ISSN 0454－1871

防災科学技術

NO. 63 1988 July

科学技術庁　国立防災科学技術センター

No. 63　　1988　　July

もくじ

アイスキャップは語る－雪氷コアによる地球環境の復元……中尾　正義・1
ＧＰＳについて……島田　誠一・10
スイス便り……納口　恭明・15
「国際自然災害軽減の10年」に向けて……木下　武雄・16
日米非エネルギー分野における科学技術協力「雪・雪崩の制御
および地すべりの予知・制御の研究」について……福囿輝旗・小見波正隆・20
コロンビアで大規模地滑り災害……・25
「地震前兆パラメータと警報レベルの研究」について……野口　伸一・26
20年を迎えたＵＪＮＲ耐風耐震構造専門部会について……大谷　圭一・31

表紙写真説明

――米国カリフォルニア州 La•Honda 地すべり地の移動量観測 ――

写真は，地すべり地の亀裂を挟んで地すべり計を設置し，地すべり移動量の観測を行っているところである。La•Honda 地すべり地域には，このような移動計が多数設置され，地すべり地の全体の変動域（量）の把握が行われている。写真の観測者は，米国地質調査所(USGS)のChris Alger 氏。米国は国土が広く，地すべり現象そのものが直接災害に結びつくことが少ない。そのため，地すべり地には対策工事などの，人為的な手がほとんど入っておらず，地すべり研究者にとっては最適のフィールドとなっている。

筆者は，1985 年３月，非エネルギー分野の日米科学技術協力（雪・なだれの制御およびすべりの予知・制御の研究）の２国間協力に伴う専門家派遣により，米国の地すべり観測地の調査および共同研究の実施について，情報交換の機会をもった。写真はそのひとコマである。

くわしくは本文20頁参照。

（第１研究部　森脇　寛）

アイスキャップは語る

ー雪氷コアによる地球環境の復元ー

中尾正義

1. 「アイスキャップに学べ」

この言葉は，去る3月24，25日の両日に亘って東京の経団連会館で開かれた地球科学国際シンポジウムの際に，米国ＮＡＳＡの地球系科学委員会の委員長であるF.P.Bretherton 氏が吐いた言葉である。同シンポジウムは，科学技術庁，宇宙開発事業団，海洋科学技術センターの主催で開かれたもので，地球上の気圏，海洋圏，岩石圏，雪氷圏，さらには生物圏をも含めて，我々の住む緑の地球全体を一つの系として捕えようという，新らしい地球系科学のあり方を主題とするシンポジウムであった。このようなテーマのもとで，我々はアイスキャップに何を学ぶことができるのであろうか。

氏のいわゆる「アイスキャップ」とは，南極やグリーンランドの広大な氷床，パタゴニアやカナダ北極諸島，ヒマラヤ等に散在する氷帽（狭義のアイスキャップ），さらに，アルプスやヒマラヤ，アンデス，ロッキー等に分布する氷河，すべてを指している。これら氷床・氷河は，太陽エネルギーを効率良く反射するため，他の地域の熱を吸収するヒートシンクとして働らき，地球上の寒冷圏を構成している。従って，氷床や氷河は，その消長を通して，地球系全体における熱循環や水循環に重要な役割を果たしており，これらのメカニズム解明を通してその役割を評価する研究が，雪氷学の主要課題の一つとして取り上げられてきた。

しかし，近年，特に氷床や氷河が注目されてきたのは，その役割が従来考えられてきた以上に重要だというよりは，氷床や氷河の中に，我々の地球の過去の記録が驚くほど正確に残されていることがわかってきたからである。過去の記録とは，単に雪氷現象にとどまらず，大気の状態や気温，火山噴火の歴史や海面変動，さらに産業革命以後の人間活動による公害問題，植生分布変動など多岐に亘る。海面変動に関する情報からは過去のプレート運動の歴史を復元するための有力な知見が得られる可能性もある。このような意味で，地球科学国際シンポジウムの席上で，「アイスキャップに学べ」という言葉が生まれたのである。

2. 雪氷コア試料

氷床や氷河の試料を分析して，過去の情報を得る研究の先がけとなったのは，室蘭工大の室住博士が米国のPatterson らの協力して行った。グリーンランドの試料による鉛の分析である。その結果を図1に示す。産業革命以降における化石燃料の消費の急増に伴って，氷床中に取り込まれた鉛の濃度が急激に増加してきた様子が良くわかる。

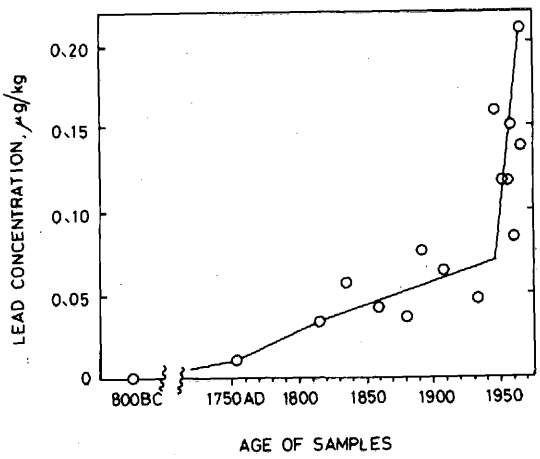

図1. 氷床中の鉛含有量の急激な増加.

特に，1900年代後半からは，モータリゼーション化に伴う驚くべき増加が記録されており，世界へ警鐘を鳴らすとともに，雪氷試料分析手法の有効性を示す嚆矢となった。

この研究が行われた1960年代後半には，鉛の分析を行うには50kgもの試料を必要としたため，氷床に堀った立坑や斜坑の壁から切り出したブロ

ック試料が分析に使われた。しかし，分析技術の進歩に伴って，必要とする試料の量は年々減少の一途をたどった。最近では，直径数cmから高々10数cmの円柱試料（雪氷コア）を掘削して，それから分析試料を切り出しても充分である。コア試料だと，掘削によって比較的容易に大深度（年代の古い）試料を得ることができる。

雪氷コア採取のための大深度氷床掘削は，まずグリーンランドのCamp Century，次いで南極Byrd 基地において，それぞれ1387 m，2164 mの基盤に達するまで，ともに米国の手によって行われた（図2，図3）。どちらも1960 年代のことである。1970 年代に入ると，ソ連による南極Vostok 基地における952mに至る掘削が行われた（1980 年には，引き続き2083 mに達した)。フランスの手による南極Dome Cにおける906m

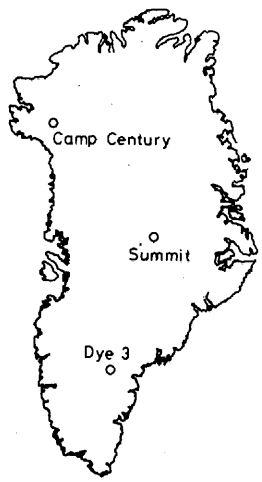

図2. グリーンランドにおける氷床掘削地点および掘削候補地.

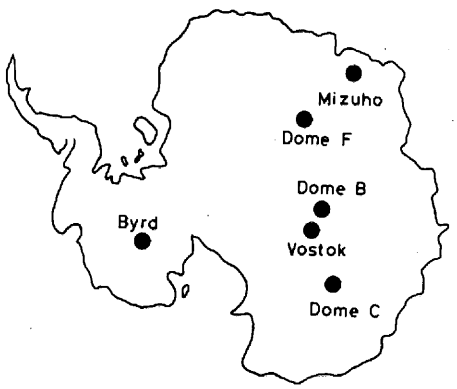

図3. 南極における氷床掘削地点および掘削候補地.

の掘削は1978年のことである。1980年代に入ると，米国・デンマーク・スイスの三国共同によるGreenland Ice Sheet Programで，Dye 3基地における2037 mの基盤までの掘削に成功。次いで，1983 年から84にかけて，わが日本による南極みずほ基地における700 mの掘削がある。

現在計画されている大深度氷床掘削としては，グリーンランド・ドーム頂上での米国のGISP2，スイス・フランス・デンマークを中心とするGRIP（Greenland Ice Program）があり，南極では，ヨーロッパの国々を中心とするドームB地点での掘削，日本によるドームF地点での掘削などがある。

以上述べてきた大深度掘削は，過去1万年から数十万年に亘る過去の情報を得ようというものである。これに対して。数百年から数千年という近い過去の情報を得るには，数10mから高々200 m程度の浅層掘削で十分である。浅層掘削は比較的容易に行うことができるため，グリーンランドや南極の氷床は勿論，世界各地の氷河で多数行われるようになってきている。カナダ北極群島やヨーロッパアルプスでは既に相当数のコア試料が採取されている。しかし，開発途上国での掘削はまだまだ少なく，ペルー，パタゴニア，ネパール，中国などでは，フランス，米国，日本などによって，それぞれ1～2本の試料が採取されているにすぎない。昨今の趨勢からいけば，これらの地域でも近い将来，活撥に雪氷コア採取が行われるようになることは，間違いなかろう。

3. 同位体組成と過去の気温の復元

雪や氷を構成している酸素や水素の同位体組成は，それらが水蒸気からできた時，つまり水分子に相変化が生じた時の温度によって決まる。その反映として，ある場所に降ってくる雪粒を構成する水分子の同位体組成は，その場所の地上気温と非常に良い相関がある。このことを利用すれば，雪氷コア試料の同位体組成の変化を分析することによって，試料の雪粒が降ってきた当時の気温を，時代を追って推定することができる。

天然に存在する水の中にある水素同位体は，通常の場合の2倍の質量をもつ重水素（Dと書くことが多い）が主である。酸素の場合は，通常のも

のが質量数16であるのに堪して，主として質量数18のものが混っている。これら同位体の存在比aは，水素の場合で約0.03%，酸素の場合でおよそ0.2%しかない。気温を推定する場合に用いるのは，これら平均的値からの偏差を問題にするのだから，存在比aという値を用いると種々の不便が生じる。そこで，便宜的に，同位体組成を標準値からの偏差として以下のように表現することがふつうである。

$$\delta = \frac{a_{\text{sample}} - a_{\text{standard}}}{a_{\text{standard}}} \times 1000$$

δはデルター値と呼ばれ，同位体組成の一種の表現である。1000をかけているため，値はパーシル(‰) で表わされていることになる。ここでa_{standard}というのは，標準海水中の同位存在比である。海水は，地球上で最も多くの酸素や水素の同位体を含んだ水である。従って，通常の試料のa_{sample}はa_{standard}より小さいことになり，δ値は殆どの場合に負の値となる。

気温との相関で云えば，同位体の存在比は気温の低下とともに減少する。云え換えれば，気温の低下とともにδ値も減る。気温1℃はδ値約0.7‰に対応している。逆に云うと，δ値での1‰の増加は，約1.3℃の気温上昇に対応することになる。

Vostok, Byrd, Camp Centuryの3ケ所の雪氷コア解析によるδ値の過去の変化の様子を示したのが図4である。どの場所でも，過去1万5千年から1万年にかけて，急激にδ値が増加したことがわかる。つまり，その頃，急激に気温が上昇したということである。これはウルム又はウイスコンシンと呼ばれる最終氷期から，現在を含む後氷期（第4間氷期という人もいる。つまり，まもなく次の氷期が来るということを想定している。）にかけての変化である。気温上昇量は場所によって異なるが，5℃ないし15℃であることがわかる。この値がそのまま，地球上の座標の一点での気温場の変動を表わしているかということでは，後述するような問題点もあるが，ともあれ，気温の長

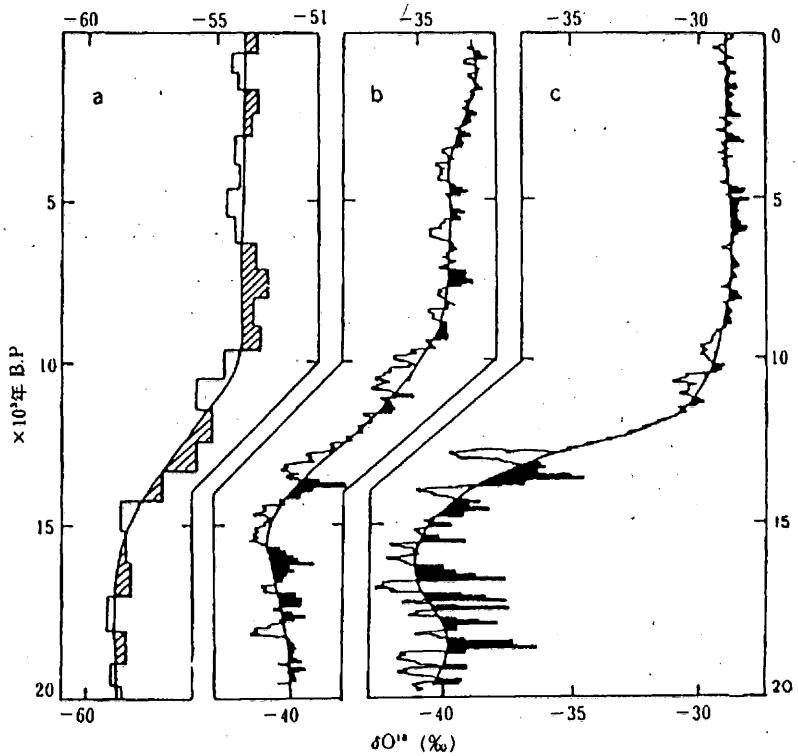

図4　大深度氷床掘削コアによる酸素同位体分析結果．a：Vostok, b：Byrd, C：Camp Century.

