

# 定性的短時間強雨予測手法による 洪水制御支援手法の開発

大石哲<sup>1</sup>・舛田直樹<sup>2</sup>・池淵周一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科(〒400-8511 甲府市武田4-3-11)

<sup>2</sup>正会員 修(工) 国土交通省技官 江戸川工事事務所(〒278-0005 野田市宮崎134)

<sup>3</sup>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)

洪水制御において迅速かつ確実な意思決定を行なうためには、短時間降雨予測手法や洪水制御支援手法による支援情報が不可欠である。一方、定量的な短時間降雨予測では、計算時間と情報量が膨大なため、対流現象を中心とするメソスケールで生起する豪雨の実時間予測を行なうことは困難である。そこで、情報工学的推論手法を用いて洪水制御を必要とするような強降雨の分布・停滞を定性的に予測する手法を開発し、実時間洪水制御支援に必要とされる6時間程度先までの予測を行なうとともに、予測の完全自動化を実現して、実際の河川管理現場への適用に供する実用的なシステムの開発を行なう。さらに、本手法の実流域への適用例を示す。

**Key Words** : severe rainfall, artificial intelligence, decision support, truth maintenance system, convective cloud

## 1. はじめに

日本では、洪水によってつくられた低平地に人口と資本の大部分が集中しているため、我が国における洪水制御の必要性・重要性は言うまでもない。そのため、治水ダムや多目的ダムなどの貯水池を建設することによって、洪水災害から住民の生命や財産を防御してきた。日本における治水機能を持つ多くのダムでは水門は可動型であるため、操作規則等を参照しながらも最終的には河川管理者が意志決定し、操作を行うことが必要になる。すなわち、貯水池を用いた洪水制御は流域-人間系システム<sup>1)</sup>によって目的を達成しているのである。したがって、河川管理者は洪水制御時には迅速かつ確実な意思決定を行なうことが必要となるが、日本のように急峻な地形を流れる河川は、洪水の到達時間が短いことや豪雨時に流量変動が著しく大きくなることなどの特徴があり、洪水制御における意思決定は難しい。さらに、洪水現象はそれほど頻繁に生起するものではないため、河川管理者にとって洪水制御は十分な経験を基礎にして行えるものではない。したがって、迅速かつ確実な洪水制御意思決定を行うためには洪水制御支援システムの導入が望まれている。

そのような背景から、実際の河川管理現場への適用を目的とした洪水制御支援手法の開発が進められてきた。洪水制御支援手法は大きく分けて、洪水制御に必要な降雨予測や流出予測を行うものと、予測結果や実況から適切な操作を判断するものに分けられる。後者は最適操作を推論するものと、操作規則等のデータベー

スから迅速に今後の操作手順を表示するものに分けられる。

水工学的なアプローチで降雨予測を行う方法として、中北・椎葉ほか<sup>2)</sup>は初期値場および水蒸気場が降雨予測にとって重要であることを見抜き、独特の手法でレーダー情報から水蒸気場を求め、それを概念モデルに取り込む短時間降雨予測手法を開発してきた。その方法は中北・藤井ほか<sup>3)</sup>に引き継がれ発展してきている。

また、最適操作方法を推論するものとして、例えば池淵ほか<sup>4)</sup>および小尻・池淵ほか<sup>5)</sup>は河川管理者の知識をファジイ関係で表現した洪水調節ルールを用いることで経験豊かなオペレータに類似した操作を実現できることを示した。小尻・藤井<sup>6)</sup>は動的計画法の最適解に基づく制御ルールの知識ベース化とファジイ集合による実時間操作を提案している。一方、高棹・椎葉・堀<sup>7)</sup>は洪水制御問題への知識工学的アプローチを試み、既存データ収集システムや定量的情報システムとの整合性を保持した支援システムの構成方法を検討している。また、高棹ほか<sup>8)</sup>は洪水制御に関する問題をいくつかに分解し、それを協調問題解決型システムによって統合して洪水制御支援を行う方法を開発した。さらに高棹・堀・荒木<sup>9)</sup>は洪水制御支援を行う際の指針となる操作規則を知識ベースに取り込んで、洪水制御の状況に合わせてそれを参照する推論エンジンを設計した。

このような、洪水制御支援に必要な短時間降雨予測手法や洪水制御支援手法の研究は、もちろんそれ単体でも洪水制御にとって有益な情報提供を行なうもので

あり、中北らの一連の方法<sup>2),3)</sup>はすでに河川管理現場に適用されている。しかし、これらの支援手法を組み合わせることにより、それらはさらに効果的になると考えられる。それが統合的洪水制御支援手法であると位置づける。

統合的洪水制御支援手法においても、意志決定には予測情報が必要である。ゲートの開閉を主とする貯水池操作による洪水制御を行う上で最も有用な情報は、精度の高い流出予測情報であり、日本の河川における降雨の流出形態を考えたとき、定量的降雨予測情報が流出予測の基礎情報となる。

一方で、貯水池操作を行うためにはゲートの開閉以外に適切なタイミングの判断を必要とする場面が多い。例えば、洪水警戒態勢への移行および解除、洪水調節に先立つ予備放流の実施、流入量最大までの一次調節、流入量が最大に達したと判断した後の二次調節、洪水調節の終了およびダム貯水位を制限水位まで低下させることなどである。これらの開始あるいは終了の判断のためには必ずしも精度の高い定量的降雨予測情報が必要ではなく、降雨の生起・持続・終了の時期の予測精度が高いことが望まれる。

このような背景から、本研究では降雨の生起・持続・終了の時期を精度良く予測する短時間降雨予測手法として、情報工学的推論手法を用いた定性的短時間強雨予測手法 (Severe Rainfall prediction system using Artificial Intelligence, SRAI)<sup>10)</sup>を提案するとともに、予測の長時間化および予測の完全自動化を実現して、実際の河川管理現場への適用に供する実用的なシステムを開発する。

本研究で提案する手法の特徴は、気象学的知識と定性推論・モデルベース推論手法の融合を行うことで、洪水制御に最低限必要な情報を適切な時間で予測し出力することである。ここでは、洪水制御に最低限必要な情報とは、あらかじめ10mm/hr以上であると定義された強降雨が降り始め、継続し、降り終わる時刻と場所の情報であるとし、それを定性的な降雨予測情報であると位置づけた。この強降雨の定義は変化させることができるが、本論文では一貫して10mm/hr以上を強降雨としている。また、強雨予測結果とレーダー雨量計データの実績降雨強度とを比較して、予測精度を論じる。予測が誤っているとは、強降雨域が生起すると予測した場所に10mm/hr以上の実績降雨が存在しなかった場合あるいは強降雨が生起しないと予測した場所に10mm/hr以上の実績降雨が存在した場合である。

