HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北海道羊蹄山周辺の降雨特性
Author(s)	菊地, 勝弘; 大口, 修; 上田, 博; 谷口, 恭; 小林, 文明; 岩波, 越; 城岡, 竜一
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 57, 35-59
Issue Date	1994-10-31
DOI	10.14943/gbhu.57.35
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/14222
Type	bulletin (article)
File Information	57_p35-59.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 57, October 1994, p. 35−59

北海道羊蹄山周辺の降雨特性

菊地　勝弘
北海道大学理学部地球物理学教室
大口　修[*1]
北海道大学大学院環境科学研究科
上田　博・谷口　恭[*2]・小林　文明[*3]・岩波　越[*4]・城岡　竜一[*5]
北海道大学理学部地球物理学教室

(1994年8月31日受理)

Rainfall Characteristics Around Mt. Yotei, Hokkaido

Katsuhiro KIKUCHI
Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University
Osamu OHGUCHI[*1]
Division of Environmental Structure, Graduate School of
Environmental Science, Hokkaido University
Hiroshi UYEDA, Takashi TANIGUCHI[*2],
Fumiaki KOBAYASHI[*3], Koyuru IWANAMI[*4] and Ryuichi SHIROOKA[*5]
Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received August 31, 1994)

Mt. Yotei (1,893m a.s.l.) is located in Shiribeshi Subprefecture, Hokkaido and is an

現在所属：＊1　東京放送㈱，東京都港区，107−06
TBS Inc., Minato-ku, Tokyo
＊2　日本気象協会北海道本部，札幌市中央区，060
Hokkaido Branch, Japan Weather Association, Chuo-ku, Sapporo.
＊3　防衛大学校，横須賀市走水，239
National Defense Academy, Yokosuka.
＊4　科学技術庁防災技術研究所長岡雪氷防災実験研究所，長岡市栖吉，187−16
Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies, National Research Institute for Earth Science and Desaster Prevention, Science and Technology Agency, Nagaoka.
＊5　農林水産省北海道農業試験場，札幌市豊平区，062
Hokkaido National Agricultural Experiment Station, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Toyohira-ku, Sapporo.

isolated mountain with a shape of which is the most typical conical among the mountains in Japan. In order to clarify the influence of precipitation amount and location on such an isolated mountain, observations were carried out by means of a mesoscale rain gauge network and a mobile weather radar supported by the Meteorological Laboratory, Faculty of Science, Hokkaido University.

The weather radar was set on western side of Lake Toya, 23km south of Mt. Yotei, because plenty of precipitation was expected to be precipitated on the southern flank of Mt. Yotei, on analysis of the past 10 years of AMeDAS data. In addition to the radar observations, a mesoscale network using 18 rain gauges was simultaneously organized around Mt. Yotei, and recorded precipitation amounts for 40 days. Of these gauges, seven were set on the flank of Mt. Yotei, one of them was at the altitude of 900m, and six were at an altitude of around 500m a.s.l. The radar observations were carrid out for 16 days from the end of August to the middle of September, 1987.

Analysis of both AMeDAS and the rain gauge measurements indicated that the horizontal distribution of precipitation amounts was concentrated around Mt. Yotei, especially on the southern slope of the mountain. As an example, the relationship between the precipitation amounts and topography was considered using the data from August 31, 1987 through the north−south vertical profile of the area from the radar site to Mt. Yotei in the case of southerly winds. The results showed a good correspondence between the altitude of the rain gauge sites and precipitation amounts, especially on the windward side of the mountain.

Throughout the observation period, the radar echoes could be classified into two types; one is the streak type which is gradually strengthened when the echoes approach Mt. Yotei, and the other is the stagnant type which is generated at low altitudes around Mt. Yotei, is gradually dissipates in the same regions. The streak type echoes take their shape at 20km windward of Mt. Yotei, and strengthen their reflectivity as it gets closer to the mountain. The streak type echoes always recorded a precipitation intensity of more than 2mm/10min. On the contrary, the stagnant type echoes, mainly generate at the windward slope of the mountain, and dissipate maintaining their lower altitude.

I. はじめに

山岳周辺の大気環境を扱う場合多くは気流が取り上げられるが山岳性降雨を議論する際にも気流の動態を理解することが大切である．山岳周辺の気流に関する研究では，円錐形をした孤立峰が，数値モデルやモデル実験等の点からも有利なため，しばしば観測や実験，モデル計算等に使われてきた．例えば，Walter and Overland (1982) はアメリカ，ワシントン州の Olympia Mountain を対象に気流の観測を行い数値モデルとの比較を，Blumen and Hart (1988) は航空機にライダーを乗せ，Mount Shasta (4,317 m) を対象に観測し，数値モデルとの比較を行っている．さらに，衛星写真より，雲によって可視化された孤立峰の Lee Wave を示した Gjevik and Marthinsen (1978) や，流体中に半球や円錐形のモデルを置いてまわりの流れについて実験を行い，孤立峰周辺の気流を考察した Brighton (1978) 等の例がある．また，日本においても，富士山をはじめとする円錐形の孤立峰を対象に多くの研究がなされている (阿部(1939)，村木(1974)，湯山 (1974))．

このように，気流の孤立峰による影響に関する研究は，国内外共，大変盛んであるが，降雨と孤立峰の関係についての研究は，今日まであまり例がない．

そこで，北海道内でも最も典型的な円錐形の山容をしている，後志地方の羊蹄山（標高 1,893 m）を対象に，1987 年 8 月から 9 月にかけて，降雨を中心に，18 台の雨量計によるネットワークに AMeDAS，それに，移設した北大理学部レーダーを加えた観測を行った．

雨量計ネットワークによる観測例も，これまでさまざまなものがあり，雨量計を密に配置して降雨を観測した Hosking and Stow（1987）やアメリカの 344 台の雨量計ネットワークを用いた研究（Riley at al.（1986））などがある．また，今回の観測対象地域の南東，オロフレ山系の南東斜面では，菊地・武田（1978），武田・菊地（1978, 1979）によって，道内でも年間降雨量が多く，日雨量 90 mm 以上の大雨も年間 3 ～ 4 回発生することが明らかになって以来，菊地等のグループがこの地域で独自に雨量計ネットワークやレーダーを設置して降雨観測を行っている（近野，菊地(1981)，近野他(1981)，菊地他(1981)，堀江(1982)，飛塚(1984)，岩波(1987)，Iwanami et al.(1988), Kikuchi et al.(1988)）．今回の雨量計ネットワークは，円錐形の孤立峰に対して，高度別，方位別に比較ができるように留意しながら，配置した．

この論文では，雨量計，レーダーのデータを用いて，羊蹄山周辺の降雨量分布の特徴，及び羊蹄山周辺に降雨をもたらしたレーダーエコーの特徴について報告する．

II. 観 測 方 法

1．雨量計ネットワーク

Fig. 1 に観測地域及び測器の配置を示す．図中の等高線は標高 500 m で，羊蹄山は整った円錐形のため，図中ではほぼ円形で示されている．羊蹄山は，太平洋の噴火湾，日本海のいずれもから約 30 km の所に位置し，周辺には，500 m 以上の山が多くある．

このため孤立峰ではあるものの，周辺の山の影響も受けることは否定できないが，標高は周囲の山々よりもかなり高く，実際にはこの図でみるよりも，はるかに，目立つ孤立峰である．図中洞爺湖畔西北西部のプラス印が，レーダーサイトで Fig. 2 はレーダーサイトからみた羊蹄山の全景である．

降雨量観測は 1987 年 8 月下旬から 9 月末までの約 40 日間にわたって行われた．Fig. 1 の● 印が，独自に設置した 18 台の自記雨量計，○印

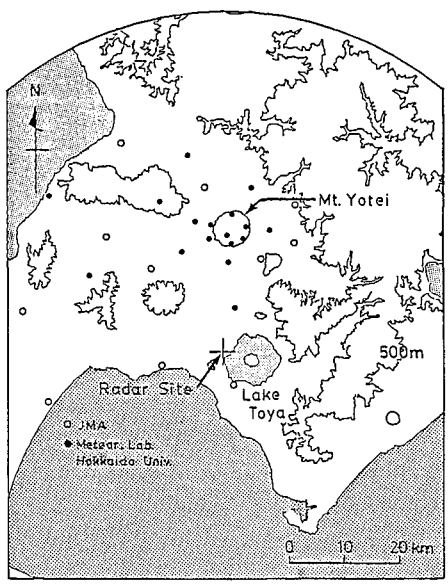

Fig. 1. Locations of AMeDAS (○) and special mesoscale raingauge (●) network around Mt. Yotei. Radar site is shown by a cross mark.

が，気象官署，AMeDAS，ロボット雨量計の位置である．雨量計は，山頂を中心に山腹では，高度毎，方位毎に雨量が観測できるように，標高900 mに1台，標高500 m付近の各方位に6台，さらに，標高250 m付近ではAMeDASを含めて羊蹄山を取り巻くように5台設置した．さらに，レーダーサイトから羊蹄山頂に向けて，ライン状に観測点を配置して，レーダーデータへの対応及び予想される南寄りの風の際の降雨への対応を考慮した．

Fig. 2. A photograph of Mt. Yotei taken at the radar site.

2．レーダー

北大理学部レーダーは羊蹄山までの見通し，距離，および過去10年のAMeDASデータから南側でより多くの降雨が期待されることから羊蹄山のほぼ真南23 km，標高330 mの地点に設置した．

III．降　雨　観　測

1．降雨の概要

観測期間中の1987年8月及び9月の降雨量を平年値と比較するため，倶知安測候所の値をTable 1に示す．表から明らかなように，この年の降雨は，9月下旬を除いてはいずれも平年に比べて少なく，8月26日には隣接した胆振管内の白老では，442 mmという大雨が降っているにもかかわらず，倶知安では平年より少なく，月降雨量では8月が平年の1/3，9月が1/2程度であった．

Table 1. Rainfall amounts (mm) in 1987 and average values at Kutchan Weather Station.

