

雪雲発生要因である冷氣流に関する 数値実験的研究

A Numerical Study on a Cold Air Flow Which Causes Snow Clouds Around Sapporo City

中山 恵介*・中嶋一彦**・長谷川和義***・藤田 睦博****

By Keisuke Nakayama, Kazuyoshi Hasegawa and Mutsuhiro Fujita

Purposes of this study are to represent a cold air which occurs on the land surface in winter seasons and to calculate cold air flow on Feb. 17-18, 1996 when snow clouds accompanying a cold air flow appeared around Ishikari Bay. We assumed that a cold air is caused by radiative cooling effect and differential equations are given considering bouyancy effects. By Kaito balloon observation a cold air flow extended to Ishikari Bay the best at 6:00 on Feb. 18. Numerical calculation result indicates that an extended front shape of a cold air flow which causes snow clouds by an ascend wind agrees with an actual snow clouds' shape at 6:00. And we found that a resistance coefficient between a cold air flow and monsoon and an upper wind are important to predict an extended cold air flow.

Key Words : cold air flow, radiative cooling effect, Ishikari river watershed, Radar data, resistance coefficient

1. はじめに

冬期石狩湾において多くの種類の降雪パターンが発生し、石狩地方に降雪をもたらす。その一つとして、冷氣流をともなった雪雲が存在する。冷氣流が石狩地方の地上から海上へと、あたかも前線のフロントを形成するごとく張り出し、雪雲を形成する。発生した雪雲は季節風に運ばれ石狩周辺に降雪をもたらす。この降雪現象は、冷氣流をともなっているため一般の気象予報では予測しがたく、さらに年に数回～10数回発生している¹⁾ため、雪雲発生・推移予測を行うことが除雪対策において必要とされている。雪雲は冷氣流先端で誘起される上昇流を起因として発生することから、冷氣流張り出し先端位置を知ることが雪雲発生予測において重要であると思われる。そこで、本研究は冷氣流に関して論ずる。

石狩湾上に冷氣流をともない発生する雪雲に関する研究として、石狩川流域のアメダスに着目して、冷氣の流下のような降雪パターンと気圧配置について論じた論文¹⁾がある。アメダスにより計測された地上風が石狩川流域を流下して行き海上にまで吹き出すことが確認されている。その際、石狩川流域の高高度と低高度の地上観測温度差から、冷氣流は外部風より温度が低く放射冷却に起因して冷氣流が起こっていることを示している。冷氣流そのものの観測としては、バルーンを用いて冷氣流を計測したもの²⁾がある。冷氣流先端のフロント上の風の場合での上昇流の発生が確認されている。冷氣流を取り扱ったものではないが、海風の動的挙動に関して実験により考察したもの^{3) 4) 5)}がある。海風侵入方向と同方向に移動するプレートを用いて、海風フロント形状の時間的な変化および3次元構造の検討を行い、外部の風速・水深と海風の風速・水深との関係を調べている。他に、石狩湾上に陸風が長期間(2日程度)発生し雪雲を形成した場合に関する研究⁶⁾がある。

これらは冷氣流の構造形態に関して有用なデータを与え、フロントで発生する雲に関して述べたものであるが、冷氣流の時間的な張り出し距離の変化、冷氣流と外部風との抵抗について論じたものではない。上述の通り雪雲が冷氣

- | | | | | | | |
|------|------|----|-------|-----|-------|-------------------------|
| * | 正会員 | 工修 | 北海道大学 | 工学部 | 土木工学科 | (〒060 北海道札幌市北区北14条西7丁目) |
| ** | 学生会員 | | 北海道大学 | 工学部 | 土木工学科 | (〒060 北海道札幌市北区北14条西7丁目) |
| *** | 正会員 | 工博 | 北海道大学 | 工学部 | 土木工学科 | (〒060 北海道札幌市北区北14条西7丁目) |
| **** | 正会員 | 工博 | 北海道大学 | 工学部 | 土木工学科 | (〒060 北海道札幌市北区北14条西7丁目) |

