

摩擦すべりに伴う細粒石英ガウジのTL信号強度変化

—— 剪断応力から期待される完全ゼロイング深度 ——

平 賀 章 三・吉 本 晃 子*・嶋 本 利 彦**

奈良教育大学理科教育講座(地学)

(平成16年5月6日受理)

TL Intensity Changes of Fine-grained Quartz Gouge during Frictional Sliding

— Complete Zeroing Depth Estimated from the Result of Shear Experiments —

HIRAGA Shozo, YOSHIMOTO Akiko and SHIMAMOTO Toshihiko

(Department of Earth Sciences, Nara University of Education, Nara 630-8528, Japan)

(Received May 6, 2004)

Abstract

We investigated the TL intensity changes of simulated intrafault materials of quartz from the St. Peter Sand, focusing our attention on the effect of frictional work due to shear stress. The shear experiment runs were performed under a sufficiently low slip rate of $56 \mu\text{m/s}$ to avoid the effect of frictional heating. Furthermore, to ensure the TL intensity increase due to a shear fracture (Hiraga *et al.*, 2002) was effectively negligible, we used samples previously fine-grained to $1\text{--}8 \mu\text{m}$ diameter.

It was found that TL intensity decreased linearly with an increase in frictional work, and obtained the complete zeroing condition of 4.8 kJ/g or 1.2 MJ/m^2 by extrapolation of the regression line. Next, we evaluated the shear stress of 0.76 MPa satisfying this condition in case of an earthquake of magnitude 7, based on the displacement of 1.6 m derived from the relationship (Matsuda, 1995) between magnitude and displacement of an earthquake. Finally, we estimated the complete zeroing depth of 130 or 40 m for a normal or reverse fault respectively, assuming a vertical normal stress to be a lithostatic pressure, at the time of examination of stress field, satisfying Coulomb's failure criterion with a Mohr's circle.

The complete zeroing of TL intensity can be expected to be attainable under more gentle conditions in the case of an actual faulting because of frictional heating. This is a subject for future studies, to perform experiments under faithfully simulated conditions for an actual faulting.

Key Words : frictional sliding, fine-grained quartz
gouge, complete zeroing

キーワード : 摩擦すべり, 細粒石英ガウジ, 完全ゼロ
イング

* 京都大学理学部地質学鉱物学教室研究生修了

** 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地質学鉱物学教室

1. 序 論

活断層の最新活動年代を評価できれば、地震予知に大きく貢献するであろう。断層破砕帯内物質そのものを試料とした直接的年代評価の可能性が、最初に ESR法で示唆され (Ikeya *et al.*, 1982), 多くの断層で評価されてきた (たとえば, 田中ほか, 1981; 大村ほか, 1981; 伊藤・澤田, 1984; 田中ほか, 1984; 森山ほか, 1984; Fukuchi *et al.*, 1985, 1986; Fukuchi, 1988; Buhay *et al.*, 1988; Fukuchi, 1989; 林, 1989; Lee and Schwarcz, 1994, 1996など)。これらは、断層活動後に試料が蓄積してきた放射線損傷量は断層活動からの経過時間に比例する、という現実的仮定に基づいている。放射線損傷量の測定に基づくという点で基本的原理を一にする TL法も、やや遅れて各地の断層試料に適用されてきた (たとえば, Sato *et al.*, 1985; Nishimura and Horinouchi, 1989; 林, 1989; Hiraga and Nagatomo, 1995; 森本・平賀, 1997; 平賀・吉田, 2000など)。

評価された年代が最新活動年代を意味するには、それまでに試料の蓄積してきた放射線損傷量が、最新活動時に完全ゼロイングされていることが必要である。この条件の実験に基づく検討は、ESR法では精力的になされてきた (たとえば, 三木・池谷, 1981; Miki and Ikeya, 1982; Tanaka and Shidahara, 1985; Ariyama, 1985; Lee and Schwarcz, 1993など) が、TL法では最近まで未着手であった。断層活動時における放射線損傷量については信号強度の、ゼロイング機構の詳細は明らかでなく、考えられる素過程ごとに検討する必要がある。平賀・森本 (2001) は断層活動時に期待される瞬時の昇温を取り上げ、その影響を熱パルスの加熱実験により検討し、“瞬時の昇温では、TL信号の完全ゼロイングを、昇温温度そのものにおいては必ずしも期待できないが、より低温側において認めることができる”とした。

さらに、Hiraga *et al.* (2002) は応力を取り上げ、150-250 μm 粒径の石英を出発試料とした剪断実験を行ない、ゼロイングに対する効果を検討したところ、TL信号強度は低応力下でいったん増加しその後減少する、という新知見を見出した。彼らはこの事実を2つの機構が作用していると解釈した。1つは応力増加に伴う信号強度の減少機構で、これは普通に期待されているものである。2つ目は信号強度の増加機構である。石英の剪断破壊によって新しい界面ができるが、この界面生成に伴い発生した電離電子は、放射線被曝による電離電子と区別できず、結果として信号強度の増加が認められた、というものである。

本研究では、剪断破壊による試料表面積ひいては信号強度の、増加の影響を無視できる程度に細粒化した石英を出発試料とし、摩擦すべりによる完全ゼロイング条件

を、実験的に明らかにすることを目的とした。

2. 実 験

2.1. 試料調整

実験に供した試料は、以下の処理により、St. Peter Sandから抽出した。これはカナダOttawa州のCambrian St. Peter Sandstoneを母岩とするもので、Ottawa Sandとも称される。わずかな不純物を含むがほぼ純粋な、よく丸みを帯びた石英からなる。

