

耐候性事業運営のための天候デリバティブ

KITAGAWA, Tetsuya / 北川, 徹哉

(出版者 / Publisher)

法政大学人間環境学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

人間環境論集 / 人間環境論集

(巻 / Volume)

15

(号 / Number)

1

(開始ページ / Start Page)

105

(終了ページ / End Page)

122

(発行年 / Year)

2014-12

耐候性事業運営のための天候デリバティブ

北川 徹哉

1 はじめに

デリバティブは、マーケットに存在する金融資産や商品などの価格変動にともなう利鞘獲得あるいはリスクヘッジのために、特定の条件を行使する権利や約束を売買する“派生商品”である。やや乱暴な言い方をしてしまうと、デリバティブの考え方を気温、降雨量、積雪量、風速、日照時間などの気象ファクタの変動へ置換したものが天候デリバティブ（例えば文献1）～11）である。気象という金銭的価値をもたない自然の営みを原資産とするデリバティブであり、このアイデアを最初に商品化して販売したのは米国のエンロンである。それが1997年のことであり、自由化により混沌としていた米国の電力業界を中心に、天候デリバティブは気象リスク回避のための手段として普及してゆく。しかしながら、よく知られているようにエンロンは不正経理疑惑に端を発して2001年にあっけなく破綻し、そのときの負債総額が巨額であったことに加え、他の企業においても類似の不正が明るみにでて社会問題化した。今となってはエンロンはその悪名ばかりが轟いているが、天候デリバティブの市場がエンロンから生まれたことは事実である。我が国では、1998年に金融システム改革法が施行されたことで天候デリバティブを取り引きできるようになった。その翌年に、三井海上火災保険（現、三井住友海上火災保険）とスポーツ用品販売企業のヒマラヤとの間で契約されたものが国内初の天候デリバティブである。近年のことであり、欧米にしても我が国にしても天候デリバティブの歴史はまだ浅い。これに対して、いわゆるデリバティブには熾烈な情報戦をとまなう近代的な取引というイメージがある一方、実はそ

の起源は古く、欧州では古代ギリシャ時代、我が国では江戸時代といわれている。

普段はさほど意識しないが、気象が収益に影響を及ぼす業種はエネルギー、食品、飲料、衣料、製造、小売、農水、観光、建設、運輸など、極めて多岐にわたる。たとえば、ある年の夏が冷夏となった場合、電力販売量の減少やエアコン販売台数の低迷、清涼飲料・氷菓子類やビールの販売量の鈍化などの社会現象が数値として現れる。また、夏から秋にかけて台風の襲来件数が多いと観光・レジャーへの客足が遠のき、収穫目前の作物や果実が被害を受け、建設現場の工程は遅延する。冬季にも多様な気象の影響があり、上述したヒマラヤの天候デリバティブの場合、スキー場周辺での12月の積雪量が少ないとスキー用品の売れ行きが伸びず、それによる収益減少に備えるものであった。あるいは年間を通じて、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの一部では、その出力が気象に左右されることは自明である。

以上のような気象リスクに曝されているとはいえ、業種によっては、気象による損失を最小化するように事業計画を組んでいる。たとえば、高確率で冷夏になることが予測されていれば、衣料品メーカーはその年の夏物衣料の売れ行きが伸びないことを見込んで生産を抑制し、過剰生産による損失を回避することができる。あるいは風力発電による売電事業を開始するとき、建設候補地での風況（気流の確率統計的な性質）の調査結果に基づいて経済性を検証し、利益が見込めないと判断されれば建設地を変更する。いずれの例においても気象リスクに対して計画的・戦略的に回避できており、わざわざ費用をかけて天候デリバティブを導入する必要はないように思われる。ところが気象は非線形現象であるから、当初の予測から大きくずれたり、想定と異なる気象が非正常に現れることがある。やっかいなことに、近年は地球温暖化や都市化などの環境問題の作用が加わる。こういった“予測が難しい”、“予測と異なる”、“まれにしか発生しない”イレギュラーな気象によって被る計画外の損失のヘッジ、ひいては事業安定化が天候デリバティブの守備範囲であろう。

このように、ユーザーにとっての天候デリバティブ導入の目的は主として不測の事態に備えることにある。それゆえ、しばしば損害保険と比較され、国によっては天候デリバティブは法的に保険の一種と分類されている。しかしながら、いわゆる損害保険事業では、膨大なサンプルに基づく大数の法則に裏付けられた信頼性と商品設計があり、その出口である補償金の算定のために損害査定を行う。査定の結果である補償金額をユーザーが知るまでに、あるいは受け取るまでに所

定の時間を要するのが通常である。これに対して天候デリバティブには査定に相当するプロセスがなく、簡単で迅速である。そもそも被害や損失が発生したかどうかを問うことすらなく、観測された気象関連データが契約条件に該当するかどうかを機械的に判定するだけである。つまり、天候デリバティブでカバーされる金額は実際に発生した損失の度合いとは無関係であり、一般に両者は合致しない。

