

放射冷却—最低気温，結氷，夜露—

近藤 純正*

1. 自然の観察

自然と共に暮らしている人々の観察力は鋭く、彼ら農家や漁師の体験から学ぶことは多い。

1980年代のはじめ、私は本州一の最低気温（ -35°C 、1945年）が記録された岩手県藪川（現在は盛岡市）を訪ね、アメダスの前身の観測所時代の委託観測に従事されていた深沢氏に、「朝の最低気温が異常に低くなる条件」を聞くと、次の4条件を上げてくれた。

- (1) 月夜に起こりやすい。
- (2) 夕方、煙突の煙が真っ直ぐに昇るとき。
- (3) 冬の季節風で新雪が積もった晴天日。
- (4) テレビで、上空5000 mに強い寒気がきたと放映される夜。

これら条件は、「(1) 晴天の (2) 微風夜で、(3) 地表層の熱容量と熱伝導率が小さく、(4) 大気全層が乾燥していて大気放射量が小さいとき」を表している。

今度は、豪雪地帯の岩手県沢内村（現在は西和賀町）に行ったときのこと、融雪が遅れて農作業を始めるのに困るだろうと心配して、農婦に「春先の雪はどのように融けるか」を尋ねると、「雪は風で一気に融ける！」という。

これは熱収支の原理に基づいており、融雪量は、ごく狭い範囲の条件では近似的に気温と比例関係にあるが、低温日は積雪面アルベドへの依存度が大きいのに対し、高温の融雪期は風速に対する敏感度が大きくなる。農婦は、融雪期になると、強風日に雪が一気に融けることを知っていた。

2. 放射冷却量を定める4要素

放射冷却についての解説は「身近な気象の科学」（近藤 1987）の第5章に掲載されている。

後述の4節に続ける前に、原理をまとめておこう。日没が近づくころ、日射量よりも地表面から失う放射量（赤外放射量、つまり波長の長い目に見えない長波放射量）が大きいため、地表面温度は下がる。冷気が流れてきても、地表面で蒸発があっても、地表面温度は下がる。これらの要因のうち、微風の晴天夜には長波放射の役割が他に比べて大きく、“放射冷却で温度が下がった”という。

放射冷却は気温や地温の上昇下降のうちで、もっとも単純な原理に基づく現象であり、諸現象を理解する際の基礎となる。なお、夜間の地上気温は地表面よりも、概略 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ ほど高温となる。

放射冷却による地表面温度の下降量は、正味放射量に比例し、また地表面（積雪があるときは積雪面）の熱容量と熱伝導率の積に大きく依存する。さらに、ひと晩の冷却量は放射最大可能冷却量を超えない。

正味放射量は、地表面が大気に失う長波放射量と、大気から地表面に入る大気放射量の差のことである。晴天夜間には、地表面が正味失う場合を正で表せば、 $60\sim 100\text{ Wm}^{-2}$ 程度である。正味放射量は大気が乾燥していれば大きく、湿っていれば小さくなる。薄曇りでは 50 Wm^{-2} 前後、下層雲では 20 Wm^{-2} 前後である。

熱容量は正確には体積熱容量（＝比熱×密度）のことで、 1 m^3 の物質を 1°C 加熱するのに必要な、あるいは冷却するとき放出する熱量である。したがって、熱容量が小さい土壌ほど冷却速度は大きい。

熱伝導率は 1 m の厚さの板の両面に 1°C の温度差があるとき、その板の面積 1 m^2 を通して1秒間に流れる熱量で表す。それゆえ、熱伝導率が小さい乾燥し

* Junsei KONDO, 東北大学名誉教授。

た土壤や積雪、特に新雪日は下層からの伝導熱が少なく、地表面（積雪面）の冷却速度は大きくなる。

次に、熱容量と熱伝導率の両効果について考える。冷却が始まると同時に地表面直下には温度勾配ができて地中から地表面へ伝導による熱が伝わるようになり、地表面の冷却を弱めるように働く。日没の少し前を冷却開始の時刻とすれば、その時刻からある時間が経過するまでに地表面が放射によって失った熱量は、薄い地表層に含まれていた熱量（土壤が失った熱量）に等しい。この熱量は地表面の冷却量と冷却が及んだ深さの積に比例する。

