

岩手県県内都市における冬の気温オプションの価格分析とリスクスワップの分析

Tee KianHeng *

要 旨 本稿は岩手県の内陸4都市と沿岸4都市の冬の気温オプションの価格とリスクスワップの公平性について分析を行う。企業が冬の異常気象による収益の減少の緩和で、保険会社から気温オプションを購入するときのどの程度のコストでヘッジできるかを分析する。また、保険会社の商品を購入せずに、2つの会社が気温リスクを交換する、すなわちリスクスワップ取引の契約をするときの公平性について分析をする。オプション価格の分析は Burning Cost 法と確率分布法を用いる。リスクスワップの公平性の分析は Hellinger 距離を用いる。確率分布法の分析と Hellinger 距離の計算において気温シミュレーションの結果が必要である。本稿は気温シミュレーションを行うための気温時系列プロセスを季節変動と季節変動以外の部分に分けて定式化を行う。季節変動以外の部分の定式化は分散変動モデルである $AR(p)$ - $GARCH(1,1)$ モデルを用いる。

キーワード 気温オプション、リスクスワップ、Burning Cost 法、確率分布法、 $GARCH$ モデル

1. はじめに

日本経済新聞社の記事によると2010年の夏では「猛暑で東北では食用鶏が15万羽死ぬ(9/4)」、「サツマイモ、猛暑と少雨で卸値19%高く(9/25)」、「テーマパーク・遊園地の4~9月、猛暑が影響で前年割れも多く(10/3)」、「ユニクロ9月もマイナス、残暑で秋物振るわず(10/5)」など企業の収益が猛暑(異常気象)によって影響を受けていることがわかる。また、9月4日の記事で岩手県は6万9000羽が死亡し、最も多かったとある。

岩手県は農林水産業が盛んであり、観光資源も豊かである。例えば夏季のやや冷涼な気候は高冷地野菜の生産に適している。また過ごしやすく避暑地の候補地として考慮できる。冬季は降雪量が多く、スキーができる地域が多い。一方で、異常気象による影響も大きいと考えられる。例えば、猛暑・冷夏による農産物の収穫の減少や観光客の減少などが考えられる。厳冬による暖房費の増加、

低温による道路凍結で融雪剤の散布費用の増加などが考えられる。このように岩手県の主要産業が異常気象の影響で収益が不安定となり、ひいては雇用や県民所得に負の影響を与える。

天候デリバティブは気象リスクによる収益の減少をヘッジするための金融商品である。本稿は冬の気温を対象として、厳冬・暖冬のリスクをヘッジしたい場合の商品の価格を分析する。また、気温リスクの交換の可能性についても分析する。

気温リスク交換は保険会社が販売する天候デリバティブ商品を購入せず、2つの企業の間で厳冬リスクと暖冬リスクを交換するものである。

上記の分析を行うために、岩手県の内陸4都市(二戸・盛岡・北上・一関)と沿岸4都市(久慈・宮古・釜石・大船渡)の日平均気温を用いる。商品価格の分析において2つの方法を用いる。1つ目は過去のデータでペイオフを計算し、そのもとで商品の価格を計算する Burning Cost 法である。2つ目は過去のデータをもとに気温時系列のプロ

* 岩手県立大学総合政策学部 〒020-0193 岩手県滝沢村滝沢字菓子152-52
科学研究費(基盤研究(C))23530373,平成23年~平成25年)の補助を受けている。

セスの定式化のもとで確率分布をあてて気温シミュレーションを行い、その結果でペイオフを計算し、そのもとで商品の価格を計算する確率分布法である。また、ペイオフの結果をもとに Tee・刈屋 (2008) で用いた Hellinger 距離でこれらの都市間で等価性を持つかどうかを調べる。等価性を持つであればリスク交換が公平であると見なせる。

気温時系列プロセスについては刈屋・Tee・郷古 (2004)、刈屋 (2005) の ARCH 型分散変動モデルの季節調整の部分を援用する。季節変動によって説明できない部分について自己回帰 (以下、AR) と条件付き分散モデルの一つである GARCH 型モデルを想定する。シミュレーションは刈屋・遠藤・牛山 (2003) と刈屋・Tee・郷古 (2004) に従う。標準正規分布によるモンテカルロ・シミュレーションを行う。

本稿の構成は以下の通りである。

2 節 気温データ

3 節 Burning Cost 法

4 節 確率分布法

5 節 リスクスワップ取引の等価性

6 節 結語

2 節では本稿が用いる気温データの特徴について述べる。そして気温オプションの詳細を説明する。3 節では過去の気温データをもとに Burning Cost 法を用いて各都市の気温オプションの価格を計算する。4 節では刈屋・Tee・郷古 (2004)、刈屋 (2005) の ARCH 型分散変動モデルの季節調整の部分と $AR(p) - GARCH(1,1)$ モデルについて説明し、推定結果を述べる。その上モンテカルロ・シミュレーションを簡単に説明して、シミュレーションの結果とペイオフの結果について基本統計量を用いて述べる。5 節では Hellinger 距離から得られる結果について述べる。6 節では本稿の結果をまとめる。

2. 気温データ

(1) 気温オプションの概要

本稿は厳冬・暖冬 (異常気象) による収益の減少をヘッジする商品を考える。対象とする気象は

表 1 暖冬の商品例

気象要素	平均気温
観測期間	12月1日から2月28日までの90日
指数	観測期間の平均気温の平均
ストライク	都市ごとに設定
支払い	ストライクを上回って0.01℃に付き2万円を支払う
最大支払額	100万円

表 2 厳冬の商品例

気象要素	平均気温
観測期間	12月1日から2月28日までの90日
指数	観測期間の平均気温の平均
ストライク	都市ごとに設定
支払い	ストライクを下回って0.01℃に付き1万円を支払う
最大支払額	100万円

平均気温であり、気温オプションを考える。表1は暖冬、表2は厳冬の商品の設定例を示してある。

都市は岩手県内陸4都市 (二戸・盛岡・北上・一関) と沿岸4都市 (久慈・宮古・釜石・大船渡) の8都市である。表からわかるように対象気温は各都市の平均気温¹⁾である。指数は観測期間の平均気温の平均であり、ストライクを上回った、あるいは下回ったときに支払が発生する。ストライク、支払いと最大支払額の設定について本節の後半に述べることにする。

観測期間について、表にある12月1日から2月28日までの90日の他に、1月1日から3月31日までの90日と1月1日から2月28日までの59日のパターンも対象とする。

このような商品を設計した場合にどのくらいの保険料が必要となるかを分析することが本稿の目的である。また、本稿のもう1つの目的は同じ条件を設定した場合、これらの商品を購入せず、2つの会社が気温リスクの交換が考えられるかどうかを分析することである。

(2) 各都市の気温

気温データは1980年10月1日から2009年9月30日までの29年間を用いる。気温オプション商品の価格を分析するに当たり、Burning Cost法は過去の気温データの表1と2の観測期間を分析の対象とし、確率分布法は過去のすべての日次気温データを分析の対象とする。10月1日を起点としたのはその頃気象庁による冬の3ヶ月予報が発表され、リスクヘッジの必要性があるかどうかを判断する時期であるからだ。また、10月1日より遅くなると、気象予報の精度が上がり、商

品を販売する保険会社、あるいは購入する企業のどちらに不利な状況が生じるため、契約は成立しないと思われる。

図1と図2は内陸と沿岸の4都市ずつの12月1日から2月28日までの日次気温の3ヶ月平均の1981年から2009年までの経年変化を図示したものである。例えば1981年の3ヶ月平均は1980年12月1日から1981年2月28日までの日次気温の平均である。図1から内陸では南部にある一関の気温が一番高く、北上・盛岡・二戸の順に低くなっている。図2から沿岸では位置に近い大船

