

ESR法による野島断層平林 NIED コアの熱履歴調査

谷 篤史*・小村健太朗**・池田隆司**

ESR Investigation of a Thermal History on Hirabayashi NIED Drilling Core Penetrating the Nojima Fault

By

Atsushi TANI*, Kentaro OMURA**, and Ryuji IKEDA**

Ocean Research Institute, University of Tokyo

tania@ori.u-tokyo.ac.jp

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

omura@bosai.go.jp, ikeda@bosai.go.jp

Abstract

The thermal history of the Nojima Hirabayashi NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention) drilling core was investigated by electron spin resonance (ESR). The Ti center, Al center and E' center in 14 quartz samples were used for the analysis. The results of the shallower Nojima Hirabayashi drilling core produced by Geological Survey of Japan (GSJ) showed a thermal effect on the ESR signals at two different depths, around 250m and 600m. In comparison, the results from the Hirabayashi NIED core showed no clear thermal effect on ESR signals. This means that the heat was insufficient to change ESR signals. Only the deepest sample (1,824m) nearer the fault plane might be affected thermally because the signal intensity of the Ti center decreased. In addition, the signal intensity of the Al center sometimes became large in the fault zone, especially in core samples where there were many cracks. The effect of water, heat or stress on the Al center must be studied in the future.

Key words: Nojima fault, ESR, Thermal history, Hyo-goken Nanbu earthquake

1. はじめに

断層活動により引き起こされる地震は、地下数 km から数十 km という深さで発生しているのに対し、通常断層を観察できるのは地表に現れているものが主である。これらの断層は地表付近で形成されたものもあれば、地下深くで形成されたものが隆起し現れたものもある。しかし、断層形成時より長期にわたる変形・変質を受けているはずで、地下深部で形成された断層とは物性的・化学的に異なっているであろう。そこで、地下深部での断層を知る目的でボーリング調査が行われてきた。

1995年1月17日の兵庫県南部地震後、地下深部での大きな地震直後の破碎帯付近の物性変化を調べるため、科学技術庁防災科学技術研究所(NIED)は兵庫県淡路島の北淡町平林地区において、1,800 mの掘削を行い、1,001-1,838 mの深度での連続岩石コアの採取に成功した。コア試料の観察から、1,140 m, 1,300 m, 1,800 m付近において断層破碎帯を確認した。掘削の詳細、並びにコアの分布様式については池田ほか(1998)や小林ほか(1998)、または本研究報告書に掲載の論文(池田ほか2001, Tanaka *et al.*, 2001など)に詳しく報告されている。

*東京大学 海洋研究所

**防災科学技術研究所

断層の活動には熱の発生が伴う。断層が動くときには、すべり面上に大きな摩擦力が働き、摩擦熱が発生する。また深部からの熱水も熱の発生要因として考えられる。断層が動くことにより地下水の通り道が変化し、深部から熱水がやってきたのであれば、周りの物質に影響を与えているはずである。よって、過去の熱履歴を知ることは断層近傍の状態や歴史を知るのに有効であろう。

本稿では、電子スピン共鳴 (ESR) 法によって石英に蓄積している放射線誘起欠陥 (放射線を受けることで物質内に生成し蓄積していく欠陥、ここでは捕獲電子をさす) をコア全体にわたって調べ、熱による異常を読みとる試みを行った。放射線によって生成する欠陥は、時間の経過とともに結晶に蓄積されていくが、熱的に不安定で、温度が上がると消滅するのが一般的である。そのため、同じ時系列上の試料を測定し、比較することにより、熱履歴を調査することができる。特に、地震時に大きな熱の影響を受けているか、あるいは、200-300 度以上の熱水の影響を受けていれば、ESR で測定される信号の一部は消滅していることが期待され、熱の影響を検出することが可能になると考えられる。同じ平林地区において地質調査所 (GSJ) により行われた掘削コアの結果 (Tani *et al.*, 2000) と比較し、報告したい。

