

学 位 論 文 題 名

Observational Studies on Factors Causing Differences
in the Development of Snow Clouds during
Winter Monsoon Surges

（寒気吹き出し時の降雪雲の発達に違いをもたらす
要因に関する観測的研究）

学位論文内容の要旨

寒気吹き出し時に日本海上で発生する降雪雲は、筋状に構成された雲であることが知られている。この降雪雲は時に強い降雪を伴い、日本海沿岸地域に雪害をもたらすことがある。このような降雪による雪害対策を考え、降雪雲の発生・発達機構の理解を深めるためには、降雪雲の内部構造の観測が必要である。このため近年、ドップラーレーダーを用いた観測が、日本海沿岸地域を中心に行われている。これらの観測的研究と、国外で行われた寒気吹き出し時の降雪雲に関する観測的研究から、降雪雲には強い下降気流を伴う場合とそうでない場合があり、発達過程に異なるタイプがあると考えられる。その違いは、降雪雲の発生・発達機構を理解する上で重要であり、その違いを明らかにする上で、降雪雲を構成する水平スケール約10kmの、個々の対流セルの発達に着目した観測を、さらに行う必要がある。そこで、本研究では対流セルの発達と、その発達の違いをもたらす要因を明らかにするために、1995年1月および1996年1月に、石狩湾で2台のドップラーレーダーを用いた観測を行い、取得されたデータを用いて対流セルの3次元構造の時間変化を調べた。

解析には、発達過程を調べることが可能であった7つの対流セルの事例を用いた。これらの対流セルは、最大反射強度の時間変化の観点から「急激に発達するタイプ」と、「緩やかに発達するタイプ」との2つに分類することができた。前者が急激な発達および消滅に伴う、内部構造の顕著な時間変化を示したのに対し、後者は持続的な発達により、準定常的な内部構造を示した。このような発達の違いをもたらす要因を明らかにするため、それぞれの対流セルについて詳しい事例解析を行った。

急激に発達する対流セルでは、発達から消滅へ変化する時に下降流の発生が見られ、この下降流が上昇流の衰退・消滅をもたらしていた。この下降流の発生には2つの様式が見られた。弱い鉛直シアを持つ対流混合層内で発生し、30dBZ以上の

大きな反射強度を示した対流セルの事例では、上昇流域で急激に形成される強降雪域（降雪コア）が、上昇流に打ち勝って降下する時に、その降雪コア内で下降流の発生が見られた。これは、霰粒子の落下により周囲の大気が引きずられるローディング効果によるものと解釈することができた。一方、非常に強い鉛直シアを持つ対流混合層内で発生した対流セルの事例では、セルの上部から下降流の発生が見られた。この場合は、雲頂付近における降雪粒子の蒸発に伴って、負の浮力を伴う空気塊が形成され、それが大きな水平運動量を伴って上昇流域に進入し混合することによって、上昇流の消滅および下降流の形成がもたらされたと解釈することができた。

これに対し、緩やかに発達する対流セルの内部では、顕著な下降流の発生が見られなかった。どの事例においても、最大反射強度は 30dBZ 以下で、霰粒子の形成が未熟でローディング効果は小さく、また環境場の鉛直シアは中程度で、雲頂付近の下降流が上昇流域に形成されなかったと解釈することができた。

これらの事例解析から、対流セルの発達の違いは下降流の有無で決まり、その下降流は霰粒子によるローディング、または雲頂付近における降水粒子の蒸発による負の浮力の形成によってもたらされていることがわかった。この2つの要因は、セル内の最大反射強度と、セルを取り囲む領域での鉛直シアとを用いることによって説明出来ることが、事例同士の相互比較からわかった。

以上の知見をもとに、より大きな水平スケールを持つ対流性降雪雲の発達の違いをもたらし要因についても調べた。ここでは、寒気吹き出しの風速増加域に形成された、主風向に直交する雲バンドの事例2つを用いた。2つの雲バンドは、よく似た2次元的な気流構造を持っていたが、異なる発達を示した。その違いは霰粒子の形成に伴う下降流発生の有無で説明することができた。

同じような見方で、夏期のチベット高原上に発生する背の高い対流性降雪雲の発達についても調べた。この降雪雲は弱い鉛直シアの場に発生し、40dBZ を越える非常に強い反射強度を示し、その強エコー域において強い下降流を伴っていたことがわかった。このことから、この降雪雲はローディング効果による下降流発生を顕著に表す、「急激に発達するタイプ」の極端な例として位置付けることができた。

過去の観測研究で取り上げられた寒気吹き出し時の降雪雲の事例についても、発達の違いを最大反射強度と鉛直シアとを用いて調べたところ、本研究で調べた対流セルの場合と同様に、下降流をもたらし2つの要因によって発達の違いをほぼ説明することができた。

以上のことから、寒気吹き出し時に海上で発生する、対流セルによって構成された降雪雲の発達は、この2つの要因を調べることで理解できると考えられ、降雪雲の発達機構を調べる上で、最大反射強度と鉛直シアは、有用なパラメーターであると提言することができた。これらの知見は、降雪予測方法の改良に貢献するとともに、寒気吹き出し時の気団変質過程に対する、降雪雲の役割の解明にも寄与するものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 播磨屋 敏 生
副 査 教 授 林 祥 介
副 査 助教授 上 田 博
副 査 教 授 藤 吉 康 志

