

土 木 研 究 所 資 料

土砂災害警戒避難システムにおける
小型レーダ雨量計の導入に関する研究

昭和63年1月

建設省土木研究所
砂防部砂防研究室

「Copyright ©(1988)by P. W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土砂災害警戒避難システムにおける 小型レーダ雨量計の導入に関する研究

砂防研究室室長	水	山	高	久
部外研究員	谷	山	勝	幸
研究員	原		義	文

【要 旨】

土砂災害警戒避難システムにおける重要な要素である雨量を面的に把握するため、レーダ雨量計を利用することが期待されている。

レーダ雨量計は大型のものが建設省によって建設されつつあるが、山の影になるなどの理由で十分な精度で雨量が観測されない可能性がある。そこで、現在稼働中の大型レーダ雨量計の覆域図を作成し、カバーされない地域を明らかにした。そのような地域に適用するまたは、大型レーダ雨量計よりも詳細に雨量の分布を把握する方法として小型レーダ雨量計を導入することを考えられる。そこで、小型レーダ雨量計の観測精度を調べるため鹿児島県桜島と静岡県富士山大沢川で建設省大隅工事事務所、富士砂防工事事務所の協力、日本無線(株)の資材協力の下に小型レーダ雨量計の試験を行った。その結果、小型レーダ雨量計は大型レーダ雨量計を補完するものとして十分適用が可能であることがわかった。

キーワード：小型レーダ雨量計、土砂災害警戒避難システム

**Study on the introduction of small-sized radar raingauge into the
warning and evacuation system for mitigating sediment disasters**

by

Takahisa MIZUYAMA

Katsuyuki TANIYAMA

Yoshihumi HARA

Synopsis

The radar raingauge is expected to be put to use for grasping the surface rainfall which is an important element in the warning and evacuation system for mitigating sediment disasters. Large-sized radar raingauges are being constructed by the Ministry of Construction. However, being shadows of mountains, they may not observe the rainfall precisely enough. Therefore, areal maps covered by the large-sized radar raingauges which are under operation at present are drawn up and areas which are not included are made clear. The application of small-sized radar raingauge to these areas and its introduction as a method to identify the rainfall distribution more detailedly than do the large-sized radar raingauges are considered. Under the cooperation of Ohsumi Work Office and Fuji Sabo Work Office of the Ministry of Construction, and the Japan Radio Company Ltd., an experiment to test the precision of small-sized radar raingauge was conducted at Sakurajima in Kagoshima Prefecture and at the River Osawa of Mt. Fuji in Shizuoka Prefecture. The results revealed that small-sized radar raingauges are fully applicable as a supplement of the large-sized radar raingauges.

Keywords : Small-sized radar raingauge, warning and evacuation system for mitigating sediment disasters.

目 次

は じ め に	1
1. 調 査 概 要	2
1.1 概 説	2
1.2 調査内容	2
2. レーダの概略	7
2.1 レーダの種類	7
2.2 レーダの作動管理	8
3. 大型レーダ雨量計の覆域	11
3.1 可視エリアの計算方法	12
3.1.1 地物による障害の評価	13
3.1.2 高度による限界の評価	15
3.1.3 ま と め	17
4. 桜島と大沢扇状地での小型レーダ雨量計の実験	19
4.1 桜島での小型レーダ雨量計の実験	19
4.2 大沢扇状地での小型レーダ雨量計の実験	32
5. ま と め	40

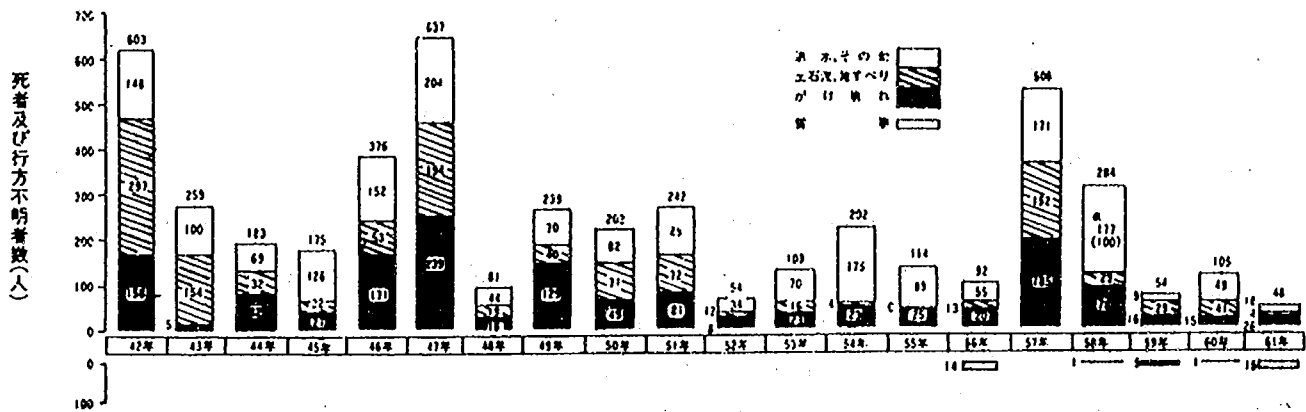
図 の 説 明

図0-1	自然災害による原因別死者・行方不明者数	1
図1-1	最大時間雨量と土石流発生時刻の差の分布（崖崩れを含む）（昭和57：長崎）	2
図1-2	雨域面積と最大雨量の関係（一時間雨量）（鹿児島豪雨）	4
図1-3	雨域面積と最大雨量の関係（一時間雨量）（京都府南部豪雨）	4
表1-1	可能最大雨量と観測雨量の比（鹿児島豪雨）	5
表1-2	可能最大雨量と観測雨量の比（京都府南部豪雨）	5
図1-4	大型レーダ雨量計と小型レーダ雨量計のメッシュ図（桜島）	6
図2-1	電磁波のスペクトルとレーダ周波数	7
図2-1	特殊レーダの種類	7
図2-2	レーダ説明図	8
図2-3	目標体積とその距離	8
図2-4	空中線の全方向の実測例	8
図2-5	直径3 mパラボラ空中線の近軸指向特性の実測例	9
図2-6	空中線指向特性	9
図3-1	大型レーダ雨量計の位置	11
図3-1	大型レーダ雨量計の観測可能地域	11
図3-2	レーダの誤差の原因	12
図3-3	降雨帯内の微細構造（Houze et al., 1980）	12
図3-4	大型レーダ雨量計のメッシュ図	12
図3-5	地物の影響	13
図3-6	式3-1（主ローブの近似曲線）	13
図3-7	式3-7（雨量換算時の減衰曲線）	14
表3-2	代表的な補間法とその比較	15
図3-8	大型レーダ雨量計のビーム高度（蛇峠）	15
図3-9	北半球の気温分布	16
図3-10	雨雲のレーダによる観測例	16
図3-3	大型レーダ雨量計のブライトバンド推定高度	16
図3-12	県別土砂災害危険地域	17
図3-11	大型レーダ雨量計の覆域図（10%以上の誤差）	18
表4-1	小型レーダ雨量計の仕様	19
図4-1	桜島の観測地点位置図	19
図4-2	桜島の観測地点位置図（鳥観図）	20
図4-3	桜島の小型レーダ雨量計覆域図	20
図4-4	桜島での大型レーダ雨量計と小型レーダ雨量計の位置図	21
図4-5	桜島の小型レーダ雨量計と大型レーダ雨量計のメッシュ図	21
表4-2	桜島の観測地点及びレーダー一覧	22

図4-6	桜島の観測降雨の天気図	23
図4-7	桜島での小型レーダ雨量計の相関図	24
図4-8	桜島での一時間雨量の時系列図(8.26 9:00~18:00)	26
図4-9	桜島での一時間雨量の横断面図(8.24 11:00~12:00)	29
図4-10	桜島での一時間雨量の横断面図(8.24 13:00~14:00)	30
図4-11-1	桜島での小型レーダ雨量計による等降雨図と 大型レーダ雨量計のメッシュ(8.1 10:00~11:00)	31
図4-11-2	桜島での小型レーダ雨量計による等降雨図と 大型レーダ雨量計のメッシュ拡大図(8.1 10:00~11:00)	31
図4-12	大沢扇状地の観測地点位置図	32
図4-13	大沢扇状地の観測地点位置図(鳥観図)	32
図4-14	大沢扇状地の小型レーダ雨量計覆域図	33
図4-15	大沢扇状地での大型レーダ雨量計と小型レーダ雨量計の位置図	34
図4-16	大沢扇状地の小型レーダ雨量計と大型レーダ雨量計のメッシュ図	34
表4-3	大沢扇状地の観測地点及びレーダー一覧	35
図4-17	大沢扇状地の観測降雨の天気図	36
図4-18	大沢扇状地での小型レーダ雨量計の相関図	37
図4-19	大沢扇状地での一時間雨量の時系列図(10.16 22:00~10.17 15:00)	38
図4-20	大沢扇状地での一時間雨量の横断面図(10.17 6:00~7:00)	39
図5-1	火山位置図	40

はじめに

わが国の国土の7割が急峻な山地である。中央部には2000mから3000mの山脈が日本の屋根を形成しており、山々からは急勾配の河川が流れ出している。またわが国は火山国で脆い火山噴出物で広く覆われ、その上多くの断層が地盤を脆くしている。豊富な降雨により土砂は非常に移動しやすいうえに入口が多く土砂の氾濫、堆積によってつくられた扇状地や急斜地まで土地利用が進んでいる。そしてこれらのことが、土砂災害をわが国の国土と気候自体からもたらされる本質的な災害としている。図0-1¹⁾に示すように土砂災害による死者は、自然災害による犠牲者の大部分を占めている。



注) 自然災害のうち、台風・大雨・強風・高潮・地震・津波災害について集計したものである。 ※58年()内：津波による死者数

図0-1 自然災害による原因別死者・行方不明者数¹⁾

現在このような災害を未然に防ぐためにハードとソフトの両面からの対策がなされつつある。ここでは土砂災害の一つである土石流を取り上げ、総合土石流対策の一環である、早期警戒避難システムの中に組み込まれているレーダシステムの有効性について検討した。

この調査では

1. 現在設置されている大型レーダ雨量計の覆域を計算し、砂防上必要な地域が大型レーダ雨量計で見えているかを調査した。
2. 大型レーダ雨量計で見えにくい地域を観測するものとして、あるいは砂防上重要な地域であり大型レーダ雨量計よりももっときめ細かいデータが必要な地区の観測のための一つの方法として、鹿児島県の桜島、富士山の大沢扇状地において小型レーダ雨量計を設置し降雨観測を行った。

大型レーダ雨量計の覆域の計算から、見えにくい地域として和歌山、日本アルプス、鳥取などがあることがわかり、砂防上から何等かの対策が求められる。

小型レーダ雨量計の実験では雷雨性の降雨、台風性の降雨について相関係数、時系列図、横断面図等より精度の調査を行った。相関係数は0.8004と0.8021、また、時系列図や横断面図も地上雨量計と強い相関を示した。また、小型レーダ雨量計は国見山の大型レーダ雨量計と比較することにより、より細かく雨量を捕捉できることがわかり、大型雨量計を補佐するものとして土石流早期警戒避難における一つの有力な手段であると思われる。

1. 調査概要

1.1 概説

総合土石流対策の中の、土石流警戒避難システムのために正確な雨量情報を得る方法としてレーダの有効性について調査を行った。

行った調査は、砂防上から評価した。大型レーダ雨量計の覆域図の作成、及び大型レーダ雨量計を補佐するものとして、小型レーダ雨量計の有効性の評価である。

一般的に土砂災害は降雨のピークで起きやすい(図1-1²⁾)。しかしその降雨の情報を正確に知ることは非常に難しい。なぜなら、降雨強度は短い距離で激しく変化するからである。土砂災害を予知し適切な対策をとるためには降雨の情報を正確にきめ細かく捕らえる必要がある。たとえば、昭和61年7月10日の鹿児島災害の豪雨から雨域面積と最大雨量の関係を示すと図1-2³⁾の様になる。図1-2 はある観測地点で30mm/hの降雨を観測したとすると、その半径5km以内で起こり得る最大雨量は93mm/h、半径10km以内では約100mm/hであることを示している。同様に、昭和61年7月21日の京都府南部の災害より雨域面積と最大雨量の関係を示したのが図1-3³⁾である。図1-2・図1-3 から可能最大雨量と観測雨量の比を出したのが表1-1、表1-2³⁾である。表1-1、表1-2 より十分正確に降雨状況を知るためには地上雨量計を非常に密に設置する必要があるが、それは非常に不経済である。そのため降雨情報を平面的に捕らえるレーダが考えられ大型レーダ雨量計が全国に設置されつつある。しかし、大型レーダ雨量計は確かに有効な手段であるが砂防で必要とされる山間部では複雑な地形のため見えない地域があると予想される。また、大型レーダ雨量計のメッシュは平均10.46km²と比較的大きく雷雨など強いが狭い地域の降雨が見え無かったり、付近と平均化され正確な雨量が得られない可能性がある。あるいは、図1-4 のように大型レーダ雨量計だけでは土石流が起きそうだとわかっていても、どの溪流が危ないとは特定できない可能性がある。

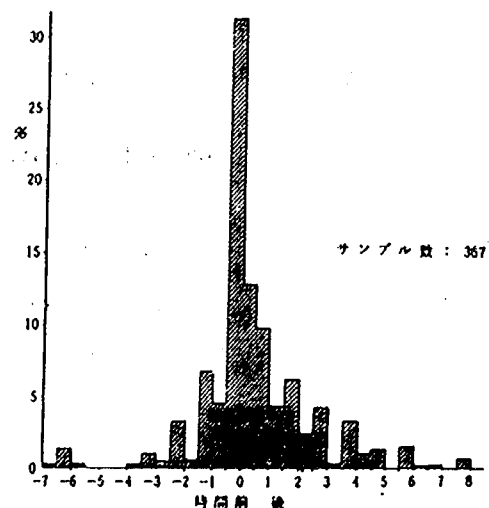


図1-1 最大時間雨量と土石流発生時刻の差の分布
(崖崩れを含む)(昭和57:長崎)²⁾

1.2 調査内容

調査内容として、以下の作業を行った。

(1) 砂防からみた 大型レーダ雨量計の覆域図の作成。

土石流警戒避難システムの情報源として 現在全国に展開されている大型レーダ雨量システムの観測エリアを調査し 砂防上どの様な地区を補助する必要があるのかを調べる。

(2) 鹿児島県の桜島、富士山の大沢扇状地における小型レーダ雨量計による降雨観測を行い、地上雨量計、大型レーダ雨量計との比較検討。

土石流の発生の頻度の高い桜島、富士山大沢扇状地において、昭和62年7月から昭和62年10月まで小型レーダ雨量計による降雨観測実験を行い、地上雨量計、大型レーダ雨量計との相関係数、降雨の時系列図、

横断面図等による降雨計測の特性の比較を行い、大型・小型レーダ雨量計の特性、有効性を調査すると共に、大型レーダ雨量計及び小型レーダ雨量計を組み入れた土砂災害警戒・避難システムを検討をする。

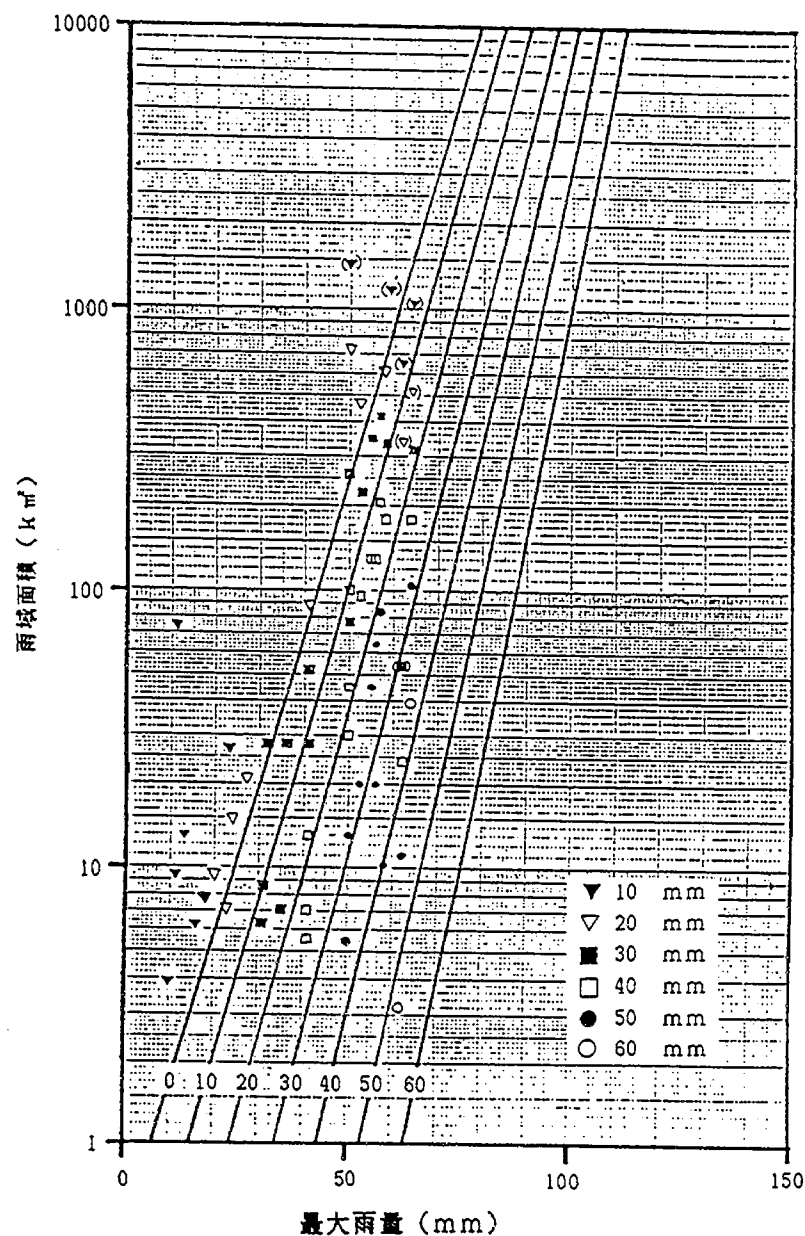


図1-2 雨域面積と最大雨量の関係(一時間雨量) (鹿児島豪雨)³⁾

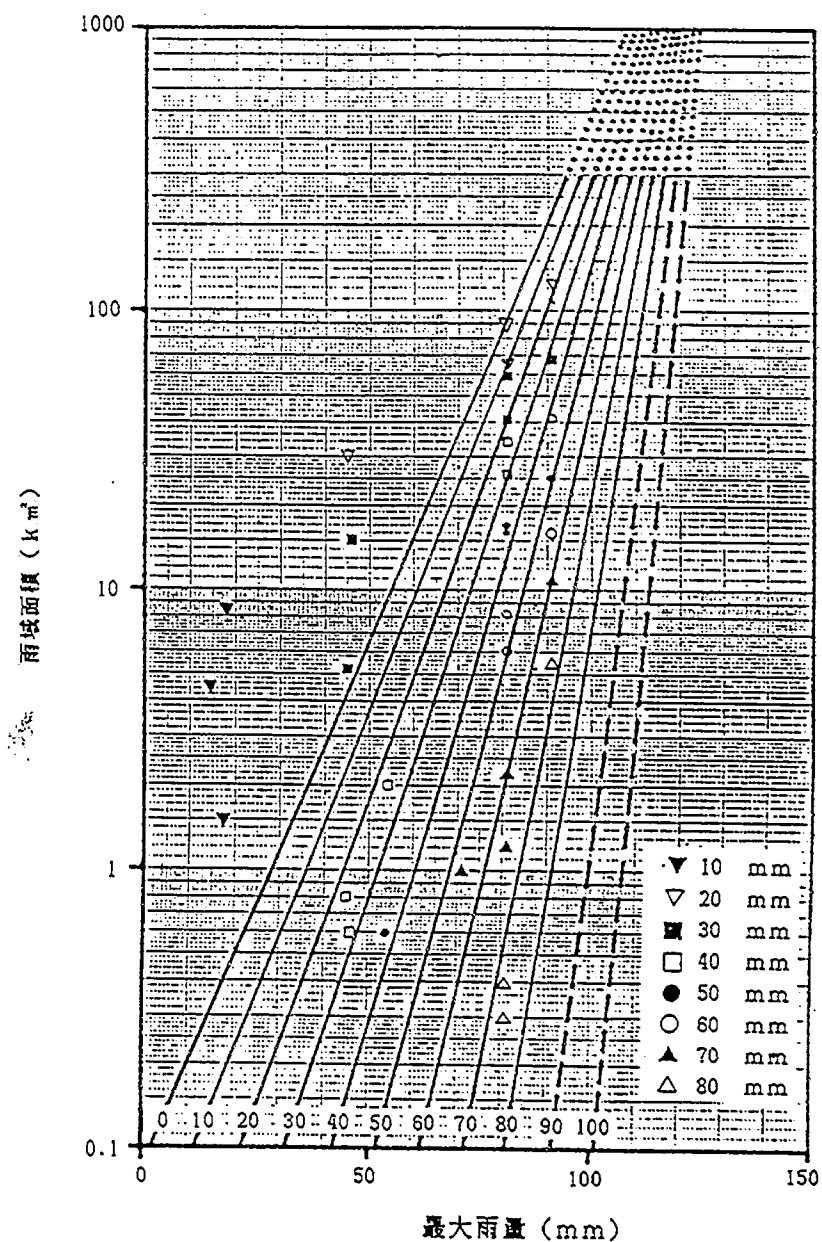


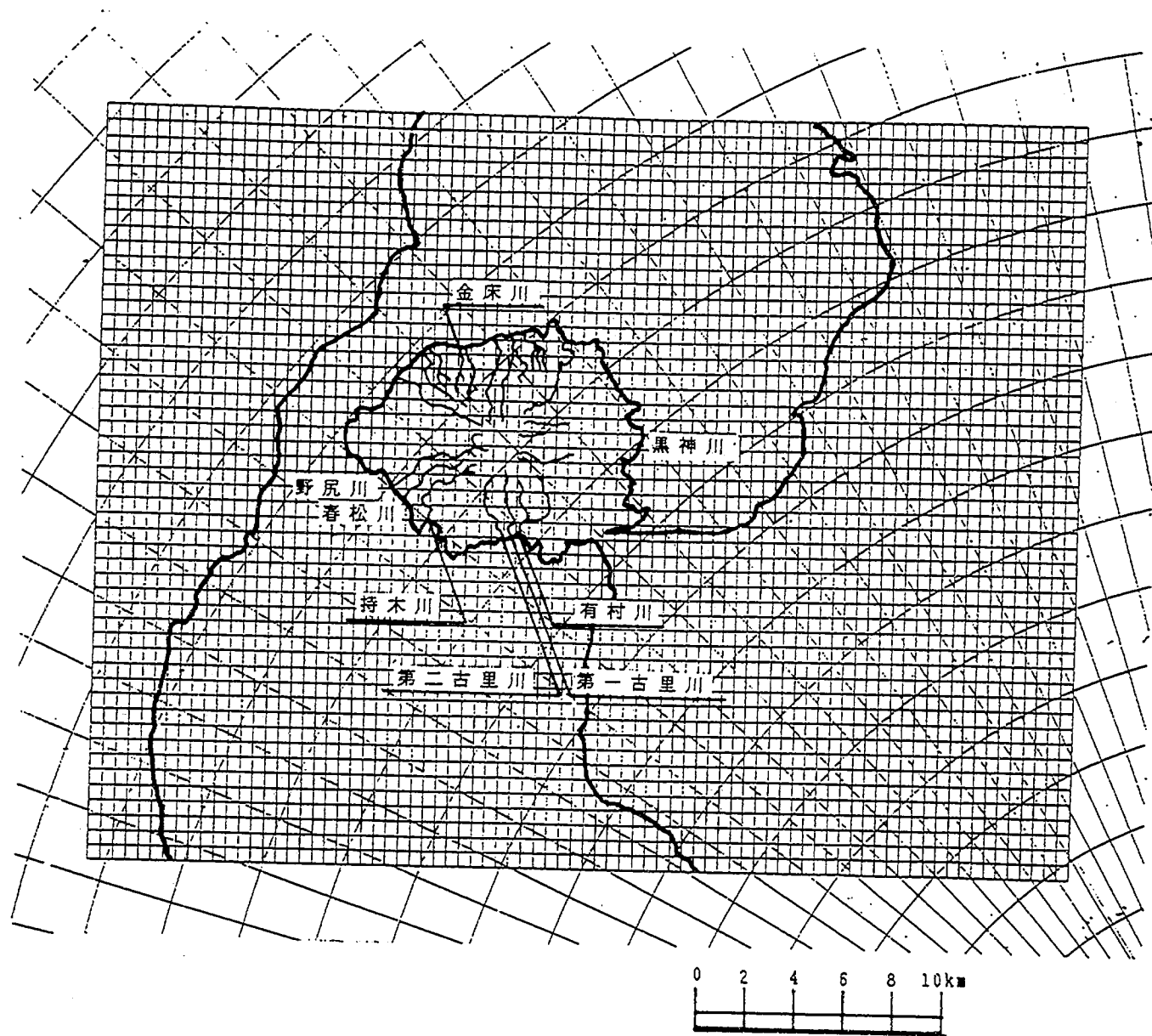
図1-3 雨域面積と最大雨量の関係(一時間雨量) (京都府南部豪雨)³⁾

表1-2 可能最大雨量と観測雨量の比(京都府南部豪雨)³⁾

代表面積 k m ²	設置間隔 k m	観測値 mm	10	20	30	40	50	60
1000	32		6.7	3.7	2.7	2.2	1.9	1.7
500	22		6.2	3.4	2.5	2.1	1.8	1.6
300	17		5.8	3.2	2.4	2.0	1.7	1.6
200	14		5.5	3.1	2.3	1.9	1.7	1.5
100	10		4.9	2.8	2.1	1.8	1.6	1.5
50	7		4.4	2.6	2.0	1.7	1.5	1.4
30	5.5		4.0	2.4	1.9	1.6	1.5	1.4
20	4.5		3.7	2.3	1.8	1.6	1.4	1.3
10	3.2		3.2	2.0	1.6	1.5	1.3	1.3
5	2.2		2.7	1.8	1.5	1.3	1.3	1.2

表1-1 可能最大雨量と観測雨量の比(鹿児島豪雨)³⁾

代表面積 k m ²	設置間隔 k m	観測値 mm	10	20	30	40	50	60	70	80	90
300	17		9.7	5.0	3.4	2.7	2.2	1.9	1.6	1.5	1.3
200	14		9.3	4.9	3.3	2.6	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3
100	10		8.6	4.5	3.1	2.4	2.0	1.8	1.5	1.4	1.3
50	7		7.8	4.2	2.9	2.3	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3
30	5.5		7.3	3.9	2.8	2.2	1.9	1.6	1.5	1.3	1.2
20	4.5		6.8	3.7	2.6	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2
10	3.2		6.1	3.4	2.4	2.0	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2
5	2.2		5.3	3.0	2.2	1.9	1.6	1.4	1.3	1.2	1.2
3	1.7		4.8	2.8	2.1	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2
2	1.4		4.4	2.6	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
1	1		3.6	2.3	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1
0.5	0.7		2.9	1.9	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1



図中の放射線状に切られた扇型の図形は大型レーダ雨量計のメッシュを表す。図中の長方形の図形は小型レーダ雨量計のメッシュを表す。大型レーダ雨量計のメッシュの大きさは図の中心付近で 6.6km^2 である、それに対して小型レーダ雨量計のメッシュの大きさは 0.3km^2 である。

図1-4 大型レーダ雨量計と小型レーダ雨量計のメッシュ図(桜島)

2. レーダの概略

2.1 レーダの種類

レーダは送信電波の種類によって、電波を断続的に出すパルス(PULSE)を使用するものと、連続的に出す持続波(CW - CONTINUOUS WAVE)を使用するものに大別される。建設省の大型レーダ雨量計及びここで使用した小型レーダ雨量計はすべてパルスレーダである。

レーダに使用される電磁波は一般にマイクロ波(周波数 $300\text{MHz} \sim 30\text{GHz}$)である。図2-1⁴⁾に電磁波のスペクトルにしめるレーダ周波数の位置を示す。図から分かるようにレーダ周波数はさらに Lバンド(波長20cm前後)、Sバンド(10cm前後)、Cバンド(5cm前後)、Xバンド(3cm前後) Sバンド(1cm前後)に分けることができる。一般的に、波長が短くなるほどビームが狭くなり、分解能がよくなるが、電波が大気中を伝わる時、降水粒子によって受ける減衰や大気ガスによる吸収も大きくなる。

一般のレーダは受信電力値のみから、大気中の諸現象を計測するが、周波数変化の特性(ドップラ効果)や偏波特性を利用して観測精度を高めようとする特殊レーダ(MULTIPARMETER RADAR)もある。(表2-1)⁵⁾

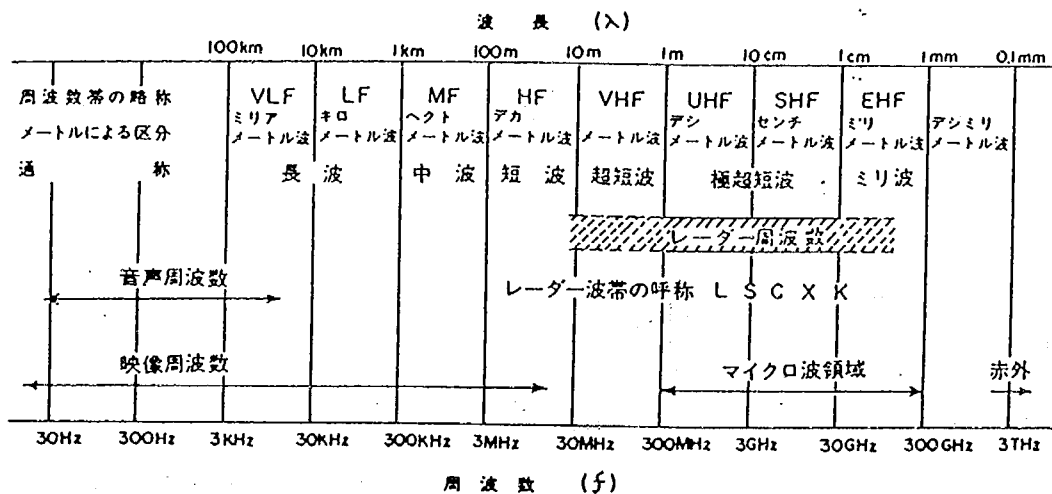


図2-1 電磁波のスペクトルとレーダ周波数⁴⁾

表2-1 特殊レーダの種類⁵⁾

種類	測定方法	測定因子
二波長レーダ	波長の異なる電波を用い反射特性の差	降水粒子の粒子分布、降雨と雷の区別
円偏波レーダ	円偏波をうけた物体からの反射信号から円偏波抑圧比	降水粒子の粒子分布、水物質の種類
二重偏波レーダ	水平、垂直偏波の反射因子の差	降水粒子の粒子分布、水物質の種類
ドップラーレーダ	ドップラースペクトラム	降水粒子の粒子分布
垂直指向ドップラーレーダ	ドップラースペクトラム	降水粒子の粒子分布、水物質の種類

2.2 レーダの作動原理

図2-2の①地点にレーダがあり②地点に雨滴が在ったとする、①地点から P_t の電力で電波を出したとし途中で減衰などが無いとすると地点での受信電力は

$$P_r(B) = \frac{P_t \cdot G}{4\pi r^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

となる。ここで G は電波利得とする。この雨滴が σ の割合で電波を反射したとすると、地点で A_e の面積を持つレーダ反射面が受ける電力は

$$P_r = \frac{P_t G \delta}{4\pi r^2} \frac{A_e}{4\pi r^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

となる。 λ を波長とすると、一般的に $A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$ が成り立つので

$$P_r = \frac{P_t G^2 \delta \lambda^2}{64\pi^3 \lambda^4} \dots\dots\dots (2.3)$$

となる。ところがレーダのパルス間隔を τ とするとある時間の受信電波は体積に含まれる雨滴の反射の和となる(図2-3)

$$\frac{2r}{C} = \frac{2(r-h)}{C} + \tau$$

$$h = \frac{C \cdot \tau}{2} \dots\dots\dots (2.4)$$

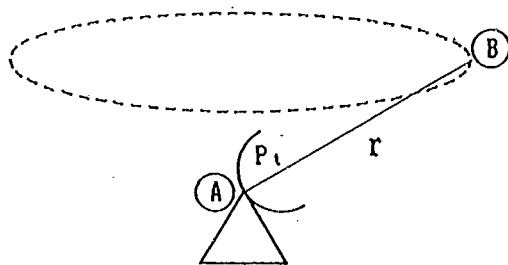


図2-2 レーダ説明図

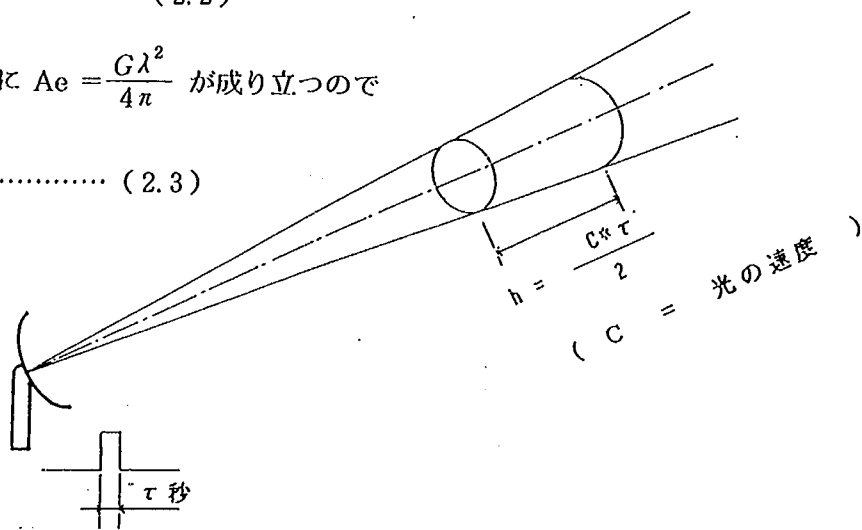


図2-3 目標体積とその距離

これらから受信電力は

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{64\pi^3 r^4} \sum_V \delta$$

となる。 G は図2-4のように非常に複雑であるが主ローブに関していえば図2-5の様に指数関数によく会うことが知られている。

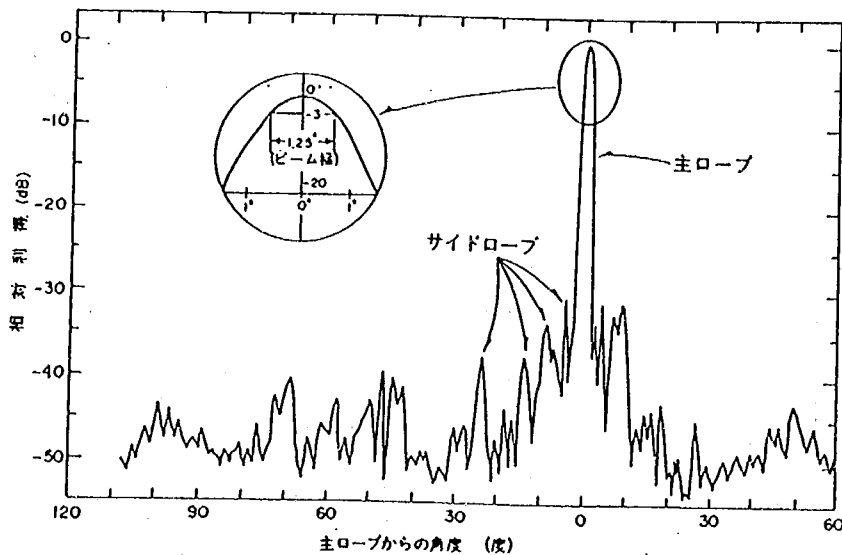


図2-4 空中線の全方向の実測例⁴⁾

図2-6の様に を定めると。

$$G_o = G_o f_a$$

$$f_a = \exp \left\{ - \left(\frac{\theta}{\theta_h} \right)^2 \log_e 2 \right\}$$

と書くことができる。受信電力は

$$\begin{aligned} \bar{P}_r &= \iiint \frac{P_t G_o^2 \lambda^2}{64 \pi^3 \lambda^4} \delta dV \\ &= \frac{P_t G_o^2 \lambda^2}{64 \pi^3 r^4} \iiint f_a^2 \delta dV \quad \dots\dots\dots (2.5) \end{aligned}$$

となる。単位体積の δ を Σ として、積分して

$$\bar{P}_r = \frac{P_t G_o^2 \lambda^2}{64 \pi^3 r^4} \Sigma \delta \iiint f_a^2 dV \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

となる。空中線は円形で、ビームは水平垂直で対称であるとする。

$$\bar{P}_r = \frac{P_t G_o^2 \lambda^2 h}{64 \pi^3 r^2} \Sigma \delta \int_{r-\frac{h}{4}}^{r+\frac{h}{4}} r^2 dr \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_a^2 \sin \theta d\theta$$

また $r^2 \frac{h}{2} \gg \frac{h^3}{96}$ より

$$\bar{P}_r = \frac{P_t G_o^2 \lambda^2 h}{64 \pi^2 r^2} \Sigma \delta \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_a^2 \sin \theta d\theta \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

主ビームの範囲は通常数度であるので $\sin \theta = \theta$ としてよい、また f_a は $\frac{\pi}{2}$ で0となるとしてよいので

$$\begin{aligned} \bar{P}_r &= \frac{P_t G_o^2 \lambda^2 h}{64 \pi^2 r^2} \Sigma \delta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \theta \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{\theta}{\theta_h} \right)^2 2 \log_e 2 \right\} d\theta \\ &= \frac{P_t G_o^2 \lambda^2 h \theta_h^2}{2^{10} \pi^2 \log_e 2} \Sigma \delta \quad \dots\dots\dots (2.8) \end{aligned}$$

となる。 $\Sigma \sigma$ は、マックスウェルの電磁方程式を解くことによって得られる。

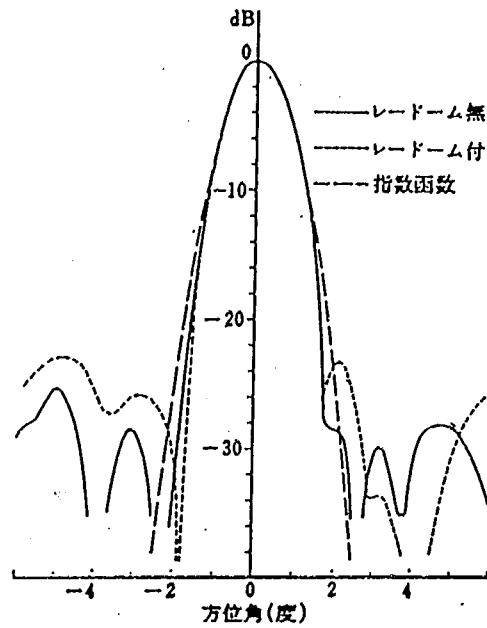


図 2-5 直径3 m パラボラ空中線の近軸指向特性の実測例

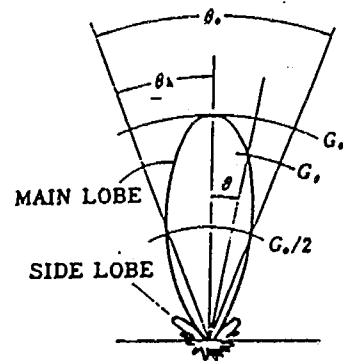


図2-6 空中線指向特性

$$r \partial_t E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$r \partial_t H = -\frac{\partial D}{\partial t} + i \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\text{div } E = \rho$$

$$\text{div } B = 0$$

ここで E は電場の強さ、 B は磁気誘導、 H は磁場の強さ、 D は電束密度、 i は電流密度、 ρ は電荷密度とする。

ここで次の条件を仮定する。

1. 雨滴は完全な球状である。
2. 雨滴は目標体積中にまったくでたらめに配列されている。
3. 雨滴の直径は波長に比べて十分小さい。

このような条件を満足するならば、式 2-1 は次式のように近似できる。

$$\delta = \pi^5 \left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2 \frac{D^6}{\lambda^4} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

ここで ϵ は水滴の複素誘電率、 D は水滴の直径である。

受信電力は次式のように書くことができる。

$$\bar{P}r = \frac{P_t G_o^2 h \theta_o^2 \pi^3}{2^{10} r^2 (\log_e 2) \lambda^2} \left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2 \sum_v D^6 \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

$\sum D^6 = Z$ (レーダ反射因子) は経験的に $Z = BR^\beta$ となることが知られている。ここで R は雨量強度

$$\bar{P}r = \frac{P_t G_o^2 h \theta_o^4 \pi^3}{2^{10} r^2 (\log_e 2) \lambda^2} \left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2 BR^\beta \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

ここで $C = \frac{P_t G_o^2 h \theta_o^4 \pi^3}{2^{10} (\log_e 2) \lambda^2} \left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2$ とおくと、受信電力は次式のように書くことができる。

$$\bar{P}r = \frac{C}{r^2} BR^\beta \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

ところが、実際はビームが完全に雨域に覆われていないなどの誤差が考えられる。また、無視したビームの減衰などがある。

$$\bar{P}r = \frac{C \cdot F}{r^2} BR^\beta 10^{-0.2 \int_0^r (k_a + k_R \cdot R^\alpha + k_c \cdot M) dr} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

