

# 1 . 北太平洋中層水

## - オホーツクで生まれる北太平洋で一番重い水

北海道大学低温科学研究所 三寺史夫

### 1 . はじめに

現在の気候や大陸の分布のもとでは、世界で最も重たい水は南極大陸の大陸棚やグリーンランドの沖合で生成されている。これが深層水であり、海洋の 1500m 以深のほぼすべてを占めている海水である。それがベルトコンベアといわれる、地球を数千年かけてゆっくりと一周する流れに乗って世界中の海を廻っており、北太平洋がその終着点であるといわれている。

では、太平洋およびその周辺ではどこで一番重たい水が作られているのだろうか？

それがオホーツク海北端の沿岸域であることが、最近の研究でわかってきた。オホーツク海の大部分は旧ソ連領あるいは経済水域内であったことから、日本に近い海にもかかわらず長らくベールに包まれた海であった。しかしながら、1997 年から始まった低温科学研究所を中心とする国際共同研究で、一挙にそのベールがはがされようとしている。そのようにして発見されたオホーツク海で生成される重たい水が、北太平洋中層水という、太平洋の 500m から 1000m を占める海水の起源になっているのである。実際には、北西端の陸棚域でできた海水がオホーツク海内で激しい混合・変質を経ながら北太平洋に流れ出し、親潮の一部となり、さらに黒潮を含む亜熱帯循環の下にもぐりこみながら北太平洋全体に広がっている。人為起源炭素の吸収源および貯蔵庫としても有力と考えられており、注目されている海水である。

今回の講演では、このような北太平洋中層水の様子を亜熱帯循環、親潮・黒潮混合域、オホーツク海、と流れを遡りながら眺めていくことにしたい。

### 2 . 北太平洋中層水

黒潮より南の亜熱帯循環に広がる北太平洋中層水は塩分極小で特徴付けられる。すなわち、塩分の薄い水ということである。図 1 に太平洋（西経 160 度）の塩分の断面を示すが、北緯 50 度あたりから沈みこんだ低塩分の水が北緯 30 度付近では 700m ぐらいまで潜り込んでいることがわかる。それが赤道域に向かって再び浅くなり、北緯 10 度で 100m ぐらいまで上昇している。この塩分極小層は  $1.0268\text{g/cm}^3$  の密度面に沿って分布している。言い換えれば北太平洋中層水の特徴的な重さは  $1.0268\text{g/cm}^3$  ということを示している。

今度は  $1.0268\text{g/cm}^3$  との密度面における塩分の様子を眺めてみよう（図 2）。そうすると、

オホーツク海からベーリング海の西側の塩分が一番うすく、それが南に行くにつれてだんだんと濃くなっていくのがわかるだろう。先に述べたように、その起源がオホーツク海であることが近年特定された。そして、周りの水と混合して少しずつ濃くなりながら亜熱帯循環に乗って南下している。どうやら、北緯 10 度付近で南半球起源のさらに高塩分の水と接しているようである。また一部はインドネシア多島海へ入り、インド洋へと抜けている。

北海道から東のほうに眼を転ずると、アラスカ湾のほうに向かって塩分が徐々に濃くなっているのがわかる。これは亜寒帯循環における中層水で、その上下の海水より温かいので中暖水と呼ばれているものである。温くなるのは、オホーツクから流出した海水が、日本の三陸沖で黒潮水と混ざりつつ亜寒帯循環にのって東方に流されていくからである。このように、三陸沖で黒潮水とオホーツク起源の親潮水が混じりあい、一方は亜熱帯循環に行き、周りより低温・低塩の北太平洋中層水になり、他方は亜寒帯循環に入って周りより高温・高塩の中暖水になるのである。

### 3 . 黒潮と親潮の混合水域

このように見ていくと、北太平洋中層水の通り道としてどうやら三陸沖が重要であることがわかる。このあたりは、混合水域と呼ばれており、黒潮と親潮が複雑に入り組んでいるところである。その概観を眺めてみよう（図 3）。

黒潮は日本の南岸を房総半島から離れ、東方に向かってジェットとなって流れ出ている。これは黒潮続流と呼ばれる流れである。そして、多くの時計回り、あるいは反時計回りの渦を伴っている。黒潮続流は大気のジェット気流に相当するものであり、したがって時計回りの渦は高気圧、反時計回りの渦は低気圧に当たる。黒潮続流は、黒潮が低緯度から北に向かって運んだ大量の熱と塩分を、太平洋の中央部にまで押し出す役割を担っている。

一方、親潮は千島列島沿いを流れ、北海道、三陸沖を南下する。時には房総半島沖まで南下する場合もある。黒潮に比べてかなり低温であり、北海道、東北沿岸での道筋は衛星の赤外画像でもはっきり見ることができる。しかし、黒潮続流と出会った後、表面からはっきりしなくなる。実は、この後親潮が黒潮続流の下にもぐりこみ、東に流されつつ南下して亜熱帯循環に入るのである。

三陸沖で細かく水温、塩分を観測した結果を図 4 に示す。これは、中層水の特徴的な密度である  $1.0268\text{g/cm}^3$  面上の塩分を表したもので、三陸沖ではほぼ 300m から 500m の深さに相当する。これを見ると低塩分の海水が北のほうからやってきて、黒潮続流と合流している様子が見て取れる。面白いのは、ぼんやりした流れがじわじわと合流するのではなく、むしろ川のようにはっきりとした道筋があるということである。

このような親潮の流れは、数値シミュレーションによっても示すことができた（図 5）。この密度面での親潮の流れは周りよりも分厚いことが知られている。そのような分厚い水をオホーツク海から流出させると、川のように流れて行くのである。

実は海洋の 1000m ぐらいまでの循環は風によってほぼ決まっていて、親潮のある亜寒帯

循環と黒潮のある亜熱帯循環の境界はかなりはっきりしており、一般に海水の交換が行われにくい。この境界が、北太平洋では北海道と東北の間ぐらいにある。ところが、親潮は日本の東方でその境界を越え、亜熱帯循環に川のように侵入してくるのである。これは、分厚い流れがオホーツク海から出ることによって日本沿岸における亜熱帯・亜寒帯循環の境界が少しだけ南にずれ、結果的に親潮が亜熱帯循環まで入り込めるためである。またどうやら渦も重要な役割を担っているようである。数値シミュレーションからは、渦が親潮水を糸巻きのように巻き取ってその境界を越えさせるという様子が示され、観測でもそのような様子が捉えられている。

#### 4 . 千島列島周辺の海

ここでのテーマは、オホーツク海の周辺でなぜ分厚い流れができるのか、ということである。そのためには千島列島の存在が重要である。

千島列島は高い海嶺が海の上に顔を出した部分であり、地形は大変複雑である。大部分海峡は比較的浅く、太平洋とオホーツク海間での海水交換はブッソル海峡とクルゼンシュタイン海峡という二つの深い海峡に限られている。

また、この海域では潮汐が激しいことが知られている。2000m 深という深いところでも1m/s もの潮流があった、という報告があるくらいである。この高い海嶺と激しい潮流のため、千島列島周辺では激しく混合が起こっていることが最近わかってきた。その証拠として、図6に列島周辺の衛星赤外画像を示す。夏、太陽によって温められて水温が高くなっているが（黒っぽい部分）千島列島の周辺だけ表面水温が低い（白い）。しかも渦のような現象があちこちで見られる。これは、列島周辺でつよい鉛直混合が起こり、下のほうの冷たい水が表面まで現れてきたためである。したがって、潮汐によって如何にして分厚い水ができ、またそれがどのようにして太平洋のほうに流れ出していくのか、ということが、ここでの問題である。

それを見るために、潮汐の数値実験を紹介する（図6）。現実的な地形を用い現実的な潮汐で駆動しており、表面水温の分布は観測されてものとよく似ている。鉛直断面を見てみると、潮流の風下側で成層の間隔が広がり、よく混ざっていることがわかる。また、層厚の厚い部分が表面水温の低い部分と対応しており、このように混合して分厚くなった層がどんどん広がって千島列島周辺を満たしているのである。

さて、次はその分厚い層がどのように広がるか、ということである。これを見るには、数十年分の計算が必要となるため、簡単なモデルで計算してみた。そうすると、列島のオホーツク海側に強く深い時計回りの循環ができ、さらにそれが西に伸びて、少々うすくはなるものの、オホーツク海南部全体に厚い層ができることがわかった（図7）。このような循環像は観測とも良く対応している。結論として、混合の強い部分は千島列島に限られるが、その効果は西方に伝わり中層水にあたる層はオホーツク南部全体で分厚くなる。そして、それが海峡を通過して太平洋に流出し、最終的に北太平洋中層水となるのである。

## 5. オホーツク海北西陸棚域

中層水を源流へと遡る旅もここで終着点となる。

オホーツク海は大規模に凍る海としては世界でもっとも低緯度に存在することは良く知られている。これは、シベリアに北半球の寒極があるためで、冬になると冷たい北西季節風が吹くからである。この、氷が張る、ということが、重い水を作るために重要なのである。

海水には塩分が含まれていてしょっぱい。しかし、氷という固体になるときに塩分が外に排出することが知られている。すなわち氷はしょっぱくない。このとき外に排出される塩分は濃縮されておりきわめて濃くなる。水温の低い海では、海水の重さ（密度）は塩分の大きさで決まるので、このしょっぱい水は重い、ということになる。

オホーツク海の中でも、北西陸棚域はもっとも大量の氷が生産される場所である。これは寒い地域のためということはもちろんだが、北西の季節風に乗って、できた氷が常に沖合いへと流されていくためでもある。すなわち、岸近くではいつでも水面が開いており、そこで常時冷たい空気と触れるため、効率よく氷が生産されるのである。これは、しょっぱくて重たい水も北西陸棚域で効率よく生産されることを示している。

図8にそのような濃い塩分のできる様子を観測で示した例を挙げる。これは大陸棚の海底に温度、塩分、流速が測れる測器を置いて観測したものである。冬、氷が張り始める1月ぐらいからじわじわと塩分が高くなり始め、3月まで上昇し続けることがわかるだろう。最終的には、北太平洋中層水よりも少し重い  $1.0270\text{g/cm}^3$  弱の海水ができています。この観測は2000年に行われたものであり、北太平洋周辺でできる最も重いこの水の存在は、先から述べているとおりごく最近になって特定されたのである。

この北西陸棚域でできた重い水は、東樺太海流という海流に乗って南に下がり、オホーツク南部の千島海盆に達する。そこで4節で述べたように強い混合・変質を受けつつ、北太平洋へと流れ出ていくのである。

## 6. おわりに

北太平洋は深層循環のベルトコンベアの終着点であり、数千年かけて延々と北大西洋グリーンランド沖からたどり着く。したがって、北太平洋中・深層の水は古く酸素などは使用されて非常に少なくなっている。オホーツク海はそのような北太平洋にあって、効率の良い浄化器の役割をしていると言ってもよいのではないだろうか。すなわち、千島列島周辺の強い潮汐混合によって深いところから古い水をくみ上げ、それを北西陸棚域に送り、海水生産とともに効率的に新鮮な水に生き返らせている、ということである。オホーツク海は、大循環における干潟のような役割を果たしているかもしれない。このようにして新しくなった水が再び太平洋に流れ出て、北太平洋中層水として500mから1000mの層を占めているのである。

オホーツク海の海氷は地球温暖化に対して大変敏感だといわれている。これは温暖化するときに高緯度の気温の上昇が大きいと考えられているためである。数値気候モデルの中には、オホーツク海の氷はなくなる、という予測をしているものさえある。

本当にオホーツク海の氷はなくなるのだろうか？もしオホーツク海で海氷が作れなくなると、それに伴って重い水もできなくなるだろう。すなわち、北太平洋中層水ができなくなる可能性を示している。このことが地球の気候システムや環境にどのような影響があるのか良くわかっていない。しかし、少なくとも新鮮な水を作りそれを太平洋の深くまで押し込むという、オホーツク海の機能がダメージを受けるのは間違いない。これからもオホーツク海の海氷や循環を注意深く見守って行きたいと考えている。

#### 参考文献

Mitsudera, H., B. Taguchi, Y. Yoshikawa, H. Nakamura, T. Waseda, and T. Qu, 2004, Numerical study on the Oyashio Water Pathways in the Kuroshio-Oyashio Confluence, *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 1174-1196.