①10%塩酸で60 min処理、洗浄、乾燥させた試料を電磁分離、さらにハンドピッキングにより不純物を除去。②タングステンカーバイド製乳鉢で磨砕し回収した20 μm 以下の試料を再度磨砕。③アセトン中に分散し2 min静置後回収した懸濁液のみを再分散、20 min静置後沈殿物のみを回収、乾燥させた粒径1-8 μm の石英を試料とした。なお、試料の洗浄は蒸留水とアセトンで各10 minずつ、乾燥は40°Cにて行なった。

2.2. 剪断実験

十分に研磨した4×5 cmのハンレイ岩の各ブロック面上に、500 mgの試料を均一に沈着させ、剪断実験でかける垂直荷重と同じ1,2,4,6,8,10 tで30 minプレプレスした。また13 tのプレプレスのみ試料も用意した。

剪断実験には京都大学大学院理学研究科の高温二軸摩擦試験機を用いた。プレプレス後の試料を、Fig. 1のようにセットし、プレプレス時と同じ垂直荷重をかけて剪断した。実験条件は、摩擦加熱の影響を無視できるよう十分に遅い変位速度56 $\mu\text{m/s}$ 、変位量2 cmであった。さらに、垂直荷重6,10 tに関しては、変位量1 cmの実験も行なった。これは、信号強度に影響を及ぼすものが応力そのものなのか、あるいは摩擦仕事なのかを確認するためである。

2.3. TL測定

プレプレスのみ試料ならびに、企図した剪断の影響を確実に受けたと考えられる試料のうち、十分な量を回収できたものを測定することとした。これまでの過程で試料粒子に汚れの付着している可能性があるため、15%過酸化水素水処理を行なった後、アセトン中に分散20 min静置し、1-8 μm 粒径とみなせる沈殿物のみを回収した。内径9 mmの真鍮製試料皿10個を50 mlビーカーの底に水平に敷き詰め、約2.5 cm深までアセトンを入れた。別途アセトン中に懸濁させた試料を、一皿あたり2.0 mg量を目安に均等に滴下、残存アセトンで40°Cで蒸発させ測定試料とした。

TL測定はDaybreak 1150 TL/OSL装置を用い、窒素雰囲気下で行なった。測定条件は昇温速度が10°C/s、

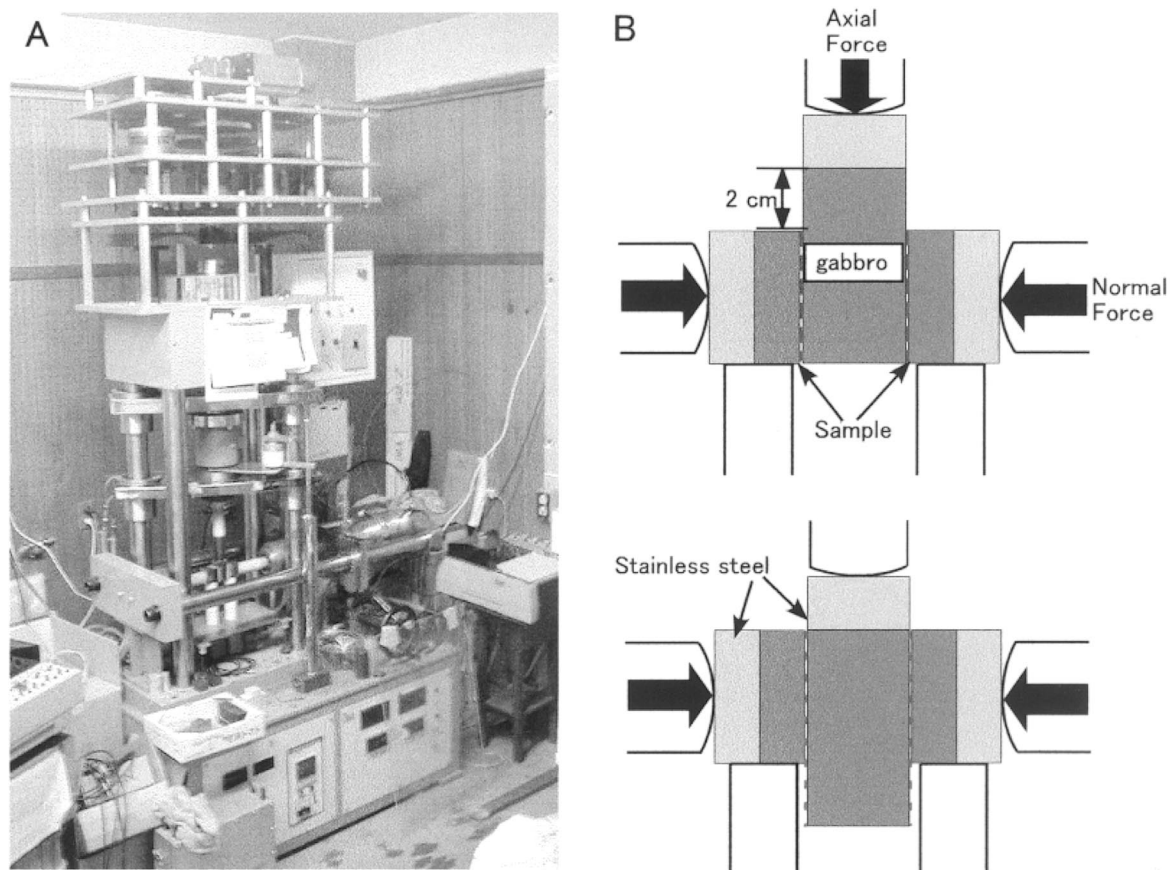


Fig. 1 A : Photograph of the high-temperature biaxial testing machine.

