

報 文

2005年10月22日に石狩地方支笏湖方面で発生した大雨の事例解析

児玉 裕樹*・竹田 康生**

Case Study of Heavy Rain Generated near Lake Shikotsu in Ishikari Area on October 22, 2005

Hiroyuki KODAMA and Yasuo TAKEDA

要 旨

北海道石狩地方の支笏湖畔アメダスで極値更新となる1時間61.5ミリの非常に激しい雨を観測した。この大雨は現業作業では十分に予測できないものであったため、その発生要因を調べるために、総観場、アメダス、ドップラーレーダー、ウィンドプロファイラのデータの解析を行った。

その結果、総観場は対流不安定であり、海上風の収束により発生したエコーが胆振地方の海岸部に形成されていた沿岸前線及び山岳にぶつかり、発達していた。また、ドップラーレーダー解析では、大雨をもたらした雨雲の構造にミニスーパーセルのいくつかの特徴が見られた。スーパーセル発生の指標であるストームに相対的なヘリシティ (SRH) をアメダスとウィンドプロファイラのデータから計算した結果、雨雲の停滞を仮定することによってSRHの数値がスーパーセルの発達条件の下限に近くなっていた。

以上の結果を概念モデルにまとめ、今後の実況監視の強化と防災対応のための資料とした。

1. はじめに

2005年10月22日の明け方に、北海道石狩地方石狩南部支笏湖方面で急激に発達した雨雲により、雷を伴った非常に激しい雨が降った。この大雨で支笏湖畔アメダス(北海道千歳市)では、22日3時10分(日本標準時、以下時刻は全て日本標準時)までの1時間に61.5ミリを観測し、1976年の統計開始以来の1時間雨量の極値(52ミリ、1988年8月12日)を更新し、総雨量は128ミリに達した。

支笏湖周辺は、北海道のなかでも有数の大雨地帯であるオロフレ山系の北東に位置し(第1図)、オロフレ山系同様、大雨の多い地域である。オロフレ山系の大雨は1000m級の山岳の南東斜面に暖湿な下層風が長時間吹きつけることでもたらされ(山本1973)、支笏湖方面でも南東風の強い吹き付けのあるときに大雨となりやすいという調査結果がある(佐藤1988)。しかし、本事例では大雨となったのは支笏湖方面のみで、また下層風の強い吹きつけも

* 札幌管区気象台(現新千歳航空測候所帯広空港出張所)、** 札幌管区気象台
(2007年10月18日受領、2008年6月5日受理)

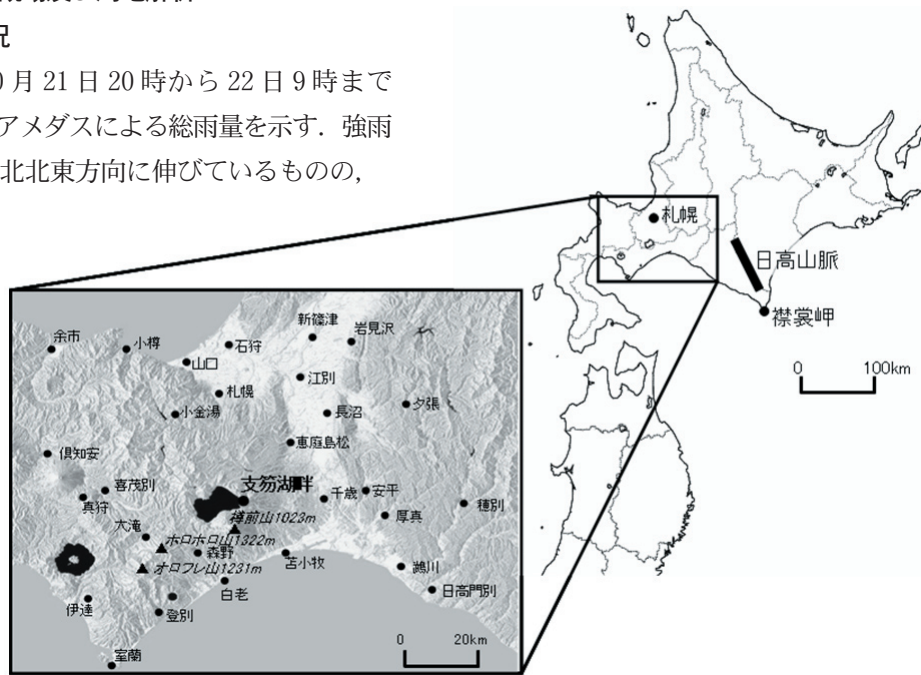
なかった。つまり、オロフレの大雨の典型的なパターンではなかったことで、予報担当者の知見が十分に生かされなかった。また、直近の領域モデルやガイダンスでも大雨の予想はされていなかったこともあって、今後の防災対応のための知見を深めることを目的として、大雨の経過を解析し、要因を考察した。

100ミリを超えるのは支笏湖畔アメダス付近のみの局地的な大雨であったことが分かる。第3図に、支笏湖畔アメダスにおける22日0時から4時までの10分間降水量とその積算値の時系列を示す。2時頃までは10分間に3から4ミリの降水が続いていたが、2時から3時過ぎにかけて強まり、10分間に10ミリ以上の降水が続いた。この強雨により、積算雨量も数時間で100ミリに達した。

