

# リアルオプションと戦略

2017 March

Vol. 9 No. 1


 日本リアルオプション学会  
The Japan Association of Real Options and Strategy
<http://realopn.jp>

学会創立十周年記念号

## 特集 リアルオプションの原点とこれからのフロンティア

巻頭言

日本の選択に貢献する学会を目指して [服部 徹] ————— 1

公開  
研究会  
2016

講演要旨

セレスの成長戦略 ～変化に対応する柔軟なビジネスモデル構築を目指して～ [都木 聡] ————— 2

大会  
JAROS  
2016

リアルオプション研究の新しい方向をめざして — 幾つかの事例から考える — [森平 爽一郎] ————— 6

破壊的イノベーションと電気事業のビジネスモデル変革 [伊藤 剛] ————— 17

2つのコードと企業価値向上 — 長期の企業価値向上に必要な施策：機関投資家の視点から — [堀江 貞之] — 26

リアルオプション学会の原点とこれからのフロンティア ————— 30

[高森 寛・今井 潤一・長谷川 専・北原 康富・小林 孝明]

四則演算によるリアルオプション [後藤 允] ————— 44

曖昧性を考慮したプロジェクトへの投資タイミングの決定 [辻村 元男] ————— 51

リアルオプションの経済実験 [高嶋 隆太] ————— 57

JAROS創立十周年記念大会ルポ [佐藤 公俊] ————— 62

十周年  
記念特集

不確実性下の戦略策定のためのモデリング～シナリオ戦略法(1) ————— 66

— インフラ・デザインおよび事業投資における戦略と運用の2段階問題 — [高森 寛・呉 瑛禄・長坂 研]

FinTech ～リアルオプションに何ができるか～ [青木 克人] ————— 73

査読  
論文

経営者保証の価値に関する一考察：リアルオプションアプローチによる分析 [伊藤 晴祥] ————— 78

天候デリバティブの種苗ビジネスへの展開 [福島 巧・中岡 英隆] ————— 88

農学的知見による多変量線形回帰モデルの最適化とオプション・プライシング

学会ニュース

# 第9巻 第1号

## 目次

### 巻頭言

日本の選択に貢献する学会を目指して…………… 服部 徹 1

### 公開研究会 講演要旨

セレスの成長戦略 ～変化に対応する柔軟なビジネスモデル構築を目指して～ …… 都木 聡 2

### JAROS 2016 研究発表大会 講演要旨

〈基調講演: セミナー「リアルオプションが挑む価値創造のフロンティア」より〉

リアルオプション研究の新しい方向をめざして — 幾つかの事例から考える — …… 森平 爽一郎 6

破壊的イノベーションと電気事業のビジネスモデル変革 …… 伊藤 剛 17

2つのコードと企業価値向上 …… 堀江 貞之 26

— 長期の企業価値向上に必要な施策: 機関投資家の視点から —

〈パネルディスカッション〉

リアルオプション学会の原点とこれからのフロンティア

…………… 高森 寛・今井 潤一・長谷川 専・北原 康富・小林 孝明 30

〈チュートリアル〉

四則演算によるリアルオプション …… 後藤 允 44

曖昧性を考慮したプロジェクトへの投資タイミングの決定 …… 辻村 元男 51

リアルオプションの経済実験 …… 高嶋 隆太 57

〈大会ルポ〉

JAROS創立十周年記念大会ルポ …… 佐藤 公俊 62

### 学会創立十周年記念 特集「リアルオプションの原点とこれからのフロンティア」

不確実性下の戦略策定のためのモデリング～シナリオ戦略法(1)

— インフラ・デザインおよび事業投資における戦略と運用の2段階問題 —

…………… 高森 寛・呉 瑛祿・長坂 研 66

FinTech ～リアルオプションに何ができるか～ …… 青木 克人 73

### 査読論文

経営者保証の価値に関する一考察: リアルオプションアプローチによる分析 …… 伊藤 晴祥 78

天候デリバティブの種苗ビジネスへの展開 …… 福島 巧・中岡 英隆 88  
農学的知見による多変量線形回帰モデルの最適化とオプション・プライシング

〈学会ニュース〉

J-Stage: 電子ジャーナル掲載予告 …… 16, 25, 50, 77, 104

論文誌「リアルオプション研究」原稿募集のご案内 …… 25, 65, 87

JAROS 2017 研究発表大会へのご案内 …… 29, 50, 65, 101

Call for Paper: International Journal of Real Options and Strategy …… 29, 101

会員の近著紹介 …… 56

学会だより …… 102

2016年度公開研究会記録 …… 103

法人会員リスト …… 104

編集後記 …… (105)

学会創立十周年記念号 巻頭言

## 日本の選択に貢献する学会を目指して

服部 徹

(日本リアルオプション学会会長 電力中央研究所)

日本リアルオプション学会は、会員の皆様や多くの関係者に支えられ、設立10周年を無事に迎えることができた。学会の設立とその後の発展のためにご尽力いただいた皆さまに心から御礼申し上げたい。

振り返ると、最初の10年間は、いわば学会の草創期で、失敗を恐れず、手探りで様々なことにチャレンジしてきた。その結果、学会としての活動を継続する上で必要な基盤はある程度整ってきたのではないかと考えている。もっとも、すべてが順調というわけではなく、見直しが必要な取り組みもある。いずれにせよ、これからは学会の存在意義を確かなものとしていくことが重要となるであろう。とりあえず、やってみる、というだけでなく、学問の発展と現実的な問題の解決への貢献によって、本学会の存在感を高めていかなければならないということである。それは必ずしも学会の会員数を増やし続けて規模を大きくすることだけを意味するのではなく、むしろ規模は小さくてもキラリと光る存在感を出せば良いのである。次の10年、そしてさらにその先の10年に向けて、今は色々なことをリセットして、学会を「再起動(reboot)」する良いタイミングかもしれない。学会が直面する課題を解決していくためには、これからも会員の皆様のご協力が必要である。重要なタイミングで、学会として最善のオプションを行使できるよう、常日頃、会員の皆様のご意見に積極的に耳を傾けていきたいと考えている。

さて、学会設立10年を迎えた2016年度を振り返ると、イギリスのEU離脱や米国でのトランプ大統領の誕生などの出来事もあり、「国」のあり方が問われる一年だったように思う。少し前までは、グローバル化が進んで、国あるいは国家というものの存在が薄らいでいくような感覚があったことからすると驚かざるを得ない一年であった。そんなことを思いながら、この巻頭言を準備していたところ、本学会の正式名称が、単なる「リアルオプション学会」ではなく、「日本リアルオプション学会」であることにあらためて気がついた。リアルオプションの研究は世界中で行われていて、その中で日本を拠点とするリアルオプションの学会として「日本リアルオプション学

会」となったのであろう。もちろん、本学会は日本人以外でも会員になれる世界に開かれた学会であるし、英文誌の発行にも取り組む国際的な学会である。学会名に「日本」がつくからこそ、常に世界を意識した学会であるべきだ。しかし、本学会が日本を拠点とし、日本と特別なつながりがある以上、まずは世界のうちの日本に貢献できる学会として存在しなければならない。

その日本がこれから解決していかなければならない課題は実に多い。政治や外交、経済、金融、財政、科学技術、エネルギー、環境、インフラ、人口、教育、文化など、様々な分野で日本の将来は大きなリスクに晒されている。個別の問題についてここで具体的に述べる余裕はないが、放置しておけば深刻な影響をもたらす可能性のある問題が山積している。国として、日本はこれから様々な難しい選択をしていかなければならないが、現在と将来において、どのような選択肢があり、どのタイミングでどのような意思決定をしていくべきなのか、ということ进行を明らかにしていく上で、リアルオプションの考え方が非常に有益であることは間違いない。そうであるならば、本学会は、リアルオプションの研究を通じて、様々な分野における日本の選択のために貢献できる学会でありたい、という志を持って良いのではないかなと思うのである。

もちろん、日本の選択というのは、日本の企業や団体・組織、また、日本人あるいは日本に住む一人一人が、個別に抱えている現実的な問題を前に、どのような意思決定をするのか、ということの積み重ねにもかかっている。そういう個々の様々な意思決定の問題に関する研究の蓄積の先に、日本の問題の解決があり、そして日本から、世界の問題の解決のために発信できるリアルオプションの研究成果が生まれると信じたい。

この10周年を記念する学会機関誌の特集号が、会員の皆様にとって、学会での新たな活動のヒントとなり、そして、これからの日本の選択にどのように貢献できるかを考えるきっかけとなれば幸いである。

〈公開研究会 2016年12月1日：講演要旨 於：野村総合研究所 会議室〉

## セレスの成長戦略 ～変化に対応する柔軟なビジネスモデル構築を目指して～

都木 聡

(株式会社セレス 代表取締役社長)

### 1. はじめに

携帯端末契約数におけるスマートフォンの比率は現在56%を超え、2019年には70%を超えると予測されており(MM総研調べ。)、スマートフォン広告市場は2015年から2020年の5年間で2倍に拡大すると予測されている(シード・プランニング調べ。)。当社は、このような成長市場の中で、成功報酬型のスマートフォンメディア事業を提供し、今や累計1000万人を超えるユーザーが利用する国内最大級のポイントサイト運営企業にまで成長した。

更なる事業拡大を図っていく中で、当社は、スマートフォンなどのインターネット上(オンライン)から実店舗(オフライン)への送客手法であり、今後も継続的に市場規模拡大が予測されるO2O(Online to Offline)市場に着目し、事業を展開している。

本稿では、高い成長を実現してきた当社の事業内容と、スマートフォン向け広告媒体として一貫してスマートフォンメディアを提供することで蓄積してきた、スマートフォンメディア事業の運営ノウハウ、約300万人の会員資産という当社の強みを活かした今後の成長戦略について、具体的な新規事業を交えて論ずる。

### 2. 会社概要

当社は2005年に設立され、2017年で13期目になる。2014年10月には東証マザーズに上場し、その約2年後となる2016年12月に東証第一部に上場した。従業員数は92名であり、主たる事業はスマートフォンを用いたメディア事業である。

経営理念は「インターネットマーケティングを通じて豊かな世界を実現する」であり、社会インフラとなったインターネットを通じて、様々なマーケティングサービスを提供することにより、豊かな社会生活の実現をはかろうとしている。

社名のセレス(CERES)とは、ギリシャ神話の「大

地の女神」「五穀豊穡の神」を意味する。設立当初はフィーチャーフォン向けに、ポイントサイト「モッピー」を提供していたが、2011年からスマートフォン向けにシフトした。

近年では、ポイントメディア事業を活かしたO2O事業の展開に向けてM&Aを含めた積極的な取り組みを行っている。

### 3. 事業モデル

当社の主たる事業は、成功報酬型のスマートフォンメディア事業で、ポイントメディア事業とHRメディア事業を手掛けている。

ポイントメディア事業では、ポイントサイトである「モッピー」「モバトク」「お財布.com」を運営している。ポイントサイトに登録している約300万人の会員は、ポイントサイト内に掲載されている広告の閲覧、スマホアプリのダウンロード、ショッピング、アンケートなどのアクションに応じてポイントを貯めることができる。ポイントサイト内で会員が広告主の広告に何らかのアクションをすると、当社は広告主から掲載料をもらえる仕組みになっている。つまり広告主からすると、顧客獲得単価をコントロールできる成功報酬型の広告サービスである。

比較されるポイントサービスとしてはT-Pointなどがあるが、貯めたT-Pointは現金化することは出来ない。それに対して当社のポイントは現金化が可能である。金融関連では、証券オンライン口座の開設促進や、クレジットカードの発券促進などで、当社のポイントサービスが活用されている。獲得したポイントは、銀行口座への振込みを通じて現金に交換できる他、LINEポイントやSuicaポイント等の電子マネー、GooglePlayギフトカードやAmazonギフト券等のギフト券、ビットコイン等にも交換ができる。このことが使い勝手のよさとしてユーザーに評価されている。商流としては広告代理店からの受注が主になるが、広告主から直接受注することもある。

HR メディア事業では、成果報酬型のアルバイト求人サイト「モッピージョブ」を運営している。広告主は無料でアルバイト求人広告を掲載可能で、求職者が採用された時点で広告料が発生する。一方、ユーザー（求職者）は 10 万件を超える求人広告の中から、無料でアルバイト求人に応募できる上、採用された

際には現金や電子マネーに交換ができる“お祝いポイント”をもらえる。

ビジネスモデルはポイントメディア事業と同様で、わかりやすく表現すると、ポイントサイトにおける広告主を、求人広告主に置き換えたビジネスといえる。

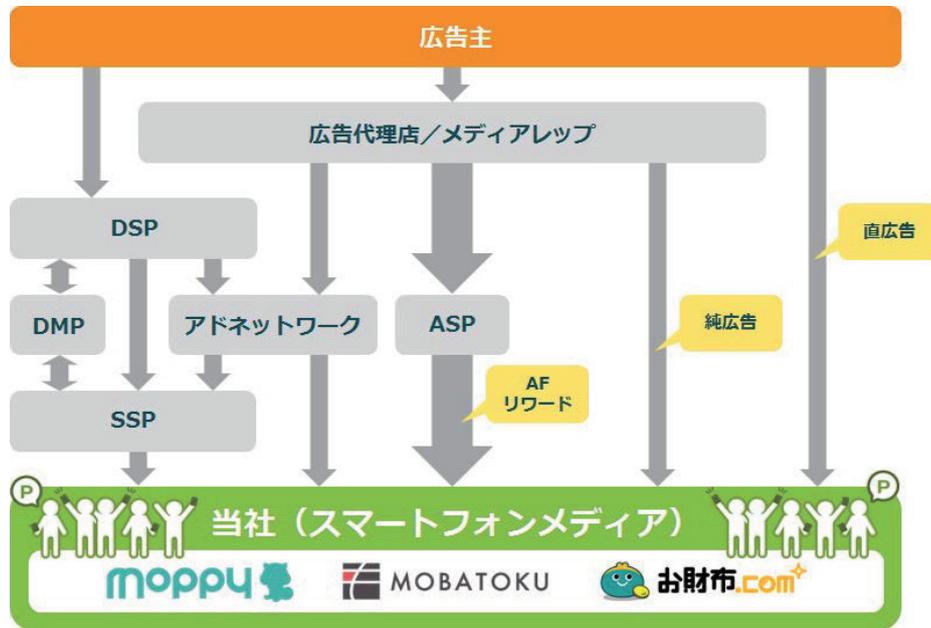


図1 セレス社のビジネス 出所：講演資料より

#### 4. 創業の経緯

2004年に、NTTドコモが世界初となるお財布携帯を始めた。具体的にはFelica対応の携帯電話を発表した。ちょうどSuicaが発売されたのと同じタイミングであった。

このような状況を見て、「モバイル端末を通じて価値を創造することが出来るのではないかと考えた。携帯電話は、ネットにつながっており、同時にFelicaにもつながるので、携帯電話を用いれば、ネット経由で獲得したポイントを、実際の購買に（Felicaを用いて）使えるようになる、と思い至った。そこで2005年にモッピーのフィーチャーフォン版サービスを開始した。因みに「モッピー」という名称は、「モバイル・ポイント」が由来である。

モッピーは、携帯広告の拡大と共に順調に推移し、売上高は、2005年度の6,400万円から、6年後の2011年度には7億1,800万円へと、11倍以上に拡大した。それに伴い、利益も始まった。しかし翌2012年は売上高が2割減少し、営業利益も赤字に転落した。原因の1つは2011年に東日本大震災が起きて、企業の広告出稿に対する自粛が発生したこと。しかしそれ以

上に、スマートフォンが本格普及したことが大きい。

スマートフォンの国内契約台数は、2009年3月時点で80万台程度であったが、3年後の2012年3月時点では2,550万台へと、30倍以上の伸びを見せていた（MM総研調べ）。そのため当社もスマートフォン向けサービスへと方向転換し、2011年10月にはモッピーのスマートフォン版サービスを開始した。

スマートフォンにはフィーチャーフォンとは異なる性質があった。どちらも課金系広告主が存在することは共通であるが、スマートフォンは、課金系広告主以外にも、アプリ広告主（アプリのダウンロード）、金融系広告主（クレジットカード、証券、FX等）、コマース系広告主（楽天、ヤフーコマース、健康食品等）など複数の広告主が台頭していた。つまりスマートフォンの普及により、広告市場が拡大した。

2013年12月には、他社ポイントサイトである「モバトク通帳」事業を譲り受けた。このM&Aも奏功して会員数は順調に拡大、2014年9月には160万人を突破した。結果、2014年度の売上高は2012年度比4倍増の24億2,000万円、営業利益も2012年度の400万円の赤字から3億2,900万円の黒字へと劇的に拡大した。



図 2 スマホ上でのビジネスにおける主な広告主、出所：講演記録より

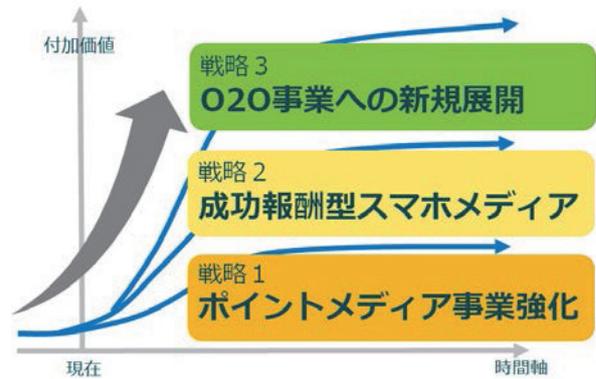


図 3 セレス社の成長戦略、出所：講演資料より

2014年10月には東証マザーズに上場。翌2015年4月には他社ポイントサイト「お財布.com」事業を譲り受けた。

2016年12月に東証マザーズから東証一部に市場変更を行っている。

### 5. 成長戦略

成長戦略として、三つの戦略を実行する。一つ目は主力事業であるポイントメディア事業の強化。二つ目は、ポイントメディア事業に次ぐ収益の柱となる成功報酬型スマートフォンメディアの新規立ち上げ。三つ目はポイントメディア事業を活かしたO2O事業への新規展開である。

O2Oとは、Online to Offlineの略であり、ネット上(オンライン)とネット外の実地(オフライン)が融合し相互に影響を及ぼす仕組みや状況のことである。具体的には、GPSやBeacon等を利用した集客支援、ポイント決済やスマートフォン決済、ビットコイン

などを使った仮想通貨分野でのサービス展開を実施していく。集客支援では、例えばスマートフォンを持ったユーザーが店舗近くに来たら、Push通知を行い、クーポン等で来店を誘導することも出来る。そして実際に来店したらスマートフォンアプリを経由してポイントを付与する、といったサービスも技術的には展開可能。

O2O戦略の一環として、2016年6月には、オムニチャンネル大手「ゆめみ」の発行済み株式の31%を取得し、持分法適用関連会社化した。同社はマクドナルドのスマートフォンアプリの開発・運用を手掛けるなど、実績が豊富な企業である。同社と共に集客支援サービスを開発予定である。

ポイント決済では、VISAと提携して当社独自のブランド付プリペイドカードを発行した。当社ポイン



図 4 収益ドライバーとしてのMoppy, お財布.com, MOBATOKU, 出所：講演資料より

トサイトの会員は、貯めたポイントを本プリペイドカードにチャージすることで、全国の VISA 加盟店でポイントを利用することができる。更には、お買い物利用額の 0.5% がポイントとして還元される。

### トークン・エコノミー

トークン (Token) とは、しるしや代用貨幣、商品引換券などと訳される。古代においては貝殻が貨幣として用いられていた。それが金 (Gold) へと代わり、更に紙幣となった。1960 年代から電子化が進み、現在では電子マネーの普及が進んでいる。

現在の法定通貨は、銀行に支払う手数料が高いことや、銀行口座保有者数よりもモバイル所有者数の方が多いため、コスト面、普及面で後れを取っている。しかも現行制度は、ヒューマンエラーの問題からも逃れられない。それに対してビットコインを活用すれば、これらの問題を解決し得る。ビットコインは 5-6 年前から出て来たものであり、ブロックチェーンをベースにした技術である。

ブロックチェーンとは、ピアツーピア・ネットワーク上のコンピュータを使って権利移転取引を記録・認証する仕組み。ブロックチェーンの利活用の可能性を探るべく、多くの金融機関を始めとした企業がブロックチェーンの実証実験や研究を行っている。また、ナスダックでは未公開株式市場をブロックチェーンで構築するなど、実用事例も現れている。

ビットコインは、そのブロックチェーン技術を活用したもっとも成功している仮想通貨であり、その時価総額は 1 兆円を超える。

ビットコインの利用例として、EC サイト・実店舗での決済、公共料金の支払い、マイクロペイメント、国際送金などが挙げられる。ビットコインを用いれば国境を越えてリアルタイムでお金の送受信・ローン・投資なども利用可能である。

例えば 10 万円を海外に送金する時、銀行の海外送金サービスを使うと、手数料が 3,750~5,500 円、相手に届くまでに 1~2 週間かかる。それに対してビットコインを使うと、手数料は 13 円、相手に届くまでに 10 分で済む。ビットコインはトークン・エコノミーの最新形であり、決済、送金を始め、世界にインパクトを与えるイノベーションと言える。

当社はビットコインの可能性をいち早く認識しており、昨年からは 6 社と相次いで資本・事業提携を結んだ。具体的には、2015 年 5 月に bitFlyer、8 月に coincheck、9 月に orb、12 月に bitbank、2016 年 6 月に合同会社ジャノム、7 月に breadwallet と提携した。



図5 提携と M&A の系譜、出所：講演資料より

coincheck は国内におけるビットコイン関連サービスを手掛ける企業であり、店舗決済においては国内市場を独占している。また、ビットコインだけでなく、イーサリアムを始め他にも多くの仮想通貨を取引可能である。

orb は、ブロックチェーンを使って仮想通貨を作るミドルウェアを開発した。山陰合同銀行と、分散型台帳技術を元に作成したオリジナルの電子マネーを、同行の本店内の社員食堂と売店で利用できるようにする実証実験を開始している。

bitbank はビットコイン取引所を運営しているが、最大で現物の 20 倍の先物取引が可能、また仮想通貨最大の情報サイト「BTCN」(ビットコインニュース)を運営している。

米国のベンチャー企業である breadwallet は、世界で最もセキュアなビットコインウォレットサービスを提供している。

一連の取り組みに加え、2016 年 11 月には、提携先である合同会社ジャノムと共同開発し CoinTip をリリースした。これは相手のツイッターアカウントさえ知っていれば、少額のビットコインを投げ銭として贈呈できるサービスである。利用例としては、応援しているアイドルへの支援、困っている人への援助として簡単に寄付をすることができる。仮想通貨関連では、取引所サービスは台頭しているものの、それ以外のサービスはほとんどなく、仮想通貨の便益を活用し切れているとは言えない状況にある。当社では、仮想通貨の特長を活かした新規サービスを今後も展開していく。

短期・中期的にはポイントメディア事業、成功報酬型のスマートフォンメディア事業で収益基盤を拡大し、長期的には O2O 事業として、リアルマーケティング、トークン・エコノミーを創造することで、成長を加速していきたい。

〈JAROS2016 研究発表大会 基調講演：セミナー「リアルオプションが挑む価値創造のフロンティア」より〉

## リアルオプション研究の新しい方向をめざして — 幾つかの事例から考える —

森平 爽一郎

(早稲田大学大学院 ファイナンス研究科)

### はじめに

リアルオプション分析は、プロジェクトの投資決定にあたり、ファイナンス理論の枠組みのなかで発展してきたオプション価格決定モデルを適用することにより、その柔軟性の価値具体的に推定する方法を明らかにしたことにより学会のみならず、実際の世界で大きな注目をあびた。とりわけ、プロジェクトのボラティリティが、そうした「柔軟性」の価値にプラスの影響を与えることは、これまでにない視点を提供したことになった。

しかし、金融資産の評価と実物資産の評価には異なる側面がある。金融資産の評価に当たっては、Black and Scholes(1973)や Cox, Ross and Rubinstein(1977) のような、負の値を取り得ない金融資産を対象にし、経営者や投資家のリスク選好や期待とは独立な「リスク中立評価」が可能である。しかし、リアルオプション研究が対象にする投資プロジェクトの評価では、まさに負になりえるプロジェクトからのキャッシュフローや利益、投資家や経営者の期待やリスク回避度がプロジェクト価値にあたる影響を考慮することなく実際の世界での投資の決定は不可能である。

また、リアルオプション研究の一層の発展のためには、その対象を投資決定にとどまらず、世の中で生じているさまざまな「実際 (Real)」な事柄に広げ、投資決定におけるのと同様な大きな貢献が可能であることを示す必要がある。

この論文では、われわれの身近にある幾つかの事例を通じて、こうした点を考慮しつつ、新しいリアルオプション研究が可能であることを示すことにしたい。

### 1. ブラック=ショールズモデルとリアルオプション研究

#### 1.1 世界で最初のブラック=ショールズモデルを用いたリアルオプション研究は？

世界で最初の無裁定条件、つまり「楽しんで金がもうからない」という自明の論理のもとでのオプション価格決定理論は、いうまでもなく、Black and Scholes(1973) によって初めて“The Pricing of Options and Corporate Liabilities”と題する論文において明らかにされた。この論文は経済学において歴史ある学術雑

誌 *Journal of Political Economy* に投稿された。この論文は当初“The Pricing of Options”と題する論文名で投稿されたそうである。結果は採択拒否であった。その理由は、この論文は応用数学の論文であり、経済学の論文ではないということであった。オプションという「投機市場」で決定される資産価格が、当時多くの経済学者にとって身近でなかった伊藤の補題 (*Itô's Lemma*) と二階の偏微分方程式を用いて導出されたこともその理由かもしれない。Black と Scholes の2人はそうしたコメントに対して、この論文で展開された価格決定方法が、経済学においても重要な役割を果たすことを示す必要があった。そこで当初の論文に付け加えられる事になったのが、Corporate Liabilities の価値の決定という論文の後半を占める文章であった。したがって、この論文を翻訳するならば、『オプションと企業負債の価値評価』とすべきであろう。

#### 1.2 株式と債券はリアルオプションである。

Black and Scholes(1973)論文の後半部分は、前半で示されたモデルが企業の貸借対照表の右側、つまり、負債と株式の価値決定においていかに役立ちうるかを、数式を用いずに言葉で示している。その基本的な考え方を簡単な数式を用いた説明すると次の通りになる。

**コールオプションとしての株式：** 株主は企業から株式を購入することで企業に資金を提供している。しかし、株券は単なる紙切れ(現在では電子情報)であり、その価値がプラスの値をとるのは、企業のバランスシートの左側の将来の企業資産価値  $A_T$  が右側の将来の負債価値  $D_T$  以上であるとき、言い換えるならば債務超過ではないときに限る。債務超過状態になれば、株主の責任は有限責任制度のもとでは、出資分に限られることから、株価はマイナスでなくゼロになる。つまり株価の下限はゼロである。このことを数式で表すと将来  $T$  期の株式時価総額  $E_T$  は

$$\tilde{E}_T = \text{Max}[\tilde{A}_T - D_T, 0] \quad (1)$$

と表される。この式は、原資産価値を企業資産とし、

行使価格を負債の満期額面とするコールオプションの満期  $T$  時点の損益(ペイオフ)を示している。つまり、企業のバランスシートの右側にある株式の現時点の価値は、式(1)の期待現在価値として求めることができることを示している。

企業のバランスシートの左側の資産とは、土地、工場設備などの有形の固定資産、のれんや特許権といった無形固定資産、在庫など短期の資産などの実物資産 (Real Assets) からなるわけであるから、Black と Scholes はまさに Black and Scholes モデルの初めての応用としてリアルオプションを議論したことになる。

**プットオプションとしての負債<sup>1</sup>：**負債価値は、企業資産を原資産として、負債額面を行使価格とするプットオプションとして表現できる。言い換えるならば、債券への投資家は、企業資産を原資産とするプットオプションを株主に売っているのである。株主はこのプットオプションを株主から買っているとみなすことができる。信用リスクのない債券、例えば国債であれば、満期になったときの額面の支払いは確実であるが、信用リスクのある債券は額面の支払いは保証されていない。言い換えれば、株主は、有限責任制度のもとでは、負債額面以下になった企業資産を負債保有者に押し付ける (Put する) ことにより、出資分に損失を限定する。

従って、社債の投資家は、信用リスクに対する保険としてのプットオプションを売ったことからのオプションプレミアムを信用リスクプレミアムとしてリスクフリーレートに上乗せする。

以上のことを数式で書くと、将来時点  $t = T$  における割引社債の価値  $B_T$  は、車載額面  $D_T$  と不確実な資産価値  $A_T$  のいずれか小さいほうである。それは次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \tilde{B}_T &= \text{Max}[\tilde{A}_T, D_T] \\ &= D_T + \text{Max}[\tilde{A}_T - D_T, 0] \\ &= D_T - \text{Min}[D_T - \tilde{A}_T, 0] \end{aligned} \quad (2)$$

最後の式は、割引債の満期の損益は、信用リスクの無い満期  $T$  に確実に  $D_T$  円を支払う割引国債の買いポジションと行使価格を割引債の額面として、原資産を企業資産とするプットオプションの売り (マイナス符号がついているので) ポジションからなるポートフォリオからの損益と考えることができることを示している。

### 1.3 応用例：預金保険料率とデフォルト確率の推定

ブラックとショールズによるこうした BS モデルの応用は、単なる可能性をめぐる議論にとどまることなく、次に示すようなさまざまな実証研究や政策手段を提供している。

#### 1.3.1 預金保険料率

Merton(1974)は、Black and Scholes(1973)が言葉によって説明したこうした事実をより精緻な議論と数式展開によって明らかにした。また、Merton(1977,1978)は、同様な考え方を銀行に対して適用し、預金者にとっての預金の保険の価値がどのようにして決定されるかをその理論的な枠組みを提唱した。つまり銀行の抱えている信用リスクの度合いに応じて預金保険料率を決定すべきということの理論的な妥当性を明らかにした功績は大きい。こうしたモデルにもとづく「あるべき」預金保険料率の計算と実際の預金保険料の支払いとを比較した実証論文は、その後数多く公開されている<sup>2</sup>。

#### 1.3.2 東日本大震災は株式市場にどのような影響を与えたのか？

預金保険料率の決定と同様、Black and Scholes(1973)の後半で展開した議論は、また上場企業のデフォルト確率推定を株価から推定するための基礎を提供している。

過去 10 年間における大きな出来事の幾つかに、リーマンショックと東日本大震災とそれに続く福島第 1 原子力発電所事故をあげることができる。前者は経済大災害であり、後者は自然大災害とそれによって引き起こされた人災といつて良いだろう。この二つが資本市場にどのような影響を与えたかを考えてみよう。

図 1 は 2001 年から 2016 年まで、東日本大震災を挟んで、長期の日経平均の日次株価の推移を示している。これをみると、東日本大震災の長期的に見たときそれほど大きな影響はなかったことがわかる。その前後の 2 年程度をみても、東日本大震災がいつ起きたか、横軸の下に示した日付をよく確認しない限り識別できない。これに対し、リーマンショックが起きた時期はすぐわかる。日経平均は 2006 年 6 月下旬に 1 万 4000 円台のピークをつけた後、10 月の終わりにはその半分になり、その後 6 年以上も横ばいの状態であった。株価は経済を映す鏡であるから、このことは Noy(2009) や Cavallo 他(2013)の主張、つまり経済大災害くらべ自然災害の影響は大きくないと判断してもう良いのかもしれない。

1 以下では、議論を簡単にするために、企業(債権者)は満期が  $T$  の割引債を発行していると考えられる。

2 例えば、Marcus and Shaked(1984)、Ronn and Verma(1986)、池尾(1989)、小田(1998)などを参照のこと



図1 リーマンショックと東日本大震災の日経平均への影響— 2000年1月4日から2015年8月31日—

**株価でなくて、信用リスクを見てみよう：** しかし、問題を株価の水準でみるのではなく、信用リスク、それも株価から算出された信用リスクの指標から考えてみると問題はそう簡単でないことがわかる。図2は、これまでに示した枠組みから計算された、東京証券取引所に上場されている企業の「1年後の債務超過確率」の単純平均を図1と同じ期間にわたって表している<sup>3</sup>。

図2から二つの点を読み取ることができる。第1に、東日本大震災が起きたときの上場企業の債務超過確率は、リーマンショック時よりも大きいことである。これは、日経平均株価の水準だけ見ていたときには、東日本大震災は大した影響がないと判断したのに比べると大きな違いである。

第2は、2つのイベントの影響の「長さ」に関する違いである。リーマンショックのほうが大震災と比較してその後の影響が大きいことがわかる。つまり、大震災という自然災害リスクは、人間が引き起こした経

済大災害に勝る影響をあたえるものの、その後の影響は経済大災害のほうが長引くことがわかる。

**大震災の影響を企業規模別に考えてみる：** 図2は実は三つの規模の異なる上場企業の債務超過確率を重ねて描いている。白黒の図では見づらいので、それぞれを比較可能な形で示したものが図3である。図3の左上の図が東証の全上場企業の債務超過確率を示し、図3の右上の図が1部上場企業の、下の図が日経225に採用された企業の債務超過確率を示している。これらの図から、企業規模が大きくなるほど、東日本大震災より経済大災害であるリーマンショックの影響が大きくなること、言い換えれば、企業規模が小さくなるほど、経済大災害よりも自然災害の影響が大きくなることがわかる。例えば日経225を構成する大企業では、リーマンショック時の債務超過確率は、東日本大震災時の債務超過確率の倍以上になっている。

3 上場企業の株価とその負債額から1年後に企業が債務超過（資産価値が負債価値をしたまわる）確率を計算できる。計算の背後にある理論と債務超過確率推定の実際につ

いては、森平(2009,2011)に詳しくのべられている。また森平(2016c)では、投資家の期待やリスク回避度が企業の債務超過確率に及ぼす影響を議論している。

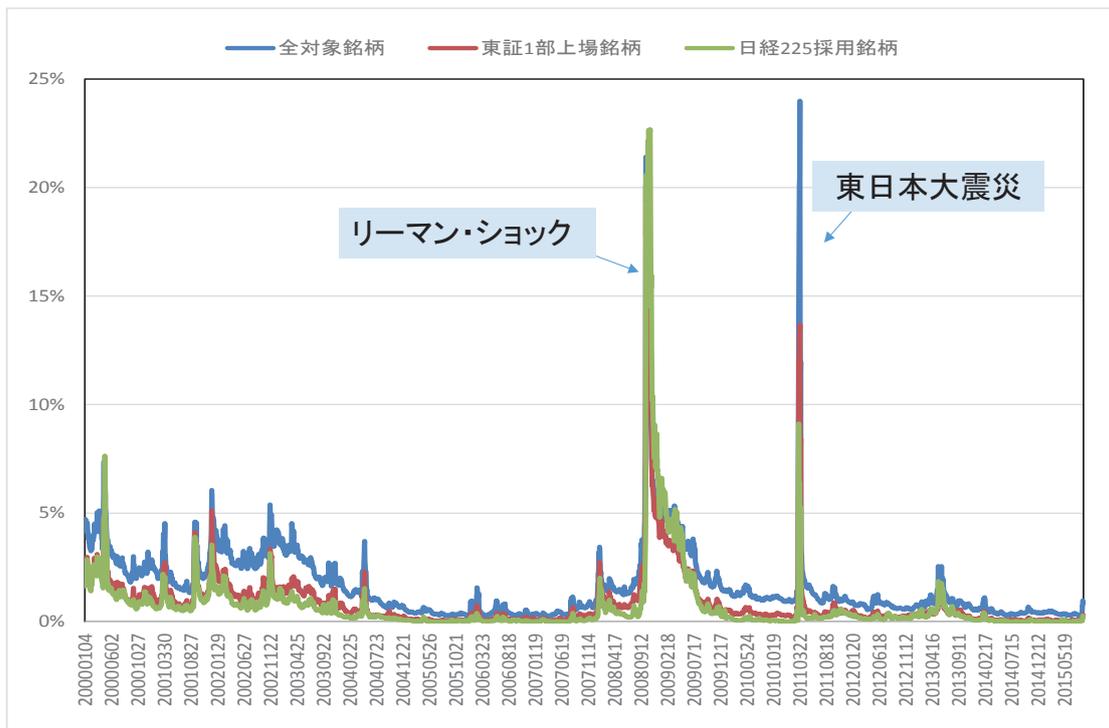


図2 上場企業のデフォルト（債務超過）確率の推移  
— 2000年1月4日から2015年8月31日—

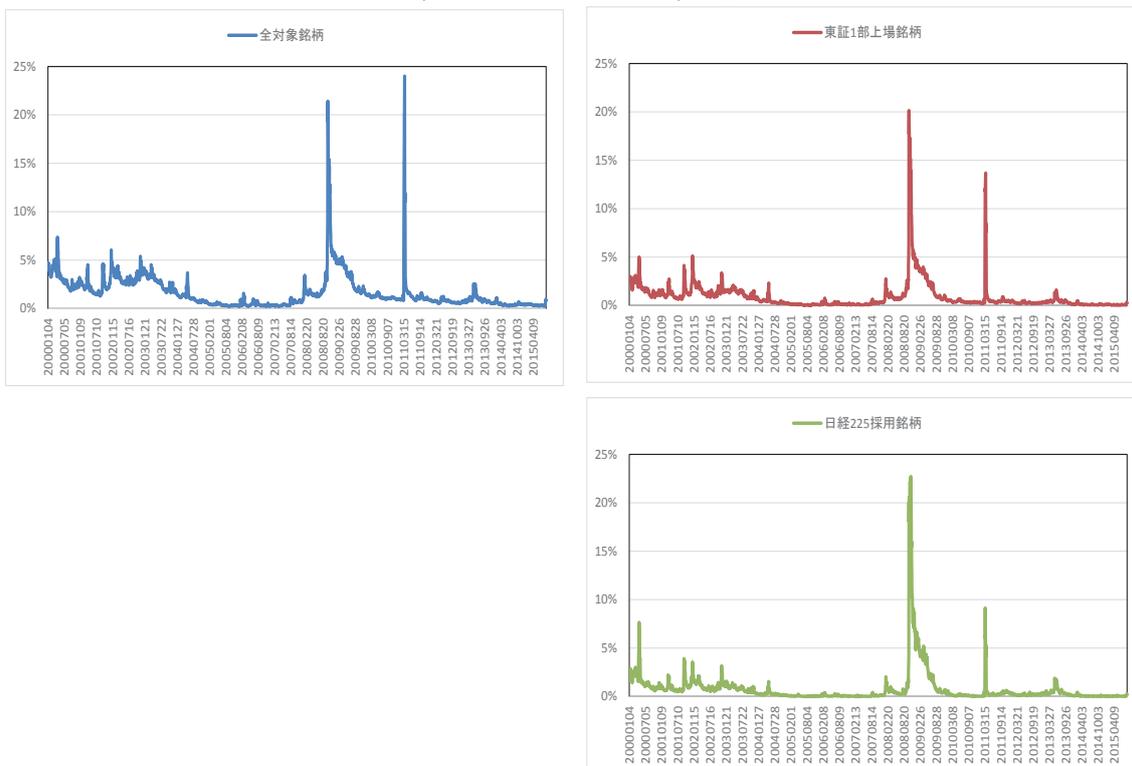


図3 企業規模別(左上：東証全銘柄、右上：東証1部上場銘柄、右下：日経225採用銘柄)の債務超過確率。— 2000年1月4日から2015年8月31日—

## 2. リアルオプションとしてのコインと通貨：その不思議な世界

われわれは日常通貨（通用貨幣）を用いて物やサービスを買ったり、売ったりしている。通貨には紙でできた紙幣と金属で作られたコイン（硬貨）がある。紙幣の「紙」そのものに（骨董としての価値を除いて）価値はない。これに対し、金属でできたコインには交換手段としての貨幣価値に加え、そこに含まれる金属が固有の価値を持っている。

### 2.1 コールオプションとしてのコイン

このことが硬貨（コイン）をオプションと考えて見ても良いことを示している。言い換えるならば、われわれは常に日常オプションを保有しており、ある状況が出現すれば、財・サービスの交換手段としてのコインを利用するのでなく、金属オプション（Metal Option）としてのコインに付随する権利を行使する。具体的な事例を考えてみよう。

表面に「鳳凰（ほうおう）」、「稲穂」が刻印された100円銀貨はいまでも依然として法定通貨である。つまり100円銀貨によって決済を行うことが保証されている。しかるに、今日われわれがこれら100円銀貨を日常目にする機会はほとんどない。なぜだろうか？ それは100円銀貨がオプションであるとわかってきた人たちが過去のある時点で一斉に権利行使をしたことによって100円銀貨が市場から消滅してしまったからである。100円銀貨は4.8gの重さ（量目）があり、銀が60%、銅が30%、亜鉛が10%を含んでいる。したがって、100円銀貨には $4.8\text{g} \times 0.6 = 2.88\text{g}$ の銀が含まれている。もし2.88gの銀の価値が100円を超えていたら銀貨の保有者はどうしたら良いだろうか？

例えば、貴金属商をして有名な田中貴金属が提示した2011年12月12日の銀1gの買い取り価格は83.72円である。銀2.88gの価値は $2.88\text{g} \times 83.72\text{円} = 241.11\text{円}$ である。しかるに、241円している銀貨の表面価格、つまり100円銀貨の額面は100円である。

**裁定機会は存在した：** これは「楽しんで儲かる」絶好の機会である。いまあなたが1万円を持っていると

しよう。持っていないとしたら誰からか利子を払ってもよいから1万円を借りてくれればよい。そうして得た1万円札を持って銀行に行き100円銀貨と両替をすれば100枚の100円銀貨が無料で入手できる。これを溶解して銀を取り出して売れば、溶解費用を無視すれば、 $100\text{個} \times 241\text{円} = 24,100\text{円}$ を手に入れることができる。この投資に要するコストは1万円であるから差額、 $24,000\text{円} - 10,000\text{円} = 14,100\text{円}$ が利益になる。しかも、いかなるリスクをもかけることなくして、正味の投資コストはゼロである<sup>4</sup>。このようにして、日本全国から100円銀貨は数ヶ月で消滅したわけである。

ファイナンス理論では、こうしたことはあり得ないように資産の価格が決まるとする。いわゆる No Risk Free Arbitrage の考え方である。市場は不完全である。「楽しんで儲かる」機会は存在する。しかしそうした機会は短期間で消滅する。実際、1980年の「ハント兄弟による銀投機」による世界的な銀価格の高騰に伴い、数ヶ月で日本中から100円銀貨は数ヶ月で日本からほぼ消滅したのである<sup>5</sup>。

この点を簡単な数式で表すと次のようになる。 $S_T$  を100円銀貨に含まれる銀2.88gの価値とし、 $K$  を100円銀貨の額面、すなわち $K = 100\text{円}$ としよう。そうすると、この通貨の将来 $t = T$ 期の価値は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \tilde{V}_T &= \text{Max}[\tilde{S}_T, K] \\ &= K + \text{Max}[\tilde{S}_T - K, 0] \\ &= \underbrace{100}_{\text{通貨価値}} + \underbrace{\text{Max}[\tilde{S}_T - 100, 0]}_{\text{コール・オプション価値}} \end{aligned} \quad (3)$$

この結果は、100円銀貨の経済価値は、1) 100円銀貨の交換価値としての100円と、2) 銀2.88gを原資産とし、額面100円を行使価格とするコールオプション価値の合計とみなすべきである。

**100円銀貨の価値は無限大：** 式(3)の現在時点( $t = 0$ )の価値はいくらになるだろうか。答えは無限大である。直感的な説明は次の通りである。銀の価格の下限は

4 実際にはリスクもコストもある。溶解するのに必要なコストと次のようなリーガルリスクもある。貨幣損傷等取締法(昭和22年12月4日法律第148号)では貨幣を傷つけることについて次のように規定している。第1項 貨幣は、これを損傷し又は铸つぶしてはならない。第2項 貨幣は、これを損傷し又は铸つぶす目的で集めてはならな

い。第3項 第1項又は前項の規定に違反した者は、これを1年以下の懲役又は20万円以下の罰金に処する。

5 ハント兄弟による銀投機については Williams(1999) に詳しい説明がある。

ゼロにあるのに対し上限は、無限大の行使期間に対して、無限大になるからである<sup>6</sup>。オプション理論の言葉で表現すれば、永久アメリカン・コールオプション(Perpetual American Call option)価値は無限大であるからである。他方、100円銀貨が法定通貨であるのに市場でほとんど流通していないことは、この銀オプションが行使されてしまっていることを意味している。理論的には行使すべきでない銀オプションがなぜ行使されてしまったのか？それはリアルオプションの研究者が回答しなければいけないパズルである。

## 2.2 プットオプションとしてのコイン

式(3)はまたプットオプションからのペイオフを用いても表現できる。

$$\begin{aligned}\tilde{V}_T &= \text{Max}[K, \tilde{S}_T] \\ &= \tilde{S}_T + \text{Max}[K - \tilde{S}_T, 0] \\ &= \underbrace{\tilde{S}_T}_{\text{銀の価値}} + \underbrace{\text{Max}[100 - \tilde{S}_T, 0]}_{\text{プット・オプションのペイオフ}}\end{aligned}\quad (4)$$

このような定式化をすることの意味は2つある。第1は100円銀貨の現在時点の価値を計算することができること。第2はコインの本質に関する新しい意味付けを与えることが可能になることである。

### 2.2.1 100円銀貨のプットオプション価値の計算公式

式(4)の時点 $t=0$ における期待現在価値が、100円銀貨の市場価値となる。100円銀貨そのものも、また銀も市場で取引が活発に取引されている<sup>7</sup>。したがって、右辺第2項の期待現在価値はデリバティブの価格決定でよく用いられている「リスク中立化法によって求めることができるだろう。永久コールオプションの価値は無限大になるのに対し、永久プットオプションの価値は有限である。なぜならその上限価値は額面100円であるのに対し、下限はゼロ円であることが、式(4)の右辺第2項を注観察すればわかる。

第2項の期待現在価値 $P_0$ はMerton(1973)によれば、

を現在の原資産(銀2.88g)の価値、 $\sigma^2$ を対数正規分布する銀価格から計算された収益率のボラティリティ、 $b$ は銀を保有することのコスト、 $r$ はリスクフリーレートとすれば以下の式(5)によって計算できる。

$$P_0 = \frac{K}{1-y_2} \left( \frac{y_2 - 1}{y_2} \frac{S_0}{K} \right)^y \quad (5)$$

ここで

$$y_2 \equiv \left( \frac{1}{2} - \frac{b}{\sigma^2} \right) + \sqrt{\left( \frac{b}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \quad (6)$$

式(4)の右辺第1項(銀)の価値は無限大になり、その期待現在価値も無限大になるはずである。しかし銀の実際の現在時点の市場価値は無限大ではない。その値を式(4)の右辺第1項とし、コインの永久プットオプション価値を式(5)によって計算すれば、その合計として100円銀貨の現在時点の価値 $V_0$ を計算できる。

ただしここで注意しなければいけないのは、コールオプションとしてのコインの価値は無限大であるのに対して、プットオプションとしてのコインの価値は有限である。プットコールパリティはヨーロッパ・オプションに対してのみ正確に成立するものも、アメリカン・オプションに対しても近似的に成立することもあることが知られている。それならば、コールと考えたときには無限価値、プットとして考えたときは有限価値になるのはおかしいという指摘もあろう<sup>8</sup>。

### 2.2.2 簡単な実証例

2012年12月12日時点における銀の永久オプション価値を考慮した100円銀貨の理論価格を推定し、その結果を市場価格と比較してみよう。

**永久プットオプション価格：**銀の現物価格が対数正規分布に従うとしよう。また式(4)の右辺第二項のプットオプション価値が式(5)によって計算できるとしよう。

2012年12月12日に田中貴金属における銀1gの

100円銀貨はネット上のオークション市場、例えばYahooオークション市場で毎日活発に取引されており、その市場価格は容易に知ることができる。

<sup>8</sup> この矛盾をどう解決するか？それほど難しいことではないのでここでは詳細に明らかにしない。

<sup>6</sup> 正確に述べると、リスク中立世界において100円銀貨を保有することのコスト(Carry Cost)がリスクフリーレートより小さい場合にこうしたことが生じる。多くの家計にとって少額の100円銀貨の保有コストはゼロであり、金利はゼロとみなして良い現下の状況ではオプション価値は「理論的」には無限大になりうる。

<sup>7</sup> 銀の小売価格は貴金属商が毎日発表をしている。また、

税抜き店頭小売価格  $S_0$  は 83.27 円、1990 年から 2011 年までの年率換算の銀価格変化率のボラティリティ  $\sigma$  は 22.33 パーセントであった。100 円銀貨の保有コスト  $b$  をゼロ、リスクフリーレート  $r$  を 1 パーセントとすると、式(5)のプットオプション価値  $P_0$  は 50.08 円となる。

**100 円銀貨の価値:** したがって、100 円銀貨の 2012 年 12 月 12 日時点の価値は、式(4)の最後の式によって、リスク中立世界では、

$$\begin{aligned} V_0 &= PV^e(S_T) + P_0 \\ &= 83.27\text{円} + 50.08\text{円} = 133.35\text{円} \end{aligned} \quad (7)$$

と計算できる。

**実際の市場価格:** 100 円銀貨の取引市場は存在する。例えば、Yahoo オークション市場では常に 100 円銀貨が取引されている。2012 年 12 月 11 日における取引事例を見てみよう。80 枚の 100 円銀貨(酸化によるサビがある)80 枚の価格が、1 週間のオークションの結果、1 万 3000 円の落札価格がついた。つまり、100 円銀貨 1 枚あたりの市場価格は 162.50 円ということになる。これに対する理論価格 133.35 円は、実際の市場価格より 30 円ほど割安に評価されていることになる。市場価格と理論価格とどちらがただしいのであろうか？

### 2.2.3 コインのプットオプション価値: 何を意味するのか?

100 円銀貨を保有している人は、もしそれに含まれる銀の価値が 100 円以下であれば、銀貨を交換手段として使用する。つまり、プットオプションを行使して、100 円以下の銀の価値しか有しない銀貨をその額面 100 円で押し付けて (Put して)、100 円の価値のある財やサービスを受け取る。こうしたことが可能なのは、国が 100 円銀貨を法定通貨として認め決済手段として国民に強制しているからである。

## 2.3 消費者余剰

レアメタル(希少金属)あるいは貴金属からなるコインはそれらを原資産とし、額面を行使価格とするコールオプションであることを示した。したがって式に示されるように、コインの価値は額面価値とオプション価値の合計と考えるべきであることも明らかにした。しかし、よく考えてみると、コイン、より

広く考えると紙幣を含む通貨は、財貨の交換手段であることがオプション価値を有している。ミクロ経済学では、それを「消費者余剰 (Consumer's Surplus)」と言い表している。

消費者はなぜ物やサービスを購入するのか? それは「お買い得」であると考えているからである。100 円ショップに行って 100 円のものを買うのは、それが 100 円以上の価値をもっていると考えるから、つまり「お買い得感」を感じたからである。これをオプション理論の言葉で表現すると、消費者は 100 円ショップで売られている財(原資産)価値が 100 円通貨の額面(行使価格)より高いときにプットオプションとしての 100 円硬貨の権利を行使する。数式で表現してみよう。100 円ショップで売られている商品(原資産)の期の価値を  $G_t$ 、通過の額面(行使価格)を

$K = 100$  円とすれば、100 円紙幣やコインのコールオプション価値は、式(3)と同様に書いて、

$$\begin{aligned} \tilde{V}_T &= \text{Max}[\tilde{G}_T, K] \\ &= K + \text{Max}[\tilde{G}_T - K, 0] \\ &= \underbrace{100}_{\text{額面価値}} + \underbrace{\text{Max}[\tilde{G}_T - 100, 0]}_{\text{オプション価値}} \end{aligned} \quad (8)$$

と考えることができよう。このオプションの満期をどう考えるかが問題である。生鮮食料品などに関して言えば満期は短く、耐久消費財や土地はより長い満期を、土地や家屋といった不動産についてはより長い満期を想定することができるかもしれない。満期が消費者や投資家によって「ある程度」自由に決められることがこの消費者余剰オプションの興味深い点である。

## 3. 原資産の確率過程をもっと柔軟に考える

リアルオプションにかぎらず、多くの金融オプションが想定する原資産の確率過程は、それが連続なときは対数正規分布、離散的なときは二項分布であり、正の値をとることを保証している。しかし、金融以外のリアルな世界のもとでは、ゼロや負の値を取る確率分布、例えば正規分布や、正の「整数」のみを取るような確率過程のもとでのオプションを考えることができる。ここでは現物が負の値を取りうるような場合のオプションを、実際例を交えて考えてみる。

### 3.1 Black(1995)の「オプションとしての金利」論文

Black(1995)は金利に関する極めて興味深い論文を書いた。彼の主張は、金利はマイナスに成らない、したがって金利はコールオプションとみなせると言うものであった。この論文では数式が全くなく、論理の展開が2つの図と文章だけでなされているため、その理解が困難である。しかし日本の金利水準が長く続いてゼロ金利からマイナスの状態にある現状からみて多くの示唆をあたえている<sup>9</sup>。

**影の金利(Shadow interest rate) :** Black(1995)は貨幣を保有しても金利は得られないから、無リスク裁定利益を得ることができないという観点から、名目金利はゼロ以下、つまり負にならないと考えた。負にならない名目金利に影響を与えるものとして影の金利(Shadow interest rate)を考え、これは負になりうるものとした。Black(1995)では影の金利は公共事業(ミシシッピのデルタ地帯の埋め立て事業)のような低リスクではあるが、負になりうるプロジェクトからの収益率であるとした。この結果観察できる名目金利は、この影の金利を原「資産」として、行使価格をゼロとするコールオプションとみなすことができる。つまり、影の金利を  $s_t$ 、名目金利を  $r_t$  とすれば、それは、

$$\tilde{r}_t = \text{Max}[\tilde{s}_t - 0, 0] = \text{Max}[\tilde{s}_t, 0] \quad (9)$$

