

対流雲からの降雨に関する知識を有する 人工知能による洪水制御支援手法の開発

Severe Rainfall Prediction Method Using Artificial Intelligence
Based on the Knowledge of Convective Cloud Processes

大石 哲¹・池淵 周一²・小尻 利治³・舛田 直樹⁴

Satoru OISHI, Shuichi IKEBUCHI, Toshiharu KOJIRI and Naoki MASUDA

¹正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所水資源研究センター (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

²フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所水資源研究センター (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所水資源研究センター (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴学生会員 京都大学大学院工学研究科 修士課程 (〒 606-0081 京都市左京区吉田本町)

The severe rainfall prediction method using artificial intelligence which simulates the act of weather forecast experts who are well versed in the local weather is proposed in order to support the flood control.

Under the condition that the system does not take the place of the numerical weather forecast, the objectives of development of the system are as follows; i) to forecast severe rainfall in fine grid scale by consideration of subgrid phenomena which are difficult to be expressed in numerical models, and ii) to make a real-time explanation of the important causes of severe rainfall to river managers.

Then, the subsystems of the SRAI are developed and discussed in terms of their performance. The accuracy of the system was 80 % for forecast of two hours ahead rainfall over 10mm/hr. The system shows the important initial conditions for severe rainfall effectively using backward reasoning.

Key Words : *severe rainfall, forecast, expert system, rule-based system, convective cloud*

1. はじめに

近年、洪水災害を語る上で局地的な豪雨の生起という言葉を使用することが多く、それは1998年に新潟県および茨城県にて生起した一連の洪水災害の報道によって、広く一般市民にも知られることとなった。局地的な雨が災害をもたらすことを防ぐためには、あらかじめ降雨生起の場所と規模を予測することが肝要であり、それを短時間降雨予測と定義することができよう。この短時間降雨予測手法の一つとして、本研究では地域の気象に精通した気象予報士が局地的な降雨の生起・発達・停滞を予測する様子をシミュレートして降雨予測を行う洪水制御支援システムの開発を目的とする。すなわち、このシステムの開発を通して観測や数値計算によって得られた気象学的な知見をルールベースに取り込んで活用する方法を提案するものである。

筆者が河川管理者とのインタビューを通じて得た、短時間降雨予測を基礎とする実時間洪水制御支援システムに期待する機能として、(1) 正確な予測を行うこと、

(2) 予測を導く手法が理解可能であり、実時間で予測値の妥当性を判断することができること、(3) 入出力など予測以外の煩雑な作業からは解放されていることがあげられる。

予測精度に関して、洪水制御を支援するための短時間降雨予測手法として、6時間程度の予測先行時間をもって流域内の定量的な降雨の時空間分布を出力することができるものが理想であるとの回答を得た。しかし、対象としている現象に対する現時点での理解が進んでいないことや、実時間での情報収集体制および計算機資源の問題からその実現は困難である。そこで、本研究で開発する短時間降雨予測手法には次の2つの制約を設けた。すなわち、予測対象を洪水制御を要するような強雨に限定し、そのような豪雨の生起時間・生起場所、発達、衰弱という定性的な予測を行うことにした。これらの2つの制約があっても、例えば急激な降雨の立ち上がりによる操作遅れを解消すること、適切に降雨のピークを判断して速やかに次の降雨に備えることといった、洪水制御に必要な降雨予測を行うこ

とはできると判断した。

予測手法の理解可能性について、気象予報士が河川管理者と会話を持ちながら予測の原因を説明し、予測誤差を修正する様子をシミュレートする方法として、降雨予測に至った最も重要な、すなわち感度の高い初期条件を提示し、それに誤りがあると判断すれば、その初期条件を変更することで予測の精度・信頼度を向上することを実現した。

上述の機能を満たす洪水制御支援手法として、情報工学的推論手法を用いた強雨予測システム（Severe Rainfall prediction system using Artificial Intelligence, SRAI）を提案する。

