

天候デリバティブの動向

高橋 俊

日立製作所金融工学コンサルティングセンタ
sh-takahashi@itg.hitachi.co.jp

土方 薫

日立製作所財務2部
k-hijikata@zaimu2.hdq.hitachi.co.jp

恵木 正史

日立製作所中央研究所
emasashi@crl.hitachi.co.jp

家島 健司

日立製作所金融工学コンサルティングセンタ
tieshima@itg.hitachi.co.jp

今年の天候と昨年の記憶だけで天候を語ることはあっても、定量的に天候リスクを把握することは、これまで多くはなかった。しかし、天候といえども過去の統計があり、統計があればリスクを定量的に評価することは可能である。そして定量的な評価は、天候を対象とする金融商品の価格を数理的に算出＝公正な価格を求めることを可能とする。ともすれば、放置されてしまう天候への対応を、定量化するとはどういうことかを解説する。

天候リスク

天候リスクとは

「冷夏だと物が売れない」は天候リスクとはいわない。

- 天候が予測できない
- 天候によって収益が大きく変化する

から天候リスクと呼ばれる。もし半年前から冷夏になることが分かっていたら、冷夏による売れ行き不振も年度予算に含められるので、リスクではなく予期された損害(すなわちコスト)になる。つまり、「物が売れなくなる冷夏かもしれない」が天候リスクである。

まず、「天候は予測できない」を考えてみよう。気象庁の長期予報は地球の気象海洋の数値計算結果に基づいている(数値予報)。この計算の初期値は全世界の観測データから作成されるが、3カ月予報ともなれば、初期値のわずかな違いが結果を大きく変えてしまう。これはスーパーコンピュータの演算能力の不足や予報モデルの不完全さによるものではなく、そもそも大気圏がカオスであることによるものである。したがって、気象庁では、観測データから作成した初期値にゆらぎを与えた複数の

