

防災科学技術

NO.67 1991
March

科学技術庁 防災科学技術研究所



も く じ

1990年10月4日伊豆大島の火山噴火の前兆現象と思われる地中電界変動……………	藤縄 幸男・1
深部地下構造調査……………	笠原 敬司・4
防災技術セミナー（JICA）帰国研修員に対するフォローアップ……………	大谷 圭二・8
地球災害——地質時代における生物の絶滅と地球磁場の逆転……………	萩原 幸男・12
地震は迷惑している……………	広部 良輔・26

表 紙 説 明

地震波反射法（パイプロサイス法）

地震波反射法による地殻構造の探査は、地震波が広がり進む際、物性の変化する境界で反射する（やまびこの原理）性質に着目した方法で、人工的震動源（パイプロサイス）から震動を発生させ、地層境界で反射した弾性波を、地表に設置した地震計で観測し、地下の様子を調べます。（写真は起震車により、人工的震動を発生させている模様）

Hz, 0.01~0.6Hz (いずれもULF) の3帯域であるが, VLF帯は, 振幅を平滑化したものを記録している。このうち, 300m井とグランドとの電位差信号の内0.01~0.6Hzの帯域は, 筑波にテレメーターで送信されているが, 他の成分は全て現地で記録している。今回は, これ等の資料を解析した結果について述べる。

図3に, 筑波にテレメーターにより伝送されている極低周波域 (ULF: 0.01~0.6Hz) の1990年9月27日から10月9日までの記録を示す。今回の噴火の前兆と思われる異常な信号が, 9月30日15

時頃から出始め(図3-No.6), 10月3日18時~22時頃が最も顕著で(図3-No.9), 地震・降灰を伴った第1回目の噴火(3時46分)の2時間半位前から, 殆んどなくなった(図3-No.6~No.10)。5時頃から再び出始め, 14時の第2回目の噴火を迎え(図3-No.6), 10月5日5時頃殆んど平常時と同じ状態(例えば, 図3-No.1~No.4)に戻った。10月5日13時頃から再び顕著な信号が出始め(図3-No.11), 10月6日16時頃より又ほぼ平常の状態に戻った(図3-No.12)。噴火のあと10月10日~17日(±30mV), 10月21日(−30mV, 約11時間), 10月25

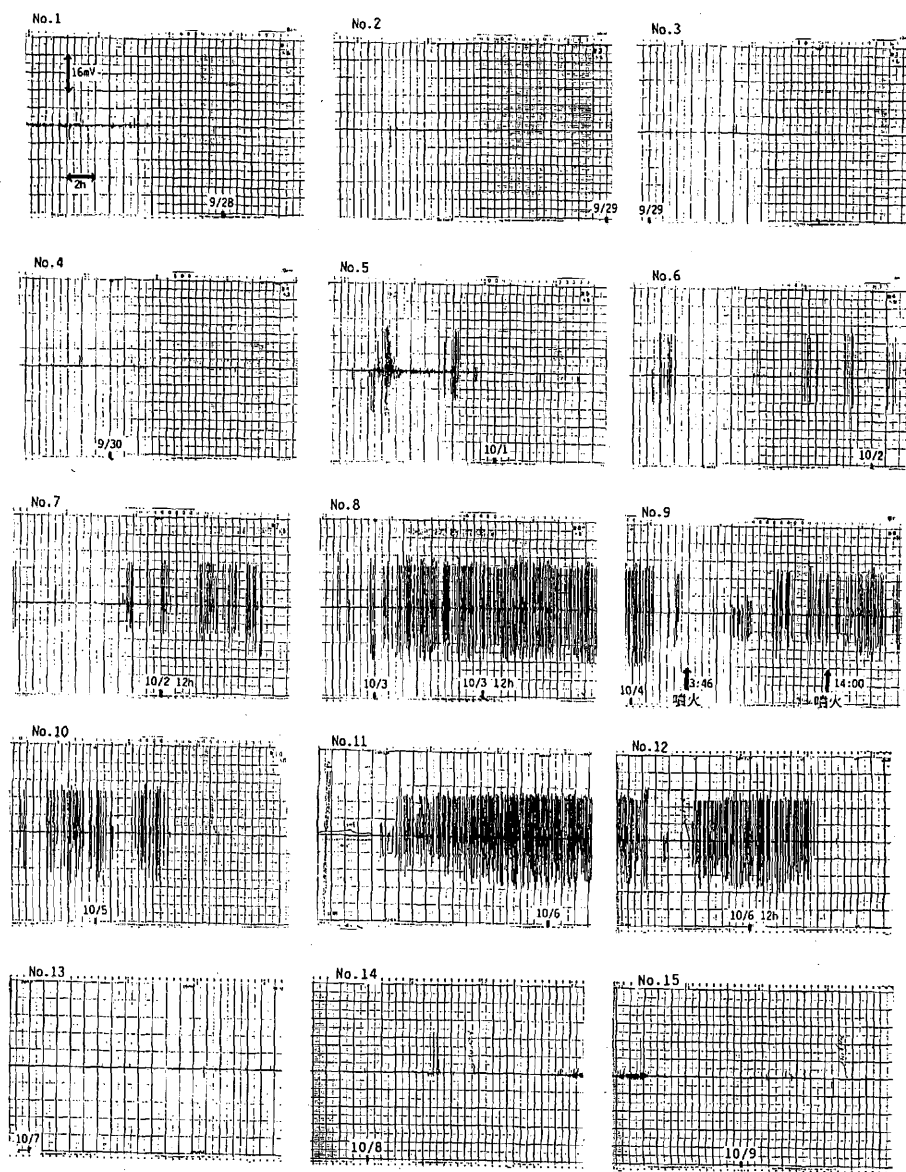


図3 1990年10月4日前後の地中電界変動記録

日($\pm 30\text{mV}$, 約15時間), 10月28日($+20\text{mV}$, 約8時間), 10月29日~30日(30mV)にも, 顕著な信号が引き続き観測されたが, それ以後11月24日現在までほぼ1ヵ月間にわたり平常の状態に戻っている。

噴火活動の数日前に異常電界変動があり, 噴火活動後の直後には一旦殆んどなくなり, 以後数週間にわたり再び強い放射があるという一連の経過は, 1989年の伊東沖の場合と同じである。

信号の形は, パルス状変動の集まりであり, 各変動の特徴は, パルスの幅が, 1~数10秒であって, 時間当たり10~100個程度である。信号の大きさは, 噴火前後の10月2日~6日にかけては最も大きく, 35mV 程度で, 符号は殆んどが正であるが, 時に負のもあった。なお同時期における筑波構内での観測記録には, 特に目立った信号が見当たらない。

又VLF帯の信号は, 平常時とレベルが違わず, 目立つ差がなかったが, ULF帯の異常の観測された時に, ノイズに重じようされているような形跡があり, 放射のスペクトルがこの帯域まで延びていたことが推測された。

伊豆大島における観測は, 1990年3月より5月下旬までバックグラウンドノイズ等の試験観測の後, 以後ほぼ平常観測に入っていた。5月24日より噴火前の9月27日までの記録では, バックグラウンドノイズが通常 $\pm 1\text{mV}$ 以下であるのに対して, $\pm 20\text{mV}$ 程度の振幅のパルス状の信号が, 時間当たり約10個以上で約2時間以上継続する“異常”信号があったのは, 7月16日~17日(40mV , 継続時間9時間), 7月19~20日(-15mV , 3時間), 7月31日(20mV , 4時間), の例がある外は, 今回のみである。又振幅がこの数分の1の約 5mV の大きさの連続的な信号は, 7月15~19日, 8月9日~12日, 8月22日, 9月12日~13日, 9月15日,

9月19日~20日, 9月26日~27日に起きている。この外の顕著な信号としては, 大きさ 30mV 程度の日周状変化, 大きさが 10mV 程度で周期が約1時間の変動が見られた。これ等の起源については現在のところ不明であるが, 7月から次第に活発化している今回の噴火に到った伊豆大島の地震活動(気象庁火山室の資料による)と関係しているかも知れない。

今回の噴火前後の地中電界変動は, これらの場合に比べ, 継続時間でも, パルスの振幅でも, 又パルスの1時間当たりの数でも, 定常観測開始以来, 最も顕著な信号である。又同島内で連続観測している地磁気(3成分)の記録からは, 火山噴火に関連する異常な電界変動と, 磁気嵐, 湾型変化等の地磁気変化との関連は見当たらず, 今回の変動が火山活動と強い関連のあることが示唆される。但し, 地磁気脈動との関係については, 現在検討中である。

異常電界変動の発生機構については, マグマの貫入に伴う微少クラックの生成が関係していると思われるが, 今回の噴火が火口内の崩落が原因ということも言われており, 解明すべき課題の一つである。

(ふじなわ ゆきお・特別研究官)

参考文献

- 1) Fujinawa, Y. and K. Takahashi, Emission of electromagnetic radiation preceding the Ito seismic swarm of 1989, *Nature*, **347**, 376-378, 1990.
- 2) 藤縄幸雄, 高橋耕三, 熊谷貞治, 地震直前先行現象としての極低周波地中電界変動, 地震, 第2輯, 第43巻, 287-290, 1990.

はじめに

地震発生を、真実をもって語るには、具体的に地中の中がどの様になっているかを知らねばなりません。

光が届かず見ることのできない地中は、見えるものなのでしょうか。ここでは、地中の映像（地震発生環境）が、どう捉えられてきたか、今後どの様に捉えようとしているのか、この様な目的を達する手法のなかでも解像度の高いといわれている地震波反射法についてスポットをあて、紹介することと致します。

1. 微小地震による映像

地震が起きる地下の様子を知る手掛かりの第一級の情報は、日常的に自然界に発生している微小地震が地下のどこで、どの様に起こっているか調べることです。それには、対象とする地域に高感度な観測点を空間密度が一定になるよう数多く配置し、突然起こる微小地震データを連続観測をして取得することから研究を開始しなければなりません。

微小地震は人里離れた山中の岩盤という静寂な環境でなくては観測できないほど小さなものです。実際、この様な場所に比べ、人間の活動が高い首都圏では、数百倍を越える人工的な振動（ノイズ）が常時起こっているため、微小地震の観測は不可能でありました。しかし防災科学技術研究所では、深さ3000mにも達する深井戸を掘り、静寂な観測環境の井戸の底に地震計を置き観測が可能となる技術開発を行いました。この様な試みの結果、防災科学技術研究所は、関東・東海地域に一部を除いて、高密度に分布する約90点の高感度地震観測網ができています。この微小地震観測点は、NT

Tの専用回線を通じてオンラインで、専用コンピュータに繋がり、年に1万5千個を越す微小地震のデータベースが作られています。この微小地震のデータからは、精度の高い震源分布が、得られるようになりました。この震源データから、地下のプレートの関わり合いが見え始め、「微小地震の目で地下を眺めた」画像を手にすることができるようになりました(図1)。この様な地下映像を得るようになると、プレートテクニクスの実証的な研究が進み、多くの地震について、その発震機構の研究と合わせ、「どのプレートとどのプレートがこすれ合った地震」といった説明が様々な視点で行われるようになりました。