	8月				9月			
	上旬	中旬	下旬	total	上旬	中旬	下旬	total
1987	20.5	2.5	31.5	54.5	16.5	0.0	53.0	69.5
平年	44.1	59.8	45.8	149.5	45.2	47.7	44.8	137.7

観測期間中の主な降雨例を，総観場と羊蹄山中腹南斜面の標高900 m地点（Y 35）の降雨量と共にTable 2に示す．期間中の多くの降雨は沿海州付近及びアムール河下流付近の低気圧から延びる前線が北海道を通過したためであった．また，低気圧が日本海の秋田沖から北海道南岸を通過したことによるもの，台風から変わった低気圧によるもの，東西にのびる気圧の谷の中で冷たい空気が流入したことによるものが各1例づつあった．なお，8月31日から9月1日にかけての

Table 2. Date, synoptic situation and rainfall amounts (mm) of rainfall phenomena at Y−35 (900m) during observation period.

	総 観 場	Y 35 での降雨量(mm)
8月20日～25日	気圧の谷の中で冷気の流入	7
8月26日～27日	北海道南岸を低気圧が通過	44
8月28日	沿海州の低気圧から延びた前線の通過	19
8月31日～9月1日	台風から変った低気圧通過	28
9月6日	アムール河下流域の低気圧からの前線の通過	10
9月7日～9日	沿海州の低気圧から延びた前線の通過	23
9月21日	アムール河下流域の低気圧からの前線の通過	10
9月25日～26日	沿海州の低気圧から延びた前線の通過	105

降雨は，台風から変わった温帯低気圧が日本海を北東進し，北海道付近に近づき北海道北部を通過したためで，各地で大きな被害をもたらすほどの記録的な強風であったが，羊蹄山周辺での降雨量はさほど多くはなかった．最も多くの降雨量が観測された9月25日から26日の例も，他の多くの例と同様に，沿海州付近の低気圧からの前線通過によるものであった．この9月25日から26日の降雨の天気図をFig. 3に示す．この降雨では，羊蹄山付近での降雨強度も，全観測期間中で最も強く，羊蹄山々腹の標高900 m地点での観測では，10 mm/10 minを記録し，比較的激しい降り方であった．これ以外の降雨強度は3 mm/10 min程度で，今回の観測期間中では，最大の降雨強度の観測された例が降雨量も最大の例となった．

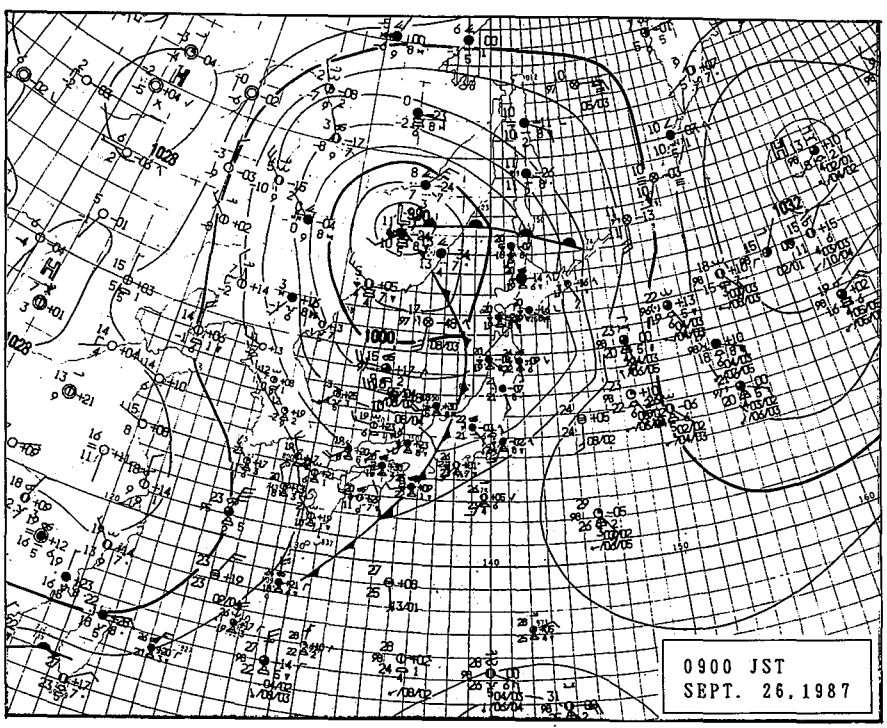

Fig. 3. Surface weather chart (0900 JST Sept. 26, 1987).

2．降雨量分布

降雨量観測期間中の8月29日から9月30日の約1カ月間の降雨量分布をFig. 4に示す．

羊蹄山を中心に降雨量が多くなっていること，羊蹄山の山腹及び裾野では南側及び東側に降雨量が多い傾向にあることが明らかになった．次に羊蹄山を取り巻く観測点における降雨量について詳細にみてみる（Fig. 5）．

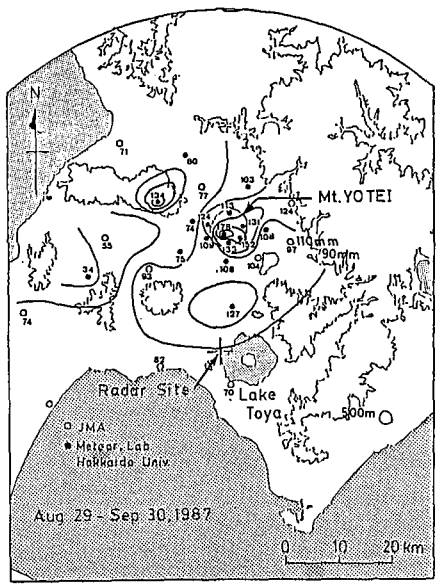

Fig. 4. Horizontal distribution of total rainfall amount from Aug. 29 to Sept. 30, 1987.

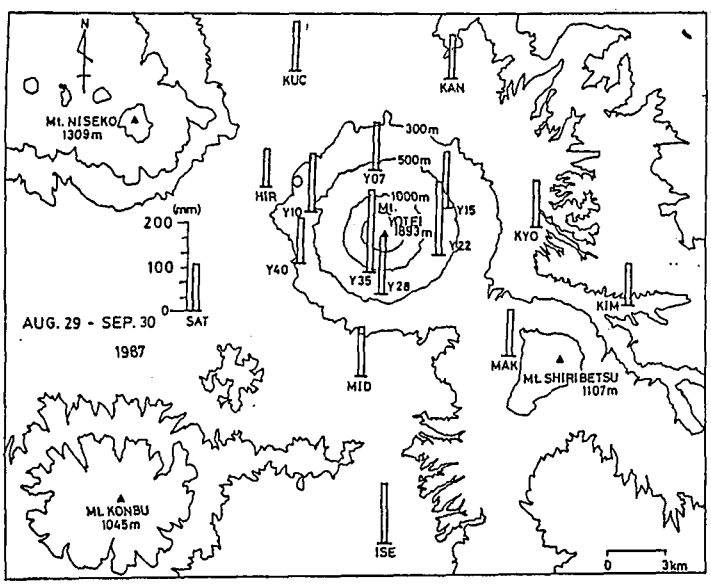

Fig. 5. Total rainfall amount around Mt. Yotei from Aug. 29 to Sept. 30, 1987.

図中の 300 m，500 m，1000 m，1500 m の等高線が示すように，羊蹄山はほぼ円錐形をしており，それを取り巻くように標高 250 m，500 m，900 m 付近に配置した観測点では，高度が高くなる程降雨量が多く，同じ高度では，南東側が多くなっている．同じように，地形と降雨量分布について，8 月 31 日から 9 月 1 日（Fig. 6），9 月 25 日から 9 月 26 日の降雨例（Fig. 7）について

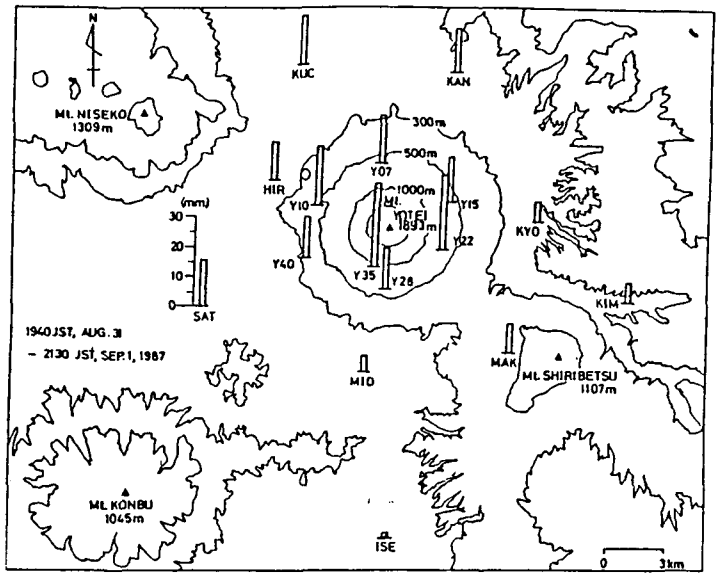

Fig. 6. Rainfall amounts around Mt. Yotei from Aug. 31 to Sept. 1, 1987.

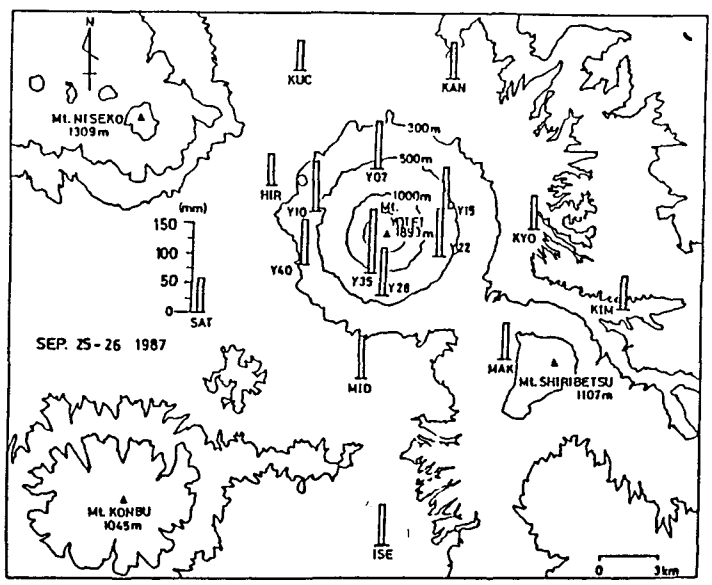

Fig. 7. Rainfall amounts around Mt. Yotei from Sept. 25 to 26, 1987.