流先端位置によって大きく発生位置を変えることから、冷気流張り出し位置を正確に知ることが、重要であることが分かる。そこで、本研究の目的は、冷気の発生は放射冷却によるものとし石狩川流域を流下させ実現象との検討を行い、予測可能であることを示すことである。

2. 放射冷却による冷気の発生

冬期夜間における放射冷却は近藤^{7) 8) 9) 10)}により提案された方法が存在する。夜間における放射冷却を考慮するのであるから、大気放射量を L_0^1 とし、夕刻30分前(ここで夕刻とは日射がなくなる時点を示す)の値と等しいとすると、夕刻における正味放射量を用いて式(1)が成り立つ。

$$Rn_0 = \sigma T_0^4 - L_0^1 \quad (1)$$

ここで、 Rn_0 : 夕刻の正味放射量、 σ : ステファン・ボルツマン係数、 T_0 : 夕刻の温度である。最大冷却時において $Rn_0=0$ であるので、最大温度降下時には式(2)の温度差が生じる。Groenによれば大気放射量は時間と共に変化するの、正味放射量を式(3)に定める。ここで f は近藤により実験式が提案されており式(3)中に示すとおりである。

$$\Delta T = T_0 - \left(\frac{L_0^1}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (2) \quad Rn = Rn_0 - f(T_0 - T) \quad (3)$$

$$f = 4\sigma T_0^3$$

以上の条件の下で式(4)に示される熱伝導方程式を式(5)の初期条件と式(6)の境界条件により解くと、式(7)の解が得られる。尚、正味放射量 L_0^1 は実験式(8)により求めることが出来る。

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4) \quad T(z,0) = T_0 \quad (5)$$

$$T_0 - T = \Delta T \times P(t') \quad \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = Rn_0 - f(T_0 - T_{(0,t)}) \quad (6)$$

$$T_{(z,t)} = T_0 - \frac{Rn_0}{f} \left\{ -\text{Exp} \left(\frac{f}{\lambda} z + \frac{f^2 t}{C_p \lambda} \right) \times \text{Erfc} \left(\frac{z}{2} \sqrt{\frac{C_p}{t \lambda}} + f \sqrt{\frac{t}{C_p \lambda}} \right) + \text{Erfc} \left(\frac{z}{2} \sqrt{\frac{C_p}{t \lambda}} \right) \right\} \quad \text{Erfc}(\gamma) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\gamma \text{Exp}(-\gamma^2) d\gamma \quad (7)$$

On water : $a=7.5$, $b=237.3$
On ice : $a=9.5$, $b=265.3$
T_d : dew-point temperature

$$L_0^1 = (0.74 + 0.19x + 0.07x^2) \sigma T_0^4 \quad \omega_{TOP}^* = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ -\frac{0.622}{g} \int_{p_n}^{p_{n+1}} \frac{e}{p - 0.378e} \left(\frac{p}{p_0} \right) dp \right\} \quad (8)$$

$$e_{SAT} = 6.11 \times 10^{a T_d / (b + T_d)}$$

ここで、 C_p : 新雪の熱容量、 λ : 新雪の熱伝導率、 ω_{TOP}^* : 過降水量、 e : 飽和水蒸気圧、 T_d : 露点温度である。周囲より冷やされた地表面に近い大気の放射冷却の影響がおよぶ高さは、式(7)で $z=0$ としたときに示される地表面温度が時間変化をしているが、その時間変化は最初2~3時間急激に変化しその後ほぼ一定値を取ることから、地表面温度の時間変化を考慮しない境界条件の下で決定した。放射冷却による大気冷却影響高さは、地表面の冷却温度のおよそ10%程度の温度を示す高度とした。式(9)に大気冷却影響高さの時間変化式を示す。

$$z = 2 \sqrt{\frac{\lambda_a t}{C_{pa}}} \quad (9)$$

ここで、 C_{pa} : 大気の熱容量、 λ_a : 大気の熱伝導率である。式(9)が冷却された温度差に関する関数となっていない点が、取り扱い易く、分かりやすい式としている。

