

1. 森林と気候のかかわり

北海道大学 低温科学研究所 渡辺 力

1. はじめに

地球上の陸地表面は、赤道から南北両極に向かって、熱帯多雨林、サバンナ・低木林、砂漠、温帯林、温帯草原、落葉針葉樹林、ツンドラ、雪氷域のようにほぼ緯度によって帯状に分布する植生帯に大まかに分類できます。これらの植生帯は、気温や降水量によって表される気候帯の分布とほぼ一致しています。また、同じ気候帯の中であっても、高い山に登ってみれば、標高が上がるにつれて植生の分布が変わっていく様子を見ることができます。こちら、標高とともに気温が下がるなど、気候条件の変化とよく対応しています。植生は、種類によって生育できる環境条件に違いがあるため、それぞれの気候帯に適したものだけが生存できるのです。つまり、植生の分布は気候によって決まると言えます。

ですが、植生は一方的に気候に支配されるばかりではなく、気候に対してかなりの影響を及ぼしてもいます。今盛んに話題にされている、地球温暖化抑制のための植林などはそれをあてにした具体例です。現在、地球温暖化などの気候変動を数値モデルによって予測する研究が、世界各国の研究機関で進められています。しかし、気候の予測結果には未だに多くの不確実性が残されているのが現状です。数値モデルの予測結果に不確実性をもたらす要因には、大気中の雲や水蒸気あるいは粒子状物質などの影響がモデルの中でうまく表現されていないことなど数多くあります。その中で、実は、森林などの植生が気候に及ぼす影響も、うまく表現されていない項目の1つなのです。そのような背景のもと、私達は、森林が気候に影響を及ぼす基本的なメカニズムを解明し、それを適切にモデルで表現するための研究を進めています。

2. 森林と気候が影響を及ぼし合うしくみ

森林が大気と影響を及ぼし合う経路には大きく分けて3通りの経路があります(図1)。そのまず第1は、CO₂の吸収・放出を通して影響しあう経路です。つまり、森林が大気中のCO₂を吸収することによって温室効果が軽減され、気候に影響が及びます。一方、森林は吸収したCO₂を使って成長し変化します。森林が変化するとCO₂の吸収量も変化し、それが大気に再び影響を及ぼすこととなります。第2は、大気もつ運動量を森林が吸収することによって相互作用する経路です。森林の樹木などは、風を遮ることによって大気の流れに抵抗を及ぼします。すると、森林のすぐ上の風は弱まりますが、もっと上の風はあまり弱まらないため、高さ方向に大きな風速勾配ができます。その結果、風の歪みが元になって、樹高の数倍程度の大きさをも

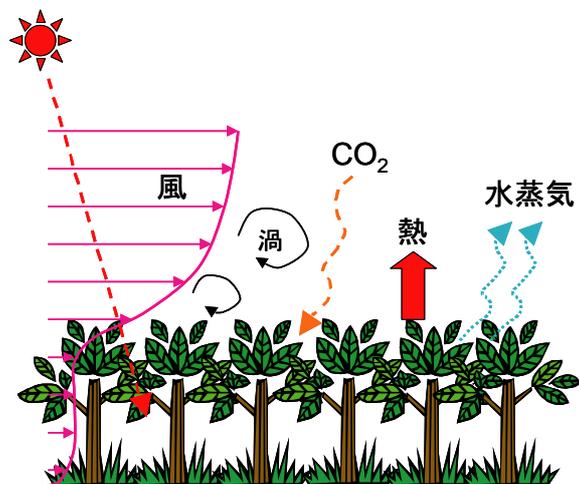


図1 森林と大気とが影響を及ぼしあう基礎過程の模式図

つ渦がたくさん作られます。こうして作られる渦が、森林と大気との間でCO₂や熱などを運ぶ役割を果たし、第1第3の経路に寄与します。一方、樹木にとってみれば、風に強く押されることによって風害を受けたり、ひどい場合には倒木によって森林が衰退したりしてしまうこともあります。そして第3の経路は、熱や水蒸気の交換を通しての相互作用です。非常に荒っぽく言ってしまうと、地球上の気候は、大気が太陽エネルギーをどこでどれだけ吸収するか、によって決まっています。しかし、大気は透明ですので、太陽エネルギーを直接吸収することはあまりありません。一旦、地表面がエネルギーを吸収し、下から大気を暖めることによって、太陽エネルギーが大気に伝わることになります。このとき、地表面上に植生があるかないか、仮に植生があったとしても葉の茂り具合はどうか、また葉に無数にある気孔が開いているか閉じているかによって、大気に伝えられるエネルギー量が変わってきます。すると、大気の循環が変化し、エネルギーが運ばれていく先が変わります。逆に植物にとっては、適度な温度と湿り気があると最も効率よく光合成ができますが、極度な高温や乾燥にさらされると光合成や蒸散（気孔を通した水分蒸発）の機能に障害をうけてしまうことにもなります。

3. 森林と大気のやりとりの観測ネットワーク

上に述べたように、森林が気候に影響を及ぼすおおもとは、ひとつひとつの森林がどれだけのCO₂を吸収し、また熱や水蒸気をどれくらい大気とやりとりしているか、ということにあります。ですので、究極的な目標は、それらひとつひとつをモデルで正確に再現することになります。しかし、世界には、光合成や蒸散の機能が異なるたくさんの種類の森林があります。しかも、同じ種類の森林であっても、生育条件が違えば環境に対する応答の仕方が異なってきます。したがって、まずはその現状を把握するために、世界中の森林で実際にどのようなやりとりが行われているかを知る必要があります。そのような目的で、現在、世界中の森林で気象観測タワー（図2）を用いた観測が実施されています。得られた観測データは、FLUXNET（フラックスネット；<http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/>）と呼ばれる観測ネットワークのデータセンターに集められ、世界中からデータを見ることができるようになっています（図3）。また、FLUXNETは地域ごとのサブネットに分割されていて、日本を含むアジア各国の観測サイトはAsiaFlux（アジアフラックス；<http://www.asiaflux.net/>）の下に統合されています。

では、実際にどのようなデータが取られているのかを見てみましょう。図4は、私達がこれまで観測を行ってきた埼玉県川越市にある落葉広葉樹林での、CO₂吸収量の季節変化についての観測結果です。この森林では、冬は葉がなく、4月中旬頃に葉が出始め、12月に落葉するという季節変化が起こります。それと合わせて見ると、この森林は葉のある期間（4－11月）はCO₂を吸収していますが、それ以外の期間は逆にCO₂を放出しているということが分かります。樹木が光合成できるのは葉のある期間だけであるのに対して、樹木や土壌微生物の呼吸は一年中続くからです。これらを1年間積算して初めて、この森林が正味としてどれだけのCO₂を吸収しているかが分かります。また、図5は、森林に吸収された日射のエネルギーが、大気加熱（顕熱）、水分の蒸発（潜熱）、樹木および土壌の加熱（貯熱）のそれぞれにどのように割り振られているのか、またそれがどのように季節変化しているのかを示したものです。まず、冬



図2 気象観測タワーの例（森林総合研究所の富士吉田試験地）

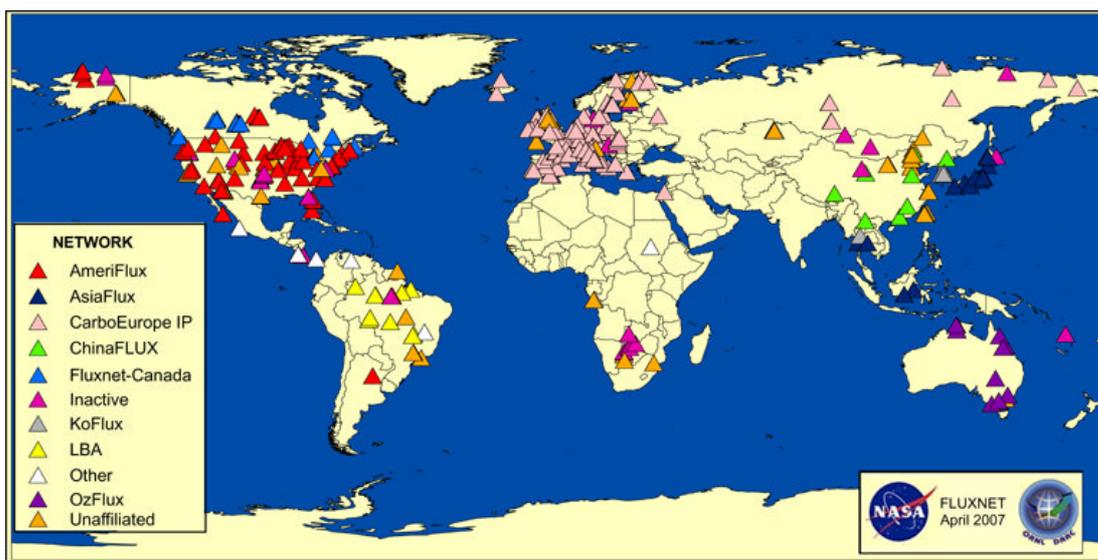


図3 FLUXNETに登録されている観測サイトの位置 (FLUXNETのHPより)

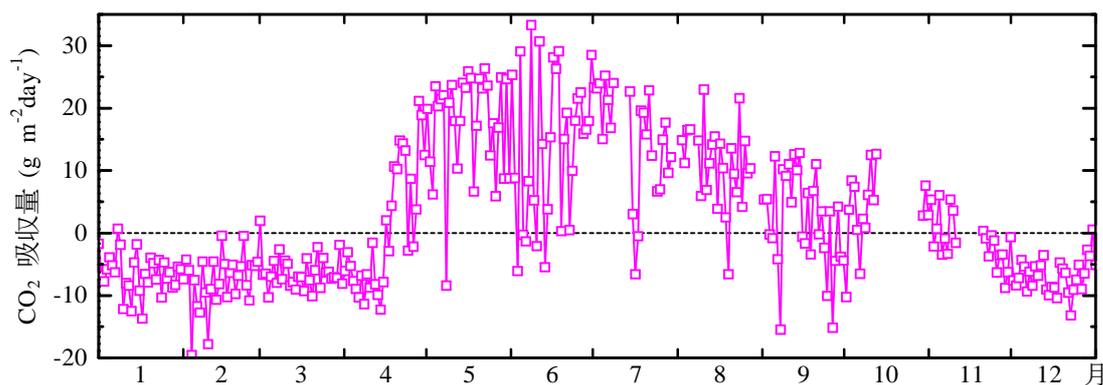


図4 森林によるCO₂吸収量の季節変化 (森林総合研究所の川越試験地での観測結果)

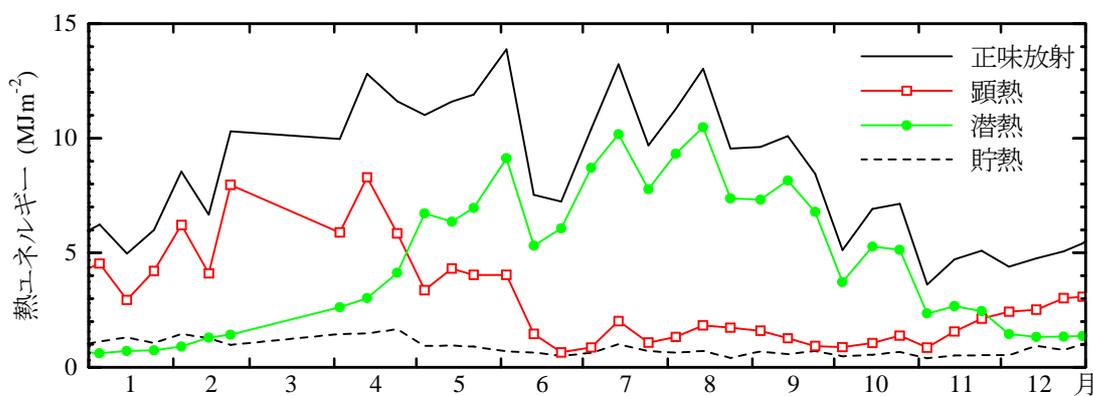


図5 日射エネルギーの配分の様子 (森林総合研究所の川越試験地での観測結果)

正味放射：ほぼ森林に吸収される日射エネルギーに対応、顕熱：大気を加熱するエネルギー、
 潜熱：水分の蒸発に使われるエネルギー、貯熱：樹木と土壌を加熱するエネルギー

(落葉期)には、水分を蒸散する葉がないために潜熱の割合が小さく、結果として日射エネルギーの大部分が顕熱となり、森林が大気を強く加熱する形になっています。この状況は、葉が開くとともに急変し、潜熱の占める割合が大きくなります。樹木が活発に蒸散を行うようになり、日射エネルギーの多くがそれに使われるようになるからです。このため、夏(着葉期)には顕熱へのエネルギーの配分が小さくなります。また、貯熱に費やされるエネルギーは年間を通してあまり大きくありません。このように、落葉樹林には、冬は大気を加熱する作用が大きく、夏には蒸散による熱消費が大きいという、気温の変動を緩和するのに都合のよい働きがあることが分かります。