本手法では、観測、あるいは数値計算された気象変数をしきい値で2値化したものを初期値として用い、強雨をもたらす対流雲の生起、発達、停滞の定性的メカニズムをルールとして蓄えた推論システムを用いて短時間降雨予測を行う。すなわち、初期値の組み合わせによって選択されるルールから、対流雲の内部で新たな気象要素が生成あるいは消滅する過程を推論して最終的にその対流雲から強雨が降るか否かが予測される。2値化の際のしきい値は強雨と定義した時間降雨量と降雨毎の雨の特性によって変化するので、しきい値の決定は予測の前に予備予測を行って、その結果と実際に観測された降雨の時空間分布を比較することで行う。

予測の説明は、予測結果に対し、初期値の組の中でその予測結果を導いた最も感度の高い初期値を後ろ向き推論によってたどることにより、初期値から予測結果に至った推論過程を明示することで実現する。

2. 数値計算による降雨予測手法の中での本手法の位置づけ

予測精度、予測結果の妥当性の検証について、従来から行われている数値計算による短時間降雨予測手法と本手法の比較を行う。ここで、メソβスケールの現象を解像する数値モデルを以下では狭領域モデルと呼ぶ。狭領域モデルは10km程度のグリッドスケールを有しているが、本手法で表現しようとする5km程度の解像度を持つ降雨分布を表現できるわけではなく、50km程度のスケールの雨域を表現することができる。しかし、日本の山岳域での河川管理には分水嶺を境界としてどちらに雨が降るのかを知る必要があるため、50km程度のスケールの雨域では解像度として十分でない場合がある。したがって、雲を構成する粒子の動きを予測する本手法の有効性が示されるのである。

また、狭領域モデルでは、初期値導入後6時間程度は降水現象がうまく表現できないというスピン・アップ問題が生じる。さらに、狭領域モデルでは、モデルが

表現しているスケールより小さな現象を取り込むことは容易ではない。この問題を本手法では、定性的な情報を扱うことによって解決している。すなわち、小さなスケールの情報であっても、注目している現象に大きな影響を及ぼすことがわかっていれば、それを定性的な初期値あるいは知識として、予測に取り入れることが可能である。

狭領域モデルは、因果関係がわかっていないもの同士の因果関係を新たに発見することや、ある現象が別の現象に与える影響を詳細に定量的に考察することが可能である。これはルールベースを基礎とした本手法では望むことができないものである。一方、狭領域モデルと計算機が著しく発達することによって、本手法が目指した5km程度の解像度を持つ降雨分布を実時間で予測する数値予測モデルが実現することがあろうが、その予測結果を実時間で解釈し、因果関係をつかむことは極めて専門的な気象学の知識を必要とし、また5km程度の解像度ともなれば、数値モデルが出力するデータの量は天文学的な数字になる。その際に、数値予測の結果を解釈し、説明する本手法の方法が、河川管理者が使える予測情報の提供に対して重要になると考えている。

3. 本手法の概要

情報工学的推論手法を用いた強雨予測システム（SRAI）は図-1に示すように、メソスケール大気診断システム、定性積雲モデル、雲間相互作用モデル、TMS(Forbus and De Kleer¹⁾)による精度・信頼度向上システムの4個のサブシステムからなる強雨予測システムである。SRAIの中で一連の推論等を行って出力された予測結果を1時間後の降雨予測結果とする。それは、小倉²⁾や高橋・阿波田³⁾の数値計算による対流雲の成長過程のシミュレーションにより1個の対流雲の生起・発達・消滅のサイクルは約1時間であり、大石ら⁴⁾によれば、それ以上続く降雨は1個の雲が停滞していることによって生起するものではなく、山岳の標高および水平規模と風のシアの関係から対流雲が次々に同一地点に発生して生起するものであるとの知見から決定した。

大石ら⁴⁾は雲を解像するスケールの数値モデルを用いて豪雨時の対流雲の挙動を解析しており、その中で雹が生成し、運搬され、落下して生起する豪雨をシミュレートすることが重要であるとの結論を導いている。それを本降雨予測手法の中で実現するために大気を上から上層、中上層、中下層、下層の4層に分類する。この分類はRSM (Regional Spectral Model) のGPV (Grid Point Value) の気温プロファイルを用いて行われる。上