Nakamura T. and T. Awaji (2004): Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A three-dimensional nonhydrostatic model experiment. *J. Geophys. Res.*, **109**, C09S07, doi: 10.1029/2003JC001850, 2004.

Schmitz, W.J. (1996) On the world ocean circulation. Vol II. WHOI Technical Report. 237pp.

Shcherbina, A.Y., L.D. Talley, and D.L. Rudnick (2004) Dense water formation on the northwestern shelf of the Okhotsk Sea: I. Direct observation of brine rejection. *J. Geophys. Res.*, **109**, C09S08, doi:10.1029/2003JC002196

Yasuda, I., K. Okuda, and Y. Shimizu, 1996: Distribution and modification of North Pacific intermediate water in the Kuroshio-Oyashio frontal zone. *J. Phys. Oceanogr.*, **26**, 448-465.

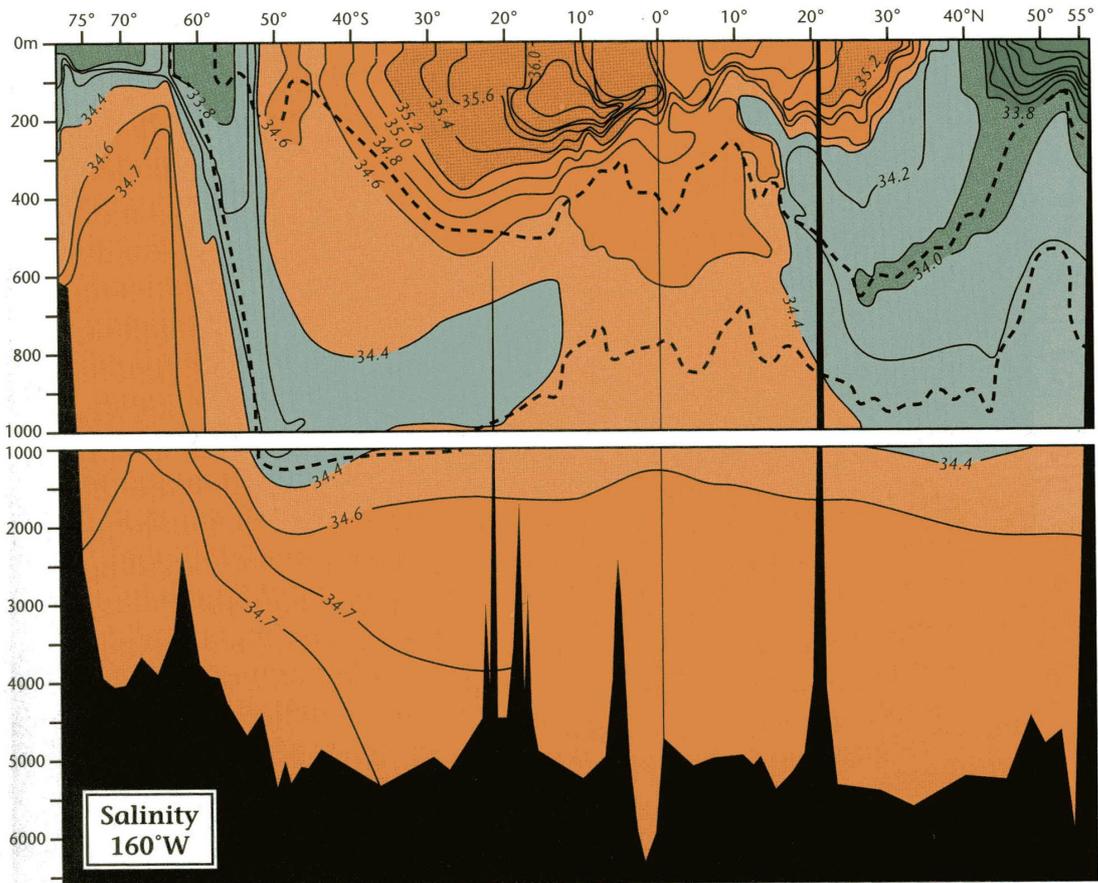


図 1 西経 160 度における塩分の断面。実線が塩分値をあらわす。破線は  $1.0268\text{g/cm}^3$  と  $1.0273\text{g/cm}^3$  の密度面を表す。Schmitz(1996)より引用。



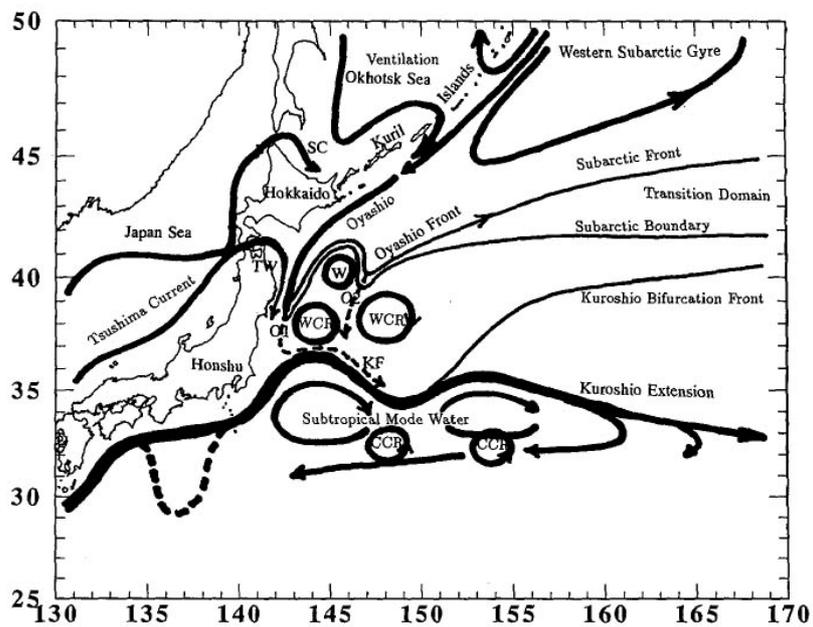


図3 混合水域の特徴的な流れ。Yasuda 他(1996)より引用。

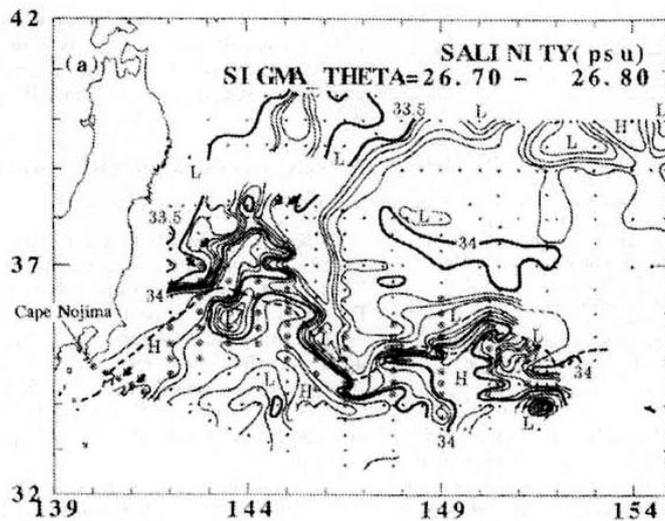


図4 密度が  $1.0268\text{g/cm}^3$  上での塩分の分布。Yasuda 他(1996)より引用。

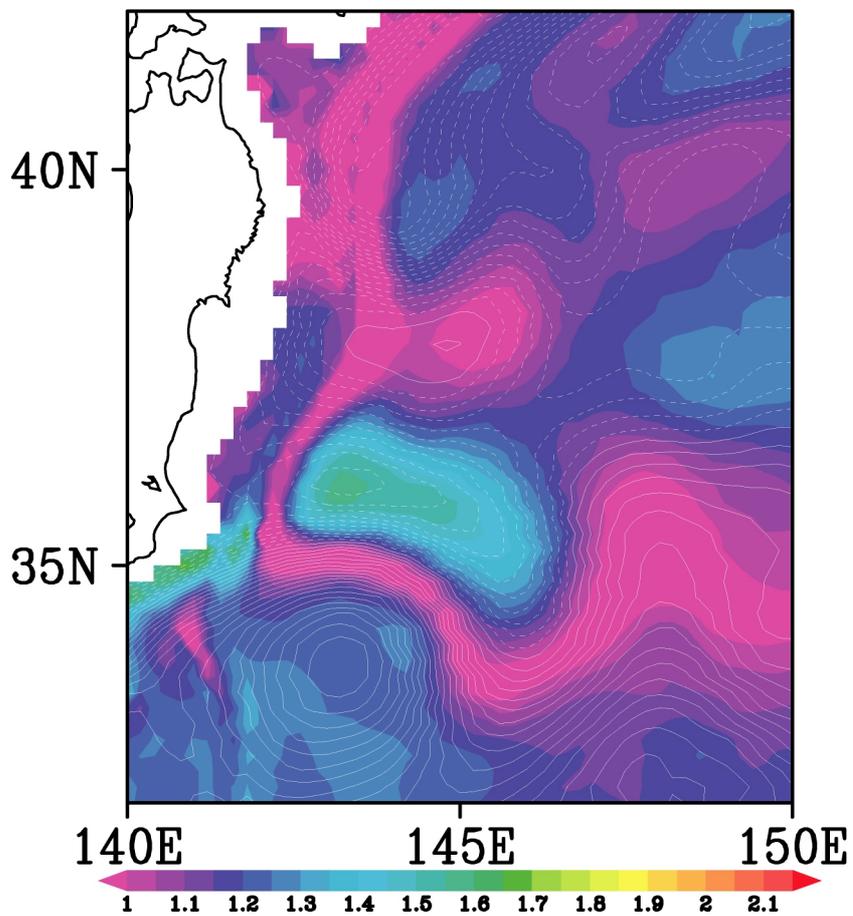
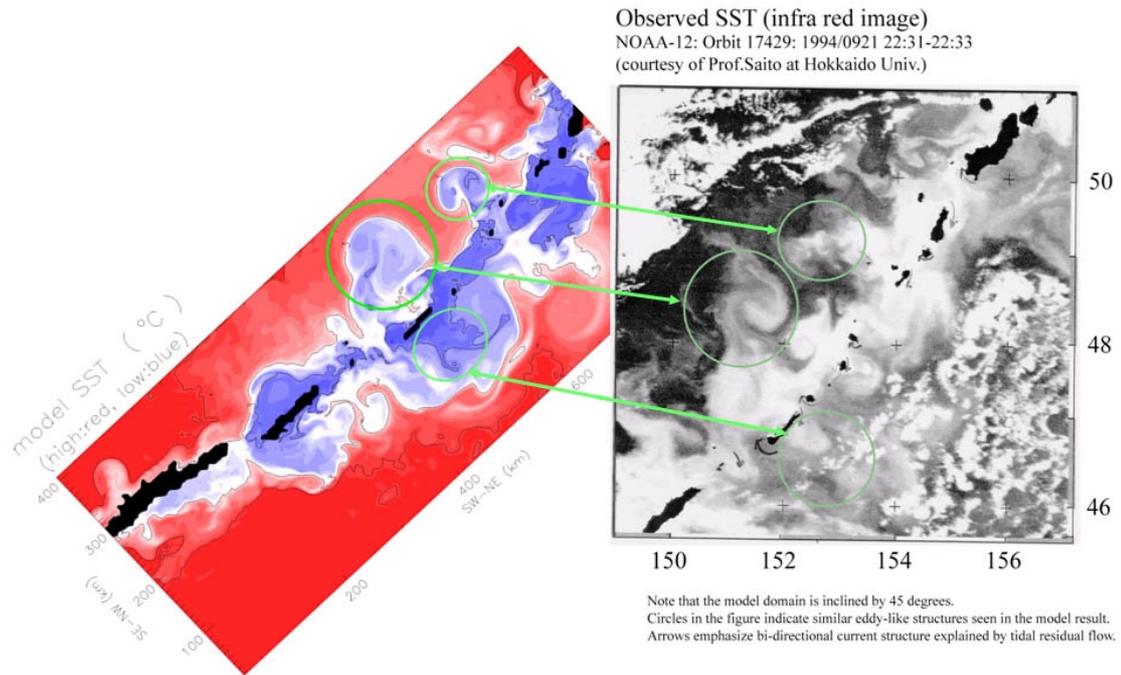


