

# 東海豪雨における地形の影響 に関する数値実験的研究

Numerical Approach for the Effect of the Topography about Torrential Rain  
in the Tokai Area, 2000

佐藤 修一<sup>1</sup>・大石 哲<sup>2</sup>・砂田 憲吾<sup>3</sup>・赤池 純<sup>4</sup>

SATO Shuichi, OISHI Satoru, SUNADA Kengo and AKAIKE Makoto

<sup>1</sup>学生員 山梨大学大学院 医学工学総合教育部土木環境工学専攻 (〒 400-8511 甲府市武田)

<sup>2</sup>正会員 博 (工) 山梨大学助教授 大学院医学工学総合研究部 (〒 400-8511 甲府市武田)

<sup>3</sup>フェロー 工博 山梨大学教授 大学院医学工学総合研究部 (〒 400-8511 甲府市武田)

<sup>4</sup>学生員 山梨大学大学院 医学工学総合教育部土木環境工学専攻 (〒 400-8511 甲府市武田)

In this study, we investigate the effect of the topography about torrential rain in several areas. In this research, several numerical simulation was made by using Nonhydrostatic Model that Numerical Prediction Division and Meteorological Research Institute have developed. We chose three areas which are Tokai area, Kanto area and the area of north part of the Lake Biwa. Comparison among the effect of above mentioned three topographies on the atmospheric circumstance of torrential rain in the Tokai area was investigated by numerical simulation.

**Key Words :** *torrential rain, topography, numerical simulation, Nonhydrostatic Model, Tokai area*

## 1. はじめに

2000年9月11日から12日にかけて、台風14号の影響により、日本付近に停滞していた停滞前線(秋雨前線)の活動が非常に活発となり、東海地方を中心に大雨となった。特に愛知県西部から三重県中部にかけては、2日間の積算降水量が600mm近くに達する記録的な大雨となった。名古屋の11日の日降水量428mmはこれまでの記録の240mmの約2倍もの大雨であった。また、東海市の11日の日降水量492mm、1時間降水量114mmは愛知県内のアメダス観測地点の記録を大幅に上回った。その結果として、この雨で東海豪雨災害といわれる甚大な被害が生じた。

台風や停滞前線のスケールを考えると日本の国土はスケールが小さく、東海豪雨を発生させたような気象条件は日本の多くの場所においても生起する可能性があると考えられる。実際、九州南西部ではほぼ毎年のように豪雨をもたらす土石流災害が発生しているし、1998年の北関東・南東北豪雨災害も台風4号の影響によって梅雨前線の活動が活発になったことが原因である。したがって、南東北から九州南西部では台風が前線を刺激した豪雨は発生するといえることができる。

一方で河川管理者の立場で東海豪雨の経験を活用すれば、台風が前線を刺激する豪雨の発生可能性が広い範囲に及んでいるのであるから、日降水量500mm、時間降水量110mmという豪雨の発生や、既存の日降水量記録の約2倍程度の豪雨までを想定した河川管理計画の策定が検討対象になってくる。しかし、そのような広い地域のどこにでも東海豪雨と同様の豪雨は発生しうるのかという疑問も生ずる。加藤<sup>1)</sup>は、東海豪雨を対象に非静力モデルを用いた数値計算により、地形が東海豪雨の生起・発達に与えた検討を行い、紀伊半島の山岳地形により地峡部分に収束が起こり、その位置が正渦度場による上昇流域に当たっていたことと高比湿気塊の流入が伴ったことが東海豪雨を発生させたという結論を得ている。すなわち、東海豪雨には紀伊山地の地形が必要であり、南東北から九州南西部のどの地点でも豪雨が生起するわけではないといえる。

こういった現状を踏まえた上で、本研究では東海豪雨を数値シミュレーションによって再現し、また、仮想的な数値実験を行い、その結果から地形が豪雨に与える影響を調査する。その際に、より工学的な観点から、地形の影響が少ないと考えられる関東平野に東海豪雨