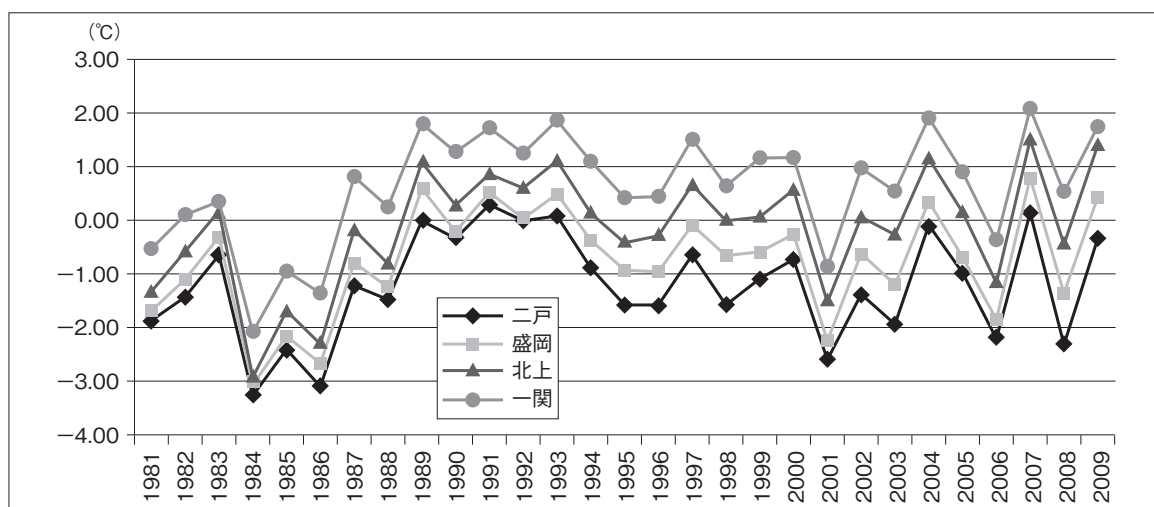


図1 岩手県内陸4都市の12月1日から2月28日までの気温の3ヶ月平均

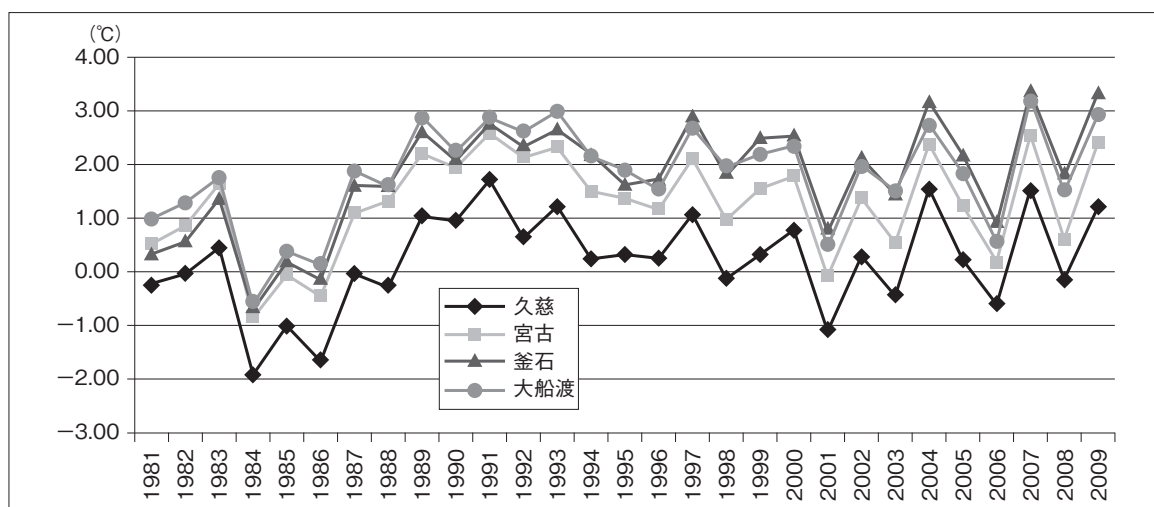


図2 岩手県沿岸4都市の12月1日から2月28日までの気温の3ヶ月平均

渡と釜石の気温が非常に似ていて、宮古・久慈の順に低くなっている。すべての都市の気温は1990年より前が低く、それ以降が高いことがわかる。ここでは示していないが1月1日から3月31日までの日次気温の3ヶ月平均と1月1日から2月28日までの日時気温の2ヶ月平均も同じ傾向である。

表3から表5は気温オプションの観測期間ごとの日次気温の平均の基本統計量を示してある。表4から2ヶ月平均が表3と表5の3ヶ月平均より

低く、表3から3ヶ月平均では12月から2月の方が1月から3月より低いことがわかる。すべての観測期間から気温の低い順に並べると、二戸・盛岡・北上・久慈・一関・宮古・釜石・大船渡の順になる。

各期間の最大値と最小値をみると、平均から1倍か2倍の標準偏差より離れていることがわかる。最大値は暖冬、最小値は厳冬の可能性がある。3ヶ月平均あるいは2ヶ月平均が正規分布に従うと仮定した場合、約66%のデータが表3から表5

表3 29年間の12月1日から2月28日までの日次気温の3ヶ月平均の基本統計量

対象都市	二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
平均	-1.22	-0.75	-0.14	0.63	0.21	1.27	1.77	1.81
標準偏差	0.99	1.01	1.09	1.05	0.92	0.94	1.05	0.95
最大値	0.29	0.79	1.50	2.08	1.71	2.58	3.36	3.23
中央値	-1.22	-0.66	0.06	0.81	0.25	1.37	1.79	1.90
最小値	-3.27	-3.07	-2.93	-2.09	-1.92	-0.86	-0.71	-0.61
+1標準偏差	-0.23	0.25	0.94	1.68	1.13	2.21	2.82	2.76
-1標準偏差	-2.20	-1.76	-1.23	-0.42	-0.71	0.34	0.72	0.86

表4 29年間の1月1日から2月28日までの日次気温の2ヶ月平均の基本統計量

対象都市	二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
平均	-2.10	-1.62	-0.99	-0.17	-0.60	0.36	0.85	0.91
標準偏差	1.10	1.16	1.25	1.22	1.05	1.07	1.19	1.11
最大値	0.04	0.64	1.41	2.00	1.36	2.21	2.99	2.93
中央値	-2.17	-1.59	-1.08	-0.16	-0.66	0.35	0.93	1.03
最小値	-4.52	-4.21	-3.94	-3.21	-3.13	-2.21	-2.07	-1.86
+1標準偏差	-1.00	-0.47	0.26	1.05	0.45	1.43	2.04	2.02
-1標準偏差	-3.21	-2.78	-2.24	-1.38	-1.65	-0.71	-0.35	-0.20

表5 29年間の1月1日から3月31日までの日次気温の3ヶ月平均の基本統計量

対象都市	二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
平均	-0.79	-0.30	0.35	1.12	0.49	1.38	1.85	1.91
標準偏差	0.93	1.00	1.11	1.12	0.92	0.95	1.11	0.99
最大値	0.70	1.48	2.01	2.80	1.85	2.86	3.55	3.46
中央値	-0.85	-0.24	0.41	1.30	0.45	1.32	1.98	1.99
最小値	-3.49	-3.18	-2.90	-2.30	-2.25	-1.43	-1.33	-1.16
+1標準偏差	0.13	0.70	1.46	2.24	1.42	2.33	2.96	2.90
-1標準偏差	-1.72	-1.30	-0.76	0.01	-0.43	0.43	0.75	0.92

に示してある平均から±1 倍の標準偏差の内側にあり、約 12% ずつのデータがそれより低いか高いことになる。そこで、表 1 と表 2 の気温オプションのストライクを設定するとき、平均から±1 倍の標準偏差の外側をペイオフが発生すると仮定する。平均+1 倍の標準偏差を暖冬の気温オプション（表 1）、平均-1 倍の標準偏差を厳冬の気温オプション（表 2）のストライクとする。各観測期間のストライクは表 3 から表 5 に示してある。例えば表 3 の盛岡のケースでは暖冬の気温オプションのストライクは 0.25℃ であり、0.25℃ を上回ったら支払いが発生する。また厳冬の気温オプションのストライクは -1.76℃ であり、-1.76℃ を下回ったら支払いが発生する。但し、本稿は 29 年間（標本サイズ=29）のデータしかなく、正規分布ではないことを留意する必要がある。