米国においては、天候デリバティブの主な利用者はエネルギー業界であることから大口の取引が多く、それゆえ米国での天候デリバティブの取引総額が世界のそれに占める割合は圧倒的である。対照的に、日本では多業種との小口取引がメインであるとともに、売り手と買い手との間での提案や協議によって個別に設計されるオーダーメイド型が主流である。特に中小企業の利用が多く、これは大企業であれば事業のポートフォリオを分散できるが、中小企業の場合はそれが難しいという事情に因る。また、アジアを中心とする途上国でも天候デリバティブの潜在的なニーズがあるといわれており、徐々にではあるが利用されるようになってきた。たとえばタイの農村部では、干ばつなどによって収穫高が大きく減少したときに、銀行からの借入金の返済が難しくなることが問題となっていた。これを回避するために天候デリバティブを用いた事例がある¹¹⁾。ただし、タイでは、上述したように天候デリバティブは保険商品に分類されており、天候インデックス保険という名称になっている。

以上のように、天候デリバティブに関する話題は金融、経営、気象、社会、国際、工、農などにわたり、様々な着眼点があるが、本論では天候デリバティブの仕組みについて、個別の要素に深く立ち入ることは避けつつ紹介したい。まず、デリバティブと天候デリバティブの基礎、ならびに両者の関連性について簡潔に述べる。次に、事例として2000年に開催された淡路花博へ導入された天候デリバティブを取り上げ、その内容を説明する。淡路花博での天候デリバティブは強風を対象とするものであり、当時、国内初であったことから注目を浴びた。最後に、淡路花博の天候デリバティブについての著者による事後分析の結果の一部を示す。

2 デリバティブの概要

第1章で触れたように、デリバティブの一つに、ある原資産の価格変動に関し

て特定の条件を行使できる権利の取引があり、これをオプション取引という。本章においては、天候デリバティブの背景としてオプションの基礎について述べる。

2.1 ブラック・ショールズ方程式

株価などのある金融資産の時点 t における価格が S のとき、そのオプションの価格を $f(S, t)$ とする。 $f(S, t)$ を評価するための基礎的かつ代表的なモデルに式 (1) のブラック・ショールズ方程式 (Black-Scholes-Merton モデル)^{12), 13)} がある。起草者のうち、Black は 1995 年に他界してしまったが、Scholes と Merton は一連の研究成果が高く評価されて 1997 年にノーベル経済学賞を受賞している。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + rS \frac{\partial f}{\partial S} + \frac{\sigma^2 S^2}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} = rf \quad (1)$$

ここで、 σ はボラティリティ ($\Delta S/S$ の標準偏差 $= \sigma\sqrt{\Delta t}$)、 r は無リスク金利 (対象期間中は変化しない利率) である。この偏微分方程式を満足する $f(S, t)$ の値がオプションの価値であり、言いかえれば理論的に適な価格である。以下では、まず式 (1) の成り立ちをみてゆくことにする。ブラック・ショールズ方程式の構築は、価格 S の金融商品を $\partial f / \partial S$ 単位買い、価格 $f(S, t)$ のオプションを 1 単位売るというポートフォリオを考えることから始まる。このポートフォリオの価値 V は

$$V = \frac{\partial f}{\partial S} S - 1 \times f \quad (2)$$

と表わすことができ、微小時間 dt における V の微小変化 dV は

$$dV = \frac{\partial f}{\partial S} dS - 1 \times df \quad (3)$$

と書くことができる。式 (3) 右辺の dS と df に伊藤のレムマ (例えば文献 14)) とよばれる確率微分方程式に関する公式を代入すれば

$$\begin{aligned} dV &= \frac{\partial f}{\partial S} dS - 1 \times df \\ &= \left(-\frac{\partial f}{\partial t} - \frac{\sigma^2 S^2}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} \right) dt \end{aligned} \quad (4)$$

となる。伊藤のレンマに含まれている S の変動成分（ランダムウォークの成分）が式 (4) では結果として消去されており、微小時間 dt の間には dV にリスクが無いことを意味する。したがって、式 (2) のポートフォリオのもとでは dV が単に無リスク金利のみで決まるので、

$$\begin{aligned} dV &= Vr dt \\ &= \left(\frac{\partial f}{\partial S} S - 1 \times f \right) r dt \end{aligned} \quad (5)$$

と表すことができる。式 (4) と式 (5) より

$$\left(-\frac{\partial f}{\partial t} - \frac{\sigma^2 S^2}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} \right) dt = \left(\frac{\partial f}{\partial S} S - 1 \times f \right) r dt \quad (6)$$