数値計算を実行し、結果のゆらぎから確率的な長期予報(平年より高い・平年並み・平年より低い確率)を発表するにとどめている。

では次に天候と事業についてみてみよう。

天候と事業の関係

冷夏だと売れないとされている商品の代表例としてエアコンがある。図-1に1991～2000年の5、6、7月の

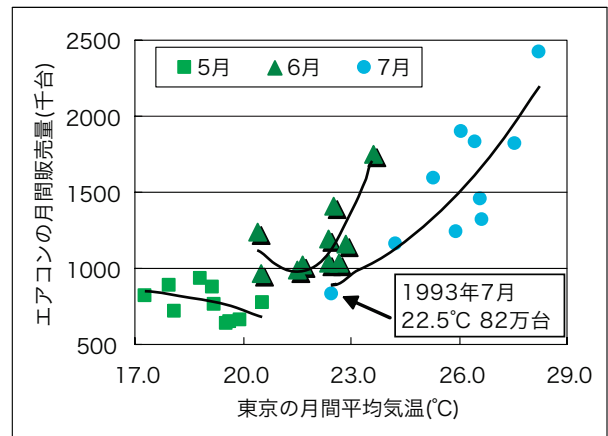


図-1 東京の平均気温(°C)とエアコン出荷台数(千台) ☆1

☆1 日本冷房空調工業会ホームページによる。

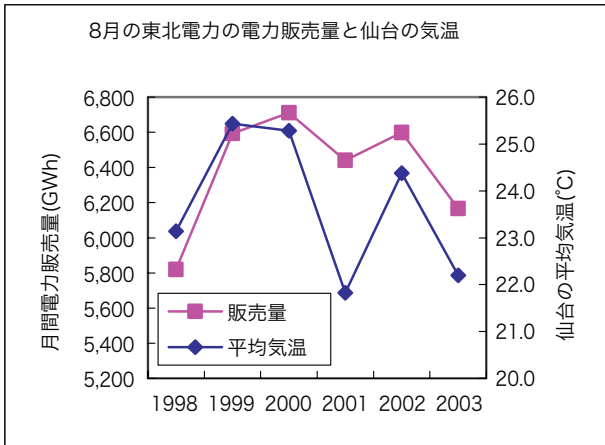


図-2 東北電力管内の電量消費^{☆2}と仙台の気温

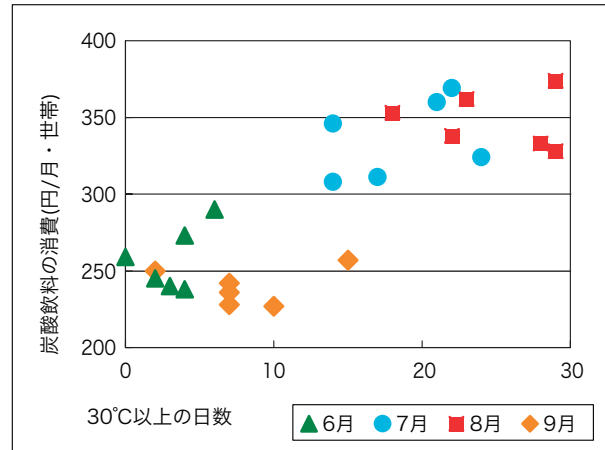


図-3 炭酸飲料消費^{☆3}と最高気温30°C以上の日数

月平均気温（東京）と日本国内のエアコン販売台数の関係を示す。5月は気温と販売台数には相関は見られない。これに対して、6、7月は相関が見られる。

特に1993年7月は東京の月平均気温は22.5°C（過去42年間で2位の低さ・1位は22.4°C）で、エアコンは平均的な夏に比べて70万台（推定売上700億円）も少ない82万台しか販売されなかった。

夏の電力需要も気温の影響を大きく受ける。図-2に1998～2003年の東北電力の8月の月間電力販売量と仙台の月間平均気温を示す。電力販売量は気温の影響を受けていることが明瞭に分かる。

エアコンと電力は気温によって販売量を左右されており、冷夏においては企業努力で売上を回復できるとは考えにくい。

これに対して、次に示す炭酸飲料は気温との関係がはっきりしない。図-3に東京の最高気温が30°Cを上回った日数と炭酸飲料の消費量を示す。6月から9月までを通して見れば、炭酸飲料の販売量は気温に対して正の相関があるが、月単位で見れば、ほとんど気温との関係はないように見える。東京の最高気温の月平均値や、月平均気温などに対しても同様である。イメージとして天候リスクにさらされているはずの炭酸飲料だが、月別にみると気温と消費に相関はみられない。これは清涼飲料の市場拡大と清涼飲料に占める炭酸飲料のシェアの変化などが大きく、気温の影響があったとしても、かき消されているからだと考えられる。

月	平均販売 (千台)	標準偏差 (千台)	気温との相関係数
5	77	11	0.45
6	118	24	0.56
7	155	46	0.82

表-1 5、6、7月の気温との相関

	平均	1993年
平均気温 (7月)	26.0°C	22.5°C
利益 (7月)	15億5,000万円	8億2,000万円

表-2 モデル企業の天候リスク

天候リスクに立ち向かうには

ここでは例として図-1のちょうど1/10規模の空調機製造会社を考えよう。そうすると表-1のようになる。この表から見て

- 5月と6月は気温と相関は小さく、過去10年の販売台数のゆらぎ（標準偏差）も小さい
- 7月は気温との相関は大きめ

であるので、7月のみ天候リスクが無視できないと考えられる。さらに記録的冷夏であった1993年には

$$82 \text{ 千台} = \text{平均 (155 千台)} - 1.6 \times \text{標準偏差 (46 千台)}$$

という販売量であり、販売量が正規分布であれば確率5%（正確には1.6σ以上の確率は5.48%）に相当する稀なケースであったことが分かる。このとき平均小売価格10万円・利益率10%を仮定すると、平均的な年に比べて、利益は7億3,000万円も少ないと考えられる（表-2）。

この利益の減少を補償するには図-4のような支払いが受けられればよい。

☆2 東北電力ホームページ掲載のニュースリリースによる。
 ☆3 総務省「国民経済計算年報」、総務省「家計調査報告」など。

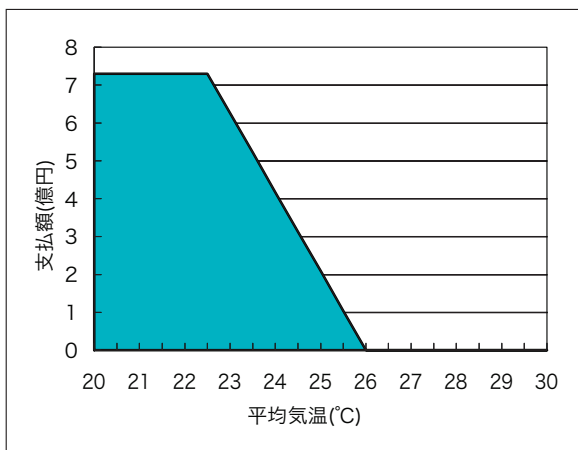


図-4 モデル企業の利益減少を補償する支払い

地点	東京		
期間	2004/7/1 ~ 2004/7/31		
種別	日平均気温	ストライク	26℃
	期間平均	PUT	
支払い	2,090 万円/0.1℃	最大支払	7 億 3,000 万円