しかし、この微小地震の震源の分布から地下構造を映像化する手法は、受動的であり、地震が起こらない場所では、何も見えません。そこで、微小地震の目を通さずに地震の起こる場所を直接探ってみるという願望が高くなります。見えない地球の中を、映像として捉えることができれば、地震の起こりかたが的確に判断できます。既に、医学の分野では、超音波やX線検査等を使用した患部の横断面の映像から、病気を診断し治療に役立てています。

見えない地中を見る手法の1つが、地下に埋蔵する石油を探索する目的で発達した反射法地震探査であります。

この反射法地震探査とは、地表の人工的振動源で発生し、地層境界で反射し、地表に戻って来る弾性波（やまびこの原理）を、地震計で観測し、そのデータから地下の境界面を調べ、見えない地下の構造を連続した画像として捉える手法です。

地震の巣の映像的調査の第2段階として、私共は、能動的に地下の様子を探ろう—地震の巣を調べること—と考え、反射法地震探査の幾つかの計画を持ちました。

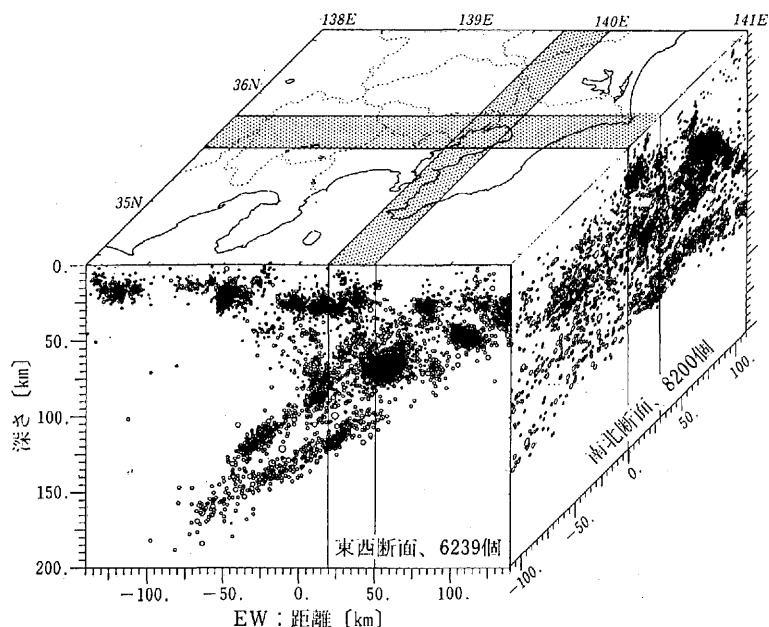


図1 東京湾を含む東西、南北の垂直地震断面 (各々の断面は、地表の網目の範囲に対応)

2. 人工地震を使った映像

伊豆半島では、昭和49年5月9日の伊豆半島沖地震 (M6.9) 以降、幾つかのM7クラスの地震が起こり、群発地震活動が活発になっています。特に平成元年6月から始まった群発地震は、手石海丘の海底噴火 (7月13日) という大きな地学的事件へと発展しました。噴火地点が、市街地に近い海中であった為、社会的にも大きな心配を与えました。

そこで、このような現象を起こす地下構造が、どの様になっているか調べ、今後の活動の推移についての知見を高めようと、平成元年8月下旬から、群発地震の活動した静岡県伊東市の沿岸 (国道135号線バイパス) に4 kmを越える長さの調査測線を取り、反射法地震探査を行いました。陸上の反射法の人工震源としては、様々なものが考案されていますが、調査深度が数千メートルを越える場合は、火薬の爆発、或いはパイプレータ (パイプロサイズ®) を使います。パイプロサイズ®反射法とは、車に積んだ油圧で動く振動機 (パイプレータ) を継続して振動させ、振動を地下深くに送り込み、反射し地表に戻った振動を地震計で観測するもの

であります。

測定の手順は、パイプレータを積んだ車が予め決められている場所に着くと、車の中央部から地表にパイプレータを下ろし、観測車から、無線で送られてきた作動開始信号により、地面の加振を開始します。観測が終わると、隣の加振点に移動します (図2、写真)。この調査では、加振点は、30mの間隔で、全測線で130点設けられました。

振動の伝播の性質を明らかにし、下から戻ってくる振動を強調したり、ノイズを弱めたりするこ

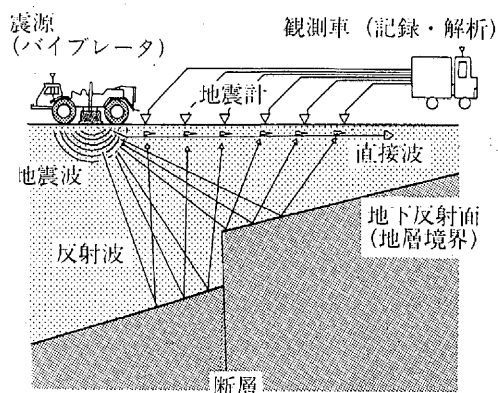


図2 パイプロサイズ反射法の概念図



写真1 観測状況 (パイプレーターと地震計)

とを目的に多数の地震計が使用されます。このケースでは、加振点毎に長さ1 kmの観測線ケーブル)による測定が行われ、このケーブルに沿って、1000個以上の地震計が80cm毎に、並べられました。パイプレータの起こした振動を観測した地震計の出力は、幾つかにグループ分けされた後、ケーブルに繋がり、記録器にデジタル録音されます(調査によっては数千個に達する地震計をどの様に展開させるかが大きな鍵をにぎっており、組織的に地震計の配列を行うとともに、観測現場では、QC(観測データ管理者)は、1つ1つの地震計の設置状態を、見て歩き、解析に役立てます)。

1つの加振点の観測が終わると、地震計やケーブルも整然と人の手によって、次の測定に移動します。この様に、現場の方々の手作業で、加振点の数に対応する130回もの測定が繰り返されました。

地下深部まで伝わる振動のエネルギーを高める為、複数のパイプレータで同時に加振するので、低音の騒音や、振動が発生します。作業に伴うこの様な弊害に対し、沿道の方々の大きな理解や協力が無ければ、パイプロサイス反射法は実施することができませんでした。

以上の観測作業を終えると、収録した膨大なデータを、弾性論や情報処理技術等を駆使して大型計算機による処理を行います。

様々な検討の後、伊東市の沿岸の地下構造断面図ができ上がりました(図3)。この深さ4 km迄の地下構造断面図に示すように大まかには、新しい火山噴出物を示すB1層、湯ヶ島層と考えられるB2層、深さ2 kmより深く位置する更に堅いB3層と、3層に分れていることや、これらの地層を貫いてA、Cで示す貫入岩(古い昔にマグマが貫入した痕跡)を見出す等、伊東市周辺の地下

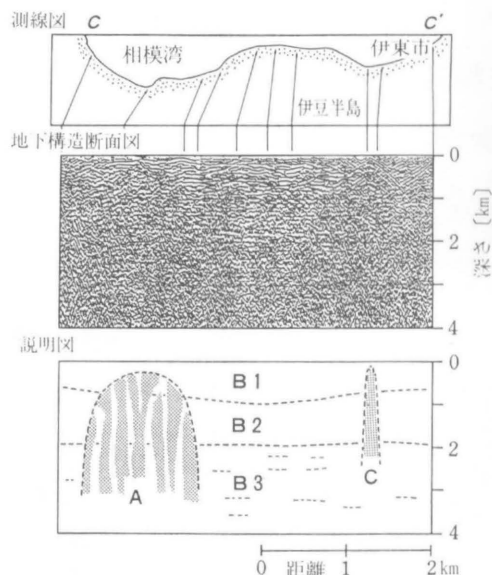


図3 伊東市沿岸の地下構造断面図

上：観測線図，中：地下構造断面図，
下：説明図

構造(地震を起こす環境)を画像として見る事ができました。また、パイプロサイス反射法が市街地で実施されたのは、我が国では初めてのことでしたが、詳細な地下構造調査を行い、大都市のきめ細かな防災計画に役立てたい、といった要望の先鞭をつけた調査でもありました。(科学技術振興調整費の緊急研究で実施)

おわりに

地震波反射法は、石油等の資源の分野で大きな発展をしてきた。この技術の地下深部構造調査への応用が、1970年代より欧米で盛んになりました。この結果、上部マントル迄の詳細な地下深部構造が画像化され、地球科学の分野の画期的な情報となり、地球科学は三次元的証拠をもって議論が進むようになりました。

しかし、我が国のような、火山地帯の地下構造一構造が複雑で人工的振動(ノイズ)が高いでは、反射法は格段に難しくなることが知られており、この事が、その実施にかかる経費の多さ共々火山地帯の地球科学に応用するには不向きと考えられていました。

防災科学技術研究所によって、伊豆大島の噴火

に伴い、バイプロサイス反射法の調査が伊豆大島で実施されました（科学技術振興調整費の緊急研究）。この結果、今まで想像の域を出なかった火山山体の地震波断面を得る事に成功し、地震波反射法は、研究要素が高いものの、火山地帯の様な構造の複雑な地域の構造調査に応用することは意味ある事が明らかになりました。

そこで、上述した伊東市付近の調査をはじめ、様々なバイプロサイス反射法調査研究が、推進されるようになりました。この様な、見えない地中を映像化し、地震の巣を明らかにする研究は、陸

上ばかりでなく、海上でもマルチチャンネル反射地震調査によって研究を開始しています。地震の巣を探る試みは、始まったばかりであり、図1のスケールに比べ、現在では、浅く、一部の場所を調べたにすぎません。これらの調査を引き続き実施し、様々な地域で、様々な手法の地震反射法による解像度の高い地下構造の研究を進める事によって、地震の巣の画像診断が実現できるのではないかと考えています。

（かさはら けいじ・地圏地球科学技術研究部）

防災技術セミナー（JICA）帰国研修員に対するフォローアップ

大 谷 圭 一

1. 「防災技術セミナー」の概要

国際協力事業団（JICA）の集団研修コース「防災技術セミナー」（以下、「本セミナー」という）は、発展途上国における防災技術担当者を対象にして1977年に第1回を開催してより、昨年（1990年）で第14回を迎えるに至っている。当研究所はこのセミナーの受入研修機関として、研修の実施・運営を行っている。

本セミナーは1976年6月に ESCAP 及び WMO が主催する Regional Seminar on Community Preparedness and Disaster Prevention が開催され、自然災害対策の重要性が再認識されたのを契機として、設立されることとなったものである。本セミナーは、開発途上国における防災担当者に対し、降雨、地震等による災害防止のための科学技術及び防災体制について専門的知識を付与し、各国の実状にあった自然災害軽減計画の立案及び防災体制の確立に役立てることを目的として実施されている。なお、1987年の第42回国連総会において「国際防災の10年」（International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR) が採択されたことに伴い、この国際協力プログラム（1990年開始）にも注目し、より一層自然災害軽減のための防災技術の普及に努めている。

本セミナーでは、研修開始以来過去14年間の間に、35カ国から139名の研修生を受け入れている。研修生を受け入れた地域は世界中に広がっており、アジア地域14カ国69名、中近東地域5カ国16名、アフリカ地域3カ国4名、中南米地域10カ国44名、オセアニア地域2カ国4名、ヨーロッパ地域1カ国2名となっている。過去に多くの研修員を受け入れている国としては、インドネシア（13名）、フィリピン（18名）、ペルー（14名）等が挙げられる。