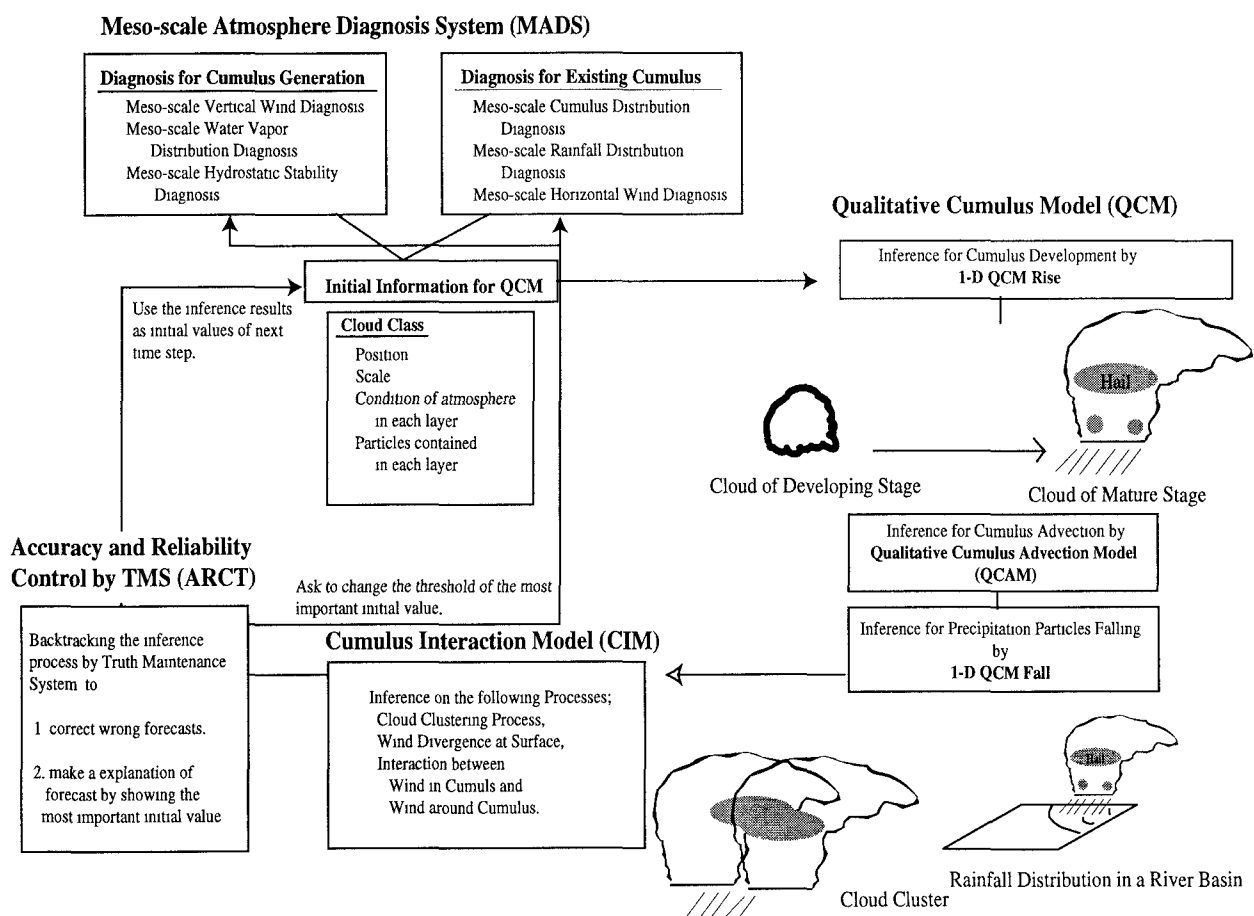


図-1 情報工学的推論手法を用いた強雨予測システムの全体像。

層と中上層を分けるしきい値は水滴が全て凍結する気温として -15°C 層を用いた。中上層と中下層を分割するしきい値は大きな水滴である雨粒が全て凍結する気温として -4.5°C 層を用いた。中下層と下層を分割する高度は雲底高度とした。このような気温による高度分類により、それぞれの層で存在する降水粒子が決定される。すなわち、上層には氷晶と霰が存在し、それらが衝突併合して雹が生起する。中上層には氷晶、霰、過冷却の雲粒、それらの接触凍結や着氷によって生ずる雹が存在する。中下層には雲粒や雨粒が存在する。下層には中下層から落下してきた雨粒だけが存在し地上に降雨をもたらす。

