

流域スケールの風の場合と降雨のシミュレーション Simulation of Wind Field and Rainfall in Catchment Area

北海道開発局 中津川 誠 Makoto NAKATSUGAWA
北海道大学工学部 山田 正 Tadashi YAMADA
北海道大学工学部 内藤 修 Osamu NAITOU
北海道開発局 水島 徹治 Tetsuji MIZUSHIMA

In this paper, the results of the field observation of rainfall which had been carried out by the authors, are shown and the effects of height or direction of the mountain on rainfall are discussed. With these investigation, we calculate the wind field in mountainous area by using the digital maps and spectral analysis. Combining the calculated wind field and the Kessler's model for rainfall, we simulate the precipitation field in mountainous area. Comparing the observed data and calculated rainfall pattern, we confirm that the above-mentioned calculation can simulate the actual orographic effect of rainfall precisely.

Keywords : wind field, precipitation field, digital map, Kessler's model, orographic effect

1. 序 論

今日まで降雨流出の再現計算としては数多くのモデルが提案され、流出の物理機構も次第に明らかにされているが、降雨そのものに関しては統計的なもの、あるいは計画上想定されたものとして扱うことが多かったように思われる。しかしながら、近年、レーダ雨量計による観測方法や観測体制が整備され、一方で降雨現象を数値的に再現しようようなモデルがいくつか提案されるような状況にあって、これらを有機的に組み合わせていくことで、降雨の再現や予測の進歩に大いなる可能性が生じてきた。

本研究では、降雨のモデル化を目指すうえで多くの集中豪雨の原因とみなされる流域スケールの地形性降雨について取り扱い、北海道内の山地流域に雨量計を設置して観測を行うことで降雨に及ぼす標高や斜面の方向等の効果について明らかにした。一方で地形データを離散化した後、ポテンシャル流としての風を計算し、算出された風の場合をケスラーモデルに導入することにより降雨の計算を行なった。以上の観測、計算解析結果をもって降雨過程に及ぼす風や地形の影響等を詳細に検討した。

2. 山地流域の降雨観測と降雨に及ぼす標高の影響

2.1 菊地らの研究¹⁾

北海道においての多雨地域は、道南の胆振地方から日高地方の太平洋沿岸に存在するが、菊地らはその中でオロフレ山系(図2.1, a))の南東斜面に着目し、降雨に及ぼす山地標高や風の効果を現地観測を通して調べてきた。この観測結果によりオロフレ山系の南東斜面上に降るいわゆる山岳性の降雨は、湿った南東風と深い因果関係があること、地雨性の降雨と対流性の降雨を比較した場合、山岳部の降雨については、後者の場合により強い分布上のコントラストがあらわれることが得られている。このことから、湿った南東風が山腹を滑昇し凝結する際に生起する局地性の強い降雨が、当該個所に特徴的な降雨形態としてとらえられ、事実、観測値をもとにして描いた等雨量線図にも、南東方向斜面に脈伏の強雨域のあらわれる例がいくつかみられている。

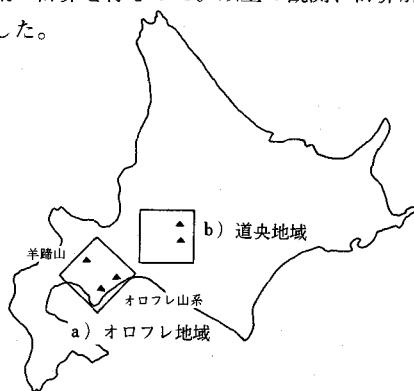


図2.1 観測地点位置の概略

2.2 著者らの実施した降雨観測と結果の概要

図2.1, b)(詳細図は図2.2)に示す位置において、既設8箇所、著者らの設置した10箇所の雨量計をもって1988年7月から10月の正味3ヶ月にわたる観測を実施した。特に、この中では8月下旬に道央を中心に降った大雨時のデータを得ることができた。この時の総観場の状況としては関東沖の太平洋上に熱帯低気圧が停滞し、湿った空気が吹き込む一方、大陸の高気圧から乾燥した冷たい空気が吹き込んで北海道上の前線の活動が活発であり、当該個所の西斜面地域においても8月26日の午前中には、時間降雨強度にして30 mm/hr程度の強い雨が観測されている。なお、この時の地上天気図、高層天気図をみると、前線の移動に伴って近傍の風向が東寄りから西寄りに推移しているのが見受けられた。図2.3は、この前後1週間(8/25~8/31)、図2.4は全期間中(7/20~10/15)の総雨量を標高別にプロットしたものであるが、これらから降雨量は標高と線形に増加していることがわかる。このよう

