

南極・北極に見る地球温暖化の現状と将来 —南極・北極は本当に温暖化しているのか？

山内 恭

国立極地研究所；総合研究大学院大学極域科学専攻

この30年地球全体は温暖化の兆候にあるが、氷の世界である南極、北極の極地もやはり温暖化しているのだろうか。極地の氷はどうなるのだろうか。最近の研究成果から迫ってみた。

はじめに

20世紀後半の最近30年、人間活動による大気中二酸化炭素濃度の増大による温室効果の増加により地球全体が温暖化していることはほぼ明らかとなり、「地球温暖化」と言われている。これまで、様々な議論がなされてきたが、多くの科学者の統一見解として、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の最近の報告(科学的評価第4次報告書¹⁾)で、このことがうたわれている。

それでは、南極、北極では「地球温暖化」はどうなっているのだろうか。南極大陸は、そのほとんどが広大な南極氷床におおわれており、平均標高は2000mの氷の塊である。その氷の量は、世界中の淡水の70%以上を占め、氷が全部融けると、世界の海面を60m弱上昇させることになるといわれている。一方、北極域は、中心部分は海で、海水が凍った海水がおおっている。海を取り巻いて大陸が広がり、南極とは全く異なった海陸分布をなしている。北極のグリーンランドは、南極ほど大きくないが氷床におおわれており、最高地点は3000mを越える標高となっている。このように、両極地は氷におおわれていることで、地球全体の気候に重要な働きをなしているとともに、地球全体の変化が目立って顕著に現れる場所であるといわれている。それでは現実に南極、北極では、温暖化はどのように現れているのだろうか。実は、地球全体が温暖化しているといっても、全体が一樣に温暖化しているわけではない。20世紀後半の世界全体の地上気温の上昇傾向を調べると、気温の上昇の最も顕著な場所は世界中で3カ所あり、それはシベリア、アラスカからカナダ北西部、そして南極半島域と、いずれも極域であることが分かった。しかし、同じ極域でも、グリーンラン

ド周辺や、南極大陸中心部分はむしろ地上気温は低下している。あらためて整理してみよう。

北極温暖化

最近の北極域での最大の話題は海水の急減である。北極海は通年氷でおおわれ、冬にはグリーンランド海、バレンツ海、ベーリング海からオホーツク海まで拡大し、夏には狭義の北極海の内部のみが海水におおわれるという状態が常であった。ところが、ここ最近、夏の、即ち海水域が縮小している時期の海水の広がりが著しく縮小するようになった。2005年の夏に著しく減った海水が、さらに2007年9月、最大規模の縮小を示した(図1)。地球温暖化に伴い海水域面積が縮小するであ

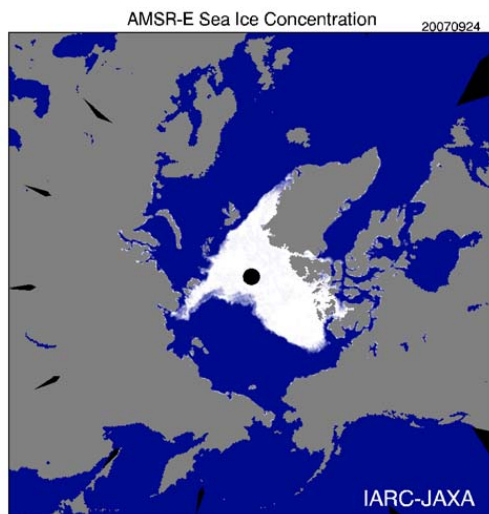


図1 衛星から見た北極海氷域の広がり、2007年9月24日、最大規模に縮小したもの(IARC/JAXA)。

ろうことは、気候モデル（地球全体の大気や海洋を物理法則に従って計算する数値モデル）により予測はされていたが、2000年代に入ってから現実の海水減少は、はるかに上回っている。単なる人間活動に基づく温室効果気体増加による温暖化だけでは説明し難くなっている。海を通しての低緯度からの熱の流入、北極海の海洋循環の速まり、そして雲や大気循環による影響など、様々議論されているが、未だ何が最大の要因かは明らかになっていない。種々の要因が折り重なった結果ではないかという見方もある。いずれにしても、この影響は、熱や水蒸気のやり取りから、生物活動、二酸化炭素の海洋への取り込みのほか、北極航路を船舶が通過することを容易ならしめたり、北極海底資源探査の可能性を引き起こすなど、計り知れないものがある（ひいては、国際的緊張を高める結果となっている）。

