

防災科学技術 NO.44

科学技術庁 国立防災科学技術センター



も く じ

水圧破壊法による地殻応力測定 —千葉県富津市、茨城県那珂湊市での測定を中心として—

.....池田 隆司・ 1	
国立防災科学技術センターの動き..... 5	
1981年6月5日の降ひょう日に至る低層での気温変化.....権 奉来・米谷 恒春・ 6	
国立防災科学技術センターの動き..... 8	
1980・81年冬山遭難と天候予測.....高橋 博・ 9	
雪処理におけるエネルギー消費.....栗山 弘・ 15	
センター新刊.....19	
動いている火山島「硫黄島」の監視(続).....20	
サンフランシスコ周辺の地質と地すべり.....田中 耕平・ 25	

表紙写真説明

1981年8月24日利根川支川小貝川左岸堤が欠壊し、利根川の水は竜ヶ崎市などにあふれた。その昔、徳川幕府が開削した新利根川へこの水は流れこんで霞ヶ浦へ迅速に排水されたのは不幸中の幸であった。写真は、田畑をひとなめにした水が、すでに満々と流れる新利根川(左側)に流入しているところ。住民はこの湛水の中にも飲料水を運びながら、根強い営みをつづけていた(8月25日、茨城県稲敷郡河内村万歳で撮影)。(本文8頁参照)

水圧破壊法による地殻応力測定

—千葉県富津市，茨城県那珂湊市での測定を中心として—

池田 隆 司

はじめに

昭和52年、深さわずか100mの井戸でスタートしたわれわれの地殻応力測定も、今では完全に軌道に乗り、毎年2地点ずつしかも500m級の井戸で測定するに至っている。地震の発生は、一種の破壊現象で、地下に徐々に蓄積されてきた応力がある限界を越えたときに、破壊が始まり地震が発生してこの応力の一部が解放される。地震を起こす応力の大きさを知るためには、地殻中で直接応力の大きさを測定することが最も有効であろう。水圧破壊法は、井戸の中のある区間を密閉しその区間に水圧をかけて人為的な破壊を起こし、割れ目が開くときの圧力と方向から応力値と応力の方位を測定しようとするものであり、地表から数千mの深さまでに蓄積された応力を測定できる唯一の方法である。

われわれの測定は地震予知計画に関連して、関東地方及びその周辺の地下応力状態を知り、この付近で発生する地震と地殻応力との関連を研究するための基礎資料を得ようとするものである。地殻活動形態の異なる代表的な地域、つまり、ごく最近や近年に大きな地震の発生した地域、地震の空白域、中小地震の活発な地域といったようなそれぞれの特徴を持った地域を選定して測定する計画である。すでに7地点で測定を行った。静岡県岡部町の2地点と西伊豆町、千葉県銚子市犬吠崎と富津市、茨城県那珂湊市、神奈川県横須賀市である。

破壊回数にすると63回を数える。測定場所を借用するための説明の折に、「破壊を起こすのだから、地震や発破のように地面が揺れ被害があるのでは？」と、よく質問を受ける。確かに、破壊ということでは地震と同じで実際に振動も出るには



写真1 那珂湊

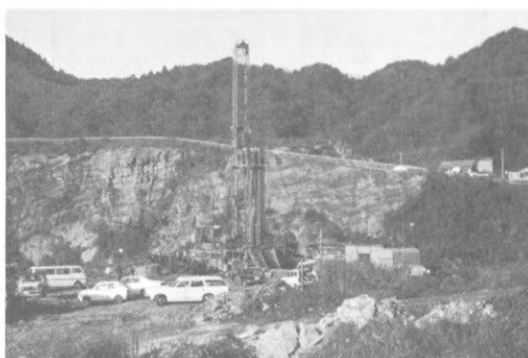


写真2 富津

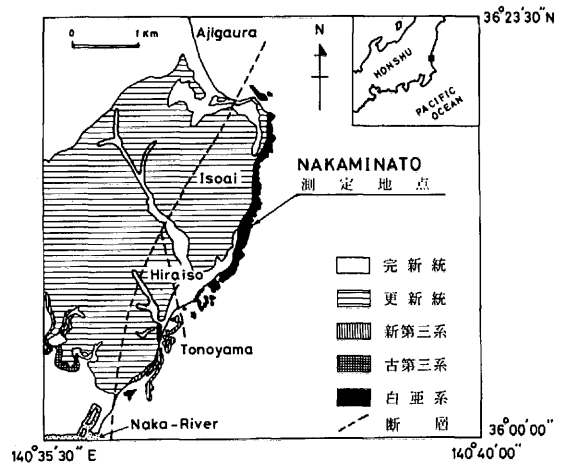
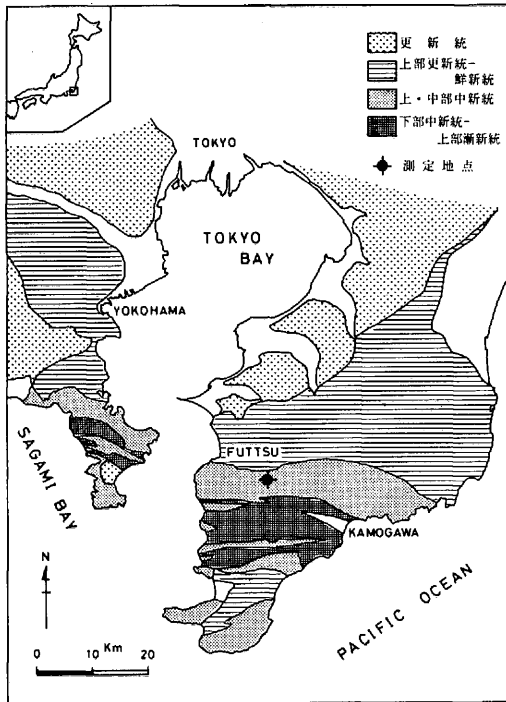


図2 那珂湊応力測定地点及びその附近の地表地質図

図1 富津応力測定地点及びその附近の地表地質図

違いないが、一回の破壊でできる割れ目の大きさは大きく見積もっても、巾数mm、長さ2~3m、深さ数mの程度で、人体に感じる程の大きな破壊ではないので心配御無用である。

以下、54年度に実施した富津と那珂湊での測定を中心に話を進めることにする。

測定地点

富津及び那珂湊の測定場所とその附近の地表地質図を、それぞれ図1と図2に示す。

富津の位置する房総半島は、1923年関東地震(M=7.9)のような大地震の発生域に近く、測地学的にも最近の地盤変動の異常などで、地震予知問題の上から注目されている。また、新第三紀以降の著しい地殻変動の場であることから、地質構造的にも多くの研究がなされている。これに対して那珂湊は、近くでは最近大きな地震は発生していないし中小地震も不活発である。したがって地震予知という面から見ると、房総半島ほどは注目されていない。両者が全く対象的な地域というわけではないが、地殻活動形態の異なる場と言えよう。

浅部から深部までの応力状態に関する有効な情報を得るためには、できるだけ硬質な岩石が浅部から深部まで連続し、かつ既存の断層破砕帯の近くなどをさける必要がある。那珂湊は中生界白亜系が海岸沿いに露出しており(写真1参照)、この附近で最も古い地質である。岩質は凝灰質泥岩が主体で砂岩とシルトの挟みがあった。富津は、測定地点では新第三系中新統であるが、より古い古第三系が測定地点の南方に存在する。しかし、この古い地層の一带は東西に伸びる複雑な隆起帯をなし、大規模な東西方向の活断層が数条推定されている。このような地帯を避け、比較的固結状態の良い地層として測定地点を選定した。岩質はシルト質泥岩が主であった(写真2参照)

地点選定の苦労はこのような地質あるいは構造的な要因によるだけではない。わが研究室の塚原弘昭氏が本誌第40号で、アメリカでの体験から、測定場所探しに殆ど苦勞しないアメリカと較べて日本の困難さを指摘されているが、全くその通りである。写真1でわかるようにこれだけ大がかりなボーリング機械を設置するには、約25m×25mの平らな空地が必要となる。このスペースを確保するのが容易なことではない。土地の所有者のも

とへ何度も足を運びほぼ確定のところまで行きながら、振り出しに戻ってしまうことが間々あるのである。適当な場所が確保できた時点で、実験は半ば成功したといっても過言ではないかもしれない。

測定装置

ボーリング機械は別として、測定用の道具としては、測定区間を密閉するための膨張パッカー、水圧をかけるためのポンプ、破壊によって作られた割れ目を確認するためのボアホールテレヴィア及び型取りパッカー、水圧や流量を測定するためのセンサーや記録器などが主なもので、数としてはそれ程多くない。しかし、水圧破壊自体、石油採油技術として開発されてきたこともあり、装置は数千mの深度での使用に耐えられる頑丈なものである。しかも、一滴の水漏れも許されない精巧な構造と、忠実な記録を得るための十分な感度が要求される。現在、パッカー類やテレヴィアは輸入品に頼らざるを得ず、消耗度も激しいことから、毎年の輸入手続がまた一苦勞である。

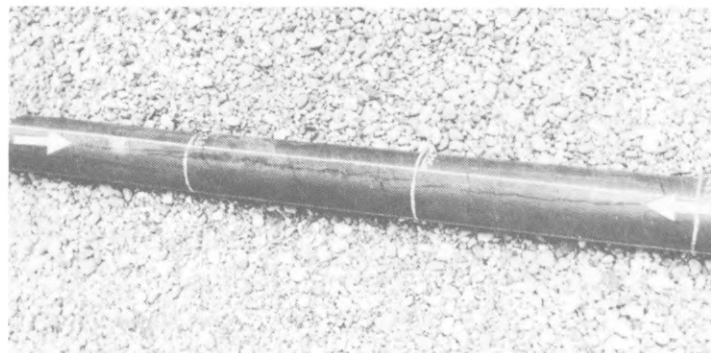
実験の積み重ねに伴い、測定装置についても色々な改良や開発を試みている。例えば水圧ポンプは、これまで石油現場用の大型ポンプを使用していたが、小型と中型のポンプを2台組み合わせ流量の微妙なコントロールが可能なるものを、現在開発している。また、富津の測定で大きく進歩したのは型取りパッカーである。型取りパッカーは、膨張パッカーの周囲にプラスチックスリーブ（長さ3m強、外径13cm）を着けて、破壊箇所水圧に

より膨らませ孔壁に押し付けることによって、割れ目の型を取るものである。西伊豆における測定（53年度）の際初めて試用したが、スリーブ表面の硬度の問題、パッカーとスリーブとの接着剤の難点があった。これらの点を改良した結果、水圧破壊によって作られた割れ目の型取りに初めて成功した。写真3は地上に回収した型取りパッカーのスリーブであるが、表面に縦方向の割れ目跡が鮮明に見られる。しかし残念ながらボアホールテレヴィア（超音波を利用し、孔壁面を映像で観察できる）では不鮮明で一部しか確認できなかった。型取りパッカーは孔壁に強く押し付けられるので、閉じた割れ目をもう一度開かせるという効果がある。そのためテレヴィアでは確認できない割れ目も検出できるようである。

結果

応力の大きさは、水圧記録から割れ目が開く時と閉じる時の圧力の値を読み計算により求める。富津と那珂湊それぞれの、最大水平圧縮応力、最小水平圧縮応力、垂直応力と深さとの関係を、図3及び図4に示す。同図中の点線は垂直応力を上載岩圧に等しいとして、密度検層から得られた地層の密度（富津 $\rho=2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 、那珂湊 $\rho=2.3\text{g}/\text{cm}^3$ ）から計算した値である。応力の方向は、型取りパッカー、ボアホールテレヴィアの結果から求めた。富津の場合、最大・最小水平圧縮応力、垂直応力とも非常に良く直線に回歸し、深さと共に増加している。応力の大きさはこれまでの測定地点中最も小さな値を示し、傾向は銚子の結果と良く似ている。こ