期変動を量的に見積ることができるのである。

同位体組成と気温との相関は，このような長期的変化に限らず，もっと短期的にも成立している。たとえば，夏・冬を通して雨ではなく雪という形の降水がある場所では，その雪のδ値は夏には大きな値をとり冬には小さな値をとるという周期変化を繰り返す。グリーンランドの雪氷コアを分析したデンマークのDansgaard 達の結果を図5に示す。毎年の季節変化が綺麗な周期変化としてあらわれていることがわかる。ということは，この周期変化を，ちようど木の年輪を数えるように一つ一つ数えていけば，コア試料の深さに対して年代のスケールを入れることができる。このようにして，グリーンランドの雪氷コアに関しては，非常に精度良く年代を決定することができたのである。

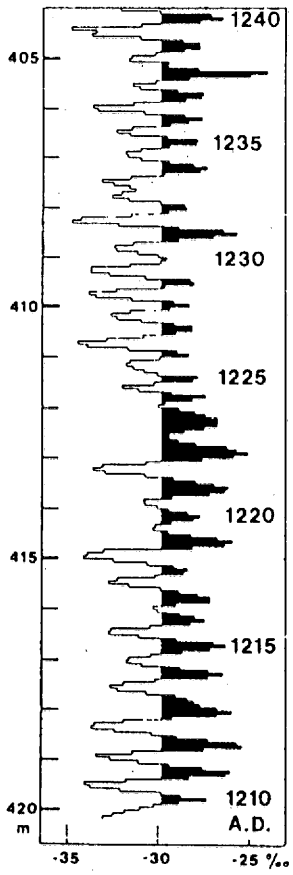

図5. 酸素同位体組成の短周期変化．1周期が1年の季節変動を繰り返している。

この結果に勇み立った雪氷研究者達は，南極のコア試料で同じ分析をしてみて愕然とした。同位体組成に綺麗な同期変化が現われて来なかったからである。このことは，雪粒が南極氷床の上に降り積った後の，雪の同位体組成の2次的変化が原因である。

南極とグリーンランドで大きく異なるのは，その上に年間に降り積る雪の量（年間堆積量）である。南極の年間堆積量はグリーンランドよりも1桁小さい。従って，特定の雪の層が氷床の表面近くに存在している時間はグリーンランドの場合よりもはるかに長時間になる。表面付近は気温の季節変化や日変化の影響を受けて，深さ方向に強い温度勾配が生じるために，雪層内の蒸発—凝結現象が顕著となり，同位体組成に大きな変化が生じてしまうのである。上にも述べたように，同位体組成は，水分子に相変化が生じることによって，あらたな変化が生じるからである。

このような事情で，南極のコアについては，グリーンランドのコアのように正確に年代を決定することができない。そこで次に，コアの年代決定法について概観してみよう。

4. 雪氷コアの年代決定

コアの年代決定には，大ざっぱにいって以下の4つの方法がある。

A．周期的に季節変化を繰り返す成分を分析して，その周期の数を数える方法。

B．あらかじめ年代の分かっているエポックが生じた痕跡を探す方法。

C．放射性同位元素の半減期を利用して，いわゆる絶対年代を推定する方法。

D．氷床や氷河の流動モデル計算を行って，その結果から年代を推定する方法。

Aの方法の代表的なものが，同位体組成データを用いるものであるが，上に述べたように南極では旨くいかない。これ以外では，種々の化学成分（特に窒素酸化物）やそれらの総合としての氷の電気伝導度が，一年を周期とする季節変動を行っているようだということで，最近注目されはじめてきた。しかし，それぞれの化学成分の地球規模の物質循環過程，ひいては積雪層内への取り込み過程がきちんと理解されていないために疑問も残

っている。逆に，年代の分ったコア試料の分析を通じて，物質循環を理解しようという考え方もある。

個々の成分に関してこのような状態なので，種々の成分の複合としてでてくる電気伝導度のデータの解釈は非常に困難である。しかしこの項目は，測定が非常に容易かつ多量の処理を迅速に行うことができるため，精力的に解析が進んでおり，多量のデータが蓄積されつつある。その結果では，この方法による年代決定がかなり有力なものになりつつある。Aによる年代決定法は，その精度が非常に良いという特徴がある。

Bの方法で実用に供されているのは，原水爆の実験の痕跡をコア中で探すというものである。コア試料のβ線総量やトリチウムの分析を行うと，原水爆実験が地下で行われるようになる以前の1950年代と60年代の2つのピークを検出することができる。さらに古い年代のエポックは，各地の火山の噴火である。雪氷コア中には火山灰層又はその時に噴出した多量の硫酸イオンという形で保存されている。図6に，グリーンランドコアに見られた噴火の記録を示す（Hammer 達による）。

問題は，これら火山灰層が，何時の，何処の噴火かということである。歴史時代程度の比較的最近のものは文献調査と火山灰層成分の分析から，その起源を比較的容易に決めることができる。最近の噴火は浅層掘削コア試料中にも含まれているため，多くのデータが得られており，地理的分布

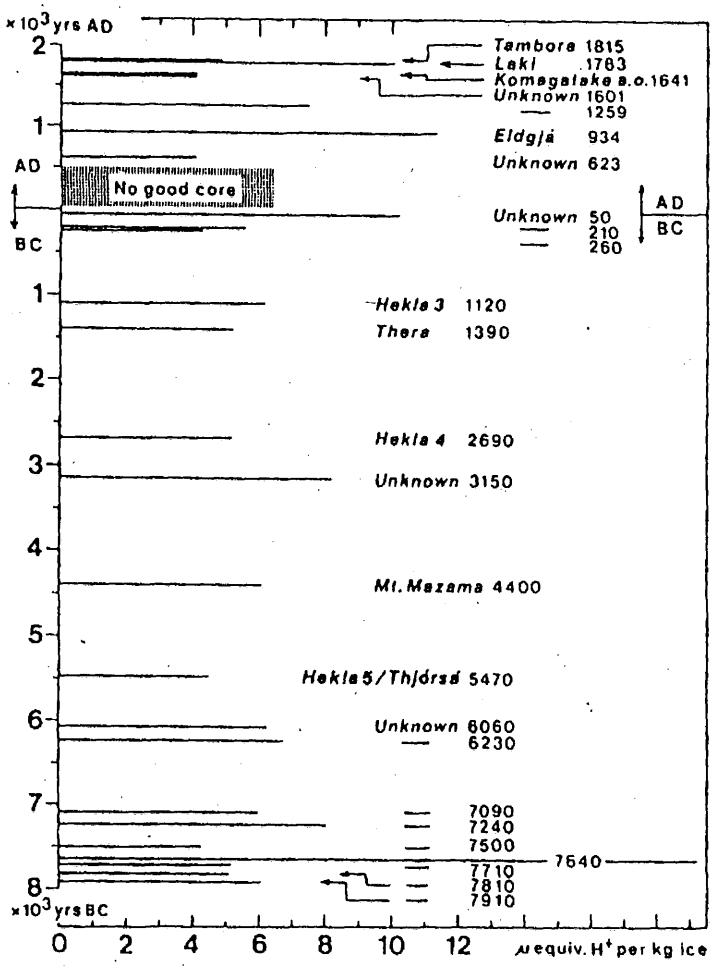

図 6. 氷床コア中に見られた火山噴火の歴史

状況の情報も得られるからである。

さらに古い時代のものになると，文献も無く，また深層掘削コアの数も限られているために，時期と場所の同定は非常に困難である。従って，年代の分っているコアの分析を行うことによって，逆に時期を決定する，云い換えると，コア解析によって火山噴火の歴史をつくり上げる方が有用となろう。深層掘削コアが多数の地点で得られれば，場所を推定することも可能となる。

Cの方法に用いられる放射性同位元素は，鉛やシリコン，トリチウム，炭素，ベリリウム，アルミニウム等である。はじめの3元素は半減期が短いため数千年以下の年代決定に，炭素は数千年から数万年の場合に使うことができる。半減期の長いベリリウムやアルミニウムの同位元素は数万年以上の場合である。

この手法の問題点は，氷床表面におけるこれら同位元素の取り込み量の変化の情報が正確に知られていない点である。上空における放射性同位元素の生成速度が過去長期間に亘って一定であったという保障は無い。さらに，仮に生成速度が一定であったとしても，降水量の多寡が変化すればその初期の濃度（氷床表面の積雪層内の濃度）が，それに応じて変化してしまうという問題もある。

その点，生成速度の変化がかなり安定している炭素の同位元素は最も有力な元素であり，種々の分野における年代決定に用いられている。雪氷コアの場合，炭素の同位元素は，氷中に閉じ込められた空気中に存在する炭酸ガスの一部を構成している。従って，降水量依存性も問題にならない。問題なのは，現在の分析技術では多量の氷試料が必要なことである。直径10cmのコアで考えると，1mから10m程度の長さを丸々使用して，やっと1個のデータが得られる。南極の場合だと，この中に数百年ぶんがまとめて入ってしまい，精度的にも非常に悪い。分析技術の進歩を期待したいところである。

Dの手法は，最も簡便に行うことができるところから，広く用いられている。これは，氷床や氷河の外形（表面高度分布や基盤との境である底面高度分布を含む）を入力データとして，氷の流動則（応力－歪の関係式）を用いて計算するのが一般的である。このやり方の最大の欠点は，定常状態を仮定しなければならないことである。氷床や氷河は，大気との相互作用を通じてある意味では常に変動しているから厳密には定常状態とは云い難い。従って，モデル計算による年代決定は大略のめやすを求めるものだと考える方が良いかもしれない。

しかし最近，雪氷コアの構造を詳細に調べることによって，試料が受けてきた過去の歪の履歴を復元する方法が見出されてきた。この手法では，試料そのものの過去の歪がデータとして得られる訳だから，氷床や氷河が非定常であってもそのまま年代決定に用いることができる。ここでの詳述は避けるが，将来的に大いに活用される可能性が高い。

5. 氷床や氷河の過去の変動

氷床や氷河の変動で特に大切なのは，表面高度（氷厚といっても良い）の変動である。このことから，陸地の上に氷という形で蓄えられた水量の変動がわかるため，世界の海水量の変化の様子を推定することができるからである。水が固体として特定の地域に蓄えられているのか，液体としての海水が増えるのかということは，地球自転にも影響を及ぼし，地球内核の運動からマントル対流現象へと伝わり，プレートの動きとも深いかかわりを持っている。

世界各地の海面変動というものは，陸地との相対的な海面レベルの変化であるから，海水量の変動とプレートの動きの変化との相互作用の結果である。従って，氷床コア解析によって海水量の変動史を明らかにすることができれば，海岸段丘やサンゴ礁などから得られる海面変動の記録と組み合わせることによって，過去のプレートの動きを推定することができよう。

氷床や氷河の表面高度の変動史は，氷中に含まれている空気の量（含有空気量：total gas content）の分析によって行われる。原理は以下のようなものである。良く知られているように，大気中の空気密度は高度が高くなればなるほど薄くなる。従って，高高度で形成された氷の中には薄い空気が閉じ込められている訳だから，当然その含有空気量は少ない。逆に，低い場所で形成された氷の含有空気量は多い。従って，氷コアの含有空気量を測定すれば，その氷が形成され

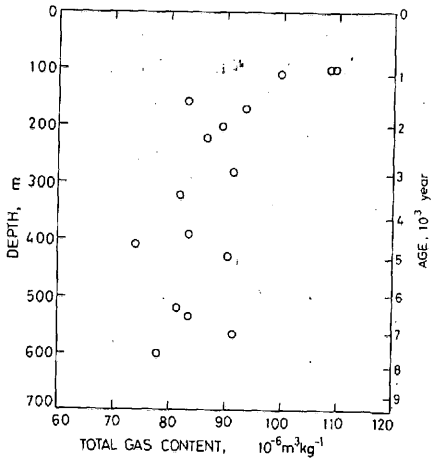

図7　含有空気量の変化．1000年前頃，急激な増加が見られる．

た場所のその時の高度がわかることになる。

含有空気量測定結果の例を図7に示す。全体的に，浅くなるにつれて，つまり時間の流れに従って含有空気量が増加してきた傾向がある。これは，氷床や氷河の流動に関係している。つまり，氷床や氷河は重力の作用によって氷が上流から下流側へと流れ下ってきている訳だから，深い場所の氷ほど，より上流で形成された訳である。従って，時とともに氷床の高度がみかけ上減少しているが，座標を固定して見れば，氷床の高度は殆ど変化していないと見ることができる。

しかし，深さ100m，年代にして1000年程前に生じている急激な変化は，氷床の流動では説明できず，その頃，確実に氷厚が減少したと考えざるを得ない。このデータでは，その量はおよそ300ないし400mである。

氷床の表面の高度がこれほど低下すれば，その場所の気温はとうぜん高くなる。極地方では100mの高度変化は1℃以上もの気温の上昇となって現われる。すると，その場所に降ってくる雪粒子の同位体組成のδ値は増加するという現象が生じる。つまり，気温場そのものは変化しないにもかかわらず，氷床表面高度の変化に応じて降雪のδ

