

冷気密度流の形成流下とその前縁における雪雲発生

学位論文内容の要旨

冬期、日本海側に位置する北方圏の都市は様々な種類の雪害にみまわれる。日本の都市の中でも最北端に位置する都市の一つである札幌は、その周辺の特異な地形効果により、他の都市より多くの種類の降雪が発生する。石狩湾周辺において、その特徴的な降雪の一つとして、放射冷却によって発生した冷気密度流を伴う雪雲による降雪が存在する。その概要は以下の通りである。

海上と陸上との熱容量との差により生じる放射冷却により発生した、周辺上空の大気より気温が低く密度が大きくなった冷気塊が、その密度差により山地斜面を重力により流下して行く。流下して行く冷気塊は冷気の流れとなり、その挙動は密度流のプルームと似たものとなる。その冷気密度流が海上に張り出し、風向の異なる季節風とぶつかり、冷気密度流と季節風との界面抵抗により、ある程度海上に張り出した後、海上にフロントを形成する。そのフロント形状と、フロントにおける不安定から生じる渦により、収束帯が生じ、雪雲が発生し、季節風により札幌周辺に運ばれ、降雪をもたらす。

雪雲発生の大きな要因となる冷気密度流の発生が放射冷却に起因していること、冷気密度流がいわゆるプルームであり、季節風との間の遷移層が非常に薄いことから、その降雪予測を行なうことは、これまでの予測手法では困難である。そこで、新たな冷気密度流の挙動予測を考慮した予測手法の開発が望まれる。冷気密度流は温度差によって生じたプルームであり、冷気密度流を再現することは成層場での流れを解くことであり、閉鎖湾内への温水の流出、湖沼内での温度成層場での流れ、河川下流部において河口から遡上して行く塩水等の問題と関連付けられる。したがって、本研究の成果は、上述の現象の解明に資することが出来ると考えている。

本論文の目的は次の4点である。

- 1) 冷気密度流張り出し数理解析・数値解析
- 2) 界面抵抗係数算定式の導出
- 3) LESモデルによる冷気密度流フロント解析
- 4) 冷気密度流を伴った雪雲規模の大気の状態による分類分け

上記1)については、冷気密度流をモデル化し数理解析を通じた安定解析、数値計算による冷気密度流の実現象の再現を行ない、そのフロント直上での冷気密度流の形状効果による雪雲の発生をメソ気象モデルARPSにより再現し、良好な結果が得られた。これまでの研究で、冷気密度流に関して多くの観測が行われてきたが、そ

の観測結果を基に冷気密度流をモデル化して数理解析したものは僅かであり、冷気密度流という二層流的な扱いでの安定解析は行なわれていない。数理解析でのモデル化を基に数値計算で用いる、夜間の冷気密度流内部の温度変化を考慮した冷気密度流方程式も開発した。

2)については、鈍い物体周りにおいてレイノルズ数が 2×10^5 以上になると生じる遷移層内での乱流化、いわゆる乱流剝離を考慮することにより、界面抵抗係数をレイノルズ数 2×10^5 以下では対数+直線則で算定、それ以上では普遍関数が z/L (L : モーニン・オビコフ長さ)に比例するとして算定し、これまでの観測、実験結果を良好に再現することが出来た。これまでの研究では、レイノルズ数による分類は行なわれておらず、唯一の式で界面抵抗係数の算定式を導出しようとされてきており、本論文で新たな算定手法を提案した。

3)については、二層流モデルでは表現できない冷気密度流フロントでの季節風との巻き上げ、連行等の現象を解析するために、LESモデルを用いて3次元水平面上張り出しブルームの再現計算を行ない、その再現性を検証するために、冷気密度流後続部における乱流熱フラックスの検討を行なった結果、良好な再現性が得られた。水平面上を張り出すブルームはフロント付近が非常に不安定であり、再現計算を行なうことは困難なこととされてきたが、安定性に優れた計算スキームを用いることによりLESモデルにより再現計算を行なうことが出来た。

4)については、冷気密度流が放射冷却により発生した際における、地上観測、レーダ観測、ソーダ観測、ゾンデ観測、カイト気球観測を時系列解析することにより、冷気密度流と雪雲粒子の発生の時間変化を知ることが出来、それを基にレーダデータ生値の規模の風速、温度勾配での区分を行なった。冷気密度流に伴う雪雲に関して多くの観測データがあるが、それらは豪雪と呼ばれる種類のものであり、本論文で行なった冷気密度流が発生した際の雪雲の規模の区分は、雪害対策上効率よく対策を立てる上で有効な手段を与えるものである。