北極の地上気温変動を示したものが図2である²⁾。北極はここ30年、激しい温暖化の下にあったことが分かる。地球全体の平均的变化より、北極域では変化が増幅されており、この増幅作用は北極

域の雪氷圏の存在に基づく氷-アルベド・フィードバック（氷が減ると日射の吸収が多くなり、温まりさらに氷が融ける……という正の循環作用）などによるとされている。さて、この図をよく見ると、20世紀前半、1920年から40年にかけても温度上昇が目立っている。最近30年の昇温とほぼ匹敵する温暖化が現れている。逆に40年から60年代にかけては寒冷化が見られる。この1940年の温暖化のピークは、地球全体平均にも現れており、この変化は気候モデルによっても説明されている。即ち、太陽活動の変化に基づく日射量の変化および火山活動の沈静化による成層圏エアロゾル（大気浮遊微粒子）の減少によって説明された³⁾。しかし、実はこの昇温は高緯度北極域に著しく強く現れ、低緯度にはほとんど現れていないことが分かった（これらを平均するため地球全体平均にも出る）。すると、先の理由では高緯度に極限される説明がつかない。北極温暖化議論をめぐる大きな未解決課題となっている。

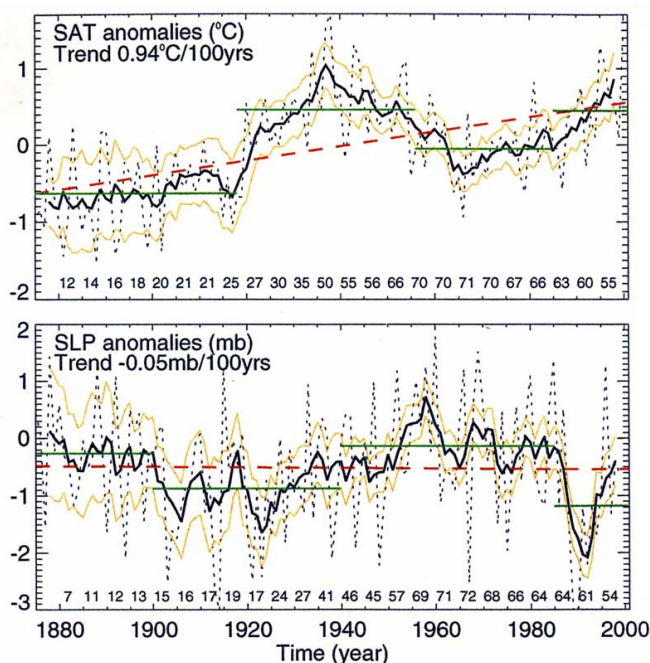


図2 1875年以来的北極域地上気温変動と気圧変動²⁾。

南極温暖化

それでは南極は温暖化しているのだろうか。南極域の中で、大きくとび出て南米に近づいている南極半島域は全地球レベルで温暖化の大きい地域になっているということは既に記した。図3に南極各基地での観測開始以来の温度変化トレンドを記してある⁴⁾。南極半島域の基地では、年平均で

も季節ごとにみても温暖化が明瞭である。その一つであるファラデー基地では、図4に示したように50年で2.5~3℃の昇温となっている。しかし、それ以外の地域、特に大陸本体の「東南極」では有意な温暖化はみられない。図5には昭和基地でのこの50年の気温変化を記したが、年々の変動が大きいのには比べ有意な温暖化はみられない⁵⁾。

