持続可能な開発目標推進企業の株価に連動する世銀債の価値分析

森平 爽一郎 [a], 伊藤 晴祥 [b], 小林　弘樹

[a] 慶應義塾大学
[b] 国際大学大学院国際経営学研究科

要旨

2015 年 9 月 25 日から 27 日にニューヨーク国連本部にて開催された国連持続可能な開発サミット内にて、「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」が採択された。このアジェンダの中では、17 の目標と 169 のターゲットからなる「持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals, SDGs)」が掲げられている。17 の目標には、クリーンエネルギーの追求、働き甲斐と経済成長の追求、住み続けられる街づくり、海や陸の環境への配慮、気候変動に対する具体的な行動などが含まれており、以上のような社会や環境問題の解決が目指されている。

以上の SDGs の取り組みを推進するため、世界銀行が発行体、BNP Paribas が主幹事となり、SDGs を推進する企業の株価に連動する債券の発行を行った[1]。具体的には当該債券の金利 (クーポン) は、ドイツの Solactive 社が計算した Solactive SDG 世界株価指数を構成する企業の株価と連動をしている。Solactive SDG 世界株価指数は世界各国に所在する企業 50 社から構成されており、これらの 50 社は、少なくとも 20%の事業が SDGs に関連して社会・環境問題の解決に資するものであることが求められている。SDGs に関連した社会貢献が十分かどうかに加えて、財務状況やボラティリティーなどの要素を加味して最終的に Viego Eiris 社[2]が構成銘柄を決定している。

本研究では、上記の SDGs 推進企業株価に連動する世銀債(以下 SDGs 債)の価値評価について考察を行い、日本版 SDGs 債の発行に向けた提案を行うことを目的とする。

1 SDGs 債の概要

世界銀行が発行した SDGs 債は 15 年債及び 20 年債の 2 種類がある。15 年債の概要は以下の表 1、SDGs20 年債の概要は以下の表 2 のとおりである。

いずれの債券も Solactive Sustainable Development Goals World RC & EUR Index (以下 SOGOALEU)に金利が連動するタイプのものであるが、金利との連動の仕方が若干異なる。さらに、15 年債が 15 年間クーポンが 0 の割引債であり、満期時点に額面に指数に連動したクーポンを上乗せした金額が償還されるのに対して、SDGs20 年債は、20 年のうち、最初の 10 年間は 1.2%の固定金利が支払われ、後半の 10 年間は、5 年目と 10 年目の指数に連動した金利が支払われる。いずれの債券も指数に連動しているが、変動金利部分は指数を原資産とする算術平均 (アジアン) あるいは最大オプションの形を取っている。

また、いずれの債券も発行価格は額面パー発行である。果たしてこの価格が Fair Value であるのか

[1] BNP Paribas のニュース＆プレスリリースから引用
http://www.bnpparibas.jp/jp/2017/03/09/world-bank-launches-financial-instrument-expand-funding-sustainable-development-goals/

[2] Environment, Social, and Governance (ESG)調査会社大手

について、まず本研究にて検証をしたい。

表 1: SGDs 15 年債の概要

15年債の概要:

発行体:	世界銀行（国際復興開発銀行、IBRD）
発行体格付け:	Aaa /AAA (Moody's / S&P)
発行金額:	106.8百万ユーロ
決済日:	2017年3月21日
年限:	15年
参照インデックス:	Solactive Sustainable Development Goals World RC 8 EUR Index (SOGOALEU)
クーポン:	なし
満期日:	2032年3月22日
発行価格:	100%
券面:	EUR 100,000
償還価格:	券面100%にインデックスパフォーマンスを加算した価格
インデックスパフォーマンス:	Average Index Return x 連動率 （但し0%は下回らない） 連動率 = 100% Average Index Return = [Average Index Level − Initial Index Level] / Initial Index Level Average Index Level = 10年後および以降満期日（15年後）までの毎年の観測日（計6回）における参照インデックスの引け値の平均値 Initial Index Level = 決済日及び以降6ヵ月後までの毎月の観測日（計7回）における参照インデックスの引け値の最小値
ISIN:	XS1579356079
上場市場:	Luxembourg Stock Exchange
クリアリング:	Euroclear / Clearstream
主幹事:	BNP Paribas

BNP Paribas ホームーページから引用
http://www.bnpparibas.jp/jp/2017/03/09/world-bank-launches-financial-instrument-expand-funding-sustainable-development-goals/