表-3 天候デリバティブ商品

これを天候デリバティブ商品として書き下すと表-3 のようになる。

これは、気象庁の観測地点“東京”において、2004/7/1 ~ 7/31 の期間の日平均気温の平均が26℃を下回った (PUT) 場合、0.1℃ごとに2,090 万円を保険会社が顧客に支払い、最大支払いは7 億 3,000 万円という契約を意味する。

天候デリバティブのプライシング

天候デリバティブのプライスとは

さて、この天候デリバティブを保険会社はいくらで売り出せばよいだろうか。そしてモデル企業はいくらで買えばよいだろうか。デリバティブのプライスは一般的に

支払額の期待値 + 支払額の標準偏差 × 安全率

で求める。天候デリバティブもまったく同じである^{☆4}。

安全率はおおよそ0.3 ~ 0.4 程度とするのが、天候デリバティブの相場のようなのである。

安全率以外の要素である期待値と標準偏差は次の手順で求める。

- (1) 過去の観測値の入手
- (2) 観測値のトレンド除去
- (3) 気温時系列の生成
- (4) 生成した気温時系列に対する支払額の算出

(5) その支払額の分布の平均と標準偏差の算出

過去の観測値の入手

気象庁の長期予報は日単位の気温や降水量を予報できるわけではない。また、予報が的中するわけでもない。したがって、基本となるのは過去の気象庁による観測値となる。気象庁以外の観測値の場合、その数値の正しさ (プライスや支払額を有利にしようとして作為的な改変がなされていないこと) を証明する必要があるからである。

この観測値は気象庁の外郭団体である気象業務支援センター^{☆5} から年間10 万円で購入できる。ただし、配信される気象庁の観測データは以下のような問題があり、必ずしもそのまま使えるわけではない。

- 気象庁は不定期にデータの誤りを訂正する
- 観測点の継続性
 - ◇ 観測点そのまま観測点番号変更
 - ◇ 観測点そのまま観測点名変更
 - ◇ 廃止観測点と同じ名の別の観測点新設
- 観測値が欠けることがある
 - ◇ 自動観測 (AMeDAS^{☆6}) では機器障害による欠測がある
 - ◇ 気象台や観測所であっても、強い台風などで観測できない場合がある

そこで、

- データの再取得 (気象業務支援センターから取得済みのデータを定期的に再取得する)
- 観測点の改廃に合わせて、改廃前後のデータをつなぎ合わせて、1つの観測点データにする
- 観測値の相関性の高い近接の観測点の観測値から線形回帰で欠測値を補完する^{☆7}

必要がある。

☆4 土方薫、「総論天候デリバティブ」、シグマベイスキャピタル、p.101 (2003)。

☆5 <http://www.jmbc.or.jp/>

☆6 Automated Meteorological Data Acquisition System.