天候デリバティブの場合、支払最大額を決めることが一般的である。本稿は最大支払額を 100 万円とする。何℃で 100 万円に達するかを見ていく。表 3 から表 5 の最大値、最小値とそれぞれのストライクとの差を比較したとき、ほとんどの都市が 12 月から 2 月までの 3 ヶ月平均の暖冬と 1 月から 3 月までの 3 ヶ月平均の暖冬は 0.5℃、それ以外のケースは 1℃ を超えていることがわかる。そこで、上記の 2 つの 3 ヶ月平均の暖冬のケースで

は 0.5℃ となるときに 100 万円を支払うとして、0.01℃ に付き 2 万円を支払うこととする。それ以外のケースでは 1℃ となるときに 100 万円を支払うとして、0.01℃ に付き 1 万円を支払うこととする。

上述した条件をもとに、3 節では Burning Cost 法、4 節では確率分布法でオプションの価格の分析を行う。

3. Burning Cost 法

Burning Cost 法は過去データとともにペイオフを算出し、それをもとに商品の価格を算出する方法である。

図 3 は盛岡市のケースを図示したものである。暖冬ストライク（0.25℃）を上回った年と厳冬ストライク（-1.76℃）を下回った年に支払いが生じる。29 年の内それぞれ 6 回と 5 回が生じる。また暖冬ストライクを上回った 6 回の内 90 年以降が 5 回であり、厳冬ストライクを下回った 5 回の内 90 年以前が 3 回である。90 年以降の気温が高めであると思われる。

暖冬ストライクを上回った場合、0.01℃ に付き 2 万円を支払い、0.5℃ 以上の場合すべて 100 万円を支払う。それ以外の年は支払いが発生しないことからゼロとなる。また、厳冬ストライクを

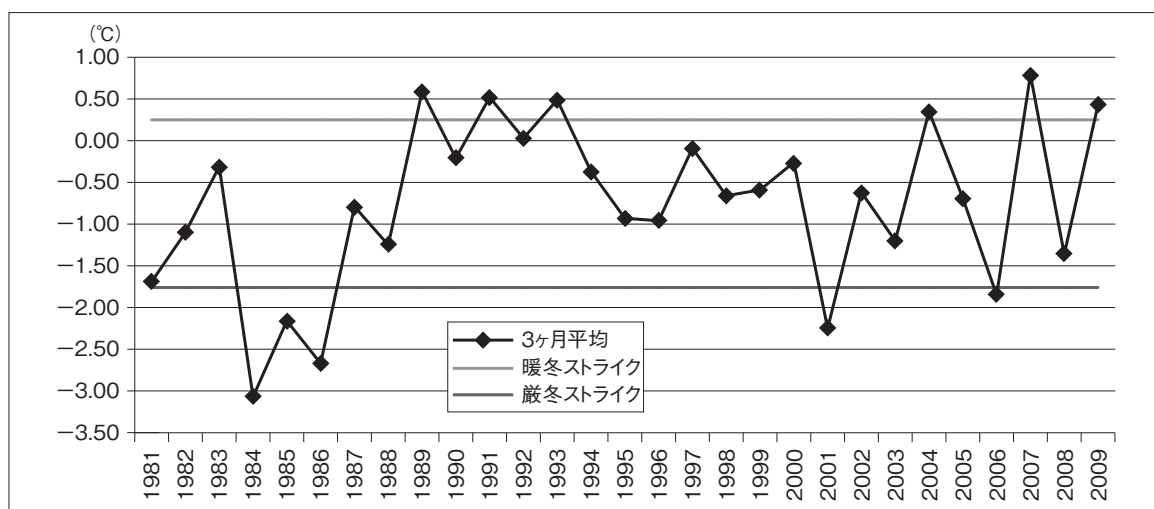


図 3 盛岡市の 12 月から 3 月までの日次気温の 3 ヶ月平均とストライク

表6 12月から2月までの3ヶ月平均のペイオフが生じる年

	暖冬	厳冬
二戸	1989、1991、1992、1993、2004、2007	1984、1985、1986、2001、2006、2008
盛岡	1989、1991、1993、2004、2007、2009	1984、1985、1986、2001、2006
北上	1989、1993、2004、2007、2009	1981、1984、1985、1986、2001
一関	1989、1991、1993、2004、2007、2009	1981、1984、1985、1986、2001
久慈	1991、1993、2004、2007、2009	1984、1985、1986、2001
宮古	1991、1993、2004、2007、2009	1984、1985、1986、2001、2006
釜石	1997、2004、2007、2009	1981、1982、1984、1985、1986
大船渡	1989、1991、1993、2007、2009	1984、1985、1986、2001、2006

表7 1月から3月までの3ヶ月平均のペイオフが生じる年

	暖冬	厳冬
二戸	1989、1990、1992、1993、2002、2007	1984、1985、1986、2001
盛岡	1989、2002、2007	1984、1985、1986、2001
北上	1989、2002、2007、2009	1981、1984、1985、1986
一関	1989、2002、2007	1981、1984、1985、1986
久慈	1989、1997、2002、2007、2009	1984、1985、1986、2001
宮古	1989、1990、2002、2007、2009	1984、1985、1986、2001
釜石	1997、2002、2007、2009	1981、1983、1984、1985、1986
大船渡	1989、2002、2007	1984、1985、1986

表8 1月から2月までの2ヶ月平均のペイオフが生じる年

	暖冬	厳冬
二戸	1989、1992、1993、2007	1984、1985、1986、2001、2008
盛岡	1989、1993、2007、2009	1984、1985、1986、2001
北上	1989、1993、2007、2009	1981、1984、1985、1986、2001
一関	1989、1993、2002、2007	1981、1984、1985、1986、2001
久慈	1993、1997、2002、2004、2007	1984、1985、1986、2001
宮古	1989、1993、2002、2007、2009	1984、1985、1986、2001
釜石	2002、2007、2009	1981、1982、1984、1985、1986
大船渡	1989、1993、2002、2007、2009	1984、1985、1986、2001

下回った場合、0.01℃に付き1万円を支払い、1℃以上の場合すべて100万円支払う。それ以外の年は支払いが発生しないことからゼロとなる。

表6から表8はそれぞれの観測期間におけるペイオフが生じる年を示してあり、ウイキペディアで調べた結果すべて異常気象の年である。暖冬オ

プションでは90年以降の回数が多く、厳冬オプションでは80年代の方が90年以降より回数が多い。表から同じ都市でも観測期間によってペイオフの回数が異なることがわかる。これは異常気象であっても、ストライクを上回っていない、あるいは下回っていないため支払は発生しないことを

示している。

Burning Cost 法の商品価格は以下のように計算される。まず、表6から表8に示してある年の気温の平均とストライクとの差に設定した支払の条件をかけて支払額を算出する。支払が発生しな

い年はゼロとする。次に年平均支払額を計算するため、上記の額の平均を計算する。最後にオプションの価格を計算するため、支払額の標準偏差を計算し、年平均支払額に0.3倍から0.5倍の標準偏差を加える。0.3倍から0.5倍の標準偏差を加え

表9 12月から2月までの3ヶ月平均の年支払平均とオプションの価格

		二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
暖冬オプション	平均(\bar{x})	120,000	112,414	100,690	71,034	103,448	84,828	98,621	75,172
	標準偏差(s)	263,113	252,667	258,649	180,205	275,529	206,581	282,435	201,753
	$\bar{x}+0.3s$	198,934	188,214	178,284	125,096	186,107	146,802	183,351	135,698
	$\bar{x}+0.5s$	251,557	238,747	230,014	161,137	241,213	188,118	239,838	176,049
厳冬オプション	平均(\bar{x})	90,690	99,655	98,621	105,517	92,414	95,517	103,103	100,000
	標準偏差(s)	252,289	263,784	269,228	272,444	263,095	248,920	264,185	247,516
	$\bar{x}+0.3s$	166,376	178,790	179,389	187,250	171,342	170,193	182,359	174,255
	$\bar{x}+0.5s$	216,834	231,547	233,235	241,739	223,961	219,977	235,196	223,758