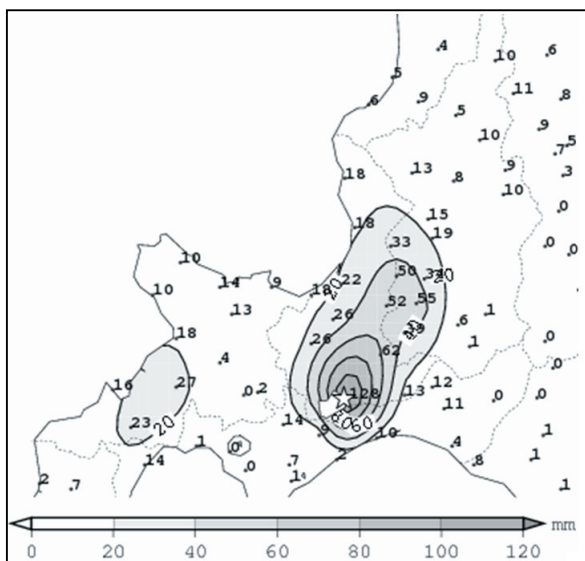
2. 実況と総観場及び局地解析

2.1 雨の実況

第2図に、10月21日20時から22日9時までの支笏湖周辺のアメダスによる総雨量を示す。強雨域は支笏湖から北北東方向に伸びているものの、



第1図 支笏湖周辺の地形図。丸印は気象官署とアメダス、三角印は支笏湖周辺の主要な山岳を示す。

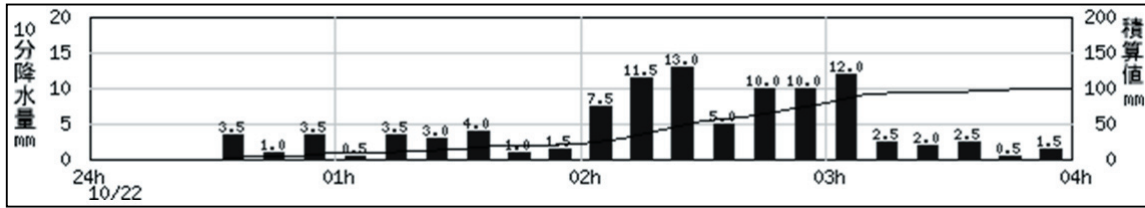


第2図 アメダスによる総雨量分布図 (2005年10月21日20時から22日9時)。星印は支笏湖畔アメダスの位置を示す。

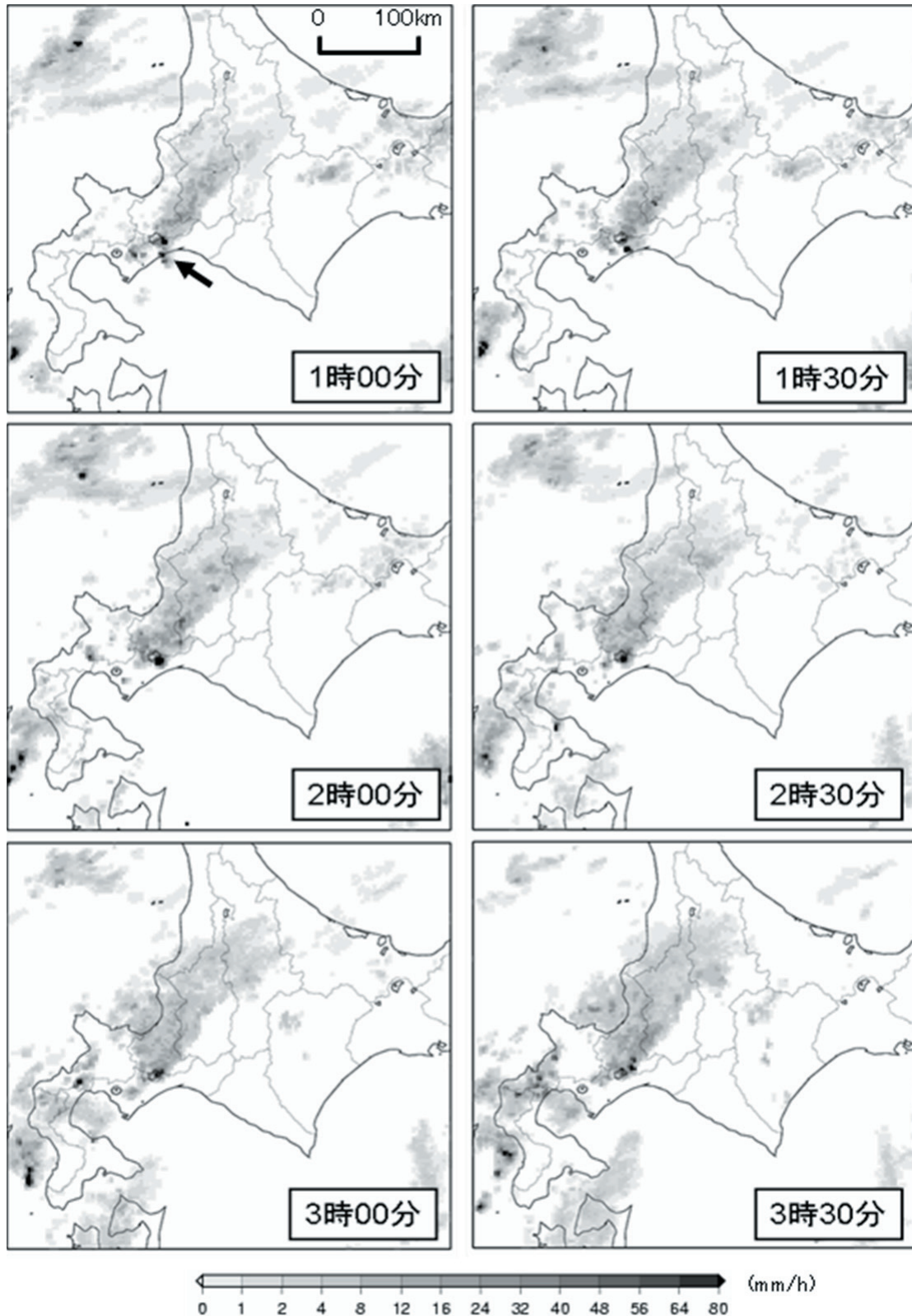
雨が強まった時間帯のレーダーエコーを第4図に示す。この中で、1時に苫小牧市付近に見られるやや発達したエコー(矢印)に注目した。このエコーは苫小牧市の南海上で発生し、支笏湖方面へゆっくりと北上、2時頃には支笏湖の南に達した。2時から3時の間、このエコーは支笏湖付近でほとんど停滞、発達し、非常に激しい雨をもたらした。その後、このエコーは弱まりながら、既にある雨域の南縁に沿う形で北東方向へ動いていった。

2.2 総観場解析

第5図に10月21日21時の地上天気図及び高層客観解析図を示す。地上天気図(第5図a)によると、北海道付近は千島近海から北海道の西海上にか



第3図 支笏湖畔アメダスの10分間雨量と積算値の時系列 (2005年10月22日0時から4時).