さらに、数値計算によらない降雨予測方法である本研究では、予測結果に誤りが生じた場合に迅速かつ正確にその原因を発見して修正を行なう機能としてTMS (Truth Maintenance System)<sup>11)</sup>を導入することが可能

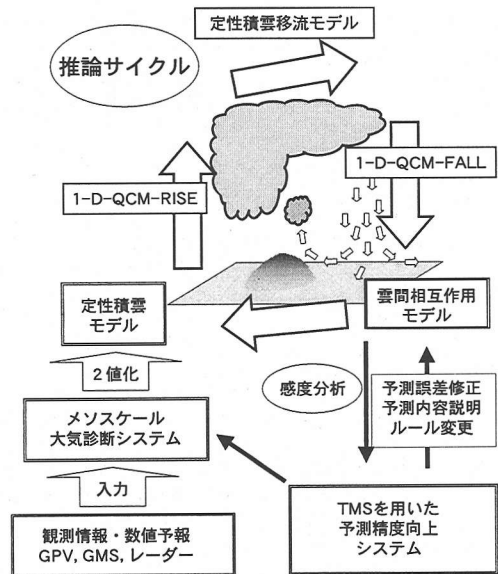


図-1 本手法の全体像

となった。これによって、予測の精度を向上させ、長時間の予測を行う基礎を築いた。同時に、TMSの導入によって数値計算による方法では困難な予測過程を出力し、それによって予測過程を説明することが可能となるような短時間降雨予測手法を開発を行った。

## 2. 本手法の概要

情報工学的推論手法を用いた定性的短時間強雨予測手法 (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による予測精度向上システムの4つのサブシステムからなるシステムであり、安価なPC-UNIX上で開発されている。

本研究では、定性推論の方法を用いているので推論という言葉を用いることがある。また、予測という言葉も用いる。ここで、推論とはルールベースに蓄えられたif-then形式のルール化された個々の物理過程をたどりながら積雲が生起、発達、消滅の様子をシミュレーションすることを指し、予測とは本システムが使用者に対して示す1時間毎の降雨予測のことを言う。

まず、予測に必要なデータについて説明する。本手法の予測のための基礎情報として、気象庁が公開しているRSM上層とRSM航空のGPV、国土交通省のレーダー雨量計の降雨強度データ、静止気象衛星ひまわり(GMS)の赤外線データを用いている。

RSM上層およびRSM航空のGPVは気象庁が領域ス

ベクトルモデル (Regional Spectral Model, RSM) を用いて数値予報をした格子点情報 (Grid Point Value) である。そのうち RSM 上層の GPV は時間間隔 3 時間、空間分解能は約 20km であり、鉛直方向は地上から 500hPa までの 5 層のものである。また、RSM 航空の GPV は時間間隔 3 時間、空間分解能は約 120km、鉛直方向は地表から 100hPa まで 12 層のものである。いずれも、主として気温、気圧、湿度、水平風速、鉛直風速の 3 次元分布データである。GPV データはオンラインで入手可能であり、客観解析値で数時間後に入手可能であり、予測値であれば実時間入手が可能である。本手法への入力のために、この RSM の GPV の時空間スケールを本研究の時空間スケールにあわせて時間的にも空間的にも線型内挿した値を用いている。

本研究では、レーダーは国土交通省淀川ダム統合管理事務所が管理する深山レーダーを用いた。深山レーダーのデータは時間間隔 5 分間、空間分解能 3km を持つ降雨強度の 3 次元分布のデータである。ダム管理者である淀川ダム統合管理事務所では実時間で入手可能なデータである。本手法への入力については、仰角固定すなわち 2 次元分布データを用いている。本研究の手法に対して、3 次元データを用いることが望まれるが、現状では多くのレーダー雨量計が 2 次元情報のみ取得可能であることを勘案し、本研究ではまず 2 次元データを用いることにした。さらに本手法では後述するように 1 時間を単位時間として予測・推論を行うので、5 分毎のレーダー雨量計データを 1 時間分積分した時間降雨量としての降雨強度を用いる。すなわち、予測開始時刻を 7 時とすると 6 時から 7 時のレーダー雨量計データを時間積分して初期情報として用いる。また、レーダーデータは予測結果の比較にも用いる。7 時を予測開始とすると 1 時間後の予測結果は 7 時～8 時のレーダー雨量計データを時間積分したものと比較する。

GMS の赤外線データは、時間間隔 1 時間で約 5km の空間スケールを持つ 2 次元データで、得られている画像から写っている点の温度が得られるものである。本研究ではこれを雲頂高度の算出に用いた。専用のアンテナを有していれば 1 時間以内で入手可能なデータである。本研究への入力としては、線型内挿によって空間スケールをあわせて用いている。

本手法では、気象学的知識に基づいた雲物理過程の推論を行って実時間強雨予測を行うために、実時間で得られる気象情報をなるべく活用することにした。これらの気象情報は定量的な情報として入力されるので、定性推論<sup>12)</sup>の方法によって適切なしきい値で定性情報にした。この際に気象現象特有のゆらぎが、一律のしきい値の設定を難しくしており、ファジイ推論を取り入れて定性情報とする方が適切であろう。しかし、TMS が

ファジイ推論を取り扱うことが現状では困難なことに同時に、TMS による予測精度向上システムがメンバーシップ関数を自動設定することが困難であることから、本研究ではしきい値で 2 値化する方法を採用した。

次に、予測の時空間スケールを説明する。予測は、対象流域に格子状の推論領域を設定して、各格子点毎に、ここでは 10mm/hr 以上であると定義された強降雨が生起するか否かを出力することで行う。1 つの格子点が代表する空間の大きさは 5km × 5km である。このような格子点スケールを決定した理由は、概ね 2km から 10km であるといわれている降水セルとしての積雲のスケールを考慮したこと、および河川管理者にとって洪水制御を行なうにあたり最も必要とされる情報であると考えたからである。レーダーなどで見られる実際の強降雨域にはもっと大きなスケールのものも存在しているが、それらも 2km～10km 程度の個々の降水セルから成り立っており雲クラスターと呼ばれる。また、小倉<sup>13)</sup> や高橋・阿波田<sup>14)</sup> の数値シミュレーションによれば、1 つの積雲は約 1 時間程度の時間スケールで成長・衰弱・消滅を繰り返す。したがって、本手法は積雲のスケールを考慮して 5 km × 5 km のスケールにすることでこれらの現象を表現できると考えた。