図5 モデルで再現された親潮（オホーツク海起源の水）の通り道。ポテンシャル渦度を描いたもので、紫の部分が層が厚いことを示す。Mitsudera 他(2004)より引用。



Planetary Potential Vorticity ( $-f/\rho_0 * d\sigma_{\theta}/dz * 10^{-3}$ ) and  $\sigma_{\theta}$ (contour)  
25.0000period x=575km (low:white, high:blue)

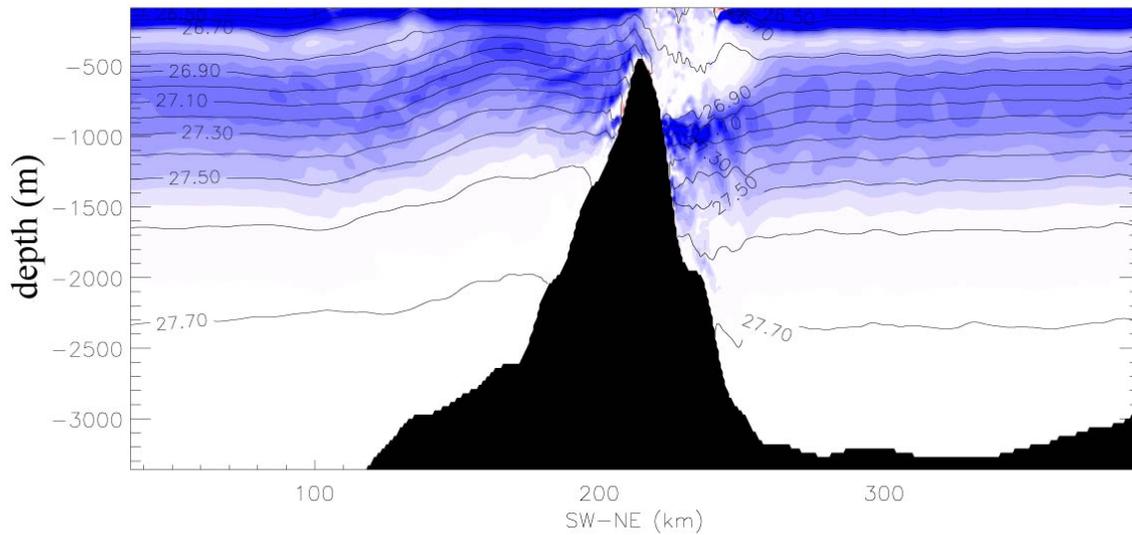


図6 (上段) 千島列島付近の海面水温。右が赤外画像で、左がシミュレーションの結果。  
(下段) シミュレーションによる潮汐混合の様子。海嶺の頂上付近で成層が壊れている様子  
がわかる。Nakamura and Awaji (2004) より引用。

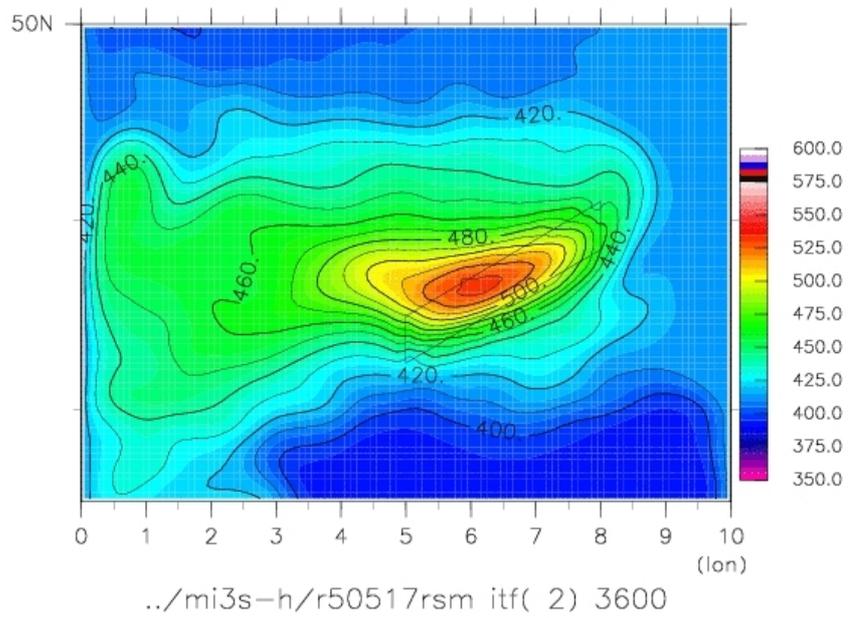


図7 混合によってできた厚い層が広がる様子。実線の四角の部分に千島列島に相当する海嶺で、そこだけに混合を与えている。

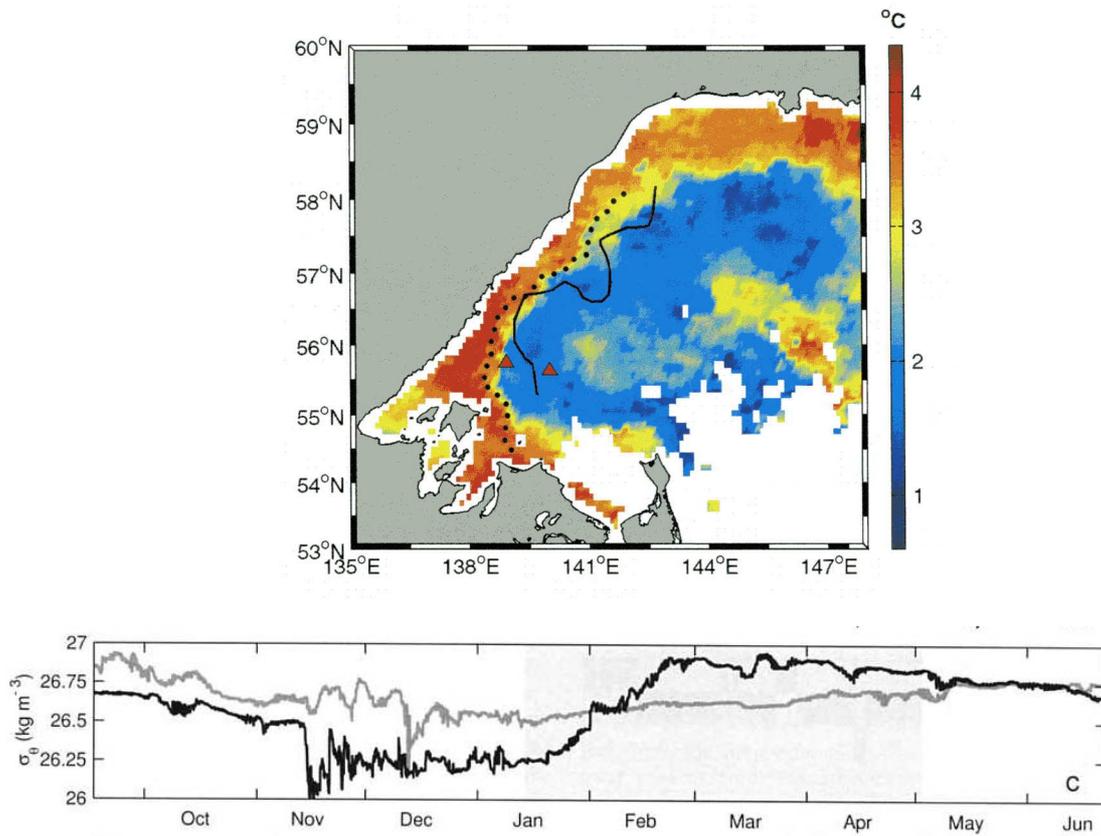


図8 (上段) オホーツク海の北西陸棚域。赤い三角が観測点をあらわす。カラーは水温である。(下段) 観測で得られた密度の変化。濃い実線が陸に近い観測点の密度変化である。2月末には  $1.0270\text{g/cm}^3$  に近い重さの海水ができています。Shcherbina 他(2004)から引用。

## 2.最新の民間天気予報事情

### ～北海道は天気予報の激戦地～

財団法人日本気象協会北海道支社 賀久正則]

#### 1.はじめに

テレビではここ10年の間で一般的なテロップ表示の天気予報から時系列のポイント予報へと予報内容も定着し、天気分布図の時間変化や降雨時のレーダーアメダス分布図もコンピュータグラフィックスなどで分かりやすく表示されるようになりました。また、北海道の約17kmメッシュ毎に展開されている約210ヶ所のアメダス地点の観測値から、コンピュータで計算された格子間隔20kmの数値予報を利用して、インターネットや携帯電話でその地域の時系列予報として細かく予報されたりしています。また、従来通りの気象台が発表する天気予報もNTTの177テレホンサービスで利用されるなど天気予報の提供内容も多様化、高度化してきました。特に北海道は、農作物や養殖漁等の作業管理などで農業や漁業などの一次産業の比率が高く、これに観光などのサービス業を加えると天気予報の関心は更に高い地域となっています。そこで、今回はマスメディアを中心とした、民間気象事業者の現状を紹介します。