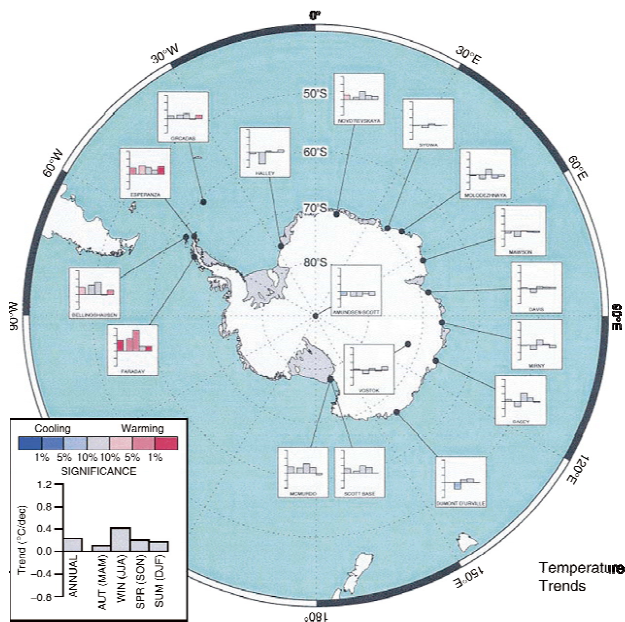


図3 南極各基地での気温変化傾向⁴⁾。南極半島域は著しい温暖化、東南極は温暖化していない、内陸はむしろ寒冷化。

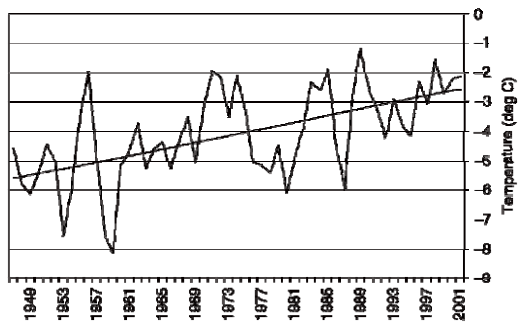


図4 ファラデー基地の年平均気温変化⁴⁾。

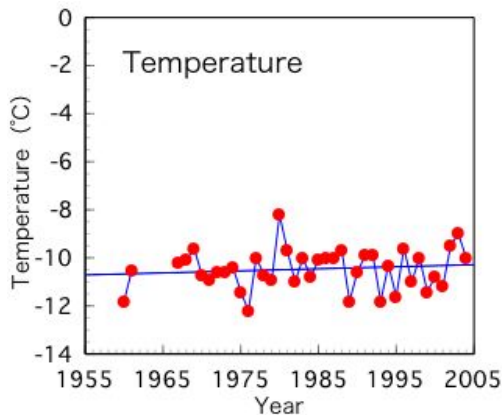


図5 昭和基地の年平均気温変化⁵⁾。

内陸の南極点基地ではむしろ寒冷化が見られるほどである。東南極沿岸では、海氷広がりも縮小はしておらず、むしろ面積は増加しているとの報告と整合的である。このように、南極本体部分の地上では温暖化は明瞭でないのである。

ところが、上空をみると違っていた。図6に示すように、対流圏（地上から高度10km程度）の中層、4～6km付近で著しい昇温が出ているのである。これは驚きである。極域では、氷-アルベド・フィードバックの存在が気候変化、例えば温暖化を増幅しているといわれてきたもので、これは地表の問題であり、地上気温に最も大きい変化が現れるはずであった。それが、上空で大きい変化があるというのは理解しがたい。低緯度からの大気中の熱輸送が原因ではないかという説明が北極の事例で試みられているが⁷⁾、南極でも本当であろうか、今後の研究課題である。図6のもっと上を見ていただくと、成層圏（対流圏の上、高度10km程度以上の層）では今度は寒冷化している。これは従来からいわれてきたとおり、温室効果気体増加により地上や対流圏は温暖化するのに対し、温室効果とはならない成層圏は二酸化炭素増加による赤外放射の放出が増えるために冷却するものである。低温化によりオゾン破壊を促進し、オゾンホール拡大に貢献する。