のような式が実際は利用されている。

ここで、 k_a は大気ガスによる減衰、 k_R は雨滴による減衰、 k_c は雲による減衰 F はビームが完全に雨域に覆われていないなどの誤差その他の総合である。

3. 大型レーダ雨量計の覆域

現在、建設省は日本全国に大型レーダ雨量計を展開している。その数は昭和62年10月現在13基である。
(表3-1)

これらの大型雨量計は最終的には日本全国をカバーする予定となっている。また各レーダは定量領域(0~120km) 定性領域(120~198km)に分けられ、現在、図3-1 の様に各地をカバーしている。

表3-1 大型レーダ雨量計の位置

地区	山名	レーダサイトの位置		高度 (m)	仰角 (度)	ビーム幅*	
		北緯	東経			水平	垂直
北海道							
東北	物見山	39° 11' 54"	141° 24' 23"	888.5	0.8	1.20	1.20
関東	赤城山	36° 32' 10"	139° 10' 46"	1692.0	1.0	1.39	1.49
	三ッ峠	35° 33' 11"	138° 48' 29"	1817.0	1.0	1.40	1.45
北陸	宝達山	36° 46' 43"	136° 48' 59"	664.0	1.0	1.07	1.10
中部	蛇峠	35° 20' 21"	137° 41' 22"	1668.5	1.0	1.50	1.50
	御在所	35° 01' 03"	136° 25' 40"	1218.0	0.3	1.40	1.40
近畿	深山	35° 02' 18"	135° 22' 48"	804.3	0.8	1.60	1.60
中国	大和山	34° 49' 18"	133° 41' 38"	608.0	0.8	1.05	1.12
	羅漢山	34° 21' 10"	132° 04' 16"	1117.0	0.8	1.05	1.07
四国	明神山	33° 34' 19"	133° 02' 55"	1555.1	0.7	1.40	1.26
九州	釈迦岳	33° 11' 02"	130° 53' 28"	1246.0	0.8	1.40	1.42
	国見山	31° 18' 27"	131° 00' 56"	903.0	0.8	1.38	1.39
沖縄	八重岳	26° 37' 48"	127° 55' 46"	456.0	0.5	1.37	1.33

注) 調整中の大型レーダ雨量計として薬師岳、ビンネシリの大
型レーダ雨量計がある

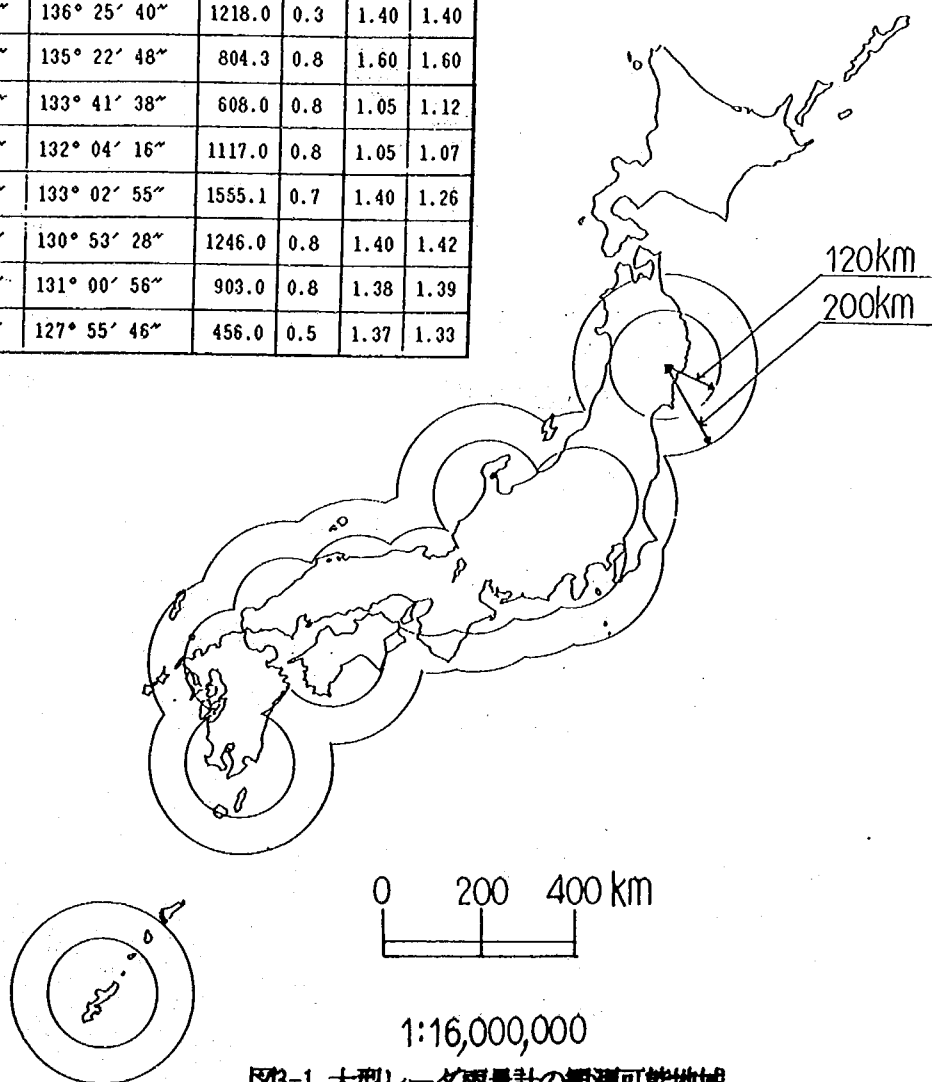


図3-1 大型レーダ雨量計の観測可能地域

土石流が降雨強度のピーク近くで発生することが多いため、砂防の立場からこの、大型レーダ雨量システムを積極的に、土石流避難警報システムの中に取り込むことが必要である。しかしその前に現在の大型レーダ雨量計のネットワークの中で砂防として利用できるエリアを知ることが必要となる。

レーダが雨量を正確に捕捉できなくなる原因としては図3-2³⁾の様に色々な理由が考えられる。

1. 地物による障害
2. ブライトバンド
3. ビームの減衰
4. ビームが降雨の上を通過する
5. 降雨がビーム幅を完全に満たしていない

など、色々な理由が考えられるが、ここではレーダの可視領域を決定する上で地物による障害と、ブライトバンドによる高度限界を考えることにする。なぜなら、砂防上必要となる降雨情報は、比較的強い降雨であり、そのような降雨をもたらす雲は図3-3⁷⁾の様に氷層を持つことが多いこと（冷たい雨の機構）。地面に張り付いたような下層雲による降雨は弱く、時間的に短いことが多い上にその評価は非常にむずかしいためである。

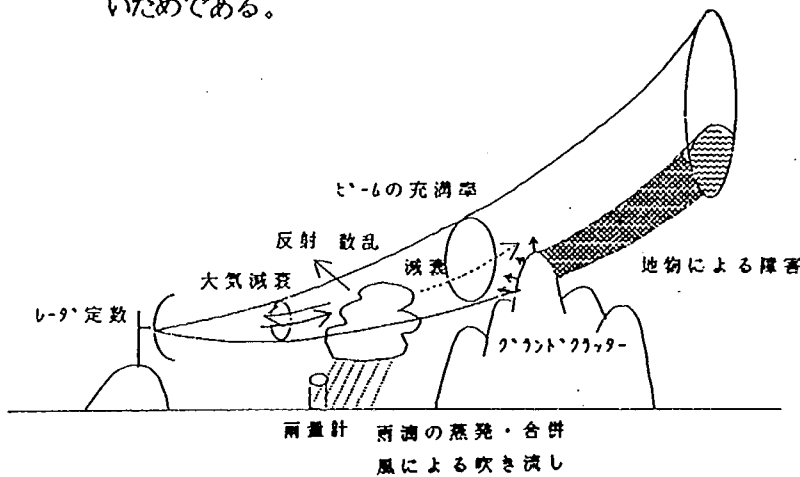


図3-2 レーダの誤差の原因³⁾

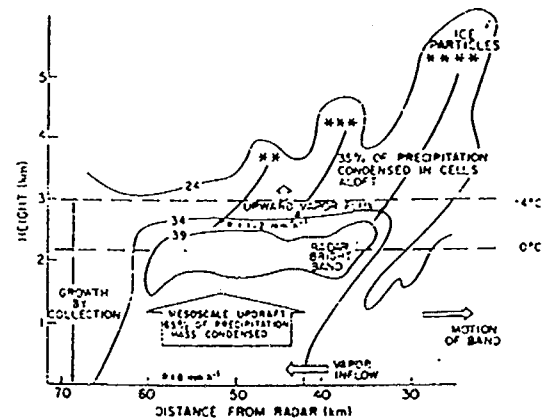


図3-3 降雨帯内の微細構造 (Houze et al., 1980)⁷⁾

3. 1 可視エリアの計算方法

大型レーダ雨量計は図3-4の様にレーダサイトから120kmまでは距離方向に3km 方位方向に128等分されている、120～198kmまでは距離方向に3km 方位方向に256等分されている。

可視領域を計算する上で、レーダサイトから距離方向に200mmごと、方位方向には0.0010ごとに計算地点を設定し、各地点ごとに見える割合を計算し、各メッシュに含まれる計算地点の平均を出しそれをそのメッシュの可視確率とした。

また地形データは、国土地理院の標高メッシュデータ (KS-110-1 250mX250m) を使用することにした。

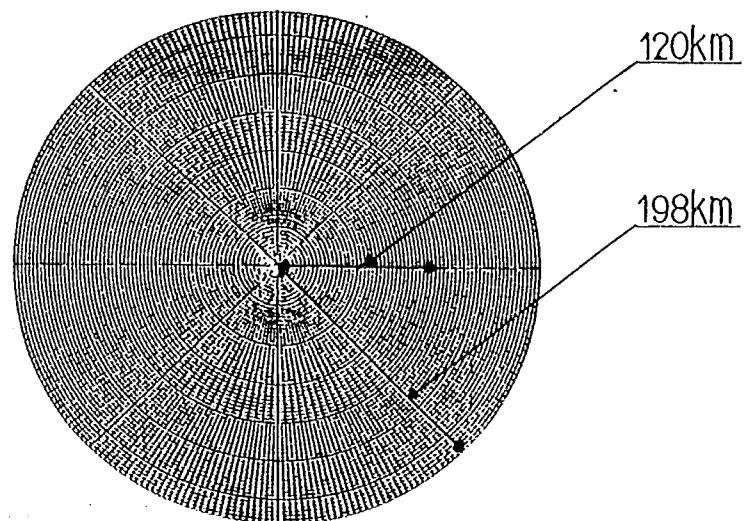


図3-4 大型レーダ雨量計のメッシュ図

3. 1. 1 地物による障害の評価

地物による障害の評価としてここではビームがある幅を持つとし 有効とされるビームを積分したものを雨量に勘算した時に減少する割合を出すとする。

このような方法をとったのは、できるだけ正確に可視領域を出すためである、すなわちビームの中心線のみで領域を出すとすると図3-5のA地点ではグランドクラッタの除去が理想的に行われたとしても相当のビームが地物によって無効となってしまう勘算雨量が減少するにもかかわらず隠されていないと見なされてしまう。

ビームは図2-4 の様に実際には非常に複雑であるが大部分は主ローブに含まれてしまう、そこでレーダから主ローブのみがでると仮定する。また 主ローブは図2-5の様に指数関数で良く近似されることが知られている。

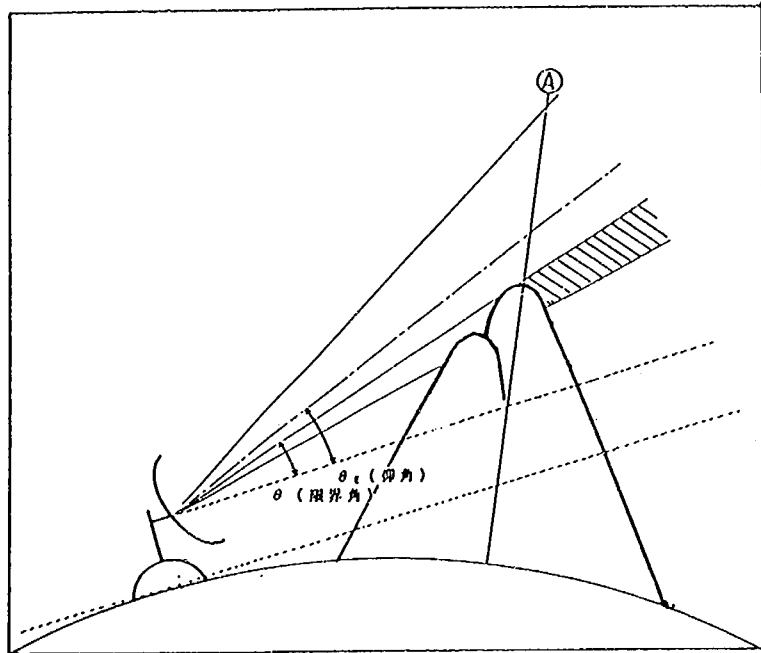


図3-5 地物の影響

$$G_o = G_o \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{\theta}{\theta_h} \right)^2 \log_e 2 \right\} \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

この方程式を図にしたものが図3-6である、(θ₀, θ_hは図2-6の様に仰角、ビーム幅である)。ビームは図3-6の様に θ₀-90°~θ₀+90°であるがθ₀-θ_h~θ₀+θ_h(斜線の部分)に全体の98%が含まれるため、ここではθ₀-θ_h~θ₀+θ_h(斜線の部分)のみを考えることにする。

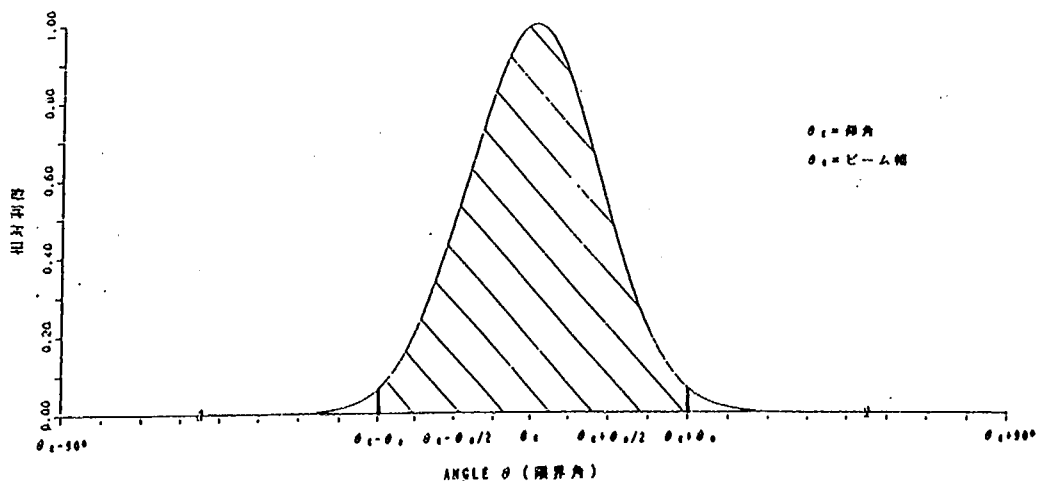


図3-6 式3-1 (主ローブの近似曲線)

$$P_l(\theta) = \exp\left\{-\left(\frac{\theta}{\theta_h}\right)^2 \log_e 2\right\} \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

レーダビームが地物に隠されない場合の雨量観測値を R とおく

$$Pr = \frac{C \cdot F}{r^2} B R^\beta \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

レーダビームが地物に隠れた場合の雨量観測値を R' とおく

$$Pr' = \frac{C \cdot F}{r^2} B (R')^\beta$$

また図3-5より、次式がなりたつ。

$$Pr = \frac{\int_{\theta_o'}^{\theta_o + \theta_h} \exp\left\{-\left(\frac{\theta}{\theta_h}\right)^2 \log_e 2\right\} d\theta}{\int_{\theta_o + \theta_h}^{\theta_o + \theta_h} \exp\left\{-\left(\frac{\theta}{\theta_h}\right)^2 \log_e 2\right\} d\theta} \cdot Pr \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

式3-3、3-4、3-5より

$$\frac{\int_{\theta_o'}^{\theta_o + \theta_h} \exp\left\{-\left(\frac{\theta}{\theta_h}\right)^2 \log_e 2\right\} d\theta}{\int_{\theta_o + \theta_h}^{\theta_o + \theta_h} \exp\left\{-\left(\frac{\theta}{\theta_h}\right)^2 \log_e 2\right\} d\theta} \cdot \frac{C \cdot F \cdot B}{r^2} R^\beta = \frac{C \cdot F \cdot B}{r^2} (R')^\beta \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

とおける。これを解くと次式のようになる。

$$F(\theta') = \frac{R'}{R} = \left(\frac{\int_{\theta_o'}^{\theta_o + \theta_h} \exp\left\{-\left(\frac{\theta}{\theta_h}\right)^2 \log_e 2\right\} d\theta}{\int_{\theta_o + \theta_h}^{\theta_o + \theta_h} \exp\left\{-\left(\frac{\theta}{\theta_h}\right)^2 \log_e 2\right\} d\theta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

ここで $\beta=1.6$ としたものが図3-7である。

この式によって各観測地点の可視率を計算し、その平均をもって各メッシュの可視率とした。

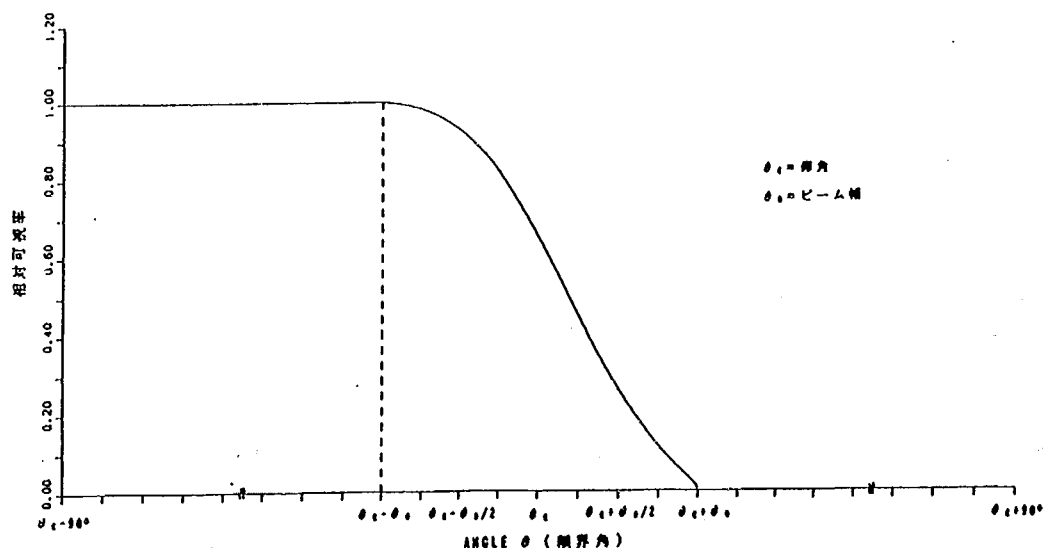


図3-7 式3-7 (雨量換算時の減衰曲線)

地形データは、一辺約250mの格子状のデータのため適当な補間をする必要がある、補間法には表3-2⁸⁾の様に色々なものが考えられるがここでは、比較的実地形をよく再現できるといわれている2次元標本化法によって補間することにする。

表3-2 代表的な補間法とその比較⁸⁾

補間法	方程式	
補間内挿法	$p(x, y) = (1-x)(1-y)/4 [p(0,0) + p(1,0) + p(0,1) + p(1,1)]$ $= (1-x)(1-y)/4 [p(0,0) + p(1,0) + p(0,1) + p(1,1)]$	
テューラー法 (2 変数, 1 次)	$p(x, y) = f(0,0) + f^{(1)}(0,0)x + f^{(2)}(0,0)y + \frac{1}{2} [f^{(2)}(0,0)x^2 + f^{(2)}(0,0)y^2 + 2f^{(2)}(0,0)xy]$	
カルタシアン法	$p(x, y) = [x^2 y^2 + 1] M B M^T [x^2 y^2 + 1]^T$ $M = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ $B = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & f^{(1)}(0,0) & f^{(1)}(0,1) \\ f(1,0) & f(1,1) & f^{(1)}(1,0) & f^{(1)}(1,1) \\ f^{(1)}(0,0) & f^{(1)}(0,1) & f^{(2)}(0,0) & f^{(2)}(0,1) \\ f^{(1)}(1,0) & f^{(1)}(1,1) & f^{(2)}(1,0) & f^{(2)}(1,1) \end{bmatrix}$ 11 マトリックスの要素	
2 次元標本化法	$g(x, y) = (i \sin x + j \sin y) \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} f(m, n) (-1)^{m+n} (x-m)(y-n)$	

3. 1. 2 高度による限界の評価。

図3-8 は蛇峠のレーダビームの高さを示したものであるがレーダサイトから190kmの所では7000mの高度となっておりほとんど無意味なところを観測している。また、気温は図3-9⁹⁾の様に高度が上がるほど低くなるのであるがそのため、通常0℃付近でレーダビームを異常に反射させる氷と水の混合層(ブライツバンド)が雲の中に形成され、それ以遠の観測ができなくなる。(図3-10)¹⁰⁾

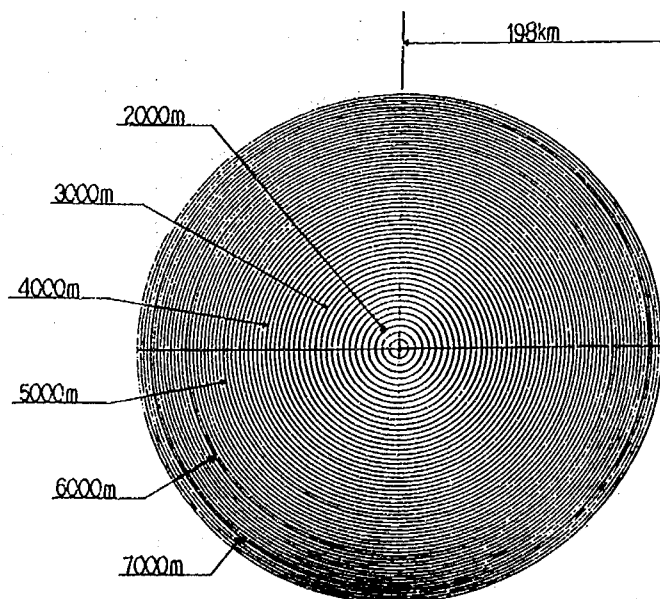


図3-8 大型レーダ雨量計のビーム高度(蛇峠)

ここでは、土石流の発生が4月～11月に起こると考えレーダサイトの近くの気象観測所のデータから平均気温を出し各レーダのブライトバンドの高度を推定した。(表3-3)。¹¹⁾

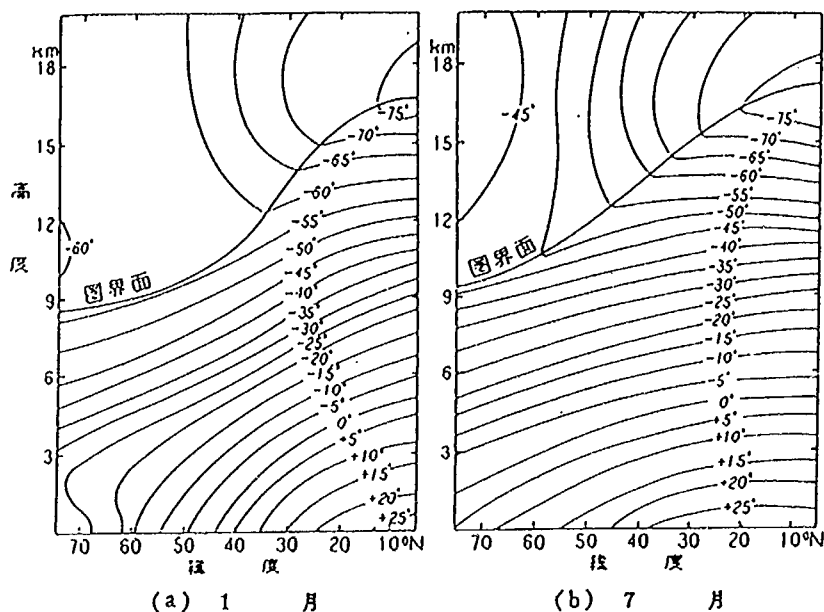
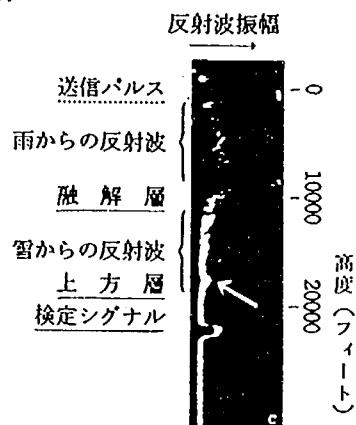
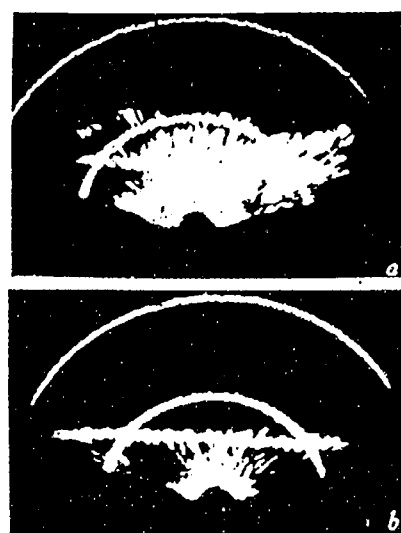


図3-9 北半球の気温分布⁹⁾

表3-3 大型レーダ雨量計のブライトバンド推定高度

地区	山名	高度 (m)	仰角 (度)	ビーム幅		ブライトバンド 推定高度(m)
				水平	垂直	
北海道						
東北	物見山	888.5	0.8	1.20	1.20	2667.3
関東	赤城山	1692.0	1.0	1.39	1.49	3125.3
	三ツ峠	1817.0	1.0	1.40	1.45	3325.5
北陸	宝達山	664.0	1.0	1.07	1.10	3074.5
中部	蛇峠	1668.5	1.0	1.50	1.50	3319.7
	御在所	1218.0	0.3	1.40	1.40	3244.5
近畿	深山	804.3	0.8	1.60	1.60	3319.0
中国	大和山	608.0	0.8	1.05	1.12	3169.8
	羅漢山	1117.0	0.8	1.05	1.07	3109.8
四国	明神山	1555.1	0.7	1.40	1.26	3280.5
九州	釈迦岳	1246.0	0.8	1.40	1.42	3335.7
	国見山	903.0	0.8	1.38	1.39	3483.3
沖縄	八重岳	456.0	0.5	1.37	1.33	3949.2



- (a) 温暖前線の雨からのレーダー反射波で、融解層、その上の雪、その下の雨の反射波を示す。
- (b) レーダーの感度を下げたので、雪からの反射は消え、融解層からの反射波がはっきり現われている。
- (c) 鉛直にむけられたレーダーによってえられた温暖前線の降水からのレーダー反射波(反射波と高度の関係)。図は大体 7,000 フィートにおけるはっきりした融解層を示す (I. C. Browne 撮影)。

図3-10 雨雲のレーダによる観測例¹⁰⁾

2. 1. 3 まとめ

このようにして作成されたのが図3-11である。図3-11は図3-5の斜線の部分による観測降雨の減少が10%以上になる地域を黒く塗っている。

この図から分かることは大型レーダ雨量計は計画された観測エリア（図3-1）¹¹⁾をほぼ包含していることである、ただし、所々に一部見えにくい所が見受けられるがそれは複雑な地形を持つわが国の場合仕方が無いことかも知れない。

しかし、図3-12より土砂災害危険箇所の密度の多い地域として日本アルプス付近が、また 単位人口あたり土砂災害危険箇所の密度の多い地域として和歌山、島根付近が指摘されていることを考えればなんらかの対策を立てる必要がある。そして、その対策の一つとして小型レーダ雨量計の利用が考えられる。

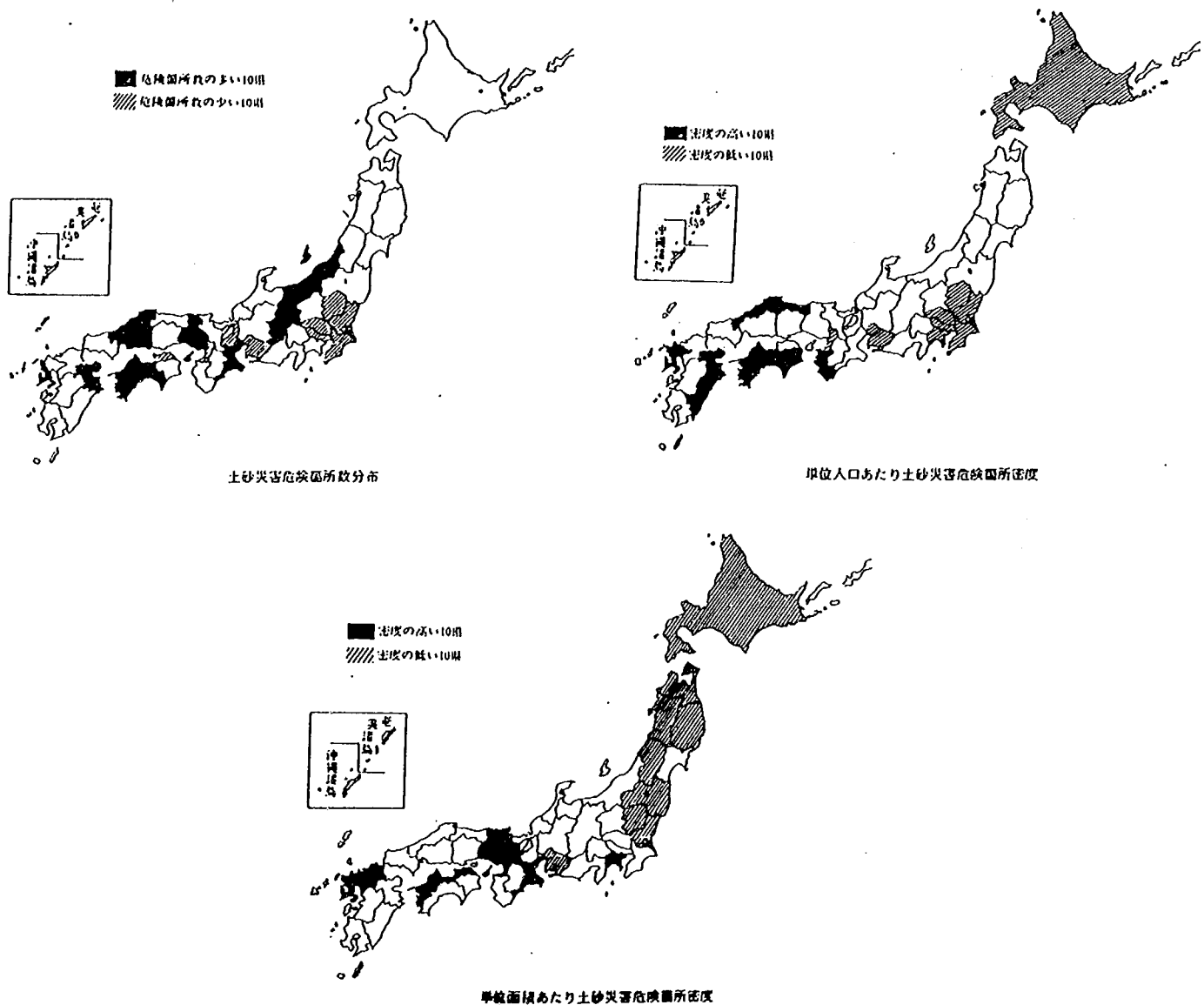
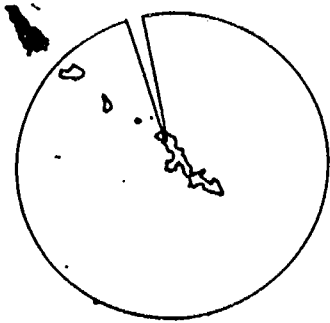


図3-12 県別土砂災害危険地域¹¹⁾



注) 図中の●は大型レーダ雨量計で観測雨量が真値と比べて10%以上の誤差のある地域を示す。

注) 薬師岳、ピンネシリの大型レーダ雨量計が現在整備中である。
 ——— は薬師岳、ピンネシリの最大観測範囲を示す。

図B-11 大型レーダ雨量計の観測範囲(10%以上の誤差)

4. 桜島と大沢扇状地での小型レーダ雨量計の実験

表4-1 小型レーダ雨量計の仕様

観測方法	観測仰角	一定
	観測範囲	東西60km x 南北60km
	観測間隔	一分毎
送信装置	空中線型式	1.2m φ円形パラボラ
	ビーム幅	水平、垂直とも2°以下
	主方向利得	37dB以上
	回転数	4rpm
信号処理装置	送信周波数	9000MHz帯（指定の一波）
	送信尖頭出力	40kW
	送信パルス幅	1 μs
	繰返し周波数	750pps
	最小受信電力	-95dBm以下
データ処理表示装置	A/D変換	10ビット
	サンプリング間隔	1.67 μs
	距離補正	有
	グラウンドクラッタ除去	MTI方式
	雨量強度算出	1~250mm/H (1mm/H単位)
	5分平均	有

図3-11の見えにくい地域及びより精密な降雨情報の入手手段として小型レーダ雨量計の観測実験を桜島と富士大沢扇状地において行った。

使用した小型レーダ雨量計の仕様を表4-1に示す。

4.1 桜島での小型レーダ雨量計の実験

1982年7月15日より9月30日まで、鹿児島県の桜島周辺で小型レーダ雨量計の実験を行った。レーダを垂水維持出張所に設置し桜島を中心に東西40km、南北30kmのエリアを観測した。(図4-1, 図4-2)

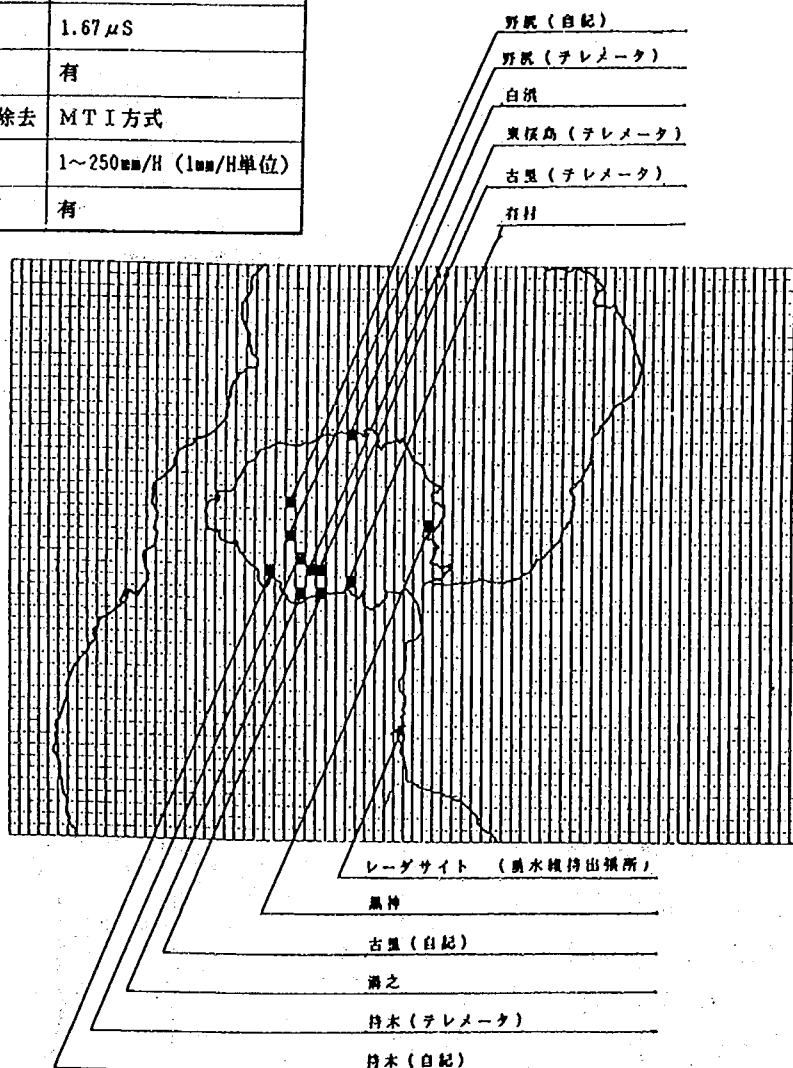
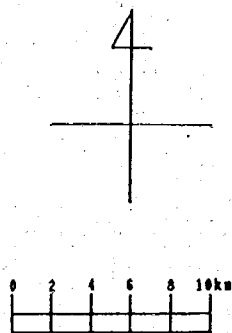


図4-1 桜島の観測地点位置図

SAKURAJIMA

CENTER 31.35' 0"
130.40' 0"
INTERVAL 1
MULTIPLY 5.0

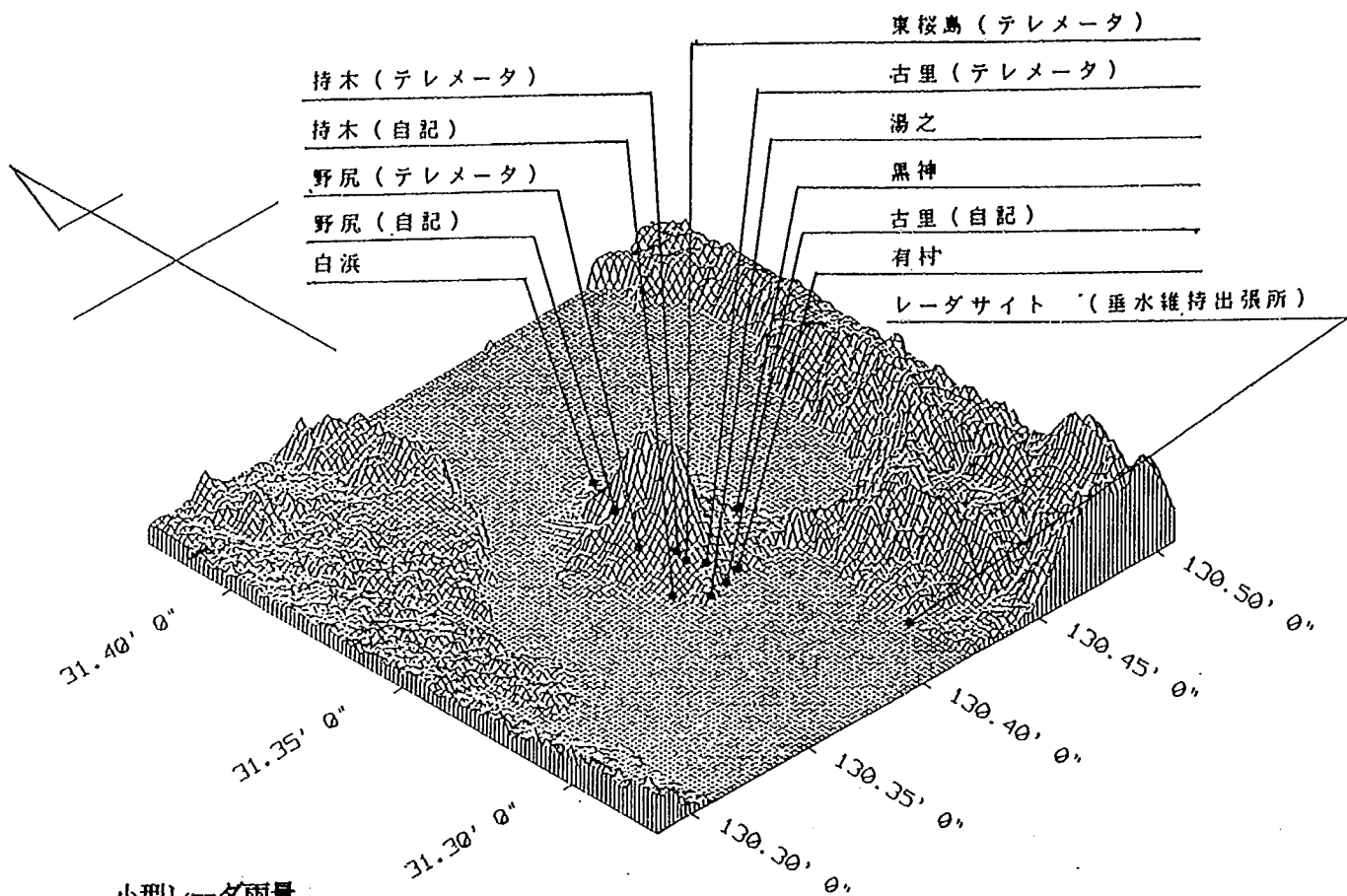


図4-2 桜島の観測地点位置図(鳥瞰図)

小型レーダ雨量計の観測範囲は図4-3である。図では、見えない割合を数字で示している。すなわち、1 ならば、1割が見えないことを示している。また桜島は国見山大型レーダ雨量計の観測範囲でありその位置関係を示したものが図4-4 図4-5 である。そして、これらをまとめたのが表4-2 である