2. フォローアップチームの派遣

JICA では帰国研修員のフォローアップ事業の一環として、主として現在継続して実施している集団研修コースの中から、5年以上実施し、50名以上の帰国研修員のいるコースを対象に、帰国研修員の所属機関及び関係機関を訪問し、現地での技術指導を行うとともに、わが国で実施した研修の成果を測定し、また、当該研修分野に係わる当該国の技術的問題点及びニーズを把握することにより、今後の研修員受入事業及びフォローアップ事業の向上改善に資することを目的として、フォローアップチームを各国へ派遣している。

本セミナーでは、過去にフィリピン、インドネシアを訪問国とするフォローアップチーム（团长木下武雄国立防災科学技術センター第一研究部長、団員影山富恵同センター管理部長、篠塚征和 JICA 筑波インターナショナルセンター研修課職員（職務はいずれも派遣当時のもの））を1985年に派遣している。

前回のフォローアップチームの派遣から5年を経過し、その後の受入研修員の数も50名を超えていることから、今回第二回目のチームを派遣することとなった。前回チームの派遣地域がアジア地域であったこと、帰国研修員の数がアジア地域に次いで多いこと等を考慮して、今回チームの派遣地域は、中南米地域とすることとした。

チームの訪問国は、中南米諸国では比較的帰国研修員の多いペルー（12名）コロンビア（7名）及び帰国研修員の数は多くないが近年連続して研修員を受け入れているベネズエラ（3名）の3カ国とすることとした。これらの諸国は地震、地すべり等による災害に幾度となく見舞われており、かつ火山国である。

3. チームの構成と派遣日程

今回のフォローアップチームの構成は、当研究所と JICA の協議により、次の 3 名に決定した。

担当業務	氏 名
総括(団長)	大八木規夫(防災総合研究部長)
技術指導	大谷 圭一(防災総合研究部地震・火山防災研究室長)
業務調整	村田 俊一(JICA 筑波インターナショナルセンター研修課職員)

今回チームの派遣における調査及び指導内容は、以下に示す各項目に要約される。

- (1) 帰国研修員がわが国で習得した技術の現地における適用度の測定評価
- (2) 防災技術分野に関する訪問各国の一般的事情、技術水準及びわが国の研修に対するニーズの把握
- (3) 防災技術分野、特に、土砂災害防災、地震防災に関する技術セミナーの開催及び訪問各国における技術水準向上のための技術指導
- (4) 訪問各国の防災関係機関の概要調査及び帰国研修員の動向調査と交歓
- (5) 今後のフォローアップ事業に対するニーズの把握
- (6) 国際防災の10年に対する訪問各国の支援ニーズの把握

チームの派遣は8月27日から9月17日までの22日間で、ベネズエラ、コロンビア、ペルーの順で、各国を訪問した。訪問各国では帰国研修員との面談、防災及び技術協力関係機関の訪問・討論、並びに講演会「防災技術セミナー」の開催等を行うとともに、首都(訪問都市)周辺の視察等を実施した。

(日程)

8月27日(月)	成田発
28日(火)	カラカス着
29日(水)	日本大使館、天然資源環境省訪問、帰国研修員面接、カラカス市周辺部視察
30日(木)	地震・地震工学研究所、大統領府中央企画局国際交流局訪問、防災技術セミナー開催、団長主催レセプション
31日(金)	日本大使館(結果報告)

9月1日(土)	カラカス発ーボゴタ着
2日(日)	市域視察
3日(月)	JICA コロンビア事務所打合せ、日本大使館訪問、国家企画省国際技術協力局訪問、帰国研修員面接
4日(火)	大統領府防災警戒局、地質鉱山研究所(INGEOMINAS)訪問、防災技術セミナー開催、 団長主催レセプション
5日(水)	ボゴタ発ーマニサレス着 コロンビア火山観測所(INGEOMINAS 所属)、カルダス州知事訪問
6日(木)	コロンビア火山観測所にて技術討論、ミニプロ打合せ、カルダス大学地質学教室訪問 マニサレス発ーボゴタ着
7日(金)	日本大使館、JICA コロンビア事務所訪問、報告書提出
8日(土)	ボゴタ発ーリマ着
9日(日)	市域視察
10日(月)	日本大使館訪問、JICA ペルー事務所訪問打合せ、国家企画省国際技術協力局訪問、ペルー国会下院議長、上院議長訪問、エバングリスタ上、下院合同予算委員会長昼食会招待、帰国研修員面接
11日(火)	日本・ペルー地震工学研究所(CIS-MID)訪問、市民防衛省訪問、防災技術セミナー開催(同省にて)、 団長主催レセプション
12日(水)	リマ市周辺野外視察
13日(木)	チョシーカ土石流災害地及びリマク川流域野外視察
14日(金)	日本大使館、JICA 事務所訪問報告書提出
15日(土)	リマ発ーロスアンゼルス着
16日(日)	ロスアンゼルス発
17日(月)	成田着

4. フォローアップの成果

帰国研修員や関係機関との面談・討論を通して得られた成果は以下のように要約出来る。

(1) 今回の各国訪問で帰国研修員の約8割の人に面接出来、かつ防災及び技術協力関係機関の関係者から生の意見を聴取することが出来た。彼らは本セミナーを非常に高く評価しており、今後より多くの研修員を参加させたいという強い希望を持っていることをそれぞれの訪問先で聞かされた。帰国研修員は本セミナーで学んだ知識・技術・考え方を自分の職場で活用しようと試みている。しかし、実際の業務遂行に当たっては資機材が足りないため、先端技術的な仕事は実行出来ないという悩みを抱えている。

(2) 殆どの帰国研修員は、何等かのリフレッシュコースにより、日本での研修に再び参加する希望を持っている。また、帰国後は最新の技術情報の入手が困難である実状を抱えており、日本の専門家や研究機関との情報交換、交流の継続を強く希望している。

(3) 本セミナーの運営に対する帰国研修員の意見は、防災技術の全般的な講義の重要性を認識するとともに、それぞれの専門分野の講義や実習により多くの時間を費やして欲しいと考えている。また、関東、関西地域への2回の見学旅行は高く評価されている。

上述したように帰国研修員、関係機関とも本セミナーを高く評価しており、今後の継続にも大きな期待を寄せていることが認識出来た。これらのフォローアップの成果は、今後の本セミナー運営に生かしていくこととしたい。

5. 訪問各国の事情等

各国での滞在期間はいずれも短いものであったが、かいま見た各国の実状はそれぞれ次のようである。

(1) ベネズエラ

石油産出による収入で数年前までは国民一人当りの収入が3,000ドルを超えており、日本からのODAの経済援助の対象にならない程であったが、近年は経済事情が悪化しており、それにつれて社会治安も悪化している。また、米国を全ての面でお手本としてきたことへの反省から、日本への関心が次第に高まってきている。

首都カラカスは東西に走る活断層を境にして北側に2,000m級の山、その南側に東西に伸びる1,000

m前後の盆地が広がり、その上に発達している。1967年には直下型地震の被害を受けており、また、人口集中による周辺山地への住宅建設により斜面災害の危険性が増している。

(2) コロンビア

コロンビアの経済状態は3カ国の中では中間であると推測され、治安状態も昨年夏の大統領交代から急速に改善されており、首都ボゴタは一年を通して気温変動が殆どなく、一年中日本の春か秋という状態で、現状では最も生活しやすい都市という感じであった。しかし、この国も自然条件的には多くの災害要因を抱えており、防災のための法体系の整備を急いでいる。特に住民への防災教育に力を入れ始めている。

コロンビアと当研究所の間では、JICAのミニプロジェクトとして「火山防災」に関する協力が昨年6月から3カ年計画でスタートしており、このプロジェクトの推進に大きな期待が寄せられている。長期専門家として広部第2研究部長が現地に赴任して元気に活動されている。

(3) ペルー

この国の経済は最悪とも言えるべき状態で、昨年度の年間インフレ率は3000%を超えている。国の機関でもガソリン代にもこと欠くという話を聞き、日系人として初めて大統領に就任した藤森氏の苦労は大変なものであろうと推測される。しかし、防災関係機関の人達の意欲は非常に活発であり、法体系の整備、住民教育の実施へと取り組む姿勢には強い感銘を受けるものがあった。

この国の自然条件も日本と良く似ており、地震、斜面災害、洪水等多くの災害要因を抱えている。また、いくつかの活火山の活動が続いており、火山防災対策に苦慮している実情である。経済の疲弊により、防災対策の推進には多くの問題が内包されているようである。

本セミナーの帰国研修員の一人 Elmer Evangelista 氏は、新大統領藤森氏の片腕として、上院議員となり、上・下院合同の予算決算委員会委員長として活躍している。彼のアレンジにより、第一副大統領兼上院議長、下院議長に表敬することが出来た。彼は上院議員として活動しながらも、防災に対する意欲はいささかも衰えておらず、わが国との交流の継続に強い期待を抱いていると力説していた。



写真1 ベネズエラ天然資源環境省での意見聴取
大谷（左から2人目）、大八木（3人目）、
Cararsco 社会基盤局長（4人目）



写真2 ペルー国会訪問 (Evangelista 上院議員 (左
から3人目)、San Roman 第一副大統領兼上
院議長 (6人目)、大八木 (7人目)、大谷 (8
人目)、溝淵 JICA ペルー事務所長 (9人目))

地 球 災 害

——地質時代における生物の絶滅と地球磁場の逆転——

萩 原 幸 男

1. はじめに

今からおよそ6,500万年前、地質時代は中生代白亜紀から新生代第三紀へと移った。この時期をK-T境界と呼び、白亜紀に大増殖した恐竜はこの時を境にして忽然と姿を消したのである。恐竜ばかりでなく、アンモナイトやペレムナイトのような中生代の代表的な生物も同じ運命を辿った。体重25kg以上の脊椎動物はすべてこの時期に絶滅したという。かろうじて生き残ったのは小型の生物ばかりであり、哺乳類も生き残って新生代に大繁殖することになる。

地質時代におけるこのような生物群の絶滅はK-T境界だけではなく、何度か起こったことが知られている。しかもほぼ時を同じくして、地球磁場の逆転が起こり、大規模な気候変動が発生した。そののみならず同じ時期に隕石の大量落下や地球の火成活動の増大もみられたという(増田：科学, 59, 455(1989))。まさにこの時期の異変は「地球災害」と呼ぶにふさわしい。

はたして地球災害の原因は何であろうか。太陽系に近接した超新星の爆発による電離層の消失と宇宙線量の増加、小惑星の落下あるいは火山の大噴火による急激な気候の寒冷化等、さまざまな学説があるが、これといった定説はない。小惑星衝突説はAlvarez et al. (Science, 208, 1095(1980))に端を発して、1980年代に爆発的に研究数が増加し、今日なおNatureやScience誌等を賑わしている。

この種の研究が今日盛んになった背景には1900年代末という世紀末思想があると考えられるが、それ以上に核戦争や、現在地球が直面している世界的な異常気象と気候変動に対する危機感にあると考えられる。核戦争は「核の冬」と呼ばれる気候の急激な寒冷化を招来するであろうし、また二