4. 森林をふく風の働き

光合成も蒸散も木の葉っぱ1枚1枚の上で起こる現象です。そんな小さな現象が広い地域の気候に影響を及ぼすのは、大気中のCO₂が風によって森林の中へ運び込まれたり、蒸散された水蒸気が風によって森林から運び出されたりしているからです。したがって、森林と大気のやりとりをモデルで再現するためには、風によるこうした輸送効果をうまく取り入れる必要があります。そのためには、森林付近の風がどのようにして流れているのかを知る必要がありますが、風は非常に複雑に乱れながら流れているため、その様子を観測で把握するのは大変困難です。そこで、数値シミュレーションによって森林付近の風の様子を再現し、風による輸送効果を明らかにする研究が行われています。図6は、シミュレーションによって得られた、ある一瞬間における風速の上下方向の成分とCO₂濃度の分布を示したものです。図6上図では、上昇流と下降流が風下方向に向かって交互に並んでいる様子が見られます。時計回りの渦が次々と発生しながら流されていることを表しています。また、図6下図では、それらの渦に対応するように、下降流の部分では高濃度のCO₂を含む上空の空気が森林の内部に進入し、上昇流の部分では濃度の低い森林内の空気が上空へ運び出されていることが分かります。こうした風の働きがあるおかげで、森林内の樹木は常にCO₂の供給を受けることができ、光合成を続けられるのです。

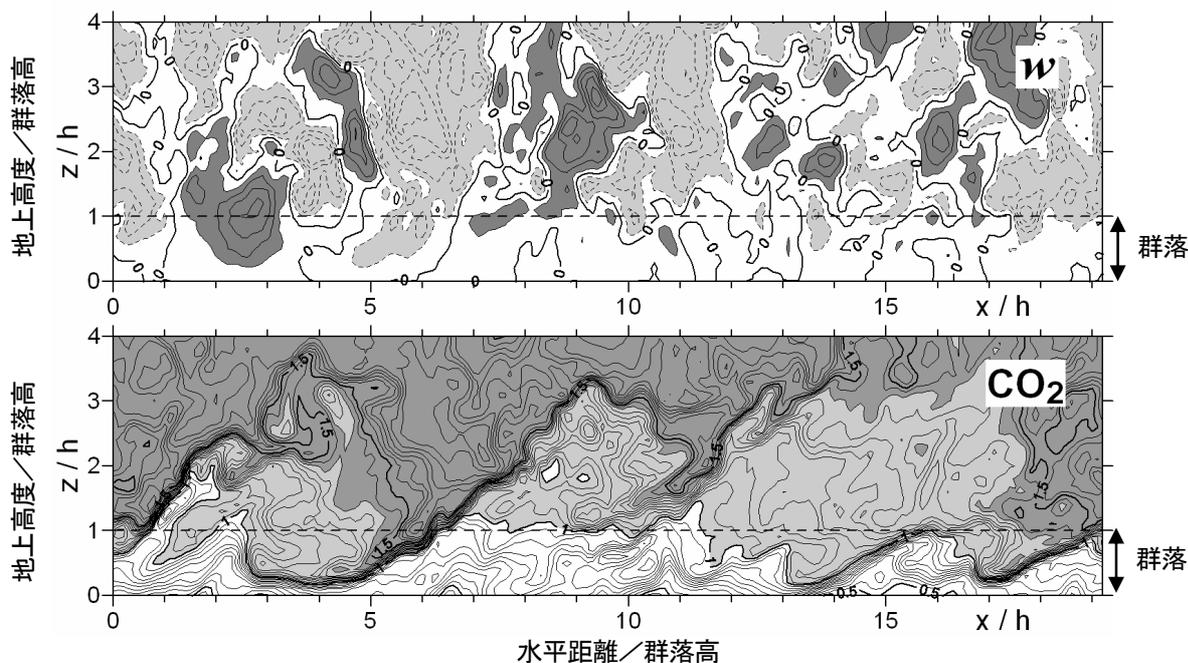


図6 森林付近の風とCO₂濃度の数値シミュレーション結果

上図：風速の上下方向成分（薄い灰色：下降流、濃い灰色：上昇流）

下図 CO₂濃度（色が濃いほど濃度が高い）

5. 森林と大気のやりとりのモデル

森林上に降り注ぐ日射のエネルギーは、一部が葉面などで反射され、別の一部が林冠を透過して地面に達しますが、残りの大部分は葉などに吸収されます。吸収されたエネルギーによって、葉などに含まれる水分が蒸発（蒸散）したり、それらに接する空気が暖められたりします。このとき群落内の大気中に放たれた熱や水蒸気は、上述のように、森林内をふき抜ける風によって群落の外へ運び出され、大気中へ広がっていきます。また、植物は天候などに応じて葉の気孔を開閉し、光合成の速度を調節していますが、このとき同時に蒸散の速度も変化します。すると、日射エネルギーのうち蒸散に使われる割合が変化し、大気に及ぶ影響が変化することになります。そのため、森林と大気のやりとりを再現するためには、光の吸収や風による輸送効果などの物理的な過程の他に、光合成や気孔の開閉など、生物としての機能をモデルに取り入れる必要があります。幸い、植物生理学の分野において、植物の光合成や気孔制御を再現できるよいモデルが既に作られています。それを物理過程のモデルと組み合わせれば、森林を総合的に扱うモデルを作ることができます（図7）。こうして作られるモデルを、先のFLUXNETで得られた観測データに基づいて調整していけば、

世界中の森林がどれだけCO₂を吸収したり熱や水蒸気を大気とやりとりしたりしているかを予測できるモデルが構築できるはずです。その一例として、川越の観測結果をシミュレートした結果を図8に示します。森林に吸収される日射のエネルギーが時間変化すると、それに応じて蒸散に使われるエネルギー（潜熱）や大気を加熱するエネルギー（顕熱）が変化する様子がよく再現されています。

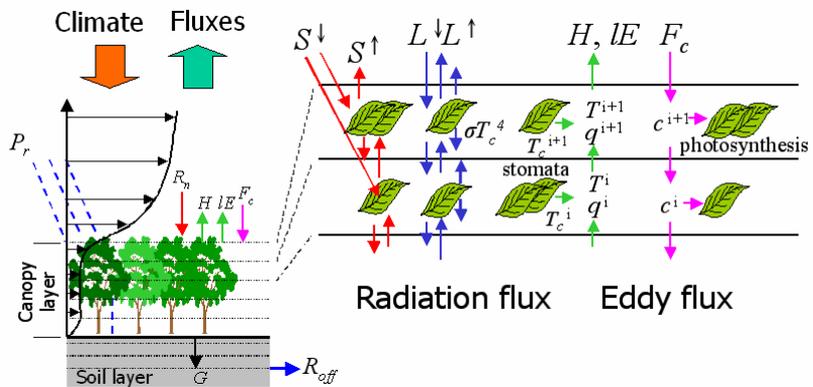


図7 森林と大気とのやりとりを再現する総合モデルの模式図

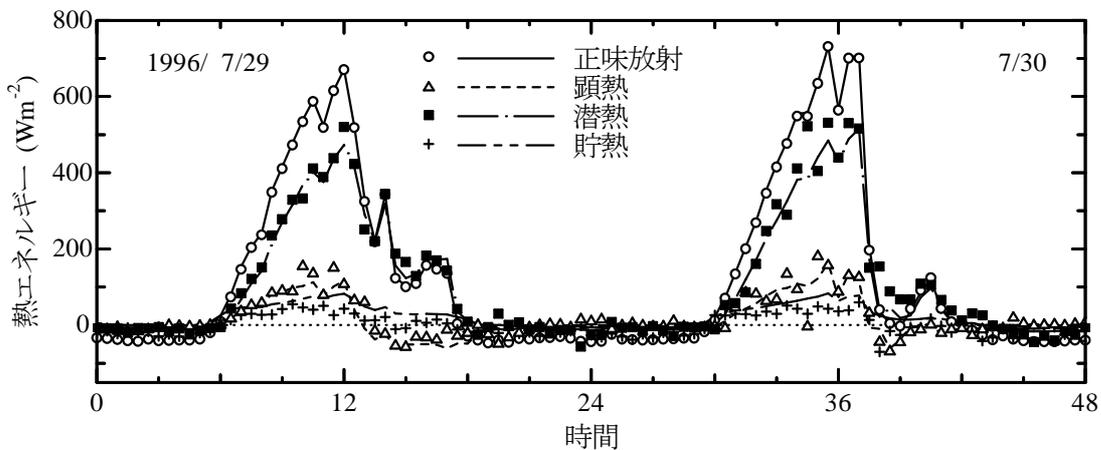


図8 日射エネルギーの配分のシミュレーション結果
点：観測値、折れ線：モデルによる計算値

6. 気候に対する影響評価の例

さて、森林が気候に及ぼしている影響を調べるにはどうしたらいいのでしょうか？たとえば、現存する森林を広範囲に伐採し、それによる気象の変化を各地でモニターすれば分かるかも知れません。ですが、それで私達がいかに森林の恩恵を被っていたかが分かったとしても、もう後の祭りです。一度伐ってしまった森林が元に戻るには百年オーダーの時間がかかります。そのように現実にはできないことも、数値モデルを使えば仮想的に実験してみることができます。

一例として、日本の真夏の気温に対する森林の影響を調べた結果を紹介します。日本の国土は約7割が森林に覆われていますが、その森林における蒸散能力が一斉に半減してしまったらどうなるのでしょうか。図9がその仮想実験の結果です。このシミュレーションは、数百km四方の領域の風や気温などを予測する数値モデル（局地循環モデルと言います）に、上述したような森林モデルを組み合わせて行われたものです。図9は、森林の蒸散能力が半減して一日が経過したとき、通常の場合に比べて真夏の15時における気温がどの程度上昇するのかを示しています。これによると、一般には森林の多い山地で気温が大きく上昇しますが、松本や甲府などの盆地や伊那地方などの谷状地の底にあたる地域では、現地には森林が少ないにもかかわらず、気温が上昇します。これは、山地を広く覆う森林と大気との熱のやりとりが変化するために、いたるところで風の強さや分布が変化し、その結果、山地から盆地へ向かう水平方向の熱の移動量が増加するためです。こうして森林の影響が広範囲に広がっていくことになります。

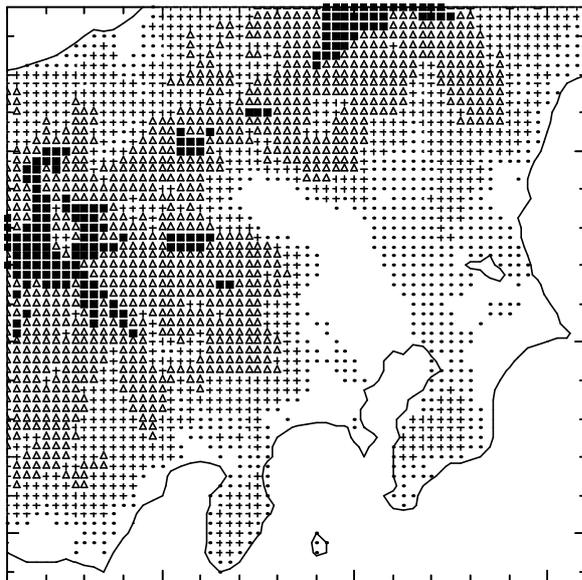


図9 森林の蒸散能力を半減させた場合の気温上昇量の分布
(・ : 0.3–0.6°C、+ : 0.6–0.9°C、△ : 0.9–1.2°C、■ : 1.2°C以上)

7. おわりに

以上、1枚1枚の葉っぱの上で起こっている現象が、風の働きによって広い範囲の気候に影響を及ぼす様子を見てきました。しかし、話はまだ終わりではありません。数十年、数百年といった長期的な視野で見ると、植生は気候の変化に適応して光合成などの特性を変化させたり、その分布域を変化させたりします。そして、そのことが再び気候に影響を及ぼすことにつながります。気候が変化すると再び植生がそれに応じて変化します。こうして、植生と気候は互いに影響を及ぼし合いながら変動していきます。ですから、長期の気候変動を予測・研究するためには、動的に変化する植生と気候との相互作用を考慮して行かなければなりません。それには、植物が成長したり枯れたり、他の種類の植物と競争して分布を広げたり、といった生態学的な過程をもモデルに取り入れていく必要があります。既に、それに向けた研究が世界各国で精力的に進められています。

