

# 電磁気的手法による流体駆動型 (Fluid-Driven) 地震の監視

笹井洋一 (東大地震研)

## Monitoring the Fluid-Driven Earthquakes by Means of Electromagnetic Observations

Yoichi SASAI (Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo)

### 1 はじめに

平成8年度から地震予知計画の一環として、「短期的地震前兆の発現機構解明のための実験的観測研究」というテーマで、共同研究が始められた。岩石実験では、ステイック・スリップ実験を中心とした、震源核形成過程の解明、野外観測では、地震・測地(GPS)・坑井歪計等の力学的観測と、電磁気・地下水観測を、特定の地域に集中して、「岩石実験から示唆される短期的前兆」をつかまえようというものである。この研究は、直前予知手法として論争の的であるVAN法の検証も課題に掲げているので、電磁気観測が目玉になっている。岩石実験の方は大中医教授(東大地震研)が中心になって、着実に進められている。野外観測は笠原稔教授(北大理)がプロジェクト・リーダーで、北海道の2地域(弟子屈地区・日高地区)をテスト・フィールドとして始まり、筆者は電磁気観測の世話係を引き受けた。

「短期的地震前兆を捉える」研究は、地震予知研究計画発足以来、様々な手法で試みられてきた。地震予知においては、力学的手法(地震・地殻変動観測)が中心となるのは当然であり、我々は地震発生領域の力学的変形に伴う現象を電磁場で見ようとしている。従って、現在の地震予知研究の到達点を取り入れた研究の方向を探る作業は、不可欠である。本稿では、「短期的地震前兆の発現機構解明」研究で想定している「地震発生メカニズム」と、その検知手法を述べ、皆さんの批判を仰ぎたい。

### 2 流体駆動型地震とは?

地震が、主として圧縮応力下で起こる、岩石のせん断破壊であることは、良く知られている。とりわけ被害を及ぼすような地震は、地殻の弱面である断層がずれることで発生する。そこで大地震の発生条件は、ほぼ均質な岩石に圧力を加えて壊す破壊実験よりも、あらかじめ作っておいた弱面(切断面)を張り合わせた試料に、圧力を加えてすべらせるステイック・スリップ(固着すべり)実験によって、詳細に調べられるようになった。その結果、「震源核」と呼ばれる準静的なすべり領域が発生して、不安定すべり(=地震)に成長するという、普遍的な地震発生モデルが提唱されるようになった。これについては、岩石実験によって、このモデルの確立に大きく寄与した、大中(1991)の解説がある。震源核形成過程を「見る」ことが出来れば、物理的根拠のある直前予報が出せるはずである。

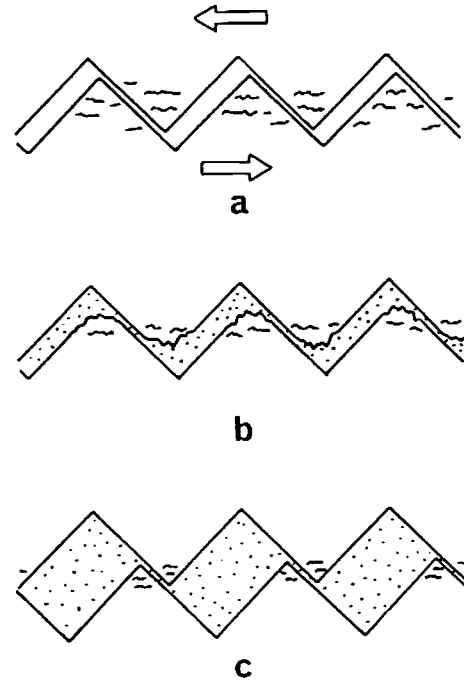
ところで破壊過程の詳細に立ち入らなくても、既存の活断層がすべる場合には、地殻内の差応力が断層面の破壊強度を超えて、地震が発生するという、巨視的な見方が成り立つ。この意味では、地震の発生原因は、次の3つの型に分類できることが、岩石の破壊実験によって、すでに1960年代に確立されている(例えば、JAEGER, 1968)。

