



南極で考える地球環境問題

信州大学名誉教授・特任教授

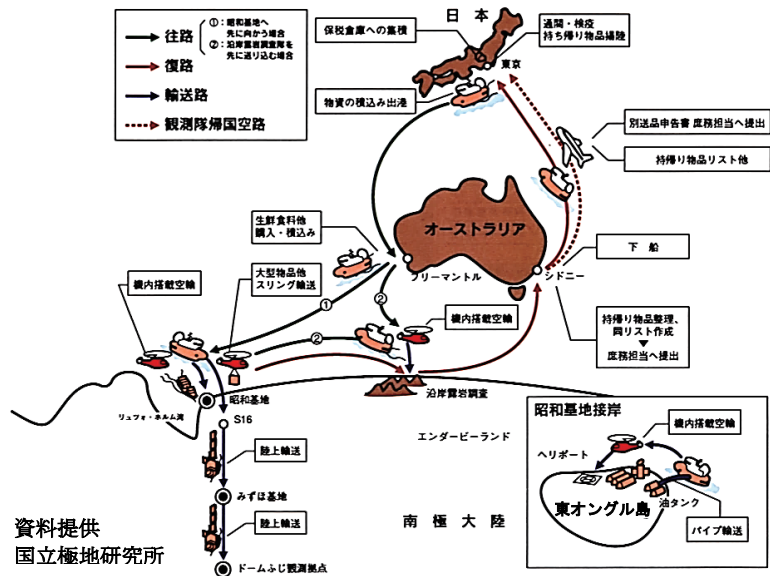
大町市立山岳博物館館長 鈴木啓助

南極大陸

南極大陸の面積は 1,231 万 km² で、日本の面積の約 33 倍もあります。大陸のほとんどが氷に覆われており、最大標高: 4,000 m、平均標高: 2,010 m、平均氷厚: 2,063 m です。地球上の氷の 90 % が南極大陸にあり、9 % がグリーンランドにあります。面積が 5 万 km² 以上の氷河を氷床と呼ぶので、南極氷床とかグリーンランド氷床と呼ばれます。現在では、地球上の氷床はこのふたつだけです。南極とグリーンランド以外の他の山岳氷河を全部集めても、地球上の氷の 1 % しかありません。チベット・ヒマラヤやパタゴニアなどの氷河を近くで見ると巨大に思えるのですが、南極の氷の量は圧倒的であることがわかります。実際に南極の内陸を雪上車で旅行すると、行けども行けども真っ白な世界ですが、氷の厚さが平均で 2,000 m もあるのですから当然かもしれません。

日本の南極観測

日本が南極観測に参加する契機となったのは、1957-58 年に計画された国際地球観測年です。各国が南極に基地を設置し観測を実施することになりました。しかし、日本に割り当てられた基地の位置は、南極で到達が最も困難な場所でした。1956 年 11 月 8 日に観測船「宗谷」で出発した第 1 次南極観測隊は、1957 年 1 月 29 日にオングル島に上陸し、観測基地を昭和基地と名付けました。昭和基地は南極大陸上にあるのではなく、大陸から約 4 km 離れた東オングル島にあります。昭和基地と南極大陸はオングル海峡を挟んで位置していますので、海氷が十分に厚くならないと雪上車で大陸に渡ることができません。現在の南極観測船は「2 代目しらせ」ですが、「宗谷」に比べて砕氷能力も物資の搭載能力も格段に向上しました。観測船が昭和基地に接岸するという意味は、東オングル島の岸壁に接岸するのではなく、オングル海峡の安定した海氷中に停泊すること



資料提供 国立極地研究所

をいいます。観測機材や食料などの生活に必要な物資は、海氷上を雪上車で運びます。燃料はパイプラインを敷設して送油することもあります。オングル海峡の海氷が厚くて、観測船が昭和基地の近くまで行けずに「接岸」できない時は、観測船に搭載されている大型ヘリコプターで運ぶしか輸送手段がなくなります。そうなると限られた物資しか運べないこととなります。

