

脱炭素社会における企業の存続確率モデル

Short Review
2021年12月投資工学研究所
主任研究員
本山 真

1. はじめに

地球温暖化の進行に対する危機感が高まる中、企業は温室効果ガスの削減に向けた取り組みを進めている。気候変動に関する企業の開示も広がっており、2022年4月の東京証券取引所における市場構造の見直し後の市場区分が「プライム市場」の上場企業は、TCFD（気候関連財務情報開示タスクフォース）またはそれと同等の国際的枠組みに基づく気候変動関連の情報開示が求められることになった（日本取引所グループ（2021））。

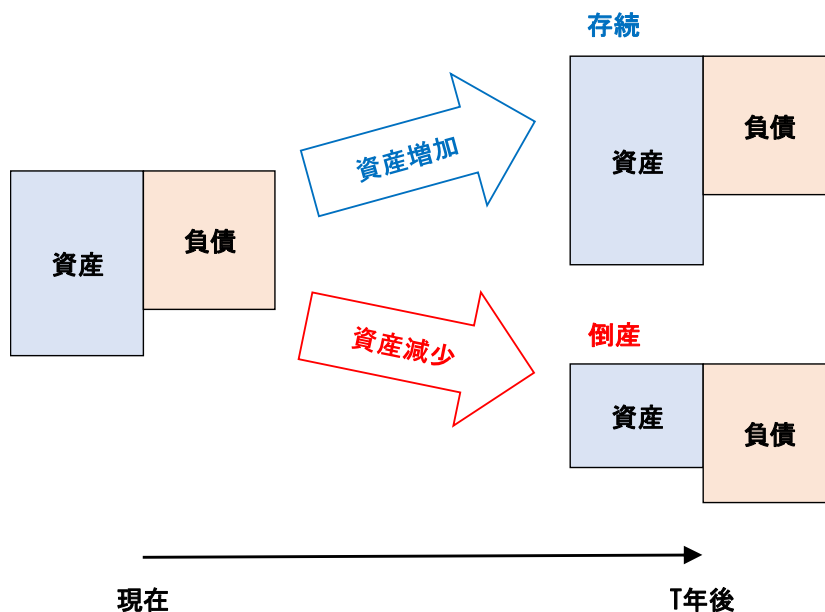
金融機関や機関投資家等の市場参加者が、開示された情報によって企業の温室効果ガスの排出量や気候変動への取り組みを把握し、脱炭素社会に資する企業評価を行い、資本市場における資本配分等の金融面から地球温暖化対策に寄与することが期待される。しかし、温室効果ガスの排出量等の気候変動関連の情報を証券分析や企業評価に反映する方法を確立することはこれからの課題である。

本稿では、脱炭素社会における企業の計量的な分析方法の一つの試案として、オプション理論を応用した企業の存続確率モデルを提示する。2章でリスクフリーレートを用いたモデル、3章で期待リターンを用いたモデルを定式化した後、4章で計算例を示し、具体的な利用方法を検討する。

2. リスクフリーレートを用いた企業の存続確率モデル

オプション理論を応用して企業の倒産確率を導出するモデルは、1990年代後半から現在に至るまで金融機関のリスク管理等の実務で広く用いられている。バランスシートをもとに、資産を原資産、負債を権利行使価格、純資産をコールオプションとみなし、 T 年後に資産が負債を上回れば企業が存続し、資産が負債を下回ったら倒産と考える（図表1）。 T 年後の資産の分布により負債を下回る確率として倒産確率が計算される。

図表1 T年後の企業の存続と倒産のイメージ



(出所) 当社作成

リスクフリーレートを用いた企業の倒産確率モデルは以下のように定式化される（森平（2009）、Bouchet and Le Guenedal（2020））。

$$E = AN(d_1) - De^{-rT}N(d_2) \tag{1}$$

$$\sigma_E = \frac{AN(d_1)}{E} \sigma_A \tag{2}$$

ここで、

$$d_1 = \frac{\log\left(\frac{A}{D}\right) + \left(r + \frac{\sigma_A^2}{2}\right)T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$d_2 = \frac{\log\left(\frac{A}{D}\right) + \left(r - \frac{\sigma_A^2}{2}\right)T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$P_D = 1 - N(d_2)$$