表10 1月から3月までの3ヶ月平均の年支払平均とオプションの価格

		二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
暖冬オプション	平均(\bar{x})	108,276	83,448	98,621	90,345	76,552	77,931	91,034	97,241
	標準偏差(s)	251,766	254,113	276,454	272,587	221,106	222,540	259,702	292,659
	$\bar{x}+0.3s$	183,806	159,682	181,557	172,121	142,883	144,693	168,945	185,039
	$\bar{x}+0.5s$	234,159	210,505	236,847	226,638	187,105	189,201	220,886	243,571
厳冬オプション	平均(\bar{x})	58,966	74,483	85,172	79,310	60,690	71,724	87,586	64,483
	標準偏差(s)	205,502	225,049	253,625	238,611	206,206	215,209	233,493	212,898
	$\bar{x}+0.3s$	120,616	141,997	161,260	150,894	122,551	136,287	157,634	128,352
	$\bar{x}+0.5s$	161,716	187,007	211,985	198,616	163,793	179,328	204,333	170,932

表 11 1月から2月までの2ヶ月平均の年平均支払平均とオプションの価格

		二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
暖冬 オプション	平均(\bar{x})	72,414	92,414	102,759	86,897	66,897	70,345	64,138	97,931
	標準偏差(s)	212,765	273,779	276,908	241,441	206,417	204,843	216,160	282,000
	$\bar{x}+0.3s$	136,243	174,547	185,831	159,329	128,822	131,798	128,986	182,531
	$\bar{x}+0.5s$	178,796	229,303	241,212	207,617	170,105	172,766	172,218	238,931
厳冬 オプション	平均(\bar{x})	94,483	105,862	103,103	107,586	85,517	92,414	108,276	91,724
	標準偏差(s)	249,436	278,779	278,877	278,024	245,991	252,398	273,771	253,392
	$\bar{x}+0.3s$	169,314	189,496	186,766	190,994	159,314	168,133	190,407	167,742
	$\bar{x}+0.5s$	219,201	245,252	242,542	246,598	208,512	218,613	245,161	218,420

たのはオプションの価格は一般的に保険会社の利益、人件費などを加えるためである。表9から表11は観測期間ごとの年平均支払平均とオプションの価格を示してある。例えば表9の盛岡の場合、暖冬オプションの年平均支払平均は約11万であり、オプションの価格は約19万円から24万円の範囲内となる。最大100万円を支払ってもらえる暖冬オプションを購入するにはこの価格帯の金額を払うことになる。

表9と表10の暖冬オプションはストライクを上回って0.01℃に付き2万円を支払うことを条件に計算した結果である。その他のオプションは0.01℃に付き1万円を支払うことを条件に計算した結果である。表11は観測期間2ヶ月のオプションであり、支払条件の設定が同じであるため比較が可能である。都市ごとに比較すると、年平均支払額が大きいと、標準偏差も大きいことがわかる。最小値がゼロ円、最大値は100万円であるため、年平均支払額が大きいのは支払回数が多いか、あるいは1回の支払額が大きいからである。表8から支払回数は必ずしも厳冬の支払回数が多いとは限らないことを示している。よって、1回

の支払額が暖冬より厳冬の方が大きいと言える。商品を販売する保険会社からすると、支払う額が大きいか、あるいは支払う確率が高いためオプションの価格(保険料)も高く設定する必要がある。表から大船渡以外の都市は厳冬オプションの価格が高く、厳冬オプションの支払額が高いことがわかる。

Burning Cost法で計算されるオプションの価格はすべて異なることがわかる。気温変動の影響による収益の変動をヘッジするためには10万円帯から20万円帯のコストが必要である。また、オプションの価格分析ではBurning Cost法の他に、確率分布法を用いることがある。次節は確率分布法の分析を行う。

4. 確率分布法

気温シミュレーションを行い、その結果をもとにオプションの価格の分析を行う。気温シミュレーションのためにまず気温時系列プロセスの定式化を行う。

(1) 気温時系列プロセス

気温時系列プロセスの定式化を2段階に分けて行う。まず、気温の年間の季節変動について定式化を行う。季節変動によって説明できない部分について分散変動モデルをあてる。

気温の年間の季節変動について刈屋・Tee・郷古(2004)、刈屋(2005)のARCH型分散変動モデルの季節調整の部分を援用する。年を yr 、日次を t で表すと、 yr は1980年から2009年まで、 t は10月1日から翌年9月30日までとなる。(4.1)

式は yr 年の t 日の気温が t 日の29年間の平均 \bar{y}_t と平均で説明できない $u_{yr,t}$ によって構成されることを示してある。

$$y_{yr,t} = \bar{y}_t + u_{yr,t} \quad (4.1)$$

(4.1)式の \bar{y}_t は季節変動として以下のように考える。

$$\bar{y}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{t,i} \quad (4.2)$$