B : Schematic diagram showing the sample assembly before and after a shear experiment.

到達温度 500℃, 検出波長は 310-440 nm であった.

なお以上の試料調整, 剪断実験および T L 測定の一連の作業は赤色光 25 lx 以下で行ない, 試料の洗浄と分散にはブラソニック卓上型超音波洗浄器 B2200 J3 (ヤマト科学(株)) を, 乾燥蒸発には送風定温乾燥機 DK-42 (ヤマト科学(株)) を用いた.

2.4. 粒度分布測定

実験前後において試料の粒度分布がどのように変化したかを調べるため, 出発試料, プレプレスのみ試料, 剪断実験後の各試料について粒度分布測定を行なった. エタノール 2 ml 中で試料 10 mg を 40 min 分散後, 堀場 自然・遠心沈降式 自動粒度分布測定装置 CAPA-300 にセットし, 遠心沈降測定を行なった. 測定条件は, 最大粒子径: 10.00 μm , 最小粒子径: 1.00 μm , 粒子径間隔: 1.00 μm , 回転速度: 1000 rpm, 測定時間: 140 s であった.

3. 結 果

以後, 出発試料を N, 剪断実験における垂直荷重 1-10 t の試料を A~F, 対応する垂直応力のプレプレスのみ試料を a~f で表す. また 13 t の垂直荷重に対応するプレプレスのみ試料は g で, 剪断実験における変位量 1 cm

の試料はプライム符号を付して表す.

3.1. 摩擦強度と摩擦係数

剪断実験における垂直応力は, 試料を挟んだブロック面積 20 cm^2 で垂直荷重を除して算出し, 剪断応力は, 軸荷重を, それを支えるブロック面積 $20\text{cm}^2 \times 2$ で除して算出した. 変位に伴う剪断応力の変化を Fig. 2 に示す. 固着すべりを示さなかった試料 A, ならびに変位量 1 cm の 2 試料 D' と F' を除く各試料は, 変位開始後すぐに最大摩擦強度を示し, その後, やや剪断応力が降下し, 残留摩擦強度を示して実験は終了した. 垂直応力と剪断応力の関係を Fig. 3 に示す. 最大摩擦強度と残留摩擦強度から静摩擦係数と動摩擦係数を求めたところ, いずれも約 1.00 の決定係数で, 0.62 と 0.54 となった.

Fig. 2 の各曲線と横軸間の面積から求めた単位面積あたりの仕事を, 試料量 500 mg を考慮して単位質量あたりの仕事に換算した. 剪断実験における垂直荷重, 垂直応力, 剪断応力, 変位のデータとともに Table 1 に示す.

3.2. T L 測定結果

プレプレスのみと, 剪断実験を行なった試料のグローカーブを Fig. 4 に示す. 各グローカーブは, 1 試料につき得た 5-10 本のグローカーブを平均したもので, 生

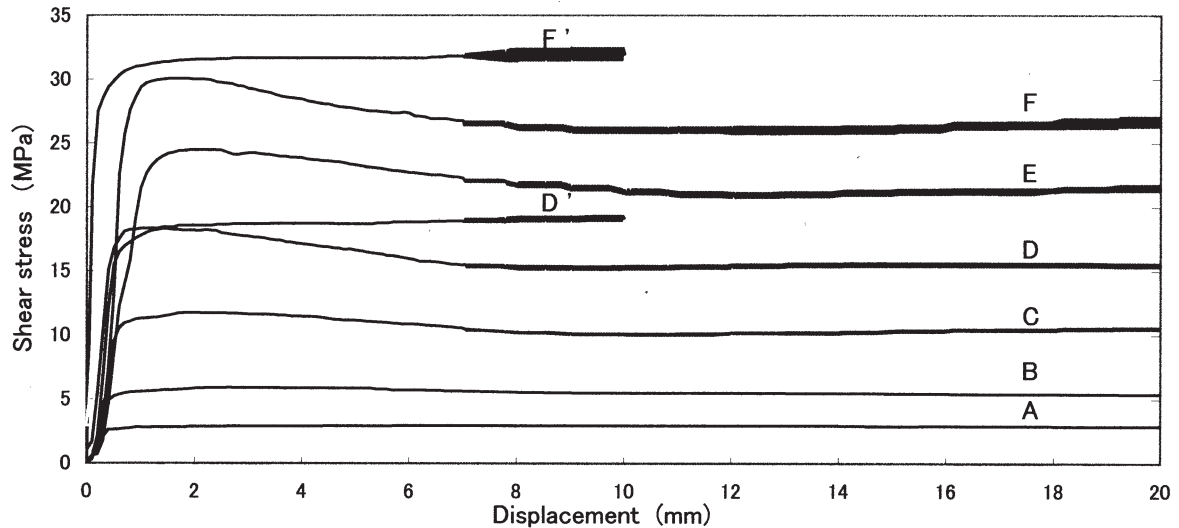


Fig. 2 Shear stress change with displacement for quartz from the St. Peter Sand. The sample A, B, C, D, E or F was subjected to the normal stress of 4.9, 9.8, 19.6, 29.4, 39.2 or 49.0 MPa, respectively.

