

古地磁気学的手法を用いたテクトニクス の復元に関する基礎研究（平成13年度）

（核燃料サイクル開発機構業務委託報告書）

2002年3月

大 阪 府 立 大 学

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2005

2002年3月

古地磁気学的手法を用いたテクトニクスの復元に関する基礎研究（平成13年度）

（核燃料サイクル開発機構業務委託報告書）

伊 藤 康 人[※]

要 旨

地盤の安定性を評価する上で、断層の活動度の時空変化を明らかにすることは極めて重要である。現在日本に分布する活断層の多くは、第四紀にテクトニクスの枠組みが大きく変化してから活動を始めたものであり、累積変位が小さいため、構造地質学的手法では評価が困難な場合が多い。従来そのような断層の評価は変動地形学的手法で解析されてきたが、すべての場合に有効とは言えず、課題が残されている。そこで、本報告では、古地磁気学的なデータに基づいて地盤の変形を定量化することを試みた。中部地方には、第四紀の東西圧縮応力場のもとで多くの活断層が分布している。その中で、変動地形学的な記載が豊富な岐阜県高山市東方の江名子断層近傍に分布する丹生川火砕流堆積物の古地磁気方位を測定した。詳細な消磁実験を行った結果、約 1.8 Ma に地層が形成された当時の安定な残留磁化が確認された。その方位は断層運動を反映した有意な時計回り回転運動を示している。大規模火砕流に対比される広域テフラの情報を加えれば、さらに広域の地殻の変形についても知見が得られると期待される。

本報告書は、大阪府立大学が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究の成果に関するものである。

機構担当課室：東濃地科学センター 地質環境特性研究グループ

〔※：大阪府立大学 総合科学部〕

(目 次)

1. はじめに	2
2. 研究地域・試料採取対象	4
3. 研究方法	4
4. 測定結果	7
5. 解析と考察	11
6. まとめ	14
7. 謝辞	17
8. 参考文献	18

1. はじめに

岩石は微弱な磁化を帯びており、その一部は、1 億年を超えるような地質学的時間が経過しても保存される（残留磁化）。それは、岩石が形成された時の地球磁場の「化石」であり、同じ時代の残留磁化方位を比較することで、構造運動に関する情報が得られる。プレートテクトニクスの黎明期にあって、大陸移動が過去に地球上で起こった事実であることを実証したのは、古地磁気学的研究であった。

日本列島など、プレート収束境界は構造変形が激しく、古地磁気学は地史の解明に欠かせない手法である。たとえば、日本海拡大の実態解明は、古地磁気データに依拠するところが大きい（Otofuji et al., 1985）。しかし、ほとんどの場合は数 100km 以上のサイズのブロック回転が議論の対象であり、断層活動度評価などメソスケールでの岩盤変形については、望ましくないノイズとして排除され、詳細な検討は行われていないのが現状である。

Itoh et al. (2000) は、岩手県の釜石鉱山の水平地下坑道で 440m にわたって稠密な古地磁気試料を採取して、各種の古地磁気・岩石磁気学的な測定・解析を行った。その結果、長期間にわたる岩盤の安定性を評価するとともに、断層近傍で有意に古地磁気方位が変位する傾向が指摘された。この例から、残留磁化の安定性と磁化獲得の同時性が保証できる場合には、断層活動度の指標として古地磁気データを利用し得ることが指摘される。

一方で、わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、これまでに知られている活断層帯を避けることにより、十万年程度の将来にわたって安定な岩盤を選定できる可能性が示されるとともに、個々の地域においては、活断層帯の影響範囲や伏在活断層の有無を詳細に検討する必要性が論じられた（サイクル機構, 1999）。上述した古地磁気学的手法による断層活動の評価技術の開発は、それら活断層帯の影響範囲や伏在活断層の有無の把握などの技術的課題を解決しうる可能性を有するものであり、さらには構造物の倒壊など地震活動による災害軽減などにも広く応用できると期待される。

以上の理由により、本研究は、火砕流堆積物の残留磁化を用いて断層活動度を評価することを目的とする。大規模な火砕流は、給源から流下・定置する間も高温を保持しており、自らの熱で固結して溶結凝灰岩となる。その温度は 700℃に達するため、岩石中の強磁性鉱物はキュリー温度を通過して冷却される過程で、極めて安定な熱残留磁化を獲得する。その獲得時期は、通常は定置から 1 年以内であり、地質学的に一瞬である。このため 1 枚の火砕流から得られる残留磁化方位は初期状態で非常によく揃っており、その食い違いは構造運動に起因すると考えてよい。

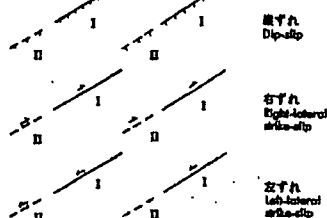
研究対象地域は、活断層が高密度で存在する中部地方（図 1）で、第四紀の火山活動による大規模火砕流が広く分布する岐阜県高山市の東方とした。以下、研究対象地域と試料採取を実施した岩石について、記載する。

凡例 Legend

陸上 On land

活断層 Quaternary active fault

A (10-1) B 〇 C (1-0.1) (0.1-0.01) 活動度 Activity (m/10³y)