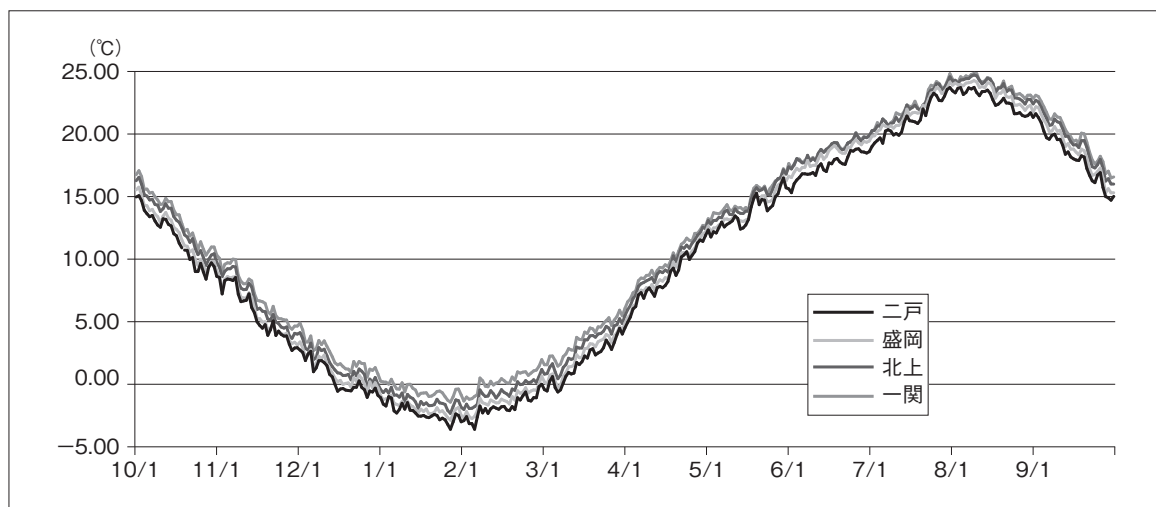


図4 岩手県内陸4都市の気温の29年間の日次平均

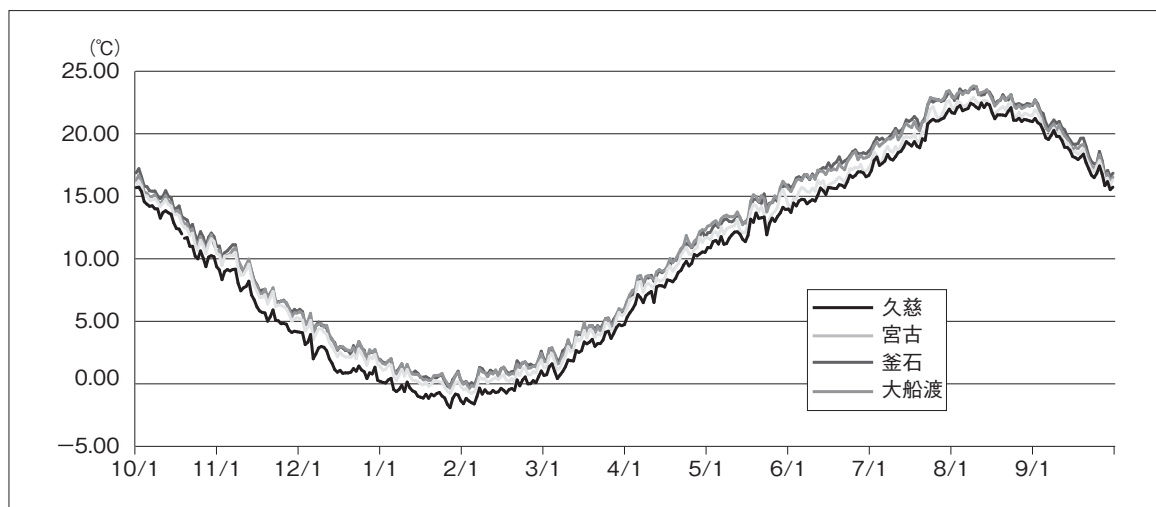


図5 岩手県沿岸4都市の気温の29年間の日次平均

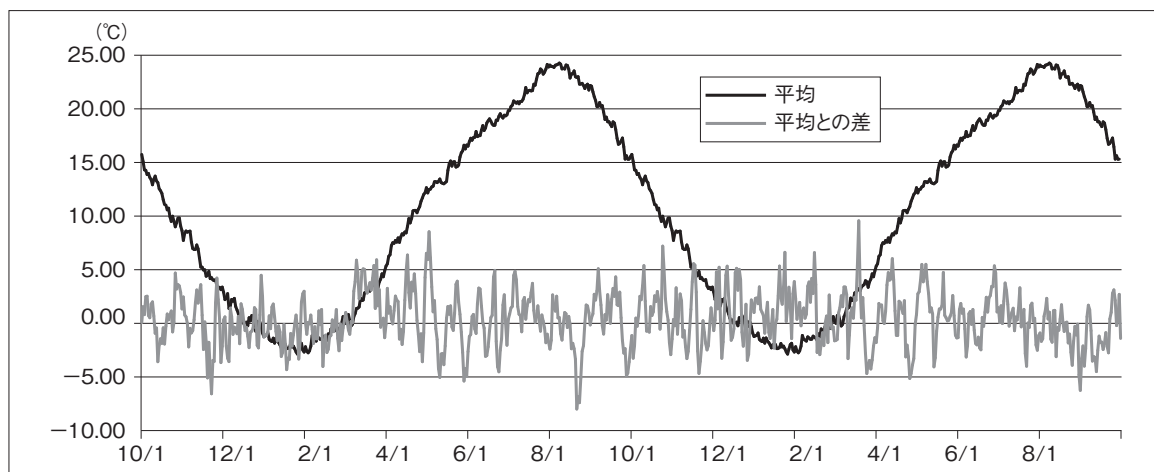


図6 盛岡市の2007年10月1日から2009年9月30日までの平均の変動と平均との差の変動

例えば、 t が10月1日のとき、 $\bar{y}_{10/1}$ は1980年から2008年までの10月1日の気温の平均となる。これを29年間の平年気温として考える。図4と図5は岩手県の内陸と沿岸の4都市ずつの各日の29年間の平均を図示したものである。両図から内陸の気温が沿岸の気温より冬は低く、夏は高いことがわかる。また都市間を比較すると、夏より冬の気温差が大きいことがわかる。図6は盛岡市の2007年10月1日からの2年間の各日の平均と平均との差($u_{yr,t}$)を図示したものである。平均との差($u_{yr,t}$)が季節変動によって説明できない部分である。気温プロセスの定式化の第2段階は $u_{yr,t}$ についての定式化である。

季節変動によって説明できなかった部分 $u_{yr,t}$ に対して、Tee (2012)と同様に自己回帰と分散変動を同時に推定する、 $AR(p) - GARCH(1,1)$ モデルを想定する。添え字 yr を省略して、 u_t を以下ようになる。

$$u_t = \sum_{j=1}^p \delta_j u_{t-j} + \varepsilon_t \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_t = \sqrt{h_t} \xi_t, \xi_t \sim iid N(0,1) \quad (4.4)$$

$$h_t = c + \alpha \varepsilon_{t-1}^2 + \beta h_{t-1} \quad (4.5)$$

(4.3)式から u は自分の過去 p 日前までの影響を受けることを示す。(4.4)式は u の誤算項 ε

は条件付き分散 h と標準正規乱数 ξ からなることを示す。条件付き分散 h は(4.5)式のように $GARCH(1,1)$ モデルを想定する。

AR の次数についてはラグ1からラグ20までで最小 $SBIC$ (シュワルツの情報統計量)をもたらす次数を最適モデルとして選択する。表12は内陸4都市、表13は沿岸4都市の(4.3)式と(4.5)式の同時推定の結果を示す。各都市の回帰係数と t 値が示してある。二戸と宮古は $AR(5)$ 、釜石は $AR(11)$ 、その他の都市は $AR(10)$ が選択された。表から u_t は1期前の影響が一番大きく、2期前と4期前の負の影響を受ける。

(4.3)式によって計算された ε が条件付き分散を持つかどうかの検証を行う。1つの時系列において標本自己係数が小さく、その2乗の自己相関係数が正でかつ長いラグにわたって相関が大きいときに条件付き分散モデル($ARCH$ 、 $GARCH$ など)が候補になりうる²⁾。

全体として系列相関があるかどうかについてLjung-Boxの Q 統計量を用いて検定する。Ljung-Boxの Q 統計量は次式となる。

$$Q(m) = T(T+2) \sum_{l=1}^m \frac{\rho_l^2}{T-l} \quad (4.6)$$

表 12 岩手県内陸 4 都市の $AR(p) - GARCH(1,1)$ モデルの推定結果

	二戸		盛岡		北上		一関	
	回帰係数	t -値	回帰係数	t -値	回帰係数	t -値	回帰係数	t -値
δ_1	0.7953	81.36	0.7772	79.21	0.7614	77.64	0.7628	77.49
δ_2	-0.2587	-19.81	-0.1800	-14.48	-0.1527	-12.44	-0.1620	-13.02
δ_3	0.1435	10.87	0.0763	5.87	0.0707	5.53	0.0738	5.78
δ_4	-0.0508	-3.95	-0.0199	-1.53	-0.0126	-1.00	-0.0052	-0.40
δ_5	0.0596	5.95	0.0333	2.55	0.0193	1.51	0.0182	1.41
δ_6			0.0017	0.13	0.0151	1.19	0.0093	0.73
δ_7			0.0119	0.92	0.0010	0.08	0.0075	0.59
δ_8			0.0108	0.86	0.0163	1.33	0.0191	1.55
δ_9			0.0058	0.46	0.0101	0.81	-0.0007	-0.06
δ_{10}			0.0351	3.51	0.0388	3.87	0.0495	5.01
$GARCH(1,1)$								
c	0.2100	5.43	0.1212	4.74	0.1176	4.70	0.2136	4.64
α	0.0419	8.76	0.0323	7.69	0.0299	7.57	0.0326	6.98
β	0.9138	79.83	0.9332	91.57	0.9358	93.17	0.9058	55.08
決定係数	0.4626		0.4880		0.4950		0.4956	
SBIC	4.3802		4.0919		4.0688		4.0827	