冷却が進むほど冷却の及ぶ深さも厚くなるので、冷却速度は夕方からの時間とともに小さくなっていく。

熱容量と熱伝導率の積が小さい乾燥土壤や新雪日は冷却量が大きいことになる。

放射最大可能冷却量は冷却量の限界値である。普通、夜間の長さは10時間程度だが、仮に夜間が十分に長く続いたとして、地中からの熱伝導が無視できる放射平衡（正味放射量がゼロ）の状態になるまでの温度下降量を放射最大可能冷却量と呼ぶ。

快晴日の放射最大可能冷却量は、水蒸気量が少ない極寒の条件で30°C程度、水蒸気の多い熱帯の条件で10°C程度、日本の秋～春では概略20°C前後である。

微風夜の実際の冷却量は、夜間の長さが10時間程度では、積雪量が概略0.5 m以上の新雪時は放射最大可能冷却量の90～100%、古い積雪や乾燥した土壤で50～70%、湿った土壤で20～40%が目安である。

3. 盆地の冷却を決める2要素

盆地では斜面で発生した冷気が盆地内に堆積し、いわゆる「冷気湖」が形成される。その結果、下向きの大気放射量が小さくなることにより、冷却量は平地よりも2～4°Cほど大きくなる。この余剰の冷却量を決める要素として、盆地の深さと盆地の形状がある。

多くの盆地で観測してみると、冷気湖の厚さは盆地の深さにほぼ比例している。深さ100 mの盆地では100 mの厚さ、1000 mの盆地では1000 mの厚さの冷気湖が形成される。冷気湖が厚いほど、盆地の底では下向きの大気放射量が少なく（正味放射量が大きく）なるので、深い盆地ほど放射冷却量は大きくなる。

一方、冷気湖全体の気温低下量は、冷気を生む斜面の総面積が広いほど大きく、また盆地大気の総容積が小さいほど大きくなる。つまり、V字形盆地はU字形盆地（皿状盆地）に比べて冷えるべき大気の容積が

小さく、盆地大気全体の気温低下量は大きくなる。このように、盆地の形状も重要となる。ただし、前章の放射冷却量を決める4要素に比べれば、盆地の深さと形状は2次的な2要素である。

4. 最低気温（-35°C）のタイ記録？

岩手県藪川を最初に訪問したときの話に戻そう。アメダス（標高680 m）の隣の郵便局へ寄り、委託観測時代に毎日09時に気象観測をしていた方（深沢氏）を教えてください、私が歩いて行こうとすると局員の日野杉 勉氏は車で深沢氏宅まで案内してくれた。

役場引退後の深沢氏は酪農をされており、前記の「最低気温が異常に低くなる4条件」を話してくれた。また、1945年の-35°Cの最低気温は現アメダス地点から直線距離で約12 kmの北東、つまり岩洞湖から東向きに流れる丹藤川と、西向きに流れてきた向井沢川の合流点の町村にある藪川小学校に設置されていた観測所時代の値であることもわかった。そこは現アメダスより標高が43 m低い盆地の底に相当する。

それから時は過ぎ、私が地球温暖化観測に適する田舎の観測所を探す目的で、藪川を3回目に訪問した2006年7月11日、昔の藪川郵便局は新築され、日野杉氏は郵便局長になられており、四半世紀前に私が最初に訪問したときのことをよく覚えておられた。

その2006年、藪川アメダスは気温観測用の通風筒は見えたが、雨量計は密に茂った雑草に覆われほとんど見えなかった。この頃から、私は日本の観測所の実態



第1図 岩手県の藪川アメダス（2006年7月11日）。

を憂い、そのまま放置できない思いになった。

再び話を戻そう。私は1980年代の半ばまでには各地での野外観測や理論的考察も終えて、放射冷却について整理できていた。さらに、最低気温の極値を起こすような条件、すなわち広域の夕方の気温として900 hPa面の低温と快晴が起こる確率、大気全層の可降水量が極端に少ない日の確率などを調べて、100年間に1回の確率で生じるような気象と積雪の条件（積雪深0.5 m以上）を想定し、地域ごとに予想される最低気温を次のようにまとめた。

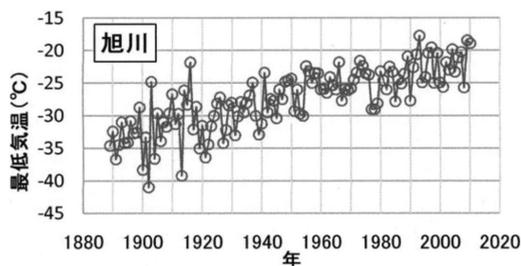
標高700 m以下として、100年間に1回程度の頻度で発生する地域ごとの最低気温の極値は：