本手法の水平方向の格子点スケールは 1 つの降水セルとしての積雲のスケールに対応していることから、本手法の時間スケールは 1 つの降水セルの発生、発達、衰弱、消滅の時間スケールである 1 時間を用いることにした。1 時間分の雲物理過程を推論し 1 時間単位の強降雨の生起を予測すること、これを 1 ステップと呼ぶ。予測開始から 2 時間後以降の予測については、推論された結果を雲間相互作用モデルによって次の時間の定性積雲モデルの初期情報とする。このような推論過程を 6 回すなわち 6 ステップ繰り返すことで 6 時間後の強雨生起・分布予測ができることとなる。

また、予測に用いる本手法の鉛直方向のスケールを説明する。大石ほか<sup>15)</sup> 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。それを実現するため、本手法では、大気を鉛直方向に上空から上層、中上層、中下層、下層の 4 層に分類している (図-2)。上層と中上層を分ける高度は水滴が全て凍結する気温として -15℃層、中上層と中下層については雨粒がすべて凍結する気温として -4.5℃層、中下層と下層の境界には雲底高度として持ち上げ凝結高度 (LCL) を用いた。このような高度分類により、各層に存在できる降水粒子を決定することができる。

つづいて、本手法の各サブシステムを説明しながら、

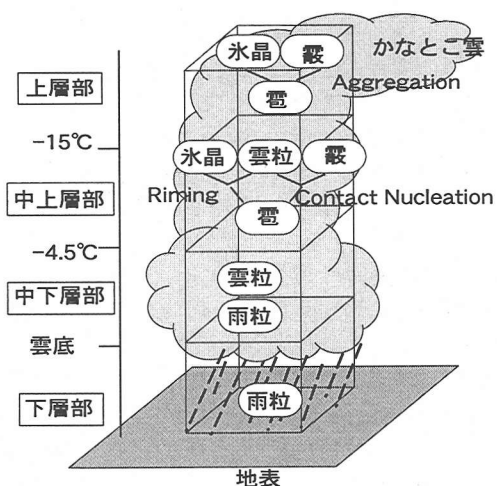


図-2 大気の高区分類と存在する降水粒子

本手法の予測の流れを説明する。まず、概略としては、本手法への入力情報である GPV, GMS およびレーダーのデータをメソスケール大気診断システムに入力する。メソスケール大気診断システムでは入力情報を加工して、各格子点毎、各層毎に2値化した大気情報を定性積雲モデルに渡す。定性積雲モデルでは、各格子点毎に降雨をもたらす積雲の生成、発達、消滅を推論すると同時に、各格子点の各層を移動させることで積雲の移動を推論し、各格子点毎に強降雨が降るかどうかを推論する。それが降雨予測結果である。

同時に、定性積雲モデルは副産物として1ステップが終了したときの大気情報を各格子点、各層毎に出力する。それが雲間相互作用モデルに入力されて加工されることで、メソスケール大気診断システムで得られたものと同様の情報を、次のステップの予測の初期値として定性積雲モデルに渡す。ここまでは1時間分の積雲の発達過程の推論と強降雨の予測である。

1時間分の推論および予測が終了すると同時に、雲間相互作用モデルで加工された大気情報は定性積雲モデルに入力されて次のステップの降雨予測が行われる。基本的にはこの繰り返しで、降雨予測を行っている。ただし、最初の予測ステップでは、予測を行うのではなく、1時間前の GPV 等から現状を予測して、予測結果と現状を比較して予測の間違いを探し、それを取り除くことで予測精度を高める。それを行うのが TMS による予測精度向上システムである。

### (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 (Mesoscale Atmosphere Diagnosis System, MADS) は、GPV, GMS お

よびレーダーのデータを入力情報として、しきい値による2値化を通して定性積雲モデルが必要とする定性情報に加工する役割を果たす。MADSは、予測の最初の時間ステップに対する定性積雲モデルの初期条件を供給するためのものである。MADSは積雲が生起する条件を診断する部分とすでに存在している雲の分布を診断する部分からなり、前者は、積雲生起のトリガーとなる鉛直風の生起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、空気塊が対流不安定であるかどうかを診断するメソスケール大気安定度診断からなる。後者は、雲頂高度から積雲の分布を診断するメソスケール積雲分布診断、レーダーデータから雨域分布を診断するメソスケール雨域診断、積雲の移流を診断するメソスケール水平風診断からなる。これらの診断の結果を、生起している物理過程や存在している物理量と、その高度(層)を記したリスト形式の情報にして定性積雲モデルに渡す。

以下、それぞれの診断システムの概要を述べる。

メソスケール鉛直風診断は、対流雲のトリガーとなる鉛直風の生起を診断するものである。RSM の GPV の鉛直風データを用いて、地表付近での鉛直風の生起を診断し、トリガーとして機能する強さの鉛直風の有無を出力する。

メソスケール大気安定度診断は、GPV の大気プロファイルから大気静力学的安定度を診断するものである。本手法では、大気静力学的安定度を示す指標として対流不安定に着目した。その理由は、浅井<sup>16)</sup>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静力学安定度を表すのが適切であると考えたためである。各格子点の各層において湿球温度  $\theta_w$  を求め、 $\partial\theta_w/\partial z$  が正の値であるならば対流安定、負の値であるならば対流不安定とする。

メソスケール水蒸気分布診断は、大気に十分な水蒸気供給があるかを診断するものである。GPV の湿度データを用いて、各格子点の各層の相対湿度がしきい値以上であるなら十分な水蒸気があると判断し、しきい値以下であるなら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は、すでに存在する積雲の雲頂高度およびその積雲内部における降水粒子の分布を診断するものである。まず GMS の赤外輝度温度を GPV 気温データを用いて高度変換して雲頂の高度を求める。それをもとに、雲頂高度から雲底高度までの各層にあらかじめ定められた降水粒子が存在していると診断し、その結果を出力する。

メソスケール雨域診断は、レーダー雨量計を用いて推論領域上空の雨域分布を診断するものである。レー

ダーの仰角固定データを用いて上空約 2 km ~ 3 km の雨域, すなわち大気の高層分類において雨滴と雲粒が分布する中下層部を診断する。すなわち, レーダーの降雨強度が現在強降雨と定義している 10mm/hr 以上であるならば, 中下層部に雨滴と雲粒および十分な水蒸気が存在すると診断する。

