

気象リスクの定量的マネジメント

富山 芳幸

気象リスクへの関心は高いがリスク認識は主観的でリスク・マネジメントは定性的な段階にとどまっている。そこで、定量的リスク・マネジメントへの道筋と課題を、定性的なそれと対比しながら、気象情報、リスク情報、情報の検証、意思決定の評価の各側面から検討した。気象リスクの定量的マネジメントの一例として、電力会社の需給運用業務におけるリスクのマネジメントに気温の確率予報をもちいたモデルを紹介した。気象情報の作成は気象学等の科学に立脚しているが、その利用もまた科学とならなければならない。

キーワード：気象リスク、定量的リスク・マネジメント、確率予報、意思決定、リスク情報、検証

1. はじめに

気象にかかわるリスクには、激しい気象現象、異常気象、気候変動によるもののほか、予測の不確実性に起因するものがある。気象現象は通常コントロールできないが、リスクについてはコントロールが可能である。ここでは、有効な情報を得て意思決定を最適化しリスクを軽減することについて述べる。次節では定量的リスク・マネジメントの概略をのべ、節3で、その一例として気温の確率予報を用いたリスク・マネジメントを紹介する。

2. 気象リスクの定量的マネジメント

2.1 リスク認識

ノアの洪水の例を挙げるまでもなく、気象災害に遭遇したひとの生死は当事者のリスク認識に依存している。気象リスクは当事者の概念的準備があって初めて認識されるものである[1]。当事者の概念的準備の段階によって、リスク認識は神話的、主観的および科学的認識の各段階が区別される。神話的リスク認識においてはリスクは天災として把握され、祈る以外に逃れる方法を知らない。だが歴史的にいえば、人類は早くから運命に甘んじることを拒否していた。中国ではすでに禹王（約4,000年前）の頃に治水が行われたと伝えられている。主観的リスク認識はそれ以来今日までの歴史的幅をもっている。

主観的リスク認識に基づくリスク・マネジメントはまだ定性的なものである。これに対して、科学的リス

ク認識に基づくリスク・マネジメントは定量的になる。気象リスクの定量的マネジメントは、一部を除けば、まだ今後の課題である。定量的リスク・マネジメントへの道を、主観的リスク認識一定性的リスク・マネジメントと科学的リスク認識一定量的リスク・マネジメントとを比較しながら展望する（表1）。気象情報、リスク情報、情報の検証、意思決定の評価の四つの側面から見ていく。

主観的リスク認識の当事者はリスクにかかわりのある気象現象を知ってはいるが、意思決定のために最適な情報が何であるかを知っているとは限らない。設計外力50 mm/hの排水設備をもっている市の防災当局は、この外力を超える降水の有無をあらかじめ知ろうとする。翌日までの範囲で、1時間ごと対象空間を市域とする時間雨量の予報を得られたとする。しかし、現在の技術では、市町村の空間分解能で50 mm/hを超える翌日の強雨となると、その予測精度は非常に低い。気象庁の数値予報モデルの降水量予報のスレット

表1 定性的リスク・マネジメントと定量的リスク・マネジメント

	主観的	科学的
リスク認識	定性的	定量的
リスク・マネジメント		
気象情報	既成の情報／あつらえの情報	リスク情報の説明因子
リスク情報	なし	原因連鎖の分析にもとづくリスク情報
情報の検証	検証なし／不適切な検証	気象情報とリスク情報に対する科学的検証
意思決定の評価	評価なし／印象による評価	客観的定量的評価