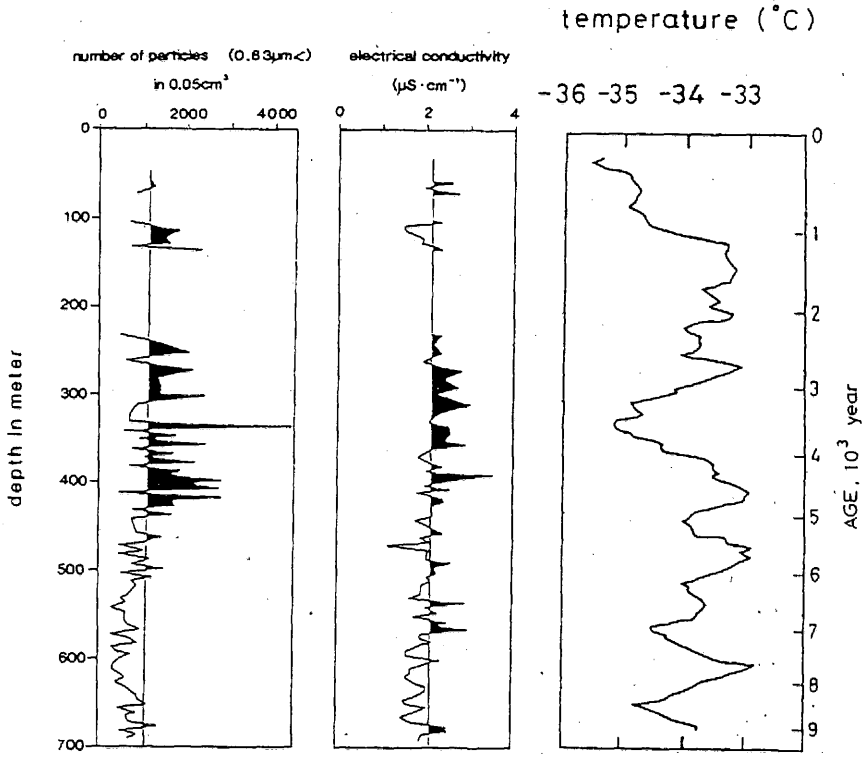

図8.　固体粒子濃度，電気伝導度，δ値から復元した気温の変動（流動や氷床変動の補正を行ったもの）。

値は変化してしまうのである。このために，3節で述べたように，δ値の変化そのままが地球の気温場の変動を表わしているとは限らないのである。従って，コアのδ値の変動から気温場の変動を読み取るためには，氷床変動のデータで補正を行う必要がある。この意味でも，氷床変動史の復元が重要になってくる。

6. 固体粒子と大気の記録

雪氷コアの中には，非常に細かい固体粒子が混っているし，空気泡という形で過去の大気が閉じ込められている。図8に示したのは，国立極地研究所の藤井博士らによる固体粒子濃度と電気伝導度の分析結果に，δ値から推定した気温場の変動記録を重ねたものである。4500年から2500年以前にかけての寒冷期に対応して，固体粒子濃度，電気伝導度ともに増加している様子がわかる。

この解釈はいまだよくついていないが，極域の寒冷化は亜熱帯高圧帯の赤道側へのシフトにつながり，その地域の砂漠化を促進したのではないかという考え方もある。固体粒子が乾燥地から飛ばされてきたものだと考えるからである。このように，固体粒子濃度は地球上の乾燥地帯の過去の変遷を知るのに重要な手がかりを与えてくれる。多点でのコア情報が得られれば，乾燥地帯の分布地域の変遷を知ることも夢ではない。

いっぽう，過去の大気の様子を知ろうと思えば雪氷コア解析の手段以外には無いといっても過言ではないだろう。スイスのベルン大学のグループが分析した炭酸ガス含有量の変化の様子を図9に示す。18世紀末から今日にかけて急激に大気中の炭酸ガスが増加してきた様子がわかる。

比較的古くから分析技術が確立していた炭酸ガスの場合でも，雪氷コア無くして18世紀における炭酸ガス量を知ることはできない。まして，最近問題になってきたメタンやフレオン等は，大気中の量の分析が行われるようになったのが極く最近であり，その時にはすでに，人間活動によって大気が汚染されてしまった後だった。もともと天然にどの程度の量だけ含まれていたのかというバックグラウンドの値さえわからなかった。こういう意味でも，雪氷コアから抽出した古大気の分析の重要性は言うをまたない。

深層掘削コアを用いた同じくベルン大学のグループは，氷期には炭酸ガスが現在の半分しか無かったというセンセーショナルな報告をしている。よく知られているように，炭酸ガスは温室効果によって，地球の温暖化をもたらす主要要因の1つであるため，氷期・間氷期の繰り返しが生じた機構を解明するためにも着目される。

氷中に閉じ込められた空気泡は，時間が経って氷床下部へ移動するにつれて，そこより上の氷の重さに相当する圧力を受けて次第に小さくなる。そしてある深さに達すると，空気泡は消滅して氷の中に取り込まれ，クラスレートと呼ばれる水和

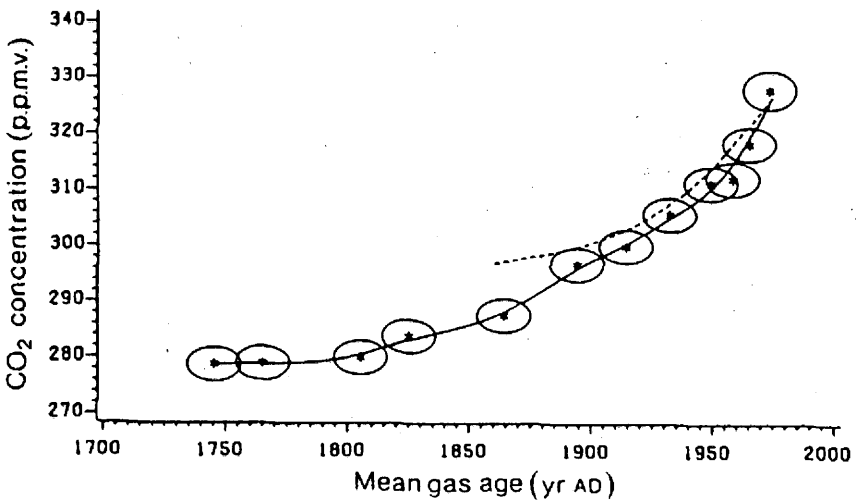

図9. 最近の大気中炭酸ガスの増加（実線）。
破線は化石燃料消費量からの推定値。

化合物を形成する。このクラスレートは理論的に予測されてはいたものの，実際に天然の氷床コア中に発見したのは富山大学の庄子博士である。

コア中に見られたクラスレートは，窒素ガスや酸素ガスが水分子と結合した，大きさ数＋ミクロンから数百ミクロンにも達する単結晶である。現在，その構造や物理的諸性質の解明が急ピッチで進められつつあり，新素材として利用できる可能性もある。

ここで問題にしたいのは，未だ発見されてはいないが，炭素ガスやメタン等は窒素や酸素よりも遥かに簡単にクラスレートを作ることが，理論的に予測されているということである。これらのガスは大気中における存在量が窒素や酸素に比較して格段に少ないため，仮にクラスレートを作ったとしても未発見である可能性が高い。もしそうであるとすれば，雪氷コア中の空気泡を分析しただけでは過去の大気を正確に復元したことにはならず，含有クラスレートを含めて分析する必要があることを指摘しておきたい。

7. グリーンランド雪氷コアの重要性

今まで述べてきたように，雪氷コアは実に多種多様の情報をもたらし，わが地球の古気候，古環境を教えてくれる。多くの種類の情報を，また多地点の情報を総合して，系としての過去の地球像を造り上げる時，最も大切になるのがコアの年代である。そういう意味で，グリーンランド雪氷コアの役割がクローズアップされてくる。そこで用いられた，同位体組成の周期変化を数えるという年代決定法に優る手法が未だ開発されていないからである。

図10　氷床コアの解析

グリーンランドでの手法によれば，気温とならんで最も重要な降水量の情報も得られる。一周期の巾がちょうど年間降水量に相当しているからである。4節で述べたBやC，Dの手法では，降水量の年々変動を知ることはできない。

いちど年代が決定すれば，他の項目を解析することによって，例えば火山の噴火の歴史を復元し，編年作業が可能となる。そのことをふまえれば，グリーンランドのように精度良く年代決定ができない他地域でも，コア中に残っている例えば火山噴火のエポックからBの手法で年代を決めることができるようになる。つまり，年代が非常に良く分かっているグリーンランドの雪氷コアは，丁度，世界各地の雪氷コアのスタンダードとしての役割を果たしているのである。

従って，グリーンランド雪氷コアを用いて，種々の項目に関する編年の作業が急速に進んでいる。その作業無くしては，他の地域のコア解析結果も生きてこないからである。この意味で，グリーンランドの情報を持たない我が国の雪氷コア解析結果は，他のコア情報とのリンクも悪く，大ざっぱな話しができないと云わざるを得ない。

一年単位での種々の情報，ものによっては季節変動の情報すら抽出することができる雪氷コア解析は，地球を一つの系として考える新地球科学にとって最も強力な武器の一つである。地球規模での物質循環，熱循環，水循環などのモデリングにとって，確かな検証手段を与えることができる。特に長期モデルになればなる程，検証のためのデータは過去にしか求められないからである。

人間活動の活撥化によって環境破壊が地球規模で進みつつある今日，世界各地において砂漠化が進行が急速に進みつつある今日，我々はアイスキャップに学ばなければならないのではなかろうか。

（なかをまさよし・長岡雪氷防災実験研究所）

ＧＰＳについて

島田誠一

1. ＧＰＳとは？

ＧＰＳは Global Positioning System の略称で，日本語では「汎地球測位システム」等と訳されている，米国で開発された人工衛星を使った新しい測位システムである。従来，船舶や航空機等が自分自身の位置を正確に知る（測位）手段としては，NNSSやロランＣ，デッカ等があった。ＧＰＳは同じく人工衛星を用いたNNSSの後継システムとして開発されたものであるが，実用化されれば地球上及び上空において100ｍ以下の精度でいつでも測位が可能となるので，自動車への搭載等，応用範囲の広い画期的なシステムである。ＧＰＳでは，人工衛星からＬ１帯と呼ばれる約1.5ＧHz 及びＬ２帯と呼ばれる約1.2ＧHzの２つの周波数の電波を使って，衛星自身の正確な位置と正確な時刻の情報が発信されている。船舶や航空機に搭載された測位用ＧＰＳ受信機は，４個以上の衛星からの電波信号を同時に受信して，各衛星から届いた電波の遅延時間差から，各衛星と受信機との距離を知り，各衛星の位置を使って自分の位置を求める。ＧＰＳ衛星は，軌道高度約20,000㎞の上空を周期0.5恒星日（約11時間58分）の円軌道で周回しており，1990年末頃に予定されている本格運用時には，６つの軌道面に３個ずつ合計18個の衛星を配置して，地球上どこでも常に４個以上の衛星が上空にあるようにする予定である。現在は試験運用段階のため，合計７つの試験衛星が打ち上げられており，日本上空では１日１回ごく短期間だけ，かろうじて４個の衛星が視界内に昇る。

ところで，測地学におけるＧＰＳの最大の魅力は，干渉観測という方法によって，従来得られなかった精度で複数の基線からなる基線網を同時に測定できることである。以下では，ＧＰＳによる精密基線測定方法を概説し，当センターが世界で初めて導入した，地震予知研究のためのＧＰＳ地殻変動連続観測システムを紹介する。

2. ＧＰＳによる精密基線測定

先に紹介した測位用受信機では，１台の受信機で瞬時に自分の位置を知ることができる。しかしこの方式では，各衛星に搭載された原子時計の誤差や受信機に内蔵された時計のゆらぎが，補正できない誤差となってしまう。一方，干渉観測方式では，図１のように数㎞以上離れた複数の干渉観測用の観測装置で，それぞれ独立に衛星からの電波を観測し記録する。観測データは後で一ケ所に集められ，計算機で各観測点の電波信号の位相差を調べ，位相差を距離に換算して，それぞれの衛星から各受信アンテナまでの距離の差が求められる。このとき，２台の観測装置で，同時に観測された一つの衛星からの電波借号の差が求め，さらに別の衛星からの信号の差ともう一度差をとるこ

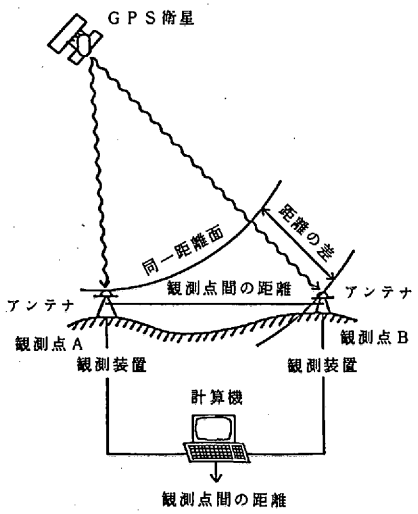

図１　ＧＰＳ精密基線測定の原理

と（二重差方式）によって，各衛星や観測装置の時計の誤差の影響から免れることができる。これによって，数10kmの基線長を1ppm以下の精度で測定することができる。

このほかに干渉観測方式では，衛星軌道の誤差，電離層や大気において電波の伝播が真空中より遅れることによる誤差，電波を観測するアンテナの近くにある障害物によって反射した電波を衛星から直接届いた電波と一緒に捉えてしまうこと（「マルチパス」という）による誤差等がある。これらの誤差のなかで最も影響の大きいのは，電離層における電波の伝播遅延による影響であるが，ＧＰＳ衛星が発射するＬ１波・Ｌ２波の両波を観測し解析することによって，この影響をほとんど除くことができる。そのほかの要因による誤差を除去または補正する研究も，主に米国を中心に進められており，最近では100km～1,000kmの基線を0.05ppm以下の精度で観測した研究結果も報告されている。

ところで，２ケ所以上の観測点で独立して電波を観測し，各観測点で観測された電波の相関を調べて位相の遅れを検出する方式としては，銀河系から遠く離れた電波星からの電波をパラボラアンテナを使って観測するVLBI（Very Long Base line Interferometry）が既にある。VLBIは，大陸間のような数千kmも遠く離れた観測点間の距離を，数cmの精度で測定することができるので，ハワイと日本との間のプレート運動を検出するといった分野で活躍している。一方ＧＰＳは，いろいろな意味でVLBIの弟分のような方式で，両端の観測点において同時に人工衛星を観測できるという制約から，測定できる基線の長さは2,000km以下である。しかし，VLBIが，パラボラアンテナや原子時計といった高価な装置を使って，解析にも数カ月を要するのに比べて，ＧＰＳはVLBIの十分の一以下の価格で，また人間が一人か二人で持ち運べて可搬性にも優れている。さらに，解析結果も数時間で得ることができる。そこで，国内の測量や，プレート境界地域におけるプレート運動やプレート内の地殻変動の検出，これらによって達成される地震予知等に威力を発揮すると期待されている。実際，米国の研究者を中心とした海外の研究においても，カルフォルニア，カリブ海地域，アラスカ等の，プレート境界域で地震活動や地殻変動の活発な地域における観測が精力的に行われている。