写真3 型取りパッカー、破壊による新しい割れ目跡（失印）が見られる。



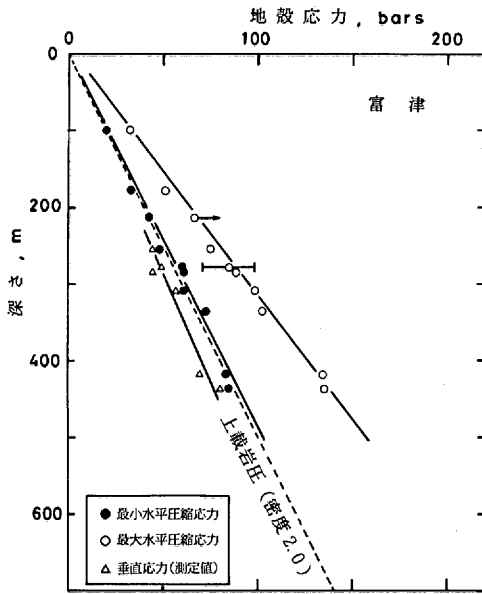


図3 富津における水平及び垂直圧縮応力と深さとの関係

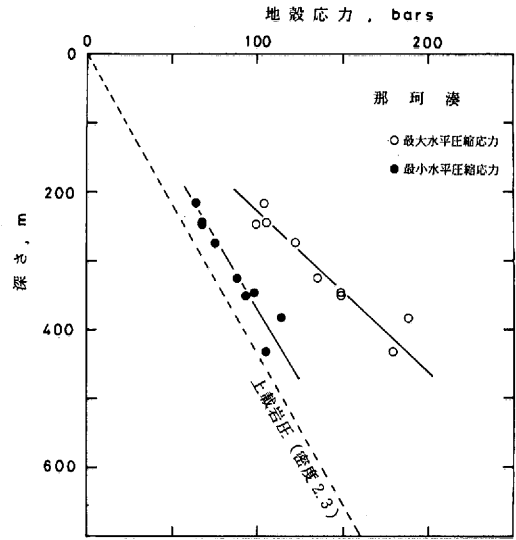


図4 那珂湊における水平及び垂直圧縮応力と深さとの関係

のことは、水平方向の圧縮力が弱く、浅い地震も大変少ないことなどとも合わせて、例えば伊豆地方と比べると現在の地殻活動度が低いことを反映しているものと思われる。最大水平圧縮応力の方位は $N45^{\circ} \pm 10^{\circ}W$ である。この方位は、地表の断裂系や三角測量から推定される最大水平圧縮方向（ほぼ南北と推定されている）とは完全には一致しない。それぞれの解析から求められる応力の間に、応力の蓄積年数の差が考えられる。また今回の結果はフィリピン海プレートのアジアプレートに対する相対的な北西への動きの方向とは一致しており、この動きを反映して、現在北西-南東の圧縮力が検出されたと考えるのは不自然ではないであろう。

那珂湊の場合、応力値は西伊豆と富津の中間位の値である。図4では応力値を最小二乗法により直線に回帰している。富津の場合より若干バラツキが大きい。深さとともに直線的に増加しているといえよう。方位は $N50^{\circ} \pm 10^{\circ}E$ であった。この方位は、太平洋プレートの押し込みから推定される最大水平圧縮応力の方位とそれほど矛盾しない。

おわりに

水圧破壊法による地殻応力測定は軌道に乗ったとはいえ、完全に確立したとはいえない。むしろ問題は山積みしている。例えば、ボアホールテレグアヤ型取りパッカーでは孔壁に出現した割れ目そのものの方位しか知ることができない。その割れ目がそのまま真直ぐ岩盤中に延びている場合は問題ないが、孔壁を構成している岩石の不均質さなどの故に、平均的なその場の応力の方位を反映して生じた割れ目の方位と、孔壁に出現した割れ目の方位とがずれている可能性も考えられる。既存の手段ではこのことを知ることができない。割れ目が生じる時の微小破壊音(AE)を捕えその音源分布を知ることにより、平均的割れ目の方位を知ることができる。われわれは微小破壊音の測定を試みそれを捕えることに成功したが、音源を決定し破壊方位を決定できるようになるまでには、まだ時間がかかるであろう。

最後に、最近届いたニュースをお伝えしよう。中国にもわれわれの仲間ができたということである。国家地震局の李方全氏を中心としたグループが、1980年10月河北省にて花崗岩中の90mの井戸で応力測定に成功した。事前に李氏からわれわれ

の測定方法や測定機器について問い合わせがあり、回答した経緯があるので、われわれにとってもその成功はまことに喜ばしい。これまでアメリカのグループを中心として行なわれてきた水圧破壊法による地殻応力測定も、いよいよ国際的になり日進

月歩といったところである。

Ryuji Ikeda・第2研究部地震地下水研究室

国立防災科学技術センターの動き(1)

●関東・東海地殻活動観測施設の整備状況

昭和56年度に設置する観測点8カ所（地殻活動観測施設3カ所：傾斜計と地震計、微小地震観測施設5カ所：地震計）の名称と位置が次のようにきまりました。

施設名	所在地
下田地殻活動観測施設	静岡県下田市須原
本川根地殻活動観測施設	静岡県榛原郡本川根町藤川字須山
八郷地殻活動観測施設	茨城県新治郡八郷町大字野田
那珂湊微小地震観測施設	茨城県那珂湊市部田野字上ノ内
須玉微小地震観測施設	山梨県北巨摩郡須玉町小尾
下呂微小地震観測施設	岐阜県益田郡下呂町蛇の尾嫁田
万場微小地震観測施設	群馬県多野郡万場町大字生利字御荷鉾
大間々微小地震観測施設	群馬県山田郡大間々町大字小平

●昭和56年度防災科学技術講演会

第18回講演会を、10月29日（木）筑波研究学園都市の科学技術庁研究交流センターで開いた。当日のプログラムは次のとおりであった。

開会のあいさつ

国立防災科学技術センター所長 大平成人

関東・東海地域の地震予知の展望

国立防災科学技術センター第2研究部 大竹政和

空からの防災情報の利用について

国立防災科学技術センター第3研究部 植原茂次

降雨量の長期変動と防災分野での問題—確率雨量の増加を中心に—

国立防災科学技術センター第1研究部 米谷恒春

討 論

映 画

「関東地方の水害記録」

(8頁に続く)

1981年6月5日の降ひょう日に至る低層での気温変化

権 奉 來 ・ 米 谷 恒 春



写真1 1981年6月5日のひょう害を受けた梅の木（群馬県榑名町）。葉・実はすべてたたき落され、この影響は今年だけでは済まないといわれている。



写真2 低層気象観測。風の測定のため、トランシットでラジオゾンデを追跡した。

1. はじめに

大規模な雷雨の発生に関して天気予報などで、「高度約5,700mの上空に寒気が流入したため、大気が不安定となり…」という解説がよくされる。他方、低層の状態には今まであまり注意が払われていない。しかし、関東地方について雷雨日の大気鉛直構造を調べた経験からすると、雷雨の発生条件として内容的に同じであるが、「地表付近の空気の温度が高くなったため、または（および）湿潤化したため、大気が不安定となり…」というべき状態も、決して少なくないと考えられる。

1981年6月2日～同4日に、当センター構内において計4回の低層気象観測を行った。本文では、この観測期間を含む6月1日～6月6日における、低層での気温の変化を示す。この変化は、上に記したような低層大気の温暖化が激しい雷雨の発生を引き起こした例、と判断される。

1981年の5月中旬から6月初めにかけて、天候は次のように推移している。5月の下旬まで低温の日が続き、関東以北で農作物は大きな被害を受けた。6月に入って温暖化し、4日と5日にはひょうを伴う雷雨が関東地方に発生した。特に5日の降ひょうは激しいもので、群馬県下での被害は31億円（県農政部調べ）と報告されている。なお、このひょう害の現地調査も行なったので、被害の一例を示しておく（写真1）。

2. 低層における気温の経日変化

6月1日～同6日における、地上と900mb 気圧面（高度約1,000m）とでの気温の経日変化を図1に示す。筑波研究学園都市にある高層気象台で、09時と21時に測られたものである。地表の気温は、2日21時までは15℃前後であったが、3日09

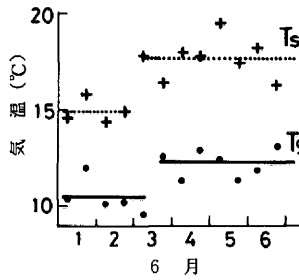


図1 高層気象台で09時と21時に測られた地表気温(Ts)と900mb気温(Tq)の6月1日～6月6日における経日変化。地表気温については、1日09時～2日21時の平均値と3日09時～6日21時の平均値を900mb気温については、1日09時～3日09時の平均値と3日21時～6日21時の平均値を、それぞれ直線で示した。

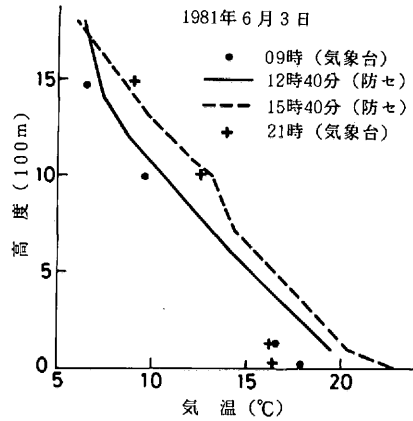


図2 6月3日の気温鉛直分布の経時変化、12時40分と15時40分は当センターの観測値で、09時と21時は高層気象台での観測値。

時に降では17℃以上のことが多く、それまでよりも3℃近く高い。地表では2日21時と3日09時の間に温暖化し、気温は不連続的に上昇したことが分かる。

900mb気圧面での09時と21時の気温は、3日09時まではほとんどの日で10℃前後に対し、3日21時以降は12℃前後と約2℃高い。900mb気圧面での気温は、地表での気温と同じ型の変化をしているが、気温が不連続的に上昇したのは3日の09時と21時の間であり、温暖化した時間が地表の場合よりも遅いことは注目に値しよう。上層500mb気圧面(高度約5,700m)での気温はばらついていて、明瞭な変化傾向は認められない。したがって、低層における昇温が4日と5日の降ひょうを伴う雷雨をもたらした有力な一因である、と考えられる。

3. 6月3日の昇温現象

低層で気温が不連続的に変化した6月3日に、低層気象観測を2回行った。観測場所の当センターは高層気象台と約10km離れている。

6月3日の12時40分と15時40分における、高度1,800mまでの気温鉛直分布を図2に示す。高度700m～1,500mにおいて、気温差が約2℃にも達する昇温が12時40分から15時40分までの間に生じている。高度約1,000mと約1,500mとにおいて、12時40分の気温は高層気象台で09時に測られた値に近く、15時40分の気温は高層気象台で21時に測られた値に近い。このことから、その後の状

態を大きく変えた6月3日の不連続的な気温の変化は、約13時から16時までの3時間内に生じたと判断される。

6月3日の昇温現象の特徴としては、本文で示した(1)地表気温が先ず上昇し、地表の昇温より3時間以上遅れて1,000m～1,500mでの気温が上昇したこと、と(2)前日から移動性高気圧におおわれていた3日は一日中晴天が続き(高層気象台での日照時間は11.7時間)、昇温は天気現象の明白な変化を伴わずに生じたこと、の二つを挙げることができる。

4. おわりに

低層大気温暖化が、降ひょうを伴う激しい雷雨をもたらした有力な一因と考えられる例を、具体的に示した。さらに、この低層大気温暖化は3時間内に2℃も昇温するという特異な現象であることを、観測により捕えた。

ここで報告したものは、著者の一人、大韓民国中央観象台春川測候所 權奉來が、1981年3月～同8月の6カ月間日本に滞在中、「雷雨・ひょう・雪等の気象災害防止の研究」の一環として実施したものである。本報告で示したこと以外に、韓国の中部地方の降ひょう日に特徴的な大気鉛直構造を、統計的に解析した。その結果、大気の安定性の指標として広く用いられているショワルターの安定指数などから降ひょう有り判定された日のうち、降ひょう日と無降ひょう日との差異は、