2. 雪は「天からの手紙」か？

北海道教育大学 岩見沢校 油川 英明

1. はじめに

雪の結晶は、大きさがわずか数ミリほどの繊細な氷の結晶で、ふたつと同じものがないといわれるほど千差万別の形をしており、このことはまた、多くの謎を秘めていることの象徴でもあるかのように思われる。そして、雪の結晶は自然の至芸とも言えるもので、遠い昔より人々の興味を引いてきた。時には風流物として、またある時には博物学の対象としていろいろに語りつがれ、科学的な調査・研究も行われてきた。このなかで、中谷宇吉郎は、自らの研究を集約し、それを簡潔に、かつ印象的に表現した言葉として「雪は天から送られた手紙である」という名言を残した。このようなことから、今回の小講義は「雪は『天からの手紙』か？」と題して、中谷の言葉が語りかけることをひもときながら、私個人の瑣細な実験をもとに、雪の結晶の生成について新たな知見を紹介しようとするものである。ただ、この知見は研究半ばのものであることをここにお断りする次第である。

2. 「天からの手紙」と雪結晶の形態

中谷 (1949) は、天然の雪結晶を観察し、そのほとんどの形のもを人工的に作製することに成功したことから、雪結晶の形を見れば、実験の結果から、その生成条件、つまりは温度と湿度が分かるとして、雪の形は上空の気象を知らせてくれる便りという比喻により、「雪は天から送られた手紙である」という言葉を記した。この名言は雪の科学に限りなくロマンを与えるものであるが、ここでは中谷のそのような意図から少し離れて、「天からの手紙」たりえるかどうかということを、やや醒めた目で眺めてみることにする。

中谷の雪の研究は、先ず天然雪の観察からはじめられているので、我々も同じように雪結晶の実体を見ることから出発しよう。雪は、中谷が述べているように (1949)、平均としての径が3mm、厚さが10 μ m、質量が0.05mgの氷の微細な結晶で、基本の形は六角形の板状と柱状の二種である。これらが単独であったり、あるいは組み合わせの形で降ってくる。板状のものは柱状のものに比べて形が複雑で種類も多い。雪の結晶は二つと同じものがないと言われるように、上空からの結晶を次から次へと顕微鏡で写真撮影してみても、すべてが異なっている。それをはじめてグループ分けして、体系的な雪結晶の分類表 (図1) を作成したのが中谷である (1949)。現在は、中谷の分類表をもとに、そのおよそ2倍の80種類ほどに分類されている。

板状の結晶は当初、一枚の板のように考えられていたが、基本の構造は二重で (図2)、なかには数段に重なった形態のものも見られる。結晶の中心には小さな六角柱があり、一般にはそのうちのどちらかの底面が大きく成長して板状結晶になっている (Iwai, 1983)。これを真上からみれば、中心に小さな六角形を据えた一枚の板状に見えるわけである。この中心部の六角柱 (必ずしも角柱状になっていない場合もある) が少し長ければ、上下の六角形の面から競合することなく結晶が成長し、はっきりとした二重の構造になり、図2に示されたような鼓型の結晶になる。また、中心部の小さな角柱から板状の枝が成長する際、その上下の面でどちらかの枝が優先的に伸びる場合があり、そのときは、例えば上の面から3本の枝が伸びれば、下の面からは3本、上が2本なら下は4本というように、合計が6本になるような成長をする。これを真上からみれば、平板状の六花に見えるが、実は二段になっ

ているわけである。さらに、これらの枝は、結晶の内側に向けた面には特有なレリーフ文様ができており、外側に向けた面には文様がなく平坦になっている。柱状結晶も、中空の結晶などの内側には凹凸があるが、外側は比較的平坦になっている。つまり、雪結晶はレリーフ文様のある「裏」と平坦な「表」を持っているわけである（油川，1992）。このような雪結晶の裏・表の成因について、中谷（1949）は人工雪の断面の観察から、結晶を成長させる水蒸気量が枝の両面で異なるからではないかと述べているが、実際の雪結晶の裏・表が水蒸気の供給方向には関係していないと見なされることから（油川，1992）、このような結晶形態は雪結晶が水蒸気から昇華成長するということに少し疑問を抱かせるものである。

雪結晶は一般には六花であるが、それ以外にも二花や三花などの枝数の少ないもの、あるいは奇形としての七花や、12本の枝が成長した十二花結晶（中谷，1949）、さらには十八花結晶（Kikuchi and Ueda, 1987）などが知られている。枝数が六花より少ない結晶は、落下中に六花が分離したものであると考えられおり（中谷，1949）、また、十二花及び十八花結晶については六花を基本にした「雪片説」（中谷，1949）や「双晶説」（Kobayashi and Furukawa, 1975）を基に考えられてきているが、それらの成因は完全に解明されているわけではない。

雪結晶の内部には気泡、あるいはその連なった形のものが見られる場合がある。一般に、氷結晶が成長する際に気泡が生成するのは水に溶存している空気の析出によるわけであるが、雪結晶の内部に存在する気泡については水蒸気の昇華による不均一な結晶成長にその成因が求められており（前野・黒岩，1966）、同じ氷結晶として成長の整合性が示されないままに留められている。さらに、板状の雪結晶の枝が接合して一体化する形態や、結晶の

中心部に円形の文様が見られること、あるいは種々の奇形結晶の形成など、これらの成因を追い求めるとき、先の気泡の問題と同様、それは決まって雪結晶の気相成長説（後述）に突き当たり、前進が滞ってしまう。

3. 過去の雪の観察

雪の結晶が六花状であることの最古の記録は、紀元前150年頃の中国・前漢時代の韓嬰による「韓詩外伝」に記された「凡草木花多五出雪花独六出」とされている。それが我が国には9世紀末に伝わり、雪を「六出」と記すようになったようである。韓嬰は燕の人で、その都は現在の北京である。なお、現存する「韓詩外伝」には「六出」と記載された箇所は失われて見あたらない。唐代（618-907）初期の「藝文類聚」に「韓詩外傳曰凡草木花多五出雪花独六出雪花曰霰雪曰同雲」とあり、また宋代（960-1279）初期に編纂された太平御覧にも「韓詩外傳曰凡草木花多五出雪花独六出雪花曰霰」とある。わが国に「六出」ということが宇多天皇（887-896）の時代に伝来し

I 針状結晶	1. 単針		IV 平板角柱	1. 鼓型	
	2. 針組合せ			2. 平板付砲弾型	
II 角柱状結晶	1. 単角柱			V 側面結晶	3. 粉雪
	2. 角柱組合せ		側面結晶		
III 板状結晶	1. 正規六花		VI 霰粒付結晶	1. 霰粒付各種	
				2. 厚板	
	2. 三花 四花系			3. 霰状雪	
	3. 十二花			4. 霰	
	4. 畸型		VII 無定形	1. 氷片状	
	5. 立体六花			2. 水滴付	
6. 放射型		3. 其他		各種	

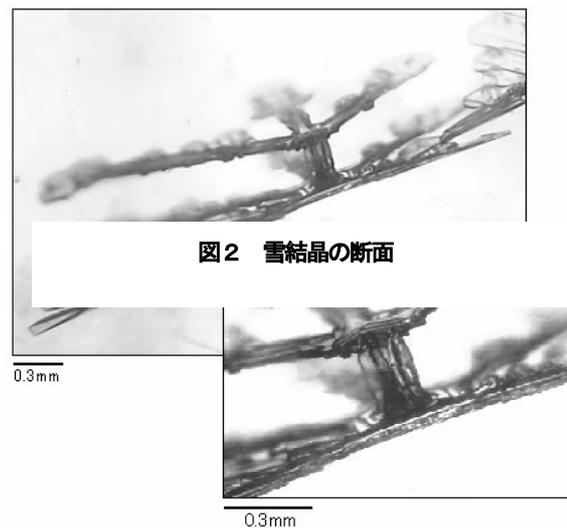


図2 雪結晶の断面

たとすれば、それは「藝文類聚」によるものと推察される。

西洋では13世紀中葉から肉眼により雪の観察が行われていたとされるが、その形を描いた最古のものは1555年におけるウプサラ（スウェーデン）の大僧正オラウス・マグヌスのスケッチである。これは、結晶の形を示しているとは言い難いが、雪にはいろいろな形のものがあるということを描いた点においては注目される。

その後、ケプラー（独）やデカルト（仏）などが雪の観察やスケッチ、あるいは六角形についての考察などを行っており、1893年にはノイハウス（独）が初めて雪結晶の顕微鏡写真を撮影している。そして、1931年にはベントレー（米）の写真集（Bentley and Humphreys, 1931）が出版された。ベントレーは1865年、米国バーモント州のジェリコの農家に生まれ、ほとんど母親の教育で育ち、17才のときにカメラを購入してもらい、雪結晶の顕微鏡写真撮影を始めた。撮影の多くは納屋で行われ、その枚数は5400枚ほどとも言われているが、そのうちの2453枚が写真集“Snow Crystals”として米国気象学会の援助により出版された。ベントレーは、当時としては高価な（乳牛10頭分以上とも）カメラを操作し、その写真は、暗視野のなかに雪結晶だけが白く写し出されるように加工している。この例を図3に示す。

我が国には雪の文様として雪華（結晶）文様のほかに雪輪文様が知られているが、これは、前述のように、雪が「六出」という中国からの伝来知識と、京や江戸での降雪はたくさんの結晶が絡み合った「雪片」として降り、多くは丸い塊で見えることから、雪を円形（雪片）でかつ六出（六つの窪み）になるように描いたものではないかと想像される。一方、雪華文様は、天保年間の土井利位の「雪華図説」によるもので、当時の江戸においても“大炊文様”として流行したことが伝えられている（小林，1982）。我が国における雪の結晶の観察は、本草学者の小野蘭山（1729～1810）がその著書に記したことに始まり、洋画家の司馬江漢（1738～1818）が顕微鏡で観察した雪のスケッチを銅版画に描き、これが我が国で最初に描かれた雪の結晶であると言われている。

4. 雪結晶の顕微鏡写真撮影法

ベントレーの写真に感銘を受けた中谷は、1932年に雪の研究に着手した。中谷は当初、ベントレーのような黒地に白く浮き上がる結晶の写真撮影を試みた。それは、ウルトロパーク顕微鏡という反射照明型顕微鏡による撮影であったが、この顕微鏡写真について中谷は、雪結晶の微細な構造が余り鮮明に撮影されないとして、以後は透過の斜光照明による撮影を主に行っている。

その後、雪結晶の撮影はカラーによっても行われるようになった。その始まりとして、吉田六郎は中谷の指導のもとに、雪結晶のカラー映画撮影を手がけ、その後、「1光源2色照明法」による雪結晶の顕微鏡写真撮影法をつくりあげた（樋口，1962）。これ以後、雪結晶を白、背景を青として撮影する方法は、吉田の方法に倣っていると言える。

小林（1969）は、吉田の照明方法の原理をヒントに、比較的手軽に雪結晶のカラー写真撮影の方法をつくりだした。この方法の特徴は、光源を二つ用いていることである。つまり、吉田の方法の困難なところは、一つの光源から二

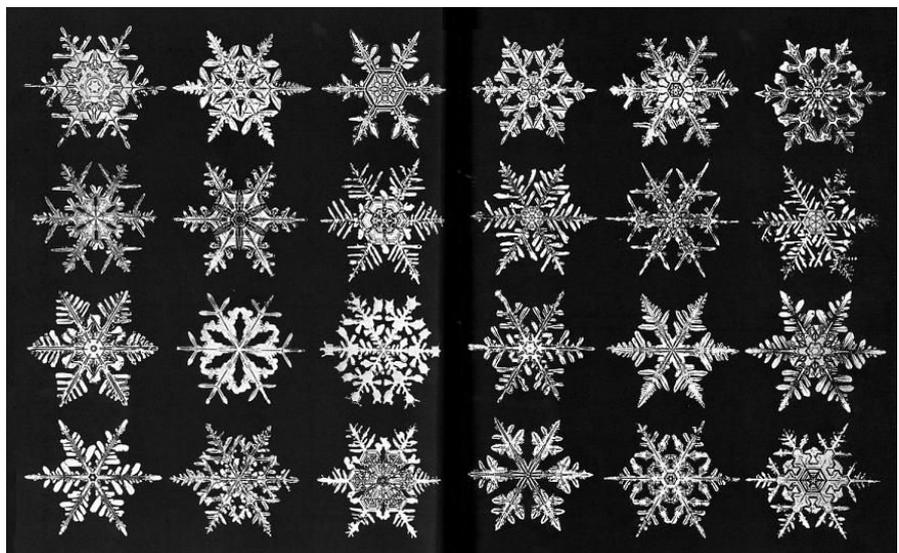


図3 ベントレー（1931）の雪結晶の写真（写真集の見開き2頁分）

色の照明を得ることであるから、それを個別の光源にしたわけである。

さらに幾つかの撮影法が考案されてきたが、ここでは照明器具のなかにフィルターを包み込んだ、いわゆる内包型フィルター式撮影法（油川，2005a）について述べる。この方法は、凹面鏡を照明用の器具として使用した一般の顕微鏡に、簡易フィルターを用いるだけの簡単なものである。すなわち、図4に示したように、顕微鏡の光源から発した白色光は照明用の凹面鏡により反射されて試料を照射するわけであるが、このとき顕微鏡により観察される範囲は、通常、対物レンズの開口角によって決められる。つまり、凹面鏡からの光はこの開口角の部分だけが対物レンズに入射するわけで、この領域をフィルターで覆えば、顕微鏡の視野にはそのフィルターを透過した光線のみが入射し、また、フィルターの代わりに光線を遮断する円板を挿入すれば、対物レンズには光が直接入射せず、顕微鏡は暗視野の状態になる。そして、載物台に雪結晶があれば、凹面鏡による対物レンズ視野外の斜光が結晶を照射し、反射・屈折を生じる。その光のうち、対物レンズの開口角以内のものは顕微鏡に入射し、白色光の結晶像を結ぶことになる。このようにして、フィルターの色を背景にして雪結晶だけが白く写し出される写真を撮影することができる。その顕微鏡写真の例を図5に示す（実際は青色の背景）。