みてみると，前述した総降雨量の場合と同様，高度の増加と共に降雨量が多くなっていることがわかる．この2例について，ほぼ風向と平行な南北断面の降雨量分布をみたのがFigs. 8, 9である．　両図とも高度と降雨量の良い対応がみられ，特に8月31日から9月1日の降雨時の風上側（南側）斜面では，レーダーサイトの降雨量0 mmから，標高900 mでの28 mmまで，山頂に近づくほど降雨量が多くなっている様子がわかる．

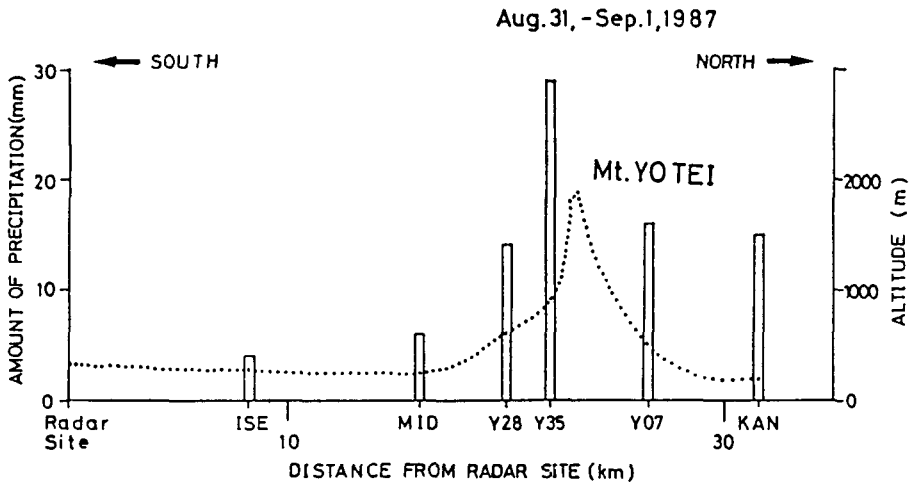

Fig. 8. Rainfall amounts along south to north cross section of Mt. Yotei from Aug. 31 to Sept. 1, 1987.

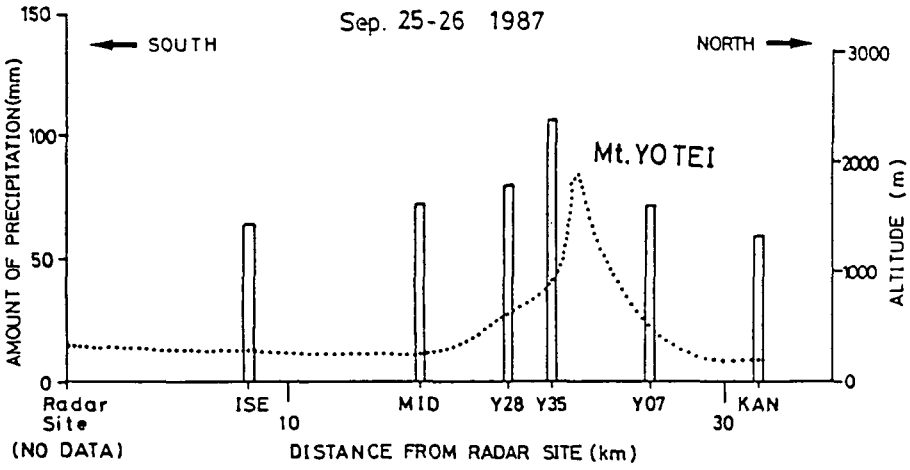

Fig. 9. Rainfall amounts along south to north cross section of Mt. Yotei from Sept. 25 to 26, 1987.

次に，風向と降雨の関係について8月31日から9月1日の例についてみることにする．Fig. 10は，雨量観測点の高度と羊蹄山山頂からの方位（90°が羊蹄山東斜面，180°が南斜面を示す．）及び各高度の降雨量を示した図である．ほぼ同一方位の斜面では，高度が高いほど降雨量が多く，また同一高度では，風上側の斜面よりもその両脇の斜面（この例では，風向が南南西なのでほぼ東，西斜面）の方が降雨量が多くなっている．この傾向は，比較的風が強くかつ降雨期間中風向が一定していた9月8日及び9月21日の例でもはっきりしていた．8月31日の例は台風から変わった温帯低気圧，9月8日および9月21日の例は，沿海州及びアムール河下流付近の低気圧からの前線による降雨例であり，風向に対して側面で降雨量が多くなる傾向は，総観規模の要因によらず，一般的にあてはまるのではないかと思われる．ただし，このような傾向がみられない例もあった．

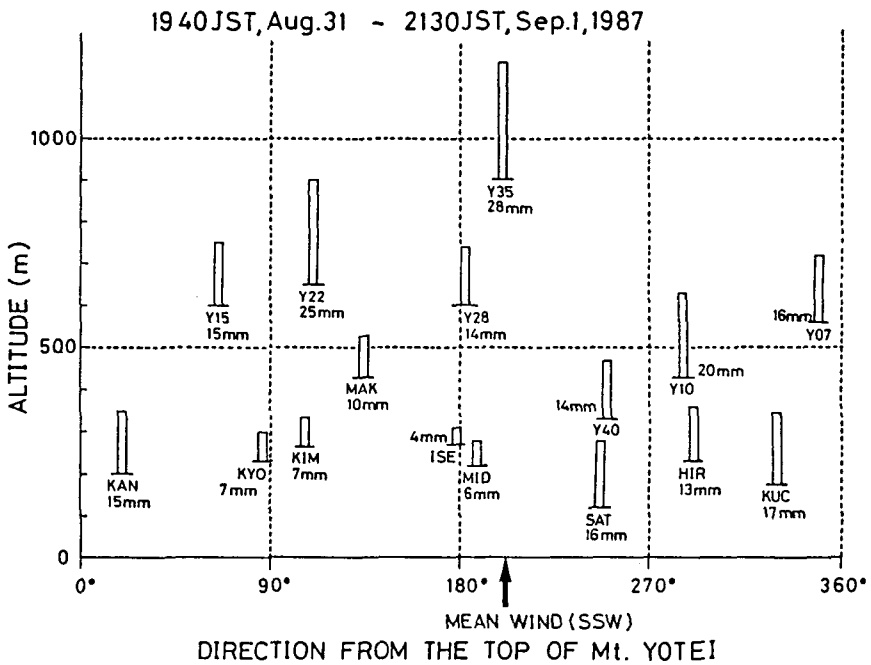

Fig. 10. Rainfall amounts at each altitude and direction from the top of Mt. Yotei.

Ⅳ．レーダー観測

雨量計によって得られたデータから，羊蹄山付近に降雨があった例についてレーダーエコーをPPI, CAPPI, 及びRHI断面で調べた．その結果羊蹄山の影響を受けて発生または成長していると思われるエコーの例と，それよりも大きなスケールのエコーが，羊蹄山の影響を受けないまま通過してゆく例があった．また，羊蹄山の影響により発生，成長するエコーも，移動してきて羊

蹄山によって強化されるものと，羊蹄山付近で発生，そのまま停滞，消滅するものがみられた．以下いくつかの例について紹介する．

1．1987年9月6日11時の例

9月6日の降雨は，観測期間中の多くの降雨例と同様にアムール河下流付近の低気圧からの前線によるものであった．

羊蹄山山腹南斜面の標高900 mのY 35及び標高600 mのY 28における降雨例をFig. 11に示す．Y 35を含め羊蹄山山腹では，11時半頃と15時頃を中心に2度の降雨があった．福岡・堀越（1971）が示しているように孤立峰周辺では，地上風向は場所によりさまざまで，今回もAMeDASからだけでは，はっきりしたことが言えないので札幌における高層データを参考にした．Fig. 12に9月6日14時30分のホドグラフを示す．この図から，高度4 km程度まではほぼ南風とみなせる．Fig. 13は9月6日11時32分から11時59分の高度3 kmのCAPPI図で，図中央のプラスマークとそれを囲む円は，レーダーサイトとNo Data領域を示している．レーダーサイトの真北20 km程にある円が，羊蹄山の高度500 mの等高線である．11時32分（左図）にレーダーサイトの北10 km付近にあったエコーセルは，11時46分に羊蹄山に達して反射強度を強め，25 dBZ以上のエコー面積が増加している（中央図）．その後11時59分（右図）には，エコーセルは羊蹄山から北へ去り，反射強度，エコー面積共，弱くかつ減少しているのがわかる．

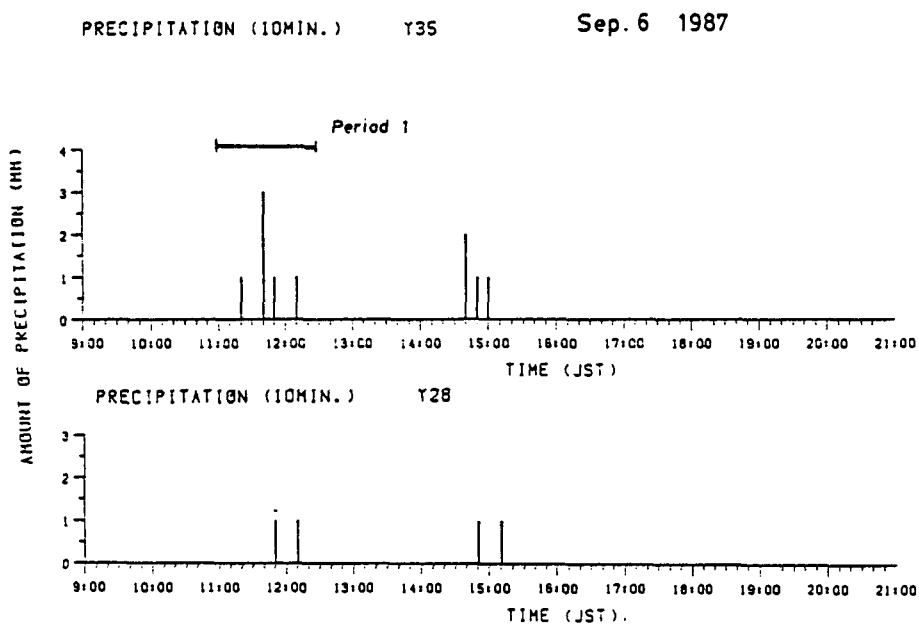

Fig. 11. Rainfall intensity (mm) per 10 min. at Y−35 (900m) and Y−28 (600m) sites on Sept. 6, 1987.