#### 2.天気予報の現状

##### 2-1 気象台と民間気象事業者

気象庁では、天気予報等の社会経済活動に必要な気象情報の提供の範囲は、注意報や警報など公的な責任として必要なものに限定し、民間気象事業者に対する規制（気象予報業務の許可、気象予報士の業務独占、気象測器の検定等）については、規制緩和を進めるとしています。そこで、平成5年5月に気象業務法の一部が改正され、気象予報士制度が導入され、気象庁発表の予報のテレビ等における解説業務の自由化と一般向け天気予報（局地）等見直しが行われて、いわゆる天気予報の一部自由化が始まりました。

## 2-2 民間気象事業者の現状

気象庁から提供される数値予報資料等から、民間気象事業者は以下のような事業を展開しています。

### テレビなどのマスメディアを通じた分かりやすい情報の提供

CG を用いたテレビの天気番組作成、新聞やラジオ向けの気象情報の編集・加工、気象予報士による解説等を行い、紫外線情報やペット夏ばて予報などの生活に関連する利便性の高い情報の提供を行っています。

### 個別情報の提供

北海道では主に農業経営の営農の基礎となる牧草や小麦の刈り取り、防除など具体的な目的に応じた気象情報提供、鉄道関係や開発局の河川やダム、港湾、道路の管理等と、市町村の防災に必要な気象情報を利用したコンサルタント業務等を行っています。

### 新しい情報メディアによる気象情報の提供

CATV、衛星放送、インターネット、携帯電話などを活用した、一般の天気予報の他に付加価値情報も加えてきめの細かな気象情報の提供を行っています。

### 北海道の民間気象事業者

全国には自治体や個人、財団法人を含め42の事業者があり、北海道には全国的な組織である(財)日本気象協会、(株)ウェザーニューズと、道内に拠点を置く北海道放送(株)、札幌総合情報センター(株)と申請中の放送局1社が主とされており、テレビ等でその気象事業者の提供される情報を目にしています。



大手ペットフードメーカー「Pedigree」、HP ([www.pedigree-otenki.jp](http://www.pedigree-otenki.jp)) より

## 2-3 道内のマスメディアにおける天気予報の現状

近年、民間気象事業者がマスメディアを通じて発表する予報は、独自の観測網や解析技術を駆使して局地予報の予測精度の向上を目指し、天気ばかりではなく生活気象情報を付加した細かな情報提供をメディアにおいても以下のように図られています。

### テレビ局 (地上波)

道内のテレビ局は、地上波でNHKと民間放送局6局があり、気象情報を放送していますが、現在は先の4社の民間気象事業者がそれぞれのテレビ局で気象情報を発信しています。近年は、気象台発表の予報一辺倒だったものが、花粉情報や洗濯指数などの生活気象情報型のコンテンツを提供したり、他局との差別化を図って独自予報を発表する局も3年前から出始め、視聴者は気象情報に関する選択肢の広がりを見せ始めています。

#### ラジオ局

道内のラジオ局は、AM局ではNHKラジオ第一放送、STVラジオ、北海道放送（HBC）3局とAIR-G、NORTH WAVE、NHKFMとFM局3局、FMイルカやFMおたるなどの地域FM局18局があり、気象台の発表する気象情報を放送するのが一般的でしたが、AM局と大手FM局、地域FM局6局は民間気象事業者と契約した独自予報や気象予報士の解説する天気コーナーを交えて放送しています。特にミニFM局は、大雨や地震等の災害時などは情報を逐次民間気象事業者から提供されて地域密着型の放送を目指しています。

#### 新聞社（スポーツ紙除く）

大手3紙（読売、毎日、朝日）と日経、道新の5紙に、地方紙数紙（十勝毎日、函館新聞、室蘭民報、苫小牧民報）では、民間気象事業者と契約した独自予報や気象予報士の気象解説を記載しており、短期予報と週間予報を載せて、独自性が図られています。

### 3. その他インターネットや携帯電話の利用

近年は携帯電話の普及で、固定電話での177テレホンサービスのアクセス数が減少しています。携帯電話での最大の特徴は様々な情報をリアルタイムに場所を選ばず簡単に入手することで、気象情報の利用の多様化に弾みをつけているといえます。

特に、農家は小麦の収穫や牧草の刈り取りなどに気象情報をシビアに利用しており、一般的な予報よりも作物毎に、生育ステージ毎に特化した予報を求めています。各JAは民間気象事業者と提携して、雨の状況やその地域の気象予測を立ち上げられた専用のサイトと携帯電話を利用して作業している畑で気象情報を収集し、今後の作業をその場で決定したり、家ではパソコンで営農支援情報を専用のWeb情報としてインターネットで検討したりしています。

また、北海道のように広い地域の道路や河川を管理する機関も、大雨や大雪などの専用の予報を民間気象業者と契約し、予測情報ばかりでなく、テレメーターデータや警報、情報までもWebや携帯電話で入手し、通常の管理や異常時の交通規制や復旧に備えています。最近の異常気象の多発も反映して、付加情報に加えて予報そのものよりも精度を求める要望の比重が増えています。

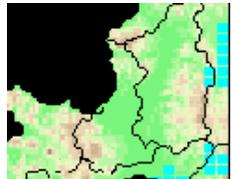
MICOS on Mobile



②台風  
③アメダス  
④マメダス  
⑤気象情報  
⑥JWA予報  
⑦メッシュ  
⑧短期予報  
⑨週間予報  
⑩気象衛星画像  
⑪天気図  
⑫地震  
⑬津波  
⑭火山

日本気象協会

[メッシュ]  
石狩支庁  
26日15時00分発表



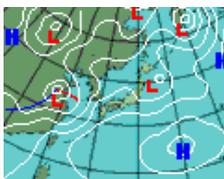
降水量実況

▼降水量  
実況  
1時間後 2時間後  
3時間後 4時間後  
5時間後 6時間後

▼気温  
実況  
▼雨雪判別  
実況  
1時間後 2時間後  
3時間後

9  
0 ニューへ戻る

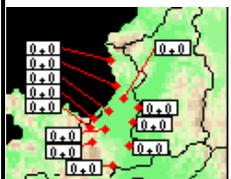
[天気図]  
26日12時の実況



24時間予想  
48時間予想  
72時間予想

0 ニューへ戻る

[アメダス]



26日15時  
雨量 0.0mm  
気温 19.5°C  
風向 西  
風速 3m/s  
日照 0min  
積雪 -cm  
積算雨量  
3h -mm  
6h -mm  
12h -mm  
24h -mm

9  
0 ニューへ戻る

JWA 提供 i-mode 気象情報 (JA 農業契約サイト)

#### 4. おわりに

何気なく見ているテレビや新聞で伝えられている気象情報でも、テレビ局毎や新聞社毎に気温や天気には差があることに気が付き始めたと思います。メディアを通じて伝えられる気象情報も精度が追求され、気象情報に関しても提供会社も淘汰される時代が目の前にきています。朝見るテレビの天気予報で、きれいなお姉さんの伝える生活に密着した親切な気象情報も、当たる予報でなければお姉さん目当てにみる視聴者しかチャンネルを合わせないこととなります。

道内のテレビ局では、気象予報士を持つ天気キャスターの予報の適中率を発表している局があります。視聴者に積極的に予報の精度も公開し、予報を利用する側のひとつの選択肢として意味のあることと思われます。予報の垂れ流しはもう過去のものです。気象台では週間予報の信頼度を3つのランクで表現し、利用者に予報の適中率をランクで伝えていますが、しかし、将来の予報の信頼性よりも、過去の適中率を公開して更に予報の信頼度を表現したほうが利用者に納得してもらえます。間もなくやってくるテレビやラジオのデジタル化により、気象のコンテンツは更に増えていき、その中心は防災情報という声も聞かれますが、皆さんはこれらメディアが伝える気象情報についてどう思われるでしょう。

# 3. 生態系と微生物

## —地球を支えるミクロの生物圏—

北海道大学 低温科学研究所 福井 学

### 1. はじめに

木々の緑がまぶしい夏が過ぎ、秋になると森の緑は色を変え、地面には落ち葉が降りつもります。しかし、翌年の春には落ち葉の多くは消えてなくなってしまったように見えます。これは微生物の働きによるものです。私たちが住んでいる地球での微生物の働きを紹介いたします。

### 2. 微生物って何？

文科系の大学1年生向けの生物学の講義で、「微生物に対するイメージは？」と質問すると、必ずと言っていいほどこんな答えが返っています。

「バイキン」、「汚い」、「きもい」、「病気の原因」など。

一般の人には、こんなふうに「微生物は印象の悪い生き物」として受け止められているようです。しかし、地球上に存在する微生物のうち、病気に関わるものはほんの一部です。微生物とは肉眼で見えない生き物をさします。一般的には、単細胞生物で、数ミクロン（1mmの千分の一が1ミクロン）のバクテリアから数百ミクロンの原生動物（ゾウリムシのなかま）や植物プランクトン（ケイ藻など）が含まれます。

こうした微生物を観察するには、顕微鏡が必要です。原生動物や植物プランクトンであれば、高校や中学校の理科室にある光学顕微鏡（約400倍程度）で観察することができます。しかし、バクテリアは1000倍くらいに拡大しないと観察できません。観察に慣れていないと、黒い点にしか見えないことがあります。バクテリアの細胞の内部を詳細に観察するためには、やはり電子顕微鏡（透過型）を使う必要があります（図1）。残念なことです。大学で生物学を専攻した学生でも電子顕微鏡で観察する機会はあまりありません。

