

## 乗富先生と CA 研究 In memory of Professor K. Noritomi

行 武 毅 Takesi Yukutake

Professor K. Noritomi passed away on June 27, 2011. This article is about his great contribution to the activity of the electromagnetic study group of Japan.

乗富一雄先生が2011年6月27日に享年87歳で亡くなられた。1970年代に電磁気グループは危機的状態にあったが、先生のご努力によってグループの研究を軌道に乗せることができた。先生のご功績を偲び当時のグループの研究とその成果について略述する。

### 1. 1970年代の CA グループの状況

電磁気グループいわゆる CA グループは力武常次先生の統括のもと研究を進めていたが、1970年代に力武先生が渡米されグループは極めて困難な状況に陥った。当時すでに地震予知研究計画は実施されていた。しかし現在グループが実施している構造探査などの研究は含まれていなかった。唯一含まれていたのは、力武先生の指導のもと山崎氏がいわゆる山崎メータを用いて実施していた神奈川県油壺における凝灰岩の比抵抗連続観測のみであった。その他の観測研究を地震予知研究計画の中に取り込むことを計っても「電磁気は地震予知に役立たない」といって取り合って貰えない状態であった。「地震予知計画は事業であるから実績のあるものだけが採り上げられている。計画に組み込まれるためには科研費などで成果を挙げる必要がある」との事であった。

### 2. 科研費自然災害科学特別研究

当時科研費には特別枠として「自然災害科学特別研究」があった。これは地震・火山に限らず自然災害を対称とする研究で多くの研究機関、研究者が参加して実施されており、姿なき研究所などと称されていた。一般の科研費で地震予知研究を行う事は困難であったので、乗富先生が代表者となって大変な努力をされ、「自然災害科学特別研究」の中に電磁気グループの研究を立ち上げることができた。これには「自然災害科学」に深く関与されていた東北大学高木教

授（当時）のご尽力に負う所が大きかった。

採択されたのは「昭和50年度：地震活動と電磁気異常現象との関連に関する研究」であった。この研究計画は岩石実験をも含む広範囲のものであったが、精力の大部分は断層構造の解明に注がれた（乗富，1981）。順次山崎断層、丹那断層、千屋断層と構造探査を実施した。これら断層構造の研究特に最初に実施した山崎断層研究は電磁気グループの起死回生を狙った乾坤一擲のプロジェクトであったと云ってよい。その結果、活断層の特徴として、

- 1) 活断層が低比抵抗帯になっていること
- 2) 磁気異常帯が存在すること
- 3) 自然電位の異常が認められる

の大きな発見がなされた。特に低比抵抗帯の発見はこの研究計画の主力を尽くした研究成果である。なおこの研究計画の口火をきった山崎断層の研究は京大防災研究所の当時の岸本教授、尾池助教授の協力によってスタートすることができた。

これらの成果をもとに、さらに地震学の浅田敏教授や文部省の飯田益雄氏などの尽力もあって電磁気グループの研究が地震予知研究計画に組み込まれることになった。今日では電磁気構造探査が地震波構造探査と並んで地震予知計画の大きな柱になっているのをみると、まさに隔世の感を深くする。現在実施している共同観測の原型は山崎断層観測にある。今日のCAグループ研究の基礎を築くのに果たされた乗富先生の功績の大きさをあらためて感ぜずにはおられない。

その後、この分野の研究は著しく進展したので、なかには改訂を要する部分もあると思われるが、出発点を振り返ってみるのも無意味ではなかろう。以下に当時の研究計画でどのような成果が得られたかを二三の例をあげて示す。

### 3. 活断層構造探査

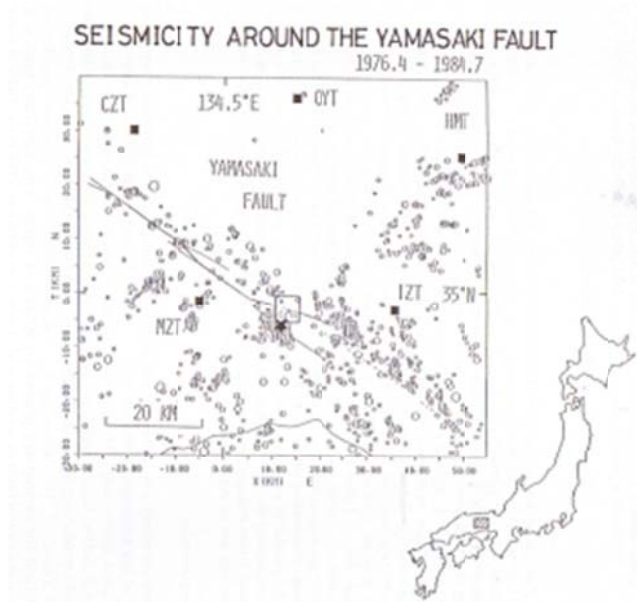
山崎断層に始まるグループの研究活動はそれ以前とはかなり異なった形をとっている。以前の研究活動は3成分磁力変化計観測を主体とした比較的限られた研究機関、研究者によるものであったが、断層研究以後では観測手段が多様化し研究参加者も拡大した。3成分変化系は光学式であったために、以前は必然的に観測所を運営する気象庁地磁気観測所、国土地理院、海上保安庁水路部、東北大学、東京大学、京都大学などに限られる傾向があった。これに対して以