と同様の気象場が生起したときの降雨強度や降雨分布について検討する。また、東海豪雨と同様の気象場であっても降雨強度が極端に小さくなる地形条件における計算を行い、その理由を考察する。

## 2. 数値モデルの概要

本研究では数値計算モデルとして、気象庁数値予報課/気象研究所の非静力学モデル (MRI/NPD NHM)<sup>2)</sup>を用いた。

静力学モデルでは、鉛直方向の運動方程式を静力学平衡の式に置き換える静力学近似を行い、気圧は鉛直積分した空気に働く重力で表され、鉛直風は予報せず水平風と連続式から診断される。静力学近似は、再現する運動の水平スケールが鉛直スケールに比べはるかに大きいことを前提としているため、水平格子間隔に制限がある。この近似は、地球大気が鉛直方向に対して水平方向にはるかに大きいことから、大きなスケールの運動に対しては非常に良い近似であり、広く利用されている。しかし、小スケールの運動は直接表現できない。一方、非静力学モデルでは、3方向の運動方程式全てを用い鉛直風も予報する。これにより静力学近似で制限された水平分解能制限が取り払われる。

気象現象は、それぞれに特徴的なスケールを持っている。例えば、現在の気象庁全球モデルの水平格子間隔はおよそ 50km であるので、台風あたりまで (眼形の微細構造は除く) 予測可能である。1km 程度になれば山岳波や積雲対流も表現できる。このように解像度を上げることによって、大規模場の中の微小現象の動態を明らかにできる。非静力学モデルは当初対流など、小スケールの現象を理解するために開発されたものである。

非静力学モデルは音波を解に含むかどうかで、非弾性 (anelastic) 方程式系と弾性 (elastic) 方程式系の 2 つに大別される。非弾性モデルは大気の圧縮性が無視できるものと仮定して方程式系から音波を除去したもの、弾性モデルは大気の圧縮性を認めて、密度の発散から気圧を予報するもので、前者では連続の式による気圧の診断的な計算、後者では音波の特殊な取り扱いが必要になる。非弾性系と弾性系のモデルは、連続の式の近似精度によってさらに分類できるが、本研究での基礎方程式系は弾性系 (圧縮系) モデルの中の完全圧縮系モデル (fully compressible model) である。

完全圧縮系のモデルは、方程式系に近似を含まない点で準圧縮系モデルより精度の点で勝っているが、密度の時間変化を許すため、数値計算の誤差に細心の注意を払わなければ質量保存に支障をきたす。多くの非静力学モデルが準圧縮方程式系を使っている理由の一つがここにある。

表-1 モデルのその他の様々な条件

| 条件        | 内容                                           |
|-----------|----------------------------------------------|
| 風速の側方境界条件 | Orlanski タイプ                                 |
| コリオリパラメータ | $f_3 = 2\omega \sin \phi$ のみを考慮              |
| 上部境界条件    | free slip, rigid wall                        |
| 地表面温度     | 地表面温度を大気放射を考慮して解く                            |
| 雲物理過程     | 暖かい雨                                         |
| 対流調節      | 20km メッシュでは雲物理過程と対流調節を併用、5km メッシュでは対流調節は用いない |

本研究での音波の扱いは HI-VI 法を用いる。HI-VI 法は horizontally implicit - vertically implicit scheme の略で、音波を鉛直・水平方向ともにインプリシットに扱うものである。HI-VI 法は、音波関連項を水平方向にも陰解法で解くため、タイムスプリット法を併用する必要がなく、水平分解能が小さくてもタイムステップが音速の影響を受けないメリットがある。