とみやま よしゆき

(株)ウェザーニューズ

〒261-0023 千葉県美浜区中瀬1-3

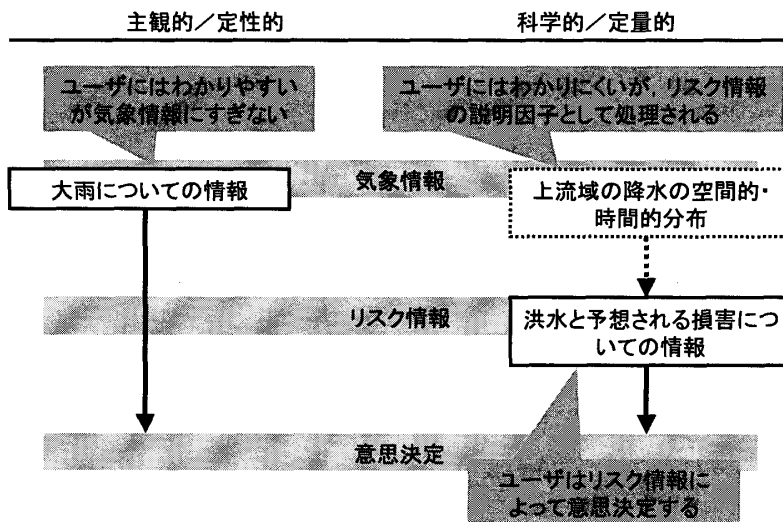


図1 リスク情報

スコアは、3時間に10mmの雨に対して12時間後の予報で、10%と20%の間である[2]。スレットスコアの定義は後に示すが、これは精度を示す指標で100%に近いほどよい。精度は、12時間後の予報でなく24時間後の予報に対してはもっと悪くなり、3時間降水量でなく1時間降水量の場合にはもっと悪くなる。10mmでなく50mmに対してははるかに悪くなる。これは40km四方ごとの検証であるが、普通の市域はこれよりはるかに小さい。40km四方でなく、10km四方で検証したら精度は悪くなる。つまり、上記のような仕様で降水量予報が得られたとしても、その精度は実用に耐える水準ではないということである。

1, 2時間後についてはある程度信頼性の高い量の予報がありうるが、翌日の降雨予測については決定論的予報でなく、降水量の閾値を指定した確率予報を用いたほうがよい。また、内水だけでなく外水(河川等によって流入する水)も浸水に関係しているなら、予測値だけでなく観測値も参照すべきである。このように、主観的リスク認識の段階では、リスクにかかわる気象現象はわかっていると、意思決定に必要な予測要素は何か、情報をどのような仕様で得ればよいか、といったことを特定することは、まだその先のことからなのである。

2.2 気象情報とリスク情報

気象リスクの定性的マネジメントと定量的マネジメントとはシームレスにつながるようなものではなく、その間に断絶と飛躍がある。大きな違いの一つは、前者の意思決定が気象情報によってなされるのに対して、後者はリスク情報を用いる点にある。リスク情報とは、損害・被害のより直接の原因に関する情報である。洪

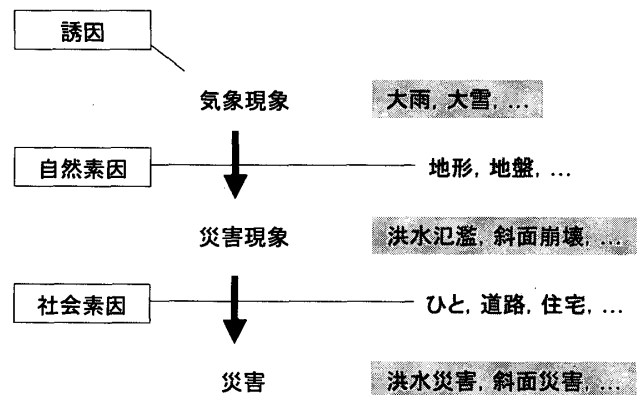


図2 災害の原因連鎖

水による浸水が問題であるならば、大雨についての情報によって意思決定するより、洪水と予想される損害についての情報によるほうがよい(図1)。端的な話、ある市域に大雨が降るかどうかという問題とその市域で洪水が起こるかどうかという問題とは別なのである。洪水は上流に降った雨によって起こるからである。

大雨や暴風のような気象現象は人口に膾炙しているせいか、リスクの原因としてよく認識されている。だが普通、被害・損害にいたる直接の原因は別のもっと身近なところにあるのだが、それが案外見落されている。災害の場合についていえば図2に示したような原因連鎖がある。気象現象は地形や地盤といった自然素因に働いて、洪水氾濫や斜面崩壊のような災害現象を生み、さらに災害現象はひとや住宅といった社会素因に作用して災害となる[3]。同じ大雨でも川がなければ洪水は起こらず、川によって洪水の起こり方は違う。洪水氾濫が起こっても被害を受けるものが存在しなければ洪水災害とはならない。未開の原野におこる洪水は、むしろ土地を肥沃にするのである。