後では磁力計もいわゆる直視型の移動可搬型が使用できるようになったし、人工電流による探査、VLF、ELF 帯を含む MT 観測などが加わって参加者も格段に増加した。その中で特に重要であったのは人工電流による探査で、山崎断層観測の支柱となった。

この物理探査手段の導入はグループにとっては初めてのことであったが、他の分野の地球物理研究者にとっても珍しいことであったため、大勢の参加協力者を得ることができた。しかし地中に大電流を流すことのできる電源車を所有するのは当時地質調査所のみであった。地質調査所陶山所長や物理探査部小野部長に対する乗富先生の働きかけによって、地質調査所の山崎断層計画への参入が実現した。物理探査部の全面的協力なしには山崎断層計画の成功は覚束なかったであろう。ではどのような成果があがったのか、次にその例を挙げる。

#### 4. 低比抵抗帯としての活断層

活断層が低比抵抗帯になっていることが山崎断層で初めて発見された (Electromagnetic Research Group for the Active Fault, 1982)。第 1 図は山崎断層の位置を示したものである。断層に沿って微小地震が発生している。微小地震分布は京大防災研究所による。



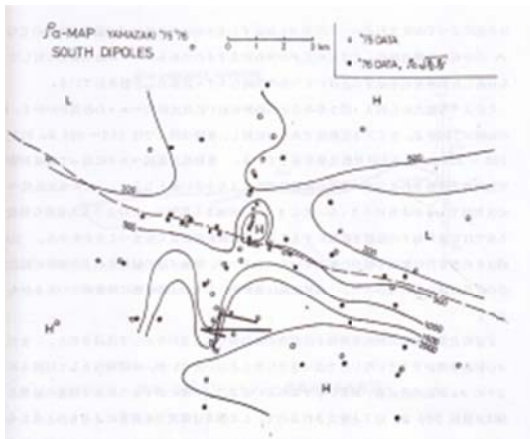
第 1 図 山崎断層と微小地震分布

Fig.1 Yamasaki fault and seismicity (Sumitomo and Noritomi, 1986)

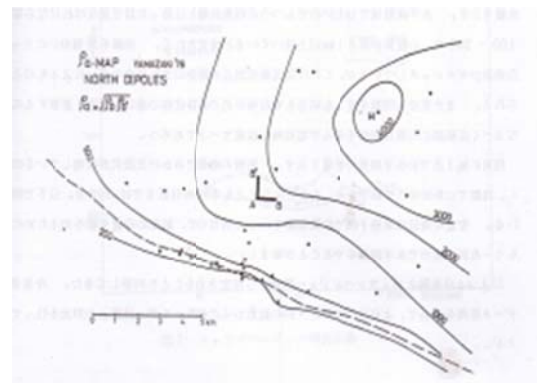
#### 4.1. 人工電流による探査

探査の一例を第2図に示す(小野他, 1977; Electromagnetic Research Group for the Active Fault, 1982)。使用した電源車は 15kW(450V,25A) の規格のもので、実際に流した電流は最大 400V, 12A であった。図の破線が断層の位置である。第2a図は断層の南側の A、B、B' に電流電極を設置して白丸の点で電位差を測定して見かけ比抵抗を求めたものである。電流を流すのは(A,B)、(A,B') の2組のL字型組み合わせで実験を行っている。断層の南側で見かけ比抵抗が高く、北側で低くなっているのが明瞭である。第2b図は電流電極を北側に移して観測を繰り返した結果である。奇妙なことに今度は断層の北側で見かけ比抵抗が高く、南側では測定不能なくらい低い。これは電極を南側に設置した場合と逆の分布になっている。

見かけ比抵抗値は電位差の測定値をもとに導かれている。見かけ比抵抗がゼロというのは電流が流れていない状態でも現れる現象である。つまり第2b図は断層を挟んで電流電極の反対側ではあまり電流が流れないことを示すものである。電流の殆どが低比抵抗の断層帯を流れて反対側にはせいぜいその漏洩電流しか流れないことを表していると考えられる。この図は山崎断層が一部を除き低比抵抗帯になっている事を示していると解釈できる。



