

## 学位論文題名

## 南極内陸域への総観規模大気輸送に関する観測的研究

(Studies on synoptic-scale atmospheric transport into the Antarctic inland  
based upon in-situ observation)

## 学位論文内容の要旨

南極域の大気は、通常は極渦縁辺部の強い渦位傾度や南半球極前線によって低緯度側の大気から隔離されている。極前線に沿って発達する総観規模擾乱は、冷たく密度の大きな極域の大気と暖かく密度の小さな低緯度側の大気の交換を行う現象である。これらの総観規模擾乱は1000km程度に亘って強風を伴い、複数の擾乱が南大洋上を東西に並ぶ。総観規模擾乱の中には極域に侵入し、昭和基地などの南極大陸の沿岸域にある基地に極端な強風と地吹雪（ブリザード）をもたらすことがある。昭和基地では冬季に多く、平均的にはひと月に3回程度ある。その際に低緯度側からの激しい暖気移流によって10℃以上の昇温が観測されることは珍しくない。

極渦の中心に近い南極大陸内陸域では、地表面の放射冷却が強く、顕著な接地気温逆転層が発達している。逆転層で冷えて密度を大きくした大気は大陸斜面に沿って海岸部に向かってカタバ風として流れ下る。-50℃～-90℃にまで冷える南極の大気中では晴れた空から雪が降る“晴天降水”（俗称、ダイヤモンドダスト）という現象が起こっており、これが南極氷床内陸の水の涵養の大部分を担っていると長い間考えられてきた。

極渦の内外の大気の交換が力学的に起こり難いとされることが、南極大陸内陸域の気象に関する議論が季節平均場によって行われることが多かった背景の一つであり、そして、人間活動を極端に困難にする低温等の自然環境によって観測データが極めて少なかったことがもう一つの理由である。南極大陸沿岸域への総観規模擾乱の強い影響が明らかである一方で、このような総観規模の大気循環場の変動が内陸域にどのような頻度で、どのように影響しているのかについて、観測事実に基づいた知見は少ない。

1995年～97年に南極内陸のドームふじ基地（77.5°S, 40°E, 標高3810m）で、気候変動の解明を目的とした南極氷床深層掘削と気象強化観測が行われた。南極内陸域における通年の気象観測データは数量が少なく、大変貴重なデータが得られた。本研究では、1997年にドームふじ基地で観測された気象データ、及び全球客観解析データを用いて、南極内陸域での気温、雲、降水の変動が、総観規模大気循環に伴う大気輸送にどのように影響を受けるのかを明らかにした。

まず、冬季の南極内陸域の温度環境は通常の気象ゾンデ観測が想定しない条件をもたらした。それらに対応するための気象ゾンデデータの補正方法を以下の3つの課題について検討した：

- (1) 気象ゾンデの観測開始初期に現われる気圧データのエラーを発見し、補正方法を提案した。
- (2) -40℃以下で信頼度が低い相対湿度データの補正方法を検証し、観測初期の大気境界層における観測値に適應するための補正方法を提案した。
- (3) 気温鉛直プロファイルに関する補正方法を提案した。

ドームふじ基地での気象観測の結果から、冬季には地上気温の変動が大きくなることを見出した。4月から10月の地上気温の時間変化から17事例の昇温現象を抽出した。昇温現象時には雲量

増加を伴っていた。平均的に雲量の少ないドームふじ基地にあって、光学的に厚い雲の現れた149回(全観測回数9.8%)のうち113回(75.8%)が、昇温現象期間中であった。500 hPa高度分布の解析から、ドームふじ基地付近にはリッジ等の高気圧性大気循環が見いだされ、それにとともなう極向きの風により南大洋上の暖かく湿った大気がドームふじ基地上空まで移流したと考えられた。

6月に起こった最も顕著な事例は、亜熱帯域で励起されたロスビー波のエネルギー伝播に伴ってブロッキングリッジが形成し、それに伴う極向きの大気循環が南大洋上の対流圏にあった暖湿大気の南極内陸域への移流を引き起こしたことが分かった。総観規模大気循環の時間的推移とドームふじ基地での観測データとの比較から、この対流圏における極向きの強風域がドームふじ基地上空を通過する時期が、地上気温の極大の出現、地上気圧の継続的上昇、地上風速の極大の出現の時期と一致することを明らかにした。南極大陸上に移流した湿った大気は地形性強制上昇等によってドームふじ基地付近に雲及び降水を生成した。