と表現することができる。

現下の日本のようにマイナス金利に対しては、名目金利の下限(行使価格)を  $K < 0$  とすることにより、式(9)を次のように書き換えることができる。

$$\tilde{r}_t = \text{Max}[\tilde{s}_t, K] = K + \text{Max}[\tilde{s}_t - K, 0] \quad (10)$$

これから、残存期間が  $T$  年の割引債の価格  $Z(0, T)$  は、適切なプライシング・カーネル(確率的割引率法)を用いて、

$$Z(t, T) = E_t^P \left[ \tilde{M}_{t+1} e^{-\int_{t+1}^T \tilde{r}_s ds} \right] \quad (11)$$

として満期  $T$  から時点ゼロに向かって Backward にこの式を解くことによって現在時点における割引債価値を求めることができよるかもしれない。

9 Gorovoi, Viatcheslav, and Vadim Linetsky(2004)はBlack(1995)のモデル化を試み、日本のゼロ金利政策にかんするその含意を議論している。

### 3.2 原「資産」が正規分布に従う場合のリアルオプション

原資産が負になるときのオプション価格は、いまから約120前にBachelier(1900)によって世界で初めてのオプション価格理論として明らかにされた<sup>10</sup>。彼の考え方は、金融資産価値が負になること、オプション価値が原資産価値を上回ることがあることなど無裁定条件を満たさないことを理由に、その後その貢献は無視されてきた。これに対し、原資産が負になるときであっても、リスク中立評価、あるいはBlack and Scholes(1973)の無裁定条件から導かれる2階の偏微分方程式をオプション満期のペイオフを境界条件として解くことにより、そうした2つの問題点を解決しようとする論文が書かれた、しかしいずれの方法であっても根本的な回答を得ることができなかった。

これに対し森平(2016a)は投資家の期待効用を最大にするようなオプション価格を導くことによりこうした不可思議性に対する一つの回答を得た。結果として得られたオプション価格モデルは、現物評価式(CAPM)と割引債価格(無リスク金利)を加えた3本の価格式から成り立つ一般均衡価格式となる。それらは、オプションの対象になる現物を企業利益を  $X_t$  とすれば、次のように示すことができる。

#### 1. 無リスク金利(割引債価格)

$$r = -\ln \beta + \lambda \left( \mu_c - \frac{\sigma_c^2}{2} \right) - \frac{\lambda^2 \sigma_c^2}{2} \quad (12)$$

#### 2. 1期間の原資産(企業価値)

$$V_0(T) = e^{-rT} \left( (X_0 + \mu_X T) - \lambda \rho \sigma_c \sigma_X T \right) \quad (13)$$

#### 3. コールオプション価値

$$C_0 = (V_0(T) - e^{-rT} K) N(d) + e^{-rT} \sigma \sqrt{T} n(d) \quad (14)$$

であり、ここで、

$$d \equiv \frac{V_0(T) e^{rT} - K}{\sigma_X \sqrt{T}} \quad (15)$$

はオプションに投資をした時の期待キャッシュフロー(分子)とリスク(分子)との比、つまりリターンとリスク比を示している。上の式で用いられた変数名は以下の通りである。 $C_0$  = コール価格、 $K$  = 行使価格、 $T$  = 満期(残存期間)、 $r$  = リスクフリーレート、

10 パシュリエ・モデルについては森平(2016b)にその詳細が示されている。

$V_0$  = 原資産(1 期間企業)価値、 $X_0$  = キャッシュフローの現在有り高、 $\mu_x$  = 期待キャッシュフロー変化額、 $\sigma_x$  = キャッシュフロー変化額のボラティリティ、 $\mu_c$  = 期待消費変化率、 $\sigma_c$  = 消費変化率ボラティリティ、 $\lambda$  = 危険回避度、 $\sigma_{cx}$  = 消費とキャッシュフローの相関である。

式(13)から式(15)で示される方程式体型は、リアルオプション分析において金融オプション分析とはことなる興味深い含意を提供している。

**リスク中立評価において、投資家は本当にリスクに関心がないのか？**： 第1に式(14)と式(15)で示されるコールオプション価格には、投資家の期待を示す変数( $\mu_x, \mu_c$ )やリスク回避度 $\lambda$ 、消費変化率の分散 $\sigma_c$ やシステムティックリスクを表す消費と企業利益変化との共分散 $\sigma_{cx}$ などが現れていない。ブラ

ック=ショールズ式と同様、オプション価格は原資産のボラティリティ、残存期間、所与の原資産価格、リスクフリーレート、行使価格の5つの関数である。言い換えるならば、オプションの投資家があたかも (*as if*) リスク中立的に振る舞うことする「リスク中立評価式」になっている。しかしながら、投資家は期待やリスク回避度とは無関係なのであるか？ そのようなはずはない。これらの変数は式(13)で示される原資産価格式 (CAPM) と式(12)で示されるリスクフリーレートの背後に隠れているのである。式(14)のオプション式のみだけでは理解できないことが、一般均衡分析を通じて明らかになる。

とりわけ投資プロジェクトの評価をおこなうリアルオプション分析においては、そうした仮定を置くことは非現実的である。

投資家の期待効用を最大にすることから得られる一般均衡モデルを用いると、こうした点に対する明

確な回答を得ることができる。期待やリスク回避度は「隠れている」のであって「無くなった」のではないのである。

**オプション価値が原資産価値を上回ることは無裁定条件を満たしていないのか？**： 第2に、原資産価格を表す式(13)からわかるように原資産価格は負になりうる。この式の右辺第1項と第2項は正負いずれの値を取りうる。この2つがマイナスの値を取れば、当然のことであるが、企業価値はマイナスになる。将来キャッシュフローの期待価値を表す右辺第1項がプラスであっても、第2項のリスク回避度 $\lambda$ 共分散リスク、つまり利益に関するリスクプレミアムがプラスであれば、両者の差であるリスク調整後の期待キャッシュフローの現在価値はマイナスになりうる。つまり財務的困難性に陥った企業であれば、現時点の企業価値はマイナスになりうる。

これに対して、式(14)のコールオプション式は負の値を取ることは数学的にも経済的にもありえない。なぜならばそれはオプション、つまり権利の価値を示しているからである。これらのことから、オプション価値は原資産価値を上回ることがあることは、何ら不思議ではない。

**原資産のボラティリティが増加するとオプション価値は減少することがある**： 第3に、こうした一般均衡分析の枠組みのもとで現物(企業利益)が負になるような場合のオプションでは Black and Scholes(1973)と異なり、現物のボラティリティが増加するとオプション価値が減少する。

なぜこうした常識に反する事が起きるのであるか？ その理由の第1は一般均衡分析の枠組みのもとで、利益のボラティリティがオプション価値に与える影響を考えたこと、第2には式(13)からわかるように企業価値は、利益のボラティリティが大きく、さらに「消費と利益の相関がプラスのとき、マイナスになることがあるからである。

企業利益のボラティリティがオプション価値に与える影響は式(14)と式(15)の中だけでなく、式(13)の企業価値(原資産価値)における企業利益のボラティリティの変化が、オプション式の企業価値変数を通じてあたえる2つの道を考える必要があるからである。

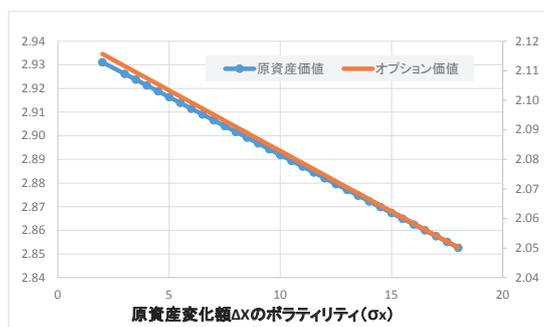


図4 キャッシュフロー・ボラティリティがオプションと資産価値に与える影響

注) 横軸は資産価値変化額  $dX$  のボラティリティ  $\sigma_X$  (2から18)、縦軸はコールオプション価値を示す。その他のパラメータ値は、現在のキャッシュフロー水準:  $X_0=2$ , 期待キャッシュフロー変化額:  $\mu_X=1$ , 期待物価変動率:  $\mu_C=0.02$ , リスク回避度:  $\lambda=1$ 、主観的割引率:  $\beta=1$ , 消費変化率ボラティリティ:  $\sigma_C=0.01$ , 残存年数:  $T=1$ , リスクフリーレートは式(12)によって  $r=0.0199$

## 要約と結論

リアルオプション分析は、投資プロジェクトの採否にあたり、伝統的な正味現在価値法では考慮することができなかった投資決定の柔軟性を、金融の世界で発展をしたオプション理論を適用することによって新しい視点を提供した。

しかし金融オプションのリアルオプション分析への適用にあたって、新たな問題を生じることになった。例えば、金融オプションの価格決定のためには Black and Scholes(1973) や Cox, Ross and Rubinstein(1979)といった評価モデルが用いられる。しかしこうしたモデルでは、原資産価値がマイナスの値を取りうることができない。そればかりでなく、リスク中立的評価を用いているため、投資家のリスク選好や期待を明示的な形で考慮することができない。投資プロジェクトからのキャッシュフローはマイナスの値を取りうるし、その期待現在価値もマイナスになりうる。投資プロの判定にあたり、経営者はもちろんのこと、投資家の期待やリスク選好を無視することはできない。そうした点を理解するためには、リスク中立的評価に代わりうる、経済的にも、数学的にも整合性のとれた新しい考え方、新しいプライシ

ングモデルが必要になろう。

本稿では、そうした点に関し、幾つかの具体的な事例を通して、新しい評価モデルと従来の視点にはとられない柔軟な思考が必要になることを示した。

## 参考文献

1. Bachelier, Louis. (1900). "Théorie de la Spéculation", *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure* 3(17): 21–86 English translation in Cootner, Paul H (1984). *The Random Character of Stock Market Prices*. M.I.T. Press, 1964, Risk Books, 2000, and in *Louis Bachelier's Theory of Speculation: The Origins of Modern Finance*. Princeton University Press, 2011
2. Beck, Stacie, and David R. Stockman. (2005). "Money as Real Options in a Cash-in-advance Economy". *Economics Letters* 87 (3): 337–45.
3. Black, Fischer, (1995) "Interest Rates as Options." *Journal of Finance* 50 (5): 1371–1376.
4. Black, Fischer, and Myron Scholes. (1973). "The Pricing of Options and Corporate Liabilities." *Journal of Political Economy* 81 (3): 637–54.
5. Bomfim, Antulio N. (2003). "Interest Rates as Options: Assessing the Markets' View of the Liquidity Trap." Vol. 3. Division of Research and Statistics and Monetary Affairs, Federal Reserve Board.
6. Cox, John C., Stephen A. Ross, and Mark Rubinstein. (1979). "Option Pricing: A Simplified Approach." *Journal of Financial Economics* 7(3): 229–63.
7. Gerber, Hans U., and Elias S.W. Shiu. (1994). "Martingale Approach to Pricing Perpetual American Options." *ASTIN Bulletin* 24(2): 195–220.
8. Gerber, Hans U., and Elias S. W. Shiu. (1996). "Martingale Approach to Pricing Perpetual American Options on Two Stocks." *Mathematical Finance* 6(3): 303–22.
9. Gerber Hans U. and Elias S.W. Shiu. (1998). "Pricing Perpetual Options for Jump Processes." *North American Actuarial Journal* 2(3): 101–7.
10. Haug, Espen Gaarder and John Stevenson. (2009). "Options Embedded in Physical Money". *Working paper*.
11. Gorovoi, Viatcheslav, and Vadim Linetsky. (2004). "Black's Model of Interest Rates as Options, Eigenfunction Expansions and Japanese Interest Rates." *Mathematical Finance* 14(1): 49–78.
12. Merton, Robert C. "Theory of Rational Option Pricing.

- (1973). ” *The Bell Journal of Economics and Management Science* 4(1): 141–83.
13. Merton, Robert C. (1974). “On the Pricing of Corporate Debt: The Risk Structure of Interest Rates.” *The Journal of Finance* 29(2): 449–70.
14. Merton, Robert C. (1977). “An Analytic Derivation of the Cost of Deposit Insurance and Loan Guarantees An Application of Modern Option Pricing Theory.” *Journal of Banking & Finance* 1(1): 3–11.
15. Merton, Robert C. (1978). “On the Cost of Deposit Insurance When There Are Surveillance Costs.” *The Journal of Business* 51 (3): 439–52.
16. Marcus, Alan J. and Israel Shaked. (1984). “The Valuation of FDIC Deposit Insurance Using Option-Pricing Estimates,” *Journal of Money, Credit and Banking*, 16(4), Part 1, 446-460.
17. Noy, Ilan. (2009). “The Macroeconomic Consequences of Disasters.” *Journal of Development Economics* 88(2): 221–31.
18. Ronn, Ehud I., and Avinash K. Verma. (1986). “Pricing Risk-Adjusted Deposit Insurance: An Option-Based Model.” *The Journal of Finance* 41 (4): 871–96.
19. Shelor, Roger M., Dwight C. Anderson, and Mark L. Cross. (1992). “Gaining from Loss: Property-Liability Insurer Stock Values in the Aftermath of the 1989 California Earthquake.” *The Journal of Risk and Insurance* 59 (3): 476–88.
20. Williams, Jeffrey C. (1995). “*Manipulation on Trial: Economic Analysis and the Hunt Silver Case.*” Cambridge, England ; NY, Cambridge University Press.1996. 『ハント兄弟の価格操作事件』, 柳沢逸司訳. 時事通信社.
21. 池尾和人 『銀行リスクと規制の経済学』, 東洋経済新報社、1990.
22. 小田 信之 「オプション価格理論に基づく適正預金保険料率の推定」、日本銀行金融研究所 WP、98-J-16.
23. 森平爽一郎(2016a) 「キャッシュフローに関するオプション価格決定モデル：理論と応用—なぜ常識に反する結果を得るのか?」、『日本ファイナンス学会予稿集』、2016年5月.
24. 森平爽一郎(2016b) 「オプション価格決定モデル：その学説史的展望(1) バシェリエ(1900)モデル」、『日本リアルオプション学会機関誌』、第7巻第3号、22–32.
25. 森平 爽一郎(2016c) 「リスク回避度と期待を反映したデフォルト確率」、『経済系』、関東学院大学経済学会、No.269,19-35.
26. 森平 爽一郎(2011) 『信用リスクの測定と管理—Excel で学ぶモデリング』. 中央経済社.
27. 森平 爽一郎(2009) 『信用リスクモデリング—測定と管理』、 朝倉書店.

**本誌「リアルオプションと戦略」は、国内外に公開される電子ジャーナルとなります**

本誌の各号は会員限定の刊行後、3か月を経過してからインターネット上の電子ジャーナルプラットフォーム「J-Stage」に登載されます。これにより本誌掲載の記事は、Google Scholar などからも検索可能となり、社会に向けて広く情報発信されます。なお、各記事には DOI (Digital Object Identifier) が登録され、本機関誌の記事は、すべて、国内外から恒久的にアクセスが保証される公開記事になります。第8巻第1号(2016年2月発行)は、2017年3月末頃に、J-Stage上に、公開される予定です。

〈JAROS2016 研究発表大会 基調講演：セミナー「リアルオプションが挑む価値創造のフロンティア」より〉

## 破壊的イノベーションと電気事業のビジネスモデル変革

伊藤 剛

(アクセンチュア 戦略コンサルティング本部 シニア・マネージャー)

### 1. はじめに

今日は、破壊的イノベーションと、電力事業のビジネスモデル変革についてお話をさせていただきます。電力システム改革によって、色々な企業が電気の小売業へ参入できるようになり、総括原価方式による料金認可制が廃止され、卸電力市場における流動性が増大するようになりました。その結果、新しいリスクが発生します。例えば、卸市場や小売市場において取引相手の倒産等により電気代を回収できないリスクであるとか、燃料価格や卸電力価格の変動により、当初期待していたリターンが得られなくなるリスクなどです。こうしたカウンターパーティリスクや価格リスクについては、電力会社をはじめ、色々な企業、機関が議論を深めてきました。ところが、最近、こうした“伝統的な”リスクとは異質の新しいリスクが登場してきており、今日は、この新しいリスク、非連続的な業界構造の変化に伴うリスクのお話させていただきます。レイトン・クリステンセン教授が提唱した「破壊的イノベーション」や「イノベーション・ジレンマ」は大変示唆に富む考察ですが、この論理は、情報通信業界のような技術革新のサイクルが短い業界に適用されるものであって、電力業界は、あのようなダイナミックな産業の構造変革とは無縁だと思っていました。それが実は、この電力業界でも、破壊的イノベーションが起これば、ドラスティックな変革が業界大で起こりうると思うに至っております。

ドイツに e-on という電力会社があります。2008 年時点、5 年連続で年率 10% 強の増益を実現し、年に 1 兆円の営業利益を稼ぐ会社でした。当時の経営陣は“イケイケ”で、「どんどん新しい投資をするぞ」という機運にありました。ところが、2008 年をピークに同社の業績は急落します。直接的なきっかけは 2008 年のリーマンショックにあったのですが、実際に同社の利益構造を破壊したのは、ドイツ国内で着実に導入が進んでいた風力発電や太陽光発電でした。2008 年時点で既に風力発電や太陽光発電の市場は著しい成長期に差し掛かっていたのですが、同社の経営者は、まさか、太陽光発電が自分たちの経営を脅かすも

のであるとは思ってもいなかったようです。結果、風力発電や太陽光発電が卸市場や小売市場の利益構造を大きく変化させ、同社は赤字に陥ります。稼ぎ頭であった発電部門が不採算化して赤字になり、結局、発電事業をスピンオフして会社を分割し、残った会社は、配電事業や小売事業にフォーカスする事態になりました。これまでのビジネスモデルが根底から覆され、新たなビジネスモデルの構築を迫られています。

同社の事例は、破壊的イノベーションによって短期間のうちに収益構造が根底から覆されてしまうリスクが電力業界にも存在することを示しています。今日は、電力業界が直面している非連続的な事業環境変化の可能性についてお話しさせていただきます。

### 2. 電気事業をとりまく環境

将来の電力業界に変化をもたらす要因には、二つのタイプの要因があります。一つは、将来の電力業界を変化させる不可避な構造変化で、これをメガトレンドと呼びましょう。もうひとつは、構造的な変化ではないものの、電力業界をゲームに例えますと、そのゲームの仕方や、流れを大きく変えてしまうほどの力を秘めた要因です。これを米国国家情報会議編 (2013) に倣ってゲームチェンジャーと呼ぶことにします。

#### 2.1 3つのメガトレンド

まず、将来の電力業界を変化させる不可避な構造変化として三つのメガトレンドをとりあげました。

**脱炭素化：** まず、脱炭素化ですが、これはトランプが大統領になられたので、温暖化を巡る議論がどのような影響を受けるようになるかわからないのですが、議論のペースは速くなったり遅くなったりするものの、脱炭素化という方向性そのものは変わらないだろうと思います。この脱炭素化が加速していきますと、当然電力業界としては基幹電源である火力発電所の位置づけが大きく変わってきます。

**人口減少：** もう一つは人口減少で、特に日本では、大きな問題になるでしょう。今日の日経新聞に、利用者の減少により JR 北海道の全路線の半分以上が維持困難

であるという記事が出ておりました。こうした“赤字路線”問題は、電力業界においても他人事ではありません。

ここに国土交通省さんが作られた資料があります。これは、日本を1平方キロメートルのメッシュに分解して、2050年にかけて人口がどのように増加、減少していくかをシミュレーションしたものです。この報告書によると、2050年において、現在人が住んでいる地域の6割以上で、人口が半分以下になります。ほとんど人が住まない地域が拡大すると、電気事業における今の送配電設備は、電気を送るための設備である送配電線の“赤字路線”の比率も増大します。今のところ、送配電設備の建設・維持に必要な費用は、広く浅く皆さんが負担しており、構造的には人口密集地の方々が、地方の電線代を負担している、とすることができます。しかし、“赤字路線”化した電線の割合が増えれば、どこかで人口密集地域の消費者が負担しきれなくなり、ユニバーサルサービスとしての送配電サービスが再考を迫られるでしょう。

## 2.2 3つのゲームチェンジャー

まず、将来の電力業界を変化させる不可避な構造変化として三つのメガトレンドをとりあげました。

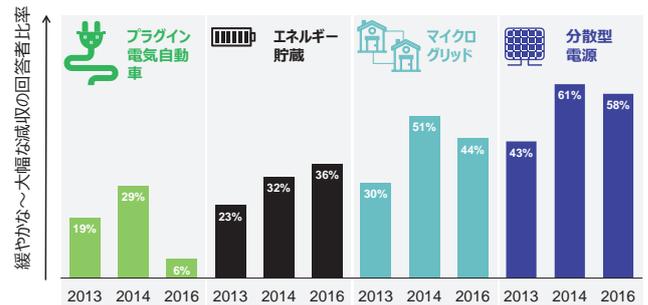
最後のメガトレンドであるデジタル化については後段で丁寧にお話しさせていただくとして、三つのゲームチェンジャーについて少しお話しさせていただきます。

**分散化**：分散型エネルギー技術の商用化に伴い、既存の電力会社は異業種からの挑戦を受けております。分散型エネルギー技術とは、太陽光発電やエコキュートなど住宅に設置するエネルギー機器だけでなく、電気自動車をはじめとする次世代自動車なども含めて考えています。最近では、エネルギー業界の外から参入してきたテスラのような企業が色々な新しい動きをみせております。テスラの場合、電気自動車を手始めに、定置用の蓄電池システムを販売するようになり、最近では太陽光発電の会社を買収して、屋根材一体型の太陽電池をつくっております。同社は、分散型エネルギー技術を最大限に活用した新しいエネルギー産業を創りだそうとしています。

アクセンチュアが海外の電力会社の経営層の皆さんにヒアリング調査をして、「2030年までにどうなりますか」という質問をした結果が、いま、ご覧いただいているグラフです (Figure1)。

Figure 1

2030年までに、以下のエネルギー機器は、貴社事業にどのような影響を与えますか。



出典：アクセンチュア・デジタルグリッド・プログラム(2016年エグゼクティブ調査)

最近出現した新しいエネルギー設備や機器として、プラグイン電気自動車、エネルギー貯蔵すなわち蓄電池、マイクログリッド、分散型電源などがあります。「これらの新機器の普及が、自分の電力会社にとって、長期的な減収リスクになるか」の質問に対して、半数以上の経営者が、自分の経営にとって、マイナスのインパクトをもたらすと回答しております。これら分散エネルギー資源の脅威が差し迫った業界構造変革のひとつとしてとらえられていることがわかります。

**システム改革の改革**：次のゲームチェンジャーとして、制度設計の巧拙が挙げられます。制度設計の上手い、下手で、新しい世の中にうまく移行できるか否かが決まってきます。日本のシステム改革は、発送電分離や小売市場自由化など、電力事業に競争原理を取り込むというところで議論が終わっています。一方、日本に先行してシステム改革を断行した欧米諸国では、「過去の電力システム改革を、次のステージとして、どう改革するか」、というシステム改革の改革が議論の中心となっています。この中では、どのようにして低炭素電源への投資を促していくか、また、供給信頼性を維持するだけでなく、そこにどのようにして効率性の概念を取り込んでいくか、を維持していくのか、拡大する分散エネルギー資源と従来の中央集約的な電力システムをどのように融合、統合していくか、といった議論が繰り返されています。

**ゼロカーボンエネルギーの輸入**：ここで、もうひとつ、最後のゲームチェンジャーの話になります。

日本が排出している温暖化ガスは、海外から輸入した炭化水素、つまり石炭や原油、天然ガスのなれの果てです。これらエネルギー資源を輸入すると、炭素(C)も付いてきてしまうのです。日本国内のCO2排出量を減らすため、炭素(C)を連れてくるのを止めようというのが、ゼロカーボンエネルギーの輸入の背景にある考えです。ゼロカーボンエネルギーの輸入方法はいくつか考えられますが、例えば、低炭素電

源由来の電気を大陸から持ってくる国際連系線が代表例です。これは、技術的な実現性というよりも、政治的な実現性が論点となりそうです。

元国際エネルギー機関の事務局長の田中伸男氏は、大陸と日本を結ぶ電力網に関して比較的ポジティブな発言をされていました。今年の11月2日の日経新聞で、このようなことを言われています：

「アジアの地政学はエネルギーをめぐる構図を一変させる可能性がある。ロシアのプーチン大統領は、最近、中国、モンゴル、ロシア、韓国、日本を電力線で結んでロシアの電力を輸出する構想への支持を表明した。・・・信頼を失った東京電力は原子力事業を関西電力に売却し・・・たらどうだろう。・・・隣国と系統線を結んでアジア広域市場ができて、それぞれが得意とする分野に特化することで勝ち残る強い電力会社ができる。」

国際連系線が整備されると、日本とアジアをまたぐ広域の電力市場ができるでしょう。そうすると、東京電力の競争相手は、東京ガスや関西電力だけでなく、ロシアの電力会社とか、中国の電力会社と競争しなければいけない。仮にこれが実現すると、まったく異なった競争関係、大きな業界構造に変化となります。これも、ひとつのゲームチェンジャーとなります。

以上に俯瞰しましたように、脱炭素化、人口減少、分散エネルギー、システム改革の改革、ゼロカーボンエネルギーの輸入とかいったものが、これまで、比較的安定していた電力業界に新たなリスク要因として入ってきています。さらに、それに輪をかけて、デジタル化といったものが電力業界に影響してきています。

### 3. ゲームチェンジャーとしてのデジタル化

最初に、電力業界にかぎらず、デジタル化が、それぞれの産業に、どのような変化をもたらしているかに触れさせていただきます。

そもそも、何故今になってデジタルが叫ばれ始めているのか、その背景を簡単に説明します。デジタルデバイスの数が飛躍的に増大し、これらが通信ネットワークに繋がり、様々なアプリケーションを利用するユーザーが拡大。アプリケーション連携を進めるAPIも増大し、その中で流通していくデータ量が非連続的に飛躍的に増えています。センサーやモバイル、デバイスの普及とこれらを横断的に繋げるエコシステムの登場がデジタル化の背景となります。

まず、日本の経営者が、デジタル化がビジネスにも

たらす影響をどのように捉えているかをご紹介します。弊社がエコノミストと共同で実施したアンケート調査結果となります。

「今後12か月で、競合他社がデジタルを活用して、ビジネスモデルを大きく変化させると思いませんか」の質問に対して、世界の経営者は、3分の2が、競合他社がデジタルを活用して、ビジネスモデルを大きく変えてくるにちがいないと考えています。

これに対して、日本の経営者は、そのように考えているのは、5分の1程度で、84%は、ビジネスモデルを変えるほどではないと考えています。

また、一方、IIoT (Industrial IoT) がもたらす期待効果として、「IIoTは、主に、オペレーションの効率化や生産性向上の貢献するのか、それとも、新たな収益源の創出により大きく貢献しますか？」という質問についてもその回答は、世界の経営者と日本の経営者で異なってきます。

世界の経営者の7割は、IIoTに関して、効率化もさることながら、新たな収益源の創出、ビジネスモデルの転換、新しい顧客価値の実現に寄与することを期待しています。一方、日本経営者の7割の方は、現在のビジネスモデルを前提とした効率化のツールとしてIIoTを捉えています。

また、「IIoTによって最も恩恵を受けると捉えている業界を挙げてください」との質問に対する世界と日本の経営者の回答も次のようになります。

世界の経営者は、多くの業界がまんべんなくIIoTの恩恵を受けると考える一方、日本の経営者の回答は、IT業界や一部のB2Cビジネス(小売りや金融業)だけがIIoTの恩恵を受けると考える傾向にあります。つまり、日本の経営者は、かつてのドットコムブームのように、やがて過ぎ去る一過性の流行としてIIoTを捉えているふしがあります。

#### 3.1 デジタル化でモノの見え方、粒度が変わる

私は、IIoTをはじめとするデジタル化の波は、一過性のブームではないと考えています。デジタル化がもたらすビジネスへのインパクトをご説明する前に、そもそもデジタル化を簡単に定義したいと思います。

これまで連続的だったアナログ量を、段階を切ってデジタルで表すことができるようになる、これがデジタル化です。

いままでだったら、たとえば、「吉野家」へ行ったら、大盛りか、並盛りかという程度の注文の仕方しかできなかったものが、デジタルになりますと、ご飯は米粒で何粒、コメの硬度、ねばり、甘さなど、きめ細かい粒度で計量化できるようになります。デジタル化により、きめ細かい粒度で世の中を捉えることが可

能になります。これがビジネスにどのようなインパクトをもつかを考えると、お客さまの見え方が変わってきます。アナログの世界では、とりあえず、大盛か、並盛りかで売っていて、「お客様がおいしかったのか、まずかったのか、満足したのか、しなかったのか」などを断片的にしか理解できませんでした。しかし、これからのビジネスというのは、お客様の理解が進むようになり、「成果を売る」ビジネスに転換が可能になります。これがデジタルによる根本的な変化の骨格であるとお考えください。

売べきは『手段』ではなく、『成果』であるということは、マーケティングの分野で、大昔から言われてきました。「顧客が欲しいのは1/4インチの『ドリル』ではなくて、1/4インチの『穴』である」と。これが、ビジネスにおいて実現されるようになってきた実例をお示しします。

### 3.2 GE 社の新しい価値の創出と提供

まず、エンジンメーカーの GE 社のケースです。従来、どのようなビジネスをしていたかという、エンジンを作って、それをボーイングなどの航空機メーカーに卸して、そのあとは、その航空機を運行しているアメリカン航空などの航空会社にエンジンの保守・サービルの売っていました。

これが今までのビジネスであったわけですが、デジタルによってこのビジネスモデルが大きく変化します。

GE の事業領域であるエンジン製造の市場規模は 8 兆円でした。これに対して、航空機メーカーの市場規模は 20 兆円の規模であり、航空会社の市場規模は 90 兆円の規模です。GE は、既存市場である 8 兆円市場ではなく、自社製品が利用されている 90 兆円の航空会社の市場に目を付けました。皆さんも、アメリカを旅行して経験があると思いますが、空の便では、よく遅延したり、欠航したりします。大体、4 本に 1 本のフライトで、遅延・欠航などが怒っているようで、遅延のうち 4 割程度がエンジントラブルなど機械のトラブルに起因しています。この機械トラブルを解消すると、1.4 兆円くらいの収益改善機会となります。GE は、頑張ってエンジンを高く買ってもらう努力をするよりも、エンジン起因のトラブルを最小化することによって、最終的エンドユーザーである航空会社さんの収益機会を最大化した方が、事業機会が大きくなるのではないかと考えました。1.4 兆円の収益改善をお手伝いした方が、従来の 8 兆円市場で頑張るより賢いのではないかと、というわけです。そこで、何をやったかという、GE Aviation とアクセンチュアと一緒に会社をつくりました。この GE

Aviation は、航空機のエンジン等機器の状況を把握するセンサーでリアルタイムのデータを集め、ネットワークでつないで分析して、故障を検知するアルゴリズムを開発しました。それまでは、機体整備という形で、航空機が着陸した後で初めて分かったトラブルが、リアルタイムのセンサーデータ、ネットワーク、アルゴリズムなど、コンピューティング能力の向上によって、故障の予知・検知が可能になったわけです。機器データを分析し予防保全を行い、これを運行計画システムと連動させ、機体整備を含む運航計画策定支援をサービスとして提供しています。

GE のビジネスモデルは、エンジン単体の販売とその保守という従来のビジネスモデルを脱皮して、デジタルを活用して機体トラブルのない最適なフライトという「成果」を最終的なエンドユーザーである航空会社に提供するに至りました。これが、「成果を売る」ということの一つの例です。

### 3.3 ミシュランの事業ドメインの拡大と価値創出

もう一つは、タイヤメーカーのミシュランのケースです。

同社はタイヤメーカーとして自動車会社にタイヤを販売し、運送会社に交換用タイヤを売り、また、保守サービスを提供していました。先ほどの GE のジェットエンジンと同様の構図です。また、タイヤ製造業の市場規模は 6.5 兆円で、運送会社の市場規模は 247 兆円でした。運送会社の課題としては、タイヤが擦り切れていると燃費が悪くなります。運送会社は、経営費用の低減、環境問題などからして、燃費の問題は、経営目標での重要課題として受け止められています。そして、燃費削減のためには、適切なタイヤ交換が不可欠ですが、問題は、いつタイヤを交換したらよいかかわからないということがありました。それでは、定期的に早期に交換するというになると、タイヤの本来の最大寿命の 45% しか利用されずに交換されてしまうという問題がありました。個々の車の走り方によってタイヤの摩耗が違ってくるので、本当は、タイヤ 1 個ずつ、個別の摩耗によって交換のタイミングがわかればよいのですが、そこまで管理ができないため、結果的には、寿命が来る前に交換することとなり、年間 1.5 兆円の機会損失がでていました。また、運転の仕方が上手くないと、燃費に影響します。運転方法に起因する無駄な燃料費も年に 7 兆円発生していることが分かってきました。そこで、デジタルを活用して、運送会社の課題を解決できないか、ということになりました。同社は、タイヤの中にセンサーを設置し、圧力計、加速度計、温度計からのデータから、どのタイヤが摩耗しているのか、交換のタイミン

グなのか、走った距離に対してタイヤの摩耗の仕方が進みすぎているならば、これら運転の仕方がおかしいのではないか、など、「費用対効果が最適になるような運転体験を運送会社に実現する」ことに取り組みました。運送会社が欲しいのは、タイヤそのものではなくて、費用対効果が最適になるような運転です。先ほどのドリルの話と同じで、「欲しいのはドリルではなく、適当なサイズの穴である」ということです。運送会社が欲しいのはタイヤなのではなくて、「適切に走る」ということです。そのこと自体をサービスとして提供するビジネスモデルを開発しました。これが「Tire as a Service」というビジネスモデルです。同社は、タイヤを売るのではなく、タイヤを使って走った距離に応じて課金をします。つまり、売っているものが「タイヤ」ではなく、「走行」に変わりました。他のタイヤメーカーが「タイヤを買いませんか」という従来の勝負をしているのに対して、ミシュランは、「当社はタイヤではなくて、お客さまである運送会社のビジネスパフォーマンスを最適化する「走行」そのものを販売します」という別次元でビジネスを展開している訳です。

**消費者向けビジネスにおける「成果」の販売：**消費者向けのビジネスでも、成果を販売する事例が登場しています。スペインのバルセロナの劇場では、「笑い」に対して課金しています。面白くなければ、つまり、笑わなければお金を払わなくて良いですし、逆に面白ければ、その分、お金を頂戴します、というビジネスです。劇場の座席の後部にモニターが設置されており、ここで「笑い」がカウントされています。最大でも2,500円程度しか課金されないの、面白かったら、気兼ねなく笑ってもらえる課金体系になっているようです。

このように、各種センサーが活用されると「成果」が定量的に可視化できるようになります。そうになると、エンジンやタイヤ、劇場の座席といった「手段」を売るのではなく、「航空」、「走行」、「笑い」といった「成果」そのものを売ることができるようになります。「成果を売る」ビジネスへの転換、これが、デジタルがもたらすビジネスに与える根本的な変化となります。

### 3.4 消費者はデジタル化でどう変わるか

ここまでの話は、デジタルがもたらすビジネスへのインパクトでした。続いて、最近の消費者の購買行動がどのように変化しているのか、について少しお話ししたいと思います。

アクセンチュアが実施した調査結果によると、「製品・サービスを購入する前によく検討しますか」とい

う質問に対して、「検討しない」と回答した割合が半数を超えています。インターネットが普及したので、購入する前にあれやこれや情報収集しているのかなと思っていたのですが、ふたを開けてみると、日米ともに「検討しない」と応えた人が半分を超え、さらには「購入している製品・サービスに興味・関心がありますか」の質問に対しても「ない」と回答した人が6割もいました。モノや購買体験に対して、消費者がだんだん関心を失っていることの表れだと、理解しています。電気やガスといったコモディティ商品であれば、何となくわからなくもないのですが、家電やホテルといった、やや嗜好性の高い商品についても同様のトレンドが確認されています。

また、シェアリング・エコノミーの文脈でアクセンチュアが実施した消費者アンケートによれば、「利用課金型のサービスがでてきたら、使いたいですか」という質問に対して、利用意向を示す消費者が一定割合確認できます。住宅はもともと賃貸住宅がありますが、例えば、最近であれば、レンタル収納スペースやカーシェアリングも一般的になってきました。また、車についても、カーシェアリングやUberのようなライドシェアが消費者の支持を獲得しつつあるように思えます。手段としての製品を所有することにそれほどこだわりがなく、「収納」や「移動」といった成果をサービスとして購入したいという消費者が増えています。

また、この調査結果から、成果が出るのであればもっとお金を払っても良いと考える消費者が多いということも確認できました。たとえば、ダイエットマシンを考えてみましょう。本当にダイエットに成功するならば、10万円でも、20万円でも払っても良いと思うのではないのでしょうか。ただ、本当に成果がでるかどうかわからないとなると、お支払できる金額も相応の金額に収まってしまいますよ、ということです。

つまり、消費者は、もはや「手段」を求めておらず「成果」を直接的に求めるようになり、そして、「成果」に対しては、今よりも対価を支払っても良いと考えているようです。

これは、事業者からみると、大きなチャレンジです。特に、無関心な人にアプローチするのは、非常に難しい話です。「これが欲しいですか」と聞いても、「考えたことはありません」と答えられてしまう訳です。こうした無関心層へアプローチする一つの方法として、Amazonのように徹底的に消費者の無関心に寄り添うアプローチが考えられます。Amazonは、日常で利用する消耗品を自動発注する仕組みを提供しています。事前設定に従って、消耗品の賞味・保存期限や欠

品を分析・予測して自動発注してくれる仕組みです。消費者の購買行動を先回りし、購買体験そのものを自動化してしまう訳です。「どうぞ無関心のままで結構です。当社が面倒なことを一切引き受けます」というのが、Amazonが目指しているビジネスモデルの一つだと思います。

もうひとつのアプローチとして、ナイキの例を紹介しましょう。ナイキが製造しているシューズも、ジェットエンジンやタイヤと同様に、モノ単体での差別化が困難になっています。そして、消費者が欲しいのは、やはり手段としてのシューズではなく、シューズを履いて「楽しく運動」すること、楽しく運動できるという体験そのものになります。ナイキは、ここに注目し、ランニングのアプリケーションの提供をはじめ、消費者が楽しく運動するためのさまざまな仕組み、仕掛けを提供しています。こうなると、安定した質とコストで大量にシューズを提供するために構築してきた従来のエコシステムに変わり、消費者に「楽しい運動」という体験を提供するためのパートナーや新しいエコシステムが必要になってきます。Amazonが無関心に寄り添ったのに対して、ナイキは、顧客体験に寄り添い、新たな関心を想起したのです。

このようにデジタルがどんどん進行していくと、手段を売っているだけでは、どんどん、消費者に置いてきぼりにされます。「成果」そのものをサービスとして提供し、「成果」そのものに対して課金をしていく、あらゆるマーケットは、この方向で変化していくでしょう。

#### 4. 電気事業のビジネスモデル変革

さて、3つ目のメガトレンドとしての「デジタル化」の話をごここまでとし、ここから、電気事業のビジネスモデル変革について、お話をさせていただきます。

これまでの電力システム改革の背景にあるのは競争原理を導入して、効率化の原理をインプットしようというのが根幹でした。日本の政府は、「新しいサービスが登場する」と言っていますが、皆さんが実感されているように、あまり新しいサービスは出でず、議論の中心は、価格や費用です。発電は、発電事業として効率化してください。小売りは小売りで価格競争を含めて効率化してください。規制部門の送配電部門も、発電や小売と切り離された中でしっかり効率化を進めてください、ということです。

この電力業界が、ここまでにご説明させていただいたメガトレンドやゲームチェンジャーの影響を受けて、いったん形が整いつつあるように見える新しい電力業界を、再び根本から変革しようとしています。

現在描かれているシステム改革後の電力業界は、決して最終形態ではなくて、むしろ更なる変化を目前に控えたスタート地点にいて考えています。

たとえば、何となく業界革新から距離がありそうな送配電事業ですら、構造的なビジネスモデル変革という挑戦に直面しています。再生可能エネルギーや省エネルギーの普及促進にどのように貢献するか、需要減少期において、これまでと同様の設備投資を行ってよいのか、太陽光発電や蓄電池などを備えたプロシューマーといかに協業するか、といった問いに同時に答えられるビジネスモデル改革、制度改革が求められています。

#### 4.1 送配電事業者の再定義：分散システムプラットフォーム事業者

ここで、ニューヨーク州が色々と面白い取り組みをしているのでご紹介します。

クオノ知事が2011年に就任し、その翌年、ニューヨーク州はハリケーンのサンディに襲われます。ニューヨーク州は、大停電に見舞われ、ニューヨーク証券取引所も2日間の営業停止を余儀なくされました。大規模な自然災害に対する電力システムの脆弱性が改めて明らかになった訳です。現在のエネルギー産業構造自体がニューヨーク州の求める要件を十分に満たしていないのではないかと、という問題意識の下、改めて新しいエネルギー産業構造を描いてみよう、ということで、「Reform the Energy Vision」というレポートを作成しました。このレポートのポイントは、いわゆる配電会社(distribution utilities)の役割を見直して、分散システムプラットフォーム事業者(Distributed System Platform Provider)として再定義したところにあります。

太陽光発電や電気自動車(の蓄電池)など地域に分散しているエネルギー資源を、うまくマネジメントして取り込もうという発想です。従来の電力システムは、大きな発電所と大きな電力需要の塊を送電線で繋いで作ったもので、電力市場においては、発電事業者と小売事業者、つまりプロの事業者が電気の売買を行います。一方、太陽光発電や電気自動車など分散エネルギー資源をもった消費者、生産者の側面も持つという意味でプロシューマー(prosumers)化したユーザーをどのように既存の電力システムに取り込むか、プロシューマーの参画を前提とする“素人の市場”と従来の“プロの市場”をどう融合していくか、といったことを、制度面、技術面、ビジネス面の各側面から構造改革していこうというのが、このビジョンです。

このビジョンを前提にニューヨーク州は具体的な

移行計画を立てており、その中で、いくつかの実証実験を行っています。その一つが分散エネルギー資源としての省エネルギーポテンシャルの活用となります。

電気の需要と供給を一致させるためには、発電所を作って供給力を積み増すという方法以外にも、例えば、省エネに投資をして需要を抑制するという方法も考えられます。発電所を建設する場合であれば、登場するプレーヤーは、発電所立地に適した用地をもっている電力会社や大規模プラント跡地を持つ製造業など特定企業になります。一方、省エネルギー資源の活用によって需要と供給のバランスをとろうとした場合に登場するプレーヤーは、こうした特定企業ではなく、例えば、マンハッタンに数多く存在するオフィスビルのオーナーだったりします。ニューヨーク州の場合、古いビルが沢山あって省エネポテンシャルは高いのですが、「省エネルギーを進めてください」といっても、省エネを進めたからといってオフィスビルの入居率が上がる訳ではなく、エネルギーに対する認識がそれほど高くないオーナー任せだとなかなか省エネは進みません。一方、省エネでお金儲けをしたい事業者も、どこに省エネのポテンシャルの高いユーザーがいるか、外から見ているだけでは分からず、ターゲットのお客さまを開拓する手間暇ばかりがかかり、なかなか割に合うビジネスになりません。ユーザーの観点からみても、事業者の観点からみても、省エネルギーに関する市場というのは、なかなか立ち上がりにくいものなのです。

そこで、このニューヨーク市内に電力供給をしているコン・エジソン (Consolidated Edison) という会社は、スマートメーターのデータを活用して、それを分析する「Retroficiency」というスタートアップと一緒に、このメーターのデータと気候のデータを組み合わせて、省エネのポテンシャルのあるユーザーがどこにいるかを解析して、そのデータをオープン化しました。ニューヨーク州の商業施設のオーナーは、コン・エジソンから無償でエネルギー診断を受けることができます。省エネポテンシャルの高いオーナーに対しては、費用対効果の高い省エネ施策を推奨したりもします。実際に省エネ施策を実行するためには、技術を持ったサプライヤーに声をかける必要がある訳ですが、省エネポテンシャルをもったオーナーと技術を持ったサプライヤーの取次もします。省エネユーザーとサプライヤーのマッチング・サービスをしているとお考えください。いままで電力会社というのは、電気を送るだけだったのが、電気を送るだけではなくて、むしろ、省エネルギーと起点として、売り手と買い手をつなぐマーケットプレイ

スのオペレーターになっていくという一つの考え方です。これはビルなどの商業施設だけではなくて、家庭でも同じようなことがなされています。

ニューヨーク州が考えている理念としては、消費者に正しい情報を提供して、消費者がマーケットメカニズムの中で正しい判断をして、省エネルギーや分散エネルギーシステムの普及を進めるというのが、一つの考えになっています。このような考えに基づいて、コン・エジソンは電気を送るだけではなく、消費者のエネルギーに対する理解を促進し、省エネ実現に必要なマッチング・サービスを実証実験の中で提供しているのです。

#### 4.2 ブロックチェーン技術でプロシューマーとコンシューマーの直接取引

また、最近、色々なところで話題になるブロックチェーン技術もエネルギー分野に適用され始めています。ブロックチェーン技術を活用することによって、プロシューマーとコンシューマーが直接的に取引できるピア・ツー・ピア (P2P) の仕組みが想定されています。IoT やブロックチェーンといった技術が、ユーザーのみなさんと、電気との関係を大きく変えていく可能性があります。

**消費者の IoT 機器が電力会社と自動契約 (スマート契約):** ブロックチェーン技術は、金融業界のプレーヤーがリードしており、例えば、VISA などのクレジットカード会社がマイクロペイメントという文脈で電力取引におけるブロックチェーン技術の適用可能性を検討しています。

VISA は、IoT 機器を対象に、機器が消費者に代わって最も安い電力会社を選定し、機器を利用する都度、ビットコインにて小口決済を行うソリューションのコンセプト検証を実施しています。具体的には、スマート電球が複数事業者と交渉し、最も安い事業者を選定。VISA でビットコインを自動購入し SatoshiPay のマイクロ決済技術を使って決済するというケースに関するコンセプト検証を行っています。

家庭分野における IoT という、スマートホームやスマート家電といったキーワードが思い起こされ、なかなか市場が立ち上がらないなど思っているところではあるのですが、家庭分野における IoT とブロックチェーン技術を組み合わせた検討も行われ始めています。例えば、IBM と Samsung が進める ADEPT では、ブロックチェーン技術を活用して冷蔵庫がテレビなど他の家電機器と会話をしながら、最適な電力使用を行うといったユースケースが想定されています。

また、アメリカの電力会社である Direct Energy は、

「Future of Billing (課金の将来)」というコンセプトを提唱しています。これは、機器単位で電力を提供し、機器単位で課金しようというものです。今は、みなさん、ご自宅単位で契約していますが、電気を使っているのは、本当は家ではなくて、家の中にある洗濯機とか、冷蔵庫なので、契約や課金の単位もこうした家電単位にするという考え方は、一定の合理性があります。ただ、これまでは、家電単位で契約したり課金しようとしたりすると、計量コストや課金コストが高くなってしまいますので、わざわざ家電単位で課金せずに、暫定的に家単位で課金しているが実態です。ただ、ブロックチェーン技術などの新しい技術を活用することによって、計量や課金のコストが下がってくると、こうした家電単位での電力契約も可能になると思われます。

もちろん家電単位で契約できるからといって、それがそのまま新しい価値になる訳ではありません。ただ、より消費者体験と密接な関係を持つ家電単位で契約できるようになってくると、電力小売にも新しいフロンティアが拓けてくるのではないかと思います。

まず、エネルギーの「利用体験」を考えてみましょう。電気の利用体験とか、ガソリンの利用体験とか、ガスの利用体験とか、みなさん感じたことがないかもしれません。たとえば、ガソリンを例にしますと、ガソリンを購入する体験はあります。「ガソリンスタンドを見つけるのが大変だな」とか、「待つのが嫌だ」とか「セルフがいい」とか。しかし、それはガソリンの利用体験ではなくて、購買体験です。ガソリンを何時利用しているかという、それは車を運転しているときです。もちろん我々は、ガソリンを消費する体験とは微塵にも思っていない、車を運転していると思っている訳です。電気も同じで、電気の利用体験ではなくて、テレビをみてテレビを視聴している経験であり、電気の利用体験を想起するのは、本質的に困難です。

となると、消費者がどんどん「利用体験 (成果)」にしか反応しなくなり、「成果」に対してしか対価を支払わなくなってくる世界において、電気を含むエネルギーを販売する事業者は、どのようにして、新しい顧客価値を創出していけばよいのでしょうか。

ある方がおっしゃっていましたが、乾電池の中に入っている電気を考えてみましょう。例えば、ドライヤーを1時間使用するときの電気代は、30~40円程度です。一方、電池という形の電気になると同じ量でも数千円になります。電池という形で電気を売った途端、販売価格が数十倍になる訳です。何故、そのような価格で売れるのかというと、「持ち運びができるよ

うに、この機器を使いたい」ので電池を使っている訳で、ユーザーは、この「電気のモビリティ」に対してお金を払っていると考えることができます。

このように、家に電気を送ってお終いではなく、誰がどのようなシチュエーションでどのように電気を使っているのか、という顧客体験にどんどん近づけていくと、電力をはじめとするエネルギー小売業も今までとは違ったお金の稼ぎかたができるようになるかもしれません。

送配電事業や小売事業がこのように変革していくのと同様に、発電事業もドラスティックに変革していく可能性があります。例えば、これまで発電事業として単一で捉えられてきた事業が分化し、発電所を所有する事業や、発電所を利用して燃料を電気に転換して取引する事業、発電所を運営する事業など、一部の地域では発電事業のアンバンドリングが進んでいます。

## 5. 顧客を起点とした業界の再構築

最後になりますが、電力業界もようやく普通の業界になっていくのだと思います。顧客や市場を起点にして、新しい産業構造が形造られるでしょう。

これまでの電力業界は、どこにどのような発電設備を作って、どこに送電線を敷設して、といった内容が議論の出発点でした。製造業に例えると、いきなりどこにどのような工場を作るかを議論して、それに続いて物流の議論をして、ようやく最後になって顧客(小売り)の話が出てくる感じでした。他の業界であれば、まず、顧客が最初に来て、こういう商品・サービスを届けたいので、そのためにはどのような工場をどこに建設して、そのための最適な物流はどうあるべきか、といった議論になるはずですが、もちろん、これまでの電力業界も需要想定という意味では顧客から出発はしていたものの、顧客体験からは程遠いマクロの電力需要が議論の出発点でしたので、これまでお話してきたミクロな顧客体験を出発点にして産業構造を議論するというのは、これまでにない新しい取り組みになるでしょう。

ここまでで申し上げてきたように、エネルギー産業全体が非連続的な構造改革期に突入しようとしている現在、経営としてこれら不確実性をどのようにマネジメントしていくかというのが、電力会社だけでなく、この業界に関わるあらゆるプレーヤーの最重要課題です。もちろんリスクだけでなく、新しいことをやりたい人からすると大きなチャンスでもあります。既存事業を守らなければいけない立場にある企業にとっても、新たな事業機会を求めて同業界に

参入しようとしている企業にとっても、今回ご説明した非連続的な変化への備えと対応が、次の10年、20年のポジションを築く上で、命運を分けるとい

ます。

以上で、わたしの講演を終わらせていただきます。ありがとうございました。

### 本誌「リアルオプションと戦略」は、国内外に公開される電子ジャーナルとなります

本誌の各号は会員限定の刊行後、3か月を経過してからインターネット上の電子ジャーナルプラットフォーム「J-Stage」に登載されます。これにより本誌掲載の記事は、Google Scholar などからも検索可能となり、社会に向けて広く情報発信されます。なお、各記事にはDOI (Digital Object Identifier) が登録され、本機関誌の記事は、すべて、国内外から恒久的にアクセスが保証される公開記事になります。第8巻第1号(2016年2月発行)は、2017年3月末頃に、J-Stage上に、公開される予定です。

### 論文誌「リアルオプション研究」原稿募集のご案内

日本リアルオプション学会は、査読付論文誌「リアルオプション研究」(英文名称: Journal of Real Options and Strategy) を発刊しております。本論文誌は、電子ジャーナル化されて、国内外に広く、公開されております。

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/realopn>

#### 募集する原稿:

リアルオプションおよびこれに関連する経営科学、リスクマネジメント、オプション的資産の価値、投資戦略、ゲームと戦略などについての理論、実証および応用に関する研究のほかケーススタディー、あるいは、この分野における教育方法の改善などに関する和文の論文で、新規性または、有用性のあるもの。

投稿原稿は、次の3類型に分けて審査されます。

1. 理論研究
2. 応用研究
3. 研究ノート

〈JAROS2016 研究発表大会 基調講演：セミナー「リアルオプションが挑む価値創造のフロンティア」より〉

## 2つのコードと企業価値向上

- 長期の企業価値向上に必要な施策：機関投資家の視点から -

堀江 貞之

(株)野村総合研究所 金融 IT イノベーション研究部 上席研究員)

### 1. はじめに

私は、公的にも、私的にも、資本市場改革に関与してきました。公的には、2013年7月以降、主としてGPIFの改革に関与しております。日本企業は執行と監督が一体となった体制でして、GPIFも理事長が全てを決めるようになっており、バランスが悪いといえます。そのため、国会審議のための法案の検討作業案の原案も作成しました。また、株式市場改革として、日本企業の資本生産性改善のために動いております。具体的にはROIC、ROEなど、投資家から見た収益の改善を目指しています。労働生産性はよくクローズアップされますが、資本生産性の低さは放置されがちです。ここを改善することを目的に、日本版スチュワードシップコードに関する有識者検討会委員（13年8月～14年2月）と、コーポレートガバナンス・コードに関する有識者会議委員（14年8月～15年3月）に就任しました。現状はまだパツとしません。野村総研として例外ではないかも知れません。外形基準は整っていますが、中身が整っていないといえます。未来投資会議「企業関連制度改革・産業構造改革—長期投資と大胆な再編の促進」会合メンバーでもあります。これらの議論などは、2017年の6月に取りまとめる成長戦略の中に組み込まれる予定です。