本研究で用いたモデルのその他の様々な条件を表-1 に示す<sup>3)</sup>。

次に、本研究で行っている初期条件、ネスティングについて説明する。本研究で初期条件として用いているものは気象庁が作成した全球客観解析データ (GANAL) である。GANAL は気温、気圧、湿度および水平風速に関する気象格子点データであり、格子点間隔は東西南北それぞれ 1.25 度であり、鉛直方向は指定気圧面のデータが与えられる。データの時間分解能は 6 時間である。このデータの一部 (計算に必要な適切な時間および場所) を 20km メッシュの地形に沿った格子点に内挿したものを 6 時間毎に与えて、20km メッシュの NHM を 12 時間分実行して 20km 毎の計算結果を得る。20km 毎の計算結果のうち、計算開始 3 時間後から 12 時間後までの気温、気圧、湿度および水平風速を 5km 毎の地形に沿った格子点に内挿したものを 3 時間毎に与えて 5km メッシュの NHM を 9 時間分実行する。したがって、GANAL から 20km メッシュモデルへ、および 20km メッシュモデルから 5km メッシュモデルへの二段階のオフラインのワンウェイネスティングを行っている。

数値地形モデルとして、米国地質調査所 (USGS) の GTOPO30 を用いた。これは全球を水平方向 30 秒 (約 1 km) 間隔のグリッドでモデル化した地形情報である。一般に数値気象モデルに地形情報を組み入れる際には、粗い水平分解能の数値気象モデルでは平滑化された地

形を用い、水平分解能が細くなるにつれて細かな凹凸を含んだ地形を用いる。本研究でもそのような地形を入れている。

### 3. 計算結果と考察

本研究ではまず、1.に述べたように、東海豪雨と同様の気象場が関東地方に生じた場合の降雨分布を調査した。その際に以下のような操作を行った。まず、2.で述べたネスティング方法によって5kmメッシュのNHMを使い、東海豪雨を再現する。次にGTOPO30の緯度経度情報を操作して関東平野の地形を東海地方の位置に移動して、そこで同様にGANALを用いて20kmメッシュのNHMを計算し、その結果を用いた5kmメッシュのNHMを使って仮想的な降雨のシミュレーションを行った。具体的にはGTOPO30の緯度を-1度、経度を-2度動かして地形を平行移動した。

このような仮想的なシミュレーションの妥当性について述べる。2.で述べたように、正しい位置で計算を行っていたとしても、GANALが表現している標高情報と20kmメッシュモデルで表現している標高情報は異なるので、GANALの値を高度方向に内挿する必要がある。したがって、仮想的な地形情報を与えた場合もそうでない場合でも、格子点の高さが若干変化するだけである。これまでに、加藤<sup>1)</sup>が地形の一部を削り取ってしまっているなどの地形情報を変化させる仮想的なシミュレーションの例は少なくない。ただし、GANALを用いて空間分解能が高い5kmメッシュの計算を行うことは問題があるので、本研究でも加藤<sup>1)</sup>の研究でも20kmの計算を途中に含んでいる。

一方で、本研究の場合には、別の場所にある地形を当てはめて、東海豪雨と同様の気象場が関東平野に生じたときの降雨分布を考察している。それは、本研究が科学的興味のみに基づいているのではなく、実際の河川管理に役立つような情報を提供するために行われているからである。その際、別の場所にある地形を当てはめることによって、結果の図からイメージされる場所と計算で行われた場所の間では、緯度が1度違うことによるコリオリ力の違いが生じるが、その影響は、地形が変わったことによる影響よりは大きくないものとして無視した。

次に東海豪雨と同様の気象場であっても、地形の影響によって豪雨が生起しない例として、琵琶湖・若狭湾を中心とした地形を用いた計算を行った。この地形はいくつかの数値計算を行って選択した。

以下に東海豪雨の再現結果を示す。5kmメッシュのNHMの計算結果として、1時間毎の降雨強度の様子(初期時刻から5,7,9時間後のみ)を図-1に示す。図-1の

各図の右上の5hour0minなどは、計算開始からの時間、その下のvalid:11.2300JSTは11日23時JSTであることを示す。また図-3にレーダーアメダスによって得られた実際の降雨状況を示す。