となり、これを整理すると式 (1) のブラック・ショールズ方程式となる。

2.2 ブラック・ショールズ方程式の解

オプションには幾つかのタイプがあり、それに応じて式 (1) のブラック・ショールズ方程式の解も変わる。本論では、オプションの中でもコールオプションを対象とする。満期に相当する特定の時点 T における S を S_T とすると、コールオプションは、 S_T があらかじめ取り決めた行使価格 X を超えた場合に、その金融商品を価格 X で購入する権利を取引するものである。 S_T と X の差がコールオプションの買い手の利益となることから、この利益がコールオプションの時点 T における価値 $f(S_T, T)$ と等価である。すなわち時点 T におけるコールオプションの価値は

$$\begin{aligned} f(S_T, T) &= \begin{cases} S_T - X & (S_T \geq X) \\ 0 & (S_T < X) \end{cases} \\ &= \max(S_T - X, 0) \end{aligned} \quad (7)$$

と表すことができる（図 1）。ここで、 $\max(a, b)$ は a と b の大きい方をとることを意味する。式 (7) の境界条件の下で式 (1) のブラック・ショールズ方程式を解く。まず、 $f(S, t)$ を

$$\begin{aligned} f(S, t) &= e^{-r(T-t)} y(\xi, \tau) \\ &= e^{-r\tau} y(\xi, \tau) \end{aligned} \quad (8)$$

のようにおき、

$$\xi = \log \frac{S}{X} + \left(r - \frac{\sigma^2}{2} \right) (T - t) \quad (9)$$

$$\tau = T - t \quad (10)$$

の変数変換を利用する。これらを用いると、式(1)は ξ と τ を変数とする y に関する拡散方程式（熱伝導方程式）

$$\frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} - \frac{2}{\sigma^2} \frac{\partial y}{\partial \tau} = 0 \quad (11)$$

へ書き換えられる。拡散方程式は経済学や社会学、理学、工学、環境学ほかの分野で目的に応じて広く用いられるポピュラーな偏微分方程式であり、解が存在する。その一般的な解法は、拡散方程式を2階線形常微分方程式と1階線形常微分方程式とに分離し、それぞれの解を互いに乗じ、さらにフーリエ積分を用いて重ね合わせるといった経路をとる。結果として、式(11)の解は式(7)のコールオプションの条件を考慮すると

$$\begin{aligned} y(\xi, \tau) &= S e^{r\tau} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-A}^{\infty} e^{-z^2/2} dz - X \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-B}^{\infty} e^{-z^2/2} dz \\ &= S e^{r\tau} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^A e^{-z^2/2} dz - X \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^B e^{-z^2/2} dz \end{aligned} \quad (12)$$

となる。ここで、

$$A = \frac{\xi}{\sigma\sqrt{\tau}} + \sigma\sqrt{\tau} \quad (13)$$

$$B = \frac{\xi}{\sigma\sqrt{\tau}} \quad (14)$$

である。式(12)を式(8)に代入し、式(9)、(10)により変数を戻せば、コールオプションの場合のブラック・ショールズ方程式の解が

$$f(S, t) = S N\left(\frac{\log \frac{S}{X} + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)(T - t)}{\sigma\sqrt{T - t}}\right) - X e^{-r(T - t)} N\left(\frac{\log \frac{S}{X} + \left(r - \frac{\sigma^2}{2}\right)(T - t)}{\sigma\sqrt{T - t}}\right) \quad (15)$$

と得られる。 $N(d)$ は標準正規分布の分布関数

$$N(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^d e^{-z^2/2} dz \quad (16)$$

を表し、ここで $d \in \mathbb{R}$ である。式 (15) が S ならびに t におけるコールオプションの価値 (= 価格) である。例として、 $X = 1000$ 円、 $\sigma = 0.1$ 、 $r = 0.05$ / 年 (= 5 % / 年)、 $T - t = 0.164$ (= 60 日 / 365 日 : 満期までの日数が 60 日のとき) とした場合、 S に対する $f(S, t)$ は図 2 のようになる。ただし、この例の無リスク金利 r の値は高めに設定していることを断っておく。デリバティブ取引では無リスク金利として LIBOR (London InterBank Offered Rate) を参照することが多いが、たとえば日本円・12 ヶ月の LIBOR は 1% 未満で推移しているなど、近年のレートは非常に低い。

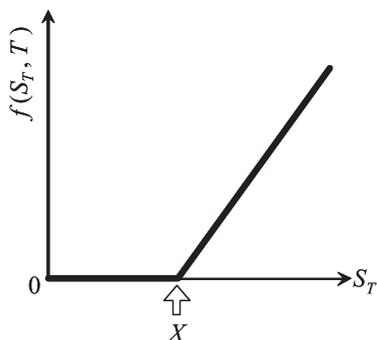


図 1 時点 T におけるコールオプションの価値

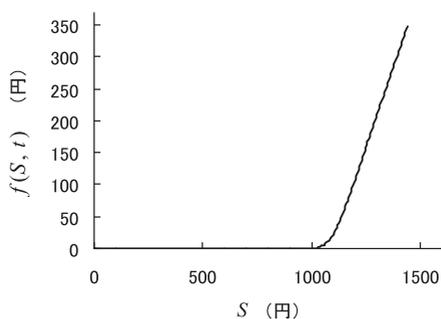


図 2 ブラック・ショールズ方程式の解の例

($X = 1000$ 円、 $\sigma = 0.1$ 、 $r = 0.05$ / 年 (= 5 % / 年)、 $T - t = 0.164$ (= 60 日 / 365 日) とした場合)