5. 人工雪の作製法

5-1 中谷の人工雪作製法

中谷は、雪結晶のいろいろな形を観察し、これらがどのようにして成長するのかを探り当てるために、雪を人工的に作製する実験を始めた。実験は先ず、霜の結晶を作製することからはじめられ、そこから「空間に霜の結晶をつくる」という発想で、ウサギの毛を空中に吊した対流型装置が考案され（図6）、人の手で初めて雪の結晶をつくるという、いわゆる人工雪の作製に成功した。

時に1936年3月12日であった。ここから、新たに雪の実験的研究が開始された。そして、天然雪と人工雪の研究を集大成したものとして、1949年に「雪の研究」が出版され、1954年には米国のハーバード大学から、新たに「中谷ダイヤグラム」などが加筆され、“Snow Crystals—Natural and Artificial—”が出版された。

中谷は、人工雪の実験結果から、雪の多様な形は温度と水蒸気量、この場合は過飽和水蒸気量であるが、それらによって決められるという結論を導いた。そして、それを図表にまとめ、いわゆる「中谷ダイヤグラム」（Nakaya, 1954）が示された（図7）。この中谷ダイヤグラムによれば、板状結晶、例えば樹枝状結晶は、温度が -14°C ～ -17°C の範囲で、湿度が約108%（氷の表面に対して）以上において成長する。また、 -10°C よりも高い温度、あるいは -20°C よりも低い温度の領域では、柱状の針や角柱などの結晶が成長する。そして、湿度が増加すると結晶の基本の形はそのままに、形態が複雑に変化して行く。このような実験的研究から、中谷は「雪の研究」の緒言に、「雪は低温に於いて水蒸気が或る種の核に昇華作用によって凝縮した氷の結晶である」と記している。この気相成長説は雪結晶の研究の「前提」となり、今日に至っている。

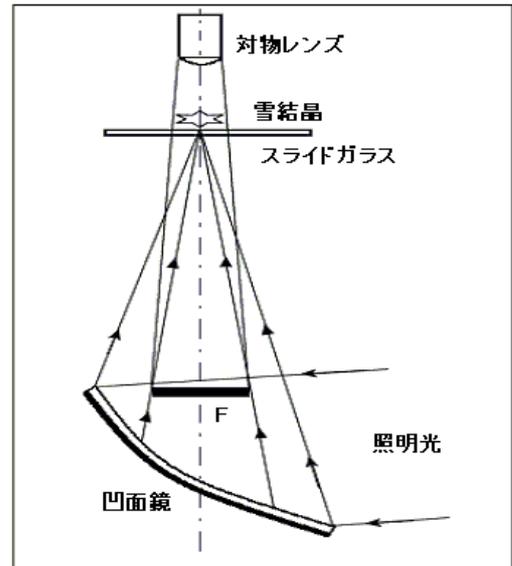


図4 内包型フィルター式撮影法の原理



図5 内包型フィルター式による撮影例

中谷ダイアグラムは、雪結晶の成長を示す国際的な標準図となっており、その内容は大略、次の通りである。1) 雪結晶の形態は温度と湿度（氷飽和以上）によって決定される、2) ほとんどの雪結晶は水飽和を超えた過飽和領域で形成される（図7のWは水飽和の曲線）、3) 雪結晶の基本的な形状（柱状か板状か）は温度によって決まり、温度の低い方へ向かって柱状、板状、柱状と繰り返す、4) 一つの温度には一つの形状（柱状か板状）が対応し、同一温度で二つの形状のものが形成されることはない、5) 雪結晶が形成される湿度には上限があり、その値は140%（氷に対して）で、これを超えると雪結晶には氷の細粒が形成される、ということである。

5-2 その後の人工雪作製法

中谷が水蒸気対流型の人工雪作製装置を開発した後、水蒸気の供給方法や冷却方法にいろいろと工夫が施された装置が考案されてきた。それらを列挙すると次のようになる。

Hallett and Mason (1958) による拡散型装置は、水分補給源を上方に設置して下方をドライアイスで冷却し、水蒸気を上方から下方へ拡散させることにより雪結晶を成長させるというもので、実験は300%ほどの高過飽和度領域まで行われている。このとき、繊維を上下方向に取り付ければ、主には各箇所温度に応じたいろいろな種類の雪結晶を一度に成長させることができる。また、Kobayashi (1960) は対流型装置を常温式に改良して、中谷の人工雪の追試を行っている。最近では、平松式（平松, 1997）のペットボトルを利用したものや、兎毛の代わりにタンポポの綿毛を用いたもの（香川他, 2003）、あるいは冷却にペルチェ素子を用いた装置（村井, 2005）などが開発されている。なお、人工雪作製の教材や降雪装置も一般に市販されている。

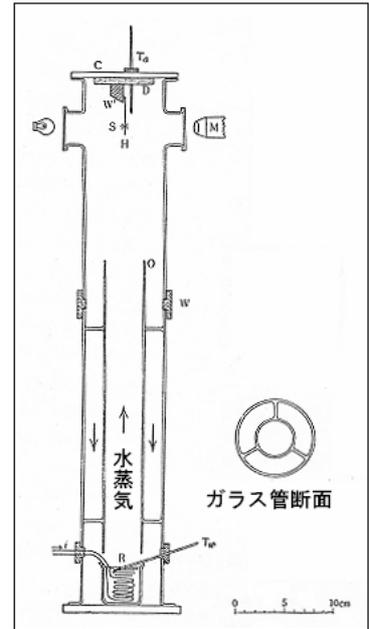


図6 中谷の人工雪作製装置

6. 人工雪の「謎」

天然の現象から人工雪の生成条件をみても、幾つかの「謎」に突き当たる。第一の謎は、雪結晶の成長に関わる水蒸気量についてである。中谷ダイアグラムでは、ほとんどの雪結晶は水に対して過飽和の領域で成長している。つまり、天然であればとうに露や霧粒ができるはずの状態なのに、それを乗り越えた領域である。また、その後の研究では、中谷のこの水蒸気量の測定は過小に見積もられているとして、例えば樹枝状結晶は全て水飽和を超えた過飽和のところ成長するとして修正も見られる（Kobayashi, 1960）。いずれにしても、降雪現象が日常的であることから、雪が生成するためには「過飽和」という特異な状態が、上空で日常茶飯事に起こっていないことにならないことになる。しかし、天然の雪雲でも、また一般的な雲でも、「水飽和」を超える状態は観測されていない。降雪を伴っている雲でさえ、そのなかの水蒸気量は水に対して飽和かそれ以下である（Warner, 1968 ; Tazawa and Magono, 1973）。つまり、天然には「過飽和」は存在しないが、人工的には「過飽和」でないと雪ができないということである。これは雪の生成に関して明らかに矛盾であり、謎である。

第二の謎は、天然において人工雪のウサギの毛に代わるもの、つまり特別な「核」が存在するか否かということである。天然の雲の中には普通、ウサギの毛が存在しているわけではないので、その代わりを見出さなければならない。これは「氷晶核」と呼ばれ、雪の芯となる特別な「核」としてかなり以前から追い求められてきた。しかし、大気中に独自に見られる氷晶核は、平均として1リットルの空気につき2個程度である。一方、降雪中の雪結晶の数は1リットルの空気中に百～数百個で、それ

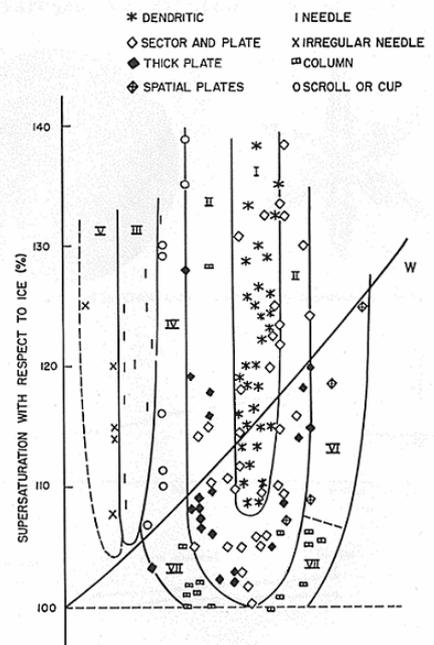


図7 中谷ダイアグラム

らには2桁ほど違いがあり、特別な核とは何かということ、つまりはウサギの毛の意味が問われることになる。

そして、謎の第三は人工雪が成長するまでの時間である。雪結晶の代表として樹枝状結晶をとりあげてみると、その径は前述のように平均3mm程度であるが、この大きさに成長するまでに人工雪の装置では少なくとも30分程度の時間がかかる。また、さや状の柱状結晶で6時間、無垢の角柱では実に70時間も長い時間が必要とされる（対流型と拡散型では結晶の成長時間に違いがある）。この間、温度と湿度はほぼ一定に保たなければならない。しかも、過飽和の状態においてである。天然の雪結晶の成長速度については雪雲内における実測値を得ることができないので、人工雪のこのような長い成長時間が天然とは異なると断定することはできないが、降雪をもたらす積乱雲内の気流の激しさなどから考えて、雪雲の中に一定不変で長時間の温・湿度の環境を求めることは相当に困難なことではないかと判断される。

7. 雪結晶作製の新たな試み

天然においては、大気が水飽和の状態に達して以降、無数に存在する凝結核に水蒸気が凝結して水滴が形成されるため、湿度が水飽和を超えることはあり得ない。また、理論的にも、氷点下であっても水蒸気が水滴となって液相に変化することの方が、固相の氷を形成するよりもエネルギー的に有利であることが示されており（黒田, 1986）、大気の水蒸気量が飽和に達したとき、通常はまず水滴が形成されるものとみなされる。実際、以下に紹介する実験においても、 -15°C ほどの温度までは、水蒸気は液相として容易に過冷却微水滴を形成することが認められた。

人工雪の生成に関わる過飽和の問題について、その解決の手がかりがKumai (1951)により示されていた。それは、電子顕微鏡により、天然の雪結晶には無数の凝結核が付着しているということの発見である。このことは、雪結晶の成長には雲粒、つまりは過冷却微水滴が液相として関与しているのではないかということを示唆するものであった。また、一方では、人工雪の作製において、微小な過冷却水滴が樹枝状結晶などに付着して、結晶を成長させていることが観察されていた（花島, 1944）。

このようなことから、雪結晶の生成に関わって、過冷却微水滴の固相変化が直接的に観察できるように、従来とは少し異なる方法で雪結晶の作製実験が試みられた（油川, 2005b）。その結果、過冷却微水滴がそのまま氷晶に変化することや、樹枝状結晶などが過冷却微水滴を捕捉しながら成長することが認められた。このような過冷却微水滴の相変化は、微水滴の過冷却度だけで一義的に決まるのではなく、その凝結形成の過程に強く関係していることが見いだされた。

7-1 実験の装置

この実験の装置は、恒温槽により温度制御された冷媒を用いることにより、常温の実験室において実験容器（ケース）の中に過冷却微水滴を形成させ、それらの微水滴から雪結晶を生成させようというものである。装置の概略を図8に示す。装置中央部の微水滴を封入する実験ケ