I 実線：確実度 I
Solid line: Certainty I
II 破線：確実度 II
Broken line: Certainty II

..... 伏在活断層
Concealed active fault

← 活断層
Quaternary active fault

● 主な第四紀火山の中心
Center of main Quaternary volcano

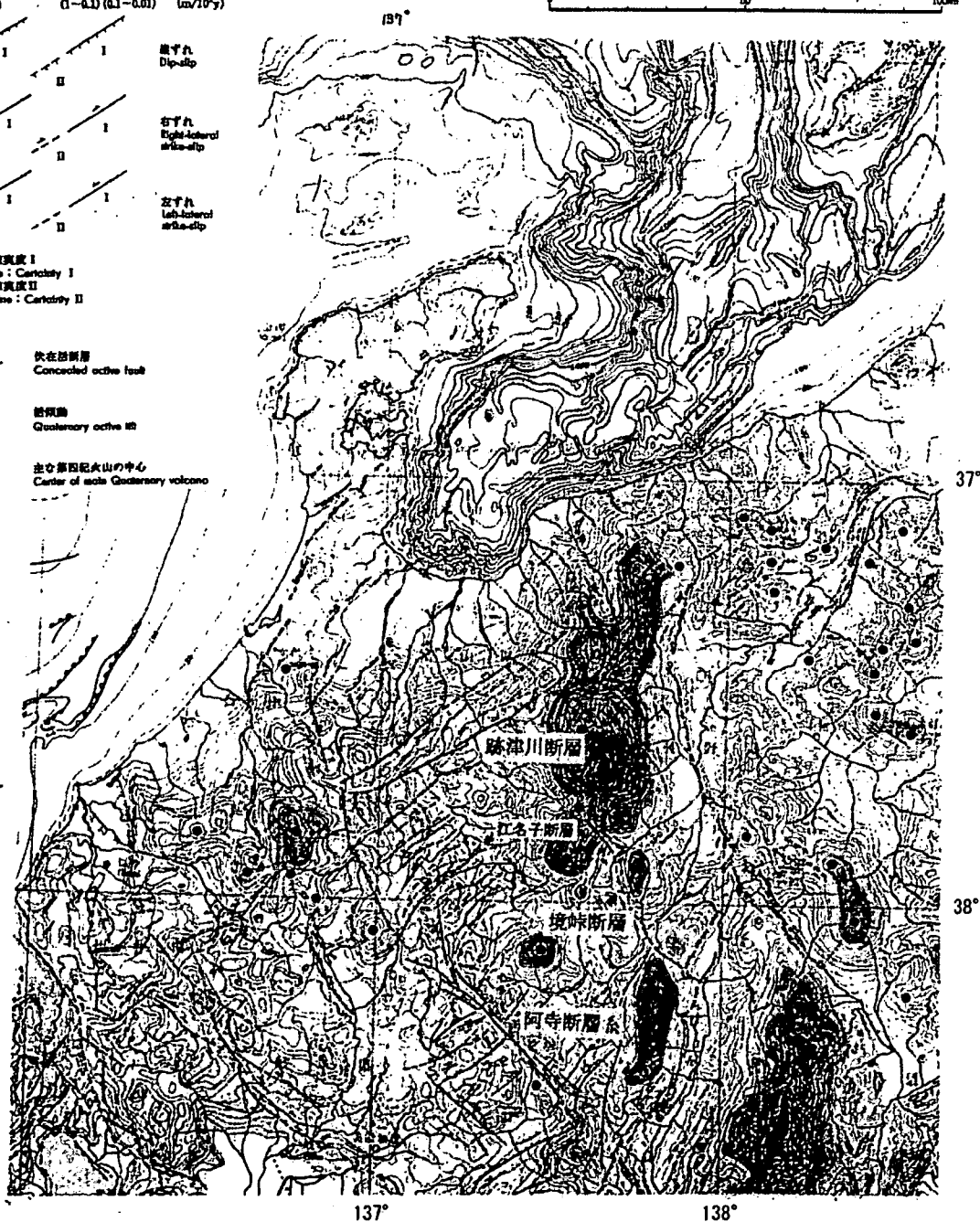


図 1 中部地方の活断層および第四紀火山の分布

2. 研究地域・試料採取対象

中部地方北部には、跡津川断層に代表される北東－南西走向の右横ずれ活断層が数多く存在する（図 1）。そのひとつ、江名子断層は、第 2 図に示すように岐阜県高山市東方に位置しており、日本の活断層（1991）の評価では確実度 I、活動度 B とされている。

試料採取の対象としたのは、江名子断層の周辺に分布する丹生川火砕流（図 2）である。これは層厚 20～100m で、基底部を除いて溶結した 1 枚の火砕流堆積物からなる。灰白色～淡紅色の基質中に斜長石や斜方・単斜輝石と石質岩片を含む塊状の岩相を示し、一般には本質レンズは観察されない（長橋ほか、2000）。溶結部分の岩質はおおむね均質であり、後述する古地磁気測定用試料の観察でも 1 cm 以上の異質岩片はほとんど観察されなかった。調査地域では、丹生川火砕流を後期第四紀の上宝火砕流堆積物が覆っている。

長橋ほか（2000）は、丹生川火砕流堆積物の記載岩石学的特徴に基づいて、房総半島の Kd39 火山灰層に対比されるとした。Kd39 はオルドバイ Subchron の上限付近に位置しており（古地磁気層位については若干の混乱が残されるが）、その年代は 1.77～1.75 Ma と推定される。

3. 研究方法

高山市東方で地表地質調査を行った結果、江名子断層を横切る沢沿いに、水平長約 80m で高さ 2～4m の丹生川火砕流の露頭を発見した（図 2★印）。図 3 に現地測量を実施して作成した露頭平面図を示す（露頭の切れ目に基づき、 $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ と命名する）。

露頭全面に水系を張ってスケッチを行い、手の届く範囲の全ての断層について、走向傾斜を記録した。その方位を図 4 に示す。古地磁気測定用の試料は、22 地点で採取した（NY01～22；図 3）。各々の地点では、エンジンドリルを用い直径 25mm のコアを 5～7 本採取した。コアの方位は、磁気コンパスで測定した。