ここで実際の東海豪雨の場を金田ら<sup>4)</sup>をもとに述べておく。この豪雨では大規模な場としては、台風と秋雨前線があり、台風は下層に湿潤な気塊を有していた。秋雨前線があることで、温度風が顕著になり、その向きは南西から北東であった。このため下層には南東風、上層には南西風という鉛直シアになっていた。特に豪雨時にはこのシアが顕著であった。

次に東海豪雨を生起させた大気場を用い、地形だけを入れ替えた仮想的なシミュレーションの結果を示す。

図-2に関東平野、図-4に琵琶湖・若狭湾付近での降雨状況について、モデルを走らせて仮想的にシミュレートした計算結果を示す。

まず図-1、図-2から、東海豪雨のような総観気象場においては東海地方の地形であれ、関東地方の地形であれ強い雨が生起することがいえる。つまり東海豪雨のような大規模な豪雨が起こるような気象条件の場合は、降雨の「生起」に及ぼす地形の影響は大きくないということがいえる。しかし重要なのは、東海地方の地形で計算された場合と、関東地方の地形で計算された場合で、降雨の発達あるいは停滞する様子が大きく異なっている点である。

まず図-1を見てみると、初期時刻から7~9時までには名古屋付近で雨が停滞していることがわかる。時間が経つにつれて降雨強度の弱まりを見せつつも9時間後の図では大阪湾で強い雨が発生しているのが分かる。一般的に降雨が停滞するとは、同じ雲が同じ場所に停滞するのではなく、別の雲が生起し発達し移流した結果、同じ場所に強い雨をもたらしてしまうことであると言われている。例えば、Ogura et al.<sup>6)</sup>は長崎豪雨のレーダーエコーを解析して降雨の停滞が上述のメカニズムであることを示している。

関東平野の計算結果を降雨の移流という点から考察すれば、東海地方に比べて北東の方向への移流が顕著に見られる。関東での降雨範囲が東西方向に100km程度移動しているのに対し、名古屋付近では40km程度しか移流していない。名古屋付近での雨雲の停滞および大阪湾での雨雲の発達において、注目したい点が紀伊半島の地形の豪雨への影響である。それは名古屋付近・大阪湾では南から吹き込む水蒸気を含んだ空気が紀伊山地の斜面に沿って上昇流が顕著になり、雨雲を生起・発達させている。その雨雲が名古屋付近で次々と強い雨をもたらして豪雨を生起している。