北海道北部	−43°C
北海道南部	−40°C
東北北部	−36°C
東南北部	−34°C
中部地方	−30°C
九州四国	−20°C

アメダスの観測値は、現在ではインターネットで得られるが、アメダスが始まったころは各地方気象台の発行する気象月報から得られていた。その時代に藪川で−35°Cのタイ記録が掲載されていた。その日の広範の気象条件から、この記録は間違いと推論し盛岡地方気象台に問い合わせたところ、−25°Cのミスプリントであることがわかった。

5. 積雪都市の最低気温の急上昇

1988年に、旭川地方気象台長の三本木 亮氏が日本気象協会発行の「気象」(32巻7号)に「旭川の気象100周年を迎えて」と題して過去100年間の年最低気温の顕著な上昇を発表している(三本木 1988)。すなわち、1902年に−41°Cの全国気象官署での最低値を記録したが1955年以降は−30°C以下は観測されていない。



第2図 旭川における年最低気温の経年変化。

しかし田舎のアメダス江丹別（現在は旭川市）では最近でも−36〜−38°Cの低温が記録されており、旭川の最低気温の急上昇は都市化によるものである。

第2図は1889年から2010年まで120年余の旭川における年最低気温の経年変化である。

私は、自分で現地を調べるべく、定年後は観測所巡りの最初の訪問先を旭川とし、2004年10月に数日間滞在して周辺の観測所における古い記録の書き写し作業と周辺各地の現地調査を行った。

旭川の観測所は数回の移転があることもわかった。旭川地方気象台の前身は1888（明治21）年7月1日、上川二等測候所として北海道庁により創設。当時の建物は北海道の内陸開発のため、囚人を使って岩見沢から忠別太まで道路を開くに際して作られたもので、その樺戸監獄署出張所の一室で観測が開始された。現在の旭川大橋の西、旭川市神居町1条1丁目に上川地方に現存する最古の建物として復元されている。ここでは、出役するオオカミを銃で追い払いながら観測が行われ、1889年1月には−34.5°Cの最低気温を記録したが、これは当時の日本の観測史上最低であり、札幌に電話で報告しても信じられなかったという。

この測候所は1890年、現在の旭川市神居町1条4丁目に移転、1898年に現在の6条10丁目（中央警察署の位置、旭川東高等学校の西側、旧・旭川地方気象台のすぐ南西側）に再移転後の1902年、−41°Cが観測され、気象官署における低温の記録となった。

さて、旭川の年最低気温の急上昇が都市化要因のうち、何が寄与しているかを探るために他の都市について調べると、東京のほかは、いずれも雪国の青森、札幌、秋田、福島、盛岡、山形などで急上昇している。

都市では時代とともに道路除雪が広範囲に及び、積雪（断熱材）の下の地中からの伝導熱の放出を促すことになった。この伝導熱は都市全域からではなくても、10〜20%程度の道路面積から出れば地表面の放射冷却は緩和され、地上気温も低くならない。

除雪の効果について放射冷却量を見積もると、年最低気温の上昇傾向はほぼ説明できる。最近雪国の冬の最低気温は上昇し暮らしやすくなった半面、従来は死滅していた病虫害が越冬する例も知られている。

雪国の除雪から連想することは、広範に海水域が分布しているとき、海洋・大気間の熱交換は小さいが、その一部が割れて水面が現れると、多量の熱が海から大気へ輸送される現象に似ている。

6. 放射冷却で氷をつくる

水を入れた容器を屋外に設置し、放射冷却を利用して天然氷を作ることができる。氷の熱伝導率は比較的に大きいことから、気温が氷点下になっても水面温度は $-1^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ を保ち（ただし、氷の厚さが数 cm 以下のとき）、かつ水温も 0°C を保つ。

