

平成 29 年城北会千葉支部総会・講演 11 月 4 日

## 「南極・北極がわかれば地球がわかる！」

講師 国立極地研究所及び総合研究大学院大学名誉教授

山内恭氏 (昭 43)

### 森正明氏 (昭 43) より山内氏の紹介

山内さんとは中学生の時学区が隣で、私が梅ヶ丘中学、山内さんが富士中でした。戸山高時代に山内さんは小島先生 (地学) に感銘を受けていたのに対し、私は寝ていたという大きな違いがありました。東工大の応用物理学科を卒業し、東北大学地球物理学に進学、その後極地研へ、南極越冬隊長を務められました。



司会 後藤公一 (昭 50)

### 山内氏の講演

「南極北極がわかれば地球がわかる」という題でお話しします。極地について皆さんどのくらいご存じでしょうか？アムンセン、スコット、白瀬中尉などの探検については聞かれたと思います。探検時代とは違い、南極の観測は様々なことが分かってきた上で行っており、現在でも

地球に関する問題を調査する要の場所となっています。南極観測で明らかになったこと、地球温暖化と南極と北極の関係、極地で何が起きているかについてお話ししたいと思います。

東工大で理学部応用物理学科に所属しましたが、多くの時間を鉄道研究部に費やしました。しかしまあ、卒業研究を行い、当時から通算で研究生活 45 年にわたったわけです。昔から気象に興味があったので東北大地球物理学科に進みました。5 年在籍しましたが、指導教官が南極の観測計画を担当していたため、門下から誰かを派遣する必要になりました。タイミングも良く博士論文も通してもらい派遣要員に指名されました。当時観測隊は公務員である必要があるため、派遣中は助手の身分にしてもらいました。南極から戻ってきたところで国立極地研に採用され、去る 2 年半前に退職するまで 35 年間在籍することになりました。総合研究大学院大学にも併任していましたが、たとえば極域科学のように大学に専門

の研究室がない特異な分野について各研究所が集まって作った組織です。極域科学は国立極地研が担当しています。定年退職後も非常勤で勤務を継続しています。

南極には5回行きました。第20次、28次、38次と越冬を3回、52次では夏だけ、米国基地訪問で計5回です。38次は越冬隊長、52次は夏隊長を務めました。北極にもしばしば行っております。

日本の南極観測の歴史ですが、まず白瀬中尉が、アムンセン、スコットと同時期の1910年、「開南丸」で出発、時期が遅かったのでいったんオーストラリアで冬を過ごし、1911年に南極に上陸し、1912年に南緯80度5分まで行きました。なぜそこまでで引き返したかは不明です。アムンセン、スコットは極点まで行きましたが、白瀬中尉の場合はそれに次ぐ偉業です。国際的にも評価され、戦後敗戦国でありながら南極観測開始を認めさせることを後押ししました。

1882-1883年に第一回の国際極年が開催され、その後第三回は、1957-1958年に地球観測年として開催されました。極地観測は一国では無理なので共同でやろうという構想が出ました。人工衛星による観測と南極の観測が重点的に行われました。日本も参加表明し最初の12か国に連なりました。当時は敗戦から10年後の厳しい状況で他国からの抵抗もありました。1955年10月に閣議決定され、1年後の出発に向けて船の手当てが必要になりましたが、灯台への補給を行っていた耐氷機能を持つ「宗谷」を使うことになりました。航海は順調で、1957年1月にオングル島に昭和基地を作り、観測が始まりました。今年に基地開設60周年にあたります。

当初南極の領有について議論があり、アルゼンチン、チリ、英国、ノルウェー、オーストラリア、フランス、NZが領土を主張していました。放っておくと争いが起こりかねないので、米国、ソ連が中心となって南極条約を作り、南極は平和に運営するため領土権は凍結にしました。最初にわが国を含む12か国が調印し、現在は53か国が参加しています。

次に観測についてお話しします。昭和基地は島の岩の上の3階建です。船は陸に接岸することはなく氷の上で止まります。みずほ基地はさらに内陸300キロ先にあるため、基地は雪に埋まります。南極の雪は堅く、軽石のようです。20次の時にみずほ基地で観測をしました。

南極大陸は標高が高い大陸で、高いところで4000メートル以上、平均2010メートルあります。岩盤自体はゼロメートル近辺の凹凸で、その上に分厚い氷（平均の厚さ1856メートル）が載っています。ほとんどの基地が海岸近辺にありますが、米国は極点に、ソ連は内陸の標高の高いところにも基地を作りました。日本も1970年代後半に内陸部にみずほ基地を作りました。高度2200mの氷の斜面にあります。

