

南極極夜の熱バランス*

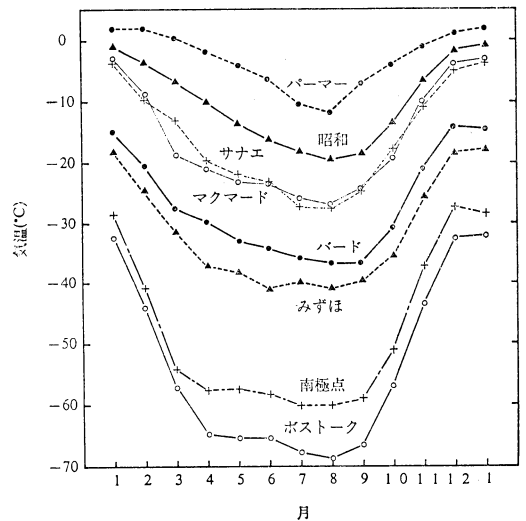
山内 恭**

南極はどのような所かと言ったとき、気象学会員でなくとも「寒い所」というのが人々の挙げる特徴の第一であろう。寒い南極でも、特に寒くなるのが日の出ない冬、「極夜」の頃である。同じ南極でも場所によって極夜の期間は異なり、南緯90°の南極点では半年間、また昭和基地のある南緯70°付近では約1か月半極夜が続く。この極夜に南極はどの位寒いのか(=気温がどの位か?)、何故そうなるのか、熱のバランスから考えてみよう。

第1図に、南極の代表的な地点にある基地での平均気温の季節変化を記した。寒い寒いと言っても、すべて事物の最低の温度である絶対零度(-273°C)が南極で実現するわけではない。最も寒いポストーク基地でも、冬の間平均気温は-70°C弱である。最低気温の記録でも-89.2°Cである。昭和基地では-20°Cにしかなっていない。

地上の温度、気温は熱のバランス、熱収支で決まる。その第1は、太陽から来る「日射」や地面から出る「赤外線」等を総称した「放射」(以前は輻射と言った)によっている。では、極夜には、入ってくる放射、即ち日射量は0であるため、地面から赤外線が出て次第に冷えていけば、いずれ絶対0度になってよさそうである。火星や月で、日の当たっていない側の地面の温度が極めて低いのはこの例である。ところが、地球上には大気(空気)の厚い層が存在し、そのことが本質的に異った状況をもたらしている。

大気は3つの役割をもっている。その1つは「温室効果」である。地表面の出す放射を大気(その中の微量な成分である水蒸気 H₂O や二酸化炭素 CO₂、雲などが主体)が吸収し、逆に大気はその温度に応じた放射を逆放射(下向に放射し)、地表面は結局その両者の差の分し