メソスケール水平風診断は, 上空に発達した積雲の移流を診断するものである。GPV の水平風データから風向・風速を求め, 積雲が生じた場合の移流速度を求める。ここで, 積雲は 1 時間の中で生起するために 15 分, 成熟するまでに 15 分, 成熟状態が 15 分, 降雨をもたらしながら衰弱するのに 15 分を要するとして, 成熟状態における雲は GPV の水平風の風向・風速と同一速度で 15 分間移動し, 別の格子点に移動するとモデル化している。

## (2) 定性積雲モデル

定性積雲モデル (Qualitative Cumulus Model, QCM) は, 1 つの対流雲の生起・発達・衰弱・消滅過程をできるかぎり雲物理過程に忠実に, かつ定性的にモデル化したものである。定性積雲モデルでは, 知識ベース内に定性的に表現された雲の微物理過程と大気力学・熱力学過程を, その因果関係にしたがって記述した定性的な多数の推論ルールを持つ。それは「ルール名 (条件節) (結果節)」の形式で表現されている。条件節, 結果節は IF - THEN 形式でいうところの IF 節, THEN 節に相当する。定性積雲モデルは状況に合わせてルールベースから適切なルールを適用してその結果を生成する事を繰り返し, 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ことで, 雲物理過程を推論する。その際に, 推論エンジンを用いて, 初期値とそのルールベースの条件節を比較し, 適合するルールの結果節を実行する。それを繰り返すことによって 1 時間での雲の発達・衰弱等を推論するものである。この推論には, 各格子点毎, 各層毎に定性的に記述された大気状態が初期値として必要である。計算開始から 1 ステップ目の予測にはメソスケール大気診断システム (MADS) によって加工された大気条件を初期値とし, 2 ステップ目以降は前ステップの定性積雲モデルの副産物としての大気条件を雲間相互作用モデル (CIM) を通して使用する。

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, 着水, 衝突併合, 接触凍結, 融解, 蒸発からなる。ここで, 凝結過程を定性積雲モデルに含ませることはしなかった。なぜなら本手法では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したためである。また, 力学・熱力学過程は, 大気安定度の顕在化, 潜熱の放出・吸収, 熱による浮力, 対流

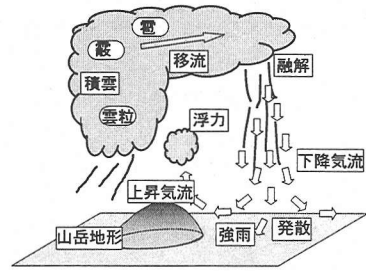


図-3 本手法で扱う現象

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。これらの物理過程は例えば Rutledge & Hobbs<sup>17)</sup> の冷たい雨のモデルとほとんど同じ物理過程を有している。

定性積雲モデルの構成は, 対流雲の生起や発達を 1 次元で表現する 1-D-QCM-RISE, 上空での対流雲の移流を 2 次元的に表現する定性積雲移流モデル, および発達した対流雲からの降水粒子の落下を 1 次元で表現する 1-D-QCM-FALL からなり, 全体として 3 次元モデルとなっている。図-3 に示すように, 1-D-QCM-RISE で推論した結果上空に生起した雲は, 定性積雲移流モデルによって移流し, 1-D-QCM-FALL によって落下し, あるものは強降雨として地上に到達することが推論される。

定性積雲モデルの出力は 2 種類ある。1 つは, 各格子点において強降雨が生起しているか否かの情報である。もう 1 つは強降雨の生起の有無に関わらず雲の発達を推論した結果, 副産物として得られる 1 時間後の大気情報である。例えば, 雲が十分発達して中下層には雲粒が十分存在するのに, 強い上昇風が生起してその雲粒が落下するのを妨げているような状態の時には, その時間ステップでの強降雨は予測されなかったが, 次のステップの予測のために, 雲粒が中下層にあること, そこに強い上昇風があることが出力される。

## (3) 雲間相互作用モデル

雲間相互作用モデル (Cloud Interaction Model, CIM) は, 定性積雲モデルによって別々に推論された 1 つ 1 つの積雲が別の積雲や周りの大気との相互作用によって生じる現象を推論するものである。推論された結果は, 次の予測ステップの定性積雲モデルの推論の初期条件となる。雲間相互作用モデルは, 1 時間毎に定性積雲モデルによって各格子点の各層毎に副産物として作られた大気情報を入力情報とし, 降水粒子の落下に伴って生じた下降風が地表に到達した場合の風の挙動や降雨後の積雲内における降水粒子の分布など

を診断したり、また、推論過程で生じたが、次の時間ステップの推論では不要となる生成物の削除を行なう。

#### (4) TMS を用いた予測精度向上システム

TMS を用いた予測精度向上システム (Accuracy Control by TMS, ACT) の機能は、予測結果として強降雨が生起したときに、推論過程を推論における and や or を考慮して逆向きにさかのぼって、定性積雲モデルの結果に関わる必須の初期値を検索することにある。ここで、必須の初期値とはそれがなくなった場合にはもはや予測結果として強降雨を予測しなくなるような初期値である。また、このように必須の初期値を検索することは定性的な感度分析であるとした。

この検索機能は TMS (Truth Maintenance System) と呼ばれて主として人工知能の研究分野で開発が行われてきた。本研究においては、TMS の中で最も簡単な Forbus and De Kleer による Justification-based Truth Maintenance System (JTMS)<sup>18)</sup> を用いた。この機能が果たす目的は主に2つあり、1つはメソスケール大気診断システムで2値化された初期条件の誤りを改善して予測精度を向上させることである。もう1つは、必須の初期値を使用者に提示することで使用者に重要な原因-結果関係を示し、予測内容の説明を行うことである。

本手法では、推論を結果から原因に向かって後ろ向きに推論するバックトラックと、ある初期条件を真ではないと仮定して推論を行なうリトラクティングという TMS の2つの機能を用いて、強降雨の生起に対する初期条件の感度分析を行なう。TMS を用いた感度分析の手順としては、まず TMS は定性積雲モデルの推論過程を原因と結果の因果関係図という形式でデータベースの中に蓄える。そのうえで定性積雲モデルによる推論の結果として強降雨が生起すると予測された場合、強降雨が生起するという推論結果からその結果をもたらした原因に向かって、因果関係図を後ろ向きに推論する。これがバックトラックであり、これによって結果に対する感度が高い初期条件の候補を抽出する。リトラクティングは、バックトラックによって抽出された初期条件群を用いて再度感度分析の対象に対する推論をし、初期条件群の要素の感度を調査する。すなわち、抽出された初期条件群中のある条件について、それが真ではないとして推論をやり直し、その影響範囲を調査する。影響範囲が感度分析の対象すなわち強降雨の生起に及ぶのであれば、その初期条件は強降雨の生起に対して感度が高い、すなわち重要な初期値と判断する。