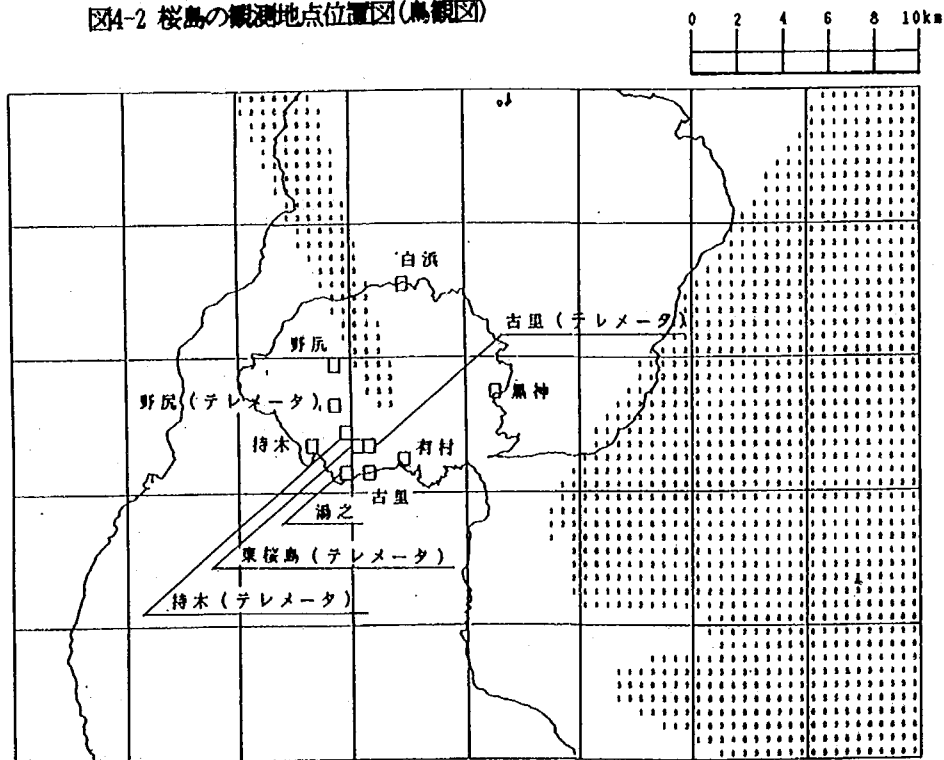


図4-3 桜島の小型レーダ雨量計観測範囲図

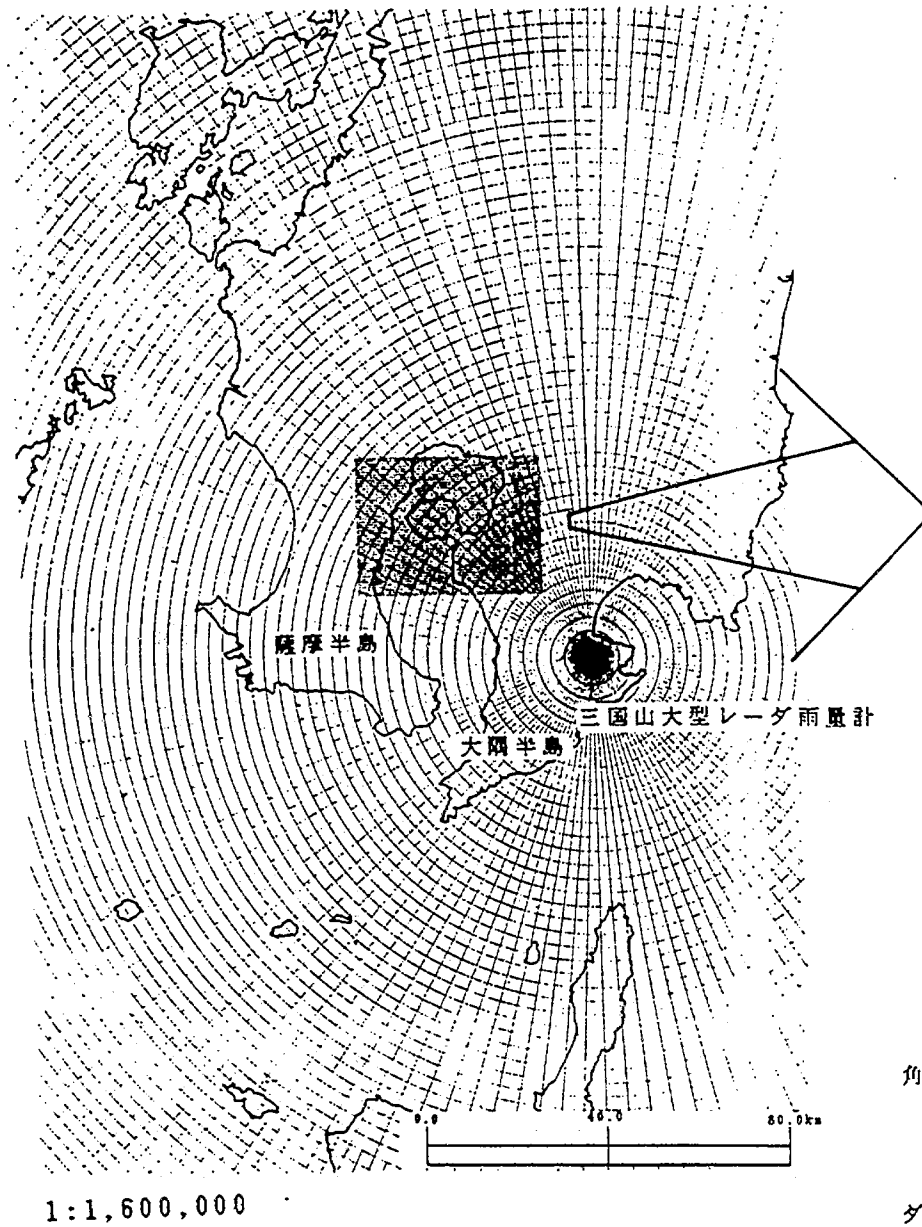


図4-4 桜島での大型レーダ雨量計と小型レーダ雨量計の位置図

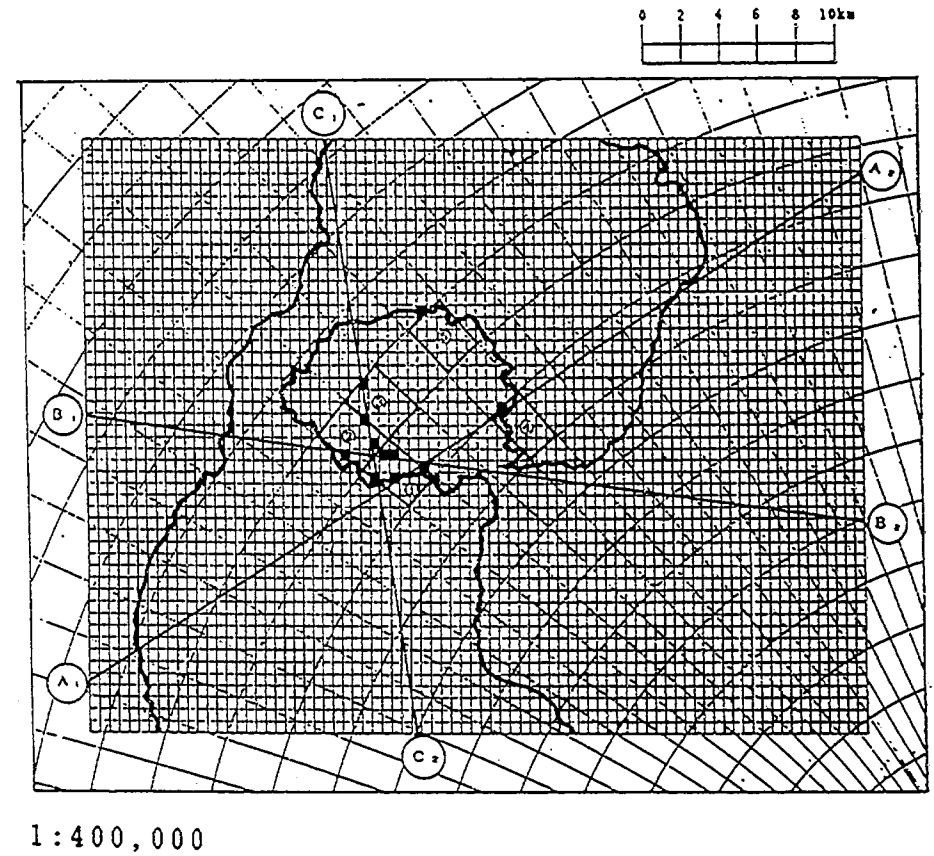


図4-5 桜島の小型レーダ雨量計と大型レーダ雨量計のメッシュ図

大型レーダ雨量計のメッシュは定性領域（距離方向 0～120km）は距離方向3km
角度方向2.8125°。

小型レーダ雨量計のメッシュは南北方向0.6km東西方向0.5km。

図4-5の中心付近の大型レーダ雨量計のメッシュの大きさは6.6km²、小型レー
ダ雨量計のメッシュの大きさは0.3km²である。

表4-2 桜島の観測地点及びレーダー一覧

観測地点			小型レーダー雨量計						大型レーダー雨量計（国見山）				
観測地点名	位 置		見逃し (%)	観測地点高度 (m)	高度(h-m) (m)	距離(m) (h-m・地上)	距離(km) (h-m・カンツクテン)	相関係数	見逃し (%)	位 置			相関係数
	北緯	東経								距離方向	方位方向	番号	
野尻	31° 35' 20"	130° 38' 10"	100	380	1400	1020	12.96	0.573572	100	16	111	③	0.446396
野尻(テレメータ)	31° 34' 32"	130° 38' 07"	100	250	1270	1020	11.70	0.929984	100	16	111	③	0.810780
持木	31° 33' 20"	130° 37' 45"	100	30	1110	1080	10.21	0.911036	100	16	110	②	0.781419
持木(テレメータ)	31° 33' 57"	130° 38' 32"	100	280	1130	850	10.43	0.962858	100	16	110	②	0.807669
湯之	31° 32' 40"	130° 38' 25"	100	70	940	870	8.58	0.939210	100	15	110	①	0.793926
東桜島(テレメータ)	31° 33' 27"	130° 38' 44"	100	190	1030	840	9.47	0.961329	100	15	110	①	0.759477
古里	31° 32' 50"	130° 39' 20"	100	30	880	850	8.01	0.677685	100	15	110	①	0.438595
古里(テレメータ)	31° 33' 19"	130° 39' 05"	100	180	980	900	8.98	0.984208	100	15	110	①	0.531357
有村	31° 33' 00"	130° 40' 00"	100	40	860	820	7.82	0.818663	100	15	110	①	0.296121
黒神	31° 34' 40"	130° 42' 30"	100	50	1130	1080	10.37	0.755096	90	14	113	④	0.643299
白浜	31° 37' 20"	130° 40' 10"	100	10	1670	1660	15.50	0.784645	90	16	113	⑤	0.758188
平均				137	1130	1000	10.37						
TOTAL								0.800400					0.592416

注) 小型レーダー雨量計が設置されているのは 北緯 31° 29' 5.7 ~
東経 130° 41' 52.5 ~
標高 35m
仰角 6.0°

注) 大型レーダー雨量計の距離方向の数字は定量領域でのレーダーサイトからの
番号、方位方向の数字は定量領域での北から時計回りの番号を示している。

注) 大型レーダー雨量計の番号は図4-5 中に書かれている大型レーダー雨量計のメ
ッシュの番号を示している。

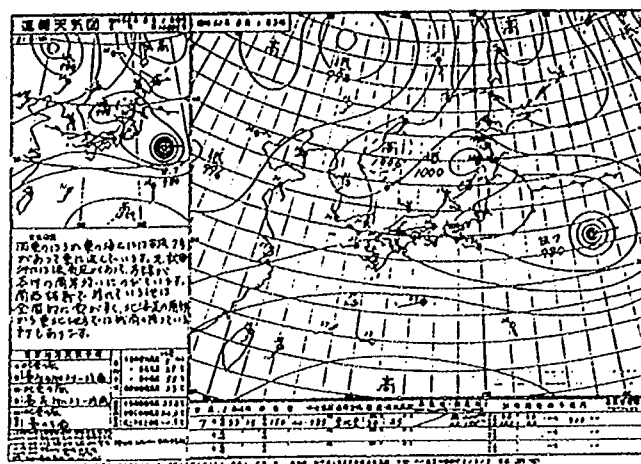
注) 大型レーダー雨量計の相関係数が悪いのは対象降雨が狭い範囲に集中的に降
る雷雨性の降雨であったためだと考えられる。

観測した降雨は8月1日(9:00-17:00)、8月24日(10:00-18:00)、8月26日(9:00-17:00)の3降雨である。天気図(図4-6)を見るとわかるように、すべて雷雨性の降雨であった。小型レーダ雨量計によって観測された降雨の状況を付図1-1-1～付図1-3-6に示す。

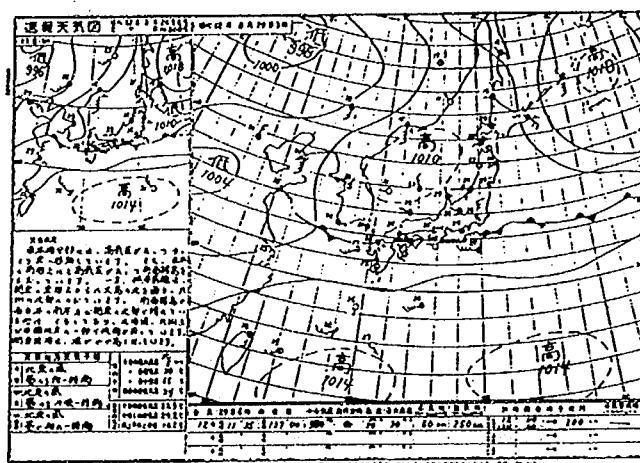
各観測地点ごとに地上雨量計の値と小型レーダ雨量計の値を示したのが図4-7である。各観測地点のTOTALの相関を一次回帰式で示すと $Y = 1.569X - 1.123$ となる。相関係数は0.8004と非常に良い。また回帰式に見られるように地上雨量計の値よりも小型レーダ雨量計の値が少し大きい。小型レーダ雨量計が $B=200$ 、 $\beta=1.6$ と標準的な降雨に合わせていたためこの雷雨性の降雨では小型レーダ雨量計の値が比較的強く現れたからと考えられる。各観測点ごとに見ると全体的に非常によい相関がとれているが、野尻、古里ではあまり良くない。これは、野尻については図4-2より観測点が比較的山の急斜面に置かれていることや、表4-2から分かるようにレーダビームによる観測エリアと地上雨量計の間の距離(ビーム地上)が比較的長いいため移流が起こったか、または、野尻、古里とも、大型レーダ雨量計でも相関係数が悪いことより地上雨量計に火山灰により問題があったか等が考えられるが、これだけのデータではわからない。また白浜の一次回帰式が $Y = 0.849X - 0.898$ となりレーダ雨量が地上計より小さくなっているのは図4-2から分かるように観測地点が山の反対側であり降雨の上の部分しか捕えられていなかったのだと考えられる。

大型レーダ雨量計の相関係数は平均で0.592416でありあまり良くない。これは、雷雨性という狭い範囲の降雨であるためであろうと思われる。

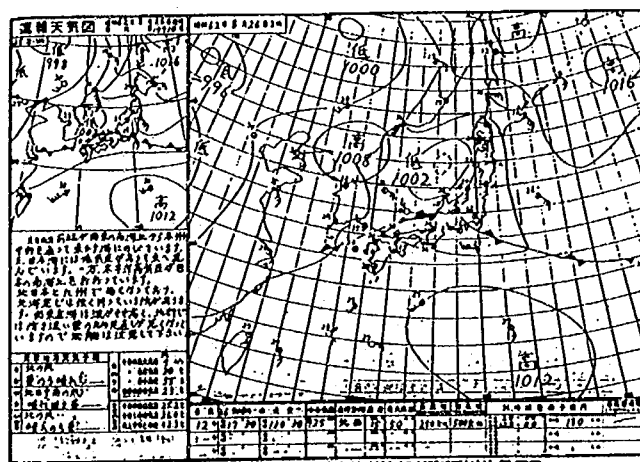
8月26日の降雨を各観測地点ごとに時系列に表したのが図4-8である。この資料からも小型レーダ雨量計と地上雨量計が非常によい相関を持っていることが分かる。



昭和62年 8月 1日



昭和62年 8月 24日



昭和62年 8月 26日

図4-6 桜島の観測降雨の天気図

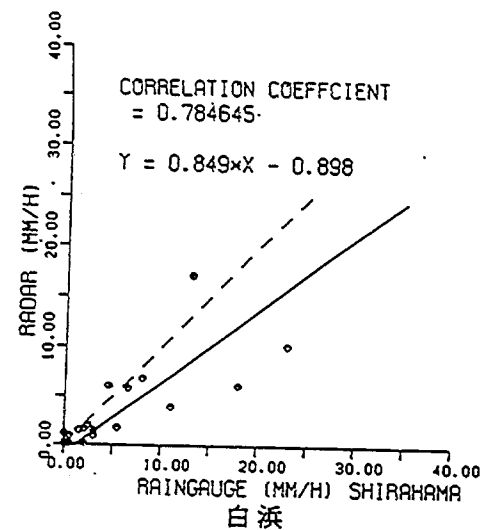
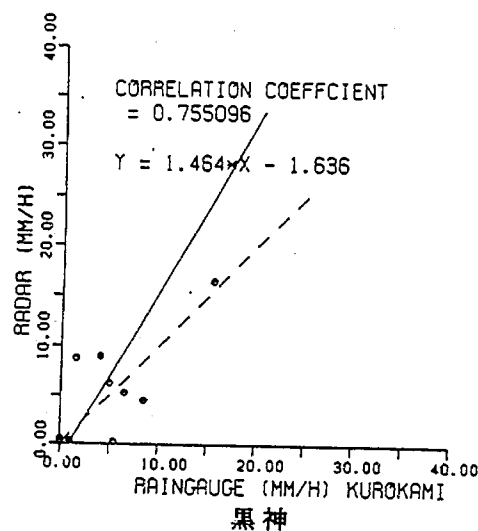
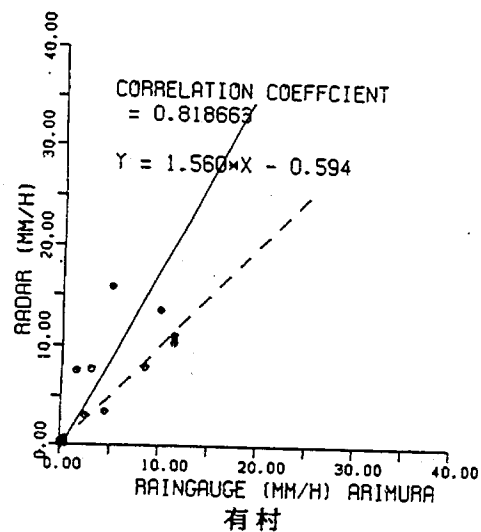
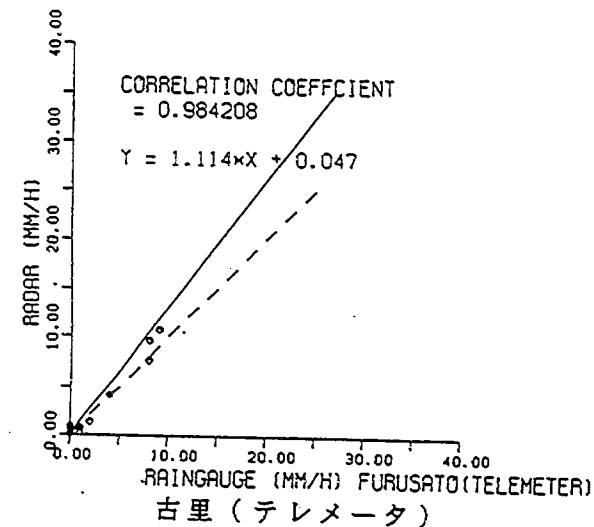
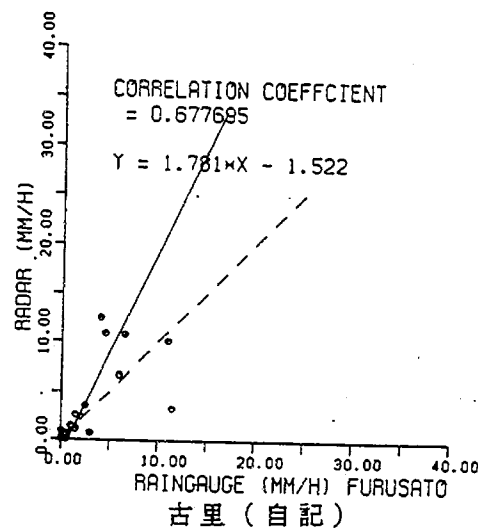
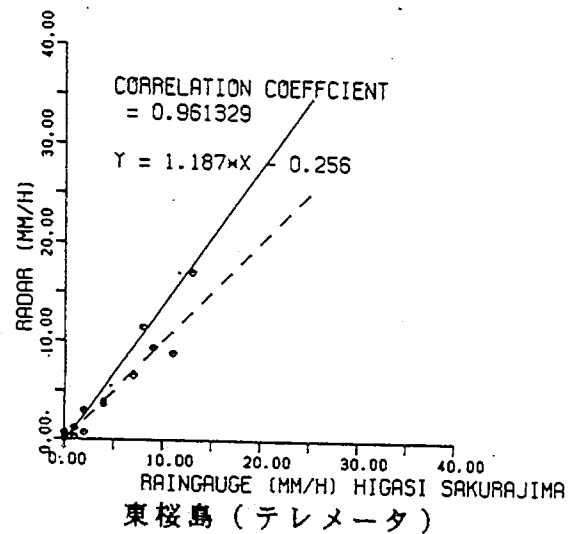


図4-7 (1) 桜島での小型レーダ雨量計の相関図

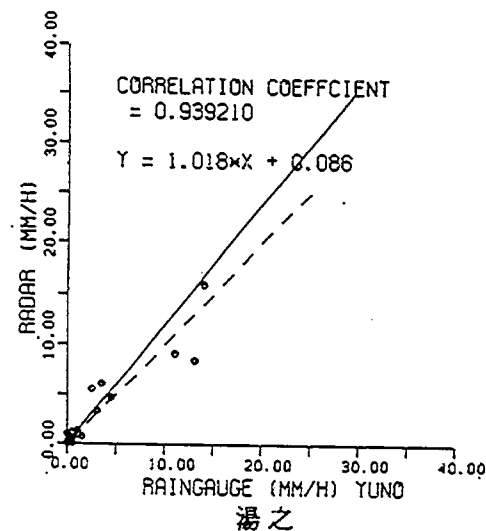
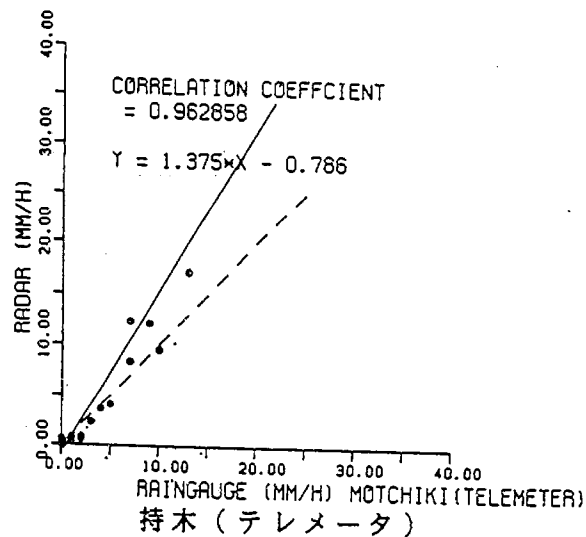
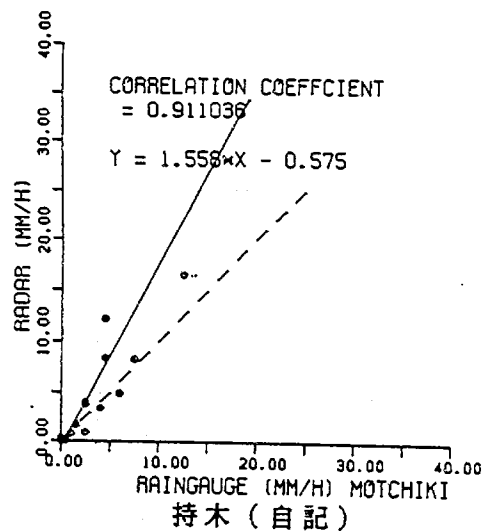
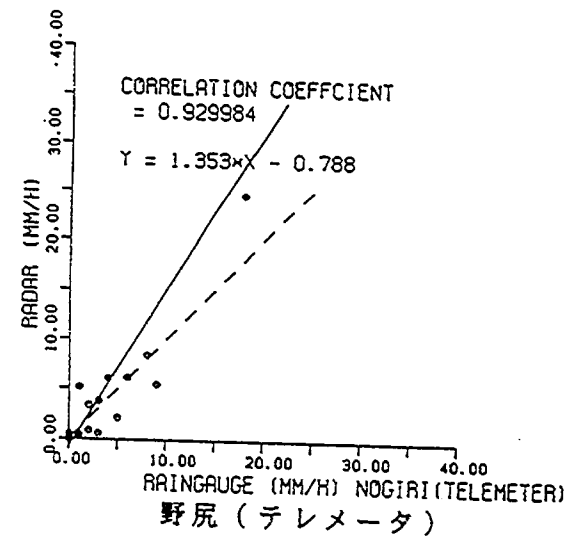
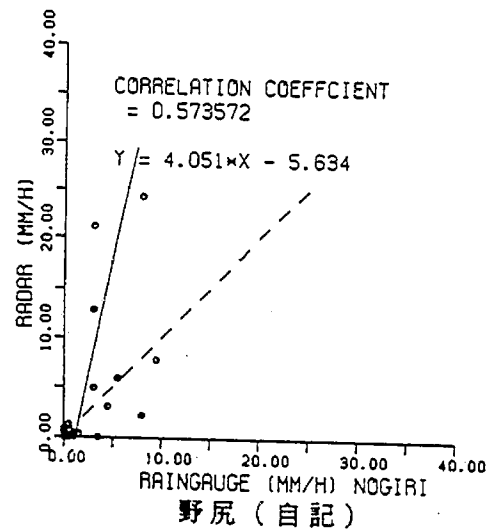
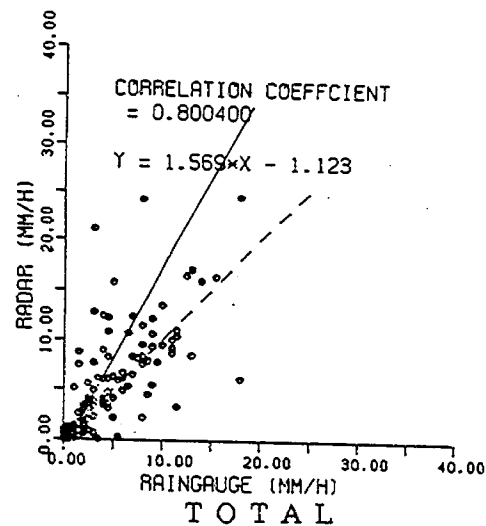


図4-7 (2) 桜島での小型レーダ雨量計の相関図

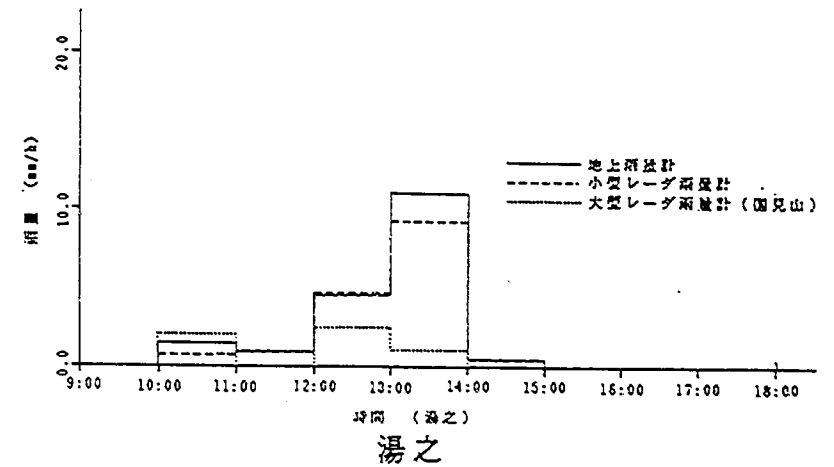
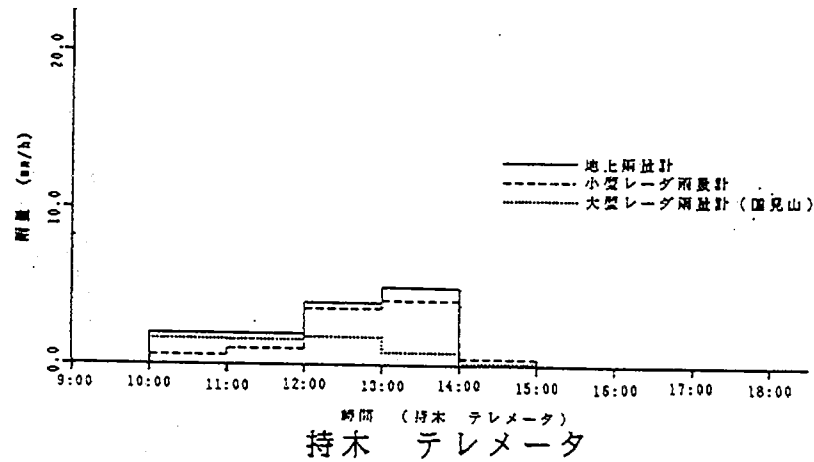
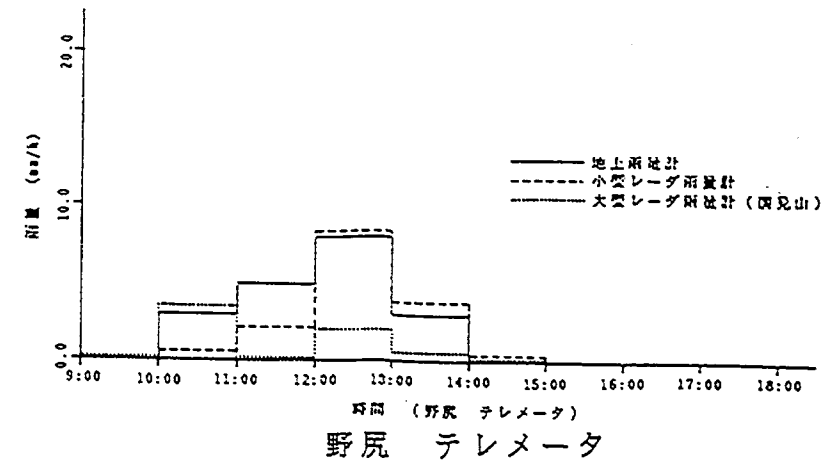
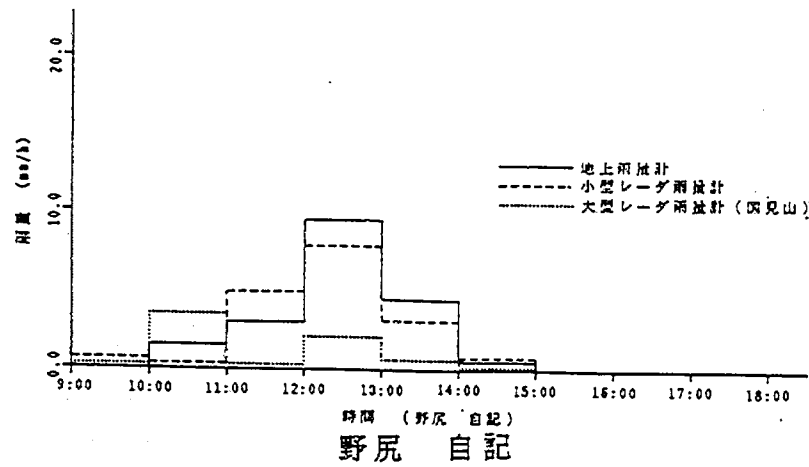


図4-8 (1) 桜島での一時間雨量の時系列図 (8.26 9:00~18:00)

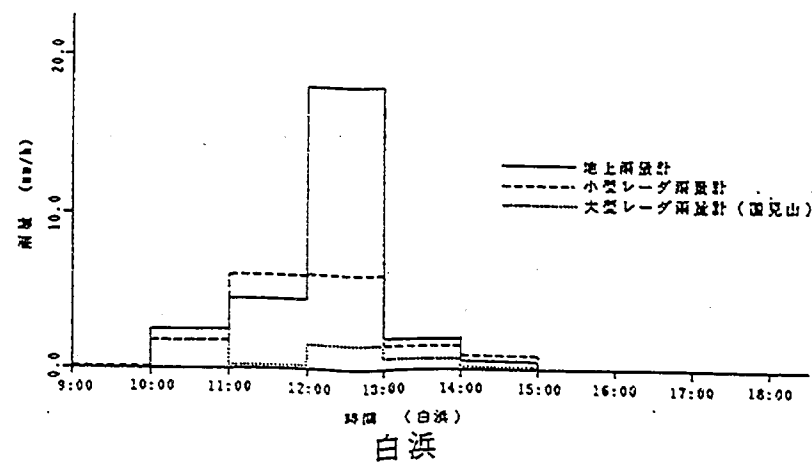
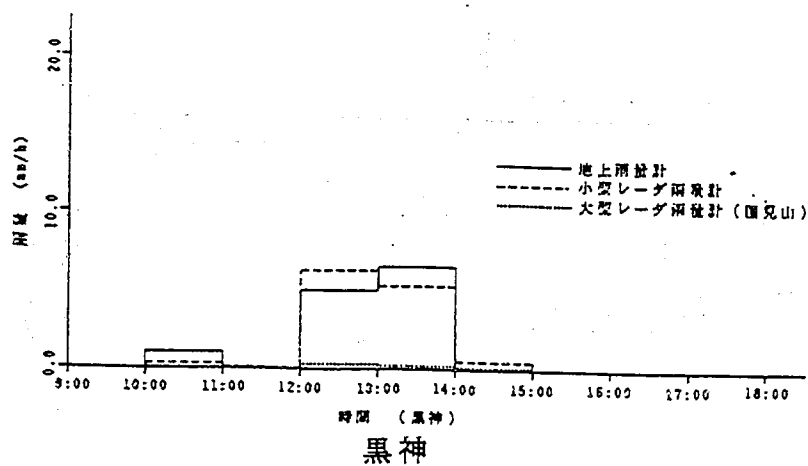
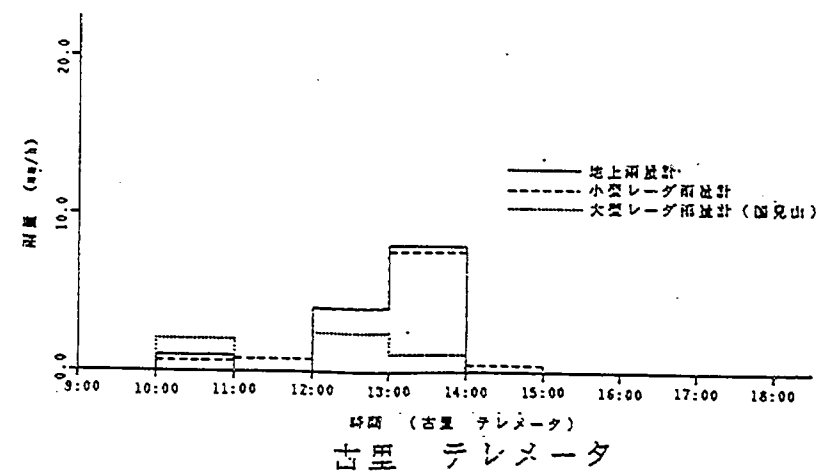
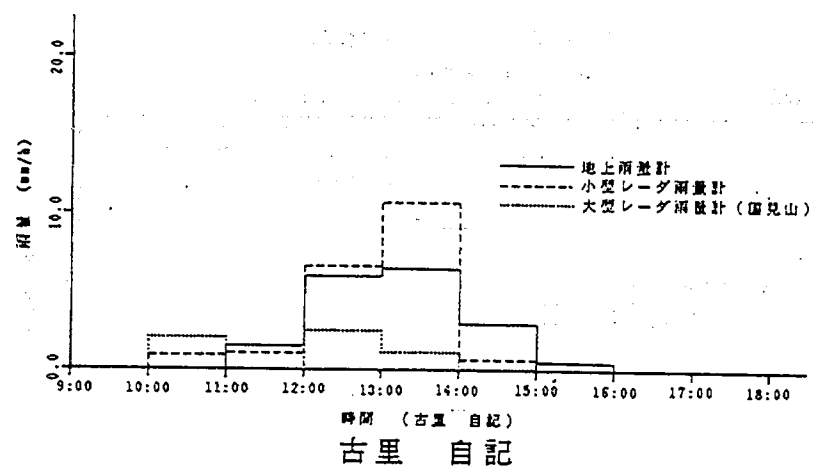


図4-8 (2) 桜島での一時間雨量の時系列図 (8.26 9:00~18:00)

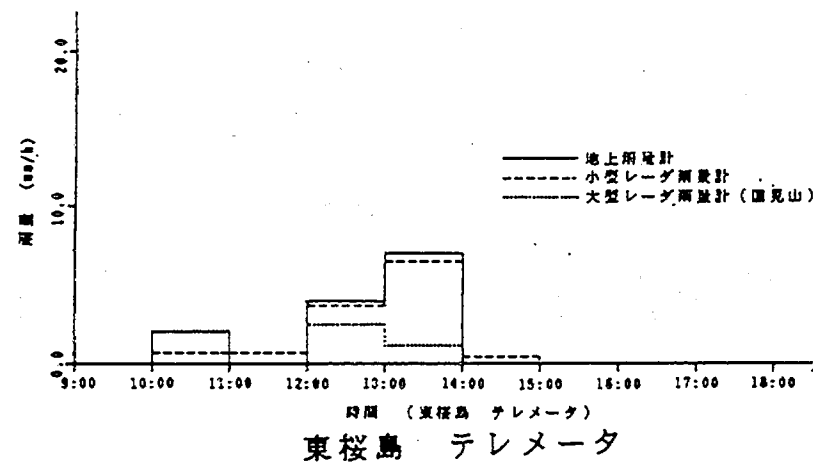
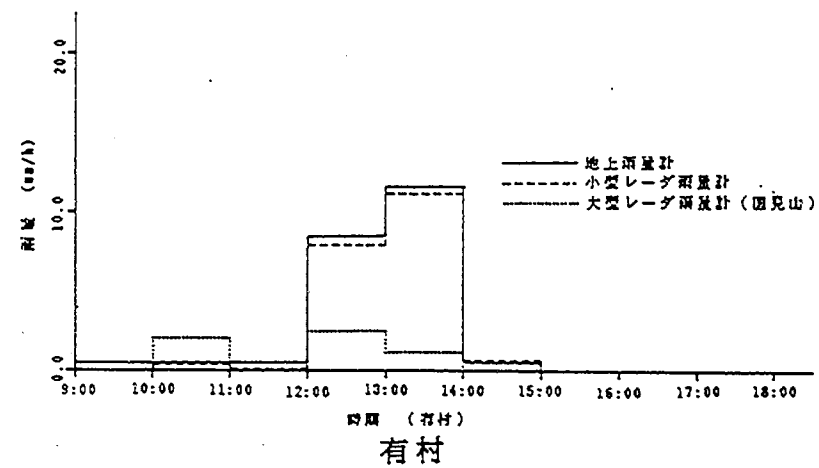
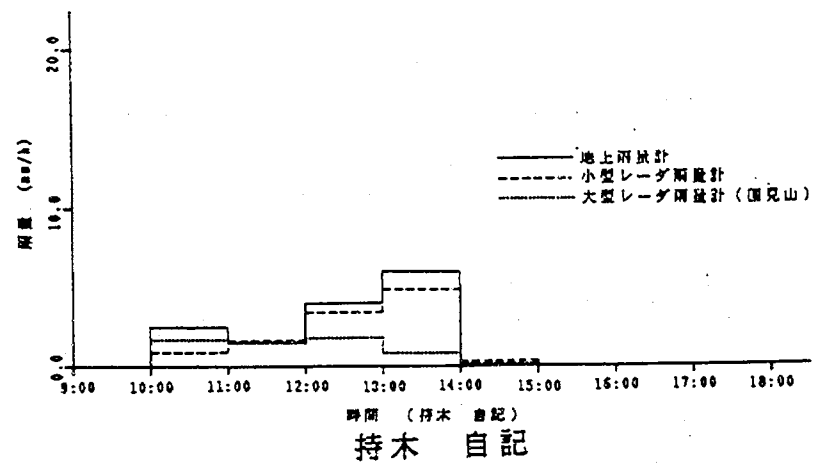


図4-8 (3) 桜島での一時間雨量の時系列図 (8.26 9:00~18:00)