3. 固定点連続観測と地震予知への応用

ＧＰＳ精密基線測定の地震予知への応用を考えたとき，大きく分けて２種類の方法が考えられる。一つは，海外で行われているのと同様に，測量によって異常な地殻変動を検出する方法である。これは，従来から国土地理院を中心として，地震の長期予知のために行われてきた，測地測量の延長と考えられる。今まで測地測量に用いられてきた光波測距儀に替わって，測量精度の向上や作業と解析の迅速化が期待されている。もう一つは，観測点に固定して１日１回またはそれ以上の頻度で，連続して観測を続ける方法である。この方法では，観測の基準となるアンテナの取り付けに伴う誤差を防ぐことができるし，少ない人数で効率的に観測を繰り返すことができる。そして何より，地震予知で最も重要な，地震発生の２～３日から１カ月前といった短期予知に用いることができる。さらに，気象や電離層の状態の変化によって生ずるＧＰＳ精密基線測定の誤差を，見積ることが容易になり，測量よりはるかに精度の向上がしやすいと考えられる。また火山噴火予知においても，同じようにしてＧＰＳ観測を用いることができる。

従来，地殻変動から地震の短期前兆を捉えるために，傾斜計・歪計といった地殻変動連続観測機器を，観測井やトンネル内に設置して，測定が行われてきた。しかしこれらの機器には，ドリフトと呼ばれる計器の不安定性に伴う観測データの変動が避けられないうえ，降雨に伴う地下水の変動による，観測機器のごく近傍の変形による影響も受けやすく，数分から数時間といった短期間の変動は容易に検出できても，それを超えるゆっくりとした変動は，かなり大きな変動でなければ検出が難しかった。従って，ＧＰＳ固定点連続観測によって，地殻変動を検出して一日から数カ月程度の期間の地震予知を行う手段ができたといえる。また，地殻変動を把握する上で，従来の地殻変動連続観測機器に比べ，直接数10kmの基線を測定するＧＰＳ観測は，はるかに信頼性が高い測定であるといえる。さらに，従来の地殻変動連続観測機器は，観測井やトンネルの掘削が必要なため，費

用，用地の確保，設置工期といった点においても，ＧＰＳ固定点連続観測の方が優っているといえる。

4. 当センターのＧＰＳ地殻変動連続観測システム

当センターでは，地震予知研究を進める上でのＧＰＳ固定点連続観測のこのような利点に着目し，昨年度に世界で初めてＧＰＳ地殻変動連続観測システムを関東・東海地域に導入した。本観測システムは，10カ所の観測点に設置されたＧＰＳ受信装置と，つくばの当センターに設置された解析装置からなる。写真１及び２に，ＧＰＳ受信装置と，本川根観測点に設置されたＧＰＳ受信アンテナを示す。また，図２に観測点の配置図を示す。観測点は，北東－南西方向に約300㎞，北西－南東方向に約180㎞の範囲に及び，首都圏・伊豆半島・東海の各地域をカバーしている。この地域は，首都圏直下型地震や東海地震の発生が懸念されており，地震の前兆現象の検出や，これらの地震発生の原動力であるフィリピン海プレート上にある伊豆半島の動きの把握が期待される。

図３に，本観測システムの構成図を示す。観測点に設置されたＧＰＳアンテナの多くは，深さ100ｍ以上の既存の観測井や，２ｍの深さまで埋設した鉄筋コンクリート製の基台の上に設置され，降雨や凍結・日射等による地表付近の変形の影響を受け難いように考慮されている。各観測点では，電波の大気中での伝播遅延の影響を補正するために，気温・気圧・湿度といった気象要素の観測も行っている。観測は，公衆電話回線を通じて与えられた指令に従って，無人で自動的に行われ，得られた観測データも，同様にして随時，つくばの当センターに転送される。集められた観測データを用いたデータ解析は，当センターの３台の計算

写真１　固定点連続観測用の干渉観測型ＧＰＳ受信装置

写真２　本川根地殻活動観測施設に設置されたＧＰＳ受信アンテナ

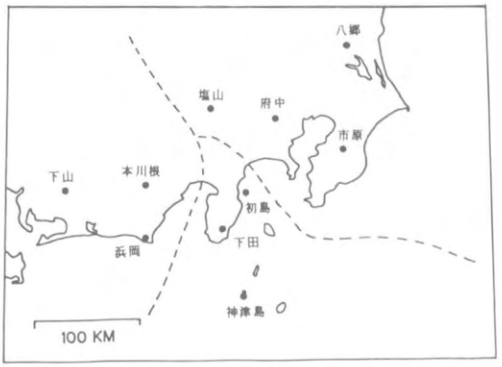

図２　当センターのＧＰＳ地殻変動連続観測システムの観測点配置

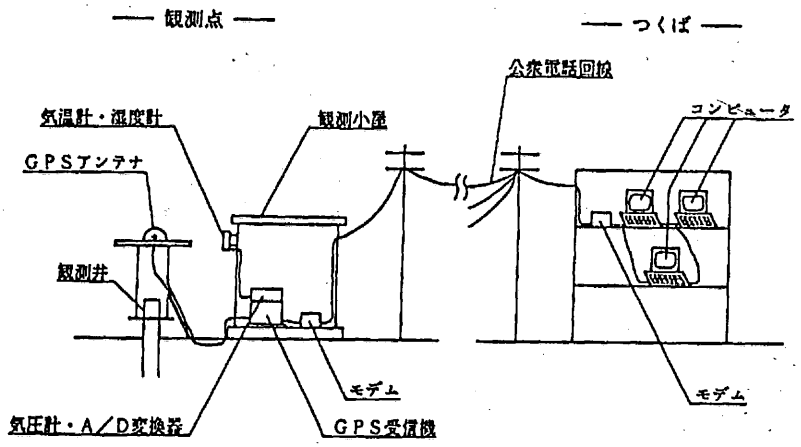

図3　当センターのＧＰＳ地殻変動連続観測システムの構成

機によって行われる。現在は，利用できるＧＰＳ衛星の数が不十分なため，１日１回だけの観測で，しかも１回の観測に約３時間半を要する。また，１回の観測データの解析には，３～４時間程度かかる。

ＧＰＳ観測システムは，当センターのほか多くの機関や大学でも導入され，直下型地震の発生が懸念されている神奈川県西部地域における国土地理院による精密測量や，各大学による東北・関東・東海・近畿等の地域での連続観測，相模湾地域での大学共同の集中観測等が，計画されている。これらの観測システムの中で，当センターのシステムには，①無人自動観測の専用機種であること，②各観測点の気象要素も同時に測定すること，③衛星軌道の誤差による基線長決定誤差を少なくするため，基線長を最小自乗法によって計算する際，衛星軌道パラメータの補正量も同時に解くことができること，④地表からの観測では評価が難しい，水蒸気による電波伝播遅延量を補正するため，各観測点の天頂方向の電波伝播遅延量も，最小自乗法によって同時に決定できること，等に特徴がある。

本システムは昭和62年度末から観測を開始している。上記で述べたように，本システムの解析プログラムには基線長決定誤差を小さくするための多くの機能が含まれており，これらをうまく働かせて基線長の決定誤差を小さくしていくには，多くのパラメータを最適化しなければならない。特に気象環境の違いから，国内における最適パラメータは米国の場合とは異なってくると考えられ，

表1　昭和63年４月６日～９日の基線長解析結果の一部（暫定値）

基線	基線長（平均値）	解析結果のばらつき（標準偏差）
市原－八郷	94.543071 km	5.6 cm [0.59 ppm]
市原－本川根	188.627492	1.2 [0.06]
塩山－八郷	138.712873	2.5 [0.18]
塩山－本川根	93.565837	1.3 [0.14]
浜岡－八郷	258.613152	3.9 [0.15]
浜岡－本川根	51.331900	3.6 [0.69]
八郷－本川根	227.111409	2.6 [0.12]
平均		3.0 cm [0.28 ppm]

また連続観測では測量と状況が変わってくる。表1に，昭和63年4月6日～9日の4日間の暫定的な解析結果における，一部の基線長の平均値とそれからのばらつき（標準偏差）を示す。解析結果のばらつきの平均は3.0㎝（0.28ppm）であった。われわれは，当面の観測精度の目標として，㎜オーダー・0.1ppm を考えているが，現時点の達成精度から見て，解析パラメータを最適化すれば到達可能であろうと予想される。0.1ppm の精度は，20～30㎞の基線を3㎜以下の精度で測定できることを意味する。これは，東海地震のようなM8級の巨大地震ばかりでなく，M7級の大都市直下型地震の前兆変動をも捉える可能性のある精度である。電離層や大気に起因する，GPS観測の一部の誤差は，基線長が短い程影響が小さくなり，精度が上がりやすくなる。従って，20～30㎞といった短い基線を0.1ppmの精度で測定できる可能性は高く，今後重要になってくる首都圏等の直下型地震の予知のために，GPSは有力な手段となってくるであろう。

5. おわりに

当センターをはじめ，多くの機関・大学において，昨年度（昭和62年度）に合計約80台のGPS受信機が購入された。これは，日本の貿易収支改善のための補正予算による緊急輸入に，この機器がちょうど適していたためである。GPS干渉型受信機は，それまでに，国内に6～7台しかなく，また世界中でせいぜい200台未満しか生産されていなかった，最先端のハイテク製品であるから，この分野の海外の研究者は羨望し，国内でこれから製品化を計画していたメーカーは落胆した。国際学会で外国の研究者から，「日本で使いきれなければ，私が使ってあげましようか？」と言われた大学教授もいるということである。ともかく各国の研究者は，日本が大量の最新機器を使いこなして，優れた結果を挙げることができるか，注目している。

さかのぼって昨年5月に，地殻変動や測量の研究・業務に携わっている若手の研究者・行政官を中心として，「GPS検討会」という組織が発足した。現在大学研究者を中心として，約130名が参加し，GPS精密基線測定の技術開発に関する情報の交流を行っている。GPSは，今後10年以上にわたって，測地学の基本技術となる可能性が高く，各機関においても若手研究者・行政官が中心になって研究・開発を進めている。GPS検討会の中心メンバーは，私も含めて多くが30歳台前半で，学生時代の先輩・同輩も多い。

地震予知研究の基本は，高精度の新しい観測手法の開発と，大地震発生域における観測による有効性の検証であろう。GPSは，久しぶりに登場した大きな可能性を持つ観測手法である。GPSによる高精度の観測手法が確立されれば，GPS連続観測網の一層の展開・充実や，国産衛星開発による精度向上も構想として挙げられよう。若い研究者が中心となった，大量の最新機器による，当センターを含む各機関・大学の観測研究の成果が期待される。

（しまだ　せいいち・第2研究部）

スイス便り

納口恭明

長期在外研究員として，昨年10月からスイス連邦工科大学水理学・水文学・雪氷学研究所（チューリッヒ）に滞在している納口恭明研究員が，近況を伝えてきた。

私の当地での研究目的は，現実的な雪崩の運動モデルをつくり，雪崩の挙動を解明することである。

今回，スイス連邦工科大学において始めているのは，雪崩を有限の質量をもつ粒子の集合と考え，それが空間中をどのように動き，かつどのように変形するかを解明しようというものである。

この研究は，主に私のほかに，カナダマギル大学からの客員教授であるサベージ博士と，ドイツダルムシュタット工科大学から週1回訪れるフッター教授の3人の共同のもとに進めている。研究の分担は，フッター教授が粒子雪崩の室内実験を担当し，サベージ教授がコンピュータシミュレーションによる実験との対応を担当，私は理論ならびにコンピュータシミュレーションによる数理モデルの定性解析を担当している。

この研究の中で，これまで得られた知見をあげると，平らな斜面上では摩擦が一定であれば，粒子体は常に広がる。斜面が上に凸の場合も同様である。これに対して，斜面が凹の場合は，運動にともない縮む場合が存在する。しかも注目すべきは，まったく変形せずあたかも剛体でもあるかのように，挙動が安定して存在することが明らかになった。この結果は，雪崩だけでなく，氷河なだれや岩石崩壊などのあらゆる粒子なだれに対して有効である。

今後の方針としては，実際の地形上での雪崩の運動を記述するモデルとして，これまで日本で進めてきた雪崩の走路の理論と，このモデルとを組み合わせていきたいと考えている。

当初，当地では日本で行ってきた雪崩の運動走路の研究を継続する予定であったが，有限質量の粒子なだれの運動の研究が，より発展的な雪崩のモデル化に寄与するものと考え，フッター教授，フィッシャー教授らが熱心に進めている研究に加わることにした。現在のところ，これは的確な判断であったと考えている。

この研究自体は，当水理学・水文学・雪氷学研究所所長のフィッシャー教授のプロジェクトである，湖の中に入る雪崩によって起こる波についての研究という，大きなわくの中の一部分を構成しており，我々が行っているのは，そのうちの湖の中に侵入するまでの雪崩の運動である。

スイス着任後，フッター教授との初対面の日に，1日がかりでその後の研究の基礎となる方程式をふたりで（というよりも，フッター教授が一方的に，ノート30枚くらいにびっしりの数式）導出した。その集中力とタフネスぶりには，大いに驚かされた。ただこのような数理解析は私自身もっとも得意とするところでもあるので，負けてはいられないと逆にはりきる原因となった。

実際は，フッター教授がドイツにいる学生とやっており，数mくらいの斜面上でプラスチックの粒子を滑落させるもので，雪崩とは大きな隔たりがある。しかし逆にいうと，このような現象をも説明できるだけの理論を基礎としなければ，雪崩の全体像も説明できないということである。

これらの結果は，国立雪・雪崩研究所（ダボス）のスタッフともしばしば討論した。とくに同研究所のザルム博士の，雪崩の実験は実物大に限るという考え方も確かに重要であり，帰国後に雪を使った実物大の実験も必要ではないかと考えている。これらの成果は，国立防災科学技術センターで現在進行中の特別研究における，現実的な雪崩モデルの確立に十分資するものと確信している。