2. ESR 信号の熱安定性

放射線によって生成した電子が捕獲されてできる欠陥は熱的に安定ではなく、温度が上がると捕獲されていた

電子が束縛から逃れ、移動する。このことは「欠陥の寿命」という形で表現される。例えば、1 次反応により消滅する場合、欠陥の寿命 τ は欠陥の活性化エネルギー E_a と反応定数 ν_0 という 2 つのパラメータと温度 $T(K)$ により決定される。

$$\tau = 1/\nu_0 \exp(E_a/k_B T) \quad (1)$$

ここで、 k_B はボルツマン定数である。例として、室温 (30°C) で寿命がおおよそ 100 万年になる欠陥 (活性化エネルギー E_a が 1.1 eV, 反応定数 ν_0 が $4.1 \times 10^{11} \text{s}^{-1}$) が、熱により消えるために必要な時間と温度の関係を図 1 に示す。温度が高い場合は短い時間で ESR 信号に影響が出るのに対し、温度が低い場合は長い時間その温度で保たれることで信号に変化が出ることがわかる。石英に見られる Al 中心や Ti 中心といった信号は 2 次反応により消滅するため (Toyoda & Ikeya, 1991), 寿命は欠陥の濃度にも依存し、やや複雑なものとなるが、熱による欠陥の消滅に関する議論は同様である。詳しくは Ikeya (1993) に議論されている。

3. 試料と測定

平林 NIED コアの 1,001 m 以浅では、岩石コア試料は連続的ではなく、98-102, 201-204, 448-467, 658-673, 830-845 m の 5 つの深度でスポット採取した。今回は、ESR 測定試料用に 14 サンプルを選んだ (図 2・表 1)。岩石は花崗閃緑岩かトータル岩で、800 m より深くなると

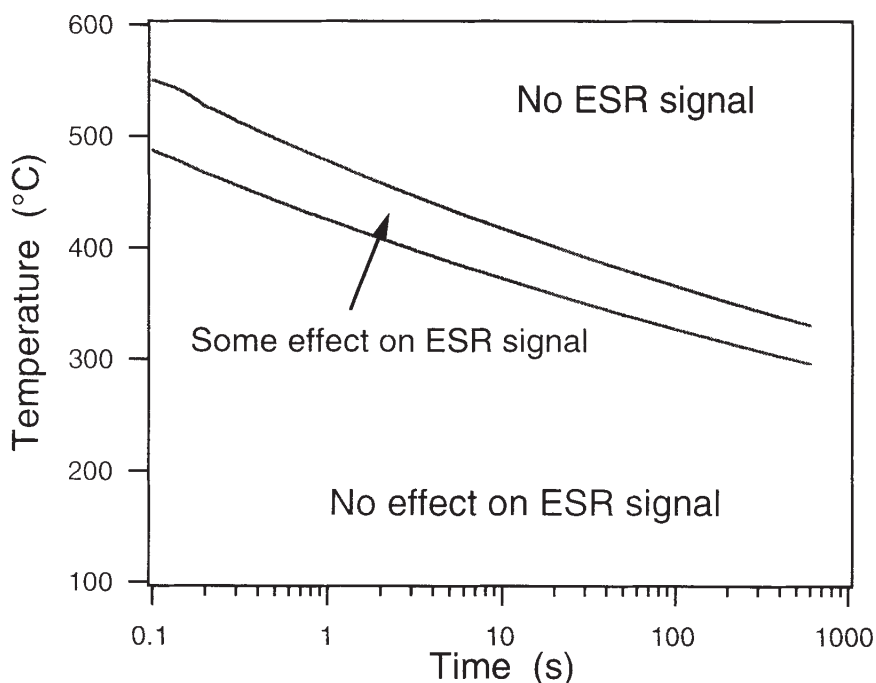


図 1 ESR 信号のアニーリング特性。活性化エネルギー $E_a = 1.1 \text{eV}$, 振動数因子 $4.1 \times 10^{11} \text{s}^{-1}$ の一次反応を仮定した。

Fig. 1 Annealing diagram of an ESR signal.