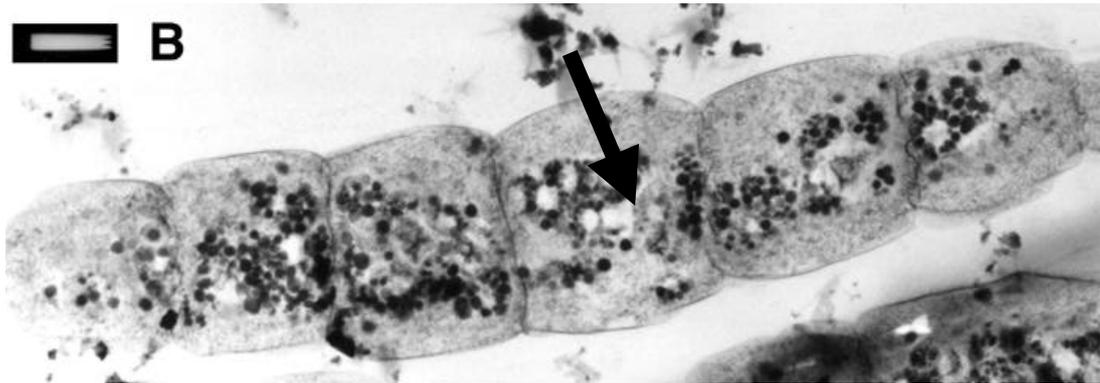


図 1. 糸状性バクテリアの透過型電子顕微鏡写真。1つの細胞の大きさが約1ミクロン。細胞内に硫黄粒子が観察されます(矢印)。

### 3. 落ち葉を分解する働き

落ち葉はセルロースなどの有機物をふくんでいます。有機物は炭素をふくんだ物質で、生き物の体は水をのぞけば、ほとんどが有機物です。

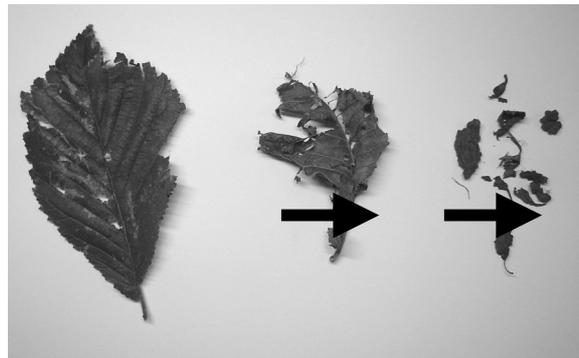


図2. 落ち葉が微生物分解されるようす

木から落ちた葉は地面の土（土壌）に住んでいる微生物によって分解されます。その仕組みは、皆さんがご飯などを食べて、エネルギーをえているのと同じ働きです。この時、エネルギーを食べ物から取り出すには空気に含まれている酸素が必要です（酸素呼吸）。また、そのエネルギーと体を作る物質から皆さんが成長しています。土に住んでいる微生物も落ち葉に含まれている有機物を酸素を使って分解し、微生物の数も増加します（図2）。その結果、有機物の多くの部分は二酸化炭素と水に変換されます。ふたたび植物によって光のエネルギーを利用して二酸化炭素と水から有機物が作られます（光合成）。

## 4. 温泉に行こう

札幌のまわりにはいろいろな温泉があり、露天風呂につかるととても気持ちのよいものですね。

中谷宇吉郎博士は、こんな言葉を残しておられます。「始終流しはなしにしておくことができ、はじめて温泉の値打ちが出てくる（中略）ホテルの大理石の湯舟よりも、田舎の温泉地で流し放しにしてある、粗末な石畳みの湯のほうが、ずっと贅沢なものである」（「温泉の有り難さ」より、昭和27年）。

それでは、ちょっと遊び心をだして、自然にわいている温泉を観察してみましょう。場所は、定山溪温泉がよいでしょう。ただし、やけどには気をつけてください。かならず保護者のかたと一緒に観察してください。40～50℃の温泉が豊富に流れているところの石や岩の表面をみてごらん。きっと緑色の藻（も）のようなものがついています（図3）。これを顕微鏡で見ると、2～3ミクロンの好熱性シアノバクテリア（サーモシネココッカスと呼びます）であることがわかります（図4）。この微生物は熱い環境を好んで、植物と同じように光合成を行います。生命が誕生した頃の地球は今よりも熱く、しかも酸素のない環境であったと考えられています。およそ27億年前の地球で誕生した最初の酸素を発生する光合成微生物は温泉の岩についている藻の仲間だったかもしれません（図5）。こうした微生物が酸素を作り出すことによって、酸素呼吸を行う微生物が誕生したと考えられています。

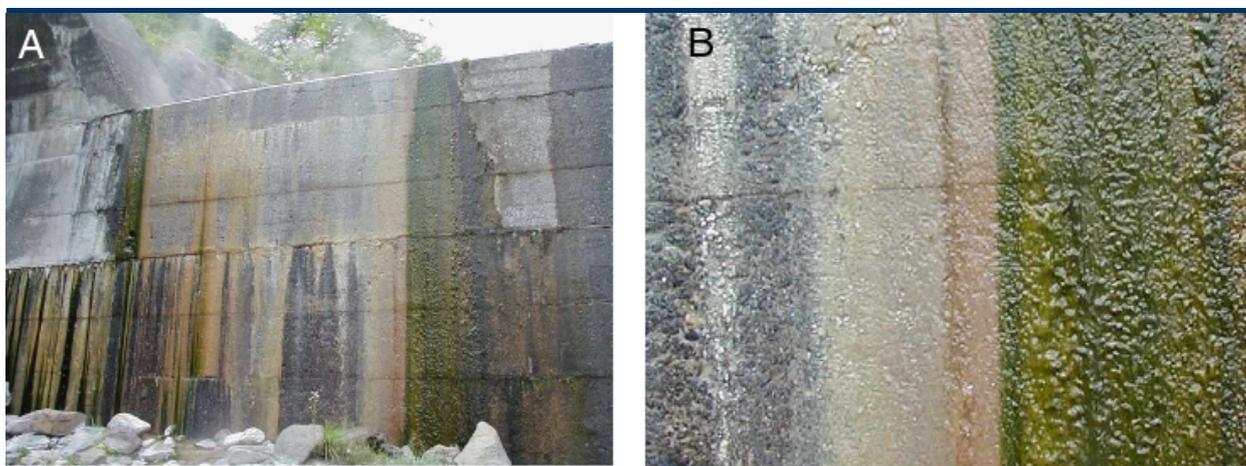


図3. 湯量の豊富な温泉水の流れに発達したバイオマット。様々な色のマットが観察され、それぞれ種類の異なる微生物が増殖しています。

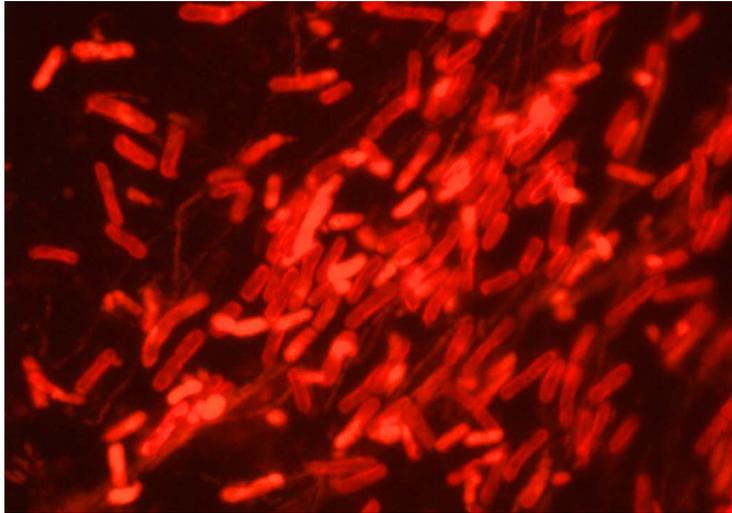


図 4. 緑色の温泉バイオマットに生息する好熱性光合成バクテリアの蛍光顕微鏡写真。細胞の大きさが約5ミクロンで、比較的大きい。このバクテリアは光合成色素を有しているので、顕微鏡下で励起光を照射すると蛍光を発します（これを自家蛍光と呼ぶ）。

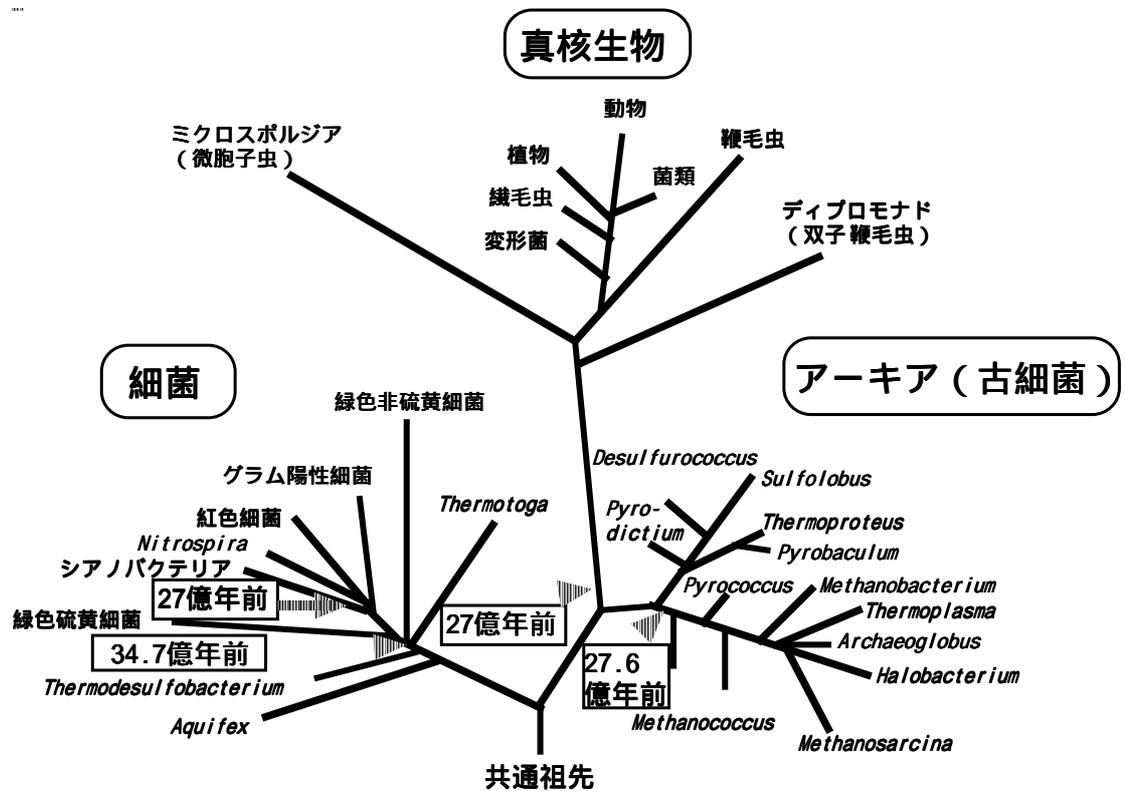


図5. スモールサブユニットリボソーム RNA の塩基配列に基づいた生物の分子系統関係。

この他にも温泉には硫黄(いおう; 卵の腐ったようなにおい)を食べる微生物もいます(図6)。硫黄と言っても、この場合硫化水素です。おおよそ70~80の温泉に含まれている硫化水素をエネルギー源にして増殖することのできる微生物で、好熱性硫酸化バクテリアと呼びます。