さて、オゾンホールが気温に関係し、二酸化炭素などの温室効果気体増加によるとオゾンホール

はさらに拡大する可能性があることを述べた。一方、オゾンが減ると成層圏での放射吸収が減り、さらに成層圏気温は低下する。即ち、気温とオゾン量との間には正のフィードバックが働くのである。ところで、なぜ南極の上空にオゾンホールができるかの説明としては、強い西風の輪、極渦の存在がある。極渦のために低緯度からの熱輸送がさえぎられ南極上空の大気が孤立し低温になる（そのため成層圏に雲ができ、フロンから塩素を取り出す反応を促進しオゾンホールをもたらす）と同時にオゾンの供給もなくなるとされてきた。ところが、実はこのオゾンホールが地上気温の動向にも関係しているという説が出てきた。オゾンホールが発達しているために極渦が強く、これは対流圏下層の大気循環をも支配し、極渦状態になって低緯度からの熱流入を妨げ南極の温暖化を抑えているというものである⁸⁾。南極沿岸基地である昭和基地でもこの50年でみると風速が強まっていることと整合している⁵⁾。そうすると、今後数十年のうちには期待されているオゾンホールの回復が起こると、極渦は弱まり、低緯度からの熱輸送が活発になり、南極の温暖化も促進されてしまうというものである⁹⁾。地球環境の大きな課題の2つである温暖化とオゾンホールが実は関連しているという、驚くべき話である！

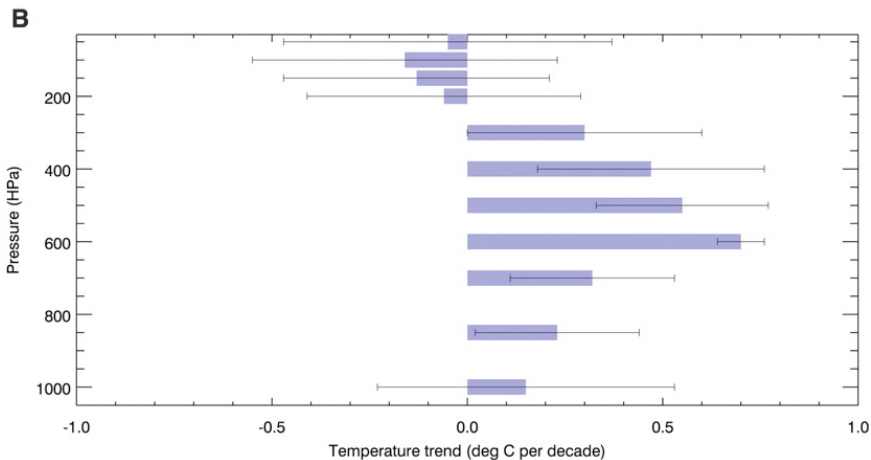


図6 南極9基地における冬の上空の気温変化、1971～2003年⁶⁾。

氷床コア

南極の氷床は何十万年にわたって雪が降り積もってできあがった氷の塊である。従って、深く下に行くほど古い雪があることになる。深い下の氷を掘ってこれを調べれば、過去の気候の情報が得られるであろうというものが氷床コア掘削に基づくコア解析である。わが国では、内陸のドームふじ基地で、1996年までに2500mにおよぶ深層氷床コア掘削が行われた。この基地は、昭和基地から1000km離れた標高3800mの高地にあり、氷

床の頂上部であることから「ドーム」と呼ばれている。普通、氷床は降り積もった雪が氷となり次第に下流、沿岸方向に流れ出て行くためバランスが保たれているのである。従って、ある場所で掘っても、深いところはより上流から流れてきた氷ということになってしまい、歴史を調べるのに容易ではなくなってしまう。そこで、その影響の少ない、流れの無い、氷床頂上部、ドームで掘削することとなった。図7がこうして得られた氷の試料を分析した1例である¹⁰⁾。氷を構成する水分子の