満期までの期間を T とし、 E は現時点の株式の時価総額、負債 D は現時点で確定しているバランスシート上の負債であり、 σ_E は株式のボラティリティ、 r はリスクフリーレートである¹。資産 A 、資産のボラ

¹ 株式の時価総額やボラティリティを利用するため、上場企業が計算対象になる。

ティリティ σ_A が未知数であり、(1)式と(2)式の非線形連立方程式の解を用いて、倒産確率 P_D を計算する。ここで、 $N(\cdot)$ は標準正規分布の確率分布関数である。

本稿では、脱炭素社会における企業活動の継続性に主眼を置き、倒産確率ではなく、企業の存続確率 P_S として次式で計算する。

$$P_S = 1 - P_D = N(d_2)$$

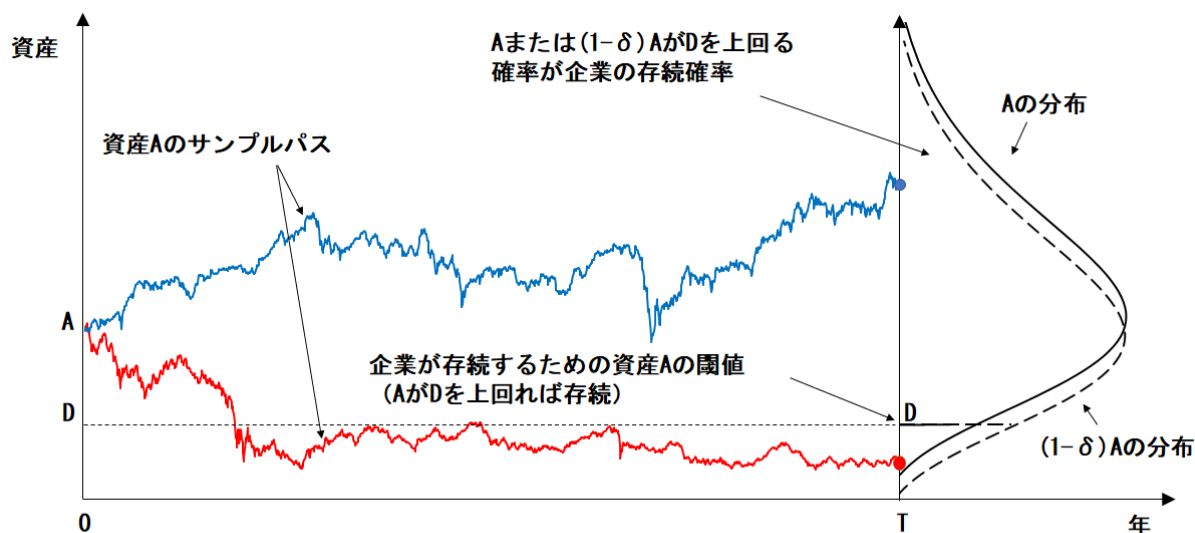
そして、気候変動リスクを考慮するために温室効果ガスを排出する企業は、資産 A が資産 $(1 - \delta)A$ に減少するとみなして、企業の存続距離 d_2' と存続確率 P_S' を次式で計算する²。

$$d_2' = \frac{\log\left(\frac{(1 - \delta)A}{D}\right) + \left(r - \frac{\sigma_A^2}{2}\right)T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$P_S' = N(d_2')$$

資産価額の推移による気候変動を考慮した企業の存続確率のイメージ図が図表2である³。時点 T で資産価額が負債 D を上回れば企業は存続すると考える。 δ が大きいほど、 $(1 - \delta)A$ は小さくなり（図表2の点線のように下方にシフトし）、企業の存続確率は小さくなる。