図6. 温泉の流れにそって発達する白い微生物マットのようす。この微生物が硫化水素を食べ、その結果白い硫黄の粒を作り出します。

この白かったり、灰色だったりする微生物マットを良く観察してみると、サーモサルフォバクテリウムと呼ばれる、嫌気性細菌(酸素がない条件でしか増殖することができないバクテリア)が観察されます。どうして、嫌気性細菌が温泉の中で増殖しているのでしょうか？それは、硫化水素を含んだ温泉水には酸素を含んでいないからです。では、この微生物はいったいどのようにしてエネルギーを得て活動しているのでしょうか？それは前に説明しました、好熱性の硫黄酸化バクテリアが鍵になります。すなわち、好熱性の硫黄酸化バクテリアが有機物を生産し、そのときに硫化水素を酸化して硫酸イオンを作り出します。この硫酸イオンを酸素の代わりに使って有機物を酸化してエネルギーを得ることができる微生物がサーモサルフォバクテリウム(好熱性硫酸塩還元バクテリア)です(図7)。こうしたエネルギーの獲得形式を「硫酸呼吸」と呼びます。我々ヒトの「酸素呼吸」に対する呼び方です。ここで、あることに気がつきませんか？温泉水中で好熱性の硫黄酸化バクテリアと好熱性硫酸塩還元バクテリアが硫黄の循環に関与しています。もう一度、図5の生物の系統関係をご覧ください。両バクテリアとも生物の共通祖先に比較的近い位置にいます。これらのことから、生命がこの地球上に誕生し、今から35億年くらい前には両バクテリアが存在し、生態系の硫黄循環に関与していたことが想像されます。

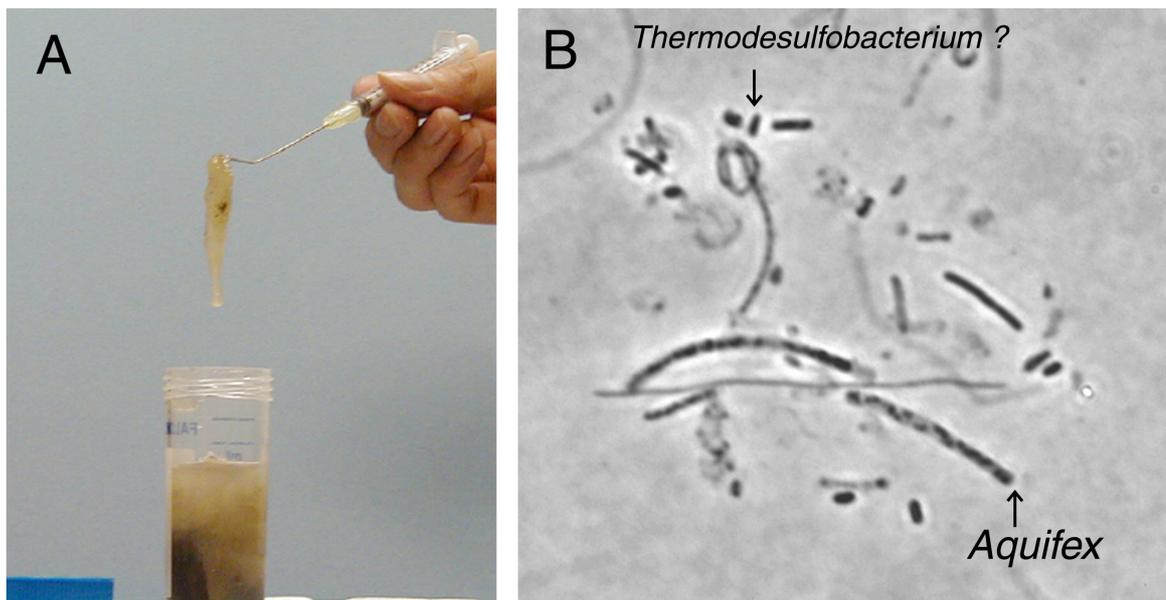


図 ストリーマー。B)顕微鏡写真(繊維状の好熱性硫黄酸化バクテリアとかん状の好熱性硫酸還元バクテリアが観察されます)

## 5. 雪の中で暮らす微生物

「雪は天から送られた手紙である」

これは雪国に暮らす人々には、あまりにも有名な中谷宇吉郎のことばです。雪の形成には、核になる固形物が必要のようです。大気中には植物の孢子や微生物が浮遊し、これらが核となって雪が形成され、地上に舞い降りてきます。つまり、雪の中には微生物が存在することになります。はたして、雪の中で微生物は増殖することができるのでしょうか？

群馬県、新潟県、そして福島県の県境に尾瀬ヶ原があります。みなさんは、中田喜直作曲の「夏の思い出」でご存知だと思います。ちょうどミズハシヨウが咲く直前、雪融けの頃、尾瀬湿原や尾瀬沼の雪が赤褐色になる現象が見られます(図8)。これを、「アカシボ」と呼びます。1週間くらいの短期間で、雪が急激に赤くなってしまいます。その原因をここ10年くらい調べているのですが、赤くなった雪を顕微鏡で観察するとヘミトマと呼ばれる藻類や鉄酸化バクテリアが認められます。

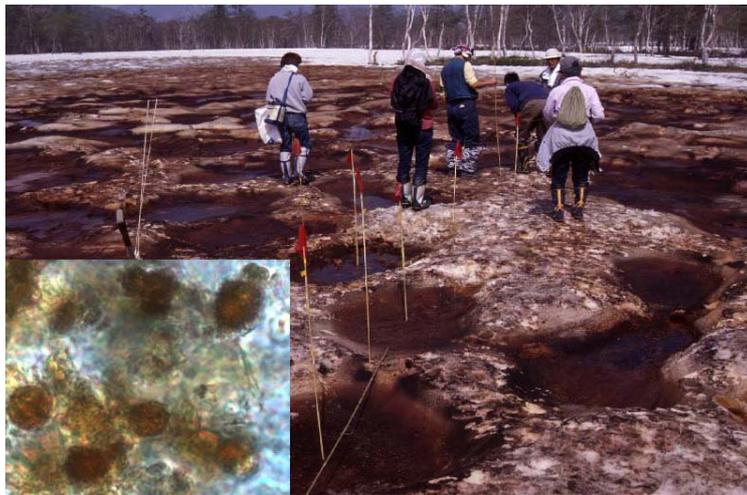


図8.融雪時に日本の湿原で見られる赤雪現象(アカシボ)。低温環境下で、しかも短時間に鉄酸化バクテリアや藻類の一種(左下の顕微鏡写真)が増殖すると考えられており、それらを補食する昆虫等も観察される。しかし、その発生メカニズムは不明であるが、地球の物質循環と微生物との関連性を解き明かす好現象の一つである。

どうして、鉄酸化バクテリアが増殖しているのでしょうか？まだ十分に解明されている訳ではありませんが、次のことが考えられます。雪融けの時期、湿原から地下水が雪に浸透していきます。地下水中には還元鉄が溶けていて、この還元鉄を酸素や硝酸塩を用いて酸化することによりエネルギーを獲得することができます。その結果、赤い酸化鉄が大量に生成されます。この反応は、雪国の人々には欠かせない「ホカロン」が熱くなる反応と全く同じです。鉄酸化バクテリアは還元鉄の反応でエネルギーを得ていますが、体の元になる炭素はどこから得ているのでしょうか？それは、雪融け水や空気中に含まれる二酸化炭素を同化して有機物を得ています。つまり、

鉄酸化バクテリアは無機物だけで生きていける微生物です。このように氷点下の世界でも、エネルギー源や炭素が供給されれば、微生物は増殖することができます。

それでは、エネルギー源や炭素が供給される条件が整っているのであれば、微生物はどれくらいの低温まで増殖可能なのでしょうか？この点に関しては、まだまだわかっていないことばかりです。また、低温環境下で生態系の物質循環はどうなっているのでしょうか？いろいろと考えてみると、是非とも究極の低温生態系で研究を行ってみたいくなります。はたして、南極や北極で微生物は生態系の中でどんな役割をしているのでしょうか？こうした未知の世界を切り開いていくのは、飽くなき探究心を持った若者です。一人でも多くの若者が生態系での微生物の役割を明らかにする科学（微生物生態学）に携わってほしいと期待しています。

### 参考文献

福井 学. 2000. 尾瀬のアカシボへの想いー ミクロとマクロの接点ー .日本産業技術振興協会ニュース.No. 369: 2-3.

福井 学. 2001. 海洋堆積物における硫黄の循環と微生物. 月刊海洋.No.23: 83-90. 2001.

福井 学・松浦克美. 2002. 温泉に太古の生命を探る . 遺伝 7月号 . 56 巻 : 30-35.

日本微生物生態学会教育研究部会編著 . 2004 . 微生物生態学入門 : 地球環境を支えるミクロの生物圏 , 日科技連出版社 , 東京 .

## 4.地震は繰り返す

- 同じ場所で同じ大きさの地震が起きる。

札幌管区気象台 濱田信生

### 1. はじめに

日本で近代科学の歴史は、明治時代以降の130年あまりしかありません。初期には学問分野は未分化で、色々な専門分野の研究が区別されず、ごったに行われてきました。今日気象学と地震学ははっきり分かれており、学会も日本気象学会と日本地震学会に分かれています。昭和の初期までは気象学会の学会誌にも色々な地震に関する研究や報告が掲載されています。今回はそのような経緯もあるので、地震は自然現象として現在のどのよう

### 2. これまでの地震に関する認識

科学的な観測が始まる前は、地震は地面が揺れる現象として人々には認識されて来ましたが、神仏の仕業とでも思われたのでしょうか、その仕組みはまったくわかりませんでした。ナマズと地震を結びつけたナマズ絵というものをご覧になったことがあると思いますが、地下にすむナマズが地震を起こすという俗信は、1855年に起きた安政の江戸地震の後に広まったもので比較的新しいものです。今でもテレビやラジオのニュースで「先ほど何時何分頃、何々地方で地震がありました」という放送が流れています。「この地震がありました」という表現は、正確には「どこか(何々地方とは限らず)で断層が滑って地震波が励起されました」という意味と、「その結果発生した地震波が、何々地方まで伝わって地面を揺らし、それを人々が感じました」という両方の意味を含んでいます。このような曖昧な表現は、昔からの人々の地震に関する漠然とした認識を今でも引き継いでいるためと考えられます。

しかし自然現象として地震がどのようなものか分からなかった時代から、地震が多く起きる地域

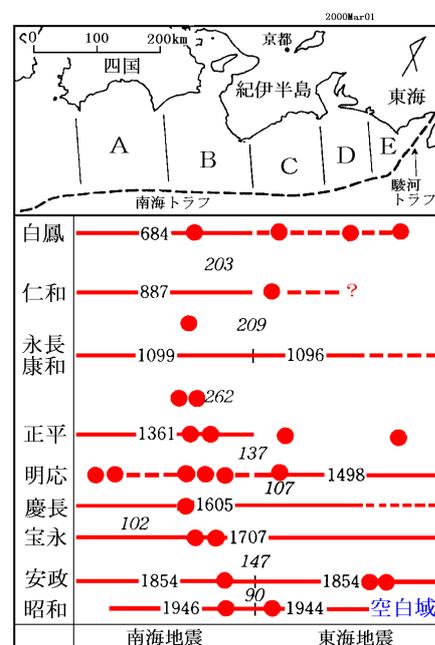


図1. 古文書などから推定されている東海地震と南海地震の繰り返し。地震の起きた年代(縦)と震源の範囲(横棒)を南海トラフに沿って示したものの(横軸)