一方、図-1、図-2で、9時間後の降雨強度をみると図-2の方が強い雨が広範囲に降っていて、雨雲が強く

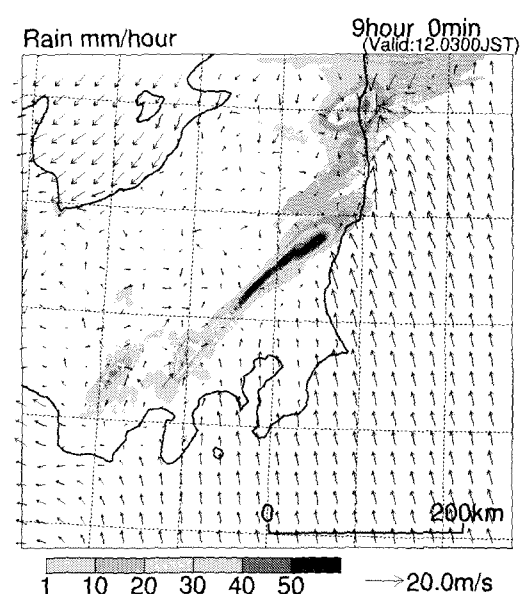
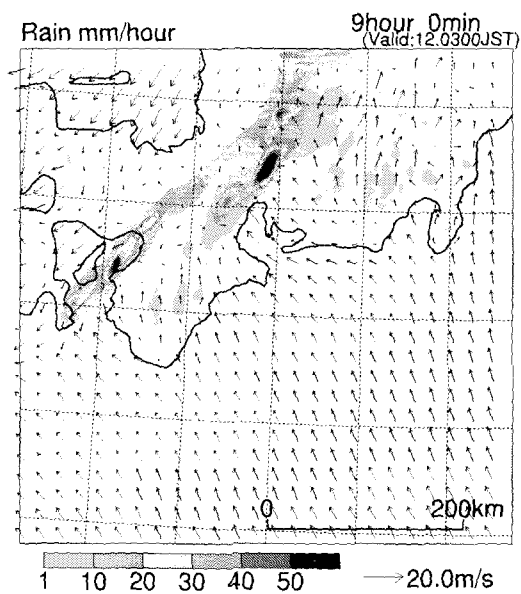
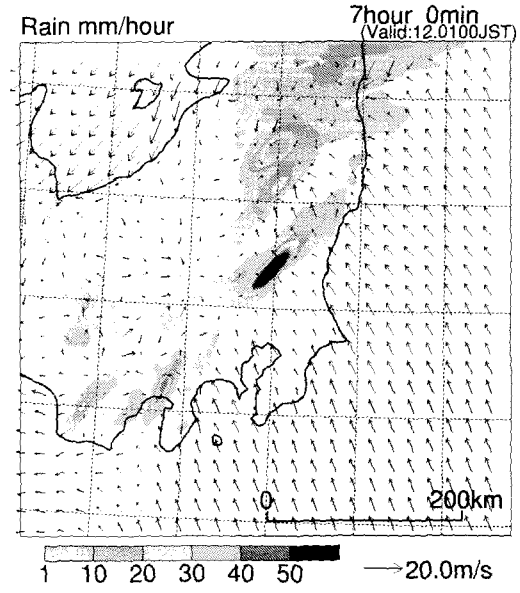
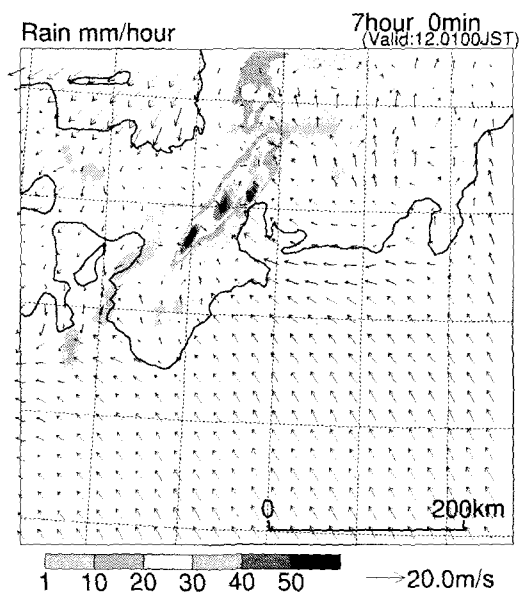
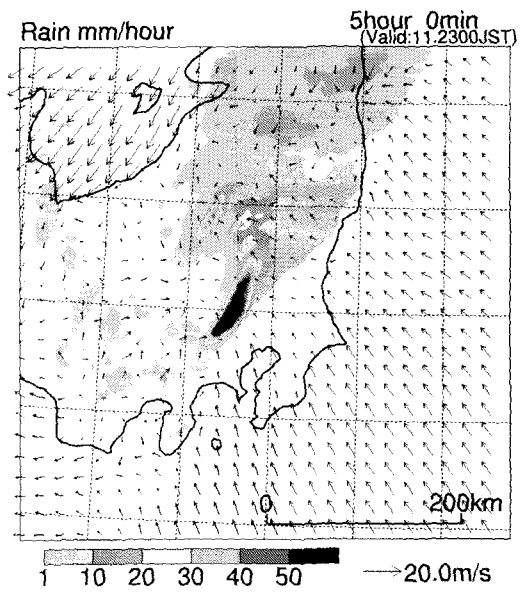
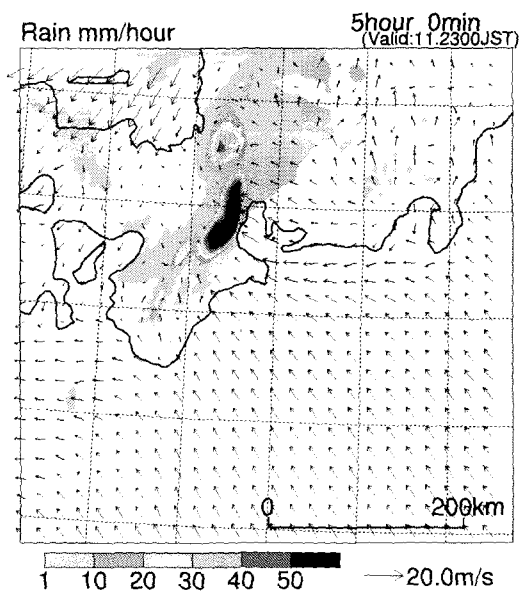