☆7 土方薫、「総論天候デリバティブ」、シグマベイスキャピタル、p.116 (2003)。

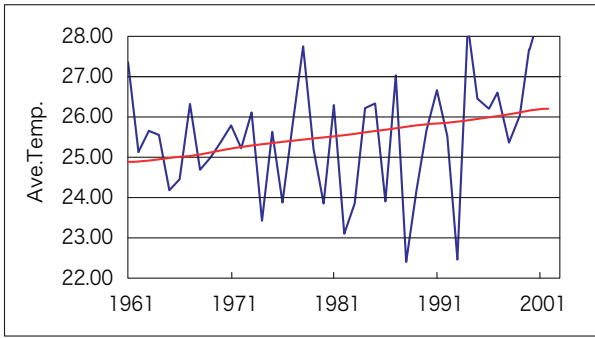


図-5 1961～2002年の東京7月の気温変化とトレンド

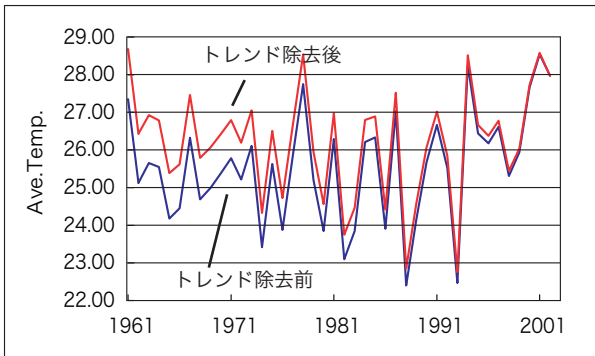


図-6 トレンド除去前と除去後

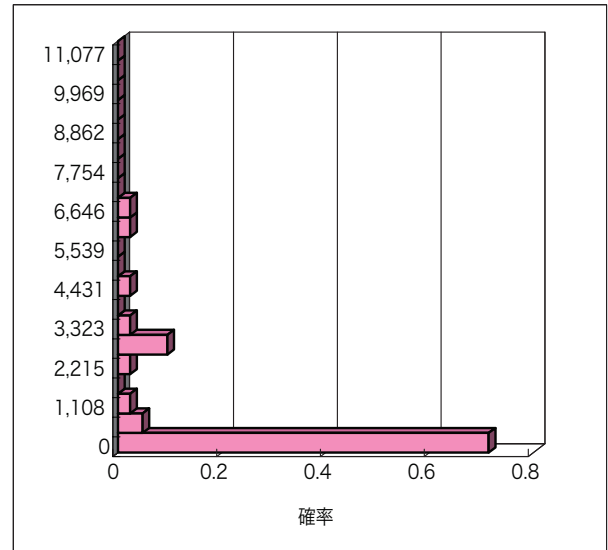


図-7 Burning-Analysisの支払額分布

観測値のトレンド除去

気温は地球温暖化や都市のヒートアイランド現象などにより年々高くなる傾向がある(図-5)。したがって、過去の観測値をそのまま使うと気温を低めに評価することになる。

そこで、このトレンドを除去して図-6のようにする。

ここでは、42年間のトレンドを用いたが、気温の経年変化の傾向が変わった場合などは過去30年あるいは過去20年分のデータだけを用い、トレンドも30年あるいは20年の値を用いる場合もあり得る。

Burning Analysis法 (実績プライシング)

トレンド除去した過去の観測値を用いて支払額を計算するのが、このBurning Analysis法である。観測値が42年分あるので、42通りの支払額が求まる(図-7)。これら42個の数値から平均と標準偏差を求めると、

$$\begin{aligned} \text{プライス} &= \text{期待値} + 0.4 \times \text{標準偏差} \\ 1.88 \text{ 億円} &= 1.26 \text{ 億円} + 0.4 \times 1.57 \text{ 億円} \end{aligned}$$

のようになる。

Dischel D-1^{☆8} モデル (確率モデルプライシング)

Burning-Analysis法以外に回帰式によって気温時系列を生成するDischelモデル(式1)がある。

$$T_n = \beta T_{n-1} + (1-\beta)\Theta_n + T(\mu, \sigma) \quad \text{式1}$$

T_n は第 n 日の気温、 Θ_n は第 n 日の気温の平均値(過去42年)、 $1-\beta$ は回帰係数、 $N(\mu, \sigma)$ は正規分布である。この未定係数 β と μ は

$$\Psi = \sum_n \{(T_n - \Theta_n) - \beta(T_{n-1} - \Theta_{n-1}) - \mu\}^2 \quad \text{式2}$$

に対する最小二乗法で求め、 σ はその残差から求める。先の例ではプライスは5万回モンテカルロ計算(図-8)で

$$\begin{aligned} \text{プライス} &= \text{期待値} + 0.4 \times \text{標準偏差} \\ 1.64 \text{ 億円} &= 0.93 \text{ 億円} + 0.40 \times 1.77 \text{ 億円} \end{aligned}$$

のようになる。

降水量については、晴雨のマルコフ過程と雨の場合の降水量を Γ 分布で近似するかたちで、確率モデルを構築する^{☆9}。

☆8 Dischel Bob: The D1 Stochastic Temperature Model for Valuing Weather Futures and Options, Applied Derivative. Trade (Apr. 1999).