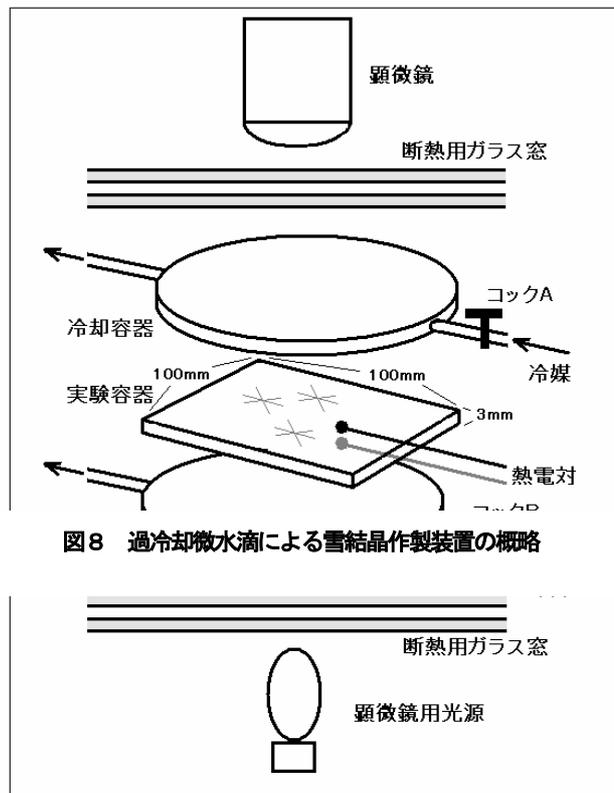


図8 過冷却微水滴による雪結晶作製装置の概略

ース（内径；10cm×10cm×0.3cm）は、顕微鏡によりその内部が観察できるように透明なアクリル板を用いて作られている。

実験の準備として、まず、図8に示された実験ケースを取り出して分解し、上面と下面のアクリル板に合成樹脂の薄膜を貼り付ける。このような薄膜を用いる理由は、付着した水滴が空中に浮遊する雲粒のように、球状に保たれるようにするためである。また、ラップの帯電現象から、結晶成長に関する電氣的な影響を調べることもできる。

次に、噴霧器により、アクリル板の薄膜面に蒸留水の微細な霧粒を全面に噴霧する。それらが霧粒で満たされたなら、二枚の板の間に枠縁を入れ、箱状に組み立ててケースを作り、その端の数ヶ所をテープで固定した後、それをさらにラップで包んで密封する。そして、ケースの上下面の温度を測定するために、図8に示したように熱電対の感温部を各々の面の適当な箇所にテープで固定する。さらに、そのケースを冷却用の2つの円盤状容器で挟み込む。この円盤状容器は透明で、各々に冷媒の出入り口が取り付けられており、それらには1台の恒温槽から冷媒がホースで分流されて循環される。なお、この冷媒は、外部から実験ケースの中が観察できるように、透明なエチルアルコールが用いられている。

これらをさらに二重のガラス窓の付いた断熱の板で上下から囲み、数ヶ所を止め金具で実験台に固定する。そして、この上に顕微鏡を設置し、ガラス窓を通して微水滴の付着した実験ケース内に焦点を合わせ、微水滴の付着状態や変化を観察するわけである。

7-2 実験の方法

実験装置が組み立てられた後、実験ケースの冷却を開始する。この場合、ケース内において氷点下の温度で微小な過冷却微水滴を凝結させるために、このケースの冷却は二段階的に行われる。すなわち、第一段階は、上、下面のどちらか、今の場合には上面の微水滴がほとんど蒸発して容器の下面だけに水滴が付着した状態とするために、下面だけを氷点下近くの温度に冷却する。ケース上面の水滴が全て蒸発したことが確認されたならば、冷却の第二段階として、実験ケースの上面に取り付けられている円盤状容器に下面と同じ冷媒を注入し、同時に冷媒を結晶が生成する適当な温度に設定する。ケースの上下両面の冷却用容器に全く同じ冷媒が流入されることにより、温度差のあったケースの上と下の面は急速に等温度となって行く。両面が等しい温度になると、下面の過冷却微水滴から水蒸気が蒸発・拡散して上面へ凝結し、過冷却微水滴が形成されて行く。

しばらくして、ケースが設定の温度になると、上面に形成された微水滴のある部分が過冷却の破れを生じ、結晶化して一気に氷晶の生成がはじまる。なお、ここで過冷却微水滴の「結晶化」とは、その水滴が氷晶や雪結晶の一部に直接、相変化することを指す。ケース上面に凝結した過冷却微水滴の多くは20 μ m内外の粒径で天然の雲粒にも近く、そのような水滴から生成された氷晶が他の過冷却微水滴を捕捉し、成長していく。また、結晶周囲の微水滴は結晶との水蒸気圧差により蒸発し、消滅していることも認められる。これは、結晶に対して過冷却微水滴から水蒸気としても水分が供給されていることを示している。過冷却微水滴から生成する氷晶は、通常においては、-15 $^{\circ}$ Cほどの温度では樹枝状結晶や扇形結晶などに成長する。また、過冷却微水滴が-10 $^{\circ}$ Cよりも高い温度では柱状結晶に成長する。このように、ケースの設定温度に応じて板状及び柱状の結晶が得られる。また、この実験による氷晶の生成は、板状でも柱状でも特別な核、つまり「氷晶核」を必要とすることなく、過冷却微水滴の結晶化によりもたらされる。

ところで、常温の微水滴を単に過冷却したものや、氷点下の温度であっても短時間で急激に凝結・形成した過冷却微水滴は、単に氷球状に凍結してしまう。例えば、実験ケースの上と下の面の温度差を比較的大きく保ち、強制的かつ急激な水蒸気の移送により形成された過冷却微水滴は一般的な氷球に凍結してしまい、結晶化は起こらない。

7-3 雪結晶の作製結果

上述のような実験で得られた雪結晶の例を図9に示す。これらはいずれも-15 $^{\circ}$ Cほどの温度で生成されたものである。図9のaは径が2mmほどの樹枝状結晶で、その周りの小さな球形のものも過冷却微水滴である。雪結

晶の周りの微水滴は結晶との水蒸気圧差により蒸発し、消滅している様子が見られる。この樹枝状結晶は六本の主枝がほぼ同じ大きさに成長しているが、各々の枝の側枝（二次枝）は成長の箇所や大きさが異なっており、対称性を欠いた形態となっている。これは、当初の過冷却微水滴の分布に対応したものである。

また、bの結晶の中央で水平に伸びている枝は、その下のΛ型に成長している樹枝状結晶と同じものを側面から見た状態である。この結晶の枝は、微水滴を挟むように、幾つもの結晶が階段状に成長している。これらは、それぞれに位置した過冷却微水滴が隣りから伸びた枝により連鎖的に結晶化し、各々が二重の鼓形状に連なって成長している。

cは、比較的多くの雪結晶の生成が見られる場合で、平均して0.5mmほどの径の結晶が30個ほど数えられ、1mm²あたりに1.5個くらいの割合で結晶が生成している。このように多くの数の氷晶を生成させるためには、実験の準備段階で室内のチリを実験ケースの薄膜上に少し多めに付着させることである。それ以外はこれまでと全く同じ実験手順で、特別な「種まき」は一切行っていない。つまり、雪結晶を生成させるための核として、一般的なチリ、すなわち凝結核が十分にその役割を果たしていると言える。

dの結晶は、この装置により作製された結晶のなかでも特異な例で、見かけとして七花になっている樹枝状結晶である。この結晶の中心部には複数の微水滴の痕跡（図の矢印）が見られることから、これは、比較的粒径の大きな過冷却微水滴が、幾つかある特定の位置関係を保ち、それらが結晶化することにより成長したものと見なされる。このような七花の成長については、氷晶核へ水蒸気が昇華して成長するというような従来の雪結晶の成長機構では理解が困難のように考えられる。

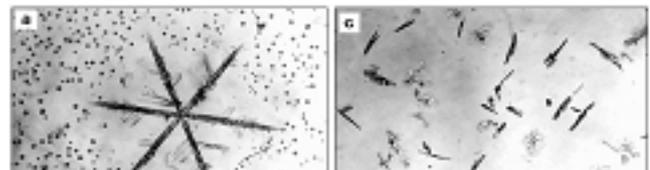
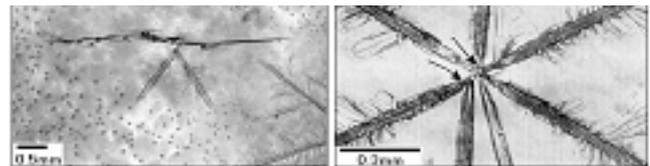


図9 実験で作製された雪結晶



次に、過冷却微水滴のなかで生成する樹枝状雪結晶について、ビデオ映像から抽出した連続画像を図10に示す。この結晶の成長は-15℃の温度によるものである。天然の雪結晶の周りでは、図10のような密集した過冷却雲粒の分布は余り起こり得ないことであるが、結晶が雪雲内を一定時間落下するとした場合、その空間に存在する過冷却雲粒を平面に投影すれば、この程度の微水滴数になるのではないかと推測される。

図10の①と②の画面において、矢印で示された部分に結晶の発生が見られるが、その発端となっているのは比較的大きな粒径の過冷却微水滴である。そして、図10の②と③においては、各々の小さな枝が微水滴を捕捉して成長している様子がうかがわれる。この結晶は、中心が必ずしも一点にはないわけであるが、それは、複数の過冷却微水滴が中心部を形成して結晶を成長させているためで、このことは図9のdの場合と同様である。このような形態の六花は天然においてもしばしば観察されている（中谷，1949）。なお、図10において、⑥の約1mm径の結晶に成長するまでの時間は氷晶の発生から3分ほどで、先の実験装置の場合に比べて相当に短い時間となっている。

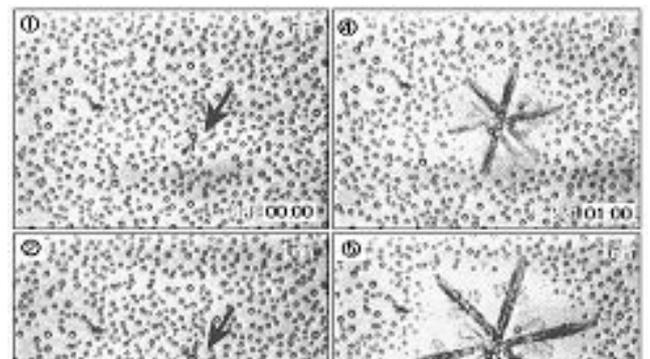


図10 樹枝状結晶の生成過程（右下の数字は分：秒）

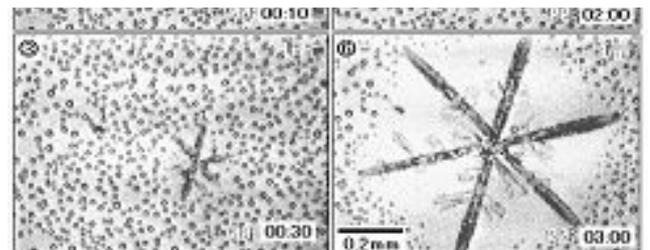


図10の④～⑥において特徴的なことは、結晶の周りの過冷却微水滴が蒸発して、その空間が結晶の成長に

伴って広がっていることである。ここで、この雪結晶は側枝の発達した樹枝状であることから、従来の対流型や拡散型の装置による人工雪の作製では、結晶周囲の空間が水飽和以上の過飽和状態となっていなければならないわけである。しかし、図10では画面全体に過冷却微水滴が存在し、また、水滴の蒸発も見られることから、結晶周囲の空間は水飽和ないしはそれ以下の水蒸気圧の状態にあるものとみなされる。つまり、樹枝状結晶の側枝は、主枝が過冷却微水滴を直接に捕捉・結晶化することにより（従来の装置では、それに相当する液相の溜まりを枝に形成させるため、結晶周囲の空間を水飽和以上の過飽和にする必要があったものと考えられる）、その箇所から成長するものようである。ところで、図10の結晶を含めて、これまで示してきた全ての結晶はいずれも静止した空気中で成長したものであり、雪結晶ないしは気流が移動することにより水蒸気を含んだ空気が強制的に結晶に当たり、結果として結晶表面が過飽和状態になるというベンチレーション効果 (Prupecher and Klett, 1997) などによらなくても、ほとんどの雪結晶の成長が可能であることを示している。

8. 液相の水から雪結晶が成長することについて

雪結晶が液相を介して成長することは理論的にも示されている (Lacmann and Stranski, 1972; Kuroda and Lacmann, 1982)。すなわち、氷結晶の表面は、氷点下においてもある厚さの水の液膜で濡れている状態の方が、水蒸気と直接に触れて乾いた状態にあるよりも、エネルギー的に有利であるということである。そして、その液膜にはエネルギー的に安定となるような平衡の厚さがあり、液膜が厚くなっても、薄くなっても、エネルギー的に安定な方向、つまりは液膜の厚さが平衡となる方向へ変化するわけである。このようなことから、雪結晶の枝が過冷却微水滴（結晶化が可能な）を捕捉することによって、あるいは水蒸気圧差により水分が蓄積して、液膜が平衡の厚さ以上になれば、それを減じるように液相-固相の界面で固相が増加し、結果として結晶が成長することになる。逆に、結晶の表面から水分が蒸発して液膜が薄くなったときは、その厚さを増すように、同様の界面において固相から液相への転化が生じるものと考えられ、結晶は消耗していくことになる。このようなことから、先の実験、すなわち過冷却微水滴からの雪結晶の成長が理解されることになるであろう。