(a) 南電流双極子



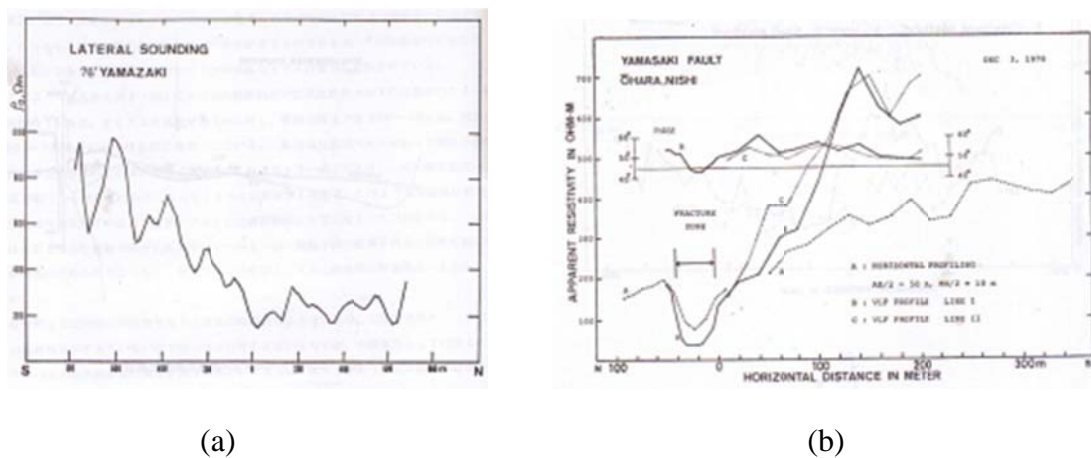
(b) 北電流双極子

第2図 電流双極子による見かけ比抵抗分布。単位は ohm-m。(小野他, 1977)

Fig. 2 Distribution of apparent resistivity obtained by dipole current method.

#### 4.2. 断層横断の見かけ比抵抗分布

断層を横断する見かけ比抵抗分布を調べると断層の位置で低比抵抗になるという結果が得られている。第3a図は人工電流を用いた水平探査（電位勾配法）の結果である。断層に垂直に断層を挟んで電流電極 A、B (AB=2000m) を設置、その間を電位電極 M、N (MN=20m) を順次移動して測定し、電位差から見かけ比抵抗を求めたものである（小野他, 1977）。南側から断層に向かって次第に見かけ比抵抗が低下して断層上で極小となり、それより北側では低比抵抗の状態が続いている。



第3図 (a) 人工電流を用いた水平探査（電位勾配法）による見かけ比抵抗分布。原点が断層の位置。（小野他, 1977）

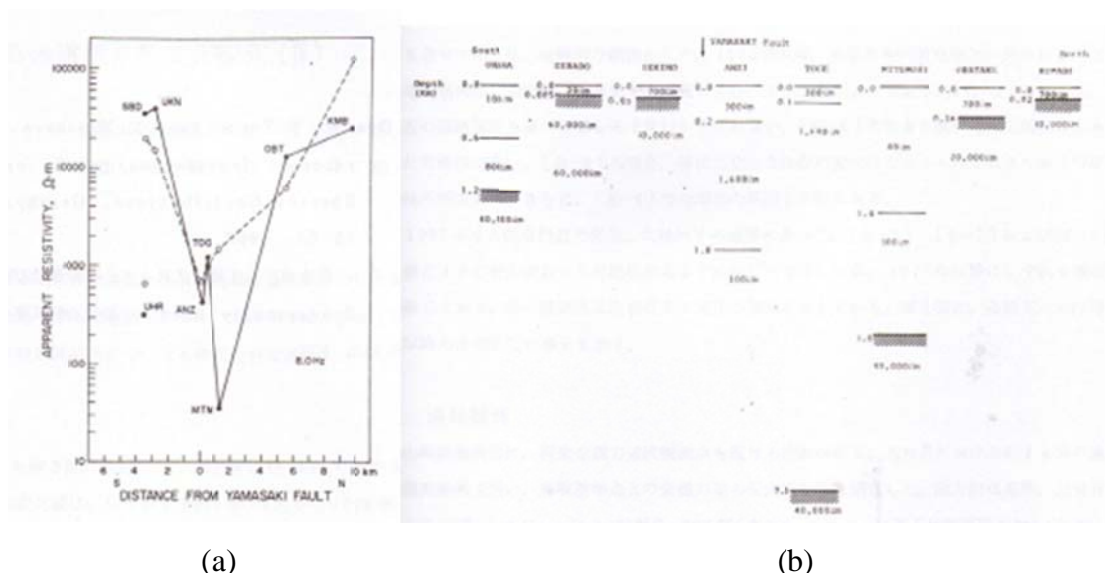
(b) (a)とは異なる測線での見かけ比抵抗分布。（村上・小野, 1979）  
破線 A；人工電位水平探査。 実線 B、点線 C；VLF-MT 観測。

Fig. 3 (a) Apparent resistivity by lateral survey with direct current method.  
(b) Apparent resistivity along a different survey line from (a). N-S direction is opposite to that of (a). Broken line A; lateral survey by direct current. Solid B and dotted C lines; VLF-MT survey.