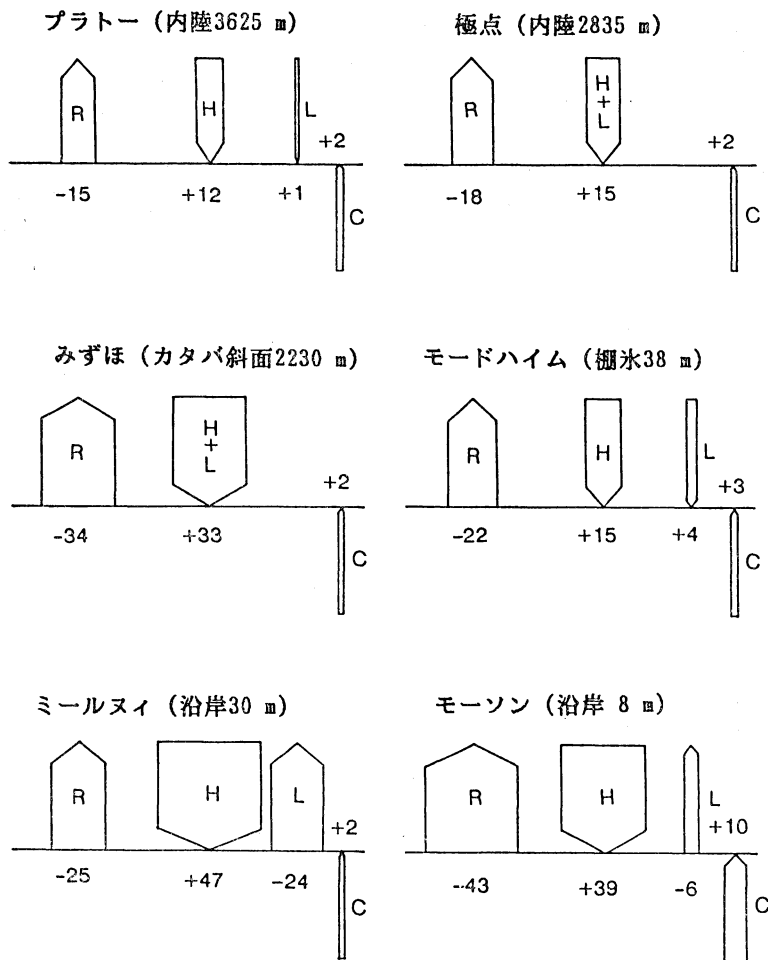


第1図 南極各基地の地上気温。上からパーマー、昭和、サナエ、マクマード、パード、みずほ、南極点、ポストーク。12月の右に1月のデータを再度並べ、12月と1月を比較しやすいようにしてある(南極の科学3「気象編」, 国立極地研究所, 1988より)。

か冷えないことになる。また、大気層から外(宇宙空間)に出る放射も地表面から出るものより一般に弱められる。これが温室効果で、大気からの下向放射と釣り合う上向放射を地表面が出すまでしか冷えない。地球上で、大気が無いと仮定した場合の地表全体の平均気温-20°C弱に対し、実際の地上気温の平均が+15°C程度であるのはこのためである。しかし、これは熱源があって大気の温度が一定に保たれた場合であって、そうでないと、長い時間がたつと大気も次第に冷えていってしまうはずである。

* Polar night heat balance in the Antarctic.

** Takashi Yamanouchi, 国立極地研究所.



第2図 南極大陸と各地点での冬季の熱収支。Rは放射収支，Hは顕熱輸送，Lは潜熱輸送，Cは地中（雪氷中）の熱伝導量（南極の科学1「総説編」，国立極地研究所，1990より）。

大気のもう一つの役割は運動により熱輸送を担うことである（大気だけでなく、海洋もその役割を担っている）。大気は上で考えたように単に上下方向の熱のやり取りに貢献するだけでなく、水平方向にも、緯度方向の大気の流れ「子午面循環」による「移流」や大気の波動に基づく「渦輸送」、その他様々な形で熱を運んでいる。この熱輸送の効率が高ければ大気はほぼ同じ温度に近づき、熱輸送のスピードが遅く効率が低ければ温度は前段で述べた大気外の放射でバランスする温度に近づき、現実の地球大気のあるまじは、その両極端の中間で、赤道域を含む低緯度と極域を含む高緯度との間にはほぼどの温度差が付き、一方また低緯度では放射収支が過

剩、高緯度では放射収支がマイナスとなり、この放射による過不足が運動による熱輸送とバランスしている。

さらに忘れてならないのは、大気が熱容量をもっていることである。極夜に入り、日射が0になり、赤外線を出して冷却しはじめても、大気は日が当たっていた時の熱量を持っているので、そう簡単には冷えきらない。大気自身の熱容量のため、もし、大気の運動による水平方向の熱輸送がなくても、大気は2～3か月の極夜では絶対0度まで冷えることはない。