表 2: SDGs 20 年債の概要

20年債の概要:

発行体:	世界銀行（国際復興開発銀行、IBRD）
発行体格付け:	Aaa /AAA (Moody's / S&P)
発行金額:	56.8百万ユーロ
決済日	2017年3月21日
年限:	20年
参照インデックス:	Solactive Sustainable Development Goals World RC 8 EUR Index (SOGOALEU)
クーポン:	1-10年、固定1.2%（年率） 11-20年：インデックスリンククーポン
満期日:	2037年3月23日
発行価格:	100%
券面:	EUR 100,000
償還価格:	券面100%
インデックスリンククーポン:	Average Index Return x 連動率 （年率、但し0%は下回らない） 連動率 = 10% Average Index Return = [Maximum Index Level − Initial Index Level] / Initial Index Level Maximum Index Level = 5年後及び10年後の参照日（2回）における参照インデックスの引け値の高い方 Initial Index Level = 決済日及び以降5ヵ月後までの毎月の観測日（計6回）における参照インデックスの引け値の平均値
ISIN:	XS1579354611
上場市場:	Luxembourg Stock Exchange
クリアリング:	Euroclear / Clearstream
主幹事:	BNP Paribas

BNP Paribas ホームーページから引用
http://www.bnpparibas.jp/jp/2017/03/09/world-bank-launches-financial-instrument-expand-funding-sustainab

le-development-goals/

2 SOGOALEU 指数について

SDGs 債価値評価を行うにあたり、原資産となっている SOGOALEU の記述統計量について検討する。SOGOALEU の日時収益率を計算し、2000 年 9 月 25 日から 2017 年 8 月 27 日までのデータを利用して記述統計量を計算したところ以下の表 3 のように計算される。

表 3 : SOGOLEU 指数の記述統計量

平均	0.000
中央値	0.000
最大値	0.022
最小値	-0.031
標準偏差	0.004
歪度	-0.555
尖度	7.311

表 3 の通り、日次収益率は尖度が非常に高く、ほぼ左右対称の分布である。Jarque-Bera 検定の結果、正規性の仮定は棄却されている。当該指数のモデル化をする場合には、正規分布を利用するのは妥当ではなく、工夫が必要となる。

そのため、本研究では、

このために、次のような CEV(Constant Elasticity of Variance)モデルを推定する

$$d\tilde{I}_t = \mu D_t I_t dt + \sigma I_t^{\gamma} d\tilde{W}_t \qquad d\tilde{W}_t = \tilde{\varepsilon}\sqrt{dt},\ \ \tilde{\varepsilon} \sim N(0,1) \tag{1}$$

ここで、I_t は t 期の SDGs 指数、μ はドリフト (成長率を示す)、Dt は、リーマンショックダミーを示し、2009 年 3 月 9 日以降であれば $Dt = 1$、それ以前であれば $Dt = 0$ とする。σ は指数変化率のボラティリティ、γ は指数の確率分布を決定するパラメータ (γ=0 であれば正規分布、γ=1 であれば対数正規分布、γ=1/2 であれば非心カイ二乗分布 (いわゆる CIR モデル))。パラメータ γ は実データに最もあるような確率分布を規定する。その値は GMM や最尤法などの適切な統計手法で推定をする。ε は平均ゼロ、分散 1 の標準正規分布(不確実の基本単位、S^{γ} によってそれを他の確率分布に変換) する。

実際のパラメータ推定とモンテカルロシミュレーションの実行には、式 (1)を離散化した式(2)を利用する。

$$\tilde{S}_{t+1} = S_t + \mu S_t \Delta t + \sigma S_t^{\gamma} \sqrt{\Delta t}\,\tilde{\varepsilon}_{t+1} \tag{2}$$

モンテカルロシミュレーションに必要なパラメータの推定は GMM を用いて行う。GMM による推定結果は、以下の表 4 の通りである。

表 4 : SOGOLEU 指数の CEV(Constant Elasticity of Volatility)確率過程

	統計値
μ	0.105^{***}
標準誤差	0.029

σ	0.154**
標準誤差	0.064
γ	0.848***
標準誤差	0.088
残差共分散	0.206
J 統計量	0.003

但し表は、$d\tilde{I}_t = \mu D_t I_t dt + \sigma I_t^{\gamma} d\tilde{W}_t \quad d\tilde{W}_t = \tilde{\varepsilon}\sqrt{dt},\ \tilde{\varepsilon} \sim N(0,1)$ における、パラメータの推計値である。推計は GMM により行う。***、**は、それぞれ、1%、5%有意水準を示す。