(1) メソスケール大気診断システム

メソスケール大気診断システム (Meso-Scale Atmosphere Diagnosis System, MADS) は観測あるいは数値計算された大気の状態を、しきい値による2値化を通してシステムが初期値として必要とする定性情報に加工する役割を果たす。MADSは対流雲が生起する条件を診断する部分と、既に存在している雲の分布を診断する部分に分かれる。前者には、対流雲のトリガー

となる鉛直風が、水平風や地形の影響によって生ずる様子を診断するメソスケール鉛直風診断、水蒸気の供給状態を診断するメソスケール水蒸気分布診断、大気の静力学的安定度である対流不安定を診断するメソスケール大気安定度診断が含まれる。後者には、雲頂高度から対流雲の分布を診断するメソスケール積雲分布診断、レーダー雨量計から雨域分布を診断するメソスケール雨域分布診断、水平風が地形の影響によって変化する様子を推論するメソスケール水平風診断が含まれる。以下、それぞれの診断システムの概要を述べる。

メソスケール大気安定度診断システムは、GPVを用いて大気の静力学的安定度である対流不安定を診断するものである。これは、浅井⁵⁾の強雨の実体に対する知見をもとに、雲を4層に分けて考える本手法においては、対流不安定の考え方で大気の静力学的安定度を表すのが適切であると考えたためである。具体的には、湿球温位 θ_w を用いて $\partial\theta_w/\partial z$ によって対流不安定を判断している。

メソスケール水平風分布診断システムおよびメソスケール鉛直風分布診断システムは、GVPの風とOishi and Ikebuchi⁶⁾による定性推論を用いた風の挙動診断手

法を用いて行われる。上空の風は GPV の風をそのまま用いて、下層および中下層についてのみ山岳地系の影響を診断する。

メソスケール水蒸気分布診断システムは GPV を用いて相対湿度がしきい値を超えていたら十分な水蒸気があると判断し、そうでなければ十分な水蒸気が存在しないと判断する。メソスケール積雲分布診断システムは GMS（静止気象衛星）の赤外線輝度データを用いて得られた輝度温度を GPV の気温を用いて高度変換し、雲底高度から雲頂高度までのそれぞれの層に降水粒子が存在すると診断する。

メソスケール雨域診断システムはレーダーを用いて雨域分布を診断するものである。本システムで適用している仰角固定レーダーでは、推論領域上空 2km-3km の雨粒を見ている。すなわち、中下層部の雨粒の存在を診断していることになる。したがって、レーダー上で強雨が存在するところでは、中下層部に雨粒が存在すると診断する。

(2) 定性積雲モデル

定性積雲モデル（Qualitative Cumulus Model, QCM）は 1 個の対流雲の生起・発達過程をできるかぎり雲物理過程に忠実にモデル化したものである。QCM ではルールベース内に定性的に表現された雲の微物理過程と力学・熱力学過程をもち、初期値とそのルールベースの条件部を比較して適合するルールを実行することによって、降水粒子・熱・水蒸気などを表現する定性的変数の存在・生起・成長・相変化を定性的に推論する。知識ベース内の推論ルールは、「(ルール名 (条件部) (結果))」として表現されている。

定性積雲モデルに含まれる微物理過程は、凝結核の活性化、凍結、昇華、着氷、衝突併合、接触凍結、融解、蒸発からなる。凝結過程は重要な微物理過程であるが、強雨の予測において衝突併合による雨滴の成長を重要視するために取り入れていない。また、力学・熱力学過程は、大気不安定の顕在化、潜熱の放出・吸収、熱による浮力、対流による降水粒子と気塊の運搬、収束、発散、落下、摩擦による鉛直流、移流からなる。