☆9 Wilks, D.S.: Adapting Stochastic Weather Generation Algorithms for Climate Change Studies, Climatic Change 22, p.67 (1992).

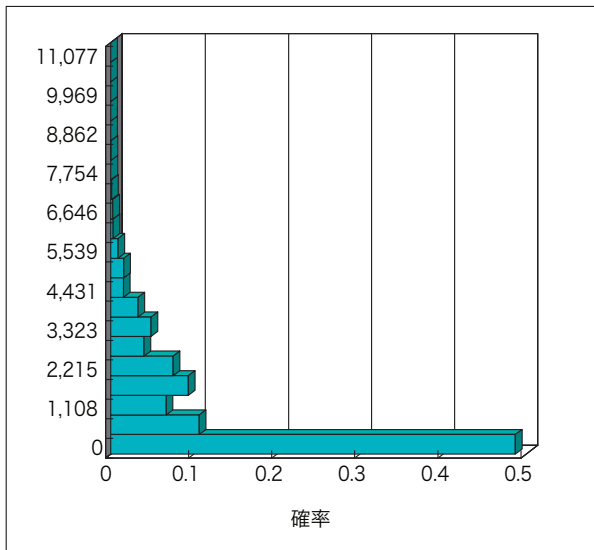


図-8 Dischel D-1モデルの支払額分布

	発表日	低い	平年並み	高い
7月	2003/4/24	30%	50%	20%
	2003/6/25	20%	50%	30%
8月			20%	40%

表-4 2003年夏についての気象庁長期予報

長期予報を考える

長期予報を反映した天候デリバティブのプライシングも行われるようになってきている^{☆10}。ここでは日本における長期予報を利用したプライシングを概観する。

長期予報が当たるとはということか

冷夏だった2003年の夏を気象庁はどう予報したかを表-4に示す。気象庁は「平年並み」から「平年より高い」を予想していたことが分かる。つまり「ハズレ」というわけである。

しかし、天候デリバティブのプライシングを行う立場に立つと、まったく別の見方ができる。

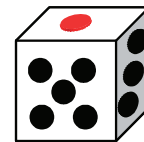
- もし、予報を一切考慮せずにプライシングするなら、事実上、以下に示す実現確率を想定したことになる。

	低い	平年並み	高い
7月	33%	33%	33%

- もし、気象庁の長期予報が的中するなら、2003/6/25に発表した8月の予報と同じ予報を10回出したとき、2回は平年より低く・4回は平年並み・4回は平年より高くなるはずである。
- もし、多数の天候デリバティブを複数年にわたって販売し続けるなら、長期予報が示す確率に従ってプライシングする方が、保険会社の収益は大きくなる

はずである。

これをサイコロ賭博に置き換えると、



- いびつなサイコロを使っている
 - どの目が出るかは予知できない
- という状況において、
- 「1から6の目」の出る確率を予報することが長期予報に相当する。

もし、「1から6の目」の出る確率を正しく予報できるなら、その確率に従って、賭けをし続ければ勝ちやすい。少なくとも、「1から6の目」の出る確率を均等に1/6ずつであると考えるよりは、有利になる。

では、「確率の予報」として見たとき、長期予報がどれくらい当たるかを見てみよう。図-9に気象庁自身が気象庁1カ月予報の的中度を評価した結果を示す。この的中とは、「20%という予報を10回出したら、2回実現した」ことを意味する。その観点から見れば、気象庁の長期予報(1カ月)はかなり信頼できると考えられる。

長期予報をプライシングに取り込むには

長期予報を取り込むために、プライシングに使用する過去気温データを修正するなどいくつかの方法が考えられる。

- ここでは、長期予報を反映する一方法を紹介する^{☆11}。
- (1) 気象庁発表の長期予報は「平年より低い確率??%、

^{☆10} Element Re: Weather Risk Management, palgrave, p.182 (2002).

^{☆11} 恵木正史, 長期予報を反映したプライシング手法, [土方薫「総論天候デリバティブ」, シグマベイクピタル], pp.233-241 (2002).