It is a case of first order decay with parameters of activation energy E_a , 1.1 eV and frequency factor ν_0 , $4.1 \times 10^{11} \text{s}^{-1}$.

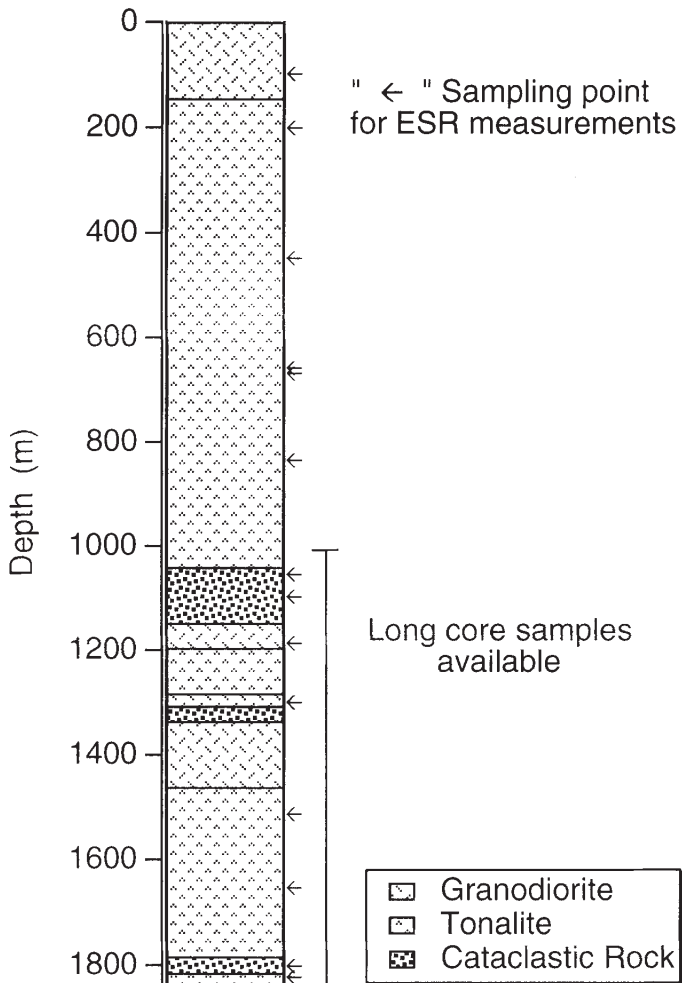


図2 平林 NIED コア柱状図。矢印は ESR 測定に用いた試料部位を示す。コア試料の記載は池田ら (1998) による。

Fig. 2 Hirabayashi NIED core and sample points for ESR analysis. 14 samples were taken for this study. Description of the whole core was referenced from Ikeda *et al.* (1998).

変形・変質が認められた。もっとも浅い 2 試料はホールコアで、それ以外はハーフカットしたコアであった。ハーフコアの一部は保存・観察のため樹脂で固めた。平林 NIED コアの処理方法については松田ほか (2001) に詳しく紹介されている。

ESR 用の試料の処理は、まず、ハーフコア表面に付着した樹脂を岩石カッターで切り落とし、破砕機において 1-2 cm に砕いた。その後、大きさが 1 cm 程度のものを 5-8 個選び、アルミナ乳鉢上でたたいて細かくした。これを 150, 300, 500 μm のメッシュを用いてふるいわけした。このうち 150-300 μm のものを塩酸 (約 45%) とフッ酸 (10%) にそれぞれ 1-2 時間溶かし、その後、蒸留水とアセトンで洗浄し、上澄みを捨て、乾燥させた。これを ESR 試料とした。試料中、試料番号 38-2-14 はとても柔らかく、固定に使用した樹脂をカッターで切り落とす

表 1 ESR 測定に用いた試料

Table 1 ESR sample list.