2.3 リスク中立評価とブラック・ショールズ方程式の解との関係

リスク中立評価法（例えば文献14）と呼ばれるデリバティブの価値評価の手法があり、前節のブラック・ショールズ方程式の解と密接な関係がある。リスク中立評価法では、満期である未来の時点 T におけるオプションの価値 $f(S_T, T)$ の期待値から、現時点から満期までの間（ $= T - t$ ）に発生し得る無リスク金利分を割り引き、これを現時点 t におけるオプションの価値 $f(S, t)$ とバランスするものとみなす。すなわち

$$f(S, t) = e^{-r(T-t)} E[f(S_T, T)] \quad (17)$$

と表される。ここで、 $E[\]$ は $[\]$ 内の量の期待値を表す。これまでと同様に式(7)のコールオプションを対象とすると、式(17)は

$$f(S, t) = e^{-r(T-t)} E[\max(S_T - X, 0)] \quad (18)$$

と書きかえられる。もし、 $\max(S_T - X, 0)$ の確率密度関数があらかじめ判っていれば、 $E[\max(S_T - X, 0)]$ を計算できるので、コールオプションの価値 $f(S, t)$ が求まる。式(18)のままでも様々な応用が可能であるが、もう少し展開する。式(18)の期待値は

$$\begin{aligned} E[\max(S_T - X, 0)] &= E[\max(e^{\log S_T} - X, 0)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \max(e^{\log S_T} - X, 0) P(\log S_T) d(\log S_T) \end{aligned} \quad (19)$$

であり、 $P(\log S_T)$ は $\log S_T$ の確率密度関数である。ここで重要となるのが、先に触れた伊藤のレンマより、 $\log S_T$ は平均が $\log S + (r - \sigma^2/2)(T - t)$ 、標準偏差が $\sigma\sqrt{T-t}$ の正規分布に従うことが導かれる点にある。すなわち

$$P(\log S_T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{T-t}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log S_T - (\log S + (r - \sigma^2/2)(T-t))}{\sigma\sqrt{T-t}}\right)^2} \quad (20)$$

である。これを式(19)の $P(\log S_T)$ に適用して積分を実行すると、結果として

$$E[\max(S_T - X, 0)] = S e^{r(T-t)} N\left(\frac{\log \frac{S}{X} + (r + \frac{\sigma^2}{2})(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}}\right) - X N\left(\frac{\log \frac{S}{X} + (r - \frac{\sigma^2}{2})(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}}\right) \quad (21)$$

が得られる。ここで、式(16)の標準正規分布の分布関数を用いている。式(21)を

式 (18) へ代入すると、式 (15) と同一の式ができあがる。つまり、リスク中立評価による式 (18) の $f(S, t)$ は、伊藤のレシマを介してブラック・ショールズ方程式の解と一致する。

3 デリバティブから天候デリバティブへ

ここまで、株価などの金融商品の価格 S を原資産として、そのデリバティブの価格 f を評価するポイントを見てきた。これを天候デリバティブに置き換えると、 S は気温や風速、降水量や積雪量などの気象に関連する何らかの要素となる。以下では、2000年3月18日から同年9月17日にわたって淡路島において開催された淡路花博の天候デリバティブを例に、前章で取り上げてきたコールオプションのプライシングと対比する。なお、淡路花博の正式名称は国際園芸・造園博ジャパンフローラ 2000 であり、主催団体は財団法人夢の架け橋記念事業協会である¹⁵⁾。

3.1 淡路花博での天候デリバティブの概要

上記の淡路花博主催団体は安田火災海上保険株式会社（現、損害保険ジャパン日本興亜株式会社）と強風発生の日数をインデックスとする天候デリバティブを契約した（例えば文献 16)、17)。淡路花博がこの天候デリバティブを導入した理由の一つは、屋外に展示されている花卉類が強風によってダメージを受けた場合の植え替え費用の補填のためである。いうまでもなく、花博は植物を主役とするイベントであるから、淡路花博においても花卉類の日常的なメンテナンスと計画的な植え替えが実施されており、そのための予算ならびに植生供給体制が整えられていた。しかしながら、会場は淡路島臨海部の斜面であったことから海からの強い風をダイレクトに受けることが危惧され、かつ開催期間に台風襲来シーズンが含まれていたため、強風被害による計画外の植え替え費用の支出に備える必要があった。もう一つの理由は強風による来場者数の鈍化への懸念である。悪天候の場合、人は特に屋外レジャーへの外出には消極的になってしまう。また、会場への主なアクセスは本州からは明石海峡大橋を、四国からは大鳴門橋を經由する陸路、そして高速船舶等による海路であった。強風でこれらの橋梁が通行止めとなってしまうたり、船舶が運休となった場合は来場者数が激減することが予想された。これらの来場者数減少にともなう入場料等の収益減少を吸収することも