上の話から、大気温度、即ち気温の成り立ちは分ってきた。極夜、南極の地表は、赤外放射を出しつつ冷えようとするが、上空の大気から下向放射を受けると

共に、地面が大気より冷えていれば（気温の逆転）さらに大気から地面に大気の乱れ「乱流」によって熱が運ばれる。これを「顕熱輸送」と言う。即ち、放射のみで完全にバランスがとれるのではなく、放射では冷却過剰の状態（大気より地表面の方が放射では冷え易い）、その分顕熱輸送により地表面は温められ、差し引き熱収支はバランスする形になっている。放射のアンバランスを顕熱が補う、言い換えれば、放射と顕熱が釣り合うように地表面温度が決まっていると言えよう。他に、地表面下、積雪内部からの「熱伝導」、地表面からの水蒸気の昇華、蒸発や凝結の「潜熱輸送」も地表面の熱収支の1要素としてあり得るが、南極内陸の極夜の条件ではいずれも小さい割合で、本質的なものは放射と顕熱である。

さて大きな熱バランスの成り立ちと同様の南極大陸内でも、第2図のように場所によって各項の割合は異なっている。(1) 内陸高原上では、標高が高いと共に、大気は特に水蒸気量が少なく下向放射が小さく、気温の接地逆転が強いことで顕熱輸送の効率が悪く、放射平衡に近い状態（温度）、即ち、小さい放射冷却となっている。(2) みずほ基地のような大陸斜面上では、斜面と温度逆転によってひき起こされる風、「斜面下降風（カタバ風）」のおかげで大気は乱され、顕熱輸送の効率は高くなる。その分、放射冷却は大きくなり得て、放射平衡から遠い温度になっている。みずほ基地の極夜の条件では、放射平衡の場合には約 40°C の接地逆転となるはずのところだが実際にはそこまで温度は下り切らず、 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ の逆転層で、高いままの温度で放射を出し続ける。大気から熱を奪い、地表面から宇宙空間に放射で熱を放出するという、ちょうど「クーラー」の役割を果しているわけである。(3) 昭和基地やモーソン基地のような沿岸では、補われる熱が大きく、放射冷却は大きいまま残る。(4) 沿岸でも、モードハイム基地のような水平な雪氷面の広がる棚氷という場所では、風が弱く顕熱輸送が小さ

く、放射で冷え、強い逆転層が発達し、熱バランスはむしろ内陸のものに近くなっている。このように、同じ南極大陸内でも沿岸から標高 $3,000\text{ m}$ を越える内陸高原まで、熱バランスの中身は微妙に異なり、異なった地上気温をもたらしている。しかし、その温度は放射平衡よりいく分高く、放射収支はマイナス、即ち放射冷却状態にあり、その分が大気からの顕熱輸送によって補われているという大筋の姿は同様である。

この熱バランスの基本が、気温の季節変化をも特徴づけている。第1図で見たように、特に内陸のポストーク、南極点、みずほ基地などでは、気温は秋に急激に下降し、その後冬の間は余り変化しないなべ底型気温推移現象「コアレスウィンター」を示している。中緯度等で一般に見られる冬の終りに最低気温が出現する型とは異なっている。これは、(1) 内陸で海から遠く、冷却を抑える熱容量の大なる海洋の影響がおよばない。(2) 日射量が0にならずとも、高い反射率（アルベード）のため地表面に吸収される有効日射量は早い時期から小さく、大気からの長波長放射の変化も小さいので、秋、4月頃より放射の入力はほぼ一定となるためである。地表面および地表近くの気温は既に逆転状態になっているので、大気から地表面への顕熱と放射冷却が釣り合うべく決まる表面温度—地上気温—もほぼ一定となるわけである。

以上、南極極夜でも絶対 0° に冷えきっているわけではなく、大気のおかげである温度を保っている。その道筋は、(1) 大気自身の熱容量の故に、熱の入力を止められても、簡単には冷えきらない。(2) 大気は運動により熱を運び、均一な温度になろうとする。(3) 大気は温室効果で地表面を保温する。(4) 温度の高い大気から地表面に熱が運ばれる。という4段階によっている。そして、コアレスウィンターで分かるようにこの熱バランスは定常的な状態に近くなっている。