Core Number	Depth (m)	Description (Ikeda et al. 1998)
1-1-L	100	Granodiorite
4-2-R	202	Tonalite
7-3-L	450	Tonalite
12-2-R	660	Tonalite
13-4-L	670	Tonalite
17-3-L	837	Tonalite
31-2-11a/b	1056	Cataclastic Rock
38-2-14	1099	Cataclastic Rock
55-4-34	1188	Granodiorite
78-5-40	1302	Granodiorite
121-5-L	1515	Tonalite
149-5-L	1655	Tonalite
180-5-39	1804	Cataclastic Rock
185-1-3	1824	Tonalite

表 2 ESR 測定条件

Table 2 ESR measurement conditions.

	Al center	Ti center	E' center
Center Field (mT)	328	340	337.5
Sweep Width (mT)	5	5	0.5
Microwave Power (mW)	5	5	0.001
Modulation Frequency (kHz)	100	100	100
Modulation Width (mT)	0.1	0.1	0.02
Sweep Time (min)	8	8	4
Time Constant (s)	0.1	0.1	0.3
Accumulation	5	5	40

ことができなかった。樹脂の混入のためか、あるいは多量の炭酸塩が析出していたためか、塩酸と激しく反応した。

試料を 100 mg ずつとり、JEOL FE-1X により測定を行った。常温で E' 中心、液体窒素温度で Al 中心と Ti 中心を測定した。測定条件は表 2 に示した。実験誤差を少なくするため、低温での測定は 5 回行いその平均を、常温での測定は 40 回 (約 3 時間) 行いその和を信号強度とした。測定結果を図 3 に示す。

4. 結果と議論

4.1 Ti 中心の結果

浅い 3 つの試料では信号強度は大きかったが、残りの試料は深さに応じて徐々に小さくなった。Cataclastic Rock と分類された 3 つの 1,140 m, 1,300 m, 1,800 m 近傍では目立った大きな変化は見られなかった。これは ESR 測定に用いた試料がそれぞれの中軸部から離れていたことが大きな原因と考えられる。もっとも深い試料 (1,824 m) の信号強度がすぐ上の試料と比べて小さくなっていったが、この 2 つの試料を比べると、最深部の試料は今回動いたと考えられる断層面にもっとも近い試料 (松田ほか 2001) で、何らかの熱の影響を受けて、信号強度が減少したのかもしれない。