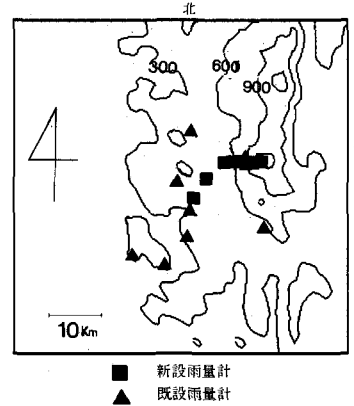


図2.2 雨量計位置図

な降雨と地形、標高に着目した観測例はわが国において比較的少なく、ここに示す結果は、今後山地流域における降雨現象を考えると、重要な資料になると思われる。

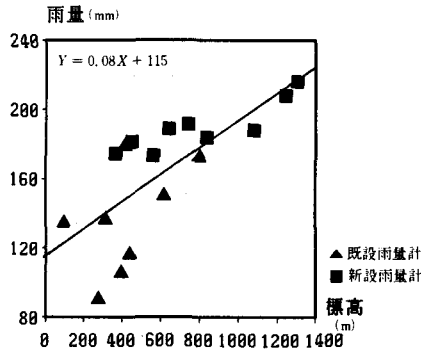


図2.3 標高別雨量データ
(1988, 8/25~8/31総雨量)

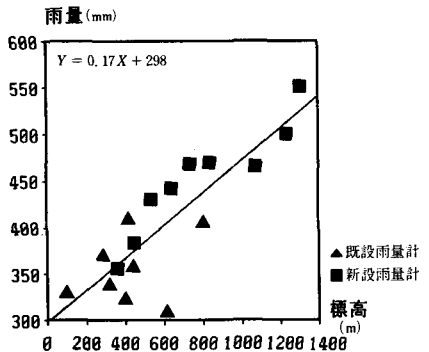


図2.4 標高別雨量データ
(1988, 7/20~10/15総雨量)

3. 山地流域における風の場の解析

3.1 計算方法³⁾

降雨に寄与する風としては充分慣性が大きく、地形としても水平方向に対する鉛直方向の変化は充分緩やかなものと考えられることからポテンシャル流を想定した。また、浅水方程式で移流項とコリオリ力の項をオーダー比較すると、後者が前者のオーダーを上まわるには $L^2 > U^2/f^2$ なる条件が得られる。なお、 L は代表スケール長(m)、 U は水平主流風速(m/s)、 f はコリオリパラメータで 1.1×10^{-4} (S^{-1}) である。このことから仮に $U = 10$ m/s を与えた場合、コリオリ力が有効なのは $10^5 (= 100 \text{ km})$ 以上のスケールであり、本論文で取り扱う数 km から数 10 km の対象範囲においてはコリオリ効果を無視して考えることが可能である。

計算の手順としては、図3.1のフローに従って地形をデジタルマップ化し、表3.1に示す基礎式を離散化したものと合成して、上空境界層にふたのある場合の3次元ポテンシャル解の合成として風を算出した。なお、計算のメッシュ間隔は水平方向に1000 m、鉛直方向に200 mとした。

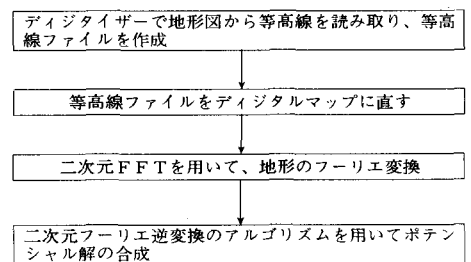


図3.1 風の計算のフローチャート

表3.1 風の計算の基礎式

$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$	(3.1)	境界条件
速度ポテンシャル		$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$ at $z = 0$
$\phi = Ux + \phi(z)e^{ikx} \cdot e^{ily}$	(3.2)	$\frac{\partial \phi}{\partial z} = U \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x}$ at $z = -h$
地形を表わす関数		ここで
$\eta = -h + a \cdot e^{ikx} \cdot e^{ily}$	(3.3)	U : x 方向の主流風速(m/s)、 h : 境界層高さ(m)
		$\phi(z)$: z 方向の速度ポテンシャル
		k, l : 水平方向の地形波数