気象リスクの定量的マネジメントにおいては、意思決定は気象情報によってではなくリスク情報によって行われるが、それによって気象情報が不要になるわけではない。気象情報はリスク情報を予測するための説明因子として処理済みの形でユーザに渡るのである。洪水氾濫を予測するための説明因子としては、洪水対象河川の上流域の降水の空間的・時間的分布を、しかも予測値とともに観測値を用いることになるが、このようなデータのセットは、そのままユーザに渡るとすれば、無味乾燥な数値の集まりにすぎない。定量的マネジメントにおいては、気象情報は意思決定をコントロールする情報ではなくなり、分析されるべきデータとなる。リスク情報が端的で有効な情報であればよいのである。多くの場合、リスクにかかわる意思決定は切迫した状況でなされるので、リスク情報は端的なものである必要がある。

洪水と予想される損害についての情報、強風の列車運行に対する影響についての情報、電力会社が保持すべき予備供給力についての情報、これがリスク情報の一例である。mm/h, m/s, °C等を単位とする気象情報と違って、リスク情報はm(河川水位), m/s(転覆限界風速), MW(予備供給力)という、意思決定当事者のリスクの単位と言葉に翻訳された情報である。

2.3 意思決定の評価

気象リスクの定性的マネジメントにおいては、意思決定は気象情報によってなされるわけだが、意思決定の当事者は気象情報の精度を正確に知っているわけではない。それどころか、まるで知らないか関心がないということさえある。「当たればよい」、これはしばしば精度への無関心に対する裏返し表現である。「当たればよい」というのは神頼みにもいえることだが、神仏のご利益を検証してみようとするひとはいないのである。

気象情報の不適切な検証の古典的な例としてフィンリー問題が挙げられる。これは、「95%を超える精度」のトルネード予報をめぐって1890年代に起こったアメリカ気象学会での論争である[4]。適中率というスコアを使って予報の検証がされていたのである。表2のような表を分割表と呼んでいる。適中率は、aでいえば、予報あり/実況ありの5と予報なし/実況なしの90をとともに当たりとしてその割合を示すものである。bは予報があっても実況のないことが多く、実況があっても予報のないことも多い。明らかにaに比べて劣る予報と考えられる。cはそもそも予報がない場合

表2 分割表。予報/実況の分割表と予報の適中率およびスレットスコアを(a), (b), (c)の三つの場合について示した。「適中率」および「スレットスコア」については本文中に説明がある

				実況	
				あり	なし
適中率	95%	予報	あり	5	3
スレットスコア	50%		なし	2	90

(a)

				実況	
				あり	なし
適中率	95%	予報	あり	0.5	3
スレットスコア	9%		なし	2	94.5

(b)

				実況	
				あり	なし
適中率	97.5%	予報	あり	0	0
スレットスコア	0%		なし	2.5	97.5

(c)

(不能予報)である。適中率で測れば、bはaに等しく、cの不能予報は95%を超える精度をもつという不合理なことになる。この場合の検証スコアとして適中率は不適切であることがわかる。この場合とは、「実況あり」の割合が小さいとき、すなわちまれな気象現象の場合である。この場合、予報なし/実況なしを当たりとして数えないほうがよい。スレットスコアはこれを省いたときの当たりの割合で、aでは50%、bでは9%、cでは0%となる。トルネードはまれな現象なのでスレットスコアを使って検証されるべきだったのである。予報ごとに適切な検証が行われているかどうか、アメリカ気象学会での論争から100年以上たった今でも、これは笑いごとではないのである。

だが、情報の品質の良し悪しを知るためにだけ検証があるのではない。予測情報は不確実な情報であって、正確さの程度、不確実性の程度を直視することができなくては、定量的リスク・マネジメントは始まらないのである。このとき大事なのは、当たるかどうかだけではなく、当たる程度についての情報である。この点で、確率予報は、定量的リスク・マネジメントに適した情報であるといえる[5]。ほかならぬ確率値が不確

実性の程度を表現しているからである。確率予報は、未来の天気に関する情報に本来内在するはずの不確実性を陽に表現しており、ユーザはそこから意思決定に適した形で情報を引き出すことができる[6]のである。

定量的マネジメントにおいては、気象情報だけでなくリスク情報に対しても適切な検証がなされる。リスク・マネジメントにとって情報は、気象情報でありリスク情報であれ、手段ではあっても目的ではない。意思決定の成果が最終的な評価の対象である。情報の良し悪しも、結局のところこの点に照らして決まるものである。定性的リスク・マネジメントにおいては、意思決定の評価はないか、あっても印象による評価にとどまる。これは、リスク・マネジメントの目標がまだ定量的に明確になっていないからである。定量的マネジメントのためには、リスクに伴う損失の範囲と、リスクに関係するコスト/ロス構造が定量的に確認されていなければならない。意思決定の評価尺度はそれを前提にして、政策的価値付けを経て決まることになる。この評価尺度によってリスク・マネジメントの効果が評価され、用いる情報と意思決定のルール最適化、コスト/ロス構造の見直し等に可能性が広がっていくのである。