(北海道大学大学院地球環境科学研究科 (低温科学研究所))

学 位 論 文 題 名

Observational Studies on Factors Causing Differences in the Development of Snow Clouds during Winter Monsoon Surges

(寒気吹き出し時の降雪雲の発達に違いをもたらす
要因に関する観測的研究)

寒気吹き出し時に日本海上で発生する降雪雲は、筋状に構成された背の低い対流雲であることが知られ、時に日本海沿岸地域に雪害をもたらすことがある。降雪雲による雪害の対策を考え、降雪雲の発生・発達機構の理解を深める上で、降雪雲の内部構造を調べる必要がある。このため近年ドップラーレーダーを用いた観測研究が、日本海沿岸地域を中心に行われているが、これらの観測研究により、降雪雲には強い下降気流を伴う場合と、伴わない場合があることがわかってきた。この下降流発生の有無の違いは、降雪雲の構造や発達・維持機構に大きな違いをもたらすものと考えられ、その違いを解明するためには、降雪雲を構成する水平約 10km の大きさを持った個々の対流セルの発達に着目した観測が必要である。

著者は、このような降雪雲の発達に違いをもたらす要因を明らかにするために、1995 年 1 月および 1996 年 1 月に石狩湾で行われた、2 台のドップラーレーダーを用いた観測に参加してデータを取得し、対流セルの 3 次元構造の時間変化を調べることによって発達過程を明らかにし、その発達に違いをもたらす下降流の発生要因を明らかにしている。観測で取得された膨大なデータから、発達過程を詳細に調べることが可能であった 7 つの対流セルの事例を選び出して解析を行い、その発達には、「急激に発達する」場合と「緩やかに発達する」場合の 2 つのタイプがあることを明らかにしている。その違いをもたらす要因を明らかにするため、各事例について 3 次元構造の時間変化に着目した詳しい解析を行っている。

急激に発達する対流セルでは、発達から消滅へ変化する時に下降流の発生が見られ、その発生には 2 つの要因があることを示した。1 つは霰粒子の落下に伴うローディング効果によ

るもので、弱い鉛直シアを持つ対流混合層内で発生し、最大反射強度が 30dBZ 以上を示す大きな降雪強度を伴う対流セルにおいて顕著に見られることを示した。もう 1 つは雲頂付近での降雪粒子の蒸発に伴う蒸発冷却によって形成されるもので、非常に強い鉛直シアを持つ対流混合層内で発生した対流セルにおいて見られたことから、その下降流が対流セルの上昇流を衰退させるためには、下降流が上昇流域に発生するようなセル内の気流構造が重要であることを示した。これに対し、緩やかに発達する対流セルの内部では、顕著な下降流の発生が見られず、霰粒子の形成が未熟でローディング効果は小さく、また環境場の鉛直シアは中程度で、雲頂付近の下降流が上昇流域に形成されなかったことにより上昇流が持続したことを示した。著者はこのような事例解析から、対流セルの発達の違いは下降流の有無で決まり、その下降流は霰粒子によるローディング、または雲頂付近における降水粒子の蒸発による負の浮力の形成によってもたらされていることを明らかにした。また、この 2 つの要因は、セル内の最大反射強度と、セルを取り囲む領域での鉛直シアとを用いることによって説明出来ることを、事例同士の比較から明らかにした。

著者は以上の知見をもとに、より大きな水平スケールを持つ、寒気吹き出しの風速増加域に形成された主風向に直交するバンド状降雪雲の発達の違いをもたらし要因についても、2 つのバンド状降雪雲を取り上げ、対流セルと同じ視点から調査を行い、発達過程の違いは霰粒子の形成に伴う下降流発生の有無で説明出来ることを明らかにした。

さらに、非常に背が高く発達した降雪雲に分類される、夏期のチベット高原上で発生する対流性降雪雲の発達についても調査を行い、霰や雹の落下によるローディング効果により発生する下降流の存在を明らかにし、寒気吹き出し時の降雪雲を構成する「急激に発達するタイプ」の対流セルの極端な例として位置付けを行っている。

過去の観測研究で取り上げられた寒気吹き出し時の降雪雲の事例についても、発達の違いを最大反射強度と鉛直シアとを用いて調べ、この研究で調べた対流セルの場合と同様に、下降流をもたらし 2 つの要因によって発達の違いを説明することが出来ることを示した。

このように著者は、寒気吹き出し時に海上で発生し、対流セルによって構成される種々の降雪雲の発達は、下降流をもたらし 2 つの要因を調べることで理解できることを観測的アプローチによって明らかにし、また、降雪雲の発達機構を調べる上で、最大反射強度と鉛直シアが有用なパラメーターであるとの提言を行った。

この成果は、降雪予測方法の改良に貢献するとともに、寒気吹き出し時の気団変質過程に対する降雪雲の役割の解明にも寄与するものであり、地球惑星科学分野に大きな貢献をしたものと高く評価できる。

よって、著者は北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格のあるものと認める。