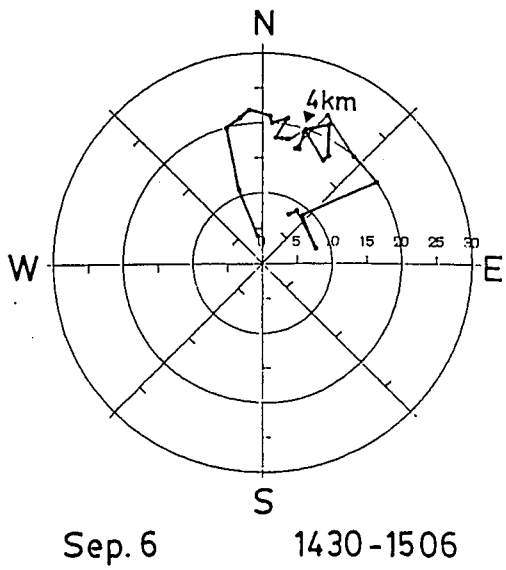

Fig. 12. Hodograph on Sept. 6, 1987 at Sapporo.

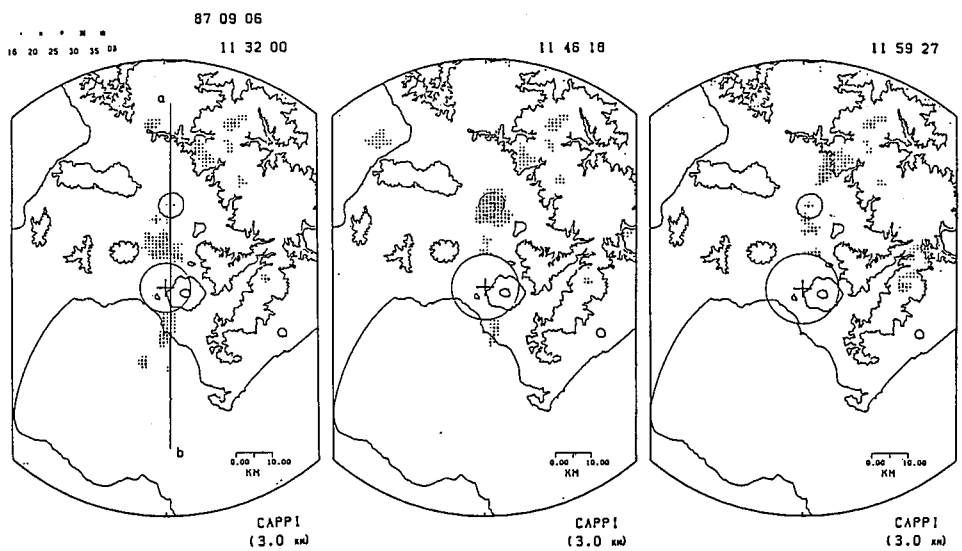

Fig. 13. CAPPI at 3km on Sept. 6, 1987. Line a—b shows a vertical cross section representing in Fig. 14.

羊蹄山への接近によるエコー強度及びエコー面積の増加をCAPPIで高度毎に示したのがTable 3である．特に目立つのは，3 kmで，反射強度で25 dBZ以上のエコー面積で2 kmの3倍に増加していることである．2 kmでも反射強度，エコー面積共，増加しているが，4 kmにおいては25 dBZのエコー面積は増加しているものの30 dBZの反射強度の領域はなくなっている．このことと，羊蹄山の標高が1,893 mであることを考え合わせると，やはりエコーの強化には羊蹄山の影響が関与しているものと思われ，その効果は高度4 km以下で大きいようである．

次にこれらの時刻のエコーの鉛直断面を見てみる．この降雨例では，Fig. 12のホドグラフ及びFig. 13の高度3 kmのCAPPIのエコーセルの移動方向からみられるように，南風であるので羊蹄山山頂を含む南北断面（Fig. 13左のａ－ｂ方向）において考察してみる（Fig. 14）．

Table 3. Time change of intensity and horizontal area of radar echoes at each altitude.

高　度	2km		3km		4km	
反射強度	25dBZ	30dBZ	25dBZ	30dBZ	25dBZ	30dBZ
11:32	34	3	9	9	18	3
11:46	34	6	26	4	20	0

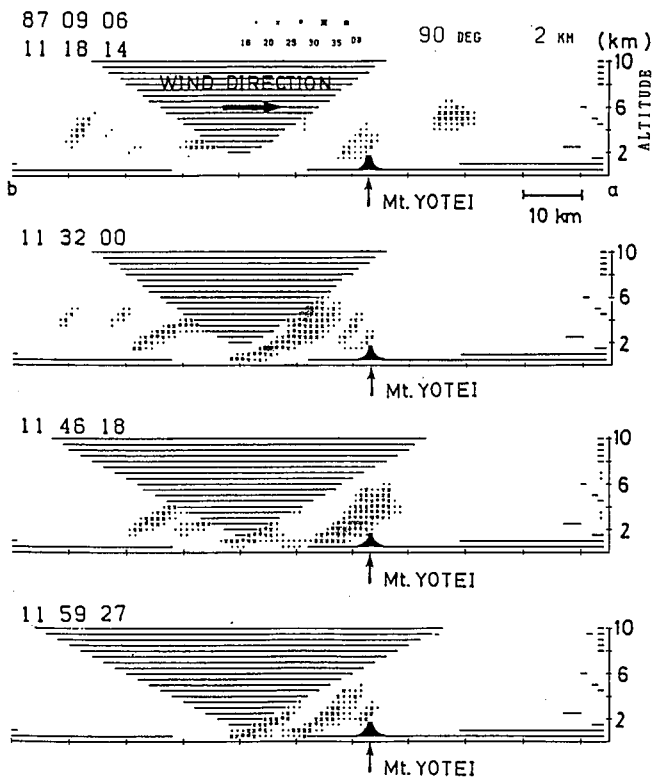

Fig. 14. Time sequence of vertical cross sections of radar echoes along the line a−b in Fig. 13.

11時18分(上図)では11時00分頃から羊蹄山の風上側斜面に沿って発生した弱いエコーがみられるが，次の11時32分では羊蹄山の風上側14 km付近に中心を持つ南北に傾斜した強いエコーセルがみられる．このエコーは，次の11時46分にはその中心部をほぼ羊蹄山付近に移動し，反射強度30 dBZ以上のエコー面積が4 km以下では3倍に増加した．この鉛直断面における各高度別のエコー面積の変化をTable 4に示す．この表からも，エコー面積の増加は高度2～4 km層で顕著であることがわかる．Fig. 15に羊蹄山山頂よりも東側，山腹の標高500 mを含むような面での鉛直断面を示す．11時32分から11時46分に至るエコーの強化はFig. 14の山頂を含む風上側斜面よりも大きくなっているのがわかる．

Table 4. Time change of intensity and vertical area of radar echoes at each layer.

高　度	0−2km			2−4km			4−6km		
反射強度	20dBZ	25dBZ	30dBZ	20dBZ	25dBZ	30dBZ	20dBZ	25dBZ	30dBZ
11:32	11	6	1	13	3	0.5	7.5	3.5	2.5
11:42	10.5	5.5	2.5	15	10.5	2	7.5	1.5	0

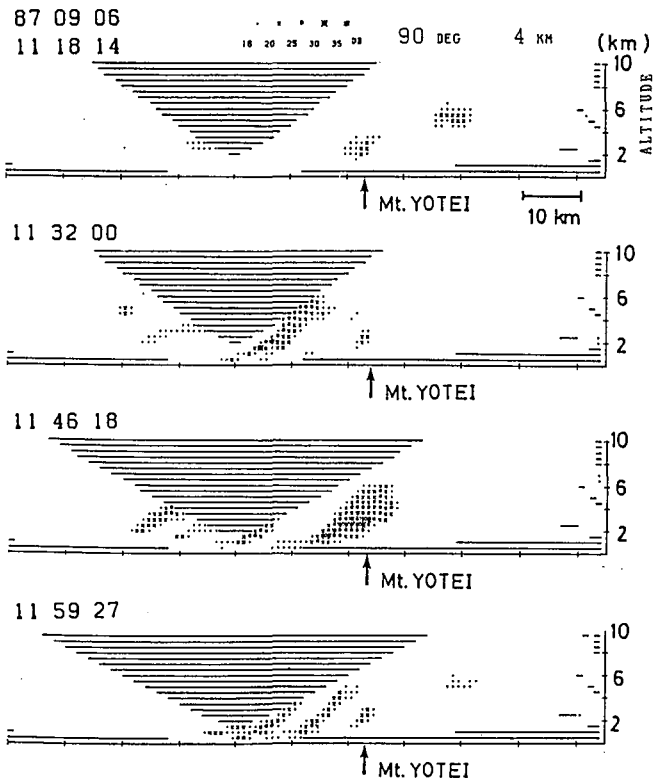

Fig. 15. Time sequence of vertical cross sections of radar echoes parallel to the line a−b of Fig. 13 on eastward slope of Mt. Yotei.