株式市場改革はまだ道半ばでして、成功するかどうかはまだ分からないといえましょう。私的活動として資本生産性の向上を目指しており、出版もしています。

本日は、以下の3点について整理したいと思います。

1. 今回の資本市場改革のポイント
2. 事業会社に求められる行動
3. GPIFと運用会社の企業価値向上支援に係わる活動と今後の動向

### 2. 今回の資本市場改革のポイント

今回の改革のポイントは「一体改革」であります。金主（投資家）、運用会社、企業、の三者に働きかけ

るための改革です。もともとやりたいことは企業の資本生産性を高めることでして、企業が儲からないと賃金が払えないし、配当も払えない。企業のファンダメンタルな収益性を上げる必要があります。

日本企業のROEの業界平均は5-6%程度ですが、投資家が株式投資で企業に求めるのは5%よりも高いわけです。つまり、投資家目線では、投資家の期待収益率を常に下回って来ました。これでは経営規律がたるといしか言えません。サラリーマン経営者には改革は難しいので、コーポレートガバナンス・コードを導入したのですが、これはもともと株式市場改革のためのものでして、株主が声を上げないことも問題という認識に立っております。

日本の年金ファンドの規模は280兆円でして、うち200兆円が公的年金で、80兆円が企業年金です。

50兆円が国内の株式市場に投資していますが、公的年金は株主の権利にうといといえます。これを変えるためにスチュワードシップコードが掲げられました。運用会社に対して、投資家としての責任を持ってもらいたいということです。

海外からの批判も同様でして、国内の機関投資家が投資先を批判しないことが原因といえます。

その例として、トヨタの種類株発行があります。このとき、海外と国内の機関投資家では賛否両論に分かれました。殆どの海外勢は反対であり、国内勢は賛成でした。私は反対しました。どれくらい企業価値へのインパクトを考えて記載したのか非常に疑問といえます。

スチュワードシップコードは殆どの国内運用会社が受け入れましたがポーズに過ぎない、と海外勢から見透かされております。「所詮は、日本人は本気でやる気はない」というのが海外の機関投資家の評価です。だから、企業、機関投資家、金主の一体改革がとても重要になります。リターンを上げるための働きかけを変えるためにスチュワードシップコードを導入した、ということです。

コーポレートガバナンス・コードはOECDを、ま

たスチュワードシップコードはイギリスを手本にしています。ただし、我が国の目的は、OECDやイギリスの目的とは180度異なります。もともとこれらのコードは、経営者がリスクを取りすぎることを押さえるためにできました。コードでタガをはめたということです。それに対して日本の経営者は全くリスクをとりに行かない。そのため、もっと積極的にリスクをとってもらうためにコードを導入しました。

海外は取締役会の暴走を防ぐために、機関投資家のチェック機能を高めました。日本は、経営者がリスクを全くとらないので、よりリスクをとるために、コードを導入しました。

これら一連の取り組みに対し、批判者は多いです。新井さんは成功するわけがない、と批判しております。

ひとつの批判として、独立社外取締役2名以上というのは機能しない、というのがあります。海外にはエビデンスがないということです。独立社外取締役の選任と解任が、実態的にCEOによって決定されています。それでは、顔をうかがわざるを得ないということです。経営者が、知られたくない情報を独立社外取締役に知らせないということです。独立社外取締役制度が企業価値向上に有効に機能しているという明らかな証拠は存在しない、といった指摘もあります。

もう一つの批判は、株主アクティビズムへの疑問です。年金等の機関投資家による株主アクティビズムは、株価上昇や収益性改善等に有意な成果を上げていないというものです。インセンティブが明確でない。

長期資本の資本生産性を高めるために、これらの批判を重く受け止めないと行けないと思います。

### 3. 事業会社に求められる行動

#### 3.1 株主向けの情報開示

日本企業は、以下の諸点で、株主向けの情報開示がまだ貧弱といえます。

- i. 企業価値向上に関する経営方針の開示  
企業理念を開示して欲しい、特に、資本配賦の方針が明示されない場合が多い。
- ii. 資本生産性の中長期目標の開示  
資本生産性の指標：ROIC（投資資本利益率）、ROE（自己資本利益率）、ROA（総資産利益率）などを「資本コスト」との相対比で示すことが重要です。海外の機関投資家は8%レベルを求めます。
- iii. 目標達成に至るプロセスの開示・説明

プロセスを開示・説明してもらわないと、目標達成に至るプロセスの評価が出来ない。言った通りにならなかったときに、どこがどう想定と異なったのかを明確にするために必要です。資本生産性向上のための手だてが企業経営者にまだ周知徹底していません。

(例) 自社株買い

パークシャー・ハサウェイは、自社株価が本質価値よりも低い場合しか自社株買いをしません。

#### iv. 経営陣幹部の選任方針・手続きの開示

6-7割の国内企業は、現社長が次期社長を探します。これに関わる意思決定のプロセスが重要です。次の社長はどんな目的でえらぶのか、などです。企業経営者には、事業運営に長けた人は多いのですが、しかし、キャピタルアロケーションの経験のある経営者は少ないといえます。本来、CFOがこの責任を負うのですが、現状では経理部長が兼任するような場合が多いといえます。

#### 3.2 長期の企業戦略に特化した取締役会の機能整備

取締役会に、株主の視点も入れた議論が必要です。そのために独立社外取締役が必要です。数の上では、上場企業の97%以上が独立社外取締役を導入していますが、しかし、そのクオリティがどうかというと、まだまだといえましょう。

事業運営よりもキャピタルアロケーションに関する議論が必要です。ポートフォリオ・マネージャーやアナリストの経験者をもっと入ってもよいのではないのでしょうか。社長が会長になるのではなく、社外取締役として他の企業をサポートして欲しいと思います。弁護士などのスキルセットではないのではないのでしょうか。

#### 3.3 経営会議と取締役会の区分が不明確

取締役会で実績を残すために、経営会議マターも取締役会に出ることが多いようです。経営会議で根回しが済んでいる案件が取締役に回ってくる人が多いのです。経営上のことがらは、執行や経営会議に集約し、戦略は、取締役会に集約すべきです。

#### 3.4 株主総会・取締役会・経営会議の役割整理

日本では配当も株主総会で決められます。しかし総会は1年に1回なので、機動的な配当政策の検討が出来ません。役割を明確にすべきです。

#### 3.5 日本の上場企業の投資家（株主）構造の状況

日本の構造の特徴は、海外に比べ、長期視点で投資している人が多いといえます。しかし、企業価値評価に対する関心が低いのです。典型例が事業会社同士

の株式持ち合いです。このパターンが4割くらい存在するのではないのでしょうか。

GPIFはパッシブの投資が多く、ずっと長期間、持たざるを得ません。持っている企業のうち、業績の悪い企業に、積極的にコミットしようとしています。企業が株主になっている場合は、投資先企業の経営者の業績が悪いときは、明確にモノを言って欲しいのです。コーポレートガバナンス・コードでも説明責任を果たして欲しいと書いていますが、実効性のあるものはほとんどありません。

#### 4. GPIF と運用会社の企業価値向上支援に係わる活動と今後の動向

私が、最も関与したのが GPIF でした。GPIF がやっていることは色々あります。

GPIF は株式を 30 兆円ほど持っています。株式市場には  $\beta$  と  $\alpha$  があります。GPIF は金額が多いのでパッシブ運用が主となります。ここで、 $\beta$  の追求が重要です。30 兆円保有しているのだから、相応の責任を果たすことが必要と思われる。その 1 つがスチュワードシップの強化でしょう。株式市場全体の 8% を GPIF が保有することになります。ROE が低い大企業に対して、GPIF が積極的に議論して資本政策を変えてもらうよう、運用会社に働きかけることが重要だと思います。パッシブ運用なので、長期的に保有せざるを得ないわけで、だからこそ、パッとしない企業に対しては、企業への働きかけに熱心な運用会社への配分を増やすなどして、働きかけることが必要だと思います。

#### 5. 結論

私のお話をまとめさせていただきます。

企業の資本生産性を改善することが主たるテーマでした。結局のところ、主役は、企業であり、企業さんに頑張ってほしいということになります。

企業の価値向上を後押しするためには、投資家の行動も変えて欲しいということになります。これら二つのことをセットにして考えることが重要とおもわれます。

#### 質疑と応答

##### 投資信託会社の投資家責任は？

機関投資家が株主になっているケースを主に話してきましたが、投資信託は一般の個人が最終的な投資家になっています。

投資信託の運用会社が、どういったリターン獲得のための努力をしているか、がポイントであると思

います。パッシブ運用の場合ですと、リターンに差が付きません。仮にリターンが上がっても、他のパッシブ運用の人にも同様にリターンが得られます。つまりタダ乗りされます。投資信託のパッシブ運用は、インセンティブが働かないということがいえます。しかし、評価会社が、評価を変える、といった程度のことは出来そうです。つまり、投資信託会社が株主になった場合は、ガバナンスが効きにくくなります。個人投資家が運用会社にプレッシャーをかけにくいわけです。

##### 機関投資家の株主としての議決権行使について

投資信託の運用会社が、議決権行使のためのコストをかける場合、どのようにしてコストを捻出するべきなのでしょう。

応答： インセンティブが働かないコードは機能しにくいといえます。それは、海外の実証研究で示されています。パッシブ運用の受託者のインセンティブは極めて低いといえます。GPIF からの場合、4 兆円受託して、報酬は 1,000 万円です。これでは、とてもやられていません。GPIF は、では何か出来るのか提案して欲しい、というスタンスです。

これで議論が活性化することが求められる。ここでコストをケチってリターンが上がらないよりは、コストをかけてでもリターンを上げる努力が必要でしょう。ただし、投資信託の場合は、インセンティブが効きにくいといえます。長期のリターン形成に対して、投資信託会社がどれだけ真剣になっているのか、が問われるということでしょう。

##### 日本は、全般的に、資本生産性が低いことについて

我が国では、資本家・株主にも、また、経営者にも、企業価値向上へのインセンティブの仕組みがうまく機能していないというお話がありました。その原因の 1 つとして、取締役会と経営者会議の役割が不明瞭というお話が、よく分かりました。スチュワードシップ・コードを持ってきたのは、それらを改善しようという試みであることも、よく理解できました。

しかし、いまや、海外の機関投資家が日本に入ってきています。これら海外投資家のプレッシャーが働いて、これからは、改善の方向へ向かうと期待できるのではないのでしょうか。

私どもの学会では、「価値創造のイノベーションと戦略部会」というのがありまして、月例講演会を開いて、そこでは、リスクに挑戦して価値創造に臨む諸企業の新進気鋭の経営者の方たちに講演をしていただいています。企業価値向上への期待がもてる企業が

多いと感じています。

もうひとつ、今日の午前中に森平先生の基調講演があったのですが、そこでは、経営者へのストックオプションなど、「オプション契約」が、インセンティブのデザインに活かせるというお話がありました。

**応答:** 我が国では、資本家と経営者の間のインセンティブのデザインが悪いという点は同感です。長期的な企業の生産性に報酬が連動するようなスキームが必要と思います。

機関投資家の経営陣への質問も、国内と海外とは全く異なるようです。

海外の投資家は、自分の報酬に直結しているので、質問がとても厳しいといえます。

#### コーポレートガバナンスに対する批判について

これに関連して、ステークホルダー主義に対する批判も、常にありますね。

**応答:** この議論をゼロサムの議論でやると難しいです。アメリカでもステークホルダー主義はうまく機能しなかったといえます。ですから、「富の創出能力の最大化」が重要になります。このことは、コーポレートガバナンス・コードにも書かれています。

#### JAROS2017 研究発表大会へのご案内

期間：2017年11月25日、26日（土日開催）

場所：石川県政記念 しいの木迎賓館 石川県金沢市広坂2-1-1

発表申込：査読セッション エントリー受付中（5月11日まで）

参加申込：2017年6月受付開始 予定

予定セッション

一般研究報告、査読セッション、シンポジウム、基調講演、チュートリアルセッション、懇親会

実行委員会（敬称略）

実行委員長：佐藤 清和

副実行委員長：長谷川 専、高嶋隆太

プログラム委員長：辻村 元男

#### CALL FOR PAPER

#### INTERNATIONAL JOURNAL OF REAL OPTIONS AND STRATEGY

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ijros/>

The International Journal of Real Options and Strategy (Online ISSN 2186-4667) is a peer-reviewed and open access journal that publishes theoretical and application-oriented articles in areas of real options, strategy and related themes. Digitized scholarly articles in this Journal can be accessed from anywhere in the world via J-Stage, Japan Science and Technology Information Aggregator, Electronic. Please visit the site: [http://www.realopn.com/association\\_index](http://www.realopn.com/association_index), for submission of papers.

#### Themes and topics that are welcome for this Journal :

Theories, applications, Empirical Studies and Case Studied on Real Investment, Strategy, Risk Analysis, Valuations, Insurance, Games, Agency Problems, Infrastructure Policy

〈JAROS2016 研究発表大会 パネルディスカッション 2016年11月19日(土) 於：中央大学後楽園キャンパス〉

## リアルオプション学会の原点とこれからのフロンティア

司会：高森 寛（早稲田大学）

パネラー：

今井 潤一（慶應義塾大学）

長谷川 専（㈱三菱総合研究）

北原 康富（名古屋商科大学大学院）

小林 孝明（NRI（株）野村総合研究所）

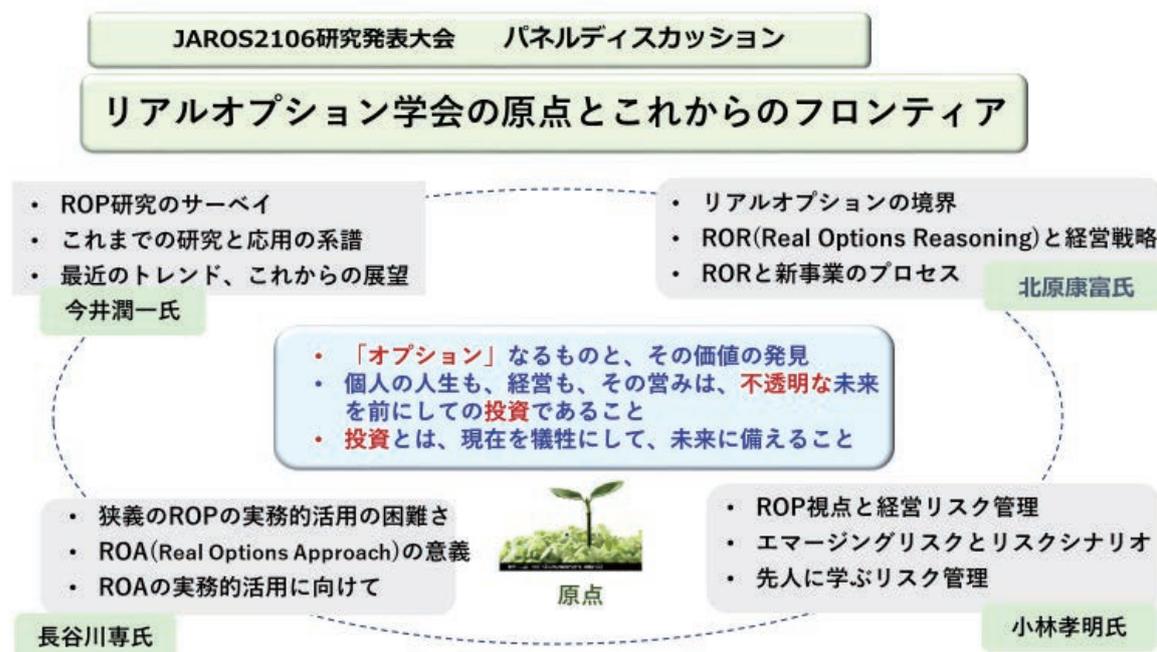
### 司会者

今回のJAROS2016大会は、私どもの学会創立十周年にあたります。学会創立にいたるまでは、公開研究会「金融技術と経営」を、月例で開催しておりました。その研究会には、企業経営の実務家の方々、諸所の大学の大学院生の皆さま、会計事務所やコンサルタント企業の方々、民間及び公的な研究機関の研究者の方々など、多岐にわたる専門分野の方々が、大いなる熱意をもって、集まりました。

そのころは、ファイナンスおよび金融の世界に革

新が起っていたかと思えます。そのような革新は、当然、諸産業の他の領域にも拡散しようという勢いがありました。

特に、そのころ台頭してきた金融技術、テクノロジーに啓発された面が大きかったかと思えます。そこに見出された新鮮なる概念として「オプション」なるものがありました。「オプション」は、本質的に、不確実性とリスクを宿した「もの（原資産）」の保有やその取引約束の価値を問うものであります。



金融革命を先導した「オプション」なる発想と視点は、金融の世界を超えて、「不動産」や諸々の「契約の取り交わし」そして、企業の投資プロジェクト案件など、経営はじめ、産業の諸側面、諸問題に新たな解明を迫ったかとおもいます。すなわち、原資産が金融

資産でない「もの」、しかし、それらとのかかわりにおいて、私たちは、不透明さやリスクに晒されながら、意思決定や戦略を策定しながら前に進まなければならない。このような問題意識を共有した有志が、十年前に、本学会を立ち上げたかと思えます。もうひとつ

共有した問題意識に、われわれ個人の行動も、企業・組織の行動も、未来を創るための「投資」が原点であるということがあると思います。投資とは、何でしょうか。それは、いま持てる資産・富について、今日の消費を犠牲にして、未来の価値創出のために投じることではないでしょうか。

この十年、だいぶ、世の中も変わってきました。私たちが進歩したか、しなかったかは、別としましても、この十年の変わりようは大きなものがありました。そして、さらに、いまや、不透明極まりない未来を前にしております。

ここにタイトルとしてありますように、本学会の原点を振り返りながら、これからのフロンティアにどう立ち向かうのか、について、4人のパネラーの方々に、その思いを語っていただきながら、また、問題提起などしていただき、フロアーの皆さんと、ディスカッションをしていただきたいと思います。

## パネラーのプレゼンテーション

### 今井潤一氏

わたしからは、2点お話をさせていただきます。この学会の一つの特徴は、会員構成が、学校・教育関係の研究者と、それから、産業界の実務・実業に従事されている方々から構成されていることか、と思います。今日、この4人のパネラーがおられますが、私は実務の経験もありませんで、大学関連の研究者として、お話させていただきます。そうなりますと、パネラーとしては、まずは、リアルオプションに関わる研究や文献のサーベイをやってみるのが一つの役目かと思ひまして、それについてお話をさせていただきます。2005年ごろからの、おおよそ300本ほどの研究ジャーナルのサーベイをいたしました。

## ジャーナルサーベイ : 主なカテゴリー part 1

### 1. 理論研究

1. リアルオプションの発見, 創造, real option reasoning (定性的議論)
2. Valuation (定量的議論)
3. 融合, 統合

### 適用(可能)分野 (主に標準的なモデルを用いた定性的な分析)

\* 原油採掘, 電力市場, 創薬, バイオ, \* 市場参入のタイミング\* ジョイントベンチャー (契約に含まれるリアルオプション) \* ベンチャーキャピタリストの各ステージにおける投資の意思決定\* M&Aに関する意思決定\* 海外直接投資\* Complex Entrepreneurial Systems \* 特許競争\* 研究開発の不確実\* Enterprise risk management\* 有機農法への転換\* サプライチェーン マネジメント\* capital structure, credit risk \* A system's architectureの不確実性\* 天然資源開発, \* 環境経済学( 排出権, 水)\* モジュラー化\* 企業の多角化\* 提携戦略の分析\* 不祥事発覚後のCEO後継者の選択\* エタノール工場への投資\* 不動産投資 \* 農業における転作のオプション\* 企業の多国籍化\* フランチャイズ契約に関するゲームオプション\* 森林の育成と伐採のタイミングオプション\* ネットワーク効果の分析\* 研究開発のマネジメント(特に戦略マネジメントのジャーナル)\* 会計報告書の中のリアルオプション価値\* 気候変動の元での小麦生産\* 原子力発電の評価\* ヘッジファンドの非流動性の価値\* 人材開発: トレーニングによるリアルオプションの創造\* ハイブリッドカーの価値評価 (ガソリン価格の不確実性)\* 航空産業のrevenue managementにおけるリアルオプション \* 最適な設備の更新のタイミング(営業利益と, 営業コストの不確実性)\* 天然ガスの保管オプション\* リアルオプションによるキャピタルゲイン課税を考慮した分析\* 会計報告とリアルオプション\* 知財マネジメントの中の, 特許開示戦略\* スポーツチケットの分析\* 資産運用のリアルオプション\* IoT by HBR

5

ジャーナルの種類としては、まずコーポレートファイナンス関連のジャーナルをみました。リアルオプションというキーワードでは、一応、すべてチェックしようということでやりました。リアルオプションには比較的否定的な論文の多いジャーナルも含めてサーベイしております。

カテゴリーとしては、大体、3つに分けられまして、(1)リアルオプションの発見・創造、リアルオプション・リーズニングの定性的な論文と、(2)Evaluationに関わるもので、事例などをもってきて、なんとか定量的な価値評価をしているものがあります。それから、(3)融合、リアルオプションとほかの分野の原理・原則

などとの統合と融合に力を入れたものがあります。原油の採掘や、IoT というものをリアルオプションで評価しましょう、というものもあります。非常に多岐にわたっておりますことから多くの分野、領域に、リアルオプションの考え方が広がっていることがわかります。

次に、実証研究あるいはケーススタディというタイプの研究ですが、これは、90年代に比べるとずいぶん増えたかな、と思います。基本的には、金融市場のデータですとか、マクロ経済データ、財務データ

などを使って、実データからオプションの価値を逆算しようという研究です。

個別の企業について、かなり、しっかりとデータをとって、ケースとしての分析をするというタイプです。実証分析というのは、少ないとは言えますが、そういう中でも、増えてきているとはいえませす。キーワードとしては、不確実性と柔軟性というのがあるでしょう。そういう中で、最適といえるかどうかは別としても、デシジョンとか、リスク管理ということ着目しています。

## ジャーナルサーベイ：主なカテゴリー part 2

### 2. 実証研究/ケース・スタディ

金融市場/マクロ/財務 データなどを用いて、オプション価値を推定  
特定の企業/事業を取り上げてケースとして分析

#### 適用分野

- gold mining: option to close: sequential option
- 不動産リーステナント会社の倒産時に発生するリアルオプション(keep, abandon, transfer)
- 薬の分野のアンケートサーベイ研究
- 1980年代に起こった、IBMのプラズマからLCDへの転換(技術の変遷の伴う業態の変換)
- 日本企業のインドへの展開に関する実証
- 原油価格と油田開発(Texasの事例、北海油田の実証、ノルウェー大陸棚油田の実証)
- モバイル通信産業のケース(最適な参入のタイミング決定)
- 家電業界の新製品導入のタイミング
- 新しいITシステムの導入のタイミング
- 不動産開発のタイミング
- M&A(中国)の実証分析
- UKでの為替レート変動の下での輸出戦略
- 原油採掘のリアルオプション in US
- 海外直接投資(南アフリカ共和国)のケーススタディ

6

Journal of Finance からとってきたのですが、リアルオプションによる評価というのは、この20年間において、金融経済学において、一つの主要な研究分野になった、と書かれています。それから実証分析がいくつかあると申しあげましたが、そこでも、特にリアルオプションだけを評価しようとしているわけではない研究においても、リアルオプションの価値が一つの軸として評価されております。このように、ある程度、認知されるようになってきたといえます。一方、先ほど、リアルオプションについて、批判的な文献もあるといいましたが、リアルオプションが実務でのevaluationに、あまり使われていない理由としては、それが複雑であること指摘されています。それから、

当初いわれていなかったのですが、途中から言われたこととして、人間の非合理性とか、組織の意思決定プロセスに存在するバイアスとか、見た目上ありそうなリアルオプションを実際にはないものになっているという、そんな批判が、割とよく共通認識として考えられているといえます。

次に、トレンドとありますが、比較的最近いわれていることですが、何のためのリアルオプションかということで、これは学習だと、そもそも、何が起きているのかわからない中で、いろいろやってみる過程で、何が起きているかを獲得するという意図で使われているということはある程度理論的な観点でやっている。それから、もう一つですが、ファイナン

スが経済学の一分野であるという認識にたてば、経済学でいわれている様々な重要な理論というものと、不確実性下の柔軟性、リアルオプションというものを両方考えるということが、いろんな立場で、コーポレートファイナンスの一分野として議論されています。そういう議論が非常に増えてきていると思います。最近では、resource-based view など、経営学か

らの視点がでてきております。取引費用の経済学、行動経済学、行動ファイナンスとリアルオプションという話などがでてきております。あるいは、OR といいますか、制御の話との関連で、議論されている論文も、OR 系ではでてきております。

## 最近の理論トレンド

- ✓ 学習(learning)
  - ✓ 組織の情報取得のためのリアルオプション
- ✓ 経済学の重要な概念との融合, 統合
  - ✓ 情報の経済学エージェンシー理論(情報の非対称性)
  - ✓ Real Option and Games (game theory, industrial organization, contract theory)
  - ✓ 産業組織論
  - ✓ resource based view : 資源ベースの経営戦略
  - ✓ transaction cost 取引費用の経済学
  - ✓ 行動経済学
- ✓ 制御理論との関連
  - ✓ フィードバックコントロール
  - ✓ ロバスト制御

9

最後のページですが、90年代に、リアルオプションというアイデアが認知されたころには、10年ぐらいで、すべての企業が、リアルオプションを採用するだろう、と当時、やはり言葉として言われた面があって、いま、振り返ってみると、とてもそういう状況ではないわけですが、そこで、ここにある難しさということで、2点あげております。ひとつは、規範的(normative)な問題なのか、descriptiveな問題なのか、ということが、学術的な分野では分かれて議論されているのですが、リアルオプションの中では混ざって議論されていて、一方で企業の現状はこうなっている、事業のプロセスはこうであるという現状認識の話をして、もう一方でこうあるべきであるという話がときどき混ざっていて、それが認識されない形で議論されているので、話が建設的に進まないということがあるのではないかと、ということがあると思います。

リアルオプションというのは、二つのタイプの分

析方法というか、考え方があって、より優れた意思決定、すなわち、現状がまだ不十分なので、より優れた意思決定のフレームワークを提供すべきだということに重きをおいた話と、過去において成功したある企業の行動がリアルオプションで解釈できるという話、の二通りがあります。ここがときどき誤解を生むような形でからんでいるように見えます。

それから、これからのパネラーの方の話になるかもしれませんが、定量的か、定性的かの話も、認識すべき問題なのかも知れません。

三番目の話ですが、どうに捉えるべきなのか、ということが問題だと思います。リアルオプションというのは、そう簡単には企業には、導入できないのだという話があります。しかし、DCF法についても、かつてはそういわれていたといえます。そうであれば、それを理由にできないというのは、おかしい話であると思います。あるいは、Buzzwordとして、リアルオプションというのは、非常に、一時、魅力的なキ

ワードとして盛り上げられていたのですが、典型的なエンロン事件のあと、ぴたっとその話が止んだといわれています。

一方で、ストックオプションの話が今日もありましたが、ストックオプションの評価というのは、いろいろ実務的な問題があって、普通の「金融オプションの評価よりも難しいといわれます。しかし、2006年に新会計基準が採用されると、突然、ブラックショールズモデルを使ってストックオプションを評価するようになって、恐ろしいほど、盲目的に受け入れられているという現状もあります。あるいは、リアルとは関係ありませんが、リーマンショックのときのCDOという話には、よくよく学術論文をみると、CDOのモデリングがこれでいいと書かれていたわけでは必ずしもないのですが、分かりにくいので、比較的簡単なモデルを使ったがゆえに、しかも、盲目的に、加速度的に使ったがゆえに、失敗したという話もあります。そうすると分かりやすいということを、あまり前面に出すと、大変なことになるのだという示唆もあります。要するに、どこまでこれが実務の現状だということを認めた上で話を進めるべきか、それとも、**descriptive**なものであれば、それを現状認識として、それを **given** として認めてしまえば、次の世界は生まれないわけで、そういった場合には、現状がどうであれ、どうするべきという話をしなければなら

ないと思います。結局、分かりやすいということは重要ですが、一方で、正確さというものも重要であると思います。

### 長谷川 専

今日は、リアルオプション理論、それは狭義の意味のリアルオプションということだと思いますが、それに関連して、実務的な話はどうなっているんだろうというからか、お話しいたします。わたしが、リアルオプションに関心をもったきっかけとしては、わたしは、公共事業、すなわち、インフラストラクチャーの事業評価に携わっておりまして、そのマニュアル作りをしておりまして、そこで経済学の理論と、実務の橋渡しをするようなところの仕事をしておりまして。

そのなかで、リアルオプションという、不確実で、オキシ不可逆で、しかも、意志決定の選択肢をもちうるだけけれども、その当時は、中止オプションしかなかったわけです。やり始めたらとまらない公共事業といわれたなかで、事業評価をちゃんとやって、中止するべきときは、中止する、休止するべきときは休止するというようなオプションなるものがあるという状況を認識しました。「これは事業価値の宝庫だな」というような思いをもって、リアルオプションなるものを勉強しました。

## 実務的活用の困難さ

### ・ 難解な理論

✓ デリバティブ理論(Black-Sholes式)のように、ブラックボックスで実務に活用できないか

### ・ 柔軟であるがゆえに標準化が困難

✓ 各種リスクに対応した多様な選択肢からの意思決定  
=画一的に標準化された意思決定ツールに馴染みにくい

### ・ 理論値の算出に必要なパラメータが推定困難

✓ 特に実物資産の価値に関するボラティリティ

リアルオプションなるものが、ほんとうに、実務でつかわれるのか、のおもいもありました。そんな中で、わたしは、産業界で仕事してきたといいましたが、実は、リアルオプションの講義を、早稲田大学のファイナンス研究科で教えています。その講義では、前半が、一番たいへんで、学生さんも苦勞する理論的なところを私が担当しておりまして、後半の応用で、一番楽しいところは、川口先生が担当するという形でやっ

ております(笑い)。それで、一番苦勞する理論的な部分ですが、教えていて悩むのは、これがどのように、なぜ、実務的に仕事で役にたつのか、ということのうちだししにくいなあ、という面があります。ひとつは難解な理論という点ですが、むかしは、難解な理論を理解できたときには、なるほど、そういうことが、ということとそれなりにひとつの快感ではありました。

## ROAとしての実務的活用

$$Laplace-Transform \\ f(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt$$

### ・実務活用の方向性:

ROA=Real Option Approach?

≠Real Option Analysis

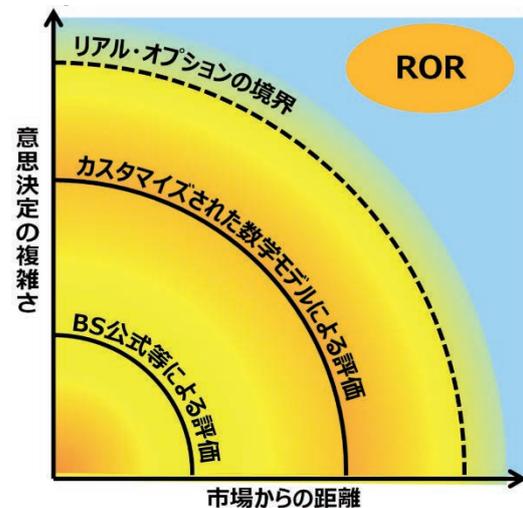
- ✓ リアルオプション理論の「考え方」を踏まえて意思決定を行う
- ✓ それだけでいいのか? → 前頁に戻る: 思考ループ

しかし、ブラックショールズ式のようなブラックボックスになっているものに、パラメータを入れて、その価値については「これが結果や」というふうになってくると、実務的に応用するというのは、なかなか、難しいな、ということになってきます。あとは、金融のことだけでなく、いろいろなものに適用されるということになってくると、柔軟に、価値創造につかえるということになってくると、柔軟であるがゆえに、標準化された意思決定ルールのようなものになりにくい面があると思います。それから、実際に実務に適用しようと思ったとたん、実物資産の価値のボラティリティってなんだ? という話になります。とくに、わたしがよく見ているインフラストラクチャーの話になってきますと、その値段決め自体が、たいへんな話です。最近、ようやく道路など、あるいは、空港など取引されることもあるようになってきましたが、そういうものの値段のボラティリティってどう推定するんだ? というようなところからしまして、理論値を算出するためのパラメータの推定は、なかなか、むずかしいなという話になります。実務的に、いったいどう役にたつんだ、この理論は、という状況で、私が考えるのは、理論に裏打ちされた形で意思決定するといいいですよ、ことだと思えます。すなわち、リアルオプションというのは、考え方が本質であるとおもいます。さきほどから、人生もリアルオプションという話がありましたように、たとえば、男女の交際で、お付き合いしているうちにどう発展するかもしれないとか、結婚の打算とか、いろいろ、リアルオプション的な話に満ちております。すなわち、リアルオプションアナリシスというよりも、リアルオプション・アプローチ、ROA、ということで、私の講義では、説明しております。しかし、ほんとうに、それで終わったしまつていいのか、という迷いもあります。今日のこのパネルディスカッションでは、そのような狭義のリアルオプション理論の意義とか、実務応

用という観点からの位置づけなどについても、話し合うことができたらいいのは、と期待しております。以上です。

### 北原康富氏

わたしは、数理ファイナンスは門外漢ですので、経営学の視点から、リアルオプションについて、お話をさせていただきます。今井先生の研究と実務の現状についてのお話にもありましたが、ここでは、狭義のリアルオプション、広義のリアルオプションの軸を通して、リアルオプションの境界について、お話ししたいと思います。



出所: 「リアルオプションが経営戦略を変える」  
(クラティラカ他、DHB, 2000) に加筆

リアルオプションの一番狭義のところは、意志決定が単純で、市場に近いもので、モデルも市場に近いところにあります。たとえば、商社で、穀物を買って売るとか、エネルギーもそうですね。いわゆる完備市場におけるプライスと、自社の事業価値が直接連動するもの、置き換えられるものという場合には、市場からパラメータを算出して、金融オプションのモデルを使って意思決定する、ということができるとは思いますが、もうすこし、それが離れていくとい

うことがあります。

このグラフは、下の横軸が、市場からの距離、縦軸が意思決定の複雑さをあらわしています。離れていけばいくほど、実務のビジネスで、市場から遠くなっていく経営判断ということになっていきます。

この中間のところの点線の内側になっているところが、いわゆる狭義のリアルオプションが使えるところだといえるところになります。このように、一番市場に近いところから始まって、2番目が、市場で取引される場所の類似の価格が参照できる場所です。たとえば、バイオベンチャー、バイオテクノロジーのプロジェクトが、原資産価格の変動は、バイオベンチャーの株式の変動、これは完備市場で取引されていますから、それを参照して等価とする。ということで、バイオベンチャーのプロジェクトのオプションの評価をする。さらに、もうちょっと複雑な意思決定との組み合わせがある場合には、その意思決定の数学モデルをカスタマイズして、その一部に、完備市場からパラメータとか、金融オプションのモデルなどをもって来る。午前中の森平先生のお話、複雑な意思決定の組み合わせの中で、どういうふうに、特定のモデルを

もってくるかの例が、いくつか、説明されましたが、このようなモデルの使い方の位置づけになるのかな、と思います。

しかし、さらに市場からもっと離れたところで、かつ、経営者としては、オプションがあるという認識のなかで、意志決定がすることがあります。経営活動においてはそういう意思決定が多くあります。そういうところで、最近では、今井先生のお話にもありましたが、定性的な議論のなかで、オプションなるものを考えていく、そして、経営の意思決定に役立てようと、というところで、ROR (real option reasoning) という考え方があるわけです。

ROR には、いくつかの段階がありますが、ひとつは、定量的に測ろうと努力はするんですが、それは必ずしも市場からではなくて、ヒューリスティクスをもとにして、オプションの価値を考慮して、意志決定に適用しようというアプローチになります。

これはブッキング・ドットコムで、あるホテルのプライスです。

部屋タイプ	定員	本日の料金	予約条件
▶ラグジュアリールーム クイーンサイズベッド1台 (ツインベッドルームはリクエスト制) 大人気!  ベッドタイプを選択: <input type="radio"/> ダブルベッド1台 <input type="radio"/> シングルベッド2台  ✨ エアコン 🗣️ 防音 🚪 専用バスルーム 📶 無料WiFi 詳細	2人	1泊2名の合計 <b>¥45,159</b> 本日のスマートセール 込: 消費税/VAT10 % 別: 1名/1泊につき€3.30の市税。	• 返金不可 • プラス¥4,147で朝食追加可
	2人	1泊2名の合計 <b>¥50,804</b> 込: 消費税/VAT10 % 別: 1名/1泊につき€3.30の市税。	• 2016年11月27日までキャンセル無料 • 滞在時に宿泊施設へお支払いください - 前払い不要 • プラス¥4,147で朝食追加可
	2人	1泊2名の合計 <b>¥56,449</b> 込: 消費税/VAT10 % 別: 1名/1泊につき€3.30の市税。	• 2016年11月30日 18:00より前までキャンセル無料 • 滞在時に宿泊施設へお支払いください - 前払い不要 • プラス¥4,147で朝食追加可

いま、キャンセル不可のホテルの値段が4万5千円です。これはキャンセル不可ですから、いま払ってしまえば、オプションはないわけです。

それに対して、2016年11月27日までキャンセル

できますよ、というのは5万円ということになるわけですから、ここではキャンセルオプションの料金が5千円ということになります。それでは、この5千円というのは、fair value なのか、ということですが、こ

れは売る側にとって、当日、空いてしまったのコストを考えて決めているんだと思います。一方、買う側にとって考えてみますと、たとえば、出張費が5万円出るとします。もし確実に出張になるなら、今の4万5千円を抑えて、出張費が5万円が出て、5千円が浮いて、それで飲めるということになります(笑)。

ただ、出張がキャンセルになった場合は、会社からもらえなくなりますから、4万5千円損することになります。それで、出張があるかないかの確率に依存することになりますから、このプライスも、フェアではないわけです。当事者によって、変わってきます。この例では、11月27日までキャンセルできるのが4万5千円で、11月30日は5万6千円ですから、4日間で6千ですから、どうなのかな、と思いますが、このようなプライシングが現実にはなされていることになります。

このような例が、先のグラフで一番上のところに位置づくのですけれど、さらに、このような数字も扱えないような領域があるわけですね。定性的ですが、金融オプション考え方のみを用いて、柔軟性の価値に対する認識をしようということです。それについては、例えばこのようなリサーチがあります。経営者というのは、オプションを内包するプロジェクトを投資の優先順序を高めるのではないか、オプションがあればあるほど高めるんじゃないか、という定性的な議論なんです。たとえば、マグラス (McGrath) が調べたのは、1971年から89年の20年にわたっての製薬会社の特許を調査し、1回目の特許と2回目の特許の関係性を調べました。ある特定の会社の2回目の特許が、1回目の特許を元の特許として参照しているかどうかの関係性を調べました。それによって、2回目の特許をとるための投資行動が一体何に基づいているかということ、マグラスがリサーチしました。まず、1回目の特許での請求項がどれだけ多いかを注目しました。請求項というのは、特許を出したときに、これと、これをプロテクトして下さいという項目ですね。つまり、請求項が多ければ、その特許は、それだけオプションが多いという解釈をしたわけです。それによって、何がわかったかということ、製薬会社は、特許の請求項が多ければ多いほど、会社は、それを使った研究の投資の優先順位を高めるといふ仮説を、実証で分析したということですね。結果的には、ある特許での請求項が多いものほど、製薬会社は、それに基づいた研究開発投資を多くしているということがわかりました。ということは、経営者は、オプションが多いものに対する価値を考えて、投資意思決定をしているんじゃないか、ということになります。

それから、これは、ご存じの方も多いかとおもいま

すが、通常、ステージ・ゲート型の開発ですと、スペックを固めて、開発条件のゲートを順番に通しながら開発していくわけです。トヨタのセットベース・コンカレント開発では、製品の仕様を固定化しないで、例えば図面を最終的に決めないで、ステージを通して設計を進めていき、いいものができたら、最終的に、そこを選んでいくことをしています。つまり、スペックを決めるのをずいぶんと先送りしているというよう開発手法をやっています。これも、オプションを考えた経営行動をしているということになると思います。

そのほか、リーンスタートアップという新規事業のスタートアップ・プロセスがあります。リーンというのは、贅肉のないという意味で、いわゆるリーン生産方式、つまり最小限の生産方式、ロットでやるというリーンと同じ意味です。リーンスタートアップというのは、不確実性の高いベンチャーの企業など、投資に対するリスクが大きいですから、最低限の製品やサービスで試作品をつくって、顧客の反応を見ながら、だんだん大きくしていくということなんです。これを概念的に描くと、この右側にあるのがリーンスタートアップの企業プロセスになります。これはアイゼンマン (Eisenmann) が書いたものです。一番、最初になるのが、ビジネスのアイデアを出すということですね。そして、ビジネスのアイデアを出した段階で、仮説を抽出しています。仮説とは、ビジネスの事業価値を左右する条件です。次に、それら仮説の感度の分析をして、一番、事業価値に大きく影響するものから順番に、テストしながら、例えば、試作品をつくったり、マーケットリサーチを安くしたりして、仮説検証を実施します。検証の結果、NPVが全然、ダメだと、これじゃ売れないということがわかったら、もうやめるか、アイデアそのものを修正するかということですね。これで、一回目の仮説でなんとかいけそうだということになったら、また、次の優先順位の高い仮説を検証していきます。これがある程度、回っていったら、最終的な大きな事業投資をします。これがリーンスタートアップのプロセスなんですが、これは事業価値を概念的にモデル化していくと、例えば、一番目、最初にアイデアがでたときは、非常のマイナスも大きいし、プラスも大きいし、非常に大きなリスクともなっているわけです。しかし、たとえば、2番目の②のところですけども、仮説検証を実施して、実は、これはあまり売れないことが分かったとか、マーケットも小さいとかがわかったとしましょう。ここで、横軸がNPVで、それに確率分布ですね。そうすると二番目になると、もう、NPVがマイナスの領域であるわけですから、リアル

オプションでいうと、**out of the money** ですから、こうなったときには、事業を中止するか、アイデアそのものを止めるかということですね。そうして、3番になっていって、最終的に全部の仮説をやると、これちょっと極端な例ですけど、ぎりぎり儲かるけれど、損もあまりしないか、ということで、じゃあ、まあやってみるか、というようなことで、リスクをヘッジしながら、最終的に大きな投資をすると、Nにいつてから、投資をするということですね。ただ、これをまあ、一番目でやっちゃった方が、大化けする可能性があるんですけど、まあ、下の下限のリスクをとらないために、順番にやっついていこうと、こういうのが仮説検証型のプロセスで、ここでも、**ROR** としての行動にもとづいているのかな、と考えられるわけです。

最後に、オプションを留保しながら、意志決定するという経営者の行動というのは、我々の生活も、経営者もみんなそうなんです。そうするとですね。なんでもかんでも、リアルオプションで説明できちゃうんじゃないか、という期待もしたくなります。たとえば、オープン・イノベーションを提唱するチェスブロウは、(広義の)リアルオプションを導入することで、安く、どんどん、特許の種みたいなものをとりいれちゃったらいいんじゃないか、とっています。そういう人もいますが、ある研究者は、**ROR** にも限界があって、オプションという考え方を事前に定義できないものについては、**ROR** は適用できないんじゃないか、とっています。たとえば、市場が具体的に、

設定できない基礎技術のようなものとか、それから、技術アジェンダが具体的に設定できない状況が考えられます。たとえば、市場では、こういうニーズがあるんだけど、それを何で解決できるのか、わからない状況です。たとえば、ドローンを使ったタクシーというようなものが、できるかどうか、といったようなことです。これらは、まだ、技術アジェンダというものが、全然できていないわけです。ですから、仮説検証を実行しても、失敗という状態が明確に定義できない、**out of the money** が発生しないということもあるんじゃないかということです。つまり、たとえば、なにか技術的なものを、どんどん作っていくんだけど、永久にそのままの可能性があるんじゃないか、それから、この市場に売れなかったら、他の市場に売ればいいのか、みたいな、失敗というもの、の定義ができない投資プロジェクトです。このようなものについては、**ROR** ではなくて、継続したプロセスということをしていくべきで、あまり、オプション的な考え方は利用できないということになります。

以上、リアルオプションの境界に着目したお話ししました。金融オプションのモデルの境界、パラメータと数学モデルが使える限界、さらにその外側の定性的なオプションの考え方が使える限界というところについて、少しご紹介させていただきました。ありがとうございました。

## 小林孝明氏

わたしの方は、本業は金融機関、特に銀行が多いのですが、新しい事業開発の調査や研究、コンサルティングや執筆活動をしています。最近、アンチマネー・ローンダリングや、データガバナンスのような新しいテーマの調査研究・執筆を中心に活動しております。そういうわけで、リアルオプションからは相当離れておりますので、昔を思い出しながら、自分がリアルオプションと、最初どのように関わってきたかを思い出しながらお話させていただきます。

もともとは、企業 valuation や、M&A を実施する際に、リアルオプションをツールとして、狭い意味でのリアルオプションの手法を道具として使って企業評価をしていくときに、非常に役に立つと理解した記憶があります。しかしながら、本日すでに、3名の先生のお話にて、リアルオプションはツールとしてのメリット・デメリットが、いろいろ指摘さ

分類	米国アクチュアリー協会サーベイによる、着目リスク
経済的リスク	<ul style="list-style-type: none"> <li>原油価格の高騰</li> <li>米ドル価値の急落</li> <li>中国経済のハードランディング</li> </ul>
環境的リスク	<ul style="list-style-type: none"> <li>気候の変動/水資源の枯渇</li> <li>熱帯低気圧による自然災害/暴風雨による自然災害</li> <li>地震による自然災害</li> </ul>
地政学リスク	<ul style="list-style-type: none"> <li>国際テロ/大量破壊兵器の拡散/民族間の紛争・内戦</li> <li>地方自治体の破綻</li> <li>巨大な組織規模の犯罪や腐敗</li> </ul>
社会的リスク	<ul style="list-style-type: none"> <li>パンデミック/感染性疾病の流行/慢性疾患の増加</li> <li>人口構成の変化 (Demographic shift)</li> <li>政権や規制枠組みの失敗</li> </ul>
技術的リスク	<ul style="list-style-type: none"> <li>サイバーセキュリティの欠陥/システム統合の失敗</li> <li>磁気嵐によるコンピュータへの影響</li> </ul>

出所: "Risk Manager Survey of Emerging Risks"より筆者作成

れました。例えば、複雑であり一目で理解できないとか、リアルオプションで計算してもなんだか、煙に巻かれたような感じで、あまり説得力が無いのではないかと、という問題などがあります。それから、バイアスという話もできました。すなわち、経営者の恣意性が排除できず、中立性をもって評価ができないのではないか、ということが懸念として残っている点で

す。

そのような中、私はリアルオプションをどのように考えようとしたか、という点ですが、それは、どちらかという定性的な考え方として、経営の思考の中に、“リアルオプション的な思考”を浸透させよう、という取り組みです。具体的には、経営の投資判断とか、撤退判断とかは、経営者であれば、無意識の内に、そのような感覚は持っていると思います。私のアイデアでは、むしろリスクの側面に着目し、リスクをテイクするか、テイクしないか、ということを実際のリアルオプションとして捉えようという考えです。このようにリスクを積極的に評価していくといった考え方にリアルオプション的な考え方を応用したいと考えております。

例えば、最近ではリスクアペタイト (risk appetite) という言葉が、金融機関などにおいてかたられるようになっております。

従来のリスク管理の教科書などでは「リスク選好」と良く訳しておりますが、いまどきであれば「リスクアペタイト」で十分通じるほど、経営者にとって馴染みの経営用語になりつつあります。次に、二つの考え方を整理してみたいと思います。

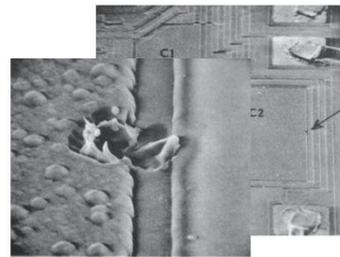
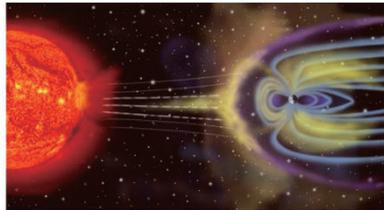
まず、どういうリスクに対して、リアルオプション

的な思考を適用していくのが良いか、という話です。リスクの種類も、色々あります。与信、倒産リスク、あるいは財務リスクなど、これらは、すでにいろいろな管理手法が確立しておりますので、そこに対して、リアルオプションを適用しようとしても、なかなか、メリットは得られません。そこで、わたしが取り組みたいと思っておりますのは、新しいタイプのリスクに対して、その考え方を適応していこうという考えです。具体的には、エマージング・リスクというリスクの種類です。新しく出てきたリスクということです。これについて、米国のアクチュアリー協会が、毎年サーベイをやっており「どういうリスクをエマージング・リスクとして着目しているか」を経営者にアンケートをとっています。

たとえば、経済的リスクに分類されている「原油高の問題」や「中国経済のハードランディング」などは、いまどきの社会情勢を反映した新しいリスクだといえます。また社会的リスクにある「パンデミック」なども、日本では数年前より着目されており、確かに、新しいリスクだと理解できると思います。ところで、一番下にある「磁気嵐によるコンピュータへの影響」というのがあります。これは私も初めは何だろう? と思い、調べてみました。

#### ■1989年3月の磁気嵐

ケベック州大停電地磁気の変動は、カナダのハイドロ・ケベック電力公社の電力網のブレーカーを落とし、行き先を失った電流は、より抵抗の低い送電線に流れ込んだ。そして、送電網は90秒以内に非接続状態になり、ケベック州に2度目の大停電を引き起こした。電源消失は9時間続いた。



出所: "Impact of Space Weather on Human Technology"より筆者作成

日本にはあまり影響が無い可能性があるのですが、北米地域などの緯度の高い地域で影響が強いリスクだそうです。具体的には、太陽フレアが発生すると、磁気嵐が起こり、地球圏に及びます。そうすると磁気の影響によってコンピュータの回路など電子機器が影響を受け、以下の右側の写真のように、回路が切断してしまうのです。米粒より小さな世界の出来事なので、前ぶれなくコンピュータがシャットアウトしてしまうという現象です。

1989年に磁気嵐により、カナダの送電所でこのような事象が発生したことで、送電ネットワークが過電流をおこし、大規模・長期間の停電に繋がりました。日本の場合、ここまでの被害はないそうですが、コンピュータが狂ってしまう程度のことはあるそうです。

地域によって、どのようなリスクを優先して管理すべきかは、あらかじめ取捨選択する必要があります。たとえば、日本で、どのようなリスクを想定しなければならないかを考えてみます。参考になるのは、内閣府の中央防災会議ではないでしょうか。

■近年の中央防災会議での議論結果

議題	概要
政府における総合防災訓練等	首都直下地震等大規模災害発生時に、中央銀行や主要な金融機関等の <b>経済中枢機関</b> 及び電力、通信・情報、道路等の <b>ライフライン・インフラ事業者</b> 等の業務継続性を確保するため、関係機関やライフライン・インフラ事業者等は、各分野（業界）別に、又は、応急対応のテーマ別に、業界横断的な訓練の実施に努めることとし、各分野（業界）等の事業者を所管する府省庁等は、各事業者において訓練が実施されるよう積極的に働きかけるとともに、必要に応じて合同で訓練を実施するよう努める。
行政中枢機能の維持に係る緊急対策実施計画の策定	行政中枢機能（中央省庁）の維持のための緊急対策実施計画として策定。 本文書にて以下のように被害を想定している。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>停電、電話不通</b> : 1週間継続</li> <li>・ <b>地下鉄運行停止</b> : 1週間継続</li> <li>・ <b>JR、私鉄運行停止</b> : 1ヶ月継続</li> <li>・ <b>主要道路不通</b> : 1週間継続</li> </ul>

国内経済の中枢機関とか、ライフライン維持管理に携わるインフラ事業者の方々は、常に BCP（ビジネス・コンティンジェンシー・プラン）という、災害が起きたときにどうやって事業を継続するかという訓練が必須とされています。しかし「インフラ事業者とは、どんな業種か」については何も定義されていないんですね。そうすると自分たちがなにかのメーカーであったときに、もしかしたらインフラ事業者と

んですけど、「これくらいの災害が起きるということ」を想定して、自分たちの事業のプランを考えてください。そういうようなリアルオプションを考えて準備をしてください」という意味です。

ところで、このような大災害に対して、どのような備えをするべきか、ということなんですが、例えば、リスク被害額を引き当てするとかいうのが、一番わかり易い例であると思います。実際、従来より財務会計上、様々な引当金を計上しています。

金融機関では、大口先の倒産や、大規模システム障害、あるいは上記のような大災害に備えて引当てしておきなさいという、法制度があります。具体的に、どの様に定義されているか見てみます。