3.2 地形の風の場に及ぼす影響⁵⁾

山の形状が上昇風に与える影響を把握するため、図2.1のa)に示す地域(以下オロフレ地域と称する。)、およびb)に示す地域(以下道央地域と称する。)を対象として計算を行なった。対象箇所はいずれも一辺63kmの正方形の区域であり、前者の区域には標高1200~1300mのオロフレ山系の峰々が南西方向に連なっている他、孤立峰である標高約1800mの羊蹄山がある。また、

後者の区域では、標高1600~1700m級の山々が南北方向に山脈をなすという状況になっている。図3.2には、オロフレ地域において上空5000mの面で上昇風の強い領域(主流風速の2%以上)をドットで表示した。a)は南東風が吹き込む場合で、この場合はオロフレの峰々がいわば壁のように作用して、南東斜面上空に広範囲にわたり上昇風速の卓越する場を形成している。これに対してb)は南西風が吹き込む場合で、この場合にはオロフレ付近の強い上昇風速場の形成に地形はほとんど寄与していないことがわかる。また、標高的には高い羊蹄山の付近では、この面においては既に入昇風が弱まっていることも注目される。

次に、図3.3には道央地域において西風が吹き込んだ場合に上と同様に上昇風の強い領域を示す。この場合には南北に連なる山脈の西斜面上に強い上昇風速場が形成されてお

り、次章以降で記述する強い雨域の形成に大きく寄与することが予想される。

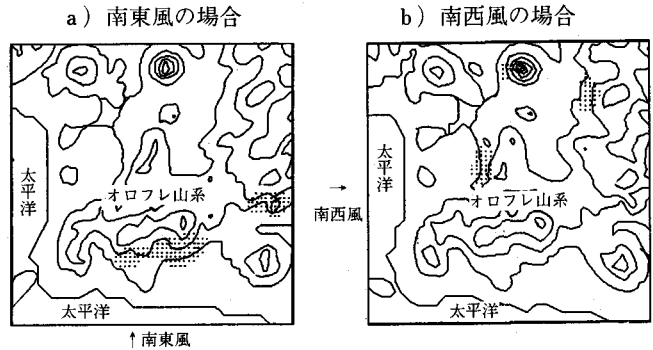


図3.2 上昇風速の強い領域(オロフレ地域)

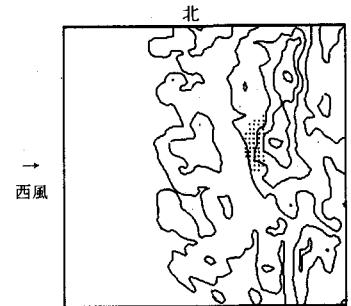


図3.3 上昇風速の強い領域(道央地域)

4. 山地流域における降雨の解析

4.1 計算に用いたモデルの概要⁴⁾⁵⁾

降雨を計算するモデルとしては、著者らによってその特性が詳細に検討されているケスラーモデル²⁾を用いた。このモデルでは図4.1に示すようなメカニズムの下で雲と雨の発生、およびそれらの相互作用を生起させ、降雨現象を再現する。ただし、この中では温度や気圧の影響、また氷晶の介在についてはモデルのパラメータ中に組み込まれており、計算上はあらわれてこない。

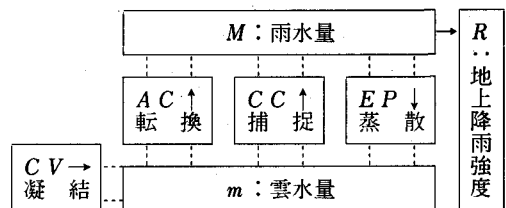


図4.1 ケスラーモデルによる降雨機構の概念図

表4.1 雨の計算の基礎式

$\frac{\partial M}{\partial t} = -u \frac{\partial M}{\partial x} - v \frac{\partial M}{\partial y} - (w + V) \frac{\partial M}{\partial z} + AC + CC - EP \quad (4.1)$	M : 雨水量 (g/m^3), m : 雲水量 (g/m^3) u, v, w : 風速 (m/s), V : 雨の落下速度 (m/s)
$\frac{\partial m}{\partial t} = -u \frac{\partial m}{\partial x} - v \frac{\partial m}{\partial y} - w \frac{\partial m}{\partial z} - AC - CC + EP + CV \quad (4.2)$	AC : 転換, CC : 補促 EP : 蒸散, CV : 凝結
$R = 138 N_0^{-1/8} M^{9/8} \quad (4.3)$	R : 降雨強度 (mm/hr) N_0 : 定数 ($= 1 \times 10^7 \text{m}^{-4}$)