3. 数値計算による冷気流の再現

冷気流の発生・流下を再現する方法として、実現象を厳密な方程式で表現し3次的に解く方法が最も再現性は良いと思われるが、冷気流の影響範囲の推定および計算時間から考慮して、鉛直方向に積分された方程式を用いることとする。更に、実地形へと計算結果を適応し計算結果の検討を行う。

3. 1 基礎方程式

式(10)・式(11)にx方向・y方向の運動方程式、式(12)に保存式を示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + \frac{f_i}{h} (u - U) u - U = -\epsilon g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\alpha(\theta - \theta_T)}{\rho_T} g \frac{\partial h}{\partial x} - \epsilon h \frac{\partial z}{\partial x} \quad (10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + \frac{f_i}{h} (v - V) v - V = -\epsilon g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\alpha(\theta - \theta_T)}{\rho_T} g \frac{\partial h}{\partial y} - \epsilon h \frac{\partial z}{\partial y} \quad (11)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u h}{\partial x} + \frac{\partial v h}{\partial y} = R \quad (12)$$

ここで、 U : x 方向外部風速、 V : y 方向外部風速、 u : x 方向風速、 v : y 方向風速、 h : 冷気流高さ、 z : 地面高さ、 f : コリオリパラメータ、 f_i : 抵抗係数、 $\varepsilon := (\rho_T - \rho_0)/\rho_T$ 、 ρ_T : 観測された冷気流密度、 ρ_0 : 外部風速密度、 θ_T : 冷気流温度、 θ : 放射冷却による降下した温度、 R : 放射冷却による冷気発生割合である。式(10)・式(11)の左辺第3項にコリオリ力が考慮されている。冷気流において、外部風と冷気流の摩擦力と、地上と冷気流との摩擦を比較すると前者が卓越していること¹¹⁾から、式(10)・式(11)の左辺第4項において冷気流と外部風との摩擦を考慮した。尚、抵抗係数 f_i については冷気流高さ $h \approx 0\text{m} \sim h = 300\text{m}$ 程度の範囲を取ることから、塩水と淡水の2層流ではあるが、内部フールド数の大きな変化による抵抗係数 f_i が導出されている玉井ら¹²⁾の式を用いることにする。式(13)に抵抗係数 f_i を示す。放射冷却により低下した温度による冷気流密度の変化を直接方程式に考慮することを、計算の安定上行わなかった。そのため、式(10)・式(11)の右辺第2項に浮力項に温度変化による冷気流の挙動の変化を考慮したものを与えた。計算結果において、冷気流張り出し距離は推定できるが、冷気流高さは実際より低いものになることを示している。本研究における目的は、雪雲を発生させる冷気流先端部分の位置の推定であり、冷気流高さではないことからこの仮定は妥当であると思われる。式(12)の冷気発生割合 R は、式(9)を時間微分した式(14)を与えた。

$$f_i = \frac{0.0896}{2} \frac{v^{1/2} (g\alpha|\theta - \theta_T|)^{3/4} h^{3/4}}{U^{3/4}} \quad (13) \quad z = \sqrt{\frac{\lambda_a}{C_{pa}t}} \quad (14)$$

計算手法は、楕円形と放物形との間で起こる不安定を解消するために分離し、保存式での安定化を行うために予測子・修正子法を用いた。式(15)～(20)に計算に用いた方程式を示す。

$$\frac{\tilde{u} - u^n}{\Delta t} = - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + \frac{f_i}{h} (u - U)(u - U) \right)^n - \varepsilon g \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} + \left(\frac{\alpha(\theta - \theta_T)}{\rho_T} g \right)^n \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} - \varepsilon h \frac{\partial z}{\partial x} \quad (15)$$