表 13 岩手県沿岸 4 都市の $AR(p) - GARCH(1,1)$ モデルの推定結果

	久慈		宮古		釜石		大船渡	
	回帰係数	t -値	回帰係数	t -値	回帰係数	t -値	回帰係数	t -値
δ_1	0.7174	72.75	0.7195	73.50	0.7331	74.46	0.7176	72.33
δ_2	-0.1639	-12.89	-0.1923	-15.17	-0.2076	-16.22	-0.1854	-14.61
δ_3	0.0969	7.56	0.1131	8.84	0.1276	9.78	0.1048	8.35
δ_4	-0.0198	-1.56	-0.0197	-1.56	-0.0318	-2.47	-0.0224	-1.79
δ_5	0.0394	3.12	0.0520	5.11	0.0447	3.45	0.0413	3.29
δ_6	0.0109	0.87			0.0001	0.01	0.0045	0.36
δ_7	-0.0006	-0.04			0.0016	0.13	0.0019	0.15
δ_8	0.0158	1.32			0.0175	1.41	0.0223	1.86
δ_9	0.0057	0.47			0.0110	0.89	-0.0075	-0.63
δ_{10}	0.0389	3.87			0.0130	1.05	0.0534	5.42
δ_{11}					0.0306	3.15		
$GARCH(1,1)$								
c	0.2857	7.34	0.2863	7.17	0.2777	7.36	0.1839	6.22
α	0.0596	10.29	0.0618	10.68	0.0621	10.68	0.0506	9.81
β	0.8671	62.17	0.8787	72.00	0.8784	73.00	0.9029	81.29
決定係数	0.4264		0.4069		0.4256		0.4203	
SBIC	4.1802		4.3812		4.3559		4.1946	

表 14 Ljung-Box の Q 統計量の検定

		二戸	盛岡	北上	一関
ε	Q(9)	12.03	2.54	2.20	2.08
	p 値	0.21	0.98	0.99	0.99
ε^2	Q(9)	210.20	144.07	128.00	103.92
	p 値	0	0	0	0
		久慈	宮古	釜石	大船渡
ε	Q(9)	9.10	20.00	8.37	5.65
	p 値	0.43	0.02	0.50	0.77
ε^2	Q(9)	356.99	457.62	408.16	254.33
	p 値	0	0	0	0

(4.6) 式の ρ_l は今期とラグ1期との自己相関係数である。T は標本サイズである。 $m = \ln(T)$ とする。(4.6) 式の Q 統計量の帰無仮説は1次から m 次までの自己相関係数がゼロであり、対立仮説はそのうちの1つの自己相関係数がゼロではない。また、漸近的に自由度 m のカイ2乗分布に従う。標本サイズは全体の10585からARの次数を差し引いた値であり、 $m=9$ となる。

表14は検定結果である。表から宮古以外の都市の残差の1次から9次までの自己相関がないこと、すべての都市の残差の2乗の1次から9次までの自己相関があることを示してある。よって、条件付き分散モデルが候補となりうる。ここでは GARCH (1,1) モデルを想定する。推定結果は表12と表13の後半部分であり、各都市の係数が有意であることがわかる。

(2) 気温シミュレーションにおけるオプション価格の分析

表12と表13の推定結果のもとでモンテカルロ・シミュレーションを行い、そのシミュレーションの結果を使ってペイオフを算出し、それをもとにオプションの価格を算出する。

シミュレーションについては刈屋・遠藤・牛山(2003)と刈屋・Tee・郷古(2004)に従う。標準正規分布に従うと仮定して、まず(4.4)式の ε_t について標準正規乱数を発生させて、(4.5)式

で生成される条件付き分散の平方根と掛け合わせて、残差を生成する。次に生成した残差に(4.3)式のARモデルを加え、(4.1)式のように1年間の気温を生成する³⁾。

シミュレーションでは2009年10月1日から2010年9月30日までのパスを1万本生成する。そのうち12月1日から3月31日までの4ヶ月間のシミュレーション結果を用いてオプションの価格の分析を行う。

ペイオフを算出するためのストライクは表3から表5に示してあるものを用いる。支払条件については Burning Cost 法と同じである。つまり、12月から2月の3ヶ月平均と1月から3月の3ヶ月平均の暖冬オプションについて 0.01°C に付き2万円を支払い、最大支払額は100万円 (0.5°C) とする。その他のオプションにおいて 0.01°C に付き1万円を支払い、最大支払額は100万円 (1°C) とする。表15から表17は観測期間ごとの分析結果を示してある。各表ではそれぞれの支払回数も示している。 Burning Cost 法の結果と比較すると、支払平均が小さいことがわかる。よって、オプションの価格も Burning Cost 法より低い。観測期間ごとの暖冬オプションと厳冬オプションの支払回数をみると、大きな差がないことがわかる。

表17の2ヶ月平均のみ同じ支払条件であるから、暖冬オプションと厳冬オプションの結果を比較する。平均支払額をみると両オプションの差は

表 15 気温シミュレーションの12月から2月までの3ヶ月平均の年支払平均とオプションの価格

		二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
暖冬オプション	平均(\bar{x})	45,946	55,546	50,622	56,728	64,708	44,524	59,378	54,444
	標準偏差(s)	183,422	201,620	194,216	206,091	218,166	178,073	210,691	199,604
	$\bar{x}+0.3s$	100,973	116,032	108,887	118,555	130,158	97,946	122,585	114,325
	$\bar{x}+0.5s$	137,657	156,356	147,730	159,774	173,791	133,561	164,723	154,246
	回数	843	959	853	944	1096	823	991	960
厳冬オプション	平均(\bar{x})	25,040	30,879	31,426	36,794	41,595	26,187	42,253	36,712
	標準偏差(s)	112,842	130,505	133,687	144,407	151,308	115,309	159,327	142,313
	$\bar{x}+0.3s$	58,892	70,031	71,532	80,116	86,988	60,780	90,051	79,406
	$\bar{x}+0.5s$	81,461	96,132	98,269	108,998	117,249	83,841	121,916	107,868
	回数	793	899	833	965	1,124	838	1,032	1,021

表 16 気温シミュレーションの1月から3月までの3ヶ月平均の年支払平均とオプションの価格

		二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
暖冬オプション	平均(\bar{x})	53,874	57,734	49,062	49,160	66,958	43,636	35,617	29,106
	標準偏差(s)	196,606	206,490	191,380	191,617	220,707	176,928	145,293	123,120
	$\bar{x}+0.3s$	112,856	119,681	106,476	106,645	133,170	96,714	79,205	66,042
	$\bar{x}+0.5s$	152,177	160,979	144,752	144,968	177,311	132,100	108,263	90,666
	回数	972	970	824	824	1,125	794	897	875
厳冬オプション	平均(\bar{x})	32,559	32,366	30,494	30,230	42,417	26,479	36,591	31,778
	標準偏差(s)	131,053	133,498	131,215	132,890	154,083	117,172	147,361	132,260
	$\bar{x}+0.3s$	71,875	72,415	69,859	70,097	88,642	61,631	80,799	71,456
	$\bar{x}+0.5s$	98,086	99,115	96,102	96,675	119,459	85,065	110,272	97,908
	回数	969	910	821	810	1,148	809	927	918

表 17 気温シミュレーションの1月から2月までの2ヶ月平均の年支払平均とオプションの価格

		二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
暖冬 オプション	平均(\bar{x})	40,577	47,200	42,099	46,476	56,816	37,073	76,468	64,590
	標準偏差(s)	155,063	172,391	162,003	170,930	187,666	147,387	243,766	220,031
	$\bar{x}+0.3s$	87,096	98,917	90,700	97,755	113,116	81,289	149,598	130,599
	$\bar{x}+0.5s$	118,109	133,395	123,101	131,941	150,649	110,766	198,351	174,606
	回数	1,023	1,043	965	1,058	1,237	959	1,125	1,041
厳冬 オプション	平均(\bar{x})	39,637	42,805	44,428	44,309	56,307	38,554	53,279	46,370
	標準偏差(s)	151,687	161,508	166,983	166,307	184,968	151,373	187,726	168,479
	$\bar{x}+0.3s$	85,143	91,257	94,523	94,201	111,797	83,966	109,597	96,914
	$\bar{x}+0.5s$	115,481	123,559	127,920	127,462	148,791	114,241	147,142	130,610
	回数	1,013	1,038	1,028	1,029	1,295	963	1,123	1,102