第4図 10月22日1時00分から3時30分の30分毎のレーダー画像. 矢印は注目するエコーを示す.

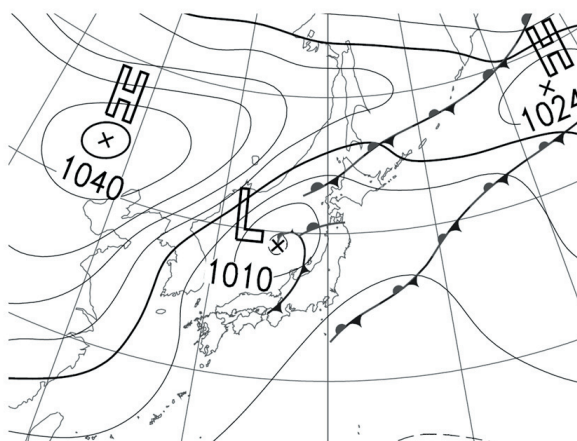
けて解析されている停滞前線に向かって南から暖気が移流する場であった。また、千島の東の高気圧と日本海中部の低気圧との間で気圧の傾きがやや急になっており、高気圧の縁辺流が南東風として北海道の太平洋側へ流れ込んでいた。

500hPa (第5図b) では、朝鮮半島の南から九州北部、本州の日本海側、北海道へかけて寒帯前線ジェット気流による強風軸が解析される。700hPa (第5図c) では、宗谷海峡から日本海へ延びる湿潤域が存在するものの、北海道から東日本にかけては湿数16度以上の領域が広がり、非常に乾燥していた。この乾燥域は、第5図aの日本の東の停滞前線の後面で前日まで解析されていた移動性高気圧による名残と思われる。

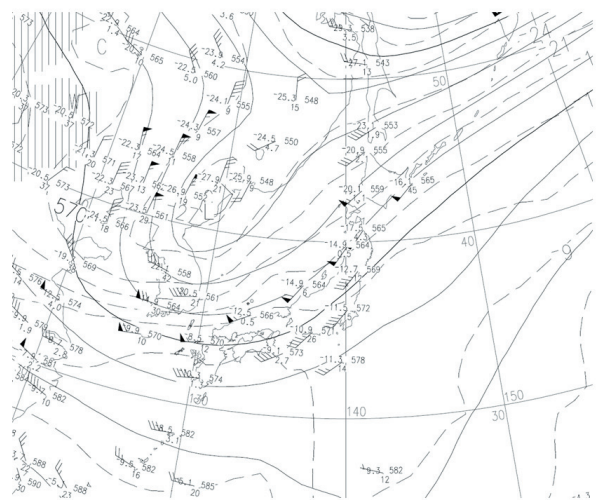
一方、850hPa (第5図d) では、北海道の北部から朝鮮半島にかけて前線帯が見られ、東北と北海道ではそれに向かう南寄りの風が観測されている。

この前線帯は、寒冷低気圧の東進と深まりによって次第に明りようとなり、北海道の日本海側と太平洋側は湿数3度以下の湿り域となっている。

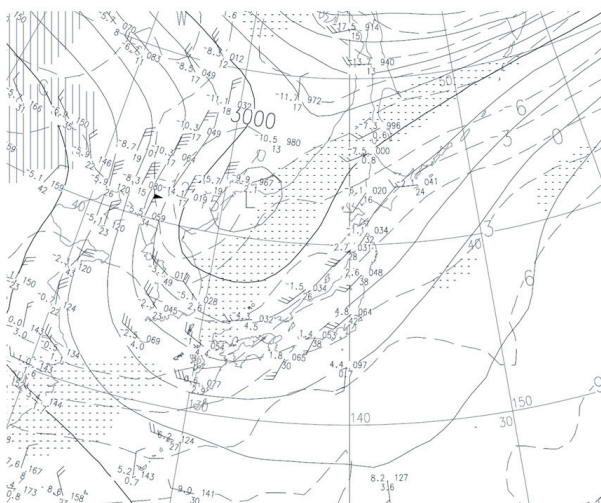
第6図に、10月21日21時の札幌高層観測の鉛直プロファイルを示す。大気の安定度を示す、ショワルター安定指数 (SSI) は5.7で、特に不安定とは言えない。しかし、第5図の高層客観解析図でも見られたとおり、700hPaから650hPa付近にかけては非常に乾燥しているため、相当温位の鉛直プロファイルは地上から600hPa付近にかけてはほぼ中立となっている。中層の乾燥域は、第7図に示すMTSAT-1Rの水蒸気画像の暗域でもやや不明りようながら確認できる。対照的に750hPa付近から下層ではかなり湿った暖気が南から南南西の移流となっていることがわかる。このように「対流不安定」の状態であったことが大雨の要因の1つであると考えられる。



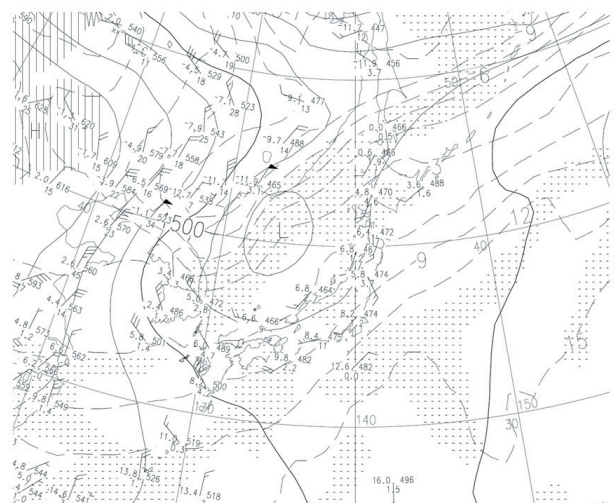
(a)



(b)