$$\frac{\tilde{v} - v^n}{\Delta t} = - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + \frac{f_i}{h} (v - V)(v - V) \right)^n - \varepsilon g \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} + \left(\frac{\alpha(\theta - \theta_T)}{\rho_T} g \right)^n \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} - \varepsilon h \frac{\partial z}{\partial y} \quad (16)$$

$$\frac{u^{n+1} - \tilde{u}}{\Delta t} = v \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} \quad (17)$$

$$\frac{v^{n+1} - \tilde{v}}{\Delta t} = v \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial y^2} \quad (18)$$

$$\frac{\tilde{h} - h^n}{\Delta t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} + \tilde{h} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} + \tilde{h} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{h^{n+1} - \tilde{h}}{\Delta t} = R \quad (20)$$

3. 2 実地形での計算結果

計算は、冷気流が流下してくると思われる石狩川流域において行った。図-1に石狩川流域周辺コンタ図を示す。石狩川本川は実線で示されるものであるが、計算結果留萌以北の流域は石狩湾への冷気流張り出しに影響を与えるものでなかったため、図-2における留萌以北を省略した領域で計算を行った。尚、計算に用いた地形は計算不安定を防ぐために波長10km以下の地形について除き滑らかにしている。

3. 1で仮定した、温度効果を浮力項で考慮し運動方程式の中に入れることが、計算においてどのような結果の違いを示すか、および抵抗係数を変えた場合にどのような結果になるかを検討した。石狩湾周辺においては、一般的に北西風が卓越しているといわれている。そこで、計算における外部風は北西風を7m/secとして与えた。表-1にcase1・case2・case3・case4の計算条件の違いを示し、図-3(a)・(b)・(c)・(d)に12時間後の冷気流高さコンタ図を示す。

表-1

	外部風 (m/sec)	放射冷却温度降下の考慮	抵抗係数
case1	北西風 7	温度差5℃のまま	式(13)
case2	北西風 7	温度差5℃のまま	式(13) × 1.5
case3	北風 7	温度差5℃のまま	式(13) × 1.5
case4	西風 7	温度差5℃のまま	式(13) × 1.5

温度差を変化させた場合は、冷気流高さに大きな違いが現れたが、張り出し距離には影響が現れなかった。張り出した高さが減少したのは、温度差が大きくなることによる浮力項の増大が原因であると考えられる。雪雲発生は冷気流フロントにおいて起こる現象であることから、温度変化を計算で考慮しないこととした。全体をととして、石狩川

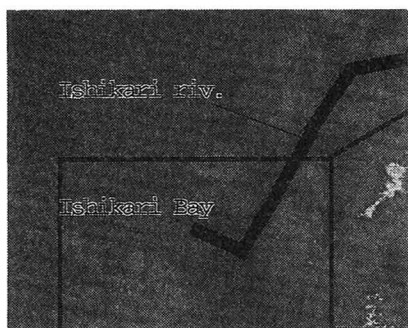


図-1 石狩川流域コンタ図

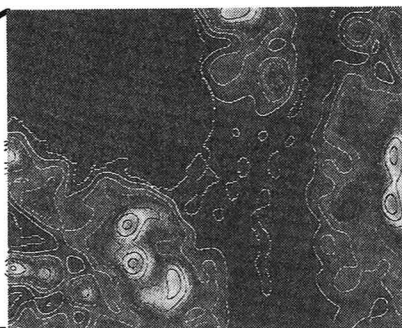


図-2 計算領域コンタ図

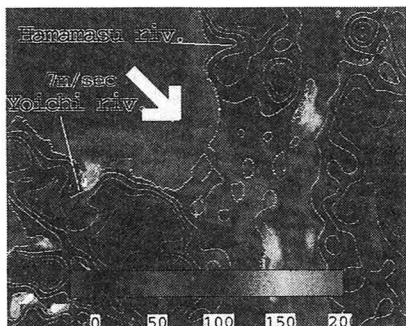


図-3(a) case1冷気流高さ分布図 (m)