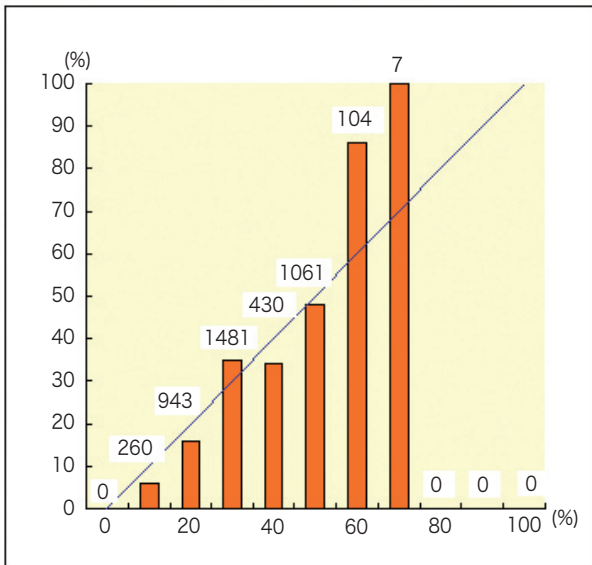


図-9 気象庁1カ月予報の的中度^{☆12}

「平均並みの確率??%, 平均より高い確率??%」というかたちで発表される。これから気温分布が正規分布であると仮定して、以下のように、平均と標準偏差を求める。

図-10に示すように、正規分布の逆関数を使って、平均より低い確率 p_1 と高い確率 p_2 から

$$\begin{aligned} x_1 &= \text{NormInv}(p_1, 0, 0) \\ x_2 &= \text{NormInv}(1-p_2, 0, 1) \end{aligned} \quad \text{式3}$$

のようにして

$$\begin{aligned} E &= \frac{\tau_1 x_2 - \tau_2 x_1}{x_2 - x_1} \\ V^2 &= \left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{x_2 - x_1} \right)^2 \end{aligned} \quad \text{式4}$$

で平均と分散が求まる。ここで、 $\text{NormInv}(x, y, z)$ は平均 y 、分散 z の正規分布に対する確率 x のときの正規分布の逆関数である。 τ_1, τ_2 は平均並みの範囲の上限と下限である。

(2) Dischel D-1モデルの漸化式(式1)を第0日の気温 T_0 から求める式に変更すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} T_n &= \beta^n T_0 + (1-\beta) \sum_{k=1}^n \Theta_k \beta^{n-k} \\ &+ \mu \sum_{k=1}^n \beta^{n-1} + \sigma \sum_{k=1}^n N_k(0,1) \end{aligned} \quad \text{式5}$$

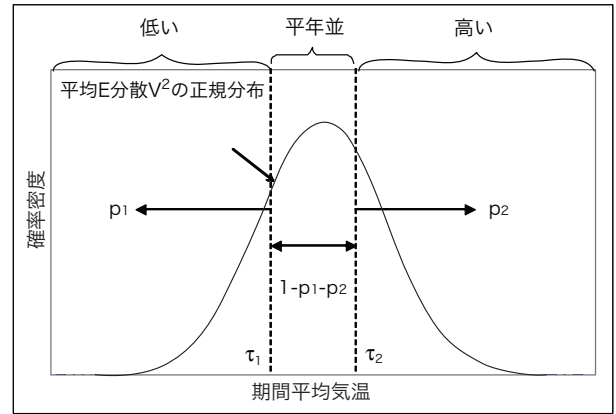


図-10 長期予報を平均と標準偏差に変換する

これを用いて、

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M T_n = \sum_{n=1}^M (1-\beta)^{M+1-n} \Theta_n \\ &+ \frac{\beta}{M} \frac{1-\beta^M}{1-\beta} T_0 \\ &+ \frac{\mu}{1-\beta} \left(1 - \frac{\beta}{M} \frac{1-\beta^M}{1-\beta} \right) \end{aligned} \quad \text{式6}$$

のように、M日間の平均値の平均Eを記述でき、同様に、M日間の分散も

$$V^2 = \frac{\sigma^2}{M^2(1-\beta)} \left(M-2\beta \frac{1-\beta^M}{1-\beta} + \beta^2 \frac{1-\beta^{2M}}{1-\beta^2} \right) \quad \text{式7}$$

のように、記述できる。

(3) これらより Dischel D-1モデルの係数 β, μ, σ を Lagrangeの未定係数法で定める。

天候デリバティブの現状・動向

成長し続ける天候デリバティブ

1999年に三井海上とスポーツ用品大手ヒマラヤによる積雪量についての天候デリバティブ契約により始まった日本における天候デリバティブ取引は図-11に示すように増加し続けている^{☆13}。しかし、想定元本^{☆14}300億円は、1兆円規模である米国に比べればあまりにも少ない。

また、米国では巨大なエネルギー企業が数百億円レベ

☆12 気象庁「1ヶ月予報における確率の評価」より。http://www.kishou.go.jp/known/kisetsu_riyou/about/accuracy.html

☆13 PricewaterhouseCoopers-WRMA Survey of Weather Risk Management Contracts (June 2001).