低層大気の安定性にあることが分かった。つまり、降ひょう日は、低層大気の安定性が悪いが、無降ひょう日の半数以上で低層大気は安定である（詳細は国立防災科学技術センター研究報告第26号に掲載予定）。

上に記した韓国の中部地方における降ひょう日に認められたのと同様な大気鉛直構造が、日本の関東地方の雷雨日についても認められる。結局、韓国においても日本においても、雷雨・降ひょうの予測の際に、温暖化の有無や安定性など低層大気の状態も十分に検討すべきである、と考えられる。

低層気象観測に関して、運輸省東京航空局新東

京空港事務所や防衛庁東部方面管制気象隊のご協力をいただき、気象庁高層気象台からは高層データを複写させて頂いた。国際協力事業団からも御援助を得ている。また、6月5日のひょう害調査に際しては、建設省利根川総合管理事務所からご便宜を計って頂いた。関係者のご厚意に深く感謝いたします。

Bong-Rae Kweon ・大韓民国中央観象台

春川測候所長

Tsuneharu Yonetani ・第1研究部主任研究官

国立防災科学技術センターの動き(2)

●台風15号の災害調査

8月23日、千葉県に上陸した台風15号は、関東地方北部の山間部に500mmを越える降雨量を記録し、各地で河川のはんらんによる被害が出た。なかでも、利根川支流の小貝川の堤防決壊により、茨城県竜ヶ崎市をはじめ2市5町村、約3,300haが被害を受け、また、長野県では須坂市の宇原川の土石流により、死者・行方不明10人が出るなど、今回の台風15号による被害は、東日本を中心

に21都道府県で、死者24人、行方不明19人、家屋全壊13戸、床上浸水6,929戸、床下浸水17,442戸、田畑の冠水12,773ha、堤防決壊149カ所、山・がけ崩れ387カ所、被災世帯数7,090世帯、被災者数26,383人（警察庁8月24日16時現在）に達した。

このため、当センターでは、小貝川と須坂市の災害について、主要災害調査の一環として現地調査を実施した。その結果については主要災害調査報告書として刊行する予定である。



土石流に襲われ巨礫に埋った
須坂市仁礼地区
(9月11日撮影)



道路上に設けた水防小屋
茨城県利根町押戸
(8月25日撮影)

1980・81年冬山遭難と天候予測

高橋 博

1980・81年の冬は、38豪雪の年から寒波の周期の18年目にあたり(図1)、4年ぶりに冬らしい冬となった。今冬の正月連休に冬山へくり出した登山者は、長野県内の北・中央アルプス、八ヶ岳だけでも1,500パーティー、1万人以上といわれている。彼らは、風速35m/s、気温-15℃以下という厳しい寒さと、1時間かけても10m前進するのがやっとという豪雪に襲われ、各地で孤立・遭難(昭和55年12月28日から昭和56年1月4日の間に33件、死者5人、行方不明17人)するという昭和43、44年(約20パーティー、150人孤立、死者6人、行方不明12人)以来の騒ぎとなった。東京都山岳連盟では、「この冬の気象資料をもとに、若干の解析を行った結果、登山者が誰でも手に入れることのできる新聞天気図やスキー場日よりなどのデータと、気象庁発表の長期予報などにより、気象や積雪状況に対する十分な事前調査を行ってれば、この数年とちがった今年の冬山の厳しさは十分認識することができ、かなりの遭難事故は未然に防げたかもしれない」と結んでいる。

冬山を志すほどの人なら、今日では、ラジオ天気図を書くほどの気象の初歩的知識はもっているので、あとはそれをもとに予測することができるか、どうかの問題である。筆者も、新聞天気図からの正月連休の天候と寒さ・豪雪の予測にトライしてみたので紹介し、読者の参考に供したい。

1. 気象と降雪の特徴

今冬の気象と降雪の特徴は、(1)北半球の上層500mb面の大気の流れは3波数型が卓越し、その谷の部分が日本の東側に停滞した。そのため、

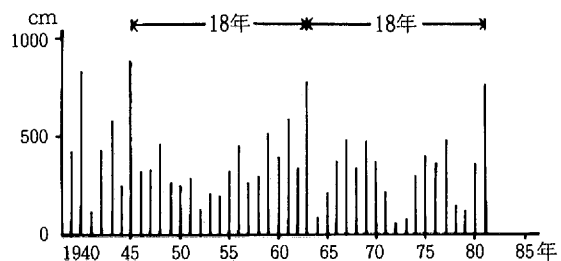


図1 寒波・大雪の18年周期、北陸地方5地点最深積雪合計値、1月(新潟、富山、高田、金沢、福井)〔能登(1981)より〕

北極からの寒気が日本付近に流入しやすくなり、次々と寒気が入ってきて大雪となった。登山面からみると、(2)入山・下山時期にあたる年末年始の各一週間に2回の記録的な大雪が降った。(3)特に1月2日からの雪は、北西の季節風が強い「山雪型」であった(図2)、(4)雪を伴ったはげしい降雪が多かった。(5)雪質も、通常の新積雪の密度が0.05-0.15g/ccであるのに対し、今冬のは0.20-0.35g/ccと重く、水っぽいものであった。(6)降雪量は地域により差が大きく、北陸地方では38豪雪に匹敵する所もあれば、上越地方のように、38豪雪をしのぐ所もあった。なお、38豪雪は里雪型であったが、今冬の雪は里雪型と山雪型の両方の性格がみられた。

2. 天候予測

天気には周期性があるので、一週間前、一カ年前、一年前、あるいは過去に類似の経過を示した年の移り変わりも参照することが出来る。筆者は、気象協会発行の雑誌「天気」の毎日9時の天気図を用いるとともに、山の天気図はないので新潟と

日	月	火	水	木	金	土
7	V→H	8	9	10	11	12
14	H	15	16	17	18	19
21	H	22	23	24	25	26
28	L→H	29	30	31	2	3
4	H	5	6	7	8	9
11	H	12	13	14	15	16
18	BL	19	20	21	22	23
25	H	26	27	28	29	30
30	V→	1/12				

H: 移動高, H1: 北高型, H2: 高気圧の張り出し, SH: 南方洋上高気圧, V: 気圧の谷, >: 吹き出し.
 大文字: 発達した, または強い, 小文字: 弱い, BL: 日本海低気圧, SL: 南緯低気圧, 2L: ニア玉低気圧, SF: 副高気圧.
 コ: 小巻
 →: 通過, 天高: 上新規, 下東原: 風向標が2以下で, 感気圧距: 感気圧距, 感気圧距: 感気圧距, 感気圧距: 感気圧距

日	月	火	水	木	金	土
5/10	H	6	7	8	9	10
12	SF	13	14	15	16	17
19	V	20	21	22	23	24
26	BL	27	28	29	30	31
2	≡V	3	4	5	6	7
9	H	10	11	12	13	14
16	H1	17	18	19	20	21
23	H	24	25	26	27	28
30	V→	1/12				

図2 1980年10月から1981年1月までの天候の変化

東京の天気で代用し、10月から1月までの間の天気図を整理した(第3図)、図をみてもまず気をつく事は、土曜日は毎週のように気圧の谷が通っており、それも発達したものが多く、通過後は冬型の気圧配置となる。月曜日から火曜日にかけては高気圧に覆われることが多く、次の谷が火・水曜日に通過することが多い。木曜日は移動性高気圧や気圧の峰が通り、穏やかな日が多い。金曜日は再び西の方から崩れ出す。この傾向は、入山1カ月前の11月下旬から典型的に現われ、1月下旬まで及んでいる。すなわち、週末は低気圧の発達により、海・山は大荒れとなり、その通過とともに大陸からの寒気の強い吹き出しがあり、それが日・月曜日、時には火曜日にまで及ぶ。週の半ばには気圧配置がゆるみ、時に低気圧の発達することもある。木曜日は気圧配置が最もゆるみ、好天に恵まれることさえある。事実、このような4、5日降っては2日小康を保つという周期をうまく利用したパーティーは、登頂の目的を果たしたほか、下山時にもチャンスに恵まれ、計画どおりの行動が出来た。

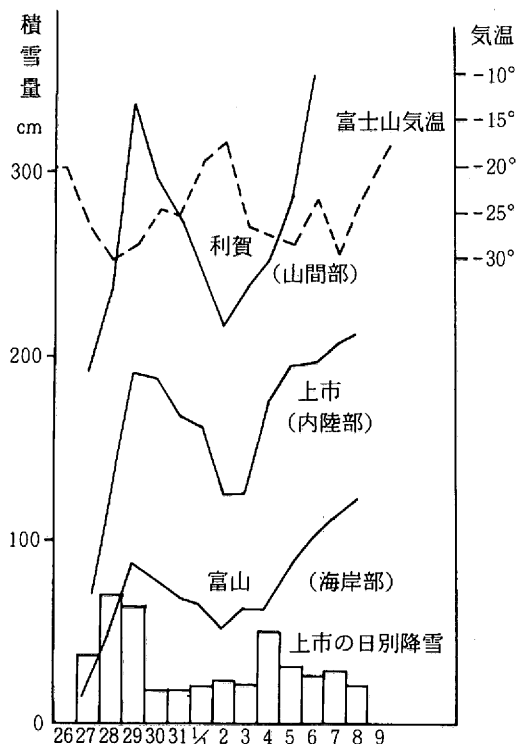
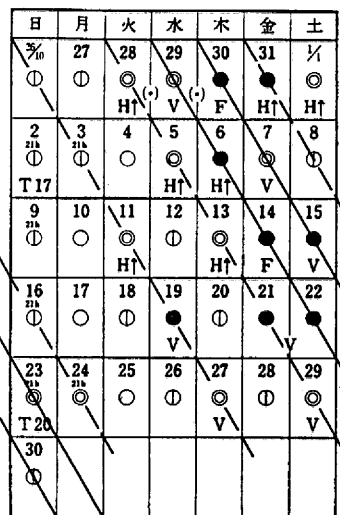


図3 1980年12月26日—1981年1月9日の富山県下各地における積雪量(都岳連資料から)

当センターでは、首都圏の地震予知研究を推進するため、首都の周辺に深井戸を掘り、そこで地殻活動観測を行う施設を建設するにあたり、岩盤の状態を知るために府中市を中心とした東京の西部地域で地震探査を1975年11月30日午前2時から行なった。この年の秋は、9月一ぱい夏のような暑さが続き、例年なら秋りんのあける頃から雨が降るようになり、11月に入っても秋晴れの日が現われなかった。地震探査の日時は多くの制約から容易に変更出来ない事情にあったが、当初案じていた木枯しの吹く気配が現われなかったため、この異常気候のなりゆきを知るため、新聞天気図による天候予測を行なった(図4)。11月22日に大陸に優勢な高気圧が現われ、気圧配置に変化がみられるようになり、29日に気圧の谷が通り、観測時に木枯しの吹く恐れが生じた。そのため、ラジオ天気図を可能な限り作り、その推移を見守っていたところ、24・25日と28・29日に南方洋上に張り出した高気圧が本州の西半分を広くおおい、低気圧の発達もみられず、無風の好天のもとで観測を行うことができた。夜が明けて撤収作業に入った頃



○ 快晴 ☉ 晴 ☉ 曇 ● 雨
H↑ 北高型 V 気圧の谷 F 前線
T 台風
実線：天気の悪い周期
破線：天気のやや悪い周期

図4 人工地震観測時(1975年11月30日)の新聞天気図からの天候予測(高橋 1976)