酸化炭素やメタン、フロン等の大気中濃度の増加は温室効果を招き、地球を温暖化させる。地球磁場の逆転現象も大規模気候変動と密接に関係するらしい。いずれの場合も生物種の交代あるいは絶滅の危機をはらんでいる。英知ある人類は過去を知ることにより、未来に迫り来る危機を回避しなければならないであろう。

2. 地球災害原因論

2.1 小惑星衝突説

近年注目されている学説にAlvarez et al.の小惑星衝突説がある。彼等はイタリア中部で採取したK-T境界の粘土層中にイリジウムの濃集を発見した。イリジウムは白金族で、地殻や上部マントルの岩石中には極めて少量しか含まれていないが、隕石中には高度に濃集している。この発見を根拠に、彼等は直径6~7kmの小惑星が20km/s程度の速度で地球に衝突したと考えた。小惑星の衝突は巨大なクレーターをつくり、成層圏に広がった大量の塵が長期間にわたって太陽光をさえぎると植物は枯れ、食物連鎖を断たれた生物群は集団的滅亡を来す。これが小惑星衝突説のストーリーのあらすじである。

K-T境界におけるイリジウム濃集層の存在はその後世界各地において発見された。そして次第に研究者の興味は小惑星衝突地点の探索に向けられるようになった。それには天体の衝突と同時に瞬間的な高圧によって生成する、SiO₂の成分をもつ高圧鉱物コーザイトやスティショパイトの分布が決め手となる。しかし高圧鉱物もまた広範囲に分布し、ヨーロッパをはじめ北米、ニュージーランド、北太平洋海底のK-T境界層から採取された(Bohor et al.: Science, 236, 705(1987))。これらの採取地の広がり様子から、おそらく複数個

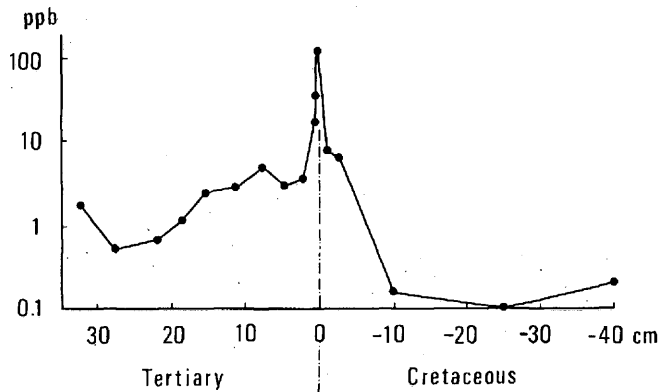


図1 ニュージーランドのK-T境界層におけるイリジウム濃度の変化。横軸は地層の厚さ。Wolbach et al. (Nature, **334**, 665 (1988))の原図より抜粋

の小惑星がほとんど同時に落下したものと考えられる。6,500万年の間に、地球全表面の約20%の広さにあたる海洋底が海溝から沈み込んでしまったために、海洋底におけるこの種の探索は陸上に比較して困難と考えられている(Kerr: Science, **237**, 856(1987))。

K-T境界における天体衝突の証拠はイリジウム濃集層と高圧鉱物の存在だけではない。酸素や炭素同位体比の異常は大規模な気候変動の発生を示唆する(Zachos et al.: Nature, **337**, 61(1989))。また Wolbach et al. (Nature, **334**, 665(1988))と Venkatesan and Dahl (Nature, **338**, 57(1989))はそれぞれ大量のすす状の炭素および芳香族炭化水素の存在を突きとめ、地球規模の大火災発生の可能性を指摘している。大規模な酸性雨

も発生し(Prinn and Fegley, Jr.: Earth Planet. Sci. Lett., **83**, 1 (1987))、植物相はプランクトンに至るまで大幅に交代した(Wolfe and Upchurch, Jr.: Nature, **324**, 148(1986), Saito et al.: Nature, **323**, 253(1986))。まして植物に依存している動物種の交代は当然のことと考えられる。

生物絶滅はひとりK-T境界に限らない。図2は Raup and Sepkoski, Jr. (Science, **231**, 833(1986))による生物属の絶滅率であり、それはK-T境界のほかにも中生代ジュラ紀と三畳紀の境界(Tr-J境界, 2億1,300万年前)や三畳紀と古生代ペルム紀の境界(P-Tr境界, 2億4,800万年前)でも極めて高い値を示している。またこれらの地質境界においては、イリジウム濃集のみならず、酸素や炭素の同位体比異常も把握されている(Hol-

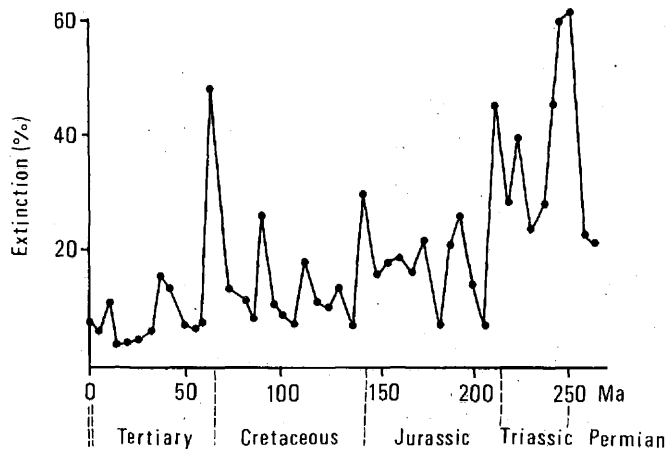


図2 海洋動物9,773属の化石データより推定した生物絶滅率。横軸の単位 Ma は百万年。Raup and Sepkoski, Jr. (Science, **231**, 833 (1986))より

ser et al. : Nature, **337**, 39(1989), Gruszezynski et al. : Nature, **337**, 64(1989))。図2の範囲外であるが、カンブリア紀と先カンブリア紀の境界(5億9,000万年前)にも酸素や炭素同位体比の異常が発見されている(Tucker : Nature, **319**, 48(1986), Magaritz et al. : Nature, **320**, 258(1986))。

K-T境界より新しい時代では、古第三紀層中の始新世-漸新世の境界(3,800万年前)にもイリジウムの濃集が発見されたし(Alvarez et al. : Science, **216**, 886(1982)), 第三紀末期の鮮新世と第四紀の境界(170万年前)にも発見された(Kyte et al. : Science, **241**, 63(1988))。元来、地質時代の境界は生物化石を根拠に決定されている。それぞれの境界において小惑星の衝突、あるいはそれに近い地球規模の大異変が発生した可能性は十分に高いと考えられよう。

2.2 小惑星衝突の危険性

小惑星の衝突といっても実感が湧かないが、彗星まで含めると地球にとって衝突の危険性はかなり高い。1989年3月31日にパローマ山天文台で発見された小惑星(1989 FCと命名)は、後に行われた計算結果によると、実は3月23日に地球からわずかに0.005AU(約75万km, AUは天文単位で 1.496×10^8 km)の位置を通過していたことがわかった(IAU Circular No. 4767(1989))。地球と月との平均距離が38万kmであるから、かなりの大接近といえる。

1989年7月18日現在、軌道が決定され、正式に登録された小惑星は4,132個にのぼる(Minor Planet Center, S A O, 1989)。確認されていない直径1km以上の小惑星の総数は50万個を超えるものと見積られている。太陽から火星までの距離は平均1.5AU, 木星までの距離は平均5.2AUであるが、小惑星の大部分はこれら2惑星の間にベルト状に2.2~3.2AUの範囲に存在する(図3参照)。

これに対して、アポロ群と呼ばれる特異な小惑星群は極端な楕円軌道を持ち、近日点距離が1AU以下であるため、地球の軌道を横切る。なかでもイカルスは19年ごとに地球に接近(600万km)する。接近のたびごとにその軌道は地球の引力により曲げられ、いつの日かは地球に衝突の危機が訪れるに違いない。

地球から18等級以上に観測できるアポロ群小惑星の総数は約7,000個にのぼると試算される。それゆえ、生物種の絶滅をもたらすような大型小惑星は別としても、小型の小惑星が地球に衝突する確率は決して低いものではなからう。ちなみに地球上で発見される大部分のコンドライト(隕石の一種)はアポロ群小惑星に起源をもつ。人類の歴史のなかで、小惑星の衝突を想起させるような大災害の記録はないが、1908年に中央シベリアのツングース地方に発生した大爆発は彗星の衝突と考えられる。ちょうどロシア革命にあたり十分な調査もされなかったが、半径80km以内の樹木はなぎ倒され、轟音は1,000kmも離れたところで聞こえたという。

軌道要素が計算されている小惑星の場合、地球への衝突の時期は推定できる。直径が小さければ、水爆等により衝突以前に破壊することが可能かも知れない。しかし前述したように、地球に大接近してはじめて発見されたのでは間に合わない。直径の大きい天体となると、衝突の危機は予知できても、衝突以前の時点で天体を破壊することは不可能に近い。またその軌道を変更させることも不可能であろう。大型小惑星の衝突は技術的に避けようがないのが実状である。

2.3 分子雲通過説

表1に与えられた地質時代区分をみると、その時間間隔がかなり一定していることがわかる。つまり地質時代は極めて周期的に変遷してきたといえる。表1にもとづいて地質時代の区分と年代との関係を示したのが図4であるが、石炭紀とカンブリア紀を除けば、地質時代の変遷の周期がほぼ一定している事実に驚かされる。

地層の年代と生物種の興亡のデータをもとにフリーエ解析した結果として、Raup and Sepkoski, Jr. (Science, **241**, 94(1988))は種の絶滅の周期を2,600万年と結論した。K-T境界の時点を基準にすると、第三紀に入ってから地球生物は2回の危機を迎えたことになる。また中生代のはじめ(2億4,800万年前)から数えると、現在まで約10回の危機が地球を訪れたことになる。

Alvarez and Muller (Nature, **308**, 718(1984))は直径10km以上のクレータの生成年代と地質時代区分の周期とが一致することを指摘して、小惑星

表1 地質時代区分。年代は Harland et al. (Cam. Univ. Press, 131 pp. (1982)) による。年代の単位 Ma は百万年