3. 気温の確率予報を用いたリスク・マネジメント

この節では、電力会社の需給運用業務に適用した定量的リスク・マネジメントのモデル[7]を紹介する。需給運用における主な問題は日ピーク需要（以下ではこれを単に「需要」と呼ぶ）の予測である。需要は最高気温に依存するところが大きい[8]。ここでは議論を簡単にするために、需要は最高気温だけによって決まるものとする。さらに簡単のために、需要は供給エリアを代表する1都市の最高気温によって決まるものとしておく。

電力会社は最高気温予測値によって需要を予想し供給力を用意する。電力は各瞬間ごとに需要と供給が一致しなければならない、という点でほかの商品と違う著しい特徴をもっている。図3に示したように、最高気温予報が高めにはずれると供給力の過剰が生じ、これは熱効率の低下となって余分のコストに帰結する。反対に最高気温予報が低めにはずれると供給力の不足が生じ、これは信頼性への打撃という形のロスとなる。

最高気温予報の誤差分布はほぼガウス分布で左右対称なので、予想したピーク需要にあわせて供給力を用

意することになると、2回に1回は供給力が不足してロスを出すことになる(図4)。ロスの影響は大きいので、電力会社は一定の予備供給力(以下、「予備力」と略す)を用意する。この予備力を保持する必要性は気温予報の不確実性によって生ずるもので、気温予報が確実に当たるものならばいなくなる(ほかには不確実性の因子が存在しないものと仮定している)。リスクの範囲をこう特定したとき、これにかかわるコスト/ロスは次の項目になる。

- 1) 信頼性への打撃という形のロス (L)
- 2) 予備力を保持するコスト (C_R)
- 3) 熱効率の低下による余分のコスト (C)

これらの和をマージナル・ロス M と呼ぶことにする。

$$M = L + C_R + C$$

M がこの場合のリスク、すなわち気温予報の不確実

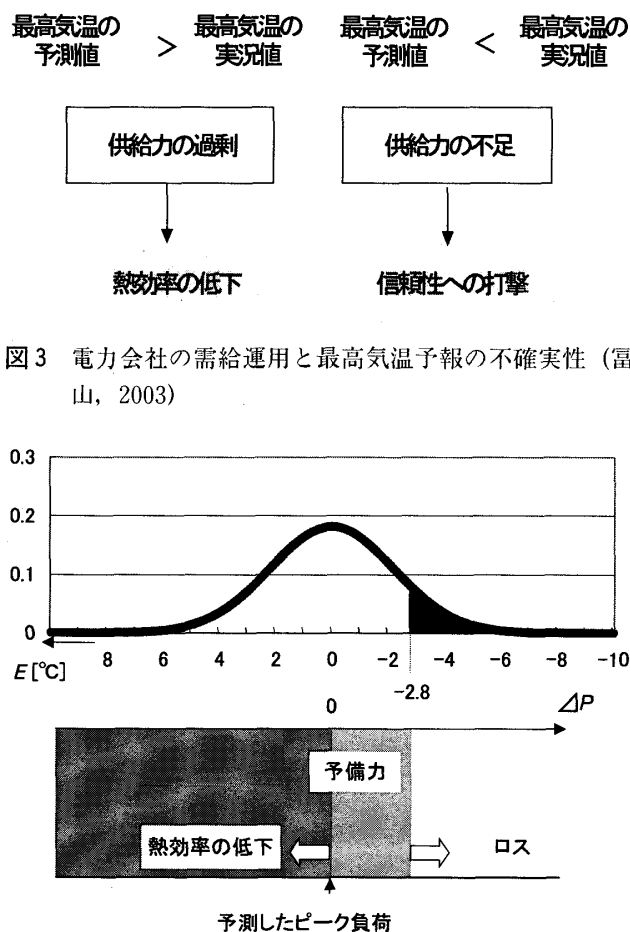


図3 電力会社の需給運用と最高気温予報の不確実性(富山, 2003)

図4 気温の誤差分布とコスト/ロス(富山, 2003). 上側は気温の誤差分布で、横軸の誤差 E は左側を正としている。右側の黒く塗りつぶした部分は危険率を表す。下側は需要の予測に対する超過分 ΔP とコスト/ロスの関係を示す。上側の図の横軸 E と下側の図の横軸 ΔP とは対応しているが、正の向きは逆となる