(a) 応力駆動型(stress-driven): 断層面のすべりを食い止めている部分(アスペリテイ Asperity と呼ばれる)の力学的強度を、周囲の巨視的せん断応力が上回って、この部分が壊れて、断層面全体がすべってしまう。

(b) 応力腐食型 (stress-corosion) : ある一定の応力が掛かった状態で、上述のアスペリティが、主として水の浸透による化学変化によって、強度の低下を起こして壊れる。

(c) 流体駆動型 (fluid-driven) : 間隙流体圧が増加して、アスペリティの接触部分が少なくなり、地殻応力を支えきれずに壊れる。

(a) は通俗的な地震発生モデルと言ってよい。プレート境界のように、歪み速度の大きい場所での、地震発生を理解するのに役立つ概念である。(b) はプレート内地震 (もしくは内陸地震) の発生過程を理解する鍵である。この場合、断層に加わる巨視的応力は不変であっても、断層が動いてしまう。一般に応力腐食割れが起こるには、極めて長い時間がかかる。従ってプレート内地震の発生間隔が非常に長く、かつ前兆が現れにくいのは、歪み速度が非常に小さい (a) の場合なのか、あるいは (b) の場合なのか、区別はし難い。(c) の場合は、地殻内の流体の力学的作用で、破壊が起こる。内陸の大きな被害地震や、群発地震の有力な発生原因と考えられる。(b) と (c) はいずれも、地殻内の水が主役なので、共に流体駆動型と言ってよいかも知れないが、あえて区別して、(c) のみを流体駆動型と呼ぶことにする。第1図に、この3種の地震発生モデルについて、断層面のアスペリティが破壊される様子を、模式的に示した。



第1図

1995年兵庫県南部地震 M7.2 では、広域にわたる異常地殻変動は観測されず、(b) のタイプの地震と思われたが、(c) タイプである可能性もある。それはこの地震に先行して、猪名川群発地震が起こっていること (炭酸ガスの豊富な温泉地域で起こった群発で、松代地震と似た様相を示す)、本震の震源域で  $V_p/V_s$  速度比が大きい (水の存在?) などの観測事実があるからである。典型的な (c) タイプの地震と考えられるのは、松代群発地震と 1984 年長野県西部地震 M6.8 およびそれに前後する王滝村群発地震、あるいは 1974 年以来続いている伊豆半島東部地域の地震群である。

個別の地震の発生メカニズムだけでなく、内陸地震の活動度の時間的、空間的変動の原因についても、従来は (a) タイプの地震発生モデルの枠組みで、考察されることが多かった。例えば、ある地域の地震活動に数 10 年間隔で、静穏期と活動期が交互に訪れる例 (北海道東部地域、伊豆半島、伊豆諸島海域)、伊豆半島で見られた震源の北上傾向、あるいは b 値の時間変化や空白域の出現などである。これらの現象は、その全てとは言わないが、応力場のゆらぎよりも、間隙流体圧の変動を考えた方が、合理的に説明できる場合が多い。

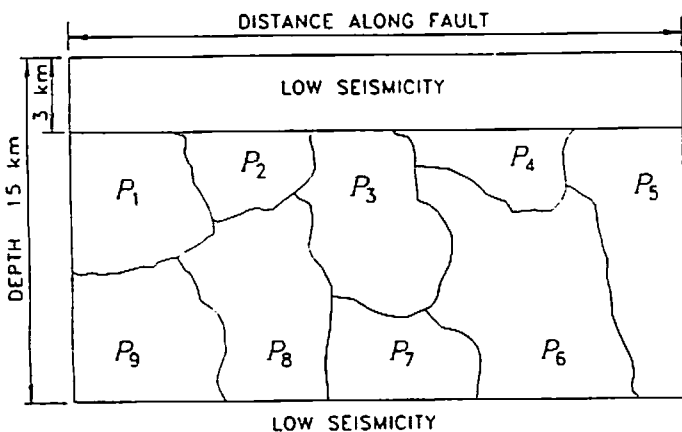
上述した地震発生原因のタイプ分けは、断層面の強度 (大中 (1991) の用語で言えば、「破壊成長抵抗」) の空間分布、あるいはその時間変化に着目したものである。これらのいずれの場合でも、地震が発生するには、震源核形成モデルで想定されるプロセスをたどる、と思われる。ただし、破壊成長抵抗の分布を知ることが極めて難しい (a) や (b) の場合に比べると、(c) の場合には、高圧の水が浸透した場所で、震源核が形成されやすいであろう、と想像できる。