「国際自然災害軽減の10年」へ向けて

木下武雄

1. ことのおこり

昭和62年（1987年）12月2日第42回国際連合総会において，日本など93カ国の共同提案になる「国際自然災害軽減の10年」（International Decade for Natural Disaster Reduction-IDNDRと略す）に関する決議が採択された。

決議によると1990年代をIDNDRと指定し，国連の賛助の下に国際社会が自然災害による被害軽減のための国際協力の促進に特別の注意を払う10年とすることになっている。

10年の具体的活動内容等については今後国連事務総長の報告を待って検討することとしているが，以下に述べる理由により日本の防災科学技術の力強い協力が求められていることは明らかであり，日本の国際協力の真の能力を発揮する好機でもあると考えられる。

決議案提出の背景は（外務省国連局経済課による）

(1) 中曽根前総理が今次国連総会出席の際，一般討論演説において「国連が災害の発生防止とその救済を迅速かつ効果的に行うための体制を整備・強化すること」の必要性を提唱し，

(2) これをうけてわが国は防災と災害援助に関する決議案の提出を検討していたが，別途モロッコより本件IDNDR決議案の共同提案申し入れがあり，これに応じ，他の共同提案国を募った結果，93カ国の共同提案として提出した。（共同提案国は日本を除いてほとんど発展途上国である。）

(3) 他方，全米科学アカデミーのプレス(Frank Press）会長は1984年より本件構想を提唱しており，同アカデミーの働きかけを受け，日本学術会議及び国土庁を中心に建設省・科学技術庁等国内関係省庁においてIDNDRに向けての準備を検討中であった。

(4) わが国は地震・台風等自然災害頻発国であり，この分野における知識・研究・技術の水準が高く，また「国際緊急援助隊の派遣に関する法律」の成立（62年9月）等，国際災害援助体制の整備も進展しており，国際社会に積極的貢献をなしうるとの認識であった。

2. 何を対象とするのか

ここで述べている自然災害とは，国連総会決議文によると，地震，暴風雨（サイクローン，ハリケーン，竜巻，台風），津波，洪水，地すべり，火山噴火，自然火災，その他自然原因による災禍で，バッタ・イナゴの来襲のようなものも含め，これらに起因する人命の損失，資産の損害，社会・経済の崩壊を指す。災害項目を他と比較してみると，小鹿島果が明治26年に日本災異誌において掲げている項目には飢饉・大風・火災・旱魃・霖雨・疫癘・噴火・地震・海嘯・虫害・彗星がある。また災害対策基本法では，自然災害のみが対象ではないが，「暴風，豪雨，豪雪，洪水，高潮，地震，津波，噴火その他の異常な自然現象又は大規模な火事若しくは爆発その他その及ぼす被害の程度においてこれらに類する政令で定める原因により生ずる被害をいう。」としている。

このような議論でいつも問題になるのは災害をどこまで広く解釈するかである。自然災害のみならず人為災害（man-made disaster）を含むかどうか。発展途上国の人の話では災害には内乱・暴動も考えるし，大精油所が核攻撃を受けた場合も考慮すべきだとの意見もでる。インドの友人曰く，最大のman-made disaster は人口の増加であると。深刻な笑話である。火災はむづかしい

項目であって，国連総会決議文ではwildfire となっているのを自然火災と意訳したが，外務省の訳では野火となっている。日本災異誌で言う火災は内容から都市火災と分かるし，災害対策基本法では「大規模な火事」と明記している。決議文でも「・・・のような自然災害」と表現していることから，どの災害まで含むかの厳密の議論ではなく，自然災害とは虫害も含むものであり，そのおゝよその輪廓の理解がここでは大切である。

3. 目　　標

目標については次の５つが設定されている。

(a)　発展途上国が必要に応じ早期警戒体制を確立する上で，発展途上国を援助することに注意を払いつつ，各国が自然災害の影響を速やかに且つ効果的に軽減する能力を改善すること，

(b)　国家間の文化的・経済的多様性を考慮しつつ，既存の知識を適用するための適当な指針及び戦略を考案すること，

(c)　人的・物的損失を軽減するために知識の重大なギャップを埋めるための科学及び技術上の努力を促進すること，

(d)　自然災害の評価・予報・防止及び軽減のための措置に関する既存及び新規の情報を普及すること。

(e)　自然災害の評価・予報・防止及び軽減のための措置を，特定の災害と位置とに合わせて技術援助・技術移転・模範的プロジェクト・教育訓練の諸計画を通して発達させ，その効果を評価すること。

写真１　ジャマイカ：ハリケーンで吹き飛ばされた中級住宅，１年経ったが復旧されない。

今後，国連事務総長の報告などにより，さらに磨き上げられるであろうが，概括的に何をするかが理解されよう。

役人の立場からは「予算措置はしてありますね」という質問が出るが，国連総会決議文には「必要あれば，国連事務総長の報告作成のために特別予算が与えられるべきだ」と勧告し，各国・各機関からの自発的な貢献が大へん望ましいと（国連総会は）考えるとしている。この文では明記はされていないが，言い出した金持ちは金を出せという意味である。

4. 国立防災科学技術センターも積極的に

これまでのところ国内でのIDNDR対応については外務省ほか関係各省庁が積極的な準備をしていると聞いている。背景でも述べた通り，科学技術庁も準備を検討中と評価されているので，当センターとしても積極的に考えてみたい。

(1)　災害の対象は適切か？

不適切な対象では我々が貢献できないのは当り前である。幸にも，決議で述べられている災害の大部分は当センターとしても，多かれ少かれ研究対象としているものであるので，地域による差異等の問題はあるにしても対象は適切である。さらにこれらに起因する人命の損失，資産の損害，社会・経済の崩壊についても研究して来た。虫害は近世までは重大であったろうが，当センターとしては現在，研究対象とはしていない。

(2)　目標は達成されるか？

当センターが研究機関であり，防災実施機関ではないことを考慮し，さらに3.目標で述べた(a)～(e)は本来的に各国が独自の人的・物的資源を用いて行うことをたてまえとするので，自然現象の解明と予測手法の開発という立場から(a)の早期警戒体制確立のための基礎研究については当センターにとって十分可能性のあることである。自然災害の影響を速やかに且つ効果的に軽減するための研究は恒常的に行っているテーマである。(b)の指針の作成等は狭義の研究ではないが，研究成果の普及ということで当センターはこれまでにも幾つかの指針作成の経験を有するもので，それら経験は役立つであろう。(c)の防災のための科学技術発展の努力は言うまでもなく当センターの目標そのも

のである。(d)の情報の普及は防災に関する色々の講演会・セミナー等を当センターが実施して成功している点をみていただきたい。(e)の技術移転等は当センターもこれまでに多くの実績を持っているし，これまでより一層の協力と努力とが必要かつ可能であることには当センター一同は異存はない。以上のような経験と努力とによって当センターとしては目標達成の貢献に確信をもつものである。

5. 具体的にできることは

具体的な貢献については，実施方針が今後の国連総会でも磨き上げが行われ，国として，科学技術庁としての枠組が決って来ないと何とも言えないが，これまでの個人的経験に基づいて，個人的な提案をさせてもらうと以下のようになる。

(1) 当センターのこれまでの活動がほとんどそのまゝ対象・目標に合致していることが明らかである。出版物がほとんど日本語であるという問題はあるが，当センターの研究はすべてIDNDRそのものである。JDNDR（J はJapan）をなぜ早く提唱しなかったか悔まれるぐらいで，例えば主要災害調査は諸外国どこへ持って行っても高い評価を受けるが，外国語に訳してないのが欠点である。もしIDNDRの方針枠組が決まらなかった場合でも主要災害調査報告書を外国語に訳して配っただけでも大きな貢献となる。

(2) 国際協力活動とは，やはり何か目に見える行為が伴うことが要求される。その一つが国際研修活動で，これは目標(e)に関係している。当センターが国際協力事業団（JICA）と協力して行っている防災技術セミナーは，過去11年間，104人の参加者を招いて成功裡に行われたが，これを拡充強化して行くことは必要である。1988年度はIDNDRの準備へ向けてという特集号にしようとして，現在各方面へ協力をお願いしている最中であるが，参加者の層を厚くし，発展途上国のIDNDR 推進に直接役立つ人達に参加してもらうようにしたい。さらにJICAの協力の下にIDNDRセミナーを開くことも提案したい。台風業務実験（TOPEX）の折には外務省・気象庁・建設省・国土庁と当センターが協力してコースを特設した例がある。フォローアップ調査班（過去に一回行った）を数多く出して参加者が帰国してからの活動を支援すること，第三国研修として適切な受入国の協力の下に当センター職員が出張してセミナーを開くといった活動も期待されている。

(3) 各国に当センターの姉妹組織としての防災センターを設けることを提案したい。勿論，各国に向かって「こうしろ」と言えるわけではないので，防災の計画・実施・評価・調整・研究・研修・公報その他どんな機能を持つかは各国で決めるべきであるが，約20カ国を訪問した個人的経験から言えば，発展途上国では第一に研修，先進国では調整であろう。当センターでは防災の研究を行っているので，研究も強調したいが，国によっては無理かも知れない。また国によっては国家安全委員会・市民防衛庁といった組織が既にあるので，既存の組織も尊重し，できるところから当センターと国際的に連携して，相互にレベルアップをはかるべきである。IDNDRとしての活動は，

(a)現状分析：各国の防災に関連する組織の全体図作成，防災センターの有無，あればその位置づけ，災害時の連絡の窓口・すべての国の防災活動事例集を作る。

(b)機能分析：現状の機能・権限を法制上・実例上分析し，機能の向上・権限の明確化をはかる。

(c)設立勧告：各国の現状をふまえて，現状の改良・補強を第1とし，必要あれば，防災センターの設立を勧告する。

(d)連絡・連携：人材の交流・共同プロジェクトの実施・相互のレベルアップ。

(e)フォローアップ：IDNDRの終了時にはこの10年における活動の評価をする。

(f)相互協力：IDNDR後は各国の防災センターが相互協力を行う。

(4) 特にその中でも当センターとして提案したいのは研究とか観測センターとしての防災センターである。これは目標(a)早期警戒体制設立のための基礎的研究に相当するものであるとともに(c)の科学・技術の移転にもなるし，当センターにとってもグローバルな視点で観測・研究が行えることは長所であり，離れた地点における現象が意外にも日本の台風とか地震とかの発生に深い因果関係を持つことがわかって来ている折でもあるので，積極的に推進したい。現在はまだ案であるが，観測センターとか地域防災センターという構想もそ

写真2　防災技術セミナーにおける研修

のうち打ちだされるであろう。詳細は相手国との相談で決められるわけであるが，例えば地震・火山の観測網を作り，ゆくゆくは地震予知・火山噴火予知への科学技術を発展させるとか，海洋・陸水・大気（中・高層も含む）まで含めた観測を赤道域で行い，熱帯の海洋・陸水・大気の諸現象の総合的な解析を行い，将来のＴＲＭＭ（熱帯降雨観測ミッション――人工衛星による）と連携して熱帯の豪雨災害の予知と防止に役立てるとかの方法がある。二国間協力などのプロジェクトとしてこのような姉妹機関ができ，積極的に交流をはかって行くことを希望するものである。

(5)　前節ではかなりの予算措置の伴なう案を出したが，それに到るまでは，いわゆる情報交換が必要である。情報交換には文献のやりとり，観測データの交換などがあるが，ここで防災という立場で考えるなら，当センターの行っている主要災害調査の国際版が最もよい。国際的にもケーススタデイと言えば一口で通用する。災害の経験を有効に蓄積して，次の災害を防ぐときに役立てようというものである。当センターの主要災害調査報告は速報性も要求されているから，若干の不備はある。完全なケーススタディをするために10年かかって，次の災害に間に合わなかったというのでは話にならない。このような経験の蓄積は地震などの再来期間の解析からプレートテクトニクスの解明へもつながるものであり，大洪水や干ばつの記録は気候の長期変動を解く鍵にもなる。さらに災害時及び復旧の経験は多くの国で共通の知識として大へん役に立つもので，大げさに言えば21世紀へ発展するための人類共通の財産である。

(6)　ケーススタディの中でちょっと特殊な提案ではあるが，私案のついでに言わせてもらいたいのは「ケーススタディ　ジャパン」である。これは日本語のわかる外国人防災研究者を日本へ長期（半年～２年）招待し，彼らに日本の防災体制を批判してもらい，わが国の防災体制の反省と強化へ役立てようというものである。彼らの来日中に災害が発生すれば勿論好都合のケーススタディとなるが，インタービュー，現代の政治・経済・社会構造の分析，古文献の調査などにより，日本を災害という面から研究してもらうことである。その結果は耳が痛いと反撥する機関もあるかも知れないが，それは成功したということである。世に言う岡目八目である。日本のリスク管理体制において，国内では常識となっていることが代替案を含めた分析に乏しいと，ある研究会でアメリカ人に批判されたことがある。科学・技術の鎖国を解いて，真の開かれた科学・技術大国日本を作って行くための一つの有効なステップであろう。勿論そうして明らかにされた事実は他の国々が工業化して行くときに，防災と国の発展をどう調和して行くかの重要な指針となる。

6.　12年後に成功だったと評価されるために

ＩＤＮＤＲはこれから始まる事業である。これまで国際協力は，準備中は出すぎないようと戒められ，計画が決まってからは後追いに終始して，往々にして，日本はよく言って「おいてけぼり」であったし，悪く言えば国際的非協力であった。前述のようにＴＯＰＥＸで台風委員会加盟10カ国の気象・水文などに関する防災能力の向上に役立ち，国連のプロジェクトの中でも例外的な成功と評価されたのは，案の段階から関係省庁の担当者が外務省を中心にボランティア的に集って対応策を練ったからである。２年も後の計画に，誰もオーソライズしていない個人のたわごとを並べた真意を理解していたゞければ幸いである。