図-1 名古屋付近における1時間毎の降水量分布(初期時刻から5,7,9時間後)

図-2 関東平野における1時間毎の降水量分布(初期時刻から5,7,9時間後)

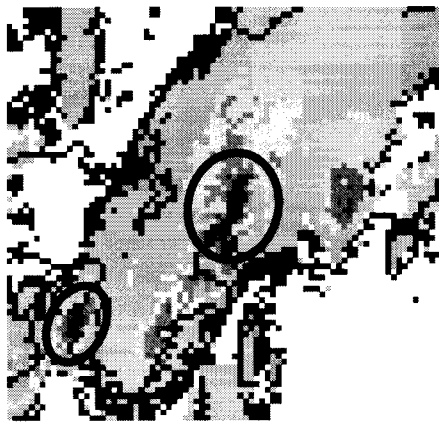


図-3 実際の降雨状況 (9月11日21時) 線で囲んだ部分が降雨の強いところ

広く発達したことがわかる。これは、関東地方の地形が平野であるということが原因であると考えられる。それは言い換えれば、東海地方の地形では山があることによって降雨が停滞し、強い雨が長い時間降り続くことによって豪雨となったが、関東平野では山がないことによって、より降雨強度が大きい雨が降っているが、その雨雲は北東方向に移流するため一箇所に強い雨をもたらすことがなかったと言うことである。そのことを、大石ら<sup>5)</sup>は2次元の bin 法を含む詳細な雲解像モデルを用いて、以下のように説明している。すなわち、山地においては山に当たる風によって上向きの風が発生すれば雲は発達する。逆に風下斜面では下向きの風が発生することがあり、その時には雲の発生が弱まるのである。この研究では、標高の高い山と低い山を比較しており、低い山では、雲が存在するときには下降流によって最初に生じた積雲の発達を妨げることがないので、その積雲が強い水平方向の収束域を形成して降水粒子の集中的な変換場として機能するというものである。

この原理から、東海豪雨時の気象場を与えても、強い雨が生じなかった琵琶湖付近での降雨シミュレーション結果を説明することができる。図-4において、6時間後のシミュレーション結果ではほとんど雨が弱くなっているのがわかる。これは9時間後まで続いた。このことは琵琶湖の北東にある伊吹山地が影響していると考えられる。下層の湿った南東風が山を越えたところで高気圧性の下降流が発生する。つまり、雨雲の発達が抑えられることとなる。また、関東平野の例のように最初に生じた積雲がそのまま移流しているのに対し、高い山が存在すると風上斜面側で次々に積雲が生起することで、風下斜面側へ至るまでに降水過程における熱力学的エネルギーが消費されているといえる。さらに大石ら<sup>5)</sup>によると、水平スケールが比較的大きい