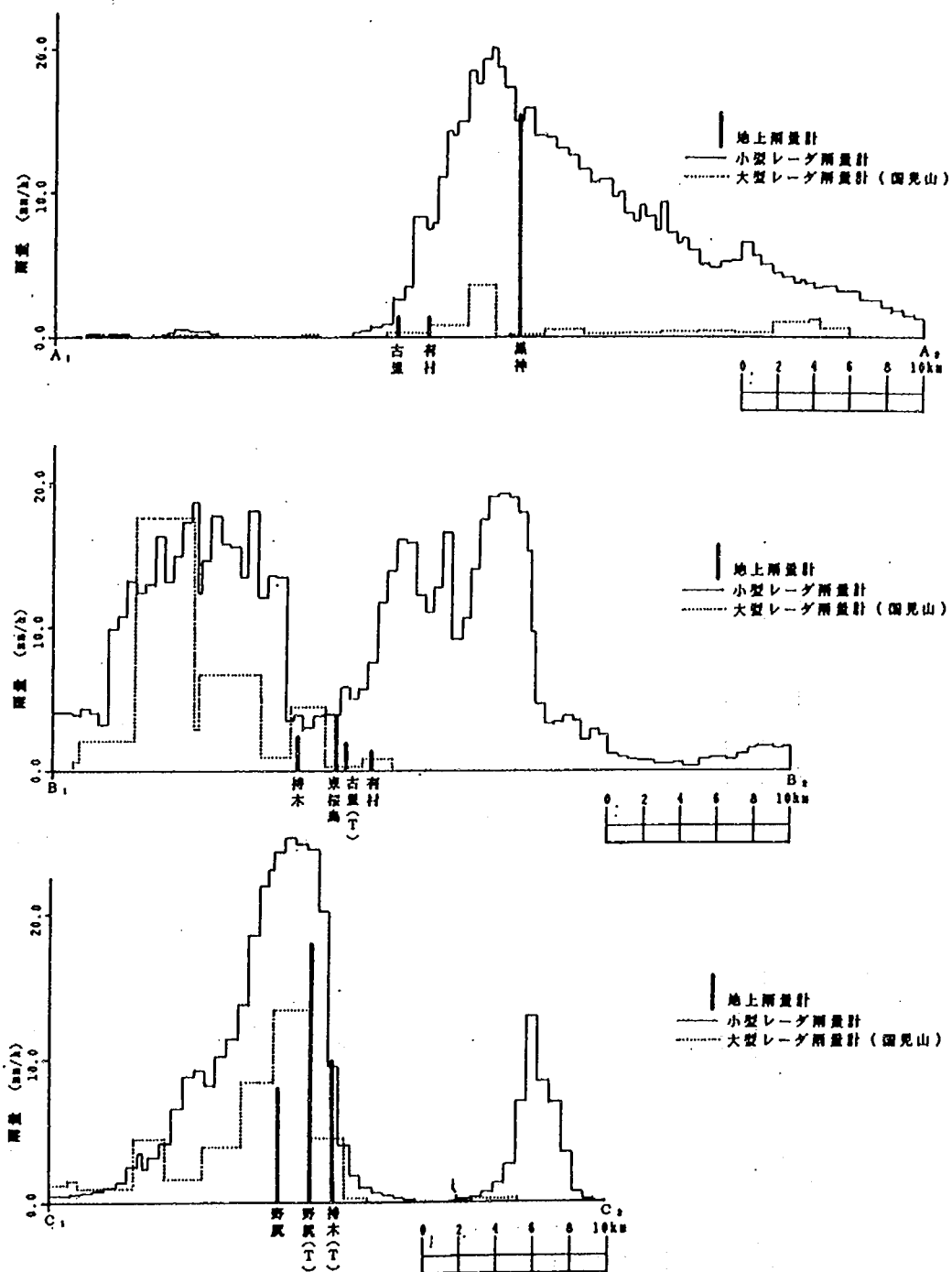
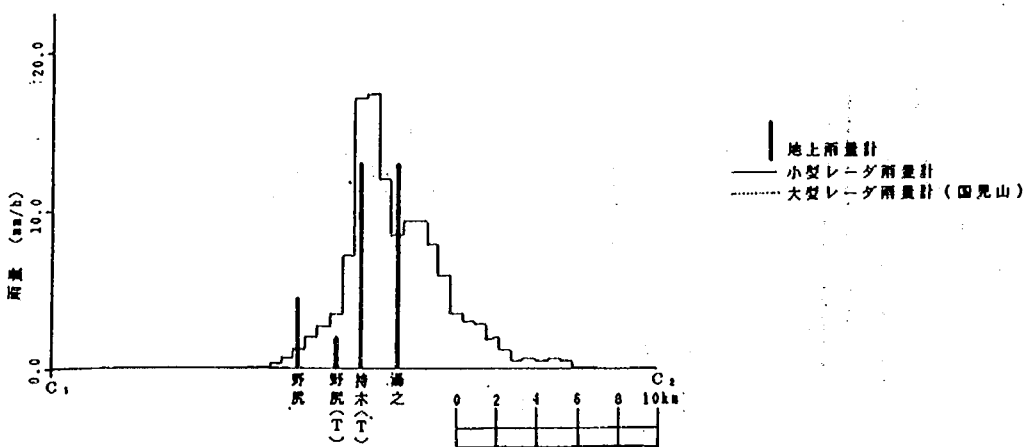
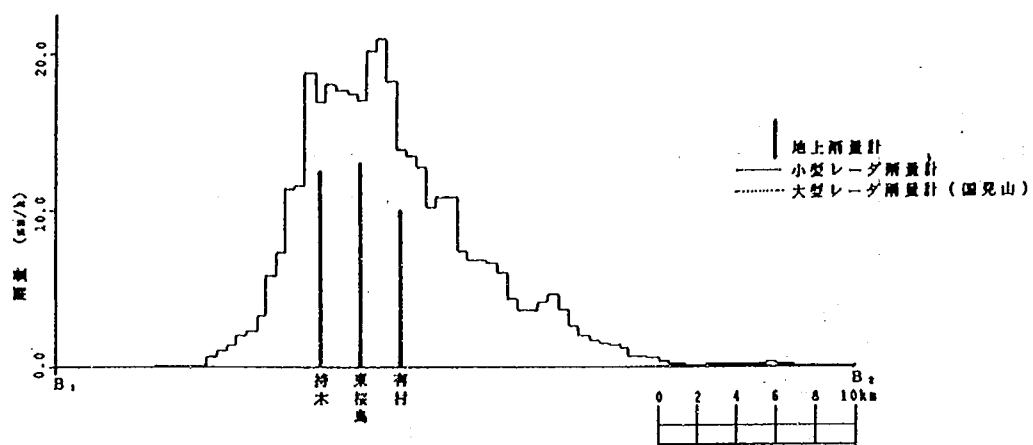
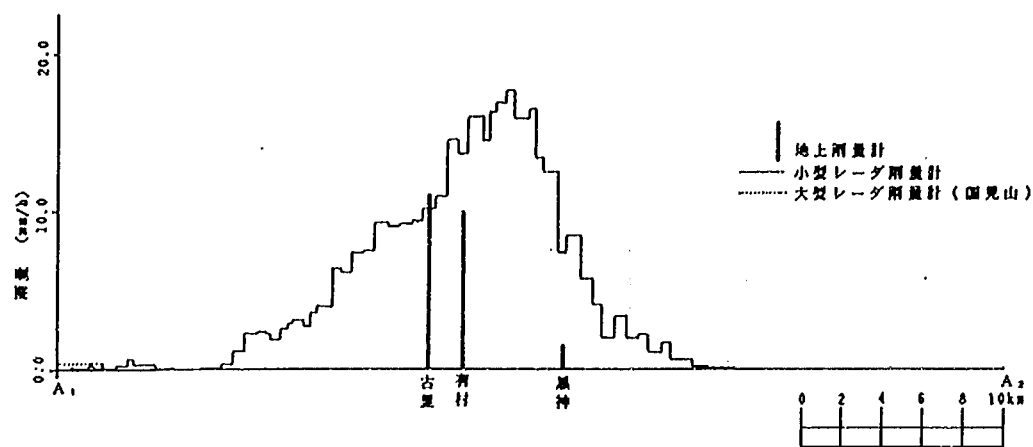


図4-9 桜島での一時間雨量の横断面図(8.24 11:00~12:00)



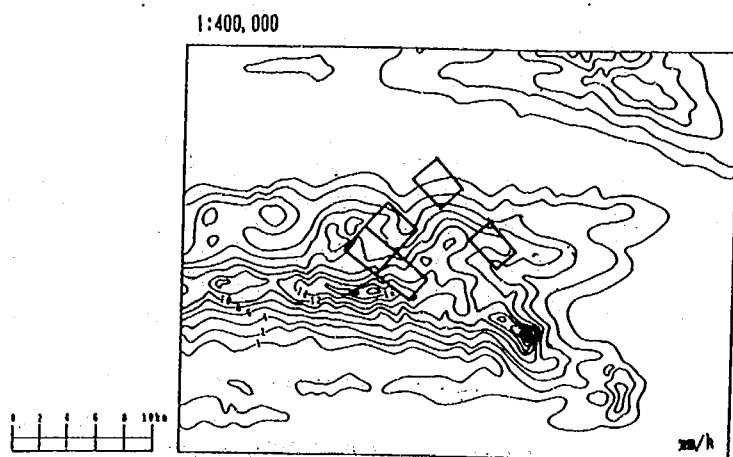
この横断面図は図4-5の
A₁～A₂、B₁～B₂、C₁～
C₂の一時間雨量を示したも
のである。

図4-7で大型レーダ雨量
計で降雨が観測されていな
いは付図1-2-4からわか
るように狭い地域での降雨
であったため比較的メッシ
ュの大きい大型レーダ雨量
計では捕らえきれなかった
と思われる。

図4-10 桜島での一時間雨量の横断面図(8.24 13:00～14:00)

8月24日 11:00 ~ 12:00 の降雨を図4-5 のA1~A2、B1~B2、C1~C2の線で切ったのが図4-9である。同様に8月24日 13:00 ~ 14:00 の降雨を処理したのが図4-10である。小型レーダ雨量計は細かく降雨を捕捉しているが大型レーダ雨量計の場合はメッシュが比較的大きいため細かい変化がわからない。大きな範囲で平均化されるため地上雨量計の値とも一致しにくいことがわかる。特に図4-10に示されているように大型レーダ雨量計は降雨の範囲が狭いときにはほとんど降雨を捕捉していないことがわかる。

小型レーダ雨量計によって観測された8月1日 10:00 ~ 11:00 の降雨を平面上に表したのが図4-11-1である。図中の四角は国見山大型レーダ雨量計のメッシュを示している。この図からも大型レーダ雨量計の1メッシュの中にも降雨量の変化があることが分かる。図4-11-2は図4-11-1を拡大したものである。この図からもし河川ごとに流域毎降雨を知るためには小型レーダ雨量計程度の細かさのメッシュが必要であると思われる。



4.2 大沢扇状地 での小型レーダ雨 量計の実験

1982年 7月17日より
10月30日まで、静岡県
の大沢扇状地周辺で小
型レーダ雨量計の実験
を行った。レーダを富
士砂防工事事務所に設
置し大沢扇状地を中心
に東西40 km、南北30
kmのエリアを観測し
た。(図4-12、図4-13)

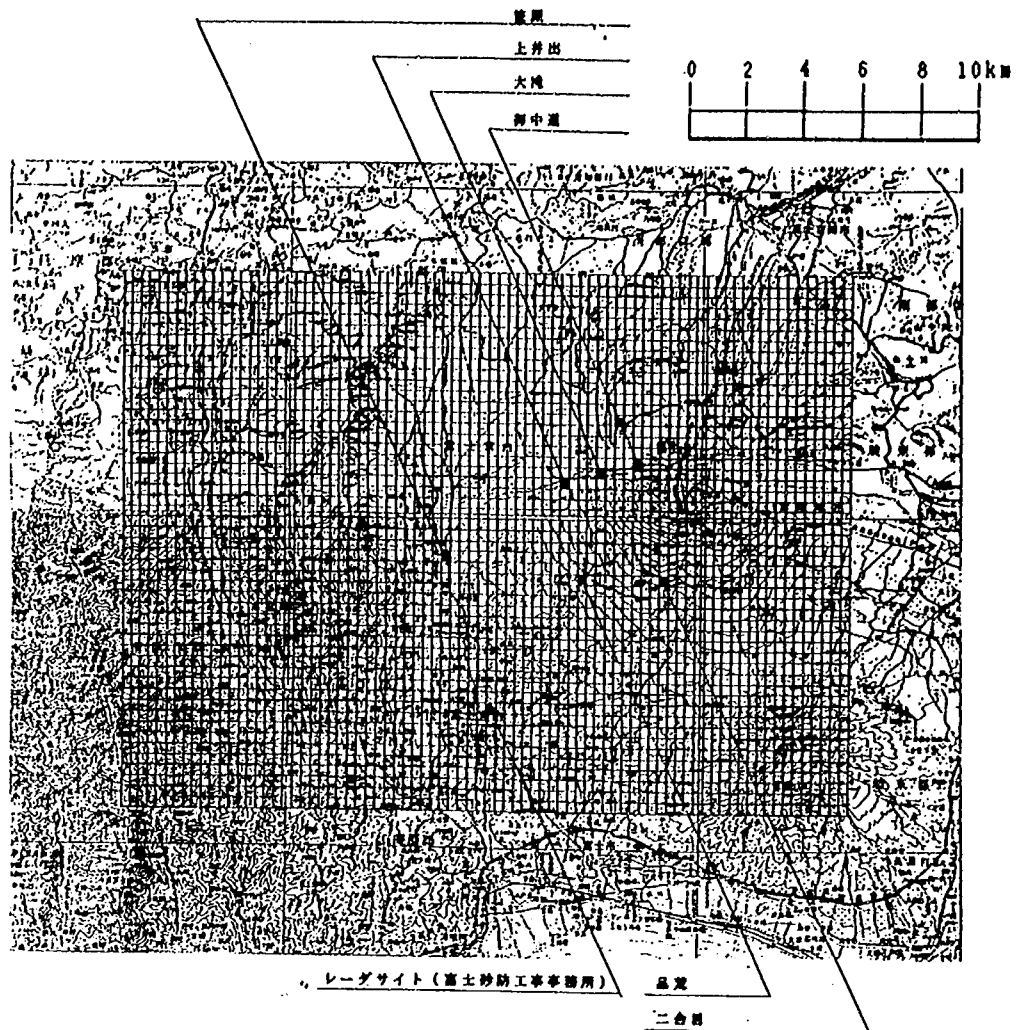


図4-12 大沢扇状地の観測地点位置図

MT. FUJI
CENTER 35.21' 30"
138.40' 0"
INTERVAL 1
MULTIPLY 5.0

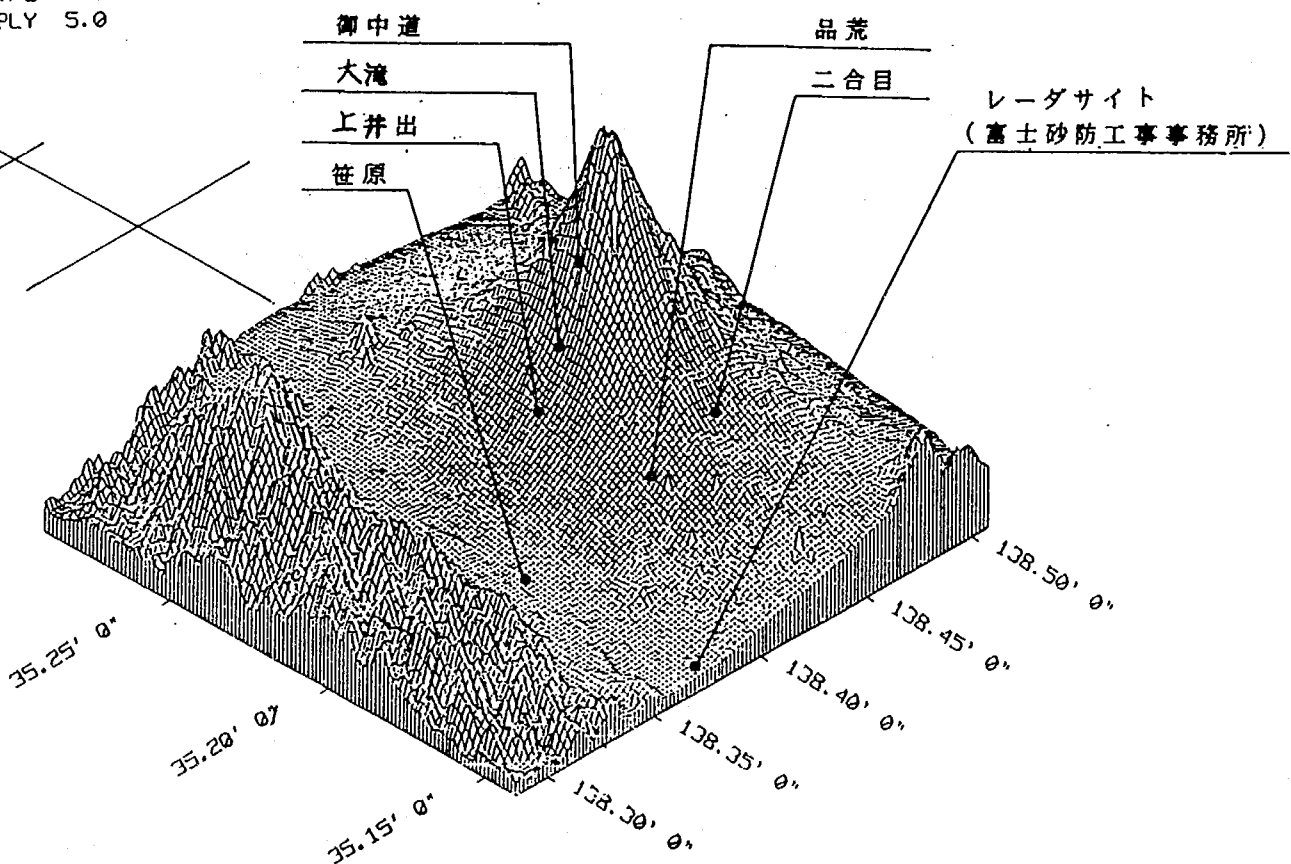


図4-13 大沢扇状地の観測地点位置図(鳥瞰図)

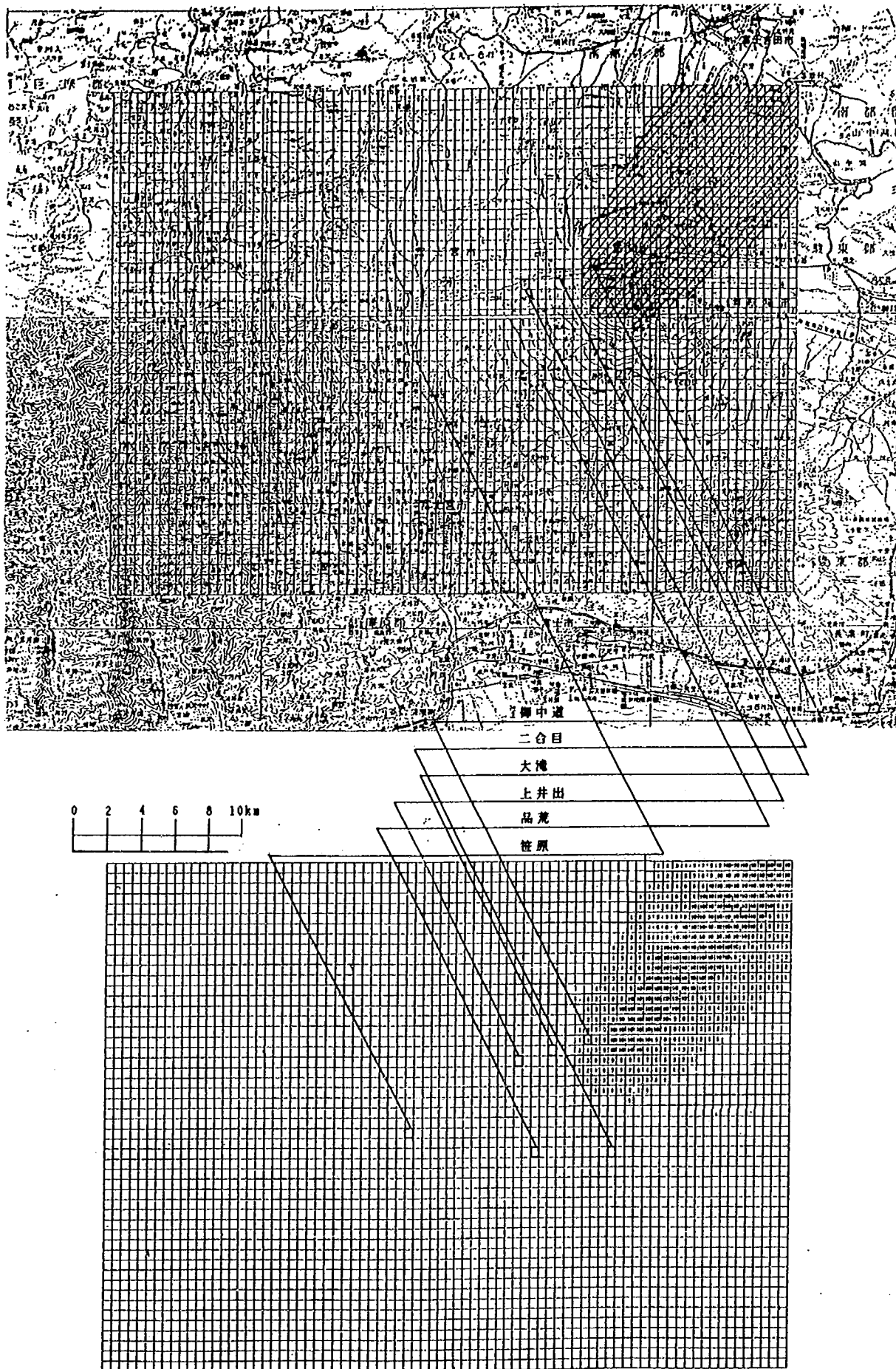


図4-14 大沢扇状地の小型レーダ雨量計観測域図

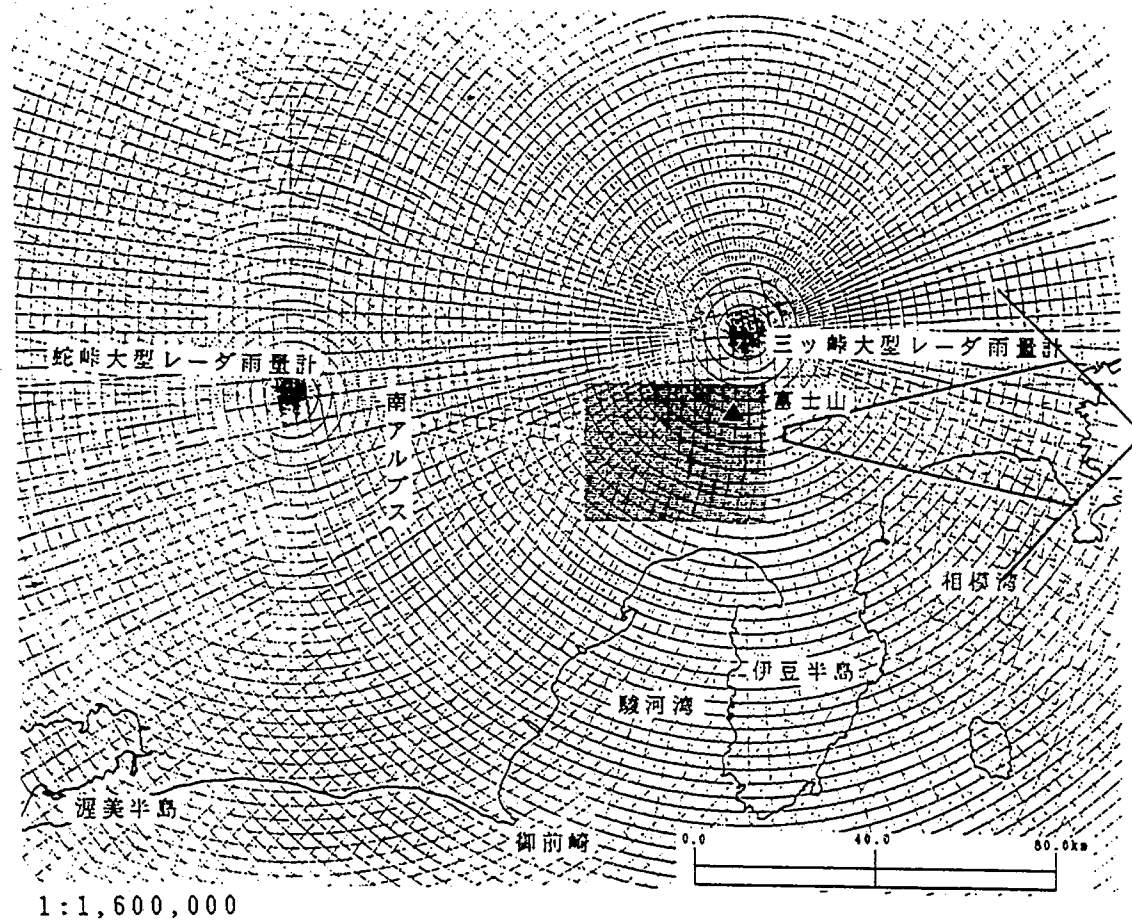


図4-15 大沢扇状地での大型レーダ雨量計と小型レーダ雨量計の位置図

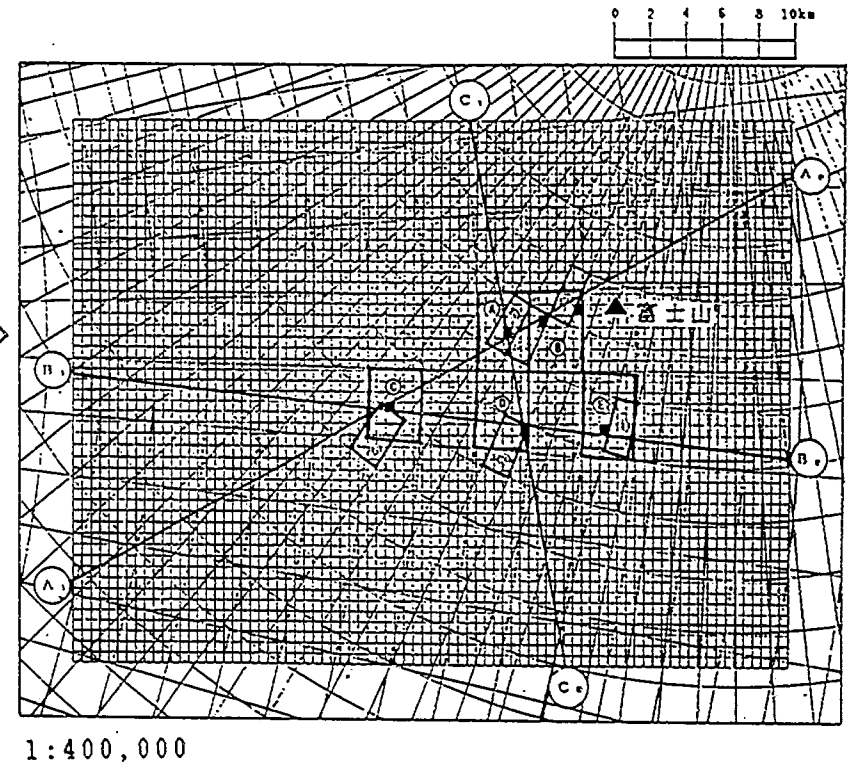


図4-16 大沢扇状地の小型レーダ雨量計と大型レーダ雨量計のメッシュ図

- 注) 大型レーダ雨量計のメッシュは定性領域 (距離方向 0~120km) は距離方向 3km、角度方向 2.8125°。
- 注) 小型レーダ雨量計のメッシュは南北方向0.6km東西方向0.5km。
- 注) 図4-16の中心付近の大型雨量計のメッシュの大きさは三ッ峠が2.2km²、蛇峠が13.25km²である。小型レーダ雨量計の大きさは0.3km²。

表4-3 大沢扇状地の観測地点及びレーダー一覧

観測地点			小型レーダー雨量計						大型レーダー雨量計（三ッ峠）					大型レーダー雨量計（蛇峠）				
観測	位 置		見透し (%)	観測地点高度 (m)	高度(h-m) (m)	距離(m) (ヒ-m・地上)	距離(km) (サイト・カンゾクテ)	相関係数	見透し (%)	位 置			相関係数	見透し (%)	位 置			相関係数
地点名	北緯	東経								距離方向	方位方向	番号			距離方向	方位方向	番号	
笹原	35° 21' 33"	138° 42' 33"	100	590	1200	610	8.37	0.852821	90	12	77	㊦	0.55513	80	28	33	㊩	0.50214
上井出	35° 21' 33"	138° 42' 33"	100	1280	1880	600	13.16	0.930282	60	9	75	㊥	0.37325	80	30	32	㊨	-0.23441
大滝	35° 21' 33"	138° 42' 33"	100	1740	2090	350	14.69	0.764699	0	9	74	㊤	0.42915	80	31	32	㊦	0.15455
御中道	35° 21' 33"	138° 42' 33"	0	2360	2230	-	15.67	0.421368	0	8	73	㊢	-0.02187	80	31	32	㊦	0.17028
品荒	35° 21' 33"	138° 42' 33"	100	950	1270	320	8.82	0.828856	90	11	73	㊣	-0.10355	70	30	33	㊩	-0.26586
二合目	35° 21' 33"	138° 42' 33"	100	1340	1760	420	12.30	0.720898	50	10	69	㊠	0.31413	70	32	33	㊥	0.00492
平均				1180.0	1640.0	460.0	11.468											
TOTAL								0.802134					0.15647					0.09387

注) 小型レーダー雨量計が設置されているのは 北緯 35° 14' 18" ~
東経 138° 37' 13" ~
標高 190+17 m
仰角 8.0°

注) 大型レーダー雨量計の距離方向の数字は定量領域でのレーダーサイトからの
番号、方位方向の数字は定量領域での北から時計回りの番号を示している。
注) 大型レーダー雨量計の番号は図4-16の中に書かれている大型レーダー雨量計の
メッシュの番号を示している。
注) 小型レーダー雨量計のそれぞれの平均及びTOTALには御中道のデータは含まれ
ていない。
注) 大型レーダー雨量計の相関係数が悪いのは三ッ峠では富士山によって、蛇峠で
は南アルプスによってビームが隠されてしまうからである。

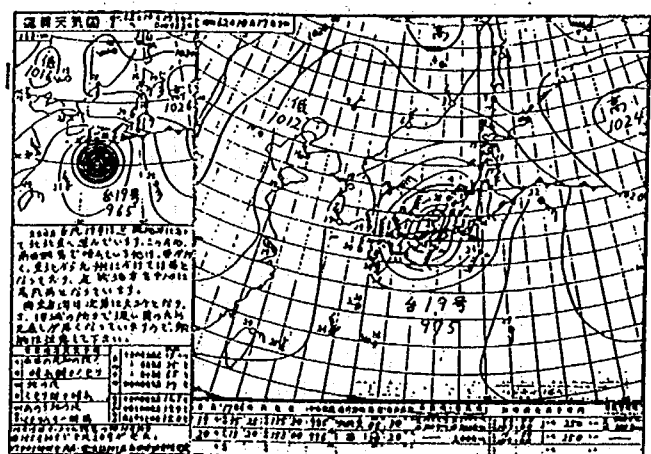
小型レーダ雨量計の観測範囲は図4-14であった。図では、見えない割合を数字で示している。また大沢扇状地は蛇峠・三ッ峠大型レーダ雨量計の観測範囲でありその位置関係を示したものが図4-15、図4-16である。これらをまとめたのが表4-3である。この表から、小型レーダ雨量計では御中道はビームの中心線より上にあることが分かる。事実、相関係数なども悪く観測データとしては無意味と思われるのでTOTALの計算や以後の解析からも除いている。この地域は三ッ峠の大型雨量計からは富士山の陰となり、蛇峠の大型雨量計からは南アルプスに隠されるため大型レーダ雨量計では観測が困難な地域である。

観測した降雨は10月17日にち(0:00-15:00)の降雨である。天気図(図4-17)を見るとわかるように、台風性(台風19号)の降雨であった。小型レーダ雨量計によって観測された降雨の状況を付図2-1～付図2-4に示す。

各観測地点ごとに地上雨量計の値と小型レーダ雨量計の値を示したのが図4-18である。各観測地点のTOTALの相関を一次式で示すと $Y = 0.852 X - 0.685$ となる。相関係数は0.827と非常に良い。また回帰式に見られるように地上雨量計の値よりも小型レーダ雨量計の値が少し小さいのは小型レーダ雨量計が $B = 200$, $\beta = 1.6$ と標準的な降雨に合わせていたためこの台風性の降雨では小型レーダ雨量計の値が比較的弱く現れてしまったと考えられる。各観測点ごとに見てみても全体的に非常によい相関がとれている。大型レーダ雨量計については予想されたように、地上雨量計との相関は良くない。これは三ッ峠大型レーダ雨量計は富士山により、蛇峠大型レーダ雨量計は南アルプスの山々によりビームが遮断されるためである。

各観測地点ごとに時系列に表したのが図4-19である。この資料からも小型レーダ雨量計と地上雨量計が非常によい相関を持っていることが分かる、このことは、地上雨量を真値とした場合の小型レーダ雨量計の誤差率が32%であることから分かる。

10月17日 6:00～7:00の降雨を図4-16のA1～A2、B1～B2、C1～C2の線で切ったのが図4-20である。この図からも小型レーダ雨量計が細かく雨量を捕らえているのに比べ大型レーダ雨量計は地物の陰となり降雨を捕らえていない。



昭和62年10月17日

図4-17 大沢扇状地の観測降雨の天気図

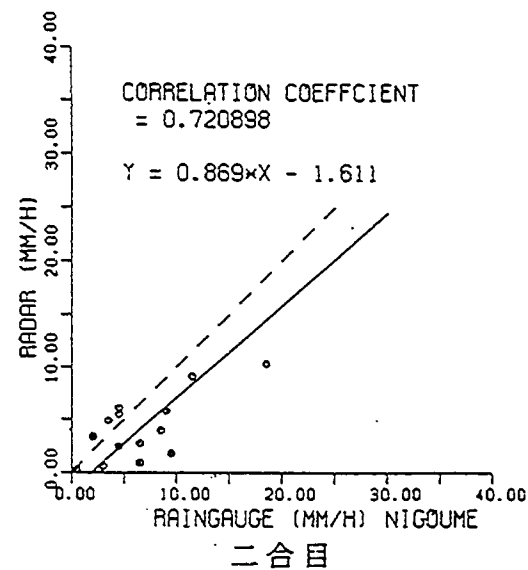
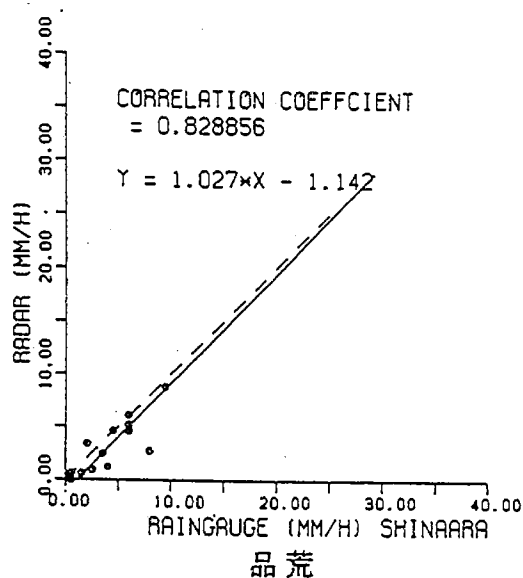
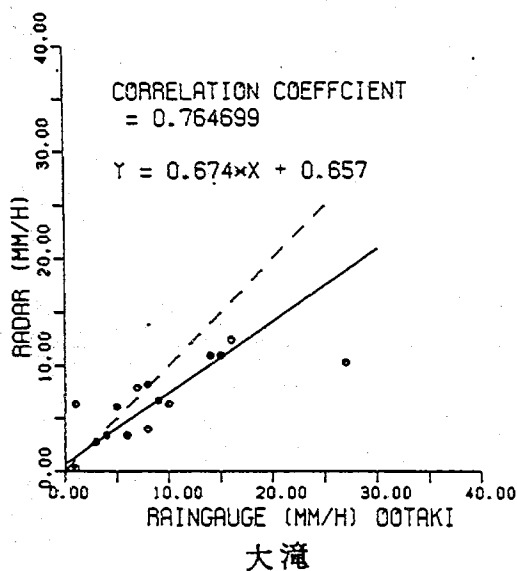
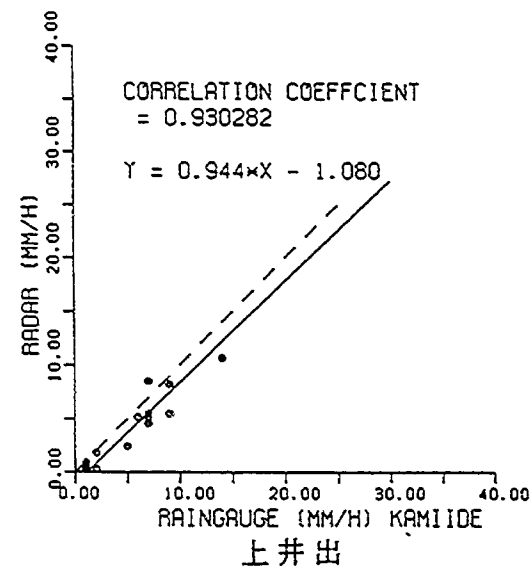
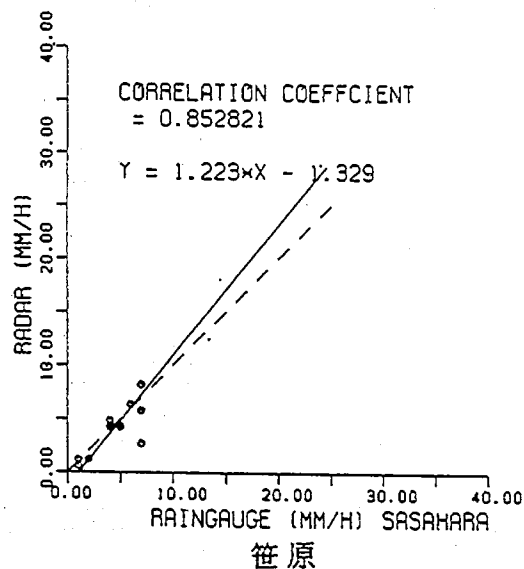
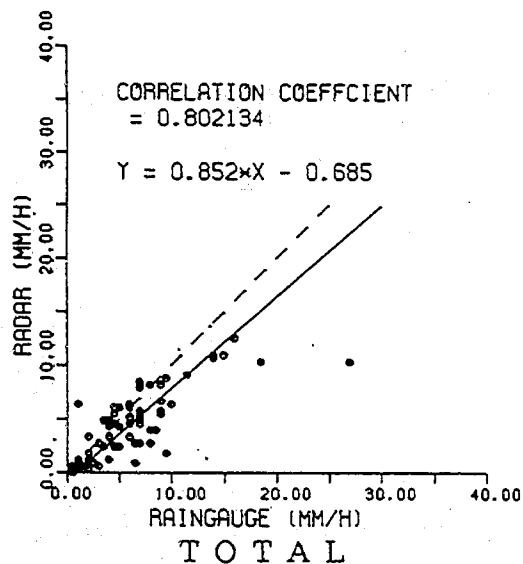