図表2 気候変動リスクを考慮した企業の存続確率



(出所) 当社作成

² 本稿では、 d_2 、 d_2' を企業の存続距離と呼ぶ。存続距離が長い（大きい）ほど、存続確率は高くなる。

³ 満期までの期間中に資産価額が閾値（負債）を下回ることがあるが、本稿のモデルは時点 T に閾値を上回るかどうかだけで企業の存続を判断するモデルである。

ここで、 δ は気候変動リスクのシナリオとして炭素価格とは関係のない先験的な値とすることも考えられるが、Bouchet and Le Guenedal (2020)では、炭素価格 C 、二酸化炭素排出量 M 、EBITDA (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization) $EBITDA$ を用いて以下としている⁴。

$$\delta = \frac{C \cdot M}{EBITDA}$$

これを以下のように書き直すと、二酸化炭素を排出する費用を考慮する前のEBITDAと考慮した後のEBITDAの比率で資産 A を調整させていると解釈できる。

$$1 - \delta = \frac{EBITDA - C \cdot M}{EBITDA}$$

本稿では δ について、Bouchet and Le Guenedal (2020)と異なる考え方で、カーボンプライシングを導入する。具体的には、現時点で二酸化炭素を排出する権利を金額 $\delta \cdot A$ で購入し、満期までの期間で二酸化炭素を排出して権利を使い切るとみなして、 δ を次式として気候変動リスクを考慮した企業の存続確率を計算する⁵。

$$\delta = \frac{C \cdot M \cdot T}{A} \quad (3)$$

3. 期待リターンを用いた企業の存続確率モデル

さらに、本章ではリスクフリーレートの代わりに資産の期待リターン μ_A を用いるモデルを考える。森平 (2009)では、株式の期待リターン μ_E を既知とし、資産 A 、資産のボラティリティ σ_A 、資産の期待リターン μ_A の3変数を未知数として、以下の(4)式から(6)式の3つの非線形連立方程式を解くモデルが示されている。本稿では同様の定式化で企業の存続確率 P_S を計算する。

$$E = AN(d_1) - De^{-\mu_A T} N(d_2) \quad (4)$$

$$\sigma_E = \frac{AN(d_1)}{E} \sigma_A \quad (5)$$

⁴ 炭素価格は、1トンの二酸化炭素の排出に対する価格。二酸化炭素排出量は、1年当たりの排出量であり、メタン等の二酸化炭素以外の温暖化効果ガスを二酸化炭素換算した値を含むものとする。

⁵ ここでは、企業の二酸化炭素排出量に上限（キャップ）を設定するのではなく、二酸化炭素の全排出量に経済的な負担が必要になると考えている。

本稿では、炭素価格や1年当たりの二酸化炭素排出量を一定として計算する。(3)式を変形した $\delta \cdot A = C \cdot M \cdot T$ が定数であるため、時点 T における気候変動リスクを考慮した企業の資産の分布は、資産 A の分布から $C \cdot M \cdot T$ を減じたものになるが、この分布も近似的に対数正規分布に従うとみなして、企業の存続確率を計算する。

$$\log(\mu_E) = \log(r) + \frac{AN(d_1)}{E} [\log(\mu_A) - \log(r)] \quad (6)$$

ここで、

$$d_1 = \frac{\log\left(\frac{A}{D}\right) + \left(\mu_A + \frac{\sigma_A^2}{2}\right)T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$d_2 = \frac{\log\left(\frac{A}{D}\right) + \left(\mu_A - \frac{\sigma_A^2}{2}\right)T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$P_S = N(d_2)$$

本稿の計算では、株式の期待リターン μ_E は PER の逆数（益回り）とし、当期利益 NI により、

$$\mu_E = \frac{NI}{E}$$

とする。そして、気候変動リスクを考慮した株式の期待リターン μ_E' は、

$$\mu_E' = \frac{NI - C \cdot M}{E}$$

とし、資産 A 、資産のボラティリティ σ_A 、資産の期待リターン μ_A' の 3 変数を推計し、気候変動リスクを考慮した企業の存続距離 d_2' と存続確率 P_S' は次式で計算する⁶。

$$d_2' = \frac{\log\left(\frac{A}{D}\right) + \left(\mu_A' - \frac{\sigma_A^2}{2}\right)T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$P_S' = N(d_2')$$