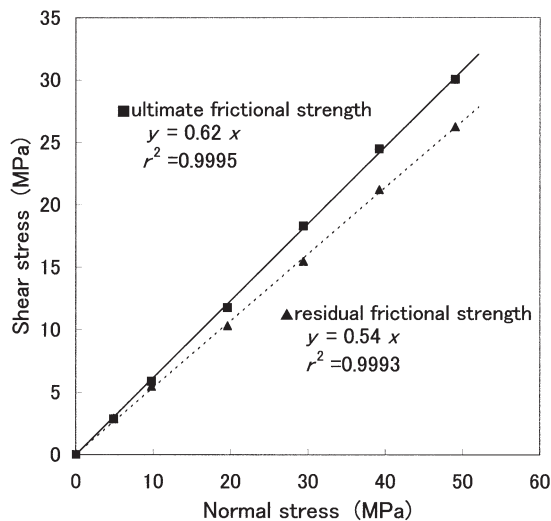


Fig. 3 Relationship between normal stress and shear stress for quartz from the St. Peter Sand. The friction coefficient of 0.62 was found from the slope of regression line for ultimate frictional strength with the determination coefficient of 0.9995.

データを App. 1-1, 1-2 に示す。

プレプレスのみ試料の垂直応力に対する TL 信号強度と、剪断実験試料の単位質量あたりの仕事に対するそれを、Fig. 5 に示す。TL 信号強度は、Fig. 4 に示したグローカーブの 325℃ ピークの半値幅、285-375℃ にわたる積分強度である。

プレプレスのみ試料の TL 信号強度は、垂直応力の増加にかかわらずほぼ一定値を示し、また剪断実験試料のそれは、単位質量あたりの仕事の増加に伴い、明らかな直線的減少を示した。

3.3. 粒度分布測定結果

粒度分布測定結果 (App. 2-1, 2-2) における各級の全体に占める割合を重みとし、代表値の重みつき平均値として各試料の平均粒径を求めた。また、試料粒子は平均粒径をもつ球と仮定し、試料重量と石英の密度 2.65 g/cm³ を考慮して、各試料増加表面積の試料 N の表面積に対する割合を算出した。プレプレスのみ試料については垂直応力に対する、剪断実験試料については単位質量あたりの仕事に対する、平均粒径の変化を Fig. 6 に、増加表面積の割合の変化を Fig. 7 にそれぞれ示す。

Table 1 Normal force, normal stress, shear stress, displacement and frictional work for sheared quartz from the St. Peter Sand.

Sample name	Normal force [t]	Normal stress [MPa]	Shear stress [MPa]	Displacement [cm]	Frictional work [kJ/g]
A	1	4.9	2.9	2	0.23
B	2	9.8	5.9	2	0.44
C	4	19.6	11.8	2	0.84
D	6	29.4	18.3	2	1.26
D'	6	29.4	19.2	1	0.73
E	8	39.2	24.5	2	1.71
F	10	49.0	30.1	2	2.11
F'	10	49.0	32.0	1	1.26

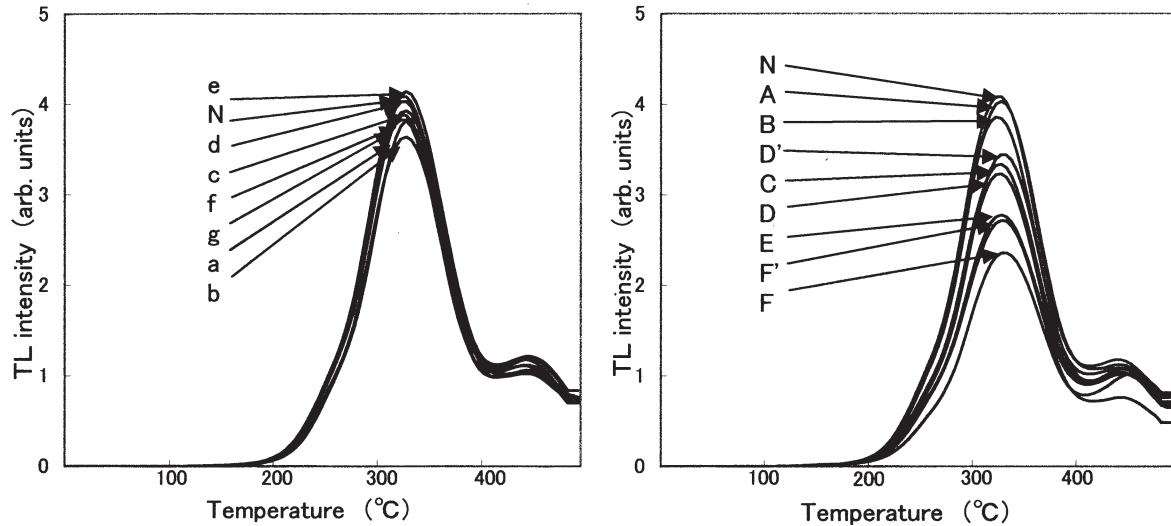


Fig. 4 TL glow curves of quartz from the St. Peter Sand. The left-hand figure is for natural and only pre-pressed samples. The right-hand figure is for natural and sheared samples. On the sample notation, see the text. Each glow curve is the average of 5-10 measurements corrected for background.