Era	Period		Epoch/Age	Abbr.	Age(Ma)
Cenozoic	Quaternary		Holocene	Hol	0.01
			Pleistocene	Ple	2.0
	Tertiary	Neogene	Pliocene	Pli	5.1
			Late Miocene	L.Mio	11.3
			Middle Miocene	M.Mio	14.4
			Early Miocene	E.Mio	24.6
			Late Oligocene	L.Oli	32.8
		Paleogene	Early Oligocene	E.Oli	38.0
			Late Eocene	L.Eoc	42.0
			Middle Eocene	M.Eoc	50.5
			Early Eocene	E.Eoc	54.9
			Late Paleocene	L.Pal	60.2
			Early Paleocene	E.Pal	65
Mesozoic	Cretaceous		Maastrichtian	Maa	73
			Campanian	Cmp	83
			Santonian	San	87.5
			Coniacian	Con	88.5
			Turonian	Tur	91
			Cenomanian	Cen	97.5
			Albian	Alb	113
			Aptian	Apt	119
			Barremian	Brm	125
			Hauterivian	Hau	131
			Valanginian	Val	138
	Jurassic	Berriasian	Ber	144	
		Tithonian	Tth	150	
		Kimmeridgian	Kim	156	
		Oxfordian	Oxf	163	
		Callovian	Clv	169	
		Bathonian	Bth	175	
		Bajocian	Baj	181	
		Aalenian	Aal	188	
		Toarcian	Toa	194	
		Pliensbachian	Plb	200	
		Sinemurian	Sin	206	
Triassic	Hettangian	Het	213		
	Rhaetian	Rht	219		
	Norian	Nor	225		
	Carnian	Crn	231		
	Ladinian	Lad	238		
	Anisian	Ans	243		
	Scythian	Scy	248		
Paleozoic	Permian		Tatarian	Tat	253
			Kazanian-Ufimian	Kaz-Ufi	258
			Kungurian	Kun	263
			Artinskian	Art	268
			Sakmarian-Asselian	Sak-Ass	286
	Carboniferous		Stephanian	Ste	296
			Westphalian	Wes	315
			Namurian	Nam	333
			Visean	Vis	352
			Tournaisian	Tou	360
	Devonian		Famennian	Fam	367
			Frasnian	Frn	374
			Givetian	Giv	380
			Eifelian	Eif	387
			Emsian	Ems	394
			Siegenian	Sig	401
			Gedinnian	Ged	408
	Silurian		Pridoli	Prd	414
			Ludlow	Lud	421
			Wenlock	Wen	428
			Llandovery	Lld	438
	Ordovician		Ashgill	Ash	448
			Caradoc	Crđ	458
			Llandeilo	Llo	468
			Llanvirm	Lln	478
			Arenig	Arg	488
			Tremadoc	Tre	505
	Cambrian		Merioneth	Mer	523
St. David's			StD	540	
Caerfai			Crf	590	

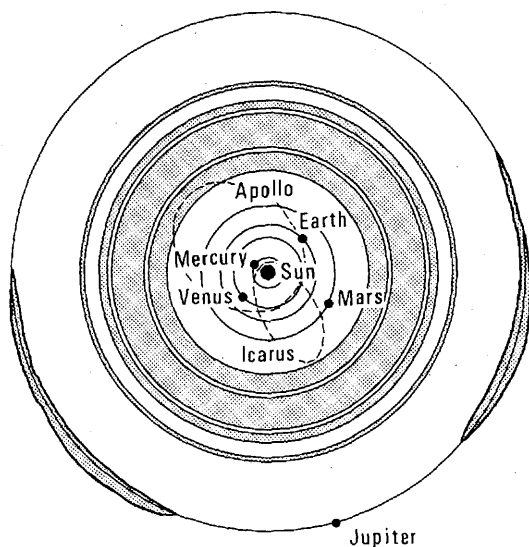


図3 惑星と小惑星の軌道。陰影の部分が小惑星の軌道範囲。木星軌道上の陰影はトロヤ群小惑星の軌道

衝突説の裏付けとした。これに対して、Rampino and Stothers (Nature, 308, 709(1984), Science, 226, 1427(1984))は分子雲通過説を提唱した。この説の概略をここで簡単に解説することにする。

約2,000億個の恒星の大集合である銀河系は全体で直径10万光年の円板状の形をなし、多くの恒星

は円板の中に密集している。太陽もその中の一つの恒星であり、銀河系の中心から約2.8万光年の距離にある。太陽は銀河系の中心のまわりを220km/sの速さで回転しているので、半径2.8万光年の円周を一回転するのに約2.4億年かかる。

ところが太陽はこの円板（銀河面という）に沿って一様な回転運動をしているのではなく、ちょうどメリーゴーランドのように銀河面に対して上下に振動しながら回転している。その周期は約6,000万年であるため、太陽は約3,000万年に1度の割合で銀河面を横切ることになる。銀河面には巨大な分子雲（水素やヘリウム分子を主成分とする星間雲）が集中的に存在していて、太陽系がこれと遭遇するとき、地球に彗星が衝突する確率が高くなる。Rampino and Stothers (Science, 226, 1427(1984))によれば、地球上のクレータ生成の年代は3,300万年周期で増減している。彼等はそれを根拠に生物絶滅の直接の原因を分子雲通過の際の彗星の衝突に求めたのである。

しかし Yabushita and Allen (Mon. Not. R. astr. Soc., 238, 1465(1989))は生物絶滅の直接の原因として、分子雲中の大量の水素が地球大気中の酸素と結合して水となるため、大気の酸欠状態が大型生物の絶滅を招いたとみる。いずれの説も生物の絶滅が太陽系の銀河面通過時に起こり得る

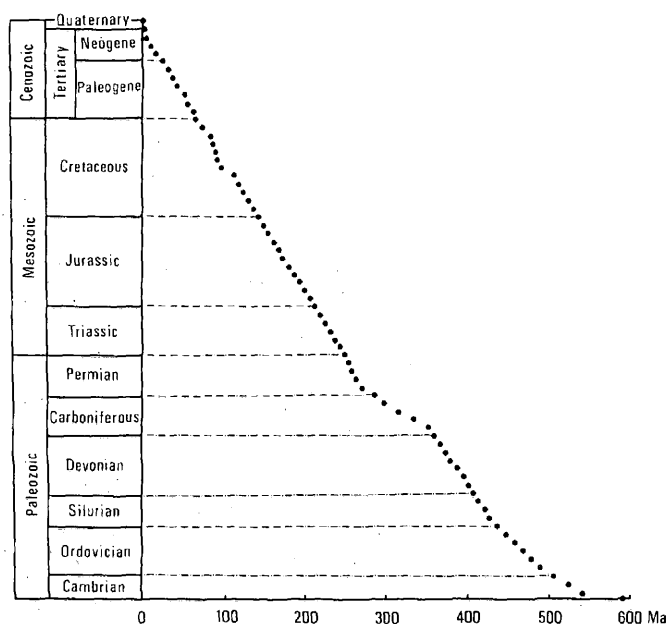


図4 地質時代区分と年代。表1からプロットしたもの

ことを指摘したものである。

これに対して、反対に太陽系が銀河面から離れる時期に絶滅の確率が高くなるという説もある (Schwartz and James: Nature, 308, 712(1984))。銀河系の円板の中心にはバルジと呼ばれる直径が約1.5万光年の球状の部分がある。バルジの中心には直径3光年程度の中心核があり、この中に数100万個の恒星が密集して、相互に激しく衝突し合っている。そこにはおそらくブラックホールがあって、その巨大な引力により恒星が吸い込まれるとき、エネルギーが電波として放出される。中心核が強い電波源である理由はこうして説明される。

地球から見る中心核は射手座の方角にあるが、濃い暗黒星雲がさえぎっているため、可視光では観測できない。中心核から発射される0.1~2 keVのX線も星間ガスの存在によって弱められて地球に到達する。ところが太陽系が銀河面から離れると、太陽系と中心核との間にX線をさえぎる星間ガスが少なくなり、X線強度が強まって生物絶滅の危険性が高まる。前記の Schwartz and James によれば、もし太陽系が銀河面から125pc(パーセク、約3.26光年) 離れるとするならば、銀河面内に比較してX線強度は約1,600倍になる。

2.4 巨大火山噴火説

火山噴火には、1回の規模が小さいものから極端に大きいものまである。それは地震も同様である。1783年浅間山の大噴火では、火砕流・土石流が3,000haの土地を埋め尽くし、死者は1,200人にのぼった。空をおおった噴煙は東北地方を中心に気温を下げ、「天明の大飢饉」の原因となった。餓死者は数十万人に及び、農民一揆が続発したという。しかしこの大噴火も実は火山災害からみれば、中規模の噴火に過ぎない。

今から22,000年前、現在の桜島の北方に、半径約20kmの始良カルデラが誕生した(荒牧: 月刊地球, 5, 83(1983))。このとき大量の火山灰や軽石が噴出して、カルデラの周辺では厚さ100mも堆積して、今日のシラス台地を形成した。火山灰は四国で2m、大阪で数十cm、東京で10cmの厚さに堆積した。青森でも当時の火山灰層が発見されることから、北海道を除く日本全土が真っ白に火山灰をかぶったことになる。この火山灰の分布から

噴煙は地上50km以上に達したと推定される。確実に世界の気温は下がったであろう。しかしこの程度の噴火では、九州や四国の生物は死滅したとしても、地球規模の生物絶滅にはつながらない。

インドのデカン半島には東西1,500km、南北1,400km、厚さ2kmに達する玄武岩質溶岩台地がある(図5)。アラビア海に侵食された面積も総合すると、その総面積は本州のおよそ5倍に達する。近年この溶岩にアルゴン同位体法による年代決定が実施され、その結果6,660~6,850万年(Duncan and Pyle: Nature, 333, 841(1988))。および6,500~6,900万年(Courtillot et al.: Nature, 333, 843(1988))の年代が得られた。これらの時期はほとんどK-T境界にあたる。一般に玄武岩質の噴火は爆発的ではないが、それでもこのような超大規模の噴火となると世界の気候を一変させたとしても不思議はない。

このような超大規模の玄武岩質噴火は通常の火山では期待できない。おそらくマントル深部からの熱上昇流(マントルプルーム)によってマグマが常に供給される場所、つまりホットスポットにおいて実現されると考えられる。現在活動している代表的なホットスポットは地磁気極を通る1つの大円上に分布する。このことはマントルプルームが地球の核内の熱対流と関係があることを物語っている。

地質時代における生物群絶滅の原因は1980年代においてもつばら天体に求められていたが、同時

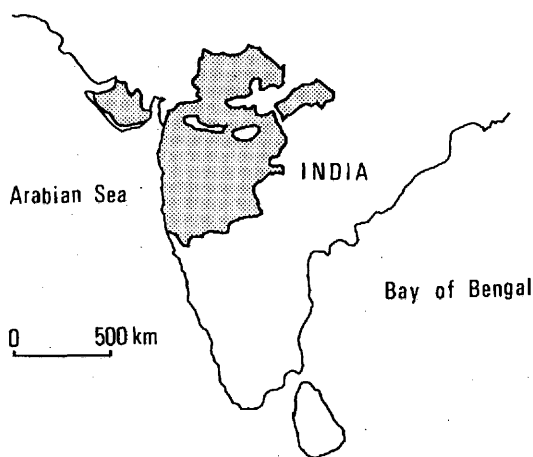


図5 インド・デカン半島の溶岩台地(陰影の部分)

代も中期を過ぎてから地球自体に原因を求める「内因説」が復活しはじめた。しかしK-T境界層における高圧鉱物の存在(Owen and Anders: Nature, 334, 145(1988))は火山説にとって不利なもののようなものである(Kerr: Science, 236, 666(1987)), 242, 865(1988))。またもし増田(科学, 59, 455(1989))の指摘のように、地球の内部・外部を問わず、多くの異常現象の同時発生が確実であるとする、やはり、「外因説」を採用せざるを得ないことになる。

3. 地球磁場の逆転

3.1 逆転の証拠

火山活動に伴って溶岩が噴出したり、地下に岩脈が貫入したりすることがある。生成当時の岩石は1,000°Cにも達する高温であるが、次第に冷却固結する。岩石の種類にもよるが、温度が数百度°C以下になると、岩石は磁性をもつようになる。この温度を「キュリー点」と呼び、磁性を帯びる現象を「帯磁」という。岩石は帯磁した状態をほぼそのまま保存するので、このような磁気を「熱残留磁気(TRM)」と呼ぶ。地球磁場のもとでTRMが発生するとき、帯磁の方向は一般に地球磁場の方向と一致する。岩石中に含まれている磁鉄鉱のような強磁性鉱物の微小片が、地球磁場の方向に配列するためである。このような現象は砂鉄の粒が堆積する際にも起こるため、堆積岩もまた残留磁気を呈する。これを「堆積残留磁気(DRM)」と呼ぶ。