4.2 Al 中心の結果

100 m の試料が一番信号強度が大きく、深くなるにつ

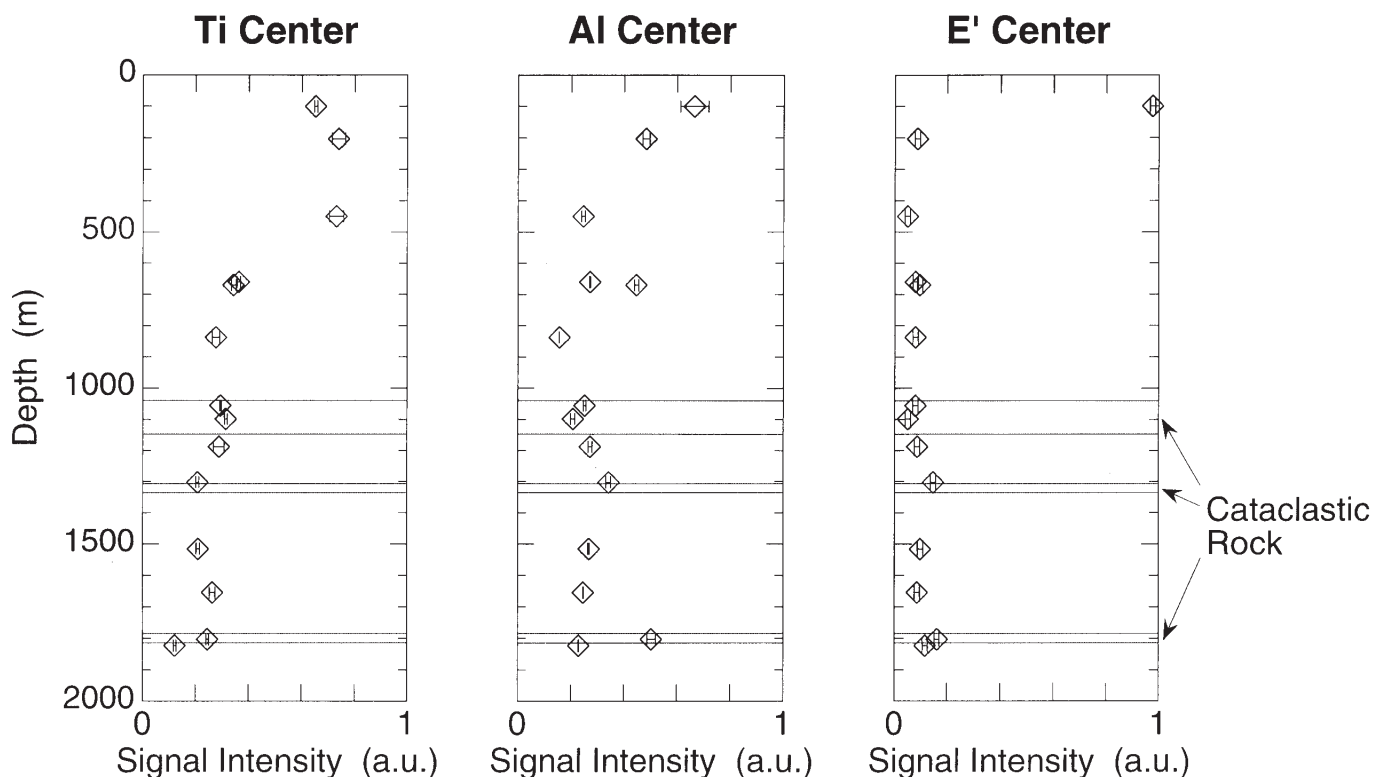


図3 平林 NIED コア試料の ESR 信号強度。Cataclastic rock と母岩（トータル岩と花崗閃緑岩）の境界を横線で示す。Ti 中心と Al 中心の誤差として五回の ESR 測定標準偏差を取った。E' 中心の ESR 信号は 3 時間かけて測定してもなお微弱であったので、ノイズレベルを誤差とした。

Fig. 3 ESR signal intensities in the Hirabayashi NIED core samples. Boundaries between the cataclastic rock and the host rock (tonalite or granodiorite) are shown as horizontal lines in the figures. Error in the Ti and Al centers was the standard deviation for 5 measurements. Error in the E' center was presumed to be noise intensity because the E' center was very weak even after measurements over a period of 3 hours.

れて強度は小さくなっていった。また、2つの試料(670 m と 1,804 m)では強度が他と比べ飛び出していた。これらの試料ではクラックがたくさん入っており、破碎帯では Al 中心の信号強度が増加することがあるという平林 GSJ コアの結果を支持する結果となった。その原因として、クラックが多く含まれる石英表面で結晶が成長するとき、地下水中の Al イオンが容易に取り込まれる、あるいは、破碎や応力が石英中の Al 中心の放射線に対する生成効率を増大させたり、Al 中心の熱安定性をよくすることなどが考えられる。一方、Ti 中心にはこういったことが見られない。これらは今後の解決すべき研究課題としていきたい。断層面近傍の試料を今回測定していないこともあり、兵庫県南部地震時の発熱による影響は顕著にはみられなかった。

4.3 E'中心の結果

もっとも浅い試料(100 m)では相対的に大きな E'中心の信号が得られた。E'中心は破碎によって生成するとも言われているが、その信号強度はかなり小さく、また線形も異なった形を取る事が知られているため、今回測定された E'中心は、歪んだ石英や石英ガラスにできる E'