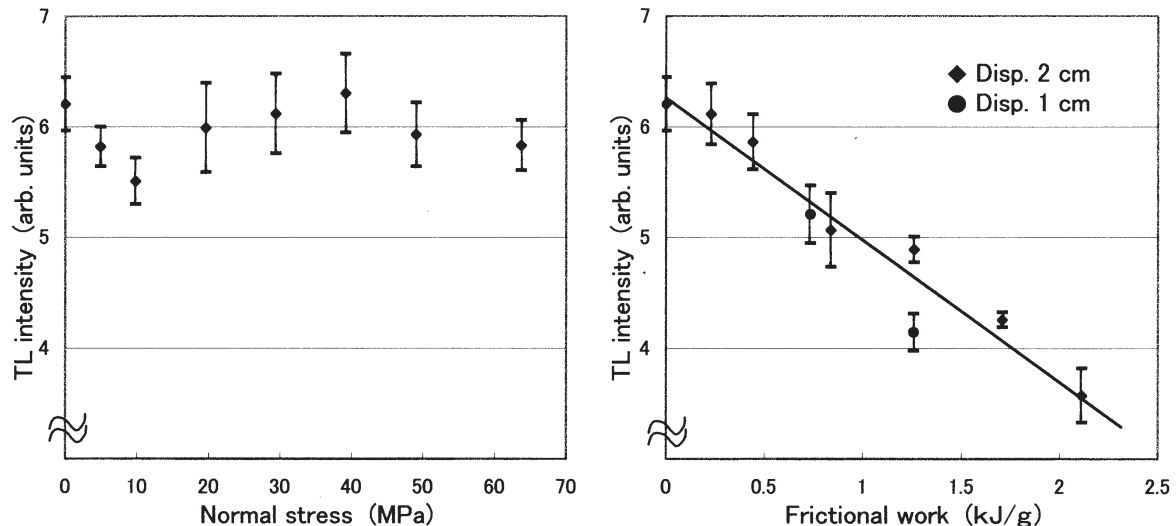


Fig. 5 TL intensity vs. normal stress or frictional work for quartz from the St. Peter Sand. The left-hand figure is for natural and only pre-pressed samples. The right-hand figure is for natural and sheared samples. TL intensity is the integrated value over the full width at half maximum of the 325°C peak shown in Fig. 4.

4. 考 察

4.1. 摩擦係数

岩石の種類によらず、最大摩擦強度を与える静摩擦係数は、垂直応力が 200 MPa 以下の場合 0.85 である、と Byerlee (1978) は実験的に示した。本実験では Fig. 3 に示したように、静摩擦係数が 0.62 とやや小さかった。また経験則どおり、残留摩擦強度を与える動摩擦係数はさらに小さく 0.54 であった。これらは用いた試料が、粉粒体であったために生じた易動性によるもの、と考えられる。

4.2. プレプレスのみ試料の TL 信号強度

TL 信号強度は Fig. 5 に見られたように、プレプレスのみ試料では、垂直応力の増加にかかわらずほぼ一定

の値を示した。剪断実験試料では、単位質量あたりの仕事が増加するにつれ直線的に減少していたのと、これは対照的である。

垂直荷重のみをかけたプレプレス試料では、変位量を測定していなかったために、なされた仕事を算出できていない。しかし、ハンレイ岩のブロックに沈着させた試料の厚さはせいぜい約 0.2 mm であり、プレプレスによって最大限圧密されたとしても、その変位量は剪断実験における 2 cm の 1% 未満でしかない。そのため、剪断実験試料と比べてプレプレスのみ試料では、なされた仕事はほぼゼロであり、TL 信号強度がほとんど変化しなかった、と考えられる。

また Fig. 6, 7 に示したように、垂直応力の増加に伴う平均粒径の減少や増加表面積の割合増加が認められるが、剪断実験試料と比べれば明らかに、プレプレス

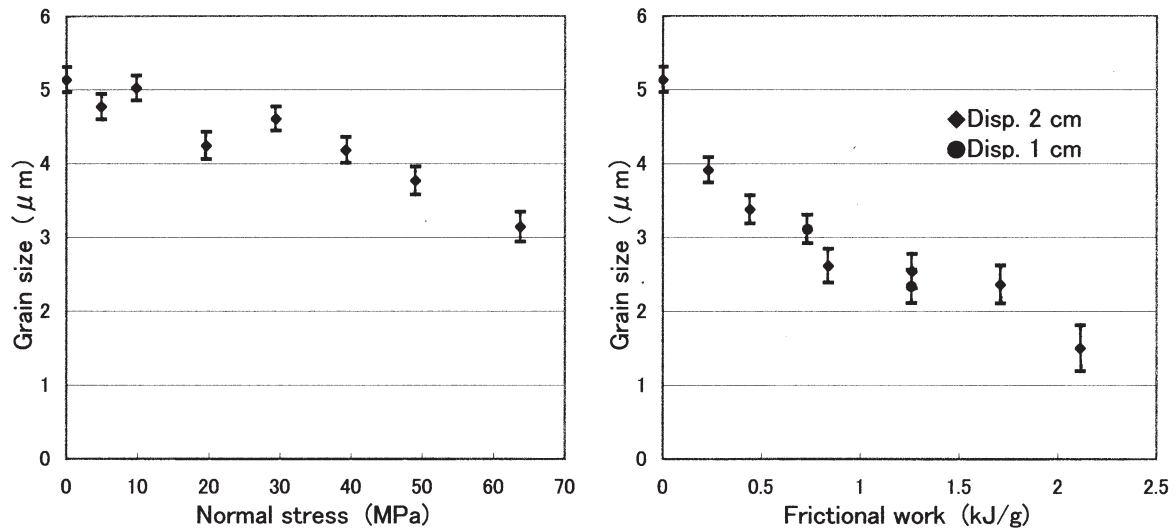


Fig. 6 Grain size change with normal stress or frictional work for quartz from the St. Peter Sand. The left-hand figure is for natural and only pre-pressed samples. The right-hand figure is for natural and sheared samples.