第3b図は第3a図とは異なる測線での見かけ比抵抗横断分布である（村上・小野, 1979; Electromagnetic Research Group for the Active Fault, 1982）。この図では南北の配置が第3a図とは逆になっていることに注意が必要である。破線が人工電位水平探査による結果である。これは電流電極 AB(=100m) の中間部に電位電極 MN(=20m) を設置して1組の測定装置とし、1組4極を20m毎にずらして測定したものである。ここでも南から次第に見かけ比抵抗が低下し、断層破碎帯

上で最も低くなっている。同じ場所で2測線をとって実施した VLF 周波数帯の MT 観測結果が実線と点線で示されている。VLF- MT 測定器が地質調査所輸入され、初めての野外測定結果である。VLF 波として当時は愛知県依佐美送信所からの 17.4kHz の電波を利用している。VLF 法によっても南側から断層に向かって見かけ比抵抗が低下し断層破碎帯で極小になる結果が得られている。

VLF 測定器は極めて簡便に見かけ比抵抗と電磁場位相差を測定できる器械であり、その出現は磁場測定にプロトン磁力計が出現したときと同じような興奮を覚えたものである。これに刺激され ELF 帯での MT 観測が半田氏などによって自作の測定器を用いて始められた。



第4図 ELF 探査結果 (半田・住友, 1979)

- (a) 8Hz に対する見かけ比抵抗分布。原点が断層位置。
- (b) 1次元解析結果。斜線部は 1kohm-m 以上の高比抵抗層。

Fig. 4 Results of ELF-MT survey

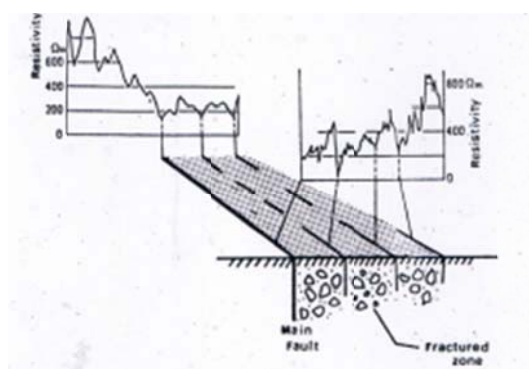
- (a) Apparent resistivity for 8Hz
- (b) 1-Dimensional analysis

第4図は断層を横断して実施された ELF 探査結果である (半田・住友, 1979; Electromagnetic Research Group for the Active Fault, 1982)。第3図に比べると探査範囲が広く、断層の南 6km から断層の北 10km に及んでいる。探査深度は当然のことながら VLF 法によるものより深い。第4a 図は断層を横切る 8Hz での見かけ比抵抗分布である。電位差測定が断層に直交する場合と平行な場合の2



組の測定結果が示されている。いずれも断層帯で見かけ比抵抗が低くなっているのが明瞭である。さらに1次元解析した結果が第4b図に示されている。単純化すれば、表層は低比抵抗であるが、ある深さに達すると1k $\Omega$ -m以上の高抵抗層が現れる。高抵抗層は断層の南で浅く、断層近傍では深くさらに北に行くに従って再び浅くなる。

以上の観測結果をもとに断層構造を模式化したのが第5図である(Yukutake, 1985)。大きな構造としては断層の北側に破碎帯が広がっていてかなりの水分を含んでいる。その中にさらに多量の水を含んだ帯状の破碎帯が走っているというモデルである。但しこのモデルは最近の研究成果に基づいて改訂の要がある。



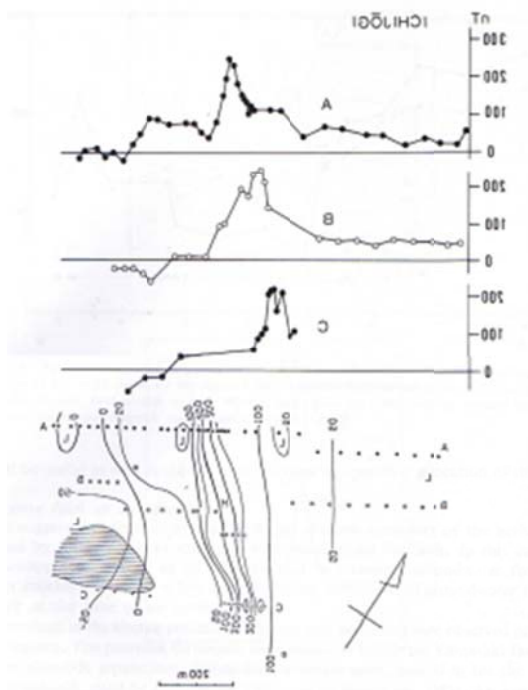
第5図 山崎断層電気抵抗構造モデル。(Yukutake, 1985)