実験室に持ち帰ったコアは、カッターで高さ約 22mm に切り揃え、古地磁気測定用の試料片とした。1 地点の試料片数は 12～16 個であった。

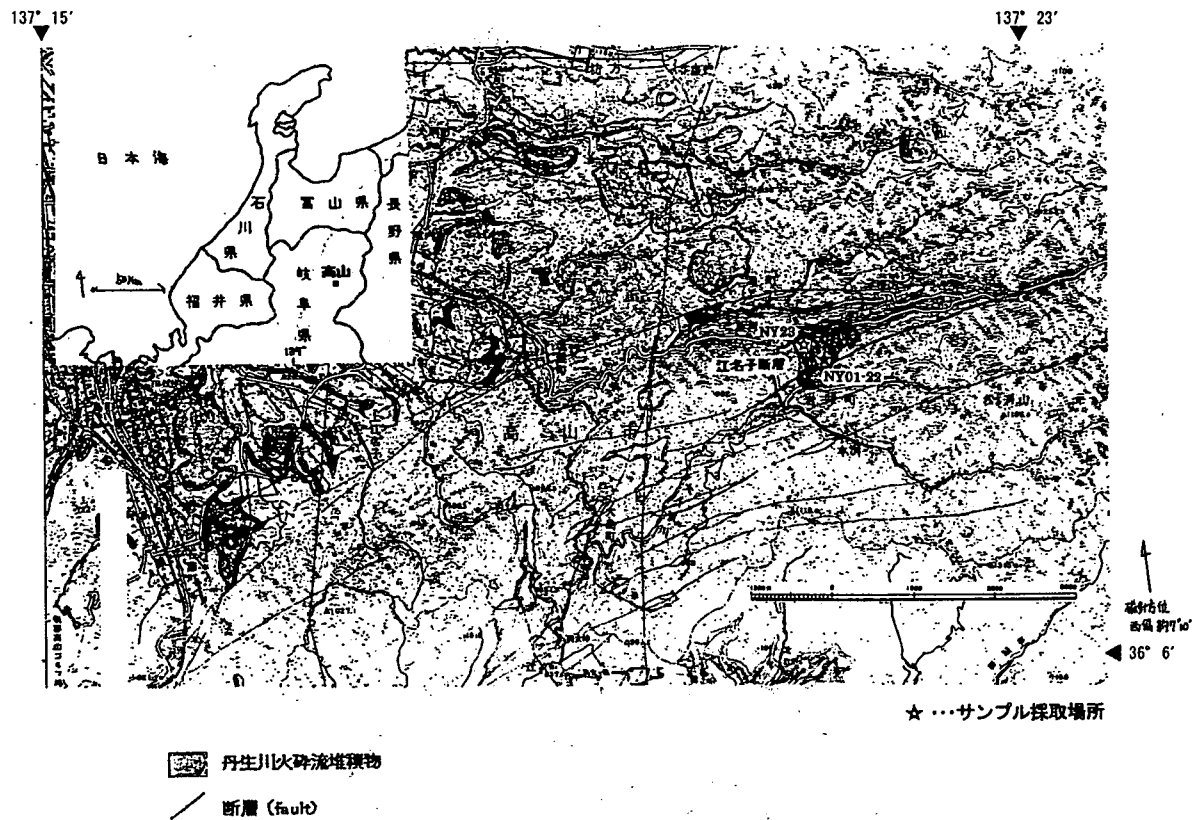


図 2 江名子断層と丹生川火砕流の位置図

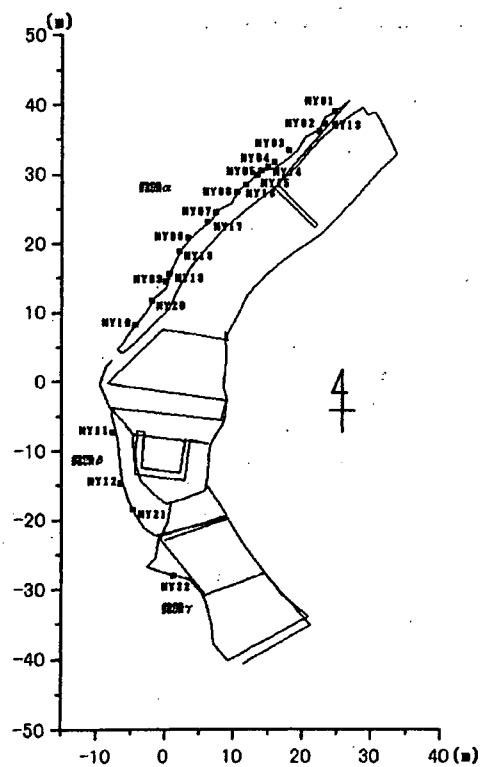
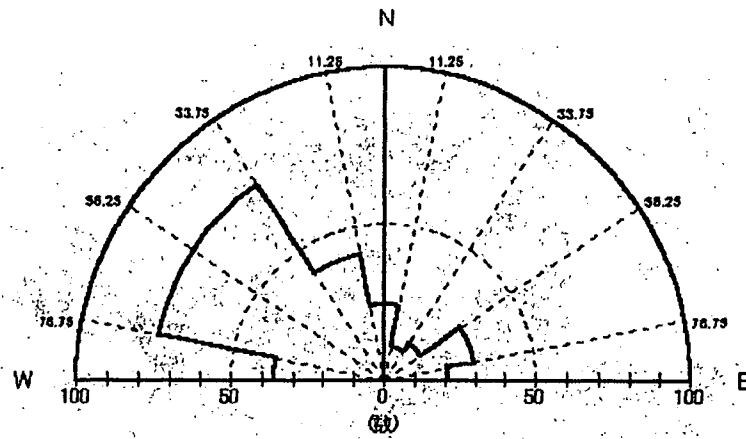
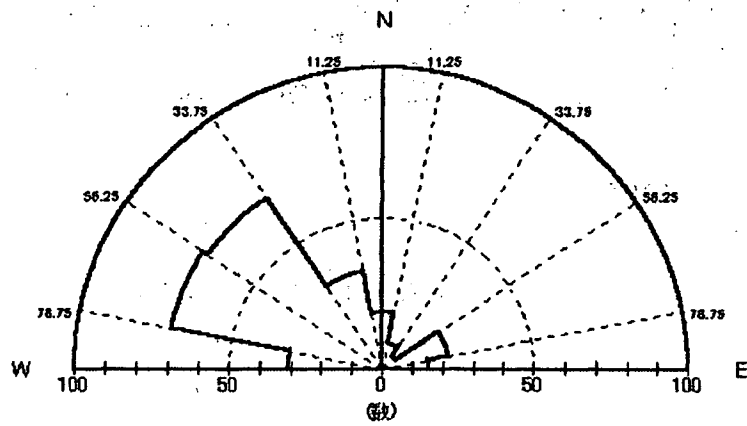


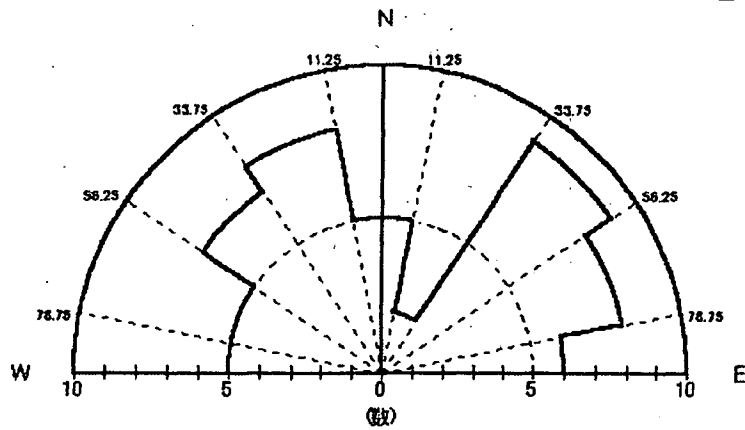
図 3 丹生川火砕流露頭の平面図と古地磁気試料採取地点 (NY01~22)



露頭α・βの全断層方位



露頭αの全断層方位



露頭βの全断層方位

図 4 露頭で観察された小断層方位のローズダイヤグラム

4. 測定結果

自然残留磁化 (natural remanent magnetization; NRM) を、作成した全ての試料片について、夏原技研製スピナー磁力計 (SMM-85) で測定した。その結果に基づいて、平均的磁化強度・方位を持つ試料片を選び、段階熱消磁実験 (progressive thermal demagnetization; PThD) および段階交流消磁実験 (progressive alternating field demagnetization; PAFD) を実施した。

PThD は高透磁率合金シールドで覆われた電気炉で行った。磁場を発生しないよう無誘導に巻かれた電気炉の内部は、試料位置で 10nT 以下と無磁場に近い状態である。消磁は 20~40℃間隔で段階的に温度を上げながら 680℃まで行い、1 段階毎に残留磁化を測定した。PAFD は高透磁率合金シールドで覆われたコイルに 2 軸タンブラーを挿入して行った。消磁は 5~10mT 間隔で段階的に磁場強度を上げながら 80mT まで行い、1 段階毎に残留磁化を測定した。

図 5 に、PThD と PAFD 結果のベクトル投影図を示す。全体に、丹生川火砕流は安定な残留磁化を保持しており、高いアンブロッキング温度と保磁力で特徴づけられる。図の直線で表される磁化成分は、ほとんどの地点で単一の逆帯磁成分であり、火砕流堆積時に獲得した熱残留磁化と考えられる。

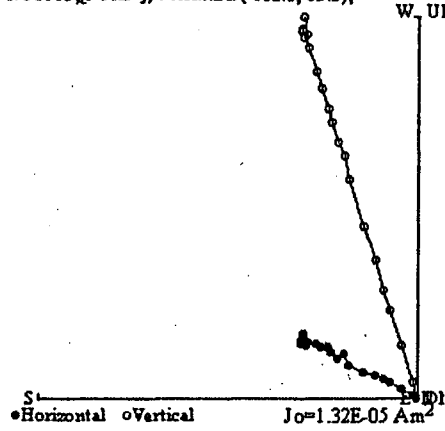
各々の地点で PThD と PAFD のどちらがより磁化成分の分離に適するかを判断し、試料片を追加して消磁を行い、Kirshvink (1980) の手法で磁化成分の直線回帰・方位計算を実施して、地点毎の平均磁化方位をもとめ、各種統計値を計算した。その結果を、表 1 に示す。

安定な残留磁化を担う強磁性鉱物を特定するため、Lowrie (1990) の提唱した岩石磁気学的実験を行った。これは、PAFD 済み試料片の直交 3 方向に交流磁場をかけて等温残留磁化 (isothermal remanent magnetization; IRM) を付加させる。その際に磁場強度は強→中→弱 (2T, 0.4T, 0.12T) と変化させる。これに PThD を施すことで、高保磁力・中保磁力・低保磁力成分 (それぞれ異なる強磁性鉱物が担っている) の相対的寄与を判断するものである。