以上、本研究の成果について概説したが、冷気密度流は前述の通り多くの問題との接点を持っており、今後の他の成層場での環境がらみの流れの解析に多くの知識を与えるものであるとともに、石狩湾周辺の雪害対策上有益な結果を与えるものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 田 睦 博
副 査 教 授 板 倉 忠 興
副 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 助 教 授 清 水 康 行

学 位 論 文 題 名

冷気密度流の形成流下とその前縁における雪雲発生

冬期間、日本海沿岸地方で年に数回程度の頻度で発生し、まとまった降雪をもたらす雪雲が、海上に張り出した冷気密度流に関係していることはこれまでも指摘されてきた。札幌市においても、石狩湾上に張り出した冷気密度流が降雪の大きな要因の一つであることが定性的には知られている。数十年に一度程度の頻度で発生する豪雪に関する研究例は数多いが、毎冬に生起する冷気流にともなう雪雲の発生に関する研究成果は少ないのが現状である。本論文は、冷気密度流の発生・流下・形成過程を理論的に解明し、冷気密度流が雪雲の発生に大きく寄与し、その予測が可能であることを示している。本論文は全6章から構成されており、以下に各章で得られた主たる成果を示す。

第1章は、本研究の背景と研究の目的とその意義を述べている。

第2章では、海上に張り出す冷気密度流を二層流モデルで近似できることを示し、冷気密度流が発生した状態での雪雲の発生をメソ気象モデル(ARPS)を用いて再現している。すなわち、冷気密度流を二層流で近似し、冷気密度流と季節風との間の界面の安定解析の結果、K-H不安定に見られる界面での擾乱の発生は高周波成分によるものに限られ、摩擦抵抗として働くのみで界面は安定した状態であることを示している。さらに、冷気密度流の発生強度式を放射冷却の理論を用いて導き、冷気密度流を伴い雪雲が発生した日(19962月18日)の再現計算を行い、冷気密度流の石狩湾における張り出し形状とピンネシリレーダーや地上観測網(SNET)との比較を行い、再現計算結果がこれらの観測値と一致していることを確かめている。また、計算によって得られた冷気密度流が地形と同様な効果をもたらすものとし、メソ気象モデルARPSにより雪雲の再現計算を行い、当日のピンネシリレーダデータにほぼ一致する結果を得ている。

第3章では、新しい界面抵抗係数の算定方法を提案している。レイノルズ数が 2×10^5 以下では、界面近傍において直線プラス対数則を速度分布として新たな界面抵抗係数算定式を提案し、それ以上のレイノルズ数域においては乱流剥離現象を考慮した界面抵抗係数算定式を導出し、これまでの界面抵抗係数の観測値、実験結果を良好に再現できることを示して

いる。さらに、温度差を用いた冷水密度流実験を行い、界面付近の流速分布が直線プラス対数則で表示できることを確かめている。

第4章では、冷氣密度流が張り出した際の風の場合について、水平対流による解析、LESモデルによる3次元密度流張り出し再現計算を行っている。まず、冷氣密度流が海上に張り出したことによる海上と冷氣密度流との温度差が風の場合に与える影響を解析し、冷氣密度流フロントにおける十分な上昇流を形成するためには過大な渦粘性係数を風の場合に与えなければならないことを示し、水平対流が風の場合に及ぼす影響は小さいことを示している。また、Deardorffにより提案された1方程式LESモデルを用いて、3次元での水平面上張り出しブルームの解析を行い、フロントにおける擾乱が冷氣密度流内部の湿った冷たい空気と外気の混合を促進し、雪雲の維持・発達に寄与していることを明らかにしている。第2章のメソ気象モデルを用いた計算では、海上に張り出した冷気流を単純に地形とみなしているため、冷気流内部と外部の大気の混合までは考慮していない。

第5章では、各種の観測資料に基づいて、冷氣密度流の張り出しと雪雲の関係について述べている。すなわち、冷氣密度流に伴う雪雲が観測された1996年2月18日において、レーダデータ、ラジオゾンデデータ、地上観測(SNET)の他に特別に石狩川河口右岸において実施したドップラーソーダおよびカイト気球による観測結果を用いて解析を行い、地上観測網とラジオゾンデデータより、発生する雪雲強度の予測が可能であることを示している。SNETなどの地上観測データおよびラジオゾンデデータは、通常時でも入手することが可能であり、リードタイムが12時間までの雪雲強度の予測が可能であることを明らかにしている。

第6章では、各章での主な結果をまとめている。

これを要するに、著者は冬期間に海上に張り出した冷氣密度流と雪雲発生メカニズムを明らかにし、冷氣密度流とそれに伴う雪雲の予測が可能であることを示しており、環境水文学の発展に大きく貢献するものである。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。