中心ではなく、試料準備の際に用いた破碎機の影響で生成したものではないとあってよい。今回、加熱実験を行っていないため、これ以上のことは E'中心の結果から言うことはできないが、どの試料も同程度の信号強度であったため、測定に用いた試料では熱による影響はなかったのではないだろうかと考えている。というのは、加熱により多くの欠陥は焼鈍されて無くなっていくが、200-250 度程度の熱が数分与えられると、E'中心はその強度が増加することが知られている。つまり、過去にその程度の熱が付与されているならば、E'中心の信号強度は他の試料と比べ大きくなっているはずである(Grün *et al.*, 1999)。

4.4 平林 GSJ コアとの比較

GSJ コアの結果との相違点を以下にあげる。

- 各測定試料の間隔が平林 NIED コアでは 100-200 m であるのに対し、平林 GSJ コアではおよそ 50 m 間隔であった。そのため、平林 GSJ コアの解析の方がより細かい変動を追うことができた。
- 平林 GSJ コアでは 200-300 m の深さで、Al 中心も Ti 中心も信号強度が小さくなっている。フィッション・

トラック (FT) の結果からも、同区間でトラック長の短縮が認められ、熱の影響が示唆されている (Tagami *et al.*, 2000) が、平林 NIED コアの実験結果からは試料が入手できなかったこともあり、その影響が明確に確かめられなかった。

- 先にも述べたが、クラックのたくさん入っているコア試料では、Al 中心の信号強度が大きく出ることがある。これは両方のコアの結果から示唆された。

4.5 今後の課題

測定試料の選定では、もとの花崗閃緑岩やトータル岩の組織をできるだけ保持している部分を選択的にとるようにつとめたが、中には岩石カッターで切るだけでぼろぼろになっていくような試料が中軸部付近で現れてくる。このようなクラックをたくさん含む試料では Ti 中心の強度はそれほど変化しないのに、Al 中心の信号強度が大きくなったりした。このことから、今後は石英中の Al 濃度の変化も同時に調べていく必要がある。また、実験室において、熱や水による物質の変形・変質と欠陥の生成効率や熱安定性の変化などを調べ、ESR によるコア解析の基礎を考えていきたい。また、熱履歴を明らかにする有効な手法として熱ルミネッセンス (TL) があるが、そのコア解析への応用方法についても考えていきたい。

5. まとめ

野島断層を貫く平林 NIED コアの解析を ESR を用いて試みた。試料はおよそ 100 m 間隔で入手し、石英の ESR 信号を測定した。Al 中心と Ti 中心は深くなるに従い、信号強度は減っていくことが確認された。3 か所で確認された断層破砕帯近傍では、おおきな熱の影響が見られなかったが、断層に近い 1,824 m の試料では Ti 中心の信号強度が小さく、試料が何らかの熱の影響を受けている可能性がある。また、クラックの多く入った試料から得られたサンプルでは、Al 中心の信号強度が大きくなることがあると示唆された。E' 中心の結果については、加熱実験を行った後、解釈をする必要がある。

電子捕獲された欠陥は熱に敏感であるため、断層破砕帯が熱水などによる熱の影響を受けているとすれば、クリアに信号強度の変化を見ることができると考えている。今回の実験から、コア全体の熱年代史を考えるのであれば、サンプル採取点の間隔を 10-20 m 程度にする方が変化をより詳しく見ることができるとわかった。また、断層の摩擦熱による熱の影響を見たい場合は、もっと細かく評価する必要がある。断層ガウジのイメージをとるかのように、熱履歴の評価ができるような装置を開発することが今後重要であることがわかった。

謝辞

NIED コア解析グループの諸氏には研究を進める上で貴重な提案・議論をいただいた。厚く感謝の意を表します。なお、本研究の一部は日本学術振興会特別研究員制度の科学研究費補助金 (平成 9 年度課題番号 5083, 平