### 3 サン・アンドレアス断層の地震

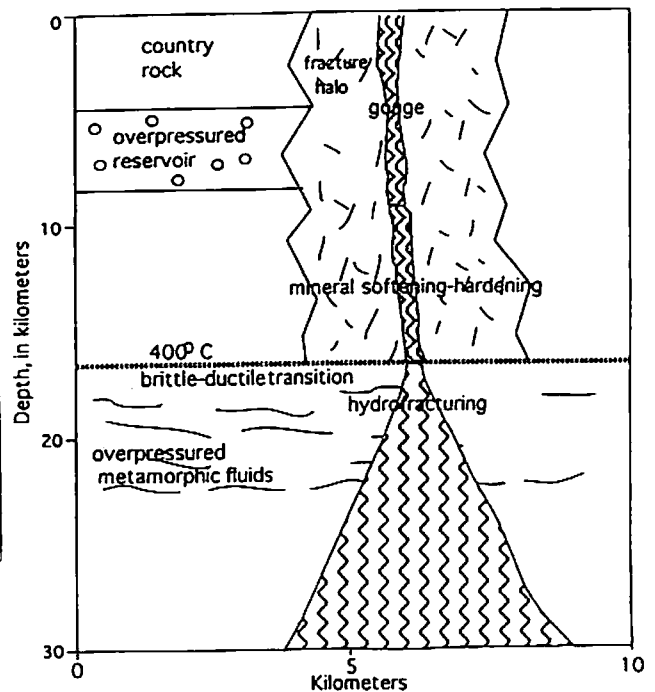
アメリカ合衆国カリフォルニア州の海岸付近を走るサン・アンドレアス断層は、北米プレートと太平洋プレートの境界をなすトランスフォーム断層として、その構造、地震発生機構等が最も良く調べられている。1906年サン・フランシスコ地震で大きな被害をもたらした部分の南方延長に、常時クリープしている所があり、さらにその南には1854年フォート・テフォン地震 M8.4 を起こして、現在は固着している部分がある。このクリープ=固着の遷移地域に、パークフィールドという小さな村があり、30年おき位に規則正しくM6クラスの地震が発生している。ここは米国の研究者にとって、地震予知のテストフィールドであり、様々な観測が行われている。

STUART and TULLIS (1995) は近い将来再発すると予想されるパークフィールド地震について、その発生予測モデルを発表した。彼らは前節の震源核形成モデルの立場に立って、実際観測されている地殻変形を説明できるような、断層面の破壊構成法則のパラメータ分布を求め、来るべき本震の発生時期を予測している。このモデルの変位場を用いると、ピエゾ磁気効果でどの位の地磁気変化が期待されるかも、計算できる(STUART *et al.*, 1995)。このモデルには、水などの流体の寄与は全く考慮されていない。1980年代にサン・アンドレアス断層の応力場の調査が進み、この断層の地震発生の仕組みを、応力の枠組みだけで説明するのは、極めて困難であることが判ってきた。この節では、この話題を紹介したい。