釜石と大船渡以外は小さいが、ほとんど暖冬の方がやや大きいことがわかる。平均支払額、オプションの価格から暖冬オプションの方が厳冬オプションより高く、回数にほとんど差がないことから、暖冬リスクの方がやや高いと思われる。

5. リスクスワップ取引の等価性

天候デリバティブの取引では保険会社が商品を販売するものの他に、保険会社を通さず2つの会社がリスクを交換するもの、いわゆるリスクスワップ取引がある。リスクスワップ取引が成立するにはある気象条件のもとで2つの会社が異常気象によって収益構造が逆相関にあることが条件である。例えば、夏における電力会社とガス会社の収益構造では、猛暑となれば電力会社は増収となり、ガス会社は減収となる。逆に冷夏となればガス会社が増収となり、電力会社は減収となる。両会社はリスクスワップ取引を行うことによって、このような収益の不安定性を軽減することができ

る。また、リスクスワップ取引は保険会社の販売する商品と違って購入費用がかからないことも一つのメリットである。しかし、エネルギー会社のような異常気象による収益構造が逆相関する会社を見つけ出すことは容易ではない。本節は収益構造が逆相関する会社が存在することを仮定して、リスクスワップ取引の公平性を考える。

本節の分析は前節の気温シミュレーションの結果を用いる。2009年10月1日から2010年9月30日までのパスを1万本生成し、そのうち12月1日から3月31日までの4ヶ月間のシミュレーション結果を用いて完全等価性の検証を行う。分析は異常気象による2つの会社の収益構造が逆相関すると仮定して12月から2月の3ヶ月平均、1月から3月の3ヶ月平均と1月から2月の2ヶ月平均の3つの観測期間の分析を行う。また同じ地域内にある会社と異なる地域にある会社の検証も行う。例えば盛岡にある2つの会社やそれぞれ二戸と盛岡にある会社などの収益構造が暖冬と厳冬

で逆相関していると仮定して、リスクスワップ取引の公平性の検証を行う。分析に際して、支払の条件が同じに設定しておく必要がある。2節の分析から2つの3ヶ月平均の暖冬オプションの支払条件は0.01℃に付き2万円を支払い、最大0.5℃で100万円を支払うとなっている。それ以外のオプションの支払条件は0.01℃に付き、1万円を支払い、最大1℃で100万円を支払うとなっている。ここでは、2つの3ヶ月平均の支払条件は0.01℃に付き2万円を支払い、最大0.5℃で100万円を支払うものとし、2ヶ月平均の支払条件は0.01℃に付き、1万円を支払い、最大1℃で100万円を支払うものとする。ストライクは表3から表5に示してある気温オプションのものを用いる。

契約の例を表18と19に示す。表18は同じ地域内の場合の契約例である。想定としてA社は暖冬になると収益増となり、厳冬になると収益減となる。またB社は厳冬になると収益増となり、暖冬になると収益減となる。暖冬の場合、指数がストライク0.25℃を上回ればA社がB社に対し価値を支払う。厳冬の場合、指数がストライク-1.76℃を下回ればB社がA社に対し価値を支払う。指数がストライクの範囲内にあると支払は発生しない。表19は異なる地域の場合の契約例である。

表18 同じ地域内のリスクスワップの契約例

気象要素	平均気温
観測期間	12月1日から2月28日までの90日
指数	観測期間の平均気温の平均
観測地点	盛岡
ストライク	-0.75℃+1.01℃=0.25℃ -0.75℃+1.01℃=-1.76℃
支払い	指数がストライクを上回った場合 A社がB社に0.01℃に付き2万円を支払う。 指数がストライクを下回った場合 B社がA社に0.01℃に付き2万円を支払う。
最大支払額	100万円

表19 異なる地域のリスクスワップの契約例

気象要素	平均気温
観測期間	12月1日から2月28日までの90日
指数	観測期間の平均気温の平均
観測地点	二戸と盛岡
ストライク	二戸：-1.22℃+0.99℃=-0.23℃ 盛岡：-0.75℃-1.01℃=-1.76℃
支払い	二戸の指数がストライクを上回った場合A社がC社に0.01℃に付き2万円を支払う。 盛岡の指数がストライクを下回った場合C社がA社に0.01℃に付き2万円を支払う。
最大支払額	100万円

盛岡にあるA社は暖冬になると収益増となり、厳冬になると収益減となる。また二戸にあるC社は厳冬になると収益増となり、暖冬になると収益減となる。異なる地域であるため、ストライクは2地点が必要である。暖冬の場合、二戸の指数がストライク-0.23℃を上回ればA社がB社に対し価値を支払う。厳冬の場合、盛岡の指数がストライク-1.76℃を下回ればB社がA社に対し価値を支払う。両地の指数がストライクの範囲内にあると支払は発生しない。

完全等価性についてTee・刘屋(2008)のHellinger距離を援用する。Hellinger距離は下式となる。

$$d(W^a, W^b) = \sqrt{\sum_i (\sqrt{p_i^a} - \sqrt{p_i^b})^2} \quad (5.1)$$

(5.1)式の W^a と W^b は、例えば表18の場合、A社の厳冬のペイオフとB社の暖冬のペイオフであり、 p^a と p^b はそれぞれのペイオフのヒストグラムの相対度数である。この数値が0であるとき、両社の分布が完全等価性をもつこととなる。完全等価性をもつであれば、両社のリスクスワップが公平と見なせる。表20から表22はそれぞれの観

表 20 12月から2月までの3ヶ月平均のHellinger距離

暖冬リスク 厳冬リスク	二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
二戸	0.0455	0.0638	0.0513	0.0566	0.0781	0.0489	0.0644	0.0591
盛岡	0.0488	0.0598	0.0594	0.0562	0.0622	0.0498	0.0585	0.0491
北上	0.0577	0.0661	0.0527	0.0615	0.0687	0.0552	0.0537	0.0532
一関	0.0605	0.0594	0.0586	0.0494	0.0545	0.0606	0.0475	0.0499
久慈	0.0700	0.0581	0.0669	0.0560	0.0577	0.0750	0.0477	0.0582
宮古	0.0442	0.0642	0.0605	0.0612	0.0741	0.0450	0.0645	0.0528
釜石	0.0706	0.0611	0.0668	0.0518	0.0565	0.0697	0.0395	0.0587
大船渡	0.0610	0.0553	0.0587	0.0559	0.0560	0.0683	0.0446	0.0525

表 21 1月から3月までの3ヶ月平均のHellinger距離

暖冬リスク 厳冬リスク	二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
二戸	0.0592	0.0563	0.0554	0.0557	0.0625	0.0601	0.0869	0.0600
盛岡	0.0520	0.0596	0.0559	0.0435	0.0668	0.0495	0.0809	0.0572
北上	0.0564	0.0607	0.0514	0.0494	0.0689	0.0522	0.0809	0.0615
一関	0.0667	0.0596	0.0525	0.0535	0.0728	0.0631	0.0877	0.0734
久慈	0.0582	0.0612	0.0722	0.0737	0.0482	0.0816	0.0641	0.0592
宮古	0.0607	0.0637	0.0561	0.0457	0.0753	0.0523	0.0949	0.0746
釜石	0.0827	0.0682	0.0797	0.0791	0.0693	0.0983	0.0453	0.0588
大船渡	0.0655	0.0576	0.0745	0.0673	0.0554	0.0837	0.0500	0.0476

表 22 1月から2月までの2ヶ月平均のHellinger距離

暖冬リスク 厳冬リスク	二戸	盛岡	北上	一関	久慈	宮古	釜石	大船渡
二戸	0.0704	0.0830	0.0692	0.0699	0.0822	0.0668	0.0693	0.0817
盛岡	0.0816	0.0756	0.0682	0.0745	0.0899	0.0755	0.0807	0.0923
北上	0.0817	0.0830	0.0688	0.0729	0.0893	0.0829	0.0860	0.0996
一関	0.0673	0.0711	0.0709	0.0677	0.0776	0.0760	0.0784	0.0969
久慈	0.0916	0.0906	0.0887	0.0841	0.0821	0.0776	0.0760	0.0784
宮古	0.0712	0.0821	0.0784	0.0808	0.0919	0.0783	0.0967	0.1066
釜石	0.0738	0.0844	0.0730	0.0797	0.1019	0.0761	0.0698	0.0815
大船渡	0.0858	0.1101	0.0933	0.1041	0.1186	0.0903	0.0900	0.0855