具体的な計算手順としては、表4.1の基礎式を差分化したものに、前章で算出した風を定常的に与え、計算の安定条件より得られる差分スキームをもって雲水量、雨水量を逐次、三次元的に計算していく。なおこの時の空間メッシュのスキームは、風の計算と同様に水平方向に1000 m、鉛直方向に200 mとし、差分は空間について風上差分、時間について前進差分とした。また、大気の初期状態としては、全空間で水蒸気が飽和している ($m = 0$) とした。

4.2 ケスラーモデルによる降雨特性

降雨特性についての理解を深める目的で、雨の計算に関わる様々な要因が結果にどのように反映されるかを検討した。この中では単純な形状をもつ山で種々の数値実験を行なった。計算により得られた結果を要約すると以下ようになる。

- 1) 降雨現象の非定常特性：文献4)に示す著者らの研究においても示されているが、3次元計算を行なっている本計算例においても、再現される降雨現象は概ね30～40分で定常に達している。ただし、 AC (転換)の臨界値を小さくし、雲の生成に対する応答を鋭敏にすることで、雨はより早く定常に達するようである。
- 2) 主流風速が降雨特性に与える影響：上流境界から与える主流風速を様々に変えて雨の計算を行なうと、主流風速の増加にともなって上昇風速も増加することで降雨強度も大きくなる。ただし、移流効果によって雨域は下流側に徐々にシフトし、主流風速を過大に与えると逆に降雨強度の弱まる場合がみられる。

図4.2には高さ1000 mの同心円状の孤立峰に与える主流風速を変えて計算した結果を示す。

- 3) 凝結効果が降雨特性に与える影響：図4.3には凝結作用が降雨にどのような影響を与えるかをみるため、試行的に凝結項の上昇風速を変えて計算した結果を示す。なお、この図は対象地形として高さ1000 mの同心円状の孤立峰を考え、上流境界から10 m/sの主流風速を与えて計算した地上降雨強度を、頂上を切る測線上で縦断的にプロットしたものである。結果から凝結項中の上昇風速にほぼ線形に降雨強度が増加していることが推察される。

- 4) 山の形状が降雨特性に与える影響：図4.4には同じ高さ(1000 m)をもつ同心円状の孤立峰と、縦断的に同一の断面をもつ山脈状の山で降雨強度を計算した結果である。この場合も上流境界から10 m/sの主流