南極ドームふじコア解析から復元された過去32万年の気温変動

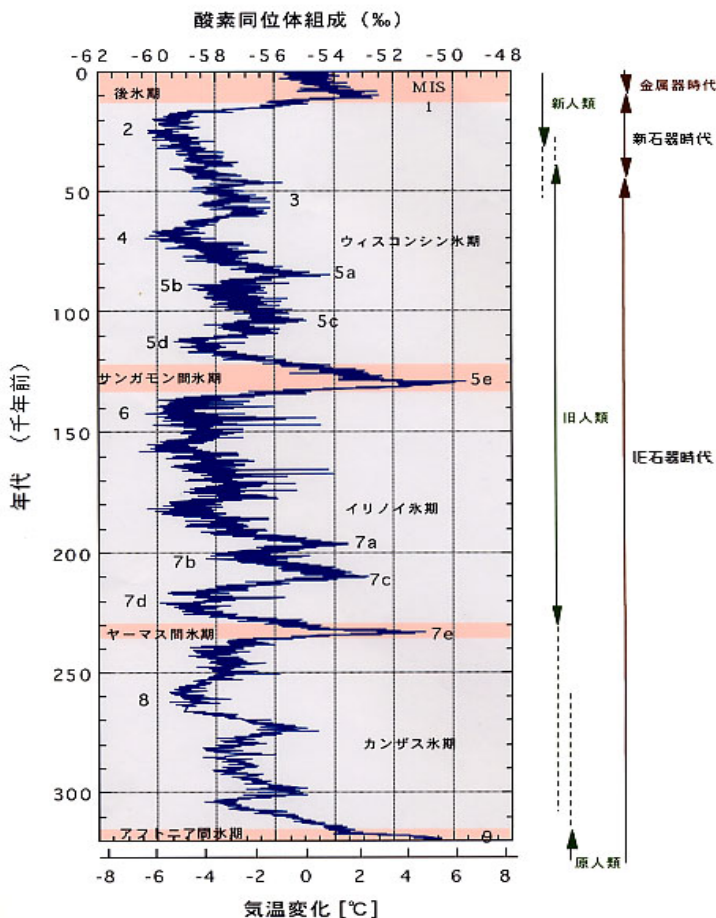


図7 南極ドームふじコア解析から復元された過去32万年の気温変動¹⁰⁾。

中の酸素の同位体の比率を気温の指標として記したものである。2500mで32万年(後に34万年と修正された)にわたる記録であり、その間に3回の氷期、間氷期が10万年強の周期で繰り返されている。氷期が長く、間氷期は短い。一つ前の間氷期の方が、現在の間氷期より高い気温がみられる。氷期の間にも気温の変動がみられる。等々、多くの過去の気候変動に関する情報が得られることがわかる。

雪が積もって氷になる過程で、空気も取り込まれる。氷の間に取り込まれた空気を分析すれば、過去の大気組成が分かるはずである。気候変動に関与する温室効果気体の濃度も調べられてきた。二酸化炭素濃度の明瞭な変動が、氷期-間氷期の気温変動ときれいに対応し、氷期の200pmv、間氷期の280ppmvという値の間をゆれている。では、過去にも二酸化炭素が増えて温暖化し、減って寒冷化したのか。重要な課題であるが、今のところ、寒冷化に向かうときには二酸化炭素濃度減少は遅れているようであるが、温暖化時には変化が早いこともあるが、二酸化炭素濃度増加と気温上昇のどちらが先行しているかは微妙な問題で未だ結論付けられていない。実は、時間軸が空気と氷でずれている問題もあり(雪が積もったときには、隙間がつながっていて空気は上下に交換してしまい、雪が氷となる約100m深以下で空気が封じ込まれた時には氷よりずっと新しい空気が共存することになってしまう)、解釈もなかなか難しい。

さらに100万年を目指して氷床掘削が行われた。ヨーロッパ連合によるドームCの掘削では約80万年の記録が得られた。ドームふじでもさらなる掘削が行われ、2007年1月までに3053m、基盤岩までの掘削が行われた。先の2500m掘削からは、基盤まで到達すれば100万年のコアが得られる可能性があるが推定されていたものだが、その後の解析からは72万年にとどまるとされている。底部近くで予想外の層の傾きがあったようで、複雑な氷床流動の影響を受けたものと思われる。両コアから、これまで最も古い42万年前までの記録を示していたポストークコアの結果をはるかに超え、40数万年以降は、それまでの大きな氷期-間氷期のサイクルとはかなり趣を異にする、氷期-間氷期の小さな気温変動、不規則な変動サイクルが示された。この変動様態の変化は