測期間の(5.1)式の計算結果である。表の対角線上にある値は、表18の同じ地域内のリスクスワップの計算結果である。表の対角線より左下の部分は表19の異なる地域のリスクスワップの計算結果である。表の対角線より右上の部分は表19の逆の想定、すなわち例えば盛岡にある企業が暖冬

リスクと二戸にある企業が厳冬リスクのリスクスワップの計算結果である。表からわかるように、どの観測期間においてもリスクスワップの同値性が得られず、設定したストライクの下では、公平な契約が得られないことがわかる。

6. 結語

企業が異常気象による収益の減少の軽減を図るときに保険会社から天候デリバティブ商品を購入するほかに、2つの会社が保険会社を通さずに直接リスクスワップ取引を行うこともできる。本稿の目的の1つ目は保険会社から気温オプションを購入するとき、どれぐらいの費用が必要かを分析することである。2つ目は2つの会社が直接リスクスワップ取引を行うときの契約の公平性について分析することである。

本稿は岩手県の内陸4都市と沿岸4都市の冬の平均気温を分析対象としている。厳冬・暖冬による気温リスクによる収益の減少をヘッジすることを想定し、観測期間中の日平均気温の平均をもとに分析を行った。2節では気温オプションの商品例について紹介した。観測期間は12月1日から2月28日までの3ヶ月、1月1日から3月31日までの3ヶ月と1月1日から2月28日までの2ヶ月の3つである。それぞれの観測期間中の日平均気温の平均がストライクを上回った(暖冬オプション)とき、あるいは下回った(厳冬オプション)ときに支払いが発生する。ストライクは1980年から2009年までの29年間の観測期間中の日平均気温の平均の平均と標準偏差によって決めた。その上、気温オプションの支払条件、最大支払額を決めた。

3節ではBurning Cost法を用いて気温オプションの価格の分析を行った。過去の29年間の観測期間中の日平均気温の平均とストライクとの差からペイオフを算出し、ペイオフのもとで平均支払額と標準偏差を求めた。オプション価格は保険会社の利益分や人件費などを考慮して平均支払額に0.3倍から0.5倍の標準偏差を加えたものとした。Burning Cost法で計算されたオプションの価格はすべて異なることがわかる。気温変動による収益の変動をヘッジするためには10万円帯から20万円帯のコストが必要であることがわかった。

4節では確率分布法を用いて気温オプションの価格の分析を行った。まず、1980年10月1日から2009年9月30日までに日平均気温のデータを

用いて、気温時系列プロセスの定式化を行った。各日の29年間の平均で季節変動を捉え、季節変動によって説明できない部分は $AR(p)$ -GARCH(1,1)モデルで定式化を行った。そのもとで、2009年10月1日から2010年9月30日までの気温シミュレーションを1万回行った。1万個の観測期間中の日平均気温の平均と2節で決めたストライクとの差からペイオフを算出し、ペイオフのもとで平均支払額と標準偏差を求めた。Burning Cost法と同様にオプション価格は保険会社の利益分や人件費などを考慮して平均支払額に0.3倍から0.5倍の標準偏差を加えたものとした。Burning Cost法の結果と比較すると、支払平均が小さくオプションの価格も低い。

5節ではHellinger距離を用いてリスクスワップ取引の等価性について分析を行った。リスクスワップ取引は保険会社を通さず、異常気象によって収益構造が逆相関する2つの会社がそれぞれの気象リスクを交換する契約である。本稿は1つの会社が暖冬によって収益が増加し、厳冬によって収益が減少するに対して、もう1つの会社がその逆であると想定する。また、会社が同じ都市にあるものと異なる都市にあるものに分けて分析を行った。この節では4節の気温シミュレーションの1万個の観測期間中の日平均気温の平均を用いて、2社のペイオフからHellinger距離を計算した結果、リスクスワップ取引の公平性が得られないこととなった。

本稿は各都市の厳冬オプションと暖冬オプションの価格が異なり、ストライクと支払条件が同じのもとでBurning Cost法より確率分布法の方が低いという分析結果を得た。また、今回設定した条件のもとではリスクスワップ取引の公平性が得られないという分析結果を得た。しかし、本稿の分析結果についていくつかの点を留意する必要がある。ペイオフを算出するために、ストライクを決める必要がある。本稿は29年間の観測期間中の平均気温の平均の平均値 ± 1 倍の標準偏差でストライクを決めている。ストライクが変わればオプションの価格が変わることになる。確率分布法

では標準正規分布を仮定していたが、これも他の確率分布を仮定すれば、オプション価格が変わることとなる。気温時系列プロセスの定式化は季節変動と $AR(p)$ - $GARCH$ モデルを用いているが、90年以降の気温が高めであることを考慮して温暖化傾向をモデルに取り入れることも必要である。リスクスワップ取引の公平性の分析では2節で述べたストライクを用いているが、ストライクを調整することで公平性が得られる可能性がある。保険会社を通さずリスクスワップ取引を行うことで気温オプションを購入するコストが節約できるメリットはあるが、利益構造が逆相関をする企業を見つけ出すことは簡単ではない。異なる地域のリスクスワップ取引の検証において、5節の気温シミュレーションの結果を用いていたが、2つの地域の気温の連動性を考慮して多変量の分散変動などのモデルを考慮する必要がある。以上の問題点を今後の課題とする。

【参考文献】

- 刈屋武昭・遠藤良輔・牛山史郎 (2003)、「分散変動 (SV) モデルによる東京の日次平均気温の予測分布 (第1版) —気温デリバティブ・プライシングモデル—」 Discussion Paper No.0208、京都大学経済研究所金融工学研究センター。
- 刈屋武昭・田中勝人・矢島美寛・竹内啓 (2003)、『経済時系列の統計』岩波新書。
- 刈屋武昭・Tee KianHeng・郷古浩道 (2004)、「ARCH型分散変動モデルによる気温リスク・スワップの検証」 Discussion Paper No.0401、京都大学経済研究所金融工学研究センター。
- 刈屋武昭編著 (2005)、『天候リスクの戦略的経営——EaR とリスクスワップ』朝倉書店。
- 土方薫 (2003)、『総論天候デリバティブ——天候リスクマネジメントのすべて——』シグマベイズキャピタル。
- Tee KianHeng・刈屋武昭 (2008)、「ARCH型分散変動モデルによる冬季気温リスク・スワップの検証」、『非流動性資産の価格付けとリアルオプション』第4章、朝倉書店。
- Tee KianHeng (2012)、「中国地方の5都市の気温オプションの価格分析」、『金融時系列分析の理論と応用』、広島経済大学研究双書第39冊。
- 日本語版ウィキペディア「厳冬」 (<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%92%E5%86%AC>) (2012年9月1日)
- 同「暖冬」 (<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9A%96%E5%86%AC>) (2012年9月1日)
- Bollerslev, T.(1986), "Generalized Autoregressive Con-

- ditional Heteroskedasticity," *Journal of Econometrics*, 31, 307-327.
- Cao, M. and J. Wei (2003), "Weather Derivatives Valuation and Market Price of Weather Risk," Working Paper.
- Engle, R.E (1982), "Autoregressive Conditional Heteroskedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation," *Econometrica*, 50, 987-1007.
- Hamilton, J.D.(1994), *Time Series Analysis*, Princeton University Press.

【注】

- 1) 以降は平均気温を単純に気温と呼ぶ。
- 2) 刈屋・田中・矢島・竹内 (2003) に参照されたい。
- 3) 詳細については刈屋・遠藤・牛山 (2001) と刈屋・Tee・郷古 (2004) あるいは刈屋 (2005) に参照されたい。