☆14 契約の最大支払額。

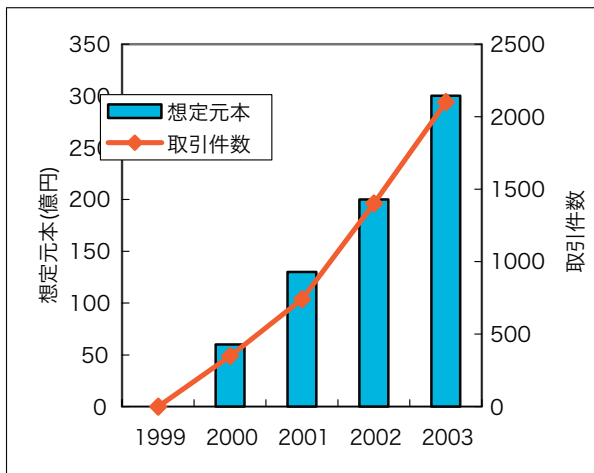


図-11 日本の天候デリバティブの成長

ルの取引を行うのに対して、日本では旅館等の観光業、鰻等の季節性のある飲食業などが50～100万円を払って想定元本数百万～程度のデリバティブを買う取引が多い。

今後は、電力取引の自由化などにより、エネルギー関連企業が天候デリバティブの購入者として姿を表すことで、市場が急拡大することも考えられる。

新しい商品の登場

2000年までの日本の天候デリバティブは気温や降雨日数・積雪量などについての契約が件数と想定元本ともに80%以上を占めていた^{☆15}。昨年は台風通過や風向などについても天候デリバティブが発売されるようになってきた。

- 東京海上は2002年に台風通過回数がストライク値を上回ると支払いが発生する「台風デリバティブ^{☆16}」や、2003年には、逆に台風に備えていたら来なくて準備が無駄になった場合に備えた「台風デリバティブ(プット型)^{☆17}」を発売
- 三井住友海上は、流水観光業者向けの風向デリバティブを2002年に発売^{☆18}

種別	安全率*	プライス	実際の支払額
冷夏ヘッジ ^{☆19}	1.05	50万円	120万円
多雨ヘッジ ^{☆20}	0.73	30万円	72万円
多雨ヘッジ ^{☆21}	-0.07	50万円	43.8万円

*安全率と支払額は、気象庁観測値から独自に算出

表-5 適切でないプライシングの例

地点	千葉	顧客	<定型商品>
期間	03/7/1	～	03/8/31
種別	平均気温	25.43℃	PUT
	期間平均		
支払い	4,000円/0.01℃	最大	100万円
プライス	10万円	支払い	64万8,000円*

*:気象庁観測値から独自に算出。

表-6 支払い期待値38万円の商品を10万円で売った例

適切でないプライシングの多さ

成長続ける天候デリバティブであるが、一方でプライシングについてはかなり不適切なものが見られる。

いくつかの公表例について、Burning-Analysis法によりプライシングしたと仮定して、安全率を推定した結果が表-5である。上の2つが安全率が高すぎて、下の1つは売り手が損する天候デリバティブ契約である。

2003年において最も不可解な例は、表-6のように支払い期待値が38万円でありながら、プライスが10万円という冷夏ヘッジ商品^{☆22}である。実際の支払いは64.8万円と計算され、購入者にとっては大変お買い得な商品となった(もちろんトレンド補正次第によってプライスは変わってくるが、トレンド補正自体がトレーダの恣意的なもので行われていること自体が整理されるべきである)。

このような商品の存在は、儲かる確率が高い天候デリバティブ商品を探すというインセンティブが働き、ひいては天候デリバティブ取引の拡大を誘起する点では有効である。

しかし、高すぎるプライスは買う側を、低すぎるプラ

☆15 PricewaterhouseCoopers-WRMA Survey of Weather Risk Management Contracts (June 2001).