冬型が推定される。これらの予測資料から、単純に寒冬・暖冬といいきれず、他の資料も考慮すると変動の大きい冬になりそうである」と結んでいる。しかし、能登は「最近の循環の状況と、これまでの成績の良い季節風指数による予想などを重視してまとめると……12月は……2回ぐらい季節風の強まる時期がある。日本海側では、年末頃に雪が降りやすいが、大雪の可能性は比較的少い」と述べている。

11月発表の3カ月予報では、「12月の下旬後半には再び大陸高気圧が発達し、季節風が強く吹く見込みです。日本海側では大雪の降るおそれがあります」と内容も豊かになっている。予報の解析（長期予報資料Vol. 5, No.11）では（図6）、10

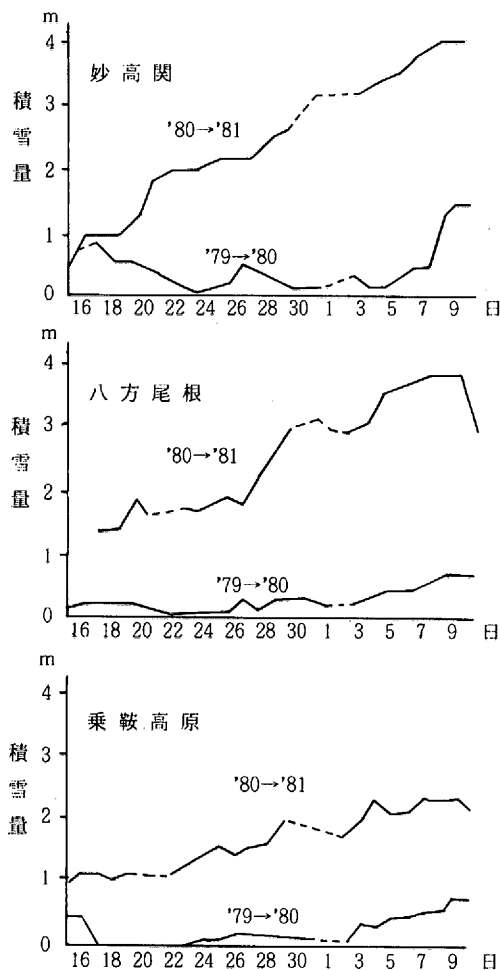


図7 1980年12月16日—1981年1月9日の各スキー場における積雪量の変化（都岳連資料から）

月の15日平均図（500mb）極東域の東西指数の予想調和解析による補外予想などから「前回の3カ月予想や寒候期予報の内容を大きくかえる資料は認められない」としているのが、天候経過類似年として1960年12月—1961年2月をあげている。これは大変重要な示唆であるが、その年は「年末は冬型気圧配置が発達して大雪が降り、交通機関が混乱したが、今年の場合はそれほどの大雪があるとは予想していない」とし、「スキー場などの雪不足が話題となることもあろう」と述べている。能登も前記の中で、「降雪については北半球の7—9月の循環パターンから、北陸や山陰地方ではやや多雪の傾向がみられるが、北陸地方の梅雨量、成層圏の夏期間の長さなどから、豪雪の可能性は少いとし、大雪は1月中旬から2月にかけて、北陸以西の多雪地帯についてだけおそれがある」と述べている。

以上の事を整理してみると、10月の長期予報で、今冬は寒冬型の恐れ、年末低気圧の発達と寒波、まとまった降雪のあることが警告され、11月の長期予報では、年末の強い吹き出し、大雪の警告と類似経過年が年末大雪で混乱した1960・61年型であることが示された。ただ、降雪量はその時ほどではないとしているが、ともかく、これらの警告をしっかりと受け止めていれば、寒さ、強風、豪雪に対する考慮と準備が、入山前に十分行われていたと考える。一方、長期予報のみによって降雪を知ることの困難な事は明らかで、各地のスキー場の積雪量を12月中旬から毎日追ってみると（図7）今冬の降雪が早くから始まり、昨冬に比して圧倒的に多いことから明らかである。

4. まとめ

初歩的な気象知識があれば、新聞天気図と長期予報、さらに日本気象協会発行の「長期予報資料」と「天気」から、資料を整理し、注意深く見れば、今冬の正月の天候の推移と特徴を予測することができ、12月中旬からスキー場の積雪状況を追跡していけば、近年にない大雪の年であること、1960・61年の冬に類似していることが判ったはずである。さらに、行動中にはラジオ天気図と富士山の気象を追跡すれば、天候の推移を適確にとらえ、遭難に至らずに進退できたと思われる。

注意すべきことは、10月20日の予報利用参考メモに次のような注意が与えられていたことである。「今年は日本の著しい冷夏，ヨーロッパの冷春・冷夏，アメリカの熱波など，世界的な異常気候が現われました。9月から10月にかけて北半球の気圧配置は大きく変わりつつあり，西半球では極地方に暖気が北上し，寒気は極東側の高緯度に滞留して，例年とやや異った様子を示しています。今後の経過によっては，この冬の天候にも大きな影響を与える可能性がありますので，今後発表される1カ月予報や3カ月予報に注意して下さい」。さらに，能登は，「冬の強い偏西風の運動エネルギーは秋が深まるにつれて大きくなる極夜地方と熱帯地方の気温差にあり，その意味で『冬の天候は秋に形成される』といえるので，精度の高い冬の予報を行うためには，10月から11月にかけての気象状況を十分検討することが必要である」と寒候期予報の内容に立ち入って述べている。10月20日の寒候期予報とともに，予報のより有効な利用法として，「可能な限り，11月20日に発表される3カ月予報も参照するようお願いしたい」と注意を与えている。

多忙とはいえ，とかく見過しがちなこれらの「注意」を十分読みとる余裕をもって冬山計画をたてて欲しい。ここに述べたことは，冬山の登山者にのみ役立つものではなく，気象の影響を強く受ける業務に携わる人にも役立つことであるので，あえて紹介した次第である。

参考文献

1. 東京都山岳連盟気象委員会（1981）：異常気象報告，今冬の気象について（昭和55年12月—昭和56年1月），東京都山岳連盟気象委員会，38pp.
2. 日本気象協会（1980）：長期予報資料，Vol. 5，No. 9—11
3. 能登正之（1980）：この冬の天候 寒候期予報，天気，24—11，6092—6096p.
4. 能登正之（1981）：1980・81寒波・豪雪の原因と世界の冬，天気，25—3，6226—6227p.
5. 高橋 博（1976）：人工地震観測時の天候予測，地質ニュース，No. 262，26—27p.

Hiroshi Takahashi ・ 第2 研究部

雪処理におけるエネルギー消費

栗山 弘

わが国で最も雪深い地域の一つを通る国道17号線の、長岡から新潟・群馬県境までの、約100kmの道路の除雪量は2,000万 m^3 と推測されている(建設省長岡国道工事事務所)。道路100kmでこれだけであるから、わが国の全積雪地域で処理される雪の量は、ぼう大なものであり、そのために費されるエネルギーの量もまた、ぼう大であるに違いないが、いまだ実態は把握されていない。いろいろな雪処理において、消費エネルギーのいくらかでも節減できれば、現今の社会的要請である省エネルギーに備えるし、除雪経費の低減にも寄与できよう。雪害対策に関係する方々の参考のために、雪処理のエネルギーについて、除雪での身近な例をとり上げて、少し述べてみよう。

1. 雪の圧縮エネルギー

雪国では多くの人々が一度はこんなことを考える。「綿のような雪は、圧縮して小さく固めて、トラックで運べば、よけい運べて能率が上がるのではないか」。確かに降り積ったばかりの新雪は、おにぎりのように握ると、簡単に圧縮されて、固いボールのようになる。しかし、かなり力を入れて固めても、握った人の体重を支えられる程には、固く圧縮されない。このことから、雪を圧縮するには、相当の力が必要なことが伺える。

ここで筆者が低温実験室で実施した雪の圧縮試験から雪の圧縮エネルギーを計算してみる。図1に示すような直径10cmの円形断面の鉄製のモールドの中に、低温室で保存したしまり雪を、一度砕いて篩でふるいながら詰めた雪を、通気孔のあるピストンで、一定の速度で圧縮する。雪柱の高さ10cm、密度 $0.34g/cm^3$ 、圧縮速度 $0.02cm/s$ で、圧縮量 x cmのときの圧縮力 P n (Nは力のSI単位)は(1)式で示される。

$$P = 4.513 \times 10^7 (10 - x)^{-4.65} \dots\dots(1)$$

(1)式を用いて、高さが半分つまり、密度が2倍

の $0.68g/cm^3$ になるまで圧縮するときの仕事(エネルギー)は $319.84N \cdot m$ (メートル法重力単位では $32.62kgf \cdot m$)となる。

$319.84N \cdot m$ の仕事量といっても、多いのか、少ないのか理解しがたいので、他の方法での仕事量と比較してみる。実験に用いた雪の質量は 0.267 kgであり、これと同じ質量の雪を車で運搬する場合のけん引力は、車輪のころがり抵抗係数を 0.025 (スノータイヤ使用)とすると、 $6.55 \times 10^{-2} N$ となる。この力で $319.84N \cdot m$ の仕事をするには、

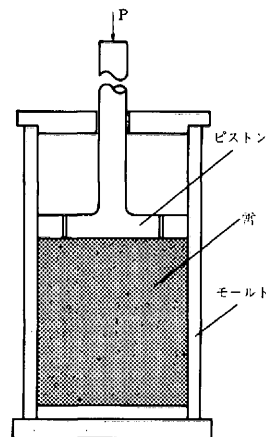


図1 モールドの中の雪の圧縮



写真1 スノーダンプによる雪の運搬

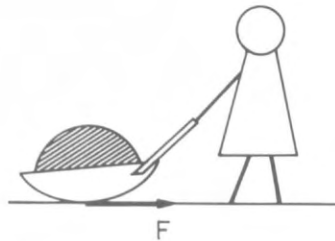


図2 スノーダンプによる雪の運搬

4,900m の距離を運搬すればよい。また雪処理で多用されている、スノーダンプ（写真1）で図2のように雪上を滑らせて運ぶとすれば、すべり摩擦係数を0.2と見積ると、すべり摩擦力 F は0.524N となり、この力で600m 運搬すると、上記の圧縮仕事と同じになる。

以上の計算には、車やスノーダンプ自体を運搬するに要する力や、力の伝達損失が考慮されていないが、密度 $0.34\text{g}/\text{cm}^3$ 、これは冬の最盛期に長岡地方の道路の両側の雪堤の雪の密度に近いものであるが、この雪を体積が半分になるまでに圧縮するに必要なエネルギーで、すでに車ならば約5 km、スノーダンプならば600m 運べることになる。ダンプトラックの雪捨距離が2 km以内（長岡市）、スノーダンプでは50m以内であるので、単に雪を捨てるために、圧縮して一回の運搬重量を2倍にしても、エネルギー利用面で有利にならない。さ



写真2 ロータリ除雪車による除雪

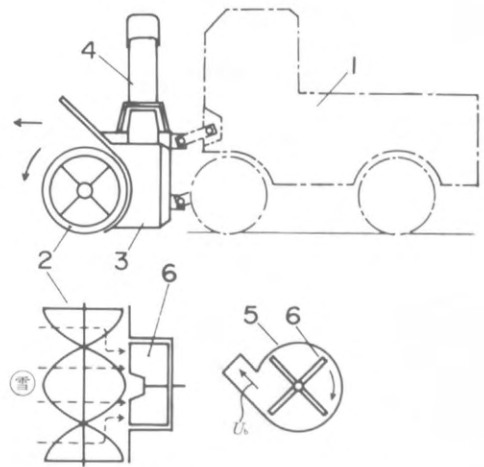


図3 ロータリ除雪車の機構

らに圧縮用の機械を用意しなければならないことを考えれば、実用性がないことが理解できる。

2. 投雪エネルギー

(1) ロータリ除雪車の投雪エネルギー

交通路除雪の90%以上は機械除雪であり、その主流はロータリ除雪車（写真2）による除雪である。

ロータリ除雪車の機構は図3のとおりである。機械の作用は図3において2のオーガで積雪を破碎して、3のブローヤに送る。ブローヤは回転するブローブレード6で雪を加速し、周速度 U_b で投雪口から雪を空中へ飛ばす。雪は放物体となって遠方に飛ぶ。この除雪で消費されるエネルギー