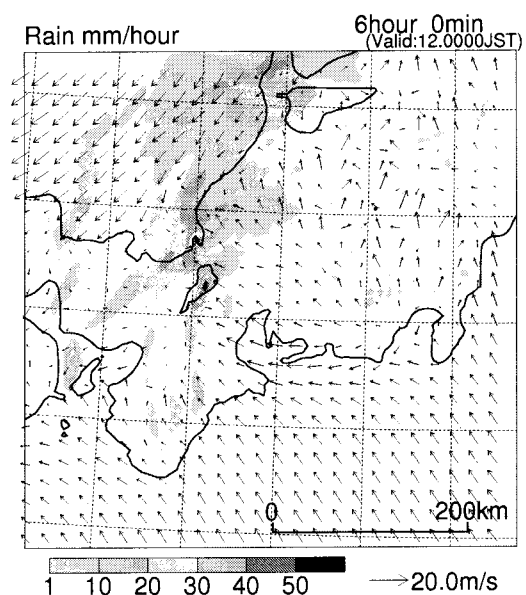
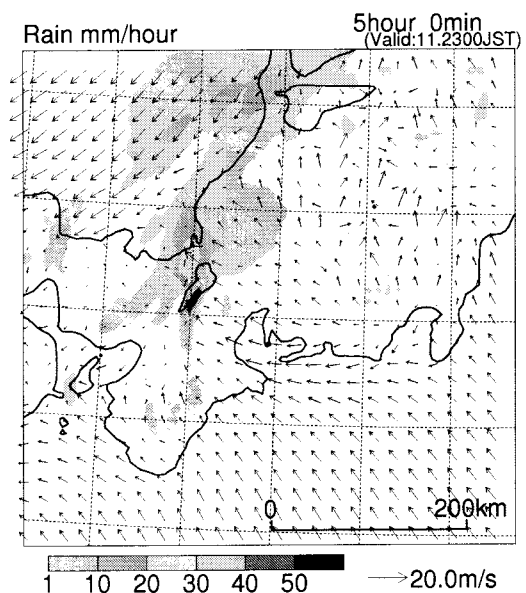
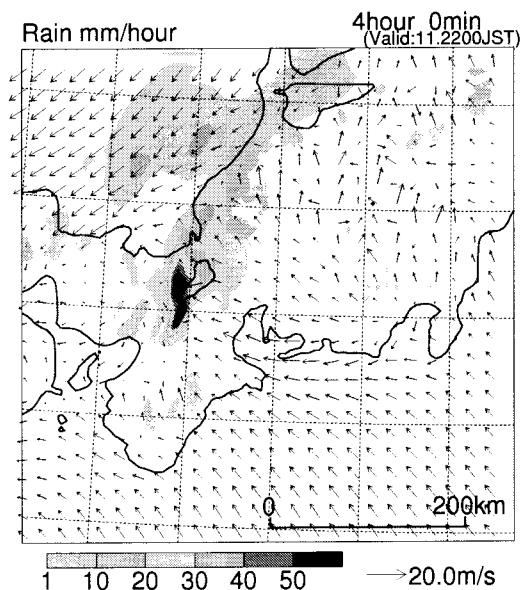


図-4 琵琶湖付近における1時間毎の降水量分布 (初期時刻から4～6時間後)

山岳の場合、最初に生起する積雲のほかに2番目以降に生起する積雲が、上昇気流が存在する領域で成長するか、下降気流が存在する領域で成長するかによって積雲の成長過程と降雨現象に与える影響が異なっており、この例の場合には山岳が積雲の成長を妨げる方向に働いていると考えられる。

一方、平野においてはそのような風が発生することはないので、下降流によって雲の発達が妨げられず、熱力学的エネルギーが持続される。したがって、一度生起した降雨域は熱力学的エネルギーが続く限り、雨を降らせ続ける。このメカニズムによって、関東平野においては東海豪雨以上の雨が降る可能性があると言える。