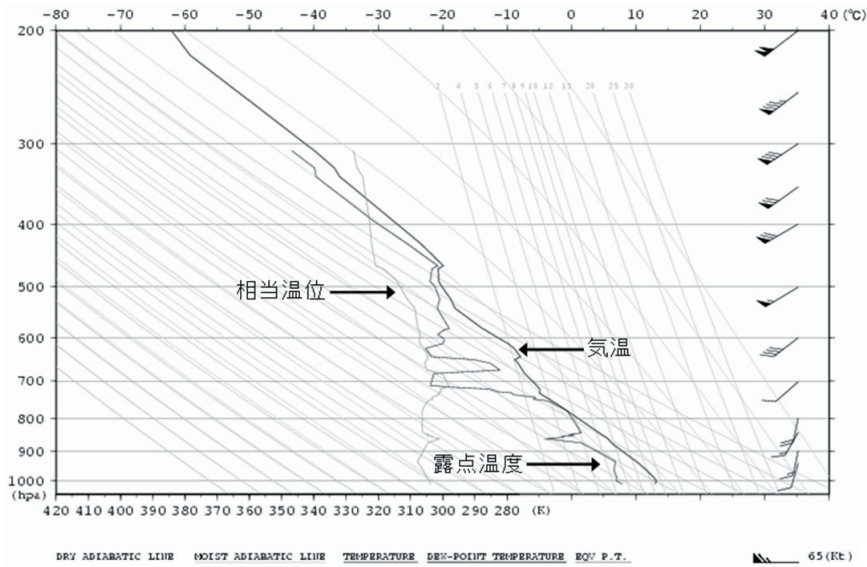


(c)



(d)

第5図 10月21日21時の地上天気図および高層客観解析図。(a) 地上天気図、(b) 500hPa、(c) 700hPa、(d) 850hPa。



第6図 10月21日21時の札幌高層観測の鉛直プロファイル.

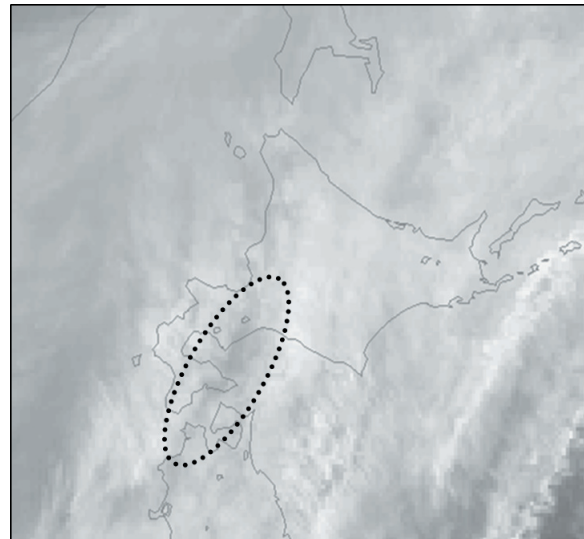
2.3 下層風解析

総観場のところで 850hPa の暖気移流を確認したが、さらに地上の気流について調べた。

第8図に、22日2時の毎時大気解析による地上風の流線を示す。北海道の太平洋側では、第5図で見られた停滞前線に向かう風と千島の東にある高気圧の縁辺流により、南東の風が解析されている。支笏湖の南では流線が込んでおり、地上風の強化が示唆される。これは、襟裳岬を指向する風が襟裳岬を迂(う)回して日高山脈の西側に回りこみ、苫小牧沖で地形の影響の小さい南東風と収束し、苫小牧沖で海上風が強化されたこと、オロフレ山系から樽前山にかけての1000m級の山岳の影響を受けて、支笏湖の南でさらに収束が強化されたことによると考えられる。このような「地形による地上風の強化」が大雨の2つ目の要因であると考えた。

2.4 局地解析

次にメソスケールの場を調べるために、アメダスを使った局地解析を行った。第9図に、支笏湖畔アメダスで雨が強まり始めた22日2時のアメダスの風、高度補正した気温を示す。上川・空知地方、また後志地方の羊蹄山麓では夜間の冷却により気温が10℃前後まで下がっており、その冷気が北風によって石狩南部や胆振地方へ流入している。特に空知地方では北から北北東のやや強い風となっている。一



第7図 10月22日1時のMTSAT-1Rの水蒸気画像。点線は暗域を示す。



第8図 10月22日2時の毎時大気解析による地上風の流線.

方、苫小牧市から室蘭市にかけての胆振地方では、前節で述べた海上からの南東風によって暖気が流入し、気温は15から16℃となっている。この2つの気塊が、石狩南部から胆振地方の海岸部でぶつかっており、幅20から30kmの間で温度差5℃近い気温の不連続線又は沿岸前線が形成されている。エコーが発達した支笏湖付近には樽前山などの1000m級の山がいくつかあり、地形による強化とともに、支笏湖で強雨をもたらしたエコーがまっすぐに北上せず空知方面の冷氣にのりあげる形で移動したことから、この付近に沿岸前線が形成されていたことも重要であり、「地形効果と沿岸前線の形成」が大雨の3つ目の要因であると考えた。