の比率は、雪の破碎に35%、投雪に55%、車の前進その他に15%程度と見積られている。実際は積雪の中に硬い雪が混っていれば、雪の破碎エネルギーの比率が大きくなるなどの変動は常にある。三つの部分が発揮している動力の和が、エンジンの最大出力になっていけば、機械を有効に使用していることになる。

ここではエネルギー消費の最も大きいブロウの投雪エネルギーを検討してみよう。雪は $Ub\text{m/s}$ の速度で空中に飛び出すので、空气の抵抗がないものと仮定すると、飛び出した雪の水平到達距離 S_m は、 $S = Ub^2 \sin 2\alpha / g$ である。 α は飛出雪の水平面とのなす角度であり、 g は重力の加速度である。このとき質量 $M\text{kg}$ の雪に与えられる運動エネルギー E_k は、 $E_k = MUb^2 / 2 \text{ J}$ ($J = \text{N} \cdot \text{m}$) である。よって、雪を S_m 飛ばすときのエネルギーは、 $\alpha = 45^\circ$ とすると(2)式で与えられる。

$$E_k = \frac{1}{2} M S g \dots\dots\dots(2)$$

一方地上で S_m 移動する場合のエネルギー E_m J は、雪を容れた容器の搬路上の摩擦抵抗係数を μ とすると、(3)式で与えられる。

$$E_m = \mu M S g \dots\dots\dots(3)$$

(2)、(3)式から $E_m = 2\mu E_k$ となり、 $\mu = 0.5$ のときはどちらの方法で運搬しても、消費エネルギーは同じになる。実際は前述のように、スノーダンプでは $\mu = 0.2$ 、車では $\mu = 0.025$ 程度なので、スノーダンプや車で運ぶ方が投雪よりはエネルギー消費面で有利である。人力除雪でも同様のことがいえる。すなわち雪をスコップで投げるより、スノーダンプで滑べらせて運ぶ方が、60%も消費エネルギーが少なくてすみ、それだけ疲労が少いことは、雪国では多くの人々が経験している。

上の計算で雪の移動は、投雪より水平移動がエネルギー消費で有利なことがわかったが、実際の道路除雪ではどう使いわけているのであろうか。

道路上の雪は横方向に移動させればよいが、機械を横向にして、一般の車の走路を塞ぐような作業はできない。したがって除雪車は雪を横方向に押し流すような除雪板を、車の前に装着し、一般の車と同じに走りながら雪を横方向に除去する。

この方法では両側の雪の壁の高さが1m近くなると、作業ができないので、あとはロータリ除雪車の投雪に依存せざるを得ない。

除雪機械はその機械が持ついろいろな効果、たとえば雪質への適応性、仕上りの良否、消費エネルギー、作業コストなどを総合的に評価して、作業性の良否が決定される。ロータリ除雪車は雪の移動では、他の方式よりエネルギー消費で不利であるが、除雪機械としての総合評価は高い。56年豪雪ではこの機械の使用の有無が、道路除雪の成否を決定づけた。

(2) ブロウ内のエネルギー損失

前項では投雪について述べたが、ここではブロウ内で、雪がエネルギーを付与される過程でのエネルギー損失について述べよう。

雪がブロウに進入して、 Ub の速度でブロウから飛び出すまでに、質量 $M\text{kg}$ の雪が受ける、投雪の有効エネルギーは、前述のように $E_k = MUb^2 / 2 \text{ J}$ で示される。実際は雪がブロウに入ってから出るまでに、雪同志あるいは雪とブロウ各部の摩擦や衝突などで消費されるエネルギーが加わる。それを幹線道路用のロータリ除雪車（1時間除雪

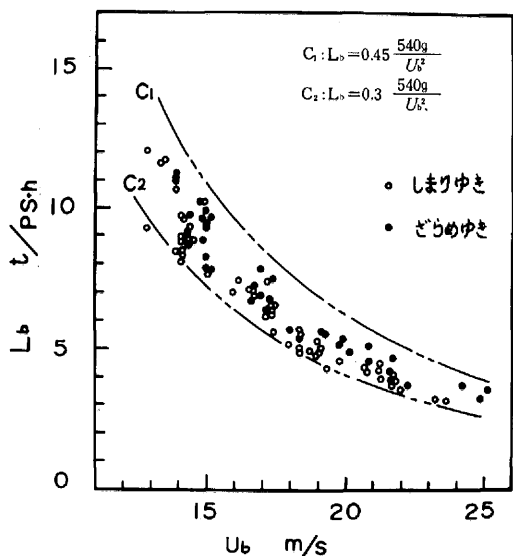


図4 投雪速度 (Ub) と除雪能率 (L_b) の関係

質量約1,700t)で実測した結果で説明しよう。図4(栗山・渋谷, 1978)は自然積雪を対象とした除雪試験の、投雪速度 U_b とブロウの仕事率(動力)の関係を示したものである。 L_b は時間当りの除雪重量をブロウの仕事率(単位、メートル馬力)で除した値である。ブロウのエネルギー損失がなければ $L_b=540g/U_b^2$ であるから、実測値が曲線 C_1, C_2 の間にあることは、ブロウの消費エネルギーの30~45%が、有効投雪エネルギーであることになる。換言すれば、無効エネルギーは有効エネルギーの1.2~2.3倍にもなっているのである。これは決して小さい値とはいえない。ロータリ除雪車が主力機械であることを考えると、この損失エネルギーの低減の研究が必要といえる。

ちなみにロータリブロウのエネルギー効率の30~45%というのは、内燃機関の熱効率や火力発熱の熱効率の値に近い。偶然の一致か、別に根拠があるのか、興味ある事柄である。

3. 機械的雪処理と融雪のエネルギー

雪処理には、熱を加える融解除去する方法と、機械的な仕事で除去する方法がある。前者では融解水は流れ去るので、作業が省力化されるし、できればよい。条件が整えばどしどし利用したい方法であるが、消費エネルギーの面では後者に歩がある。ここではそれを検討しよう。

簡単にするために、機械的処理は、先に述べた投雪を例にとる。投雪エネルギーは、(2)式から熱量表示(cal)で次のようになる。

$$E_k = \frac{MSg}{2 \times 4.186} \dots\dots\dots(4)$$

一方温度 0°C 、含水率0の質量 $M\text{kg}$ の雪を融解して、 0°C の水にするに必要な熱量 $Q\text{cal}$ は次のとおりである。

$$Q = 8 \times 10^4 M \dots\dots\dots(5)$$

(4), (5)式から

$$Q = \frac{6.83 \times 10^4}{S} E_k \dots\dots\dots(6)$$

の関係を得る。実作業では投雪距離は20m前後な

ので、 $S=20$ とすると、 $Q=3,415 E_k$ となり、同じ質量の雪を除去する場合は、融雪エネルギーは、機械的に20m投雪するエネルギーの約3,400倍となる。あるいは、同じエネルギー消費ならば、20m投雪では融雪の3,400倍の質量の雪を除去できることになる。

次はスノーダンプでの運搬と比較しよう。運搬のエネルギー(cal)は(3)式から次のようになる。

$$E_m = \frac{\mu MSg}{4.186} \dots\dots\dots(7)$$

(5), (7)式から

$$Q = \frac{3.41 \times 10^4}{\mu S} E_m \dots\dots\dots(8)$$

の関係を得る。 $\mu=0.2$ 、 $S=10\text{m}$ とすれば、 $Q=17,050 E_m$ となり、同じ質量の雪を処理するのに、融雪は運搬の約17,000倍のエネルギーが必要となる。あるいは、同じエネルギーでは、運搬は融雪の17,000倍の量の雪処理が可能ということになる。この比較には、機械の動力伝達における損失エネルギーや、スノーダンプの運搬エネルギーが見積られていない。実作業では種々のエネルギー損失があるので、機械処理と融雪のエネルギー消費の差はもっと縮まっている。

以上のことから、融解除去は機械的除去に比し、如何にエネルギー消費が多いかが理解できよう。このために、道路除雪では、条件が整って地下水を利用する融雪が可能のところ以外は、峠附近の急勾配の凍結し易い場所、横断歩道橋の階段を電熱融雪にしている。それ以外はエネルギー消費が少なく、経費の安い機械除雪である。

石油危機以来自然エネルギーの利用が積極的に進められている。除雪ではすでに、地下水の散水融雪の形で自然エネルギーの利用がなされている。この方式の発祥の地長岡市では、冬期最盛期の地下水使用量は、24時間で40万 m^3 に及び、うち10万 m^3 が100kmの道路の融雪用に、残り30万 m^3 のうち相当の量が、屋根、家周辺、駐車場などの融雪に使用されているとみられる(長岡市の調査)。地下水が地面に出たときの温度が約 13°C であるから、10万 m^3 の地下水の融雪可能熱量は、13億kcalとなる。これはドラム缶約800本の灯油の発熱量に相当する。毎日お金を出してこれだけの石油を燃し

て、道路の融雪はとてもできない。自然の恵の大きさであろう。信濃川を擁うし、地下水に恵まれている長岡市でも、例年2月になると地下水位は相当低下する、ということは、それだけ簡便で安価に、融雪に利用され易い形で熱を地下水から得ている証左であろう。現今自然エネルギーの利用の研究が進んでいるが、簡便で安価で且つ悪影響を伴わない利用技術の開発が望まれる。

参考文献

栗山弘・波谷満(1978)：ロータリ除雪機のブ
ロワ動力。雪氷, Vol. 40, No. 4, p. 16-23.

Hiroshi Kuriyama ・ 雪害実験研究所

センター新刊

- 日本における100年確率日雨量と年降水量の長期変動, 防災科学技術資料, 第58号, 72頁, 昭和56年7月

1900年以前から観測が行なわれている全国の気象官署における月最大日降水量と月降水量について解析を行なった結果, 次の結論を得た。(1) その年までの50年間の年最大日降水量から評価した100年確率日雨量は, 降雨災害に対する現在の防災体制にとって, 無視しがたいほど大きい変動をしている。(2) 産業活動が活発で人口も多い, 関東地方から関西地方までのベルト地帯に位置する大都市と, このベルト地帯に水資源を供給する地域で, 年降水量は激しく変動している。

- 平塚沖波浪観測資料(3)(1979.9-1980.8), 防災科学技術研究資料, 第59号, 127頁, 昭和56年7月

波浪観測塔で, 1979年9月から1980年8月までの間に定時観測した, 波高・風向・風速・気圧・潮汐の記録を集録するとともに, これらの記録について季節ごとの特性を調査した。

- 内水被害発生箇所資料(昭和42年-52年), 防災科学技術研究資料, 第61号, 185頁, 昭和56年7月

最近の内水被害は「水害統計」(建設省)の一般資産等の被害額でみると, 全水害の50%に達している。このような状況のもとで, 水害防止対策を論ずるにあたり, 被害の現状を把握し, 対策を調査する一資料とするために, 昭和42年から52年までの11年間について, 内水被害の発生日月, 被害箇所名, 被害箇所数について全国52水系別に整理し, 被害箇所の市町村名を掲載してある。

- 地殻傾斜観測資料集(3)1980, 防災科学技術研究資料, 第62号, 123頁, 昭和56年7月

静岡県岡部町・中伊豆町・韮山町, 神奈川県南足柄市, 山梨県塩山市及び千葉県銚子市・富山町に設置した9地殻活動観測施設について1980年の地殻傾斜, 地中温度, 気圧, 雨量の記録を掲載してある。