⁶ μ_E' は気候変動リスクを考慮した株式の益回りであり、逆数は気候変動リスクを考慮した PER になる。株主から見た企業の収益性の指標として広く用いられている ROE についても同様の計算ができる。PER や ROE は企業の存続確率と比較して単純な指標ではあるが、これらの計算にもカーボンプライシングを導入することによって、気候変動リスクを考慮した値を計算することができる。

4. 計算例と考察

本章では、2章と3章で定式化した企業の存続確率モデルの計算例を示し、具体的な利用方法を検討する。まずは、2章のリスクフリーレートを用いた企業の存続確率モデルについて、図表3の値を用いて計算する⁷。

図表3 企業の存続確率モデルに代入する値

変数名	値
株式時価総額（億円）	10,000
負債価値（億円）	15,000
株式のボラティリティ（%）	30
年限（年）	5
リスクフリーレート（%）	0.01
二酸化炭素排出量（万トン/年）	200

（出所）当社作成

気候変動リスクを考慮しなかったときの5年後の企業の存続確率は、図表4の95.60%となる。2章の方法で気候変動リスクを考慮するため、炭素価格を3,000円、10,000円、20,000円の3通りを仮定すると、5年後の企業の存続確率として、図表5の95.17%（炭素価格を3,000円とした場合）、94.03%（炭素価格を10,000円とした場合）、91.96%（炭素価格を20,000円とした場合）が得られる。

図表4 気候変動リスクを考慮しなかったときの存続距離と存続確率

炭素価格（円）	存続距離 d_2	存続確率 P_S （%）
-	1.71	95.60

（出所）当社作成

図表5 気候変動リスクを考慮したときの存続距離と存続確率

炭素価格（円）	存続距離 d_2'	存続確率 P_S' （%）
3,000	1.66	95.17
10,000	1.56	94.03
20,000	1.40	91.96

（出所）当社作成

⁷ 負債価値としてバランスシート上のどの値を用いるか、株式のボラティリティをどのように推計するか等が問題となるが、本稿では議論しない。二酸化炭素排出量は、分析の目的や開示の状況によってScope1（直接排出量）、Scope2（エネルギー起源間接排出量）、Scope3（その他間接排出量）の値を利用することを想定している。

カーボンプライシングを導入すると二酸化炭素を排出する企業は、存続確率が低下する。そして、炭素価格が高いほど、存続確率は低くなる。本格的な炭素税や排出量取引が導入される前でも、金融機関や機関投資家等は独自のカーボンプライシングを導入すれば、炭素価格に応じた投融資先の信用リスクの評価等が可能になる⁸。また、炭素価格には国内外の排出量取引の価格（後藤・川崎（2021））や炭素税を用いることもでき、DICE モデル（Nordhaus and Sztorc（2013）、伊藤（2021））やマクロ経済成長モデル（本山（2021））等による炭素価格を用いることも考えられる⁹。

また、存続確率を額面 100 円の割引債の現在価値とみなし、年限に応じたリスクフリーレートで割り引けば、資金調達コストを表す指標として金融機関と企業（発行体、融資先）の双方が利用できるだろう。

さらに、排出削減のシミュレーションに用いることもできる。炭素価格を 10,000 円として、図表 3 の値を用いて、二酸化炭素排出量は 50 万トン/年（150 万トン/年の削減）、100 万トン/年（100 万トン/年の削減）、200 万トン/年（削減なし）の 3 通りを仮定すると、5 年後の企業の存続確率は、図表 6 の 95.25%（二酸化炭素排出量を 50 万トン/年とした場合）、94.87%（二酸化炭素排出量を 100 万トン/年とした場合）、94.03%（二酸化炭素排出量を 200 万トン/年とした場合）になる。カーボンプライシングの導入を前提にすると、排出削減によって存続確率が高まる。二酸化炭素の排出削減にはコストがかかるが、企業評価の向上、信用リスクの低減、資金調達コストの低下等とのトレードオフを定量化することができる¹⁰。