この昇温現象の後期には波動のエネルギーの収束が終わり、ブロッキングリッジの先端から孤立した高気圧循環がドームふじ基地付近を中心として東南極大陸上に切離した。南大洋からの活発な暖湿大気の移流は終息し、地上気温の極大から約20℃低温化した。この時期にドームふじ基地上空の対流圏中層から下層にかけて強い乾燥化が起こった。冬季には間断なく観測されていたダイヤモンドダストが観測されない頻度が多くなったことは対流圏の乾燥化のためと考えられた。しかしながら、この期間中にもダイヤモンドダストによる降水量が観測された。ライダーデータ及び気象ゾンデデータの解析から、この降水は対流圏で生成されたのではなく、自由対流圏の水蒸気が低温な接地気温逆転層に取り込まれそこで昇華凝結して生成されたと結論付けた。

この顕著な昇温現象の地上気温の上昇幅は約35℃であった。ドームふじ基地上空の対流圏下部の昇温は20℃弱であることから、総観規模の大気移流による寄与は60%程度と評価された。一方、逆転強度は、極夜期の平均の逆転強度21.5℃に対して約10℃と、約10℃の昇温で30%程度を担ったと評価した。残りの10%を説明する候補の一つは大気境界層における潜熱放出と考えた。

南半球の大気循環場、特に偏西風の風速分布が作り出す絶対渦度分布はロスビー波の伝播条件を規定するが、ドームふじ基地のある東南極の西部領域が面する大西洋からアフリカ大陸南方の南大洋域の絶対渦度分布の気候値は、低緯度側の比較的小規模の総観規模波動の伝播条件を満たす。6月に発生した卓越した昇温現象はこの領域を伝播した波動の影響を受けた。Schneider *et al.* [2004] は、南極大陸上の地上気温の変動モードの上位の一つとして東南極の西部領域が作用中心となっていることを新たに発見しており、本研究で議論した南大洋域の絶対渦度分布に関連した総観規模波動の伝播のしやすさがこれを説明する可能性がある。

本研究によって、南極内陸域においても総観規模擾乱によって顕著な顕熱輸送や水蒸気輸送がしばしば起こることが分かった。これらは南極域の温暖化の促進や南極氷床の涵養に結び付く。今後、南極域の気温及び氷床の涵養を司る機構の一つとして、総観規模擾乱の集積的效果を接地気温逆転層と連携させて量的に明らかにすることは、気候変動・地球温暖化における南極域の応答と役割の理解を深め、アイスコアからの気候復元にも寄与すると考えられる。

# 学位論文審査の要旨

主査	特任教授	山崎孝治
副査	教授	藤吉康志
副査	准教授	堀之内武
副査	准教授	藤原正智
副査	教授	山内恭 (情報・システム研究機構国立極地研究所)

## 学位論文題名

### 南極内陸域への総観規模大気輸送に関する観測的研究

(Studies on synoptic-scale atmospheric transport into the Antarctic inland based upon in-situ observation)

南極域の大気は、通常は極渦縁辺部の強い渦位傾度や南半球極前線によって低緯度側の大気から隔離されている。極前線に沿って発達する総観規模擾乱は、冷たく密度の大きな極域の大気と暖かく密度の小さな低緯度側の大気の交換を行う現象である。総観規模擾乱の中には極域に侵入し、昭和基地などの南極大陸の沿岸域にある基地に極端な強風と地吹雪（ブリザード）をもたらすことがある。昭和基地では冬季に多く、平均的にはひと月に3回程度ある。その際に低緯度側からの激しい暖気移流によって10℃以上の昇温が観測されることは珍しくない。

極渦の中心に近い南極大陸内陸域では、地表面の放射冷却が強く、顕著な接地気温逆転層が発達している。逆転層で冷えて密度を大きくした大気は大陸斜面に沿って海岸部に向かってカタバ風として流れ下る。-50℃~-90℃にまで冷える南極の大気中では晴れた空から雪が降る“晴天降水”（俗称、ダイヤモンドダスト）という現象が起こっており、これが南極氷床内陸の水の涵養の大部分を担っていると長い間考えられてきた。

極渦の内外の大気の交換が力学的に起こり難いとされることが、南極大陸内陸域の気象に関する議論が季節平均場によって行われることが多かった背景の一つであり、そして、人間活動を極端に困難にする低温等の自然環境によって観測データが極めて少なかったことがもう一つの理由である。南極大陸沿岸域への総観規模擾乱の強い影響が明らかである一方で、このような総観規模の大気循環場の変動が内陸域にどのような頻度で、どのように影響しているのかについて、観測事実に基づいた知見は少ない。

1995年~97年に南極内陸のドームふじ基地（77.5°S, 40°E, 標高3810m）で、気候変動の解明を目的とした南極氷床深層掘削と気象強化観測が行われた。南極内陸域における通年の気象観測データは数量が少なく、大変貴重なデータが得られた。本研究では、1997年にドームふじ基地で観測された気象データ、及び全球客観解析データを用いて、南極内陸域での気温、雲、降水の変動が、総観規模大気循環に伴う大気輸送にどのように影響を受けるのかを明らかにした。