動いている火山島「硫黄島」の監視（続）

熊谷 貞治

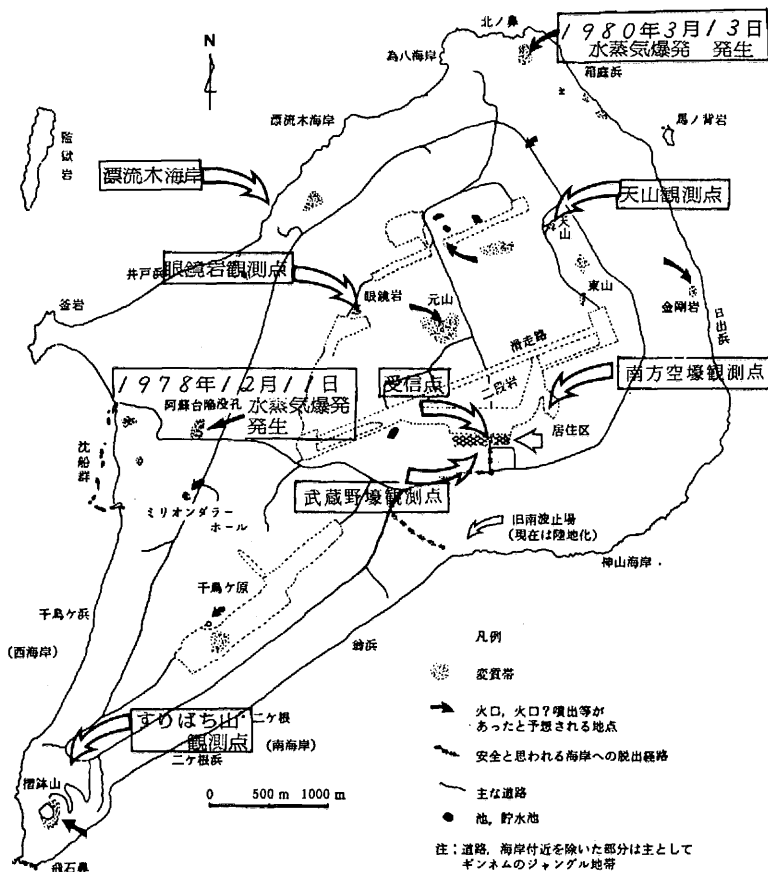


図1 火山列島硫黄島の概要図

火山活動の監視には、測地学的方法、電磁気学的方法、熱学的方法、地球化学的方法と地震学的方法がある。この方法の中でも、火山活動監視には地震学的方法が最も多く用いられ、日本で常時観測を行なっている22火山の全部で実施している。また、世界の火山監視方法を昭和49年（1974年）から昭和53年（1978年）の5カ年に火山噴火が発生した火山のうち常時観測を行なっているのは26火山（日本を除く）であるが、これもまた、地震観測を全ての火山で実施している。その他電磁気的方法（磁力計）で定期観測を実施しているが11火

山、測地学的方法（傾斜計、重力計、水準・辺長測量）を用いているのが11火山、熱学的方法が2火山であった。これらの例をみて明らかのように火山活動の監視方法では地震学的方法が主流を占めている。それは、火山噴火予知で最も重要なことはマグマの挙動を正確に把握することであるが、地震学的方法によれば、地震、微動の観測により、震源位置、波形・規模などからマグマ溜りなどの挙動を推定でき、また火山噴火の数時間前など直前にハーモニック・トレモア（harmonic tremor）と呼ばれる微動がしばしばハワイの火山やフィリ

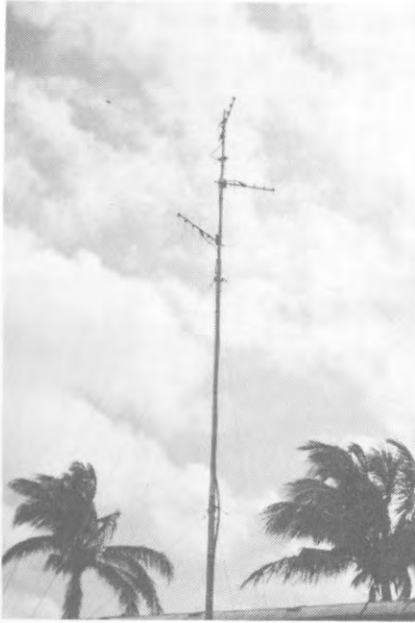


写真1 受信点に設置されたアンテナ群，最上部は地上高10mある．アンテナはそれぞれ左から天山，眼鏡岩及び摺鉢山の地震観測点に向いている．支柱の周辺に見えるのはココヤシの木．

ピン（ルソン島）のタール火山に出現することがよく知られているからであろう．さらに，他の方法と比較し，割合簡単に地震の常時観測が実施できるからであろう．

硫黄島も例外ではなく，昭和51年（1976年）に火山活動の監視に地震の常時観測（1地点，3成分，10Hzで10,000倍）が防衛庁により開始された．しかし，1地点による観測のため地震回数，初期微動時間等を知ることができても震源は明確に知ることができなかった．すなわち，震源を決めるために必要な大森係数を，不発弾処理による爆破地震を利用し2.5と仮定し，初動方向の合成と初期微動時間から震源を推定するにすぎなかった．そこで，火山活動を地震学的方法から知る上でやはり地震の多点観測により震源を決める必要があると考え，特別研究「海溝型巨大地震の予知に関する研究」の「火山活動観測研究」において昭和55年度及び昭和56年度に予算化して機器の整備を図った．その結果，昭和55年度には地震観測点を3カ所選定し，一定期間地震観測を行い，昭

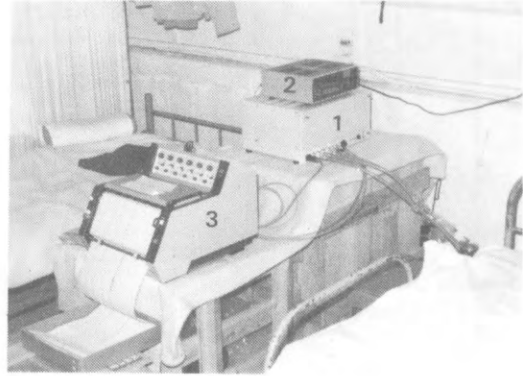


写真2 地震の集中記録装置．1が受信装置，2が水晶時計，3が記録計で3地点の地震を記録している．臨時観測であったため木箱の台を利用するなど苦勞のあとがみえる．

和56年度に常時観測へ移行することとした．この島において地震の多点観測は度々実施されたことがあるが，観測点相互の距離はいずれも数百mと短く，元山，摺鉢山の両火山地区において同時に行われたことはなかった．

今回選定した地震の観測点は，元山火山を対象とし，新設2カ所（天山，眼鏡岩），既設1カ所（武蔵野壕），摺鉢山火山を対象として1カ所（摺鉢山）を図1のように配置した．武蔵野壕を除いた3地点はすべて無線式テレメータ（400Mc帯）により玉名山地区で受信し，集中記録した．使用した地震計は固有周期の0.3秒の動コイル型の上下動，出力は0.4V/kineの高温型（120℃まで正常に作動）である．倍率は記録紙上で10,000倍（10Hz）．観測は昭和56年（1981年）2月25日から3月3日までの7日間である．武蔵野壕に設置されていた防衛庁の地震計は，昭和56年6月末に南方空壕（図1に位置を示す）に移設された．これは，武蔵野壕の地点は居住地区に近く，日中は観測倍率を10,000倍から1,000倍に感度を下げざるを得なかったからである．ノイズレベルは武蔵野壕（地表下約8m）が180 μ kine，南方空壕（地表下約22m）は26 μ kineと約7分の1である．南方空壕の玉名山観測点はケーブルで約500m離れた気象室まで伝送して現在，常時観測が行なわれている．

さて，今回の地震観測の結果，次のことが明ら

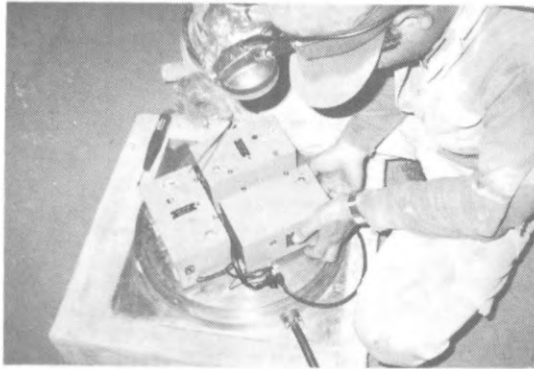


写真3 南方空壕（旧日本海軍の南方諸島海軍航空隊主計科分隊の壕）に設置中の地震計（3成分）。地表下約22mもあり、ノイズレベルは、低いときは15 μ kine程度。地震計設置点付近の気温は47 $^{\circ}$ C、10m程奥へ入ると65~75 $^{\circ}$ Cにも達する。この暑い中での作業はかなり辛かったと思う。しかし、昭和53年7月の遺骨収集作業、昭和19年頃の掘削作業、それに較べれば……。この地震観測点が、今後展開する地震観測網の基準となる予定。（写真提供：明豊エンジニアリング）

かになった。

(1) 眼鏡岩観測点だけ地震が観測され、最も近いわずか1.8km離れた天山観測点では記録されなかった例を図2-Yに示す。これは、いわゆるA型の火山性地震であるが、初期微動時間が検測できないほど短く、観測点のごく近傍に発生した地震と考えられる。これはまた各観測点間の地質構造が断層か節理により破碎されていることが推定され、そのため地震波が減衰して伝播しないものと考えられ

る。

(2) 摺鉢山観測点だけが記録した火山性微動の例を図2-Zに示す。これだけ卓越した火山性微動が4.9km離れた眼鏡岩及び4.2km離れた武蔵野壕の観測点でも記録されていない。これは摺鉢山と元山をつなぐ千鳥ヶ原には未固結の砂岩が、かなり断層等で破碎されていることを示すものである。千鳥ヶ原には両火山の不等隆起により非常に多数の断層が地表にみられるが、この断層が摺鉢山に発生する

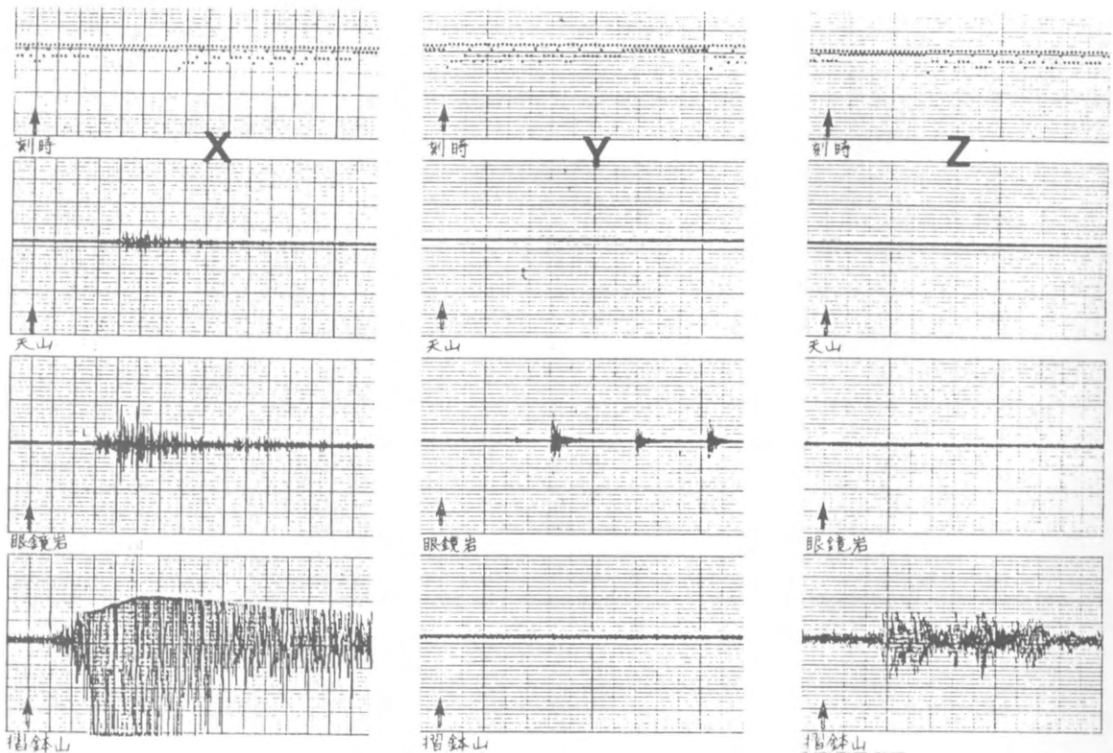


図2 硫黄島の地震記象例

火山性微動を減衰し伝播させない深さにまで達しているらしいことが判る。千鳥ヶ原の地下構造がどのような状況にあるのか、物理探査が行われていない現在、詳細は不明であるが、火山性微動の伝播状況から前述のような推定ができる。また、これまで武蔵野塚の一地点観測で摺鉢山火山の監視も可能と考えていたが、今回の観測により摺鉢山付近で発生する火山性微動を必ずしも観測していないことが判った。従って摺鉢山の火口の中心から約350mの地点に地震計を設置することにより摺鉢山の火山活動監視には有力な手段となろう。