観測結果についてですが、まず CO<sub>2</sub>濃度の変化です。CO<sub>2</sub>は人間の活動から発生しますが、驚くことに生活圏から遠い南極でも同様に変化しています。北極は冬が高く夏は下がります。これは植物の光合成が夏に活発になり CO<sub>2</sub>を吸収するからです。こうした季節変動をしながら全体として右肩上がり、年間 2ppm の増加が起こっています。発生源が北半球であるため、南極は北極よりも数値が低く、タイムラグが 2-3 年程度あります。南極には生産活動のような攪乱要素がないためきれいな値が取れるということで意味があります。2016 年に南極でも 400ppm を超えました。CO<sub>2</sub>だけでなく光合成で発生する酸素の数値も観測しています。昭和基地の観測では確かに酸素の値が下がっています。この両者の関係を調べると、CO<sub>2</sub>がどれだけ植物に吸収され、どれだけ海に吸収されているかが分かります。大気球による観測では様々な高度から空気を凍らして採取して分析を行う必要があります。成層圏から地上までの変化をみると、地上から成層圏の間で 4-5ppm の違いがあります。これも、地上から成層圏まで到達する時間差による遅れです。

オゾン層は成層圏高度 15-20 km のところにあります。オゾンが減っていることが 1982 年ころに問題になりました。もともと地球のオゾンの総量は 1 気圧換算で厚さ 3 mm 程度です。1980 年代に入り急激に減少、特に 9-10 月の減少が大きく大問題になりました。オゾンの役割は太陽光を吸収し温めることと紫外線を遮ることで生物の生命を守ることです。南極大陸上空にオゾンが欠けた部分が穴のように見えるためオゾンホールと呼びます。日本の観測は早かったけれど、なかなか評価されませんでした。英国のグループが「nature」誌に発表したことで世に知られるようになりました。

南極の上空でオゾンホールが出来るプロセスについて説明します。定説では人間が作り出したフロンガスがオゾンホールを作り出すといわれていますが、それだけでは説明できません。南極は寒く、上空に極渦という強い西風の吹く渦ができています。そのため、極渦の中は外から温められることなくオゾンも入ってこないことから孤立した場所になっています。非常に寒いので南極の上空だけ雲粒が出来ます。この粒の上で反応が起こってオゾンが壊されるということがわかってきました。逆に極渦がなくなるとオゾンが入ってくるし冷えないため、雲粒もできないということで夏になるとオゾンホールがなくなります。

オゾンホールを解消するためにフロン規制が世界的に進んで、ウィーン条約やモントリール議定書でフロンの製造、使用禁止が進みました。これが奏功して増加したフロンが減少に向かっています。1980 年にオゾンホールの存在が発見されましたが、当時の水準以下にフロンが減ればオゾンホールはなくなる可能性があります。人間が原因となった現象を解消する方向に向かっているわけです。

最近大型のレーダーを作りました。アンテナは 1000 本、岩盤にドリルで穴をあけて建てており、上空の様子が詳細に観測できます。上空の空気の流れや、オゾンホールの解明に役立ちます。

氷の採掘と分析についてです。ドームふじ基地は昭和基地から 1000 キロメートル、内陸

の標高 3800m、ここで氷を掘ります。南極も雪表面は洗濯板のように凸凹しています。200 リットルのドラム缶を 1 台 12 本ずつそりに載せて運びますが、雪上車の燃費は 1 km で 5 リットル必要でして、1000 km 行くのに 5000 リットル、燃料補給旅行で半分の燃料を消費してしまいきわめて効率が悪いです。ドームふじ基地は標高が高い所なので平均気温-54℃、自身では補給旅行で行った際に、-66℃を経験しました。最低気温の観測記録は-79.7℃であります（ちなみに世界最低気温は南極ポストーク基地での-89.2℃）。

柱状に氷を掘って調べると、下の方ほど古い雪であり、雪が積もって重みで圧縮されて氷になったものです。氷（H<sub>2</sub>O）の酸素同位体を調べますが、<sup>18</sup>O の比率が気温と関係するという理論に基づいており、年代別の気温を推定します。現在は温かいゾーン、1 万年以上前までのしばらくは寒い、そして十数万年前には温かい時期と、氷期、間氷期が周期的に変化し、5-10℃の変化が見られました。ヒトは登場してから氷期、間氷期を経験していることとなります。気温の変動は CO<sub>2</sub> の量と相関があるように見えますが、ラグがあるなどで必ずしも説明が有意とはいえません。また雪が固まる過程で新しい空気が混じるという問題があり、これを補正することはなかなか難しいことです。西暦 1800 年ころまでは CO<sub>2</sub> 濃度は一定で 280ppm、産業革命以降急激に増えて今や 400ppm、大昔では間氷期に 280、氷期 200 の幅で動いていました。雪面下 2500m で 34 万年、3035m で 72 万年の氷が採取できました。他国による離れた場所の掘削でも似たような分析結果になりました。