とそうでない地域がある程度のことは知られていました。図1は、今世紀前半に発生すると予想されている東海地震や南海地震に関連してしばしば引用される図です。図1は東海地方から紀伊半島、四国にかけての太平洋岸で、いつ頃の地域で大地震が発生したかを表しています。いつ頃どこで大地震が起きたかは、大部分は昔から伝わる古文書に記された記事から推定されたものですが、近年遺跡の調査など考古学の研究から推定されたものも含んでいます。図1からは四国や紀伊半島の沖合では、ほぼ百年に一度の割合で大地震が起きていることが読み取れます。このことは地元では、昔から時々大地震が起こり津波が押し寄せるといふ古老の話として伝承されてきました。つまり大地震が同じ地域で繰り返し起きることが比較的古くから認識されていたことを示しています。

### 3. 地震と断層

地震が断層が動いて発生するという考え、あるいは地震が断層の運動そのものであると

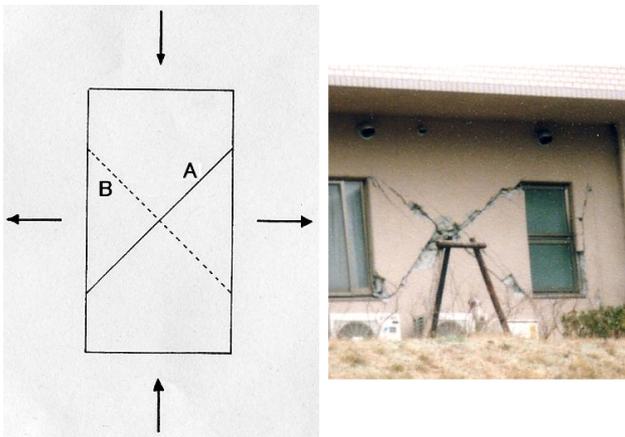


図2. 岩盤に力が加わった時の剪断面の生成、Aの面が形成されるか、Bの面あるいは両方が形成されるかは、岩石の不均一性に依存する。右側は地震によるコンクリート壁の剪断破壊

これが地震そのもので、岩盤が破断し、ずれることにより、それまで内部に蓄えられていたエネルギーの多くは、熱になったり、岩盤を伝わる弾性波つまり地震波となって伝わり、人々が揺れを感じるわけです。この破断面、岩盤がずれる面が連なったものが断層です。断層にはその滑り方により図3に示すようなタイプに分類されます。さて地震が断層運動そのものであることは分かったのですが、次の問題として同じ断層が繰り返し滑るのだろうか、それとも毎回岩盤の違う部分がずれる

という考えは、今から40年ほどまえに学説として確立したものです。図2は、色々な教科書や資料に使われている岩石などの破断の模式図と実際の地震によるコンクリート壁の破断の例です。地下の岩盤、地層に圧力が加わると、その圧力に応じて岩盤は少しずつ変形し、内部にひずみエネルギーが蓄積されます。しかし圧力が岩盤の破壊強度を超えると、岩盤は剪断面と呼ばれる面に沿って破断し、ずれを生じます。

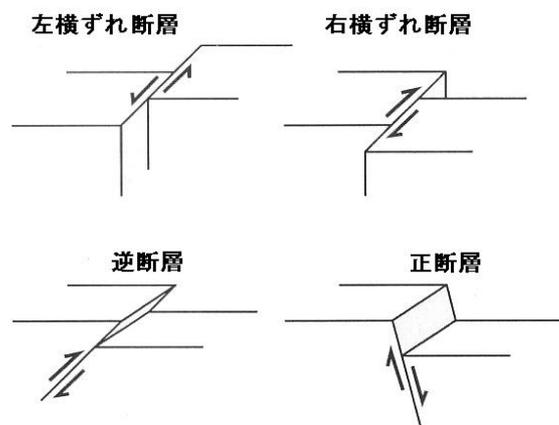


図3. 各種の断層の模式図。断層がどのようにずれるかは、主要な圧力が掛かる方向で決まる。

のかという疑問が出てきます。

#### 4．活断層と地震の繰り返し

断層は一度地震を起こしてすべると、地下の深い部分では、地震の時に発生する熱や、物理化学的な反応、高い圧力を受け、やがて固着すると考えられています。その後、地下の圧力で岩盤に再びひずみエネルギーが蓄積され、次の地震が発生する場合、おなじ部分が断層として滑るのか、あるいは別の場所で新たに破断面を生ずるのかという疑問が湧いて来ます。もし毎回違った部分が破断し、断層として滑るのであれば、正確には地震は繰り返すとは言えなくなります。しかしまったく同じ部分が断層として滑るのであれば、地震は繰り返すといっていじょう。この同じ断層が滑るのかという問いに対する、今日の地震学の答えは、「はい」でもあり、また「いいえ」でもあります。

図4は、阪神淡路大震災を引き起こした、平成7年兵庫県南部地震（M7.3）の震源付近の断層を示した地図です。たくさんの線が引かれていますが、線の一本一本が過去の地震によって動いて出来た断層と考えられます。しかし兵庫県南部地震のような大地震が起きるときには、この断層のすべてが動くのではなく、その内の一部だけがずれて地震が起こります。兵庫県南部地震のような大地震は、この地域では過去に繰り返し起きていたと考



図5．活断層の発掘調査の様子。断層を横切る大きな溝（トレンチ）を掘削し、斜面に現れる断層のずれを調べ、何回、いつ頃、どのくらい変位したかを調査し、断層の活動度を評価するために行われている。

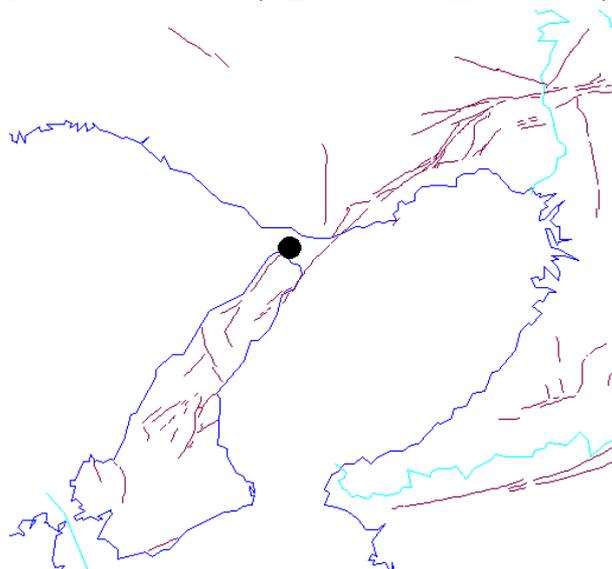


図4．淡路島から神戸にかけて走る活断層の分布。平成7年兵庫県南部地震（マグニチュード7.3、黒丸）の震源域周辺を北東から南西方向に延びており、大部分がそれぞれの断層上に立つと、右側が手前にずれる右横ずれを示している。

えられますが、一つ一つの大地震で動いた断層はこれらの断層の一部で、毎回毎回同じ断層ではなかったと考えられます。また地下にはまだ存在の知られていない断層が隠れている可能性もあるので、大地震で動く可能性のある断層の数は実際にはもっと多いただろうと考えられます。もし毎回違う断層が動いて大地震を起こすのであれば、厳密には大地震が繰り返すとは言えないでしょう。し

かしおおまかに見ると狭い範囲に集中して大地震が起きるので、大地震は繰り返すと言えるかもしれません。図5は実際に断層を発掘してどの程度地震を起こしたか、何年くらいの間隔で地震が起きていたかなどを調べているところです。

このように繰り返し地震を起こし、将来も地震を発生させる可能性のある断層を活断層と呼びます。

## 5. 地震観測による繰り返しの確認と固有地震

これまで断層が動いて地震が発生する。断層は繰り返し地震を発生させるらしいことを紹介してきました。しかし大地震だけでなく、小さい地震も同じように小さな断層で繰り返し発生するのだろうか、或いは繰り返し発生する地震の揺れは毎回同じだろうかという疑問が次に湧いてきます。この疑問に答えるのは容易ではありません。大地震は百年に1回あるいはもっと長く数千年に1回の頻度でしか起きません、地震計による観測から揺れ方を比べることは不可能です。小さい地震は大きい地震に比べて頻繁に起こりますが、断層そのものが小さく、震源の位置が同じかどうかなど精度の点からも確認するのが容易ではありません。しかし近代的な地震の研究と観測が始まって130年位たち、ようやく手がかりが得られるようになってきました。

### 1) マグニチュード6クラスの地震が繰り返し発生する(パークフィールドの地震)

1966年に米国カリフォルニア州のパークフィールドという町で、マグニチュード6の地震が発生しました。この地震は詳細な余震観測により、余震が本震の断層面に沿って起きていることが実際に確かめられた初めての例として有名ですが、その後、米国の地震学者達は、同じ地域で同じくらいの大きさの地震が、1857年、1881年、1901年、1922年、

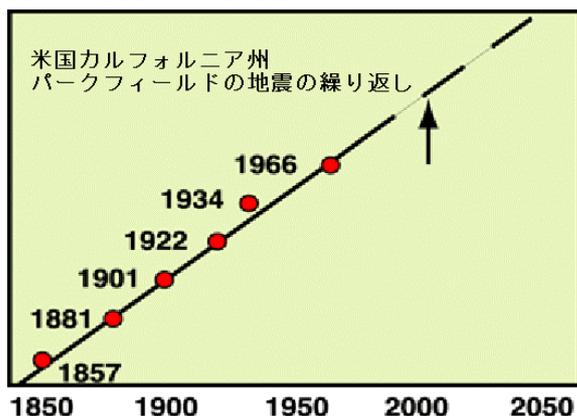


図6. パークフィールドの地震の繰り返し(米国地質調査所ホームページから)

縦は発生した地震のエネルギーの積算、横軸は発生時間を示す。

1934年にも起きていることに気がつきました(図6)。初めの3回は曖昧な点が多くよくわからないのですが、1922年と1934年の地震は、地震計の記録から1966年の地震とそっくりであったのです。1966年の地震まで平均すると22年に一度の間隔で地震が起きています。このことから次の地震が1985年から1993年の間に90%の確率で起きると予想した地震学者達は、パークフィールドに地震予知のための色々な観測器械を持ち込み、地震が起きるのを待ちました。しかし予想された期間内に地震は起き

きず地震予知の期待はしぼんでいきました。ところが、予測の期間を10年以上過ぎた2004年9月にマグニチュード6.0の地震が起きました。細かく見ると色々違いもあるのですが、

2004年に起きた地震もそれまでの地震と大変よく似ており、地震が同じ場所で、繰り返し起きていることが確かめられました。今日これら同じ場所で同じ断層が繰り返し活動して発生する地震を固有地震と呼んでいます。

## 2) 日本で見つかった固有地震(釜石沖地震)

1999年頃、東北大学の研究者が、東北地方の太平洋沿岸の地震活動を詳しく調べているうちに、岩手県釜石市の沖合、深さ50kmの海底で、1957年以降5年くらいの間隔でマグニチュード5クラスの地震が繰り返し発生していることに気がつきました。平均発生間隔は5.5年で、毎回地震波形がよく似ていることから、パークフィールドの地震と同じような固有地震