(3) 天山、眼鏡岩及び摺鉢山の3観測点で記録された地震の例を図2-Xに示す。地震の立上り時刻からみて摺鉢山付近で発生した地震と思われる地震波が段々と速くへ伝わっていく様子がよく判る。今回は3カ所分だけ一つの記録計で集中観測したが、将来は南方空壕観測点と併せ4カ所の地震を集中記録し、震源を決めるなど地震活動から火山活動を推定することに役立てる予定である。

(4) 地震が頻発したあと、水蒸気爆発が発生した例を図3に示す。水蒸気爆発は爆発音が聞えた昭和55年(1980年)3月13日20時58分頃と推定される。爆発の前の地震は19時14分、その次は20時47分と48分、52分、54分に2回、57分、爆発後の地震は21時02分、08分、17分、35分、38分でこの後は22時31分であった。これらの地震の初期微動時間は1秒前後で観測点から震央まで3.5kmあり、大森係数2.5では2.5kmとなりとどかない。また水蒸気爆発であるから地表面近くで爆発したものと考えられるが、記録された地震はA型の火山性地震で爆発時の20時58分前後にも表面波の卓越した地震は記録されなかった。これらのことは①水蒸気爆発の位置がA型の地震を発生させるような深さで発生した。②大森係数が小さいなどの問題点が考えられる。今回の水蒸気爆発発生日とその前4日の地震回数が97個、昭和53年(1978年)12月11日の水蒸気爆発日を含む5日間には68個であった。前者は北地区の北ノ鼻のマッド・ピット、後者は西海岸

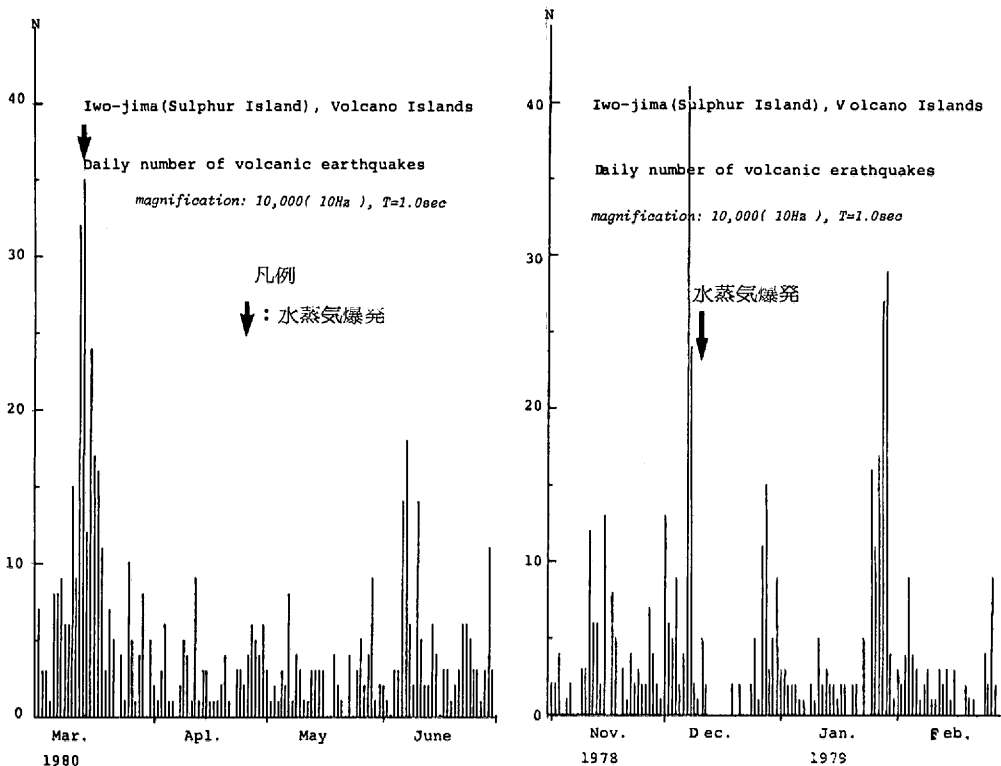


図3 水蒸気爆発発生時前後の硫黄島における日別地震回数を示す。



写真4 漂流木海岸の漂砂による海退現象を示す。写真(L)は昭和55年5月15日、(R)は昭和56年7月1日にそれぞれ撮影。写真Lの矢印1,2が写真Rの1,2に対応する。砂の深さは、1~2m程度と推定される。

の阿蘇台陥没孔と場所は異なるが、この島の平均日別地震回数が3~4個であることを考えると、地震活動が活発な時期に水蒸気爆発が発生している。昭和51年(1976年)3月の地震観測開始以来このような例は2回しかない。また、5日間の累計地震回数が121個あっても水蒸気爆発が発生しなかった例もあり、今後は事例を待って、地震の多点観測の結果と併せてこの問題に関して検討を加えて行く予定である。

次にこの島で観測された有感地震についてみる。有感地震は昭和47年(1972年)10月12日以降観測されており、昭和56年(1981年)7月31日までに8回記録された。発生状況を次に示す。(硫黄島付近を除く震源は気象庁が決めたもの)

1974年6月30日06時25分 震度Ⅰ 硫黄島付近
 1975年7月8日04時30分 震度Ⅱ 父島近海
 1976年10月16日10時08分 震度Ⅱ 硫黄島付近
 1980年3月13日20時58分 震度Ⅰ~Ⅱ 硫黄島付近
 1980年4月27日06時28分08秒 震度Ⅰ 父島近海
 1980年4月27日06時28分21秒 震度Ⅱ 父島近海
 1980年12月20日08時35分 震度Ⅰ 鳥島近海
 1981年5月18日02時42分 震度Ⅰ 硫黄島付近
 約9年間に発生した有感地震の半分は、硫黄島以外の父島近海、鳥島近海付近を震源とするもの

で、最大震度はⅡであり、硫黄島付近を震源とする地震も最大震度はⅡである。また年平均では1個弱で、東京の20~30個に比較すると非常に少ないといえる。

次に、硫黄島に起った最近の漂砂現象について少し述べてみる。

写真4は図1の矢印で示した漂流木海岸であるが、昭和55年(1980年)5月に海であったところが、昭和56年(1981年)7月には陸地となり砂でおおわれている。これは、約1年間で除々に陸地化したのではなく、数日間という短期間に漂砂により我が国土の拡大が行われた。しかし、写真4-Lの海岸線から約80m沖合まで砂浜化していたのが、また一夜にして30mぐらい削り取られてしまったのである。どこから砂がやってくるのか謎である。硫黄島は度々このように海岸線が変化することがみられるため、海岸付近に設置する建物等構造物の建設には十分注意しなければならない。当センターでも、写真4-Lに見える岩に潮位計を昭和56年度に建設する予定であったが、できなくなってしまったのである。

Teiji Kumagai・第3研究部主任研究官

サンフランシスコ周辺の地質と地すべり

田中耕平

1. はじめに

カリフォルニア、この言葉から連想するものはゴールド・ラッシュでしょうか。それとも映画のハリウッドかしら。青い海と輝く太陽、作物が豊かに実る広大な土地。カリフォルニアを語る時、この土地に夢を託した多くの人達の姿がそこにあります。私も過去の人達と同様に期待と不安に包まれながら、カリフォルニアに向いました。サンフランシスコ空港に降りたって、時差ボケでボーとした目に飛び込んできたのは懐しい塚原さんの顔と、アメリカで過ごした一年間にあらゆる面で世話になった野口さんの顔でした。それから一年、色々なことがあり、色々なものを見ました。書きたい事は沢山ありますが、その中の一端をここに紹介させていただきます。

2. カリフォルニア州の地形と地質構造

まず図1を見てください。この図にはカリフォルニア州の大略の地形区分が示されています。この図で目を引くのは、北西から南東に伸びる海岸山脈 (Coast Range)、グレート・バレー (Great Valley)、シエラ・ネバダ (Sierra Nevada) 山脈の三列の帯状の配列です。図2の3にそれらを北東-南西方向で切った模式断面図を示します。この図から、海岸山脈 (Coast Range) とシエラ・ネバダ (Sierra Nevada) 山脈の間に、グレート・バレー (Great Valley) の低地があるという関係が理解できます。カリフォルニア州の北部と南部ではこの三列の帯状配列の傾向はくずれ、北部ではクラマス (Klamath) 山地の変成岩とカスケード

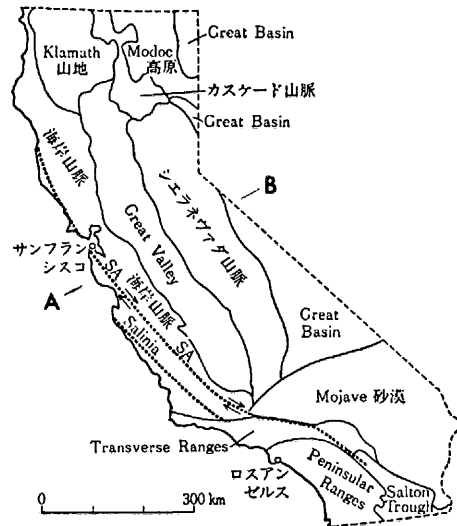


図1 カリフォルニア州の地形区
点線SAは San Andreas 断層
A-Bは断面線
都城 (1979) を修正

(Cascade) 山地の火山岩が隣り合っています。南部でもモハベ (Mojave) 砂漠の花崗岩類とサン・アンドレアス (San Andreas) 断層の西側の花崗岩類が接しています。

ここでは主に中部地域の三列の帯状配列を中心にサンフランシスコ周辺の地質の成り立ちを考えてみましょう。

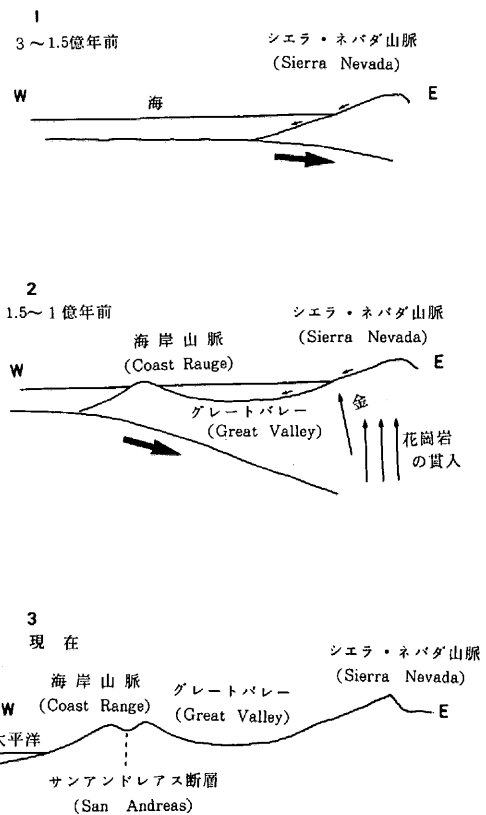
まず今から3~1.5億年前(地質時代というなら後期古生代から中期中生代)、まだカリフォルニア州の大半は海の中にありました。だがすでにこの時代にシエラ・ネバダ山脈は海上に顔を出していました。もっとも現在のように高い山脈となったのはもっと後の時代のことです(図2の1)。こ