Fig. 5 Resisitvity model of Yamasaki fault

## 5. 全磁力異常と自然電位異常

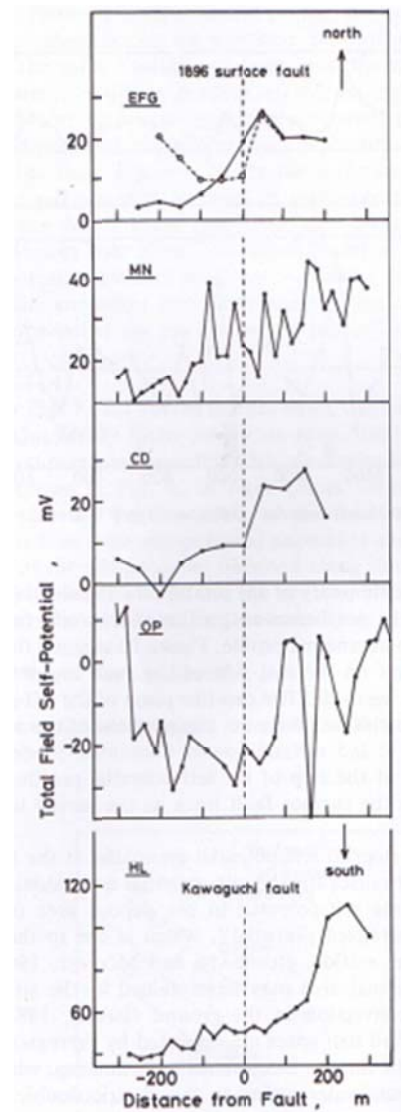
断層に沿って全磁力異常と自然電位異常の存在が発見されたのもこのプロジェクトの大きな成果である。秋田県千屋断層を横断する全磁力分布を示したのが第6図(三品, 1981; Yukutake, 1985)である。3測線について実施された磁気測量はいずれも断層上で顕著な正の磁気異常を示している。断層に沿う磁気異常の発見は初めてのことである。

断層の特徴は低比抵抗、全磁力異常にとどまらず、自然電位にも異常が現れることが判明した。第7図は千屋断層を横断する測線についての自然電位分布を図示したものである(Murakami et al. 1984)。断層の西側で自然電位は低く、東側で高くなっているのが見てとれる。断層を境にして自然電位がステップ状に変化する現象は山崎断層でも観測されている(Miyakoshi, 1986)。この分布は断層面に沿って上昇する地下水による界面動電現象として解釈されている。



第6図 千屋断層の全磁力異常。  
(三品, 1981; Yukutake, 1985)

Fig. 6 Total intensity anomaly across the Sen'ya fault



第7図 千屋断層の自然電位異常。  
(Murakami et al. 1984)

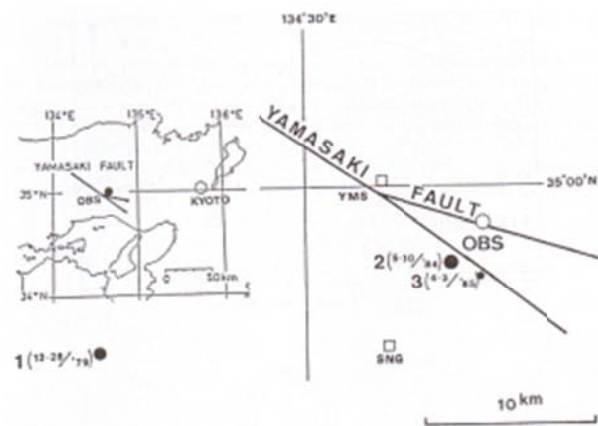
Fig. 7 Self-potential anomaly across the Sen'ya fault



## 6. 地震に伴う地電位・磁場変化

上に述べたように断層の電磁氣的構造について新たな発見が相次いたが、さらに注目すべきは地震に伴って地電位や磁場に変化が観測された事である。断層の低比抵抗にしろ自然電位異常にしろ地下水の分布に関係していると考えられるから、地震の際に地下水の移動が起こればこれらに異常変化が起こるのは当然期待されることである。

山崎断層の枝分かれ部分の直下 17km の深さで 1984 年 5 月 30 日に M=5.6 の地震が発生した (第 8 図)。諸種の観測を実施していた観測点は震央距離にして約 3km の地点であった。このとき、見かけ比抵抗、全磁力、自然電位に極めて顕著な変化が観測された。

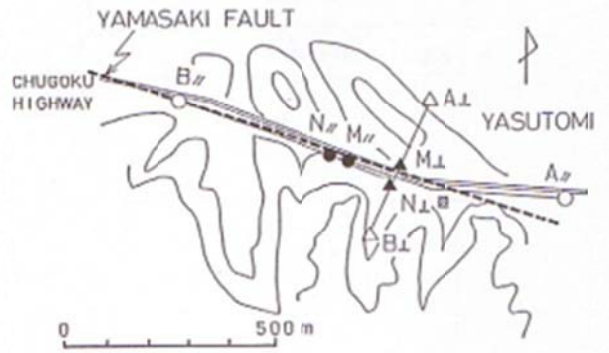


第 8 図 M=5.6 の地震 (黒丸 2: 1984 年 5 月 30 日) (Miyakoshi, 1986)