ZOBACK *et al.* (1987) はサン・アンドレアス断層周辺の水圧破碎実験から、最大主応力の方向が、断層走向にほとんど直交するくらい高角度であることを見出した。しかも断層に沿って、熱流量の異常や熱水活動がほとんど見られない。断層面が周囲と同じ均質な岩石であれば、圧縮軸に対して45度より低い角度でせん断破壊面ができるはずで、サン・アンドレアス断層自体がすべることはあり得ない。従ってこの断層には非常にせん断破壊強度の小さい物質が詰まっていて、少しのせん断応力がかかってもすべってしまうこと、またそれ故に発生する摩擦熱も少ないので、熱流量の異常が現れない、と解釈される。ところがせん断強度の弱い典型的な物質として、モンモリロナイトのような(断層で生成される)粘土鉱物を想定しても、熱異常を発生しないほど、強度は弱くない。このことから断層には、水(せん断破壊強度ゼロ!)が詰まっているのではないかと、という考えが生まれた(LACHENBRUCK, 1980)。



第2図



第3図

断層内の水が繋がった状態でなければ、せん断破壊強度は低下しない。つまりこの水の圧力は、岩盤圧と同程度でなくてはならない。ところがサン・アンドレアス断層は横ずれ断層であるから、中間主応力が岩盤圧、最大と最小主応力が水平である。従って水圧は最小主応力よりも大きいので、水圧破砕が起こり、断層内に閉じ込められた水は逃げ出してしまふ。これがサン・アンドレアス断層のパラドックスと呼ばれるものである。

BYERLEE (1990, 1993) と RICE (1992) は、この困難をうまく解決するようなモデルを提案した。BYERLEE (1990) は当初、粘土鉱物に見られる「非 Darcy 流」現象（ある水圧差以上にならないと、多孔質媒質中の水流（Darcy の法則に従う）が起こらない）に着目して、水圧が高まっても水圧破砕を起こさない仕組みを考えた。その後彼は、大地震に伴って、断層破砕帯に周囲から水が流入して飽和し、圧密の過程で水圧が高まると共に、水の周囲にシリカが沈殿して、水を封じ込める Sealed Compartment（水袋と呼ぶべきか？）が形成される、というモデルを提案している。BYERLEE (1993) によれば、このような水袋は、断層の深部から浅部にむかって、次々と沢山、形成される（第 2 図参照）。そしてこの水袋が破れることで、地震がトリガーされる。

一方 RICE (1992) は、断層帯の中心部で非常に間隙水圧が高く、そのへりに向かって急激に減少するような水圧分布を考えることで、水圧破砕を起こさずに、小さなせん断応力で断層がすべるモデルを提案した。中心部の高い水圧は、下部地殻（もしくはマントル）から常に水が供給されることで、維持される（第 3 図参照）。つまり Byerlee モデルでは、地震直後を除いて、水の流れは無いのに対して、Rice モデルでは、下部地殻からの定常的な水の注入がある。しかし BYERLEE (1993) が指摘するように、両者のモデルは一見非常に異なるように見えるが、力学的には同等であって、高圧の水の供給源が違っているにすぎない。特に Rice のモデルは、すでに YUKUTAKE (1985) が日本における地殻比抵抗研究グループの成果を総括した上で提案した、Aqua-Duct モデル（大規模活断層＝下部地殻からの水の通路）とほとんど同じと言ってよい。

JOHNSON and MCEVILLY (1995) はパークフィールド地域の地震観測から、本当に「水袋が破れることで地震が誘発されている」ことを示す、地震学的証拠があるかどうかを、詳細に検討している。地震波トモグラフィによれば、1966 年パークフィールド地震の震源域では、 $V_p$  自体が遅いのには  $V_p/V_s$  比が高い（1.9 位）ことが判明している。これは  $V_s$  が非常に小さいことを意味し、水の存在を支持する。また 3 次元地震波速度構造を考慮したモーメント・テンソル・インバージョンから、M4 クラスの地震で非ダブル・カップル成分が大きく、震源域の体積減少（水袋が破れた？）を示唆する結果を得ている。さらに EBERHART-PHILLIPS *et al.* (1995) は、地震波と比抵抗の探査を組み合わせ、断層内における水の所在を、精度良く確かめる方法について議論しており、我々には大変参考になる。