成 12 年度課題番号 08303) を用いて行われた。

参考文献

- 1) Grün, R., Tani, A., Gurbanov, A., Koshchug, D., Williams, I. and Braun, J. (1999): A new method for the estimation of cooling and denudation rates using paramagnetic centers in quartz: A case study on the Eldzhurtinskiy Granite, Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, **104**-B8, 17531-17549.
- 2) 池田隆司・飯尾能久・小村健太郎 (1998): 活断層の応力測定について。月刊地球号外, No. **21**, 91-96.
- 3) 池田隆司・小村健太郎・飯尾能久・新井崇史・小林健太・松田達生・島田耕史・田中秀実・富田倫明・平野 聡 (2001): 1995 年兵庫県南部地震に伴う野島断層を貫くドリリング調査, 防災科学技術研究所研究報告, No. **61**, 141-153.
- 4) Ikeya, M. (1993): New application of electron spin resonance-Dating, Dosimetry and Microscopy. World Scientific, Singapore.
- 5) 小林健太・松田達生・新井崇史・池田隆司・小村健太郎・佐野広征・澤口 隆・田中秀美・富田倫明・富田直人・平野 聡・山崎暁子 (1998): 野島断層深部における断層岩・鉱物・元素の分布様式 —防災科学技術研究所掘削コア・1,140 m 破砕帯の解析—。月刊地球号外, No. **21**, 154-159.
- 6) 松田達生・新井崇史・池田隆司・小村健太郎・小林健太・島田耕史・田中秀実・富田倫明・平野 聡 (2001): 野島断層平林 NIED コア破砕帯部 (1,140 m, 1,300 m, 1,800 m) の物質解析。防災科学技術研究所研究報告, No. **61**, 183-193.
- 7) Tagami, T., Murakami, M., Hasebe, N., Kamohara, H., and Takemura, K. (2000): Thermal history analysis of the Nojima fault borehole samples by fission-track thermochronology. *GSJ Interim Report No. EQ/00/1*, 203-209.
- 8) Tanaka, H., Matsuda, T., Omura, K., Ikeda, R., Kobayashi, K., Shimada, K., Arai, T., and Tomita, T. (2001): Complete fault rock distribution analysis along the Hirabayashi NIED core penetrating the Nojima fault at 1,140 m depth, Awaji Island, Southwest Japan. 防災科学技術研究所研究報告, No. **61**, 195-221.
- 9) Tani, A., Matsumoto, H., and Ikeya, M. (2000): A survey of thermal disturbance on the GSJ Nojima core sample by electron spin resonance (ESR). *GSJ Interim Report No. EQ/00/1*, 223-226.
- 10) Toyoda, S. and Ikeya M. (1991): Thermal stabilities of paramagnetic defect and impurity centers in quartz: Basis for ESR dating of thermal history. *Geochemical Journal*, **25**, 437-445.

(原稿受理: 2000 年 11 月 31 日)

要 旨

野島平林 NIED コアの熱履歴解析を電子スピン共鳴 (ESR) により試みた。およそ 100 m 間隔で得られた 14 の試料を測定対象とした。石英に見られる Ti 中心, Al 中心, E' 中心を測定した。地質調査所の平林コアでは 250 m と 600 m 付近で熱の影響を見ることができたが、すでに報告のある主要な 3 つの断層破砕帯 (1,140, 1,300, 1,800 m) 付近での顕著な ESR 信号の変化は認められなかったが、1,824 m の破砕帯部近傍の試料では Ti 信号の縮小が見られた。断層活動時の熱の影響の可能性はある。その他、クラックの多く入っているコアでは Al 中心の信号強度が大きいものがあることが示された。Al 中心と水や熱、応力との関係については今後の課題である。

キーワード：野島断層, ESR, 熱履歴, 兵庫県南部地震