驚くことに、北極のグリーンランドで採取した氷からも似たような結果が出ました。しかしながら短い期間の細かい変化は一致しません。またメタンの濃度変化で時間軸を合わせることができ、詳細にみるとラグがありますが南極と北極が連動しています。これは 1000 年単位で温度が変化する世界の海をめぐる深層海流の影響ではないかと考えられています。

気温の 10 万年単位の変化は太陽の日射量の影響です。地軸の角度の変化や楕円軌道により太陽と地球の位置関係が変わり日射量に影響を与えて温度が変動します。日射量の変化だけではこれほどの温度変化にはならないですが、気温が変わり始めると CO<sub>2</sub> が増加し気温の変化の増幅作用をもたらします。

温暖化についてお話ししましょう。地球が得るエネルギーは太陽からの熱だけで、太陽定数 1370W/m<sup>2</sup> を使います。これは 1m<sup>2</sup> あたり電気ストーブ 1 個分に相当します。熱は地球に入るだけでなく、地球から赤外線を放出するので温度が均衡します。気温を決める簡単な式に当てはめると大気がないという前提で地球の平均温度は-18℃です。ところが地上の平均温度は 15℃で、この違いは温室効果によるものです。この温室効果の状態が変化してくるのが問題となります。過去 CO<sub>2</sub> 濃度が高い時期がありましたが、その時は南極の氷も小さかったのです。

南極大陸でみると、南極半島では氷が流出していますが、昭和基地の近辺ではあまり変化がないです。世界全体が温暖化している中で南極だけ温暖化が明瞭になっていない場所があることが良く分かりません。今、南極に起こっている現象は、オゾンホールの子供

はないかと言われていました。上空が寒くなるとオゾンホールができ、さらに気温が低下して上空の極渦が強まり、下層や地上にも及び、低緯度からの暖気が入りにくくなる効果を生むということで、オゾンが回復すると南極でも温暖化が進むという仮説です。

次に北極についてです。まず南極と北極の違いですが、南極は真ん中に大陸があり、周りは海で孤立しています。北極は反対に真ん中に海で周りが陸です。北極は海があるので中心まで熱が運ばれてきますが、南極は陸のため熱の供給源がなく、さらに標高が高いため寒さに大きな差が出ます。

北極に最初に足を踏み入れた日本人は、武富栄一（農商務省水産局の調査・漁業監視船の船長）、1920年代にベーリング海から北極海に行ったのが最初だと思われます。その後さらに大きな「快鳳丸」を作って北極海から欧州を通過して南下し南極海を回ってこようとし、出港までしましたが1941年に第二次大戦がはじまり壮大な計画は中止になりました。

雪の結晶の研究で有名な物理学者、中谷宇吉郎は「雪は天からの手紙」の著者ですが、1957年にグリーンランドで調査を行ったのが観測の始まりで、南極とほとんど同じタイミングでした。ただしこれは米国の調査隊の一員として参加しました。

北極は南極よりも温暖化が進んでおり、地球全体の2-3倍の速さで進んでいます。これを温暖化増幅と言っています。海氷への影響が大きく、もともと冬に広がり、夏に小さくなるという傾向がありましたが、夏の海氷域のサイズが以前の半分になってしまいました。特に2012年が小さかったです。いろいろなモデルでの予測が行われましたがそれよりも速いスピードで進行しているため、2050年ころには夏の氷がなくなってしまうという予測も出てきています。

グリーンランドの氷床の融解、氷河の流出が激しいです。氷河の表面に生物由来の黒くなっている部分（クリオコナイトと言う）があり、光を吸収し融解を増幅しています。シベリアやアラスカ、カナダ北部では、永久凍土が融けて川になり、海岸が崩れ、生物への影響が大きいです。また大気中のCO<sub>2</sub>濃度が高まると海に取り込まれる量も増え、そうすると海水の酸性化が起こり、寒冷海洋のプランクトンや貝類への影響が出ます。

北極の温暖化は他の地域にも影響を及ぼしています。昨年日本は暖冬だといわれていたのが、一転して1月下旬に寒波が来て豪雪、沖縄でも雪が降りました。これは北極の温暖化の影響ではないかと研究が盛んに行われています。ジェット気流は通常上空を西から東に流れて北極の周りに極渦を形成していますが、一部蛇行すると一方では低緯度の暖気を運び北極を温め、逆に他の場所では北極から低緯度側に寒気が下りてきて日本などで豪雪が起こります。こうしたプロセスから北極温暖化がジェット気流の蛇行を引き起こしていて、全体としては温暖化が進んでいる中、特異的に中緯度地域で寒冷気象が見られるということです。NYの豪雪もこの影響といわれています。