TMS の本手法への適用にあたっては、3次元的な推論を行なう定性積雲モデルの推論に適用すると、各推論モデル間の入出力に伴い処理効率が低下するため、3次元的な推論システムを1次元化して TMS の処理効

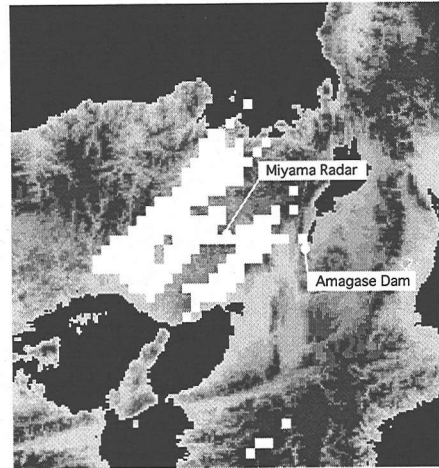


図-4 1999年6月27日6時～7時のレーダー降雨強度 (10mm/hr以上を強降雨として表示)

率を高めた。

本研究では、まずこのサブシステムを用いない方法で予測を行った場合の結果を3.で示し、次にこのサブシステムを用いた場合に予測精度が向上することについて4.で説明する。したがって詳しい説明は具体的事例を用いて4.(2), (3)で行う。

#### (5) システムの自動化

上述してきたサブシステム間の情報の受け渡し等を全て自動化して洪水制御支援のための短時間強雨予測システムとした。すなわち、利用者にとって必要なのは予測開始時間の入力のみである。ただし、本研究で作成したシステムはプロトタイプであるので、予測に必要なデータはオフラインで入手し、筆者らによってあらかじめハードディスク内に移されている。入力をオンライン化しハードディスク内の適切な場所に保存することは本研究では対象としていないが、それほど技術的に困難なことではない。

また、定性情報を2値的に扱う上で重要となるしきい値については、予測開始時点での強雨域には、表-3に示す初期値がすべて存在するようになるようにしきい値を設定するようにした。このしきい値は予測精度を向上させるために変化する。その方法については、4.(2), (3)で説明する。

### 3. 本手法の実流域への適用

本手法では、実際の降雨現象への適用として、淀川水系天ヶ瀬ダム流域とその残流域を対象流域とする。6時間後までの降雨予測を行うことを考えて降雨の動きを

考慮すると、全予測領域を深山レーダーサイトを中心とした東西240km、南北240kmとする必要がある。図-4に全予測領域と天ヶ瀬ダムおよび深山レーダーの位置関係を表す。本論文では予測手法の開発に主眼をおいているので、全予測領域の降雨予測結果の評価を行うことにし、以下では予測結果は全予測領域のものを示すことにする。また、図-4ではレーダーによって観測された10mm/hr以上の強降雨域を四角の白抜きで表している。以下同様の形式で、レーダー雨量計および予測の強降雨域を表す。

まず、1999年6月27日7時を推論開始時刻として強降雨予測を行なった。この適用事例の概況を述べると、26日午前に紀伊半島南岸沿いに停滞していた梅雨前線が、26日午後から九州西部に発生した低気圧の東進に伴って、活動が活発となり北上し、低気圧は27日早朝に若狭湾沿岸を通過し、中心から南西に伸びる前線が27日の日中に近畿地方を通過した。前線は27日夜には紀伊半島沖に抜けた。

対象領域において10mm/hr以上の降雨が生じた事例について、GPV、GMS、レーダーの各データを初期情報として、本手法による6時間先までの予測を行なった。ただし、TMSを用いた予測精度向上システムはこの場合用いていない。推論開始時の各初期条件のしきい値は表-1となった。しきい値を設定する際に用いた27日6時~7時の実績強降雨域を図-4に示す。図中で白く色抜きされた領域が強降雨が生起している領域である。

本手法のTMSを用いた予測精度向上システムを使用しない場合の予測結果を図-5に示す。本手法によって、これまでは推論することができなかった3時間後以降の予測について、6時間先までの予測を継続することができた。強雨域の発達・衰弱の時間的变化については、前の時間ステップで強降雨が生起すると推論された領域で次の時間も強降雨が継続して生起する領域、および前の時間ステップで強降雨は生起しないと推論された領域で次の時間も強降雨が生起しない領域を予測した。さらに、前の時間ステップでは強雨が生起していない領域で次の時間ステップに強降雨が生起する領域も予測できた。しかし、前の時間ステップで強降雨が生起すると推論された領域では、必ず次の時間にも強降雨が生起すると予測してしまう問題点も生じた。

#### 4. 予測精度向上システムの活用方法

ここでは、前節の適用例を用いてTMSを用いた予測精度向上システム(ACT)の機能について詳細に説明する。

##### (1) 予測の因果関係説明への活用

まず、因果関係の出力が必要な理由を述べておく。S-RAIの利用者にとって予測結果の精度が高い、すなわち良くあうことが最も重要であるが、そのような手法にするためには過去の事例への適用を繰り返して予測手法を向上させていく必要がある。そのためには、手法の内部で行われている予測過程を簡潔に示す機能が不可欠である。同時に実時間予測においても、予測の因果関係が簡明に出力されていれば、予測システムが過失等により不適切なデータを利用していたりするのではないことがわかる。このため、予測の因果関係の出力が必要である。

3.で示した適用事例について、2.(4)に示した方法で感度分析を行うと、強降雨が生起すると推論した領域では以下のような推論過程を経て結論が出力された。すなわち、中下層において対流不安定と上昇風の存在が強い上昇風を生起し、それが中下層の雲粒を中上層に運び、中上層にあった霰に接触して雹となる。その雹が落下して降雨が生起されたのである。このように、ACTは簡潔に強降雨予測に重要な推論過程を出力することができる。

##### (2) 予測精度向上への活用

次に、予測結果にACTを用いることで予測精度を向上させる方法について説明する。

本手法では、予測結果に誤りが生じた場合、その原因は推論の初期条件群の中に誤りを含んだ条件が存在していたためと考えている。実際には本手法で考慮されていない現象が影響を与えていることもありうるが、まず予測の誤りの原因を推論の初期条件群に求める方法で事例適用を増やしていくことで、次の段階として考慮すべき現象を考察することが可能となる。