9. おわりに

「雪は天からの手紙」か？という問いは、結局、雪の気相成長説を検証することと同義であると言える。これまで述べてきたことや紹介してきた実験は、この説にある種の疑問を呈するものであった。そのような観点からではあるが、「天からの手紙」については、そこに専門的な意味を求めて雪結晶から具体的な気象を解読しようとするよりも、中谷宇吉郎の科学的発見や研究の成果が“昇華”されたものとして、かつ、それが抽象化されたものとして、そのまま享受することの方が適切であるように思われる。中谷のこの言葉が、自然への憧れを限りなく沸き立たせてくれる名言として、長く語りつがれていくことを望んでやまない。

参考文献

- 油川英明, 1992 : 雪結晶の「裏」と「表」について. 雪氷, 54, 123-130
油川英明, 2005a : 雪結晶のカラー及び暗視野の顕微鏡写真. 天気, 52, 33-35
油川英明, 2005b : 過冷却水滴の結晶化による雪結晶の生成. 北海道教育大学紀要 (自然科学編), 第55巻, 第2号, 1-12
Bentley, W. A. and W. J., Humphreys, 1931 : Snow Crystals. McGrawHill Book Co., New York, 226pp.
Hallett, J. and B. J. Mason, 1958 : The influence of temperature and super-saturation on the habit of ice crystals grown from vapour. Proc. Roy. Soc., 247, 440-453
花島政人, 1944 : 人工雪の生成条件について-補遺. 低温科学, 物理篇, 2, 23-29
樋口啓二, 1962 : 雪の結晶の観察と記録. 気象研究ノート, (13), 45-58
平松和彦, 1997 : 平松式ペットボトル人工雪発生装置. <http://www1.ocn.ne.jp/~kojihk/kazupage/pet.htm>

- Iwai, K., 1983: Three-dimensional structure of plate-like snow crystals. *J. Meteor. Soc. Japan*, 61, 746-755
- 香川喜一郎・伊藤文雄・澤 大輔・佐々木恭介・服部浩之, 2003: 帯電したタンポポの毛を用いた人工雪生成実験. *雪氷*, 65, 29-32
- Kikuchi, K. and H. Ueda, 1987: Formation mechanism of eighteen-branched snow crystals. *J. Fac. Sci., Hokkaido University, Ser. VII*, 8, 109-119
- Kobayashi, T., 1960: Experimental Researches on the Snow Crystal Habit and Growth using a Convection-Chamber. *J. Meteor. Soc., Japan*, 38, 231-238
- 小林禎作, 1969: 雪の結晶の二色光源による顕微鏡写真撮影法. *低温科学, 物理編*, 27, 395-397
- Kobayashi, T. and Y. Furukawa, 1975: On twelve-branched snow crystals. *J. Crystal Growth*, 28, 21-28
- 小林禎作, 1982: 雪華図説正+続[復刻版]・雪華図説新考. 築地書館, 161pp.
- Kumai, M., 1951: Electron-Microscope Study of Snow-Crystal Nuclei. *J. Meteor.*, 8, 151-156
- Kuroda, T. and R. Lacmann, 1982: Growth kinetics of ice from vapour phase and its growth forms. *J. Crystal Growth*, 56, 189-205
- 黒田登志雄, 1984: 結晶は生きている. サイエンス社, 265pp.
- Lacmann, R. and I. N. Stranski, 1972: The Growth of Snow Crystals. *J. Crystal Growth*, 13/14, 236-240
- 前野紀一・黒岩大助, 1966: 雪結晶の中の気泡, *低温科学, 物理篇*, 24, 81-89
- 村井昭夫, 2005: ペルチェ素子を使用した対流型人工雪生成装置の製作. *雪氷*, 67, 341-351
- 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究—結晶の形態とその生成—. 岩波書店, 161pp.
- Nakaya, U., 1954: Snow Crystals—Natural and Artificial—. Harvard University Press, Cambridge, 510pp.
- Pruppacher, H. R. and J. D. Klett, 1997: Microphysics of Clouds and Precipitation (2nd edition). Kluwer Academic Publishers, 954pp.
- Tazawa, S. and C. Magono, 1973: The Vertical Structure of Snow Clouds, as Revealed by “Snow Crystal Sondes” Part I. *J. Meteor. Soc., Japan*, 51, 168-175
- Warner, J., 1968: The Supersaturation in Natural Clouds. *J. de Rech. Atmos.*, 3, 233-237

3. 知って得する天気のはなし

～天気予報で病も克服！？～

日本気象協会北海道支社 北原 宏之

〇はじめに

みなさんは「気象病」という言葉をご存知でしょうか。天気や気温、気圧や湿度など気象の変化が原因で、病状が悪化したり、精神的に不安定になったりするものです。「雨や曇りの日には気分がすっきりしない、やる気が出ない、調子が悪い」ということはよく聞く話で、私たちの体は気象現象とは無関係ではないのです。気象と病気の関係は昔から世界中で研究がされており、日本でも「生気象学会」なるものが設立されているほどです。

今年の4月下旬、日本気象協会北海道支社から発表された天気情報の一部に「車の運転や夫婦げんかに注意してください」と付け加えられたことがきっかけとなり、あらためて全国のテレビや新聞、インターネットで大きく取り上げられました。

晴れると虫垂炎が増える？

気温や気圧の変化 体調、気分に影響

「気象病」に 気をつけて

「気象病」とは、気象の変化によって体調や気分が悪化する状態を指します。気温や気圧、湿度の変化が原因で、頭痛、めまい、吐き気、食欲不振、不安感などの症状が現れることがあります。特に、気圧の低下は、虫垂炎やアレルギー反応を引き起こす可能性があります。

「気象病」は、気象の変化によって体調や気分が悪化する状態を指します。気温や気圧、湿度の変化が原因で、頭痛、めまい、吐き気、食欲不振、不安感などの症状が現れることがあります。特に、気圧の低下は、虫垂炎やアレルギー反応を引き起こす可能性があります。

独自の健康注意報

気象庁は、気象の変化によって体調や気分が悪化する状態を指す「気象病」に関する独自の健康注意報を発表しました。この注意報は、気象の変化によって体調や気分が悪化する状態を指す「気象病」に関する独自の健康注意報を発表しました。この注意報は、気象の変化によって体調や気分が悪化する状態を指す「気象病」に関する独自の健康注意報を発表しました。

(2007年5月23日北海道新聞より)

この時は、翌日に低気圧が北海道の北を通過することによって南から暖気が入り、オホ

一ツク海側ではフェーン現象による気温の急上昇が起こると予想されました。このため、これが元でイライラしやすくなる可能性が考えられたのです。

今回は、天気私たちのからだに与える影響例をいくつかご紹介します。

また、天気予報に関する様々な豆知識もお話したいと思います。

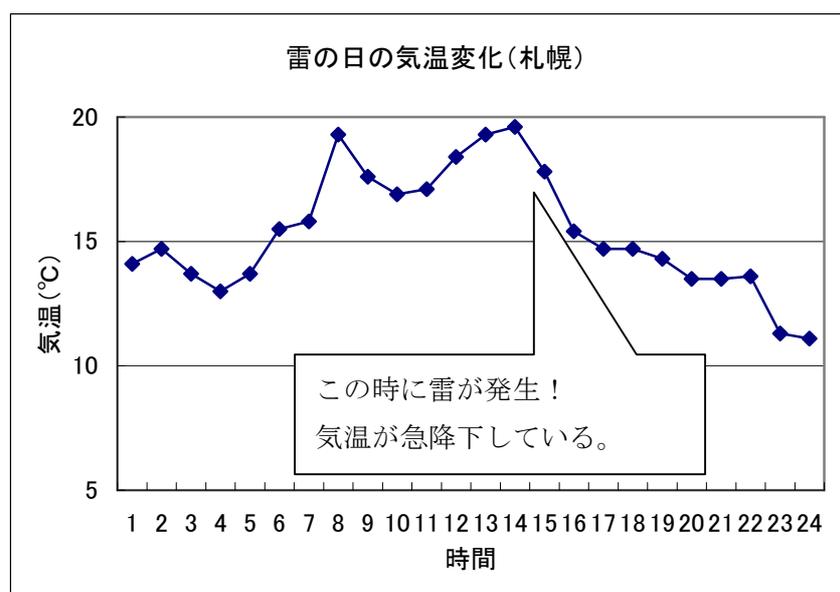
○身近に聞く「気象病予防」のことわざ・言い伝え

世の中には昔から非常に多くの諺（ことわざ）がありますが、その中にも気象病を予防するための諺が数多くあります。

「雷のときにお腹をだしている、へそを取られる」



本当に昔の方々はよく考えられたと思います。子供にしつけを教えるのに非常にインパクトがありますね。でも、もちろん「おへそを取られる」はずがありません。これは、雷が鳴るような場合には気温が高く、蒸し暑いことが多いのですが、雷が鳴り終わると急速に気温や湿度が下がります。この時に、お腹を出しているとお腹が冷えて、お腹を痛くしたり風邪を引く元になったりしてしまうので、きちんとお腹を暖めておきなさい、ということなのです。次のグラフをごらん下さい。



これは札幌で雷が鳴った日の気温の変化を表した図です。15時（午後3時）ごろに雷が発生、その頃から急速に気温が下がっていることがわかります。この「暖から寒」への急激な変化に注意しなければならないのです。

「子供がさわぐと、雨になる」

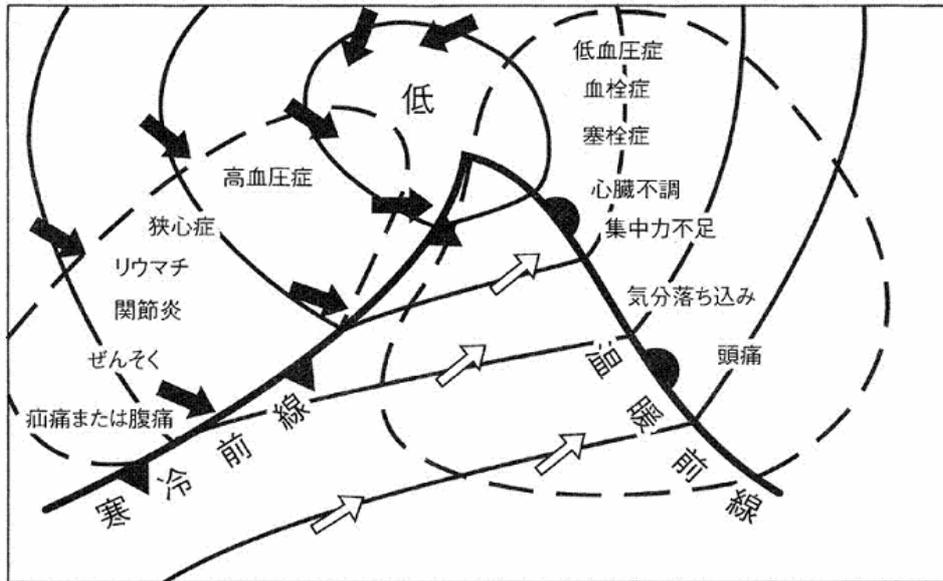


冗談のようにも感じられますが、科学的にみて必ずしも間違いではないようです。もっとも、「さわぐから雨になる」のではなく、「雨を感じてさわいでしまう」のです。

これは、雨が降るような場合には低気圧が接近していることが多く、その気圧の変化を感じているためです。具体的には、体内のアドレナリンが増えて自律神経系の動きが活発化し、神経が高ぶって興奮ぎみになるのだそうです。一方で、大人は抑制が効くが神経過敏になってうるさく感じる、ようです。状況も様々で、他の要因もあり一概には言えないにしても、無関係ではなさそうです。

○低気圧の通過と関連する症状

低気圧の通過とそれに伴って現れやすい症状の分布をまとめたものが次の図です。



温帯低気圧の中心から南東にのびる温暖前線、南西にのびる寒冷前線ともなって明らかになる症状とその範囲(破線でそれぞれを示す)。白い矢印は南西の暖かい湿った風、黒い矢印は北西の冷たい乾いた風。