天候デリバティブの導入の狙いであった。

淡路花博に導入された天候デリバティブの内容を表1に示す。強風の度合い(CWD : Critical Wind speed Day)を日最大風速から15m/sを差し引いたものとし、 $CWD > 0$ となった日のカウント数をインデックスとしている。ここで対象とする日最大風速は気象庁・洲本特別地域気象観測所で観測されたものである。なお、10分間の風速データの平均値が平均風速であり、その日の平均風速の中で最大の値が日最大風速である。一方、淡路花博の会場は淡路島北部の東側沿岸部にあり、洲本特別地域気象観測所も淡路島の東側ではあるが会場から南南西へ約30kmの位置にある。会場での気象に着目するのであれば、利用する気象データは会場で観測されたものであることが自然である。しかし、天候デリバティブで利用される気象データについては、信頼性と公平性の観点から、公的な観測施設で得られたものとするのが通例となっている。また、30kmほどの距離は気象学的には小さなスケールに属することから、会場と洲本では短時間で発生・消滅する小規模気象の現れ方に違いはあるものの、ほぼ同一の気象となっている。したがって、洲本での日最大風速はこの天候デリバティブの気象情報のソースとして問題はない。

日付 t までにおける $CWD > 0$ の合計日数が S 、対象期間の最終日 T までにおける $CWD > 0$ の合計日数が S_T に相当する。 S_T が免責1日を超えると、この天候デリバティブの売り手である安田火災海上保険から買い手である淡路花博主催団体へ支払(ペイアウト)が発生する。この免責日数が X に相当し、ストライク値という。 $CWD > 0$ の合計日数とストライク値との差に単位支払額(1億円/日)を乗じた金額がペイアウトとなる。その概要は図3に示すようになっており、図1と似ているが、ペイアウトに上限(4億円)が設定されている点が異なる。実際は、淡路花博の開催期間を通じて日最大風速が15m/sを超えることはなかったため、ペイアウトはゼロであった。以降では、この天候デリバティブをCWDコールオプションとよぶことにする。

まず、図2に示した金融商品のコールオプションの例では、 $S = 0$ 円の場合は $f(S, t) = 0$ 円であった。これはブラック・ショールズ方程式の解である式(15)の右辺第1項と第2項の双方において、式(16)より $N(-\infty) = 0$ であることによる。すなわち金融商品の価格 S がゼロであれば、 S は将来にわたってゼロのまま増えても減りもしない。これはその金融商品が存在しないことと同義であり、 S が株価であれば、その株式会社は倒産していることになる。 S がゼロのままというこ

とはデリバティブを設計することに意味がなく、 f はゼロとなるのである。これに対して、淡路花博のCWDコールオプションの場合、 t を対象期間の初日とすると $S = 0$ 日となりえるので、同様に式(15)で価格を算定すると X に関わらず $f(S, t) = 0$ で無価値となってしまふ。ところが天候は株価とは異なり、たとえ $S = 0$ 日であっても、その後の天候によっては S が X を超えてペイアウトが発生することもあり、CWDコールオプションには価値があるので $f(S, t) = 0$ とは矛盾する。天候デリバティブで用いるインデックスの挙動が伊藤のレンマのベースにある幾何ブラウン運動と合致しないことに起因して、以上のように、ブラック・ショールズ方程式などのモデルでは天候デリバティブの価格評価が困難なケースがある。実際、天候デリバティブの価格評価には S が陽に現れない式(18)を数値的に用いることが多く、本論においても以下ではこれを用いる。ただし、本論のCWDコールオプションではインデックスが日数なので、上述の変数の対応づけのみでは式(18)の単位は金額にはならない。すなわち、式(18)の $\max(S_T - X, 0)$ に表1の単位支払額 C (1億円/日)を乗じて日数を金額へ換算する。さらに表1および図3に示したように、ペイアウトには上限 P_L が設定されていることを考慮すると、式(18)は

$$f(S, t) = e^{-r(T-t)} E[\min(C \max(S_T - X, 0), P_L)] \quad (22)$$

のように修正される。ここで、 $\min(a, b)$ は a と b の小さい方をとることを意味する。以下では、式(22)をベースに淡路花博のCWDコールオプションの価格について分析する。