FENOGLIO *et al.* (1995) は Byerlee モデルをもとに、sealed compartment が次々と破れて、断層がすべる場合に期待される、高周波の電磁場発生シミュレーションを行った。この計算で最大の疑問は、非常にゆっくりした水の浸透流で、発生することが確かめられている界面動電現象が、仮定したような高速の流れでも起こるのか、という点である。岩石実験による検証が欲しいところである。FENOGLIO *et al.* (1995) は、Loma Prieta 地震に際して、ULF 帯で観測された電磁放射 (FRASER-SMITH *et al.*, 1990) はこのモデルで説明可能である、としている。

Byerlee のモデルは、サン・アンドレアス断層のパラドックスを解消するために考え出されたもので、どの位普遍性を持つものか、よく分からない。一方 Rice のモデルは、サン・アンドレアスでなくとも成り立つように思われる。地震に伴う電磁放射の発生機構として、従来は、乾いた環境（高比抵抗）で、劇的な応力変化を想定したモデルが多い。これらのモデルは、前節での (a) 応力駆動型の地震発生機構を、暗黙の内に前提としている。しかし力学的観測からは、本震前の急激な応力変化は、ほとんど否定されているのに加えて、これらのモデルでは、本震に伴う電磁場変化がなぜ観測されないのか、という疑問にも答えるのが難しいように思う。今後は、湿った環境（低比抵抗）で、水の動きで生成されるような電磁放射メカニズムにも、注目する必要がある。

## 4 北海道の地震と電磁気観測

最初に述べたように、我々は北海道の2地区で、力学的観測と電磁気観測を組み合わせた、地震予知の基礎研究を始めている。ひとつは弟子屈を中心とした北海道東部で（弟子屈地区と呼ぶ）、もうひとつは日高山脈南部（日高地区と呼ぶ）である。島村英紀・森谷武男著「北海道の地震」によれば、「弟子屈付近は内陸直下型地震の巣」であるし、日高地区にはやや深い、M6-7クラスの被害地震が時折発生する。（ちなみにこの本は、北海道および周辺の地震活動を、一般向けに分かりやすく解説したものであるが、我々にとっても大変示唆に富んだ内容で、観測の苦労話などは実に面白い。）

弟子屈地区では、1938年屈斜路湖の地震 M6.1 で、発光現象を含む様々な異変が目撃された。1959年 M6.3 から1967年 M6.5 まで、群発地震を含んでMが6から7クラスの地震が5つ続いた。それ以降、M4を越える浅い地震は、ほとんど起こらなくなった。島村・森谷によれば、この地域の地震の活動期・静穏期が、千島海溝ぞいの巨大地震発生を契機として、交代しているように見えるという。北海道東部は上嶋・他(1991)によって、ネットワークMT法で比抵抗構造が求められており、下部地殻が低比抵抗層となっている。広帯域MT観測によって、より詳細な比抵抗構造を調べる研究が、平成8年度から始められた。その速報は、本論文集の西田・他の報告を参照されたい。