越冬観測隊は 11 月に日本を出発して、翌年の 2 月 1 日に前の越冬隊との越冬交代式を経て正式に越冬を開始します。さらに翌年の 2 月 1 日までが越冬期間で、3 月に日本に帰ってきます。つまり、連続 16 ヶ月間は日本を離れることとなります。夏期観測隊は越冬観測隊と一緒に日本を出発しますが、翌年の 3 月には日本に帰ってきます。筆者が最初に南極に行った頃 (1997 年 11 月 14 日出航) は晴海埠頭から観測船に乗って行きましたが、現在では、海上自衛隊が運航する観測船のみ日本からオーストラリアの西海岸にあるフリーマントルに向かいます。観測隊員は日本からオーストラリアまでは航空便で向かい、フリーマントルから観測船に合流し、昭和基地に向かいます。帰国時は、昭和基地からオーストラリア東海岸のシドニーまで観測船に乗り、シドニーか

ら日本までは航空便を利用します。オーストラリアと昭和基地の間の往復の航路では、海洋に関する様々な観測を行います。しかし、航路の途中には「狂う 50 度」や「絶叫する 60 度」と呼ばれるような強風による荒波の海域があります。南極観測船は、海氷が厚い時には船首を海氷にぶつけて砕氷するラミングと呼ばれる航法をとるので、船底が特殊な形をしています。そのため、乗船勤務には慣れているはずの海上自衛隊の皆さんも、観測船では船酔いをするそうです。なお、最近では観測船を利用せずに、通常の航空路線で南アフリカのケープタウンまで行き、ケープタウンから南極大陸までは、各国の南極観測隊が共同で運用する専用の航空機で行くルートも利用されるようになりました。筆者の 2 度目の南極は、夏期観測隊としてのドームふじ基地までの往復でしたが、この時は往復ともケープタウン経由でした。航空路線は観測船に比べて短期間で往復できますので、研究観測をととても効率的にできる利点があります。

日本南極観測隊員の構成は、研究者と、生活に必須な料理人や医者、発電機や雪上車の技術者などの設営担当とが半々です。しかし、近年は経費節減のために隊員数が減ってきています。生活に必須な設営担当は減らすことができませんので、研究者が減少する傾向にあります。日本の観測隊の研究対象は、大別すると宙空、気水、地学、生物の 4 分野です。宙空分野はオーロラなどの成層圏よりも高い空間が研究対象です。地学分野は隕石や地形・地質など、生物はペンギンやコケ(草や木は生えていません)などが主な研究対象です。雪や氷が存在する海洋から対流圏、そして膨大な氷を研究対象とするのが気水分野です。

南極の氷から環境変動を探る

筆者は、雪や氷を研究していますので、気水圏分野の近年の最大のプロジェクトである氷床コアから過去の環境変動を探る研究について紹介します。南極の氷は、降ってきた雪が順番に積みもり圧密で氷になったものです。ちなみに、雪から氷になりますが、雪と氷の違いは通気性があるかどうかです。雪の状態では中の空気は自由に動くことができますが、氷の状態になると空気は閉じ込められたままになります。つまり、氷に閉じ込められた空気は雪として降ったときの大気の状態を保持していることになります。南極の氷を水の中に入れて、パチッ、パチッと音がしますが、閉じ込められていた空気が弾ける音です。ちょっと話がそれますが、昭和基地でウイスキーのオンザロックを飲むときに入れる氷は、近くの氷山か