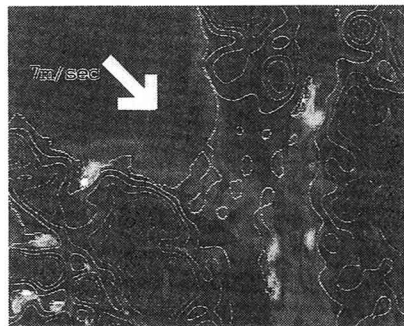


図-3(b) case2冷気流高さ分布図

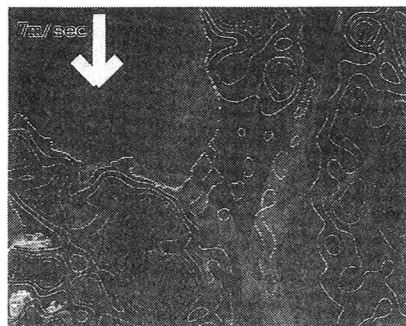


図-3(c) case3冷気流高さ分布図

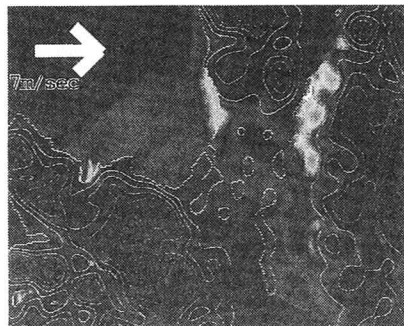


図-3(d) case4 冷気流高さ分布図

が大きく湾曲している地点において非常に多くの冷気が溜められているのが分かる。この地点は千歳川が合流している部分であり、冷気流が河川水と同じく、河道に沿うかたちで流下していることを示している。

case1・case2を比較すると、石狩湾に流下してゆき張り出す冷気流は、主に石狩川から流下してゆくものではなく、余市川から流下してゆくものであることが分かる。これまでは、冷気流はそのほとんどが石狩川河口から石狩湾に張り出してゆくもの^{11) 12)}とされていたが、冷気流にとって余市川の影響は非常に大きく、張り出し形状を決定付けるものであるといえる。全体的な冷気流高さは貯留部においてほぼ同じく、海上への張り出しは抵抗係数を小さくした方がより大きくなっているのが分かる。本論文では、塩水と淡水の間での抵抗係数を参考に計算を行っており、温度効果で生じた密度差に起因する2層流での抵抗係数を扱っていない。計算結果によれば、抵抗係数の大きさにより張り出し距離が大きく変化するため、今後実験により、温度差に起因した2層流間の抵抗係数を求める必要があると思われる。

case3・case4においては、北風が卓越する場合には余市川の影響が大きく浜益川からの冷気流の張り出しがはっきりとみられ、西風が卓越する場合には余市川からの冷気流の張り出しが大きく現れた。張り出しには風向が大きく影響しており、case1・case2での計算は北西風で行われたために余市川の影響が大きく現れたものであり、北風が卓越するような場合には、北風に直行する余市川の影響は張り出しにおいて小さく、浜益川の影響が大きくなることが分かった。

以上のことから冷気流張り出し計算において、冷気流を季節風との抵抗に起因する風速・抵抗係数と、風向が大きく影響していることが分かった。これはこれまでの観測結果¹⁴⁾を裏付けるものである。