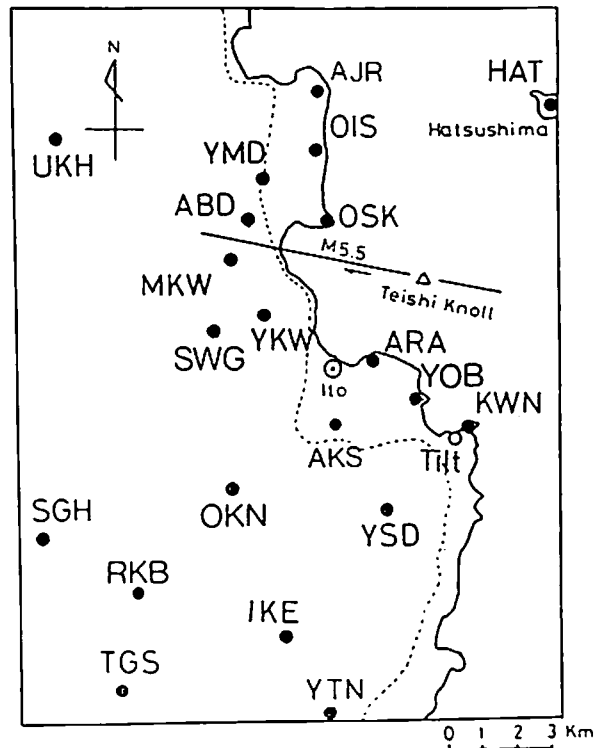
日高地区は弟子屈地区に比べても、人工的な電磁気ノイズが小さい。ここでは地震に関連する電場の異常が、検知され易いと期待できる。ここの短基線の電場データに、時折VAN法でActivityと呼ばれている矩形波状の変化が記録される。我々は何らかの人工ノイズではないかと疑っている。いずれにしても、その原因をつきとめることで、SESと呼ばれる電氣的シグナルのうち、ある種のものについての知見は得られるであろう。

## 5 伊豆半島東部地域を電磁気グループのテスト・フィールドに

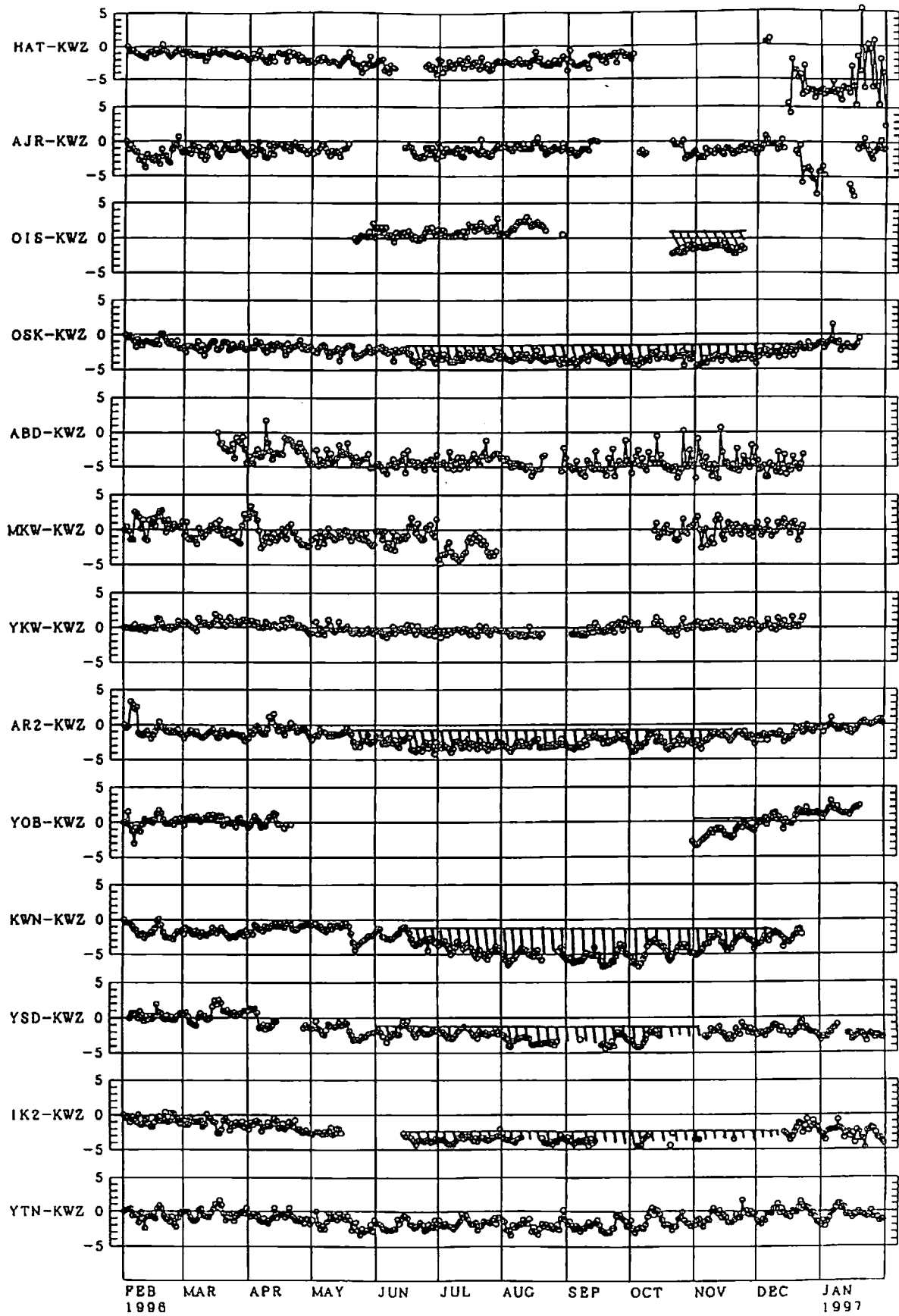
1974年伊豆半島沖地震 M6.9 以来、伊豆半島東部地域では活発な地殻活動が続いている。とりわけ1989年7月の手石海丘噴火以来、東大地震研、東工大理学部、京大防災研および同理学部では共同して、プロトン磁力計を20ヶ所ほどに展開して、全磁力の連続観測を行い、最近NTT回線を利用した長基線の電場測定も開始した。第4図にプロトン磁力計の観測点分布を示す。