表3 気温の確率予報 (富山, 2003). 表で, 例えば $T=30^{\circ}\text{C}$ の下方積算確率が 94%で上方積算確率が6%とは, 最高気温が 30°C を下回る確率が94%で 30°C 以上となる確率が6%と予報していることを意味する. また, 危険率が上8%で $T=29.5^{\circ}\text{C}$ とは, 上方積算確率を8%としてもつ気温が 29.5°C であることを意味する

最高気温の確率予報		2001年 7月 12日										
$T[^{\circ}\text{C}]$		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
下方積算確率[%]		0	0	0	0	1	3	6	12	23	38	
上方積算確率[%]		100	100	100	100	99	97	94	88	77	62	
$T[^{\circ}\text{C}]$		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
下方積算確率[%]		38	54	68	80	88	94	97	99	99	100	
上方積算確率[%]		62	46	32	20	12	6	3	1	1	0	
危険率[%]	下5	下8	下10	上10	上8	上5						
$T[^{\circ}\text{C}]$		19.8	22.3	22.6	29.1	29.5	30.2					

性に伴うリスクの範囲である. リスク・マネジメントの成果は M の大小によって評価することができる.

所与のコスト/ロス構造に対して, 予備力の大きさは最高気温予報の誤差統計を用いて最適化することができる. 10 電力会社の平均程度の規模の架空の電力会社 X を想定し, コスト/ロス構造を決める因子を与えて計算してみると, 誤差の標準偏差が 2.2°C の場合, 片側危険率 (積算確率) 8%に当たる -3.0°C (誤差は予報-実況と定義する) の誤差にそなえなければならないことになる. 気温と需要との関係から, 危険率8%の予備力がわかる. この場合は1,200 MW (メガワット) である. これが, 誤差統計を用いて最適化された予備力である. ほかの情報がないとすれば, この大きさは毎日固定で運用することになる.

節2で述べたリスク情報とは, この場合, 予備力に関する情報である. 誤差統計によって得られた1,200 MWの予備力を日々用意するとなると, これは多くの場合に大きすぎ, 比較的小さい場合には, これでも足りない. そこで, 気温の確率予報 (PFT: Probability Forecast of Temperature) によって予備力に関する別の情報を得ることを考えるのである.

表3にここで用いたPFTの予報例を示した. これによって「翌日の最高気温が 30°C 以上となる確率」や「上方積算確率を8%としてもつ気温」を知ることができる. この場合も備えるべき危険率を仮に8%とすると, これに対応する気温誤差は, 誤差統計の場合のように -3.0°C で一定ではない. それによって予備力も1,200 MWで一定ではなく, 毎日違った値となる. そこで, 予備力に関する意思決定においてPFTを用いた場合と誤差統計を用いた場合とを, 上記のマージナル・ロスという尺度を用いて定量的に比較して

表4 PFTと誤差統計を用いた意思決定のマージナル・ロス (富山, 2003). D_1 日と D_2 日の例

(a) D_1 日 (需要の予測に対する超過分: 1,600 MW)

	予備力 [MW]	L[k¥]	CR[k¥]	C[k¥]	M[k¥]
PFT	1,720	0	3,440	240	3,680
誤差統計	1,200	22,000	2,400	0	24,400

(b) D_2 日 (需要の予測に対する超過分: 440 MW)

	予備力 [MW]	L[k¥]	CR[k¥]	C[k¥]	M[k¥]
PFT	800	0	1,600	720	2,320
誤差統計	1,200	0	2,400	1,520	3,920

みる.

表4に D_1 日と D_2 日の例を示した. D_1 日には最高気温予報が大きく低めにはずれたため1,600 MWの予備力が必要であった. PFTはこれをカバーしているが, 誤差統計によって最適化された予備力では不足するためロスが出ている. マージナル・ロスはPFTのほうがはるかに小さい. D_2 日には最高気温予報はやはり低めにはずれたが誤差は小さく, 440 MWの予備力があれば足りた. 誤差統計はこの場合も1,200 MWであるが, PFTはこれより小さめの予備力を指示したため, マージナル・ロスはこの場合もPFTのほうが小さくなっている.