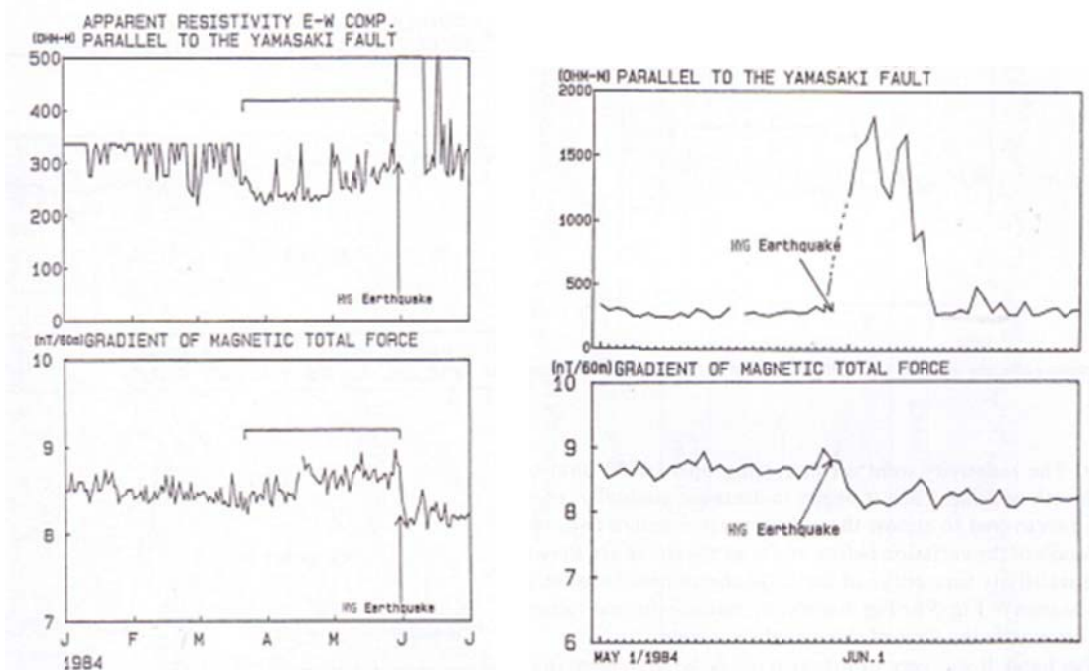
Fig. 8 An earthquake with M=5.6 occurred below the Yamasaki fault on May 30, 1984.

### 6.1. 断層の見かけ比抵抗変化 (Sumitomo and Noritomi, 1986)

断層上の A、B 点に電流電極を設置して断層内に電流を流し、中央部の MN 間の電位差を測定して見かけ比抵抗の時間変化測定を継続していた (第 9 a 図)。AB=950m、MN=50m の電極間隔である。地震発生前の約 70 日間第 10a 図に示すように見かけ比抵抗の減少が観測された。減少量は最大 30% に達している。さらに驚くべきは地震後の変化である。第 10b 図に見るように今度は見かけ比抵抗は増加に転じ、平常時は 300ohm・m であるのに対して最大値は平常時の約 6 倍の 1700 ohm-m に達した。この異常変化は約 2 週間経って平常値に復帰している。



第 9 図 断層見かけ比抵抗連続測定 of 電極配置。(Sumitomo and Noritomi, 1986)  
 Fig.9 Electrode arrangements for the resistivity measurements



(a) 地震前

(b) 地震前後

第 10 図 地震前後での見かけ比抵抗ならびに全磁力差変化。(Sumitomo and Noritomi, 1986) 上 2 図 ; 見かけ比抵抗変化 下 2 図 ; 全磁力差変化

(a) 地震前の変化 (b) 地震前後の変化

Fig. 10 Change in the apparent resistivity and the total intensity at the time of earthquake. Upper 2 panels; apparent resistivity change. Lower 2 panels; total intensity change. (a) change before the earthquake (b) change over the time of earthquake occurrence