(3) 雲間相互作用モデル

定性積雲モデルは鉛直 1 次元のモデルであり、生起・発達を推論された雲は各層の風によって水平方向に移動、すなわち移流する。移流は対流雲のスケールが 2km から 10km であることを考慮して、5km の格子点間隔で計算を行うことにした。雲間相互作用モデル（Cloud Interaction Model, CIM）は移流された対流雲同士が衝突した場合に、それらが合体する様子を推論したり、地形の影響によって風が収束している地点や発散して

いる地点があれば、そこから上昇風や下降風の生起を推論するものである。すなわち CIM は QCM の推論より副産物として生成された降雨生起後の大気安定度、降水粒子の存在、風の定性的状態を用いて、次の時間の予測を行うための初期値の組を作成するものである。

(4) TMS による予測精度および信頼度向上システム

Truth Maintenance System (TMS) による予測精度および信頼度向上システム（Accuracy and Reliability Control by TMS, ARCT）は、予測結果にとって最も重要な、すなわち最も感度の高い初期値を検索するためのものである。

実際の予測を行う前に初期値を定性値に変換するしきい値を決定するための予備予測では、予測降雨と実測降雨が定性的に異なっている場合に、ARCT で検索された感度の高い初期値のしきい値を変化させることを MADS に要請した後、再度降雨予測を行うことを繰り返して最適なしきい値を決定する。実時間予測の際には、予測開始より 1 時間後に入力される新たな実測降雨情報と予測降雨分布とが ARCT において比較され、予備予測と同様の方法で最適なしきい値が決定された後、新たに観測された気象情報やあるいは更新された数値気象予測結果を用いて新たな降雨予測を行うことで、降雨予測を連続して行うことが可能となる。この方法を用いることで予測誤差が発生した際に以後の降雨予測に悪影響を及ぼすことを防ぐことも可能となる。

本研究では、ARCT によって降雨予測の結果についての説明を行うことも提案している。その方法を図-2 を用いて説明する。ここで、図-2 の点線部より上に記載されている物理現象や物理変数は初期値であり、点線以下では定性積雲モデルによって推論された物理過程が矢印で順次示されている。図-2 の太線部のように結果に至る際に重要であった推論過程を示すことにより次のような説明が可能である。すなわち、中上層に霰が存在し、中下層には十分な水蒸気があり、かつ対流不安定にあるために、中下層では凝結および潜熱の放出が行われて上昇風が生起する。この上昇風によって中下層の降水粒子が中上層に運搬され、そこにもともとあった霰との間で着氷過程が生起するによって電ができ、それが落下して融解していることが強雨の原因となっている。

本研究においては TMS の中でも最も簡単な Forbus and De Kleer¹⁾による Justification based Truth Maintenance System (JTMS) を用いた。JTMS は定性積雲モデルの推論過程をデータベースの中に蓄えて、バックトラッキングと言われる後ろ向き推論を行うことによって感度の高い初期値の候補を抽出し、その候補の 1 つを初期値集合に含めないでリトラッキングとい