何が原因か、今後の研究に待たねばならないが、ますます興味ある事実が明らかになりつつある。

なお、南極の氷床深層コアが示す過去の気候変動が、どの程度の地域を代表しているか、全地球の気候を示しているかの疑問が生じる。南極大陸内部では、代表的な深層コアであるバード、ポストーク、エピカ・ドローニングモードランド(東経0度のコーネン基地)、ドームC、そしてドームふじと、極めて良い相似性を示しており、少なくとも南極大陸スケールでの現象は代表していると言えよう。それでは、北極のグリーンランドコアと比較してみてもどうであろうか。単純に深さごとの記録を並べても比較にはならない。場所によって雪の積もる速度-堆積速度-が異なるため時間軸がそろわない。このため、画期的な手法が編み出された。それは、コアに含まれる気体成分のうちメタンの濃度変動で合わせ込もうという方法である。大気中のメタン濃度は気候変動に対応して極めて鋭敏な変化を示す上に、短時間(現代の測定でも2~3年)で全球で一様になることが知られているため、時間軸の指標として最適であった。こうして比較されたグリーンランドのコア(GRIP, GISP II, North GRIPなど)と南極各コアは、大きな10万年スケールの氷期-間氷期サイクルでは、驚くべき一致を示したのである。全球的な気候変動を代表していることが確認された。さらに細かい時間スケールでみると、氷期の間の千年スケールの変動など、おおよそ似た変動を示すが、良く見ると微妙な時間的なずれが見られ、単にばらばらにずれているのではなく、規則的にずれている。即ちシーソーのように南極の気温変動と北極側の気温変動が連動している、つまり両者の間につながりがあることが類推される結果となった。世界の海をめぐる、海洋深層循環(ベルトコンベアーと称される)が働いているのではないかとの説が有力である。いずれにしても、極めて驚異的な関係である。

氷の変動

最後に、近年の温暖化で南極、北極の氷の変動はどうなっているか、どうなりそうか、に触れよう。地球温暖化に伴い、北極をめぐる氷河の融解、消耗はほぼ確実といわれている。スカンジナビア、スバルバル、シベリア北部の島嶼、アラスカ、

表 1 海面水位変化に寄与する各成分と期間毎の海面水位変化¹⁾。

海面水位上昇の要因	1961-2003 上昇率(mm/年)	1993-2003 上昇率(mm/年)
熱膨張	0.42±0.12	1.6±0.5
氷河・氷帽	0.50±0.18	0.77±0.22
グリーンランド氷床	0.05±0.12	0.21±0.07
南極氷床	0.14±0.41	0.21±0.35
上記各要因の合計	1.1±0.5	2.8±0.7
観測された海面水位上昇	1.8±0.5	3.1±0.7
観測と評価の差	0.7±0.7	0.3±1.0

カナダの氷河、いずれもがその速度は異なるものの、減少を示している。さらに、グリーンランド氷床も、周辺の氷河の流出とともに沿岸域氷床高度の減少として観測されてきており（航空機や衛星からの高度計データ）、氷床の減少はほぼ確実に視されている。問題は南極氷床である。これまで、温度上昇の激しい南極半島域では、氷河流出が進み氷床減少に寄与するが、東南極氷床はむしろ温暖化に伴う降雪の増加（気温が上昇すると大気中に含まれる得る水蒸気量が増加し降水が増加するのではとの説）が優り、全体としては南極氷床は減少せず、むしろ増加になるのではないかとの考えが多く、雪氷、気候研究者のコンセンサスであった。ところが、最近の南極半島を含む西南極域の各地での激しい棚氷の崩壊（2002年3月のラルセン棚氷、1998年と2008年のウィルキンス棚氷が有名）、それに伴う氷河流動の加速が顕著で、これは後ろにひかえる氷床の流出をうながすことになる。東南極氷床の氷床高度変化は幾分のプラスではあるが（微妙な量で観測・評価が難しい）、予想したほど降雪の増加はみられておらず、先の西南極での氷床減少の方が優勢となり、全体として南極氷床は減少に向かっているのではないかというのが、IPCC¹⁾を含み、ここ数年の大勢である。表1にこれらの評価を記したが、いずれの氷体とも減少傾向、即ち海面水位には増加させる方向に働くという結果である。ただし、いずれの評価も不確実性が大きく、特に南極氷床の傾向は誤差幅のほうが大きく、有意とは言えないという形である。まだまだ、評価が難しいため、さらなる精度の高い、有効な観測手法の開発が望まれている。