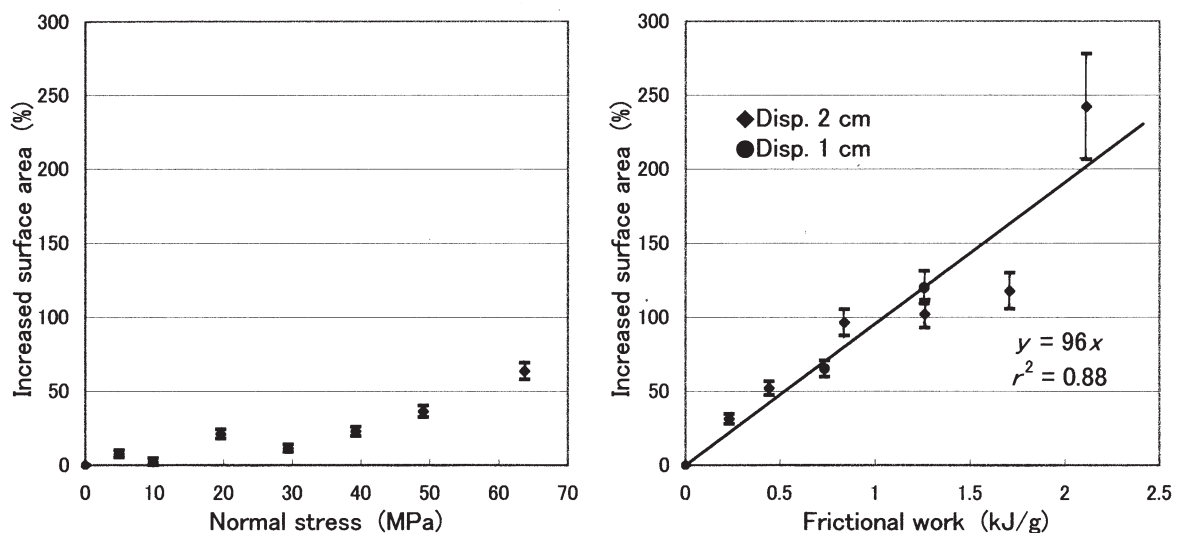


Fig. 7 Increased surface area change with normal stress or frictional work for quartz from the St. Peter Sand. The left-hand figure is for natural and only pre-pressed samples. The right-hand figure is for natural and sheared samples.

のみ試料における変化は僅かである。これも、上述したように、プレプレスのみ試料になされた仕事はほぼゼロであり、粒子の破壊が顕著に起こらなかったことによる、と考えられる。

4.3. 剪断実験試料の T L 信号強度

今回の剪断実験で、単位質量あたりの仕事の増加とともに平均粒径は減少し (Fig. 6), 増加した表面積の出発試料表面積に対する割合は増加していた (Fig. 7). 全粒子は平均粒径を持つ球であり、さらに増加表面積量は単位質量あたりの仕事に比例するという妥当な仮定に基づくと、Fig. 7 に示された関係は比例関係であることが期待され、決定係数 0.88 で回帰直線が求められた。このように今回の実験では、たしかに表面積は増加していたが、Hiraga *et al.*, (2002) が指摘したような T L

信号強度の増加は認められず、単位質量あたりの仕事が 2.1 kJ/g のとき、出発試料の約 60 % にまで、むしろ減少していた (Fig. 5).

これは実験計画時に企図した、出発試料を細粒化したことの効果、と考えることができる。上述試料の平均粒径は $1.50 \mu\text{m}$ であり、増加表面積量は出発試料表面積の約 2.4 倍と算出された。Hiraga *et al.*, (2002) の実験では、出発試料粒径は $150\text{--}250 \mu\text{m}$ であり、平均粒径 $1.5 \mu\text{m}$ まで剪断破壊されたとすれば、増加表面積量は出発試料表面積の百数十倍となる。今回の実験を彼らの実験と比べれば、新界面生成による電離電子の発生ひいては T L 信号強度の増加は、数十分の 1 と無視できる程度であり、T L 信号強度の増加を検出できなかった、と考えられる。

試料粒子になされた仕事が捕獲電子の励起に用いられ

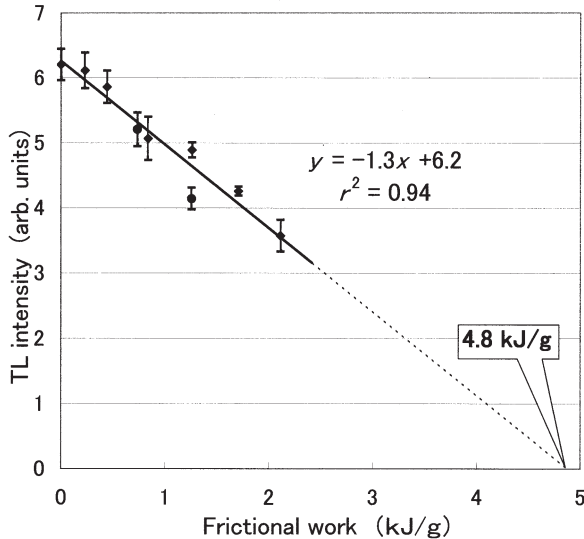


Fig. 8 TL intensity vs. frictional work for natural and sheared quartz from the St. Peter Sand. The regression line with the determination coefficient of 0.94 suggests the complete zeroing condition of 4.8 kJ/g.