図4-18 大沢扇状地での小型レーダ雨量計の相関図

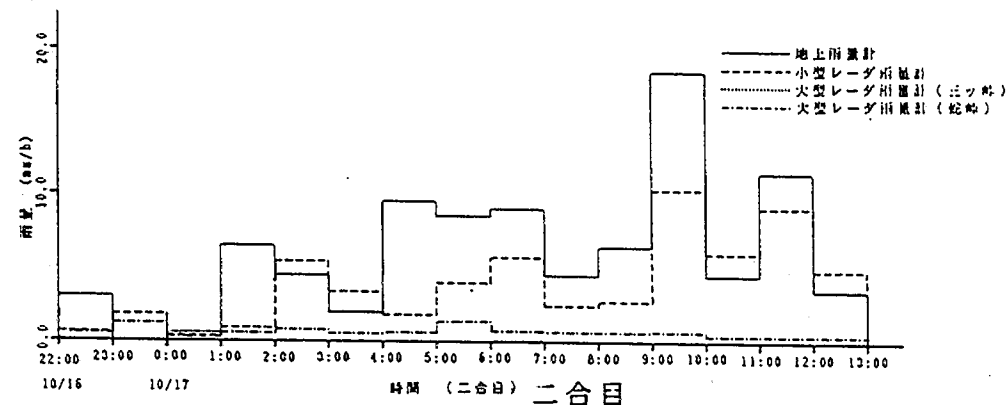
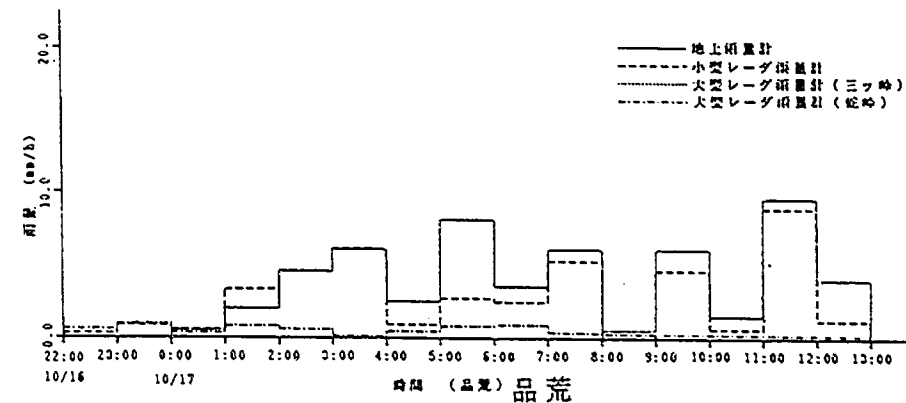
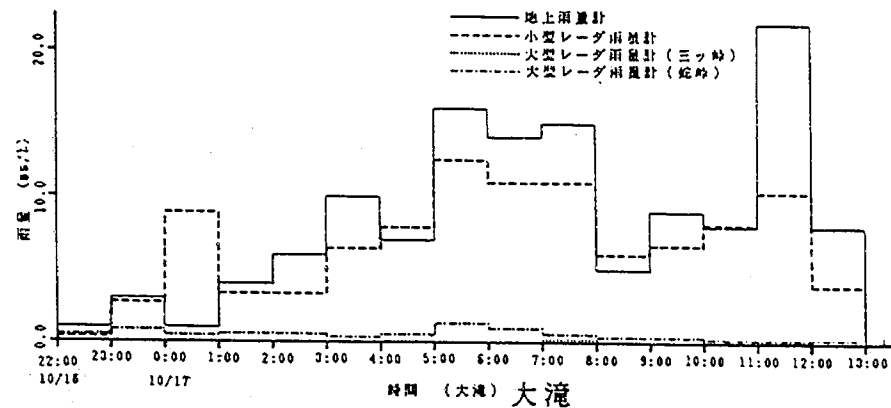
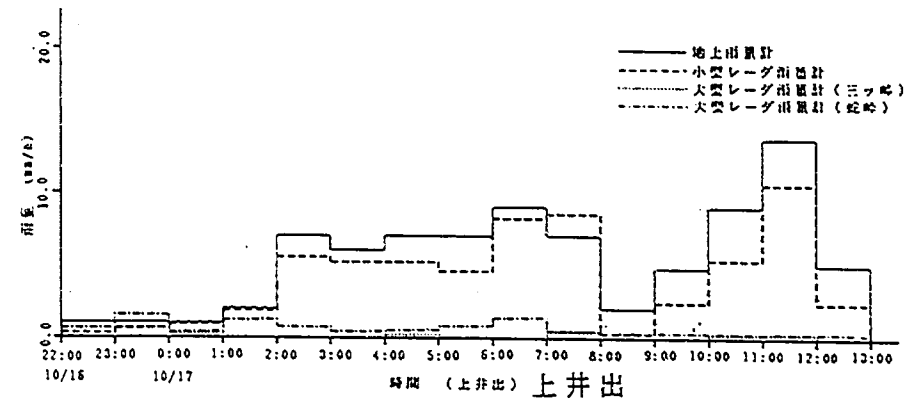
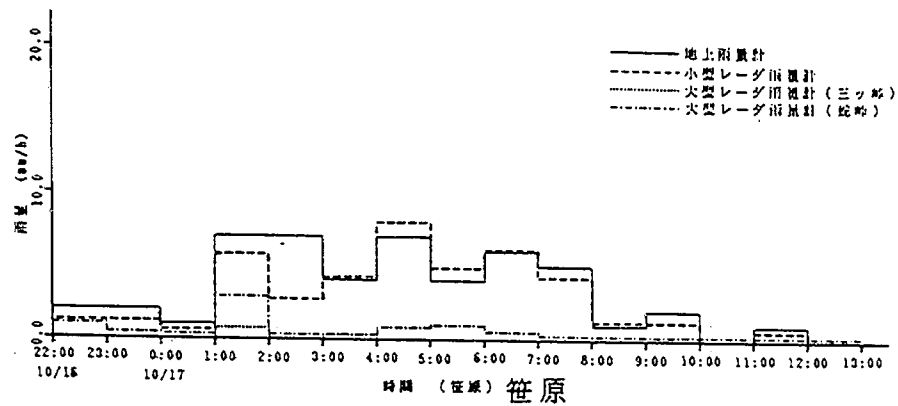


図4-19 大沢扇状地での一時間雨量の時系列図(10.16 22:00~10.17 15:00)

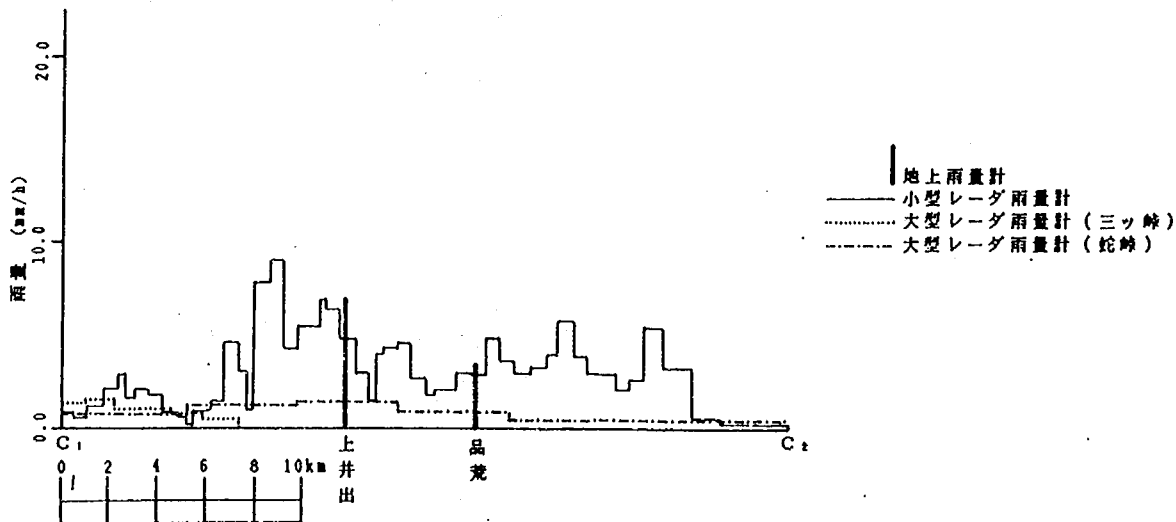
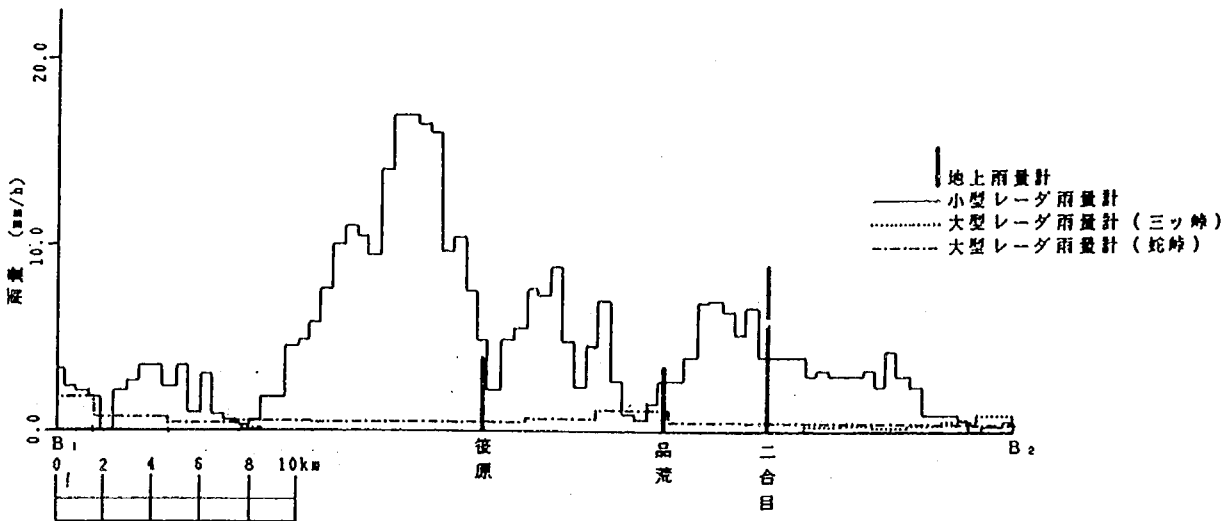
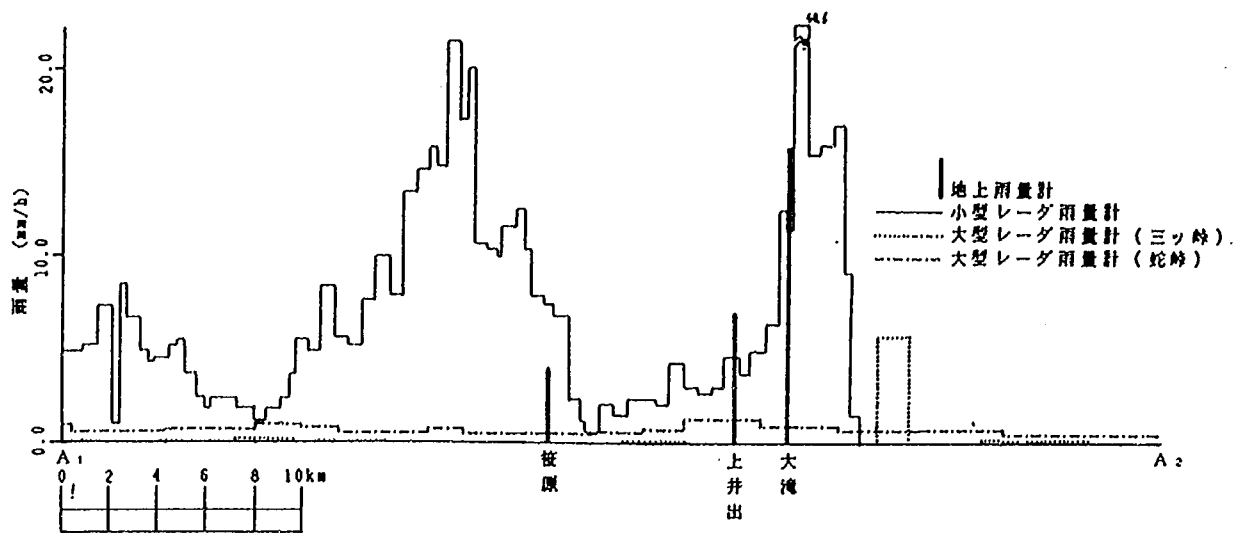


図4-20 大沢扇状地での一時間雨量の横断面図(10.17 6:00~7:00)

注) この横断面図は図4-16のA₁~A₂、B₁~B₂、C₁~C₂の一時間雨量を示したものである。

5. まとめ

大部分の土砂災害は降雨と密接にかかわっている。また、図1-1に示すように降雨強度と土砂災害発生時刻にはなんらかの関係があることが多い。ここでは土砂災害を予知するうえで、降雨情報を取り上げ、砂防が必要としている精度まで降雨情報が補えられているかを調査した。まず、大型レーダ雨量計の覆域図より和歌山、鳥取、日本アルプス近辺が見えにくいことが示された。その地域を補完するものとして、またもっと細かい降雨情報を得るための手段として小型レーダ雨量計を桜島、富士山大沢扇状地で実験した。その結果、相関係数が0.8004、0.8021、時系列図、横断図も小型レーダ雨量計の有効性を示した。

集中豪雨などの地域単位の降雨状況の把握や、数時間後の豪雨の発生などに利用されつつある大型レーダ雨量計も、個々の溪流ごとの土砂災害の予測の為に十分細かさを望めない。もっと細かいレベルでの降雨情報が必要である。しかし、地上雨量計を非常に密に設置するのは非常に不経済である。そのため、小型レーダ雨量計が考えられその有効性が示された。特に火山のある地域では土石流が起こり易い上に地上雨量計は降塵の影響を受け易く、また火口付近は立入禁止区域であることが多い、たとえば桜島のような地域では小型レーダ雨量計は有効である。(図6-1)¹¹⁾。また山間部で山のため大型レーダ雨量計で見えない地域についても小型レーダ雨量計が有効であると思われる。土石流の予想のためにはまず正確な情報が必要であり次にその適切な処理方法の開発が必要である。そしてこの調査より正確な降雨情報を得る手段として小型レーダ雨量計が有効であることが本研究を通じて示された。

謝辞

本研究を進めるにあたり、小型レーダ雨量計の実験局については日本無線株式会社から多大なご協力を得た。また、地上雨量データの収集では富士砂防工事事務所、大隅工事事務所の砂防調査課、電気通信課の支援を受けた。大型レーダ雨量計データの収集にあたっては中部地方建設局、関東地方建設局の協力を得た。本研究を進めるにあたり御協力、御支援頂いた上記の皆様に対して深く感謝の意を表します。

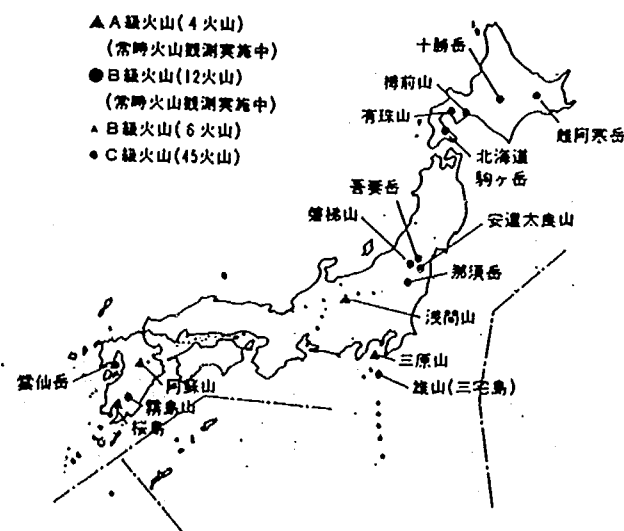
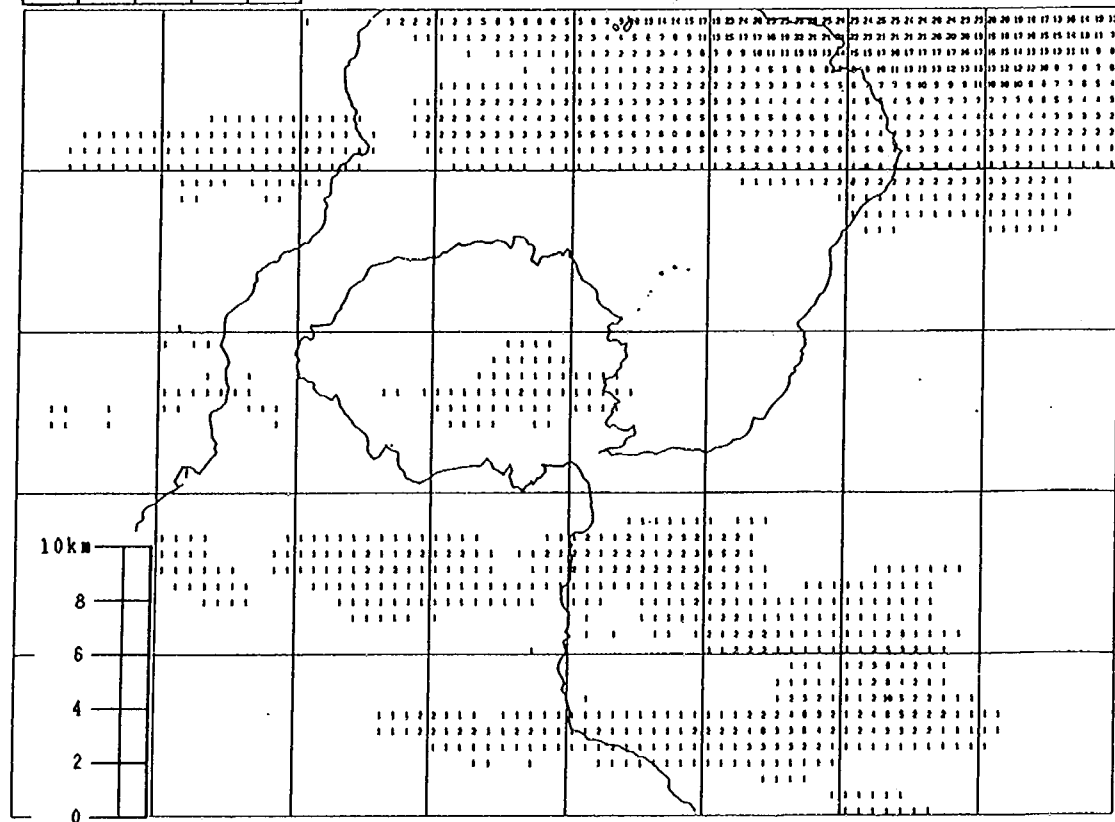
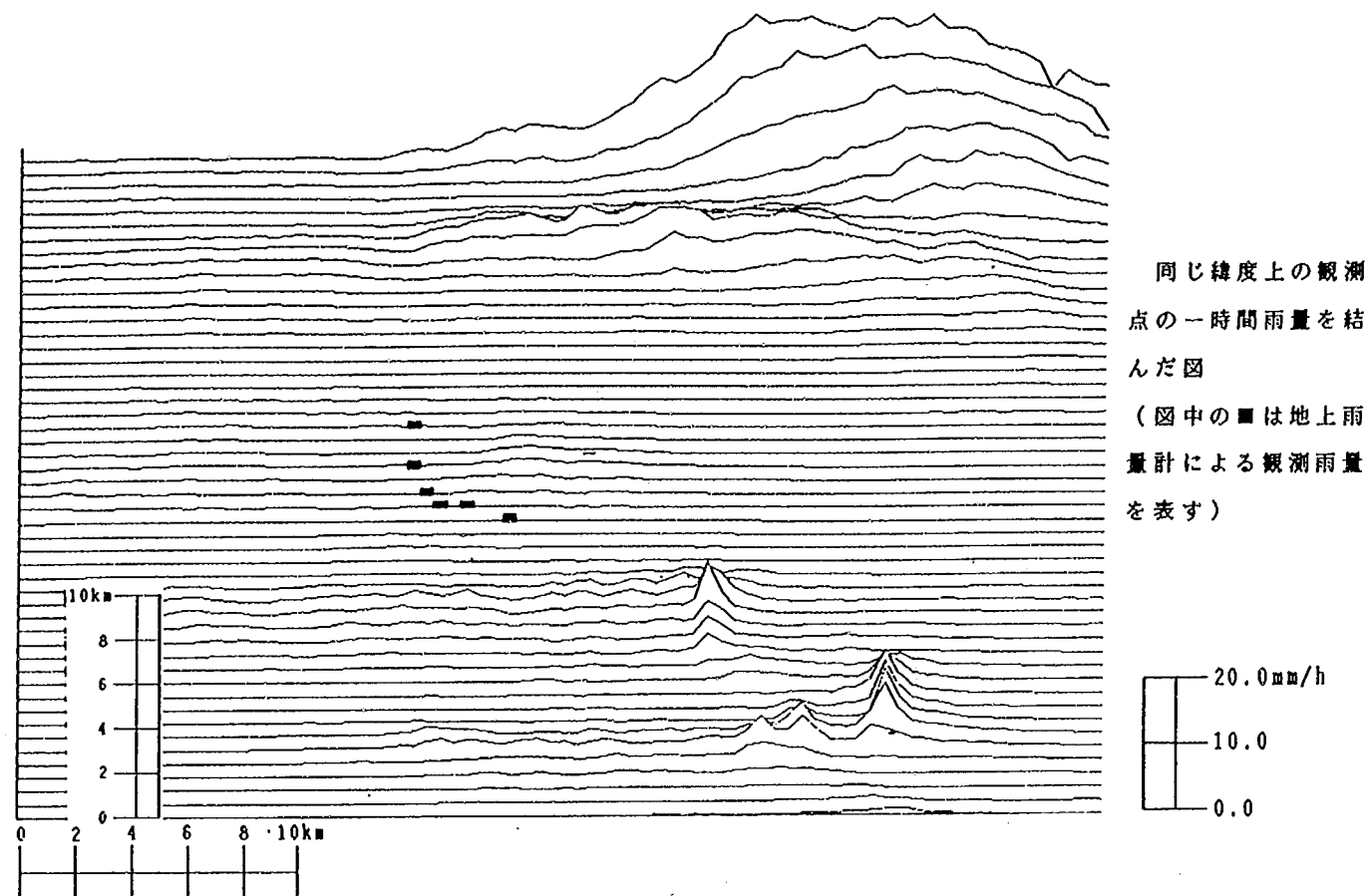


図5-1 火山位置図¹¹⁾

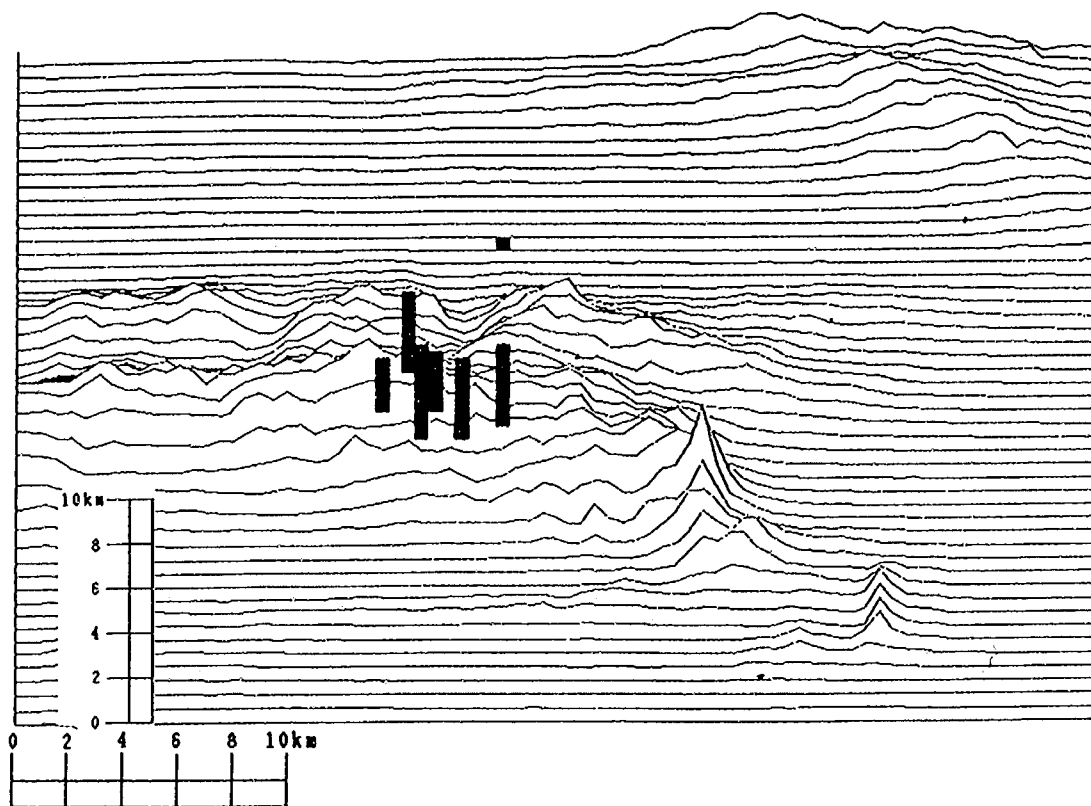
参考文献

- 1) 砂防・地すべり技術センター(1987): 土砂災害の実態 昭和61年, pp. 3
- 2) 水山高久(1986): 斜面災害の予知と防災, 土石流, pp 59
- 3) 建設省土木研究所(1987): 集中豪雨の観測体制に関する検討 報告書
- 4) 日本気象協会(1976): レーダ気象観測指針, pp 2-2, 2-5
- 5) 建設省土木研究所(1987): 直交二偏波レーダによる降水観測に関する調査報告, 土木研究所資料 第2487号, pp 2
- 6) 日本気象協会(1972): 気象研究ノート 第112号, pp 1~56
- 7) 武田喬男(1981): 気候における雲の役割, 気候変動シンポジウム(Ⅱ) 諸要因の変動, 気象研究ノート 第141号, pp 12
- 8) 戸塚良則(1979): 標高メッシュデータを用いたVHF/UHF電解強度自動計算実験システム, 昭54.6 NHK技研月報
- 9) 山本義一(1960): 気象学概論, pp 3
- 10) B. J. メイソン(1968): 雲と雨の物理
- 11) 砂防地すべり技術センター(1986): 土砂災害等危険箇所について, 砂防と治水



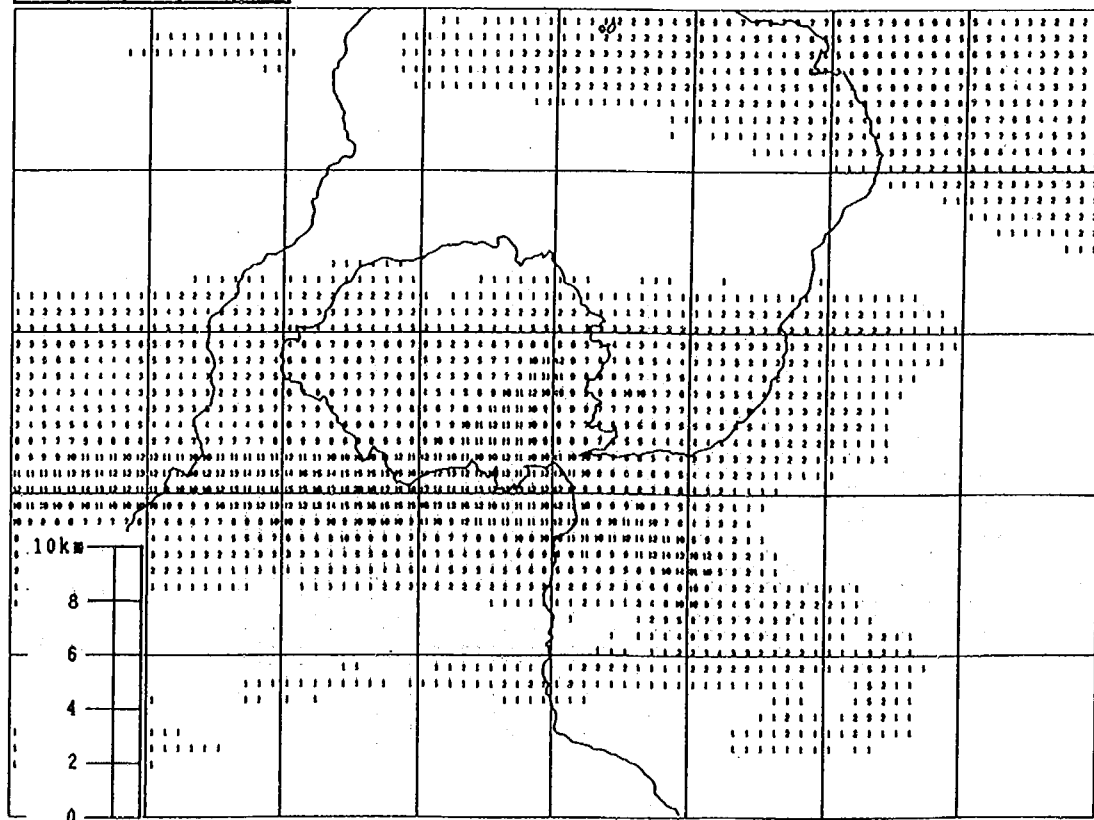
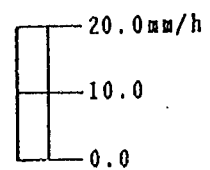
数字は一時間雨量を表す (mm/h)

付図1-1-1 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 9:00~10:00)



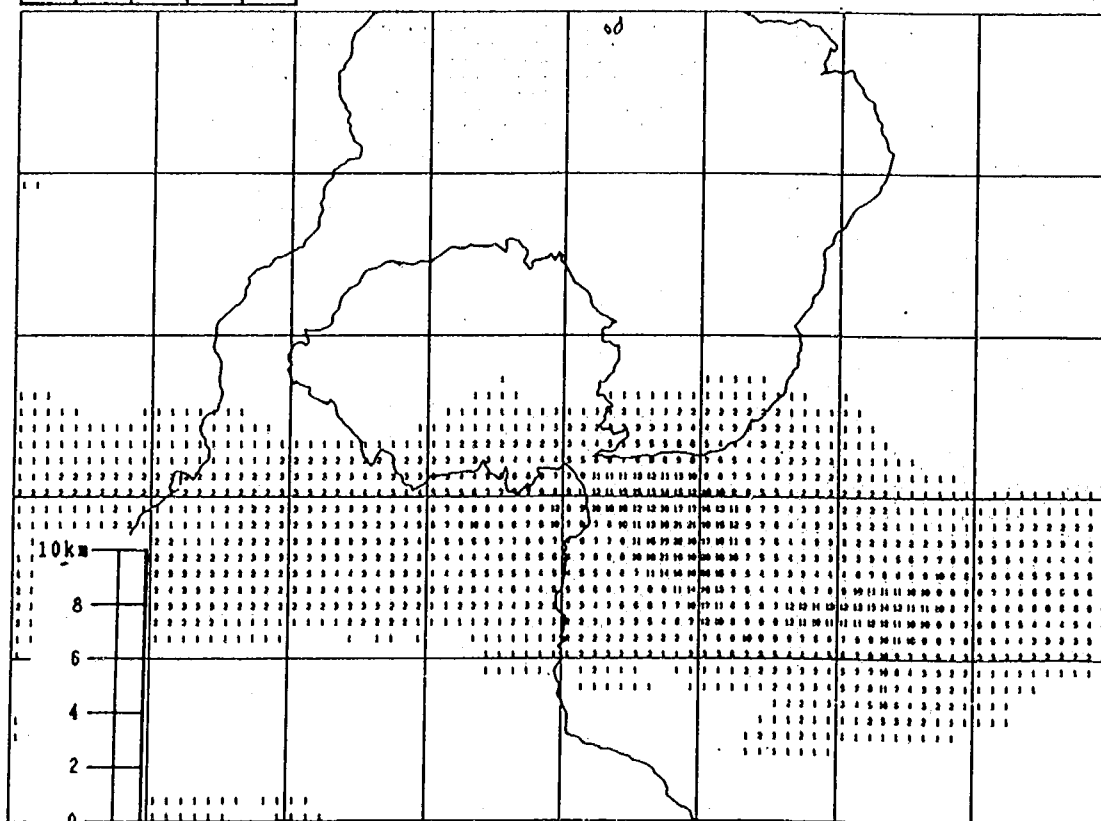
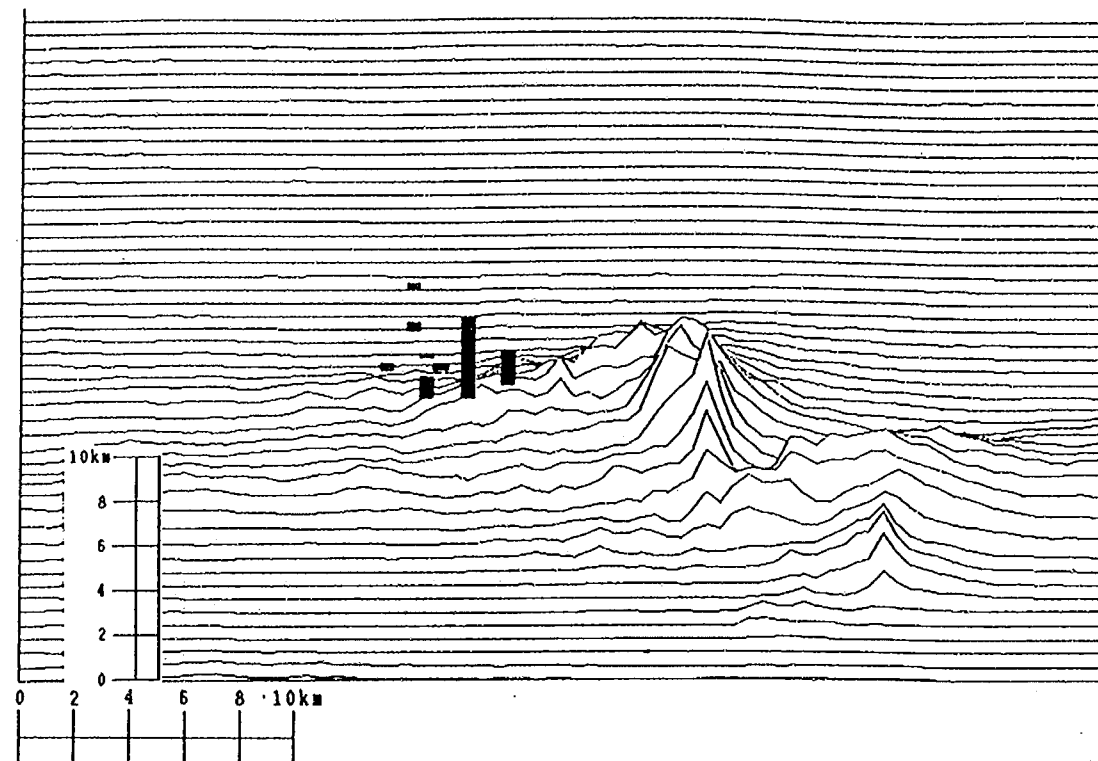
同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図

(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)

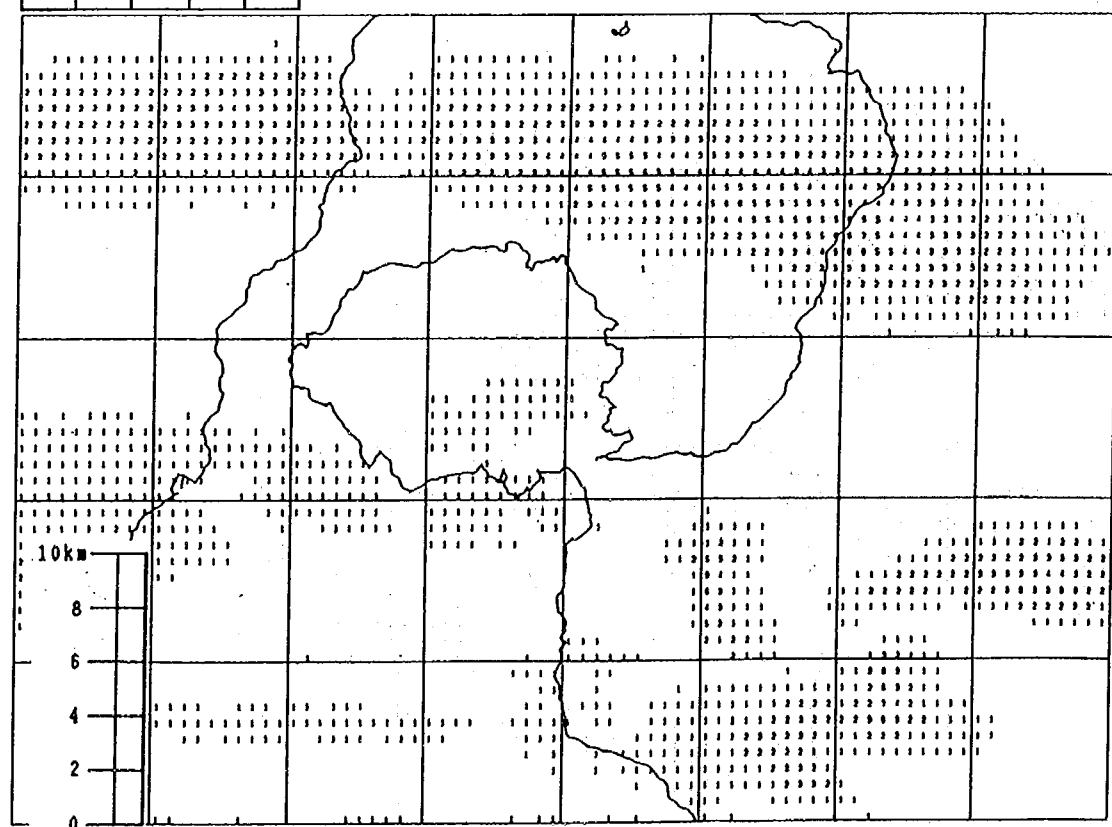
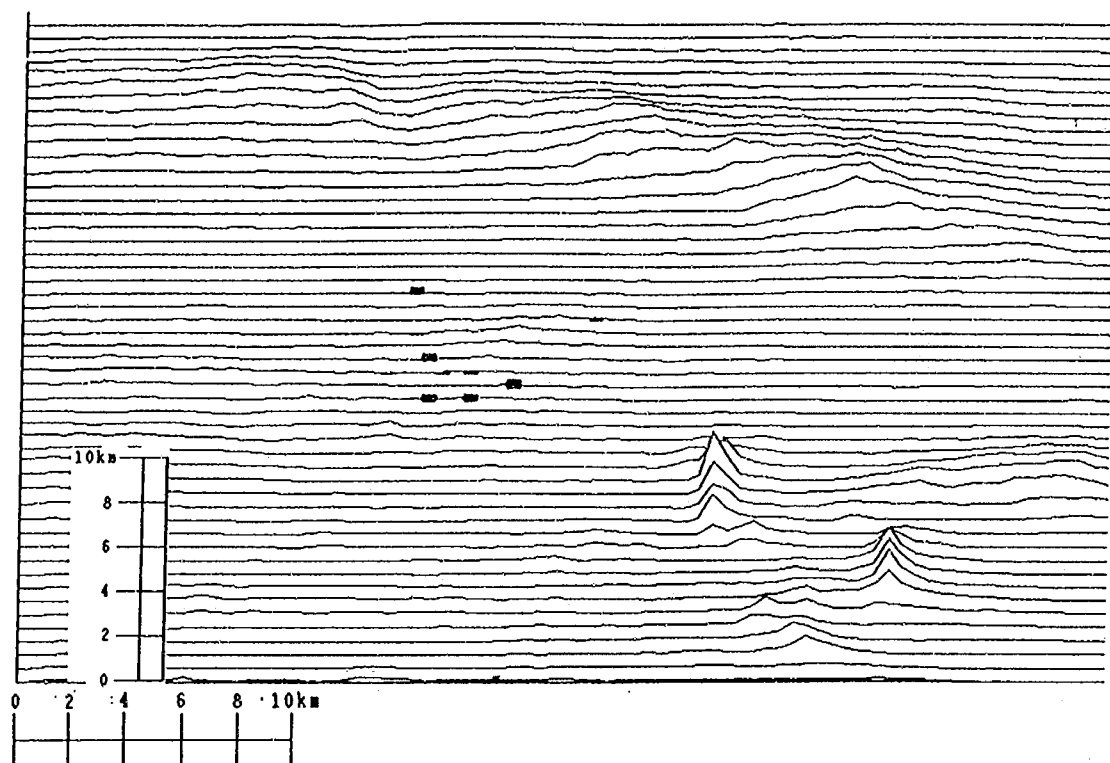


数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

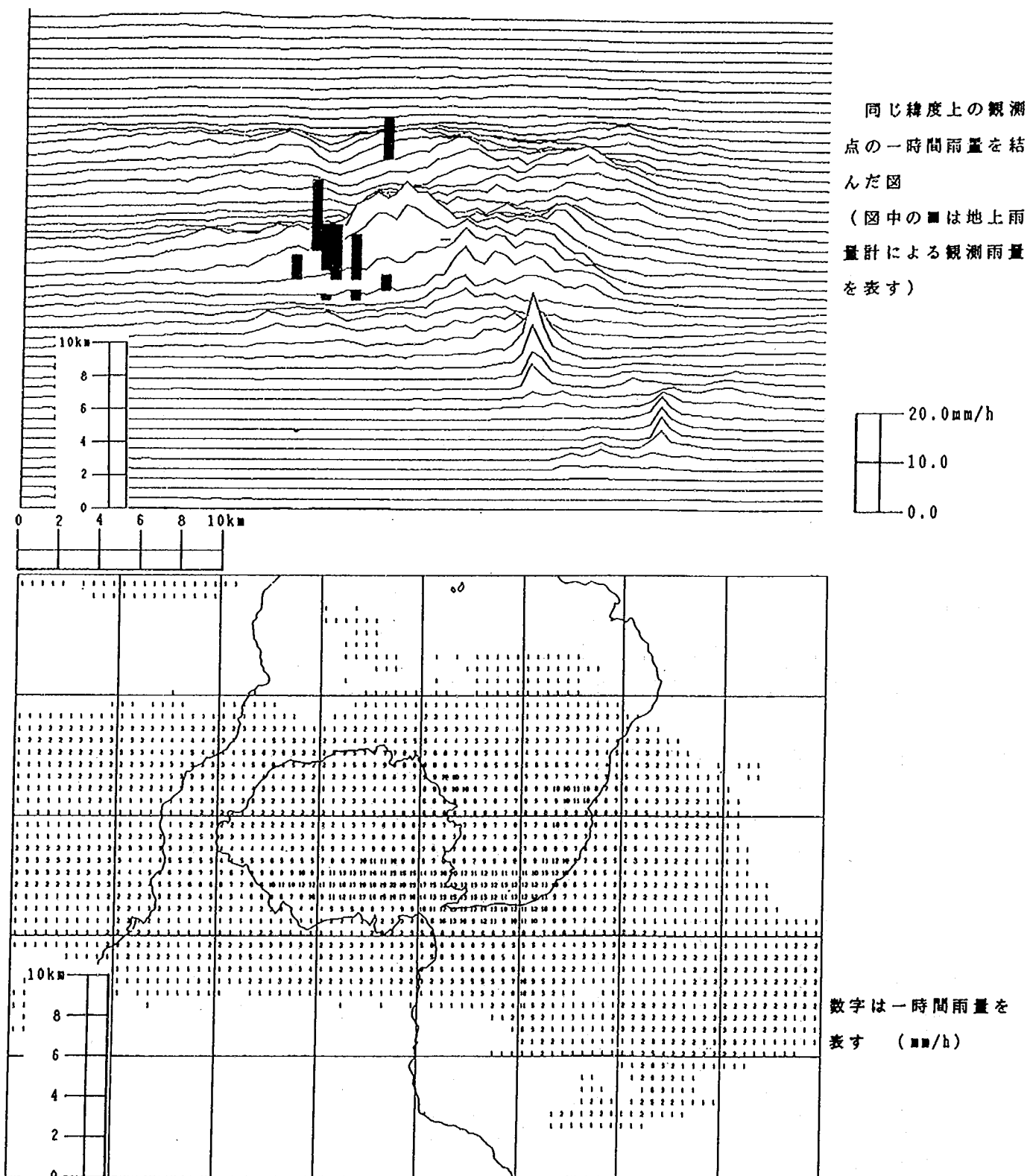
付図1-1-2 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図 (一時間雨量 1987年8月1日 10:00~11:00)