このことは先に示した降雨量が風上側斜面よりも，その側面の斜面で多いことと一致している．さらに9月8日14時30分頃の降雨例（Fig. 16）でも同様のエコーが観測された．この例では反射強度は最大で30 dBZ以下とあまり強くはなかったもののエコーセルの変化の様子は先の例と同様であった．風向は，ホドグラフ及びPPIから南西風であるので，鉛直断面は羊蹄山山頂を含む北東から南西にかけての断面である．14時30分に羊蹄山の風上約24 km(この風向では昆布岳の風上側斜面付近)でエコーが発生し，10分後の14時40分には羊蹄山まで13 kmと接近し，25 dBZ以上のエコー面積で7倍に増加し，またエコー頂高度も4 kmから6 kmへと発達した．さらに10分後の14時50分にはエコーセルは羊蹄山付近に達し，25 dBZ以上のエコー面積もさらに2倍に増加した．羊蹄山通過後の15時00分には20 dBZ以上の面積は広がったものの，25 dBZ以上の面積は半分以下に減少した．

以上の2例は，沿海州及びアムール河下流付近の低気圧からの前線による降雨であるが，台風

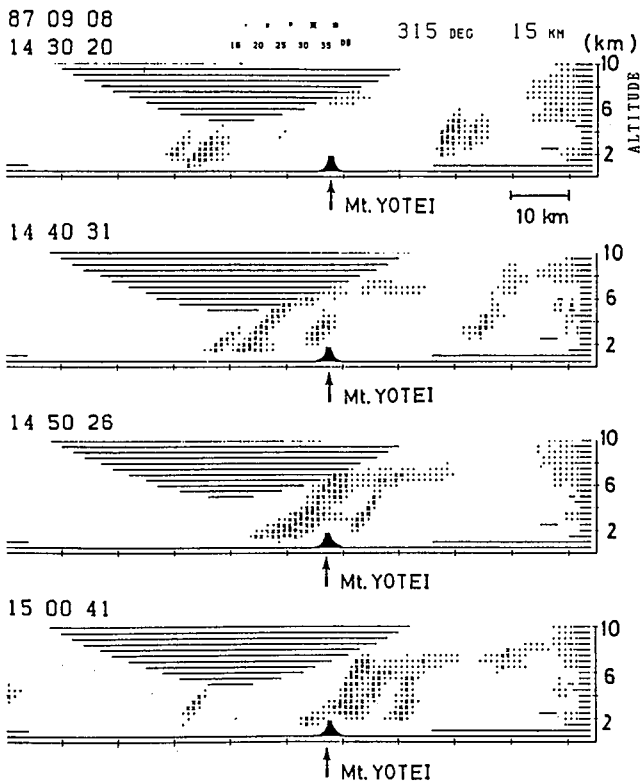

Fig. 16. Time sequence of vertical cross sections of radar echoes along southwest to northeast of Mt. Yotei on Sept. 8, 1987.

から変わった低気圧による降雨例でもこのような例が観測された．

Fig. 17 は 8 月 31 日 19 時 41 分から 20 時 21 分までの仰角 3.3°の PPI である．南西から移動してきた広い降雨域が，20 時頃を中心に羊蹄山付近を通過した．この例の羊蹄山山頂を含む面での鉛直断面を Fig. 18 に示した．この例でも羊蹄山付近でエコーが強められているのがみられる．またその割合は，高度別にみると前の例と同様に 4 km 以下で大きくなっていた．

以上 3 例ともエコーの鉛直断面が形状やその強度においてはっきりしてくるのは，羊蹄山の 20 km 前方からとなっていることがわかる．この位置は風向にもよるが，海岸線や昆布岳と一致している場合もあり，それらの影響も無視できず，エコーの発生，強化のトリガーとしての役目を果たしているのかもしれない．しかし，その後エコーが維持，強化されていくのは，少なくとも羊蹄山の影響が関与していると思われる．そこで，このエコーの横方向の広がりをみるため Fig. 17 に示したＡ－ａからＥ－ｅまでの 5 つの鉛直断面をみることにする．

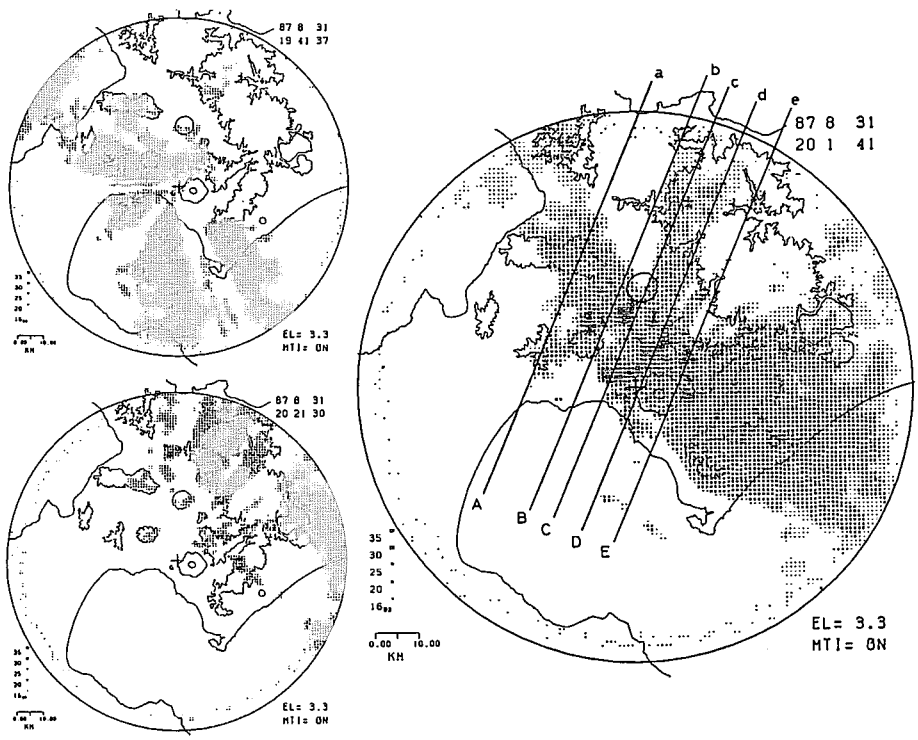

Fig. 17. PPI displays of radar echoes on Aug. 31, 1987.

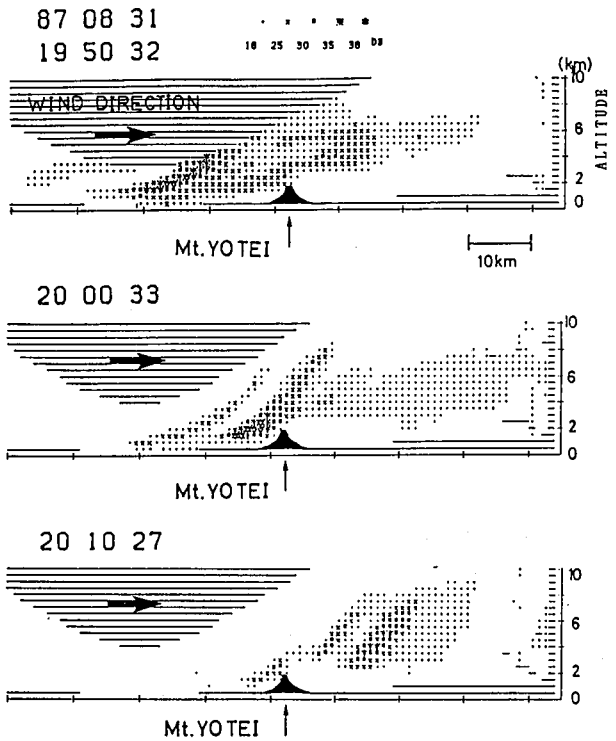

Fig. 18. Time sequence of vertical cross sections of radar echoes of Fig. 17 along south−southwest to north−northeast of Mt. Yotei.

Fig. 19 中央の（C－c）断面が，羊蹄山の山腹を含む断面で，（A－a），（B－b）はそれぞれ羊蹄山から西北西，（D－d），（E－e）は東南東方向の鉛直断面である．これらの図から，風向に対して直角方向のエコーの組織化や強化が羊蹄山を中心に存在し，羊蹄山から遠ざかる程エコーの形状や反射強度が弱くなっているのがよくわかる．また，この例では羊蹄山によるエコーへの影響は横方向に関して左右約 10 km づつであった．ただし，今回の風向では羊蹄山の両脇にあるニセコ連峰と尻別山の存在がエコーへの影響に寄与している可能性も考えられる．

今回のレーダー観測期間中に，このような羊蹄山によって強められる，エコーによる降雨例は，Fig. 11 の Period 1 に示すような，1 時間程度の一続きの降雨で 6 例観測された．それらのうち，エコーの反射強度が特に強く他との比較に適さない 1 例を除いた 5 例，合わせて 12 セルについて羊蹄山との距離とエコー面積との関係に注目してみた．

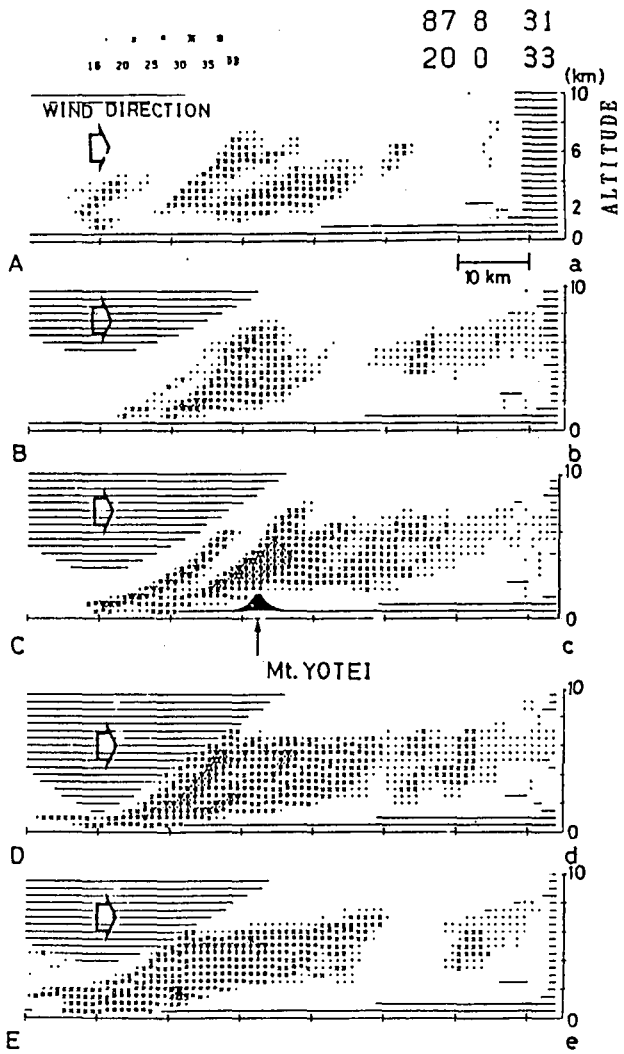

Fig. 19. Vertical cross sections of radar echoes along (A−a) to (E−e) of Fig. 17 on Aug. 31, 1987.