「医学気象予報(角川書店)」から引用

低気圧の中心から南東方向へ延びる温暖前線の前後では、低血圧症、血栓症、塞栓症、心臓不調、集中力不足、気分の落ち込み、頭痛が起きやすい、とされています。一方、南西方向へ延びる寒冷前線の前後では、その後ろ側(寒気側)で高血圧症、狭心症、リウマチ、関節炎、喘息、腹痛が発生しやすいようです。この分布図は元々ドイツで作成されたもので、日本に合っているのか、統計的にどの程度有為な関係があるのかははっきりしませんが、あらかじめ症状の発生が予測できれば少しは気持ちも楽になるかもしれませんね。

ここで、低気圧をもう少し見てみましょう(次の図)。



一般に「低気圧」と言ったら、「温帯低気圧」のことを指します。この温帯低気圧は、「暖気」と「寒気」がぶつかりあうことによって発生・発達し、活発な雲を作ります。特に寒

冷前線付近で雲が発達するため、この前線が通過するときには激しい雨や雷、突風が発生することが多く、気温や湿度、気圧や風の変化が大きくなります。

なお、温帯低気圧に対して「熱帯低気圧」がありますが、これは海から蒸発する水蒸気がエネルギーとなり、発達した雲ができます。このため、発生するのは海面水温の高い熱帯地域で、日本付近に来ると勢力が弱まってきます。そして、最大風速が 17.2m/s 以上に発達したものが「台風」と定義されています。よって、台風も低気圧の一つですが、いわゆるよく聞く「低気圧」とは構造が異なり、前線を伴っていません。

○高気圧の場合

高気圧イコール晴れておだやか、というイメージをお持ちの方が多いようです。そのイメージはだいたい当たっていますが、油断はできません。

ご存知の通り、特に夏に晴れた場合には気温が高くなり、紫外線も強くなります。このような時に注意が必要なのが、熱中症の発生や、紫外線による皮膚がんです。また、高気圧に覆われることによって気圧が上がると虫垂炎が増加するというデータもあります。一方で、“高気圧”でも寒さや曇天をもたらし、体調を崩す原因を作ることもあります。

次に、高気圧の種類と注意点を並べました。

「太平洋高気圧」

太平洋から日本列島を覆うように張り出す大きな高気圧。南から暖かくて湿った空気が北海道にも大量に送り込まれる。夏の高気圧と言えばこれを指す。

<注意点>晴れて蒸し暑くなるので、熱中症や日焼け対策、水分補給が必要。



「オホーツク海高気圧」

高気圧ではあるが、オホーツク海から北海道に湿った空気や寒さをもたらす。

<注意点>春が来て一旦暖かくなっても、5月から6月にかけてオホーツク海高気圧が現れ、どんよりとした雲に覆われ再び肌寒くなることがある(リラ冷えとも言う)。このとき、油断すると体調を崩しやすくなる。7月に出現すると、日照不足と低温で北海道民の気分がすっきりしないだけでなく、夏物商戦や農業関係にも影響を及ぼすことがある。



「移動性高気圧」

大陸方面から2～3日程度で通過していく。春や秋に多い。日中はさわやかに晴れることが多いが、高気圧中心が過ぎると天気は下り坂。

<注意点>天気や気温、気圧や湿度の変化が早く、しかも大きいので油断は禁物。



○知って得する豆話

・マイナスイオンが出やすいのは

家電量販店に行くと、心地良くなるとされる「マイナスイオン発生器」が販売されていますが、自然界ではどのような状況で多く出ているのかご存知でしょうか。

噴水や滝の近くがよく知られていますが、寒冷前線の通過後や台風一過の時にも多くなります。マイナスイオンは、水が落下して分裂したときに放出されるわけですが、湿度が50%前後で最も多く作られるとされ、湿度が非常に高い雨降り中の場合は増えません。よって、雨が強く降ったあと晴れた場合がベストなのです。雨が降った後は、空気中のほこりやチリも洗い流されるので、お散歩するならこのタイミングが良さそうです。

ただし、前述したように前線の通過時には、様々な症状が現れますので、どなたでも心地良く感じるわけではありませんのでご注意ください。

・色で感じる温度

「暖色系」「寒色系」と表現されるように、人は色でも温度差を感じます。ある調査によると、色による体感気温の差は3度くらいあるようです。夏に室温を3度下げようとエアコンを強くしたり、冬に3度上げようと暖房をかけたりすると、無駄にエネルギーだけでなくお金もかかってしまいます。お部屋の色や服装、身近な持ち物をその日の状況によって少し変えるだけでも、気分的に暑さ寒さが違うようです。

・月にも影響される人のからだ

ここまで地球上での原因についてお話してきましたが、実は夜空に浮かぶ「月」にも影響されている、というデータがあります。月が、満月や新月の時には事故が少なく、上弦や下弦の時には多い、というものです。満月や新月の頃には、海では大潮（満潮と干潮の差が大きい時期）になるわけですが、人間の場合は緊張状態になって注意力や反射神経が機敏になり事故は減るようです。一方で、上弦下弦の場合には注意力が低下するようです。

空を見て、月が三日月の場合には気を少し引き締める必要があります。

○天気情報の見方～こんな時はご注意ください～

「大気の状態が不安定」

このようなフレーズ（言葉）がテレビやラジオの天気予報から聞こえてきたら要注意です。なぜなら、晴れ・曇り・雨・雷が全て起こる可能性が高く、しかも急に変化するためです。また、A地点とB地点が数キロ程度しか離れていなくても、A地点は晴れなのにB地点はどしゃ降り、ということも珍しくありません。詳細な天気予報を作成するのは非常に困難となり、気象予報士泣かせとなります。ちなみに、このような時には「局地的な強い雨」「短時間強雨」「落雷」などという言葉もセットになっていることが多くなります。

「発達した低気圧」

低気圧にもいろいろあって、ほとんど影響しないものもあれば、暴風や大雨をもたらして甚大な被害を与えるものもあります。一般に、「台風」に対しては関心が高く警戒される

ことが多いのですが、「低気圧」ではあまり気にしない方が多いようです。しかし、低気圧でも「非常に発達」すると台風以上にパワーを持ち、暴風雨をもたらすことも少なくありません。今後、「発達した低気圧が北海道を通過」という言葉が聞こえてきたら十分警戒するようお願いします。

○傘を持つか持たないか、の判断はココを見る！

お出かけしようとした時、いまは雨が降っていないけど降りそうな気もする、でもできれば傘は持ちたくない、どうしよう？と思ったことのある方も多いと思います。そんな場合に参考になる一例を簡単にご紹介します。

「携帯電話で雨雲を見る」(NTT Docomoの「iモード」)



(A)



(B)

(A:左)では、札幌上空には雲がないことがわかり、すぐに雨の降る可能性は低く、とりあえず短い時間なら傘をもたなくても良さそうだ、ということがわかります。一方で、浜益～滝川～芦別～富良野にかけて雲が伸びており、この地域では雨の可能性があるとわかります。一方、およそ3時間後の(B:右)では、雲が後志地方から石狩地方にかけてかかり始めています。小樽では本降りの雨、札幌市内でも手稲区や西区などでも雨が降り出してきました。札幌中心部では雨が降っていないとしても、1時間後の予想も見てみると(ここでは割愛)、中心部にも雲のかかることが見てわかり、傘を持っていこうと決断できます。

では、これを見る手順を次に紹介します。(最初だけは面倒ですが、一度開いてBookmarkしておけばすぐに見ることができるようになります。「お天気プレミアム」を「マイメニュー登録」する必要があります。)

以下の順番で選択してください。

①i Menu

②メニュー／検索

③北海道メニュー

④ニュース／天気

⑤北のお天気

* ここから「マイメニュー登録」する必要があります。

⑥お天気プレミアム

⑦雨雲メニュー

⑧雨雲予報（カラー）

⑨（札幌ならば）石狩を選択

ここでは、現在の状況と、今後数時間の予想も見ることができ、お出かけの参考になると思います。積極的に活用してみたいかがでしょうか。

○新しい気象用語

今年の4月、気象庁から用語の改正が行われ、新しい用語が追加になりました。

「猛暑日」

一日の最高気温が35℃以上の日を言います。全国的に35℃を超える日が珍しくなくなってきたことから、作られました。

ちなみに、30℃以上の日が「真夏日」25℃以上の日を「夏日」と言います。

「藤田スケール（Fスケール）」

竜巻の強度を示す用語です。元々学術用語でしたが、佐呂間町で竜巻による大きな被害が発生を受けて公式な用語となりました。0～5の6段階で強度を示し、Fスケールとも言います。次に各スケールと予想される被害をご紹介します。

F 0：17～32m/s（約15秒間の平均） テレビアンテナなどの弱い構造物が倒れる。小枝が折れ、根の浅い木が傾き、非住家が壊れることもある。

F 1：33～49m/s（約10秒間の平均） 屋根瓦が飛び、ガラス窓が割れる。ビニールハウスの被害甚大。根の弱い木は倒れ、強い木は幹が折れたりする。走っている自動車が横風を受けると、道から吹き落とされる。

F 2：50～69m/s（約7秒間の平均） 住家の屋根がはぎとられ、弱い非住家は倒壊する。大木が倒れたり、ねじ切られる。自動車が道から吹き飛ばされ、車が脱線することがある。

F 3：70～92m/s（約5秒間の平均） 壁が押し倒され住家が倒壊する。非住家はバラバラになって飛散し、鉄骨づくりでもつぶれる。車は転覆し、自動車はもち上げられて飛ばされる。森林の大木でも、大半折れるか倒れるかし、引き抜かれることもある。

F 4：93～116m/s（約4秒間の平均） 住家がバラバラになって辺りに飛散し、弱い非住家は跡形なく吹き飛ばされる。鉄骨づくりでもペシャンコ。列車が吹き飛ばされ、自動車は何十メートルも空中飛行する。1トン以上ある物体が降ってきて、危険この上もない。

F 5：117～142m/s（約3秒間の平均） 住家は跡形もなく吹き飛ばされるし、立木の皮がはぎとられてしまったりする。自動車、列車などがもち上げられて飛行し、とんでもない

ところまで飛ばされる。数トンもある物体がどこからともなく降ってくる。

○おわりに

今回は人間に対する気象との関係を中心にお話ししましたが、気象の変化を察知する能力は、もちろん人間だけではありません。全ての動物や植物がもっているものです。それは、餌が取れるかどうかであったり、場合によっては命にもかかわるものですから、人間以上に敏感であり、その能力は人間をはるかに上回ると考えられます。これまで、気象や天気予報といえば経済的な観点から見る事が多く、外出や洗濯の都合で晴れるのか雨が降るのかを知る程度、という方も多いように思います。しかし、今後は気象をより詳しく知ること、より快適で前向きな生活ができるようになります。地球温暖化や環境問題もあわせて学んでいくことをおすすめしたいと思います。

○自己紹介



北原 宏之 (気象予報士)

現在、STV「どさんこワイド180」の天気予報(月～水)に出演中。

これまで「朝6生ワイド」「どさんこサンデー」のほか、ラジオの気象コーナーも担当。

4. 地震情報の最先端

— 緊急地震速報 —

札幌管区気象台 阿南恒明

1. はじめに

日本は、世界に占める面積の割合が数パーセントにもかかわらず、世界中で発生する地震の10~20パーセントが日本周辺で発生しているという地理的位置に置かれているため、昔から地震による災害を被ってきました(図1参照)。そんな地理的条件にあるため日本では地震災害から日本を守るために地震に関する学問・研究が進んでいます。その研究の究極の目的は、「いつ」「どこで」「どれくらいの規模の地震が発生するか」という地震の予知であると言っても過言ではありません。最近の研究により「どこ

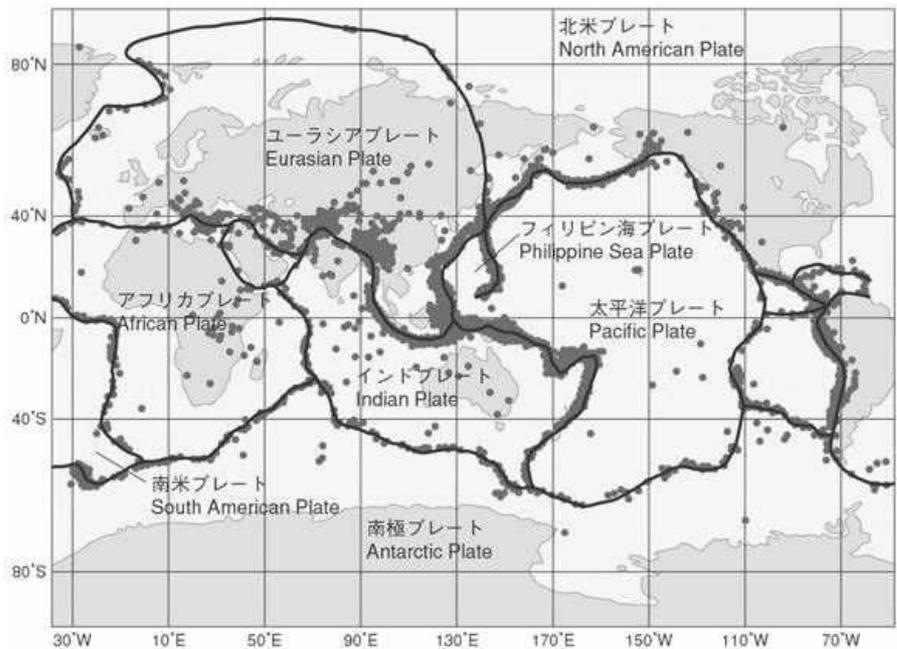


図1 世界の震源分布。1991~2001年までの深さ100km以下のマグニチュード5.0以上の地震。アメリカ地質調査所のデータをもとに気象庁で作成。内閣府ホームページより。