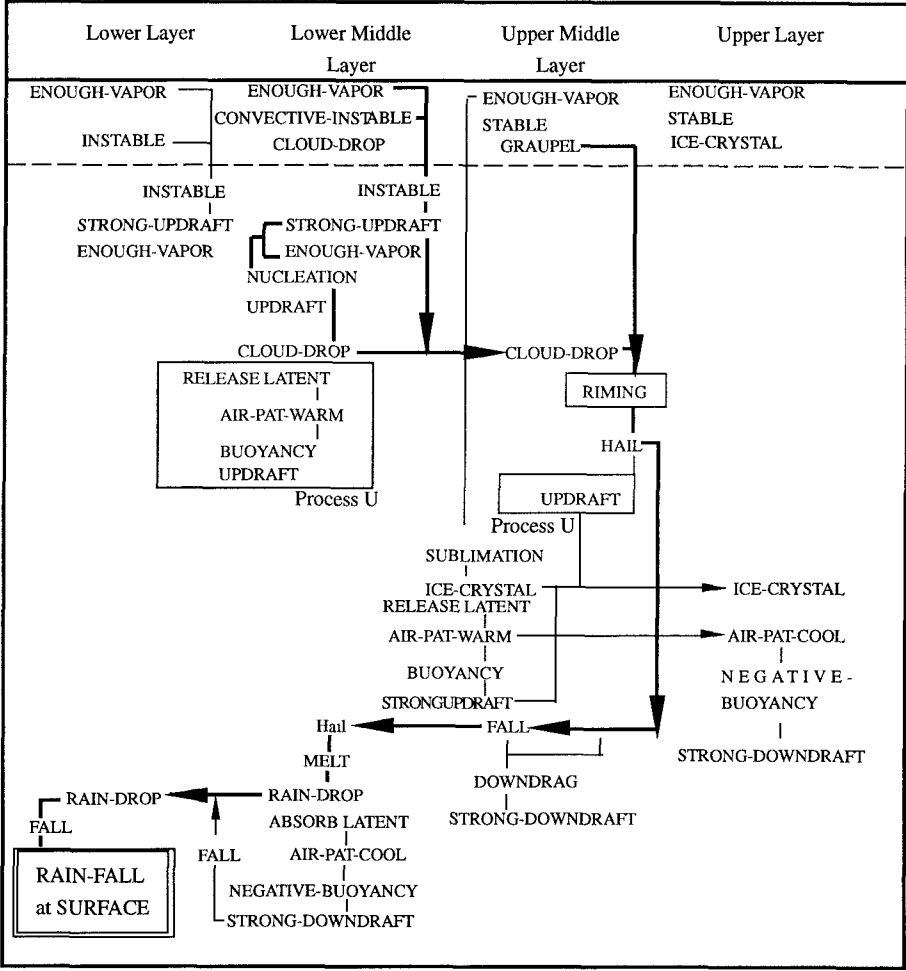


図-2 定性積雲モデルの推論過程を示した例。

表-1 SRAI の予測結果と実際の降雨強度の比較

領域の一部に強雨があった事例				
	1 時間後の予測結果		2 時間後の予測結果	
実測雨量強度	10mm/hr 以上	10mm/hr 未満	10mm/hr 以上	10mm/hr 未満
10mm/hr 以上	7	1*	1	0*
10mm/hr 未満	1*	1	0*	1
領域全体に強雨がなかった事例				
10mm/hr 以上	0	0*	0	0*
10mm/hr 未満	2*	8	2*	0

われる前向き推論によって再び推論を行うことで、推論結果を変えるような感度の高い候補を探し出すものである。JTMS は最も簡単な TMS であるため、a でない ($\neg a$) という論理値 (否定) を扱うことができない。すなわち、a という論理値がないことを a でないとするという性質を持っている。そのため、not_a という値を作って否定も扱うことができるようにした。

4. 本手法の性能

(1) 降雨予測精度

まず、TMS による予測精度および信頼度向上に関するシステムを組み込むことなく、本手法にどの程度の予測精度があるかを検証した。検証に用いたのは 1996 年梅雨期の北陸地方に生じた強雨であり、強雨の定義は 10mm/hr 以上であるとした。メソスケール大気診

断システムの各しきい値は、湿球温位の鉛直勾配が負の時に対流不安定であると診断し、相対湿度 90%以上で水蒸気が十分に供給されていると診断し、レーダー反射強度をテレメータ雨量値で補正して 10mm/hr 以上であれば強雨域があると診断するように設定した。降雨予測領域である 30×35 (km²) の一部に強雨があった場合と、領域全体で 5mm/hr 程度の雨があり強雨がなかった場合の 2 通りを用いて、それぞれ 2 時間後までの予測の検証を行った。表-1 は予測結果を領域内に存在する 10 台のテレメータ雨量計と比較して対応する格子点の数を示したものである。*がついたカラムは予測誤りのあった格子点の数を表している。2 時間後の比較格子点が少ないのは、降雨が移流によって予測領域外にでてしまうためである。表-1 に示すように 80% 程度の格子点に対して強雨の有無を正確に予測できた。降雨予測領域の一部に強雨があった事例の予測に対しては、推論過程における降水物理過程を図-2 の様に図示して、強雨があると予測した場所とない予測した場所での違いを比較し、QCM が降水物理過程にしたがって降雨予測を行っている様子を確認した。