図表 6 二酸化炭素の排出を削減したときの存続距離と存続確率（炭素価格が 10,000 円の場合）

二酸化炭素排出量（万トン/年）	存続距離 d_2'	存続確率 P_5' (%)
50	1.67	95.25
100	1.63	94.87
200	1.56	94.03

（出所）当社作成

ここまでは、二酸化炭素の排出量はプラスの値であることを前提としたが、マイナスの値でも計算できる¹¹。二酸化炭素を回収・貯留等を行う企業の評価で活用されれば、カーボンニュートラル、そして

⁸ 金融機関の本源的なリスクである信用リスクを発生させる要因（リスクドライバー）として、気候変動リスクを組み込むことができる。企業内で独自に炭素価格を導入し、部門間の取引や投資判断等に用いて低炭素投資・対策を推進する仕組みをインターナル・カーボンプライシングと呼ぶが、ここでは金融機関や機関投資家等が投融資先の評価に用いるインターナル・カーボンプライシングと言えよう。炭素価格が高いほど、投融資先の評価が厳しくなる。

⁹ 気候モデルと経済モデルを組み合わせた統合評価モデルによって得られる炭素価格を用いれば、世界的な気温上昇の上限の目標（例えば、1.5 度以下等）や二酸化炭素の排出削減目標（例えば、2050 年カーボンニュートラル等）と整合的な炭素価格を前提とすることもできるだろう。

¹⁰ ここでは、二酸化炭素の削減コストによる資産への影響は無視している。削減コストが計算できれば、(3)式で考慮することが可能である。

¹¹ 二酸化炭素の排出量がマイナスとは、二酸化炭素の回収・貯留等を行い、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を減少させることを意味する。

カーボンネガティブへの道も開かれる。2章の定式化において、現時点で二酸化炭素を排出する権利を金額 $\delta \cdot A$ で購入することを考えたが、ここでは $\delta \cdot A$ で売却できる企業を考える。炭素価格を10,000円として、図表3の値を用いて、企業全体の活動によるネットの二酸化炭素回収量を50万トン/年、100万トン/年、200万トン/年の3通りを仮定すると、5年後の企業の存続確率として、図表7の95.93%（二酸化炭素回収量を50万トン/年とした場合）、96.23%（二酸化炭素回収量を100万トン/年とした場合）、96.77%（二酸化炭素回収量を200万トン/年とした場合）が得られる。図表4の気候変動リスクを考慮しなかったときの存続確率である95.60%より大きくなり、二酸化炭素を回収・貯留等を行う企業の評価が高まる。さらにこのような分析を行うことによって、二酸化炭素排出企業と回収・貯留等を行う企業をマッチングし、二酸化炭素を排出する権利の価格等の条件の交渉材料にすることができるだろう。

図表7 二酸化炭素の回収・貯留等を行う企業の存続距離と存続確率（炭素価格が10,000円の場合）

二酸化炭素回収量（万トン/年）	存続距離 d_2'	存続確率 P_S' （%）
50	1.74	95.93
100	1.78	96.23
200	1.85	96.77

（出所）当社作成

最後に、3章の期待リターンを用いた企業の存続確率モデルについて、図表3のリスクフリーレートを図表8の値に変更し、当期利益を用いて計算した結果が図表9、10である¹²。リスクフリーレートをを用いた企業の存続確率モデルよりカーボンプライシングの導入の影響は小さいが、炭素価格が高いほど、存続確率は低くなることが確認できる。

図表8 期待リターンを用いた企業の存続確率モデルに代入する値

変数名	値
リスクフリーレート（%）	1.0
当期利益（億円）	1,000

（出所）当社作成

¹² リスクフリーレートの自然対数を使うため、マイナス金利を含めてリスクフリーレートが小さい場合、このモデルでは計算することができない。ここでは計算が可能な1.0%とした。