1996年10月に伊東市汐吹崎付近で、活発な群発地震活動が起こった。この活動に約4ヶ月先行して、将来の震源域に近い7ヶ所で、全磁力が減少した（第5図）。また震源域に含まれる4ヶ所の地電位電極で、自然電位が最大70mV位、増加した。群発地震の発生と同時に地殻隆起が始まったが、全磁力の減少域は隆起域と一致している。

1989年手石海丘噴火以降、1993年5-6月、1995年9-10月、そして1996年10月と、大体同じ場所で、大規模な群発活動が起こっている。この3回の事例ではいずれも、群発に数カ月先行して全磁力減少が、複数点で観測されている。しかし1995年から開始された長基線電場測定では、1995



第4図



第5图

年には大きな年周的变化が観測されているものの、1996年の群発地震の時ほどには、群発地震との対応は明確ではない。また1997年3月3日から、M5クラスを含む群発地震が始まった。これは今までと異なり、1996年の全磁力減少がかなり急速に回復した時点で、地震が発生している。全磁力の先行的変化について云えば、今までに3度あったことが、4度目には起こらなかった訳である。まことに、地震予知は難しい。

全磁力変化は、顕著な群発地震に伴うものばかりではない。1989年11月から翌年2月頃にかけて、伊東市の宇佐美付近を中心に、局所的な膨張が起こった。また1993年10月から94年3月にかけて、内陸部のろくろば峠を中心とした隆起(第2次冷川隆起)が発生した。これ等と見事に対応する、正負の対をなすような全磁力変化が、5-6ヶ所の観測点で観測されている。これらの全磁力変化はいずれも、地殻やや深部(深さ16km付近)に、水平に分布する薄いマグマ・シート(この深さに、地震波の顕著な反射面が存在する)から分離した熱水と、それと混ざった地下水が浅部に上昇し、間隙流体圧増加による群発地震を発生させ、また隆起の圧力源となっていることを、強く示唆する現象と考えられる。浅部に湧き上がって来る流体が、温度上昇をもたらす場合は、熱消磁効果が卓越して全磁力が減少する。温度が変化しない場合は、ピエゾ磁気効果が卓越して、正負の異常を生じる。そして自然電位の変化は、上昇してきた水が正の電荷を運んできたことによる、流動電位現象で説明される。