重要なことは、TRMもDRMもともに岩石生成当時の地球磁場の方向を保ち続けることである。もし地球の長い歴史のなかで磁場の方向に変化があったとするならば、残留磁気は岩石生成当時の

地球磁場を化石として今日に残していることになる。岩石の残留磁気を調査することにより、過去の地球磁場変遷の歴史を知ることが可能なのはこのためである。

大正から昭和のはじめにかけて、松山基範(1884-1958, 京大名誉教授, 山口大学元学長)は日本国内はもとより朝鮮半島や中国東北部にまで足を延ばして岩石を採集し、そのTRMを測定し続けた。その結果、彼は現在の地球磁場の方向に帯磁した通常の岩石のほかに、逆方向に帯磁した岩石を数多く発見した。この逆帯磁の事実を説明するため、彼は地球磁場は第四紀のはじめ頃に現在の方向と反対方向であったと提唱した。「地磁気の逆転」に関する論文が発表されたのは1929年のことであったが、当時世界の地球科学者は誰一人として彼の卓見に気付かなかったのである。1960年代になって、岩石の年代決定法が確立されるに及んで、はじめて地球磁場の逆転が事実であることが証明されるに至った。

今日では超伝導磁力計による残留磁気測定法の大幅な進歩から高感度の測定が可能となった。堆積速度の速い地層からサンプルを採集するならば、100年以下のタイムステップでDRMの変遷を確定できる。房総半島には堆積速度の著しく大きい(1,000年で3m以上)海成層がある。図6は新妻・藤井(静岡大学地球科学研究報告, 10, 123(1984))がこの海成層のサンプルから松山-ブリュンヌ逆転期(約70万年前)に対応する古地磁気極(VGP)を求めた例である。

このような精度の高い測定により世界各地でVGPの位置が求められるようになると、グローバルな逆転のプロセスが判ってくる。赤道付近か南半球のある緯度の部分から逆転が開始されるという共通した性質も突き止められた(Hoffman: Sci.

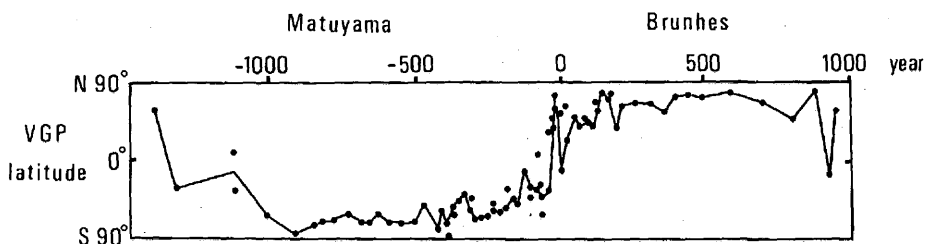


図6 松山-ブリュンヌ逆転期の古地磁気極(VGP)の変遷(新妻・藤井による)

Amer., 258, 50(1988)). 地球磁場には正か逆の状態を保ち続ける安定期と、逆転途上で逆戻りしたり、途中で一時期ストップする不安定期も存在することが明らかになった。

図7は磁場の逆転のモデルである。黒く塗りつぶした時期が正磁気、白い部分が逆磁気の安定期にあたる。正磁気の期間中に一時的な不安定期(図では Excursion)も見られるが、あまりにも短期間なので、正磁気の安定期を示す黒の帯の中に白の線を書き入れることが不可能な例である。これに対して、逆磁気の安定期中に比較的短期間の正磁気(図では Normal Subchron)が見られる。一般にこの時期を「イベント」と呼び、安定期の「エポック」と区別する。

図8は過去500万年の逆転の様子を示す。ブリュンヌ、松山、ガウス、ギルバートの4期はエポックに、ハラミヨ、オールドゥバイ等はイベントに相

当する。なおブリュンヌ・エポックの中にラシャン、ブレーク、ビワI、ビワII等の一時的な不安定期も発見されているが、図には示されていない。ビワIおよびビワIIは琵琶湖の湖底堆積物のDRMによって検出されたエクスカッションである。

3.2 逆転の原因

地球磁場の逆転はなぜ起こるのであろうか。これについて述べる前に、まず地球磁場はなぜ存在するかの疑問に答えなければならない。

地球の構造は核とマントルに大別される。核はその中心部に内核と呼ばれる半径約1,300kmの固体部分を持ち、その周辺部の外核(半径約3,500km)は液体である。外核の主成分は鉄であって、隕鉄からの類推により、約10%のニッケルを含むと考えられている。地球の温度は内部ほど高くなる。外核の温度は鉄の融点より高いために外核は液体

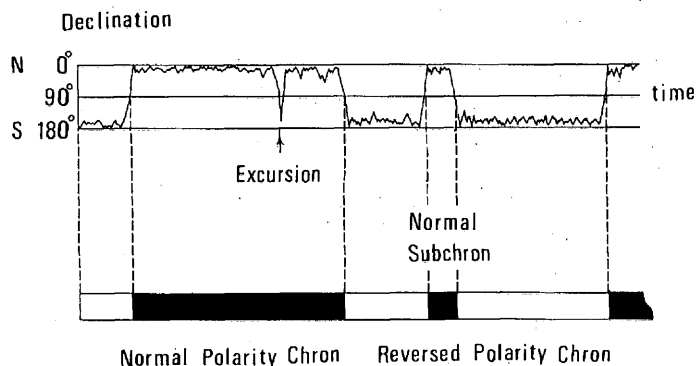


図7 地球磁場の逆転モデル。Harland et al. の原図より引用

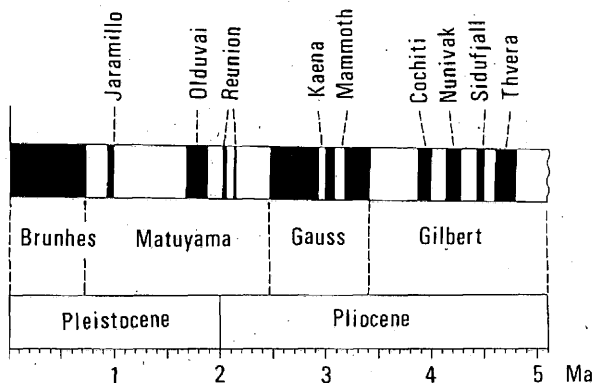


図8 過去500万年間の地球磁場の方向。黒い部分は正、白い部分は逆磁気を示す。Harland et al. の原図を一部修正したもの

となる。しかし、圧力が増すとともに融点は高くなる傾向をもつので、最深部の内核では温度が相対的に融点より低くなり、固体の状態に戻る。

地球は誕生の初期以来次第に冷却しつつある。核の内部でも同じことで、温度が少し下降すると液体は固体に変るため、外核から鉄が固化して内核が成長する。外核は鉄だけではなく、ニッケルのような軽い元素を含んでいる。鉄が内核と外核の境界で析出されると、あとに軽い物質が残る、これが浮力によって上昇流をつくる。こうして外核内に対流運動をひき起こす（高柳・本蔵：号外地球，2，58(1989)）。このような考え方に対して、外核とマントルとの境界に対流のきっかけを求める考えもある。2.4において述べたように、もしマントルブルームが核の表面から熱を奪って上昇するならば、外核の上部に熱い、あるいは冷たい部分がつくられ、結果として外核内に上昇流や下降流が発生するであろう。きっかけはどうかあれ、このような対流運動が地磁気の原動力なのである。

外核の主成分は鉄であるので電気が流れやすく、しかも流体運動をしている。いま何かの原因で地球に磁場が発生したと仮定する。磁場の中でコイルを動かすと電流が誘導されると同じ原理で、発生した磁場の中を液体鉄が動くとき電流が流れる。その電流は再び磁場をつくるために、ひとたび生じた磁場は減衰することなく維持される。この過程は発電機と同じであって「ダイナモ理論」と呼ばれ、地球磁場の成因を説明する有力な考え方である。

しかしこの過程だけでは地球磁場の維持は説明できても逆転はできない。数理的に非常に複雑で難解な理論なので、簡単化して円板モデルにより磁場発生仕組みを説明することがある。このと

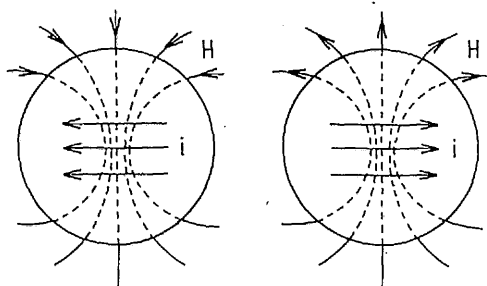


図9 外核内の電流*i*と地球の主磁場*H*の関係

き2個の円板ダイナモをカップルさせると磁場が逆転することが知れている。これを考案者の名をとって「力武モデル」と呼ぶ。そのメカニズムについては力武常次著「地球磁場とその逆転」（サイエンス社，1980）に詳しい。おそらく実際の外核の中でも、力武モデルと同様なプロセスで逆転が実現されるものと考えられるが、そのメカニズムは完全には解っていない。

流体核の熱対流に伴うダイナモ作用説に対して、近年「小惑星衝突説」（Muller and Morris：Geophys. Res. Lett., 13, 1177(1986)）が登場した。小惑星が地球に衝突すると、地球は「核の冬」と同様の状態のもとに小氷期を迎える。すると極地の氷冠が成長して水の質量のグローバルな再配分が短期間に起こる。例えば200～300年間で10mも平均海面が低下すれば、地球の慣性能率は変化し、結果としてマントルの角加速度に変化が生じる。マントルと外核との間に摩擦が発生し、外核の表面付近に生じた乱流により地球磁場に逆転あるいはエクスカージョンのトリガーがかかる。

この仮説が真実であるとするならば、ある限度を越えた大規模気候変動が発生するたびに、頻繁に地磁気の逆転が起こることになる。しかし大規模気候変動が原因となって地磁気の逆転を起こす過程には何か無理があって納得し難い気がする。

3.3 逆転の周期性

地質時代の境界の年代には明瞭な周期性があることを2.3において述べた。地磁気の逆転にも同じように周期性があるだろうか。ジュラ紀のはじめから現在まで1.7億年間の逆転の様子を示す図10によって、周期性の有無を検討してみよう。図に見られる最大の特徴は白亜紀に約5,000万年の長期にわたる無逆転期が存在することである。それに対して、この期間の前後、すなわち白亜紀前期とジュラ紀、および第三紀と第四紀には数多くの逆転が発生している。逆転期-無逆転期-逆転期の変遷から周期性を抽出するならば、それはおよそ1～1.2億年ということになる。

Pal and Creer (Nature, 320, 148(1986))は三疊紀(2.5億年前)までの逆転データにもとづいて、百万年ごとの逆転回数を図11にまとめた。図によると2.5億年間に3回の逆転回数のピークがあり、白亜紀の無逆転期と同様な無逆転期が約2億年前