☆16 <http://www.tokiomarine.co.jp/j0201/html/020423.html>

☆17 <http://www.tokiomarine.co.jp/j0201/pdf/030508.pdf>

☆18 <http://www.ms-ins.com/news/h14/1127.html>

☆19 <http://www.miebank.co.jp/topics/news174.pdf>

☆20 <http://www.miebank.co.jp/topics/news175-1.pdf>

☆21 http://www.joyobank.co.jp/n_t/140509.html

☆22 http://www.chibakogyo-bank.co.jp/news/20030530_1.html

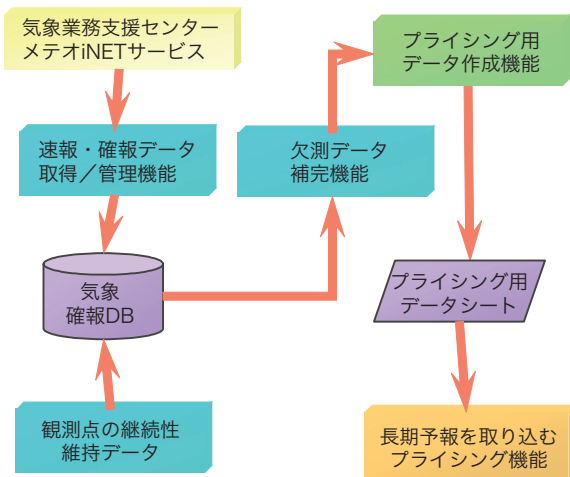


図-12 システム構成



図-13 プライシング画面

イスは売る側を天候デリバティブ取引から遠ざけてしまうので、適正なプライスに収束していくことが望まれる。

適切なプライシングに向けて

適正なプライシングを行うには、天候デリバティブ商品の売り手の一方的な価格を受け入れるのではなく、買い手も独自に価格を計算することが必要となる。これには誰もがプライスを求められるプライシングツールが必要である。

米国ではSpeedwell Weather DerivativesのSWS^{☆23}などが有名である。日本でも東京海上がASP形式のプライシングシステムを取引関係係限定で公開している。また、気象協会^{☆24}も有償でASP形式のプライシングサイトを運営している。

ここでは、適正なプライスを容易に算出することを目的とし、長期予報を取り込んだ確率モデルを実装した日立天候デリバティブプライシングシステム^{☆25}を紹介する。当システムは以下から構成される(図-12)。

- 気象データベース
 - ◇ 気象業務支援センターからの気象データ自動取り込み
 - ◇ 欠測値補完機能を持つ検索ツール
(補完候補地リストから相関が最も高い地点のデータからの単回帰式により補完、三宅島を除けば欠測値を100%補完可能)

• プライシングツール(図-13)からなる。

このシステムは損害保険会社や総合商社で、実際に利

用されている。

また、本稿のモデル企業に対する天候リスク分析やプライシング、公開された天候デリバティブ取引の安全率推定にも、この日立天候デリバティブプライシングシステムを使用している。

おわりに

日本で天候デリバティブ取引が始まって4年、次第に市場規模が拡大するとともに、プライシングの技術も向上してきた。この先、さらに市場規模が拡大し、天候デリバティブの市場取引も広く行われるようになるだろう。そのときには、今日の最低気温や明日の天気予報がとてもエキサイティングなものになるかもしれない。

すでに対象期間に入っている天候デリバティブ商品は、毎日のように支払予想額が変化するだろう。最高気温35℃以上の日数に対するデリバティブであれば、まさに日々、支払額が増えていくことになるだろう。

また、長期予報を反映したプライシングが広まれば、長期予報によって価格が大きく動くこともあり得るだろう。そうすると、気象庁の発表前に、発表内容を手に入れることが、大きな利益をもたらすこともあり得るだろう。

まさに「今日は暑いですねえ」というのが時候の挨拶ではなく、億単位のお金の流れを意味するようになる。そんな、ちょっとこわい時代を夢見て、天候デリバティブを考えてみるのはいかがだろうか？

(平成15年11月6日受付)

☆23 <http://www.weatherderivs.com/index.php?Title=SWS&site=SWSD.php>

☆24 <http://www.jwa.or.jp/news/houdou/index.html>

☆25 http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/030424a_030424a.pdf