伊豆半島東部は、直流電車を始めとする、人工的電磁気ノイズの大きい所である。このような地域でなお、地殻活動に伴う明瞭な電磁気シグナルが観測されることは、我々を勇気づけてくれる。地殻流体の所在を探る最も有効な方法のひとつである比抵抗探査では、自然電磁場を用いるMT法が使えない。人工電流源を用いる方法のうちでも、探査深度の大きいTDEM(時間領域電磁)法に期待する所が大きい。しかし大規模な観測を実施するのは、伊豆半島で現在電磁気観測を続けている少人数のグループの手に余る。野島断層の観測が一段落した(?)のを機会に、伊豆を電磁気グループ全体のテスト・フィールドとして、地震予知の基礎研究を行うことを呼びかけたい。当面の課題は、

- 1)人工電流法による比抵抗探査で、地震の発生源であり隆起の圧力源である、地殻流体の所在を探る、
- 2)プロトン磁力計、長基線と短基線の電場測定の詳細観測で、地殻活動に伴う電場磁場シグナルの検知能力を上げる手法(ハード、ソフト共)を開発する、
- 3)人工電流法による比抵抗の連続測定、電磁放射観測、ボア・ホール磁力計による観測、その他の実験的野外観測を展開する、

こと等であり、最終的には伊豆の地殻活動の発生機構を解明する、ことを目指したい。

## 参考文献

BYERLEE, J., Friction, overpressure and fault normal compression, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 2,109-2,112, 1990.

BYERLEE, J., Model for episodic flow of high-pressure water in fault zones before earthquakes. *Geology*, **21**, 303-306, 1993.

EBERHART-PHILLIPS, D., W. D. STANLEY, B. D. RODRIGUEZ and W. J. LUTTER, Surface seismic and electrical methods to detect fluids related to faulting, *J. Geophys. Res.*, **100**, B7, 12,919-12,936, 1995.

FENOGLIO, M. A., M. J. S. JOHNSTON and J. D. BYERLEE, Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zones: Application to the Loma Prieta ULF emissions. *J. Geophys. Res.*, **100**, B7, 12,951-12,958, 1995.

FRASER-SMITH, A. C., A. BERNARDI, P. R. MCGILL, M. E. LADD, R. A. HELLIWELL and O. G. VILLARD Jr., Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1,465-1,468, 1990.

JAEGER, J. C., 「弾性・破壊・流動論-工学および地球科学への応用-」, 共立全書, 1968.

JOHNSON P. A. and T. V. MCEVILLY, Parkfield seismicity: Fluid-driven?, *J. Geophys. Res.*, 100, B7, 12,937-12,950, 1995.

LACHENBRUCH, A. H., Frictional heating, fluid pressure and the resistance to fault motion, *J. Geophys. Res.*, 85, 6,97-6,112, 1980.

大中康誉, 震源核形成過程と地震直前前兆現象, Conductivity Anomaly 研究会 1991 年論文集, 53-67, 1991.

RICE, J. R., Fault stress states, pore pressure distributions, and the weakness of the San Andreas fault, in EVANS, B., and WONG T. F., eds., Earthquake mechanics and transport properties of rocks, Academic Press, 475-503, 1992.

島村英紀・森谷武男, 「北海道の地震」, 北海道大学図書刊行会, 224pp., 1994.

STUART, W. D. and T. E. TULLIS, Fault model for preseismic deformation at Parkfield, California, *J. Geophys. Res.*, 100, B12, 24,079-24,099, 1995.

STUART, W. D., P. O. BANKS, Y. SASAI, and S-W. LIU, Piezomagnetic field for Parkfield fault model, *J. Geophys. Res.*, 100, B12, 24,101-24,110, 1995.

上嶋誠, 歌田久司, 西田泰典, Network-MT 法について, Conductivity Anomaly 研究会 1991 年論文集, 39-51, 1991.

YUKUTAKE, T., A review of studies on the electrical resistivity structure of the crust in Japan, *Earthq. Pred. Res.*, 3, 345-364, 1985.

ZOBACK, M. D. and 12 others, New evidence on the state of stress of the San Andreas fault system, *Science*, 238, 1105-1111, 1987.