ら採取した氷です。周りにいくらでも氷がありますから、冷凍庫で作るわけではありません。氷山は南極内陸から流れ下って海に出てきたものですから、圧縮された空気が閉じ込められています。グラスを傾けると、パチッ、パチッと音がして格段に美味しく感じます。さて、水(氷や水蒸気も含めて)を構成する酸素と水素には質量数の異なる安定同位体が存在します。例えば酸素の質量数は 16 ですが、わずかに 17 や 18 の質量数の原子があります。質量数 16 の酸素原子に対する他の質量数の酸素原子の存在比を、同位体比と呼びますが、この同位体比は水の相変化(例えば、水蒸気から氷になる)時の温度で決まります。つまり、氷の同位体比は水蒸気が集まって雪ができた時の温度の情報を持っていることになります。南極の氷は融けたりしませんから、雪として降って積もった後は水の相変化がなく、同位体比も変わりません。このように、南極の氷は降った時の気温と二酸化炭素濃度などの大気情報を持っているのです。表面近くの氷は最近降った雪ですが、深くなればなるほど昔に降った雪からできていますから、氷を深くまで掘って分析すれば、過去の気温や二酸化炭素濃度がわかることになります。氷を掘る場所は、氷の流動がない高い場所が最適です。そのため、我々は昭和基地から内陸に約 1,000 km に位置する標高 3,810 m のドームふじ基地で氷を掘削しました。ドームふじ基地での年間降水量は 25 mm とわずかしかなかったから、ちょっと掘るだけでずいぶん過去の雪(氷)に出会えるのです。

日本の観測隊が、ドームふじ基地で掘削した氷(写真 1)を分析してわかった過去 30 数万年間の気温と二酸化炭素濃度の変動を図 1 に示します。とても気温の低い氷期と比較的暖かい間氷期が、ほぼ 10 万年周期で繰り返していることがわかります。その間にも大小様々な気温の変動(赤)があります。気温の変動と二酸化炭素濃度の変動

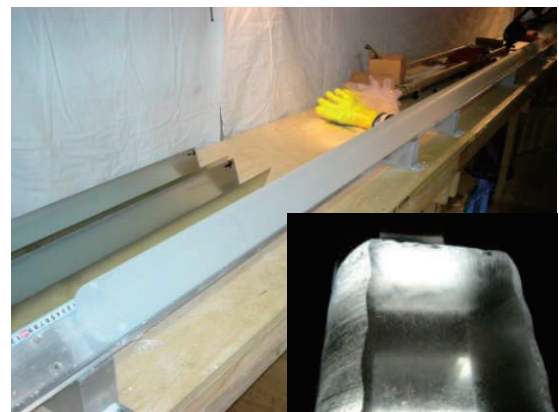


写真 1 掘削された氷試料。浅いところの氷は気泡があるので白く見える。深くなると気泡はクラスレートになり透明になる(右下)

(青) は同じように上下しています。つまり、気温が高いときは二酸化炭素濃度も高く、気温が低いときは二酸化炭素濃度も低くなっています。最近の二酸化炭素濃度の増加は人間活動による化石燃焼の燃焼が原因であり、その温室効果により結果として気温が高くなっていると説明されています。しかし、10 数万年前や 20 数万年前に二酸化炭素濃度を増加させた要因は何でしょうか。その前に、気温の変動と日射量の変動(黒)が同期していることがわかります。日射量が大きい夏は暑く、小さい冬は寒いですから、地球の気温の変動に日射量が影響するというのは考えやすいです。夏と冬のように周期的に変わるの、太陽と地球の関係が周期的に変わっているからです。地球の自転軸の歳差運動は 2.3 万年周期で、自転軸の傾きは 4.1 万年周期で変わることがわかっています。さらに、太陽の周りを地球が回る公転軌道の離心率は約 10 万年周期で変わります。どれも地球が受け取る日射量を変動させることとなります。これらの周期性と地球の気温変動に最初に気づいたのが、ミランコビッチというセルビアの科学者です。それぞれの周期が合わさって図 1 の日射量の変動がわかっているのです。ところで、図 1 には「北緯 65°の夏至の日射量」とありますが、どうして南極のことを考えているのに北緯 65°なのでしょう。世界地図を見てみると、北緯 65°はほとんどが陸地で、陸地の割合が一番大きいことがわかります。真夏のグランドは日中にはとても暑く夜には冷えてきますが、プールの水は昼も夜も温度があまり変わりません。これと同じように、太陽からの日射量の変動によって陸地はすぐに影響を受けるのに対して、海はすぐには影響を受けません。それで、北緯 65°の日射量を描いてあるのです。この日射量の変動によ