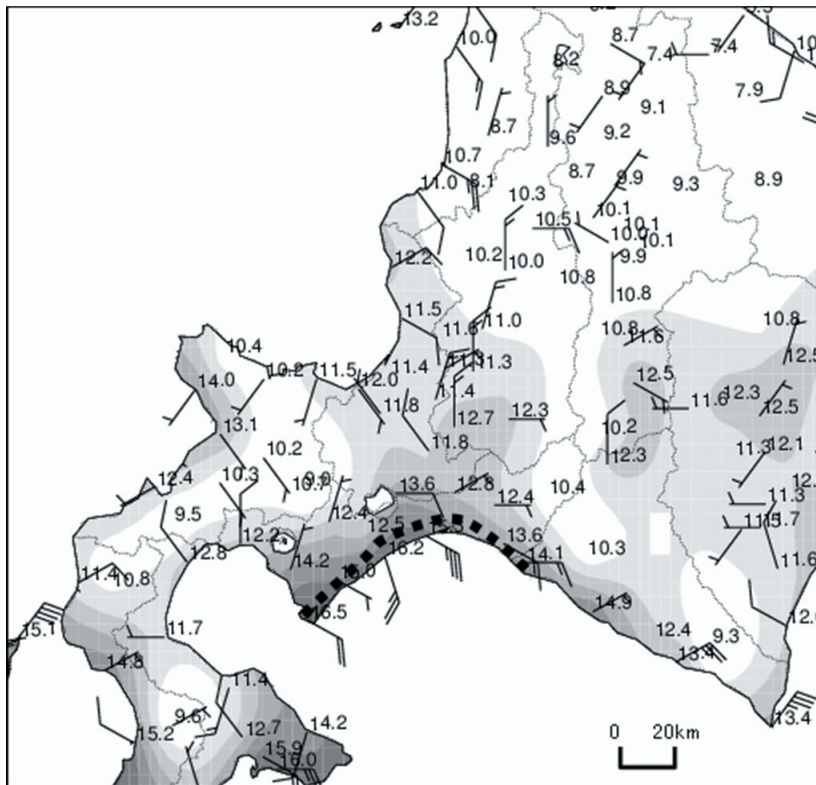
この章の解析では、今回の大雨の背景として以下のように考えられる。

- ①対流不安定
- ②地形による地上風の強化
- ③地形効果と沿岸前線の形成

3. 新千歳測候所航空気象ドップラーレーダーの解析

大雨をもたらした2時から3時にかけての雨雲の構造を、支笏湖畔アメダスの約25km東に位置する新千歳航空測候所の航空気象ドップラーレーダーを使い、解析した。

第10図に、エコーが最も発達した時間帯である22日2時33分の仰角別のドップラー速度とエコー反射強度の分布を示す。ドップラー速度は、寒色系がレーダーサイトに近づく成分、暖色系がレーダーサイトから遠ざかる成分を表しており、仰角2.7度(高度約1400m)のドップラー速度(第10図a)では図の円で示すように、樽前山の北東、支笏湖の東に反時計回りの強い循環が見られる。同時にこの部分は、強い反射強度が観測されている(第10図c)。一方、仰角1.1度(高度約600m)のドップラー速度(第10図b)では、発散の領域が見られ、そのすぐ東では収束が見られたが、これは地上のガストフロントに対応していると推測される。そして、発散領域に対応して強い反射強度が観測されて



第9図 10月22日2時のアメダス解析(風、高度補正した気温)。陰影は気温11℃以上を表し、1度毎に濃くなる。太点線は沿岸前線を示す。

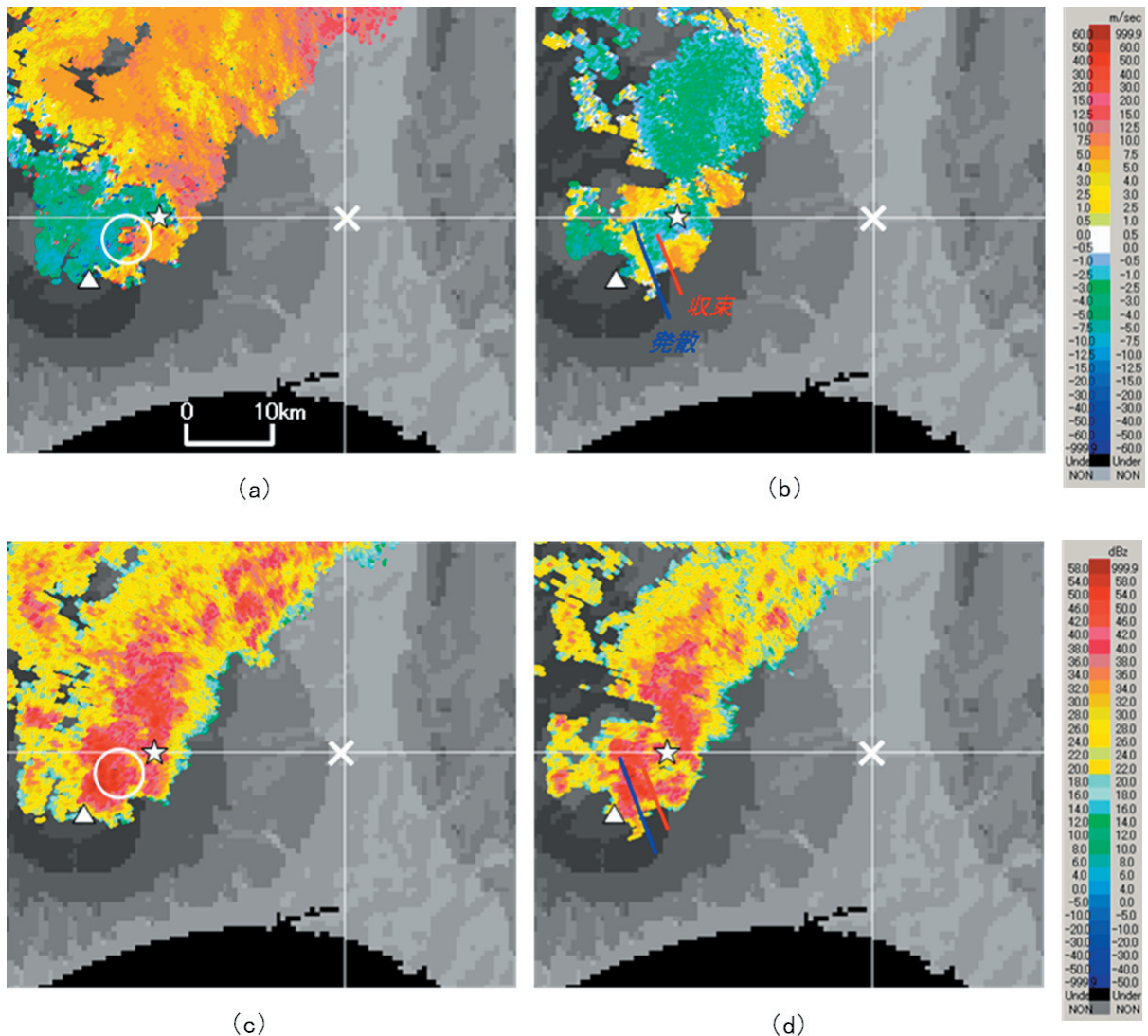
いた(第10図d). さらに, どちらの仰角においても, 強い反射強度が観測された南東側はBWER(エコーの弱い仕切られた領域)と呼ばれる弱いエコー域となっており, 全体としてエコー形状がフック状となっていた.