で」「どれくらいの規模の地震が発生するか」については、文部科学省等の取り組みによりかなり詳しくわかってきています。しかし、人の命を地震災害から守るためには、「いつ」という地震の発生する時期を2~3日前という精度で予測(これを短期直前予知と言います)する必要がありますが、この人類の悲願とも言える短期直前予知が可能と考えられている地震は、今のところ東海地域で発生すると考えられている「東海地震」しかありません。従って、現状では「東海地震」以外の地震は何の予告もなしに発生するので、私たちは突然大きな揺れに見舞われることを余儀なくされています。

これから紹介する「緊急地震速報」は、地震発生の予知はできなくても地震による強い揺れが来るのを例え数秒というわずかな時間であっても事前に伝えることができれば、揺れに備えることが可能にな

るのではないかとの発想から生まれた情報です。

緊急地震速報とは、震源に近い観測点で捉えた地震波を使って、直ちに震源、地震の規模、各地の震度などを推定し、地震検知から数秒程度で情報として提供するものであり、地震の大きな揺れが始まる前の防災対応に資することを目指すものです。緊急地震速報は、その提供が主要動（大きな揺れ）の到達に間に合わないことがあるなど、利活用にあたってのさまざまな限界や課題はありますが、適切に利用されれば地震災害の軽減が期待されている情報です。

2. 緊急地震速報のしくみと技術

地震が発生すると震源から地震波が四方八方へ拡がり、これが地表に到達し、被害を発生させます。地球の内部を伝わる地震波には、P波（縦波：およそ7 km/s の速さ）とS波（横波：およそ4 km/s の速さ）があり、一般に大きな揺れを生じるS波より、揺れの小さいP波の方が速く伝わるという特徴があります（図2参照）。この速度の差を利用し、震源近くの観測点でP波を捉え、直ちに震源、地震の規模や各地の震度等を推定し、これを情報として発表します。この情報を迅速に伝えることにより、震源からある程度距離が離れたところでは、主要動が到達する前に情報を受信することができるわけです。

緊急地震速報では、一刻も早く情報を発表するため、1点で地震波を検知した段階から震源等を推定し、情報を発信します。その後2点、3点と地震波を検出した観測点数が増える毎に、震源等の計算を繰り返し、推定精度・信頼度を逐次向上させ、数次にわたり更新し発表するという方法をとっています。

緊急地震速報の実用化に際し、気象庁では（財）鉄道総合技術研究所との共同研究により、1点のP波のデータから震源を推定する手法を開発しました。また、（独）防災科学技術研究所が開発したHi-netを利用した震源・マグニチュードの推定手法も活用し、緊急地震速報の提供を行っています（図3参照）。

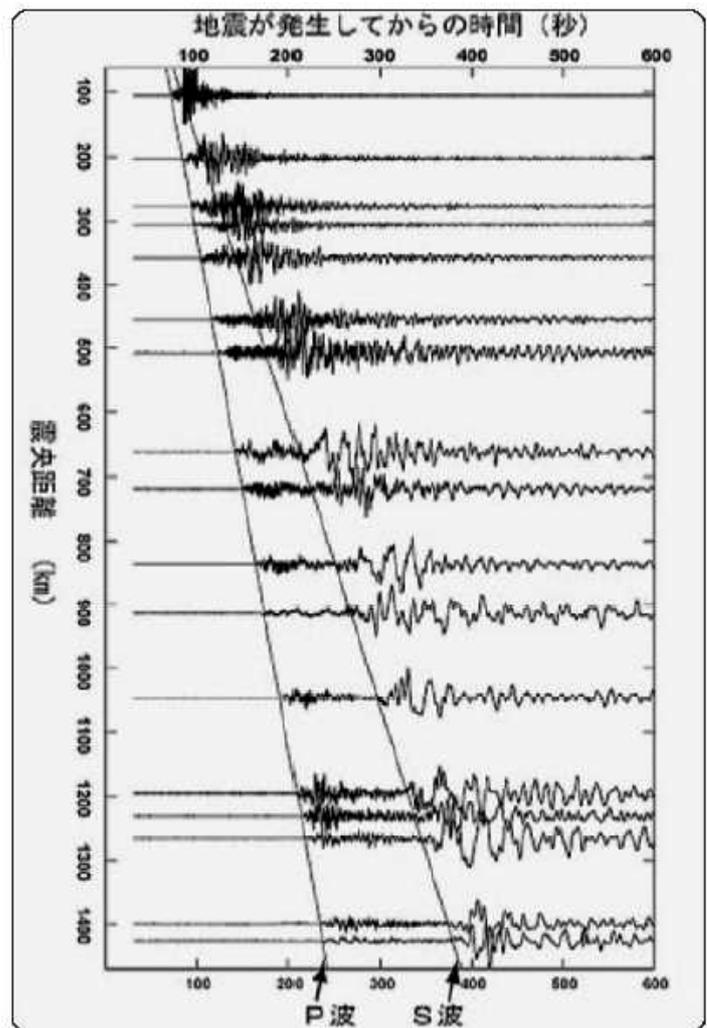


図2 平成13年（2001年）芸予地震における地震波。縦軸は震央までの距離、横軸は時間（秒）を表している。震央までの距離が大きいほど、S-P時間が大きくなっているのがわかる。

3. 緊急地震速報の技術的限界

緊急地震速報には、以下のような技術的な限界があります。

①情報の提供から主要動が到達するまでの時間は長くて数十秒であり、内陸の浅い地震などでは、震央付近では情報の提供が主要動の到達に間に合わない。

②ごく短時間の観測データを基に震源等の推定を行うため、その推定精度には限界がある。これまで提供した情報では、震度の推定精度は概ね±1程度であるが、大規模な地震では、地下の岩石の破壊中にも情報を発表するなどのことから、より大きな誤差を生じる可能性がある。

③1観測点のみのデータを使っている段階の情報では、落雷などのノイズにより、まれに誤報を発信するおそれがある。また、複数の地震が連続して発生した場合には、適切に区別できず的確な情報の提供ができないことがある。

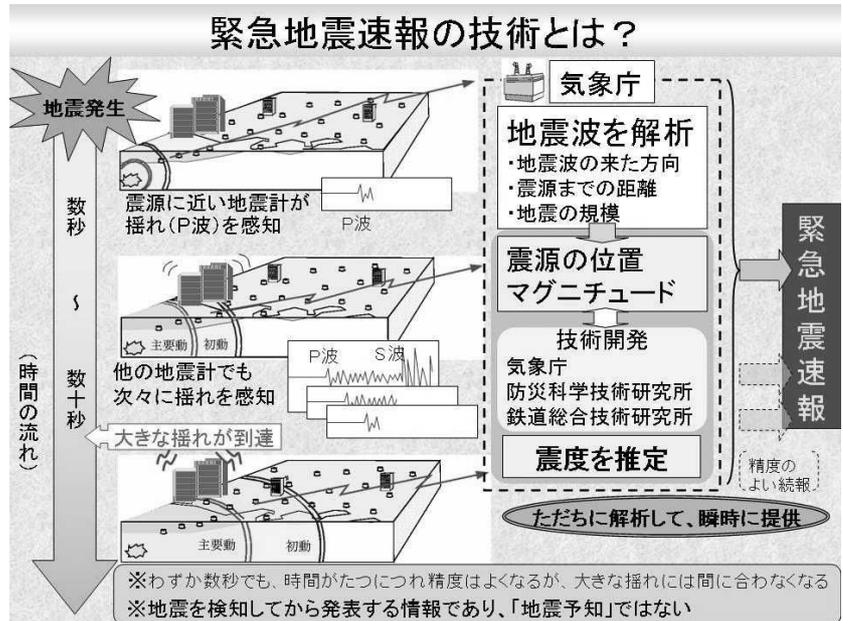


図3 緊急地震速報の技術イメージ。緊急地震速報の震源精度は時間経過と共に向上するが、大きな揺れに間に合わない。

4. 緊急地震速報の段階的な提供

緊急地震速報は、適切に活用されれば地震災害の軽減が期待されるものであり、広く国民に提供されるべき情報です。一方で、上述のような技術的限界やその活用方法が知られていない時点において提供すると、例えば集客施設等で緊急地震速報を聞いた人が出口に殺到するなどの混乱が発生するおそれがあります。

このため気象庁では、学識者や報道機関、関係省庁等で構成される検討会の提言を受け、混乱を生じずに、かつ、少しでも地震被害

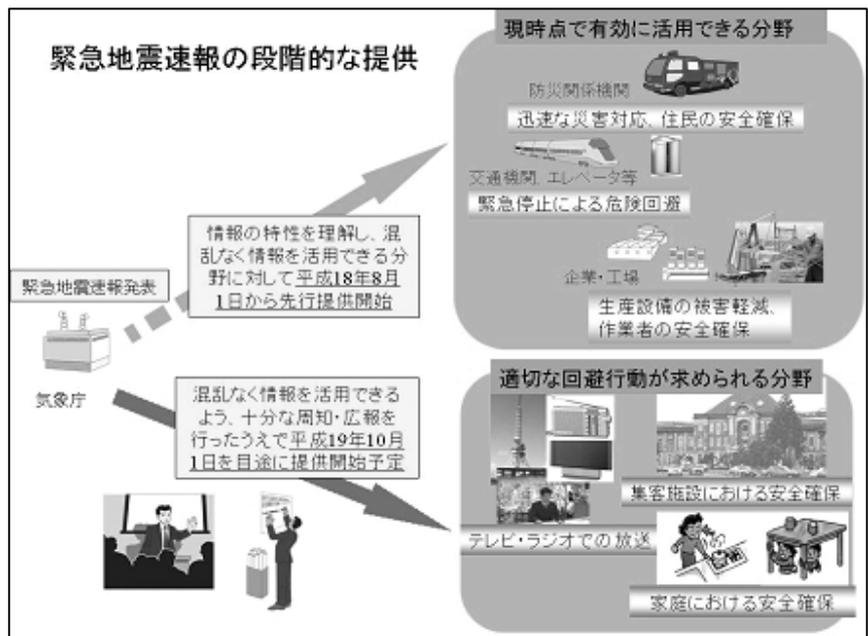


図4 緊急地震速報の段階的な提供イメージ。

を軽減させるという観点から、まずは、提供に伴う混乱のおそれのない列車の制御や工事現場の作業員の安全確保等に利用する分野の利用者に対する先行的な提供を、平成 18 年 8 月 1 日から開始しています（図 4 参照）。

5. 緊急地震速報の適切な活用のために～「利用に当たっての心得」の普及～



図 5 家庭で緊急地震速報を受け取った場合の対応例。頭を保護し丈夫な机の下に隠れる、あわてて外へ飛び出さないなどの対応が望まれる。

緊急地震速報を受信した方が、短時間で適切な行動をとるためには、緊急地震速報を受信したときにどのように行動すればよいかということ事前に決めておく必要があります。気象庁では、これを緊急地震速報の利用の「心得」と呼び、学識者や報道機関、関係省庁等で構成される検討会の検討を経て取りまとめました。

心得の基本は「状況に応じて、あわてずに、まず身の安全を確保する。」です。あわせて、この心得を踏まえた「家庭」、「不特定多数の者が出入りする施設」などの場面における具体的な対応行動の指針も示されています（図 5、6 参照）。緊急地震速報を受信してから主要動が来る前での時間（防災行動をとれる時間）は非常に短いので、事前に「心得」を理解し、情報を聞いたときに直ちに適切な行動をとれるように日頃から訓練を行っておくことも重要です。



図 6 人が大勢いる施設で緊急地震速報を受け取った場合の対応例。係員の指示に従う、落ちついて行動、あわてて出口に走り出さないなどに対応が望まれる。

6. さいごに

気象庁では、今年の 10 月 1 日から緊急地震速報の本運用（広く国民への提供）を開始する計画です。緊急地震速報は、情報を受けてから大きな揺れが来るまでの時間はごく短時間であり、情報を使って自らの身を守るためには、一人ひとりが自分で考えて行動することが必要です。