ここまでの議論で、関東平野における仮想的なシミュレーションから、強い降雨が北東に移流しながら生起することがありうることがわかった。さらに、河川管理を想定した考察を行うと、図-2は、東西にのびる利根川流域では上流から下流へ降雨が移流していることがわかる。東海豪雨では庄内川や新川で氾濫が起こったが、それらは南北に流れる川である。したがって雨が東側へ移流すれば、そのような川の流域に降る雨は弱まり、川の流量は減少する。しかし、利根川のような東西に流れる川であると、降雨域が東西に移流しても流域の上空に常に雨が降る状態が続くのである。したがって、利根川の支川が合流する地点では大変危険な状態になると予想される。このことから、利根川においては特に分布型流出モデルを用いた検討が必要になる。すなわち、河川計画においては降雨強度と降雨域の移流速度を考慮して分布型流出モデルによって洪水追跡を行うことにより計画を立てる必要があり、洪水調節においては流出の遅れ時間と降雨域の移流速度が重なり合うような危険な状態をさけるような方策を検討しておく必要がある。

#### 4. おわりに

本研究は気象庁数値予報課/気象研究所の非静力学モデル(MRI/NPD NHM)を用いて1時間おきの9時間分の降雨状況を再現、予測し、その結果より解析・検証を行った。

具体的には、地形が豪雨発生に及ぼす影響について、東海地方と関東平野での違いから降雨状況について考察した。ここで、本研究の成果を具体的に述べることで本論文の結論とする。

再現された東海豪雨は実際のものとは多少違いがあったが、検証資料としては十分であった。

関東平野と琵琶湖・若狭湾付近に東海豪雨の気象条件を与えて降雨の仮想的なシミュレーションを行い、それと東海豪雨再現結果とを比較することによって、い

くつかの知見を得た。具体的には、東海豪雨のような気象条件が関東平野上空でも発生した場合に、同じような豪雨もしくはそれ以上の豪雨が発生することがあるということがまず大きな結論の一つである。当時の気象条件のような場合は、平野か山地かに関わらず、豪雨が生起する可能性があるということがいえる。また、地形を通した上昇流・下降流による雨雲の状態の変化があると考えられる。その他、もしも関東平野で東海豪雨のような雨が発生した場合、東西に流れる利根川に洪水発生危険性があることを強調したい。関東地方では雨雲の移流が顕著であるが、利根川は東西に流れているので雨域が移流しても、流域上空に降雨があることになる。現在でも洪水災害に対する備えは十分に行われていると思うが、その防災体制を継続しておく必要がある。

本研究では東海地方、関東平野、琵琶湖・若狭湾付近に焦点を当てたが、地形データを変換するということで、例えば、北海道や大阪などというように、違った地形の場所での降雨の仮想的なシミュレーションも行うことができる。あるいは、山のない平野地形を仮定したり、全て海であるような場を仮定するなど、様々な状況に応じて検証することができると考える。地形だけでなく別の日の気象データを用いることでさらなる解析に繋ぐことが可能であるとも期待する。今後、本研究の成果が高精度の降雨予測実現に役立ち、豪雨発生のメカニズムの解明が進展し、豪雨による土砂災害や河川氾濫による災害の減少に繋がることを願って本研究の結論とする。

**謝辞：** 本研究を遂行するにあたり、土木学会河川懇談会気象学的観点からの降雨特性の評価に関する研究助成(代表：大石哲)より援助を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 加藤輝之：集中豪雨のモデルと予想—数値実験によるアプローチ—, 天気, Vol.49, No.8, pp.626-634, 日本気象学会, 2002.
- 2) 斉藤和雄：非静力学モデル, 気象研究ノート, 第196号, pp.19-32, 1999.
- 3) 斉藤和雄・加藤輝之・永戸久喜・室井ちあし：気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル, 気象研究所技術報告投稿原稿, 第2稿, K-4-3, 2000.
- 4) 金田幸恵・坪木和久・武田喬男：東海豪雨のメカニズム—その雨をもたらしたもの—, 天気, Vol.49, No.8, pp.619-626, 日本気象学会, 2002.
- 5) 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, 水工学論文集第41巻, pp.117-122, 1997.
- 6) Ogura, Y., T. Asai and K. Dohi : A case study of a heavy precipitation event along the Baiu front in northern Kyushu, 23 July 1982 - Nagasaki heavy rainfall, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.63, pp.883-900.

(2003.9.30 受付)