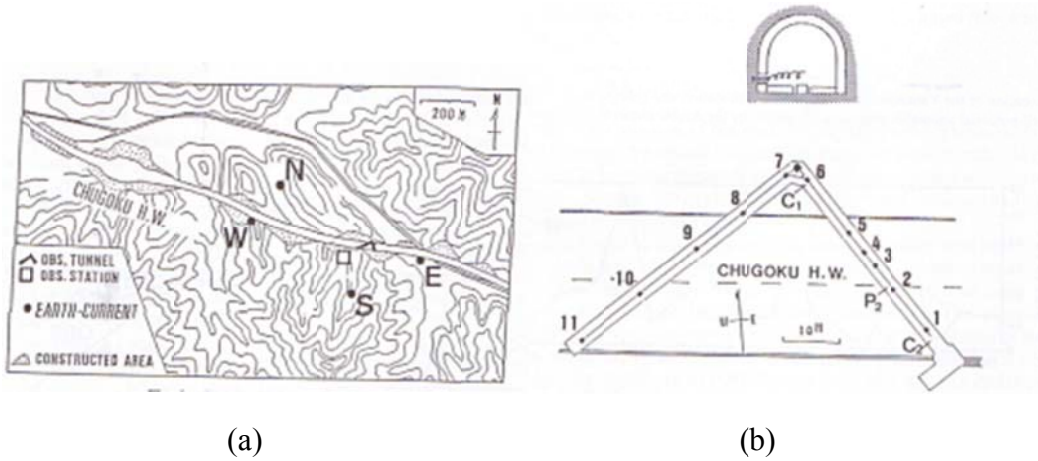
いかにしてこのような変化が生じたかの説明は容易ではないが、Sumitomo and Noritomi (1986) では応力増加による地下水の移動が原因だとしている。断層自体はすでに地下水で飽和しているから、地震前後の応力変化で比抵抗値に変化はないが、周辺地域では分離されていた間隙流体が応力増加によって連結され比抵抗の減少が起こったのではないかと推察している。つまり観測された見かけ比抵抗減少は周辺地域の比抵抗減少によるというのである。地震後の変化の説明はさらに容易でないと思われる。震源域はダイラタンシーの進行によって間隙の拡大を生じ、断層周辺を含む周囲より震源域の拡大した間隙への地下水の流入が起こったのであろう。このため断層周辺の比抵抗が低下したのではないかと想像している。

### 6.2. 全磁力差変化 (Sumitomo and Noritomi, 1986)

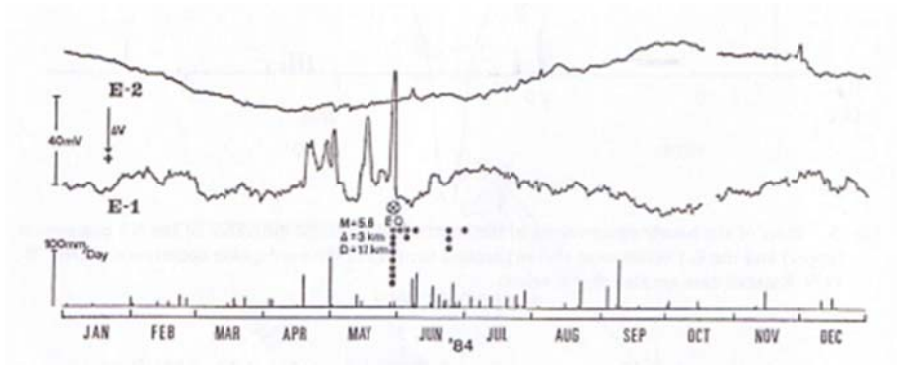
全磁力にも変化が観測された。断層に直角にセシウム磁力計のセンサー 2 個 (A, B) を断層に近いほうから A、B と約 60m 離して設置しその間の全磁力差 ( $\Delta F = F_A - F_B$ ) の測定が行われた。断層から A 点までの距離は約 100m である。 $\Delta F$  の時間変化を図示したのが第 10a 図の下図である。全磁力差にも年周変化のような長周期変動があるが、その長周期変動からのずれが地震発生の約 2.5 ヶ月前から始まり地震発生時には約 10% (0.7nT) の増加に達していた。その後およそ 2 日かけて本来の変動に復帰している (第 10b 図 下の図)。Sumitomo and Noritomi (1986) ではこの異常変化は東西圧縮にともなうピエゾ磁気効果によるとしている。