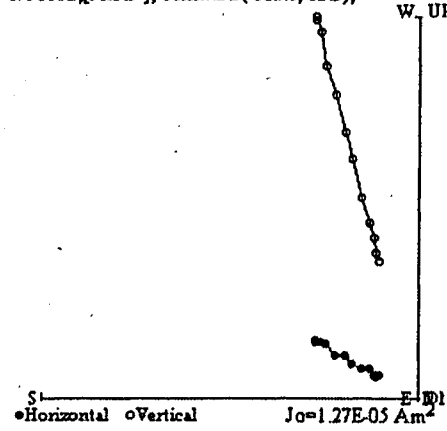
図 6 に、直交 3 軸 IRM の PThD における強度変化を示す。いずれの地点でも高保磁力成分の存在が確認される。それは 680℃の消磁で磁化が消失することから、ヘマタイトが担うものと考えられる。一方、低温で最大の強度を持つ低保磁力成分は 600℃以下の消磁でほとんど消失しており、マグネタイトが担うものであろう。前述した NRM の PThD では 600℃を境に磁化方位変化は見られず、丹生川火砕流の安定残留磁化は複数の強磁性鉱物が冷却時に獲得した熱残留磁化と結論される。すなわち、同時期の地球磁場方向を反映するものと考えてよい。

a) NY01 Th and AF

NY0113;[PThD];Orient:DD(182.0, 63.5);

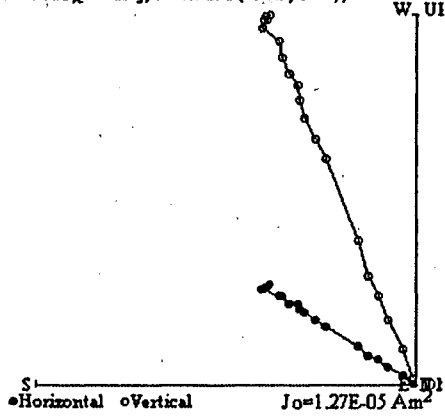


NY0112;[PAFD];Orient:DD(182.0, 63.5);

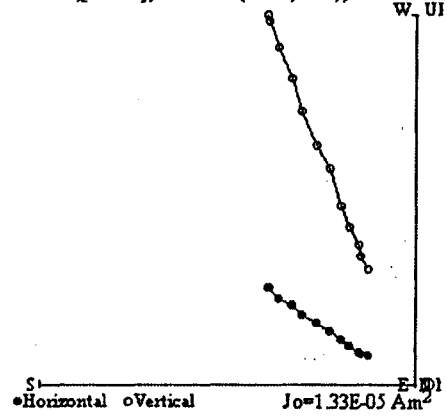


b) NY11 Th and AF

NY1122;[PThD];Orient:DD(91.0, 62.5);

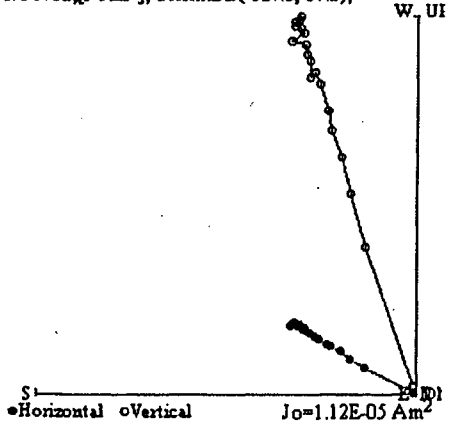


NY1121;[PAFD];Orient:DD(91.0, 62.5);

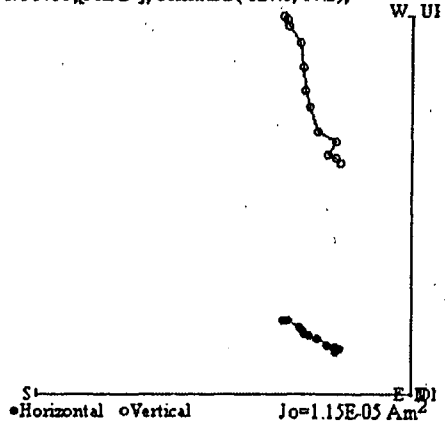


c) NY17 Th and AF

NY1712;[PThD];Orient:DD(127.0, 67.5);



NY1711;[PAFD];Orient:DD(127.0, 67.5);



Solid (Open) circles are projection of vector endpoints on the horizontal (N-S vertical) plane in in-situ coordinates.

図 5 丹生川火砕流の段階熱消磁 (PThD)・段階交流消磁 (PAFD) 実験結果のベクトル投影図 (黒丸は水平面, 白丸は南北方向の垂直面へのベクトル終点の投影結果を示す。図中の直線で表されるのが, 安定な残留磁化成分である。)

表 1 丹生川火砕流の古地磁気方位・仮想地磁気極 (VGP) 位置

	In-situ	Tilt-Corrected				VGP			
	D	I	Dc	Ic	$\alpha 95$	k	N	ϕ	λ
Site α									
NY01	-148.1	-71.0	-165.1	-65.1	1.1	2340.7	9	74.4	178.0
NY13	-153.1	-71.9	-171.1	-62.4	1.1	2335.0	9	79.8	176.3
NY02	-155.7	-72.2	-170.3	-61.8	1.8	1132.9	7	79.9	-178.4
NY03	-151.1	-72.3	-172.4	-66.2	1.2	1707.3	9	76.4	159.1
NY04	-142.9	-62.5	-155.7	-58.9	1.6	1028.3	9	70.6	-150.5
NY14	-151.0	-64.5	-164.4	-49.7	1.2	1718.9	9	75.8	-113.8
NY05	-146.1	-59.0	-156.4	-51.9	0.9	3372.9	9	70.2	-129.0
NY15	-145.1	-59.1	-147.9	-55.5	1.5	1122.6	9	64.2	-142.1
NY16	-150.4	-58.6	-146.6	-60.6	1.4	1338.4	9	63.6	-154.9
NY06	-155.1	-64.0	-160.8	-65.3	1.8	850.1	9	71.9	-177.0
NY07	-153.4	-63.4	-151.6	-58.5	1	2435.1	9	67.4	-149.1
NY17	-150.9	-68.1	-155.3	-57.3	1.4	1339.7	9	70.3	-145.3
NY08	-149.7	-65.6	-157.4	-67.9	0.9	3056.0	9	68.1	178.0
NY18	-142.2	-61.6	-143.7	-64.5	2	658.2	9	61.2	-164.7
NY19	-156.2	-65.4	-156.2	-61.4	1.2	1992.3	9	70.6	-159.1
NY09	-140.7	-59.4	-144.1	-54.9	1.2	1975.4	9	61.0	-142.0
NY20	-139.2	-50.7	-149.1	-60.7	1.6	1029.1	9	65.5	-155.2
NY10	-140.5	-61.8	-145.3	-54.4	1.3	1579.2	9	61.9	-140.5
Site β									
NY11	-146.3	-63.5	-135.2	-59.8	0.7	5193.0	9	55.0	-154.1
NY12	-162.2	-68.5	-141.1	-61.4	1.1	1719.7	9	59.5	-156.8
NY21	-112.7	-69.7	-116.5	-58.8	1.2	1833.3	9	40.8	-157.0
Site γ									
NY22	172.1	-70.2	-158.2	-57.3	0.6	6518.8	9	72.6	-144.9
Reference									
NY23A	-106.3	-50.8	-176.7	-74.3	0.9	6518.8	7	65.5	141.3
NY23B	-91.1	-60.7	*	*	1.9	825.8	8	*	*
丹治ほか(1977)	-174	-49	-171.0	-72.3	*	*	*	68.0	150.4

D and I: site mean declination and inclination in degrees (in-situ) ; Dc and Ic: site mean declination and inclination in degrees (untilted) ; $\alpha 95$: radius of 95% confidence circle; k: Fisher(1953)'s precision parameter; N: Number of specimens; ϕ and λ : latitude and longitude of virtual geomagnetic pole calculated for tilt-corrected site mean.