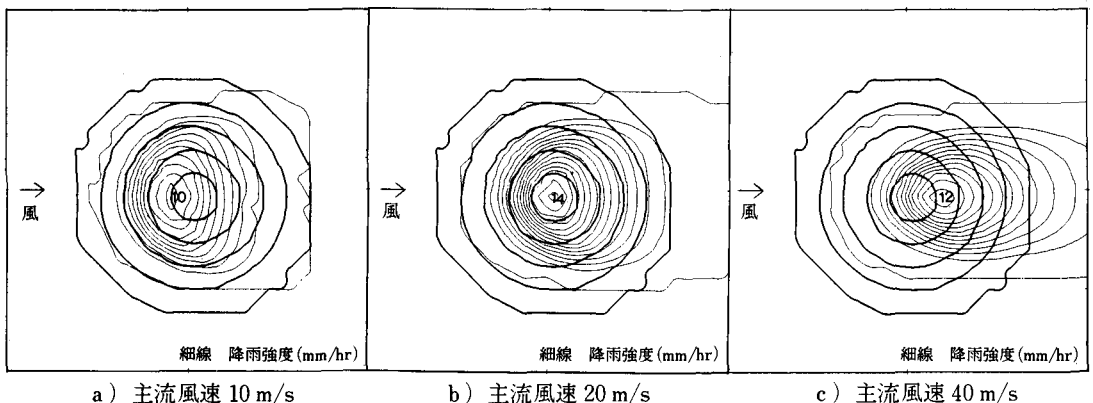


図4.2 主流風速の変化に伴う雨域の変化

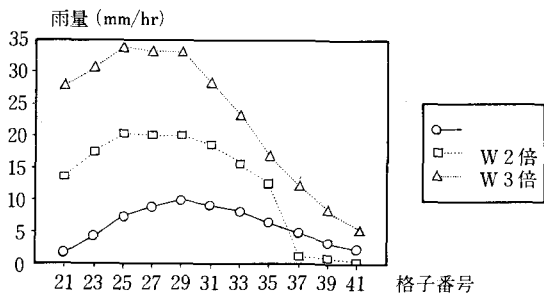


図 4.3 凝結項中の上昇風速が降雨量に与える影響

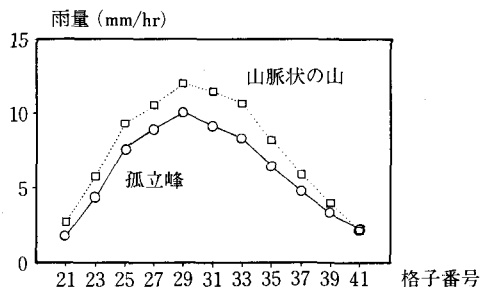


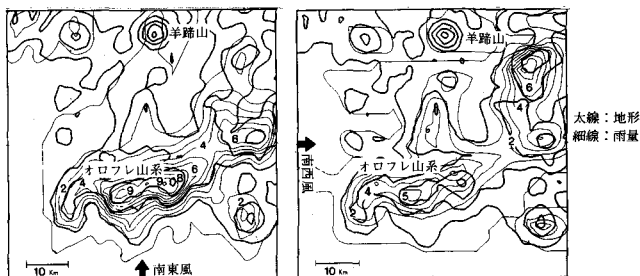
図 4.4 孤立峰と山脈状の山の違いによる降雨量の相違

風速を与え、頂上を切る測線上（したがって両者とも同じ断面形状）で地上降雨強度をプロットしている。風のまわりこみの有無による上昇風速の強弱がそのまま降雨強度の強弱に反映されていることがわかる。これは実地形上の降雨特性を類推するうえでも重要な要因と言える。

4.3 実地形上における降雨の計算例とその特性

降雨計算の対象個所は、風の場の計算と同様に先に示したオロフレ地域、および道央地域を選定した。図 4.5 はオロフレ地域の降雨分布を示した図であり、a) は南東風が吹きこんだ場合、b) は南西風が吹きこんだ場合の地上降雨強度 R (mm/hr) の等雨量線図を表わしている。条件としては、上流境界から 10 m/s の風を与え、計算時間は 2 時間とした。

南東風の場合、菊地らの観測結果と同様の傾向をもって、オロフレ南東斜面上に強い雨域の再現されることが確認された。一方、南西風の場合、図 3.2 に示した地形の効果による上昇風の強弱がそのまま反映され、オロフレ周囲の雨量は、全体として南東風の半分程度にすぎない。

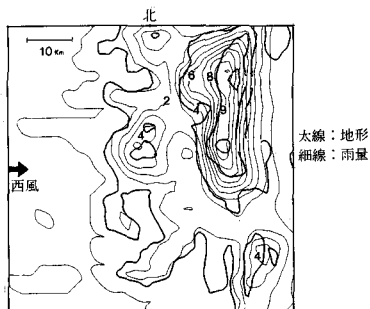


a) 南東風の場合 (図中の数字は降雨強度 (mm/hr))
b) 南西風の場合 (図中の数字は降雨強度 (mm/hr))

図 4.5 オロフレ地域の地上降雨強度計算結果

次に道央地域に西風が吹きこんだ場合について、降雨分布の計算結果を図

4.6 に示す。計算条件は前例と同様である。図 3.2 に示された結果が反映され、南北に連なる山脈の西斜面上において強い降雨がみられる。このことを意図して図 2.2 の位置に雨量計が設置され観測が行なわれたが、それらに最も近接するメッシュ上の地上降雨強度をプロットしたものが図 4.7 である。図 2.3 および図 2.4 と比較すると、計算上においても、標高とともに雨量が線形に増加する傾向が再現されている。



(図中の数字は降雨強度 (mm/hr))