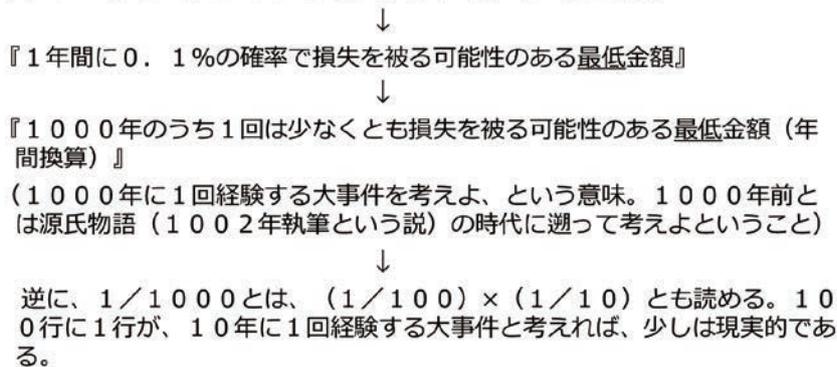
大災害に対する引き当て方法としては、オペレーショナル・リスクというカテゴリーがあり、規制で決められている。オペリスクの場合、「片側 99.9%の信頼区間で 1 年間に予想される最大損失の金額を引き当てしなさい」と、これだけの数字しか書いてありません。こういうのを分解して考えてみます。たとえば、99.9%ということは、1 年間に 0.1%の確率で発生する可能性のある金額を積んでおけばいいことになります。1 年間に 0.1%の可能性ってなんだろうとい

うことになりませんが、逆に考えると千年のうち1回起こるような損失ということなんです。単純計算ですけど、千年というと、みなさんご存じかも知れませんが、源氏物語が作られたときがちょうど千年前と言われています。そんな時代から数えて、最大の地震を考えましょう、ということで、非常に、非現実的なことになります。そこで、もっと分解していくと、一番下の 1000 分の一というのは、100 分の一×10 分の一、というように

考え、100 行に一行の銀行が 10 年に 1 回、遭遇するような大規模の事象を考えて見積もりなさい、と理解できます。そのように考えると経営者の方には、わかりやすくなります。ですから、難しい方程式で考えなくても、わかり易く考えることで、どれくらいのリスクが自分たちに及ぶ可能性があるかを把握することは大切だと思います。

このように難しい数値計算はしなくてもいいというのが、私の個人的な考えです。難しい計算をしても

■ご参考) オペレーショナルリスクの定義『片側 99.9%の信頼区間で1年間に予想される最大損失に相当する金額』



いってもよいかもしれない、と考えた場合、積極的に「自分たちも、関係あるかもしれないから積極的にリスク管理してみよう」ということがあってよいのではないのでしょうか。

ここで、下側ですが、対策をするときにどれくらいの被害を想定すれば良いかの参考例です。たとえば、地震が起きたというときに、停電が一週間続くと考えましょう、地下鉄とか、JRでも、一週間とか、一か月です。相当程度の大災害が起きたという想定な

その通りに起こるとは限らないし、説得力があるともかぎりません。実は、昔の哲学者がすごくいいことを言っています。テューキーという哲学者は「精緻で間違っている式よりも、漠然として正しい答えの方がましだ」と言っています。まずは、漠然としたものでもいいから、どのくらいの被害額があるのかな、どれくらいのリスクが隠れているのかな、というものを経営のオプションとして把握するというのを考えていくことが重要。それをどういう風に計算するかというツールの話は、それから先でもよいと考えております。

## 司会者

ありがとうございました。

以上、4人の方々から、それぞれのお仕事や、ご専門の目から、これまで、リアルオプションというものと、どのようにかわり、また、いまは、どんな見方をされているかについて、お話をいただきました。

それで、ここで、フロアーの皆さまから、ご自由に、ご意見、問題提起などをお願いしたいとおもいます。

## 発言者1-青木克人氏

冒頭で恐縮でございます。三井住友信託銀行の青木でございます。リアルオプションについては、2001年の春、日本IBMに勤務しているときに、ITコンサルをやっけて、IT投資の評価になにか有用なツールはないか、ということで、勉強して、2002年の4月に埼玉大学の大学院にいきました。その間、2006年の7月28日にリアルオプション学会ができました。その後、2007年3月に、博士号をいただいたんですけども、冒頭ありましたように、リアルオプションが割合と普及しない、理由のひとつとして、一点、四方のパネラーのかたがたがふれられていない、ということがありまして、それについて、少し、述べさせていただきます。要は、定量的でも、定性的でもいいから、オーソライズされる場がないというのがひとつでございます。わたしは、別のはなしですが、気象予報士の資格をもって、気象界の天気予報も、一つの未来の不確実性を扱う学問です。天気予報には、昔は無かった確率予報というものができました。現在の天気予報には、アンサンブル予報というものがありまして、気象庁は、松竹梅の予報を出しているんですね。これがオーソライズされて、これが、この確率でこの天気になって、この確率でこの温度になって、この理由はこうです、というように、narrativeでもいいし、定量的であれば理想的なんです、財務会計、管理会計、または、

IRの世界、IRですと、特記事項の欄に、narrativeでもいいから、たとえば、ここにこの投資をするのに、この撤退オプションの考えでやっているんです。まあ、オリエンタルランドさんが、ディズニーランドをつくるにあたって、最悪、この事業が失敗したら、浦安の住居に転用する契約を結んでいた話は、有名な話だと思います。そういった話でも、これがリアルオプション的な考え方で、こういうふうに行っているんだということが、オーソライズされる部分が、残念ながら、感じられないなというところがなかなか厳しいとおもいます。ひょっとすると政治的な問題なのかもしれません。ただ、学術的に会計学をやっている先生方であれば、そういった規則をつくる場所にも参画している方もいらっしゃると思うので、そういった観点でも問題提起を一点だけつけ加えさせていただきます。

## 発言者2-宮原孝夫氏

名古屋市立大学の宮原でございます。今日のお話で、北原さんのお話、非常に、関心を持ちました。私は、もともと、数理ファイナンスで、この学会ができるときに参加させてもらったんですが、その理由は何かと言いますと、数理ファイナンスは、完備市場、ブラックショールズ、それから非完備市場、それからその時の評価をどうするか、というのが基本であって、それから外れたものですね。さきほどの北原さんの話ですと、市場に近いものもあるが、市場から離れたものをどう評価するか、それがリアルオプションの本来の一番の目的であったというふうに、理解しておりました。それをリアルオプションを研究しているひとたちが、どういう新しい理論をつくって、どういう評価法をやっているかということに期待したんですけど、それからすると、いろいろ聞かしていただく話が、必ずしも、あまり多いとは言えなかったと思います。いろんな分析をされているんですけども、それらを無理に、ブラックショールズモデルだとか、本来だったら、裁定理論を適用できる世界で使われるべきものに、無理に合わせてやろうとしている傾向があり、それが不満でした。私自身、できればそういうものとは違った評価法をつくりたいとおもって、今日のお話には、そういうところができて、それが大事だと思います。このパネル討論のテーマとして、「これからのフロンティア」とありますが、リアルオプションのところ、市場から離れたような、あるいは、適切な市場がない、裁定理論が使えないようなところで、どういう評価があるのか、ということが、非常に大事なことで、とおもいます。

**発言者 3-後藤允氏**

北大の後藤です。若手ということで、お話させていただきたいんですが、私は2000年、2001年頃は、まだ大学院生でしたが、その頃、高森先生が主催されていた月例の「金融技術と経営」研究会に出ておりました。それが、リアルオプション学会の前身でしたが、その頃は、高嶋先生とか宮口さんと一緒に参加させていただいておりました。当時はまだ、修士の学生でした。2006年には本学会が創立されましたが、以来、今日までリアルオプションに関連する研究に勤しんできました。もう10年になることを振り返ると感慨深いものがあります。先程は、宮原先生にお叱りを受けまして、期待に応えられなかった研究者として今、ここに立っております。皆さんがおっしゃったことですが、リアルオプションは、まずは扱いにくい、分かりにくい、ということがあります。それは実際そうだと思います。私も、理系でしたので、学ぶときは、数学から入ります。なので、人に説明するときとか、自分の研究も数学に根づいているんですけど、今は北大で教えているんですが、それは経済学部の学生で、文系なのですが、特に、会計大学院ですので、学生に教えるには数学に頼りません。そういう学生にどうやって教えよう、と考えたときに、数学をやめよう思っております。これは、明日のチュートリアルセッションでも、お話させていただくんですが、すべて離散に話を落として、積分とか、微分方程式とかを使わないことにしております。「四則演算による」という話で、リアルオプションの考え方とか、概念を簡単に理解してほしいということで、今、取り組んでおります。本来でしたら、宮原先生がおっしゃったような新しい格付け理論のようなことを研究したいところを、ちょっと、退化したようなお話になってしましますが、皆様方にも聞いていただいて、もっとこうしたほうがいいのか、などご指導をいただければありがたいと思っております。

**発言者 4-高嶋隆太氏**

東京理科大学の高嶋です。今日は、懇親会の司会もやりますので、ここでは、あまり目立たないようにしたいと思っております。私も、後藤先生がおっしゃった月例の「金融技術と経営」研究会に、大学院生としてでておりました。このころ、その研究会に講師として講演されていた方々が、今日、この場にも、何人かいられて、たいへん、懐かしい思いです。あのころから結構経ちますが、わたしも、そのとき、そのとき、リアルオプションについての考えがかわりました。それで、いま、思ってきているのは、さきほど、宮原

先生もお話になられたことですが、リアルオプションをエンジニアリングとして考えていなかったのではないかとことがあります。これについては、むしろ、今井先生からお話がある方がいいかもしれませんが、アカデミックな世界で、リアルオプションを使った研究で、こういうことがすばらしいんだよ、こんなことをやったら、リアルオプションはすばらしい研究だよ、というところの位置づけが、どちらかというと、難しい経済学の理論を使って、企業の行動を証明するというが多かったと思います。ですから、いまままで、企業がこんな行動をしてきたということ、特に、不確実性下で、企業がやってきたこと、意志決定してきたことを、今までの理論として証明できなくて、また、説明できなくて、それをリアルオプションを使うとできる、というような研究が、私がやってきた研究の領域では、多かったのではないかと思います。そこで、いまにいたっておもうのですが、リアルオプションというのは使えるはずなんだけれども、そういう方向への努力が足りなかったのではないかと、思います。それで、北原さんのお話ですが、あれこそが、エンジニアリングに近いというふうに感じます。どうやって、使うかということを考えないと、研究者含めて、リアルオプションというのは、使っていけないと思います。理論も大事ですが、やはり、データというのも、大事だと思います。今井先生もおっしゃいましたが、徐々に、実証研究はふえてきていると思います。「ここにリアルオプションがある」という研究が、分野を問わず、結構あります。ですから、そういうデータ分析と、リアルオプションを使うにはどうしたらよいか、というエンジニアリングとしての考え方が重要だと思います。流体力学で、飛行機を飛ばす研究をしますが、それと同じで、飛行機がとばなければどうにもならないのですから、エンジニアリングの理念、心をもって、リアルオプションは、どう使われたらいいのかに、しっかりと取り組むのが大切であると思います。

ここらについて、パネラーの方々、とくに、今井先生にコメントいただけたらありがたいです。

**パネラーからのコメント****今井氏**

非常に難しい質問をうけました。後藤先生、高嶋先生のところで、お互いに相対する考え方がでたかと思えます。エンジニアリング的に使いたいというのは、私も、理工系の出身なので、すごく思っています。それが、いまままで出来ていなかったのは、自分に実力がない、ことがあります。やはり、そちらの方向へ努力をしなければいけないとは思っています。その辺に

もかかわるのですが、後藤先生がおっしゃっていたところですね。私も、まったく同じで、最初は、数学というか、金融デリバティブのところから勉強をはじめたこともあって、リアルオプションの話も、わたしにとっては、数学的な方向から見るというのは、新鮮というか、やりやすいという面があります。現在は、理工学部におりますが、かつては、経済学部におりましたし、総合政策学部におりました。そういうときに、リアルオプションの話をするときに、いかに、たいへんかということは重々知っております。一方で、いま、理工学部にいて思うのですが、われわれは、ある一定の割合で、数学ができて、かつ、リアルオプションに興味をもつ学生を育てなければいけないと思います。最初、私がコーポレートファイナンスを勉強したときに、「自分は数学が分かんないから、ここは分からなくていいんだ」というような矛盾的なことを、先輩方や、実務の方にいわれて、それはおかしいだろうとおもいました。難しいから自分はわからなくてもいいが、それは常識だ、というようなことにすごく反発した記憶があります。数学が分かれば、リアルオプションは解決するわけでは全然ないのですが、わたしは、依然として数学の重要性は訴えたいな、と思っております。

### 長谷川氏

さきほどの北原先生のお話、ほんとうにそうだなあ、と思いつつ聞いておりました。それで、限界という話がありましたが、ほんとうにそれを所与のものとして受け入れていいのかな、というところに悩み深いものがある気がします。今井先生のお話には、昔は、DCFもそうだったようね、という話がありました。でもCDOみたいに使い方を誤るとたいへんなことになってしまう、というような話もあり、まあ、悩みは深まるばかりなのかなあ、とおもいます。また、高嶋さんから、「エンジニアリングとして、リアルオプションをどう使うの?」という点がありましたが、今日のセミナーでの堀江氏の話に、一体、何のためにリアルオプションを研究しているんだ、別に、リアルオプ

ションをやりたいから、リアルオプションを導入するのではないだろう、ということではないでしょうか。企業価値を高めたいという中で、それが一つのオプションであるともいえます。それについて、投資家なり、経営者に、気づいてもらうようにしないと、進んでいかないように感じます。そのところは、「もう限界だね」と終わってしまう可能性もあるわけです。そのところを、投資家なり、経営者に、どう説明していくか、という中に、エンジニアリング的な視点で努力する余地があるのではないのでしょうか。理論はよくわからないけれども、とにかく、こういう考え方で、こうなんだということをいっていくのが、重要なのかな、と思います。

### 司会者

さて、たいへん、充実した熱心なディスカッションをしていただきました。皆さんのお話を聞きながら、わたしのところに大きく浮かんできた思いがあります。それは、まだまだ、フロンティアなるものが、われわれの前にあるのだ、ということです。今日の堀江氏のご講演では、日本の産業は、資本の生産性が低いというお話がありました。安倍首相も、日本の産業の成長と発展のために、いろいろな方策をもって、尽力していられます。リアルオプションこそ、不透明で、リスクに満ちた未来をまえに、価値創造の投資戦略を支援することを基本テーマとします。資本の生産性が低いということは、価値創出への活力が、まだまだ、弱いということではないでしょうか。宮原先生からは、学会創立当初から、先生が期待していたような研究がなされてこなかったではないか、とお叱りを受けました。本学会の研究者にとっても、産業界の実務家、経営者にとっても、我々に必要なのは、リスクには適正な評価をしながら、価値ある事業投資を発見し、創出して、活力ある元気な産業社会にむけて、貢献したいという心と熱意ではないでしょうか。われわれのまえには、まだまだ、挑戦すべき、フロンティアがあるのだ、ということをお話していただいたパネル討論でした。ありがとうございました。

〈JAROS2016 研究発表大会 チュートリアル 2016年11月20日(日) 於: 中央大学後楽園キャンパス〉

## 四則演算によるリアルオプション

後藤 允

(北海道大学大学院 経済学研究科)

### 1. はじめに

リアルオプションという名称は、1977年に Stewart C. Myers によって命名されたといわれる。プロジェクトや設備などがもつ柔軟性(選択肢の幅)は、実物資産(real asset)から派生するオプション(option)と解釈でき、金融オプション理論を実物資産の世界に応用したものというのが、リアルオプションの由来である。

今日では、リアルオプションは実経済において数多く存在し、汎用性の高い考え方であるといえる。その反面、理論的な難解性も併せもつため、学生や実務家にとってはよく分からないというのが実情である。例えば、ブラウン運動や偏微分方程式などのオプション理論の応用、最適化問題や確率制御問題その他の数学的なハードルが数多く存在する。

そこで、本稿では数学的なハードルを下げるために、離散モデルによって議論を展開する。具体的には、二項モデルを利用することによって、数学は四則演算のみで、グラフによる視覚的な解法を用いる。これによって、ブラウン運動、偏微分方程式、積分を使わずに、不確実性とは何か、戦略とは何か、価値とは何かといったリアルオプションの概念を理解することを目的とする。

### 2. リアルオプションの投資例

まずは以下の例を考えよう。

**例 1** 新製品開発プロジェクト ある企業が新製品を開発し、市場調査を終えて市場への投入を検討している。市場調査の結果、

- 新製品の投入には、広告宣伝費などの投資費用が100億円かかる
- 現在の潜在需要から、投入後の予想総利益は120億円である
- 1年後には潜在需要が膨らみ、利益は1.5倍になる
- しかし、他社から類似製品が販売される可能性が50%ある
- その場合、利益は半減する

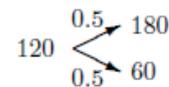
ということが分かった。この企業は、新製品を即座に投入すべきか、あるいは1年待ってから判断すべきだろうか。

この例は、典型的なリアルオプションの投資案件であるが、NPV法に従えば、

$$NPV = 120 - 100 = 20 > 0$$

となって、即座に新製品を投入すべきとなる。もちろん、これでは1年後の不確実性を考慮できていない。

例1の予想総利益の不確実性を考慮するために、1期間二項モデル



を利用する。さらに、投資によって得られる価値の二項モデルを考えると、

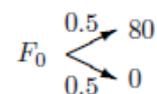
$$NPV = 20 \begin{cases} 0.5 & 180 - 100 = 80 \\ 0.5 & 60 - 100 = -40 \end{cases}$$

となり、利益が上がった場合は投資する価値があるが、下がった場合は投資する価値がないことが分かる。

次に、1期間待ってから投資を判断する場合の価値  $F_1$  を考える。価値が上がっていれば投資して80を得て、下がっていれば投資しないので、1期間後の利益を  $V_1$  とすると、

$$F_1 = \max \{ V_1 - 100, 0 \}$$

となり、これは正にオプションのペイオフを表している。プロジェクト価値の二項モデルは、



となり、リスク調整済み割引率を  $\rho = 0.25$  とすると、現在のプロジェクト価値は

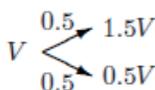
$$F_0 = \frac{E[F_1]}{1.25} = \frac{0.5 \times 80 + 0.5 \times 0}{1.25} = 32 > NPV$$

と求められる。例1の結論は、リアルオプションによる価値評価によって、現時点では投資せず、1期間後に利益が上げれば投資する。

### 3. リアルオプションの離散モデル

#### 3.1 1期間モデル

ここからは、投入後の予想総利益を一般化して、プロジェクト価値 $V$ とする。1期間二項モデルを $u = 1.5$ 、 $d = 0.5$ 、 $p = 0.5$ 、



とする。ただし、1期間後にプロジェクト価値が上がった場合は投資する価値があり、下がった場合は投資する価値がないとすると、

$$1.5V - 100 > 0, \quad 0.5V - 100 \leq 0 \\ \Rightarrow 66.7 < V \leq 200$$

の範囲で考えることになる。

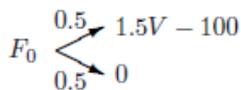
$t = 0$ で即座にプロジェクトを開始する価値は、

$$NPV = V - 100$$

となり、 $t = 1$ まで待つてから投資を判断する場合の価値は

$$F_1 = \max \{V_1 - 100, 0\}$$

となる。プロジェクト価値の二項モデルは



となり、現在のプロジェクト価値は

$$F_0 = \frac{E[F_1]}{1 + \rho} = \frac{0.5 \times (1.5V - 100) + 0.5 \times 0}{1.25} \\ = 0.6V - 40$$

となる。

リアルオプションによるプロジェクト価値を NPV と比較してみると、

$$NPV - F_0 = 0.4V - 60$$

となり、図1のように $V$ の水準によって正にも負にもなる。すなわち、 $V \geq 150$ のとき即座に投資する。NPV法によれば、 $V > 100$ のとき即座に投資するので、 $100 \leq V < 150$ のときに待つことにリアルオプションの意味があるといえる。プロジェクトへの投資戦

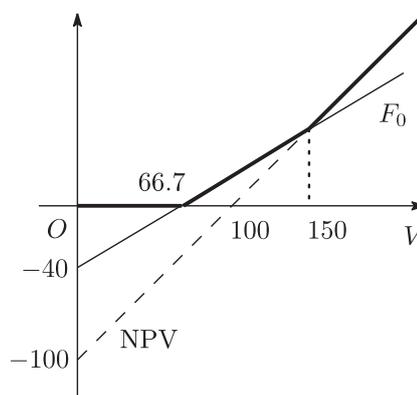


図1. リアルオプションの価値

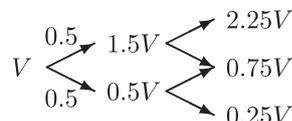
略をまとめると、

$$F = \begin{cases} 0 & V < 66.7 \text{ のとき, 投資しない} \\ F_0 & 66.7 \leq V < 150 \text{ のとき,} \\ & \text{1 期間待つて上がったら投資} \\ NPV & V \geq 150 \text{ のとき, 即座に投資} \end{cases}$$

となる。

#### 3.2 2期間モデル

次に、予想総利益の変化を2期間に拡張する。前項とパラメータ $(u, d, p)$ は同じとすると、2期間二項モデルは



となる。ただし、プロジェクト価値が2回上がった場合は投資する価値があり、2回下がった場合はないとすると、

$$2.25V - 100 > 0, \quad 0.25V - 100 \leq 0 \\ \Rightarrow 44.4 < V \leq 400$$

の範囲で考えることになる。このとき、1期間の場合の戦略は不変だろうか。変化が2期間の場合、1期間後に価値が下がったとき、2期間後に価値が上がる可能性がある。したがって、新たに2期間後まで判断を待つという戦略が存在する。

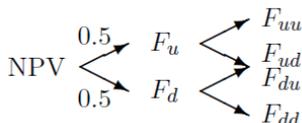
ここで、2期間の場合のすべての戦略を考えよう。プロジェクト価値の上下を下付き文字 $u$ 、 $d$ で表すと、すべての戦略は

- $F_u$ : 1 期間後に上がったら投資する
- $F_d$ : 1 期間後に下がったら投資する
- $F_{uu}$ : 2 期間で2回上がったら投資する
- $F_{ud}$ : 1 期間後に上がって2 期間後に下がったら投資する

$F_{du}$ : 1 期間後に下がって 2 期間後に上がったら投資する

$F_{dd}$ : 2 期間で 2 回下がったら投資する

となる。ただし、仮定より  $F_{dd} = 0$  である。これらを二項モデルで表せば、



と描ける。

各戦略の現在価値を計算すると、

$$NPV = V - 100$$

$$F_u = \frac{0.5 \times (1.5V - 100)}{1.25} = 0.6V - 40$$

$$F_d = \frac{0.5 \times (1.5V - 100) + 0.5 \times (0.5V - 100)}{1.25}$$

$$= \frac{V - 100}{1.25}$$

$$F_{uu} = \frac{0.5^2 \times (2.25V - 100)}{1.25^2} = 0.36V - 16$$

$$F_{ud} = \frac{0.5^2 \times (2.25V - 100) + 0.5^2 \times (0.75V - 100)}{1.25^2}$$

$$= \frac{0.6V - 40}{1.25}$$

$$F_{du} = \frac{0.5 \times (1.5V - 100)}{1.25} + \frac{0.5^2 \times (0.75V - 100)}{1.25^2}$$

$$= 0.72V - 56$$

となり、明らかに

$$F_d < NPV, \quad F_{ud} < F_u \quad (1)$$

が分かる。これは下がってから投資するよりも、その前に投資したほうがよいことを表している。この点については、次節で詳しく調べる。

図 2 は、各戦略のグラフを表している。グラフから、2 期間の場合のリアルオプション戦略をまとめると、

$$F = \begin{cases} 0 & V < 44.4 \text{ のとき, 投資しない} \\ F_{uu} & 44.4 \leq V < 100 \text{ のとき,} \\ & \text{2 回上がったら投資} \\ F_u & 100 \leq V < 133.3 \text{ のとき,} \\ & \text{1 期間後に上がったら投資} \\ F_{du} & 133.3 \leq V < 157.1 \text{ のとき,} \\ & \text{1 期間後に下がっても} \\ & \text{2 期間後に上がったら投資} \\ NPV & V \geq 157.1 \text{ のとき, 即座に投資} \end{cases}$$

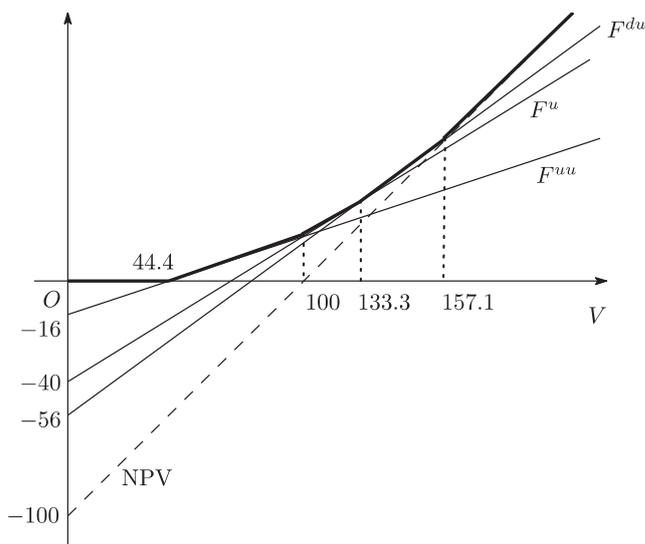


図 2 2 期間モデルの価値

となる。1 期間モデルと比較して、戦略が増えた分だけ折れ線が増えていることが分かる。さらに、投資をしない水準が下がり ( $66.7 \Rightarrow 44.4$ )、即座に投資する水準上がっている ( $150 \Rightarrow 157.1$ )。これらのことから、2 期間モデルは 1 期間モデルよりも、連続モデルに近付いていることが分かる。

### 3.3 割引率と期待成長率

ここで、(1)式の意味「下がってから投資するよりも、その前に投資したほうがよい」ということを詳しく調べよう。パラメータをすべて一般化すると、

$$F_d = \frac{p(uV - I) + (1 - p)(dV - I)}{1 + \rho} = \frac{(pu + (1 - p)d)V - I}{1 + \rho}$$

となり、

$$1 + \mu = pu + (1 - p)d$$

とすると  $\mu$  は期待成長率と解釈できる。(1)式の最初の不等式の一般形は、

$$\begin{aligned} F_d &< NPV \\ \frac{(1 + \mu)V - I}{1 + \rho} &< V - I \\ (1 + \mu)V - I &< (1 + \rho)V - (1 + \rho)I \\ \mu V &< \rho V - \rho I < \rho V \\ \mu &< \rho \end{aligned}$$

となる。すなわち、期待成長率は割引率よりも小さいことになる。もしも期待成長率が割引率よりも大きいならば、必ず待つてから投資するという結果にな

り、リアルオプションの分析に意味がなくなってしまう。これは  $F_{ud} < F_u$  でも同様の結果になる。

### 3.4 連続モデルとの比較

離散モデルの最後に、連続モデルと比較する。まず、即座に投資するかどうかの境目の値のことを閾値という。すなわち、 $F_u = NPV$ となる $V$ のことで、 $V_u^*$ と表す。一般化すると、

$$\begin{aligned} NPV - F_u &= V - I - \frac{p(uV - I)}{1 + \rho} \\ &= \frac{1 + \rho - pu}{1 + \rho} V - \frac{1 + \rho - p}{1 + \rho} I = 0 \\ V_u^* &= \frac{1 + \rho - p}{1 + \rho - pu} I > I \end{aligned}$$

となり、必ず NPV 法の閾値  $I$  よりも大きくなる。

離散モデルをまとめると、

$$F(V) = \begin{cases} 0 & V < V_d^* \text{ のとき} \\ \frac{p(uV - I)}{1 + \rho} & V_d^* \leq V < V_u^* \text{ のとき} \\ V - I & V \geq V_u^* \text{ のとき} \end{cases}$$

$$V_d^* = \frac{I}{u}$$

$$V_u^* = \frac{1 + \rho - p}{1 + \rho - pu} I$$

となる。一方、導出は省略するが連続モデルは

$$F(V) = \begin{cases} (V^* - I) \left(\frac{V}{V^*}\right)^{\beta_1} & V < V^* \text{ のとき} \\ V - I & V \geq V^* \text{ のとき} \end{cases}$$

$$V^* = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} I$$

となるので、両モデルは非常に類似した結果になることが分かる。

## 4. 実行中のプロジェクト価値

前節で考えていた状況は、実行前のプロジェクトに対する投資であり、プロジェクト価値の予想がいくらなら実行可能か、というものである。本節では、実行中のプロジェクトに対する投資を考え、どのような状況になれば増産可能か、あるいはいつプロジェクトから撤退せざるを得ないか、というような状況を分析する。

### 4.1 当期利益とプロジェクト価値

前節ではプロジェクト価値  $V$  が変化したがる、本節で

はプロジェクト価値のもととなる当期利益が変化すると仮定する。 $t$ 期の収益を  $X_t$ 、費用を  $C$  とすると、 $t$ 期の利益は  $X_t - C$  となり、プロジェクト全体の価値は

$$V = \sum_{t=0}^{\infty} \frac{[X_t] - C}{(1 + \rho)^t}$$

と計算できる。 $X_t$  が 1 期間だけ変化し、その後は同じ水準で利益が永続する場合の二項モデルは、

$$X \begin{cases} \xrightarrow{p} uX \longrightarrow \Rightarrow V_u = \sum_{t=0}^{\infty} \frac{uX - C}{(1 + \rho)^t} \\ \xrightarrow{1-p} dX \longrightarrow \Rightarrow V_d = \sum_{t=0}^{\infty} \frac{dX - C}{(1 + \rho)^t} \end{cases}$$

と描ける。このとき、プロジェクト全体の価値は

$$V_0 = X - C + \frac{pV_u + (1 - p)V_d}{1 + \rho}$$

となる。

$V_u$  は初項  $uX - C$ 、公比  $0 < \frac{1}{1 + \rho} < 1$  の等比級数なの

で、

$$V_u = \frac{uX - C}{1 - \frac{1}{1 + \rho}} = \frac{1 + \rho}{\rho} (uX - C)$$

となる。したがって、プロジェクト価値は

$$V_d = \frac{1 + \rho}{\rho} (dX - C)$$

$$V_0 = X - C + \frac{(pu + (1 - p)d)X - C}{\rho}$$

$$= \frac{1 + \mu + \rho}{\rho} X - \frac{1 + \rho}{\rho} C$$

となる。

### 4.2 プロジェクトの拡大オプション

次に、1 期間後に費用  $I$  で規模を 2 倍に拡大する戦略について分析する。拡大したときのキャッシュフローの変化は、

$$X - C \begin{cases} \xrightarrow{p} 2(uX - C) \longrightarrow \Rightarrow 2V_u - I \\ \xrightarrow{1-p} dX - C \longrightarrow \Rightarrow V_d \end{cases}$$

となる。ただし、下がったときは拡大する価値がないと仮定すると、

$$2V_d - I < V_d \Rightarrow V_d < I$$

が条件となる。拡大したときの価値は

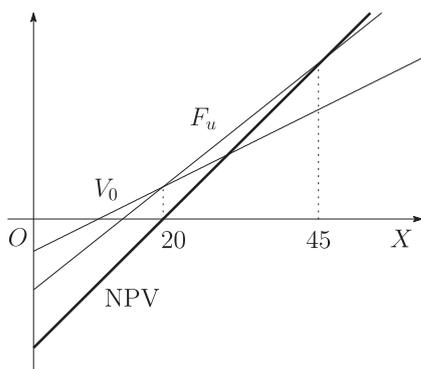


図3 拡大戦略の価値

$$\begin{aligned}
 F_u &= X - C + \frac{p(2V_u - I) + (1-p)V_d}{1+\rho} \\
 &= X - C + \underbrace{\frac{pV_u + (1-p)V_d}{1+\rho}}_{V_0} + \underbrace{\frac{p(V_u - I)}{1+\rho}}_{G_u} \\
 &= V_0 + G_u
 \end{aligned}$$

と変形でき、何もしないときの価値と拡大オプションに分離できる。拡大閾値 $X_u^*$ は、

$$NPV = F_u \tag{2}$$

$$2V_0 - I = V_0 + G_u$$

$$G_u = V_0 - I \tag{3}$$

$$X_u^* = \frac{\rho + 1 - p}{\rho + (1-p)d} \frac{\rho}{1+\rho} \left( I + \frac{1+\rho}{\rho} C \right) \tag{4}$$

となる。(2)式はプロジェクト価値全体から、(3)式は拡大オプションだけから拡大閾値を計算する式である。

ここで、パラメータを $u = 1.5$ 、 $d = 0.5$ 、 $p = 0.5$ 、 $\rho = 0.25$ 、 $C = 10$ 、 $I = 100$ とすると、プロジェクト価値は

$$V_u = 7.5X - 50, \quad V_d = 2.5X - 50$$

$$V_0 = 5X - 50$$

$$G_u = \frac{p(V_u - I)}{1+\rho} = 3X - 60$$

$$F_u = V_0 + G_u = 8X - 110$$

$$NPV = 2V_0 - 100 = 10X - 200$$

$$X_u^* = 45$$

と計算できる。図3は、拡大戦略のグラフを表している。前節の図1と比較して、何もしないときの価値 $V_0$ が基準となっていることが違いである。

プロジェクトの拡大戦略をまとめると、

$$F = \begin{cases} V_0 & X < 20 \text{ のとき, 拡大しない} \\ F_u & 20 \leq X < 45 \text{ のとき, 1 期間} \\ & \text{待って上がったら拡大} \\ NPV & X \geq 45 \text{ のとき, 即座に拡大} \end{cases}$$

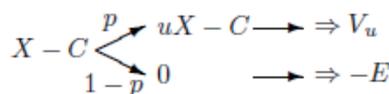
となるが、もう少し変形してみると、

$$\begin{aligned}
 F &= \max\{V_0, F_u, NPV\} \\
 &= \max\{V_0, V_0 + G_u, V_0 + G_{NPV}\} \\
 &= V_0 + \underbrace{\max\{0, G_u, G_{NPV}\}}_{F^+}
 \end{aligned}$$

となり、拡大オプション価値が分離できる。

### 4.3 プロジェクトの撤退オプション

前項とは反対に、1 期間後に費用 $E$ で撤退する戦略を考える。撤退したときのキャッシュフローの変化は、



となる。ただし、上がったときは撤退しないと仮定すると、

$$-E < V_u$$

が条件となる。撤退したときの価値は

$$\begin{aligned}
 F_d &= X - C + \frac{pV_u + (1-p)(-E)}{1+\rho} \\
 &= X - C + \underbrace{\frac{pV_u + (1-p)V_d}{1+\rho}}_{V_0} + \underbrace{\frac{(1-p)(-V_d - E)}{1+\rho}}_{G_d} \\
 &= V_0 + G_d
 \end{aligned}$$

となり、拡大オプション価値と同様に、何もしないときの価値と撤退オプションに分離できる。撤退閾値 $X_d^*$ は、

$$NPV = F_d \tag{5}$$

$$-E = V_0 + G_d$$

$$G_d = -V_0 - E \tag{6}$$

$$X_d^* = \frac{\rho + p}{\rho + pu} \frac{\rho}{1+\rho} \left( \frac{1+\rho}{\rho} C - E \right) \tag{7}$$

となる。拡大オプションと同様に、(5)式はプロジェクト価値全体から、(6)式は撤退オプションだけから撤退閾値を計算する式である。撤退閾値(7)と拡大閾値(4)を比較すると、ほぼ対のような形になっている。

ここで、パラメータを $u = 1.5$ 、 $d = 0.5$ 、 $p = 0.5$ 、 $\rho = 0.25$ 、 $C = 10$ 、 $E = 20$ とすると、プロジェクト

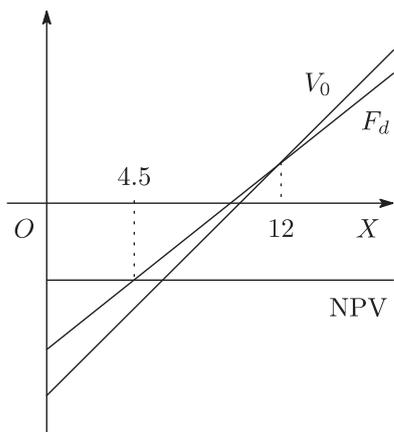


図4. 撤退戦略の価値

価値は

$$\begin{aligned}
 V_u &= 7.5X - 50, & V_d &= 2.5X - 50 \\
 V_0 &= 5X - 50 \\
 G_d &= \frac{(1-p)(-V_d - E)}{1+\rho} = -X + 12 \\
 F_d &= V_0 + G_d = 4X - 38 \\
 X_d^* &= 4.5
 \end{aligned}$$

と計算できる。

図4は、撤退戦略のグラフを表している。前項の図3と比較して、NPVが $-E$ になっていることが違う。プロジェクトの撤退戦略をまとめると、

$$F = \begin{cases} -E & X \leq 4.5 \text{ のとき, 即座に撤退} \\ F_d & 4.5 < X \leq 12 \text{ のとき,} \\ & \text{1 期間後に下がったら撤退} \\ V_0 & X > 12 \text{ のとき, 撤退しない} \end{cases}$$

となる。

#### 4.4 拡大と撤退の複合オプション

最後に、1 期間後に上がったら費用 $I$ で規模を2倍に拡大、下がったら費用 $E$ で撤退という複合戦略を考える。キャッシュフローの変化は、

$$\begin{array}{l}
 X - C \begin{cases} \xrightarrow{p} 2(uX - C) \rightarrow \Rightarrow 2V_u - I \\ \xrightarrow{1-p} 0 \rightarrow \Rightarrow -E \end{cases}
 \end{array}$$

となる。ただし、制約条件は

$$V_d < I, \quad -E < V_u$$

である。複合戦略の価値は

$$F_{ud} = X - C + \frac{p(2V_u - I) + (1-p)(-E)}{1+\rho}$$

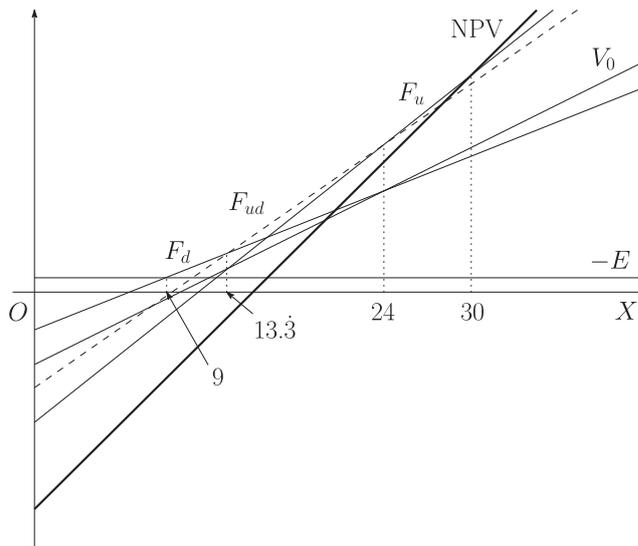


図5 複合戦略の価値

$$\begin{aligned}
 &= X - C + \underbrace{\frac{pV_u + (1-p)V_d}{1+\rho}}_{V_0} + \underbrace{\frac{p(V_u - I)}{1+\rho}}_{G_u} \\
 &\quad + \underbrace{\frac{(1-p)(-V_d - E)}{1+\rho}}_{G_d}
 \end{aligned}$$

となり、何もしないときの価値と、拡大オプションと撤退オプションに分離できる。

パラメータを $u = 1.5, d = 0.5, p = 0.5, \rho = 0.25, C = 10, I = 50, E = -10$ とすると、プロジェクト価値は

$$\begin{aligned}
 V_u &= 7.5X - 50, & V_d &= 2.5X - 50 \\
 V_0 &= 5X - 50 \\
 G_u &= \frac{p(V_u - I)}{1+\rho} = 3X - 40 \\
 G_d &= \frac{(1-p)(-V_d - E)}{1+\rho} = -X + 24 \\
 F_u &= V_0 + G_u = 8X - 90 \\
 F_d &= V_0 + G_d = 4X - 26 \\
 F_{ud} &= V_0 + G_u + G_d = 7X - 66 \\
 X_d^* &= 9, & X_u^* &= 30
 \end{aligned}$$

と計算できる。

図5は、複合戦略のグラフを表している。今回のパラメータでは撤退費用が負であるため、 $-E$ が正になっている。これは、設備などを売却して撤退時に利益が生まれる場合に相当する。プロジェクトの複合戦略をまとめると、

$$F = \begin{cases} -E & X \leq 9 \text{ のとき, 即座に撤退} \\ F_d & 9 < X \leq 13.3 \text{ のとき, 1 期間後に} \\ & \text{下がったら撤退} \\ F_{ud} & 13.3 < X < 24 \text{ のとき, 1 期間後に} \\ & \text{下がったら撤退, 上がったら拡大} \\ F_u & 24 \leq X < 30 \text{ のとき, 1 期間後に} \\ & \text{上がったら拡大} \\ NPV & X \geq 30 \text{ のとき, 即座に拡大} \end{cases}$$

となる。

## 5. まとめ

本稿では、離散モデルを利用することで、数学は四則演算のみでリアルオプションの議論を展開した。結果として、連続モデルと同じような性質をもつことが分かった。これによって、より複雑なモデルの分析も可能であり、四則演算のみでさまざまなリアルオプションの問題を分析できる。

ただし、原資産過程に幾何ブラウン運動ではなく二項モデルを用いるため、意思決定には期限が存在する。連続モデルは解析解が得られる場合、計算は1度だけでよいが、離散モデルは期間が増えるごとに計算量が増加する。単純な計算ではあるが、計算量は指数関数的に増加してしまうという限界が存在する。

### 本誌「リアルオプションと戦略」は、国内外に公開される電子ジャーナルとなります

本誌の各号は会員限定の刊行後、3か月を経過してからインターネット上の電子ジャーナルプラットフォーム「J-Stage」に登載されます。これにより本誌掲載の記事は、Google Scholar などからも検索可能となり、社会に向けて広く情報発信されます。なお、各記事にはDOI (Digital Object Identifier) が登録され、本機関誌の記事は、すべて、国内外から恒久的にアクセスが保証される公開記事となります。第8巻第1号(2016年2月発行)は、2017年3月末頃に、J-Stage上に、公開される予定です。

### JAROS2017 研究発表大会へのご案内

期間：2017年11月25日、26日(土日開催)

場所：石川県政記念 しいの木迎賓館 石川県金沢市広坂2-1-1

発表申込：査読セッション エントリー受付中(5月11日まで)

参加申込：2017年6月 受付開始 予定

予定セッション

一般研究報告、査読セッション、シンポジウム、基調講演、チュートリアルセッション、懇親会

実行委員会(敬称略)

実行委員長：佐藤 清和

副実行委員長：長谷川 専、高嶋隆太

プログラム委員長：辻村 元男

〈JAROS2016 研究発表大会 チュートリアル 2016年11月20日(日) 於: 中央大学後楽園キャンパス〉

## 曖昧性を考慮したプロジェクトへの投資タイミングの決定

辻村 元男

(同志社大学)

### 1. はじめに

不確実性については古くより活発な議論がなされてきた。中でも、Knight (1921) による不確実性の定義は代表的な例の一つとして挙げられる。Knightは、確率分布が一意に特定化される不確実性を「リスク」とし、確率分布が一意に特定化されない不確実性を「不確実性」とした。この Knight の定義した不確実性を Knight 流不確実性 (Knightian uncertainty) と呼ぶ。

リスクの下においては、Von Neumann と Morgenstern によって提案された期待効用基準によって意思決定の分析がなされてきた。その後、Ellsberg (1961) の有名な壺の実験によって、人々の意思決定が期待効用基準では説明できない事例が示された。実験は次のようなものであった。壺からボール取り出し、色が当たれば賞金がもらえる。ただし、2種類の壺があり、壺1には、100個のボールが入っていることはわかっているが、赤色と黒色それぞれ何個ずつ入っているかはわからない。一方、壺2は、100個のボールの内、赤色と黒色がそれぞれ50個ずつ入っていることがわかっている。2つの壺を前にして、多くの人が壺2を選択することとなった。すなわち、事象に対して確率のわかる場合とわからない場合があれば、人々は確率のわからない場合を避けることが示された。このような不確実性に対する態度は、曖昧性回避 (ambiguity averse) と呼ばれる。以降、本稿では Knight 流不確実性に対して曖昧性という用語を使う。

その後、Schmeidler (1989) は非加法的な確率とシヨケ積分を用いた期待効用を用いて、曖昧性下における意思決定について議論を行い、Ellsberg によって示された曖昧性回避を説明した。一方、Gilboa and Schmeidler (1989) は、複数の主観的な確率 (信念 (prior) と呼ぶ) を考えることで、確率の加法性を保持した期待効用を用い曖昧性を回避する主体の意思決定を分析した。曖昧性下では、複数の信念の中から、最も悪い事態が起こる信念を用い、期待値あるいは期待効用が大きくなるように振る舞うという、maxmin 原理 (maxmin principle) に基づいた maxmin 期待効用

(maxmin expected utility: MEU) によって、意思決定がなされる。Gilboa や Schmeidler 達の研究以降も、曖昧性下における意思決定については理論的な研究が積み重ねられてきている。詳細については、Camerer and Weber (1992) や Etner et al. (2012) 等を参照されたい。

このように、曖昧性下における意思決定の研究が積み重ねられ、プロジェクトへの投資に対しても応用されるようになった。Dixit and Pindyck (1994) に代表されるように、不確実性下において不可逆性を考慮した投資の分析において、従来は、不確実性としてリスクが考えられてきた。それに対して、Nishimura and Ozaki (2007) は、不確実性として曖昧性を考慮し、不可逆的なプロジェクトへの投資について分析を行った。彼らと同じように、本稿も曖昧性下における不可逆的なプロジェクトへの投資タイミングについて解説を試みる。

### 2. 投資の意思決定：離散・2期間モデル

本節では、今期 ( $t=0$ ) と来期 ( $t=1$ ) からなる2期間モデルを用いてプロジェクトへの投資タイミングについて、その基本的な考え方を見ていく。まずは、リスクの下での投資タイミングの決定について考察し、次いで、曖昧性の下での投資タイミングについて考察する。

#### 2.1 リスク下における投資の意思決定

企業はプロジェクトへの投資から収益を得られるとしよう。ただし、このプロジェクトへの投資は費用  $I$  がかかる。今期に、プロジェクトへ投資すると  $X_0$  の収益が得られるが、来期の収益は、ビジネス環境によって変化する。ここで簡単化のため、ビジネス環境は良いか悪いかのどちらかが実現するとしよう。

来期のビジネス環境について、良いビジネス環境は確率  $p$  で、悪いビジネス環境は確率  $1-p$  で実現する。したがって、来期の収益  $X_1$  は、

$$X_1 = \begin{cases} X_1^g, & \text{確率 } p, \\ X_1^b, & \text{確率 } 1-p \end{cases}$$

となる。このような来期のビジネス環境に関するリスクの下で、企業のプロジェクトへの投資を見ていこう。

まず、今期にプロジェクトへ投資する場合、プロジェクトからの収益の現在価値 $V_0$ は、

$$\begin{aligned} V_0 &= X_0 + \frac{1}{1+r} \mathbb{E}[X_1] \\ &= X_0 + \frac{1}{1+r} [pX_1^g + (1-p)X_1^b] \end{aligned}$$

となる。ただし、 $r$ は割引率を表わす。正味現在価値 (net present value: NPV) 法によるプロジェクトからの正味の収益 $W_0$ は、

$$W_0 = \max [V_0 - I, 0]$$

となる。

次に、来期におけるプロジェクトへの投資の意思決定を考えよう。NPV 法によるプロジェクトからの正味の収益 $W_1$ は、

$$W_1 = \max [X_1 - I, 0]$$

となり、その現在価値は、

$$\begin{aligned} &\frac{1}{1+r} \mathbb{E}[W_1] \\ &= \frac{1}{1+r} \mathbb{E}[\max [X_1 - I, 0]] \\ &= \frac{1}{1+r} \{p \max [X_1^g - I, 0] + (1-p) \max [X_1^b - I, 0]\} \end{aligned}$$

となる。

企業の問題は、プロジェクトへの投資から得られる収益を最大とするように、今期に投資するか、あるいは来期まで投資の実施の可否についての判断を遅らせるかである。

$$W = \max \left[ V_0 - I, \frac{1}{1+r} \mathbb{E}[W_1] \right]. \quad (1)$$

## 2.2 曖昧性下における投資の意思決定

企業のマネージャーが、将来のビジネス環境は良いか悪いかの確率を一意に特定化できない場合、すなわち、確率 $p$ を一意に特定化できない場合について見ていこう。

一意に確率を特定化できないため、Nishimura and Ozaki (2007) らと同様に、 $\varepsilon$ -contamination を用いて、ビジネス環境が良い確率 $p$ に対して集合 $\mathcal{P}$ を考えよう。

$$\mathcal{P} = [p - \varepsilon, p + \varepsilon], \quad 0 \leq p - \varepsilon, \quad p + \varepsilon \leq 1.$$

MEU モデルによると、曖昧性の下では最悪のケースを想定し、その時の効用などを最大にする意思決定をすることから、企業の問題は、次のように定式化される。

$$W = \max \left[ V_0 - I, \frac{1}{1+r} \min_{p^\varepsilon \in \mathcal{P}} \mathbb{E}^{p^\varepsilon} [W_1] \right]. \quad (2)$$

その後 Marinacci (2002) によって、 $\alpha$ -MEU モデル ( $\alpha$ -maxmin/multiplier expected utility モデル) と呼ばれる、最良の場合と最悪の場合のコンビネーションを考え、期待効用を最大とする意思決定方法が考案された。最悪の場合に対するウェイトを $\alpha \in (0,1)$ とすると、企業の問題は次のように定式化される。

$$\begin{aligned} W = \max \left\{ V_0 - I, \frac{1}{1+r} [(1-\alpha) \max_{p^\varepsilon \in \mathcal{P}} \mathbb{E}^{p^\varepsilon} [W_1] \right. \\ \left. + \alpha \min_{p^\varepsilon \in \mathcal{P}} \mathbb{E}^{p^\varepsilon} [W_1]] \right\}. \end{aligned}$$

(3)

このように定式化すると、 $\alpha$ は曖昧性回避を表すパラメータと解釈される。

## 3. 投資の意思決定：連続・無限期間

本節では、前節に見てきた企業のプロジェクトへの投資問題を、連続時間で計画期間を無限期間に拡張しよう。

### 3.1 リスク下における投資の意思決定

まずは、リスクの下でのプロジェクトへの投資タイミングについて見ていこう。プロジェクトからの収益 $X_t$ は、次の幾何ブラウン運動に従っているとしよう。

$$dX_t = \mu X_t dt + \sigma X_t dZ_t, \quad X_0 = x, \quad (4)$$

ただし、 $\mu (> 0)$ はプロジェクトからの収益の期待成長率を表し、 $\sigma (> 0)$ はその変化の大きさ (ボラティリティ) を表す。したがって、プロジェクトからの収益のリスクの大きさは、 $\sigma$ で表現される。また、 $\{Z_t\}_{t \geq 0}$ は確率空間 $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ 上の標準ブラウン運動を表す。プロジェクトへ投資が実施された場合のプロジェクト価値は、期待収益の現在価値の総和として次のように求められる。

$$V(X_t) = \mathbb{E} \left[ \int_t^\infty e^{-rs} X_s ds \right] = \frac{X_t}{r - \mu}.$$

プロジェクトへの投資時刻を $\tau$ とすると、企業の問題は、プロジェクト価値を最大とする投資時刻を求める最適停止問題として定式化される。

$$W(x) = \sup_\tau \mathbb{E} \left[ e^{-r\tau} \left( \int_\tau^\infty e^{-r(t-\tau)} X_t dt - I \right) \right]. \quad (5)$$

企業の経営者は、投資タイミングを決めるため、各時点において、プロジェクトへ投資すべきか否かを判断しなければならない。つまり、各時点で、次のどちらかで大きな収益を得られる方を選択する。  
max { 今投資する, 次の時点まで投資判断を遅らせる }

これを式で表現したものが HJB (Hamilton-Jacobi-Bellman)方程式と呼ばれる式であり、次のようになる。

$$W(x) = \max \{V(x) - I, e^{-rdt} \mathbb{E}[W(X_{dt})]\} \quad (6)$$

もし、 $V(x) - I > e^{-rdt} \mathbb{E}[W(X_{dt})]$ なら、直ちにプロジェクトへ投資することとなり、

$$W(x) = V(x) - I \quad (7)$$

となる。一方、 $V(x) - I < e^{-rdt} \mathbb{E}[W(X_{dt})]$ なら、次の時点まで投資の判断を延期することとなり、

$$W(x) = e^{-rdt} \mathbb{E}[W(X_{dt})] \quad (8)$$

となる。ここで、 $e^{-rdt}$ は $(1 - rdt)$ と近似できること、 $W(X_{dt}) = W(x + dX_t) = W(x) + dW(x)$ であること、さらに伊藤の公式を利用すると、(8)式の右辺は次のように書き直せる。

$$\begin{aligned} & e^{-rdt} \mathbb{E}[W(X_{dt})] \\ &= (1 - rdt) \mathbb{E}[W(x) + dW(x)] \\ &= (1 - rdt) \mathbb{E} \left[ W(x) + W'(x) dX_t + \frac{1}{2} W''(x) dX_t^2 \right] \\ &= (1 - rdt) \\ & \cdot \mathbb{E} \left[ W(x) + \left( \mu x W'(x) + \frac{1}{2} \sigma^2 x^2 W''(x) \right) dt \right]. \end{aligned}$$

さらに、時間間隔 $dt$ を限りなく短くすると ( $\lim_{dt \rightarrow 0}$ )、(8)式は、

$$\frac{1}{2} \sigma^2 x^2 W''(x) + \mu x W'(x) - rW(x) = 0 \quad (9)$$

となる。

これらの計算から、次の(10)–(12)からなる変分不等式 (variational inequalities) と呼ばれる式が導き出される。

$$W(x) \geq V(x) - I \quad (10)$$

$$\frac{1}{2} \sigma^2 x^2 W''(x) + \mu x W'(x) - rW(x) \leq 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & [(V(x) - I) - W(x)] \cdot \\ & \left[ \frac{1}{2} \sigma^2 x^2 W''(x) + \mu x W'(x) - rW(x) \right] = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