Sample localities (latitude, longitude) NY01-22 (36° 7.97' , 137° 21.42')

NY23A (36° 8.05' , 137° 21.20')

丹治ほか(1977) (36° 12.2' , 137° 26.6')

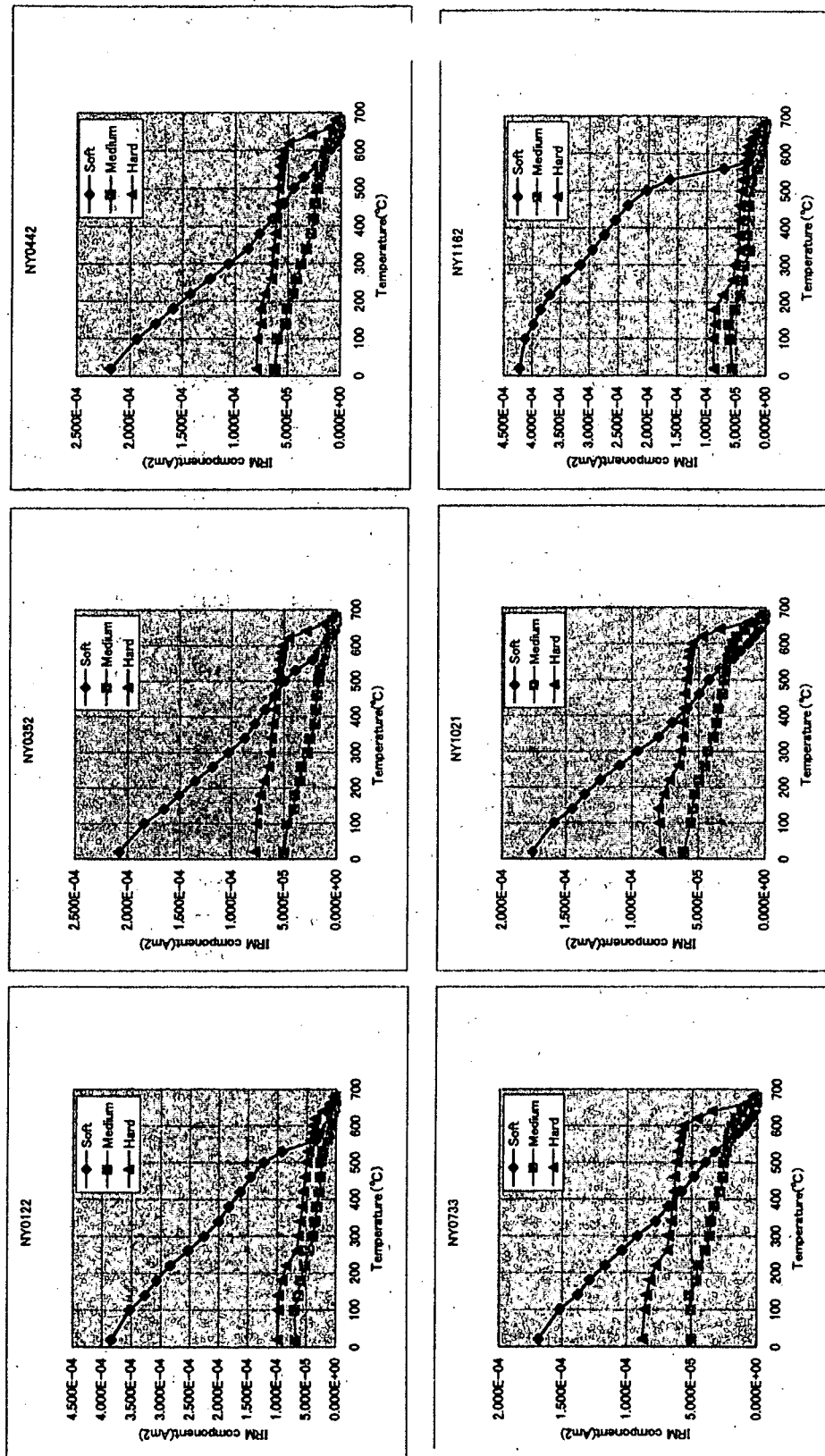


図 6 丹生川火砕流の直交 3 軸の IRM の PThD における軸強度変化

5. 解析と考察

22 地点の安定残留磁化方位（表 1）は全て逆帯磁であり、丹生川火砕流が松山逆磁極期に形成されたとする推定に調和的である。その方位には若干のばらつきが見られ、形成後の運動を反映したものと考えられる。図 7 は磁化方位の差と露頭で確認された小断層密度の分布を示している。両者の間には、明瞭な相関は確認されない。

前述のように、丹生川火砕流では本質レンズは観察されないため、古地磁気方位の傾動補正は行えない。そこで、本研究では磁化率の異方性（anisotropy of magnetic susceptibility; AMS）を測定した。これは微視的な岩石の組織を反映しており、磁化率最小軸 K3 が火砕流堆積時の垂直方向に近いと考えられる。表 2 に KappaBridge を用いて測定した AMS パラメータを示す。

図 8 は、AMS に基づいて傾動補正した場合の、伏角・偏角値が地点毎に変化する様子を示す。伏角に関しては、ばらつきも小さく一定傾向は認められない。一方、偏角は江名子断層谷の中軸（NY21 付近）に向かって時計回り相対回転角が増大する傾向が明瞭に認められる。さらに、谷をまたいだ NY22 では、回転量が急減していることが注目される。この谷は「活断層の可能性のあるリニアメント」とされているが、明瞭な変位地形は確認されない。今回、古地磁気学的手法によって有意な回転運動が検出されたことは、江名子断層の第四紀の活動を初めて実証したものといえる。

表 2 丹生川火砕流の磁化異方性（AMS）測定結果

AMS parameters of the Nyukawa Pyroclastic Flow Deposit exposed across an active fault in central Japan
Sample preparation and description by S. Doshida, measurement and analysis by Y. Itoh (2001-2002)