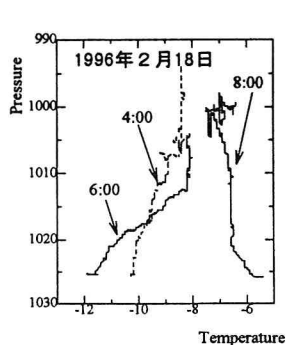


図-4 カイト気球観測結果

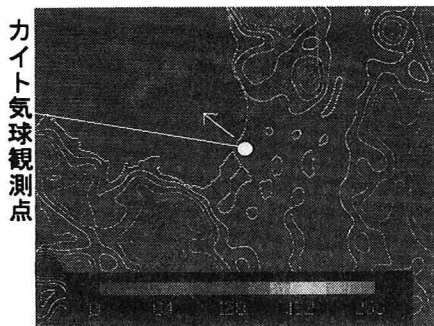


図-5 1996年2月18日6:00レーダ反射強度

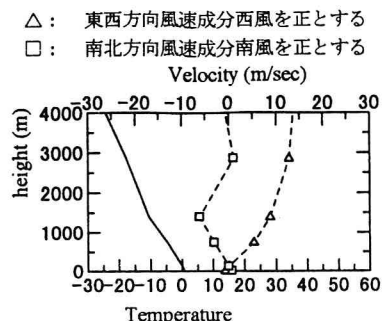


図-6 1996年2月17日21:00における風速・温度鉛直分布

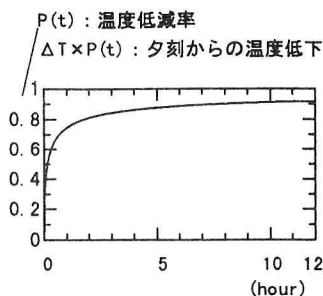


図-7 1996年2月17日18:00～2月18日6:00における気温低下

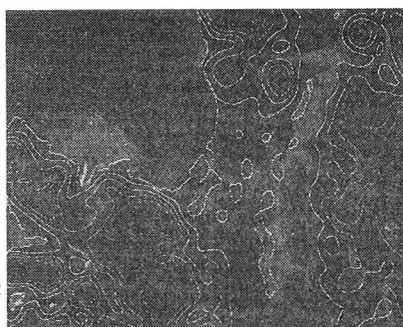


図-8(a) 2月17日20:00における冷気流張り出し再現計算結果

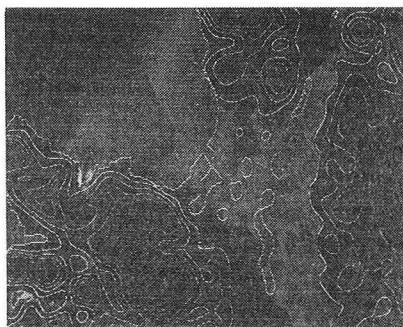


図-8(b) 2月18日6:00における冷気流張り出し再現計算結果

4. 1996年2月18日の観測結果との検証

これまで著者等はカイト気球を用いて冷気流観測を行ってきた^{13) 14)}。1996年2月18日の観測において、小規模ではあるが冷気流をとまなう雪雲が観測された。本節では、その観測結果と数値計算結果との再現性の検証を行う。

4. 1 冷気流をとまなう雪雲観測結果^{13) 14)}

図-4に、図-1の石狩川河口にあたる地点で2月18日に行ったカイト気球観測の結果を示す。午前4時程度から午前6時を最大値として、冷気流が流下してゆき発生したと思われる、地上付近の気温低下が最大180m程度の高さで発生しているのが分かる。この日は冷気流の張り出しが弱く、日が登り始めてから急激に冷気流が後退してゆき午前八時には、地上付近の気温低下が観測されなかった。図-5に2月18日6:00におけるレーダ観測結果を示す。雪雲が石狩湾北部に弧状に発生しているのが分かる。6:00はカイト気球観測においても、冷気流の外部風との気温低下が大きく、最も大きく冷気流が石狩湾に張りだしていたと思われ、その時間と一致して雪雲が弧状に発生しているのは、冷気流を起因として雪雲が発生したことを意味していると思われる。次ページの写真-1に、図-5のカイト気球観測点から矢印方向に2月18日7:00に撮影した雪雲を載せる。建物の陰となっているが筋状の雲が生じているのが分かる。