（きのした　たけお・第１研究部）

日米非エネルギー分野における科学技術協力「雪・雪崩の制御および地すべりの予知・制御の研究」について

福 囿 輝 旗・小見波 正 隆

1. 概 要

「日米非エネルギー分野における科学技術協力協定」は1979年5月に両国政府間で調印され，現在48課題で協力が進められている。「雪・雪崩の制御および地すべりの予知・制御の研究」は，その中の第22番目のテーマとして取りあげられていて，日本側では当センター，米国側では農務省森林局が対応体になっている。実際の協力は，日米双方がそれぞれのコンタクトパーソンを通してテーマを出しあい，研究の遂行に協力するという形で行なわれている。現在のコンタクトパーソンは当センターと農務省森林局森林科学研究所が担当している。

2. 研究担当機関

日 本 側	米 国 側
科学技術庁国立防災科学技術センター	農林省森林局（USFS）
農林水産省農業土木試験場	内務省地質調査所（USGS）
同 林業試験場	大学（オレゴン州立，モンタナ州立等）
通商産業省工業技術院地質調査所	
北海道開発庁北海道開発局土木試験所	
建設省土木研究所	
同 国土地理院	

3. これまでの活動状況

(1) 共同研究

課 題	日本側	米 国 側	期 間
I 地すべり分野			
1. 降雨の中断と地盤災害発生に関する研究	防災セ	USFS・FSL（森林科学研究所）	1982
2. 樹根の抵抗力による森林表層土壌の保全に関する共同研究	林 試	同 上	1983
3. 地すべり土塊の天然ダム形成にともなう河川のダムアップ災害の研究	防災セ	同 上	1984－1985
4. 地すべり発生時の間隙水圧の高速変動に関する実験的研究	同 上	USGS 同	1987
5. 火山周辺土石流の物理的特性の研究	土木研	同 上	1986－1987
6. 地すべりの予知・制御に関する現場計測手法の開発	防災セ	USFS・FSL	1987－1988
II 雪・なだれ分野			
1. なだれ発生の予測に関するシミュレーション・プログラムの開発のための共同研究	防災セ	USFS・FSL	1983
2. 地吹雪計の実用化ならびに防雪棚の効率評価に関する共同研究	同 上	同 上	1987

(2) 会議・研究者交流（「日米非エネルギー分野」の枠によるもの）

年	会議	研究者交流	
		日本→米国	米国→日本
1980	コンタクトパーソン及び専門家一行来日，協力の可能性及び具体的方策等について		
1981	米国側コンタクトパーソン及び専門家一行来日，研究協力の具体化について協議及び研究機関視察		
1982	日本側コンタクトパーソン訪米，協力計画の立案について協議	富永雅樹，USFS・FSLへ	
1983			R．ジーマー（USFS・RSL），農林省林試へ T．E．ラング（モンタナ州立大学），当センター新庄支所へ
1984	USFS・国際協力開発局（OICD）専門官来日，今後の研究協力推進について協議	中村秀臣，USFS・FSLへ	F．スワンソン（USFS・FSL）当センターへ
1985	USFS・OICD専門官来日，当センター及び林業試験場視察　米国側コンタクトパーソン来日，研究計画について協議	森脇　寛，USFS・FSLとUSGSへ	第4回国際地すべり研究会議（東京）で開催を機会に，当プロジェクト研究者の交流を行う。
1986	USFS・OICD次長来日，当面の研究協力について会談 大八木第3研究部長訪米，米国側コンタクトパーソンと今後の研究推進について情報交換		R．イーズ(USFS・RSL) 当センター，京大へ T．ピアソン (USGS・カスケード火山観測所) 他1名，土木研へ E．ハープ（USGS）当センターへ T．ピアソン（USFS・カスケード火山観測所）他1名，土木研へ R．アイバーソン，R．ラヒューゼン（USGS）当センターへ
1987		富永雅樹，USFS・FSLへ 福囿輝旗，USFS・FSLへ	
1988		福囿輝旗，USFS・FSLへ 佐藤照子，USFS・FSLへ	A．シュミット（USFS・FSL）当センター新庄支所へ

4. 地すべり分野が昭和62年度に行なった共同研究について

地すべり分野では，昭和62年度に『火山周辺土石流の物理的特性の研究』と『地すべり発生時の間隙水圧の高速変動に関する実験的研究』，『地すべりの予知・制御に関する現場計測手法の開発』の3つの共同研究を行なった。ここでは，これらの内，当センターが担当した後2者の研究内容について紹介する。

(1) 地すべり発生時の間隙水圧の高速変動に関する実験的研究

研究の目的

地すべり・土砂崩れなどによる災害を防止・軽減するためには，その発生から土砂の流動・堆積までの一連の機構を解明することが必要である。といっても，崩壊が発生する前の，土砂が静止している状態から，土層の破壊，流動化，下流での堆積までを統一して説明できるモデルを作製することは困難である。このために，崩壊の発生，土砂の流動，堆積などにわけて，個別にその機構が論じられている。

当センターの土砂災害研究グループでも，崩壊の発生と流動・堆積に大別して，そのメカニズムの解明を行なってきている。特に，大型降雨実験施設を用いての実大規模の継続的な実験研究は，世界でも類を見ないもので，雨水浸透現象のモデル化，崩壊発生時刻の予測法，流下・堆積型の分

類，崩土の到達距離の推定法などの研究成果をあげている。しかし，発生時に固体であった土砂が流動化していくメカニズムに関しては未知で，土砂災害を統一的に理解していくためには解明しなければならない点であった。

一方，共同研究者である米国地質調査所のR．Iverson 博士とR．LaHusen 博士は崩れた土砂が流動化していく過程での，間隙水圧の高速な変動と土砂の高速な変形の相互作用に関する独自の理論を提案し，米国内での室内試験での確認を終え，現地斜面での野外実験を試みたが，現地斜面の複雑さのために，成功していなかった。このために，実大規模の斜面模型で実験が行なえ，境界条件の設定が容易で，入力が正確にコントロールできる実験装置を必要としていた。

これら日米双方の研究を統合的に発展させるべく，今回の共同実験研究が計画されたものである。

実験の概要

両博士は，昭和62年の10月５日に来日し，12月３日まで日本に滞在した。実験は，この間の10月７日から11月５日までの約１ケ月の間に，大型降雨実験施設を用いて行った。模型は，当センターが，毎年継続的に使用している斜面崩壊実験装置内に作製し，斜面角度30度，高さ３m，長さ６m，幅 1.5 m，土層厚 0.5 m，および斜面角度30度，高さ５m，長さ10m，幅４m，土層厚１mの実大規模の模型斜面である。

模型の材料は，両博士の研究フィールドである米国ワシントン州セント・ヘレンズ火山の周辺で発生する土石流の堆積物に近い粒度組成をもつ，茨城県笠間市の近くで採取した風化花崗岩（マサ土）と千葉県佐原産山砂を使用した。

全体的な崩壊機構の把握と崩壊時刻を予測するための測定は，当センター降雨実験室で試作・使用してきた土壌水分計，地下水位計，内部歪計，内部応力計，地表面の移動量計とデータ・ロガでまた，崩壊時の高速な間隙水圧の変動測定は，博士らが開発し，持参した水圧センサー（写真１）とデータ収録器機で行なった。この水圧センサーは，半導体タイプで最高10KHzまでの高速な圧力変動をキャッチでき，今回の実験のために，博士らが独自に開発したものである。

写真１．実験に使用した水圧センサー

写真２．崩壊後の状況

実験は，模型斜面の上部から実験前日に給水を始め，斜面土層内に土層厚の約１／４の高さの定常的な地下水位を生じさせた後，大型降雨実験装置で１時間に50㎜の雨を斜面が崩壊するまで約４～６時間散水した。写真２に崩壊後の状況を示す。

実験は，マサ土で３回，山砂で１回行なわれ，特に，３回目の実験は，報道機関へ公開され，成功裡に終了した。

得られた結果

この実験により，斜面土層が崩壊し，流動化していく過程について，特に，次の現象が明らかになった。

土層が崩壊する際には，土層内にある破壊域が生成され，その領域は，ダイラタンシー現象により体積が膨張することが知られていた。これに伴い間隙水圧は減少していくことが考えられる。今回の実験でもこの現象が見られ，崩壊が始まる初期には，すべり面付近の間隙水圧が減少する。と

ころが，ある時点で反転し，急激に増加し，過剰な間隙水圧になる。この急増現象は次のように考えられる。当初，土層は土粒子のみによって支えられているが，すべり面付近で土粒子の骨格構造が破壊され流動化するために，その支える力の一部が間隙水に分散され，間隙水圧が急増する。また，この圧力急増現象は，周囲の土層に急速に伝播していく。このために，周囲の土層が急激に流動化していくものと思われる。

その後，間隙水圧は，約1Hz 程度の比較的低い周波数で増減を繰り返す。このことから，土層が崩壊する際には，ある大きさのブロック毎に動くということが推定される。このことは，従来考えられていた，土層内の破壊域が一様にできていくという考え方では理解し難いものであり，今後の検討を要するものである。

今後の発展

土塊がいかなるメカニズムで流動化していくかという問題は，今まで研究されていなかった分野である。今回の共同実験によって，流動化していく際の間隙水圧の高速な変動現象とその役割が一部明らかになったが，従来の考え方とは異なった，あるいは，考えられていなかった新しい現象も観測された。土砂災害に対する防災対策を考えるうえで，重要なことの一つに，土砂到達域の正確な推定があるが，その際に必要となる崩壊土砂の流動・堆積機構解明のためにも，この間の機構は，ぜひとも明らかにしておかなければいけない問題であり，今後も継続した研究が必要である。

この際の問題点は，現在，目的に合い，使用に耐えうる計測センサーがほとんどないということであろう。今回の実験では，両博士により開発された水圧センサーにより，高速な間隙水圧の変動をうまく把えることが出来たが，今後とも，この用な目的にあった，新しいセンサーの開発が必要となろう。これは，地すべり・土砂崩壊の研究分野全体にいえることである。

(2) 地すべりの予知・制御に関する現場計測手法の開発

目　的

当センター降雨実験室では，大型降雨実験施設の完成以来，降雨に起因する土砂災害の発生機構に関し，実験に基づく研究を精力的に行なってきた。また，この研究のなかで，土撥水分計，土中流速計，内部歪計，地表面移動量計などの試作・開発を行なってきている。これらの成果を，自然状態の地すべり・崩壊などに適用し，理論の正当性と開発機器の有効性を確認し，その発展を図りたいと考えていた。しかし，日本では，地すべりが発生すると，すぐに，応急的な対策を行ない，自然の動きを抑制してしまう。このために，最終崩壊までの自然な現象を観測できる地すべり地を見つけることは難しく，現地への展開が困難な状況にあった。

一方，米国北西部の森林地帯のなかには，毎年雨期になると移動を繰り返す自然状態の地すべり地が多数存在する。これらは，自然状態の地すべり運動を解明するために，絶好のフィールドである。この付近の地すべりは，災害に直接関係しないため，長期間の森林生態系を乱す外乱の変化の１つとして把らえられており，今まで，高精度・継続的な観測は行なわれていなかった。しかし，下流域での土砂災害の発生源として考えた場合，降雨に対する短時間の変化を精度よく把らえる必要があり，現場計測手法の改良・高度化を考えていた。

これら双方の意向を踏まえて本共同研究が計画され，米国側『米国森林科学研究所』と当センターとの『個別重要国際共同研究』として行なわれた。

内　容

本共同研究は，『個別重要国際共同研究』としては単年度で終ったが，実質的には数年間継続する予定である。

昭和62年度には，当防災センター降雨実験室において，高精度・高応答な間隙水圧センサーの試作に着手するとともに，実験研究の中で試作・使用してきたセンサーを，米国北西部の２ケ所の地すべり地に設置し，観測を開始した。

昭和63年１月７日から４月５日まで，福囿輝旗主任研究員が米国側共同研究機関である森林科学研究所に滞在し，米国北西部の森林地帯で発生している地すべり地の調査を行なった。同時に，米国北西部沿岸域にあるコンドン・クリーク地すべりと内陸森林地帯のH．J．Andrews 試験地内に

あるルックアウト・クリーク地すべりに，米国側と共同でポテンショ型の移動量計とロータリー・エンコーダー型の移動量計をそれぞれ設置した。

前者の移動量計は，当センターの降雨実験で試作・使用した高精度のもので，現場計測用に防湿処理などの改良を加えて設置した。米国側で行っていた観測よりも1桁以上精度の良いデータが継続的に得られる。後者の移動量計は，ある設定された移動量ごとに電気パルスを発生するもので，機械工学の分野等では広く使用されているが，この分野では新しいものである。今のところ，電力消費量が比較的多いために，電源確保が容易でない現場測定には不利であるが，長期間安定している点とデータがディジタルで出力されるので，コンピューターでの取り扱いが容易である点が長所である。

データ収録は，米国森林科学研究所と米国地質調査所で使用している現場計測用のデータ・ロガ（CAMPBELL SCIENTIFIC社製 CR21, 21X）で行なった。写真3に，この計測システム全体を，また，写真4に，ルックアウト・クリーク地すべりへの設置状況を示す。

また，昭和63年3月10日から3月30日まで，佐藤照子研究員が米国森林科学研究所に滞在し，山地水文・水収支の観点から，流出試験地を含め，当地区の地すべり地の調査を行なった。また，当センターの降雨実験のなかで開発した土壌水分計を持参し，米国側と協議のうえ，同地すべり地への設置を行うことにした。

これらは，今後，少なくとも，1年間，観測を続け，長期間の安定性などについて検討する。

今後の方向

米国側は，自然状態で運動している地すべりの観測を行ない，そのメカニズムの解明を目指しているが，計測はマニュアルで行なう（この現場計測のノウハウには学ぶべき点が多い）のが主であるために，この共同研究を契機として，電気的な計測技術を発展させたい考えがある。そのために，今後，数年間，本共同研究を継続したいという強い要望がある。