上記のパラメータを利用し、また、シミュレーションを行うためには、式(2)を離散表示する必要があるため、以下の式(3)を利用して指数のシミュレーションを行う。

$$\begin{aligned} \tilde{I}_t &= \left(1+0.105267 D_t \Delta t\right) I_{t-1} + 0.15366 I_{t-1}^{0.84713} \sqrt{\Delta t}\,\tilde{\varepsilon}_t \\ \tilde{\varepsilon}_t &\sim N(0,1), \qquad \Delta t = \tfrac{1}{253} \end{aligned} \tag{3}$$

モンテカルロシミュレーションは、以下のステップにより行う。

Step1　パラメータ μ、σ、γ、の値を与える。時間刻み Δt = 1/253 とし、日次で指数を推計する。

Step2　参照指数の初期値 I_0 を与える。初期指数水準の最初の基準日となる 2017 年 3 月 21 日時点の指数を利用して、$I0$ = 173.6854 とする。

Step3　標準正規分布に従う乱数を一つ発生させ、それを ε_{t+1} とする。

Setp4　式(3)の右辺を計算し左辺とする。

Step5　仕組債の計算をおこなう。

Step6　時間をすすめる。$t \leftarrow t+1$ とし、Step3 にもどる。この計算を満期 T まで繰り返す。

Step7　Step2 に戻る。この過程を充分な数だけ繰り返えし、結果の平均値を計算する。本研究では、10,000 回のパスを発生させる。また乱数発生の際には、対称変量法を利用する。

3　評価モデル

3.1　SDGs15 年債の評価モデル

まず、SDGs15 年債の価値(V_{B15})は以下の式(3.1)により行う。

$$V_{B15} = \underbrace{\frac{100}{\left(1+r_{15}\right)^{15}}}_{\text{額面の現在価値}} + \underbrace{100\frac{E^P\left[\max\left(AIR_{B15},0\right)\right]}{\left(1+r_{15}\right)^{15}}}_{\text{満期の指数連動クーポンの現在価値}} \tag{3.1}$$

$$= \frac{100}{\left(1+r_{15}\right)^{15}} + \frac{100}{IIL_{B15}} E^P\left[max\left[\frac{1}{6}\sum_{t=10}^{15} I_t - IIL_{B15}, 0\right]\right] \tag{3.2}$$

$$where \qquad AIR_{B15} = \frac{AIL_{B15}}{IIL_{B15}} - 1, \qquad AIL_{B15} = \frac{1}{6}\sum_{t=10}^{15} I_t \tag{3.3}$$

$$IIL_{B15} = Min\left(I_0, I_{1/12}, I_{2/12}, I_{3/12}, I_{4/12},, I_{5/12}, I_{6/12}\right) \tag{3.4}$$

ここで、AIR は、平均指数リターン、AIL は平均指数水準、IIL は初期指数水準、I_t は、t 年目のSOGOALEU 指数、r_t は、t 年物スポットレートである。添え字の $B15$ は、15 年債を示す。添え字の数字は、整数の場合は年度を示し、1/12 など分母が 12 となっている場合は、1 か月目など月を示す。

この割引債の価格決定は指数の収益率を原資産とする式 (3.1) による場合と、指数の水準の平均値を原資産とする式(3.2)のいずれかによって行うことができる。

指数収益率を原資産とする場合 : 式(3.1)の右辺第 2 項を吟味すると、AIR_{B15} を原資産として行使価格がゼロのヨーロピアンオプション 100 単位購入(Long)した時の価値をあらわしていると解釈できる。もし AIR_{B15} が正規分布に従うようであれば原資産が正規過程に従うときのオプション価格決定モデル (森平(2015)) を適用することができる。しかし表 3 に示されるように日次収益率が正規分布に従わないことからこうしたモデルを適用できるかどうかは直ちに判断できない。

指数水準を原資産とする場合 : 式 (3.2) の右辺第 2 項は 10 年目から 15 年目の指数の算術平均を原資産とし、IIL_{B15} を行使価格(水準)とする平均(アジアン)オプションを $100/IIL_{B15}$ 単位購入したときの価値を表している。指数が対数正規分布するとしてもその算術平均は対数正規分布しない。このため様々な近似あるいは数値解析手法が平均オプションの価格決定にあたって考えられている。しかしSOGOALEU 指数は対数正規分布すらしないため、対数正規分布する確率変数の平均の近似分布を用いる手法は適用できない[3]。モンテカルロ法などの数値解法を用いることになる。