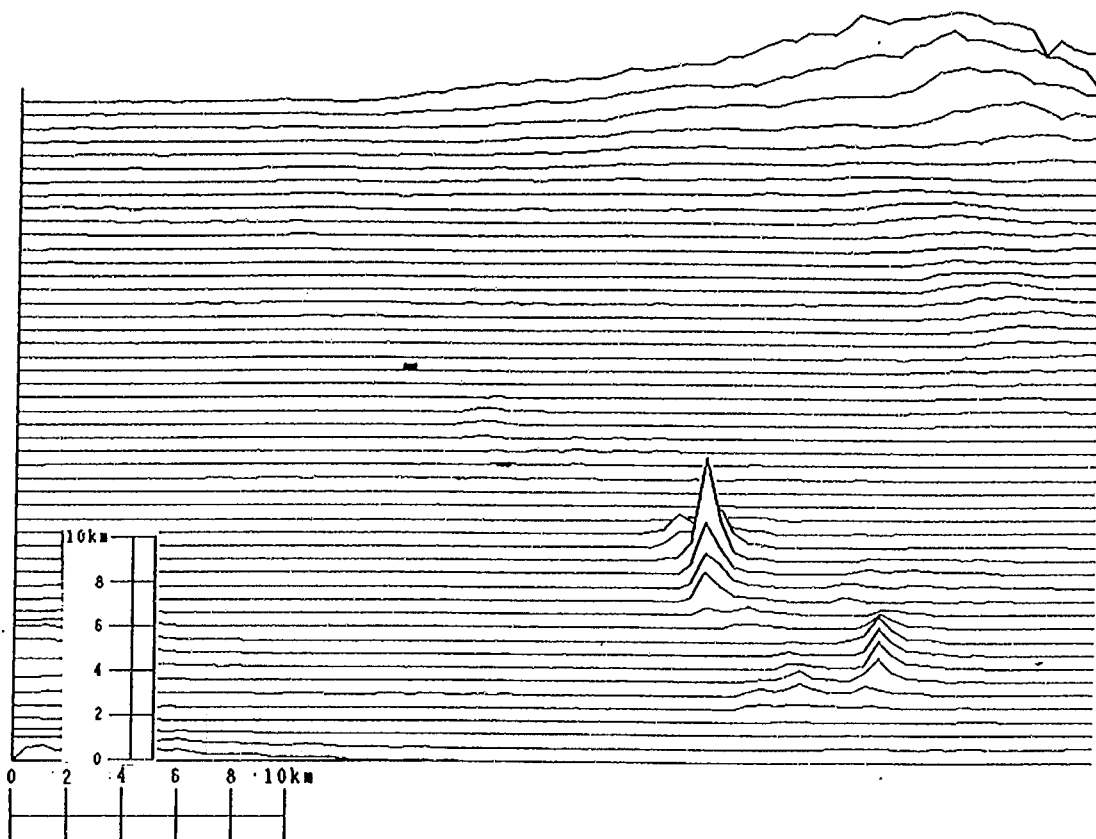
付図1-1-3 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 11:00~12:00)



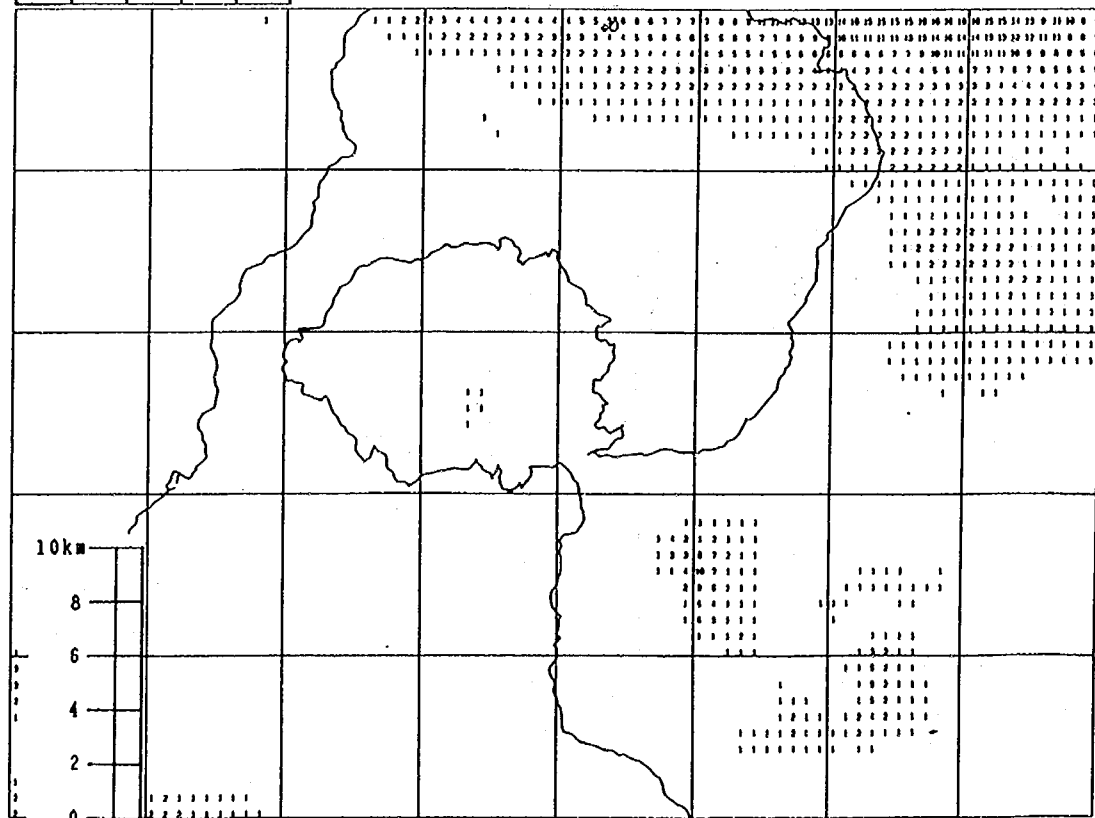
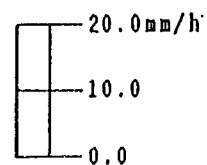
付図1-1-4 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 12:00~13:00)



付図1-1-5 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 13:00~14:00)

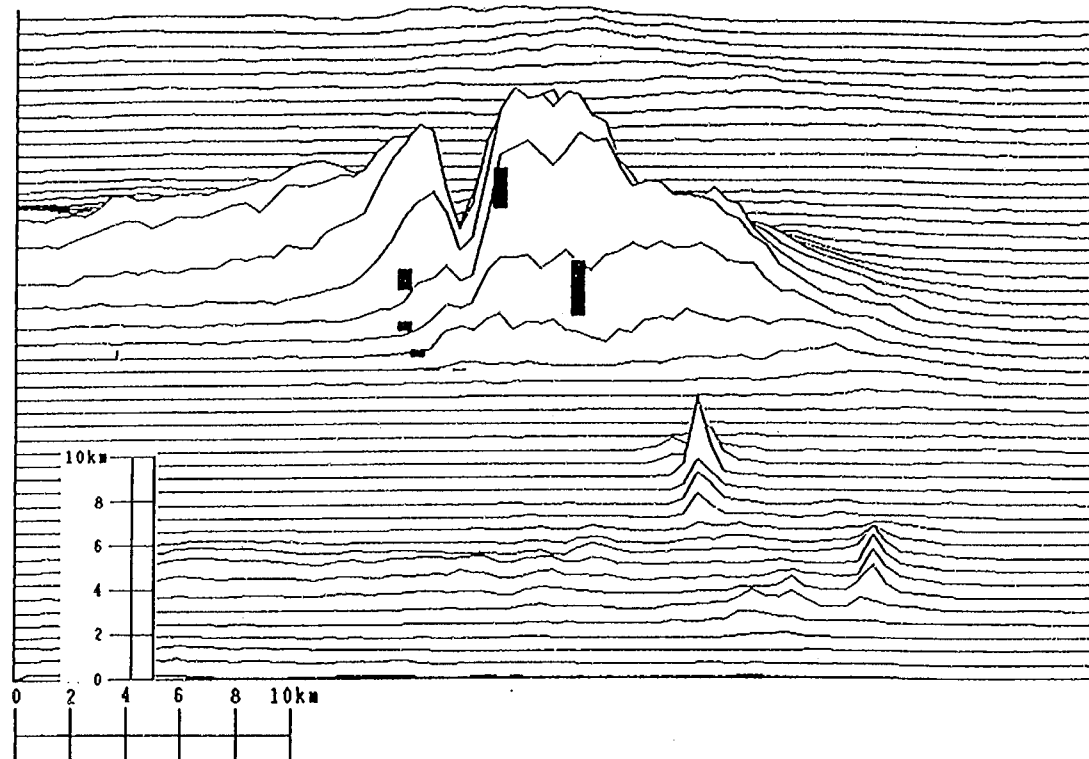


同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)

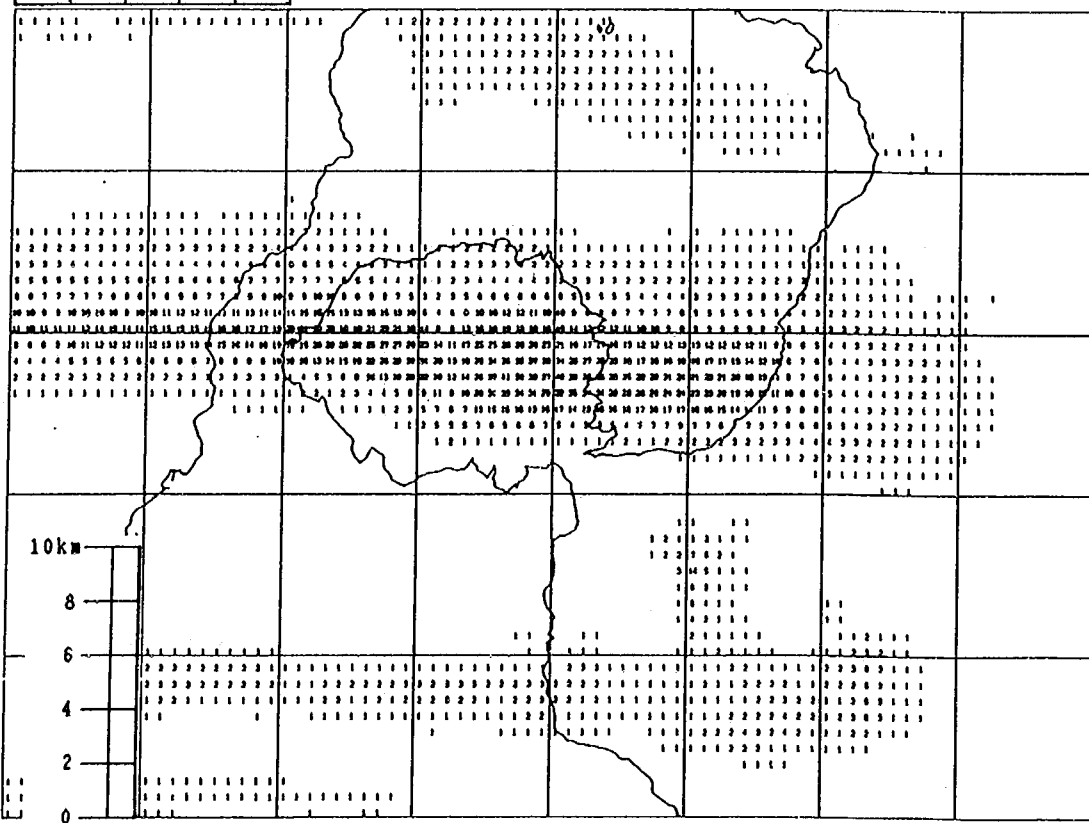


数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

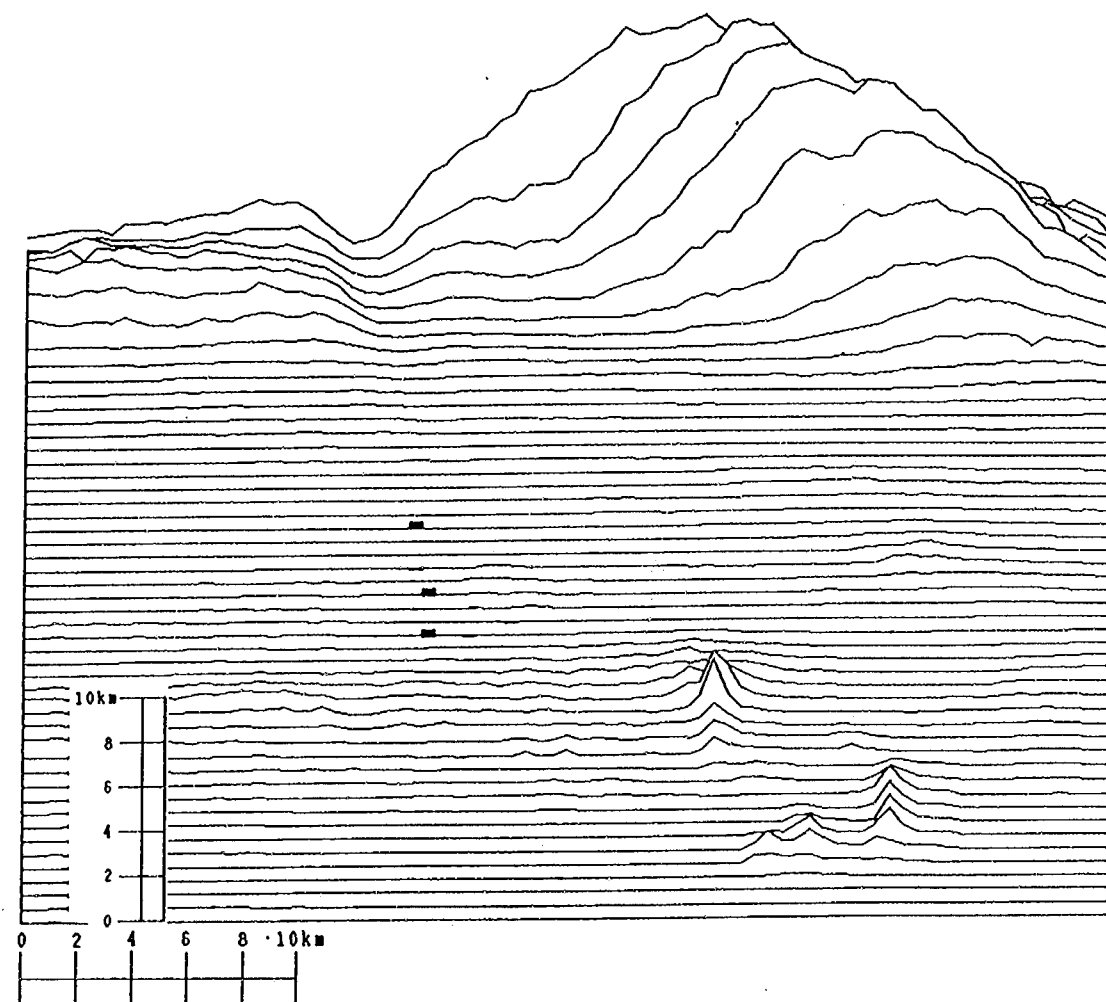
付図1-1-6 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 14:00~15:00)



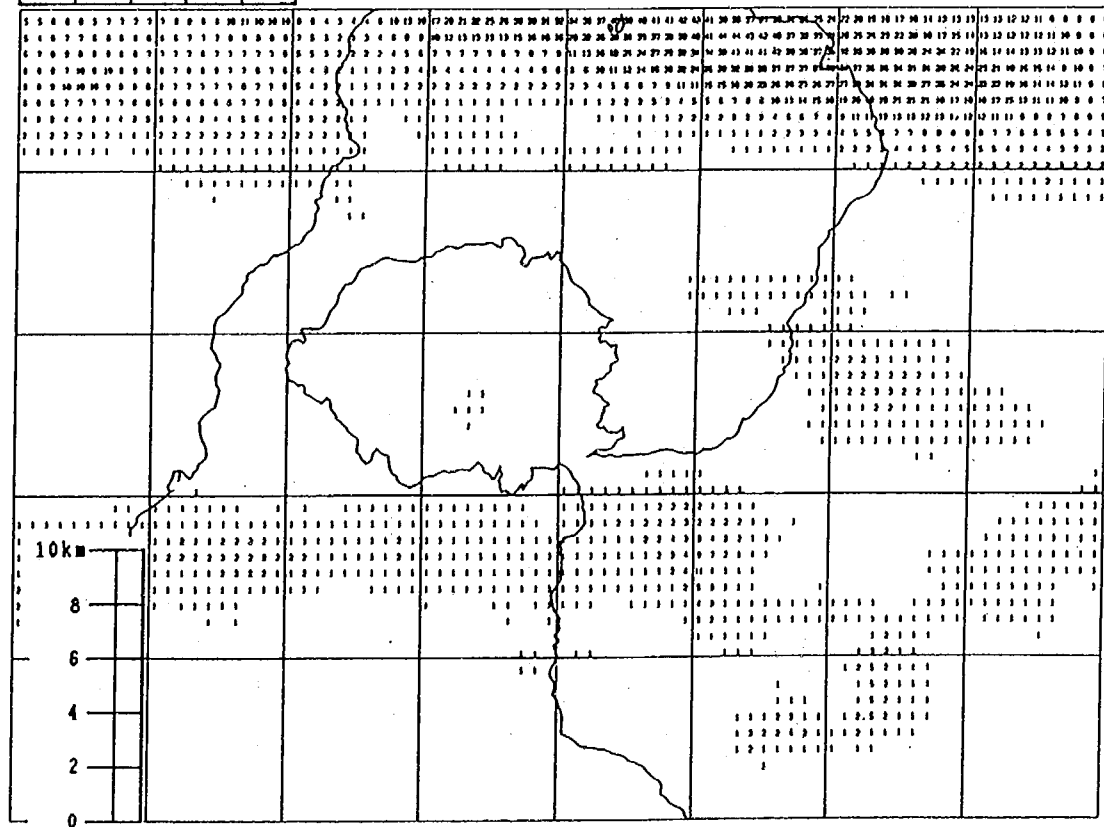
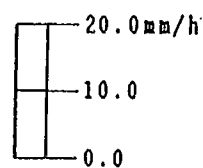
同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)



付図1-1-7 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 15:00~16:00)

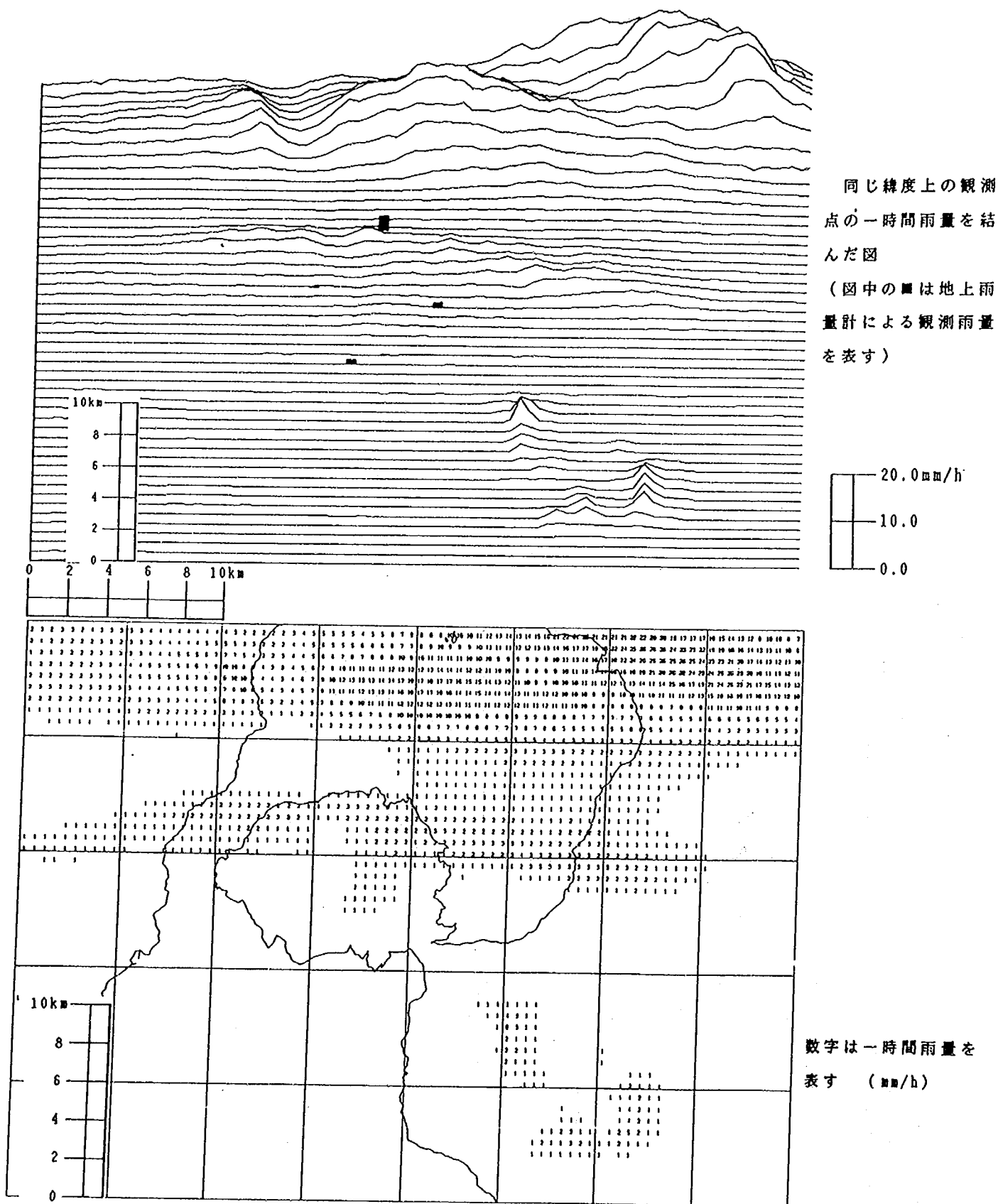


同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)

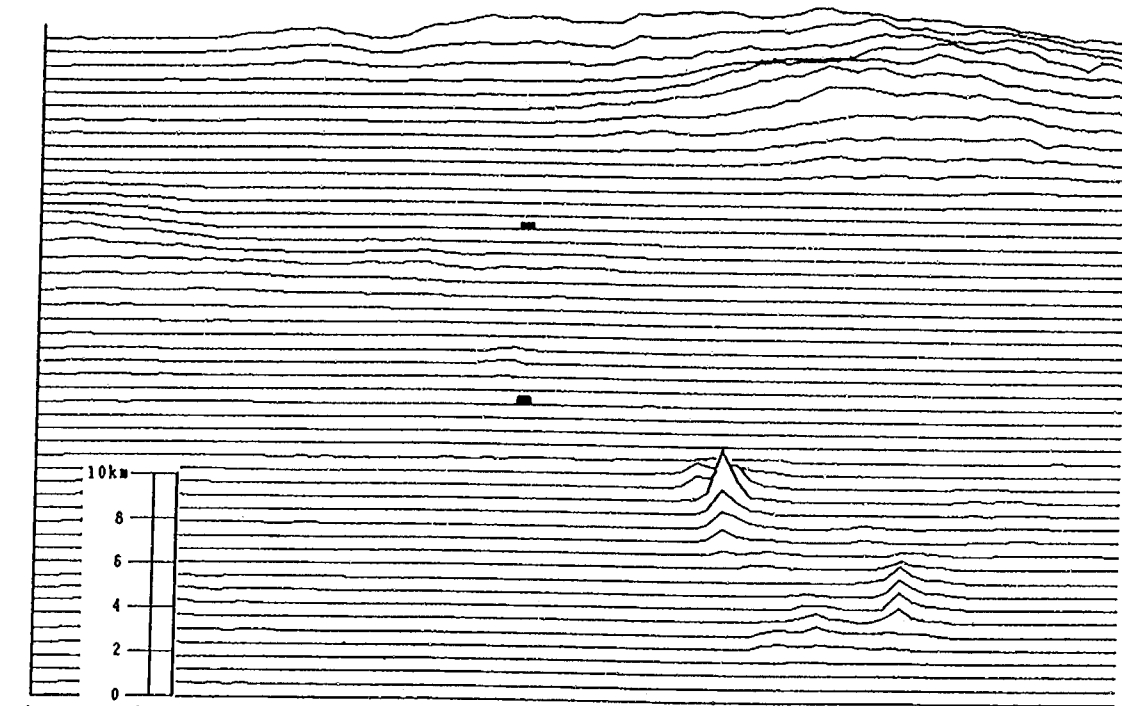


数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

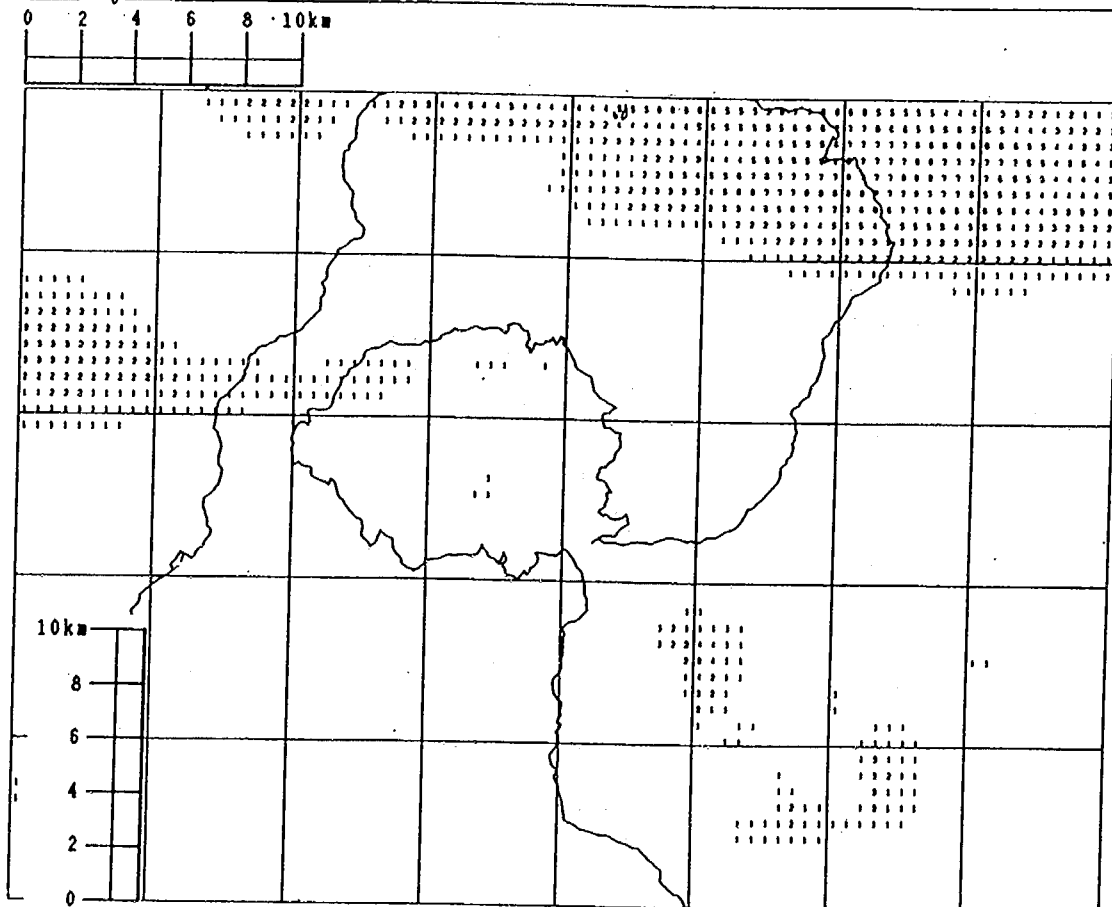
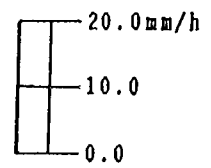
付図1-1-8 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 16:00~17:00)



付図1-1-9 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 17:00~18:00)

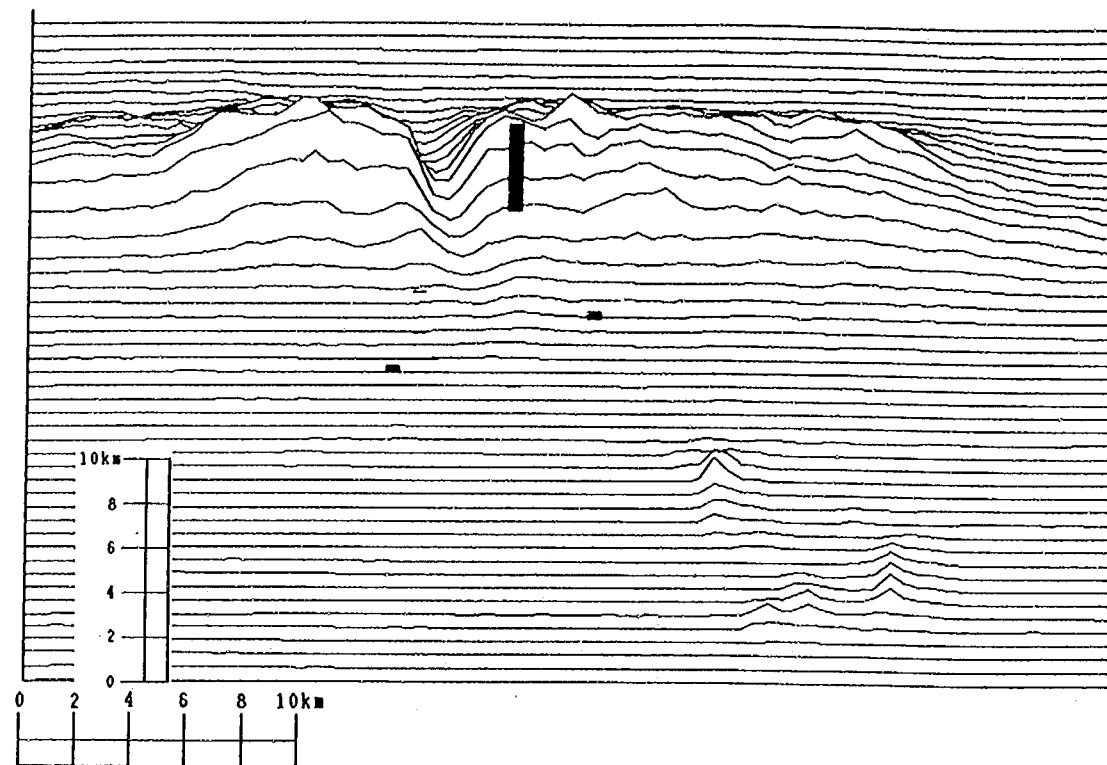


同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)

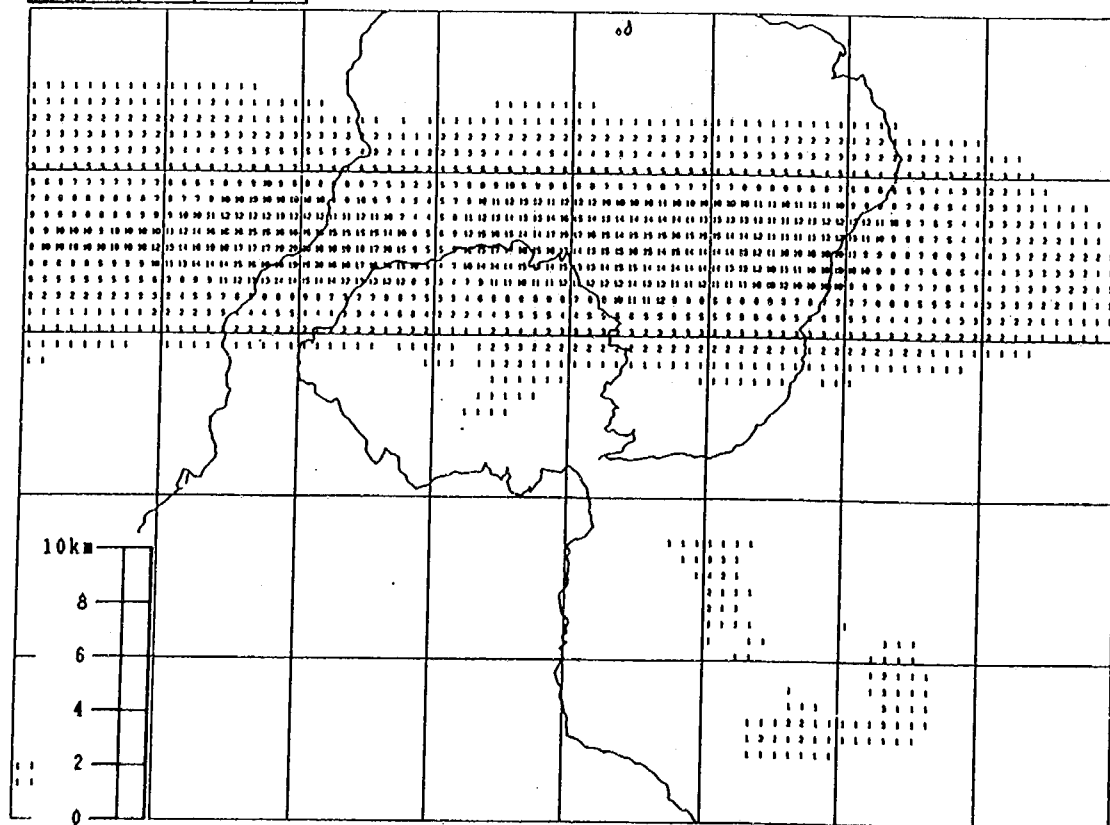
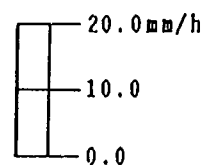


数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

付図1-1-10 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 18:00~19:00)

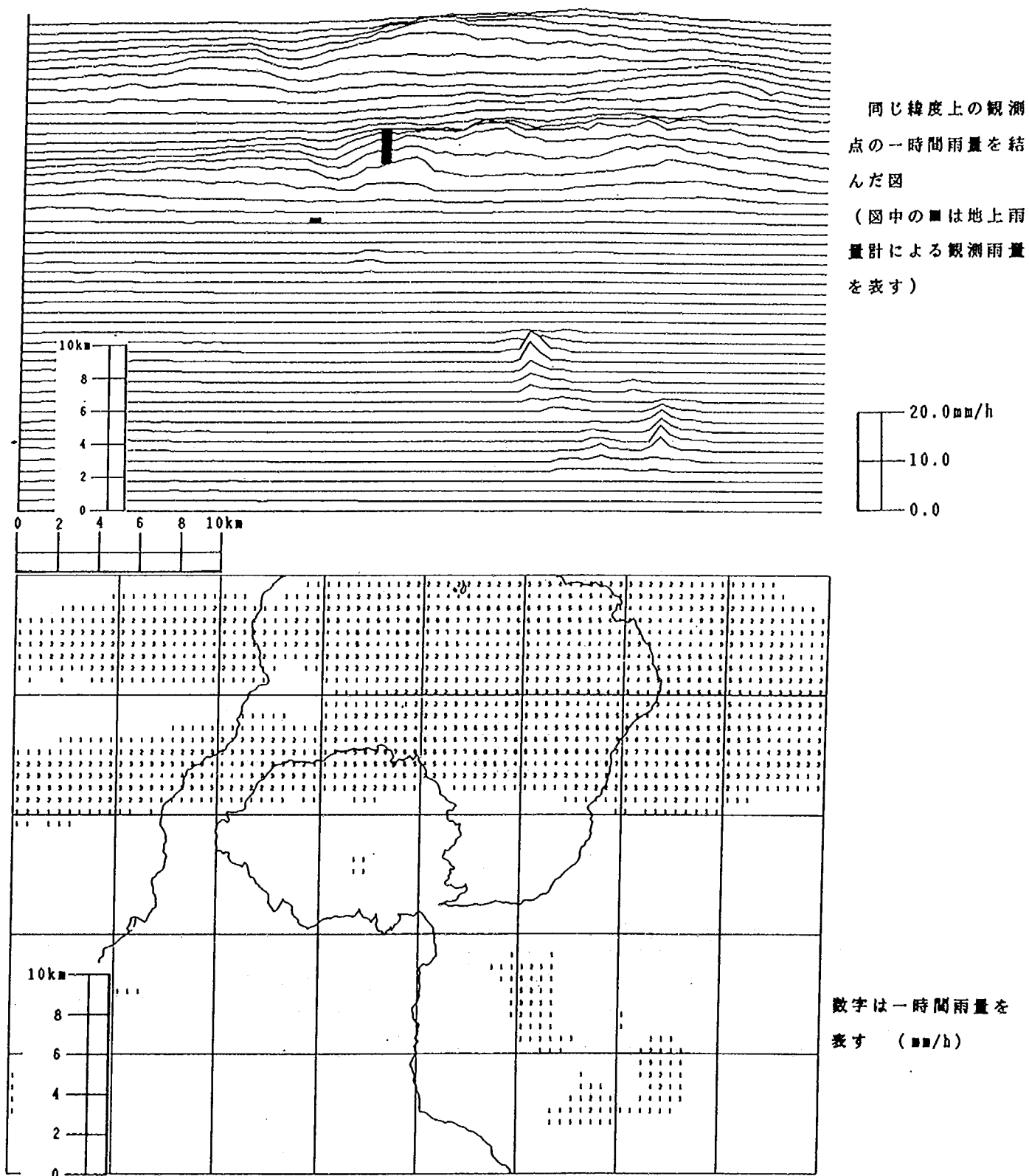


同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)

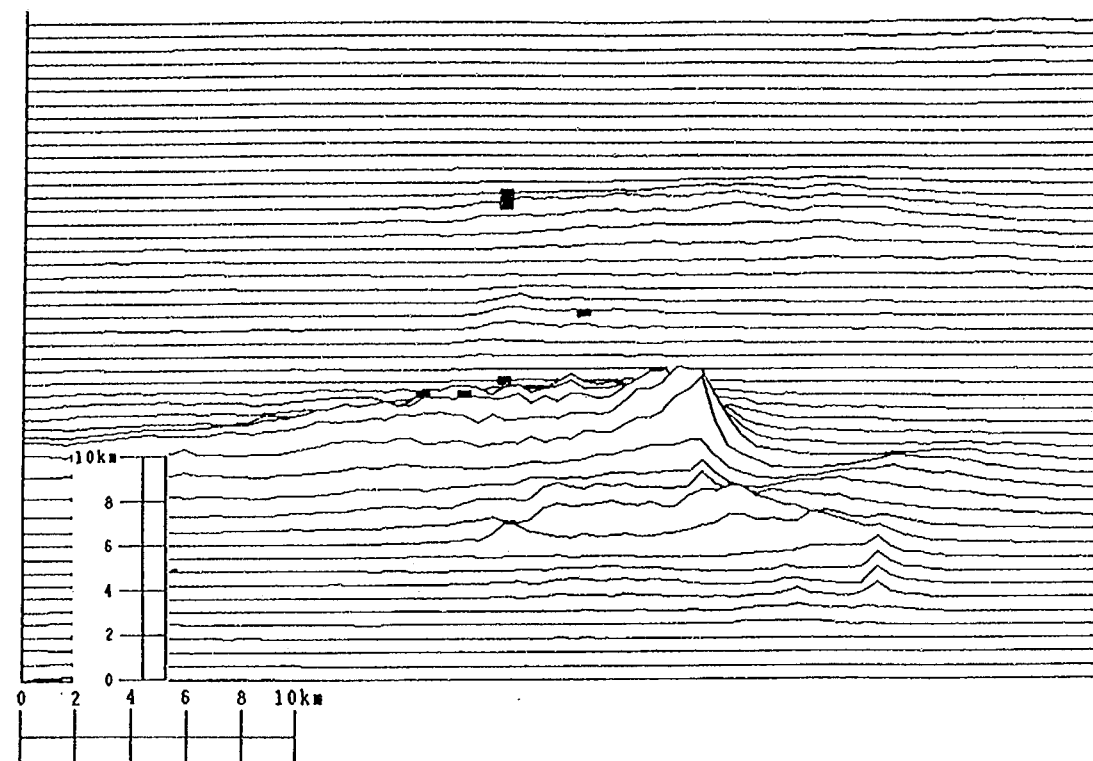


数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

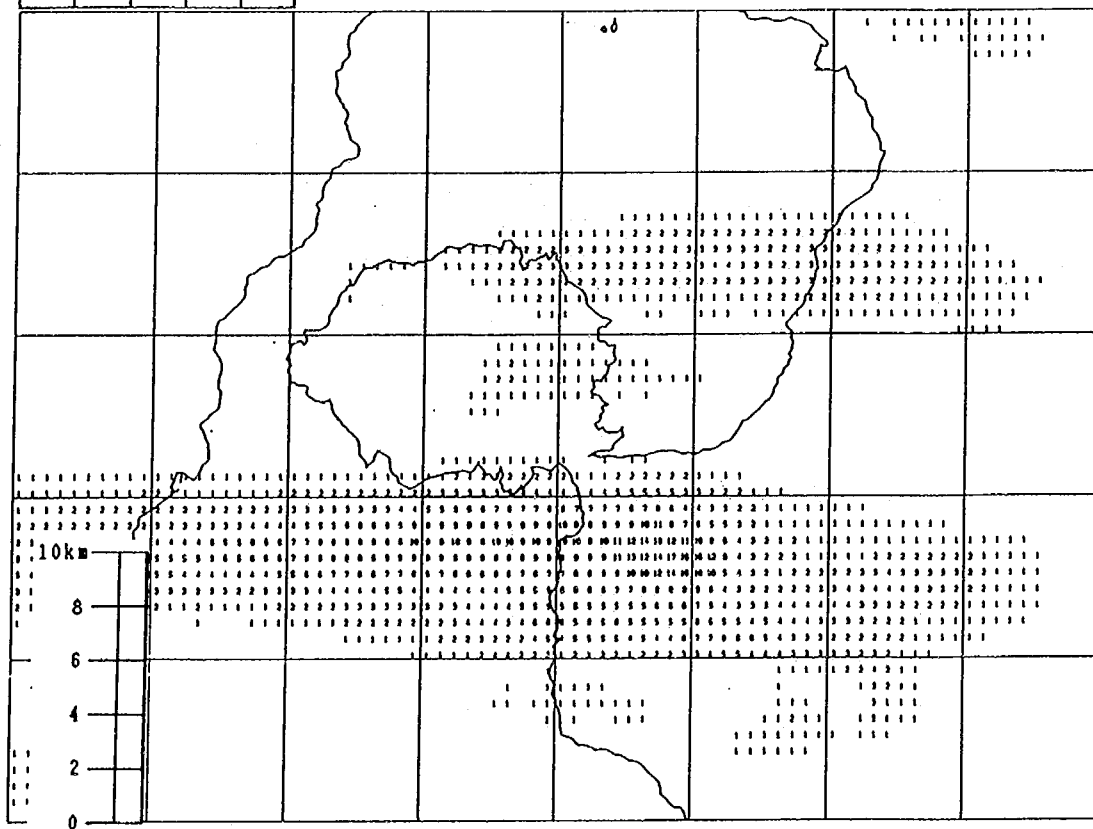
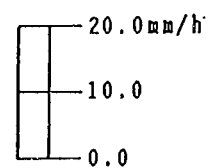
付図1-1-11 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 19:00~20:00)