(12)は、(10)か(11)のいずれかの式が等号で満たされることを意味する。したがって、(10)–(12)は、次のようにまとめられる。

$$\begin{aligned} & \max \{ (V(x) - I) - W(x), \\ & \frac{1}{2} \sigma^2 x^2 W''(x) + \mu x W'(x) - rW(x) \} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

プロジェクトへ投資するか、次の時点まで待つかの判断は、プロジェクトから得られるであろう収益がある水準に達しているかいないかでなされる。その水準を閾値と呼び、 $\bar{x}$ と表記しよう。

$$X_t \begin{cases} \geq \bar{x}, & \text{投資する} \\ < \bar{x}, & \text{待つ} \end{cases}$$

このような投資判定基準に従うと、プロジェクトへの投資時刻 $\tau$ は、次のように記述される。

$$\tau = \inf \{ t > 0; X_t \geq \bar{x} \}. \quad (14)$$

変分不等式を用いて企業の問題を解いていこう。まずは、収益の水準が閾値に到達するまで $x < \bar{x}$ は、プロジェクトへの投資が見送られ、微分方程式(9)が成り立つ。 $W(0) = 0$ に注意して、(9)式を解くと、

$$W(x) = Ax^\beta$$

を得る。ただし、 $\beta (> 1)$ は次の2次式の正の解である。

$$\frac{1}{2} \sigma^2 \beta(\beta - 1) + \mu\beta - r = 0.$$

企業の問題を解くためには、閾値 $\bar{x}$ と定数 $A$ を求めなければならない。これら2つの未知定数は、境界条件である value-matching 条件：

$$W(\bar{x}) = V(\bar{x}) - I$$

と smooth-pasting 条件：

$$W'(\bar{x}) = V'(\bar{x})$$

を用いることで求まる。計算の結果、閾値 $\bar{x}$ は、

$$\bar{x} = \left( \frac{\beta}{\beta - 1} \right) (r - \mu) I \quad (15)$$

と求まる。以上の最適停止問題の詳細については、辻村・前田 (2016) を参照されたい。

### 3.2 曖昧性下における投資の意思決定

次に、曖昧性下におけるプロジェクトへの投資問題について見ていく。

企業の経営者は、確率測度 $\mathbb{P}$ は正しくはないだろうと思っており、2節と同様に、信念の集合を考える。ただし、信念を考える範囲を $[-\kappa, \kappa]$ とする。このように信念を考えるのを、 $\kappa$ -ignorance と呼ぶ (Chen and Epstein (2002))。

パラメータ (密度生成作用素 (density generator))  $\{\theta_t\}$ とその集合 $\Theta$ を用い、集合を $\mathcal{P}$ から次のような $\mathcal{P}^\theta$ に拡張する。

$$\mathcal{P}^\theta = \{\mathbb{P}^\theta; \theta \in \Theta\}$$

ただし、 $\Theta = [-\kappa, \kappa]$ であり、 $\kappa > 0$ は曖昧性の程度を表わす。 $\{Z_t^\theta\}_{t \geq 0}$ を確率空間 $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P}^\theta)$ 上の標準ブラウン運動とする。ギルサノフの定理 (Girsanov's Theorem) より、次を得る。

$$Z_t^\theta = Z_t + \int_0^t \theta_s ds. \quad (16)$$

曖昧性下では、プロジェクトからの収益 $X_t$ が従う確率微分方程式は、

$$dX_t = (\mu - \sigma\theta_t)X_t dt + \sigma X_t dZ_t^\theta, \quad X_0 = x \quad (17)$$

となる。

以上より、曖昧性下における企業の問題は、プロジェクトからの収益が最も悪い場合を考え、プロジェクト価値を最大とする投資時刻を求める最適停止問題として定式化される。

$$W(x) = \sup_{\tau} \min_{\mathbb{P}^\theta \in \mathcal{P}^\theta} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} \left[ e^{-r\tau} \left( \int_{\tau}^{\infty} e^{-r(t-\tau)} X_t dt - I \right) \right]. \quad (18)$$

企業の問題(18)の HJB 方程式は、

$$\begin{aligned} W(x) &= \max \left\{ V(x) - I, e^{-rdt} \min_{\mathbb{P}^\theta \in \mathcal{P}^\theta} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} [W(X_{dt})] \right\} \\ &= \max \left\{ V(x) - I, e^{-rdt} \min_{\theta \in \Theta} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} [W(X_{dt})] \right\} \\ &= \max \left\{ V(x) - I, e^{-rdt} \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} [W(X_{dt})] \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

と求まる。収益が最も悪い場合を考えたプロジェクトの現在価値 $V$ は、

$$V(X_t) = \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} \left[ \int_t^{\infty} e^{-rs} X_s ds \right] = \frac{X_t}{r - \mu + \sigma\kappa}$$

と求まる。価値 $V$ が求まるためには、 $r - \mu + \sigma\kappa > 0$ でなければならず、曖昧性の程度を表わす $\kappa$ は、不等式 $\kappa > \frac{\mu - r}{\sigma}$ を満たさなければならない。

次に、(13)に対応する変分不等式は、

$$\begin{aligned} \max \left\{ (V(x) - I) - W(x), \frac{1}{2} \sigma^2 x^2 W''(x) \right. \\ \left. + (\mu - \sigma\kappa)xW'(x) - rW(x) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

と求まる。曖昧性下における投資の閾値を $\bar{x}^\theta$ とすると、投資時刻 $\tau^\theta$ は、

$$\tau^\theta = \inf \{ t > 0; X_t \geq \bar{x}^\theta \} \quad (21)$$

と与えられる。

プロジェクトへの投資が実施されない領域 $x < \bar{x}^\theta$ においては、変分不等式(20)より、微分方程式

$$\frac{1}{2} \sigma^2 x^2 W''(x) + (\mu - \sigma\kappa)xW'(x) - rW(x) = 0 \quad (22)$$

を得る。 $W(0) = 0$ に注意すると、(22)の解は、

$$W(x) = A^\theta x^{\beta^\theta} \quad (23)$$

と求まる。ただし、 $\beta^\theta (> 1)$ は次の2次式の正の解である。

$$\frac{1}{2} \sigma^2 \beta(\beta - 1) + (\mu - \sigma\kappa)\beta - r = 0.$$

未知定数 $A^\theta$ と閾値 $\bar{x}^\theta$ は、value-matching 条件：

$$W(\bar{x}^\theta) = V(\bar{x}^\theta) - I$$

と、smooth-pasting 条件：

$$W'(\bar{x}^\theta) = V'(\bar{x}^\theta)$$

を用いて求まる。計算の結果、閾値 $\bar{x}^\theta$ は、

$$\bar{x}^\theta = \left( \frac{\beta^\theta}{\beta^\theta - 1} \right) (r - \mu + \sigma\kappa) I \quad (24)$$

と求まる。

こうした曖昧性下におけるプロジェクトへの投資問題については、Trojanowska and Kort (2010)、Wang (2010)や Thijssen (2011) なども参考にされたい。

次に、Schröder (2011) と同様に、収益が最も悪い場合に加えて、最も良い場合も考慮した $\alpha$ -MEU モデルに基づいて、プロジェクトへの投資問題を見ていこう。

収益が最も良い場合を考えたプロジェクトの現在価値 $V$ は、

$$V(X_t) = \max_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} \left[ \int_t^{\infty} e^{-rs} X_s ds \right] = \frac{X_t}{r - \mu - \sigma\kappa}$$

と求まる。最も悪い収益の重みを $\alpha$ として、最も良い収益と悪い収益の加重平均は、

$$\begin{aligned} V(X_t; \alpha) &= (1 - \alpha) \max_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} \left[ \int_t^{\infty} e^{-rs} X_s ds \right] \\ &+ \alpha \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} \left[ \int_t^{\infty} e^{-rs} X_s ds \right] \\ &= X_t \left( \frac{1 - \alpha}{r - \mu - \sigma\kappa} + \frac{\alpha}{r - \mu + \sigma\kappa} \right) \\ &= X_t \phi \end{aligned}$$

となる。ただし、 $\phi \equiv \frac{1 - \alpha}{r - \mu - \sigma\kappa} + \frac{\alpha}{r - \mu + \sigma\kappa}$ である。また、価値 $V$ が求まるためには、 $r - \mu + \sigma\kappa > 0$ かつ $r - \mu - \sigma\kappa > 0$ でなければならず、曖昧性の程度を表わす $\kappa$ は、不等式 $\frac{\mu - r}{\sigma} < \kappa < \frac{r - \mu}{\sigma}$ を満たさなければならない。

したがって、企業の問題は、

$$W(x) = \sup_{\tau} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} [e^{-r\tau} (V(X_\tau; \alpha) - I)] \quad (25)$$

と定式化される。

企業の問題(25)の HJB 方程式は、

$$\begin{aligned} W(x) &= \max \{ V(x) - I, \\ &(1 - \alpha)e^{-rdt} \max_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} [W(X_{dt})] \\ &+ \alpha e^{-rdt} \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} [W(X_{dt})] \} \end{aligned} \quad (26)$$

となる。最悪の収益のみを考慮した場合の変分不等式(20)に対応する変分不等式は、

$$\begin{aligned} \max\{ & (V(x) - I) - W(x), \frac{1}{2}\sigma^2 x^2 W''(x) \\ & + (\mu + (1 - 2\alpha)\sigma\kappa)xW'(x) \\ & - rW(x)\} = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

と求まる。プロジェクトへの投資の閾値を  $\bar{x}^\alpha$  とすると、投資時刻  $\tau^\alpha$  は、

$$\tau^\alpha = \inf \{ t > 0; X_t \geq \bar{x}^\alpha \} \quad (28)$$

と与えられる。これまでと同様にして、変分不等式(27)を用いて、直ちにプロジェクトへ投資をしない場合に導かれる微分方程式を解き、value-matching 条件と smooth-pasting 条件を用いると、閾値  $\bar{x}^\alpha$  は、

$$\bar{x}^\alpha = \left( \frac{\beta^\alpha}{\beta^\alpha - 1} \right) \frac{I}{\phi} \quad (29)$$

と求まる。ただし、 $\beta^\alpha (> 1)$  は次の2次式の正の解である。

$$\frac{1}{2}\sigma^2\beta(\beta - 1) + (\mu + (1 - 2\alpha)\sigma\kappa)\beta - r = 0.$$

### 3.3 数値例

本節で紹介した3つのモデルの閾値を数値例で示そう。パラメータの値を、 $r = 0.05$ ,  $\mu = 0.01$ ,  $\sigma = 0.2$ ,  $\kappa = 0.1$ ,  $\alpha = 0.7$ ,  $I = 10$  とする。この時、各閾値の値は、 $\bar{x} = 0.870$ ,  $\bar{x}^\theta = 1$ ,  $\bar{x}^\alpha = 0.718$  と計算される。 $\bar{x}^\theta > \bar{x}$  となることから、曖昧性の下でのプロジェクトへの投資は、最悪の収益に基づく期待収益を最大化する MEU モデルにおいては、リスクの下での投資よりも遅れることとなる。一方、最悪の収益と最良の収益の双方を考慮する  $\alpha$ -MEU モデルにおいては、 $\bar{x}^\alpha < \bar{x}$  となることから、投資が促進されリスクの下での投資よりも早く投資が実施されることとなる。

次に、リスクを表わす  $\sigma$ 、曖昧性の程度を表わす  $\kappa$ 、曖昧性に対する態度を表わす  $\alpha$  の各パラメータに関して比較静学を行い、各パラメータが投資の意思決定にどのように影響するかを見ていこう。まず、図1は、リスクの大きさを表わす  $\sigma$  に関する比較静学の結果である。図1から、リスクが大きくなるに従い、 $\bar{x}$  と  $\bar{x}^\theta$  も大きくなり、投資が抑制されることがわかる。一方、 $\bar{x}^\alpha$  は  $\sigma$  が小さな値の時は、 $\sigma$  が大きくなるにつれて、 $\bar{x}^\alpha$  も大きくなるが、 $\sigma$  が一定の値を超えると、 $\sigma$  の動きとは逆に  $\bar{x}^\alpha$  は小さくなり、投資が促される。

次に、曖昧性の程度を表わす  $\kappa$  について見ていこう。

ただし、 $\kappa$  については、 $\frac{\mu-r}{\sigma} < \kappa < \frac{r-\mu}{\sigma}$  を満たさなければならぬことに注意されたい。本稿の数値例では、 $-0.2 < \kappa < 0.2$  となる。図2からは、 $\kappa$  が大きくなるに従い、 $\bar{x}^\theta$  も大きくなり投資が抑制される、一方、 $\bar{x}^\alpha$  は、 $\kappa$  のサイズがゼロから離れて曖昧性の程度が高まる

に従い、 $\bar{x}^\alpha$  は小さくなり、投資が促進される。なお、 $\kappa = 0$  は曖昧性が解消され、リスクの下での投資問題に帰着されるため、全ての閾値が一致する。

最後に、曖昧性に対する態度  $\alpha$  について見ていこう。設定から  $\alpha$  が大きくなるに従い、最悪の収益に対する重みが増え、企業経営者は将来の収益に対して、より悲観的な態度を持つようになる。図3から、 $\alpha$  の値が小さく楽観的な態度を持つ場合は、 $\alpha$  が大きくなるに従い  $\bar{x}^\alpha$  は小さくなり、投資が促進される。一方、 $\alpha$  が一定の値を超え悲観的な態度を持つようになると、 $\alpha$  が大きくなるに従い、 $\bar{x}^\alpha$  も大きくなり、投資が抑制される。なお、 $\alpha = 1$  の時は、最悪の収益のみを考慮することとなり、企業の問題は MEU モデルに帰着される。

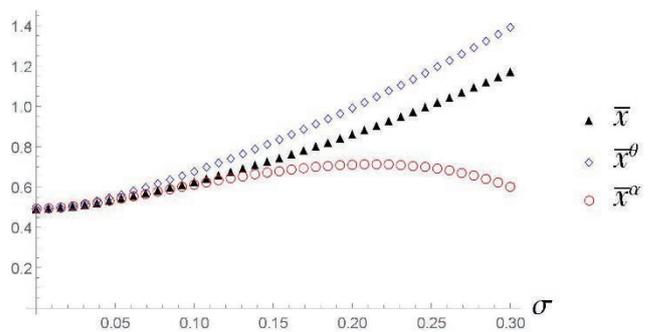


図1. 閾値の  $\sigma$  に関する比較静学

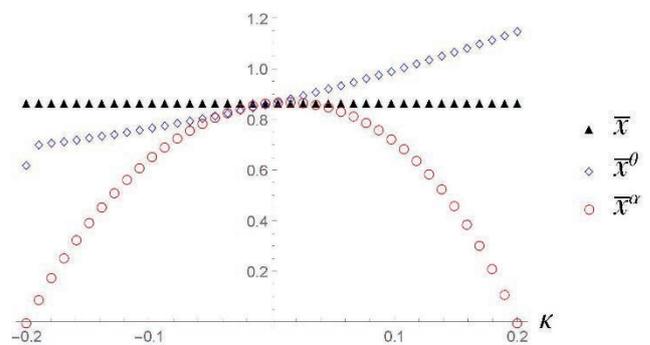


図2. 閾値の  $\kappa$  に関する比較静学

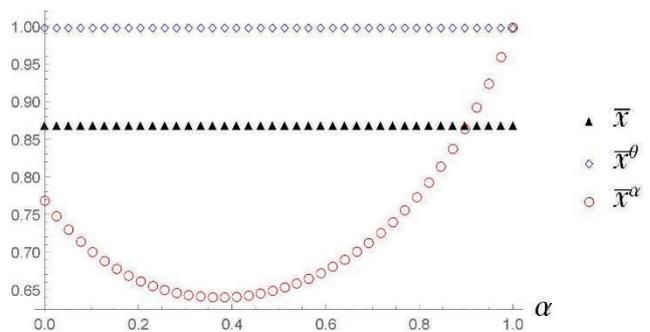


図3. 閾値の  $\alpha$  に関する比較静学

#### 4. おわりに

本稿では、プロジェクトから得られるであろう収益の分布を一意に決められない曖昧性の下で、企業のプロジェクトへの投資問題について解説を行ってきた。まずは、2期間モデルで曖昧性下における意思決定の基本的な考え方を示し、次いで、連続で無限期間モデルへと拡張し、プロジェクトへの最適な投資タイミングを見てきた。解説したモデルは、最悪のケースを考えた時の期待効用を最大とする maxmin 基準による MEU モデルに基づいた考え方と、最悪のケースに加え最良のケースを考え、各効用の線形和を考える  $\alpha$ -MEU モデルの両モデルに基づいた投資の意思決定についてである。

曖昧性下における意思決定については、活発な研究活動が繰り返されており、研究成果の蓄積が進んでいる。今後、企業の多様な意思決定に対して、一層有益な示唆が得られると期待される。

#### 参考文献

- [1] 辻村元男・前田章 (2016) 『確率制御の基礎と応用』朝倉書店。  
 [2] Camerer, C. and M. Weber, (1992) Recent Developments in Modeling Preferences: Uncertainty and Ambiguity, *Journal of Risk and Uncertainty*, **5**, 325–370.  
 [3] Chen, Z. and L. Epstein, (2002) Ambiguity, Risk, and Asset Returns in Continuous Time, *Econometrica*, **70**(4), 1403–1443.  
 [4] Dixit, A. K. and R. S. Pindyck, (1994) *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, New Jersey, USA.  
 [5] Ellsberg, D., (1961) Risk, Ambiguity, and the

Savage Axioms, *Quarterly Journal of Economics*, **75**, 643–669.

[6] Etner, J. M. Jeleva, J.-M. Tallon, (2012) Decision Theory under Ambiguity, *Journal of Economic Surveys*, **26**, 234–270.

[7] Gilboa, I. and D. Schmeidler, (1989) Maximin Expected Utility with Non-unique Priors, *Journal of Mathematical Economics*, **18**, 141–153.

[8] Knight, F.H. (1921) *Risk, Uncertainty, and Profit*, Houghton Mifflin, Boston, USA.

[9] Marinacci, M. (2002). Probabilistic Sophistication and Multiple Priors, *Econometrica* **70**(2), 755–764.

[10] Nishimura, K. G., and H. Ozaki., (2007) Irreversible Investment and Knightian Uncertainty, *Journal of Economic Theory*, **136**(1), 668–694.

[11] Schmeidler, D., (1989) Subjective Probability and Expected Utility without Additivity, *Econometrica*, **57**, 571–587.

[12] Schröder, D., (2011) Investment under Ambiguity with the Best and Worst in Mind, *Mathematics and Financial Economics*, **4**(2), 107–133.

[13] Thijssen, J. J. (2011) Incomplete Markets, Ambiguity, and Irreversible Investment, *Journal of Economic Dynamics and Control*, **35**(6), 909–921.

[14] Trojanowska, M., and P. M. Kort, (2010) The Worst Case for Real Options. *Journal of Optimization Theory and Applications*, **146**(3), 709–734.

[15] Wang, Z., (2010) Irreversible Investment of the Risk- and Uncertainty-averse DM under k-Ignorance: The Role of BSDE. *Annals of Economics and Finance*, **11**(2), 313–335.

会員の近著紹介！

辻村 元男／前田 章 著

確率制御の基礎と応用

- Stochastic Control: Theory and Application -

朝倉書店 2016年9月25日

〈JAROS2016 研究発表大会 チュートリアル 2016年11月20日(日) 於: 中央大学後楽園キャンパス〉

## リアルオプションの経済実験

高嶋 隆太

(東京理科大学理工学部経営工学科)

### 1. はじめに

近年、リアルオプション理論は、様々な分野に活用されており、天然資源の開発、新薬の研究開発、インフラストラクチャーの設置問題など広範囲にわたり、投資や操業の意思決定手法の一つとして注目されている。リアルオプションは、従来用いられてきた正味現在価値(NPV)法に比べて、投資の意思決定に関する柔軟性を考慮した評価を行うことができるという利点がある。このような利点を明らかにするため、これまで、理論モデルによる評価や、実証データを用いた分析など、多数の研究が行われてきた。しかしながら、その一方で、リアルオプションの実証実験に関する先行研究は、比較的少なく、基本的で、非常に簡便な問題を分析している実験のみである[1,2]。その中で、Yavans and Sirmans[1]は、投資オプションの3期間モデルについての実証実験の方法を提案し、それについて分析している。これを基に、リアルオプション理論の実証実験が行われはじめ、実験において観測されたデータによって、理論モデルによる結果との比較やその要因が示されてきている[2]。リアルオプションの研究分野において、実験で観測されたデータと、これまでの理論モデルによる結果に違いがあることが判明しているにもかかわらず、リアルオプションの実証実験は、ほとんど行われてこなかった。投資の意思決定に関する柔軟性を評価するリアルオプションは、分析結果により、その意思決定自体に大きな影響を与えるため、この差異は投資判断に大きく左右するものと考えられる。そこで、本稿では、Yavans and Sirmans[1]の研究をもとに、経済活動における意思決定や行動の規則性を発見することに有用な実験経済学のアプローチを用いることによって、実際にリアルオプションの理論の状況を再現する。また、その状況下における規則性を発見し、リアルオプションの分野で活用できるデータを提示することを目的とする。

### 2. リアルオプション

リアルオプションには投資、撤退、停止、再開などの様々なオプションが存在する。これらのオプションの価値は、様々な要因によって変化し、意思決定はそれらに依存する。

#### 2.1 投資オプション

投資オプションとは、投資を任意の時点まで遅らせることができるというオプションである。これにより時刻0時点で投資を行うか行わないかの判断のみならず、一定期間待つてから、好ましいタイミングで投資を行うという、より現実的な意思決定を表現することが可能である。例えば、図1のように、現時点において、200円の価値のある製品が、将来時点では、確率0.5でそれぞれ、300円、もしくは100円の価値になるような問題を考える。すなわち、価格の期待値は現時点の価格と同様の200円である。ここで、この製品の投資には固定費1600円がかかるものとし、割引率を10%とする。この投資のNPVは

$$-1,600 + \sum_{t=0}^{\infty} \frac{200}{(1+0.1)^t} = -1,600 + 220 = 600$$

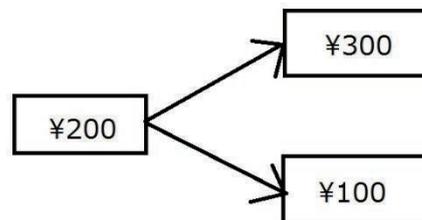


図1: 2期間モデルにおけるキャッシュフローの推移

となる。一方、投資の意思決定を1年待ち、製品の値段が上がった場合のみ投資するという投資オプションを考慮したときのNPVは、

$$0.5 \times \left( -\frac{1,600}{1+0.1} + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{200}{(1+0.1)^t} \right) = \frac{850}{1.1} = 773$$

となり、投資オプションを保有している場合には一年待った方が良く、その価値の差は $773 - 600 = 173$ であり、この値が柔軟性の価値、すなわち、オプション価値である。このように将来のキャッシュフローに不確実性が存在する場合には、投資延期の意思決定が有効である場合もある。

### 3. 実験経済学

経済学において、物理学のような統制された科学実験は不可能であるといわれてきた。しかしながら、Smith[3]が経済学における実験方法論的基礎を、価値誘発理論としてとりまとめたことにより、経済学でも統制された実験が可能となった。近年、実験経済学はゲーム理論を中心として、産業組織論、公共経済学、ファイナンス理論、政治学などの経済学をはじめとする社会科学の様々な分野に応用され、それぞれの研究分野の発展に欠かせない実証データを提供し続けている。実験経済学は、被験者の選考を実験的に統制するという特徴がある。経済環境やゲーム構造を規定する被験者の選考をはじめとした様々な要因を実験的に統制することで、理論的に想定されている状況をできる限り再現し、そのもとで被験者がどのような行動原理をもって行動するか、その法則性を観測することができる。実験経済学では、このようにして実験室内に再現された経済環境において経済理論やゲーム理論の仮説を実験的に検証する。また、実験経済学は理論研究によってしか研究されていなかった経済学上の諸問題を実験的に検討し、さらに発展させるきっかけを提供している[4]。

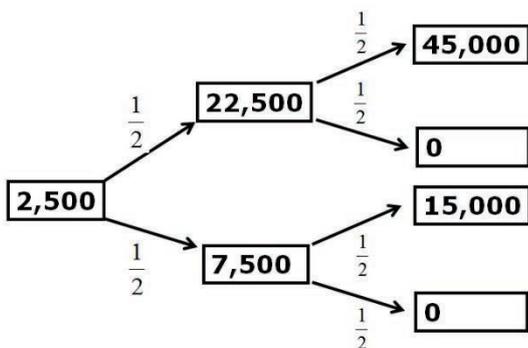


図2: 投資オプションモデル

## 4. 実験方法

### 4.1 投資オプションのモデル

図2のようなYavans and Sirmans[1]の投資モデルの実証実験を考える。第1期では、投資を行うことによって、2,500のキャッシュフローが得られるものとする。第2期ではそれぞれ0.5の確率で22,500か7,500のキャッシュフローが得られる。第3期では、第2期の結果により、それぞれ0.5の確率で45,000か0、または、15,000か0のキャッシュフローを得られる。このキャッシュフローは、それぞれ投資した段階から得られるものとし、投資を行う以前のキャッシュフローを得ることはできないものとする。また、投資にはコストがかかり、投資を行った時点で25,000を支払う必要がある。第 $t$ 期に得られるキャッシュフローを $X_t$ 、 $j$ を第2期、第3期のキャッシュフローの推移に対応する添字、キャッシュフローの変動確率を $P_{jt}$ とする(本稿のモデルでは、この変動確率はすべて $p=0.5$ とする)。投資コストを $C$ とすると、第1期における投資の価値は、

$$EV(1) = X_1 + \sum_t \sum_j P_{jt} X_{jt} - C \quad (1)$$

となる。ここで、第1期では投資を待ち、第2期まで投資を延期するというオプションを考慮すると、第2期における投資の価値は

$$EV(2) = \sum_j P_{j2} \max \left( 0, X_{j2} + \sum_i (P_{i3} |X_{j2}) X_{i3} - C \right) \quad (2)$$

となる。 $(P_{i3} |X_{j2})$ は、キャッシュフロー $X_{i3}$ を受け取る際の確率となっている。同様に、第3期における投資の価値は

$$EV(3) = \sum_j P_{j3} \max(0, X_{j3} - C) \quad (3)$$

となる。図2の投資モデルを実際に計算すると $EV(1) = 7,500$ 、 $EV(2) = 10,000$ 、 $EV(3) = 5,000$ となり、最適な投資戦略は、第2期まで投資を待ち、キャッシュフローが22,500になったときのみ投資を行い、他の状況では投資を行わないという戦略である。以上より、以下の仮説が立てられる。

仮説1: 投資家は、第1期には投資を行わず、第2期のキャッシュフローにより、投資の実施について判断する。

また、Yavans and Sirmans[1]の実験は、米国のペンシルヴァニア州立大学で行われ、被験者は米国人が比較的多いものと考えられる一方で、本研究の被験者は日本人である。田村[5]によると、日本人は国民性としてリスクや危機などといった言葉を嫌う精神構造が指摘されている。これをもとに以下の仮説が立てられる。

**仮説 2 :** Yavans and Sirmans[1]の実験に比べ、リスクを嫌い、投資を遅らせる投資家が多くなる。

**4.2 情報非対称な投資オプションモデル**

実際の投資では、売り手が情報を持ち、買い手が持つ情報は少ないという情報非対称な場合が多い。リアルオプションの実証実験では、被験者に対し情報を全て公開している場合がほとんどである[1,2]。そこで本モデルでは、第1節のゲームの条件に加え、被験者に確率分布を伝えずに行う。そのため、被験者は、値段推移の動向が分からず、第1節のモデルとは異なる行動を起こすと考えられる。リアルオプションにおいて、不確実性が増すと、オプションの価値も増加する。すなわち、以下の仮説が考えられる。

**仮説 3 :** キャッシュフロー推移の確率分布に関する情報が非対称な場合には、投資家は投資の判断をより遅らせる。

**4.3 売却（撤退）モデル**

Sandri et al.[2]の実験をもとに、売却モデルの実証実験を考える。あるプロジェクトがすでに操業している状態であるものとし、このプロジェクトから撤退する問題について考える。まず、第1期に、このプロジェクトからキャッシュフロー $X_0$ が得られるものとする。第2期に移行する際に、キャッシュフローが、第1期のキャッシュフローの価格から $h$ だけ増加（確率は $p$ ）または減少（確率は $1-p$ ）する。次に、第3期に移行する際のキャッシュフローは、 $X_0 + 2h$ （確率は $p^2$ ）、 $X_0 - 2h$ （確率は $(1-p)^2$ ）、または $X_0$ （確率は $2p(1-p)$ ）となる。このプロジェクトから撤退する場合には、残存価値 $L$ を得ることができる。ここで継続価値を $\hat{C}$ 、売却価値を $L + X_0$ とすると、意思決定のルールは、

$$D_1: \max(\hat{C}, L + X_0) = \hat{F}_0 \tag{4}$$

となる。ここで継続価値 $\hat{C}$ は、

$$\begin{aligned} \hat{C} = X_0 + \{p(X_0 + h) + (1-p)(X_0 - h)\}q^{-1} \\ + \{p^2(X_0 + 2h) + 2p(1-p)X_0 \\ + (1-p)^2(X_0 - 2h) + L\}q^{-2} \end{aligned} \tag{5}$$

となる。また、 $q = 1-r$ であり、 $r$ は割引率を表している。このとき、キャッシュフローが

$$\hat{X} = L_r - h(2p - 1) \left(1 + \frac{1}{1+q}\right) \tag{6}$$

となる場合に撤退することが最適である。ここで、第1期と第2期に撤退することができるオプションを考える。なお、第3期では、必ずこのプロジェクトから撤退するものとする。キャッシュフローが上がったときにプロジェクトを継続すると仮定すると、意思決定のルールは、

$$D_2: \max(\tilde{C}, L + X_0) = \tilde{F} \tag{7}$$

となる。ここで継続価値 $\tilde{C}$ は、

$$\begin{aligned} \tilde{C} = X_0 + \{p(X_0 + h) + (1-p)(X_0 - h + L)\}q^{-1} \\ + \{p^2(X_0 + 2h + L) \\ + p(1-p)(X_0 + L)\}q^{-2} \end{aligned} \tag{8}$$

となる。このときの最適な売却の閾値は、

$$\tilde{X} = L_r - h \left(2p - \frac{q}{p+q}\right) \tag{9}$$

となる。本モデルの分析では、図3のように、 $X_0 = 1,000$ 、 $L = 11,000$ 、 $p = 0.5$ 、 $h = 1,000$ 、 $r = 10\%$ とすると、 $\hat{C} = 787.5$ となる。これより第1期と第2期の撤退オプションを考えると、売却の閾値は低下する。これは $\hat{C}$ に撤退オプションの価値が加わったためである。すなわち、リアルオプションを考慮しないと第1期で売却することになるが、リアルオプションを考慮すると第2期まで売却を待つことが最適な戦略となる。これにより、以下の仮説が考えられる。

**仮説 4 :** 図3の売却モデルでは、投資家は第2期まで売却オプションを待ち、第2期のキャッシュフローの価格によって売却するかしないかを判断する。

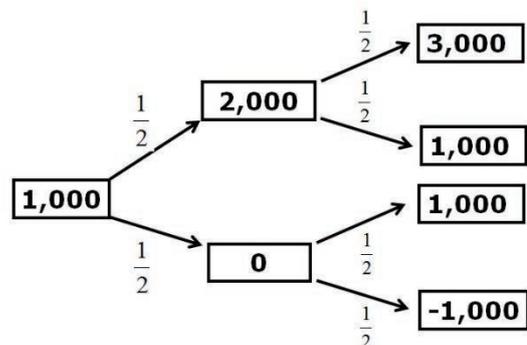


図3: 売却オプションモデル

## 5. 実験の条件

実験はすべて、東京理科大学野田校舎にて、同大学理工学部経営工学科の学生を対象に行った。また実験では、各々の報酬に対する効用の差を排除するため、ゲームの成績を順位付けし、後程発表すると伝えた。さらに、各ゲームの独立性を保つため、ゲームの成績はランダム抽出した成績によって順位付けを行うと伝えた。先行研究[1]に従い、本実験では同じルールでの投資ゲームを18ラウンド行い、初めの3ラウンドを練習ラウンドとした。第1期、第2期の終了時に、次期のキャッシュフローを発表した後、思考時間として1分間を用意した。第1回目の実験（投資オプションモデル）は、2013年11月19日に128名を対象に行い、第2回目の実験（売却オプションモデル）は、2013年12月24日に114名を対象に、第3回目の実験（情報非対称な投資オプションモデル）は、2013年1月9日に48名を対象に実施した。

## 6. 結果と考察

第1回目の実験の結果は、表1のようになった。まず、仮説1について考える。表1より、第1期に投資している人は一定数いることがわかる。そこで「第1期に投資する人はゼロである」という命題についてt検定を行うと、15ラウンドにおいても、最後の5ラウンドにおいても有意となり、この命題は棄却された。すなわち、「理論よりも早い段階で投資を行う投資家が存在する」という結論が得られた。

Yavans and Sirmans[1]の実験では、最後の5ラウンドだけ抽出した際のt検定では、命題は有意でない、すなわち第1期に投資を行う投資家はゼロであるという結果になっていたが、今回の実験では有意でないという結果が得られた。これは、表1のデータからYavans and Sirmans[1]の実験では、15ラウンドすべての場合のデータと、最後の5ラウンドのデータのばらつきがあったためではないかと考えた。本実験では、被験者が比較的多かったため、データのばらつきが小さく、より正確な結果が得られたと考えられる。

次に、仮説2について考える。「投資を先延ばしにする」ということは、すなわち、第1期と第2期に投資する割合が低下するということである。これについてt検定を行ったが、Yavans and Sirmansの実験の結果と今回の実験の結果に有意差は見られないという結果となった。すなわち、本実験においては、「リスクを嫌う日本では、米国よりも投資を先延ばしにする傾向がある」という仮説は成り立たないことが

分かった。

第2回目の実験結果は表2のようになった。仮説4について考える。本実験では、第2期においてキャッシュフローが増加する、もしくは、減少するかの推移確率はほぼ等確率であったため、理論に従えば第2期での撤退と第3期での撤退はほぼ半分ずつとなる。しかしながら、表2より約2割の被験者が第1期での撤退を選択していることが分かる。Sandri et al.[2]によると撤退の際には「心理的な惰性」が働き、理論よりも撤退のタイミングが遅れてしまうものと考えられる。これについて検証すると、第2期でのキャッシュフローが上昇した際に最適な戦略を取った被験者は、約82%であった。一方、第2期でのキャッシュフローが下がった際に最適な戦略を取った被験者は約66%と、それらに差が見られた。両者には約2割の差があり、本結果はSandri et al.[2]との結果にもほぼ一致しており、これが「心理的な惰性」によるものであると考えられる。よって、この実験では「撤退のオプションにおいても理論よりも早く行動する投資家が約2割存在する」という結果と、「キャッシュフローが減少した際には心理的な惰性により、投資家は撤退を理論よりも遅らせる」という結果が得られた。

表1: 第1回実験データ

	period1	period2	period3	見送り
Yavans and Sirmans[1]の実験				
all15	0.33	0.19	0.09	0.39
final5	0.17	0.31	0.17	0.35
本実験結果				
all15	0.20	0.36	0.02	0.41
final5	0.24	0.48	0.02	0.27

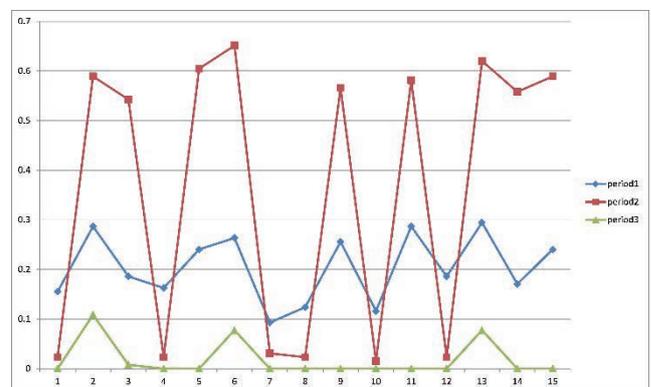


図4: 第1回の各ラウンドの選択期数割合

表 2: 第 2 回実験データ

	period1	period2	period3
all15	0.20	0.33	0.47
final5	0.25	0.41	0.35

撤退時期の選択

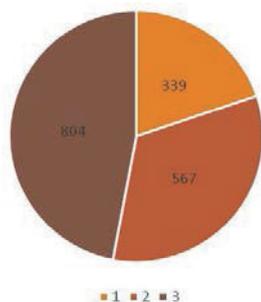


図 5: 撤退時期の選択

表 3: 第 3 回実験データ

	period1	period2	period3	見送り
all15	0.19	0.27	0.08	0.46
final5	0.25	0.27	0.05	0.43

情報非対称との比較

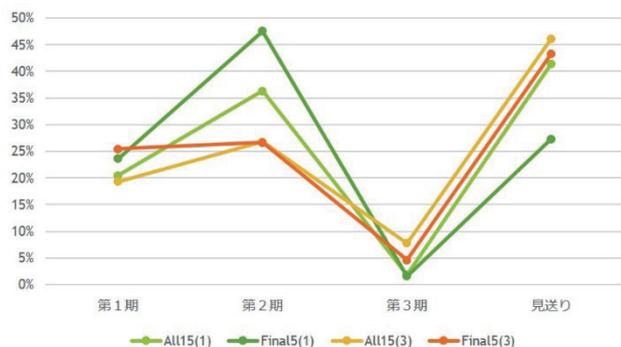


図 6: 第 1 回と第 3 回の投資期の割合比較

第 3 回の実験結果は表 3 のようになった。仮説 3 について考える。第 1 回目の実験結果と比較すると、第 3 回目の実験では第 2 期での投資が減り、投資見送りの割合が増加したことがわかる。すなわち、情報が非対称な場合には、投資家は理論よりも投資を先延ばしにすることが分かる。また本実験でも約 2 割の被験者が第 1 期での投資を行っている。本結果より、本

研究では「投資や売却の条件にかかわらず、理論よりも早い段階で行動を起こす投資家がある一定数存在する」という結果が得られ、本研究の条件においては、約 2 割存在するという結果が得られた。また、今回の実験では被験者は学生であったが、Sandri et al.[2]は投資家と非投資家において意思決定にそれほど差は見られなかったと指摘している。このことから今回の実験に、被験者が非投資家であったことはそれほど影響していないものと考えられ、現実の投資の意思決定に示唆を与える結果であると考えられる。

## 7. おわりに

本稿では、リアルオプション理論に対する新たな知見を発見できるデータを提示することを目標とし、実験経済学のアプローチを用いてリアルオプション理論の分析を行った。実験における投資家の投資判断を観察することで、リアルオプションの分野に有益なデータを提示するとともに、新たな知見を発見することが可能となった。実験における投資家の意思決定と、リアルオプション理論との差異は無視できるものではなく、特に、競合他社が存在する場合などのモデルを考える場合には、理論モデルによる予測値ではなく、実際に観測された値を使用することが好ましいと言える。今後、様々な条件下におけるリアルオプション理論を、実験経済学のアプローチを用いて分析することで、より現実的な理論モデルを構築することが可能となると考えられる。

## 参考文献・資料

1. Yavans,A.,and Sirmans,C.F. (2005), Real options: Experimental evidence. *Journal of Real Estate Finance and Economics*, 31, 27-51.
2. Sandri, S., Schade, C., Musshoff, O., and Odening,M. (2010). Holding on for too long? An experimental study on inertia in entrepreneurs and non-entrepreneurs disinvestment choices. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 76, 30-44.
3. Smith,V. L. (1976). Experimental economics: Induced value theory. *American Economic Review*, 66, 274-279.
4. 川越敏司 (2007) 実験経済学. 東京大学出版会.
5. 田村雄一郎 (1994) 言霊・リスク・保険. 国民経済雑誌, 170, 神戸大学経済経営学会.

〈JAROS2016 研究発表大会ルポ 2016年11月19日(土)～20日(日) 於: 中央大学後楽園キャンパス〉

## JAROS 創立十周年記念大会ルポ

佐藤 公俊

(神奈川大学工学部)

### 1. はじめに

2016年11月19日と20日の2日間にわたり、日本リアルオプション学会2016年研究発表大会が中央大学後楽園キャンパスで開催された。本学会は2006年からスタートし、本年度は創立十周年記念の年にあたるため、シンポジウム、パネルディスカッション、チュートリアル・セッション等の特別企画が行われた。本大会は日本感性工学会協賛の大会であり、鳥海重喜実行委員長(中央大学)を筆頭に準備を実行委員会で進め、2日間で80名を超える方に参加頂いた。

### 2. シンポジウム

大会初日(11/19)では、「リアルオプションが挑む価値創造のフロンティア」というテーマで3件の講演が行われた。司会の今井潤一氏(慶應義塾大学)よりテーマの趣旨説明の後、講演1として、森平爽一郎氏(早稲田大学)から「リアルオプション研究の新しい方向をめざして」というタイトルで講演が行われた。リアルオプションの事例として、貨幣、大災害、アスリートの報酬、航空の搭乗率保障などが紹介されるとともに、その価格決定理論としてプライシング・カーネル法が有効であることが述べられた。リアルオプションが様々な分野に広がりを持ち、今後の発展性を示されたことは大変興味深かった。

続いて講演2として、伊藤剛氏(アクセンチュア(株))から「破壊的イノベーションと電気事業のビジネスモデル変革」というタイトルで講演が行われた。電気の発電から流通、小売における各事業における新たなテクノロジーを用いたビジネスモデルが事例とともに紹介された。

続いて講演3として、堀江貞之氏((株)野村総合研究所)から「二つのコードと企業価値向上」というタイトルで講演が行われた。企業経営者が果たすべき役割は長期の企業価値向上であるが、機関投資家はこの役割をどのように達成してほしいと考えているかについて事例を基に紹介された。



森平氏によるシンポジウムの様子(撮影:伊藤真理氏)



伊藤氏によるシンポジウムの様子(撮影:伊藤真理氏)



堀江氏によるシンポジウムの様子(撮影:伊藤真理氏)

### 3. パネルディスカッション

パネルディスカッションでは、「リアルオプション学会の原点とこれからのフロンティア」というテーマで高森寛氏の司会のもと、長谷川専氏((株)三菱総合研究所)、今井潤一氏(慶應義塾大学)、北原康富氏(名古屋商科大学大学院)、小林孝明氏((株)野村総合研究所)による討論が行われた。本学会の前身で

あり 2002 年に始まった月例公開研究会「金融技術と経営戦略」の当時の様子が語られるとともに、学会創設当初の有志の方々の志を聞くことができた。さらに、これからの日本の経営と経済に対して、本学会がどのようにチャレンジし、貢献することができるかについての活発な意見が交わされた。

シンポジウムの各講演者の講演内容とパネルディスカッションでの内容については本機関紙に掲載されているのでそちらを参照されたい。



パネルディスカッションの様子（撮影：伊藤真理氏）



パネルディスカッションの様子（撮影：伊藤真理氏）



後藤氏によるチュートリアルの様子（撮影：伊藤真理氏）



辻村氏によるチュートリアルの様子（撮影：伊藤真理氏）

#### 4. チュートリアル

2 日目 (11/20) の午前に行われたチュートリアルでは、後藤允氏 (北海道大学)、辻村元男 (同志社大学)、高嶋隆太氏 (東京理科大学) の 3 名により、学生・大学院生を対象としたリアルオプションの講義が行われた。

後藤氏の講義では、リアルオプションの基礎概念が四則演算のみを用いてわかりやすく解説された。難解な数式を用いずリアルオプションの本質を学ぶことができるため、大学生だけでなく、高校生への教材としても活用できる内容であった。

辻村氏の講演では、曖昧さ (ambiguity) を想定したもとの投資の意思決定方法が解説され、最新のリアルオプション分析に触れることができた。

また、高嶋氏によるリアルオプションの経済実験では、工場の設置に関する投資プロジェクトを例としたゲームが行われた。投資後に得られるキャッシュフローが不確実に変化する際に、プレイヤーは投資を実施すべきか延期すべきかを選択し、高い利潤を目指すというものである。ゲームを通して、不確実性と意思決定を楽しく体験することができた。

#### 5. 一般報告

一般セッションと査読セッションでは計 15 件の研究発表が行われ、活発な議論がなされた。例えば、董晶輝氏 (東洋大学) は「最適閾値への初到達時間の比較静学分析」では、将来のキャッシュフローが幾何ブラウン運動に従う場合に、参入および退出の際の最適閾値への初期到達時間に関する比較静学の結果が定性的に示された。また、伊藤晴祥氏 (国際大学大学院) による「2 変数をトリガーとする天候デリバティブを利用したリスクマネジメント」では、コンピュータ関数を用いて気温および降水量の 2 つのリスク変数の相関構造を考慮し、実データを用いて天候リスクマネジメントの価値分析を行うという内容であった。

また、本大会では、創設十周年を記念して研究発表奨励賞が設けられ、伊藤和哉氏 (東京理科大学) の「複占競争下における企業の投資意思決定-リスク回避度の影響-」に授与された。この研究では、複占市場の意思決定主体のリスク回避度が非対称であるとき、コストとリスク回避度の変化が投資のタイミングに与える影響を分析している。リスク回避度の大きさと企業の市場参入のインセンティブの関係や投資の閾値の比較静学が細かく分析されており、興味深い内容であった。



董氏による研究発表の様子（撮影：伊藤真理氏）



伊藤氏による研究発表の様子（撮影：伊藤真理氏）



研究発表奨励賞を受賞された伊藤氏（撮影：伊藤真理氏）

## 6. 懇親会

懇親会は中央大学後楽園キャンパス内の会議室で開催された。35名の方に参加していただき、大変盛況だった。服部徹会長（（一財）電力中央研究所）のご挨拶に始まり、続いて、中央大学理工学部長の石井靖氏よりご挨拶をいただいた。今井潤一副会長の乾杯のご発声後、ビュッフェ形式で懇親会はスタートした。会場には、食べきれないほどたくさんの料理が並んでいた。

懇親会の中盤では、本学会創設時の前身にあたる研究会から現在まで長年ご尽力いただいている高森寛氏が本学会で最初の名誉会員として表彰された。スピーチでは、産業界と学术界が結びつき今後の学会の発展を期待する旨が述べられ、大変印象深いものであった。

また、本大会の懇親会には多くの法人会員の方々にご参加いただいた。新規法人会員を代表して、二宮



服部会長氏による挨拶の様子（撮影：伊藤真理氏）



石井氏（左）と副実行委員長の高嶋氏（中央）、実行委員長の鳥海氏（右）（撮影：伊藤真理氏）



高森氏（右）と伊勢氏（左）（撮影：伊藤真理氏）



懇親会の様子（撮影：伊藤真理氏）

俊一郎氏（（株）翻訳センター）と松浦正二氏（（株）サンセイランディック）にご挨拶をいただいた。二宮氏は学会を通じたビジネスマッチングの魅力について述べられ、松浦氏からは学会における受託研究に対する期待が述べられた。懇親会を通して、産学の交流を深めるよい機会となった。

## 7. おわりに

2日間にわたる本研究発表大会は参加者が活発に交流を深める非常に有意義なものでした。これは実行委員長の高海先生をはじめ開催準備にかかわった諸先生方、参加・ご講演頂いたすべての方々、ならび

に関係各位のご支援とご協力のおかげであり、参加者を代表して心より感謝申し上げます。また、本研究発表大会が今後のリアルオプションのさらなる発展へ貢献することを期待しております。

### JAROS2017 研究発表大会へのご案内

期間：2017年11月25日、26日（土日開催）

場所：石川県政記念 しいの木迎賓館 石川県金沢市広坂2-1-1

発表申込：査読セッション エントリー受付中（5月11日まで）

参加申込：2017年6月 受付開始 予定

予定セッション

一般研究報告、査読セッション、シンポジウム、基調講演、チュートリアルセッション、懇親会

実行委員会（敬称略）

実行委員長：佐藤 清和

副実行委員長：長谷川 専、高嶋隆太

プログラム委員長：辻村 元男

### 論文誌「リアルオプション研究」原稿募集のご案内

日本リアルオプション学会は、査読付論文誌「リアルオプション研究」（英文名称：Journal of Real Options and Strategy）を発刊しております。本論文誌は、電子ジャーナル化されて、国内外に広く、公開されております。

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/realopn>

#### **募集する原稿:**

リアルオプションおよびこれに関連する経営科学、リスクマネジメント、オプション的資産の価値、投資戦略、ゲームと戦略などについての理論、実証および応用に関する研究のほかケーススタディー、あるいは、この分野における教育方法の改善などに関する和文の論文で、新規性または、有用性のあるもの。

投稿原稿は、次の3類型に分けて審査されます。

1. 理論研究
2. 応用研究
3. 研究ノート

<解説： 学会創立十周年記念 特集「リアルオプションの原点とこれからのフロンティア」(1)>

## 不確実性下の戦略策定のためのモデリング～シナリオ戦略法 (1)

### - インフラ・デザインおよび事業投資における戦略と運用の2段階問題 -

高森 寛(早稲田大学) 吳瑛祿(株シーエスデー) 長坂 研(東京農工大学)

キーワード： 確率計画法、シナリオ戦略技法、オプション資産、事業資産、二段階問題

#### 1. はじめに

いわゆる「オプション」と呼ばれる資産や契約条項は、不確実性やそれに伴うリスクに対処しての計画や意志決定において、中心的な概念として現れる。

近年、進展してきた金融技術においては、株式などの不確実変動をブラウン運動など、確率過程のモデルとして表現して、オプション資産の価値評価をしてきた。これらの革新的な理論と考え方は、金融の世界を超えて、ひろく、企業の事業プロジェクトや、公共プロジェクトの計画や戦略思考にも、大きなインパクトを与えてきた。

しかし、ブラックショールズなど、金融の世界で使われる強力なリスク資産評価法は、企業の投資案件や、公共インフラの計画の戦略策定に使うとなると、いくつか、難があることが認識されている。その主要な難点は、次の二つに整理できると思われる：

1. 金融の世界では、常に、原資産についての市場なるものがあり、その市場での変動との間で、裁定 (arbitrage) 関係をデザインして、リスクをヘッジすることが可能である。しかし、金融以外の世界では、そのような市場が存在しなかったりして、リスクをヘッジする手立てがないことが多い。
2. 企業の投資や、公共インフラ計画などに関わる意思決定では、不確実性とリスクなるものに関連して、市場がないのみならず、多種・多様なものを考えなければならない。たとえば、投資をした後に起こりうるリスク事象には、原材料の価格変動もあるが、競合他社の行動などがありうる。気象変動もありうる。これら、まったく異次元の諸現象を、包括的に、ひとつの多次元確率過程としてモデル化できたとしても、手に負えないほど、複雑になってしまう。

そこで、ここでは、金融のオプションモデルとは違った方法で、不確実性とリスクに直面しながら、なんとか、現実的に意思決定を支援するモデルと方法を紹介する。

この手法は、新しいものではないが、いわゆる確率計画法 (stochastic programming) といわれるもので、数理計画法の一つの発展領域である。

従来、数理計画法の分野においても、いわゆる chance-constraint programming といわれるモデル研究があった。このチャンス制約型の問題では、最適計画の問題の目的関数や制約の中のいくつかの定数項が確率変数であるような問題である。そして、「そのいくつかの制約については、たとえば、95%の確率で満たされればよい」、すなわち、この制約は、5%は満たさなくてもよいというタイプの問題を考えるものである。

一方、確率計画法 (stochastic programming) は、それとは、かなり違った特質の問題を扱う。いくつかの定数項が確率変数であることは同じであるが、意志決定変数は、戦略変数 (strategic variable) と、戦術変数 (tactical variable) に区別される。戦略変数は不確実事象が実現する前に意思決定がなされるべき変数である。戦術変数は、不確実事象については、何が実現したかを観察してから、それらに、対応しての意思決定である。各制約条件は、戦術的対応によって、確実に、100%の確率で、満たされることが要求される。また、この問題状況では、目的関数は確率変数となるので、その確率変数の一体なを最大化、あるいは、最小化しようとしているのか、明確にされる必要がある。

このように、チャンス制約型問題と明確に区別するためにも、私たちは、確率計画法 (stochastic programming) を「シナリオ戦略法」と呼ぶことにしたい。それは、金融モデルを投資戦略に適用するにあたっての難点の2.に挙げた点に関して、異次元・異質のリスク要因を、シナリオの集合という形で、簡易的に扱い、現実的解決を容易にしてくれるからである。

数理計画法は、いくつかの不等式での制約を満たしながら、目的関数を最適化しようとするが、シナリオ戦略法では、いくつかの制約条件が不等式ではなくて、制約条件自体が、最適化問題になっているタイプのものがある。この種のシナリオ戦略法が扱う問題は、二段階問題 (bi-level problem) と呼ばれている。

## 2. 数理計画法からシナリオ戦略法へ

まず、端的に、シナリオ戦略法とは、どのような問題何なの例をしめす。

### 2.1 シナリオ戦略法の例 1

ある電力消費者 A 氏は、次週の時間平均での自らの電力必要量（需要）とその電力を購入できる価格について、不確実な状況にある。これら価格と A 氏の必要消費量（需要）は、下の表 1 の三つのシナリオのどれかが実現する。