次に, 雨雲の立体構造を調べるために, エコーの鉛直断面の解析を行った. 第11図に22日2時22分のレーダーサイトからの等距離エコー断面を示す. 最も反射強度の強い領域を切ると(第11図a), 2.3節で述べた支笏湖の南で強化されていた下層風の風向は南から南東風のため, 支笏湖付近の強エ

コー域(図の矢印で挟まれた領域)では下層風に対してほぼ平行に切ったエコー断面となる. エコートップは約3kmで, 高度が高くなるにつれて反射強度の強い部分が, 下層の風上(南)に向かってせり出すオーバーハングといわれる構造が見られた(第11図b).

以上のドップラーレーダーの解析から分かった雨雲の構造の特徴をまとめる.

- ①中層の強雨域で強い反時計回りの循環
- ②下層の強雨域で発散, ガストフロントに対応すると思われる部分での収束



第10図 10月22日2時33分の新千歳ドップラーレーダーによるドップラー速度と反射強度. (a) 仰角2.7度(高度約1400m)のドップラー速度, (b) 仰角1.1度(高度約600m)のドップラー速度, (c) 仰角2.7度の反射強度, (d) 仰角1.1度の反射強度. ドップラー速度はレーダーサイトに近づく向きが寒色系, 遠ざかる向きが暖色系. ×印は新千歳航空測候所, 星印は支笏湖畔アメダス, 三角印は樽前山を示す. また, 円は仰角2.7度で見られた低気圧性の循環, 線分は仰角1.1度で見られた発散(青), 収束(赤)を示す.

③強雨域周辺のフック状エコー

④下層風の風上に向かうオーバーハングエコー

これらの特徴は古典的なスーパーセル型ストームの特徴とよく一致する(例えば小倉 1999). しかし, アメリカなどで観測されるスーパーセルは, 水平スケールが10から40km, 鉛直スケールが10km以上ある(小倉 1999)のに対し, 今回の雨雲は第10図と第11図に示したとおり, 水平スケールが5から10km, 鉛直スケールはエコートップが3km程度であり, 古典的なスーパーセルと比較すると空間スケールが半分以下である. また, 周囲の雨量計やレーダーエコーの解析から, 2時から3時の間の約1時間がこの雨雲の持続時間であり, 1時間から数時間の時間スケールを持つ一般的なスーパーセルに比べると短い.

上記のような特徴が見られたこと, 低いエコートップながら発雷, 非常に激しい降水があったことから, 今回の大雨をもたらした雨雲は Suzuki et al. (2000) が関東地方で発生した竜巻の親雲として解析したものと同様の小型のスーパーセル(ミニスーパーセル)であると推定される.

4. ウィンドプロファイラデータを用いたヘリシティ (SRH) 解析

ウィンドプロファイラデータを用いてスーパーセルの発達指標の1つとされているストームに相対的なヘリシティ (SRH) を計算し, スーパーセル発達の可能性を調べた.

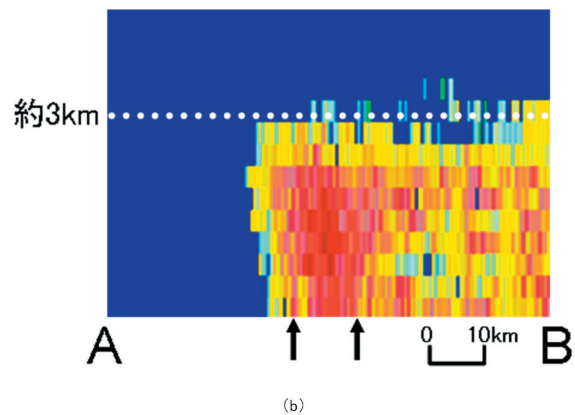
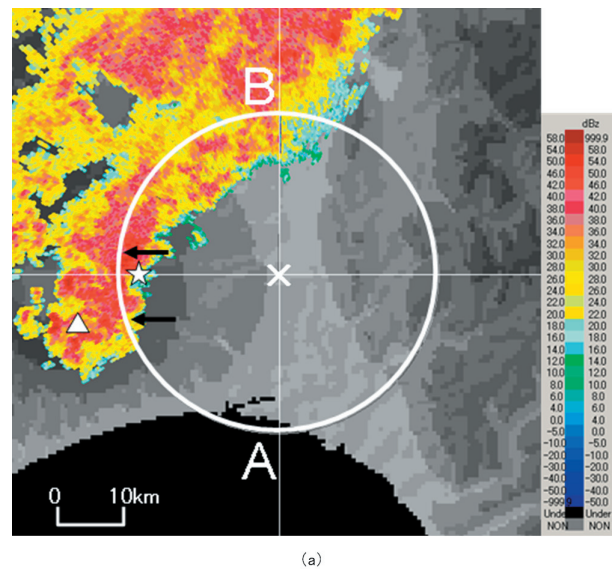
対流雲の発達の可能性については, 対流有効位置エネルギー (CAPE) やシヨワルター安定指数 (SSI), K-index といった鉛直安定度の指数を用いて議論されるが, それに加えてスーパーセルの場合, 発達条件の一つに「大気下層の強い鉛直シア」が挙げられる. これは, 下層の強い鉛直シアによって水平に軸を持つ渦管が形成され, この渦管が対流雲中の上昇流によって鉛直方向へ傾けられること (傾斜効果) によって鉛直渦度 (上昇流) が強化され, さらに対流が活発化するという理論である. このため, スーパーセルの発達には鉛直シアの強さと, それがどの程度ストームに取り込まれるかが重要となり, この

効果を定量的に求めたものが SRH で, 以下の式によって定義される (大野 2001).