この2事例は, もちろん, 典型的な成功事例にすぎない. 図5に夏季3ヶ月間の平均値を示した. 日平均マージナル・ロスはPFTが5,190千円, 誤差統計が6,920千円で, PFTを用いることによって約25%の削減ができることになる. なお, PFTの場合は危険率8%が最適であるとは限らないので, 7%と10%についても同じ期間の日平均マージナル・ロスを計算し

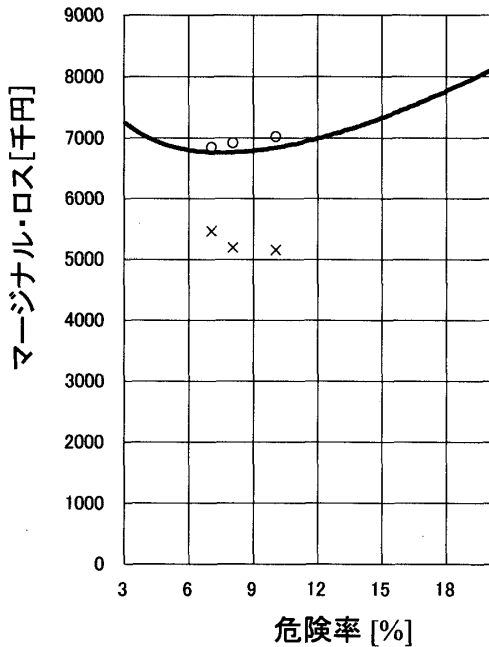


図5 日平均マージナル・ロスの危険率に対する依存関係 (富山, 2003). 2001年7月から9月の3ヶ月間の平均値. ×印がPFT, ○印が誤差統計. 実線はマージナル・ロスの期待値で参考のためにあわせて示した

てあわせて図に示した。

このように意思決定の定量的評価を行うためには、気温予報の不確実性にかかわるリスクの範囲を特定して定量化してあることが前提になる。気温の確率予報は通常の天気予報と違って、わかりにくい情報である。しかし、これは必要な予備力というリスク情報を得るために処理される情報であって、この数値をながめて意思決定するわけではないのである。

4. まとめ

気象情報の普及にもかかわらず、それをを用いて意思決定をするユーザ側のリスク認識は多くの場合神話的段階や主観的段階にある。ここでは、節2で気象リスクの定量的マネジメントへの道を、主観的リスク認識一定性的リスク・マネジメントと科学的リスク認識一定量的リスク・マネジメントとを比較しながら展望した。節3では気温の確率予報を用いた定量的リスク・マネジメントのモデルを提示した。

ここで論じた問題は気象学や予測技術の問題ではなく気象情報の利用技術に関する問題である。Dutton [9]は、気象サービスの新時代にとっての最も重要な挑戦は、科学や技術であるよりは経済と政策であると述べている。気象現象からリスクまでの連鎖の過程で、一方の端である気象現象については気象学という科学にもとづいて情報が作られる。他方の端には情報のユーザであるリスクにかかわる意思決定の当事者がいるが、こちらに近いところで、利用の科学が求められる。利用の科学の成立にとって困難の焦点は、気象学、災害科学から政策科学、経営学までを貫く学際的研究である。だが、気候変動と社会の災害に対する脆弱性を考えるとき、これは急務でもある。気象情報の利用が科学となるとき、利用の科学は気象学と拮抗し、気象学に新たな要請を突きつけるようになるだろう。そのとき気象学にとっても豊かな発展の時代が来るはずである。

参考文献

- [1] Smith, K., 2001: *Environmental Hazards*, 3rd ed, Routledge.
- [2] 気象庁予報部, 2003: 平成15年度数値予報研修テキスト, 気象業務支援センター.
- [3] 水谷武司, 2002: 自然災害と防災の科学, 東京大学出版会.
- [4] Murphy, A. H., 1996: The Finley affair: a signal event in the history of forecast verification. *Weather and Forecasting*, Vol. 11, 3-20.
- [5] 立平良三, 1999: 気象予報による意思決定, 東京堂出版.
- [6] Wilks, D. S., 1995: *Statistical methods in the atmospheric sciences; An introduction*, Academic Press.
- [7] 富山芳幸, 2003: 気温の確率予報を用いたリスク・マネジメント, 天気, Vol. 50, 175-187.
- [8] 山本博士・増川隆久, 1999: 気象と電力需要予測, 電気評論, Vol. 84 (Dec), 19-22.
- [9] Dutton, J. A., 2002: Opportunities and priorities in a new era for weather and climate services. *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 83, 1303-1311.