Fig. 20 (a)は，各々のエコーセルの中心と羊蹄山山頂との距離と，そのセル中の反射強度25 dBZ以上のエコー面積との関係を示している．いずれのエコーセルも羊蹄山に近づくと共に，そのエコー面積を増加させ，羊蹄山付近で最大をむかえる様子がわかる．さらにその後は，9月8日21時の1例，3セルを除いては，いずれも，羊蹄山から遠ざかると共に，減少し，消滅している．

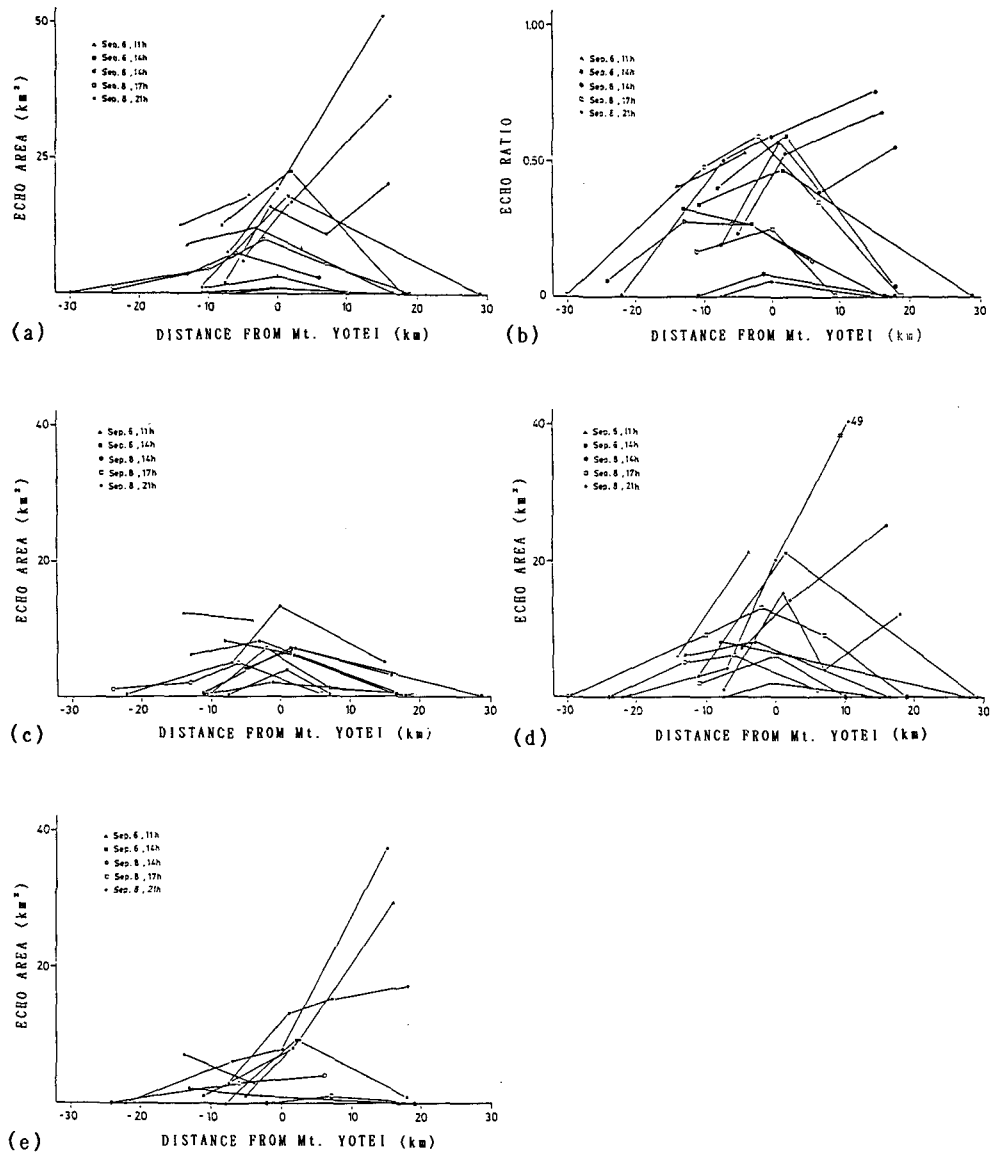

Fig. 20. Relationship between echo area and distance from Mt. Yotei in (a), echo ratio (25 dBZ/20 dBZ) and distance (b), echo area stronger than 25 dBZ in 0 to 2km in altitude and distance (c), echo area stronger than 25 dBZ in 2 to 4km in altitude and distance (d), and echo area stronger than 25 dBZ in 4 to 6km in altitude and distance (e).

また，そのエコー面積の増加の割合も羊蹄山周辺では大きく急激に増加しているのに対して，羊蹄山から遠い所では増加の割合が低かった．

Fig. 20 (b)には，反射強度 20 dBZ 以上のエコー面積中の 25 dBZ 以上のエコー面積の割合と羊蹄山からの距離の関係を示している．この図においても羊蹄山を中心にその割合が大きくなっており，エコー面積そのものも増加していることを示した Fig. 20 (a)と共に，エコーセルが羊蹄山付近で面積，強度共，最大となっていることを表わしている．

Fig. 20 (c), (d), (e)は，エコー面積と羊蹄山からの距離を，各高度別にみた図であるが，これらより羊蹄山付近でエコーセルの面積が増加するのは 2 ～ 4 km の層が一番寄与していることがわかる．

2．1987 年 9 月 1 日 09 時の例

羊蹄山の地形の影響を受けて発生または発達するエコーの例として，前節の例のように移動性のエコーの他に羊蹄山付近で発生し，30 分程度で発達，その場で停滞し，消滅してゆくものがある．

Fig. 21 は 9 月 1 日 08 時 51 分から 10 時 11 分の仰角 3.3°の PPI 画面である．08 時 21 分以前には，羊蹄山の標高 500 m 以上の所にのみエコーがなかったが，08 時 21 分頃，羊蹄山の風上側の南西部の地域にエコーが発生しはじめた．エコーは 30 分かかって発達，09 時 21 分には図に示す様に広範囲に広がり，約 1 時間存在した．エコー強度は，20～25 dBZ 以下とあまり強くはなく，さらに 09 時 50 分頃より，エコーはそのままの位置で面積，反射強度共に減少し，50 分後の 10 時 40 分頃には，羊蹄山南西方向のエコーは消滅し，羊蹄山山腹のみにエコーが残っている状態へ戻った．

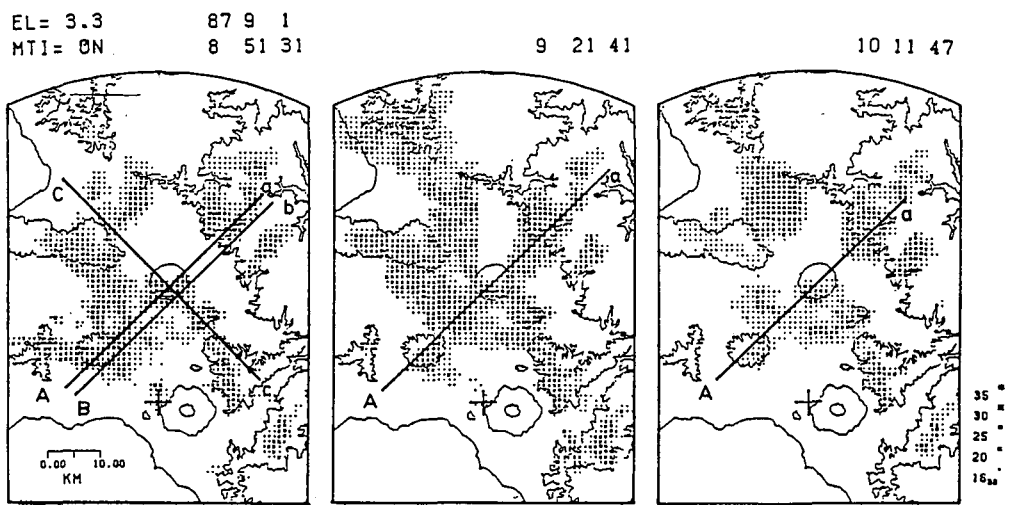

Fig. 21. Time sequence of PPI on Sept. 1, 1987.