おわりに

以上、温暖化に伴う北極、南極の状況、長い過去を示す氷床コア解析の結果、そして氷河・氷床の変動傾向をみてきた。地球全体の温暖化はほぼ確実にされるなか、極域はその兆候が増幅される地域であるといわれてきたが、その面を含みつつ実は一筋縄ではない現実である。様々な興味ある事実が解明されてきたとの印象がある一方、未だ解明されていない現象も多いことを再確認せざるを得ない。今後のさらなる研究の進展が必須である。

参考文献

- 1) IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, New York.
- 2) Polyakov, I. V., R. V. Bekryaev, G. V. Alekseev, U. S. Bhatt, R. L. Colony, M. A. Johnson, A. P. Maskhtas, and D. Walsh (2003): Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875-2000. *J. Climate*, 16, 2067-2085.
- 3) Nozawa, T., T. Nagashima, H. Shioyama and S. A. Crooks (2005): Detecting natural influence on surface air temperature change. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20719, doi: 10.1029/2005GL023540.
- 4) Turner, J., J. E. Overland and J. Walsh (2007): An Arctic and Antarctic perspective on recent climate change. *Int. J. Climatology*, 27, 277-293.
- 5) Yamaonuchi, T. and Y. Shudou (2007): Trends in cloud amount and radiative fluxes at Syowa Station, Antarctica. *Polar Science*, 1, 17-23.
- 6) Turner, J., T. A. Lachlan-Cope, S. Colwell, G. J. Marshall and W. M. Connolley (2006): Significant

warming of the Antarctic winter troposphere. *Science*, 311, 1914-1917.

- 7) Graversen, R. G., T. Mauritsen, M. Tjernstrom, E. Kallen and G. Svensson (2007): Vertical structure of recent Arctic warming. *Nature*, 541, 53-57.
- 8) Thompson, W. J. and S. Solomon (2002): Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, 296, 895-899.
- 9) Son, S.-W., L. M. Polvani, D. W. Waugh, H. Akiyoshi, R. Garcia, D. Kinnison, S. Pawson, E. Rozanov, T. G. Shepherd and K. Shibata (2008): The impact of stratospheric ozone recovery on the Southern Hemisphere westerly jet. *Science*, 320, 1486-1489.
- 10) 渡邊興亜, 藤井理行, 神山孝吉 (2002) : 南極氷床, ドームふじコアから読む地球気候・環境変動. 地学雑誌, 111, 856-867.

Summary

Present and Future of Global Warming Seen in the Antarctic and Arctic - Is the Antarctic and Arctic Really Warming?

Takashi Yamanouchi

National Institute of Polar Research and
Department of Polar Science, Graduate University for Advanced Studies

It is apparent that we are in the global warming within the recent 30 years; however, it is not sure whether the Antarctic and Arctic cryosphere is also warming. We would like to review the direction of polar cryosphere based on the recent studies.

Large warming is evident in the polar regions, north west America, Siberia and Antarctic Peninsula, due to polar amplification. Recently we are confronted to the abrupt reduction of summer sea ice in the Arctic. The reduction rate is far more rapid than IPCC climate model prediction, which implies that we still do not understand the mechanism of climate change exactly. The main part of the Antarctic, East Antarctica, shows no clear warming trend in contrast to the rapid surface air temperature increase at stations in the Antarctic Peninsula/ West Antarctica. 2500 m deep ice core drilling at Dome Fuji revealed the three cycles of glacial — inter glacial variation during 340 thousand years and showed a great similarity among the deep ice cores drilled in Antarctica and Greenland. Melting and retreating of ice shelves and glaciers will lead to the reduction of ice sheets and then might contribute to the sea level rise.