また、15 年という長期の割引債券であり、その割引率についても検討が必要である。データの利用可能性によっては当該債券や類似債券の β 値などを計算したい。さらに、アジアンオプションの価値を計算する場合も指数のボラティリティーがパラメータの一つとなるが、そのボラティリティーを固定とせずに確率あるいは変動ボラティリティなどとして扱うべきかについても検討が必要である。

さらに、SOGOALEU 指数の構成銘柄は変動するため、その指数の操作が可能である可能性があり、そのことについても価値評価をする際には配慮が必要である。日本版 SDGs 設計の際にはこのような指数の恣意性にも留意する必要がある。

3.2　SDGs20 年債の評価モデル

SDGs20 年債の評価モデルは 11 年目以降のクーポンは指数への連動率を 10%とすると以下の式(4.1)の通りである。

$$V_{B20} = \underbrace{\sum_{t=1}^{10}\frac{0.012\times 100}{(1+r_t)^t}}_{\text{1年目から10年目までの1.2\%固定クーポン支払いの現在価値}} + \underbrace{\frac{100}{(1+r_{20})^{20}}}_{\text{20年目の額面支払額の現在価値}} + \underbrace{100\times 0.1\sum_{t=11}^{20}\frac{E^P\left[max\left[AIR_{B20},0\right]\right]}{(1+r_t)^t}}_{\text{11年目から満期時までの指数連動クーポンの現在価値}} \tag{4.1}$$

$$= \sum_{t=1}^{10}\frac{0.012\times 100}{(1+r_t)^t} + \frac{100}{(1+r_{20})^{20}} + \frac{10}{IIL}\sum_{t=11}^{20}\frac{E^P\left[\max\left[max\left[\tilde{I}_5,\tilde{I}_{10}\right]-IIL_{B20},0\right]\right]}{(1+r_t)^t} \tag{4.2}$$

$$where \quad AIR_{B20} = \frac{MIL_{B20}}{IIL_{B20}} - 1 \quad MIL_{B20} = \max\left(I_5, I_{10}\right) \tag{4.3}$$

$$IIL_{B20} = \frac{1}{6}\left(I_0 + I_{1/12} + I_{2/12} + I_{3/12} + I_{4/12} + I_{5/12}\right) \tag{4.4}$$

ここで、MIL_{B20} は、5 年目と 10 年目の指数のいずれか大きい方を示している、添え字の B20 は 20

[3] このような解釈ができるのは、この 15 年債が発行後 6 ヶ月を経過してからである。発行時(t=0)から 6 ヶ月 ($t=\frac{6}{12}$) までは IIL_{B15} は確率変数であり、この場合行使価格は不確実になる。

年債であることを示す。SDGs20 年債の価格決定には、SDGs15 年債と同様に、SOGOALEU 指数のモデル化が問題となる。

指数収益率を原資産とする場合: 式(4.1)の右辺第 3 項は指数収益率 AIR_{B20} を原資産として、行使価格がゼロのヨーロピアンコールオプションを $10/IIL_{B20}$ 単位購入したポジション価値を示している。15 年債と同様、もし AIR_{B20} が正規分布にしたがっているとすれば算術ブラウン運動に従うときのオプション価格決定モデルを適用してこの価値を計算できる。しかし正規性の仮定が満たされるかどうかについては慎重に検討する必要がある。

指数水準を原資産とする場合: 式(4.2)の右辺第 3 項の $\max\left[max\left[\tilde{I}_5,\tilde{I}_{10}\right]-IIL_{B20},0\right]$ は 5 年目と 10 年目の指数を大きい方を原資産とし、IIL_{B20} を行使価格とする最大オプションのペイオフを示している。指数 $\tilde{I}_5,\tilde{I}_{10}$ が対数正規分布に従っているとすれば Stulz(1982)を適用してこの価値を決定できるが、指数は表 3 に示したように対数正規分布に従わないことに注意すべきであろう。

さらに、当該債券の問題について、10 年目以降のクーポンレートが確定をしてしまうため、SDGs20 年債の格付けが AAA であることから、クーポンレートが同様な国債と比べて低い場合(最小で 0)には、当該債券の価格が暴落してしまうことになる。また実際に当該債券の価格は、I_5 及び I_{10} のみで決まってしまうため、長期投資の観点からはリスクが高い債券となり、また、2 つの指数のみで債券の価格が決まるとなると、指数を操作することにより価格決定が容易になるという問題がある。