一方，当センターでは，模型実験で得られた結果・理論を実際の地すべりで確認・発展させるとともに，実験のなかで開発してきた，又，今後，開発していく計測技術を現場計測へ発展させるために，自然状態で運動している地すべりの観測を行ないたいという強い希望がある。

この予算上での共同研究は単年度で終了したが，これら両者の意向をふまえ，今後も『地すべりの運動モニタリング・システムの比較研究』という課題名で共同研究を継続し，現在の観測を引き続き行なうとともに，今後，開発・改良を予定している高精度の間隙水圧計，地中内部の微少変動量測定器などを順次，同地すべりに設置し，現場計測技術の改良と発展を密接な協力関係の基で行うことになっている。

（ふくぞの　てるき・第3研究部，こみなみ　まさたか・資料管理部）

写真3.　ルックアウト・クリーク地すべりに設置した計測機器

写真4.　ルックアウト・クリーク地すべりへの計測機器の設置状況

コロンビアで大規模地滑り災害！

1987年9月27日午後2時30分頃，コロンビア共和国Medellin市の中心から約4km東の斜面が突然崩れだし，直下のVilla Tina 地区の住宅密集地を襲った。この崩壊土砂の流下により，死者217名，破壊家屋80戸を出す大惨事となった（図1）。

崩壊した斜面は勾配約30度，第三紀変成岩を基岩としラテライト化した風化土壌がこの基岩を被っている。今回崩壊したのは，この表層の風化土壌で最大幅150m，長さ約100m，深さ1～1.5m，推定土量20,000㎥である。先行降雨もなく災害発生当日も雨が降っていなかったにもかかわらず，崩崩土砂は多量の水分を含んでおり流動化していたことから，崩壊原因として地すべり上部を通っている取水用水路から漏水または溢水した水が，山腹に浸透し不安定化したものと考えられている。まだ，崩壊土砂の約50％が崩壊源に残っており，今後の雨で再滑動する恐れがあるほか，周辺の山腹にも亀裂が入っているため，現在コロンビア当局は斜面に移動監視モニターを設置し警戒するとともに緊急対策工事を進めている。

崩壊した土量がそれほど大きくないにもかかわらず，このような多数の死者を出したのは社会環境にその助長要因があった。このMedellin市はコロンビア共和国の首都Bogotaの北西300kmに位置し，中央アンデス山脈を源とするRio Cauca川の支流のRio Medellin川沿いに発達した都市である。人口200万人を有し，商都として栄えているが，わが国と同様最近の過度の人口集中に伴い，都市がスプロール化し，急峻な山のすぐそばまで住宅が密集している。従って，人口密度の高さも相まって過去には問題とならなかった小崩壊でも，現在では大きな被害をもたらす危険性をはらむようになってきている。今回のVilla Tina地区の災害もこの一例である。この災害を契機として，コロンビア当局は従来の事後の対策工事を主体とした活動から，災害の予防にも目を向けハザードマップの作成による広域地域防災計画つくりを検討中である。

（資料提供：全国治水砂防協会　徳弘日出男氏）

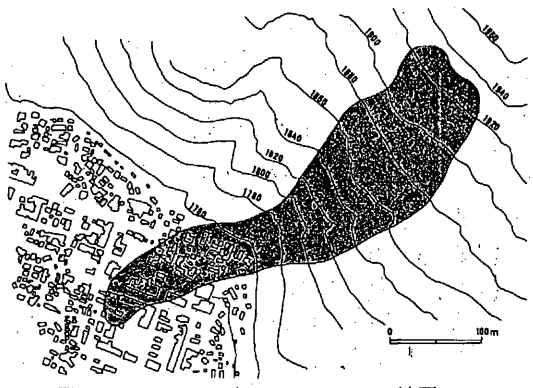

図1. Medellin市Villa Tina 地区の地すべり状況図

「地震前兆パラメータと警報レベルの研究」について

野口伸一

1. 背景から開始まで

昭和62年度から，科学技術振興調整費による研究推進の一環として，個別重要国際共同研究が開始された。これは，わが国の単一の省庁の研究機関と単一の相手国の研究機関が共同で行う先導的かつ社会的要請の強い，また政府レベルでの国際協定において協力の推進が合意されている研究の推進を主旨としている。国立防災科学技術センターの地震予知研究は，その対象を主に東海・南関東に置いているが，その手法開発等では国内のみならず，海外の研究機関の研究成果や研究協力に負うところも少なくない。とりわけ，微小地震や地殻変動のリアルタイムデータから，短期的な地震予知を指向した研究を進める上で，同様の観測体制と研究を行っている米国地質調査所（以下ＵＳＧＳ）とは，天然資源の開発利用に関する日米会議（ＵＪＮＲ）地震予知専門部会や研究者の往来等で，つながりも強く，双方の研究進展に寄与している。最近の第５回ＵＪＮＲ（昭和61年６月，筑波）において，松村・他は即時的なデータ処理による半自動的な地震前兆解析を目指す新システム（略称ＡＰＥシステム）を紹介した（防災科学技術№59参照）。一方，この会合でＵＳＧＳのバーカン（William Bakun）・他は，近々マグニチュード６級の地震が予想されているカリフォルニアパークフィールドの地震予知の戦略体制を紹介し，実験的に稼動している地震警報の発令・解除システムとこれまでの結果を報告した。これは，東海・南関東の大地震の前兆の出方と対応策のシナリオ作りにも参考になるものである。また，昭和61年11月，ＵＳＧＳの主催する中期的地震予知に関する研究会議（モントレイ）では，日米の最新の観測や理論の研究成果が報告され，当センターの佐藤は地震波の散乱と減衰の時間変化の理論と日本における観測結果を発表した（防災科学技術№58）。

このような中で，昨年度始まった上記研究制度は我々にとっても時宜にかなったものであり，当センターは岡田義光地震活動研究室長（当時），ＵＳＧＳはパークフィールド地震予知計画主任でもあるバーカン氏を各々の研究実施責任者として「地震前兆パラメータと警報レベルの研究」案を作成した。その概要は，①将来の大地震の予知のためには，過去の地震活動の詳細な履歴と地域特性の定量的把握が不可欠であるとの観点から，まず微小地震の基礎データを整備する。②これら基礎データとこれまでの双方の研究成果に基づいて，新たな地震前兆パラメータの開発と時間変化の解析を行う。③既存の諸パラメータと並列して，地震発生確立の算出，警報レベルの発令・解除方式の開発と地震予知のシミュレーションを行う。④最終的に，本研究成果を双方のオンライン観測・処理システムに組み込む，というものである。この計画は，昨年度，３カ月間の派遣による共同研究として認められた。最終目標の達成までには，かなりの研究期間を要することが予想されるが，まず共同の研究を具体化すること，さらにその研究成果をもとに今後も継続して取り組むとの認識を持ってスタートした。以下，昨年度ＵＳＧＳで行った研究内容，成果等を記す。

2. 研究の中味

ＵＳＧＳにおける研究は，カリフォルニア，メンロパークの西部地域センターの地震・火山および工学部門（William Ellsworth 氏が部長）において，ＵＳＧＳ側の共同研究実施責任者バーカン氏およびその下で主にマグニチュードの研究を進

めているマイケルソン嬢(Cary Michaelson)と行った。まず,彼らの最近の研究活動に触れることにする。バーカンさんは,一貫してカリフォルニア中部の地震活動の観測と詳細な解析・研究を進めている。特に最近では,カリフォルニア地震予知計画の方向付けに大きな影響を与えた1984年の論文(カリフォルニア大のマキャベリ氏と共著,パークフィールドのM6以上の地震の繰り返し間隔から次回地震の発生時期を1988年±5年と予測)や1984年のモルガンヒルの地震(M6.2)について,その場所・大きさを予測していた1980年の論文等,地震予知に貢献した仕事をしている。これとともに,地震予知の基礎ともなるマグニチュードの決定法について,その時空間的均一性をできるだけ保つための詳細かつ地道な仕事も継続して行っている。パークフィールド計画主任に就任してからは,現地出張,会議・打合せ,マスコミとの対応等かなり多忙である(なお,パークフィールドについては,地震ジャーナル第2号に金森博雄先生が興味深い記事を書かれている)。一方,優秀な女性研究者であるマイケルソンさんは,ワシントン州から数年前メンロパークに転動し,現在近くのヨットハーバーの小さなボートを住処としている。計算機を得意とし,最近,我々の今回の研究に密接に関係するUSGSのマグニチュードの決定方式を,大量のデータを駆使して合理的な形にまとめる仕事をしている。

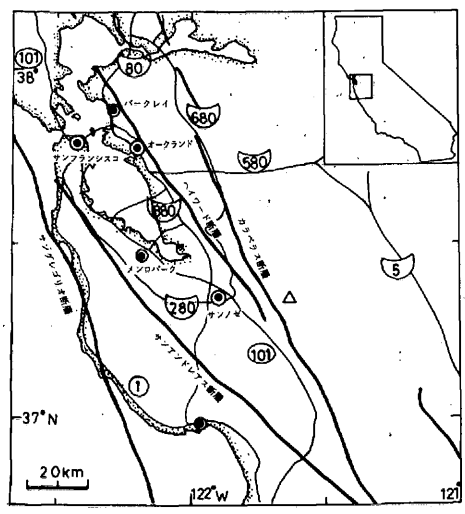

図1　サンフランシスコ湾周辺の断層(太線)と主要道路網(細線)。

我々はまず上述の①に沿って,カリフォルニア中部サンフランシスコ湾東側のヘイワード断層とカラベラス断層沿いの地震を研究対象に選んだ(図1.)。その理由は,(1)これら断層沿いには,USGSの中部カリフォルニア地震観測網(CALNET)とカリフォルニア大学バークレイ校(UCB)地震観測所(Bruce Bolt 教授が所長)の観測網による良質のデータが長期にわたって多数蓄積されていること,(2)ヘイワード断層においては,1836年と1868年に大地震が発生したが,それ以後今日まで静かであり,その間巨大な建造物と高速道路網からなる人口密集地帯に発展したサンフランシスコ湾岸地域(ベイエリア)の特にオークランド周辺の地震予知は,社会的にも極めて重要なこと等による。

②の地震前兆パラメータの解析のため,我々は,既存の長期的データを活用して,できるだけ簡便な汎用性の高い手法を開発すること(他地域でもデータが得られれば容易に応用可能であること)を念頭に置いた。一般に,大地震の前にはその予想域周辺で応力の増加による地殻の変形や歪の局所的蓄積によって,日常的に発生している微小地震の波形にも変化の現れることが予想される。我々が目指しているのは,その波形変化を定量的かつ組織的に検出できないか,特に普段起きている微小地震の顔つきと大地震前のそれとの違いを素早く正確に判断できないかというものである。

普通の地震は,初めの大きな揺れ(最大振幅)が大きければその後続く揺れている時間(振動継続時間)も長い。しかし,地震の中には,最初の揺れが大きいのにすぐ終わってしまうもの,逆に最初の揺れは小さいがいつまでも揺れているといった変わり種がある。この相違が,実は地震のマグニチュードの決め方に反映される。というのは,微小地震のマグニチュードの決定には,この地震波の最大振幅を用いる方法と,振動の継続時間から決める方法があり,上述の変わり種の地震では,この両マグニチュード間の差が顕著になるからである。そして,大地震前には,応力の局所的集中や媒質の変形によって,このような変わり種地震が比較的よく出現することが考えられる。この考えに沿って,まず,USGSがルーチンで震源決定している1969－1987年の微小地震約2,200個を選び出した。これらの地震について,上述の

二つのマグニチュードのうち，振動継続時間によるものは，ＵＳＧＳがルーチンで決定している。一方，最大振幅からのマグニチュードは，新たに決めなければならない。このため，我々は，ＵＣＢ地震観測所のウッド・アンダーソン型地震計のデータを用いることにした。

ＵＣＢは，メンロパークから車で約50分弱，対岸にサンフランシスコの高層ビルや金門橋が望める丘の中腹に位置している。また，ＵＣＢ地震観測所は，1887年のハミルトン山の観測所開設以来100年の歴史を持ち，カリフォルニアのみならず世界の歴史的大地震を観測し，その読み取り原簿や地震記象等貴重な資料を保存している。リヒターが1935年世界で初めてマグニチュードを定義するのに用いたデータは，ウッド・アンダーソン型地震計によるものであるが，ＵＣＢの同地震計による観測は，1920年代半ばから今日まで続けられている。従って，例えば同じ場所に最近起きた地震と数十年前に起きた地震の顔つきが同じであるか否かの比較も可能となる。実際，エルスワースさんらは，ハミルトン山のウッド・アンダーソン型地震計の記録を用いて1930年代から最近までの地震の波形変化を調べている。

地震予知の研究では，このように新たな発想や手法の出現により，数十年以上の長期に渡り同一条件で観測されたデータを必要とすることが往々にして出てくる。短期間で観測方式や処理方法を変更すると将来に悔いを残すこともある。この点，ＵＣＢ地震観測所が，職員の地道な観測と保守により安定したデータ蓄積を長年続けていることは，見習うべきことと思う。

さて，上記約2,200個の地震のリストに基づき，ＵＣＢの地球科学の建物等に保存されている読み取り原簿から最大振幅データを採録し，また読み取り原簿にないより小さな地震については，もとの記録に戻り測定を行った。滞在中の最初の一カ月近くはこの仕事に費やされた。これらの記録は，他のベニオフ型地震計等による記録とともに，１～２カ月毎にひもで束ねられ，それが何十年分か地下の棚に横積みにされて保存されている。この中から，目当ての地震にたどりつき振幅を測定し再びもとに戻す作業を繰り返すことは，私はもちろん，身長170cmは優にあるマイケルソン嬢にとってもいささか骨の折れる労働であったようだ。とにかく，かくして1969－1987年の地震のうち約1,200について，総計約5,000個の振幅データを整備することができた（図２）。