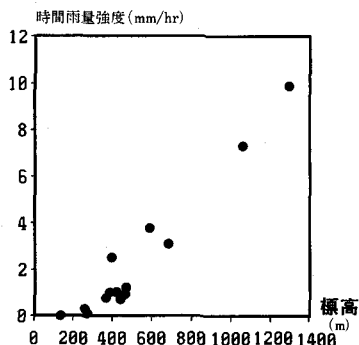


図 4.6 道央地域の地上降雨強度計算結果 図 4.7 道央地域の計算降雨強度

4.4 降雨現象に与える地形スケールの影響

一連のモデルの中では実地形をデジタルマップ化し、それを離散的にフーリエ変換して風や雨の計算に利用してきた。ここでは降雨に与える地形のスケール（地形のフーリエ成分）の影響を検討した。図4.8は、オロフレ地域のフーリエ成分を視覚化したものだが、このうち第10項以上の高周波成分を除去した地形に対して前例と同様に南東風を与えて計算を行なった。結果を図4.9に示すが、分布上はほとんど大差ない降雨がみられる。この時、サンプリング定理から考慮される最小のスケールは約6kmとなっている。すなわち、地形スケールで6kmより小さい山地の起伏は、地形性降雨に対して大きな影響を与えていないとみることができる。

5. 結 論

本研究で得られた結果を要約すると、1) 著者らの現地観測により、山地流域の降雨量は標高とほぼ線形に増大する。2) 風向に対して山脈状に連なっている地形に湿った空気が吹きこむと、風向に面した斜面上で特に強い雨が観測される。3) 上記の傾向、効果は本論文で提案したモデルで良く再現される。4) 降雨のモデル計算では上昇風速が大きい程強い雨が降る。雨量は凝結項中で与えられる上昇風速にほぼ線形に大きくなる。ただし、水平方向の移流速度が過大なときは降雨強度は逆に弱まる場合もみられる。5) 実地形上における5～6km以下のスケールの高周波成分を除去しても雨域の分布および降雨強度に大きな変化は表われない。

謝辞：本研究の一部は文部省科学研究費重点領域研究(1)および一般研究C(代表、山田正)の援助を受けている。

参考文献

- 1) 近野好文, 菊地勝弘：北海道の局地的大雨(I), (II), 北海道オロフレ山系南東斜面の降雨特性(I), (II), 北海道大学地球物理学研究報告, 1977. 9, 1978. 5, 1980. 7.
- 2) Kessler. E: Models of microphysical parameters and processes, Meteorological Monographs, # 10, pp. 26～31, 1969.
- 3) 山田正, 渡辺英章：一般的な山地地形における風の場の計算, 土木学会北海道支部論文集, 第44号, pp. 287～292, 1988, 山地地形における風の場の解析, 第43回年次学術講演概要集, pp. 68～69, 1988.
- 4) 山田正, 渡部元：地形性降雨の数値実験に関する研究, 土木学会北海道支部論文集, 第43号, pp. 183～188, 1987, 地形性降雨の数値シミュレーション, 第42回年次学術講演概要集第2部, pp. 98～99, 1987.
- 5) 山田正, 内藤修, 中津川誠：流域スケールにおける風の場の算出法に関する研究(土木学会北海道支部論文集投稿中)

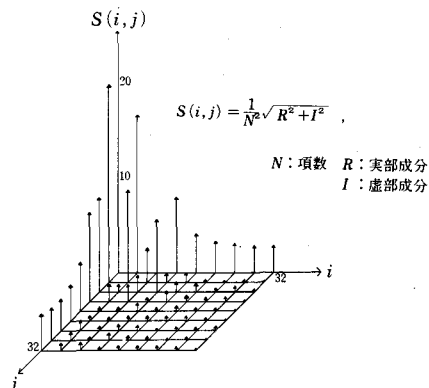


図4.8 実地形のフーリエ成分(オロフレ地域)

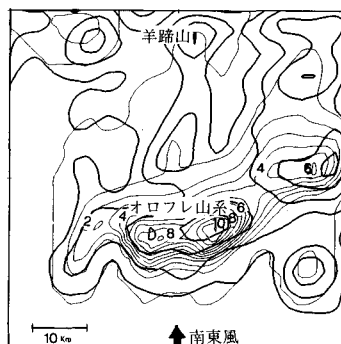


図4.9 オロフレ地域における地形の高周波成分除去後の地上降雨強度計算結果
(図中の数字は降雨強度(mm/hr))