表 1 A 氏が直面する不確実事象

シナリオ	確率	必要電力 (MW/h)	価格 (万円/MW)
1	0.2	11	2.6
2	0.6	9	2.3
3	0.2	7	2.0

さらに、A 氏は、今週の現時点において、ある二者間契約で、電力を 2.4 (万円/MWh) で、いくらでも購入することが可能である。しかし、この購入契約は、次週の消費量（需要）と価格が確定する前に、結ばねばならない。

[解説]

この問題を次のように定式化しよう。

パラメータ： 不確実パラメータ

$\tilde{d}$  : 次週の電力必要量（需要）(MW/h)

$\tilde{e}$  : 次週の電力価格 (万円/MWh)

意思決定変数

$P^C$  : 二者間契約での購入量 (MW/h)

$P$  : 市場からの購入量 (MW/h)

解決したい問題

$$\begin{aligned} & \max_{P^C, P} 168(2.2P^C + \tilde{e}P) \\ & \text{制約:} \quad (1) \\ & P^C + P \geq \tilde{d} \\ & P^C, P \geq 0 \end{aligned}$$

この問題では、二つのパラメータ  $\tilde{d}, \tilde{e}$  が不確実事象であるので、パラメータには、それを表す記号“ $\sim$ ”がついている。これらに確定した値  $d, e$  が与えられているならば、この問題(1)は普通の線形計画(リニアプログラミング)問題である。

ここで、意思決定変数は  $P^C$  と  $P$  であるが、これらは根本的に異なるタイプの意思決定を表している。

図 1 に示すように、今週の現時点での決定  $P^C$  は、どのシナリオが実現するか、まだ、分からない状況で決めなければならない。次週の購入する電力  $P$  は次週の需要  $\tilde{d}$  と価格  $\tilde{e}$  について、どんな値を実現するかを観察してから、意思決定できる。この意味で、 $P^C$  は戦略的決定であり、 $P$  は戦術的決定である。この  $P$  の戦術的決定は、リソース決定 (recourse decision) とも呼ばれている。

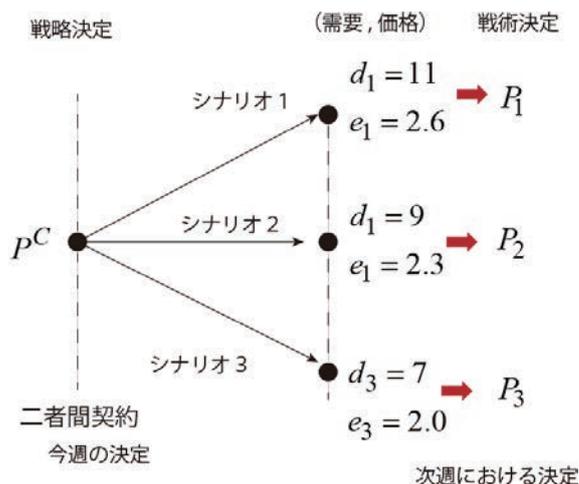


図 1 シナリオ戦略法の状況

ここで、もう一つ観察するべきことがある。戦術決定  $P$  の方は、シナリオのどれが実現するかによって、シナリオ 1 が実現したときには、 $P_1$  (MW) を追加購入し、シナリオ 2 なら  $P_2$  (MW) を、シナリオ 3 なら  $P_3$  (MW) を追加購入するというふうに、意志決定  $P$  は確率事象であることになる。

かくして、結果的には、問題(1)の目的関数であるトータル電力購入費用も、確率事象ということになる。

このように、不確実でリスクのある目的関数がある場合、リスク回避的な立場に立つなら、起こりうる総費用でも、一番大きな費用を最小化しようとする意思決定者がいることも考えられる。

いま、ここでは、各シナリオの確率がわかっている、期待費用を最小化する方法を考えることにしよう。

期待値最小化のシナリオ戦略モデル

図 1 に示すように、シナリオ  $i$  が実現したときの電力追加購入量を  $P_i, i=1,2,3$  としよう。これら新しい決定変数をつかうことにより、次のような線形計画問題を定義することができる。

$$\min C^S = 168 \times (2.4P^c + 0.2 \times 2.6P_1 + 0.6 \times 2.3P_2 + 0.2 \times 2.0P_3)$$

制約:

$$P^c + P_1 \geq 11 \quad \text{シナリオ1が実現のとき} \quad (2)$$

$$P^c + P_2 \geq 9 \quad \text{シナリオ2が実現のとき}$$

$$P^c + P_3 \geq 7 \quad \text{シナリオ3が実現のとき}$$

$$P^c, P_1, P_2, P_3 \geq 0$$

これは、標準的なリニアプログラミング問題である。マイクロソフトのエクセルには、数理計画法を解くソフトウェア「ソルバー」が、アドオン機能としてついている。図2に、この機能を使うために、エクセルシート上に、問題(2)をレイアウトしたものである。どのレイアウトでは、意思決定変数は、

	戦略決定	戦術的決定					
Scenario ⇒		1	2	3			
確率 ⇒		0.2	0.6	0.2			
	Pc	P1	P2	P3			
意思決定	7	4	2	0			
各シナリオ制約 ↓					左辺和		右辺下限
シナリオ1	1	1			11	>=	11
シナリオ2	1		1		9	>=	9
シナリオ3	1			1	7	>=	7
費用係数 ⇒	2.2	2.6	2.3	2			
目的関数係数 ⇒	2.2	0.52	1.38	0.4	20.2		
							目的関数値

図2 シンプルなシナリオ戦略のExcelソルバーでのレイアウト、添付資料 File: シンプルシナリオ戦略 1.xlsx

黄色のセルに配置している。灰色のセルは、所与の定数値を並べている。意思決定変数  $P^c, P_1, P_2, P_3$  の値が黄色のセルに与えられたとき、各シナリオでの電力総供給量が、ブルーのセルで計算される。

ソルバーのダイアログ・ボックスでは、これら総供給量が、右辺の各需要を下回ってはならないという制約を定義している。また、最小化すべき期待総費用はピンク色のセルで定義されている。

いまここで定義している問題パラメータの設定では、図7の黄色セルに現れているように、最適の戦略は、今週の現時点において、 $P^c = 7$  (MWh) を購入計約することである。シナリオ1のときの追加購入は  $P_1 = 4$  (MWh) で、シナリオ2のときの追加購入は  $P_2 = 4$  (MWh) である。シナリオ3では、追加購入はしない。

## 2.2 シンプルなシナリオ戦略法の例2: 最適フォワード契約料の決定問題

ある地域の電力供給事業者Aは、2種類の電源を保有している。一つは、風力発電Wで、もう一つは、火力発電設備fである。これらの設備で発電するときの限界発電費用(増分燃料費のことは、下記のとおりである。

$C_w = 0$  : 風力発電は、限界発電費用は、無視できる程度に小さい。

$C_z = 3.0$  (万円/MWh) : 火力発電設備の限界発電費用

$K = 1.0$  (MW) : 事業者Aの火力発電設備の容量。

明日の午前中の10時からの、1時間に関して、地域内の電力需要と風力発電量について、表2の3つのシナリオが考えられる。

事業者Aは、隣の地域の電力事業者Bから、電力供給を受ける契約をしていて、その契約内容は、次の通りである。

前日において、翌日の当該時間帯で、 $X$  (MW) 以内まで発注する可能性があることを連絡しなくてはならない。この段階で、1MWあたり、 $c_x = 0.05$  (万円)の支払いが確定する。すなわち、 $X$  (MW)の容量を購入したことになり、これをフォワード容量購入という。これにより、事業者Aは、翌日のアルタイムで、 $Y$  (MW)をBから購入することができるが、ただし、 $Y$ は $X$ を超えることはできない。また、このBからのリアルタイム調達には、シナリオ*i*に依存して、表に示すような $e_i$  (万円/MWh)の費用がかかる。

表2 明日の10時から1時間の需要、風力発電量、Bからの電力購入価格

シナリオ $i$ ⇒	1	2	3
確率 $\tilde{p}$	0.3	0.3	0.4
需要 (MW) $d_i$	2.5	2.0	4.0
風力発電 (MW/h) $w_i$	1.5	0.8	0.7
Bの電力価格 (万円/MWh) $e_i$	2.5	1.5	2.0

ここで、事業者Aが最小の期待費用で、地域の需要を満たすには、前日の容量契約量(フォワード契約) $X$ をどれだけにするべきかを決めたい。この問題状況を図で示すと図3のようになる。

事業者Aの火力発電による発電レベルを $Z$ とすると、最小化したい費用は

$$\min_{X,Y,Z} c_x X + C_z \tilde{Z} + \tilde{e} \tilde{Y} \quad (3)$$

と書ける。また、制約は、

$$\begin{aligned} \tilde{w} + \tilde{Z} + \tilde{Y} &\geq \tilde{d} \\ \tilde{Y} &\leq X \\ X, \tilde{Z}, \tilde{Y} &\geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

と書ける。

ここでも、問題をこのように記述すると、線形計画のようにみえるが、不確実なパラメータ  $\tilde{e}, \tilde{w}, \tilde{d}$  などが含まれているので、このままでは、線形計画問題として解くことはできない。

この問題で、意思決定変数は、 $X, Y, Z$  であるが、図3に示すように、戦略的意思決定(strategic decision variable)は、前日に決定するフォワード容量契約量  $X$  である。この意思決定変数は、リアルタイムにおいて、どのシナリオが実現するかを知る前になされなければならない。

一方、隣町のBからの購入レベル  $Y$  と、自己保有発電所の発電レベル  $Z$  については、不確実事象  $\tilde{e}, \tilde{w}, \tilde{d}$  の実現値を観察してから、それに対応しての意思決定である。したがって、これらも確率変数(random variable)であり、 $\tilde{Y}, \tilde{Z}$  と書かれるべきであろう。このように、シナリオの実現をみてからの意思決定を表す変数は、戦術的変数(tactical decision variable)、すなわち、リコース変数である。

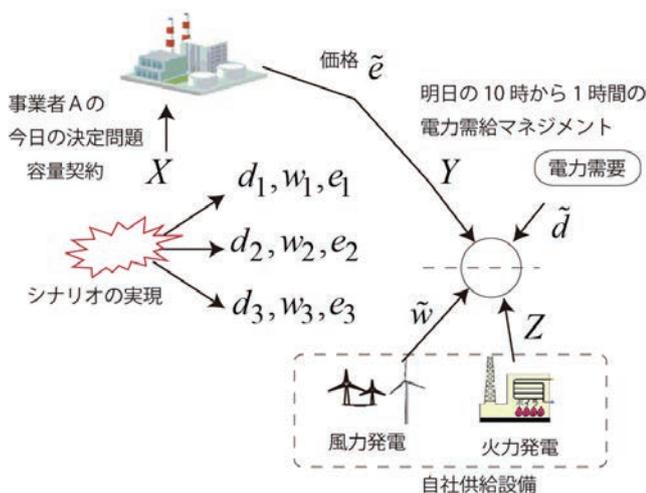


図3 フォワード契約とリアルタイム調整の状況

もうひとつ、留意すべきは、最小化したい目的関数の値

$$\tilde{V} = 5X + 30\tilde{Z} + \tilde{e}\tilde{Y}$$

も、確率変数(random variable)であることであ

る。なぜなら、 $\tilde{V}$  は、確率変数  $\tilde{Z}$  と  $\tilde{Y}$  の関数になっている。

ここでも、 $\tilde{V}$  の期待値を最適化する問題を考えることにする。そして、その場合には、この問題を、確率的パラメータを含まない決定論的な計画問題(deterministic problem)に変換することが可能である。

まず、次のような新しい変数を定義する。

$y_i$  : シナリオ  $i$  が実現したときのBからの購入量、  
 $i=1,2,3$ 。

$z_i$  : シナリオ  $i$  が実現したときの自社保有の発電  
所出力、 $i=1,2,3$ 。

$\pi_i$  : シナリオ  $i$  が起こる確率、 $i=1,2,3$ 。

また、表1に示した不確実事象  $\tilde{e}, \tilde{w}, \tilde{d}$  の各シナリオでの値を  $e_i, w_i, d_i, i=1,2,3$  とする。

最小化したい目的関数：

$$C = c_x X + p_1(e_1 y_1 + C_z z_1) + p_2(e_2 y_2 + C_z z_2) + p_3(e_3 y_3 + C_z z_3) \quad (5)$$

制約：

$$\begin{aligned} \text{シナリオ1に対して: } & y_1 \leq X \\ & y_1 + z_1 \geq d_1 - w_1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{シナリオ2に対して: } & y_2 \leq X \\ & y_2 + z_2 \geq d_2 - w_2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{シナリオ3に対して: } & y_3 \leq X \\ & y_3 + z_3 \geq d_3 - w_3 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{変数の符号制約: } & X, Y, Z \geq 0 \\ & y_i, z_i \geq 0, i=1,2,3 \end{aligned} \quad (9)$$

目的関数(5)に、確率と費用パラメータの値を入れて整理すると、以下になる。

$$C = 0.05X + (0.3)(2.5)y_1 + (0.3)(1.5)y_2 + (0.4)(2)y_3 + (0.3)(3)z_1 + (0.3)(3)z_2 + (0.4)(3)z_3$$

このように、線形計画問題に翻訳してしまうと、マイクロソフトのExcelで利用できる最適化ソフト“ソルバー”で容易に解くことができる。

図4は、上記の問題(5)~(9)をソルバーにレイアウトしたものである。所与のパラメータは、灰色のセルに与えられている。この問題で、意思決定変数は、 $X, y_i, z_i, i=1,2,3$  であるが、ソルバーのダイアログボックスでは、これらは“変化させるゼロ”として指定する。同図のレイアウトでは、黄色

のセルである。

(6)~(8)の需給バランス式は、すべて

$$z_i + y_i + w_i - d_i \geq 0, i=1,2,3 \quad (10)$$

の形で表現できるので、同図の青色のセルに、これらの式を定義している。そして、ソルバーのダイアログボックスでは、これら青色セルの値が非負であるという制約を与える。最小化したい期待総費用(5)は、オレンジ色のセルに設定し、定義している。ソルバーのダイアログボックスだが、このセルの値を最少化したいことを入力する。

シナリオ	1	2	3		
確率 $p_i$	0.3	0.3	0.4		
需要 $d_i$	2.5	2	4		
風力発電 $w_i$	1.5	0.8	0.7		
B電力価格 $e_i$	2.5	1.5	2		
契約単価 $c_x$	自家発電単価		自家発電容量		
0.05	3		1		
X	2.3			0.12	契約費用
$y_i$	1	1.2	2.3	1.58	期待購入費用
$z_i$	0	0	1	0.4	期待発電費用
				2.1	期待総費用
シナリオ $i$	1	2	3		
$z_i + y_i + w_i - d_i$	0	0	0		

図 4 Excel ソルバーでの最適フォワード契約の決定、添付資料 File: 最適フォワード契約.xlsx

ソルバーで、この問題を解くにあたっては、黄色の「変化させるセル」での初期値は、任意の値を与えておいてよい。

いま、与えられているパラメータの値では、最適解は同図のように得られる。すなわち、前日に契約する購入容量は  $X = 2.3$  (MW) である。そして、シナリオ 1, 2, 3 のそれぞれが実現した場合の B 社からの購入量  $y_i$  と、自家発電量  $z_i$  は下記になる。

シナリオ 1 のとき、 $y_1 = 1$  (MW),  $z_1 = 0$  (MW)

シナリオ 2 のとき、 $y_2 = 1.2$  (MW),  $z_2 = 0$  (MW)

シナリオ 3 のとき、 $y_3 = 2.3$  (MW),  $z_3 = 1.0$  (MW)

### 3. シナリオ戦略法における上段問題と下段問題

この章では、シナリオ戦略法は、不確実事象のシナリオを介しての上段問題と下段問題を包括的に解

くものであることを明らかにする。上段、下段の問題とも、最適化問題である。

問題例：

欧米では、早くから、電力卸市場があり、市場ベースで電力の取引がなされ、そこでは、電力価格が、市場で決まるという価格メカニズムの仕組みが機能していた。電力の取引で重要なのは、瞬時瞬時において、需要量と供給量が等しくなければならないことがある。需要や供給量がきわめて不確実な中で、この需給バランスを確保しながら、市場効率性を保証する方法が、二段階決済方式(two settlement system)といわれるものである。

この章では、

- i. 二段階決済方式の取引システムは、シナリオ戦略法のモデルで記述できること、
- ii. シナリオ戦略法には、上段における最適化と下段における最適化があり、その二つを包括的に、最適化する

ということを明らかにする。

二段階入札では、市場での電力需要に対して、多数の供給者が、表 3 に示すように、市場オペレーターに前日価格  $c_i^d$  とリアルタイム価格  $c_i^r$  の二つの供給価格、および供給容量  $K_i$  を提示する。

表 3 各供給者の入札価格と供給量

前日価格 (万円/MWh)	リアルタイム価格 (万円/MWh)	供給容量 (MW)
$c_1^d = 2.0$	$c_1^r = 2.0$	$K_1 = 50$
$c_2^d = 1.6$	$c_2^r = 2.4$	$K_2 = 75$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$c_m^d = 1.0$	$c_m^r = 3.0$	$K_m = 30$

これは、図 5 二段階決済市場の仕組みに示すように、翌日のある特定の時間帯  $t$  において、これらの価格で、 $K_i$  の量まで供給したいという提案である。これらの提案(入札)をする段階では、その翌日の時間帯  $t$  に、どのような需要  $\tilde{D}$  が実現するのかわからない。

前日価格  $c_i^d$  は、当該時間帯  $t$  よりも 24 時間ほど前に提示される。また、リアルタイム価格  $c_i^r$  は、当該日になってから提示されるが、しかし、不確実変数  $\tilde{D}$  が、まだ未知の状況で提示されることは、前日価格と同じである。その意味で、 $c_i^d, c_i^r$  とも、前もって約束されるという意味で、フォワード価格である。そこで、

市場オペレータの問題は、まずは、各供給者  $i$  からの前日価格  $c_i^d$  での購入量  $x_i$  を前日の時点で決定し、契約することである。それは、需要量  $\tilde{D}$  が未知の状態での意思決定であるから、当然、リアルタイムにおいては、需要量  $\tilde{D}$  の実現値に対応しての調整をおこなわなければならない。それが、リアルタイムにおいての各供給者からの購入量  $y_i$  の決定である。この段階では価格交渉はできない。すなわち、フォワード価格  $c_i^r$  で購入する。

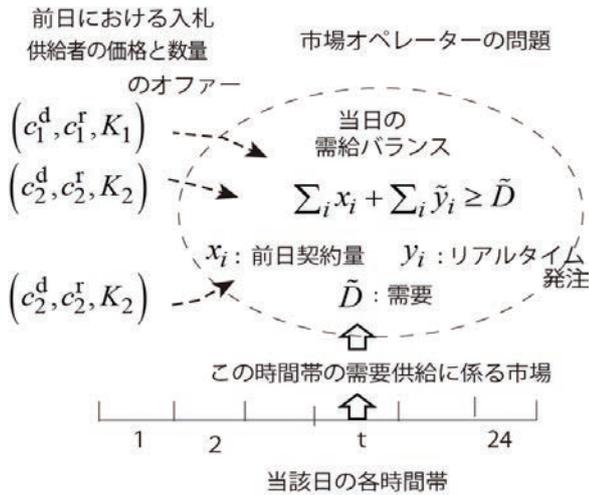


図5 二段階決済市場の仕組み

また、前日の時点で、市場オペレータが供給者  $i$  から購入契約した量  $x_i$  は、リアルタイムの時点では変更できない。

### 3.1 二段階問題としての定式化

市場オペレータの立場に立って、翌日の第  $t$  時間帯の不確実な需要  $\tilde{D}$  を最小の期待費用で満たすための戦略問題をシナリオ戦略問題として定式化する。ここで、意思決定変数は、表3の各供給者からの前日購入量  $x_i$  と、リアルタイム購入量  $\tilde{y}_i$  である。

以下では、需要の不確実性については、離散的に、 $n$  個のシナリオ値  $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  のいずれかが実現するものとして、 $D_k$  が実現する確率を  $p_k$  とする。

**上段問題：** 前日における市場オペレータの決定問題

$$\begin{aligned} \min_{x_i} & \sum_i c_i^d x_i + E[\tilde{Y}] \\ \text{制約：} & \\ & x_i \leq K_i, \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (11)$$

この上段問題において、前日購入契約量  $x_i$  の決定

は、リアルタイムでの需要  $\tilde{D}$  が実現する前の決定である。一方、目的関数の第2項の  $E[\tilde{Y}]$  は、各シナリオが実現しときの最小費用  $\tilde{Y}$  の期待値である。

リアルタイムでの最適購入量  $\tilde{y}_i$  は、需要の実現を観察して、それに対応しての最適決定である。その問題は、次のような下段での最適化問題である。

**下段問題：** 不確実シナリオ  $k$  の実現に対応しての問題

$$\min_{y_{ik}} Y_k = \sum_i c_i^r y_{ik} \quad (12)$$

制約：

$$\begin{aligned} \sum_i x_i + \sum_i y_{ik} &= D_k \\ y_{ik} &\leq K_i - x_i, \quad i=1, \dots, m \\ y_{ik} &\geq 0, \quad i=1, \dots, m \end{aligned} \quad (13)$$

このように、下段問題は、上段での意思決定  $x_i, i=1, 2, \dots, m$  およびシナリオの実現値  $D_k$  を所与のパラメータとしての最適化問題である。上段問題には現れなかったが、下段問題のみに現れる変数として以下がある。

$y_{ik}, i=1, \dots, m, k=1, \dots, n$  : 供給者  $i$  から、シナリオ  $k$  のときに、購入する電力量。

以上に記述した上段問題と、下段問題を包括的に解くグローバルな最適化問題は、次のように、定式化できる。

$$\min_{x_i, y_{ik}} \sum_i c_i^d x_i + \sum_k p_k \left[ \sum_i c_i^r y_{ik} \right] \quad (14)$$

制約：

$$\begin{aligned} x_i &\leq K_i, \quad i=1, \dots, m \\ x_i &\geq 0, \quad i=1, \dots, m \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sum_i x_i + \sum_i y_{ik} &= D_k, \quad k=1, \dots, n \\ y_{ik} &\leq K_i - x_i, \quad i=1, \dots, m, k=1, \dots, n \\ y_{ik} &\geq 0, \quad i=1, \dots, m, k=1, \dots, n \end{aligned} \quad (16)$$

### 3.2 二段階問題の数値例

ここでは、供給者は、表3に示された供給者1と2のみを想定する。すなわち、二社からの入札  $(c_1^d, c_1^r, K_1) = (2, 2, 50)$  と  $(c_2^d, c_2^r, K_2) = (1.6, 2.4, 75)$  がある。

需要の不確実性に関するシナリオと確率については、表4のように想定する。

表 4 各シナリオにおける需要

シナリオ k	1	2	3
確率 $p_k$	0.4	0.3	0.3
需要(MW/h) $D_k$	100	30	80

この場合、上段と下段の問題を包括的に解く線形計画は、下記ようになる。

$$\min_{x_i, y_{ik}} 2x_1 + 1.6x_2 + 0.4(2y_{11} + 2.4y_{21}) + 0.3(2y_{12} + 2.4y_{22}) + 0.3(2y_{13} + 2.4y_{23})$$

制約：

上段容量制約： $x_1 \leq 50, x_2 \leq 75$   
 $x_1, x_2 \geq 0$

下段での制約：

シナリオ 1： $x_1 + x_2 + y_{11} + y_{21} = 100$

シナリオ 2： $x_1 + x_2 + y_{12} + y_{22} = 30$

シナリオ 3： $x_1 + x_2 + y_{13} + y_{23} = 80$

容量制約： $y_{11}, y_{12}, y_{13} \leq 50 - x_1$   
 $y_{21}, y_{22}, y_{23} \leq 75 - x_2$

非負条件： $y_{11}, y_{21}, y_{12}, y_{22}, y_{13}, y_{23} \geq 0$

この問題を、Excel ソルバーで解くために、シート上に、パラメータおよび決定変数をレイアウトしたものを図 6 に示す。灰色のセルには、各種パラメータを与えている。黄色のセルは、上段決定変数  $x_1, x_2$  および下段変数  $y_{11}, y_{21}, y_{12}, y_{22}, y_{13}, y_{23}$  を配置して、ソルバーのダイアログ・ボックスで「変化させるセル」として指定している。青色のセルには、残余容量  $K_1 - x_1$  および  $K_2 - x_2$  を計算している。また、各シナリオ  $k$  ごとの総供給量  $x_1 + x_2 + y_{1k} + y_{2k}$  青色のセルに計算式を設定した。これら各総供給量は需要  $D_k$  を下回ってならない制約も定義した。そう期待費用はオレンジのセルに計算式を設定し、それを最小化したい目的セルとした。

この数値例での最適解は、供給者 2 から、前日に  $x_2 = 30 \text{ MW}$  を契約する。シナリオ 1 では、供給者 1 から  $50 \text{ MW}$  を、供給者 2 から  $20 \text{ MW}$  をリアルタイム

購入する。シナリオ 2 では、前日購入分で需要を満たせる。シナリオ 3 では、供給者 1 から  $50 \text{ MW}$  を購入し、供給者 2 からの購入はない。

		供給者1		供給者2					
	Cd_i	2.0	1.6						
	Cr_i	2.0	2.4						
	Ki	50	75						
	供給者i	1	2	供給				前日費用	
	X_i	0	30	30					48
	残余容量⇒	50	45			需要	確率		
k		1	2	供給量		D_k	Pk	費用	
1	y_i1	50	20	100		100	0.4	148	
2	y_i2	0	0	30		30	0.3	0	
3	y_i3	50	0	80		80	0.3	100	
								リアルタイム期待費用⇒	89.2
								総期待費用⇒	137.2

図 6 二段階問題の Excel ソルバーによる解法、添付 File: 二段階問題.xlsx

#### 4. まとめ

確率計画法は、従来チャンス制約問題 (chance-constrained problem) と呼ばれた問題とは、異なる問題を扱うので、シナリオ戦略法と呼びたい。不確実な将来事象をシナリオの集合としてモデル化する。シナリオの実現前になされる意思決定変数と、シナリオの実現を観察してからの意思決定変数を包含した問題がシナリオ戦略問題である。

#### 参考文献

1. Conejo, A.J., M. Carrion and J. M. Morales, "Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets," Springer, 2010
2. Conejo, A.J., L. Baringo, S.J. Kazenpour and A. S. Siddique, "Investment in Electricity Generation and Transmission," Springer, 2016.
3. 高森寛、横山隆一、山下大樹、新村英隆 (2016). "不確実性下の戦略的電力需給マネジメント - フォワードおよびオプション契約の活用とシナリオ戦略技法 -", 『リアルオプションと戦略』 Vol.8, No.2, 2016
4. 高森寛、吳瑛祿、長坂研 (2016). "コミュニティのエネルギーマネジメント事業のシステム・デザイン-シナリオ戦略技法のアプローチ," 『リアルオプション研究』 Vol.8.

〈論説： 学会創立十周年記念 特集「リアルオプションの原点とこれからのフロンティア」(2)〉

## FinTech

### ～リアルオプションに何ができるか～

青木 克人

(日本リアルオプション学会理事・評議員)

#### 1. はじめに

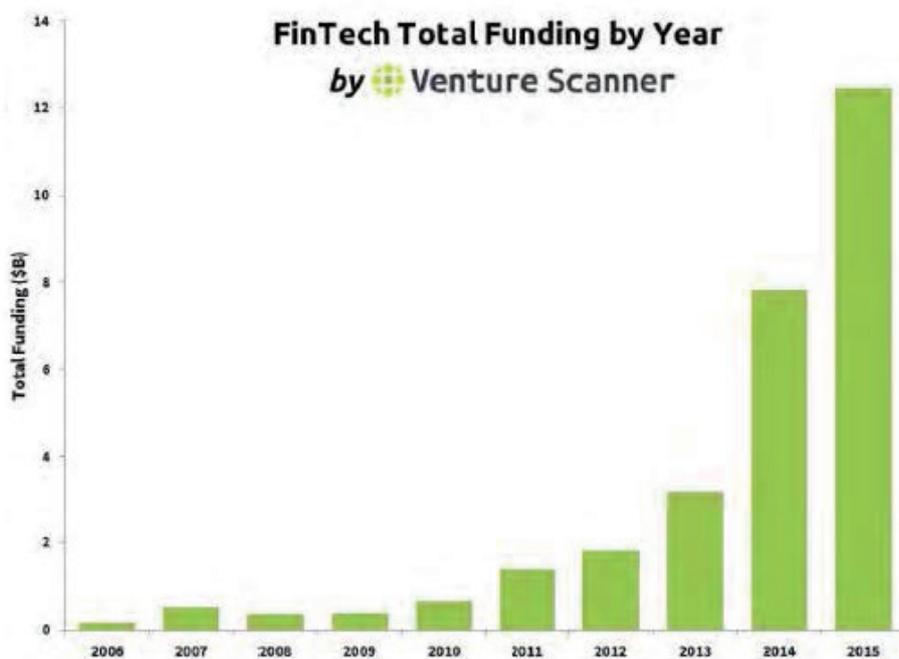
IoT/FinTech は単なる BuzzWord ではなく、「第四次産業革命」にも該当する事態である。製造業にとっての IoT、金融業にとっての FinTech は日本においても官民挙げて推進される方向である。

以上の状況のもと、主要書店の店頭には IoT や FinTech の現状や方向性についての啓蒙書、解説書が大量に刊行されている。とりわけ FinTech については金融庁、日銀もセミナー等に積極的に登壇

し、啓蒙活動を精力的に行っている。

IoT/FinTech は範囲、規模ともに急成長を遂げているビジネスモデル(図1)であり、リスクもリターンも大であることが容易に推察される。一方

「IoT/FinTech のリスク」に正面から取り組んだ単著はおろか、先行研究も見当たらず、「事業戦略・リスクの評価」のツールであるリアルオプションの貢献する余地は大であると考えられる。



(出所) Venture Scanner

図1：世界的に、FinTech 企業に投資資金が流入

本稿においては、IoT/FinTech のうち、FinTech においてリアルオプションの貢献し得る領域について提案を行う。

#### 2. FinTech 概観

本邦における FinTech につき概観する。

## 2.1 FinTech で何が変わるか

銀行業務に限定しても図2の通りフルバンキングの業務に対して、FinTech スタートアップ企業がラインアップされている。共通点として挙げるべきは、ユーザーインターフェースである。従来のATM・ハイカウンター・ローカウンター等の「実店舗」に加えて、スマートフォン上でほぼ全てのトランザクションを完結することができることが特徴である。また、レンディングのように、「実店舗」と人手だけでは実現しえないようなサービスも実現されている。

スマートフォンとフィーチャーフォン(所謂「ガラケー」との違いは、メモリー・CPU・通信速度に加え、Ferica・GPS・三軸加速度センサー・カメラ(含む2次元バーコードリーダー)等の高度のハードウェア機能を備え、かつ、OS(基本ソフト)のサプライヤーがApple及びGoogleの事実上の寡占状態であるため、アプリケーション(応用ソフト)の供給者(=スタートアップ企業)の参入が容易になった点である。また、クラウドコンピューティングが普及し、

スタートアップ企業が高価なサーバー等を自前で所有する必要がなくなっている。これらの点がFinTechを加速している。

個人のユーザーはスマートフォン上で金融機関等にアクセスし、その画面のデザインや、使い勝手(ユーザーエクスペリエンス→UX)が悪ければ、数秒で他の金融機関を選んでしまう。スマートフォン上で実現されるサービスは、トップシェアにならなければ事実上生き残りは不可能と言われている。

一方で本邦の伝統的金融機関サイドはオーバーバンキング、ゼロ金利政策等により収益が圧迫される中、高齢の富裕層等の収益セグメントのためには実店舗・ATM網・外勤要員も維持することが必要であり、AI等を活用したコンサルティングのサポート、将来的にはブロックチェーンの活用によりコスト削減を図り、実店舗を維持するコストを捻出する必要にも迫られている。FinTechは収益拡大と共に、コスト削減のためのIT投資機会としての側面も持っている。

サービス分野	内容	海外の主な企業	日本企業( )は商品名
融資(Lending)	・Web上で貸し手と借り手を募り、Rating等を実施して、融資を実現するサービス。P2Pレンディング、ソーシャルレンディングとも呼ばれ、融資対象は個人、法人。FinTechにおいて現在最も注目される領域と言われている。	LendingClub, Prosper, Kabbage, Affirm	Maneo, エクストレンジャー・レンジョン(Aquash), クラウドクレジット
決済(Payments)	・スマホ等を利用してクレジットカード決済を行うサービス。伝統的に多くのFinTech企業が参入。一部は既に大企業に成長。近年はBitcoinの技術により既存インフラ刷新を目指す企業も登場。	PayPal, Stripe, Square	LINE Pay, コイニー, マタプス(SPIKE)
個人資産管理(Personal Finance)	・本人の許諾のもとで多くの金融機関の口座情報を集約して活用するアカウントアグリゲーション等により、顧客の資産を分かりやすく管理するサービス。	MX, Mint	マネーフォワード, Zaim, マネーツリー
資本性資金調達(Equity Financing)	・資金を必要とするベンチャー企業と個人投資家をマッチングさせて、資本を調達するサービス。IPO投資も可能。	CircleUP, Loyal3	ミュージックセキュリティーズ
個人による投資サポート(Retail Investments)	・個人投資への助言を、完全にソフトウェアだけで行うことにより、安価で提供するサービス。質問に回答することによるポートフォリオの組成、テーマ選択による投資、ビッグデータ分析による資産管理も可能。	Motif Investing, Wealthfront, Betterment	お金のデザイン, ZUU, Finatext(あすかぶ!)
小規模企業向けサービス(Business Tools)	・小規模企業向けに、売掛金・買掛金・固定資産等の管理、請求書作成、給与・税金支払いといった経理、税務等のサポートを行うサービス。	Xero, ZenPayroll, Zenefits	freee, マーベス
送金(Remittances)	・国際送金やP2P送金等のモバイル送金を低価格で提供するサービス。送金先に銀行口座がない場合も送金可能。外国人による母国への送金手段として注目されている。	XOOM, TransferWise, WorldRemit	——
個人向け金融(Consumer Banking)	・モバイル等と銀行のインターフェースを担当し、モバイル等による銀行サービスを提供。個人に対して使い過ぎ防止等の適時適切な助言サービスも可能。	Simple, Moven	——

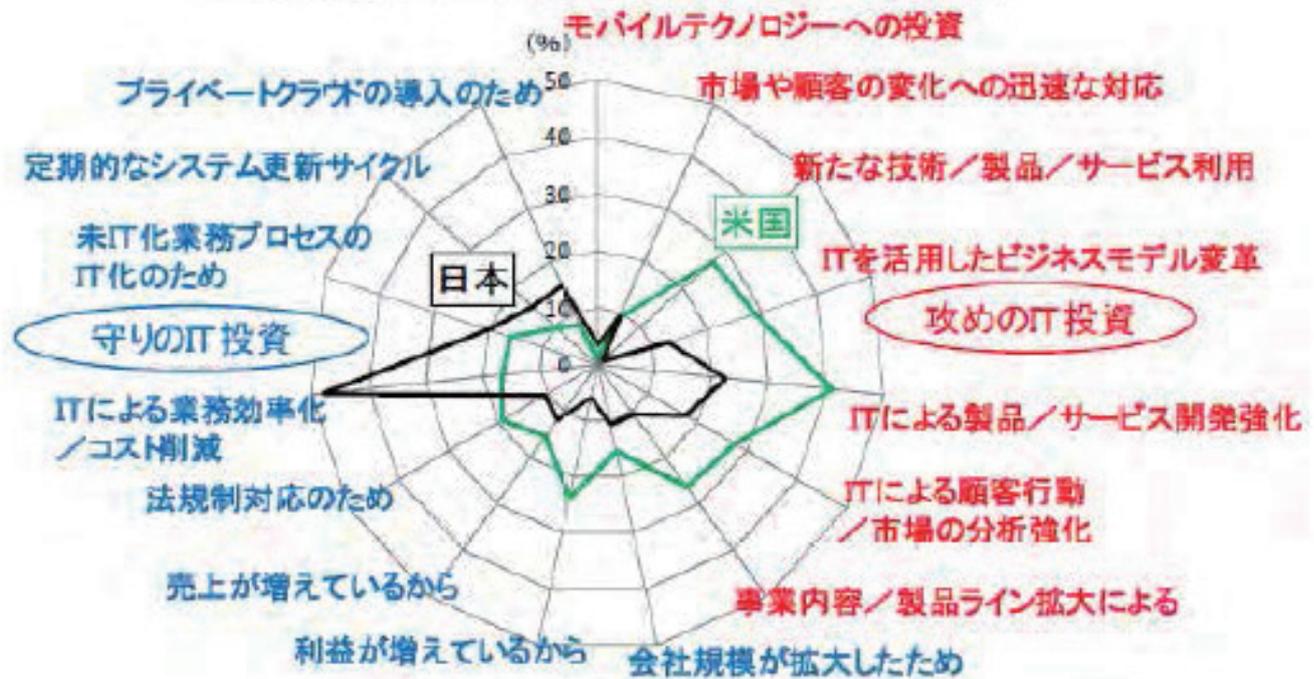
(出所) 日本銀行

図2: FinTechによって実現される金融の高度化事例

## 2.2 本邦における FinTech と課題

青木(2011)にもある通り、特に本邦の金融機関の IT

投資は「攻め」というよりコスト削減等を主目的にした、「守り」の IT 投資の比率が高い (図 3)。



(出典)一般社団法人 電子情報技術産業協会(JEITA)  
「ITを活用した経営に対する日米企業の相違分析」調査結果(2013年10月)

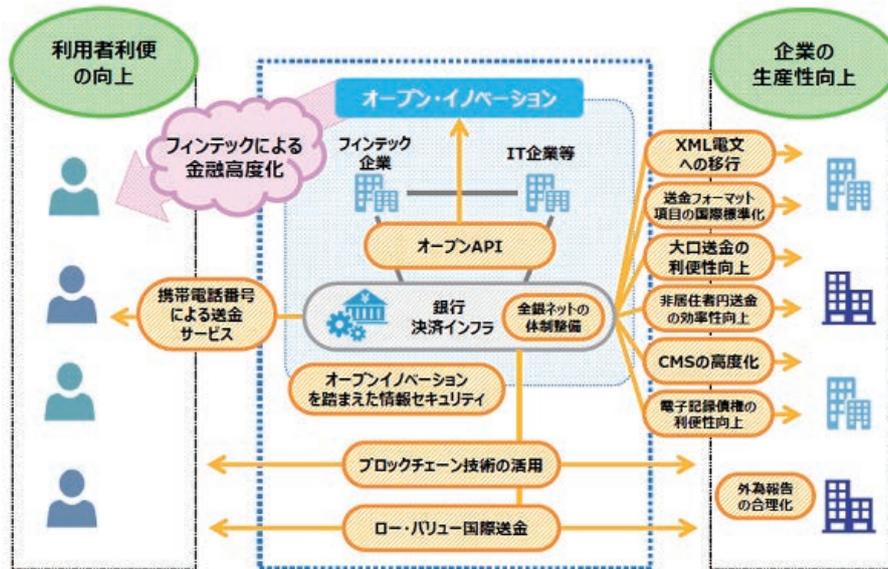
図3：米国と日本企業のIT投資（全産業）  
(IT予算を増額する企業における、増額予算の用途)

FinTech投資は上述の通りコスト削減を目的にできる分野もあるが、大半は戦略的にカスタマーエクスペリエンスを向上させたり、レンディングのように従来の枠組みでは全く実現しえなかったビジネスモデルを実現する戦略的IT投資であり、本邦の伝統的金融機関が決して得意としてきた分野ではない。

国際的に見れば常に最先端のサービスを提供し続けてきた第一次～第三次のオンラインも、護送船団式監督体制の下で、横並びに開発されてきたものであり、決して個々の金融機関が独自戦略を描いていたものとは言えない。さらには1990年代以降の金融危機によりそもそも投資余力がなく、先進的かつ大規模な新規システムを開発することなく、伝統的金融機関が経営破綻したり公的資金の導入を受けることになったような事態を経て、メガバンク・メガ損保等に至るまでの複数段階のM&Aにて生存を模索せざるを得ず、その過程においては経営意思決定の人的資源及びシステム統合コスト・開発要員を奪われ、「攻めのIT投資」の意思決定を数十年にわたり行ってこなかった経緯がある。近年になってようやくM&Aも一息ついた感があったが、ゼロ金利政策等に

より、さらなるコスト削減策を求めて、金融グループを超えて資産管理銀行を合併する動きも報じられている。FinTechに求められる「攻めのIT投資」を米国並みに実行する投資余力及び人的資源に乏しいのが課題である。

こうした中でも当局はリテール顧客の利便性向上・ホールセール顧客である企業の生産性向上へのキラーコンテンツとしてFinTechを位置づけ、推進しようとしている(図4)。ここで鍵になるのは、従来より本邦伝統的金融機関のメインフレームを担ってきたITベンダーが、いかにStartup企業との「仲」を取り持つかであると考えられる。日本においてもエコシステムを築くべきとの論調が強いが、その例として度々挙げられるシリコンバレーにおいては、Startup企業を育てるためのエコシステムが存在するのであって、そこには伝統的金融機関も、伝統的金融機関をあたかも「メインバンク」のように支え続けるITベンダーも存在しない。本邦金融機関に相応しいエコシステムを育てることが可能なのは証券・地銀等の共同センター等を含めて伝統的金融機関を支えてきたITベンダーとなろう。



(出所) 金融庁

図4: アクションプランの全体像

また、FinTech はまさに「イノベーションのジレンマ」であるという見方も可能である。ただし、クリステンセンがこの概念を世に知らしめたので、伝統的金融機関は過去の事例に学ぶことが可能となった点は注目に値する。協業の相手としてのみではなく、破壊者としての側面も目に見えている FinTech とどう向き合うかは伝統的金融機関にとり大きな課題である。2017年1月23日に Merton(2017)において、FinTech には「信頼」が不足しており、「信頼」の無き例として（口頭で）『スマートフォンに膝の具合が悪いと相談したら、AI は「切断しろ」と回答するだろう、だから私は AI (FinTech) ではなく信頼できる医者に行くのだ』と FinTech の未熟性を指摘したが、現実には医学が AI や機械学習を使って最適な療法や薬の化学式を導出する段階に来ており、FinTech は「信頼」に足る成果を出し始めている。このことを認識しないことが、まさに「イノベーションのジレンマ」であり、本邦金融機関の課題とも言えよう。

### 3. リアルオプションと FinTech

それでは、こうした状況で、FinTech 各プレイヤーの保有し得るリアルオプションにはどのようなものが存在するのであろうか。

#### 3.1 伝統的金融機関

伝統的金融機関はまず、FinTech に「参入」するオプションを保有することが考えられる。そのための投資は、ブロックチェーンの導入であり、財務アプリケーション等に対する API の公開であったり、これから発明されるであろう様々な技術・サービスへの「参入」オプションを保有することが考えられる。そ

の主たる投資効果については当面図2で挙げられるような分野での収益拡大効果が考えられるが、本邦の伝統的金融機関がこうした「攻めの IT 投資」を得意としていない点は上述した通りである。その点で、リスクを定量化し、オプションを明確化するリアルオプションのフレームワークの貢献する余地は大であると考えられる。また、コスト削減を意図して行う FinTech 投資についても同様のオプションが存在する。

さらに、「参入」にリスク回避的な立場を前提とするのであれば、小さく始めて拡大するという「拡大」オプションや撤退する「撤退」オプションについても適合する。

#### 3.2 スタートアップ企業

スタートアップ企業にとっては自らが投資家から急成長を求められる立場にあるため、「拡大」オプションを必要とするであろう。また、タグを組むべき本邦金融機関は情報提供、実験、小規模プロジェクト等において提携したとしても永続的に自社と取引できるかは不確実なため、タグを組む本邦金融機関、またはそのメイン IT ベンダーを変更する、「スイッチング」オプションの確保が必要となるであろう。

#### 3.3 伝統的金融機関のメイン IT ベンダー

上述の通り、本邦の伝統的金融機関にとって IT ベンダーは融資における「メインバンク」のような役割を演じてきているため、FinTech においても相応の立ち位置が求められる。リアルオプションの観点では、伝統的金融機関と共に、又はその参謀役として、FinTech 企業を「スイッチ」するオプションが重要であろう。ここに本邦における FinTech のエコシステム形成の鍵が存在すると考える。

#### 4. リアルオプションからの提言「FinTech 支店」

上述の通り本邦金融機関は戦略的 IT 投資を得意としているとは言えない。しかし、まさに「イノベーションのジレンマ」の「破壊者」に見える FinTech の波は押し寄せて来ている。一方でパブリックブロックチェーンのように社外でパソコンで実装されているシステムに、伝統的金融機関の心臓部である勘定系システムを実装することには抵抗があると考えられる。こうしたまさに「ジレンマ」の打開策として、FinTech への「参入オプション」「拡大オプション」として Web 上に「FinTech 支店」の開設を提案する。

FinTech 支店には実通貨の勘定元帳と仮想通貨の勘定元帳を各々別個のプライベートブロックチェーンで実装する。実通貨と仮想通貨は容易に時価で交換可能とする。プライベートブロックチェーンにて実装することにより、従来の勘定系に比べて飛躍的に安いコストで預金業務、決済業務を実装することが可能となる。また、仮想通貨は各種ポイントとの親和性も高いことから、各種クロスセルも容易となる。決済業務自体はいかに低コストであっても高収益の実現は困難であるが、FinTech 支店に滞留した資金を保険、投信、年金等の収益商品へのクロスセルに向けることが可能となる。そうしたクロスセルには、より高度化されたロボアドバイザーの実装も有効になることが想定される。このように FinTech 支店は「参入オプション」として低コストで従来の本邦金融機関の支店では実現できなかった FinTech サービスを実装することが可能であり、ブロックチェーンやロボアドバイザーを社内の他のシステム・サービスに展開する「スイッチングオプション」、他の支店や商品に展開する「拡大オプション」等を有していると考えられる。個々のサービスをスタートアップ企業と組んで FinTech 対応するのではなく、社内にフルバンキングに近い商品ラインアップで構築することは、本邦

の伝統的金融機関の経営風土にもマッチする。

#### 5. おわりに

日本で FinTech が官民ともに加速度的に拡大を始めたのは昨年であり、まだ1年も経っていないが、主要金融機関は軒並み何等かの FinTech 対応のプレスリリースを複数行っている。さらに、これからまだまだ多くの技術やアイデアにより様々なサービスが生まれることが期待される。

一方で、クラウドコンピューティングがそうであるように、FinTech も本邦の伝統的金融機関が勘定系にまで取り込むにはまだまだ時間がかかるように見える。本邦金融機関の事業リスクへの低い対応能力、リスク回避的姿勢が透けて見えるが、FinTech に関して戦略的 IT 投資を推進する必要には迫られており、そこにリアルオプションの貢献できる可能性は大であると考えられる。

#### 参考文献・資料

1. Clayton M Christensen(2000), *The Innovator's Dilemma When New Technologies Cause Great Firms to Fail*(Boston; Harvard Business School)(伊豆原 弓訳(2001),『増補改訂版 イノベーションのジレンマ 技術革新が巨大企業を滅ぼすとき』翔泳社。
2. Robert C.Merton (2017), Finance Science and Financial Innovation in Asset Management Trust as the Innovation-Implementation Model for a Sustainable Financial-Service Industry in the Future, *Nippon Finance Association Symposium*, 11-13.
3. 青木克人 (2011), 「情報システム化投資の定量評価—金融機関業態別モデルの構築—」時潮社。
4. 経営情報学会情報システム発展史特設研究部会(編)(2010), 「明日の IT 経営のための情報システム発展史 金融業編」専修大学出版局。
5. 辻庸介・瀧俊雄(2016), 「FinTech 入門」日経 BP 社。
6. 日経コンピュータ(編)(2016), 「FinTech 革命 テクノロジーが溶かす金融の常識」日経 BP 社。

#### 本誌「リアルオプションと戦略」は、国内外に公開される電子ジャーナルとなります

本誌の各号は会員限定の刊行後、3か月を経過してからインターネット上の電子ジャーナルプラットフォーム「J-Stage」に đăng載されます。これにより本誌掲載の記事は、Google Scholar などからも検索可能となり、社会に向けて広く情報発信されます。なお、各記事には DOI (Digital Object Identifier) が登録され、本機関誌の記事は、すべて、国内外から恒久的にアクセスが保証される公開記事になります。第8巻第1号(2016年2月発行)は、2017年3月末頃に、J-Stage 上に、公開される予定です。

&lt;査読論文 2017年3月2日採択&gt;

## 経営者保証の価値に関する一考察： リアルオプションアプローチによる分析

### On the Valuation of the Guarantee by Managing Shareholders : A Simple Analysis by Real Options Approach

伊藤 晴祥

(国際大学 大学院国際経営学研究科 准教授)

Haruyoshi Ito

Associate Professor of Finance  
Graduate School of International Management  
International University of Japan

**Summary:** This paper analyzes the value of guarantee by managing shareholders in Japan using real options approach. Managers of mid and small sized corporations are able to choose whether to be a guarantor or not when borrowing money from financial institutions. When a manager does not be a guarantor, higher interests rate would be offered. This paper shows that the guarantee is a portfolio of call options and a risk-free asset. This paper finds out that the value of guarantee by the managing shareholders is associated with risk free rates, wealth level of managers, and underlying risks of the corporation the managing shareholders engage. Interests rates offered could depend on the wealth level of the managers when managers are guarantors to the debts.