付図1-1-12 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 20:00~21:00)

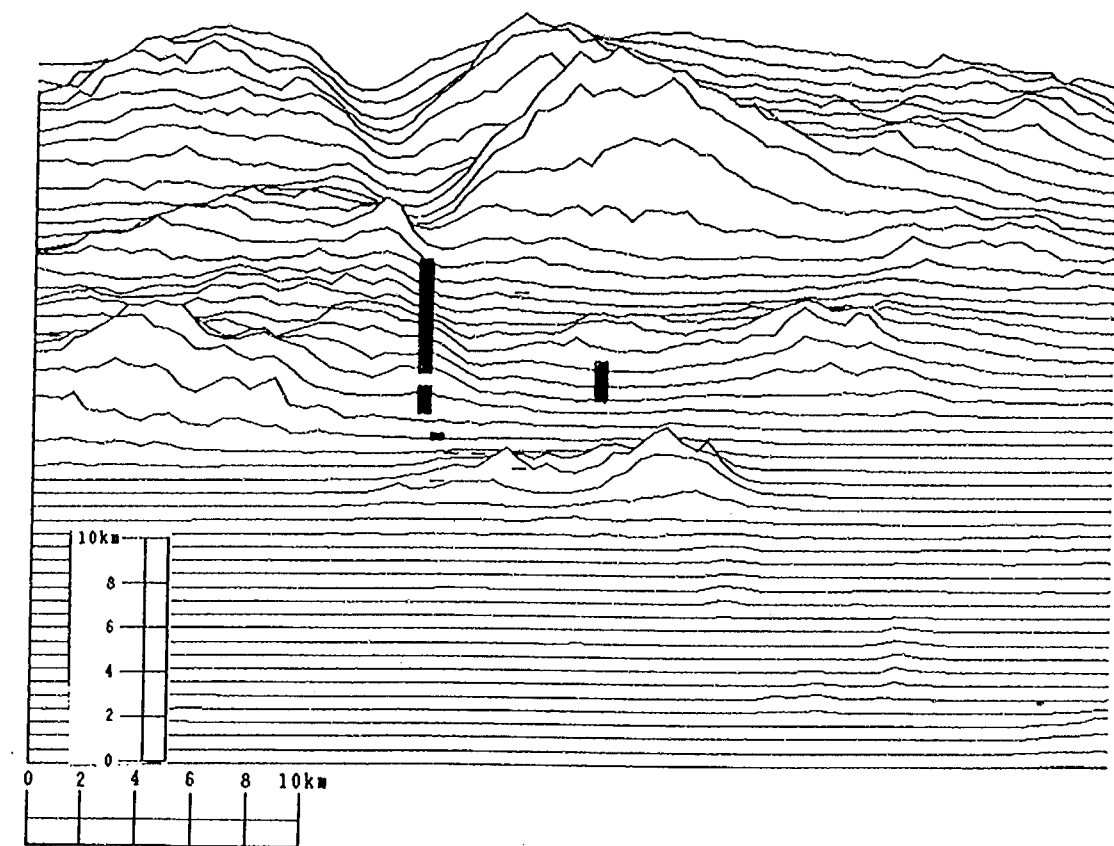


同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)

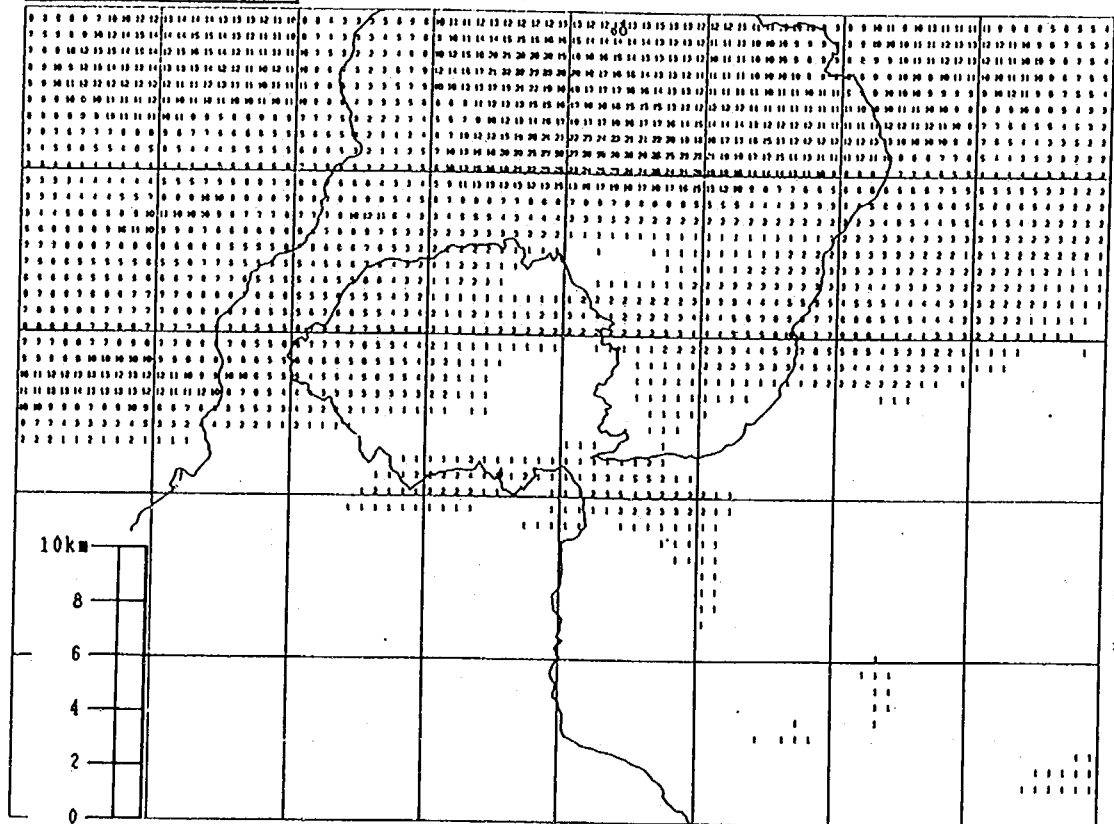
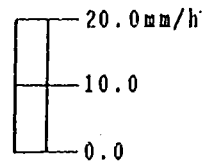


数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

付図1-1-13 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月1日 21:00~22:00)

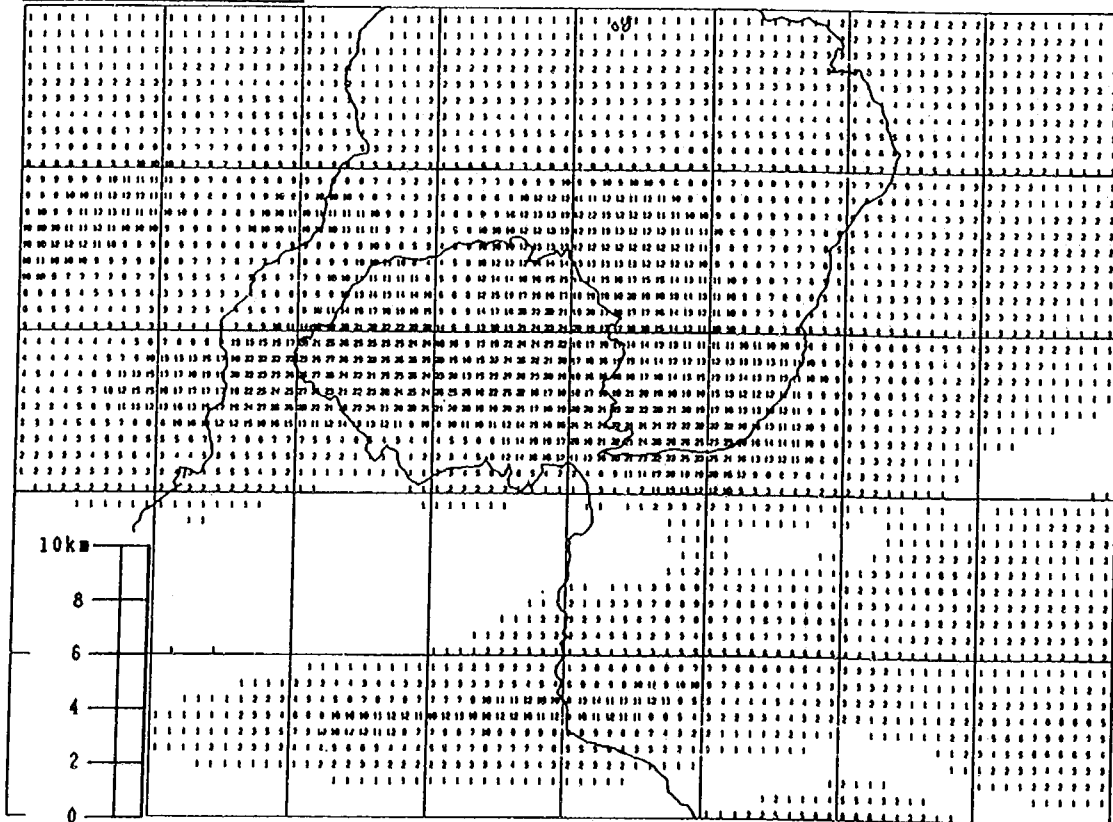
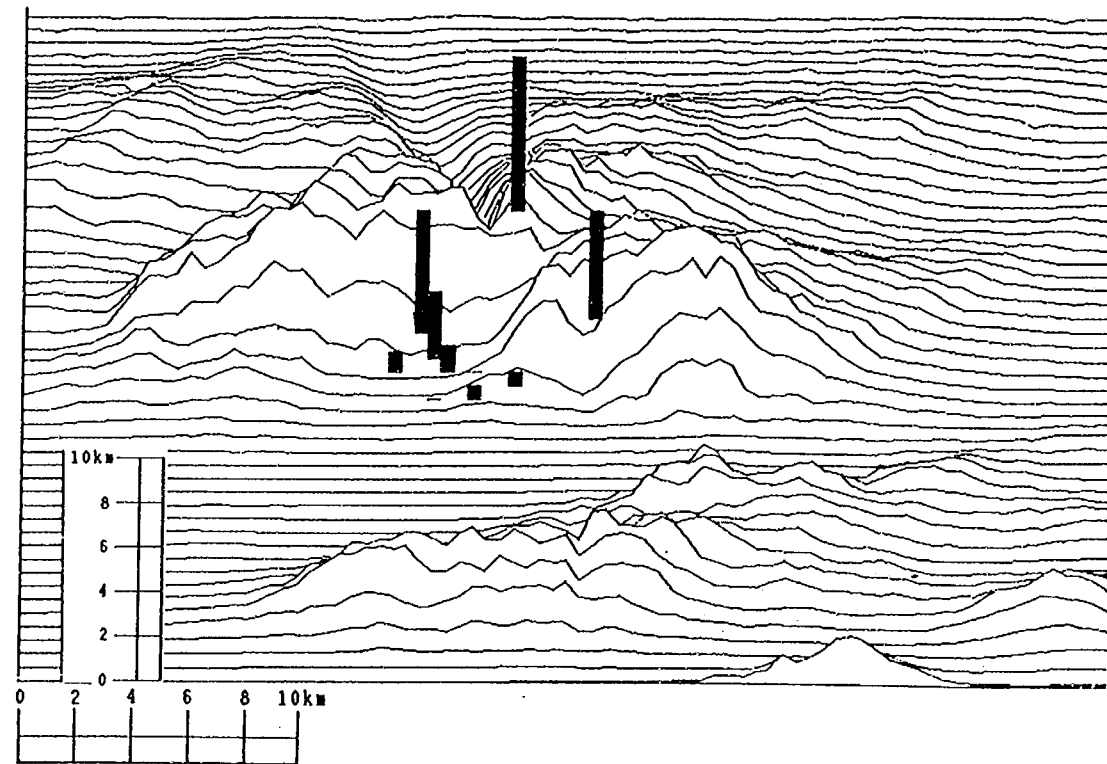


同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)

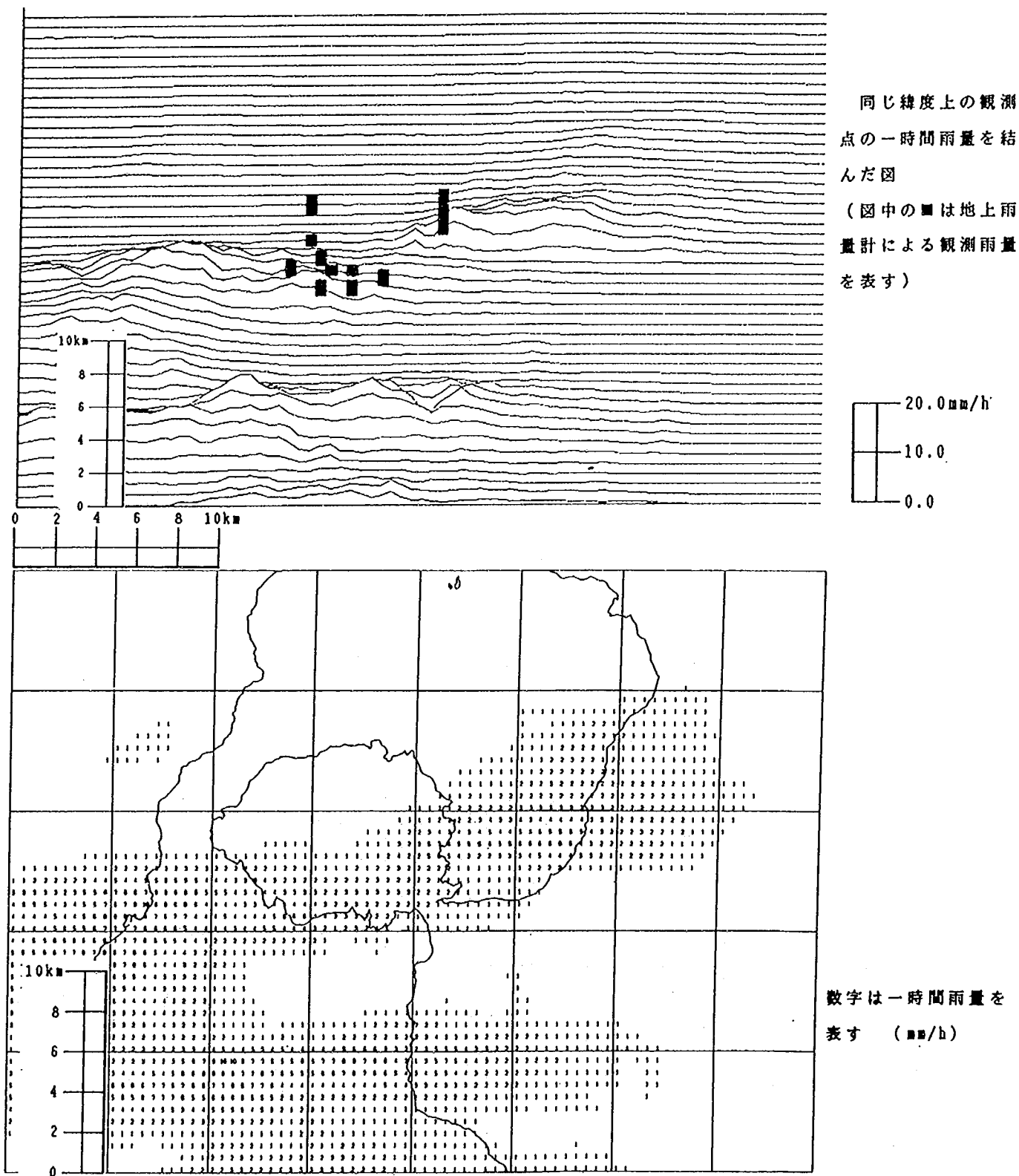


数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

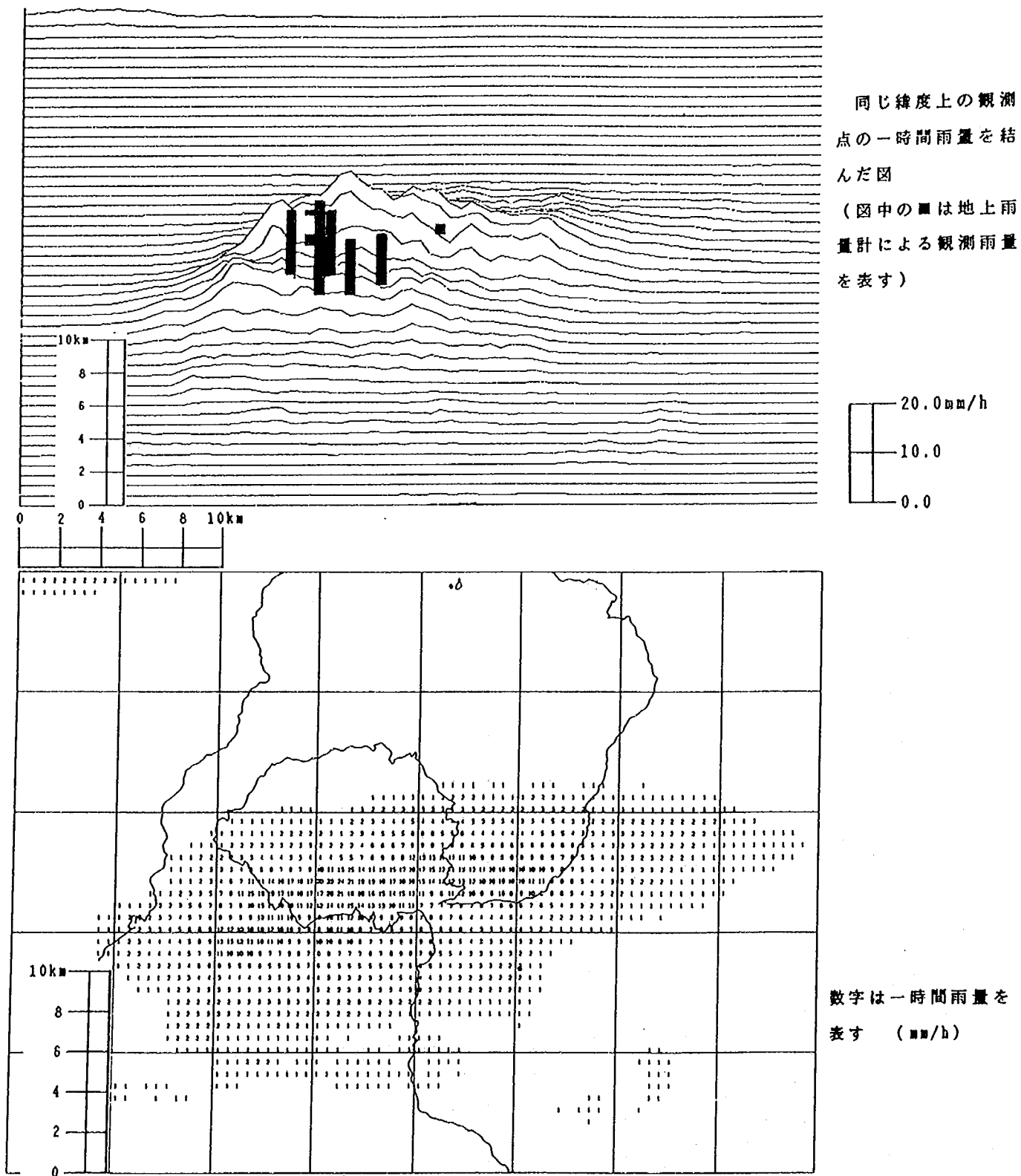
付図1-2-1 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月24日 10:00~11:00)



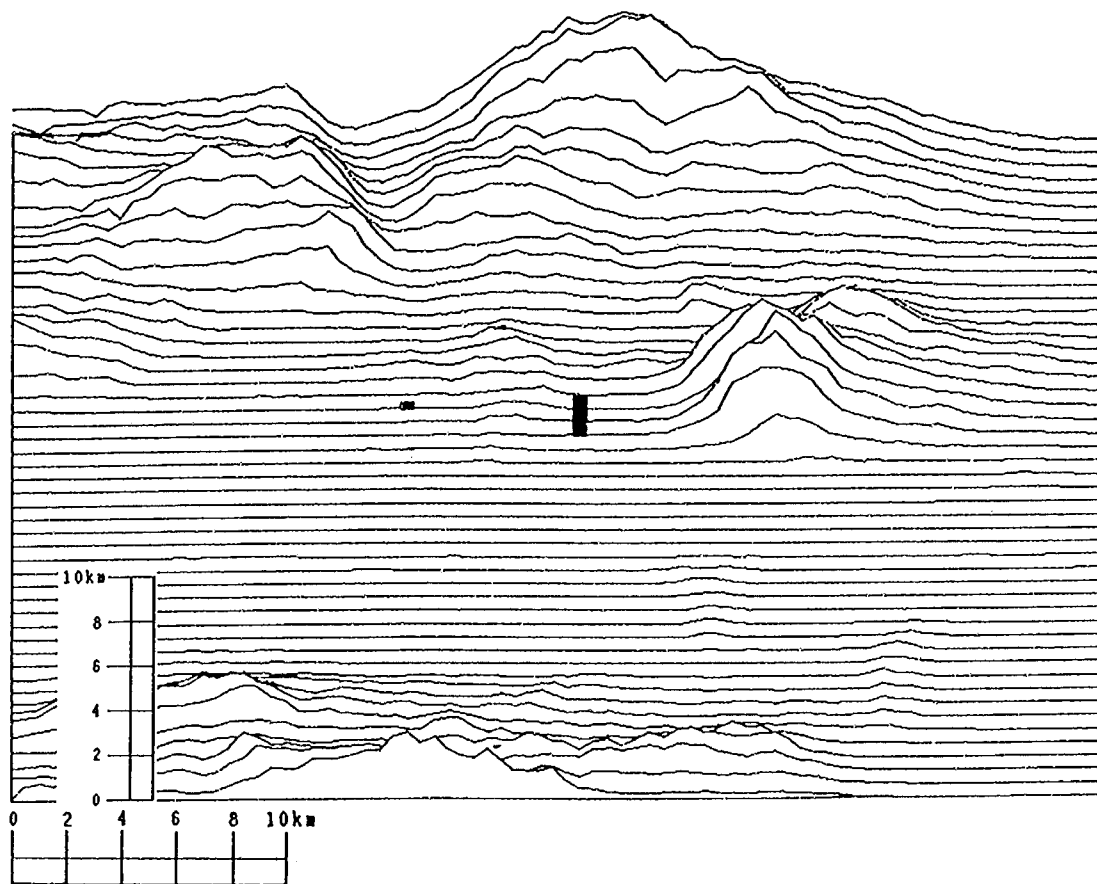
付図1-2-2 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月24日 11:00~12:00)



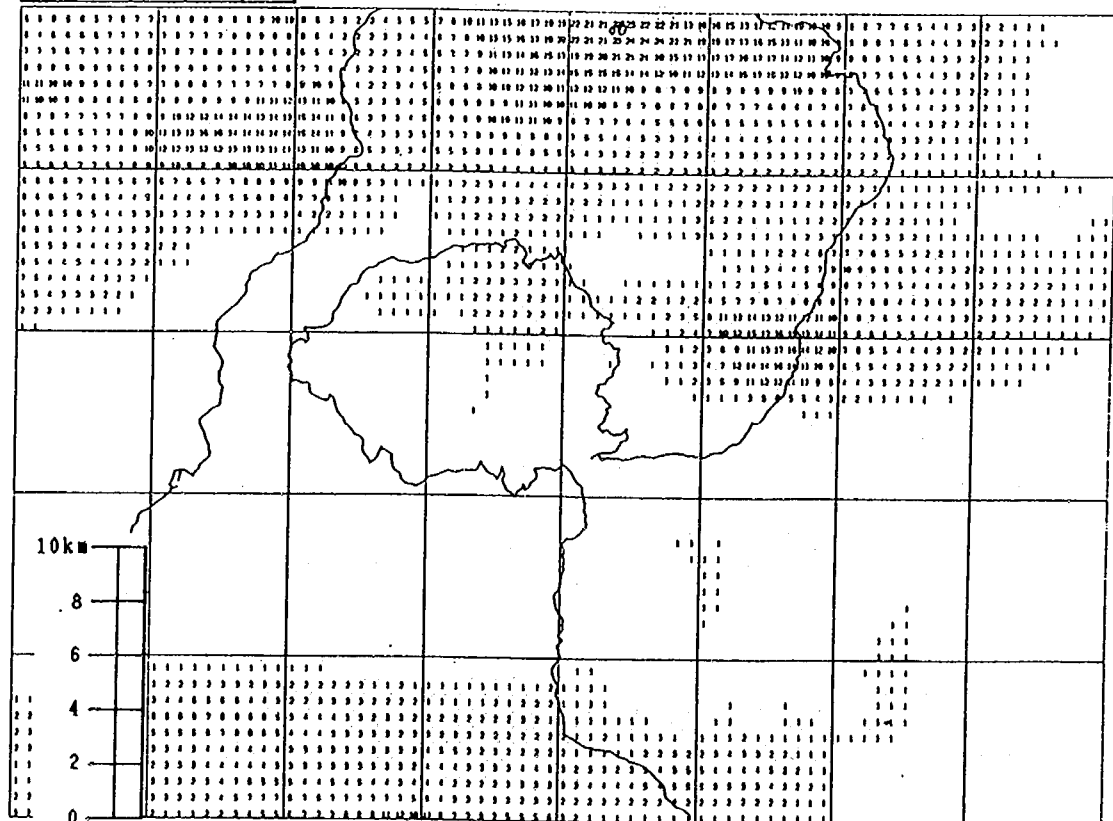
付図1-2-3 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月24日 12:00~13:00)



付図1-2-4 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月24日 13:00~14:00)

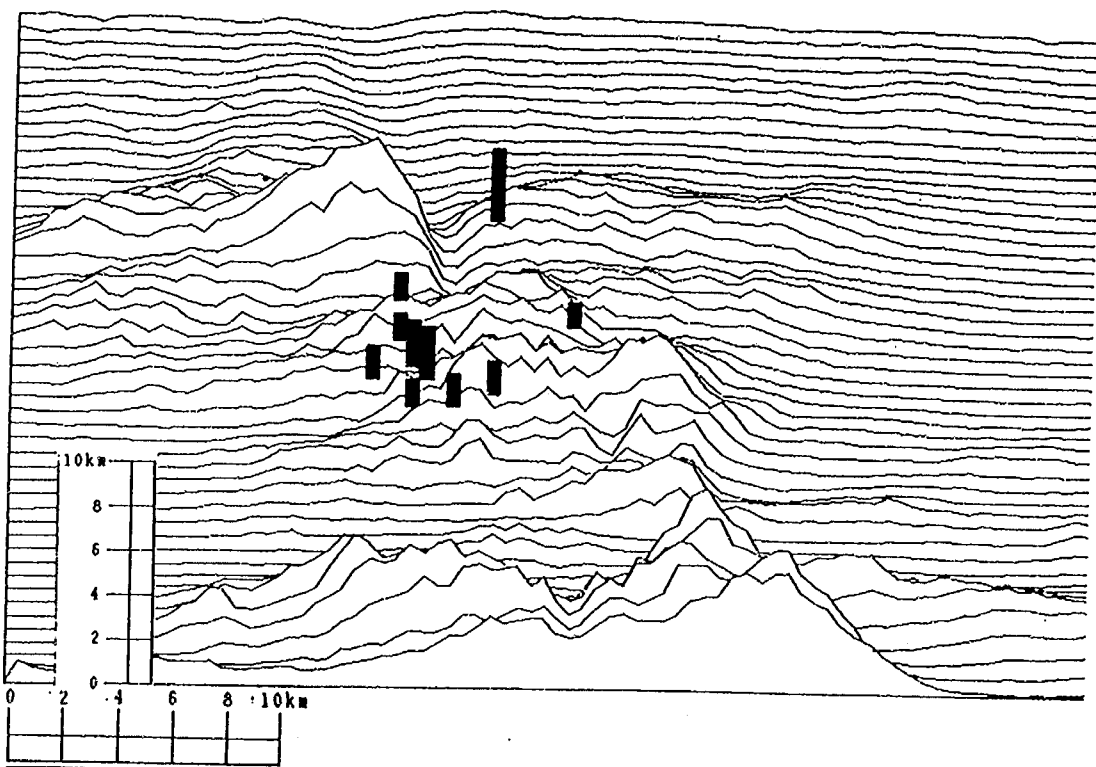


同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)

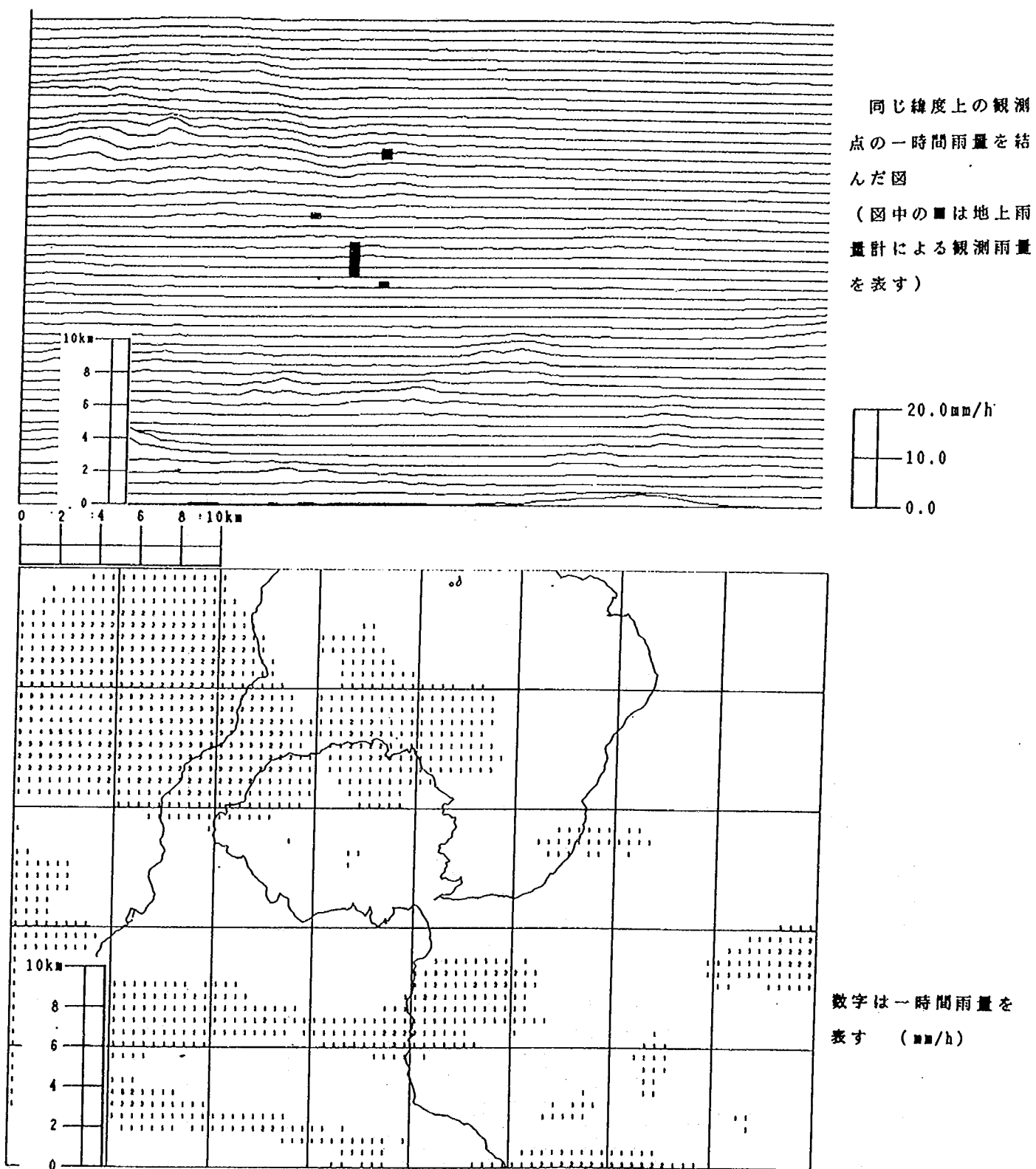


数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

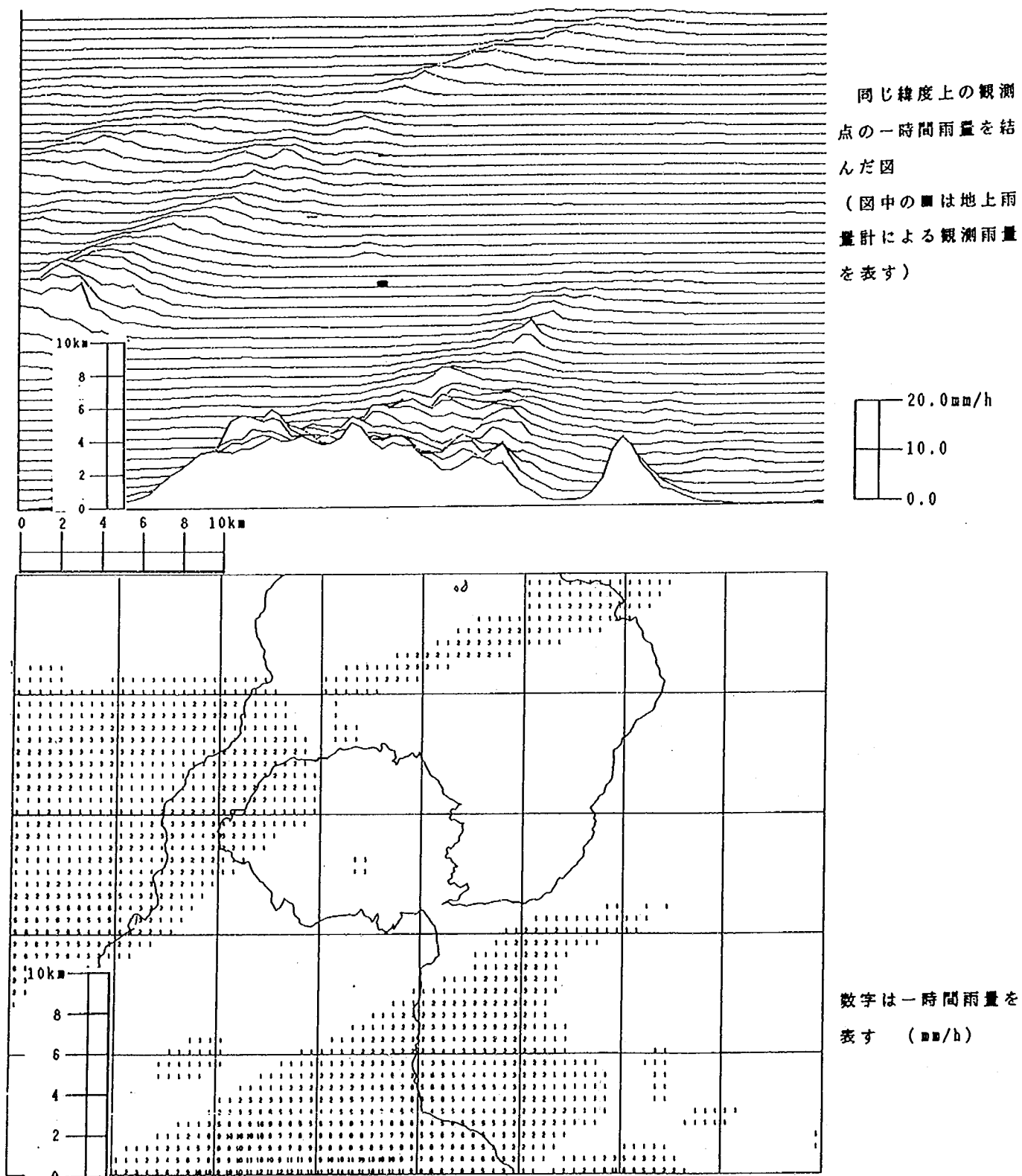
付図1-2-5 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月24日 14:00~15:00)



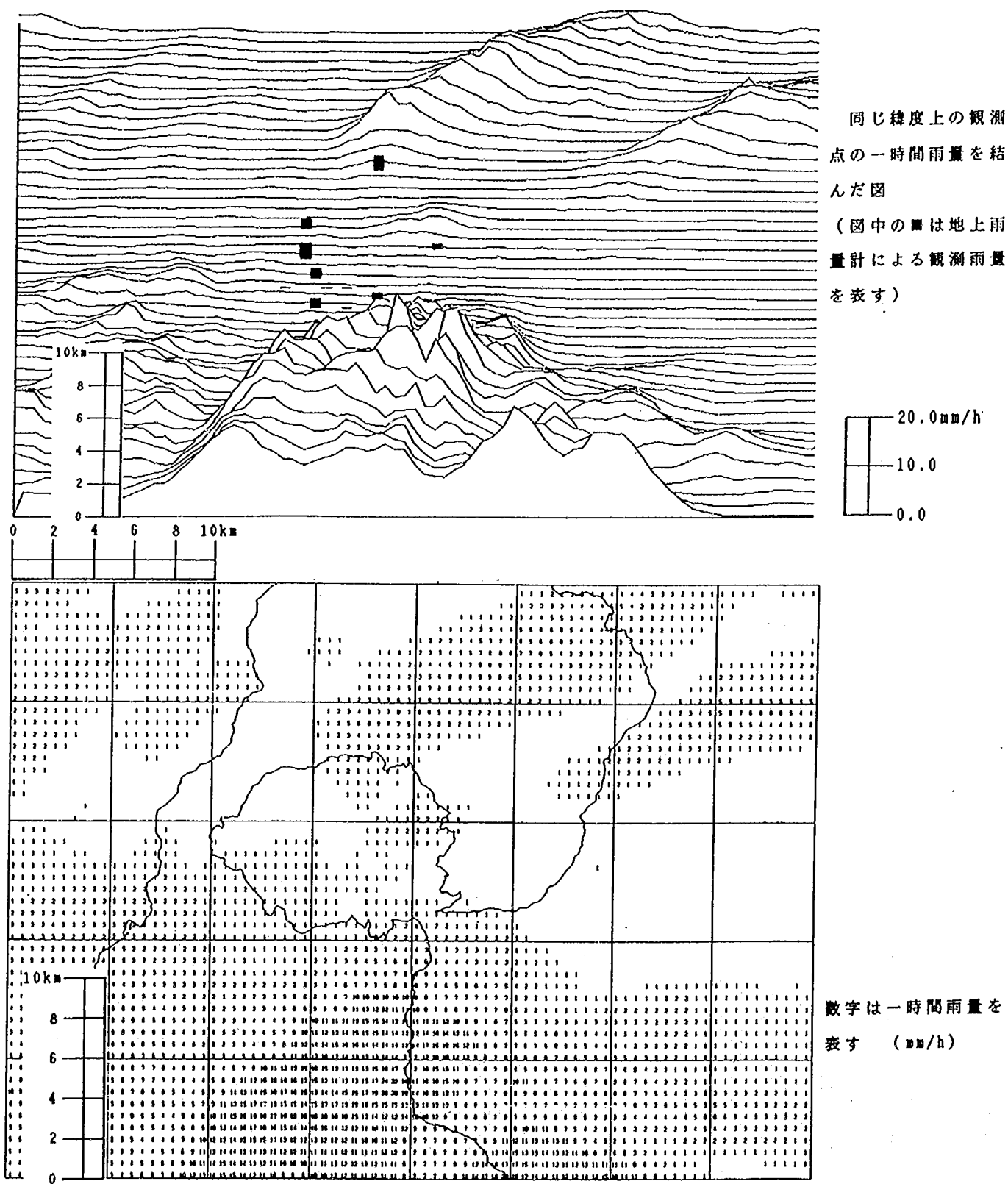
付図1-2-6 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月24日 15:00~16:00)