表1 淡路花博の天候デリバティブの内容

天候デリバティブのタイプ	CWDコールオプション
売り手	安田火災海上保険株式会社 (現、損害保険ジャパン日本興亜株式会社)
買い手	財団法人夢の架け橋記念事業協会 (淡路花博主催団体)
観測地点	洲本特別地域気象観測所
インデックス	対象期間中に観測地点での日最大風速が 15m/sを超えた日数
対象期間	2000年6月1日～9月17日
ストライク値(免責日数)	1日
単位支払額	1億円/日
支払額(ペイアウト)の上限	4億円

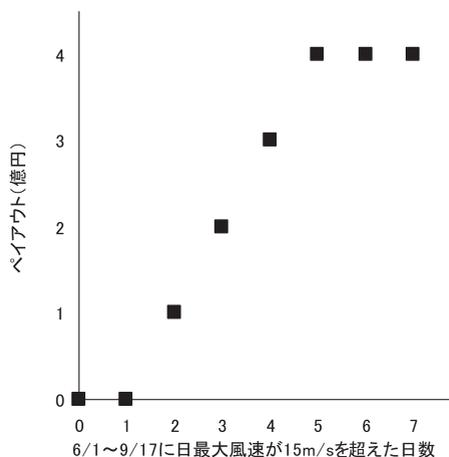


図3 淡路花博CWD コールオプションのペイアウト

3.2 淡路花博での天候デリバティブのインデックスについて

式(22)中の期待値は、確率密度関数が高精度で得られていればそれを用いて算出するか、あるいは過去の気象データに基づいたシミュレート結果の平均値を当てはめる(burning cost法)ことが多いが、本論では後者に従う。式(22)による淡路花博CWD コールオプションの価格評価を行う前に、まず、日最大風速が15m/sを超える日数(= S_T)を淡路花博の開催年より過去のデータについて調べておく。洲本特別地域気象観測所¹⁸⁾での過去の日最大風速に基づいて S_T を求めた結果を図4に示す。いずれの年においても6月1日から9月17日を対象としている。図4の横軸には2000年以降のデータも記載されているが、淡路花博は2000年に開催されたので、検討対象となるのは1999年以前である。 S_T が相対的に大きい年は1950年代から1960年代にかけて集中し、それ以外の年の S_T は高々1日か2日程度であり、不均一な分布となっている。1950年代から1960年代に強風の発生頻度が高いのは、台風の発生が活発であったためである。

淡路花博のCWD コールオプションの設計過程は公表されていないが、文献19)において過去の S_T は平均で0.7日ほどであったとの記載がある。しかしながら、図4に見られた不均一性により、 S_T の平均値は平均化対象期間によって異なるはずである。そこで、1999年から遡って10年きざみで平均化対象期間を変

えた場合の S_T の平均値を調べた。その結果が図 5 である。平均化の対象期間が 1950 年代ならびに 1960 年代を含むと S_T の平均値は急激に大きくなり、さらに過去の年にまで平均化対象期間が及ぶと減少してゆく。平均化対象期間が 1970 年から 1999 年の場合、 S_T の平均値は 0.67 日となっており、これが上述の 0.7 日とほぼ一致する。したがって、淡路花博の CWD コールオプションの設計には 1970 年から 1999 年の日最大風速が参照されたと思われる。

この推察について風速データの質の面から触れておく。我が国では風速の観測・評価方法が統一されていなかった時代があり、その頃の観測データの信頼性とそれを現行に合わせるための補正方法について議論がある。たとえば、牧野²⁰⁾は 1940 年に風速の評価時間が、および 1971 年に日最大風速の算出方法が現行と同様に定められたことを述べている。さらに定量的な分析の結果を加味した上で、データの均質性を重視する場合、1971 年以降のデータを利用するべきであると指摘している。これが淡路花博の天候デリバティブの設計に考慮されたか否かは不明だが、図 5 において 1970 年以降の風速データが用いられたと推察されたことに整合する。