### 6.3. 地電位変化 (Miyakoshi, 1986)

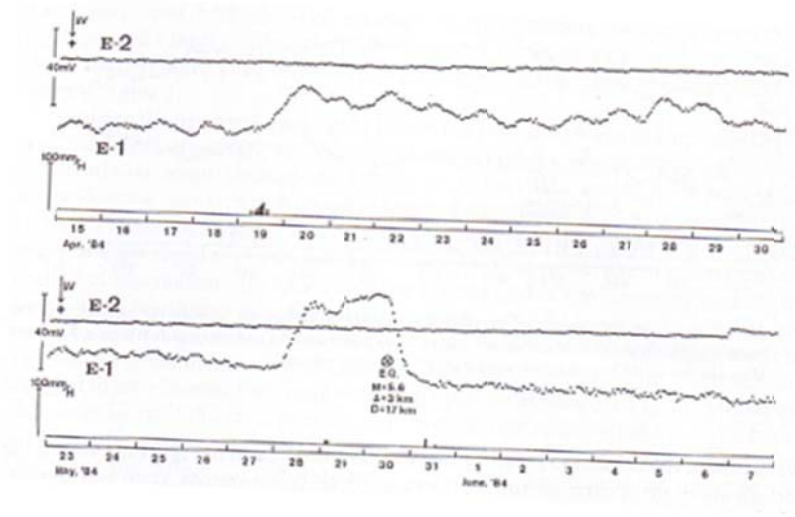
断層に沿って作られた中国縦貫道を横断して京大防災研究所の地殻変動観測壕がある (第 11a 図)。この壕の壁面に電極を設置して自然電位の測定が行われた。第 11b 図に電極 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、P<sub>2</sub> の配置を示す。C<sub>1</sub> を基準にした電位差の時間変化を図示したのが第 12a b 図である (E-1 = C<sub>2</sub> - C<sub>1</sub>、E-2 = P<sub>2</sub> - C<sub>1</sub>)。図には降水量も併せて示してある。注目すべきは E-1 の変化で、C<sub>2</sub> の自然電位変化を表すと見られている。E-1 は通常は降雨の影響を受けないが、地震発生の前に敏感に反応するようになったように見える。第 12a 図に見られるように約 40 日前より顕著な変化が繰り返し起こるようになった。55 時間前にも電位の減少が始まり一定水準に留まった後、地震が発生すると増加に転じ、約 13 時間かけてもとの水準に戻っている (第 12b 図；図では上向きが減少)。この変化の前後で顕著な降雨は認められない。したがって降雨による変化とは考えられない。



(a) (b)  
 第 11 図 自然電位観測点。(Miyakoshi, 1986)  
 Fig. 11 Observation sites for self potential difference



(a)



(b)

第 12 図 地震前後での断層を横切る自然電位変化。(Miyakoshi, 1986)  
 Fig. 12 Variation in the self potential difference across the fault over the period of earthquake occurrence.

この現象を見ると通常は透水性の低い断層が地震発生前の地殻応力変化により透水性が高くなり水路が開けたように見える。それもかなり前に始まったと推察される。その結果降雨によって顕著に電位変化が起こるようになり、地震発生直前には降雨はなかったものの地下水の移動が起こり電位の変化を生じたと考えることも可能である。

しかし何故 C<sub>2</sub> の電極のみに変化が観測されたかは難しい問題である。Miyakoshi (1986) は地下水の進入により電極接触電位差が変化したか、あるいは地下水の進入により自然電位が変化したか、のいずれかであろうとしている。未解決の問題である。

地震に伴う電磁気的变化については、その原因についてそれぞれ一応の解釈がなされている。いずれも地下水の移動が関係していることは間違いないが、地震の際に断層域で何が起こったかを総合的統一的に理解するにはなお検討の余地があるように思われる。

## 7. 結び

活断層研究計画によって活断層が低比抵抗帯であること、断層に伴う磁気異常帯、自然電位異常の発見という大きな成果が得られた。さらに続いて地震に伴う自然電位、見かけ比抵抗、磁場変化が観測されるという結果がもたらされた。これらはその後の CA グループの研究の発展のきっかけとなった。研究計画を指導されその後の研究体制の基礎を築かれた乗富先生の重みをあらためて感じ入る次第である。

## 参考文献

Electromagnetic Research Group for the Active Fault, Low electrical resistivity along an active fault, Yamasaki fault, *J. Geomag. Geoelectr.*, **34**, 103-127, 1982.

半田駿, 住友則彦, 山崎断層における ELF 自然電磁波を用いた比抵抗の観測, CA 研究会論文集, 25-28, 1979.

三品正明, 山下済, 断層による磁気異常, 「科研費: 自然災害特別研究成果報告; 地球電磁気学的手法による断層活動度の研究 (乗富一雄)」, A56-2, 84-89, 1981.

Miyakoshi, J., Anomalous time variation of the self-potential in the fractured zone of an active fault preceding the earthquake occurrence, *J. Geomag. Geoelectr.*, **38**, 1015-1030, 1986.

- Murakami, H., Mizutani, H. and Nabetani, S., Self-potential anomalies associated with an active fault, *J. Geomag. Geoelectr.*, **36**, 351-376, 1984.
- 村上裕, 小野吉彦, 山崎断層, 特にその西部の比抵抗構造について, CA 研究会論文集, 9-14, 1979.
- 乗富一雄, 「科研費: 自然災害特別研究成果報告; 地球電磁気学的手法による断層活動度の研究」, A56-2, pp107, 1981.
- 小野吉彦, 村上裕, 行武毅, 人工電位法による山崎断層周辺の比抵抗構造について, 地磁気観測所技術報告「CA シンポジウム講演論文集」, **17**, 61-68, 1977.
- Sumitomo, N. and Noritomi, K, Synchronous precursors in the electrical earth resistivity and the geomagnetic field in relation to an earthquake near Yamasaki fault, Southwest Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **38**, 971-989, 1986.
- Yukutake, T, A review of studies on the electrical resistivity structure of the crust in Japan, *Earthq. Predict. Res.*, **3**, 345-364, 1985.