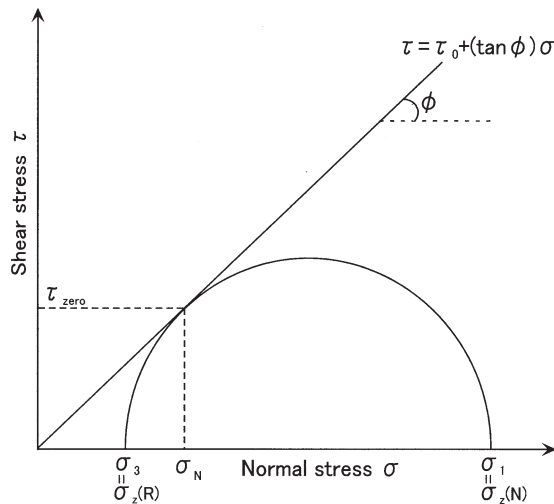


Fig. 9 Schematic diagram showing an estimate of the complete zeroing depth, using Mohr's circle and Coulomb's failure criterion. τ_{zero} is the shear stress under which the signal intensity is completely zeroed, and σ_N is the corresponding normal stress. Principal stress σ_1 or σ_3 gives the vertical normal stress σ_z for normal fault or reverse fault, respectively. The complete zeroing depth can be estimated, assuming that σ_z equals lithostatic pressure at a depth z .

ると、TL信号強度の比例的減少が普通に期待される。したがってTL信号強度の変化は、結果的に増加であれ減少であれ、なされた仕事に比例的である。上述のように、新界面生成に伴う電離電子の発生を実質的に無視できることから、捕獲電子の励起ひいてはTL信号強度の減少を、単位質量あたりの仕事の関数として観察した、と今回の実験結果 (Fig. 5) を見るができる。

4.4. 完全ゼロイング条件

今回の剪断実験条件では、TL信号強度の完全ゼロイングを確認することはできなかった。しかしながら前節で考察したように、単位質量あたりの仕事に対するTL信号強度の変化は一次関数的と期待される。回帰直線を外挿して完全ゼロイング条件 4.8 kJ/gを得た (Fig. 8)。実験条件を勘案すると1.2 MJ/m²に相当するこの完全ゼロイング条件が、実際の断層活動では地下どの程度の深度で満たされるのか、モール円を使った評価を試みた (Fig. 9)。クーロンの破壊条件を表す直線と、それに接するモール円を描けば、垂直応力軸との交点から、完全ゼロイング条件を満たす応力場の主応力 σ_1 と σ_3 を得る。深さ z における鉛直方向の応力 σ_z は上載岩圧 $\rho g z$ に等しいと考えて、正断層の場合は $\sigma_z(N) = \sigma_1$ 、逆断層の場合は $\sigma_z(R) = \sigma_3$ から、完全ゼロイング深度を評価できる。ここに、 ρ は上載岩の密度で、 g は重力加速度である。

単位面積あたりの仕事は、断層活動における剪断応力と変位量の積である。ここでは一例として、マグニチュード7の地震を引き起こす断層の、完全ゼロイング深度を評価対象として検討する。松田 (1995) によれば、変位量 D mはマグニチュード M と、 $\log D = 0.6M - 4$ が関係付けられており、 $M = 7$ のときは約 1.6 mである。したがって完全ゼロイング条件を満たす剪断応力 τ_{zero} は約 0.76 MPaとなる。

クーロンの破壊条件において粘着力 $\tau_0 = 0$ とすればクーロンの摩擦法則となり、より厳しい完全ゼロイング条件を与える。クーロンの摩擦法則から対応する垂直応力 σ_N を求めると、今回の実験で得た摩擦係数 0.62 から約 1.2 MPaとなり、作図あるいは解析幾何学を援用して、 $\sigma_1 = 2.6$ MPa、 $\sigma_3 = 0.80$ MPa を得る。上載岩の密度を 2.0 g/cm³、重力加速度を 9.8 m/s² として対応する上載岩圧を求めると、完全ゼロイング条件を満たす深度は、正断層の場合で約 130 m、逆断層の場合で約 40 m と評価された。

実際の断層活動に多かれ少なかれ伴う摩擦加熱は、TL信号強度を減少させる。今回の実験では、剪断応力による摩擦仕事の影響のみを検討した。したがって今回評価した条件よりも容易に、ゼロイングは達成されるであろう。

なおHiraga *et al.*, (2002) は、剪断破壊によるTL信号強度の増加を指摘している。しかし、活断層では繰り返し活動した結果、破碎帯内物質は実質的に当初から細粒化している。そのような試料を用いる限り、信号強度の増加過程を考慮することは不要と思われる。

今後、完全ゼロイング条件を検討するには、実際の断層活動を、できるだけ忠実に模した条件下での実験が、

望まれよう。

5. 摘 要

断層活動によるTL信号強度の変化について、剪断応力による摩擦仕事の影響のみを取り出して検討した。摩擦加熱の影響を実質的に無視できるよう、剪断実験は十分に遅い変位速度 $56 \mu\text{m/s}$ で行なった。また剪断破壊による信号強度増加 (Hiraga *et al.*, 2002) の影響も実質的に無視できるよう、 $1-8 \mu\text{m}$ 粒径に細粒化した試料を剪断実験に供した。