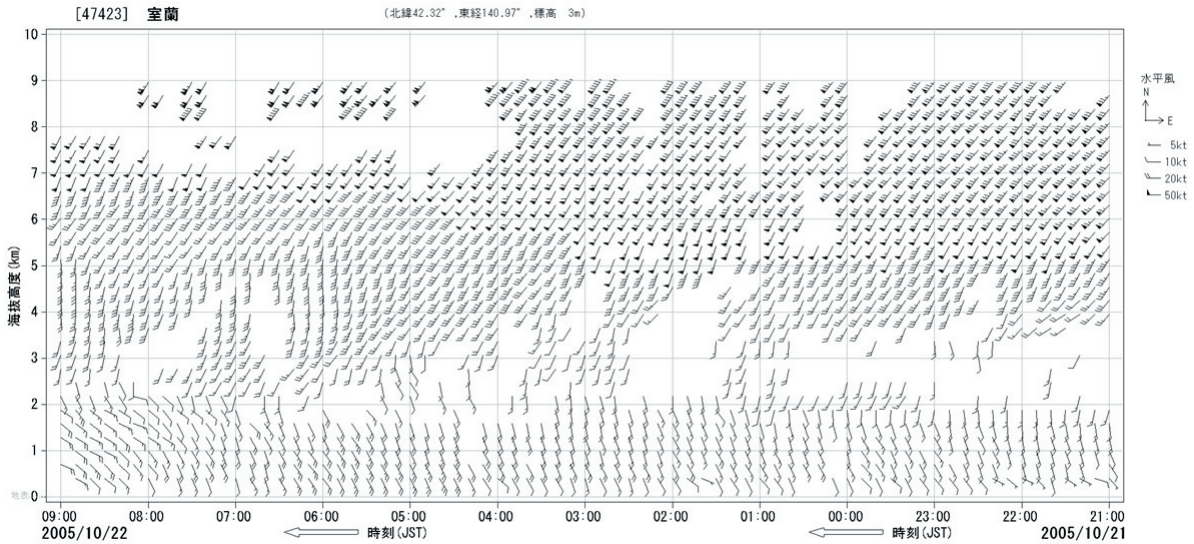
$$SRH = \int_0^{3km} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \left(\mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \right) dz$$

ここで, \mathbf{k} は鉛直上向きベクトル, \mathbf{V} は風ベクトル, \mathbf{C} はストームの移動ベクトルを表し, SRH の単位は m^2/s^2 である. 事後解析から実際のストームの動きを調べたところ, 第4図に示したとおり最も発達した時間帯にエコーはほとんど停滞していたことから, ストームの移動速度は0 ($\mathbf{C} = 0$) として SRH の計算を行った (以下, SRH ($\mathbf{C} = 0$)).

SRH の計算は, 気象庁のウィンドプロファイラ観測網 (WINDAS) のうち, 支笏湖畔アメダスに



第11図 10月22日2時22分の(a)仰角2.7度の反射強度, 印は第10図と同じ. (b) aのAB間断面図. 矢印で挟まれた部分は, 注目するエコー域を示す.



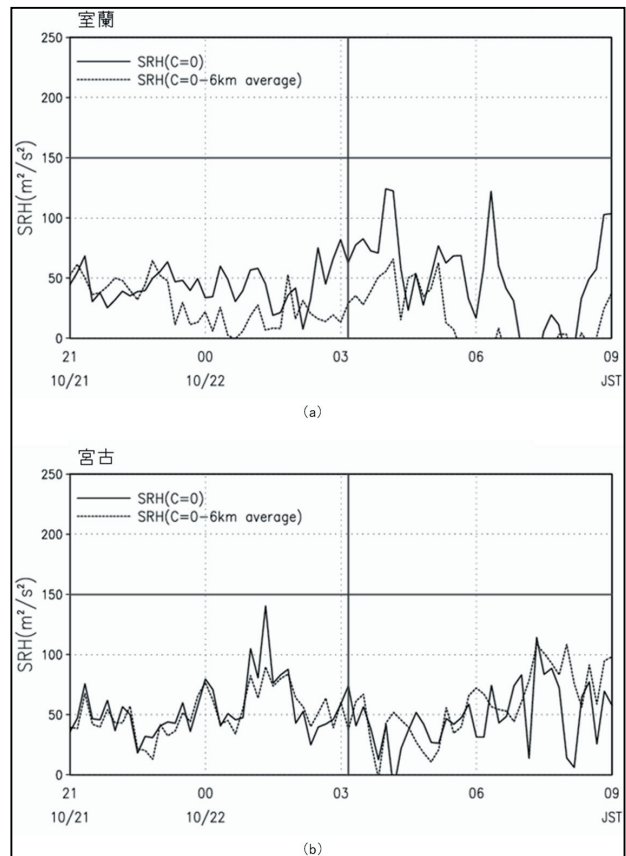
第12図 10月21日21時から22日9時のウィンドプロファイラ室蘭の時系列.

最も近い観測点である室蘭（北海道室蘭市）及び下層気流の上流側にある宮古（岩手県宮古市）の2地点について行った. いずれの地点も最下層データとしてアメダスの風向・風速10分値データを使用した. 第12図に, 計算に使用した室蘭のウィンドプロファイラの時系列データを示す. 第12図で, 高度2から4kmでデータ抜けがあるが, これは第2.2節で述べた中層の乾燥域の存在を表している. この影響を考慮するために, データが5個未満の時間は計算不可能として $SRH = 0$ と処理した.

ストームの移動速度は, 対象とするじょう乱のレーダーエコーの移動ベクトルから計算したが, この方法では事後の解析でしか求めることができない. 実況監視においてリアルタイムでSRHを計算するためには, ストームが平均風によって流されると仮定して移動ベクトルを算出する方法が一般的である. 鈴木ほか(2005)は, 観測時刻における6000m以下のウィンドプロファイラのベクトル平均をストームの移動ベクトルとして与えて「簡易SRH」を計算している. 本調査においても, 同じ方法で簡易SRHを計算した. その場合, 6km以下の平均風速・風向を求めるが, 本事例ではおおむね南南西約10m/sであった.