4. 2 計算による再現結果

図-6は、1996年2月18日9:00におけるラジオゾンデ風速・温度鉛直分布を示している。西風およそ7m/sec、北風およそ2m/secであると推定される。ラジオゾンデデータは2月17日21:00にも得られているが、冷気流が張り出した時間に近い2月18日9:00を選ぶこととした。図-7は、2月17日18:00～2月18日6:00までの地上における放射冷却温度低下の時間変化を示している。計算に用いた露点温度は、2月17日9:00と2月17日21:00における値の平均値を用いて決定した。2時間～3時間ではほぼ最大低下温度にまで、温度が低下していることが分かるが、この日は日射量が冬期石狩地方の平均最大日射量のおよそ3分の1の値であったことから、最大低下温度は冬期間を通してみると、大きな値とはなっていない。

図-8(a)・(b)は、再現計算を行った結果の2月17日・2月18日6:00における冷気流高さ分布を示している。抵抗係数は式(13)を用いた。3. 2の計算結果と同じく、冷気流は石狩川と千歳川の合流部において溜まっている。風速は冬期石狩湾周辺においては、あまり大きくない値であり、風向は西北西であったため、冷気流の張り出しは余市川からのものが卓越しているのが分かる。図-8(a)から放射冷却開始から2時間後では、余市川からの冷気の張り出しが大きくなっており、2月18日の冷気流張り出しには余市川が大きく影響していたことが分かる。図-8(b)において、冷気流フロント形状が、図-5で示されたレーダ反射強度の大きな部分の形状と一致している。冷気流フロント周辺に、

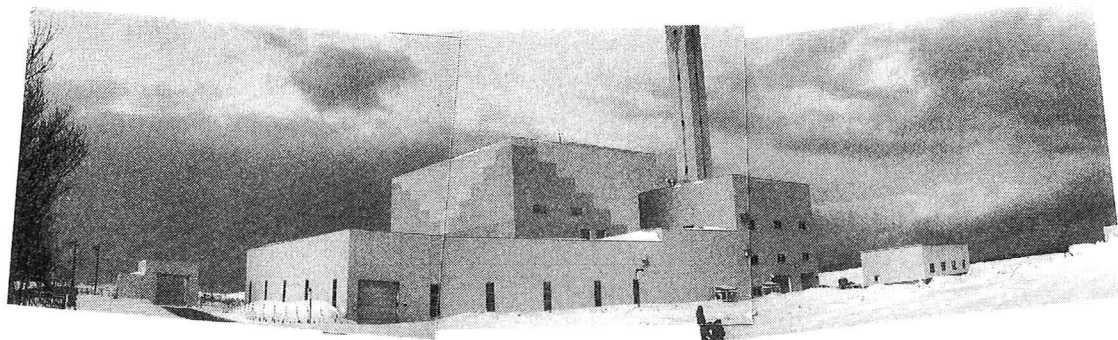


写真-1 1996年2月18日7:00に図-5のカイト気球観測地点から矢印方向に撮影した写真：建物の後ろに筋雲がみられる

フロント形状故に発生する上昇流のため雪雲が発生することから、冷気流張り出し形状の予測が精度よく行われていると思われる。

冷気流発生に大きな影響を及ぼす抵抗係数を、本研究においては塩水楔で用いられるものを用いたが、より正確な冷気流張り出し計算を行うためには、温度差に起因した2層流実験を行うことにより導くことが必要であると思われる。更に、冷気流の推移予測を行うことができたが、冷気流がどの程度張り出すと雪雲を生じるのかは、多くの要因が存在すると思われるが、まだ解明されていない。今後、予測することのできた冷気流張り出しと、雪雲発生の関係を知ることが必要である。

5. まとめ

- ①ゾンデデータを用いることにより、放射冷却気温低下度を求めることができた。浮力項に温度低下を考慮することにより放射冷却を考慮した冷気流方程式をたてることができた。
- ②冷気流張り出しには、冷気流と季節風との抵抗を決定づける季節風風速・抵抗係数および、季節風風向が大きく影響していることが分かった。
- ③1996年2月18日に観測された、小規模ではあるが冷気流張り出しをともなった雪雲発生時の冷気流形状を、冷気流張り出しモデル数値計算により再現することができた。