図表 9 気候変動リスクを考慮しなかったときの存続距離と存続確率
(期待リターンを用いた企業の存続確率モデル)

炭素価格 (円)	存続距離 d_2	存続確率 P_S (%)
-	1.75	96.02

(出所) 当社作成

図表 10 気候変動リスクを考慮したときの存続距離と存続確率
(期待リターンを用いた企業の存続確率モデル)

炭素価格 (円)	存続距離 d_2'	存続確率 P_S' (%)
3,000	1.75	96.01
10,000	1.75	95.98
20,000	1.74	95.93

(出所) 当社作成

5. おわりに

脱炭素社会における企業の分析方法としてオプション理論を応用した企業の存続確率モデルを定式化し、計算結果を示しながら、利用方法を検討した。具体的な利用方法としては、①金融機関や機関投資家等の投融資先の評価、②資金調達コストの分析、③二酸化炭素の排出削減に関するシミュレーション、④二酸化炭素排出企業と回収・貯留等を行う企業のマッチングに言及した。

脱炭素社会においてカーボンニュートラル、そしてカーボンネガティブを達成するためには、資本市場において資本配分の基礎となる企業評価の転換が大きな役割を果たすと考える。企業の排出削減努力を評価し、二酸化炭素の回収・貯留等を行う企業を育成し、資金調達がしやすくなる仕組みに寄与するために企業評価の方法をさらに議論していく必要があるだろう。

参考文献

Bouchet, Vincent and Le Guenedal, Théo (2020), "Credit Risk Sensitivity to Carbon Price",
<https://ssrn.com/abstract=3574486>

Merton, Robert C. (1974), "On the Pricing of Corporate Debt: The Risk Structure of Interest Rates.", Journal of Finance

Nordhaus, W.D., and Sztorc, P. (2013), "DICE 2013R: Introduction and User's Manual",
http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf

阿竹敬之(1998),「オプション・プライシング・アプローチとニューロ・ファジー・モデルでの倒産予測可能性の実証研究」,『JAFEE1998 夏季大会予稿集』,日本金融・証券計量・工学会

伊藤央峻(2021),「DICE モデルによるカーボンプライシング」,日興リサーチレビュー

<https://www.nikko-research.co.jp/library/10425/>

ウィリアム・ノードハウス(2015),「気候カジノ」,日経 BP

大嶋秀雄(2021a),『NGFSの気候シナリオが示す「2050年脱炭素」の世界～民間企業で行うリスク分析に向けて求められること～』,日本総研 Research Focus

<https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=39241>

大嶋秀雄(2021b),「秩序ある2050年カーボンニュートラルに不可欠な経済影響の把握—金融・企業連携によるシナリオ分析が急務—」,日本総研 Research Focus

<https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=39426>

大嶋秀雄(2021c),「中小企業の脱炭素のカギを握る銀行セクター～多面的支援を行う仕組みづくりが急務～」,日本総研 Research Focus

<https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=101813>

後藤誠也・川崎正勝(2021),「EU ETSを参考にした排出量取引市場の多期間分析」,日興リサーチレビュー

<https://www.nikko-research.co.jp/library/10487/>

鈴木茂央(1996),「信用リスクと社債評価—デフォルト率・回収率を考慮した社債評価と日本市場の実証分析」,『証券アナリスト・ジャーナル』

常泉和也(2021),「金融機関の気候変動に関する開示状況調査」,日興リサーチレビュー

<https://www.nikko-research.co.jp/library/10728/>

日本取引所グループ(2021),「TCFD提言に沿った情報開示の実態調査」

<https://www.jpx.co.jp/corporate/news/news-releases/0090/nlsgeu00000610sr-att/TCFDsurveyJP.pdf>

前田章(2009),「排出権制度の経済理論」,岩波書店

本山真(2021),「気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル」,日興リサーチレビュー

<https://www.nikko-research.co.jp/library/10496/>

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

(END)