まず、冬季の南極内陸域の温度環境は通常的气象ゾンデ観測が想定しない条件をもたらした。それらに対応するための気象ゾンデデータの補正方法を以下の3つの課題について検討した：（1）気象ゾンデの観測開始初期に現われる気圧データのエラーを発見し、補正方法を提案した。（2）-40℃以下で信頼度が低い相対湿度データの補正方法を検証し、観測初期

の大気境界層における観測値に適応するための補正方法を提案した。(3) 気温鉛直プロファイルに関する補正方法を提案した。

ドームふじ基地での気象観測の結果から、冬季には地上気温の変動が大きくなることを見出した。4月から10月の地上気温の時間変化から17事例の昇温現象を抽出した。昇温現象時には雲量増加を伴っていた。平均的に雲量の少ないドームふじ基地にあって、光学的に厚い雲の現れた149回(全観測回数の9.8%)のうちの113回(75.8%)が、昇温現象期間中であった。500 hPa 高度分布の解析から、ドームふじ基地付近にはリッジ等の高気圧性大気循環が見いだされ、それにとまなう極向きの風により南大洋上の暖かく湿った大気がドームふじ基地上空まで移流したと考えられた。

6月に起こった最も顕著な事例は、亜熱帯域で励起されたロスビー波のエネルギー伝播に伴ってブロッキングリッジが形成し、それに伴う極向きの大気循環が南大洋上の対流圏にあった暖湿大気の南極内陸域への移流を引き起こしたことが分かった。総観規模大気循環の時間的推移とドームふじ基地での観測データとの比較から、この対流圏における極向きの強風域がドームふじ基地上空を通過する時期が、地上気温の極大の出現、地上気圧の継続的上昇、地上風速の極大の出現の時期と一致することを明らかにした。南極大陸上に移流した湿った大気は地形性強制上昇等によってドームふじ基地付近に雲及び降水を生成した。

この昇温現象の後期には波動のエネルギーの収束が終わり、ブロッキングリッジの先端から孤立した高気圧循環がドームふじ基地付近を中心として東南極大陸上に切離した。南大洋からの活発な暖湿大気の移流は終息し、地上気温の極大から約20℃低温化した。この時期にドームふじ基地上空の対流圏中層から下層にかけて強い乾燥化が起こった。冬季には間断なく観測されていたダイヤモンドダストが観測されない頻度が多くなったことは対流圏の乾燥化のためと考えられた。しかしながら、この期間中にもダイヤモンドダストによる降水量が観測された。ライダーデータ及び気象ゾンデデータの解析から、この降水は対流圏で生成されたのではなく、自由対流圏の水蒸気が低温な接地気温逆転層に取り込まれそこで昇華凝結して生成されたと結論付けた。

この顕著な昇温現象の地上気温の上昇幅は約35℃であった。ドームふじ基地上空の対流圏下部の昇温は20℃弱であることから、総観規模の大気移流による寄与は60%程度と評価された。一方、逆転強度は、極夜期の平均の逆転強度21.5℃に対して約10℃と、約10℃の昇温で30%程度を担ったと評価した。残りの10%を説明する候補の一つは大気境界層における潜熱放出と考えた。

南半球の大気循環場、特に偏西風の風速分布が作り出す絶対渦度分布はロスビー波の伝播条件を規定するが、ドームふじ基地のある東南極の西部領域が面する大西洋からアフリカ大陸南方の南大洋域の絶対渦度分布の気候値は、低緯度側の比較的小規模の総観規模波動の伝播条件を満たす。6月に発生した卓越した昇温現象はこの領域を伝播した波動の影響を受けた。*Schneider et al.* [2004] は、南極大陸上の地上気温の変動モードの上位の一つとして東南極の西部領域が作用中心となっていることを新たに発見しており、本研究で議論した南大洋域の絶対渦度分布に関連した総観規模波動の伝播のしやすさがこれを説明する可能性がある。

本研究によって、南極内陸域においても総観規模擾乱によって顕著な顕熱輸送や水蒸気輸送がしばしば起こることが分かった。これらは南極域の温暖化の促進や南極氷床の涵養に結び付く。今後、南極域の気温及び氷床の涵養を司る機構の一つとして、総観規模擾乱の集積的効果を接地気温逆転層と連携させて量的に明らかにすることは、気候変動・地球温暖化における南極域の応答と役割の理解を深め、アイスコアからの気候復元にも寄与すると考えられる。

以上のとおり、申請者は南極の気象について新知見を得たものであり、極地気象学や環境科学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって、申請者は博士(環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。