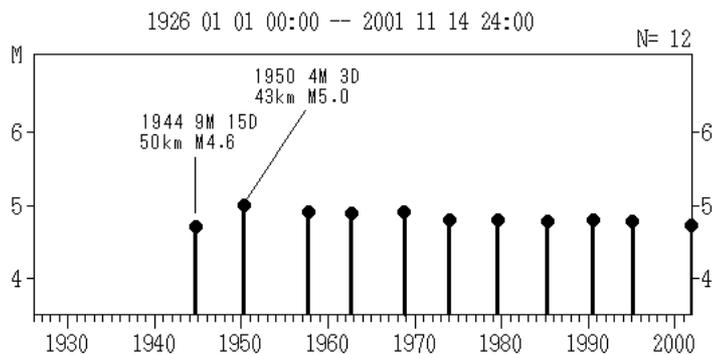


図7. 釜石沖で発生する固有地震の繰り返し。縦軸は地震の規模を横軸は発生時間を表す。

と判断されました。パークフィールドの地震と違うのは、8回と繰り返しの回数が多く、また間隔もより規則的なことです。最後の地震は、1995年3月に起きているので、東北大学の研究者は、次に地震が起こるのは2000年頃ではないかと推定し論文を発表しましたが、果たせるかな2001年11月にマグニチュード4.7の地震が発生し、予想がほぼ的中しました。その後断層面の滑りなどを詳細に解析してみると1995年の地震と2001年の地震はほとんど同じような形の断層が同じような滑り方をしていることが分かりました。その後の調査で1950年と1944年にも地震が発生していることが分かり、述べ11回も繰り返していることが分かりました(図7)。これらの事から、次の地震が起きる時期は2007年頃と予測されています。

## 3) 大地震の繰り返し(十勝沖地震)

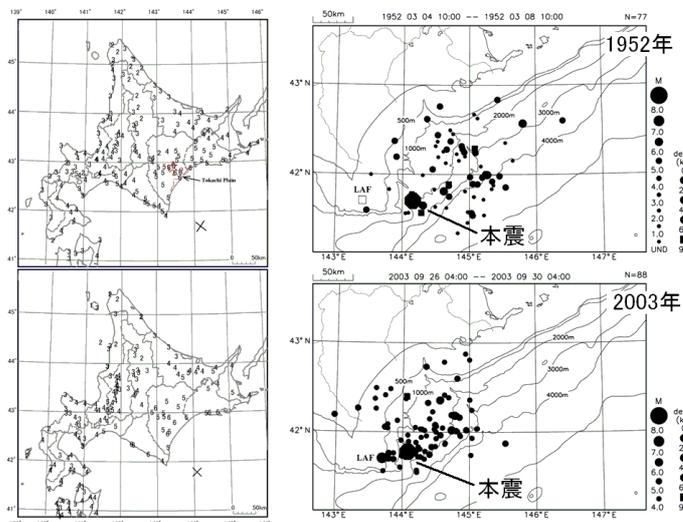


図8. 1952年十勝沖地震(上)と、2003年十勝沖地震(下)の余震の起こり方(右)と震度分布(左)の比較、いずれも余震は本震の北東側に広がっており、震度分布も北海道全体で同じような分布を示している。

十勝沖地震と呼ばれているマグニチュード8クラスの地震は、今までに1952年、1968年それに一昨年の2003年の3回発生しています。この内1968年の地震は、実際の震源域は青森県東方沖で、十勝沖ではありません。十勝沖で起きた十勝沖地震、1952年の地震と2003年の地震は、地震波、余震分布、震度の分布、津波の初期の波形などが互いに似ており

(図8), パークフィールドの地震や, 釜石沖の地震と同じような固有地震と考えられています。マグニチュード8クラスの地震が同じ場所で, 繰り返し発生していることが, 地震観測により確認されたのは世界でも初めてではないかと考えられます。しかし地震の性質は大変よく似ているのですが, 津波は1952年の時の方が大きく, 全く同じとはいえません。その違いの原因については, 今後の検討課題です。

#### 4) 新たな繰り返しの例(釧路沖地震)

昨年12月, 一昨年(2003年)の十勝沖地震の余震域の東の外側に, 釧路沖地震(M7.1)が発生し

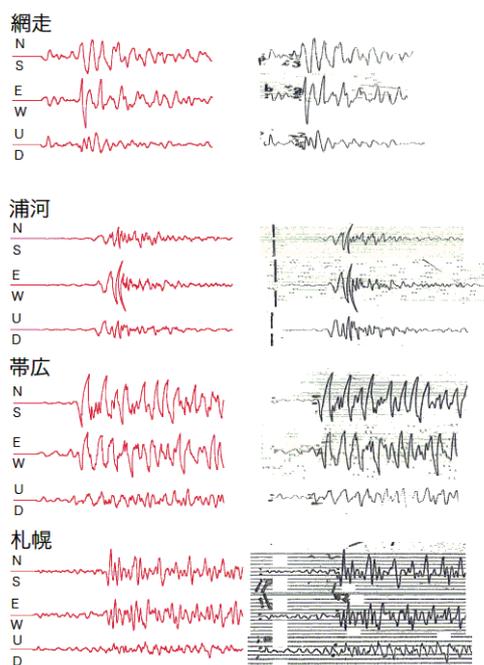


図9. 2004年釧路沖の地震(左)と1961年釧路沖の地震(右)の札幌などで観測された地震波形の比較。2004年の地震の記録はデジタルであるが, 1961年当時の地震計のペン記録と比較するために円弧書きに補正している。各観測点の波形は細かい部分までよく似ており, 両者がよく似た起こり方をした地震であることを示している。(吉田他 2005) による

地震の観測波形が大変よく似ていることです(図9)。さらに興味深いことは, 余震の起こり方(図10)です。余震が起きている部分の間に, 余震が起きない空白の部分があります。この空白部分は本震で滑った断層の核心部分と考えられ, アスペリティと呼ばれています。

#### 6. 固有地震とアスペリティ

長期間の地震観測データの蓄積により, 同じ断層で同じ規模の地震が繰り返し起きる例が色々見つかってきました。地震を起こす断層は, その断層に特有の規模と性質を持つ

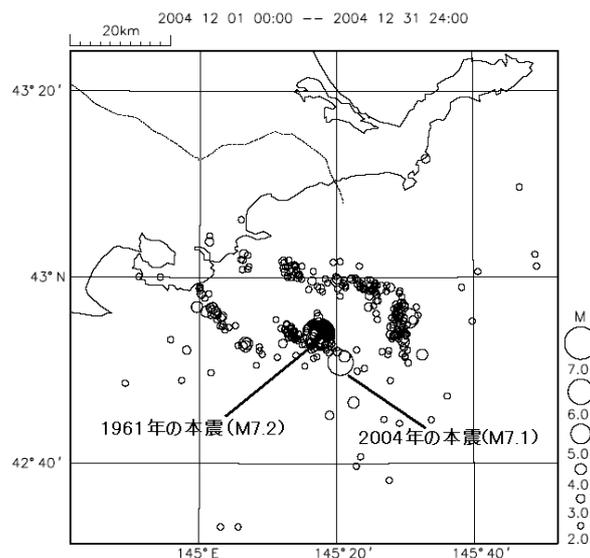


図10. 2004年釧路沖の地震の本震とその余震の分布, 及び1961年の地震の本震の位置(黒丸)を示したもの。余震は本震の周りや北側に分かれて発生し, 本震の北側では空白になっている。余震に挟まれた部分が本震で大きく滑ったアスペリティと考えられる。

ました。釧路沖ではマグニチュード7クラスの地震は珍しくないのですが, 注目されたのは, 震源も規模も1961年8月に起きた釧路沖地震(M7.2)とほとんど一致することや, 2つの

た地震を発生させるという考え方から、発生する地震を固有地震と呼ぶようになりました。この固有地震を説明するのにアスペリティという概念が用いられます。アスペリティは、

### 断層面上のアスペリティと本震、余震の分布

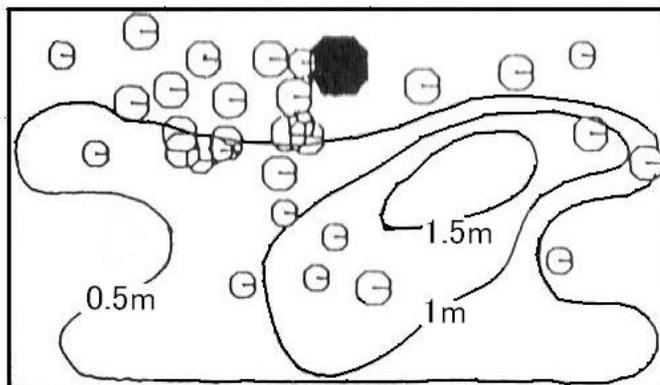


図11. 断層面上のアスペリティの概念。黒丸は本震が始まった位置，同心円は断層面上の滑り量を表し，中心部ほど滑りが大きい。中心部をアスペリティと呼び，余震（印）はアスペリティの外側で多く発生するという傾向を示す。

「特異な性質を持つ部分」を意味しますが、日本語にうまく対応する用語がなく、そのまま訳さずに調査研究に使われています。地震で断層が滑る時、断層の大きさは有限ですから、断層の滑りは断層面上で一様ではなく、大きく滑る部分と、あまり滑らない部分があります。図11はアスペリティと断層、地震の震源の関係を表した模式図です。大きく滑る部分をアスペリティと呼んでいます。

このアスペリティは、地震を起こす前は、強く接着しており、地震時には大きく滑るため、大きなエネルギーを持った地震波を励起します。また本震の時に大部分のエネルギーを放出するために、余震があまり起きません、余震はむしろ本震による断層の滑りの少ない部分、アスペリティの周りで多く発生することから、余震分布からアスペリティがおおまかに推定できますが、地震波や地殻変動を解析することにより、より詳しく推定されるようになっていきます。

### 7. 終わりに

これまでの地震観測データの積み重ねと研究により、特定の断層で、同じ規模の地震が繰り返し発生する仕組みが少しずつ見えるようになってきました。断層上のアスペリティと呼ばれる部分では断層面が強く固着しており、普段は小さい地震も起きないのですが、アスペリティの周辺の断層は固着が弱く、少しずつ滑って小さな地震を発生することから、平常時の地震活動はむしろ活発と考えられます。このようなアスペリティの性質を解明し、アスペリティにかかる歪みにより、地震発生直前にどのような変化が見られるか、あるいは期待できるかを知ることから、地震予知に結びつく有力な手がかりが得られるのではないかと考えられ、色々な調査研究が行われています。

参考になるホームページなど

活断層に関する一般知識（地震調査研究推進本部のホームページ）

<http://www.jishin.go.jp/main/katsudanso/index.htm>

パークフィールドの地震（米国地質調査所のホームページ，英文）

<http://quake.wr.usgs.gov/research/parkfield/index.html>

地震予知連絡会の資料（国土地理院のホームページ）

<http://cais.gsi.go.jp/KAIHOU/index.html>

釜石沖の地震（日本地震学会一般向け広報誌ないふるのホームページ）

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/ssj/naifuru/vol31/v31p2.html>