これらのデータは，ＵＳＧＳの計算端末から，ファイルに蓄えた。この計算機（主にVAX 750, 785 VMS系と，ＵＮＩＸ系）は，マイケルソン嬢の援助とＨＥＬＰ機能で比較的容易に使うことができた。ソフトウェアの中には，地震活動の解析に不可欠な震央分布図や断面図，地震回数等の作図や端末への表示が容易にできるＱＰＬＯＴが備わっている（当センターにも岡田さんが開発されたＥＱＣＲＯＳがある）。これは，クレインさん（Fred Klein）が作られたもので，初心者でも画面の操作・手順に従ってキーを打っていけば簡単に図を出すことができ，さらに，手順をファイルに蓄えておくと，後で図の修正や複雑化が容易にできる。特徴的なことは，120以上のコマンド（４文字からなる）が揃っていて，各々の詳しい使用法を端末に即座に出せることである。これらコマンド群を使いこなすとかなり凝った図形を作れる。また，震源決定プログラムも，地域毎の細かい速度構造が用意されていて，利用者の目的に応じて多様な出力ができるように便宜が計られている。

このＵＳＧＳの計算機に蓄えたウッド・アンダーソン型地震計のデータから，振幅マグニチュードを計算した。その際，リヒターの定義した方式を用いると，マグニチュードの距離依存性が出てしまうため，バーカン氏が新たに導いた式を用いた。次に，この振幅マグニチュードと先程のＵＳＧＳの振動継続時間マグニチュードとの関係を，1969－1987年の全期間の地震について比較検討した。単純に，両マグニチュードの差を取ってその時間変化を調べると，いくつかの顕著な変化が現れた。これらは全体として，(1)ある時期を境に系統的に変わっているものと，(2)ある期間で変化するものに分けられる。(1)については，実は，観測システムの変更に伴って振動継続時間の読み取り方式が変わった時期に対応することがわかった。一方，(2)は実際の自然現象を反映したものと考えられる。特に，この調査期間に発生した1979年８月６日のカイオーテレーク地震（Ｍ5.8）と1984年４月24日のモルガンヒル地震（Ｍ6.2）の震源域について，これらの地震前後で両マグニチュードの関係が異なること，さらに，これらの

地震前の約2年位の期間だけでも変化のあることがわかった。また，最近100年以上に渡り大地震のないサンフランシスコ湾東側のオークランドやバークレイ周辺の微小地震の両マグニチュード間の差にも時間変動が認められた。

3. 今後の展望

現在，USGSにおいてマイケルソンさんが前述の振動継続時間の読み取り方式の変更の影響を除くマグニチュード決定に取り組んでいる。また，UCB地震観測所の振幅データも磁気テープに収録し，当センターに持ち帰り，詳細に解析中である。これにより，1969－1987年の全期間に渡った長期的な変動について，より詳しい興味ある結果が見い出せる可能性がある。今後の課題として，上述の時間変動の統計的有意性の検定法及び前兆出現時期の検出手法を開発すること，またカリフォルニアの他地域及び日本の地震活動に本研究の解析手法を適用するため，基礎データの整備をすることが挙げられる。

当センターが予知研究の対象としている南関東・東海とカリフォルニア中部の地震活動の特徴を比べると，関東・東海の大地震は，海底下のあるいは地下深部の断層として面的に発生することが予想される。周辺地域で観測されている微小地震の分布も単純ではなく，地殻構造の複雑さ，海底での観測の困難さ等の問題もある。また日本の中枢地域であるため，予知情報の社会的に与える影響は大きい。これに対し，カリフォルニア中部の微小地震は，主に陸上部分を南北に走る横ずれ型断層沿いの深さ20km位までに，線状に分布している（図2）。過去の大地震もこれら断層沿いで横ずれ運動として発生し，破壊の始まりの場所と進行方向，停止位置等が詳しく調べられている。このため，パークフィールドのように，どこから破壊が始まりどこで止まるかを予想し，震源域直上でじかに種々の観測を行うことができる。例えば，地震時の断層運動を記録するため，予想される地表の断層線をにらんでテレビカメラのモニタ

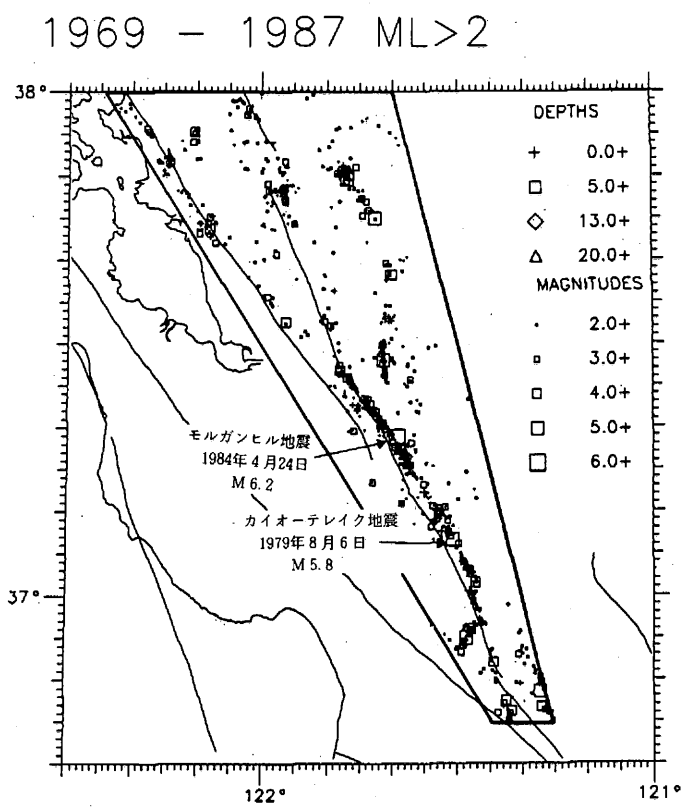

図2. 太枠内が今回研究対象とした地震分布（振幅マグニチェードが決められた地震約1,200個）

写真　近々発生が予想されるパークフィールド地震について，地表の断層運動を捕らえるため，テレビカメラを設置しているところ。右側がパークフィールド計画主任のバーカン氏。

一も行われている（写真）。前述の警報の発令・解除システムは，まだ初歩的な段階にあるが，人口20数人（バーカン氏談）の町なればこそ稼動できるものである。また，大地震発生の核となる歪集中域（アスペリティ）や破壊がどこまで進行・停止するか（バリアーの分布）及びクリープ運動等の観測と物理的メカニズムの研究，あるいは岩石破壊実験等の基礎研究の面でも進展をみている。

このように，カリフォルニアの観測上の利点や基礎研究から得られている成果には，学ぶべき点が多い。一方，当センターの研究においても，これまでに地震活動や地殻の物理的性質を定量的に表すパラメータや解析手法が独自に提起・開発され，内陸のＭ６級の地震前に前兆的変化を検出している。従って，日米双方の地震予知技術の開発を無駄なく効率的に推進する上で，共同研究はこれからも続けられるべきものであり，また具体的課題も少なからず見いだせる。特に今後は，複数の観測項目の並列解析による地震発生確率の向上のため，地震データとともに地殻変動データの観測技術，解析手法の開発を共同で進めることが必要と思われる。

最後に，本研究では当センターの管理部，科学技術振興局国際課，研究開発局防災科学技術推進室の皆様に大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。

（のぐち　しんいち・第２研究部）

20年を迎えたＵＪＮＲ耐風耐震構造専門部会について

大谷圭一

1. 概　要

ＵＪＮＲ（天然資源の開発利用に関する日米会議）の設立については，昭和39年１月27日東京で開催された，第３回日米貿易経済合同委員会第１回全体会議の席上，米国側から提案され同年から発足した。

耐風耐震構造専門部会は，ＵＪＮＲの17の専門部会の一つとして，強風，地震，高潮ならびに津波からの災害防除に関して，日米の技術協力を行う目的で，昭和42年に設置が決められた。その後，昭和43年東京において，第１回の合同部会が開催されてから，本専門部会は年々その活動を拡張し続け，今年第20回目の合同部会を米国において開催した。

この部会は，日米両国が互いに地震，強風，高潮，津波の被害国である実情から，構造物の耐風・耐震設計法等の開発研究の成果をもちより，意見を交換する機会をもたらすことに，主眼が置かれた。その活動範囲は年々拡大され，設計基準の改正上の問題点に関連して，実施された調査研究の成果の交換，さらに強風，地震，高潮，津波により生ずる災害から，人命及び財産の損失を防止するための総合的対策，技術分野の開拓を目標としている。

この部会には，日米双方に部会が設置され，日本側の部会は建設省土木研究所長を部会長とし，６機関29名の委員で構成されている。構成機関は，建設省土木研究所・同建築研究所・同国土地理院，科学技術庁国立防災科学技術センター，運輸省港湾技術研究所・気象庁気象研究所・また本部会には専門部会の活動をより緊密にするため，10の作業部会を設け，研究情報の交換，作業部会ごとのワークショップの開催等を実施している。

2. 作業部会

1. 強震計配置計画と強震記録
2. 大型実験計画
3. 既存構造物の補修及び補強
4. 構造物の性能評価
5. 自然災害予測とその軽減のための国土利用計画
6. ライフライン施設の災害防止法
7. 風の特性と構造物の応答
8. 地震時における地盤の挙動と安定
9. 高潮及び津波
10. 交通システムの耐風耐震技術

3. 共同研究

研　究　課　題	期　間
・鉄筋コンクリート造に関する大型耐震実験研究	1979－1987
・鉄骨造に関する大型耐震実験研究	1981－1987
・ライフライン施設の耐震性に関する共同研究	1982－継続中
・原位置地盤調査法に関する共同研究	1983－継続中
・組積造に関する大型耐震実験研究	1984－継続中

4. 合同部会における研究成果の発表（当センター関係）

部会	年	場所	課題	氏名
1	1970	東京	・日本における強震観測の現況	有賀世治
3	1971	東京	・地震時の最大加速度に対する人体応答及び構造物の非線型応答について	沢田健吉，大崎順彦，渡部　丹
			・日本における最近の耐震耐風研究の概況について	有賀世治，沢田健吉
4	1972	ワシントン	・日本における耐震耐風に関する研究活動の現況	沢田健吉
5	1973	東京	・日本における耐震耐風に関する研究の現況	稲葉誠一
6	1974	ワシントン	・大型耐震実験装置を利用する耐震実験	稲葉誠一
7	1975	東京	・オイルプラント及び原子力発電所の耐震実験	稲葉誠一
8	1976	ワシントン	・電力用機器の耐震性に関する研究－電力用遮断器の震動実験	稲葉誠一，木下繁夫，木下武雄
9	1977	東京	・日本の地震予知研究の現状	浜田和郎，佐藤　裕，高橋　博，諏訪　彰
			・岩槻深層地殻活動観測井におけるＳ波速度分布	山水史生，高橋　博，太田　裕，後藤典俊，塩野計司
			・予測誤差フイルターを利用した地震波合成法	大谷圭一，木下繁夫
			・地中埋設管の耐震性に関する研究	大谷圭一，小川信行，箕輪親宏
			・日本における高層建築物耐震設計の現状	大谷圭一
10	1978	ワシントン	・組立てパネル矩形水槽の振動挙動	大谷圭一，箕輪親宏
11	1979	つくば	・鉄筋コンクリート造りの耐震実験	大谷圭一，箕輪親宏
12	1980	ワシントン	・３層実大鉄筋コンクリート造建物の耐震実験	大谷圭一
13	1981	つくば	・速度計による強震観測	大谷圭一
			・1979 年20号台風によって引き起こされた高潮高波について	都司嘉宣，高橋　博
14	1982	ワシントン	・動的解析に用いる入力震動の見直し	大谷圭一
15	1983	つくば	・国立防災科学技術センターにおける耐震工学研究	高橋　博，大谷圭一
			・海洋上の観測塔で測定された強風の性質	内藤玄一，渡部　勲，徳田正幸，高橋　博
			・三次元震動実験装置の開発研究	大谷圭一，高橋　博，藤原剛二
			・1982年10号および18号台風に伴う潮位偏差について	都司嘉宣，竹田　厚，小西達夫，高橋　博
16	1984	ゲイザースバーグ	・東海地震に対する大地震早期警報システムの開発	大谷圭一，高橋　博
			・日本及び韓国の沿岸での日本海中部地震の津波高分布	都司嘉宣，木下武雄，小西達夫，高橋　博，白雲　娶，秋教昇，安希洙

部会	年	場所	課題	氏名
17	1985	つくば	・台風通過時の海上風擾乱の性質	内藤玄一，高橋　博
			・1台の気象用ドップラーレーダによる突風前線の自動検出方法の開発	上田　博，D.S.Zrnic
			・府中地域における群列強震観測	大谷圭一，木下繁夫，御子柴正
			・日本海に発生した地震津波と数値計算結果	都司嘉宣，小西達夫，高橋　博
			・高潮の河口部の逆上について	小西達夫，木下武雄，高橋　博
			・長野県西部地震による岩屑流と崩壊	田中耕平，大八木規夫，井口隆，植原茂次，高橋　博
18	1986	ゲイザースバーグ	・首都圏における地盤地震動のスペクトル特性	大谷圭一，木下繁夫
			・津波・高潮による浸水域の衛星資料からの識別方法	竹田　厚，都司嘉宣，高橋　博
19	1987	つくば	・ロックフィルダムの動特性について	大谷圭一，馬場恭平，中井智治
			・海底地すべりによる津波の見積もり	岩崎伸一，高橋　博

防災科学技術　No. 63　1988 July

昭和63年7月25日　印刷
昭和63年7月30日　発行

編集兼
発行人　国立防災科学技術センター
茨城県つくば市天王台3－1
TEL（0298）51－1611㈹

印　刷　前田印刷株式会社　筑波支店