4 モンテカルロシミュレーションの結果

4.1 SDGs15 年債の評価モデル

まず、SDGs15 年債の価値(V_{B15})をモンテカルロシミュレーションにより行う。初期指数 IIL_{B15} の分布に関する記述統計量は、表 5 の通りである。

表 5 : 初期指数(IIL_{B15})の分布に関する記述統計量

	統計値
平均	173.4923
中央値	173.7489
最大値	188.9590
最小値	146.1623
標準偏差	4.5515
歪度	-0.4357
尖度	3.6476

表 5 から、初期指数(IIL_{B15})の分布は、歪度が 0 に近く、また尖度も 3 に近いことから、正規分布に近くなっているが、左に裾が長い分布となっていることが理解される。

続いて、平均指数(AIL_{B15})の分布に関する記述統計量は、表 6 の通りである。

表 6 : 平均指数(AIL_{B15})の分布に関する記述統計量

	統計値
平均	682.9496
中央値	668.8973
最大値	1528.5710
最小値	259.9968
標準偏差	150.8132
歪度	0.5754
尖度	3.6131

表 6 から、平均指数(AIL_{B15})の分布は、歪度が 0 に近く、また尖度も 3 に近いことから、正規分布に近くなっているが、左に裾が長い分布となっていることが理解される。また、平均指数の平均は 683 の指数となり、最小でも、260 であることから、シミュレーションの結果からは必ず正のリターンが得られることを示している。(3.1)式の通り、15 年債には何らかのオプションが付されていると考えるが、必ず行使されることを示しており、このオプション価値は本源的価値と同値になると解釈される。

最後に、平均指数リターン(AIR_{B15})の分布は、以下の表 7 の通りである。

表 7: 平均指数リターン(AIR_{B15})の分布に関する記述統計量

	リターン(15 年)	リターン(1 年)
平均	293.52%	9.40%
中央値	285.37%	9.41%
最大値	800.43%	15.78%
最小値	47.10%	2.61%
標準偏差	85.68%	1.58%
歪度	0.5666	-0.0548
尖度	3.5912	3.0363

上記の通り、当該債券に投資をすることにより平均で 9.4%の年次リターンが得られることが理解できる。最小値が 2.61%であることから、額面が保証されているものの、平均指数が額面を下回ることはなく、額面保証のオプション(アジアンオプション)が付与されているものの、その価値は殆どなく、額面保証があってもなくても、当該債券の価値は変わらないと考えられる。また、債権としては高いリターンであり、標準偏差も 1.58%と、低い値になっている。低リスク高リターンの投資対象の様にみられるが、今後さらに検討をしたい。

5 今後の課題

まず、上記の通り、SOGOALEU 指数の分析を深化させ、SDGs 債権の価値評価を行い、当該債券が Fair Value で発行されていたかどうかについて検証をしたい。具体的には、指数の β 値や銘柄分析を行うことにより、SDGs 債券を評価するための適切な割引率、言い方を変えれば、当該債券投資への期待リターンについて検証をしたい。

また、当該価値評価を行うにあたり、実確率を利用するのではなく、リスク中立確率を利用した方法も考えられる。その際には、上述の割引率を計算する必要がない反面、投資家のリスク回避性などを織り込むことが必要となるが、このような評価方法も検証したい。

日本への応用としてまず、円建て指数を計算することにより、日本の投資家にとってのリターンとリスクについても検討をしたい。また、新しい日本版 SDGs 債を提唱する際にこのような指数の合成が日本株で可能かどうかについても検証したい。

そして、SDGs 債の分析として、上記の利回りやデュレーション、流動性などのリスク分析も行いたい。そして、日本版の指数の開発及び日本版 SDGs 債の設計のために必要な論点の整理を行いたい。

参考文献

[1] Cherubini, U., & Romagnoli, S. (2010). The Dependence Structure of Running Maxima and Minima: Results and Option Pricing Applications. *Mathematical Finance*, *20*(1), 35–58

[2] Johnson, H. (1987). Options on the maximum or the minimum of several assets. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, *22*(3), 277–283.

[3] Stulz, R. (1982). Options on the minimum or the maximum of two risky assets: Analysis and applications. *Journal of Financial Economics*, *10*(2), 161–185.

[4] 森平爽一郎(2016)「正規分布に従う原資産に対するオプション価格理論とその応用」、日本ファイナンス学会発表論文