って気温が変動していることがわかります。どんどん寒くなっていく時期(水色)は日射量があまり大きくなりません。その時期には低温のため陸地には広く氷床(氷河の面積が 5 万 km² 以上)が広がります。地面に比べて氷床の表面は白いので、太陽からの日射を反射してしまいますから、さらに寒くなり氷床が拡大することになります。ところで、地面もある温度を示しますから、地面からも上空に向かう熱の移動があります。氷床が拡大すると、地面からの熱は行き場を失って氷床の底面を融かすこととなります。底面が滑りやすくなった氷の塊は海へと流れ下ります。その結果として地面が広がると太陽からの日射エネルギーを吸収しやすくなり気温もどんどん高くなっていきます。こうして間氷期を迎えるのです。

太陽からの日射量の変動によって地球の氷期・間氷期サイクルが説明できました。では、気温の変動によって大気中の二酸化炭素濃度が変わるメカニズムはどうなのでしょう。冷えた炭酸飲料と冷えていない炭酸飲料の泡立ち具合がヒントになります。冷え切った炭酸飲料をグラスに注いでもほとんど泡立ちませんが、冷やしていない時はとても泡立ちます。水に対する二酸化炭素の溶解度は、低温の方が大きいからです。つまり、気温が低下するに従って海水の温度も低下していきますから、その時には二酸化炭素が海に吸収されていくこととなります。一方、気温の上昇によって海水の温度も高くなると、海水中の二酸化炭素が大気中に放出されていくこととなります。日射量の変動により気温の変動が起こり、その結果として大気中の二酸化炭素濃度が気温の変動と同期するようになるのです。夏と冬の気温差を生み出す太陽の力は、10 万年周期の氷期・間氷期サイクルも生み出しているのです。

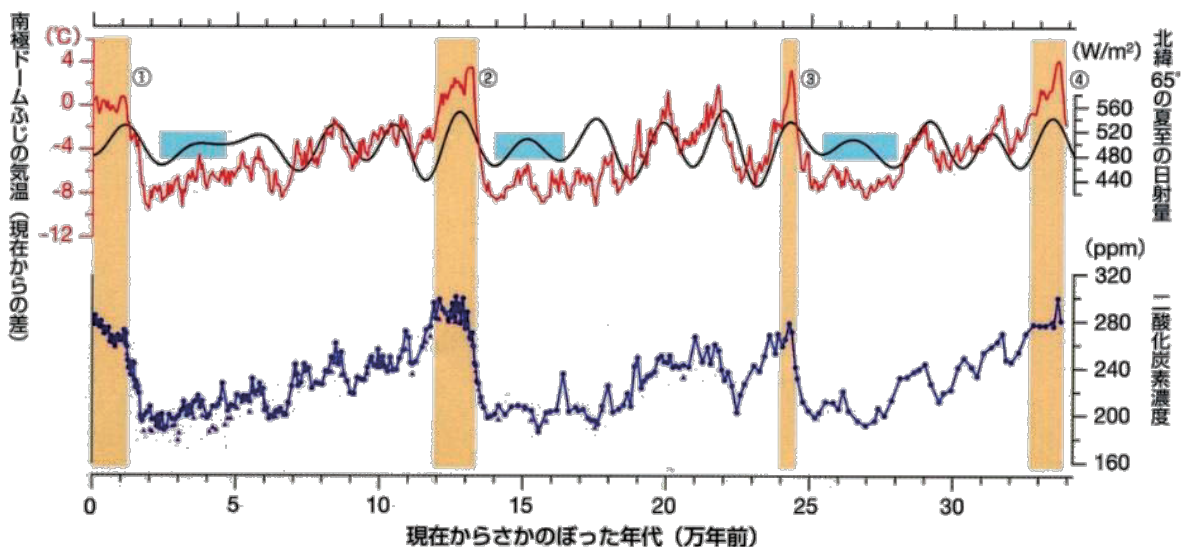


図 1 南極・ドームふじ基地の氷床コアから復元された気温・二酸化炭素濃度変動と日射量の変動 (Kawamura et al., 2007)