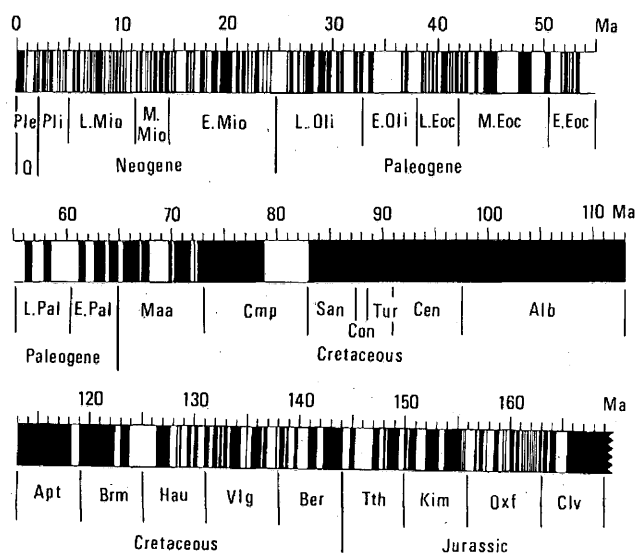


図10 過去1.7億年間の地質時代区分と地磁気の逆転。黒い部分は正、白い部分は逆磁気のエポックを示す。Harland et al. の原図を一部修正したもの

の三畳紀後期からジュラ紀前期にかけて存在したことがわかる。つまり約1億年の周期で逆転回数が増減していることになる。Pal and Creer はフーリエおよび最大エントロピー法を用いてさらに細かい周期分析を試み、逆転回数の増減には1,200万、3,800万および6,700万年の周期が存在することを明らかにした。

Stothers (Nature, **322**, 444(1986))も同様な周期分析の結果、3,000万、6,700万、および1.32億年の周期性を検出したし、また Lutz and Watson

(Nature, **334**, 240(1988))も3,000万年周期の存在を再確認している。3,000万年周期は太陽系が銀河面を横切る周期に等しく、これを根拠に彼等は宇宙起源のカストロフィーが地磁気の挙動に影響すると主張している。これらは地磁気逆転の「分子雲通過説」とでも云うべきものであって、前記した Muller and Morris の「小惑星衝突説」と対比される。

+1 あるいは-1 の値をとる時系列の解析に適した直交関数系にウォルシュ関数がある。地磁気

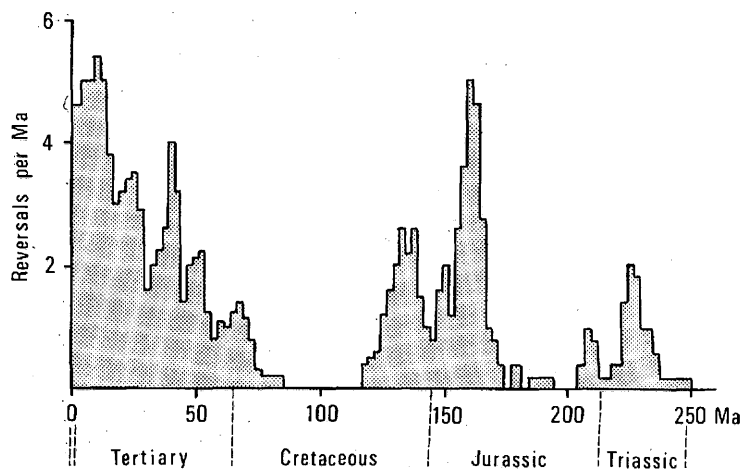


図11 百万年ごとの地磁気逆転回数 (Pal and Creer による)

の逆転の地史的変遷を時系列として取扱うには、従来のフーリエ解析は不適当であるが、ウォルシュ解析は適当である。Negi and Tiwari (Geophys. Res. Lett., 10, 713(1983))はウォルシュ解析の手法によって、地磁気の変動スペクトルに3,400万年と2.85億年のピークを見出した。この3,400万年の周期は上記した太陽系が分子雲を通過する周期3,000万年に近い。以上述べた逆転の周期性に関する諸研究は、いずれもその結論として地磁気の逆転が生物絶滅とならかの関連があることを示唆している。

では図10において、地磁気の逆転と地質時代の境界、つまり生物絶滅との関連性をチェックしてみよう。まず地質時代の境界に比較して逆転回数がはるかに多いことから、逆転が生物絶滅の原因となる確率が小さいことが理解される。問題は地質時代の境界がかならず逆転の時点に一致しているか否かである。図10によると両者は一致している場合もあるし、一致していない場合もあって、生物絶滅のような大事件が発生したからといって、かならずしも逆転が起こるとは限らないことがわかる。しかし多くの研究者が周期性の一致を認めていることもあり、地磁気の逆転と生物生命の危機との間に因果関係を否定することもできない。この問題については次節でももう少し掘り下げてみることにしたい。

3.4 逆転と生物の絶滅

今からおよそ70万年前に松山-ブリュンヌ反転が起こり、約180万年続いた逆磁気エポックは現在の正磁気エポックに移行した(図8参照)。海底堆積物中の化石の調査から、この逆転時に一致してある種の放散虫がまったく死滅したことが確かめられた。この一致性は地球磁場の逆転時に宇宙線や強い放射線が地球に降り注いだ証拠であって、過去の恐竜の死滅も地磁気逆転に伴った事件かもしれないと、かなり飛躍した意見を述べる学者も現われた。さらに70万年前の北京原人も放射線が遺伝子に影響して突然変異をひき起こした結果かもしれないと想像は限りなく広がった。本当に地磁気の逆転時に生物死滅や突然変異の可能性があるのだろうか。地球磁気圏の構造を示す図12について、その可能性を探ってみる。

日食のとき太陽のまわりに見られるコロナは100

万度の高温のガス体が噴出している姿である。このガス体は電子と陽子を主とするプラズマ(原子核と電子に分離したものの混合物)の流れとなつて、平均500km/sの速さで地球に吹きつける。これを太陽風という。太陽風が地球に近づくと、地球磁場の壁に衝突するため、プラズマ流は直接に地球上に降り注ぐことができない。地球生物は磁場のマントで保護されている。マントの内側の範囲を磁気圏という。磁気圏は太陽に向かう方向では地球半径の10倍、反対方向には月までの距離の100倍にまで広がっている。つまり地球は太陽風に吹き流された長い磁気の尾をもつわけで、ちょうど彗星の尾に似ているため「磁気彗星」とも呼ばれる。太陽面で爆発が起ると、太陽風は1,000~2,000km/sの速さで磁気の壁を突破してくるため、地磁気に擾乱が生じ磁気嵐となる。

さて問題は地磁気の逆転時である。短期間であるとはいえ、地磁気がゼロとなる瞬間がある。このとき磁気圏は一時的に消失するわけで、太陽風はさえぎられることなく直接に地球に降り注ぐこととなる。そうなれば地球生物は強い放射線を浴びたと同じ効果となって死滅するかもしれない。生物を死に至らしめないまでも、遺伝子に影響して突然変異を起こすかもしれないのである。しかし磁気の壁がなくても、大気がその代役を果たしてくれるとの楽観論もある。地球磁場が消失したとしても、プラズマ粒子は大気の原子や分子に衝突してそのエネルギーの大部分を失うため、地表

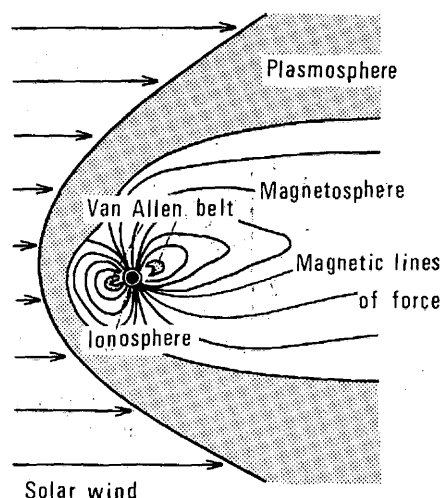


図12 地球磁気圏の構造

に達する量は全体の10%程度である。ましてや放散虫を死滅させたり、突然変異で北京原人を出現させたりする筈がないというのである。むしろ問題は逆転に伴って発生する大規模な気候変動である。地磁気の逆転は氷期の到来と関連があり、気候の寒冷化を招くという意見がある一方、温暖化を招くとする考え方もある。プラズマ粒子のエネルギーの大部分は大気粒子との衝突に費やされるため、気温上昇をもたらす可能性がある。また大量な動植物の死滅があるとすれば、その遺骸から発生する二酸化炭素が温室効果をもたらすとの指摘もある。次節に日本の研究陣による最近の成果を紹介することにより、逆転と気候変動の問題に関する一応の考え方をまとめてみたい。

3.5 逆転と気候変動

琵琶湖底に約1,400mのボーリングを行い、得られたコアの各種分析により古環境を推定しようとする計画が京都大学を中心に実現した。コアのD RMの測定も行われ、第四紀層中に従来のラシャンとブレークのほかに、新たにビワ I およびビワ II のエクスカージョンを発見するという輝かしい成果を挙げた(Kawai et al.: Proc. Japan Acad., 48, 186(1972))。図13の上図はコアの深度に対する磁気伏角の変化を示す。ボーリングの場合、コアが回転するので残留磁気の方角は不明である。堆積速度は平均0.4mm/年、コアの深度200mが約50万年に対応する。深度に従ってラシャン(1.2万

年前)、ブレーク(10.8万年前)、ビワ I (18万年前) およびビワ II (29.5万年前) のエクスカージョンが見られる。図にはビワ III の記入があるが、エクスカージョンと認定するには不明な点がある。

図13の下図に Honda (Proc. Japan Acad., 48, 510(1972)) による全有機炭素に対する炭化水素の成分比を示す。これは生物生産量を示すインディケータであって、生物活動が活発なときには大きい比を、逆に低調なときには小さい比を示すことになる。生物活動はまた気温と密接に関連する。一般に比が大きいとき高温期に、比が小さいとき低温期に対応する。

さて両図を比較してみると、実に興味深い関係が見出せる。ラシャンは不明であるが、ビワ III を含めて4回のエクスカージョンはすべて気温の極小期に対応している。しかもエクスカージョンの直前にかかわらず気温の極大期が出現する。5 m ほどのサンプリングなので、詳細な変動は不明であるが、エクスカージョンに先行する高温期とその後の低温期の到来は否定すべくもない。過去200万年は氷期と間氷期とが交互に到来した時期で、ビワ I の低温期がリス II 氷期、ブレークの低温期がウルム I 氷期に対応している。

大気の温度が上昇すると、海水中に生息する有孔虫の炭酸カルシウム殻の酸素同位体比が小さくなる傾向をもつ。この殻に含まれる酸素は、海水が暖い時期には軽い酸素 ^{16}O が通常より多く殻に取り込まれ、反対に寒い時期には重い酸素 ^{18}O が多