推論の初期条件は2値的に表現された定性的変数であるから、初期条件の誤りとは定性値の誤りであり、その修正とはその定性値を変更することである。予測の誤りの修正とは、前節で示された感度の強い、重要な推論の初期条件を誤りを含まない状態にして、予測をやり直すことである。初期条件を予測のパラメータと考えれば、このことは初期パラメータの最適化を行なっていると言える。

予測の誤りの修正をするためには、メソスケール大気診断システムによって2値化された初期条件群を推論の初期条件として1時間後の強雨予測を行なう。この予測結果と現在のレーダー降雨強度とを各格子点で比較する。表-2に示すように、予測の誤りには予測では強降雨が生起すると推論されたがレーダーでは強降雨域をとらえていない場合と、予測では強降雨は生起しないと推論されたがレーダーでは強降雨域をとらえてい

表-1 1999年6月27日7時 推論開始時のしきい値

診断項目	しきい値	診断結果
大気安定度診断	$\partial\theta_w/\partial z$ が負	対流不安定
水蒸気分布診断	相対湿度が96.48% 以上	水蒸気は十分に供給
鉛直風診断	RSM 上層で Sfc の $w$ が 1.65 m/sec 以上 RSM 上層で Sfc の $w$ が -1.65 m/sec 以下	下層と中下層に上昇風がある 下層と中下層に下降風がある
雨域診断	レーダー降雨強度が10 mm/hr 以上	強雨がある

表-2 予測結果の分類

番号	本手法の予測結果	レーダー降雨強度	予測結果の評価	誤りの修正
1	強降雨が生起する	10 mm/hr 以上	予測結果は正しい	行なわない
2	強降雨が生起する	10 mm/hr 以下	予測は誤り	感度分析を行なう
3	強降雨は生起しない	10 mm/hr 以上	予測は誤り	感度分析結果を利用する
4	強降雨は生起しない	10 mm/hr 以下	予測結果は正しい	行なわない

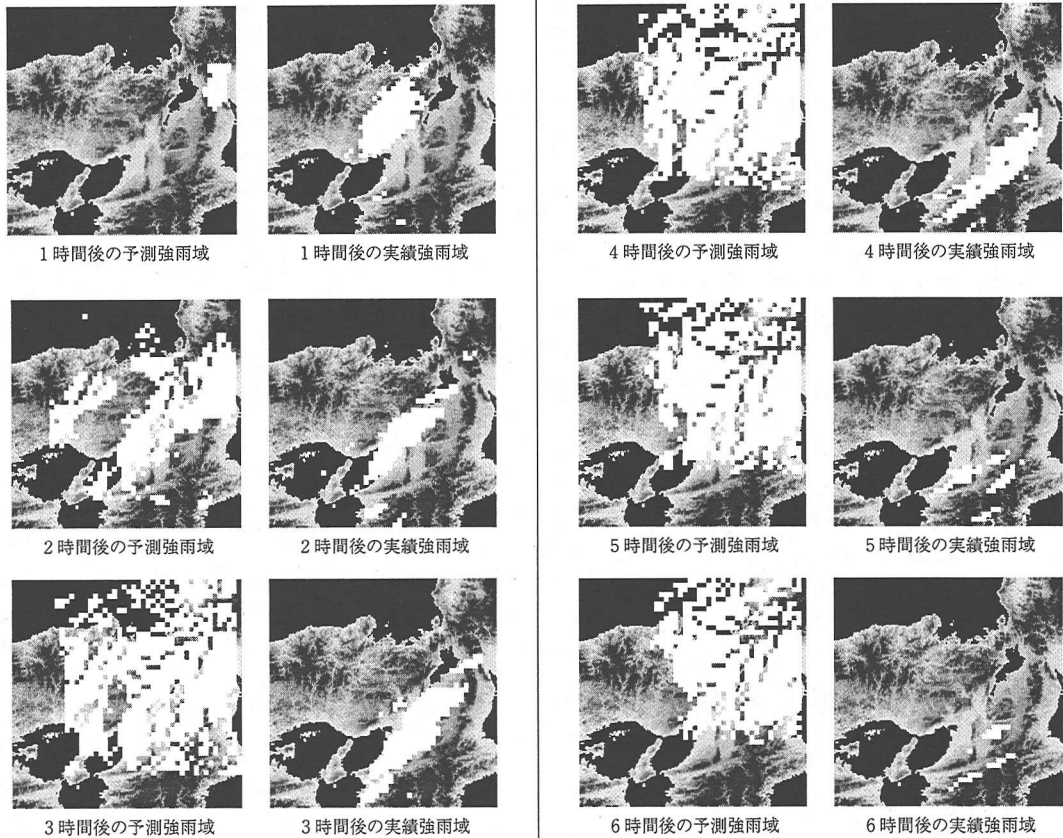


図-5 1999年6月27日7時 推論開始の予測雨域図とレーダーによって得られた相当する時刻の実績強雨域（10 mm/hr 以上の降雨を強降雨として白抜きで表示）



る場合とがある。

まず前者については、強降雨の生起を対象として感度分析を行うことによって、予測の誤りの原因となる初期条件をリストアップすることができる。リストアップされた初期条件は、どれも強降雨の生起に対して必須の条件であるから、どれか1つの条件の値を定性的に変更することで予測の誤りは修正できる。また、予測の誤りを解消するだけであれば、どの初期条件を修正しても予測の誤りは解消される。

一方、後者についてはなぜ強降雨が生起しないと推論されたのかを感度分析によって調査することはできない。なぜなら、強降雨が生起しないと推論された理由は、強降雨が生起すると推論されるための条件が無かったためであり、システムは条件がないものについては、その理由を求めることができないからである。例えば、ある格子点において初期情報が欠落し、十分な情報をもとに推論を行なうことができない状態で強降雨が生起しないと推論した場合には、どの情報の欠落が重要であったかをその格子点の情報だけから判断することはできない。したがって、後者の予測の誤りを修正するには、強降雨が生起した格子点の情報が必要である。すなわち、前段落で述べている強降雨の生起に対して感度の高い初期条件のリストを、ここで用いることで同様に予測の誤りの修正を行なう。

すなわち、表-2の番号2の場合、強降雨の生起に対して必須と判断された初期条件から任意にある初期条件だけを除くことで予測誤差は解消される。しかし、任意の初期条件を除くよりは気象学的に考察して除く順序を決めておく方が予測精度が向上すると考え、あらかじめ除くべき初期条件を順序づけてしておく方法を採用した。それは次節で述べる。また、番号3の場合には、番号2となった場所の感度分析結果を利用して、それをすべて初期条件に加えることで予測誤差は解消される。