SRHの計算結果を第13図に示す. 図中の22日3時過ぎの縦線は支笏湖畔アメダスで61.5mmの1時間雨量を観測した時刻を表す. また, 図中の横実

線 ($SRH = 150\text{m}^2/\text{s}^2$) は, 米国でスーパーセルの発生する場合のSRHの下限とされている値である(大野 2001). 支笏湖に近い室蘭では, 大雨の前後



第13図 10月21日21時から22日9時のSRH時系列. (a) 室蘭, (b) 宮古. 実線はストームが停滞していたとした場合のSRH, 破線は簡易SRH.

の時間帯で SRH ($C = 0$) の値が大きく、22 日 2 時から 4 時ころにかけては 80 から $130\text{m}^2/\text{s}^2$ まで上昇した。一方、簡易 SRH は、最大でも $60\text{m}^2/\text{s}^2$ 程度であった。下層気流の上流に位置する宮古では、SRH ($C = 0$) と簡易 SRH に大きな差はないが、22 日 1 時過ぎに SRH ($C = 0$) で $140\text{m}^2/\text{s}^2$ まで上昇した。

以上の結果から、室蘭で SRH ($C = 0$) が簡易 SRH より大きな値となったことは、雨雲が場の風に流されず停滞することによって、雨雲内部の水平渦の傾斜効果が大きくなることを示唆している。つまり、支笏湖畔に大雨をもたらした雨雲は胆振地方に形成された沿岸前線上で停滞したことによって、鉛直シアによって形成された水平渦がより雨雲内に取り込まれ発達したと考えられる。また、室蘭では SRH ($C = 0$) は現象の約 1 時間前から上昇をはじめ、約 1 時間後に最大となったが、宮古では現象の約 2 時間前に最大となった。今回のような下層風場に注目した場合、下層気流の上流にある観測点で SRH 上昇のシグナルをつかむことができる可能性を示唆している。

SRH は風速の場のみから計算される指数である。スーパーセルの発達の議論においては、SRH が大きいことだけではなく、鉛直の安定度が悪いということが重要である。強い鉛直シアによって水平渦が形成されたとしても強い上昇流がないと鉛直方向に曲げられないからである。本事例の場合は、第 6 図に示したように対流不安定であったことから、この条件を満たしているといえる。

5. まとめ

2005 年 10 月 22 日の明け方、北海道石狩地方の支笏湖畔アメダスで観測開始以来の極値更新となる大雨が発生した要因を、アメダス、ドップラーレーダー、ウィンドプロファイラの各種データを用いて調査した。

北海道付近は、下層は千島近海から北海道の西海上にかけて停滞する前線に向かって暖かく湿った南東風が流入しやすい場であった。加えて、日高山脈の影響で襟裳岬を迂 (う) 回した風と地形の影響を

受けない風の収束により、支笏湖の南の苫小牧沖で強化されていた。一方、中層は乾燥しており、対流不安定な場であった。

さらに支笏湖の南の胆振地方の海岸部では、沿岸前線が形成されており、海上から流入したエコーはこの沿岸前線や樽前山などの地形効果により発達・停滞した。

新千歳航空測候所のドップラーレーダーのデータを解析した結果、着目したエコーに対応して、中層に強い低気圧性循環、下層の発散やガストフロントの特徴、オーバーハングエコーが見られたことから、この雨雲は小型のスーパーセル(ミニスーパーセル)であると推定した。

ウィンドプロファイラデータを用いて、スーパーセルの発達指標の一つであるストームに相対的なヘリシティ (SRH) が大雨の前で上昇したことが確かめられた。また、下層気流の上流にある観測点で SRH 上昇のシグナルをつかむことができる可能性を示唆した。

得られた結果を今回の大雨発生概念モデルとして第 14 図にまとめた。鉛直構造が対流不安定のなか、下層風の強化や沿岸前線によって SRH が上昇、つまり水平渦の傾斜効果が加わり、雨雲がミニスーパーセルにまで発達したと考えた。また、本事例では大雨の数時間前に下層風の上流に位置する宮古のウィンドプロファイラデータによる SRH の上昇が見られた。大雨の監視時には、鉛直安定度や局地前線、収束等の把握が重要であるが、加えて SRH を面的に監視することによって雨雲の発達ポテンシャルの考察をさらに深めることができるであろう。

これまでオロフレ山系から支笏湖にかけての大雨は、暖湿で強い下層風の南東斜面への吹きつけ、つまり地形による強制上昇で説明されてきた。今回の調査では、オロフレ山系の典型的な大雨パターンのような強い吹きつけは見られなかったが、中層の強い低気圧性の循環という、雷雲の構造に起因する降水の強化が示唆された。近年、観測システムはウィンドプロファイラが全国展開され、さらに全国的にレーダーのドップラー化が進められている。北海道でも平成 19 年度に函館レーダーと釧路レーダーが



第14図 概念モデル.

ドップラー化された。これまで単に地形や沿岸前線の強制上昇による降水強化と考えられていた大雨についても、新しい観測システムを取り入れることによって、雷雲の構造に起因する降水の強化を示すSRHやメソサイクロンを監視し、きめ細かな防災対応につながる可能性がある。

今後、事例解析を増やし、概念モデルから定量的な予測のできるモデルにしていきたい。

参考文献

- 大野久雄 (2001) : 雷雨とメソ気象. 東京堂出版, 309pp.
- 小倉義光 (1999) : 一般気象学 (第2版). 東京大学出版会, 308pp.
- 佐藤信機 (1988) : 石狩南部の大雨事例解析 (昭和63年8月11日から13日にかけての大雨). 札幌管区気象研究会誌, 165-166.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno and H. Nirasawa (2000) : Tornado-producing mini supercells associated with typhoon 9019. Mon. Wea. Rev., 128, 1868-1882.
- 鈴木和史・金田昌樹・田畑明 (2005) : 突風をもたらした低気圧の特徴と突風発生予兆の把握について. 気象庁研究時報, 57, 63-80.
- 山本乾輔 (1973) : 胆振地方の大雨について (総合報告). 気象庁研究時報, 25, 195-211.