Site	N of data	K ₁	Dec.	Inc.	K ₂	Dec.	Inc.	K ₃	Dec.	Inc.	L (K ₁ /K ₂)	F (K ₂ /K ₃)	P (K ₁ /K ₃)	P _J	T	q
NY01	13	1.009	262	3	1.002	353	9	0.990	154	81	1.007	1.012	1.019	1.019	0.259	0.458
NY02	12	1.009	269	3	1.003	360	12	0.988	166	78	1.006	1.015	1.021	1.022	0.446	0.324
NY03	15	1.011	253	3	1.000	343	10	0.989	145	80	1.011	1.011	1.022	1.022	0.010	0.663
NY04	13	1.013	278	5	0.999	9	6	0.988	147	82	1.014	1.011	1.025	1.025	-0.101	0.766
NY05	15	1.010	289	6	1.000	20	8	0.989	164	80	1.010	1.011	1.021	1.021	0.053	0.625
NY06	14	1.013	286	3	1.000	196	1	0.987	86	87	1.013	1.013	1.026	1.026	0.037	0.640
NY07	14	1.011	93	3	1.001	3	4	0.988	219	85	1.010	1.013	1.023	1.023	0.108	0.579
NY08	12	1.014	308	3	1.001	218	3	0.985	82	86	1.013	1.016	1.029	1.030	0.088	0.597
NY09	12	1.014	290	1	1.000	20	4	0.987	192	85	1.014	1.013	1.027	1.027	-0.048	0.717
NY10	14	1.010	289	1	1.002	19	8	0.988	195	82	1.008	1.014	1.022	1.023	0.242	0.471
NY11	15	1.007	112	7	1.003	22	2	0.990	278	83	1.004	1.013	1.017	1.018	0.505	0.284
NY12	16	1.010	98	12	1.005	7	3	0.985	263	78	1.005	1.020	1.025	1.027	0.624	0.210
NY13	15	1.009	258	2	1.002	348	11	0.989	159	78	1.007	1.013	1.020	1.021	0.302	0.426
NY14	14	1.009	284	7	1.000	16	15	0.990	172	73	1.009	1.010	1.019	1.019	0.050	0.627
NY15	15	1.011	289	1	1.000	19	4	0.988	187	86	1.011	1.012	1.023	1.023	0.023	0.652
NY16	15	1.011	110	2	1.002	200	3	0.987	344	87	1.009	1.015	1.024	1.025	0.213	0.494
NY17	16	1.013	92	2	1.000	1	10	0.987	195	79	1.013	1.013	1.026	1.026	0.006	0.667
NY18	15	1.012	306	1	1.001	216	3	0.987	52	87	1.011	1.014	1.025	1.025	0.137	0.555
NY19	13	1.015	104	1	1.000	14	4	0.985	204	86	1.015	1.015	1.030	1.030	0.016	0.659
NY20	15	1.014	301	7	1.002	210	9	0.984	70	78	1.012	1.018	1.030	1.031	0.211	0.497
NY21	14	1.009	131	3	1.005	40	11	0.987	236	79	1.004	1.018	1.022	1.024	0.624	0.210
NY22	16	1.014	106	13	1.008	12	14	0.978	236	71	1.006	1.031	1.037	1.040	0.718	0.154
NY23-A	8	1.015	292	37	1.008	197	6	0.977	99	52	1.007	1.032	1.039	1.041	0.635	0.204
NY23-B	9	1.013	263	31	1.008	357	6	0.978	97	58	1.005	1.031	1.036	1.039	0.729	0.148
NY24	13	1.008	51	23	1.007	320	4	0.985	220	67	1.001	1.022	1.023	1.026	0.892	0.056

T and q are not calculated on the basis of Excel functions.

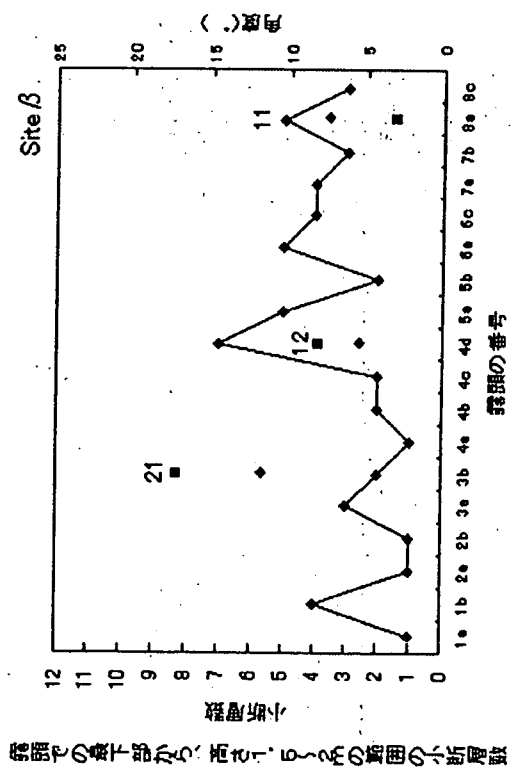
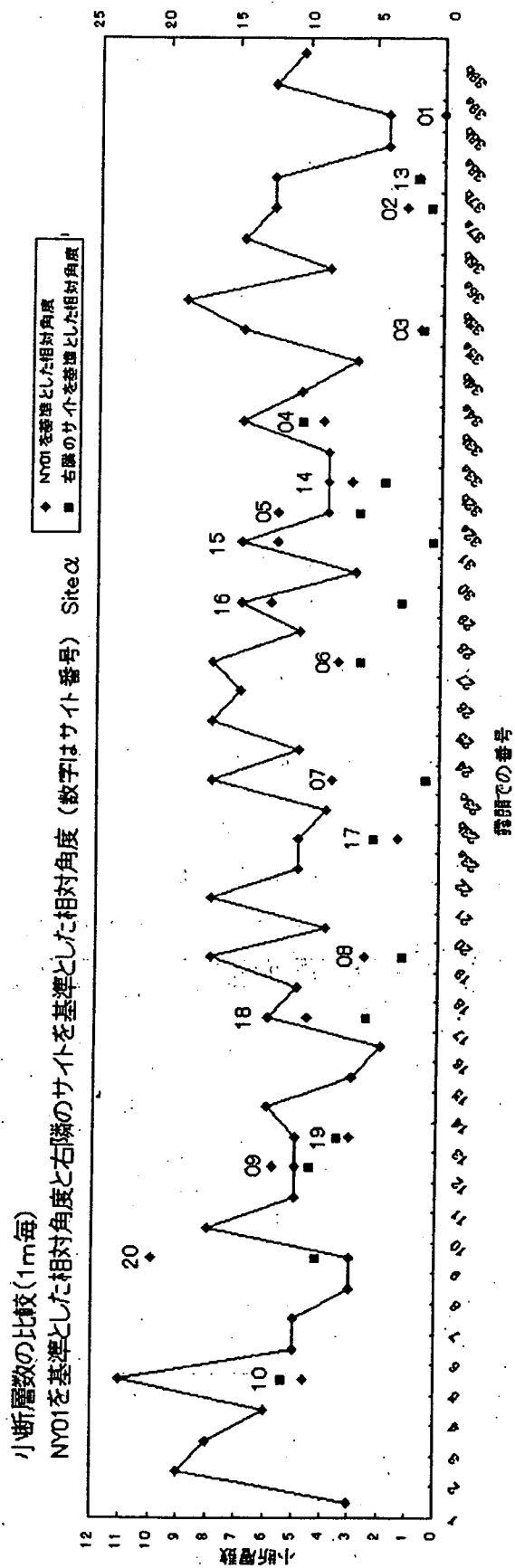