### (3) 適用事例における予測誤りの自動修正

本手法による予測結果と同じ時刻のレーダー雨域図との比較から、予測の精度については、実際に生起した強降雨域と本手法が予測した強降雨域は一致しなかった。そこで1時間後の結果とそれに相当する時刻のレーダーの降雨強度を比較して、予測結果に誤りがある場合には修正を行なった。まず、強降雨が生起すると推論した領域について強降雨の生起を対象として感度分析を行ない、その結果を修正に用いる。

表-3は本事例の感度分析で得られた重要な初期条件である。これらの初期条件から、予測の誤りの原因となりかつ修正の影響が次の時間ステップ以降の予測精度の向上につながる条件として、中下層の上昇風を選

表-3 1時間後に強雨が生起すると推論した領域で強雨生起を対象として感度分析を行なった結果、重要な初期値であると判断されたもの

下層	中下層	中上層	上層
なし	十分な水蒸気 雲粒 上昇風 対流不安定	霰	なし

択するのが適当であると考えられた。なぜなら山田<sup>19)</sup>は鉛直風分布の算出によって降雨予測を行っており、それに類する研究も多数行われているため、本研究でもそのアプローチが適当であると考えたからである。すなわち、表-3の中下層の上昇風を初期条件から最初に除くことにした。2番目以降は決めておく必要がなかった。一方、実際には強降雨が生起した領域で強降雨の生起を推論できなかった領域については、推論開始時点において表-3の条件がすべて揃っていたものとした。

自動修正の結果、実際には強降雨が生起していないが、強降雨を予測してしまっていた領域については、予測は改善された。しかし、実際には強降雨が生起しているが、強降雨の生起を予測できなかった領域については、予測は改善されなかった。

### (4) 推論ルール改良方法の指針

自動修正を行なったにもかかわらず、実際には強降雨が生起した領域で強降雨の生起を予測することができなかった原因を調べるために推論内容をTMSを用いた予測精度向上システム(ACT)を用いて調査した。

ここで、本手法において、このような予測結果を誤らせるルールを発見するためには気象のエキスパートである必要はなく、TMSを用いた予測精度向上システムの使用方法を理解するだけでよい。ただし、そのルールが妥当であるかどうかは気象学的知識が必要となる。

調査の結果、推論過程で強降雨の生起に対して重要な条件である雨粒が生成されたにも関わらず、雲底高度以下に十分な水蒸気が存在しないために雨粒が地上に到達する前に蒸発してしまったと推論したことがわかった。気象学的には十分な水蒸気が存在しないときには、雨粒は周囲の水蒸気圧との関係による蒸発速度に応じて蒸発する<sup>14)</sup>のであるが、本研究の手法では定性的な大気条件を用いているので、蒸発速度等を決定することはできない。筆者ら<sup>15)</sup>は梅雨期の降水の数値計算による解析を行ってきた。その経験から、日本は湿润であるため雨滴が落下中に蒸発してすべて水蒸気になってしまう現象は起こらないと考えた。そこで、雨粒の蒸発はルールから除外することとした。

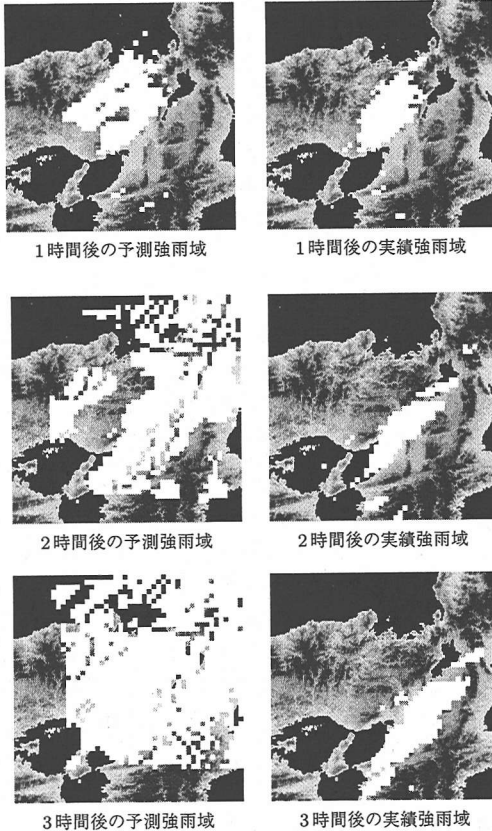


図-6 予測誤りの自動修正, および雨滴蒸発のルール変更を行った後に推論した1999年6月27日7時推論開始の予測雨域図と相当する時刻の実績強雨域(10 mm/hr以上の降雨を強降雨として白抜きで表示)

現状では, このようなルールの変更を実時間で行うことはできない。まずは, 多くの事例の適用を通して, 適切なルールを見つけていくことで対応すべきである。また, 適用すべきかどうか, 事例毎に異なるルールが出てくると考えられるので, それに対応し, 自動的にルールの追加削除ができるようシステムに変更していく必要があると考えられる。

### (5) 適用結果

下層での雨粒の蒸発過程を表現したルールを変更して予測した結果が図-6である。1時間後の予測において対象領域の中央一帯に強降雨域を推論したのがわかる。この結果からルールの変更が妥当であったことが確認された。

一方, 2時間後以降の予測結果については, 本手法は強降雨域の継続・発達を推論できているが, 雨域の衰弱・消滅は推論できていない。3時間後以後の予測

結果は図-5と同じように良い予測結果を出すことができなかったため, 掲載しなかった。

これらについては, 本手法のTMSを用いた予測精度向上システムの出力結果から判断して, 大気的不安定エネルギーとその消費についての概念, 地形の影響を受けた風の収束・発散のモデルの精度向上によって解決できる問題であると考えられる。このように手法の問題点を改善する上で本研究で確立した感度分析および予測の誤りの修正手法は有効であり, それは本手法の実用化に貢献し得るものである。

また, このほかの事例として1999年6月29日と1998年10月16日に生じた降雨現象についても本手法による強雨予測を行ったが結果はほぼ同様であった。

## 5. おわりに

本論文では, 実際の河川管理現場への適用を目的とした洪水制御支援手法として, 情報工学的推論手法を用いた定性的短時間強雨予測手法を提案した。ここでは, まず, 実時間洪水制御における意思決定支援システムの重要性和短時間降雨予測手法に必要なとされる機能について述べた。このことが数値計算を主体とした定量的な予測手法ではなく, 本手法のような推論を用いた定性的な予測手法を提案する動機となった。次に, 本手法を構成するサブシステムについてこれまでの研究成果を整理した上で, 本手法による予測において, 予測精度を向上させるための方法論を示した。さらに, 本手法の開発にあたっては河川管理者の要請に応えるべく, 入出力などの予測以外の煩雑な作業を自動化するとともに, 予測内容の説明機能の付加など実用的なシステムを開発した。