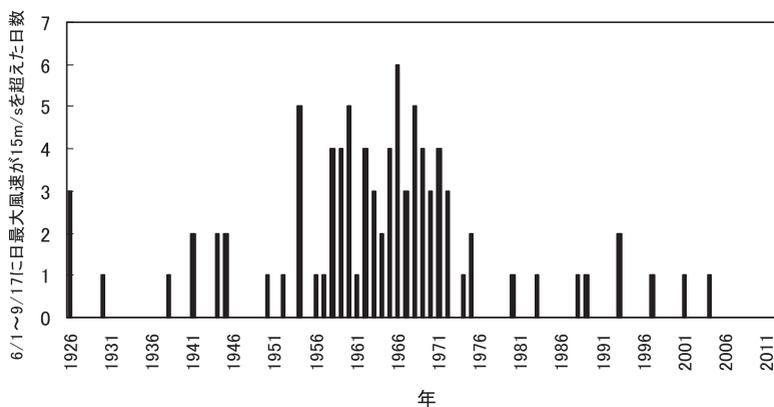


図 4 過去の年を対象に CWD 合計日数 S_T を調べた結果

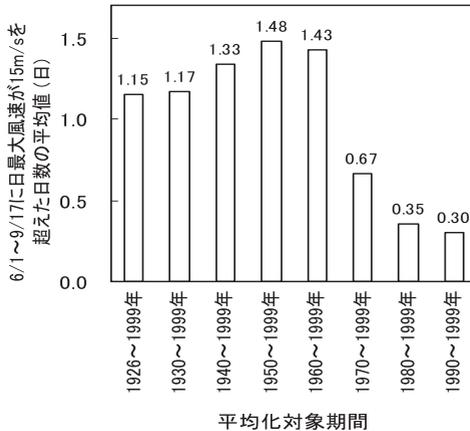


図5 平均化対象期間が S_T の平均へ及ぼす影響

3.3 淡路花博での天候デリバティブの価格評価

淡路花博のCWDコールオプションのペイアウト(式(22)中の $\min(C \max(S_T - X, 0), P_L)$)をシミュレートしたものが図6である。図4にみられた S_T の不均一性により、1950年代から1960年代の日最大風速に対しては高額なペイアウトの発生が集中することを示しているが、ペイアウト上限 P_L により4億円以下に抑えられている。さらに、これらのペイアウトの平均値を求め、式(22)中の $E[\min(C \max(S_T - X, 0), P_L)]$ とする。 S_T の平均値の場合と同様に、ペイアウトの平均値が平均化対象期間によってどのように変化するかを調べた結果が図7である。上限が4億円であるにせよ、平均化対象期間に1950年代~1960年代が含まれると平均値が増大することは、 S_T の平均値の場合(図5)と同様である。また、前節の S_T の平均値の分析からは、このCWDコールオプションが1970年から1999年の風速データを参考に設計されたと推定された。図7において、平均化対象期間が同じく1970年から1999年の場合のペイアウトの平均値をみると、その金額は3千万円(=0.3億円)となっている。著者が淡路花博の主催団体関係者に確認したところ、このCWDコールオプションは2千万円で契約されたとのことであった。上記の3千万円がこれに近いことから、やはり淡路花博のCWDコールオプションは1970年から1999年の日最大風速を参考に設計されたと推定される。

以上で得られた平均化対象期間が1970年から1999年の場合の $E[\min(C \max(S_T - X, 0), P_L)] = 0.3$ 億円を式(22)に代入すれば、CWDコールオプションの価値

(= 価格) が算出される。式 (22) の $T - t$ を対象期間 (表 1) より約 0.3 年 (=109 日 /365 日) とし、あとは無リスク金利の利率 r をどのように設定するかである。利率 r が大きければ割引が増えることになり、式 (22) より CWD コールオプションの価値 (= 価格) は指数関数的に下がってゆく。しかしながら、本論の場合、仮に r を近年ではありえないほど高い 0.1 / 年 (10% / 年) としても、式 (22) より求まる価値は約 2 千 9 百万円である。これは上述した実際の契約額である 2 千万円よりも依然として高額である。さらに、以上のように期待値に基づいて見積もられた価格にリスクバッファを上乗せすることが多く、契約額はより高額になるはずである。したがって、本研究で行った価格評価の結果をみる限り、淡路花博における CWD コールオプションの契約額 2 千万円は格安であったと評価される。