図 7 露頭で確認された小断層密度 (折れ線) 古地磁気方位の相対変位角度

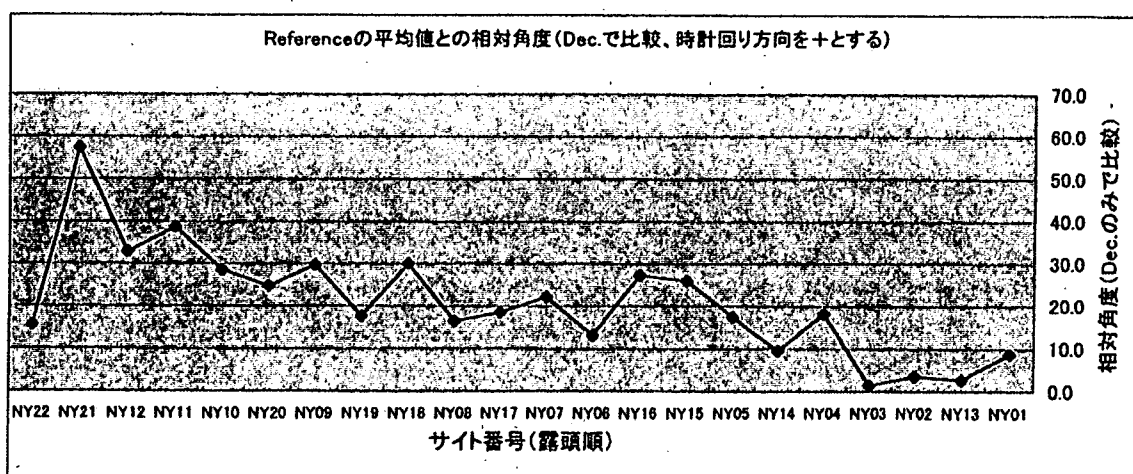
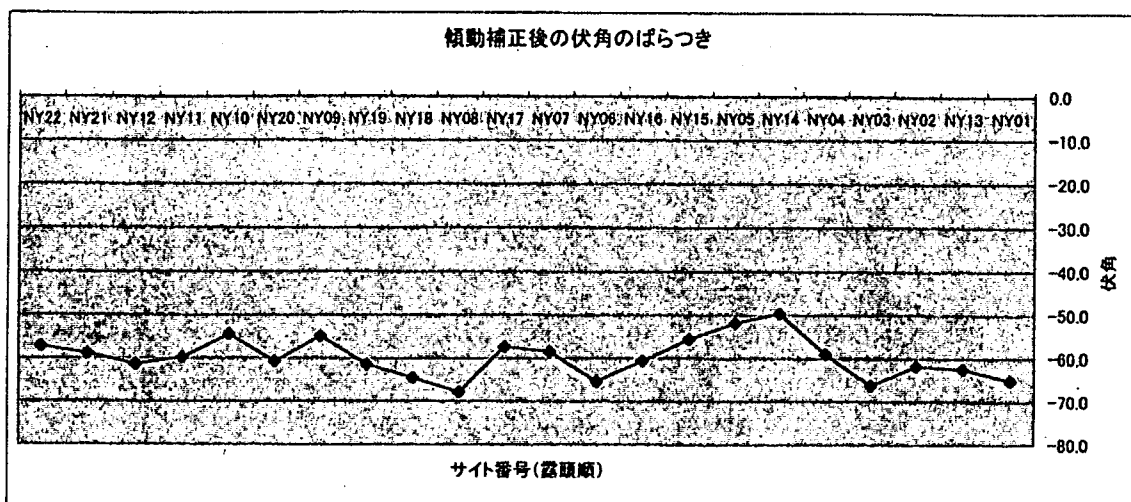


図 8 傾動補正後の古地磁気方位の伏角・偏角

6. まとめ

本研究によって、断層近傍の変形が、古地磁気学的手法で実証された。これは、累積変形量の小さい第四紀の岩石から得られたデータであることが注目される。また、露頭で観察された小断層と変形パターンに明瞭な相関が見られず、地質学的な検討のみでは、岩盤変形評価が完全ではないことを指摘できるかもしれない。もちろん、構造地質学的手法で詳細に記載された断層帯を評価する際にも有効であることは言うまでもない。例えば、顕著な横ずれ断層帯（トランスフォーム断層）である北米のサンアンドレアス断層周辺や伸張テクトニクス場であるベースンアンドレンジ地域では、古地磁気学的手法を駆使して、新生代を通じたブロック回転運動の範囲と量が評価されている（Hornafius et al., 1986 ; Janecke et al., 1991）。

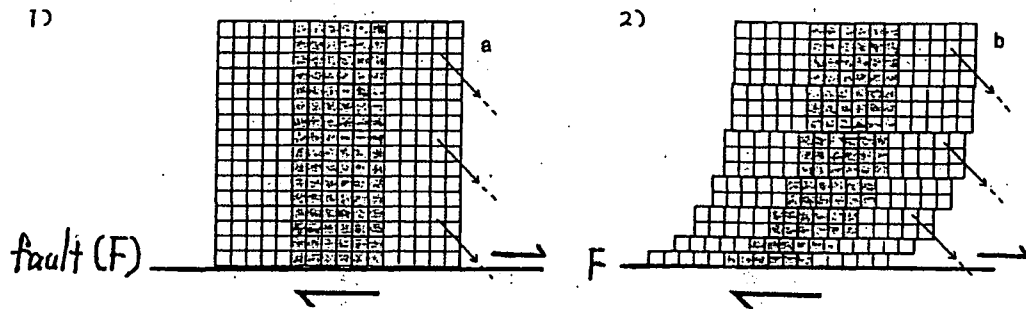
図 9 は、横ずれ断層近傍での岩盤変形モデルを示している。今回の研究では断層近傍で変形量が系統的に変化する傾向が確認された。これはモデル B-1,3 に該当する。そのどちらが妥当かについては、データの密度・精度を向上させカバーする範囲を拡大して、検討を続行する必要がある。中部地方については、断層ブロックの回転モデルが Kanaori et al. (1990) などにより提示されている。今回の結果は、剛体的な回転運動を仮定するモデルとは一見矛盾するが、断層の活動度や変形の規模によって地殻変形のメカニズムは異なるかもしれない。今後は、変形の規模とモードを意識した研究が必要と考えられる。

大規模火砕流の多くはテフラを伴い、それは広域に対比可能である。テフラは一般に多くの強磁性鉱物を含み、安定な堆積残留磁化を保持している。これら給源火砕流と遠隔地のテフラの古地磁気方位は、元々は同時に獲得された同方向のものと考えられるので、それらを精密に比較することで、より広域での地殻の変形をモニタリングできる可能性が指摘される。図 10 は、長橋ほか（2000）による第四紀の大規模火砕流とそれに対比されるテフラの分布を示している。この例では、中部山岳地帯を中心に半径数 100 km の範囲について、変形を評価することができる。

また、高レベル放射性廃棄物の地層処分の観点からは、これらの成果は、第四紀の火砕流堆積物が分布し、活断層の分布がリニアメント解析により指摘される領域という限定があるものの、地層処分研究開発において技術的な課題となっていた活断層帯の影響範囲および伏在活断層の有無を把握できる可能性を示すものである。今後の課題としては、本手法がどのような地質構成に対して有効で、どの精度まで把握しうるのかを明確にしていくこと、すなわち適用範囲の提示が挙げられ、それは上述した「高精度・高密度調査」と「テフラを用いた広域的な対比調査」により可能になっていくものと考えられる。