北極海の氷が解けると船が通れるようになり、経済的に大きな影響が出ます。横浜からロッテルダムへは北極海航路では従来航路よりも40%短くなります。時間と燃料費はかなり

の節約になるため注目されています。

資源についていえば、シベリアの大陸棚に世界の30%の天然ガスが、北極海に13%の石油が埋蔵されているといわれています。北極海の公海部分は狭いにもかかわらず周辺国がEEZの拡張を主張しており、条約がないため領土問題の解決は難しいです。ロシアはすでに北極点（の海底）に国旗を立てています。北極圏の国は8か国で、20年前に評議会を作りました。それ以外の国もオブザーバーとして参加できます。2013年に日本も参加し、北極政策を作り科学による貢献を提案しています。

北極南極は地球規模の気候環境にとって重要な場所で、地球の気候を支配する仕組みがあります。雪氷があるため気候変動の増幅作用があります。極地はCO<sub>2</sub>の発生など人間の影響が小さい場所なので地球のベースの環境を監視するのに最適です。氷という過去の気候環境の記録を持っている点でも重要な場所です。

北極は温暖化が顕著ですが、南極は一部でしか進んでいません。遠いところですが地球全体としてつながりがあるし、北極からは日本にも直接の影響が出てきていることもあり、今後も関心を持っていただきたいと思います。

## 質疑応答

柴氏（昭53）

オゾンホールが出来るメカニズムからいうと、フロンが生産され続けていくとオゾンが減って紫外線が増えて生物に影響があるのでという議論がありました。オゾンホールが出来るのは極地だけであってそれ以外では起こらないということでしょうか？

山内氏

オゾン層が激しく壊されるのは極渦の中で、南極の極渦が強くてオゾンホールは発達します。北極はそれほど極渦が強くはなく、ジェット気流が蛇行しているため熱が運ばれ南極ほど寒くはならず、オゾンホールも大きい物はできません。極地以外でも数パーセントのオゾンが減っている場所が90年代に観測されました。ただし雲粒の関わらない反応によるオゾン減少の要因はもっと高いところで起こるため、フロンがオゾン全体をこわすような要因にはなりません。もちろん南極でオゾンが減少することで南極と南米、オセアニアの一部の地域の生物に影響がある可能性は否定できません。

柴氏（昭53）

CO<sub>2</sub>濃度だけでなく、メタンなど温室効果ガスの年代別データも調べたのでしょうか？

山内氏

温室効果が強いのは、メタン、 $N_2O$ 、フロン。フロン代替の物質が検討されましたがいずれも温室効果の強いもので簡単にはいかないのが現状です。氷コア中の過去の気体の分析で $CO_2$ 以外にもメタン、 $N_2O$ なども調べましたが、複数の気体の濃度を同時に分析出来ないし微量なので大変難しい作業です。

一方、温暖化で永久凍土中のメタンが溶け出すとさらに温暖化に影響が出るのではないかとという仮説のもとにメタンの調査は始まりました。

志田氏（昭33）

温暖化が問題になっている中で地球が第5氷期に向かっているようですが、その点についてのお考えをいただけますか？

山内氏

現在は間氷期、長い時間のスケールで行くと当面は間氷期、いずれ氷期になるでしょう。しかし過去安定していた $CO_2$ 濃度が急激に増加した為、同じようなサイクル変化が起らないかもしれません。一方、氷期になったら大変ではないかといわれますが、人類は氷期を通じて生きてきています。今のような豊かな生活は出来なくても十分に耐えることが出来て、滅んでしまうことはないと思います。

志田氏（昭33）

採取した氷の深さと年代の関係はどうやって決めているのでしょうか？

山内氏

これは最も基本ですが非常に難しいのです。何等かの指標があれば参考になります、たとえば火山灰など有史以後の記録があれば、別な地域との比較などでも参考になります。しかし遠い過去についてはそのようなことが出来ないのも、降雪量と厚さの関係を現在の気温と積もり方から類推することで判断することになります。

日射量の変動は規則正しいため、窒素酸素比と日射変動が関係しているという事実が分かり、その関係から年代を判定するという方法を最近日本の研究グループが発見し進めています。この方法によると大変正確な年代決定が可能になりました。

詳細につきましては「南極・北極の気象と気候」を参考図書としてお読みください。