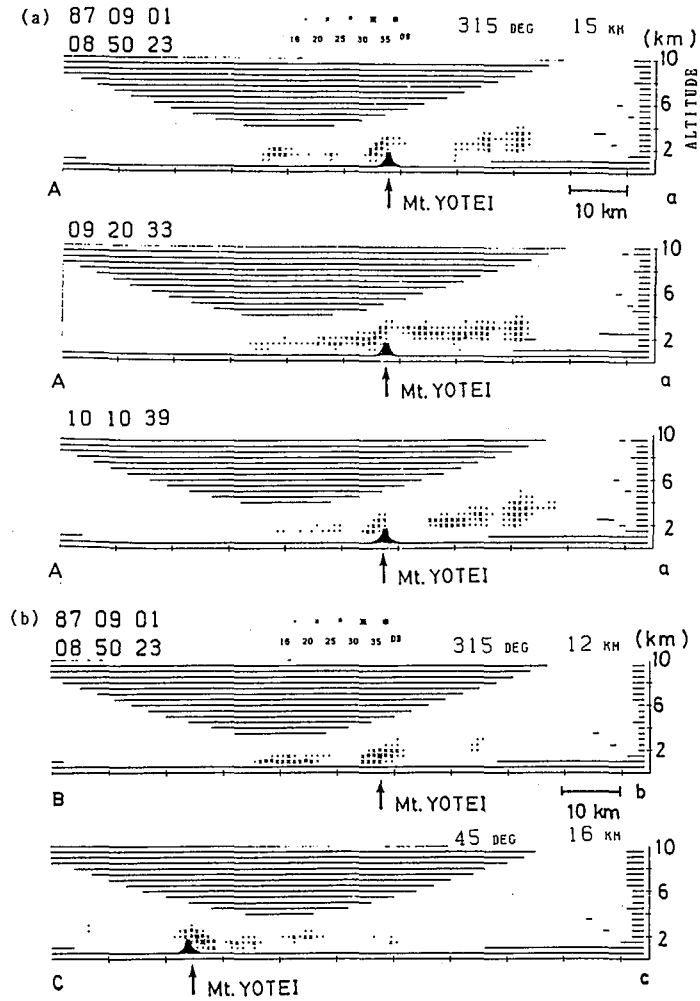

Fig. 22. Time sequence of vertical cross sections of radar echoes along (A−a) in (a), and (B−b) and (C−c) in (b) on Sept. 1, 1987.

Fig. 21 の PPI 画面の（A－a）に対応した鉛直断面を Fig. 22 (a)に示す．前節の例のエコーに比べて，いずれもエコー頂高度が低く，エコー面積も狭いこと，また反射強度もあまり強いものがみられないことがわかる．08 時 50 分の図では，羊蹄山の風上側斜面に比較的強いエコーが極く狭い範囲に存在し，その南西側ではさらに弱く背の低いエコーがみえる．09 時 20 分の図では，羊蹄山山腹のエコーと南西部のエコーがつながり，さらに羊蹄山の風下側にもエコーが発達，本倶登山に至るまで一続きのエコーとなった．この状態においても羊蹄山の風上側斜面が最も反射強度が強かった．さらに，50 分後の 10 時 10 分には，08 時 50 分同様，羊蹄山山腹と羊蹄山南西部，及び本倶登山付近の 3 カ所にわかれたエコーがみられる．この様にこのタイプのエコーは羊蹄山等の山岳を中心に発生，発達し，背の低いまま停滞，その場で消滅してゆくが，特に羊蹄山の風

上側斜面におけるエコーが常に他のエコーよりも強く，また存在時間も長かった．

また，同じ 08 時 50 分について，Fig. 21 に示す（B－b），（C－c）断面の羊蹄山山腹のエコーを比べてみる（Fig. 22 (b)）．両者を比較すると，Fig. 22 (a)の上図では最大で 30 dBZ 以下であるのに対して，(b)図（B－b）では 35 dBZ 以下と，風向に対して山頂の側面にあたる斜面上の方が大きいことがわかる．また，風向に対して直角にとった(b)図（C－c）からも，羊蹄山山頂の上方よりも，側面の南東斜面上の方が反射強度が強くなっているのがわかる．これは，9 月 1 日 03 時 30 分の例でも同様の傾向が示されている．

このように，降雨量が風向の側面の斜面で多くなることについては先の移動性のエコーについて，レーダー観測からも一致した結果が得られたことを示したが，今示した様に停滞性のエコーでも同様に山腹側面で降雨量が多いという結果が得られた．

3．1987 年 9 月 8 日 15 時の例

観測期間中の羊蹄山付近における降雨は，これまで示してきたような山体の影響を受けたエコーによるものがほとんどであった．しかし，ごくわずかながら以下に示すような，羊蹄山の影響を殆ど受けなかったと思われるエコーによる降雨も観測された．

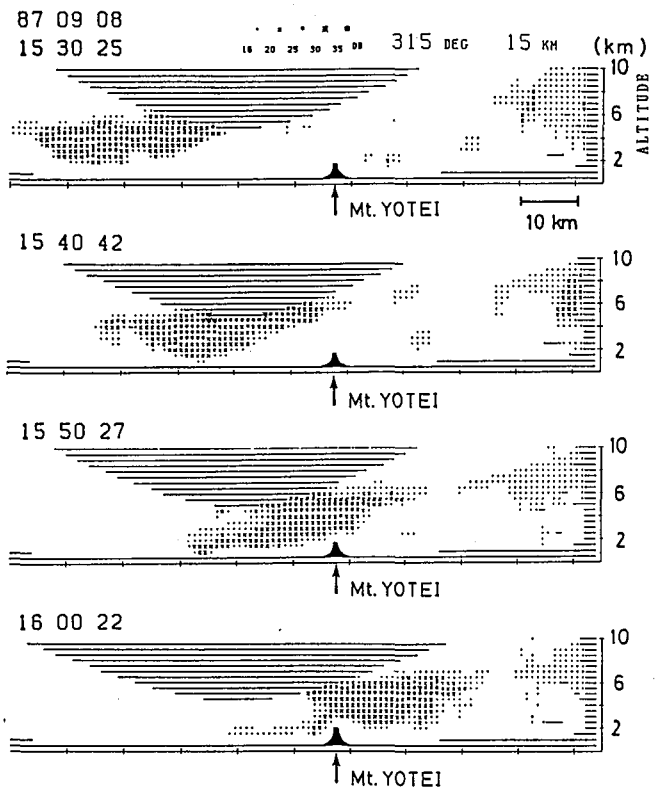

Fig. 23. Time sequence of vertical cross sections of radar echoes along southwest to northeast of Mt. Yotei on Sept. 8, 1987.

Fig. 23 は 9 月 8 日沿海州付近の低気圧からのびる前線による降雨例の 15 時 30 分から 16 時 00 分の RHI 画面である．羊蹄山の南西からエコー頂高度 6 km 程度のエコーが移動，15 時 50 分には羊蹄山付近に達しているが，ここで特にエコー強度の強化やエコー面積の増加，エコーの形状の変化は認められなかった．一方，降雨量は羊蹄山の標高 900 m の Y 35 においても 1 mm と少なかった．観測期間中は他に 8 月 28 日 12 時頃にも同様な，羊蹄山による影響を受けなかったと思われる例があり，この時も Y 35 での降雨量は 2 mm と少なかった．

V．考　　察

この章では 3 つのレーダーによる降雨例をみてきたが，それを実際の降雨と対応させてみる．Fig. 24 は，羊蹄山山腹の標高 900 m (Y 35) における 9 月 6 日と 8 月 31 日の 10 分間降雨量を示している．9 月 6 日の 11 時から 12 時頃の降雨は，4.1 で扱ったレーダーエコーに対応する降雨であり，8 月 31 日の 8 時から 10 時頃の降雨は 4.2 で扱った停滞性のレーダーエコーに対応する降雨である．

4.1 の降雨の特徴としては，短時間のうちに降雨強度を変化させながら比較的強い降雨強度で降ることで，これは他の 5 例の場合も同様であった．また，このような一続きの雨での降雨量は，6 例中 5 例で 6 mm/10 min 以下，残りの 1 例では 13 mm/10 min であった．

一方，停滞性のエコーによる降雨の特徴は 1 mm/10 min 程度の弱い降雨強度で一様な降雨を

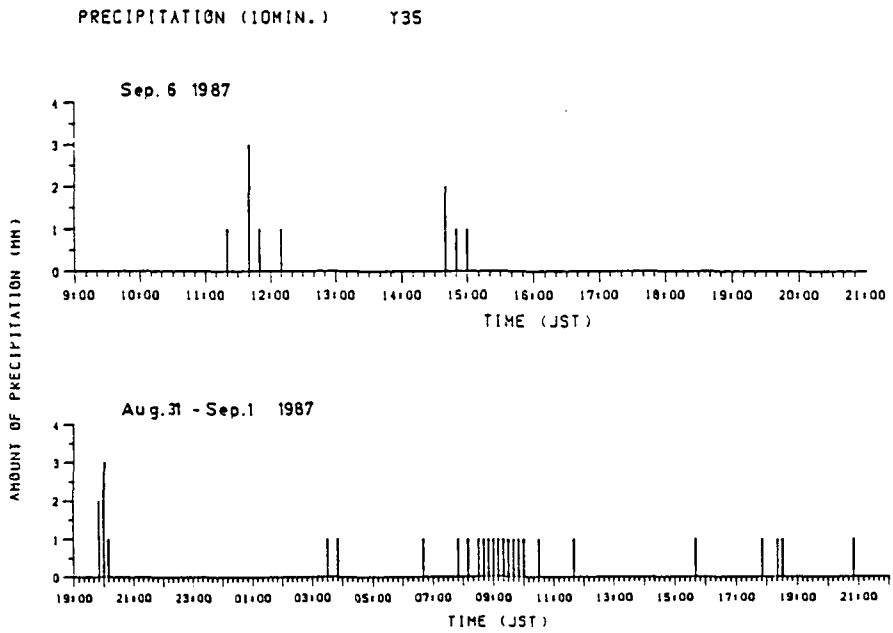

Fig. 24. Rainfall intensity (mm) per 10min. at Y−35 (900m) on Sept. 6 and Aug. 31 to Sept. 1, 1987.