右横ずれ断層による、断層近傍の変形のモデル

A) 断層運動による回転が起こらない



B) 断層運動による回転が起こる

a・時計回り回転が起こる

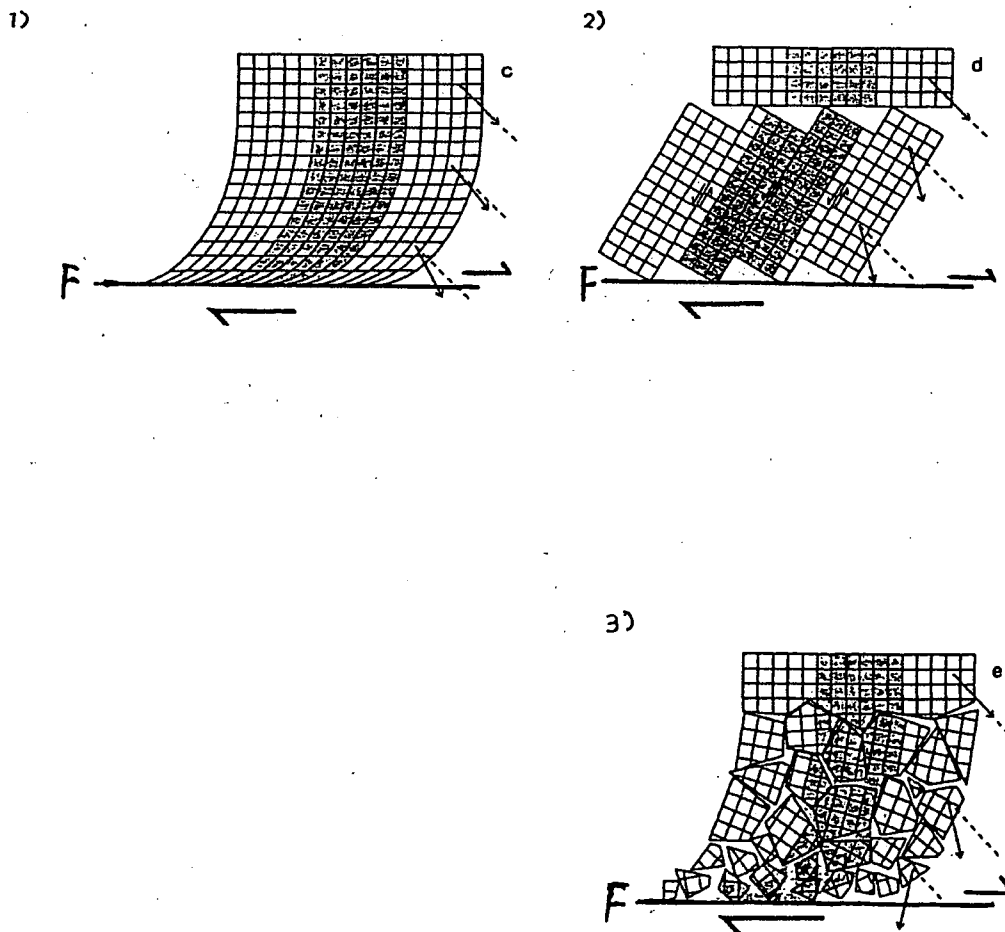


図 9 横ずれ断層近傍の岩盤変形モデル

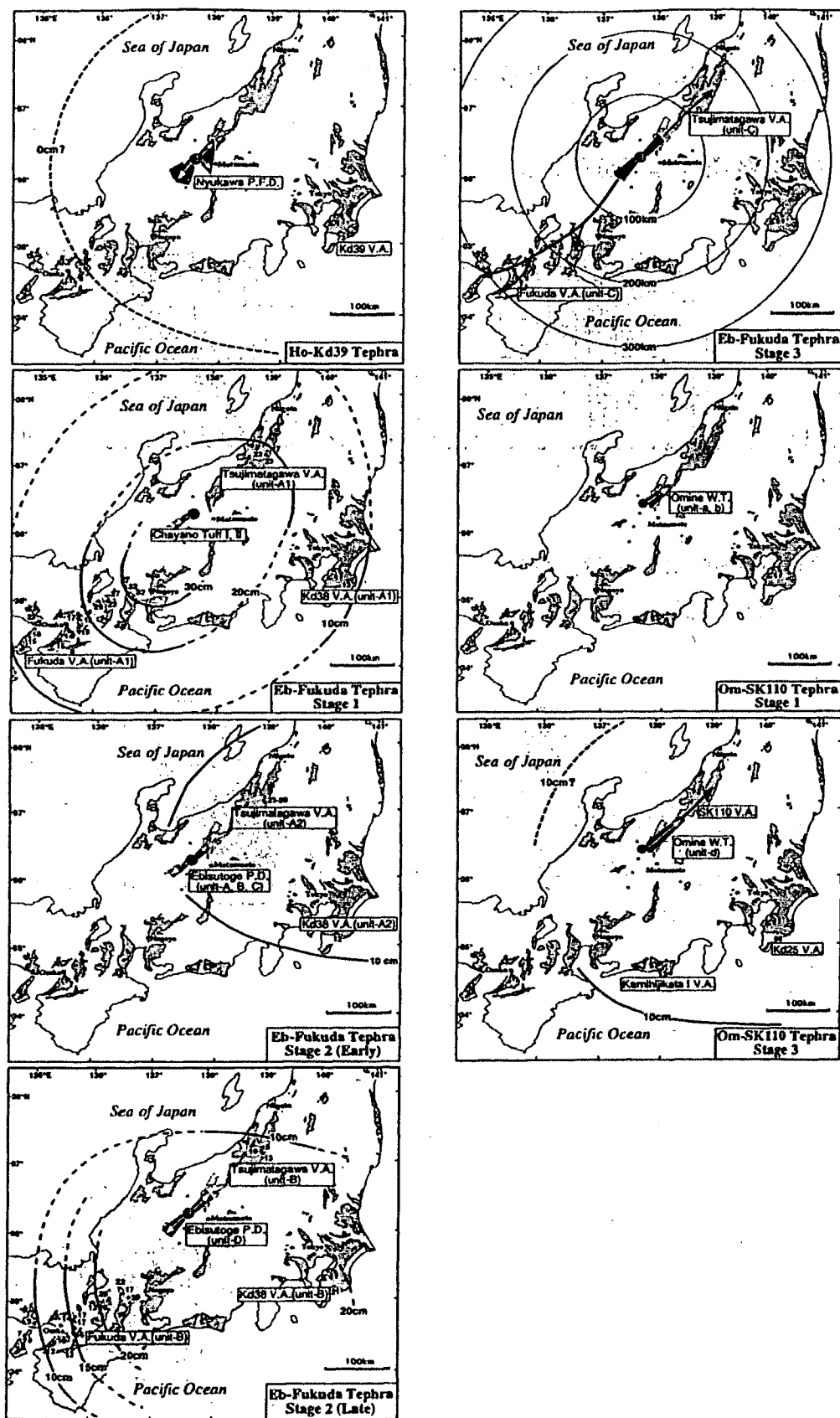


図 10 長橋ほか（2000）による中部地方の大規模火砕流と対比されるテフラの分布

7. 謝辞

古地磁気・岩石磁気学的パラメータの測定は、同志社大学理工学研究所・京都大学大学院人間環境学研究科の実験室で行った。その使用に際して、林田明教授（同志社大学）と石川尚人助教授（京都大学）には各種の便宜を計っていただいた。現地調査にあたっては、京都大学理学部地球物理学教室の堤浩之博士と木村治夫氏にご協力をいただいた。この場を借りて、以上の方々に、厚く御礼申し上げます。

8. 参考文献

- Hornafius, J.S., Luyendyk, B.P., Terres, R.R., Kamerling, M.J., 1986. Timing and extent of Neogene tectonic rotation in the western Transverse Ranges, California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 97, 1476-1487.
- Itoh, Y., Amano, K., Danhara, T., 2000. Paleomagnetism, rock magnetism, and fission track dating of the Kurihashi Granodiorite in northeast Japan: Evidence for a Cretaceous hydrothermal event and differential rotation along the eastern Eurasian margin. *J. Geophys. Res.* 105, 13519-13532.
- Janecke, S.U., Geissman, J.W., Bruhn, R.L., 1991. Localized rotation during Paleogene extension in east-central Idaho: Paleomagnetic and geologic evidence. *Tectonics* 10, 403-432.
- 核燃料サイクル開発機構, 1999. わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊1 わが国の地質環境, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TN1400 99-021.
- Kanaori, Y., Endo, Y., Yairi, K., Kawakami, S., 1990. A nested fault system with block rotation caused by left-lateral faulting: the Neodani and Atera faults, central Japan. *Tectonophysics* 177, 401-418.
- Kirschvink, J.L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 62, 699-718.
- Lowrie, W., 1990. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties. *Geophys. Res. Lett.* 17, 159-162.
- 長橋良隆, 里口保文, 吉川周作, 2000. 本州中央部における鮮新-更新世の火砕流堆積物と広域火山灰層との対比および層位噴出年代. *地質雑* 106, 51-69.
- Otofuji, Y., Hayashida, A., Torii, M., 1985. When was the Japan Sea opened?: Paleomagnetic evidence from Southwest Japan. In: Nasu, N., Uyeda, S., Kushiro, I., Kobayashi, K., Kagami, H. (Eds.), *Formation of Active Ocean Margins*. Terra Publishing Co., Tokyo, pp. 551-566.