の時代にシエラ・ネバダで削られた土砂が、当時まだ海の底であったシエラ・ネバダの西麓に堆積を続けていました。この時代に堆積した地層の下部は後に変成を受けてカラベラス (Calaveras) 変成岩となりましたが、上部は強い変成を受けずにマリボサ (Mariposa) 頁岩となりました。

そして1.5～1億年前 (ジュラ紀から白亜紀)、今までシエラ・ネバダの西縁で沈み込んでいた海洋プレートが、シエラ・ネバダより130 kmほど西側で沈み込むようになりました (図2の2)。このためプレートの沈み込む場所で少し盛り上がりがありました。これが後の海岸山脈に発展していきます。この初期の海岸山脈とシエラ・ネバダ山脈の間には海の底で大きな谷が形成されました。これが後のグレート・バレーです。ここには北側と東側から多くの土砂が運ばれ、グレート・バレー・シークエンス (Great Valley Sequence) という名の地層が形成され始めました。海洋プレートの沈み込み場所の移動とほぼ同じ時期に、シエラ・ネバダの下からマグマが貫入し、花崗岩の大きな岩体を形成しました。この岩体は、現在シエラ・ネバダ山脈の中核をなしています。ゴールド・ラッシュの時に掘られた金は主にこの花崗岩マグマの貫入に伴ってシエラ・ネバダ山脈の西麓の断層に沿って胚胎した鉱脈に含まれていました。

次の大きな変化は2.1千万年ほど前 (第三紀の中新世) に起きました。それは太平洋の中で海洋プレートを生産していた海嶺そのものが、北アメリカ大陸の下にもぐり込み始めたということです。このため海岸山脈の位置で起きていた海洋プレートのもぐり込みは起きなくなり、太平洋プレートが北アメリカプレートに対して北に移動していくという相対的な運動だけが残されました。その結果、太平洋プレートに乗っている部分、すなわちサン・アンドレアス断層より西側の部分が、段々と北に向かって移動していくという現象が起き、それが現在にまで引き継いでいます。すなわち、現在のサン・アンドレアス断層の西側に分布する部分は、はるか南にあった地塊が移動してきているため、断層の東側の部分とは直接には関係がありません。

さらに今から5～2百万年前 (第三紀鮮新世) にかけてシエラ・ネバダから運ばれた膨大な土砂が、グレート・バレーを埋め尽しました。そのためグレート・バレーを構成している地層のうち、



下部の地層は海成ですが、上部の地層は陸成です。

3. サンフランシスコ周辺の地すべり

次に以上を踏まえた上で、サンフランシスコ周辺の地すべりについて見てみましょう。まずサンフランシスコ周辺の地質図を図3に示します。主にサンフランシスコ周辺は海岸山脈中に位置しますが、一部にグレート・バレーの要素を含みます。またサン・アンドレアス断層が南東から北西に走り、中部カリフォルニアの縮図ともいえるところ です。

この地域でもっとも特徴的な岩石はフランシスカン (Franciscan) 変成岩で、これは海岸山脈に分布しています。この変成岩は主として硬化したグレイワケ砂岩からできていますが、頁岩、チャート、石灰岩、玄武岩、蛇紋岩なども含んでいます。かなりの部分が海岸山脈という海洋プレートの沈み込む場所に存在したため、破碎されてメランジ (Mélange) と呼ばれる構造を呈しています。次

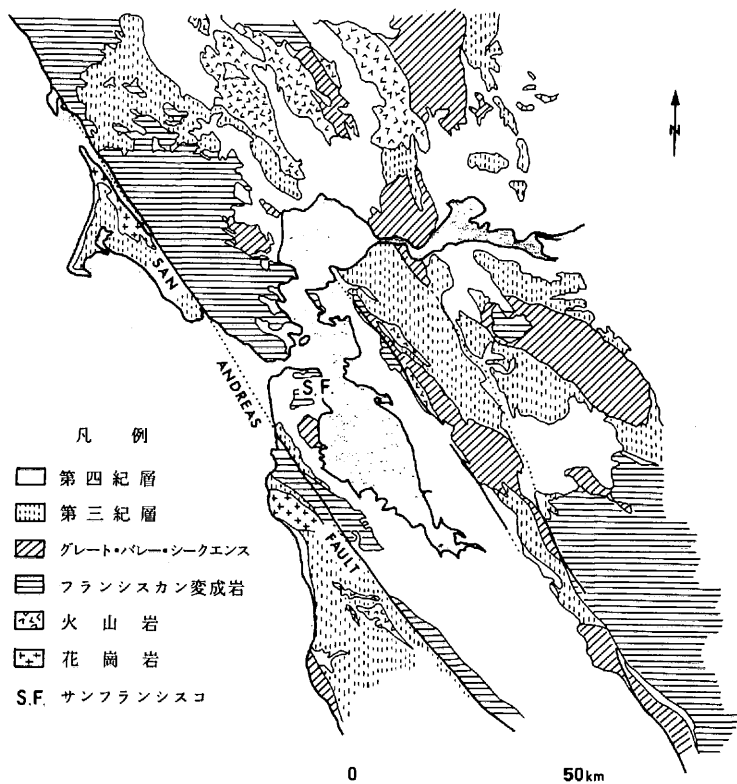


図3 サンフランシスコ周辺の地質図

に海岸山脈とグレート・バレーの境界付近を中心にして、海岸山脈の周辺にグレート・バレー・シークエンスが分布します。これは主に中生代の海成の砂岩、頁岩、礫岩からなります。さらにグレート・バレー・シークエンスの上には、第三紀の堆積岩が重なりますが、これには陸成と海成の2種類があります。海成の第三紀の堆積岩はサン・アンドレアス断層の西側にも分布します。なお海岸山脈の低地は、さらに新しい時代の未固結の砂や泥で埋められています。

堆積岩とは別に第三紀に噴出してきた玄武岩を主体とする火山岩が、サンフランシスコ北方に分布します。またサン・アンドレアス断層の西側には、はるか南から運ばれてきたシエラ・ネバダに続く中生代の花崗岩も分布しています。

図4はサンフランシスコ湾岸地域南部の地すべりの地の等頻度図(Isopleth map)です。この図から、地すべり地の頻度はフランシスカン変成岩、第三紀層分布地域で高く、花崗岩とグレート・バ

レー・シークエンスの分布地域で少いことが判ります。また、この図には含まれませんが、北方の火山岩地域の地熱変質帯でも沢山の地すべりが報告されています。

日本では古く、小出博によって地すべり多発地域として「破碎帯」「第三紀層」「温泉」の三地域があげられました。この考え方は修正ならびに細分化されながらも、その本質的な部分は現在でも通用しています。サンフランシスコ周辺の各々の地域をこれと較べて見ると、フランシスカンが「破碎帯」、第三紀層はそのまま「第三紀層」、ガイザー(Geysers)を中心とする地熱地帯が「温泉」に匹敵し、日本とカリフォルニアの地すべり多発地域には明らかに共通性があります。また、それぞれはサンフランシスコから車で2,3時間以内のところであり、身近に恰好の研究対象をもてる米国地質調査所の研究者達をうらやましく思いました。

写真1はフランシスカン変成岩帯中の地すべりです。道路の切取によって発生したもので、道路



図4 サンフランシスコ湾岸南部地域の地すべり地の等頻度図
R. H. Wright and T. H. Nilsen (1974)を簡略化

が破損していないことから、すべり面は道路面より上にあると考えられます。周囲の地質はメランジで、そのため周辺の地質構造を明らかにすることはできませんでした。構成物は岩屑で、礫の岩質はグレイワケの砂岩がほとんどで、一部に蛇紋岩を含みます。

一般に、フランシスカン変成岩中の地すべりは、大きなものは地層が厚い場所で起きやすく、フロー(Flow)* はメランジに多いと言われています。

次に第三紀層中の地すべりは図4からも明らかのようにオリンダ(Orinda)地区とラ・ホンダ(La Honda)地区に顕著です。ここではオリンダ地区のアースフロー(Earth Flow、構成物が土であるFlowの意)の写真を示します。オリンダ層から形成された粘土には、モンモリロナイトが40~50%も含まれていて、この含有量の高さがオリンダ層中に地すべりを多くしているといわれています。ラ・ホンダ地区の地すべりは米国地質調査所のG・ウィゾレック(G. Wiczorek)氏によって詳しく調べられていて、この地区の地すべり構成物の内部摩擦角、粘着力、透水性の低さとモンモリ

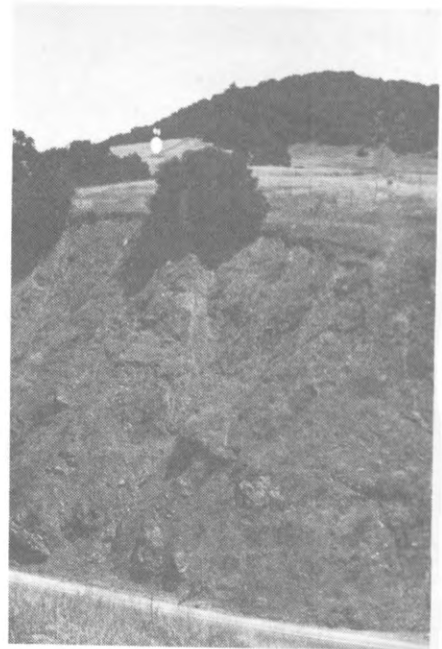


写真1 フランシスカン変成岩帯中の地すべり

*地すべり(広義)の一形態で流動と訳されている。

ロナイトの高い含有率が指摘されています。

ガイザー地区は現在、カリフォルニアにおける地熱発電の中心地です。種々の地熱発電のための建造物が地すべりのため被害を受けていて、そのため企業サイドによる地すべりの研究の盛んな所です。ここでは熱水変質域と地すべり発生域がオーバーラップしていることが指摘されています。

4. おわりに

このようにサンフランシスコ周辺でみられる地質と地すべりの関係の多くは、日本で見られるものかなり良い一致を示しています。また個々の地すべりについて、研究者達と話し合った結果でも、その現象には共通点が多く、私達が日本で行っている研究の汎用性が高いことを知りました。今後、アメリカだけでなく世界各国の地すべりの情報を入手したいと考えています。

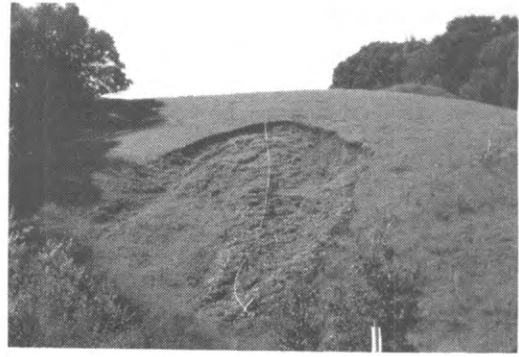


写真2 オリンダ地区のアースフロー
(Earth Flow)

最後に機会を与えてくれた方々に深く感謝するとともに、海の彼方に出来た新たな友人達に心からサンキューの言葉を送りたいと思います。

Kohei Tanaka・第3研究部地表変動防災研究室

防災科学技術

No. 44

昭和56年11月25日 印刷

昭和56年11月30日 発行

編集兼 国立防災科学技術センター
発行人 茨城県新治郡桜村天王台3丁目
T.E.L. (0298) 51-1611(代)

印刷 前田印刷株式会社東京支店