推論過程を調査した結果、1 時間後の強雨予測は、初期値として与えた雨粒が移流によって運ばれることに起因していることが示された。すなわち、この場合には雨域の運動学的移動をそのまま用いていることになる。2 時間後には、地上付近に強い上昇流が生起して雨の落下を妨げている現象や、前の時間に強雨がなかった場所から移流してきた空気塊が、下層からの水滴の供給を受けるようになって降雨を生起している現象が見られた。

このように初期値を 2 値化して用い、対流性雲の発達過程をルールベースとして持つ降雨予測手法は、洪水制御に必要な降雨の生起・継続・衰弱を予測することができることが示された。2 時間の予測継続時間を長期化することによって、本手法の有効性は一層高められよう。

(2) TMS による予測精度および信頼度向上に関するシステムの性能

TMS による予測精度および信頼度向上に関するシステム (ARCT) の性能の検証は、4 層で 19 個の初期値を持つ 1 組の初期値集合を定性積雲モデルに適用した上で、ARCT で重要な初期情報を検索する方法と、しらみつぶ的に初期値を調査して重要な初期値を検索する方法を比較することで行った。後者の方法を全検索法と呼ぶ。

比較した結果、全検索法では 4 個の初期値からなる集合 A を重要な初期値集合であるとしたのに対して、ARCT では A の要素を全て含む 6 個の初期値からなる

集合 B を重要な初期値集合であると検索した。B $\cap$ -A を構成する 2 個の初期値は、降水粒子の落下を阻止する上昇風に関するものであった。定性積雲モデルの推論過程においては、この初期値 B $\cap$ -A は他の初期値から始まる物理過程によって消滅し、結果に影響を及ぼさないものである。ARCT のリトラクティングでは他の推論の影響によってこの初期値がなくなるという否定の論理が表現できないため、推論結果にとって重要であると判断している。

このように ARCT と全検索法を比較することで ARCT では見逃しなく、かつ高速に重要な初期情報を検索することが可能であることを示した。

5. 終わりに

本研究は、洪水制御を支援することを目的として、地域の気象に精通した気象予報士が短時間降雨予測を行っている様子をシミュレートするシステムについてその内容を示したものである。

まず、本システムは数値モデルでは表現できていないようなサブグリッドスケールの現象にも注目して、より細かい解像度で降雨予測を行うこと、強雨の発生に対して最も重要な初期値を検索し、それを出力することで河川管理者に対して実時間で強雨の発生要因を説明することを目指したものであることを述べた。

次に本システムを構成する基本的なサブシステムを開発し、その性能を検証した。短時間降雨予測の基本的な部分をなすシステムを用いて、10mm/hr を強雨と定義した場合に 2 時間先までの降雨を 80% 程度の精度で降雨予測することができることを示した。また、強雨に対して感度が高い初期値の組を効率よく検索すること可能となることを示した。

参考文献

- 1) Forbus, K.D. and J. De Kleer : Building Problem Solvers, Bradford Books, 1993.
- 2) 小倉義光 : 一般気象学, 東京大学出版会, 1984.
- 3) 高橋劭・阿波田康裕 : 詳細な雲の微物理過程を考慮した二次元積雲の数値実験, 京都大学防災研究所年報, 第 36 号 B-2, pp.189-217, 1993.
- 4) 大石哲・木谷有吾・中北英一・池淵周一 : 詳細な雲物理過程を考慮した豪雨に及ぼす地形の影響に関する数値実験的研究, 土木学会水工学論文集, 第 41 巻, pp.117-122, 1997.
- 5) 浅井富雄 : ローカル気象学, 東京大学出版会, 1996.
- 6) Oishi, S. and S. Ikebuchi : Inference of Local Rainfall by using Qualitative Reasoning, Qualitative Reasoning, -The Tenth International Workshop-, AAAI Technical Report WS-96-01, pp.181-190, 1996.

(1998.9.30 受付)