私が気象予報士たちの講習会で放射冷却の熱収支を話した後日、関 隆則氏がひと冬にわたり毎晩の結氷観測の結果を送ってきた。面白いので取り上げたい。

夜間の正味放射量が例えば 92.8 Wm^{-2} とすれば、微風条件では、この熱量が近似的に氷の凍結熱に等しくなる。氷の凍結の潜熱は $l_f=3.34\times 10^5\text{ Jkg}^{-1}$ であるので、10時間当たりの氷の成長速度は $92.8\text{ Wm}^{-2}\times 10\times 3600\text{ s} / l_f=10\text{ kgm}^{-2}$ 。つまり10時間当たり水換算で厚さ10 mm の成長となる。ここで気温が氷点下の風が吹けば、水面から顕熱も失われ氷の成長速度は風速に比例して大きくなる。

かつて私は長野県の野尻湖で数年間にわたり湖面蒸発を観測したことがある。湖面が結氷する年としない年があった。平均気温が同じ年でも、日中の天気と夜間の天気など偶然性がうまく重なったときは、湖面の広範囲が結氷する。すなわち、日中は曇天（降雪も含む）で夜間は晴天で薄い氷ができ、朝方の降雪で覆われ水面が白くなったとき、日中に多少の日差しがあっても溶けず、次の夜間に晴天であれば氷の厚さは増加していく。結氷面積が広がれば、強風が吹いても波で破壊されずに、氷はひと冬にわたり残ることになる。

7. 夜露は風が適度の夜に多い

土壌面の放射冷却では、地表面温度が下がると下層からの伝導熱があるため、冷却は弱められる。しかし、草や植物の葉面の冷却は幹や茎を伝わってくる下からの伝導熱が微小で冷却は大きくなる。

仮に大気と葉面間の顕熱と潜熱（蒸発または凝結）の交換がゼロの場合、葉面は近似的に放射平衡の温度となる。現実には無風でも葉面の周囲には小さな循環流（高温物体の周りに発生する対流と逆向きの流れ）ができて顕熱と潜熱の交換が起こる。したがって、気温と葉面温度の差は、放射と顕熱と潜熱の3つの熱収支が釣り合うように決まる。

晴天夜間には、気温と葉面温度の差（温度差）は風速、葉面の大きさ、大気の相対湿度に依存し、最大 5°C 以上になりうる。

空気が乾燥した夜は葉面に結露せず、温度差は大きくなるが、湿度の高い夜は水蒸気が葉面に結露し、その際の潜熱が温度差を小さくする。

夜間の結露量はいくらになるか。風速がゼロでかつ葉面の周囲で循環流も発生しない完全無風の状態では結露はゼロであるが、風速が強い時は大気と葉面の顕熱の交換が大きく、葉面温度は下降せず結露も生じない。しかし、適当な風速が吹く夜は、葉面も冷えて温度差が適当な値となり最大の結露量が生じる（近藤2000、図5.7下）。

この適当な風速は相対湿度が高い夜ほど強く、相対湿度が低くなるにしたがって弱くなる。水蒸気の多い夏の朝、草むらを歩くとき夜露で足元がびしょりと濡れた経験者は、読者の中にもいるだろう。

温度が氷点下では降霜になる。霜は地物や葉面がよく冷えた場所に降りるが、降霜量がもっとも多いのは、その付近で最大に冷却した場所・地物ではない。

8. あとがき

放射冷却による凍霜害の研究の歴史は古い。東北大学で気象学の研究をして欲しいと、1918年に測候所風の気象観測室を寄贈したのは蚕糸業を営んでいた佐野理八である。この建物の設計は、兼任教授・岡田武松（のちの第4代中央気象台長）によるとされる。明治・大正時代に大きく発展した日本の産業の一つに生糸があり輸出品（金額）の約1/3を占めていた。

古い論文を探すと、恩師・山本義一と斎藤隆幸が1954年に防霜策としての煙による長波放射の透過率の実験的研究の論文を出している。これは後にエアロゾルによる日射と大気放射への影響へとつながっていく。私自身は1950年代後半、学部4年生から大学院修士課程にかけて、地面から高度100 mまでの大気各層について大気放射の吸収・透過・射出による気温の時間変化の数値計算を手回し計算機によって続けていた。それから4半世紀後の1980年代前半、放射冷却の本格的な研究へとつながった。

参考文献

- 近藤純正, 1987: 身近な気象の科学. 東京大学出版会, 189pp.
 近藤純正, 2000: 地表面に近い大気の科学. 東京大学出版会, 324pp.
 三本木 亮, 1988: 旭川の気象100周年を迎えて. 気象, 32 (7), 9-12.