もたらすことである．このタイプのエコーによる，一続きの雨での降雨量はエコーの持続時間に依存するが，今回の観測期間中に，10 mm 超える例が 2 例あった．

また，エコーが羊蹄山の影響を受けなかった例では，大きなエコーが通過しているにもかかわらず，降雨量は 1 mm 程度とわずかであった．このことから，羊蹄山の影響を受けない降雨システムからは羊蹄山付近へは，あまり降雨がないといえる．

また，これら降雨システムのエコー発生に関してその種類毎に，総観場，AMeDAS の羊蹄山付近の地上風，札幌における高層風の風向・風速，シアー等について調べてみたが，エコーの種類別の特徴は得られなかった．

一方，降雨量分布より羊蹄山では風向に対して側面での降雨が多いことを示したが，このことをレーダーエコーからも観測することができた．レーダーエコーでは，羊蹄山の頂上よりも側面の上方で反射強度が強いこと，また，風上側斜面よりも側面付近の方が大きいこと等が示された．これより羊蹄山付近では，佐藤・恩田（1974）が風洞実験で示した様に，風が円錐形の両脇にまわり込む様に吹いているのであろうことが容易に想像できる．羊蹄山の場合南から西寄りの風の場合には，（今回の降雨例は，ほとんどがこの方向の風であった）風向に対して直角方向に，ニセコ連峰と尻別山が存在しており，羊蹄山とニセコ及び尻別山との間で，両脇にまわり込んだ風が，収束，上昇をし易い地形的条件が関与して，側面での降雨量が多くなるのであろう．このような斜面上昇と水平収束の影響は，羊蹄山南東方向のオロフレ山系について降雨量観測，レーダー観測，数値実験等によって確かめられている（Iwanami et al., 1988; Kikuchi et al., 1988）．

このように，降雨量の分布についての研究も気流の研究なしには考えられず今後この地域での気流の研究が期待されるが，今回，羊蹄山の風下側で Scorer（1949）などに示される Lee Wave を示す様なエコーが観測されたのでその RHI 画像のみを示しておく（Fig. 25）．なお，最近同じ場所でドップラー化された北大理学部レーダーで Lee Wave や Rotor が観測されていることを

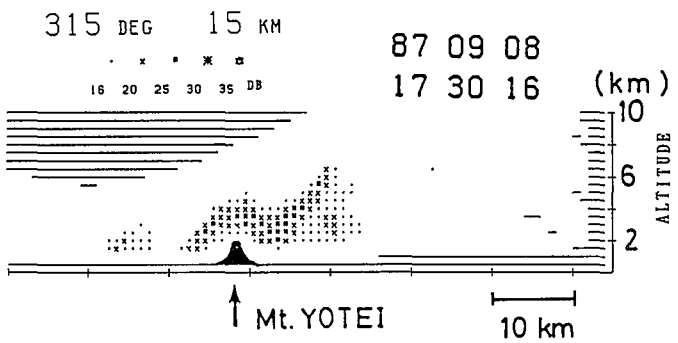

Fig. 25. RHI display of radar echoes on Sept. 8, 1987 along southwest to northeast of Mt. Yotei.

付記しておく（Uyeda et al., 1991: Takahashi et al., 1993）.

VI. ま　と　め

典型的な円錐形をした孤立峰である羊蹄山を対象に降雨に対する応答を調べるため，1987年8月から9月にかけて雨量計18台と北大理学部レーダーを現地に移設して観測を行った.

その結果，降雨量観測からは，この地域での降雨は羊蹄山付近に降雨量が多く，また羊蹄山においては，高度が高い程降雨量が多くなること，風向が比較的一定の場合，風向に対して側面の斜面上で降雨量が多くなることがわかった．さらに，レーダー観測によってもエコー強度が風上側より側面の斜面上で強いことが示された.

さらに，今回の観測期間中の羊蹄山付近の降雨は，そのほとんどが，羊蹄山の影響を受けたエコーからのもので，羊蹄山付近を通過しながらも羊蹄山の影響がみられなかったエコーからの降雨量は，ごくわずかしかないことがわかった．羊蹄山の影響を受けたエコーも二つのタイプに分けられる．一つは移動しながら羊蹄山の手前で，反射強度，エコー面積を強化かつ増加して行くタイプで，もう一つは，羊蹄山の風上側斜面を中心に発生，停滞し，その場で消滅してゆくタイプである．この移動性のエコーのタイプは，羊蹄山に近づくと共にそのエコー面積，反射強度を強め増加するがその効果は高度4 km以下でより顕著であった．また水平方向では，最大で風上側20 km，風向に対して横方向で左右各10 km程度であった．ただし，この水平方向の効果の範囲に関しては，海岸線や昆布岳によるエコーの発生や，横方向の広がりに対するニセコ連峰や尻別山等，他の要素もあるので，純粋に“円錐形をした孤立峰”のみの影響とは必ずしもいえない．しかし，エコー面積の増加の割合が羊蹄山付近で大きいことなどは，羊蹄山がエコーの形成，発達の主な要素であることを示すものである．一方，羊蹄山付近で発生，停滞，消滅するタイプは羊蹄山山腹にエコーが存在するもので，エコー頂高度も低く，反射強度も弱かった.

今回，降雨量を中心に研究を行ったが降雨に注目する場合でも気流のデータは大変重要である．今後，この地域を対象にドップラーレーダー等の風の場も測定できる測器での観測がなされれば，今回のいくつかのエコータイプも，どの様な状況下で発生したのかが明らかとなるであろう.

謝辞　この研究の一部は1989年文部省科学研究費（重点領域研究(2)，自然災害）（課題番号01601501）「理想的な孤立峰周辺の風系に対する大雨域の変動予測に関する研究」（研究代表者：上田　博）によるものである．高層データ，AMeDASのデータを提供していただいた札幌管区気象台に感謝いたします．なお，レーダーのデータ処理は，北大大型計算機センターを使用した.

文　献

阿部正直，1939，富士山の雲型分類，J. Meteor. Soc. Japan, **17**, 163－181.

Blumen, W. and J. E. Hart, 1988, Airborne Doppler lidar wind field measurements of waves in the lee of Mount Shasta, J. Atmos. Sci., **45**, 1571－1583.

Brighton, P. W. M., 1987, Strongly stratified flow past three－dimensional obstacles, Quart. J. R. Meteor. Soc., **104,** 289－307.

福岡義隆・堀越信治, 1971, 風向分布におよぼす孤立峰の影響, 天気, **18,** 32－34.

Gjevik, B. and T. Maritinsen, 1987, Three－dimensional Lee－wave pattern, Quart. J. R. Meteor. Soc., **104,** 947－957.

堀江成人, 1982, 北海道オロフレ山系の山岳性降雨の研究, 北海道大学大学院環境科学研究科修士論文, 63 pp.

Hosking, J. G. and C. D. Stow, 1987, Ground－based, high－resolution measurements of the spatial and temporal distribution of rainfall, **26,** 1530－1539.

岩波　越, 1987, 北海道オロフレ山系の局地的大雨に関する研究, 北海道大学大学院理学研究科修士論文, 68 pp.

Iwanami, K., K. Kikuchi and T. Taniguchi, 1988, A possible rainfall mechanism in the Orofure mountain range Hokkaido, Japan－The rainfall enhencement by a two－layer cloud structure－, J. Meteor. Soc. Japan, **66,** 497－504.

菊地勝弘・播磨屋敏生・堀江成人, 1981, 1980年8月下旬の北海道南西部における局地的大雨の特徴に関する解析, 北海道大学地球物理学研究報告, **40,** 55－77.

菊地勝弘・武田栄一, 1978, 北海道の集中豪雨, 文部省科研費自然災害特別研究研究成果, No. A－53－4, 109－124.

Kikuchi K., H. Horie, T. Harimaya and T. Konno, 1988, Orographic rainfall events in the Orofure mountain range in Hokkaido, Japan, J. Meteor. Soc. Japan, **66,** 125－139.

近野好文・菊地勝弘, 1981, 北海道オロフレ山系南東斜面の降雨特性, (I)－降雨量分布－, 北海道大学地球物理学研究報告, **39,** 1－18.

近野好文・菊地勝弘・若原勝二・鈴木和史, 1981, 北海道オロフレ山系南東斜面の降雨特性, (II)－雨滴粒度分布の二点観測－, 北海道大学地球物理学研究報告, **39,** 19－35.

村木彦麿, 1974, 富士山頂の風の観測, 気象研究ノート, **118,** 65－74.

Riley, G. T., M. G. Landinm and L. F. Bosart, 1987, The diurnal valiability of precipitation across the central Rockies and adjacent Great Plains, Month. Wea. Rev., **115,** 1161－1172.

佐藤　浩・恩田善雄, 1974, 富士山周辺の流れの風洞実験, 気象研究ノート, **118,** 55－64.

Scorer, R. S., 1949, Theory of waves in the lee of mountains, Quart. J. R. Meteor. Soc., **75,** 41－55.

Takahashi, N., H. Uyeda and K. Kikuchi, 1993, Doppler radar observation on wave－like echoes generated in a strong vertical shear. J. Meteor. Soc. Japan, **71,** 357－365.

武田栄一・菊地勝弘, 1978, 北海道の局地的大雨, (I)－年間降水量に対する大雨の寄与について－, 北海道大学地球物理学研究報告, **37,** 19－29.

武田栄一・菊地勝弘, 1979, 北海道の局部的大雨, (II)－道北と道南の集中豪雨の降雨機構について－, 北海道大学地球物理学研究報告, **38,** 1－16.

飛塚一敏, 1984, 北海道オロフレ山系の降雨の集中度に関する研究, 北海道大学大学院環境科学研究科修士論文, 62 pp.

Uyeda, H., N. Koizumi, K. Iwanami, R. Shirooka, N. Takahashi and K. Kikuchi, 1991, Structure of wind field and precipitation system around an isolated mountain observed with a Doppler radar during the passage of a typhoon. Preprint Vol., 25th Intn'l Conf. Radar Meteor., Paris, 24－28.

Walter, B. A. Jr. and J. E. Overland, 1982, Lee of the Olympic Mountains, Month. Wea. Rev., **110,** 1458－1473.

湯山　生, 1974, 富士山の雲, 気象研究ノート, **118,** 23－38.