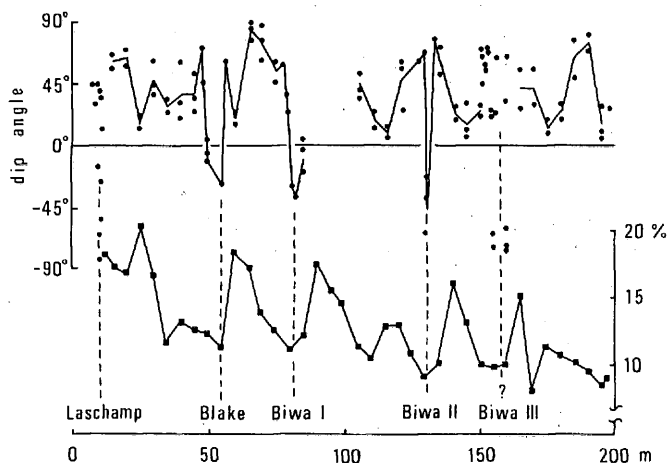


図13 琵琶湖底のボーリング深度に対する磁気伏角の変動 (Kawai et al., 1972 による) と炭化水素の変動 (Honda, 1972 による)

く取り込まれる。そのため同位体比 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ は暖い時期に小さく、寒い時期に大きくなる。通常、酸素同位体比は測定試料と標準試料との比較において千分率で表わされ、 $\delta^{18}\text{O}$ と記す。また気候変動の研究には炭素同位対比も併用されることが多く、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ について同様に定義された $\delta^{13}\text{C}$ を用いる。 $\delta^{13}\text{C}$ は生物量の変化を示す重要なインディケータであり、生物の炭素生産量が多くなれば $\delta^{13}\text{C}$ も大きくなり、逆に生物が死滅して生産量が減少すれば小さくなる。

図14は新妻・藤井（静岡大学地球科学研究報告、10, 123(1984)）が房総半島の海成層中の有孔虫化石から求めた松山ーブリュンヌ逆転時の $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の変化である。明らかに逆転と同時に同位体比は急激な減少を示している。図14から $\delta^{18}\text{O}$ の減少量は0.8‰であり、これは3℃の水温上昇に相当する。しかし新妻・藤井によれば、 $\delta^{18}\text{O}$ の乏しい極地方の氷床が融解すれば、海水中の $\delta^{18}\text{O}$ もまた減少するので、実質上の水温上昇は3℃には達しない。

問題は $\delta^{13}\text{C}$ の1‰に及ぶ減少で、これは地球上の全生物量の40%の有機炭素が二酸化炭素として放出されたことを示すという。つまり地上はもちろん、海洋表層の生物を含めた大量死滅が起こったのである。遺骸から発生した大量な二酸化炭素は温室効果を招き、気温上昇に重大な役割を演じたい。この結論は逆転が生命に重大な危機をもたらさないという楽観論を退ける結果となった。

ここに奇異に感じることは、琵琶湖の場合には、地磁気の一時的な逆転がすべて低温期に対応して

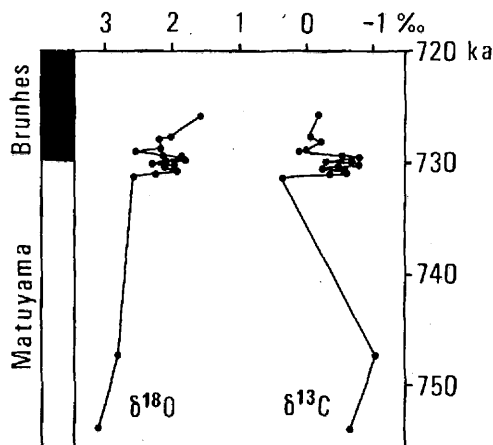


図14 松山ーブリュンヌ境界における酸素と炭素同位体比の変化。kaは1,000年。新妻・藤井による

いるのに対して、松山ーブリュンヌ逆転期では逆転と同時に高温期が襲来していることである。しかし図13のサンプリング間隔が5 m、すなわち1.25万年であって、図14に示される約2,000年間の短い高温期を拾い出すには粗すぎることに気付かなければならない。逆転期に対応する詳細な気候変動の解明には、房総半島の例のように、堆積速度の大きい(3.2mm/年)高解像力のある地質学的記録を選び出す必要がある。

4. 迫り来る逆転（おわりに）

ブリュンヌ正磁気のエポックはすでに70万年も続いてきた。途中に4回のエクスカッションがあったが、まだ発見されていないものもあるかもしれない。最後のラシャン・エクスカッションから今日までわずかに1.2万年経過しただけであるから、次の磁気的変動にはまだ間があるだろうと楽観してもいられない。実は現在のところ、年ごとに地球磁場は減少し続けているのである。地球磁場の強さを表す磁気モーメントを年代とともにプロットしてみると、図15のようになり、このまま減少を続ければ1,000～1,500年後には磁気はゼロとなる勘定となる。

現在、人類の工業活動等により大気中の二酸化

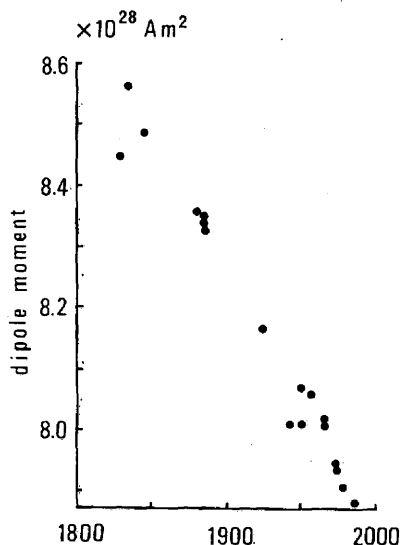


図15 地磁気双極子モーメントの減少 (Rikitake and Honkura : Solid Earth Geomagnetism, D. Reidel, 384 pp. 1985)

炭素の量が急増し、その温室効果による地球の温暖化が懸念されている。しかし1970年代には、むしろ寒冷化が指摘されていた時期があり、1974年版の気象庁編「異常気象レポート」には寒冷化の予想が述べられていた。1980年代に入ってから急に大気中の二酸化炭素が影響し出す筈はない。二酸化炭素の増加は十分に警戒されるべき問題であるには間違いないが、現在観測されている温暖化の主因は大気中の二酸化炭素の増加ではなく自然現象なのである(松野：学術月報，42，13(1989))。

もし現在進行中の磁気モーメントの急減が地球磁場の逆転もしくはエクスカージョンの前兆であり、そしてまた琵琶湖底の堆積物が示したように、エクスカージョンの直前の高温期があるものとするれば、現在われわれが大気中の二酸化炭素にすべての罪を着せようとしている温暖化現象はその高温期への移行かもしれない。もしそうとすれば、高温期の後に続くエクスカージョンと寒冷化に見舞われることになる。

約70万年前の松山-ブリュンヌ逆転期には一部の生物が絶滅し、一時的に気温の急上昇があったことは事実であろう。だが人類の祖先達はその危機を乗り越えて生命を後世に伝えた。地磁気の逆転は地質時代の境界とは異なり、恐竜を絶滅させるほどの超大規模のカタストロフィーではなかったようである。ましてや一過性のエクスカージョンは生物に大きい影響を与えないであろう。事実、ホモサピエンスはラシャン・エクスカージョンを乗り切っている。

ラシャン・エクスカージョンを乗り切った当時

の世界人口はきわめて少数であった。たとえ寒冷化の襲来により食物の供給が困難になったとはいえ、それは致命的なものではなかった。動植物の40%近くが死滅したという松山-ブリュンヌ逆転期を乗り切った祖先達も同様な状況であったろう。しかし50億人を数える現代人類にとって、逆転やエクスカージョン時の異常気象とそれに続く食料問題はおそらく致命的な大事件となり得る。今すぐ来襲するわけではなく、1,000年以上も後のことではあるが、そろそろ「その時」について討議を開始すべきではなかろうか。地球科学者は過去に何が起こったかを地磁気、古気候、化石等の立場から綿密な調査を開始しなければならないであろう。

21世紀からはじまる1,000年間は来たるべき危機を迎えるための準備の期間である。21世紀中頃には二酸化炭素やフロン問題もその影響が現われはじめるという。まさに21世紀は人類にとって試練の幕あけの時と云わなければならない。

謝 辞

小惑星については東京大学地震研究所長沢 工講師、地磁気については東京工業大学理学部本蔵義守助教授、また松山-ブリュンヌ逆転期については静岡大学理学部新妻信明教授より資料の提供と助言を頂いた。当研究所の藤縄特別研究官には原稿を通読して頂き、適切なご批判を頂いた。ここに記して謝意を表したい。

(はぎわら ゆきお・防災科学技術研究所長)

近年、大地震があるたびに液状化が問題になる。マスコミで大々的に取上げられ、液状化地帯のマップがテレビ画面に登場する。しかしこの言葉の陰に納得のいかない点がある。そもそも液状化とは何であったのか。新潟地震でクローズ・アップされたのは、本来、丈夫と考えられていた砂質地盤でアパートが本体は破損することなく倒れたからである。土質工学の立場からすれば、地盤は砂質と粘土に大別される。砂質地盤は力学的にも丈夫で、安心して構造物を作りうる良い地盤である。粘性地盤は水を吸うと力学的にも不安定で、充分に対策を施す必要のある軟弱地盤である。粘性地盤で圧密や不同沈下が起こり、アパートが例れたとしたら、ある意味で納得がいく。しかし、本来丈夫な筈の砂質地盤が地震をうけた時にのみ軟弱化し、地震が止めば元の丈夫な地盤に戻るという特殊な現象が生じた。これゆえに液状化現象がクローズアップされ、在来技術の再考を迫られたのである。

今日、液状化のあったという地域をみてみよう。千葉県東方沖地震で液状化が発生したという埋立て地はどうか。砂質地盤などではない。最初から深さ100m位までN値ゼロの所で、表面の2～3mだけが硬いのである。丁度、昔の五右衛門風呂のようなもので、地震になれば上下、左右に動き、

水を吹き出す不良地盤である。現象が似ているからと云って、液状化が生じたと云われるのは全く不愉快である。最初から液体の上に蓋をした不良地盤ではないか。このような所を宅地や工場地として売却するのは、どういう見識なのだろう。

自然の河川により河口に堆積した沖積層が液状化することはある。これは本来の正当派液状化である。自然の河川流は粒子の選別を正確に行い、揃った粒子を同一個所に沈澱する。砂粒子と粘土粒子を混合して堆積することなどない。

埋立て地の不良地盤が深さ100mまでN値がゼロなのは砂と粘土が入混っているから、造成後かなりの時間が経過しても沈積しないのである。人工的に土粒子を輸送する場合、パイプラインによる水力輸送などを行うと、砂粒子だけではパイプ中に沈積して送れない。混粒を行う必要があるのである。

立派な砂質地盤と不良地盤を同じに扱われては腹が立つが、不良地盤も大した費用をかけずともサンドパイルやパイプロ・フローテーション工法などによって改良できるのだ。このような改良すらししないで、すべて自然現象である地震に責任を転嫁されては、迷惑と云うしかないだろう。

(ひろべ りょうすけ・コロンビア国立地質・
鉱物研究所)

防災科学技術 No67 1991 March

平成 3 年 3 月 22 日 印刷

平成 3 年 3 月 31 日 発行

編集兼 防災科学技術研究所
発行人 茨城県つくば市天王台 3 - 1
 TEL. (0298) 51-1611(代)

印 刷 ニッセイエプロ株式会社