南極観測隊の環境保全活動

南極の利用は平和目的のみに限ること(第1条)や、自由な科学調査を永續すること(第2条)、科学調査の結果は交換し自由に入手できること(第3条)、領有権の立場には変更を加えないこと(第4条)などの南極条約が、1959年12月1日に日本をはじめとする12カ国によって採択されました。その後、関連する条約等が制定されていますが、1991年には、南極の環境と生態系を包括的に保護することを目的とする「環境保護に関する南極条約議定書」が採択され、1998年に発効しました。この議定書を担保するために、日本では「南極地域の環境の保護に関する法律(南極環境保護法)」が1997年に制定されました。この南極環境保護法に基づいて、南極観測隊は、「計画する観測計画・設営計画について環境大臣に「確認申請」を提出し」、「確認後「行為者証」を受けて南極条約地域(南緯60度以南)で活動する」ことになりました。

南極環境保護法が制定されるまでは、昭和基地の周囲は廃棄物で一杯でした。冬の間は雪の下に隠れていますが、夏になって雪が融けるとドラム缶や廃材が至る所で顔を出すような状態でした。南極環境保護法が制定されてからは、全島清掃が実施され、過去の廃棄物を拾い集めて日本に持ち帰る作業が続けられました。南極に向かう観測船の船内は、基地で使用する燃料などで満載ですが、帰りはその分が空いています。そこに廃棄物が積み込まれるということになります。現在では、昭和基地周辺に野晒しの廃棄物は無くなりました。昭和基地での観測隊員の生活に伴い発生する生ゴミは焼却炉で処理され、トイレ等からの汚水は微生物による分解などで処理し、日本で川などに放流される下水と同等なレベルまできれいにしてから海に放流されます。現在では、生ゴミと排泄物以外の廃棄物はすべて日本に持ち帰っています。ちなみに、雪上車で調査旅行に出かける際(写真2)にも、排泄物はすべて集めて昭和基地



写真2
南極
地用調
研テ査
究ン旅
行ト中
(の写
国ト真
立イ2
極レ
地用調
研テ査
究ン旅
行ト中)

に持ち帰り、基地の汚水処理施設で処理しています。南極では排泄物はすぐに凍結してしまいますから旅行中に臭気に悩まされることはありません。

空ドラム缶の有効利用

雪上車で南極の内陸に調査旅行に出かける際には、途中で給油所があるわけではありませんから、燃料の入ったドラム缶を積んだ橇(最大で7両)を引いていきます(写真3)。橇1両に2ト



写真3
南極
地内
のす
降
荷る
物雪
を上調
積車査
んと旅
だ燃行
橇料に
な使極
ど用内
のす降
荷る
物雪

ンまで搭載可能なので、最大で14トンの重量を引くのですから、雪上車は多くの燃料を必要とします。給油後に空になったドラム缶は、昭和基地まで持ち帰りますが、一部は写真4のようにルート上の標識として使用します。現在はGPS機器の性能が良くなりましたが、一度作ったルートを踏外して雪面を幅広く乱さないように、2km先の標識としてのドラム缶を目指して進みます。なお、ルートの反対側には竹竿が立っていますが、これは立派な観測用具です。この地点を通過するたびに竹竿の長さを計測します。もし、ある期間で雪が積もって堆積していれば、竹竿の長さは短くなりますし、風によって削剥されていけば、竹竿の長さは長くなります。このことを利用して、各地での雪面の堆積・削剥状況を観測しているのです。写真の地点では、埋まりかけている竹竿と新しい竹竿がありますから、堆積が進んでいることとなります。



写真4
観測
用缶
の標
識と
竹竿
の表
面



鈴木啓助氏 略歴

1954年山形県生まれ。北海道大学理学部卒業、同大学大学院博士課程修了。東京都立大学理学部助手を経て1996年より信州大学理学部助教

授、2002年より教授。南極観測隊に2回参加。専門は水文学、雪氷学、山岳環境学。信州大学山岳科学総合研究所長など歴任。記事は昨年10月15日の定時総会後に開催された講演会の内容をまとめたものです。