本手法の実流域への適用結果から, 本手法では予測開始後1時間の強雨域は適切に予測できることが示された。しかし, 実質的には予測開始後1時間のレーダー雨量計データを用いて予測誤差を修正していることから, 予測情報としては本手法を用いることができるものではない。

また, 本論文で確立した感度分析と予測の誤りの修正手法は今後の予測システム改善に寄与するものである。システム改善の具体案として, 雨域の衰弱・消滅を例に挙げる。GPVから得られる大気的不安定エネルギー(CAPE)とその消費についての概念を導入すること, 地形の影響による風の収束・発散について山田<sup>19)</sup>のsupercritical flow状態における鉛直風の推定方法を用いて局地的な地形の影響に主眼をおくことにより, 雨域の衰弱・消滅はより適切に推論できると考えられる。このように本研究で確立した感度分析および予測の誤りの修正手法は, 手法の改善点を容易に検索すること

に有効に機能していることが示された。

本研究で提案した手法 (SRAI) と同程度の時空間スケールを持つ情報を出力する数値モデルは、非静力メソモデルと言われるものである。日本における非静力メソモデルとしては、気象庁・気象研非静力メソモデル (NHM) がある。これも RSM の GPV を初期値・境界値として用いることを想定して作られており、メソスケールの線状エコーなどを非常に良く再現できるとの報告がある<sup>20)</sup>。NHM と SRAI では雲物理過程についてはほぼ同様の過程を有している。具体的にはメソスケール大気診断システムのメソスケール鉛直風診断と、定性積雲モデルの定性積雲移流モデル、そして大気不安定エネルギーが考慮されていないことを除けばサブシステムは NHM と同様な気象学的に妥当な結果を出力できる。NHM と比較して SRAI が劣っているサブシステムは気象学上重要なものであるため、その点で NHM では本研究で提示した以上の精度を予測可能であると考えられる。これは、SRAI の物理過程を充実させていくことで SRAI の精度を向上させることができる。一方、NHM では数値積分による予測を行っているため、SRAI の様に 1 時間前のデータを用いて現在の状況を予測させ、それを現在の状況と比較して予測誤差を修正するという方法を採用することは困難である。その意味で SRAI はレーダーデータなどを実時間で入力して短時間予測を行う洪水制御支援のための降雨予測手法としてのあり方を示すことができていると考えている。

謝辞：本研究で用いた深山レーダー雨量計のデータは国土交通省淀川ダム統合管理事務所から提供していただいた。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 堀智晴：洪水災害軽減のための流域-人間系のモデル化と管理に関する研究，京都大学博士論文，1993。
- 2) 中北英一，椎葉充晴，池淵周一，高棹琢馬：3次元レーダー情報の利用に関する基礎的研究 (II)，京都大学防災研究所年報，第31号B-2，pp.231-240，1988。

- 3) 中北英一，藤井孝成，杉本聡一郎，池淵周一：3次元レーダーおよび水蒸気鉛直輸送を考慮した短時間降雨予測手法の開発，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第2部，pp.264-265，1997。
- 4) 池淵周一，宮川裕史，河端伸一郎：ファジィ推論をベースにしたダム貯水池の実時間操作，土木学会第44回年次学術講演会，pp.160-161，1989。
- 5) 小尻利治，池淵周一，十合貴弘：ファジィ制御によるダム貯水池の実時間操作に関する研究，京都大学防災研究所年報 第30号B-2，pp.323-339，1987。
- 6) 小尻利治，藤井忠直：知識ベースを用いた貯水池操作に関する研究，水工学論文集 第34巻，pp.601-606，1990。
- 7) 高棹琢馬，椎葉充晴，堀智晴：洪水制御支援のためのエキスパートシステムに関する基礎的検討，京都大学防災研究所年報 第31号B-2，pp.357-368，1988。
- 8) 高棹琢馬，椎葉充晴，堀智晴，佐々木秀紀：協調問題解決型洪水制御支援環境の設計，水工学論文集 第34巻，pp.595-600，1990。
- 9) 高棹琢馬，堀智晴，荒木千尋：貯水池操作支援システム総合化のためのダム操作規則参照用推論エンジンの設計，水工学論文集 第40巻，pp.57-62，1996。
- 10) 大石哲：積雲の雲物理的構造解析を基礎にした洪水制御支援環境の開発に関する研究，京都大学学位論文，pp.131-170，1997。
- 11) Doyle, J.: A truth maintenance system, *Artificial Intelligence* 12, 1979.
- 12) 西田豊明：定性推論の諸相，朝倉書店，1993。
- 13) 小倉義光：一般気象学，東京大学出版会，1984。
- 14) 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。
- 15) 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。
- 16) 浅井富雄：ローカル気象学，東京大学出版会，1996。
- 17) Rutledge, S.A. and Hobbs, P.V.: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones VIII, *J. Atmos. Sci.*, 40., pp.1185-1206, 1983
- 18) Forbus, K.D. and De Kleer, J.: *Building Problem Solvers*, Bradford Books, 1993.
- 19) 山田正：降雨予測と洪水予測，気象予測とその水文・水資源学への応用，pp.109-129，1992。
- 20) 加藤輝之，WMO-01観測グループ：2001年1月15日に北陸地方に豪雪をもたらした日本海収束帯上で発生した $\beta$ スケール渦，[http://www1.newweb.ne.jp/wb/crest-mcs/0115/beta\\_0115.html](http://www1.newweb.ne.jp/wb/crest-mcs/0115/beta_0115.html)，2001。

(2000.7.21 受付)

## A DECISION SUPPORT SYSTEM BY QUALITATIVE SHORT-TERM SEVERE RAINFALL PREDICTION METHOD

Satoru OISHI, Naoki MASUDA and Shuichi Ikebuchi

In flood control, the decision support information made by short-term severe rainfall prediction methods and flood control support systems are indispensable for quick and appropriate operation. On the other hand, it is difficult to forecast the weather of meso- $\beta$  to  $\gamma$  scales numerically because of limited computational resources, stability of calculation, time and cost for computer and exactness of calculation. In this paper, based on these background, we develop the qualitative short-term severe rainfall prediction method using artificial intelligence for practical use in order to apply to river site by forecasting the time series variation of distribution of severe rainfall having a lead time of six hours, automatically.