#### 1. はじめに

中小企業の経営者が事業資金の融資を受ける際、多くの場合に経営者は連帯保証人になる必要がある。本研究では、このような経営者保証の価値について、リアルオプションの観点から考察を加える。

表1：日本政策金融公庫による経営者保障に関するガイドラインの活用実績

	平成26年 2月~3月	平成26年度	平成27年度	平成28年 4月~9月
1.新規に無保証で 融資した件数(億円)	5,634	41,860	52,911	36,815
2.新規融資件数	37,345	219,099	220,628	112,838
3.割合(1/2)	15%	19%	24%	33%
4.新規に無保証で 融資した金額(億円)	2,479	14,801	18,950	14,980
5.新規融資金額	11,428	60,457	58,797	29,471
6.割合(4/5)	22%	24%	32%	51%

出典：中小企業庁

(<http://www.chusho.meti.go.jp/kinyu/keieihosyou/>)

経営者保証は、起業家が融資により創業をする場合に大きな足かせとなっていると考えられ、中小企

業経営者や後継者にとっても、経営者保証を提供することは大きなリスクとなっている。そのため、日本商工会議所と一般社団法人全国銀行協会を事務局とし、中小企業庁と金融庁が共同で有識者との意見交換の場として設置された経営者保証に関するガイドライン研究会が、「経営者保証に関するガイドライン」を2013年12月5日に公表し、このガイドラインは2014年2月1日から適用が開始された。その後、多くの金融機関で経営者保証を付けない融資形態が増えつつある。

表1のとおり、日本政策投資銀行において、経営者保証を付けないで行われた融資の件数及び金額はともに増加傾向にあり、金額に至っては、平成28年4月~9月に行われた融資の過半数が無保証で行われたものであった。

金融機関からすれば、経営者保証を付けない場合には、経営者保証を付けた場合よりも、リスクが高い融資案件になるために、高い金利がつけられることになる。例えば日本政策投資銀行では、経営者保証の免除を受けられた場合には、利率が0.2%上乘せされ

る1。そのため、経営者にとっては、経営者保証を付け、リスクをとって融資を受けるか、リスクを取らずに高い金利を支払い、融資を受けるかの意思決定をしなければならない。

本稿では、当該経営者保証をオプションのポートフォリオとして考えられることを示す。リアルオプションアプローチを利用して、経営者保証の価値分析を行い、その価値に応じて、金利がどの程度低減されるべきかについても検証を行う。以上の分析により経営者が融資を受ける際に経営者保証を付けた方がよいか、つけない方がよいかの意思決定に有用な示唆を得ることを目的とする。2節では図を利用して経営者保証がどのようにオプションとして認識できるかについて説明し、3節では、計算の簡単化のため、二項モデルを利用して経営者保証の価値分析を行う。4節では3節の結果をもとに数値例を利用して感応度分析を行う。5節は本論文の結論である。

## 2. リアルオプションとしての経営者保証

株式価値あるいは、負債価値をリアルオプションと考えて分析した研究は、Black and Scholes (1973) 以降多く存在するが2、経営者保証の価値をリアルオプションアプローチにより分析した例は、筆者の知る限りほとんど存在しない。

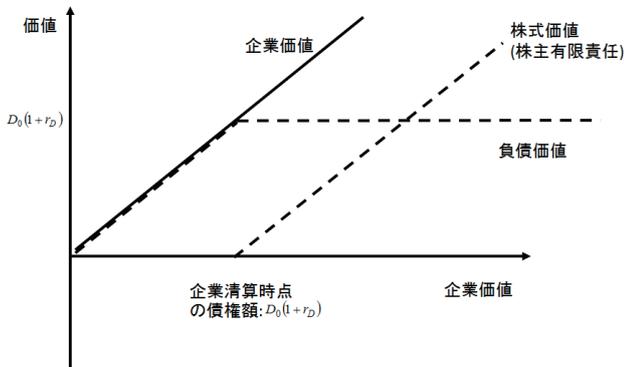


図1：リアルオプションとしての株式価値 (株主有限責任の場合)

注：図中において  $D_0$  は現時点での債権額、 $r_D$  は、経営者保証がない場合の負債金利である。そのため、企業清算時点での債権額は、 $D_0(1+r_D)$  となる。ここで、債権額は企業が返済をしなければならない金額、負債価値は、この債権の価値と定義する。

まず、Black and Scholes (1973) など、既存研究において株主価値及び負債価値がどのようにオプションとして表現されているかを示す。企業価値に応じた

株式価値及び負債価値は、図1に示されている。本稿では分析の簡単化のため、1年後には企業を清算するとし、1年後の企業価値に従って、1年後の負債価値及び株主価値が決まるとする。株主は、企業の所有者であるため、企業価値が債権額を上回った場合には、残余財産を得ることができる。企業価値が債権額を下回った場合には、株主の責任は出資額以上の責任を負わない (株主有限責任である) ため、株主価値は0となる。そのため、株主価値はコールオプションのペイオフと同じになるため、企業価値を原資産とする、コールオプションとして考えることができる。同様に図1のとおり、企業価値が債権額を下回ってしまった場合には、債権者は債権額の一部しか回収することができない。また、企業価値が債権額を上回った場合には、債権額が債権者に対して支払われるのみである。そのために、プットオプションの売り及び安全資産(国債)の買いから複製されるポートフォリオと同じペイオフになる。

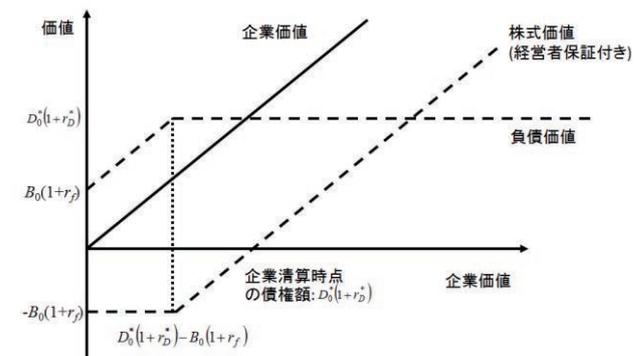


図2：リアルオプションとしての株式価値(経営者保証付きの場合)

注：図中において  $D_0^*$  は現時点の経営者保証付きの場合の債権額、 $r_D^*$  は、経営者保証付きの場合の負債金利である。そのため、企業清算時点での債権額は、 $D_0^*(1+r_D^*)$  となる。ここで、債権額は企業が返済をしなければならない金額、負債価値は、この債権の価値と定義する。 $B_0$  は、現時点における経営者個人の所有する安全資産(国債)の金額、 $r_f$  は、安全利子率である。本論文では、経営者の個人資産は該当企業の株式及び国債のみであると仮定する。

ここで、経営者保証付きの場合の株式価値及び負債価値について検討する。経営者保証付きの場合の株式価値及び負債価値は、図2のとおりである。経営者保証が付いている場合には、企業価値が債権額を下回った場合には、経営者が私財を利用して、返済をしなければならない。本研究では単純化のために、経

1 <https://www.jfc.go.jp/n/finance/search/keitoku.html>

2 オプションアプローチを利用した先行研究及び最新の研究は、佐藤(2016)などが詳しい。



負債金利である。

ここで、負債金利  $r_D$  をリスク中立確率を利用して評価する<sup>3</sup>。第2節で述べたとおり、 $T=1$ 、つまり1年後に企業を清算すると仮定して株主価値及び負債価値を計算する。

式(1)の設定では、企業価値が上昇するリスク中立確率は、 $q = \frac{r_f - d}{u - d}$  である。

負債金利は、1年後の企業価値に依存して決まるため、1年後の企業価値が常に、 $D_0(1+r_D)$ を上回るケース及び、企業価値が下落した場合、つまり下方リスクが顕在化した場合に企業価値が  $D_0(1+r_D)$ を下回るケースのそれぞれについて検証をする<sup>4</sup>。

### ケース1 $V_d > D_0(1+r_D)$

まず、1年後の企業価値が常に、 $D_0(1+r_D)$ を上回る場合には、信用リスクが存在しないため、

$$r_D = r_f$$

となる。

### ケース2 $V_d < D_0(1+r_D)$

つづいて、1年後に企業価値が負債価値を下回る可能性があるケースについて検証をする。企業価値が上昇した場合の負債価値を、 $D_u$ 、下落した場合の負債価値を  $D_d$  とすれば、負債価値は以下の式(2)のように示される。

$$\begin{aligned} D_u &= D_0(1+r_D) \\ D_d &= (1+d)V_0 \end{aligned} \quad (2)$$

現時点の負債価値について定式化して、 $r_D$  について解くと以下の式(3)のように負債金利が得られる。

$$\begin{aligned} D_0 &= \frac{1}{(1+r_f)} E^Q[D_T] \\ D_0 &= \frac{1}{(1+r_f)} [q\{D_0(1+r_D)\} + (1-q)V_0(1+d)] \\ qD_0(1+r_D) &= D_0(1+r_f) - (1-q)V_0(1+u) \\ r_D &= \frac{(1+r_f) - (1-q)(V_0(1+u)/D_0)}{q} - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで株式価値は、 $V_d < D_0(1+r_D)$  であることから、企業価値が下落した場合、 $E_T = 0$  であるため、

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{1}{(1+r_f)} E^Q[\tilde{E}_T] \\ &= \frac{1}{(1+r_f)} [q\{V_0(1+u) - D_0(1+r_D)\}] \end{aligned}$$

となる。

$$\text{ただし、 } r_D = \frac{(1+r_f) - (1-q)(V_0(1+u)/D_0)}{q} - 1$$

であるため、

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{1}{(1+r_f)} [qV_0(1+u) - D_0(1+r_D)] \\ &= V_0 - D_0 \end{aligned}$$

であることが確認される。

### 3.2 経営者保証付きの場合

続いて、経営者保証付きの場合について検討をする。この場合には、企業の清算価値が債権額を下回った場合には、経営者の個人資産を利用して負債の支払を行わなければならない。そのため経営者個人資産について設定をする必要があるが、本研究では単純化のため、経営者個人は、経営している企業の株式と国債にだけ投資をするとする。その場合の、負債価値及び株式価値は式(4)のとおりになる。

$$\begin{aligned} V_0 &= D_0^* + E_0^* \\ \tilde{D}_T^* &= \min[D_0^*(1+r_D^*), \tilde{V}_T + B_0(1+r_f)] \\ \tilde{V}_T &= V_u \text{ w.p. } 50\% \text{ or } V_d \text{ w.p. } 50\% \\ V_u &= (1+u)V_0, \quad V_d = (1+d)V_0 \\ \tilde{E}_T^* &= \max[\tilde{V}_T - \{D_0^*(1+r_D^*) - B_0(1+r_f)\}, 0] \\ &\quad - B_0(1+r_f) \\ W_0 &= E_0 + B_0 \\ \tilde{W}_T &= \tilde{E}_T^* + B_0(1+r_f) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $D_0^*$  及び  $\tilde{D}_T^*$  は、それぞれ現時点あるいは  $T$

時点における経営者保証付きの場合の負債価値、 $E_0^*$

及び  $\tilde{E}_T^*$  は、それぞれ現時点あるいは  $T$  時点における

経営者保証付きの場合の株式価値を示す。w.p. 50%は、

実確率が50%であることを示す。つまり、 $\tilde{V}_T$  は、50%

の確率で  $V_u$ 、50%の確率で  $V_d$  になることを意味する。

3 本研究では事業資産と国債を利用することによりコールオプションが複製できること、つまり完備市場を仮定している。非完備市場下での設定については今後の研究課題としたい。

4 理論上は企業価値が上昇しても債権額を上回らないことも考えられるが、本研究ではこのようなケースには、融資自体が成り立たないと考え、分析から除外した。

$r_D^*$  は、経営者保証付きの場合の負債金利である。 $W_0$  は、経営者の初期富であり、 $B_0$  は、国債への投資額である。 $\tilde{w}_T$  は、 $T$  時点における経営者の個人資産額である。上記以外の変数については式(1)と同じである。3.1 節の分析と同様に、 $T=1$  を仮定する。

まず、経営者保証がある場合の株式価値  $\tilde{E}_T^*$  につい

$$\begin{aligned} \tilde{E}_T^* &= \max\left[\tilde{V}_T - \left\{D_0^*(1+r_D^*) - B_0(1+r_f)\right\}; 0\right] - B_0(1+r_f) \\ &= \max\left[\tilde{V}_T - D_0^*(1+r_D^*), 0\right] \\ &\quad + \max\left[\tilde{V}_T - \left\{D_0^*(1+r_D^*) - B_0(1+r_f)\right\}; 0\right] \\ &\quad - \max\left[\tilde{V}_T - D_0^*(1+r_D^*), 0\right] - B_0(1+r_f) \end{aligned}$$

となる。第1項目の、 $\max\left[\tilde{V}_T - D_0^*(1+r_D^*), 0\right]$  は、経営者保証がない場合の株主価値である。ここから、経営者保証のみの価値  $\tilde{G}_T$  は、式(5)のようになる。

$$\begin{aligned} \tilde{G}_T &= \max\left[\tilde{V}_T - \left\{D_0^*(1+r_D^*) - B_0(1+r_f)\right\}; 0\right] \\ &\quad - \max\left[\tilde{V}_T - D_0^*(1+r_D^*), 0\right] - B_0(1+r_f) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)からも、図3にて示したとおり、経営者保証は、 $D_0^*(1+r_D^*) - B_0(1+r_f)$  を行使価格とするコールオプションの買い、清算時点の債権額  $D_0^*(1+r_D^*)$  を行使価格とするコールオプションの売り、及び清算時点に経営者個人で所有している国債の金額  $B_0(1+r_f)$  を額面とする国債の売りのポートフォリオにより表現できることが確認される。

ここで負債金利  $r_D^*$  を、リスク中立確率を利用して

評価する。3.1 節の分析同様、企業価値が債権額を上回るケース、企業価値が債権額を下回っても経営者の個人資産により、債権の全額が回収できるケース及び経営者の個人資産を利用して債権の一部が回収できないケースについて検討をする。

### ケース1 $V_d > D_0(1+r_D^*)$

まず、企業価値がつねに債権額を上回る場合には、信用リスクが存在しないため、

$$r_D^* = r_f$$

となる。

ケース1における経営者保証付きの株式価値は、

$$\begin{aligned} E_0^* &= \frac{1}{(1+r_f)} E^Q \left[ \tilde{E}_T^* \right] \\ &= \frac{1}{(1+r_f)} \left[ qV_0(1+u) + (1-q)V_0(1+d) - D_0^*(1+r_D^*) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

となる。

当然にケース1における経営者保証の価値は、

$G_T = 0$  であることから、 $G_0 = 0$  となる。

### ケース2 $V_d + B_0(1+r_f) > D_0(1+r_D^*) > V_d$

続いて、企業価値が下落した場合に、企業価値が債権額を下回っても、経営者の個人資産により、債権の全額が返済可能であるケースを考える。この場合であっても、債権者からすれば、信用リスクが存在しないため、

$$r_D^* = r_f$$

となる。

ケース2における経営者保証付きの株式価値は、ケース1と同様に式(6)により求められる。ただし、ケース1とは異なり、マイナスになる可能性がある。

経営者保証の価値は、式(5)及びケース2の条件から、式(7)のように計算される。

$$\begin{aligned} G_0^* &= \frac{1}{(1+r_f)} E^Q \left[ G_T^* \right] \\ &= \frac{\left( \begin{aligned} &q[V_u - \{D_0^*(1+r_D^*) - B_0(1+r_f)\}] \\ &+ (1-q)[V_d - \{D_0^*(1+r_D^*) - B_0(1+r_f)\}] \\ &- q[V_u - D_0^*(1+r_D^*)] - B_0(1+r_f) \end{aligned} \right)}{1+r_f} \\ &= \frac{(1-q)[V_d - \{D_0^*(1+r_f)\}]}{1+r_f} \end{aligned} \quad (7)$$

### ケース3 $V_d + B_0(1+r_f) < D_0(1+r_D^*)$

最後に、企業価値が下落した場合に経営者の個人資産を利用して債権の一部が返済できないケースについて検証をする。その際の1年後の負債価値は、

$$\begin{aligned} D_u^* &= D_0^*(1+r_D^*) \\ D_d^* &= (1+d)V_0 + B_0(1+r_f) \end{aligned} \quad (8)$$

となる。

式(8)から負債の現在価値を求め、 $r_D^*$  について解くと、式(9)が導かれる。

$$\begin{aligned}
D_0^* &= \frac{1}{(1+r_f)} E^Q [D_T^*] \\
&= \frac{[q\{D_0^*(1+r_D^*)\} + (1-q)\{V_0(1+d) + B_0(1+r_f)\}]}{(1+r_f)} \quad (9) \\
q\{D_0^*(1+r_D^*)\} &= D_0^*(1+r_f) - (1-q)\{V_0(1+d) + B_0(1+r_f)\} \\
r_D^* &= \frac{(1+r_f) - (1-q)\{V_0(1+d) + B_0(1+r_f)\} / D_0^*}{q} - 1
\end{aligned}$$

式(9)を利用することにより経営者保証付きの負債金利を求めることができるが、解釈が困難であるため、デフォルト時の債権の回収率、 $RR$  を定義し、

$$RR = \frac{V_0(1+d) + B_0(1+r_f)}{D_0^*(1+r_D^*)}$$

と、式(10)のように計算される。

$$r_D^* = \frac{1+r_f}{(1-q)RR+q} - 1 \quad (10)$$

式(10)から債権回収率  $RR$  が低下すればするほど、負債金利  $r_D^*$  は上昇することが理解される。

ケース 3 における経営者保証付きの株式価値は、企業価値が下落した場合の株式価値が、

$$E_d = -B_0(1+r_f)$$

となるため、

$$\begin{aligned}
E_0^* &= \frac{1}{(1+r_f)} E^Q [\tilde{E}_T^*] \\
&= \frac{1}{(1+r_f)} [q\{V_0(1+u) - B_0^*(1+r_D^*)\} + (1-q)\{-B_0(1+r_f)\}]
\end{aligned}$$

となる。

ケース 3 における経営者保証部分のみの価値は、式(5) 及びケース 2 の条件から

$$\begin{aligned}
G_0^* &= \frac{1}{(1+r_f)} E^Q [G_T^*] \\
&= \frac{\left( q[V_u - \{D_0^*(1+r_D^*) - B_0(1+r_f)\}] \right)}{1+r_f} \\
&= \frac{\left( -q[V_u - D_0^*(1+r_D^*)] - B_0(1+r_f) \right)}{1+r_f} \quad (11) \\
&= -(1-q)B_0
\end{aligned}$$

と計算される。

次節では、本節での計算結果をもとに、数値例を利用して経営者保証の価値分析を行う。

#### 4. 数値例による経営者保証の価値及び負債金利の分析

本節では 3 節での分析結果を利用し、数値例を利用して経営者保証の価値及び負債金利の分析を行う。基本的なケースとして、式(1) 及び式 (2)のパラメー

タとして、

$$V_0 = 1000, D_0 = D_0^* = 700, E_0 = E_0^* = 300, r_f = 0\%, u = 50\%,$$

$d = 1/(1+u) - 1 \doteq -33\%$ ,  $W_0 = 301, B_0 = 1$  を仮定すると、

リスク中立確率は、 $q = 40\%$ となる。さらに、以上の仮定から、 $V_d < D_0(1+r_D)$ 、 $V_d + B_0(1+r_f) < D_0(1+r_D^*)$

となるため、企業価値が減少した場合には、債権の一部しか回収できないため、経営者保証なしの負債金利は式(3) から、経営者保証付きの負債金利は式(9)から、計算すると、

$$r_D \doteq 7.14\%$$

$$r_D^* \doteq 6.93\%$$

となる。その差は、約 0.21%であることから、経営者が計画をしているリスクが相当程度高く(成長率の標準偏差は約 41.67%)、経営者の個人資産が殆どない場合には、政策金融公庫が設定している 0.2%の金利差が妥当である。しかし、経営者が個人資産をより持っている場合に、個人保証を付けた場合には 0.2%以上の金利減を得られるべきであり、このような経営者は、個人保証を付けないことを選択すると考えられる。反対に、個人資産が殆どない経営者は、個人保証を付けることによって金利減の恩恵が少なくなるはずであるが、0.2%の減少が制度で決まっている場合には、個人保証を付けることを選択すると考えられる。そのため、当該制度には、個人及び企業情報を金融機関が把握し、顧客のスクリーニングを行っていない場合には、逆選択の恐れがあると考えられる。

上記のパラメータを想定して、経営者保証の価値を計算すると式 (11)から、

$$G_0^* = -0.6$$

となる。そのためこの数値例では、0.6 の価値を金融機関に渡し、約 0.21%の金利減少の恩恵を受けていると解釈できる。

当該分析をさらに深めるため、負債金利及び経営者保証の価値の安全利子率、経営者の個人資産の水準及び、事業のリスクに対する感応度分析を行う。

#### 4.1 安全利子率に対する感応度分析

本節では、安全利子率に対する感応度分析を行う。分析のため、パラメータとして、

$$V_0 = 1000, D_0 = D_0^* = 700, E_0 = E_0^* = 300, u = 50\%,$$

$d = 1/(1+u) - 1 \doteq -33\%$ ,  $W_0 = 360, B_0 = 60$  を仮定し、現

実にはほとんどの確率で存在しない超低金利 (-5%) から超高金利 (50%) の値を利用して感応度分析を行うと図 4 のような結果が得られる。

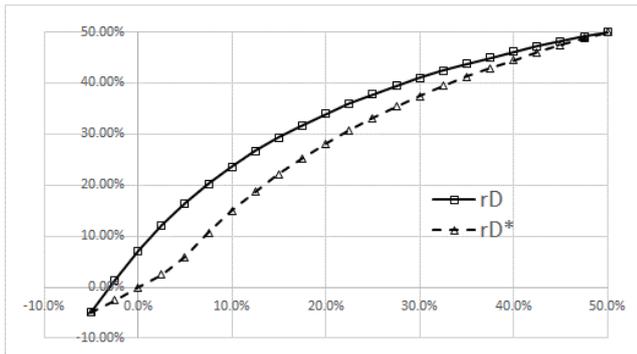


図4：経営者保証なしの負債金利(実線、 $r_D$ )及び経営者保証付きの負債金利(破線、 $r_D^*$ )の安全利率( $r_f$ )に対する感応度分析(x軸：安全利率、y軸：負債金利)

図4のとおり、超低金利下では、 $r_D$ と $r_D^*$ が同値になるが、これは、1年後の債務額 $D_0(1+r_D)$ あるいは、 $D_0^*(1+r_D^*)$ が減少し、これが $V_d$ を下回りデフォルトリスクが消滅するためである。 $r_D$ と $r_D^*$ のスプレッドは、金利の上昇に伴い、安全利率が相当程度低い場合(約4.17%以下)、スプレッドも上昇するが、安全利率が高い場合(約4.17%以上)には、スプレッドも減少し、超高金利、 $r_f = 50\%$ の場合には、0になる。これは、企業価値が上昇するリスク中立確率( $q$ )が安全利率の増加に伴い高くなり、 $r_f = 50\%$ の際に、 $q = 100\%$ となるためである。

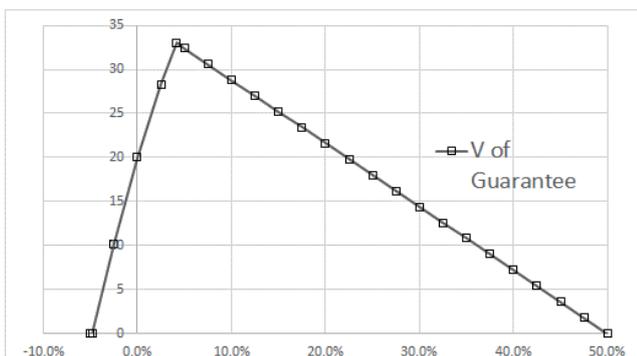


図5：経営者保証価値( $G_0^*$ )の安全利率( $r_f$ )に対する

感応度分析(x軸：安全利率、y軸：経営者保証価値)  
注：経営者保証価値は便宜上プラスの値として示しているが、経営者側からすると保証の提供者であるため、その価値はマイナスとなる。つまり図5は、金融機関から見た経営者保証の価値になっている。

経営者保証価値( $G_0^*$ )の安全利率に対する感応度

分析結果は、図5のとおりである。安全利率が約-4.76%のとき、 $V_d = 1,000 \times (1 - 1/3) \cong 666.67$ 、 $D_u = D_d = D_0 \times (1+r_D) = 700 \times (1-4.76\%) \cong 666.67$ であり、安全利率が約-4.76%以下の超低金利下の状況では、 $V_d \cong D_0 \times (1+r_D)$ となり、デフォルトが起きないため、経営者保証の価値は、0となる。安全利率が約-4.76%

を超えると、 $V_d < D_0(1+r_D) < D_0(1+r_D^*)$ となり、経営者が個人資産を利用して債務保証をしなければならず、安全利率の上昇に伴って、経営者の個人資産からの支払額、 $D_0 \times (1+r_D) - V_d$ が上昇するため、(金融機関からみた)経営者保証価値が上昇する。金融機関からみて経営者保証からのキャッシュフローが最大化するのは、 $V_d + B_0(1+r_f) \leq D_0(1+r_D^*)$ の場合で、経営者が個人で所有している国債の清算時点における金額、 $B_0(1+r_f)$ のすべてを支払わなければならない場合である。

$V_d + B_0(1+r_f) = D_0(1+r_D^*)$ のとき、安全利率は約4.17%であり、(金融機関からみた)経営者保証の価値は、 $G_0^* = 33$ で最大となる。安全利率が約4.17%を超えた場合には、

$$V_u > D_0(1+r_D^*)、かつ、V_d + B_0(1+r_f) < D_0(1+r_D^*)$$

であることから、企業価値が上昇した場合には、経営者保証からのキャッシュフローは0になり、企業価値が減少した場合には、(金融機関からみた)経営者保証からのキャッシュフローは、 $B_0(1+r_f)$ で一定となる。この場合、企業価値が上昇するリスク中立確率は、

$$q = \frac{r_f - d}{u - d}$$

であることから、安全利率の上昇とともに、 $q$ も増加する。そのため、式(11)から示されるように、安全利率が約4.17%を超える場合には、安全利率の上昇に応じて、経営者保証の価値が減少する。安全利率が50%の場合には、 $q = 100\%$ になるため、経営者保証の価値が0となる。

#### 4.2 経営者の個人資産に対する感応度分析

本節では、負債利率および個人保証価値の経営者の個人資産額の安全利率に対する感応度分析を行う。分析のため、パラメータとして、 $V_0 = 1000$ 、 $D_0 = D_0^* = 700$ 、 $E_0 = E_0^* = 300$ 、 $u = 50\%$ 、 $r_f = 0\%$ 、 $d = 1/(1+u) - 1 \cong -33\%$ 、を仮定する。経営者が個人で所有している国債の現時点における金額( $B_0$ )に対す

る感応度分析は、図6のとおりである。

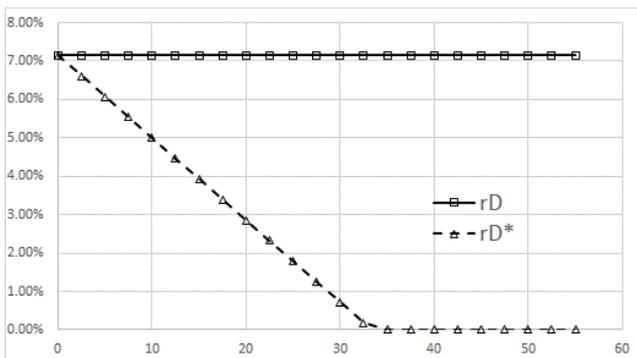


図6：経営者保証なしの負債金利(実線、 $r_D$ )及び経営者保証付きの負債金利(破線、 $r_D^*$ )の経営者の個人資産( $B_0$ )に対する感応度分析(x軸：経営者の個人資産、y軸：負債金利)

図6のとおり、経営者の個人資産額が増えれば増えるほど、経営者保証付きの金利が減少する。経営者保証がない場合は、負債金利は経営者の個人資産額に依存せずに一定である(この場合  $r_D \equiv 7.14\%$ )。そのため、スプレッドは経営者の個人資産( $B_0$ )の水準に従って拡大し、 $V_d + B_0(1+r_f) = D_0(1+r_D^*)$ となるまで(この場合  $r_D^* = r_f = 0\%$  になるまで)拡大する。 $B_0$ がこれ以上の水準になる場合には、個人保証を付けることにより、全ての債権額が保証されるため、この場合  $r_D^* = r_f = 0\%$  で一定となる。

日本政策投資銀行が設定しているように、制度上、個人保証付きの場合の融資が、個人保証がない場合の融資よりも0.2%低いというように、スプレッドが固定している場合には、個人資産が多額の経営者は個人保証を付けない融資を選択し、個人資産が殆どない経営者は、個人保証付きの融資を選択することが考えられる。前述のように、経営者の個人資産額が経営者保証免除の基準にはないため、逆選択が起る恐れがある<sup>5</sup>。

5 しかしながら、経営者保証付きの融資のみしか選択肢がなかった時代に、起業を行わなかった経営者が、経営者保証なしの融資が選択肢できるようになった際には、あらた

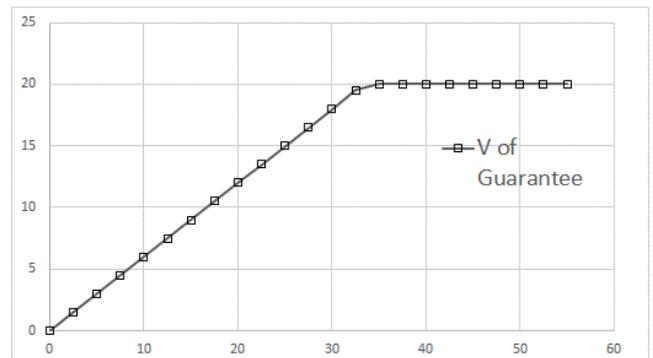


図7：経営者保証価値( $G_0^*$ )の経営者の個人資産( $B_0$ )

に対する感応度分析(x軸：経営者の個人資産、y軸：経営者保証価値)

注：経営者保証価値は便宜上プラスの値として示しているが、経営者側からすると保証の提供者であるため、その価値はマイナスとなる。つまり図7は、金融機関から見た経営者保証の価値になっている。

経営者保証価値の経営者が個人で所有している国債の現時点における金額( $B_0$ )に対する感応度分析結果は、図7のとおりである。個人資産額の増加に応じて、(金融機関から見た)経営者保証の価値も増加する。企業価値の棄損額にも限りがあるため、清算時に経営者が保証をしなければならない金額、 $D_0^*(1+r_D^*) - V_u$ を経営者が個人で所有している国債の金額、 $B_0(1+r_f)$ を上回った場合には、全ての債権額が保証されるため、経営者保証の価値は最大となり、経営者の個人資産額が上昇しても経営者保証の価値は増加しない。

#### 4.3 事業リスクに対する感応度分析

最後に、事業リスクに対する感応度分析を行う。事業リスクは、企業価値成長率の標準偏差( $\sigma$ )を利用する。 $\sigma$ は、企業価値が上昇する際の成長率が $u$ 、企業価値が減少する際の成長率が $d$ 、 $d = 1/(1+u) - 1$ であり、企業価値が上昇及び減少する実確率がともに50%であるため、 $\sigma = (u-d)/2$ となる。分析のため、パラメータとして、

$V_0 = 1000, D_0 = D_0^* = 700, E_0 = E_0^* = 300, r_f = 0\%, W_0 = 360$   
 $B_0 = 60$ を仮定する。感応度分析の結果は、図8に示されている。

な資金需要を確保できるというメリットが金融機関にもあると考えられる。この分析は今後の課題としたい。

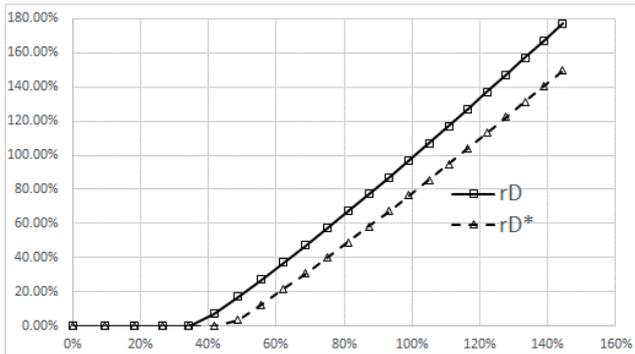


図8：経営者保証なしの負債金利(実線、 $r_D$ )及び経営者保証付きの負債金利(破線、 $r_D^*$ )の事業リスク( $u$ )に対する感応度分析(x軸：事業リスク( $\sigma$ )、y軸：負債金利)

注：事業リスク( $\sigma$ )は、企業価値成長率の標準偏差である。企業価値が上昇する際の成長率を  $u$ 、減少する際の成長率を  $d$ 、とし上昇及び下落する確率がともに 50%であるとしたため、 $\sigma = (u - d) / 2$  となる。企業価値が減少する際の成長率、 $d$  を  $1/(1+u) - 1$  と定義したため、 $u$  が大きくなればなるほどリスクが高くなる。成長率の標準偏差は、 $u$  が、50%、100%、150%、200%の場合にはそれぞれ、42%、75%、105%、133%となる。

図8のとおり、経営者保証がない場合、ある場合ともに、リスクが低い場合には、デフォルトが起きないため、負債金利は安全利子率と同じ0%になる。リスクが相当程度高い場合には、経営者保証がない場合の金利から先に上昇し、経営者保証付きの金利は、リスクの上昇に伴い、企業価値が減少した場合に、経営者の個人資産と企業の清算では、一部の債権額が支払えなくなる場合になって初めて金利が上昇する。経営者保証がない場合と経営者保証付きの場合の負債金利のスプレッドは、リスクの上昇に伴い、増加する。これは、リスク上昇に従って、企業価値減少のリスク中立確率が増加し、債権の期待損失額が上昇し、経営者保証の価値が上昇するためである<sup>6</sup>。このことは、図9に示されている。

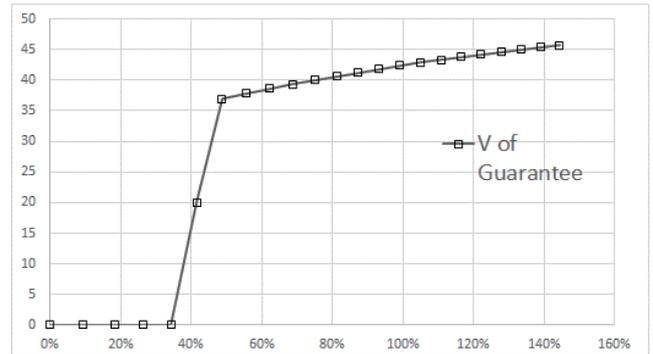


図9：経営者保証価値( $\sigma_0^*$ )の経営者の事業リスク( $\sigma$ )

に対する感応度分析(x軸：事業リスク( $\sigma$ )、y軸：負債金利)

注：事業リスク( $\sigma$ )は、企業価値成長率の標準偏差である。企業価値が上昇する際の成長率を  $u$ 、減少する際の成長率を  $d$ 、とし上昇及び下落する確率がともに 50%であるとしたため、 $\sigma = (u - d) / 2$  となる。企業価値が減少する際の成長率、 $d$  を  $1/(1+u) - 1$  と定義したため、 $u$  が大きくなればなるほどリスクが高くなる。成長率の標準偏差は、 $u$  が、50%、100%、150%、200%の場合にはそれぞれ、42%、75%、105%、133%となる。

経営者保証価値は便宜上プラスの値として示しているが、経営者側からすると保証の提供者であるため、その価値はマイナスとなる。つまり図9は、金融機関から見た経営者保証の価値になっている。

図9のとおり、企業価値の上昇率が40%を超えると、経営者保証の価値は急激に上昇する。これは、企業価値が減少した場合に、経営者の個人資産の一部を利用して負債を返済しなければならなくなるためである。上昇率が55%を超えると、経営者保証の価値の上昇が緩やかになるが、これは、経営者の個人資産のすべてを利用して負債を返済しなければならなくなるため、企業価値の減少率が増えても個人保証のペイオフは変化せず、前述のとおり、企業価値減少のリスク中立確率が増加するため、個人保証ペイオフの期待値が上昇するためである。

## 5. 結論

本研究では経営者保証をリアルオプションとして考えられることを示し、経営者の価値及び経営者保証付き融資の負債金利について二項分布を利用して分析を行った。安全利子率の上昇に伴い、低金利下では経営者保証の価値は上昇し、高金利下では経営者保証の価値は減少することが示され、経営者の個人

スプレッドはリスクが上昇しても一定である。

<sup>6</sup> 例えば、 $d = -u$  などのように仮定し、リスク中立確率が常に一定( $r_f = 0\%$  であれば、 $q = 50\%$ )とすれば、金利の

資産の上昇に伴い、金融機関から見た経営者保証の価値が上昇することが示され、事業リスクの上昇に伴い、経営者保証の価値も上昇することが示された。

経営者保証付きの負債金利も経営者保証の価値に付随し、金融機関から見た経営者保証が高くなる場合には、金融機関が経営者から得たオプションの価値が高くなるため、この負債金利も減少することが示された。現行の制度では経営者保証付きとそうでない場合の金利差が0.2%であるが、経営者の個人資産額などの情報も反映されることにより、金融機関がより適切な負債金利を設定できるようになると考えられる。

今後は本研究での仮定を緩やかにし、詳細な経営者保証の価値分析及び経営者保証付き融資の金利分析を行いたい。事業の不確実性について2項モデルを利用したが、より精緻に不確実性をモデル化した。また、経営者の個人資産が該当企業の株式以外には国債のみに投資をすとしたが、実際には、不確実性のある証券などにも投資をしていると考えられる

ため、清算時点の個人資産の価値が不確実になることも踏まえたモデルを構築したい。経営者が企業から報酬を得ていることも考えられるため、このことも考慮したい。また、本研究で想定した経営者のように、殆どの資産を該当企業の株式に投資をしている場合には、分散投資ができないため経営者のリスク回避性についても考慮し、プライシングカーネルアプローチや、非完備市場性を考慮したモデルを利用した分析も行いたい。

#### 参考文献

1. Black, F. and M, Scholes. (1973). The pricing of options and corporate liabilities. *Journal of Political Economy*, 81, 637—659.
2. 佐藤清和 (2016). 「残余利益オプションモデルによるインターネット企業の株式評価」. 『日本リアルオプション学会機関紙』. 第8巻第3号. 21-32.

#### 論文誌「リアルオプション研究」原稿募集のご案内

日本リアルオプション学会は、査読付論文誌「リアルオプション研究」(英文名称: Journal of Real Options and Strategy)を発売しております。本論文誌は、電子ジャーナル化されて、国内外に広く、公開されております。

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/realopn>

#### 募集する原稿:

リアルオプションおよびこれに関連する経営科学、リスクマネジメント、オプション的資産の価値、投資戦略、ゲームと戦略などについての理論、実証および応用に関する研究のほかケーススタディー、あるいは、この分野における教育方法の改善などに関する和文の論文で、新規性または、有用性のあるもの。

投稿原稿は、次の3類型に分けて審査されます。

1. 理論研究
2. 応用研究
3. 研究ノート

<査読論文 2017年3月2日採択>

**天候デリバティブの種苗ビジネスへの展開**  
**農学的知見による多変量線形回帰モデルの最適化とオプション・プライシング**  
**Weather Derivative to Incorporate Multiple Weather Factors and**  
**Agricultural Insights into Option Pricing Model:**  
**A Case Study for the U.S. Seed Production Business**

福島 巧(株サカタのタネ)<sup>a</sup> 中岡 英隆(多摩大学大学院)

Takumi Fukushima (Sakata Seed Co.)  
Hidetaka Nakaoka (Graduate School of Tama University)

**Summary:** Saying goes that a normal weather is now an average of extremes. According to NOAA<sup>b</sup>, July 2015 was the warmest month ever recorded for the globe. Growing world population which is often referred to as “Feeding Nine Billion People by 2050” is another global issue. Farming is a reliable source of food supply to feed the world but, it is also known as one of businesses to be largely exposed to such weather-related risks. Governments therefore have traditionally provided unique financial support programs for their farmers such as crop insurances in order to strengthen their food security. Such traditional crop insurances are yet recognized not to be efficient because of moral hazard or adverse selection problem under asymmetric information and are, as a result, fully or mostly subsidized. Weather derivative is one of the promising financial schemes to possibly alternate or supplement the said traditional government agriculture insurance. Most of the past studies have used a simple index based either on rainfall or temperature, summing up the weather information within the main vegetative period of a specific crop in a specific region to explain a correlation with a “crop yield”. Recent researches, however, suggest benefits to more utilize an agronomic point of view and to look into plant requirements at each critical growth stage. This paper illustrates a put option model assigning multiple weather factors to determining an amount of the index which is equivalent to an estimated yield. Challenge of this study is to incorporate local agronomists expertise and insight into a process of developing the yield estimating model and arrive to reasonable fitting. This method is demonstrated in a case study for vegetable seed production in Skagit Valley, Washington, one of the historical seed production areas in the United States.

**キーワード:** 天候デリバティブ, 農業保険, 農学的知見, 多変量線形回帰モデル, オプション・プライシング, モンテカルロシミュレーション.

## 1 はじめに

世界の人口は現在 73 億人、今から 33 年後の 2050 年には 90 億人に達するだろうと推定されている。その時、食料需要は現在と比べて 60% 増加するという試算もある。2015 年 9 月に国連が「持続可能な開発のためのアジェンダ」を採択し、飢餓の終焉と食料安全保障を目標のひとつに掲げたことは記憶に新しい。一方では、世界各地で異常気象が頻発し、天候と事業収益の関係にはますます関心が高まってきている。

農業は、その収益(収穫量)が天候リスクに悩まされている事業のひとつである。これまで各国政府は自国の食料安全保障政策の観点から、また、農民の経営安定への支援を目的として、各国独自の農業保険を整備してきている。ところが、いずれの国においても

こうした従来型の農業保険が効率的に運営されていないのではないかと批判にさらされている。例えば、米国のように手厚い農業補助金(税金)の使い方が政争の具にされている国もある<sup>1</sup>。こうした従来型の農業保険に置き替わる、もしくは補完する新たなリスク緩和手段として、天候デリバティブを利用したリスクヘッジ手法の創設への期待が大きい。

気温、降雨量、日照量、風量など多かれ少なかれ作物の生育に影響を与える気象要素はいくつか数えられるが、これまで農業部門で導入されてきた天候デリバティブは降雨量型が主流となっている。かたや、エネルギー部門を中心に市場取引されているのは気温型である(Cao et al. (2004))。降雨量型の天候デリバティブの基本モデルは、干ばつなどで雨が不足すると収穫量が落ちて損失する場合、あるいは雨が降り

a 本論文の研究内容は筆者個人に属するものであり、筆者の所属する組織の公的見解を表すものではない。

b National Oceanic and Atmospheric Administration.  
1 Wall Street Journal, July 12, 2015.

すぎて洪水などにより損失する場合に、気象量をインデックスとした金銭の授受で補償するかたちをとる。したがって、栽培期間中の累積降雨量で収穫量ないし収益との関係性を明らかにできることが鍵となるが、単一の気象要素に頼ったモデルではその説明力に限界があることも指摘されている。そうした中で、いくつかの先行研究では、作物の特性、農学的な知見をモデル構築のプロセスに組み込んでインデックスを作成する有効性が指摘されてきている。しかし、それらをどのようにモデルの構築に役立てていくかという具体的な手法を示した先行研究はまだ少ない。

本研究では、米国ワシントン州の西海岸に位置する野菜種子の生産地を題材にして、複数の気象要素を組み入れて種子の収穫量を推定するモデルを構築し、天候デリバティブ取引のフレームワークを策定している。特に、地元農業技術者の知見、現場の経験則を収穫量推定モデルに組み入れていくプロセスに重点を置いて考察したものである。また、栽培期間中の作物の生育ステージをたどりながら、植物の生理、その時々で計画される農作業も勘案しながら、地元農業技術者全てに関心の高い気象要素をもれなく取り上げることに専念した。最終的には複数の気象要素を調合してモデルを作成したが、当該取引の普及も考慮して、需要側に対するわかりやすさにも心掛けた。作物生産のストーリー性をモデルに付与したことが本研究の貢献であると考えている。そのストーリー性が織り込まれたモデルを統計的手法により最適化し、作成したインデックスを原資産とするプットオプションのプレミアムを算定する手順を明確に示すと同時に、あわせて支払い上限付き条件でのプレミアムの算出も行って、実務家にとって実用化しやすいモデルを提案した。

本稿の構成は以下の通りである。まず、第2章で農業部門の天候デリバティブについて先行研究を整理した。続いて、第3章で収穫量推定モデルを構築していく理論的フレームワークとプライシングの基本概念について示し、第4章では実際のデータを使って実証分析を行った。最後に第5章にて本研究のまとめを報告する。

## 2. 農業部門の天候デリバティブの問題

ここで本研究の関心事を明らかにするために先行研究を振り返りたい。農業経営の収益変動に影響を与える要素はさまざまあるが、農業現場では歴史的に地域を問わずいくつかのリスク対応策が採られてきている。例えば、より多くの種類の作物を作ること、

栽培する時期を広くずらすこと、栽培する畑を複数所有することなどである。また、それを確かに実践するために、農民自らが栽培技量を向上させようとしたり、新しい技術を積極的に試みる態度も、やがては収益の安定につながる個々の手立てといえる。更に、兼業、出稼ぎなど農業外収益源を多様化させるやり方もある(Burke et al. (2010))。以上は、自助努力にたよるいわゆるインフォーマルな手法であるが、農民の個々の対応であるため、案外に割高になることが指摘されている(Nieto et al. (2011))。一方、これを補完する公的なリスク転嫁の手法として、各国は長年にわたってフォーマルな形としての農業保険を提供してきた。

こういった従来型の農業保険は、各国の食料安全保障を強化する建前もあって政府主導で提供されることが多い。しかしながら、気象と農家の収益との因果関係の分析が必ずしも科学的知見に裏付けされたものでなく、また保険商品自体の高いコスト構造もあって、結局、農民が負担すべき保険料や損害に対する保険金の支払いに対して多額の政府補助金を投入しなければ立ち行かないなど、効率的に機能してきたとはいえない(Spaulding et al. (2003), Nieto et al. (2011))。では、なぜ農業保険は非効率的呢か。先行研究を整理すると主に3つの問題点が論じられている。それらは、情報の非対称性に由来する問題、損害査定にかかる費用、そしてキャッシュフローのミスマッチである。まず、情報の非対称性の問題では、一般的な保険商品と同様にモラルハザード、逆選択の行動が避けられないことをあげている。次の損害査定にかかる費用とは、天災ごとに被災者一件一件に対して要求される被害確定にかかる高額な費用である。人が介在するため、主観に偏った査定も完全には除外できない。最後のキャッシュフローのミスマッチとは、二つ目の損害査定に費やされる時間にも影響を受けるが、農民が必要な時に保険金が入ってこない不便さである。慣習として「つけ」でたね、肥料など農業資材を購入し、当年の収穫物を換金することでつけの返済と家計をまかなう事業サイクルの場合、支払いサイトが生むタイムラグは不都合が多い。以上、現行の農業保険の構造的な非効率性から生まれるコストが必然的にプレミアムに追加され(Burke et al. (2010))、結局、従来型農業保険が政府の補助金なしでは立ち行かない仕組みを作ってしまった。

天候デリバティブは先に述べた3つの問題に拘束されない。なぜなら、誰の目にも明らかな気象データに基づいてペイオフが確定するため、情報の非対称性に派生する問題を生まない、すなわち、保険を掛け

ている農民にも、たとえ天災が発生したとしても、良い作物を作り続けようとするインセンティブ報酬は残るため、モラルハザード、逆選択の問題が生まれることもなく(渡辺 (2008))、損害査定も不要であるため商品コストが低減できる、そして、インデックスが確定すれば迅速にペイオフが確定される。更に、同一の気象データを原資産として、誰でも契約できるという商品設計の拡張性もその特徴として数えられている(Hazell and Hess (2010))。例えば、異常気象からの減収に備える農民だけでなく、同様な条件下で彼らに農業資材を掛売りする側である小売店のリスク対処手段であってもよい。

ところで、農業部門における降雨量型の天候デリバティブの特徴は、天水農業<sup>2</sup>を行うため干ばつリスクが高い地域、特に農業インフラが脆弱な途上国で栽培される穀物向けの研究事例が多い。降雨量型の基本的なモデル設計は、地域、作物名、栽培期間を特定し、栽培期間中の累積降雨量からインデックスを作成し、事前に合意した閾値(干ばつ判定する値)からの不足量と減収量との関係性からペイオフを確定するモデルとなる。先行研究から天候デリバティブの普及を制約するいくつかの課題とその対応策を整理すると、それらは、ベイスリスク(basis risk)、データの信頼性、モデルの説明力、そして、需要側での金融リテラシーとなっている。

第1のベイスリスクは、実際に発生した損害額と算出された補償額が乖離する問題である。気象量を代表する気象観測拠点と栽培地点が離れるにしたがって発生しやすくなるが、気温と比べて雨は局地性が大きいという傾向も指摘されている(Musshoff et al. (2011))。

第2のデータの信頼性についての議論では、モデルを構築する十分な量のデータがあるかという問題と、信頼できるデータ提供者から安定的に気象データが提供されているのかという質の問題に分けて議論されている。

また、第3のモデルの説明力とは、収穫量と気象量のフィッティングの問題である。これまでの主だった議論では、単一の気象量(降雨量だけ)の栽培期間中の累積量だけで収穫量を推定するには限界があるため、農学的な知見をインデックスの設計の中に組み入れていく有効性が認識されてきている(Nieto et al. (2011))。一例では、小麦の生産期間中の有効な降雨量が生育ステージごとに異なることに着目し、生育期

間を10日刻みで分割、各分割期間ごとに相応な重みづけ(係数)を行い、より説明力の高いモデルが構築できることを実証している(Stoppa (2003))。別の先行研究では、複数の気象要素を組み合わせると説明力の高いインデックスを構築する可能性を示唆しているが実証されてはいない(Musshoff et al. (2011))。

最後に、需要側での金融リテラシーとは、新規取引では、購入者にとって内容が難解である商品は、追加的に教育機会を設けなければ普及しにくいことである(Skees et al. (2001), Tadesse et al. (2015))。

これらの天候デリバティブの課題と従来型の農業保険の問題点に鑑みて、農家のリスク緩和手段としての新しい天候デリバティブへの期待は大きい。本研究では、上記の課題の中でも、とりわけ農学的知見を組み入れたモデルの構築プロセスを農業技術者の立場から考察し、作物、産地を代えて広く応用できるような農業部門の天候デリバティブのフレームワークを明らかにして行きたい。

### 3. モデル設定の背景

#### 3.1 生産地と作物のプロフィール

米国の北西部、太平洋岸沿って位置するワシントン州は、スターバックス、アマゾンドットコム、マイクロソフトなどの本社の所在地として有名であるが、それよりもずっと以前から、米国民の間では雨が多い州として知られている。年間平均降雨量は866mm、年間降雨日数は152日<sup>3</sup>を記録する。成田空港から直行便でワシントン州のシアトル空港に降り立ち、そこから100kmほど北上したところに位置するスカジット市で、これまで60年近く営まれてきたハウレンソウ(学名 *Spinacia oleracea*)の商業種子生産を本研究の題材とする。

スカジット市の2015年の農業生産額は約272百万ドル<sup>4</sup>であるが、むしろその規模よりも、この地で生産されている「たね(種子)」によって世界中に知られている<sup>5</sup>。北緯49°でパリ、樺太と同緯度、夏至付近の日長は現地時間で朝4時頃から夜9時頃まで16時間ある。ハウレンソウが開花するためにはこの長日日長が不可欠であるため、世界でも当作物の種子生産が商業的に成り立つ場所は数少ない。ちなみに日本で播かれるハウレンソウの種子はほぼ100%を輸入にたよっている。

同市のハウレンソウ種子のシェアは全米で75%<sup>6</sup>

2 水を降雨にたよる。対比として水を人工設備によって畑に引き入れる灌漑農業。

3 1961年から1990年の平均(US Climate Data)。

4 Skagit County Agriculture Statistics 2015.

5 2006 International Spinach Conference.