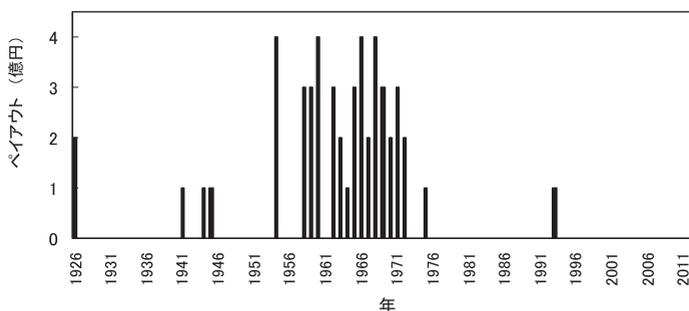


図 6 過去の年を対象に実施したペイアウトシミュレーションの結果

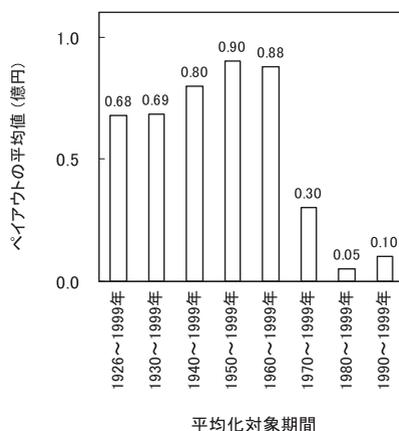


図 7 平均化対象期間がペイアウトの平均へ及ぼす影響

4 おわりに

イレギュラーな気象リスクが企業等の収益に及ぼす影響を戦略的にコントロールするのは困難と言われてきたが、それをある程度可能にするのが天候デリバティブである。また、天候デリバティブによる気象リスク移転はROE（自己資本利益率）などの向上に寄与するので、その企業の価値を高めるという利点もある。今後、我が国の天候デリバティブの市場がさらに拡大することを期待したい。しかしながら、第3章の検討例でもそうであったが、天候デリバティブの実際の契約価格と第三者によってプライシングされた価格とが乖離するケースがしばしば見られる。この理由は明らかではないが、関連する要因をいくつか想像することはできる。第1章では我が国においては天候デリバティブの設計が個別的であることに触れたが、そのクローズ性ゆえに価格の積算根拠がブラックボックスになりやすい。また、そもそも買い手である企業等が自社の収益に及ぼす気象リスクの実態を把握しきれておらず、天候デリバティブの価格を判断できていない場合がある。実際、企業等の業績には様々な要因が関与しているので、どこまでが気象リスクによる損失であるかを区別するのは容易ではない。逆に、この線引きができれば、気象に対するEaR（Earning at Risk;たとえば文献6）が推定でき、天候デリバティブでカバーすべき費用も明確になってくる。いずれにせよ、不確定要素が多いほど実際の契約価格と第三者による評価とは漸近しない。その点、米国においては、取り引きされている天候デリバティブの大半が電力業界によるもの（第1章）で、かつ気温をインデックスとするものであるために標準化されている部分もあり、わかりやすい。今後、我が国においても、電力事業の自由化の拡大とともに天候デリバティブ市場が活性化され、ひいては標準化が進むかもしれない。ただし、天候はCO₂排出権や電力などとならんで無体物（金融にも商品にも分類されないもの）であり、我が国では天候デリバティブを取引所に上場することは未だできない。これを可能にするためには法改正が必要であるが、自由をアイデンティティの源とする米国でさえ、かつては無体物の上場には躊躇したという。

参考文献

- 1) Davis, M. : Pricing weather derivatives by marginal value, *Quantitative Finance*, Vol. 1, pp. 305-308, 2001.

- 2) 日本経済新聞 2001 年 8 月 14 日, p. 4, 2001.
- 3) Platen, E., West, J.: A fair pricing approach to weather derivatives, *Asia-Pacific Financial Markets*, Vol. 11, No. 1, pp. 23-53, 2005.
- 4) 広瀬尚志, 天崎裕介, 岡本 均, 椎原浩輔, 新村直弘: 天候デリバティブのすべて—金融工学の応用と実践—, 東京電機大学出版局, 2003.
- 5) 石川勝敏: 顧客志向の新市場を創造する気象コラボレーション技法導入・実践マニュアル〜ビジネスチャンス開発・リスク回避のための気象情報テクノロジー, Vagabond, 2002.
- 6) 刈屋武昭, 山本 毅, Tee Kian Heng, 郷古浩道: 天候リスクの戦略的経営—EaR とリスクスワップ—, 朝倉書店, 2005.
- 7) 川口正明: 風災害に対する損害保険の新しい取り組み, 日本風工学会誌, 第 96 号, pp. 31-36, 2003.
- 8) 宮崎浩一: 天候デリバティブとは—スキームと評価手法—, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 49, pp. 288-295, 2005.
- 9) 山田雄二, 飯田愛実, 椿 広計: トレンド予測に基づく天候デリバティブの価格付けと事業リスクヘッジ, 統計数理, 第 54 巻, 第 1 号, pp. 57-78, 2006.
- 10) 環境省: 金融業における環境配慮行動に関する報告書, 2002.
- 11) 環境省: 第 2 回気候変動適応の方向性に関する検討会資料, 2010.
- 12) Black, F., Scholes, M.: The pricing of options and corporate liabilities, *Journal of Political Economy*, Vol. 81, pp. 637-654, 1973.
- 13) Merton, R. C.: Theory of rational option pricing, *Bell Journal of Economics and Management Science*, Vol. 4, No. 1, pp. 141-183, 1973.
- 14) ジョン・ハル (三菱 UFJ 証券市場商品本部訳): フィナンシャルエンジニアリング第 7 版, 金融財政事情研究会, 2013.
- 15) 財団法人夢の架け橋記念事業協会: “淡路花博” 国際園芸・造園博「ジャパンフローラ 2000」公式記録, 国際園芸・造園博ジャパンフローラ 2000 日本委員会, 2001.
- 16) 日経金融新聞 2000 年 6 月 6 日, p. 3, 2000.
- 17) 日本経済新聞地方経済面兵庫 2000 年 6 月 6 日, p. 46, 2000.
- 18) 気象庁ホームページ: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 19) ひょうご Virtual 健康科学センターホームページ: <http://www.hyogohsc.or.jp/library/journal/vol11.html>

- 20) 牧野 稔：日最大風速値の観測法の不統一が強風の極値分布に及ぼす影響について，日本風工学会誌，第 96 号，pp. 41-44, 2003.