謝辞：本研究を進めるにあたり、本学低温科学研究所の牛山朋来氏、開発局石狩川開発建設部、気象協会北海道本部、札幌総合情報センター、北石狩衛生施設組合にデータの入手・観測及び研究に対して多くの助言をいただいた。又、本研究は、文部省科学研究費奨励研究A(中山恵介, 08750617)ならびに(財)河川環境管理財団の平成8年度河川整備基金助成(中山恵介, 8-1-①-1)の資金援助を受けて実施されたものである。記して、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) Yoshihiro TATIBANA: SNOWFALLS AND THEIR RELATION TO COLD AIR DRAINAGE IN HOKKAIDO ISLAND, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, January, 11, 1994
- 2) Berson, F.A., : Some measurements on undercutting cold air, Quart. J. Royal Meteo. Soc., Vol. 84, pp. 1-16, 1958.
- 3) SIMPSON, J.E., : A comparison between laboratory and atmospheric density currents, Quart. J. Royal Meteo. Soc., Vol. 95, pp. 758-765, 1969.
- 4) BRITTER, R.E., and J.E. SIMPSON, : Experiments on the dynamics of a gravity current head, J. Fluid Mech., vol. 88, pp. 223-240, 1978.
- 5) SIMPSON, J.E., and R.E. BRITTER, : The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface, J. Fluid Mech., vol. 94, pp. 477-495, 1979.
- 6) Tsuboki, K., Y. Fujiyoshi, and G. Wakahama, : Structure of a Land Breeze and Snowfall Enhancement at the Leading Edge, Journal of the Meteorological Society of Japan, pp. 757-769, 1989.
- 7) Kondo, J., O. Kanechika, and N. Yasuda, : Heat and Momentum Transfers under Strong Stability in the Atmospheric Surface Layer, Journal of the atmospheric sciences, Vol. 35, pp. 1012-1021, 1978
- 8) 近藤純正, 森洋介: アメダス(地域気象観測所)データを用いた夜間冷却量の解析と最低気温予報式(1), 天気, Vol. 29, pp. 57-69, 1983.
- 9) 近藤純正, 森洋介: アメダス(地域気象観測所)データを用いた夜間冷却量の解析と最低気温予報式(2), 天気, Vol. 30, pp. 33-40, 1983.
- 10) 近藤純正, 山沢弘実: 夜間の地表面放射冷却と積雪および日本各地の最低気温の極値について, 天気, Vol. 30, pp. 21-27, 1983.
- 11) 中山恵介, 長谷川和義, 藤田睦博: 冬期石狩湾において豪雪をもたらす冷気流張り出しに関する研究, 土木学会論文集, pp. 31-42, 1995.
- 12) 玉井信行, 浅枝隆: 淡塩2層流境界面における抵抗係数について, 土木学会論文集, pp. 67-81, 1977.
- 13) 中山恵介, 長谷川和義, 藤田睦博: 『カイト気球を用いた冬期石狩湾冷気流観測』, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 506-507, 1995.
- 14) 中山恵介, 長谷川和義, 藤田睦博: 冬期石狩湾において豪雪をもたらす雪雲特性に関する研究, 土木学会論文集, 投稿中, 1996.
- 15) 中山恵介・長谷川和義・藤田睦博, 『冬期石狩湾における鉛直断面内の冷気流形状に関する研究』, 水工学論文集第39巻, pp. 177-182, 1995.
- 16) Nakayama, K., K. Hasegawa, M. Fujita, Characteristics of a Cold Air Flow in Winter with Consideration to the Influence from Topography, Proceedings of The First Korea-Japan Bilateral Seminar on Water Resources and Environment Research, pp. 81-88, 20-23 August, 1996.
- 17) Nakayama, K., K. Hasegawa, M. Fujita, Characteristics of Snow Clouds When a Cold Air Flow Appears Around Ishikari Bay, International Conference on Water Resources & Environment Research: Towards the 21st Century, 1996.