6 Crop Profile for Spinach Seed in Washington. 世界シェアでは8-10%。

であり、1956年に全米で初めて商業的にホウレンソウ F1<sup>7</sup>のたねとり(採種)が始まったのもこの街である。当地のホウレンソウ種子生産は天水農業の手法で行われ、早春にたねを播き、晩夏に収穫するという作型である。また、当地域に広がる畑の土性は砂壤土<sup>8</sup>で、雨が降っても比較的乾きやすい特性をもっている。

### 3.2 農業技術者の知見を取り入れたモデル化

地元の農業技術者の間では、「雨の多い年はたねが採れないね」とよく表現される。また、「あの時期にちょうど良い雨が合ったから」などと豊作の原因を振りかえる見方もある。本研究では、このような現場の経験則をたどりながら、ホウレンソウの生育ステージごとに現場で関心の高い気象量をもれなく取り上げていく。次に、各ステージで集計した気象量に閾値を設定することで、作物の生育に意味のある分量だけがモデルに反映されるような加工を施す。こうした手続きを経ることで、地元農業技術者の感覚により近い形の収穫量の推定モデル作成可能となる。

まず、ホウレンソウ種子の生産期間3月20日から8月20日までを種子生産上意味のある5つの生育ステージに区分けた(表3.2-1)。生育ステージは、畑の準備をするステージ1、たねを播くステージ2、株が生長するステージ3、花が咲くステージ4、そして実った種子が熟し収穫されるまでのステージ5までとした。

ところで、雨が降りすぎて収穫量に負の作用を及ぼすとはいえ、全く降らなければ畑は干上がってしまう。逆に、ある時期の降雨量が収穫量に対して正の作用を及ぼすとしても、植物の生育に有効に作用する水の量には限度がある。これまで現地にはこうした植物の生育と気象量との関係を定量的に実証した研究資料がないため、生産現場の経験則、地元の農業技術者の知見を聞き取りながら生育ステージごとに集計する気象量に閾値を設定していくことにした。今回は、気象量をこうした閾値との関係で定量化していくためにBottom(下限)、または、Cap(上限)のコンセプトを取り入れて、各生育ステージでの過剰と不足の意味を定義した。5つの各生育ステージにおいて現地の農業技術者にとって重要な意味を持つ気象量、閾値、そしてその背景にある作物の生理と農作業については以下の通りである。

表3.2-1 ホウレンソウ種子生産期間中の生育ステージi

生育ステージ, i	1	2	3	4	5
活動内容	圃場準備	播種	栄養生長	開花	登熟・収穫
期間	3/20 - 3/31	4/1 - 5/15	5/16 - 6/20	6/21 - 7/31	8/1 - 8/20
期間日数	11	45	35	40	20

#### 1) 圃場準備期(生育ステージ1)

ホウレンソウのたねを播く畑の整備を行う期間である。例えば、土壌pH調整のための石灰、土質改良のための堆肥、除草剤などの散布、また、播種(たね播き)前の整地作業など一連の農作業をトラクターを圃場で駆動させながら実施していく。早春であるこの期間の気温は低く平均気温9°C程度である。つまり雨量の多い降雨日が1日あると、砂壤土とはいえ畑が乾燥するまでに時間がかかり、トラクターなどの農機具の使用を妨げてしまう。圃場の準備遅れは、晴れ間を狙って計画される播種日の遅延につながり、ひいては収穫量には負の作用を与える。一方で、除草剤の効果を上げるためには、ある程度の降雨も必要である。

ステージ1では降雨の過多がその後のホウレンソウの収穫量に負の影響を及ぼすことが地元農業技術者の間では知られている。その時、おおよその目安として、1、2インチ(25-50mm)程度の雨であれば圃場のぬかるみは数日後に回復可能であるが、それ以上の量だとトラクターがしばらく圃場に入れない、という経験則がある。したがって、降雨量についてはBottomを30mmに設定して(1)式のように定量化した<sup>9</sup>。本研究では、このように閾値を設けて定量化した値を加工値と呼ぶことにする。また、降雨日数については、雨が降っていたら当日の農作業は中止する習慣があるため、気象量をそのまま採用し(2)式のように定量化した。観測された気象量 $r$ には、\*を付けて加工値と区別する。

$$r_{1,mm,t} \equiv \max[r_{1,mm,t}^* - 30, 0] \quad (1)$$

$$r_{1,days,t} = r_{1,days,t}^* \quad (2)$$

ただし、生産年度 $t$ において

$$r_{1,mm,t}^* \text{ ステージ1の観測累積降雨量 (単位mm)}$$

$$r_{1,days,t}^* \text{ ステージ1の観測降雨日数}$$

であり、ステージ $i$ の生産期間を $d_{i,t}$ とすると

$$\text{March 20} \leq d_{1,t} \leq \text{March 31},$$

$$\text{March 20} \leq d_{i,t} \leq \text{August 20}, \{i|1,2,3,4,5\},$$

また、生産年度 $t$ は $1994 \leq t \leq 2011$ である。

7 雑種第一代交配種。

8 大部分が砂の感じで、わずかに粘土を感じる。比較的乾きやすい。

9 1日当たり3lの水を畑1m<sup>2</sup>に散水する量が3mmの雨、30mmとは、その量が10日間続くイメージ。

以上のように、地元農業技術者の知見と生産現場での経験則から閾値を仮定しているが、さらにフィッティングの良い閾値があるか否かについては第5章で検証を行っている。

## 2) 播種期(生産ステージ2)

ステージ1で整備された畑でたね播きをする時期である。トラクターに播種機、肥料箱、殺虫剤タンクなどを一斉に装備し、定期的に人力で不足を充てんしながら時間をかけて慎重に行われる。したがって、圃場準備期同様に降雨が農作業を妨げる。4~5月にかけて予定される播種期は3月下旬の畑準備に比べて気温がやや上昇してきているため、ある程度の降雨量があっても播種作業を開始する畑の回復が比較的早い。

ステージ2では、ステージ1同様に降雨の過多がその後のハウレンソウの収穫量に負の影響を及ぼすことが地元農業技術者の間では知られている。生産現場での経験則からおおよその目安として3インチ程度、また、降雨日数については20日間程度であれば何とか期間内に播種が収まる。降雨量については、ベースケースとしてBottomを80mmに設定して(3)式のように定量化する。また、降雨日数については、Bottomを20日に設定して(4)式で定量化する。(閾値の変化形については第5章を参照。)

$$r_{2,mm,t} \equiv \max[r_{2,mm,t}^* - 80, 0] \quad (3)$$

$$r_{2,days,t} \equiv \max[r_{2,days,t}^* - 20, 0] \quad (4)$$

$$April\ 1 \leq d_{2,t} \leq May\ 15$$

## 3) 栄養生長期(生産ステージ3)

作物が伸長し、収穫量を左右する植物体の大きさが決定する重要な期間である。ハウレンソウは長日で開花が誘引される。品種間で若干の差はあるが、一般的には16時間以上の日長を必要とする。この開花条件があるがゆえにハウレンソウの種子生産は緯度45~55°辺りに位置する地域でなければ商業的な生産が成り立たないことになっている。当地では、夏至近くで開花を開始すると、栄養生長から生殖生長へ移行していくため植物体の生育伸長が緩慢になっていく。その時までには十分な肥大を達成するために、生育の進行を見ながら確実に追肥を行う。日本の「イネの肥やしは土用まで、麦の肥やしは彼岸まで」という言い伝えも、作物の栄養生長から生殖生長への移行していく暦と農学的な知見にもとづいた追肥のタイミングを示唆している。地元農業技術者の間では、この期間に十分な量の雨が降らなければ、十分な収穫量をあげるだけの植物体ができない

ことが知られている。同時に、春先の低温から緩やかに気温が上昇する時期であり、平年であれば、平均気温はハウレンソウの生育適温(15~20°C)辺りを通過する時期である。したがって、この期間に気温が不足すると十分な植物体ができないことも経験則として知られている。

ステージ3では、降雨量、また、気温の不足が作物の大きさ、つまり収穫量に負の影響を及ぼすことが地元農業技術者の間では知られている。今回は、閾値を下回る量を定量化するCapの概念を取り入れる。気温については、当期間中の気温量を定量化するために、累積有効気温GDD<sup>10</sup>を採用する。一日当りの日次のGDDは以下のように定義される。

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \quad (5)$$

$T_{base}$  植物が生育できる最低気温(°C)

$T_{max}$  日最高気温(°C)

$T_{min}$  日最低気温(°C)

そして、日次のGDDの基準となる $T_{base}$ をハウレンソウの生育に必要な最低温度10°Cに設定する。生産年度 $t$ におけるステージ3の全期間中の累積有効気温を $GDD_{3,t}^*$ と記述し、生産現場での経験則からCapを $GDD_{250}$ に設定すると、(6)式のように加工値が定量化される。同様に、降雨量についても、Capを250mmに設定して、加工値を(7)式のように定量化する。(閾値の変化形については第5章を参照。)

$$r_{3,gdd,t} \equiv \max[250 - GDD_{3,t}^*, 0] \quad (6)$$

$$r_{3,mm,t} \equiv \max[250 - r_{3,mm,t}^*, 0] \quad (7)$$

$$May\ 16 \leq d_{3,t} \leq June\ 20$$

## 4) 開花期(生産ステージ4)

ステージ3で十分な大きさに生長したハウレンソウが夏至付近の長日に感応し開花を開始して、交配、結実の過程に進む生殖生長期である。ハウレンソウは風媒植物<sup>11</sup>であり、花粉が軽いため降雨によって著しく交配活動が阻害される。したがって、降雨量が収穫量に対して負に作用する。この間は気温の上昇とともに開花が進み、7月下旬頃の暑さで開花が終わる。

地元農業技術者の間では、この時期の降雨量はその多少によらず、もれなく収穫量に対して負に影響することが知られている。したがって、閾値は設定せず気象量をそのまま採用し(8)式で定義する。

$$r_{4,mm,t} = r_{4,mm,t}^* \quad (8)$$

$$Jun\ 21 \leq d_{4,t} \leq July\ 31$$

10 Growing Degree Days. 米国で作物の生育段階を計る目安として使われているインデックス。

11 風によって花粉が雄しべから雌しべに移動し受粉、交配する植物。

## 5) 種子登熟・収穫(生産ステージ5)

交配によって結実した種子が熟し、収穫準備が始まる時期である。この頃になると、播種後100日以上が経過しているため、植物体に疲れが見え始める。草丈は、100~150cmまで伸長し徐々に茶色く色づきはじめる。早い畑では7月下旬から収穫を開始する。この時期は気温が上昇、降雨が湿度の上昇をもたらすことで弱った植物体に病害などの発生を助長することから、降雨量の増加は収穫量に負の作用を及ぼすことが知られている。一方で、結実した種子が肥大する時期であり、反対に降雨が極少ないと種子の肥大が停止して小粒になるため収穫量は減少する傾向がある。

ステージ5では降雨量の過多が収穫量に負に作用することが地元農業技術者の間では知られている。この時期はまとまった雨があまり降らないが、0.5インチ程度のおしめりは種子の肥大に丁度良いという経験則があることから、ベースケースとしてBottomを10mmに設定して(9)式のように定量化する。

$$r_{5,mm,t} \equiv \max[r_{5,mm,t}^* - 10, 0] \quad (9)$$

$$\text{August 1} \leq d_{5,t} \leq \text{August 20}$$

以上の手続きにより、各ステージにおいて収穫量に影響を与える気象要素を地元農業技術者の知見、生産現場における経験則を組み入れながら定量化した。この結果を踏まえて、生産年度 $t$ における収穫量 $Y_t$ を(10)式の変量線形回帰モデルとして定式化する<sup>12</sup>。

$$Y_t = b + a_1 r_{1,mm,t} + a_2 r_{1,days,t} + a_3 r_{2,mm,t} + a_4 r_{2,days,t} + a_5 r_{3,mm,t} + a_6 r_{3,gdd,t} + a_7 r_{4,mm,t} + a_8 r_{5,mm,t} + \varepsilon_t \quad (10)$$

そして、生産年度 $t$ の気象量から推定される収穫量推定値 $\hat{Y}_t$ は、過去のデータを用いた重回帰分析により $\hat{b}$ 、 $\hat{a}$ などの標本回帰係数を求めると、(10)式のように表される。

$$\hat{Y}_t = \hat{b} + \hat{a}_1 r_{1,mm,t} + \hat{a}_2 r_{1,days,t} + \hat{a}_3 r_{2,mm,t} + \hat{a}_4 r_{2,days,t} + \hat{a}_5 r_{3,mm,t} + \hat{a}_6 r_{3,gdd,t} + \hat{a}_7 r_{4,mm,t} + \hat{a}_8 r_{5,mm,t} \quad (10)'$$

## 3.3 プライシングの基本概念

これまで農業分野での天候デリバティブで採用されてきたプライシングの手法は、プットオプションまたはコールオプションの2つが中心であり、いずれも気象量を原資産として、収穫量(収益)に影響を与え始める閾値を行使価格(Strike)としている。先行研究においては、降雨量を原資産とした場合でのプ

ライシングの基本形を(11)式あるいは(12)式のように表示している(Martin et al. (2001))。

プットオプション型

$$\text{indemnity} = \begin{cases} 0 & \text{if } x > \text{strike} \\ \text{strike} - x & \text{if } x \leq \text{strike} \end{cases} \times \lambda \quad (11)$$

$\text{strike}$ : 干ばつと判定される閾値

$\lambda$ : 単位支払い金額

$x$ : 降雨量mm,  $0 \leq x$

コールオプション型

$$\text{indemnity} = \begin{cases} 0 & \text{if } x < \text{strike} \\ x - \text{strike} & \text{if } x \geq \text{strike} \end{cases} \times \lambda \quad (12)$$

いずれのオプション型も閾値を変化させることで、ペイオフが発生する確率を操作することが可能であるため、天候デリバティブの顧客のニーズに合わせてプレミアムを柔軟に設定することができる。例えば先の(11)式の場合、閾値を高く設定すれば干ばつの判定が出易くなるため、ペイオフが発生する確率が高くなりプレミアムが高くなる。一方で、閾値を低く設定すればプレミアムは低くなるが、損害をカバーする保険としての質は低下する(Stoppa (2003))

本研究においては、プットオプション型を採用する。この時、当該デリバティブは、モデルから同定される収穫量推定値が低下するにつれてペイオフが増加する仕組みとなる。すなわち、基本的なアイデアは農家の収穫量推定値を原資産とする方法を採用することであり、(10)'式から導出される収穫量推定値 $\hat{Y}_t$ を原資産価値、基準収量<sup>13</sup>を行使価格 $K$ としたプットオプションのプライシングを行うことが本研究の目的である。そこで、農家に支払われるペイオフを $F(\hat{Y}_t)$ とすると、本研究におけるプットオプションは以下のように表される。

原資産価値 $\hat{Y}_t$ : 当年の気象量から推定される収穫量推定値

行使価格 $K$ : 基準収量

ペイオフ:  $F(\hat{Y}_t) = \max(K - \hat{Y}_t, 0)$

更に、実務上の導入しやすさという観点から、本研究では支払い額に上限を付けることも検証するため、最終的には支払い上限付きプットオプションの形も検証する。このケースでは、支払い額の上限となる原資産価値を $U$ として、それに従うペイオフを $F_U(\hat{Y}_t)$ とすると、ペイオフは以下ようになる。

支払上限付きペイオフ:  $F_U(\hat{Y}_t) = \min(F(\hat{Y}_t), U)$

今回、支払金額の上限は、1エーカー当たりホウレ

12 収穫量の単位は面積当たり数量で lbs/acre と表す。

13 1エーカー当たりの想定収穫量(lbs/acre)。一般的に生

産会社と農民との生産契約時に合意される単位面積当たり収穫量の期待値である。

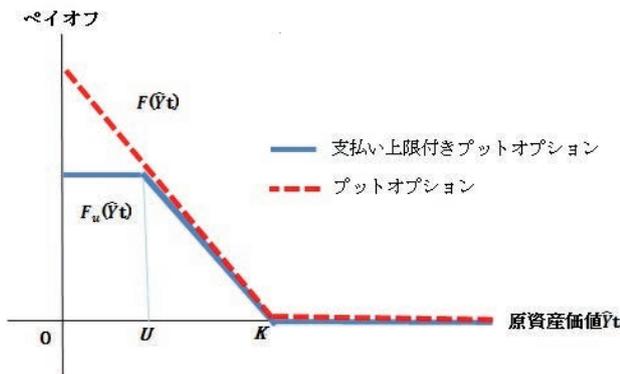


図3.3-1 支払い上限付きプットオプションのペイオフ

ンソウ種子生産コストの変動費にあたるUSD3,000に設定する。また、契約の主体は、地元の種子生産会社<sup>14</sup>、または、生産会社組合(8社共同)がインシュアラーとなり、各社から生産を請け負う農民がポリシーホルダーとしてそれを購入する構図を想定する。すると、今回設定した条件は図3.3-1のように描くことができる。

次に、当該デリバティブのプレミアム金額の算定方法について検討する。本研究では、統計学的なアプローチ(土方 (2000))を採用するため、まず各気象量について過去のデータの動向から当てはまりの良い確率分布を推定する。そして、求めた気象量の確率分布にしたがって収穫量を推定するモデル(10)式についてモンテカルロシミュレーションを行い、収穫量推定値の確率分布を導出する。その確率分布の下でのプットオプションのペイオフの条件付期待値に種子単価 $\lambda$ を乗じた金額がデリバティブの価値、すなわちプレミアムの金額となる。これを定式化すると、上限なしのプットオプションのプレミアムは

$$Premium = 0 \times P_{\hat{Y}_t \geq K} + \lambda \cdot E[F(\hat{Y}_t) | \hat{Y}_t < K] \times P_{\hat{Y}_t < K} \quad (13)$$

となり、上限付きプットオプションのプレミアムは

$$Premium = 0 \times P_{\hat{Y}_t \geq K} + \lambda \cdot E[F(\hat{Y}_t) | U < \hat{Y}_t < K] \times P_{U < \hat{Y}_t < K} + \lambda \cdot U \cdot P_{\hat{Y}_t \leq U} \quad (14)$$

となる。ただし、 $P_{\hat{Y}_t}$ は確率変数 $\hat{Y}_t$ についての発生確率を表しており、例えば $P_{\hat{Y}_t \geq K}$ は $\hat{Y}_t \geq K$ となる確率を示している。なお、モンテカルロシミュレーションは1万回の変動パスを発生させる。

## 4. 実証分析

### 4.1 データの集計

目的変数を収穫量、また、説明変数を気象量として、それぞれを以下の手順に沿って集計した。

#### 4.1.1 目的変数としての収穫量

当産地には種子生産会社が8社あり、各社がそれぞれ世界中の顧客から独自の品種の種子生産を請け負っている。品種ごとに、先に述べた基準収穫量が異なるため、全品種をサンプルとする収穫量平均値を採用することはできない。当研究では当産地の代表的な品種であるA-1号の年次平均収穫量を採用する。通常、種子生産する圃場は生産農家ごとに独立しているため、 $t$ 年の生産圃場数は複数枚になる。したがって、 $t$ 年を代表する収穫量 $Y_t$ は(15)式のように定式化される。

$$Y_t = \frac{\sum_{n=1}^m y_{n,t}}{m} \quad (15)$$

{ $Y_{it}$  |  $t$ 年のA-1号の平均収穫量、 $1997 \leq t \leq 2011$ }

{ $y_{n,t}$  |  $t$ 年の圃場 $n$ の単位収穫量lbs/acre、 $1 \leq n \leq m$ }

実際には、2001、2002、2011年ではA-1号の生産は実施されなかった。したがって、最終的に(15)式の $t$ の条件は以下の通り定義される。

$$t \in \left\{ \begin{array}{l} 1997, 1998, 1999, 2000, 2003, 2004, \\ 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 \end{array} \right\}$$

表4.1.1-1 年次収穫量

t	$Y_t$	m
1997	1,478	10
1998	1,141	11
1999	1,456	10
2000	1,512	9
2001	N/A	0
2002	N/A	0
2003	1,490	1
2004	1,896	2
2005	1,043	4
2006	1,772	1
2007	1,470	1
2008	889	1
2009	1,952	2
2010	1,866	1
2011	N/A	0

14 スカジット市では8社が世界中のクライアントからの生産を請け負っている。また、地元大学機関の仲介により8社が協力して高品質生産活動を行う体制が整っている。詳しくは、「米国における野菜採種の概況」を参照された

い。  
<http://vegetable.alic.go.jp/yasaijoho/kaigaijoho/1301/kaigaijoho01.html>

表 4.1.1-2 基本統計量

Y <sub>t</sub>	統計量
平均	1496.989
標準誤差	98.573
中央値 (メジアン)	1483.596
標準偏差	341.468
分散	116600.852
尖度	-0.702
歪度	-0.369
範囲	1063.022
最小	889.028
最大	1952.051
合計	17963.875

以上の手続きにより、集計した収穫量データを表 4.1.1-1に、及び、その基本統計量を表4.1.1-2で示す。

4.1.2 説明変数としての気象データ

気象データは地元ワシントン州立大学(WSU)施設内気象観測所が提供しているデータを採用する<sup>15</sup>。当観測所は、今回題材となっている産地の中央に位置しているため当産地の代表的な気象データを提供しているといえる。また、地元大学が提供しているという点で信頼性も高い。

本研究での気象データの集計期間は表3.2-1で示した通り、中心的な栽培期間である3月20日から8月20日までの151日間とする。集計期間の終わりを決定する収穫日は、各圃場の播種日、また、生産期間中の天候によって左右されるため、毎年、圃場ごとに若干のばらつきがみられるが、今回設定した8月20日は最も早く収穫される場合を想定している。したがって、8月20日以降に収穫された場合、8月20日から実際の収穫日までの気象データはモデルに反映されない。しかしながら、現時点ではこのようなケースは極めて稀であると想定している。

気象要素については、降雨量(mm)、降雨日数、ま

た、累積有効気温(GDD)を採用する。

4.2 収穫量と気象データとの相関性と考察

まず、収穫量と各ステージの気象量との相関(表 4.2-1)について、また、同様に収穫量と加工値との相関(表 4.2-2)について調査した。加工値では、そのままの生データを採用した気象量に比べて収穫量との相関係数がやや上昇する傾向がみられる。更に、ステージ 3 では閾値の設定により符号が逆転し、すべてのステージで仮説通りの相関関係を示すことになった。一方で、ステージ 1 の相関は想定していた程度よりやや高く、ステージ 2 のそれはやや低い結果となった。しかし、ステージ 1 の圃場の準備は生産の開始として生産後半まで収穫量に負の影響を与える雑草の防除に注力する期間、また、最も重要な適期の播種を実施するための播種を適期に完了する期間であると解釈すれば、確かに納得できる値である。日本の伝統的な言い伝えである「苗半作」を思い起こさせる結果となった。今回の算出された統計値と経験則から設定した値との差異は、経験則の中に可能性としてあるバイアスをあらためて見直す機会(Burke et al. (2010))でもあり、今後継続して収穫量推定値モデルの精度を向上させていくときに役立つだろう。ところで、生産期間中の総降雨量と収穫量との相関は  $\rho(\sum_{i=1}^5 r_{i,mm,t}^*, Y_t) = 0.008$  となった。生産期間中の総降雨量の増加は単純に収穫量の減少に関係していないだろう、という当初の仮説を検証することができた。

4.3 気象データモデル化のための統計的手続き

4.3.1 変数選択法によるモデルの最適化

(10)式で定式化した収穫量と気象量の多変量回帰モデルについて重回帰分析を行い、同時に 8 つの説明変数について最適な組み合わせ選ぶために変数選択を行った。(10)式で採用している説明変数は経験則に基づいた妥当性だけで選択してきている。今回の変数選択では、収穫量 Y<sub>t</sub> の予測に役立つ変数はできるだけもれなく取り込むことを前提にしながら、逆に、変数の数を過度に増やしてオーバーフィッティ

表4.2-1 収穫量と各ステージで設定した気象量との相関

i	1	2	3	4	5			
$\Gamma_{i,weather,t}^*$	$\Gamma_{1,mm,t}^*$	$\Gamma_{1,days,t}^*$	$\Gamma_{2,mm,t}^*$	$\Gamma_{2,days,t}^*$	$\Gamma_{3,mm,t}^*$	$\Gamma_{3,gdd,t}^*$	$\Gamma_{4,mm,t}^*$	$\Gamma_{5,mm,t}^*$
$\rho(\Gamma_i^*, Y_t)$	-0.797	-0.364	-0.176	-0.348	0.118	0.350	-0.289	-0.538

表4.2-2 収穫量と各ステージで設定した加工値との相関

i	1	2	3	4	5			
$\Gamma_{i,weather,t}$	$\Gamma_{1,mm,t}$	$\Gamma_{1,days,t}$	$\Gamma_{2,mm,t}$	$\Gamma_{2,days,t}$	$\Gamma_{3,mm,t}$	$\Gamma_{3,gdd,t}$	$\Gamma_{4,mm,t}$	$\Gamma_{5,mm,t}$
$\rho(\Gamma_{i,th}, Y_t)$	-0.826	-	-0.220	-0.441	-0.117	-0.350	-	-0.675

15 WSU Mt Vernon 観測所(48. 44° N 122. 39° W)。スカジット市内には合計 6ヶ所、ワシントン州内に合計で 177ヶ

所の観測所が設置されている。

表 4.3.1-1 選択された変数とその偏回帰係数の有意性の検定

変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	t 値	P 値	判定	目的変数との相関
$r_{1,mm,t}$	-36.6557	-1.1495	-6.1849	0.0008	**	-0.8262
$r_{1,days,t}^*$	72.6586	0.4537	2.6893	0.0361	*	-0.3642
$r_{2,days,t}$	-53.7749	-0.3906	-2.9492	0.0256	*	-0.4420
$r_{3,gdd,t}$	3.2290	0.3112	2.0793	0.0828		-0.3503
$r_{4,mm,t}^*$	-2.9899	-0.2330	-1.9262	0.1024		-0.2894
b	1155.9347		4.5340	0.0040	**	

判定 \*\*:1%有意 \*:5%有意

表 4.3.1-2 (17)式の有意性(分散分析)と精度

有意性			精度			
F 値	P 値	判定	修正済決定係数	重相関係数	DW 比	AIC
12.996	0.0036	**	0.8450	0.9568	2.2489	157.3609

判定 \*\*:1%有意 \*:5%有意

ングを発生させていないこと、また、説明変数相互で相関の高いものがないこと(多重共線性)を検証する統計的な手続きになる。今回、変数選択方法として、変数減少法(backward elimination method)を採用した。最終的に、モデル間の優劣判断は変数減少法とAIC(赤池情報量基準Akaike Information Criterion)を併用して判定した。AICは(16.1)式、(16.2)式で定義される。

$$AIC = -2 \ln L^* + 2k \tag{16.1}$$

この時、 $\ln L^* = -\frac{n}{2} \ln \left( \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n} \right)$ より、

$$AIC = n \ln \left( \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n} \right) + 2k \tag{16.2}$$

$\ln L^*$  : 対数最大尤度<sup>16</sup>

$n$  : 標本数

$e_i$  :  $Y_i - \hat{Y}$

$k$  : モデルのパラメータ数

そして、変数選択の結果、(17)が導出された。

$$\hat{Y}_t = 1155.93 - 36.65 r_{1,mm,t} + 72.65 r_{1,days,t} - 53.77 r_{2,days,t} + 3.229 r_{3,gdd,t} - 2.98 r_{4,mm,t} \tag{17}$$

表 4.3.1-3 選択された変数間の相関

	$r_{1,mm,t}$	$r_{1,days,t}^*$	$r_{2,days,t}$	$r_{3,gdd,t}$	$r_{4,mm,t}^*$	$Y_t$
$r_{1,mm,t}$	1.0000					
$r_{1,days,t}^*$	0.6596	1.0000				
$r_{2,days,t}$	0.2620	0.2751	1.0000			
$r_{3,gdd,t}$	0.4792	0.1413	0.3640	1.0000		
$r_{4,mm,t}^*$	0.0976	-0.0163	-0.0501	0.1400	1.0000	
$Y_t$	-0.8262	-0.3642	-0.4420	-0.3503	-0.2894	1.0000

ステージ1では降雨量と降雨日数の両気象量が採用、ステージ2では降雨日数が採用されて降雨量は削除、ステージ3では気温が採用されて降雨量は削除、ステージ4では降雨量がそのまま採用、そして、ステージ5の気象量(降雨量)は削除された。この変数選択の検定結果は表4.3.1-1のとおりである。また、(17)式の有意性と精度については表4.3.1-2に示すとおりである。なお、各生産ステージの気象量の閾値については、生産現場における知見をベースに、AICなどを使いながらCapとBottomをもいろいろと試行した。その際の閾値の組み合わせとAIC結果は表4.3.1-4に示すとおりである。最終的には、表中の組み合わせ19を採用したが、AICに基づいて最適化したモデルが農業技術者の知見に合致する結果となった。

ここで、ステージ1の降雨日数とステージ3の気温のそれぞれ説明変数の係数の符号が逆転して正になった点について以下の通り考察を加える。ステージ1については、降雨量が収量に与える影響を降雨日

16 対数最大尤度は、 $\ln L^* = -\frac{n}{2} \left\{ 1 + \ln(2\pi) + \ln \left( \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n} \right) \right\}$ と定義されるが、標本の値によらず最初の2項は一定の値

となるので、(16.1)式で定義される値を対数最大尤度のかわりに使うことができる。

表 4.3.1-4 試行した各ステージの閾値と AIC 結果

閾値組み合わせ	$r_1^*,_{mm,t}$	$r_1^*,_{days,t}$	$r_2^*,_{mm,t}$	$r_2^*,_{days,t}$	$r_3^*,_{mm,t}$	$r_3^*,_{gdd,t}$	$r_4^*,_{mm,t}$	$r_5^*,_{mm,t}$	AIC
組み合わせ 4	30*	5*	80	20*	200	200*	0*	10	159.836
組み合わせ 5	30*	5*	80	20*	250	250*	0*	10	159.836
組み合わせ 6	20*	5	80	24	250	250	0	10*	164.250
組み合わせ 7	30*	6	80	20	200	200	0	10	165.239
組み合わせ 10	30*	5	80	24	250	250	0	10*	162.191
組み合わせ 12	30*	5	80	15	250	250	0	10*	162.191
組み合わせ 14	20*	5	80	20	250	250	0	10*	164.250
組み合わせ 15	23*	5	41	12	250	250	6.2	2	166.362
組み合わせ 16	36*	7*	81	19*	250	250*	32*	14	159.620
組み合わせ 17	0*	0	0	0	250	250	32	10*	164.4798
組み合わせ 18	30*	9	80	24	250	250	32	10*	162.191
組み合わせ 19	30*	0*	80	20*	250	250*	0*	10	157.361
組み合わせ 23	30*	0*	80	20*	250	175*	0*	10	159.825
組み合わせ 25	30*	0*	80	20*	250	200*	0*	10	157.361

\* F=2.0(減少法)で有意であった変数の閾値

数が調整する補完的な役割を担っていると解釈する。その役割は、標準偏回帰係数が示すように、降雨日数の影響力が降雨量のそれより半分を下回ることからも確認できる。すなわち、降雨量と降雨日数を一対にして収穫量への影響が負であると解釈する。当ステージ期間中の過去の気象データ、また、偏回帰係数から、これら二変量の和が目的変数に対して正の作用をする確率は極めて低いと考えられる。また、ステージ3では、降雨量が削除され気温が採用されたが、偏回帰係数の符号が逆転して正になっている。表4.3.1-3の相関行列が表す通り、このステージ3の気温(GDD)の変数は、ステージ1の降雨量( $\rho=0.48$ )およびステージ2の降雨日数( $\rho=0.36$ )と相関が比較的高い。すなわち、前ステージまでの降雨量または降雨日数が多い年は、ステージ3での気温(GDD)も低下する傾向を示している。したがって、当該モデルの中では、ステージ3の気温が、ステージ1とステージ2で採用した2つの気象量を調整する役割になっていると解釈できる。更に、今回削除されたステージ5については、全栽培期間のうち87%が終了した生産の終盤であり、収穫量についてはほぼ決着がついていること、既にそれ以外の5つの説明変数で目的変数との相関係数が0.956であることから考えれば、どうしても必要な変数であるとは主張しにくいだろう。以上から、今回、変数減少法によって選択された各説明変数とそれぞれの偏回帰係数は妥当である

と考えられよう。

しかしながら、当初の想定では、モデルの全ての偏回帰係数の符号が負に揃うと期待されたにも関わらず、一部で調整という形で正の符号になった。今後の課題として、例えば非線形モデルの利用などを検討することで、偏回帰係数の符号を揃える可能性を追求していきたい。

#### 4.3.2 各気象量に対する確率分布の推定

統計学的なアプローチに沿って、まず各気象量が従う確率分布の推定を行い、それらの確率分布に基づいて、オプション・プレミアムの価値を算出する。具体的には、モンテカルロシミュレーションにより、(17)式の各変数項についてランダムな変動パスを発生させることで収穫量の将来予測を行う。次いで、この将来予測に基づいて、デリバティブ契約を販売するオプションのプレミアム価値が算出される。

まず、説明変数の各気象量について、過去のデータの動向から当てはまりの良い確率分布を推定する。今回は、ステージ毎に、それぞれ過去の気象量に当てはまりの良い確率分布を探索した。最終的にKS検定<sup>17</sup>で正規性の検定を行った結果、どのステージの気象量についても、帰無仮説が棄却されなかったことから、正規分布が受容されると判断した。したがって、各ステージで採用した気象量の観測値の将来予測を正規分布に当てはめてモンテカルロシミュレーションを行うこととする<sup>18</sup>。なお、各説明変数のKS検定結果を

17 Kolmogorov-Smirnov 検定。

18 正規分布をベースにした切断分布をあてはめること

で、マイナス値となる気象量予測値を除去してモンテカルロシミュレーションを行った。

表 4.3.2-1 KS 検定結果

	$r_{1,mm,t}^*$	$r_{1,days,t}^*$	$r_{2,days,t}^*$	$r_{3,gdd,t}^*$	$r_{4,mm,t}^*$
K-S	0.1353	0.1463	0.1212	0.1126	0.1735
p 値	0.5921	0.4457	0.8100	0.9549	0.1<

帰無仮説「正規分布に従う」に対して、p 値<0.05 で棄却する。  
 $r_{4,mm}^*$  の p 値については、0.1 より大きいという統計結果を得ている。

表 4.3.2-2 説明変数の期待値と標準偏差

	$r_{1,mm,t}^*$	$r_{1,days,t}^*$	$r_{2,days,t}^*$	$r_{3,gdd,t}^*$	$r_{4,mm,t}^*$
期待値	36.3	7.0	19.0	136.1	32.8
標準偏差	12.7	2.0	5.9	31.5	25.5

表 4.3.2-1 に、また、各説明変数の期待値と標準偏差を表 4.3.2-2 に示す。

#### 4.4 プライシング

第3章で記したプライシングの基本概念に沿って以下の通り、プレミアムの算出と、ペイオフの仕組みを考案する。

##### 4.4.1 ペイオフとプレミアムの算出

今回の天候インデックス保険では、モデルにより推定される収穫量推定値が基準収量から下回った場合の差(減収量とよぶ)に契約単価を乗じた金額を農民への補償額とするプットオプションとなる。原資産価値である収穫量推定値 $\hat{Y}_t$ を再掲すると、以下の(17)式のとおりである。

$$\hat{Y}_t = 1155.93 - 36.65 r_{1,mm,t} + 72.65 r_{1,days,t} - 53.77 r_{2,days,t} + 3.229 r_{3,gdd,t} - 2.98 r_{4,mm,t} \quad (17)$$

また、今回の基準収量は表4.1.1-2より1,497lbs/acreと設定する。

まず、減収量の生起する確率をモンテカルロシミュレーションによって導出した<sup>19</sup>。1万回のシミュレーションの結果、減収する確率(図中で0以上の生起する確率)は46.47%となった(図4-1)。

次に、減収量の条件付期待値を求めるため、減収量だけについてモンテカルロシミュレーションを行った(図4-2)<sup>20</sup>。その際の基本統計量は表4.4.1-1のとおりで、減収量の条件付期待値は392.4lbs/acreとなった。今回は単位当りペイオフ金額を種子生産の契約単価と同額にすることとして、USD5.00/lbと想定し、(13)、(14)式において $\lambda=5.00$ とした。この結果、当該天候デリバティブの価値、すなわちプットオプションのプレミアムは、(13)よりUSD911.74と算出された。以上の結果より、生産契約時点での農民の期待収益(契約単価×基準収量)が1エーカー当たり

USD7,485と想定できるので、当該プレミアム金額は期待収益の約12%程度に相当することがわかる。

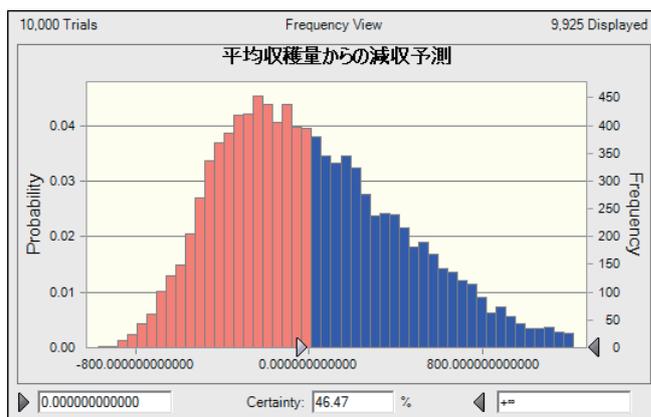


図 4-1 収穫量推定値と基準収量(平均収穫量 1,497lbs/acre)の差の確率分布

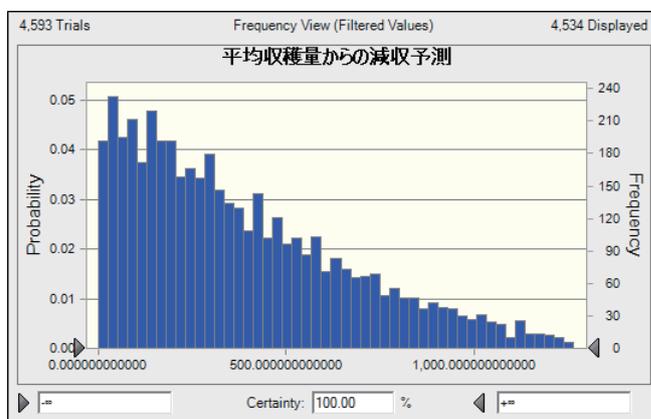


図 4-2 減収量の確率分布

表 4.4.1-1 減収量の基本統計量

	Forecast values
Trials	4,593
Mean	392.449
Median	316.271
Standard Deviation	311.961
Variance	97,320.143
Skewness	1.12
Kurtosis	4.31
Coeff. of Variability	0.794
Minimum	0.190
Maximum	2,326.892
Range Width	2,326.701
Mean Std. Error	4.603

19 今回の研究では、(17)式同定時の決定係数が極めて高いこと、さらに保険料には「事務諸経費」をオプション価格に上乗せすることを念頭においていることから、誤差項

から生じるリスクプレミアムに関しては考慮していない。  
 20 図 4-2 の確率分布は図 4-1 右側(0 以上)の確率分布と同じである。

4.4.2 支払い上限付きプットオプションのプレミアム

次にペイオフに上限を設けた場合で、プレミアム価値がどれくらい低下するかを調査する。今回は、1エーカー当たり平均生産コストの変動費 USD3,000 を上限としてプレミアムの価値を算出する。単位当たりのペイオフ金額  $\lambda$ (USD5.00/lbs)をそのまま採用すれば、ペイオフの最高値 USD3,000 は減収量が 600lbs/acre 以上場合で確定する。したがって、上限付きの場合のプ

レミアムは、ペイオフが減収量に比例して上昇する 0 以上 600lbs/acre の区間、及び、ペイオフが USD3,000 で固定される減収量が 600lbs 以上になる場合の 2 つに分けて算出する。再度モンテカルロシミュレーションを行った結果、前者では、条件付期待値が 254.7lbs/acre(表 4.4.2-1)、発生確率が 36.47%(図 4-3)となった。また、後者での条件付期待値は支払い上限に到達する収穫量推定値である 600lbs、発生確率は 9.17%となる。この発生確率は、図 4-4 の基準収量から減収する確率 45.64%から、図 4-3 の減収量が 0 以上 600lbs 以下の幅に収まる確率 36.47%を減じて求められる。したがって、支払い上限付きプットオプションでのプレミアムは、(14)より USD739.5 となった。このプレミアム金額は、農民の 1 エーカー当たり期待収益の約 10%に相当する。支払い上限を設けない場合に比べて、約 20%プレミアム金額が低下することになる。以上の手続きによって、将来想定される多様な取引に対して柔軟性と拡張性を付与することができる。

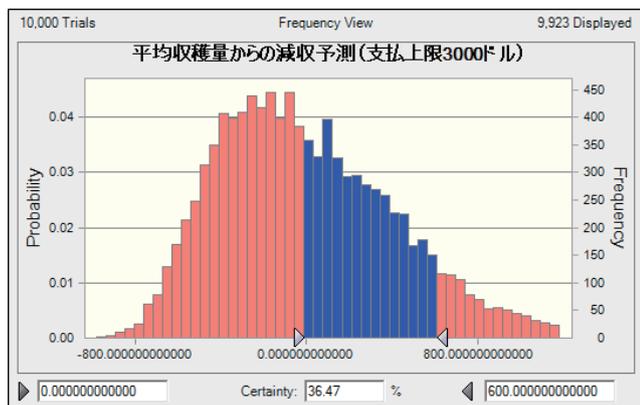


図 4-3 0 ≤ 減収量(予測値) ≤ 600lbs/acre の確率

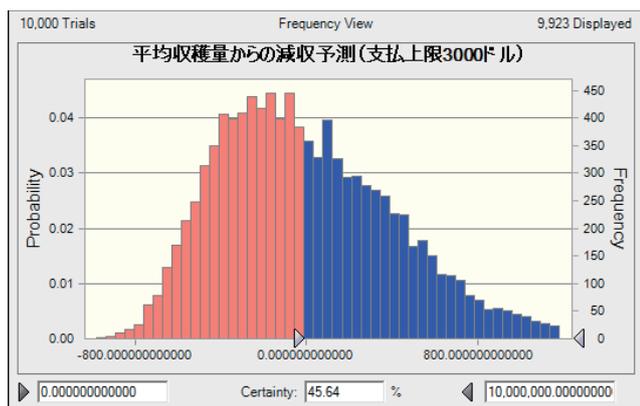


図 4-4 0 ≤ 減収量(予測値) の確率

表 4.4.2-1 基本統計量

	Forecast values
Trials	3,569
Mean	254.734
Median	237.579
Standard Deviation	166.061
Variance	27,576.328
Skewness	0.266
Kurtosis	1.92
Coeff. of Variability	0.651
Minimum	0.0288
Maximum	599.832
Range Width	599.803
Mean Std. Error	2.779

5. まとめと今後の課題

本研究では、農業分野における降水量型の天候デリバティブを拡張して、複合的な気象量の農産物収穫量への影響を解析するために、農業技術者の知見を織り込んだ多変量回帰モデルの構築を行い、さらに収穫量に影響を及ぼす各気象量の確率分布の推定を行った上で、モンテカルロシミュレーションによりプット・オプションのプレミアム算定を行うまでのフレームワークを提案した。作物生産の収益を規定する収穫量とそれに変動をもたらす気象量との関係をモデル化していく過程では、作物の生育ステージごとに、作物の能力を最大限引き出すその時々々の農作業(経験則)と地元農業技術者の知見を照らし合わせながらモデルに織り込んでいくプロセスを丁寧に記述することを心掛けた。生産期間が青果栽培に比べて長い種子生産ビジネスにおいて、複合的な気象要素を取り入れ、それぞれに現場の知見にあった加工を施すことで気象量と収穫量の関係をより高い精度をもって推定し、現地の農業技術者の知見に沿ったモデルを作成するプロセスを提案したところが本研究の貢献と考えている。

第4章の実証分析で明らかにしたように、農業技術者の知見に合致させたモデルによって、収穫量と加工された気象量の間にある強い関係性を実証することができた。現時点でデータ数に制限があったことは否めないが、モデルを構築するアプローチの仕方として、作物を変え場所を変えて本研究のフレームワークは応用可能である。さらに、現場の経験則も重視してイ

ンデックスを作り上げているため、地元農業関係者にはその直観的な妥当性が感覚として共有されやすいことも利点として挙げられるだろう。この点は、天候デリバティブを従来型の農業保険の補完ツールとして普及させていくときに重要な要素となっていくはずである。

ところで、農業分野でのデータ不足は天候デリバティブの多くの先行研究で指摘されている。お天気まかせ、経験と勘への過信も実務レベルでのデータ不足を放置させてきた原因なのかもしれない。その結果、リスク移転の視座から見た情報の非対称性の問題とも相まって、従来型の農業保険を非効率なままにしていることも周知の事実である。実際、いずれの国も政府補助金なしでは農業保険は成り立っていない。では、どうしたらよいか。著者の天候デリバティブへの関心もここから始まったことを付け加えておきたい。

本文中で述べた今後の課題を整理する。1つ目は、モデル化した後の偏回帰係数の符号の一致である。この点については、非線形モデルを検討するなどして改善を図りたい。2つ目は、リスクプレミアムを勘案した保険料の算定である。今後は、保険数理の考え方も取り入れながら、より弾力性と頑健性を兼ね備えた農業部門における天候デリバティブのフレームワーク構築を目指したい。そして、3つ目は、各気象量の将来予測に、より合致した確率分布の選択である。例えば、対数正規分布、ガンマ分布など気象学の分野で研究されている知見も合わせて探索していくこともできるだろう。

精密農業といって、データ、情報を活用して農業の生産性を向上させようという世の中の動きがある。その多くは、世界人口が90億人になる2050年に向けての食料増産や、水、農地など限りある資源を有効に利用する持続的な農業経営やリーン生産などを文脈にして語られることが多い。こうした農業体系の全く新しい基盤と期待されているのがIoTで、急速に普及しているセンサーネットワークから集まってくるビッグデータである。例えば、圃場別の気温、降雨量などの気象データはもとより、作物の草丈、数、栄養状態、病虫害や雑草の発生など従来は農民でしか知りえなかった栽培情報を、フィールドサーバー、GPSトラクター、ドローン、人工衛星といった多層な視野からリアルタイムで集めるテクノロジーが次々と生まれている。2016年9月に660億ドルで遺伝子組み換え種子の世界最大手モンサント社の買収を発表した農薬・種子大手のバイエル社は、衛星画像を使った土壌分析に基づいて農薬散布の時期や量などの情報を提供、収

穫量に応じて手数料を受け取るサービスに今後5年間で2億ユーロを投資する計画を立てている。バイエルの買収を受け入れたモンサントも2013年に気象データ分析のベンチャーを9.3億ドルで買収している<sup>21</sup>。本研究でも指摘した農業分野における天候デリバティブ普及の制約となっているベイシスリスクを低減していくため、デジタルプラットフォームや現場の暗黙知を形式知化していくための投資が今後ますます進められていくことは間違いない。本研究で提案したモデル化のプロセスが、より高い精度の天候デリバティブの構築に貢献できるとすれば幸いである。

### 参考文献

1. Burke, Marshall; de Jnavry, Alain; Quintero, Juan. (2010). Providing Index – Based Agricultural Insurance to Smallholders: Recent Progress and Future Promise, CEGA, University of California at Berkeley.
2. Cao, M., Li, A. and Wei, J. (2004). Precipitation Modeling and Contract Valuation: A Frontier in Weather Derivatives, *The Journal of Alternative Investments, Autumn*.
3. Hazell, P. B. R. & Hess, U. (2010). Drought insurance for agricultural development and food security in dryland areas, *Food Sec. (2010) 2*: 395. doi:10.1007/s12571-010-0087-y.
4. Martin, S. W., Barnett, B. J., and Coble, K. H. (2001). Developing and Pricing. Precipitation Insurance, *Journal of Agricultural and Resource Economics Volume 26, Number 01, July 2001*, 261-274.
5. Musshoff, O., Odening, M. and Xu, W. (2011). Management of climate risks in agriculture—will weather derivatives permeate?. *Applied Economics*, Volume 43, Issue 9, 2011 pages 1067-1077.
6. Nieto, J.D, Cook, S.E, Läderach, P., Fisher, M. J., Jones, P. J., Rainfall index insurance to help smallholder farmers manage drought risk, *Pages 233-247 | Published online: 08 Jun 2011*.
7. Skees, J., Gober, S., Varangis, P., Rodney, L., and Kalavakonda, V. (2001). Developing Rainfall - Based Index Insurance in Morocco, *Policy Research Working Paper 2577*.
8. Spaulding, A., Kanakasabai, M., Hao, J., Skees, J. et al. (2003). Can weather derivative contracts help

21 2016年9月20日付日本経済新聞朝刊。

- mitigating agricultural risk? *Microeconomic policy implications for Romania. Paper presented at the International Conference for Policy Model, Istanbul, July 3-5, 2003.*
9. Stoppa, A. and Hess, U. (2003). Design and Use of Weather Derivatives in Agricultural Policies: the Case of Rainfall Index in Morocco, *Agricultural policy reform and the WTO.*
10. Tadesse, M., Shiferaw, B. and Erenstein, O. (2015), Weather index insurance for managing drought risk in smallholder agriculture: lessons and policy implications for sub-Saharan Africa, *Agricultural and Food Economics, 2015, vol. 3, issue 1, pages 1-21.*
11. 土方薫(2000). 「天候デリバティブ」. シグマ ベイキャピタル.
12. 渡辺隆裕(2008). 「ゲーム理論入門」. 日本経済新聞出版.

### JAROS2017 研究発表大会へのご案内

期間：2017年11月25日、26日（土日開催）

場所：石川県政記念 しいの木迎賓館 石川県金沢市広坂 2-1-1

発表申込：査読セッション エントリー受付中（5月11日まで）

参加申込：2017年6月受付開始 予定

予定セッション

一般研究報告、査読セッション、シンポジウム、基調講演、チュートリアルセッション、懇親会

実行委員会（敬称略）

実行委員長：佐藤 清和

副実行委員長：長谷川 専、高嶋隆太

プログラム委員長：辻村 元男

### CALL FOR PAPER

#### INTERNATIONAL JOURNAL OF REAL OPTIONS AND STRATEGY

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ijros/>

The International Journal of Real Options and Strategy (Online ISSN 2186-4667) is a peer-reviewed and open access journal that publishes theoretical and application-oriented articles in areas of real options, strategy and related themes. Digitized scholarly articles in this Journal can be accessed from anywhere in the world via J-Stage, Japan Science and Technology Information Aggregator, Electronic. Please visit the site: [http://www.realopn.com/association\\_index](http://www.realopn.com/association_index), for submission of papers.

#### Themes and topics that are welcome for this Journal :

Theories, applications, Empirical Studies and Case Studied on Real Investment, Strategy, Risk Analysis, Valuations, Insurance, Games, Agency Problems, Infrastructure Policy

## 学会だより

- 会員データの確認と更新のお願い

会員の皆さまにお願いいたします。「メールアドレス」や、「学会からの郵便物の宛先」が変わり、学会から連絡が取れなくなっている方々がいられます。このほか、ご所属の変更や、会員身分(学生会員、あるいは、正会員)の変更など、ご本人からのお届けがないかぎり、学会は、データ変更をできません。これらの更新のお届けは、学会ホームページの「各種届出」ページから、「変更届けの用紙」をダウンロードして、ご記入のうえ、学会事務局へのメール添付などをお願いいたします。

- JAROS2017 研究発表大会

2017年度の研究発表大会は、次の日程で、金沢で開催される予定です。

日程：2017年11月25日、26日(土日開催)

場所：石川県政記念 しいの木迎賓館 石川県金沢市広坂 2-1-1

予約はお早めに：日程は観光シーズンであることに加え、同時期に市内で他の大きなイベントがある予定です。参加ご予約の方は、JAROS2017へのお申込だけでなく、できるだけお早めに(半年から数か月前)宿泊や交通機関の予約をご検討下さい。

- 月例公開研究会へご参加ください

月例の公開研究会は、2017年度から、二つの研究部会「価値創造のイノベーションと戦略」(主査：小林孝明氏、幹事：松尾雄治氏)と「エンターテインメント・ビジネス研究」(主査：川口有一郎氏、幹事：余語将成氏)の合同企画で、開催されます。皆さまのふるってのご参加をお待ちしております。

- 役員選挙について

次期会長および評議員を選出するため、会則に沿って選挙を執り行いました。

任期は2017～2018年度の2年間です [2017年4月1日～2019年3月31日]。

開票日： 2017年3月2日

投票総数： 47 (有効47、棄権0、無効0)

会長： 現職 服部 徹 氏 信任。(信任47、不信任0)

評議員： 「学界・研究」「産業界・官界」各10名。得票上位者へ意思確認を行い、3月末までに調整いたします。

日本リアルオプション学会 2016年度 公開研究会 記録	
第1回 「今あらためて注目される免疫力を用いたがん治療と周辺事業」	講師：矢崎 雄一郎氏 テラ株式会社 代表取締役社長 司会：小林 孝明 氏(株)野村総合研究所 2016年4月5日(火) 18:00 - 19:45 於：野村総合研究所 会議室
第2回 「コンテンツツーリズムとは何か」	講師：増淵 敏之氏 法政大学大学院政策創造研究科教授 司会：小林 孝明 氏(株)野村総合研究所 2016年4月18日(月) 18:30 - 20:00 於：野村総合研究所 会議室
第3回 「リンゴ皮むき工法の向こうに見える風景」	講師：吉野 佳秀氏 ベステラ株式会社 代表取締役社長 司会：小林 孝明 氏(株)野村総合研究所 2016年5月30日(月) 18:00 - 19:30 於：野村総合研究所 会議室
第4回 「次代に向けた企業価値創造へのチャレンジ ～自販機ビジネスモデルの革新～」	講師：長谷川 直和氏 ガイドードリンク株式会社執行役員コーポレートコミュニケーション本部長 司会：小林 孝明 氏(株)野村総合研究所 2016年6月13日(月) 18:00 - 20:00 於：野村総合研究所 会議室
第5回 休会	
第6回 「『No.1 セキュリティ・リサーチ・チーム』を目指すFFRIの成長戦略」	講師：鶴飼 裕司氏 株式会社FFRI 代表取締役社長 司会：小林 孝明 氏(株)野村総合研究所 2016年7月6日(水) 18:00 - 19:30 於：野村総合研究所 会議室
第7回 「価値創造のイノベーションと企業戦略 ～なぜインフォテリアは技術動向を先取りした経営ができるのか?～」	講師：平野 洋一郎氏 インフォテリア株式会社 代表取締役社長/CEO 司会：小林 孝明 氏(株)野村総合研究所 2016年8月9日(火) 18:00 - 19:30 於：野村総合研究所 会議室
第8回 「新しい医療技術を患者に届ける為には、何が求められる? ～今、求められる『医療レギュラトリーサイエンス』とは?～」	講師：松本 徹氏 早稲田大学 重点領域研究機構 医療レギュラトリーサイエンス研究所 招聘研究員博士 (生命医科学)、MBA 司会：小林 孝明 氏(株)野村総合研究所 2016年9月26日(月) 18:00 - 19:30 於：野村総合研究所 会議室
第9回 「大学発ベンチャー成功の秘訣」	講師：窪田 規一 氏 ペプチドリーム株式会社 代表取締役社長 司会：小林 孝明 氏(野村総合研究所) 2016年10月26日(水) 18:00 - 19:30 於：野村総合研究所 会議室
第10回 「『スマートフォン×ポイントサービスを活かしたセレスの成長戦略』」	講師：都木 聡 氏 株式会社セレス 代表取締役社長 司会：小林 孝明 氏(野村総合研究所) 2016年12月1日(木) 18:00 - 19:30 於：野村総合研究所 会議室
第11回 「地方の企業経営「京都・あやべスタイル」～上場企業と「半農半X」が共存する魅力～	講師：材木 正己 氏 日東精工株式会社 代表取締役社長 司会：小林 孝明 氏(野村総合研究所) 2016年12月12日(月) 18:00 - 19:30 於：野村総合研究所 会議室

## 法人会員リスト

日本リアルオプション学会は  
以下の法人の方からのサポートを受けています。  
ここに記して感謝いたします。

-----  
株式会社 シーエスデー  
株式会社 アーク情報システム  
株式会社 構造計画研究所  
同志社大学 大学院ビジネス研究科  
株式会社 サンセイランディック  
日本管理センター 株式会社  
株式会社 翻訳センター  
--- (入会順) ---

### 本誌「リアルオプションと戦略」は、国内外に公開される電子ジャーナルとなります

本誌の各号は会員限定の刊行後、3か月を経過してからインターネット上の電子ジャーナルプラットフォーム「J-Stage」に登載されます。これにより本誌掲載の記事は、Google Scholar などからも検索可能となり、社会に向けて広く情報発信されます。なお、各記事にはDOI (Digital Object Identifier) が登録され、本機関誌の記事は、すべて、国内外から恒久的にアクセスが保証される公開記事になります。第8巻第1号(2016年2月発行)は、2017年3月末頃に、J-Stage上に、公開される予定です。

## 編集後記

日本リアルオプション学会の機関誌「リアルオプションと戦略」の第9巻第1号をお届けいたします。本年度は、当学会が2006年7月28日に設立されてから創立10周年にあたりますので、本号は学会創立十周年記念号として特集テーマ「リアルオプション学会の原点とこれからのフロンティア」を設け、特別号として盛りだくさんの記事の掲載を行いました。まず、学会・会長の巻頭言を始めとして、公開研究会の講演要旨、創立十周年を記念して開催されたJAROS2016研究発表大会の基調講演要旨やパネルディスカッション「リアルオプション学会の原点とこれからのフロンティア」のパネラー発表要旨、チュートリアル講演要旨、そして大会ルポを掲載いたしました。また、十周年記念号の特集テーマに沿った解説記事、論説記事を掲載し、最後に査読論文2篇を掲載することができました。これもタイトスケジュールの中で原稿を寄稿して頂いた皆様のご協力の賜物と心より感謝申し上げます。

次号第9巻第2号は、学会の研究叢書第1号として、宮原孝夫先生の研究ノート「プロジェクトの総合的評価理論『リスク鋭感的価値尺度法』」を本年4月に刊行予定しておりますので、ご期待下さい。

中岡英隆

日本リアルオプション学会機関誌  
**リアルオプションと戦略 第9巻 第1号**

2017年3月31日 発行

(機関誌編集委員会)

委員長：高森寛

委員：森平爽一郎、中岡英隆、伊藤晴祥

発行所 **日本リアルオプション学会**

THE JAPAN ASSOCIATION OF REAL OPTIONS AND STRATEGY

事務局本部：

〒103-0027

東京都中央区日本橋1-4-1 日本橋1丁目ビル5F

早稲田大学ファイナンス研究センター

事務業務担当：

〒104-0033

東京都中央区新川2-22-4 新共立ビル2F

電話：03-3551-9893 FAX：03-3553-2047

## Reviewed Papers, Vol. 9, No. 1

On the Valuation of the Guarantee by Managing Shareholders:  
A Simple Analysis by Real Options Approach

[Haruyoshi Ito] ————— 78

Weather Derivative to Incorporate Multiple Weather Factors and  
Agricultural Insights into Option Pricing Model:  
A Case Study for the U.S. Seed Production Business

[Takumi Fukushima, Hidetaka Nakaoka] ————— 88



**日本リアルオプション学会**  
The Japan Association of Real Options and Strategy

---

<http://realopn.jp>

---

早稲田大学ファイナンス研究センター  
〒103-0027 東京都中央区日本橋1-4-1 日本橋1丁目ビル5F