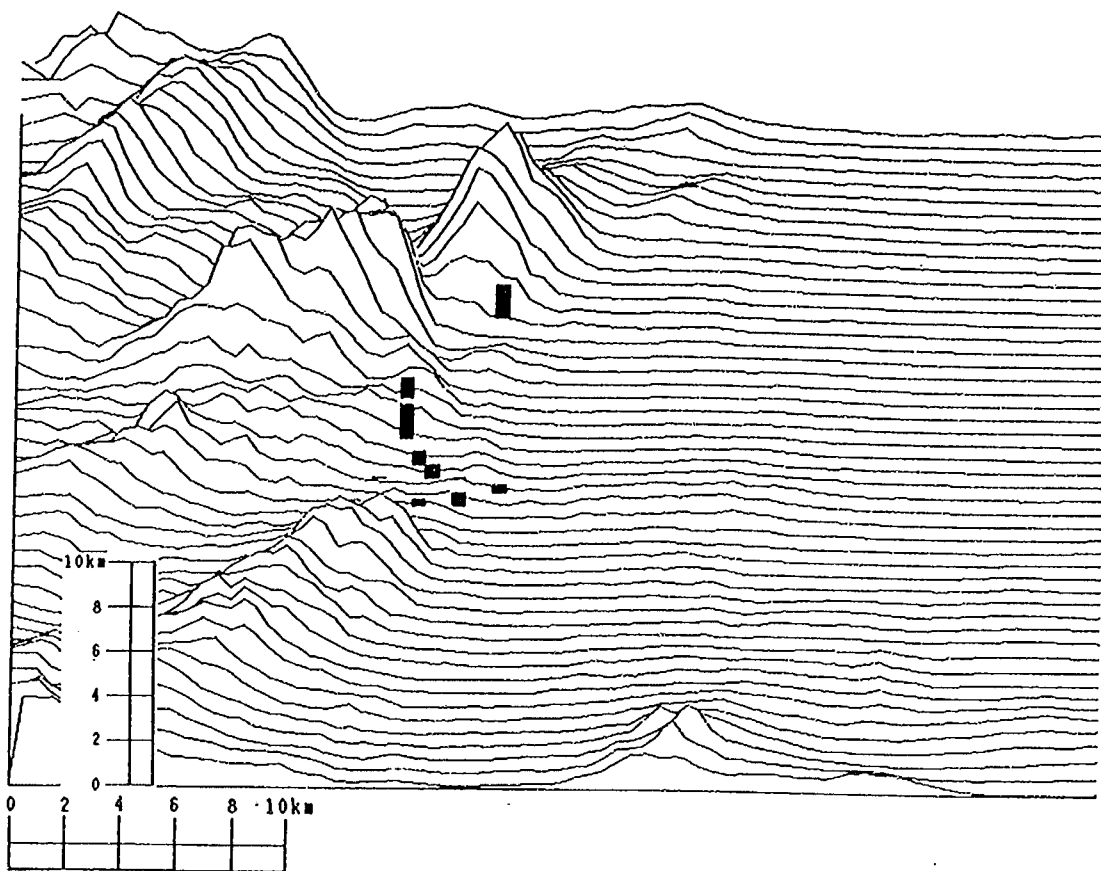
付図1-2-7 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月24日 16:00~17:00)



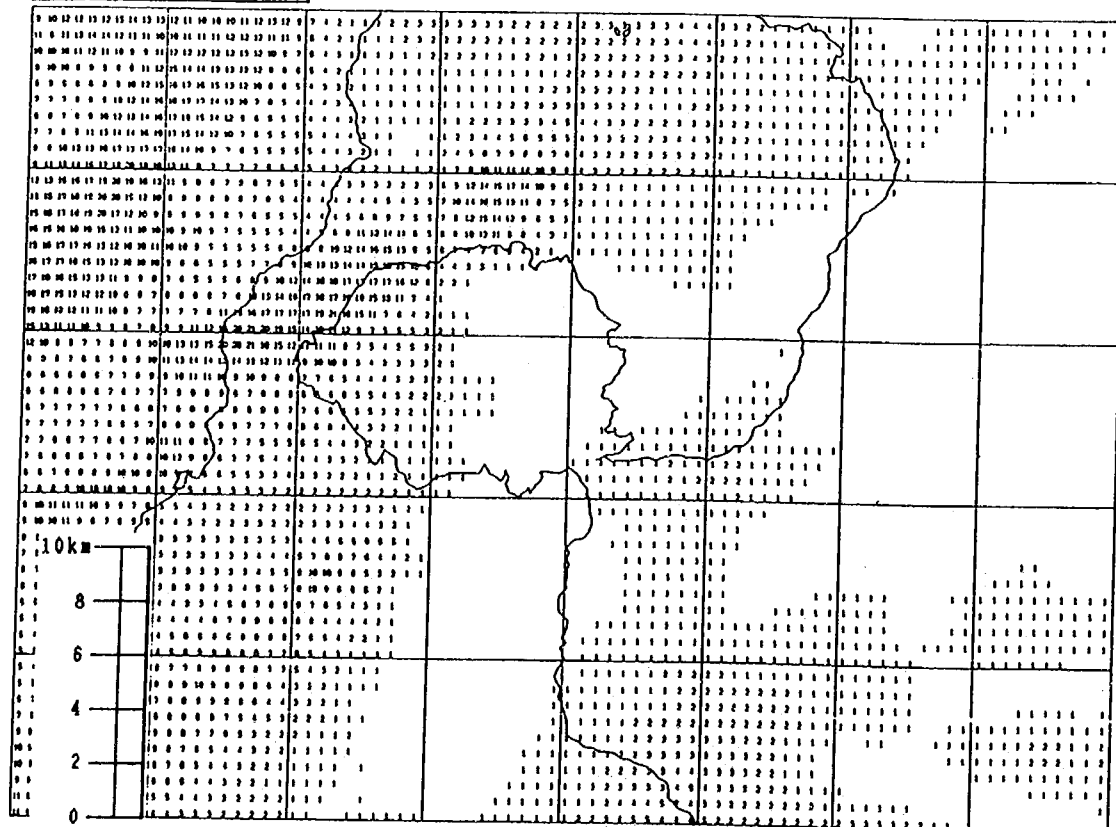
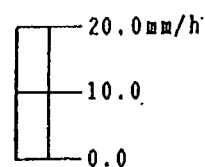
付図1-3-1 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月26日 9:00~10:00)



付図1-3-2 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図（一時間雨量 1987年8月26日 10:00～11:00）

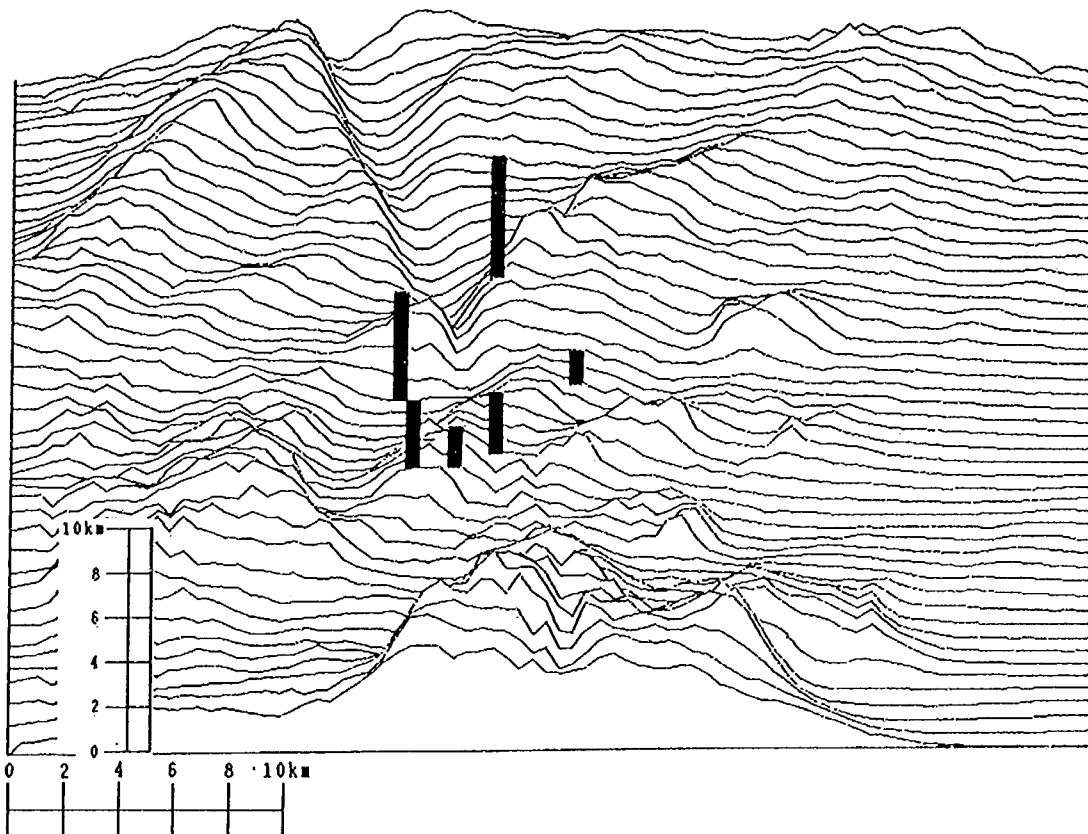


同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)



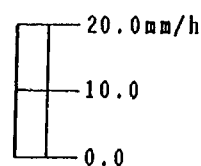
数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

付図1-3-3 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月26日 11:00~12:00)



同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図

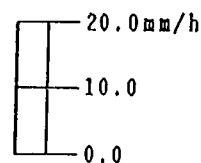
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)



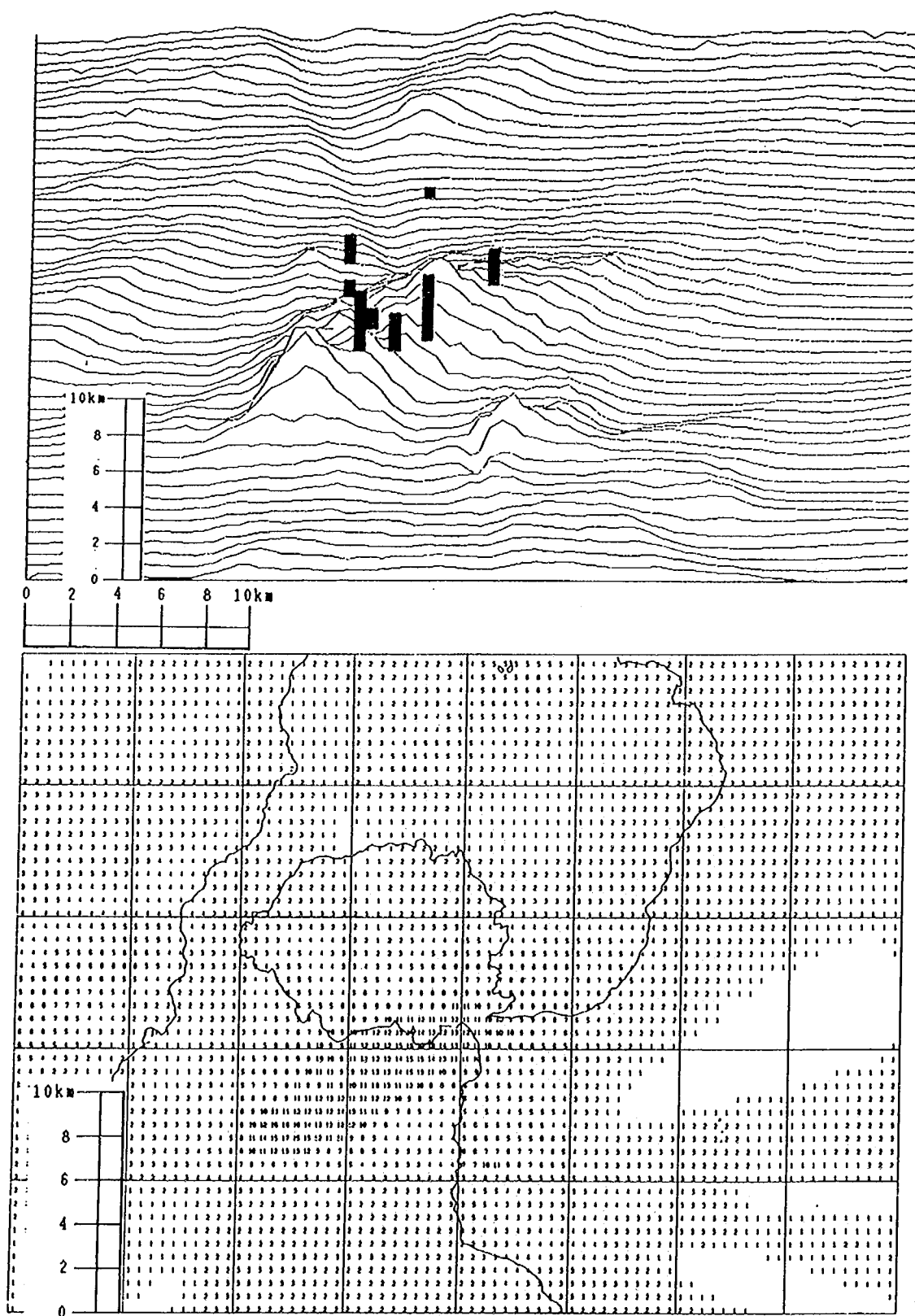
数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

付図1-3-4 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月26日 12:00~13:00)

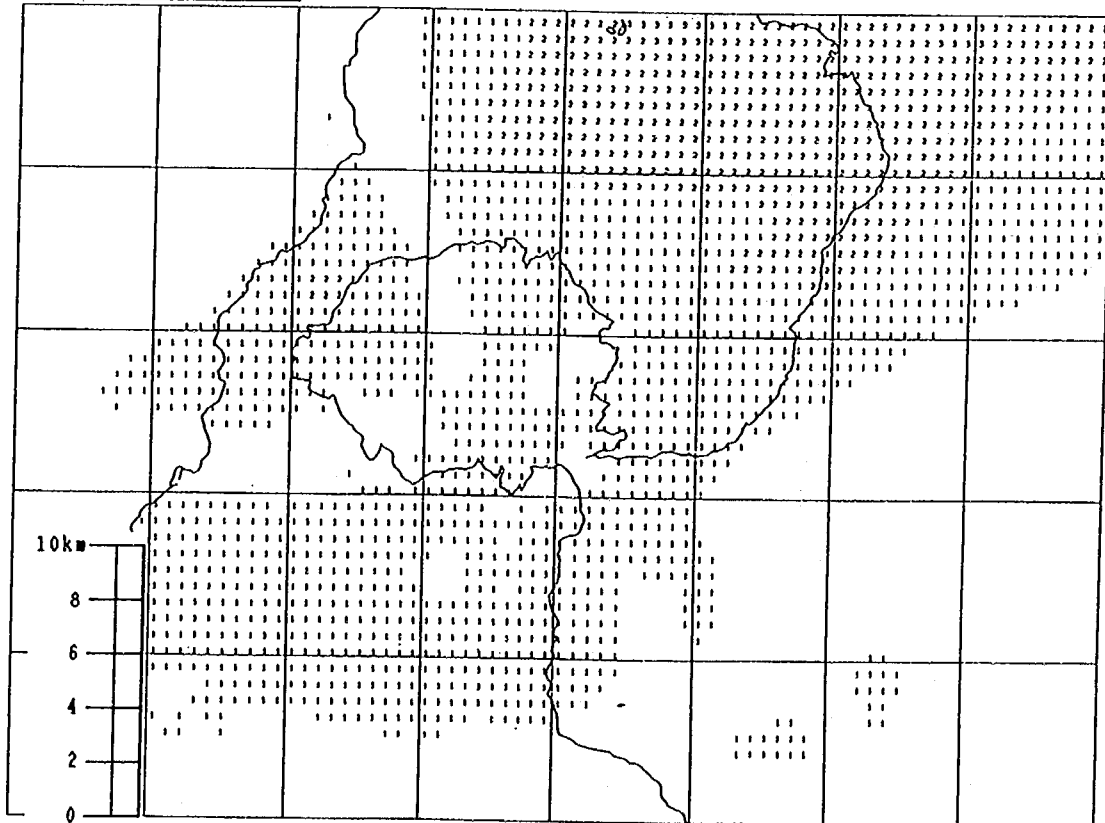
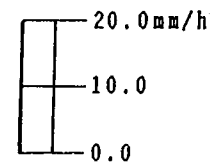
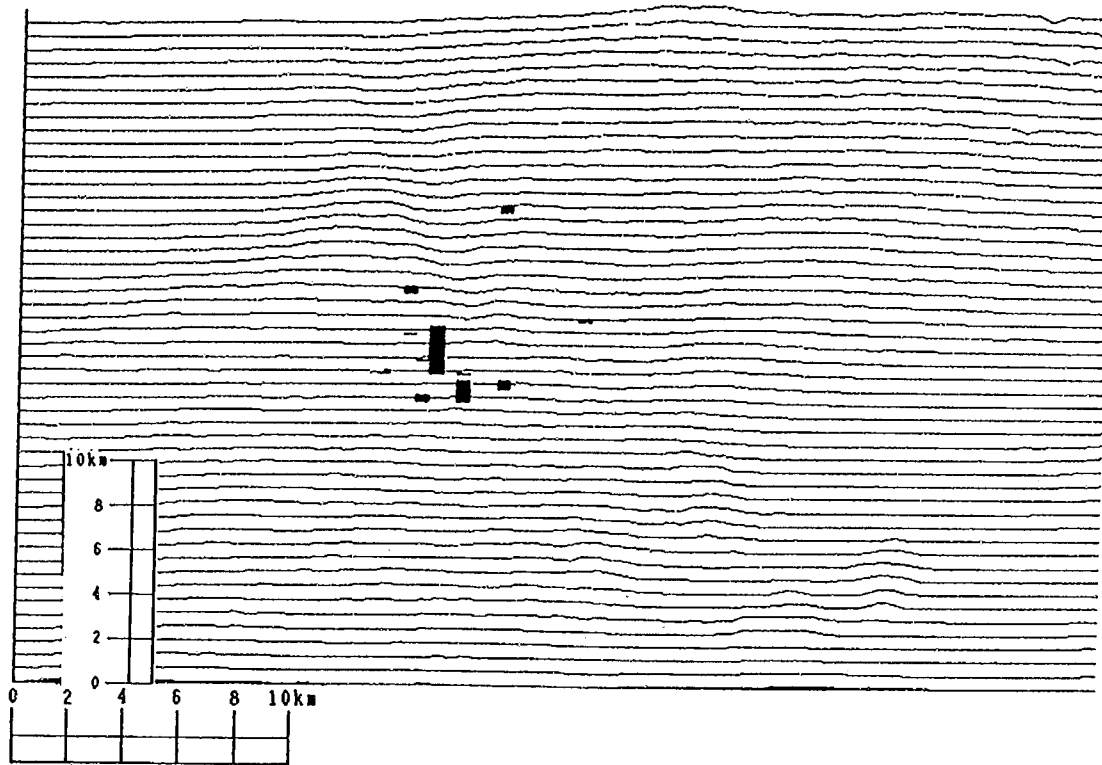
同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)



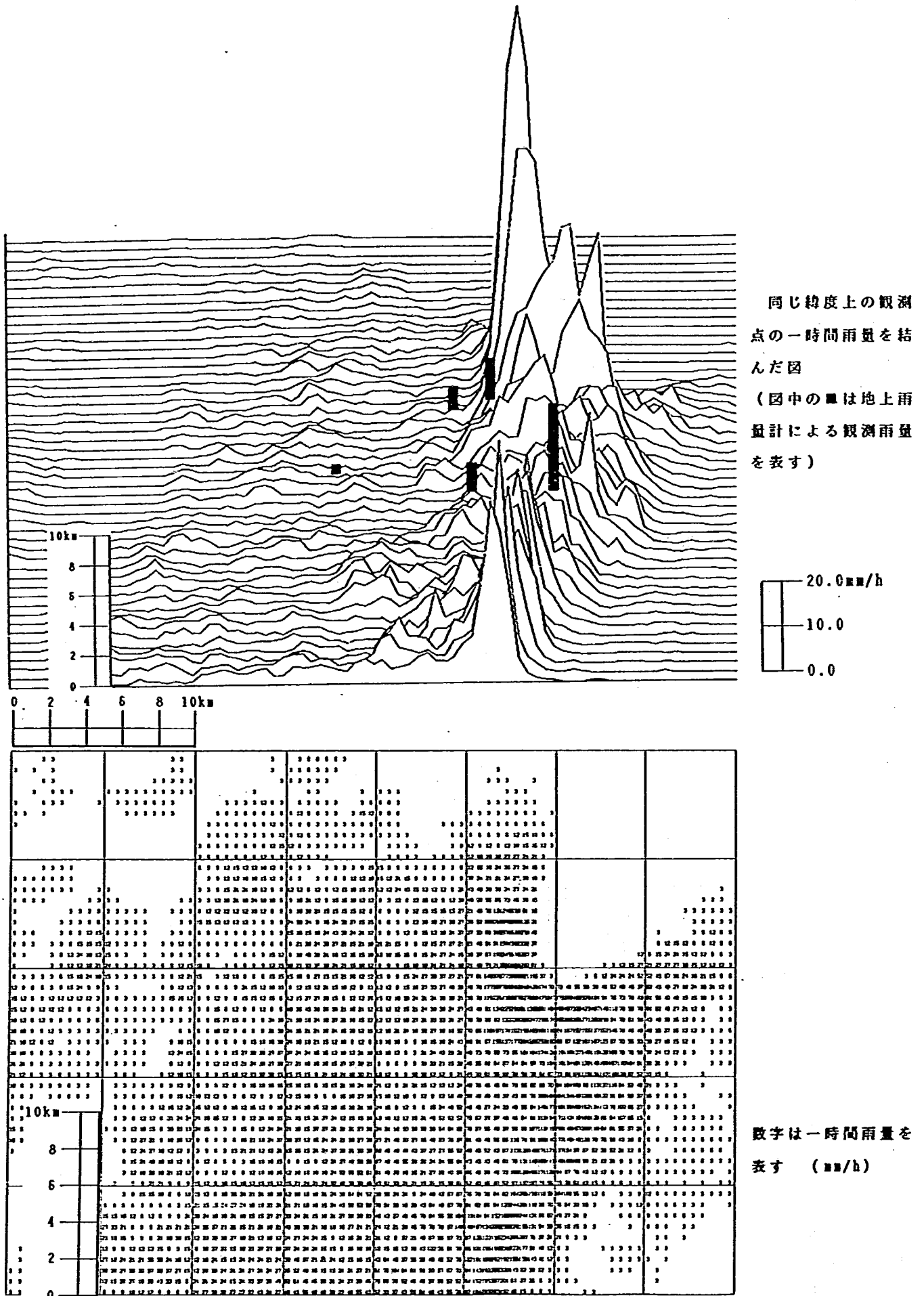
数字は一時間雨量を
表す (mm/h)



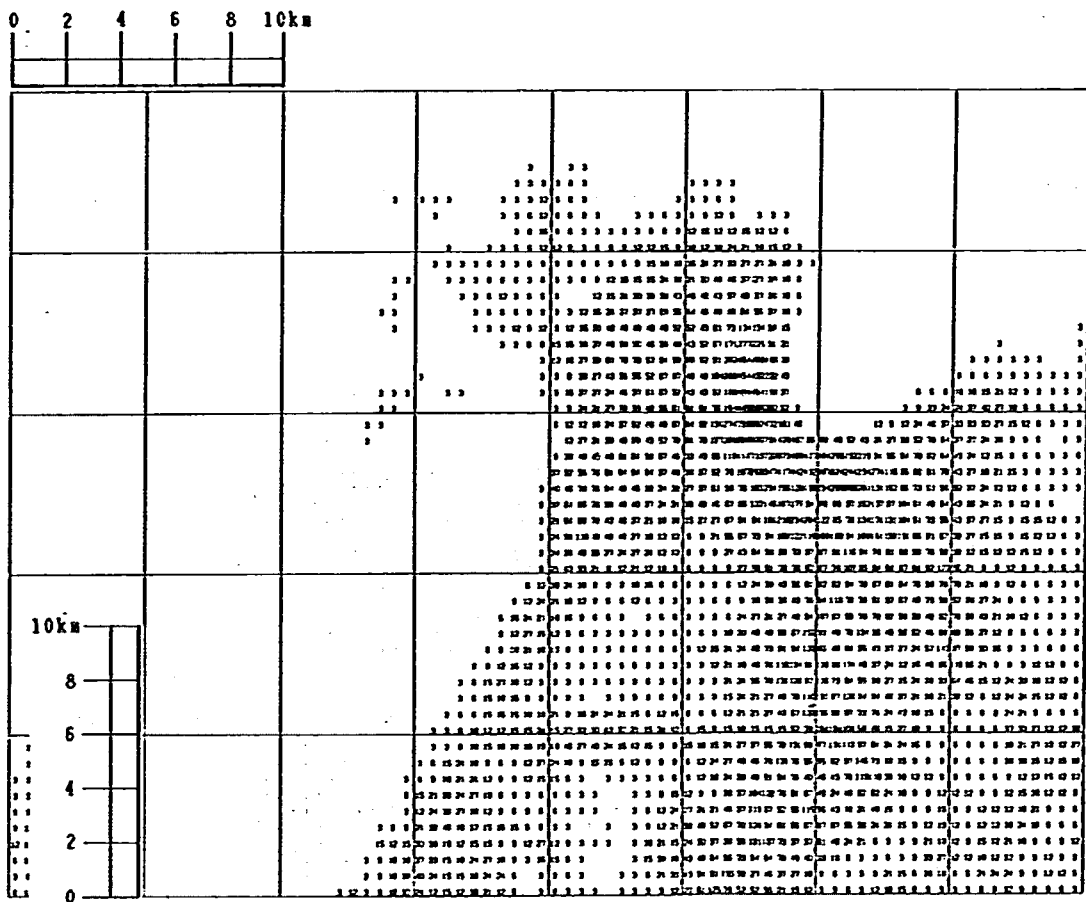
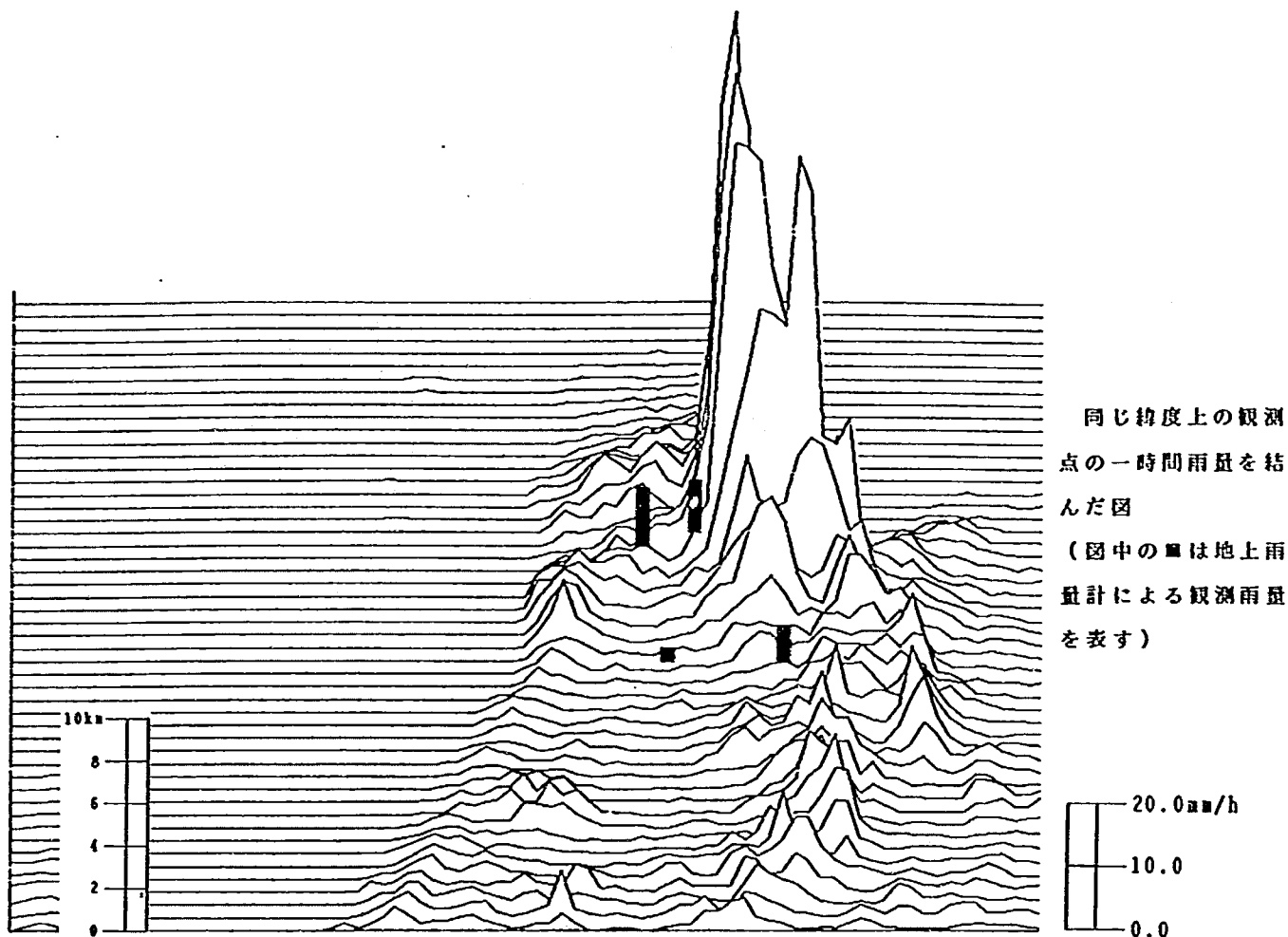
付図1-3-5 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月26日 13:00~14:00)



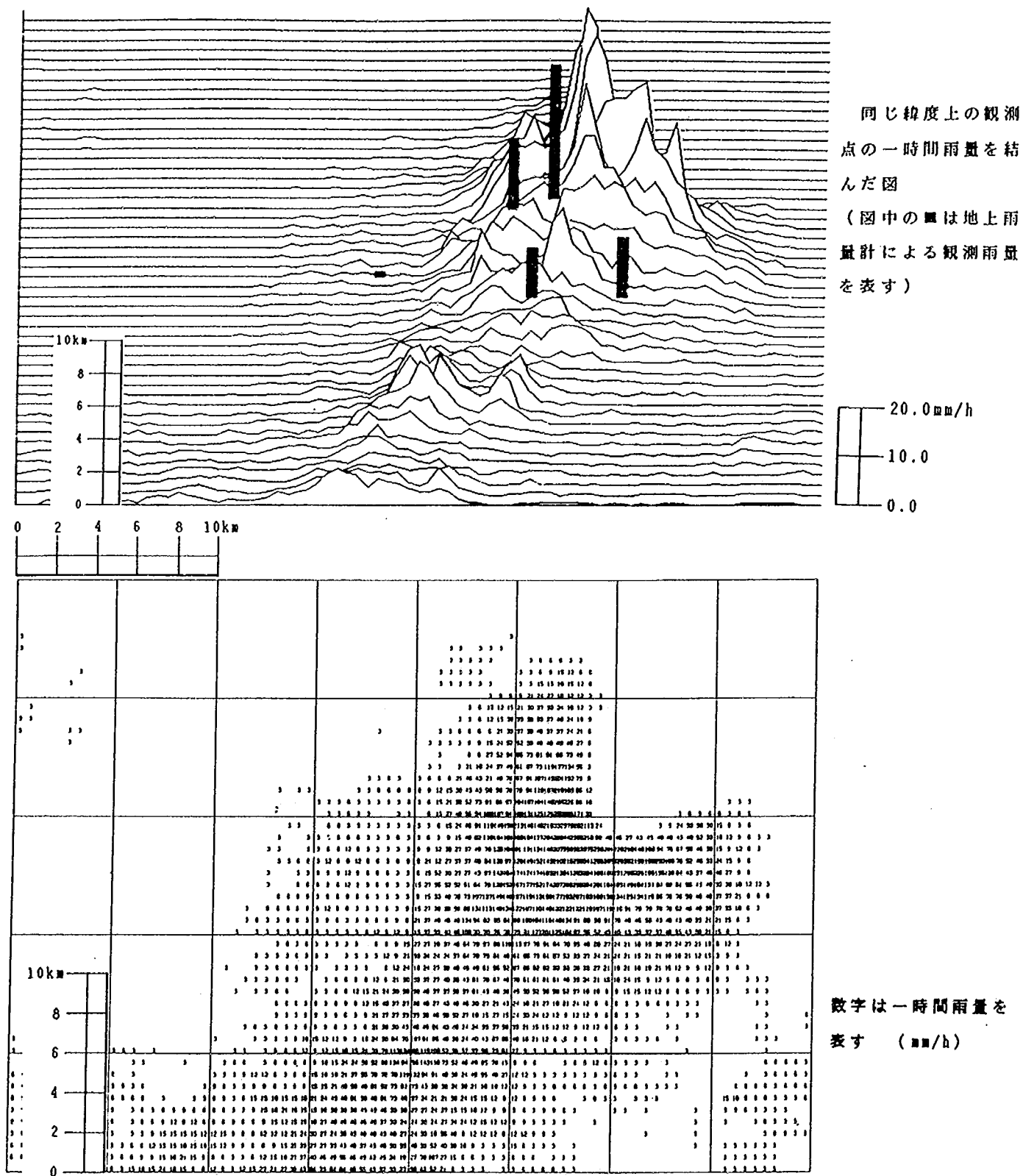
付図1-3-6 桜島の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年8月26日 14:00~15:00)



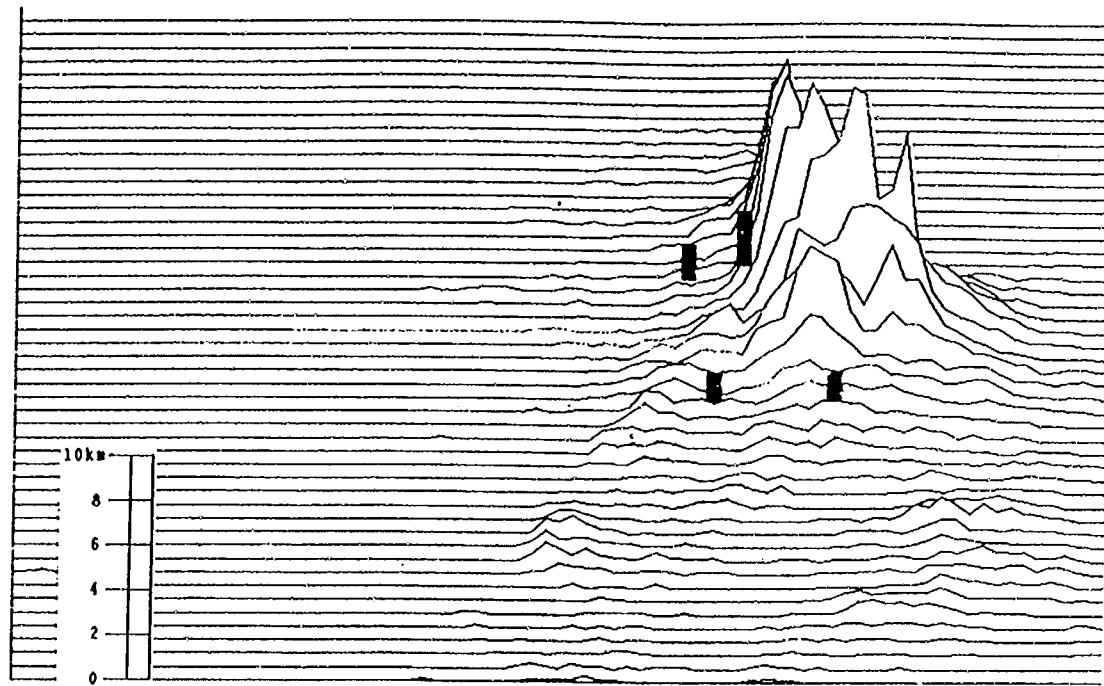
付図2-1 大沢扇状地の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年10月17日 12:00~13:00)



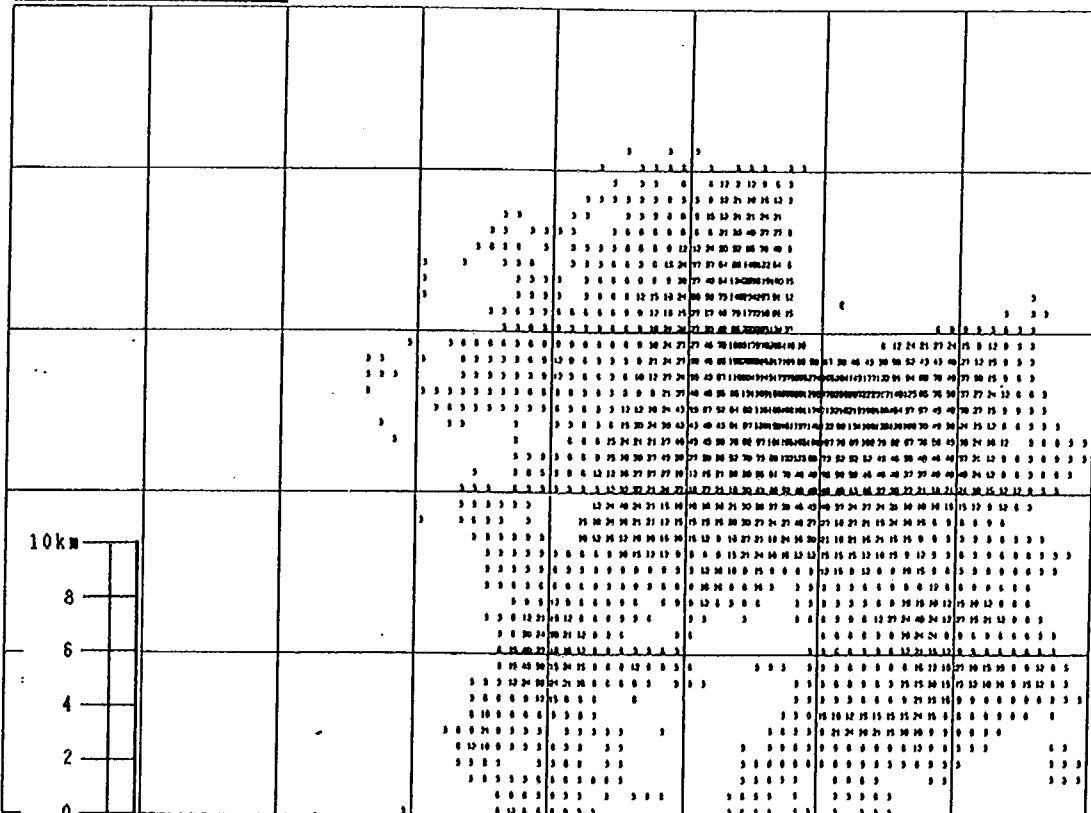
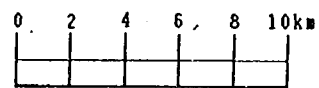
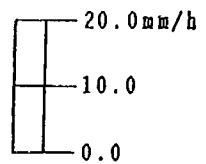
付図2-2 大沢扇状地の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年10月17日 13:00~14:00)



付図2-3 大沢扇状地の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年10月17日 14:00~15:00)



同じ緯度上の観測
点の一時間雨量を結
んだ図
(図中の■は地上雨
量計による観測雨量
を表す)



数字は一時間雨量を
表す (mm/h)

付図2-4 大沢扇状地の小型レーダ雨量計による降雨図(一時間雨量 1987年10月17日 15:00~16:00)

土砂災害警戒避難システムにおける
小型レーダ雨量計の導入に関する研究

I S S N 0386—5878
土木研究所資料第2535号
昭和63年1月(1988)

建設省土木研究所砂防部砂防研究室 水山高久
谷山勝幸
原 義文

要 旨 土砂災害警戒避難システムに小型レーダ雨量計を導入する
必要性和可能性を示すため、大型レーダ雨量計の覆域図を作成し、
桜島と富士山で小型レーダ雨量計の精度を試験した。

キーワード：小型レーダ雨量計、土砂災害警戒避難システム



郵便はがき

40円切手
はって下
さい。

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市旭一番地
建設省土木研究所
砂防研究室 御中

No. _____

土研資料 第2535号

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2535号

土砂災害警戒避難システムにお
ける小型レーダ雨量計の導入に
関する研究 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印