摩擦仕事の増加に伴うTL信号強度の直線的減少を見出し、回帰直線の外挿から、完全ゼロリング条件 4.8 kJ/g あるいは 1.2 MJ/m^2 を得た。さらに、マグニチュード7の地震を引き起こす断層の変位量が約1.6mである (松田, 1995) ことから、この場合の完全ゼロリング条件を、剪断応力で約 0.76 MPa と試算した。クーロンの破壊条件を満たす応力場のモール円を用いた検討において、鉛直方向の垂直応力は上載岩圧と仮定し、正断層で約130m逆断層で約40mと、完全ゼロリング深度を見積もった。

実際の断層活動ではもう少し緩やかな条件で、TL信号強度のゼロリングが達成されると期待できる。今後、実際の断層活動をできるだけ忠実に模した条件下での実験が、望まれよう。

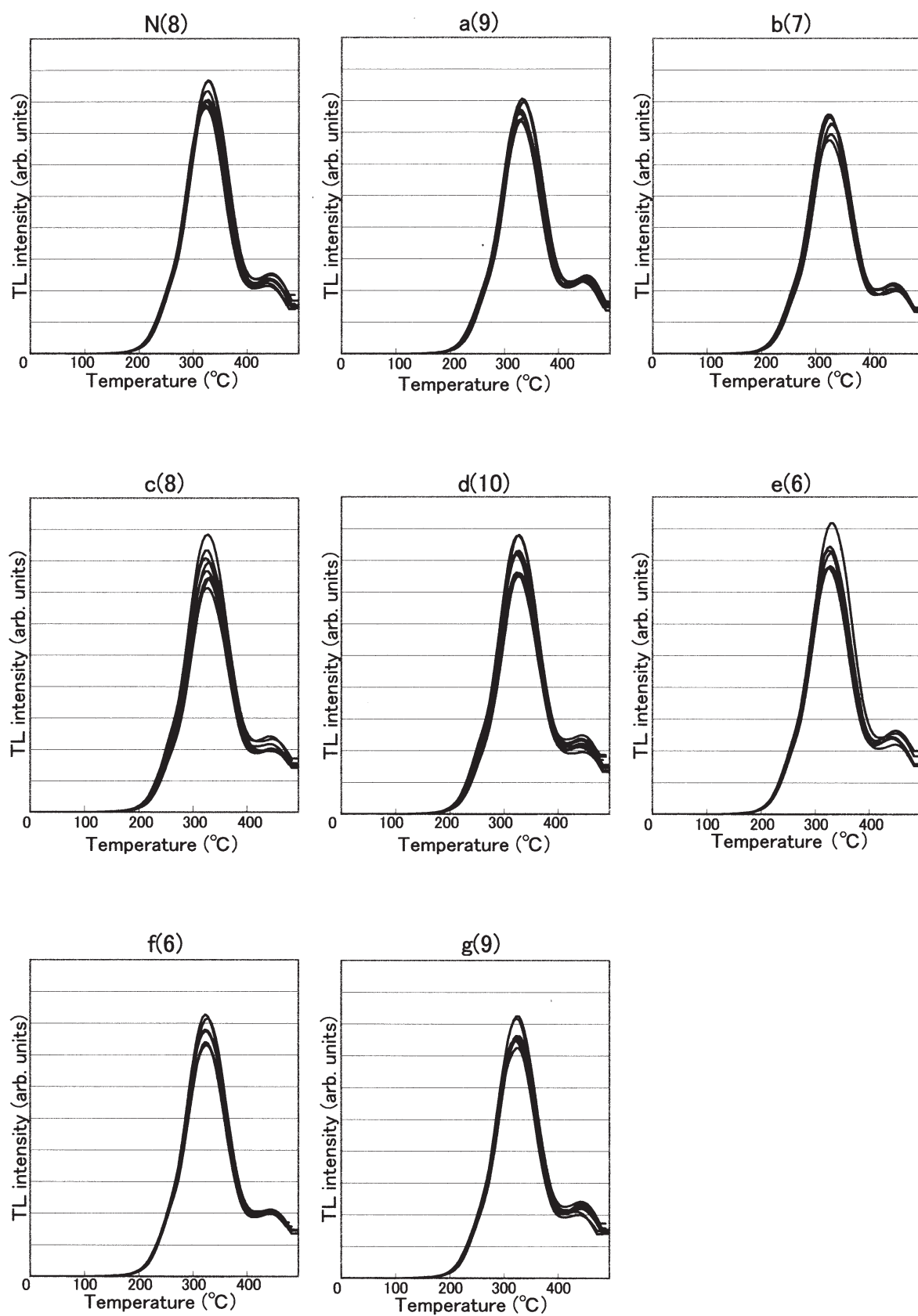
文 献

- Ariyama, T., 1985, Conditions of resetting the ESR clock during faulting. In *ESR Dating and Dosimetry*, edited by Ikeya, M. and Miki, T., pp.249–256. IONICS, Tokyo.
- Buhay, W. M., Schwarcz, H. P. and Grün, R., 1988, ESR dating of fault gouge: the effect of grain size. *Quat. Sci. Rev.*, **7**, pp.515–522.
- Byerlee, J.D., 1978, Friction of rocks. *Pure Appl. Geophys.*, **116**, pp.615–626.
- Fukuchi, T., 1988, Applicability of ESR dating using multiple centres to fault movement — the case of the Itoigawa–Shizuoka Tectonic Line, a major fault in Japan. *Quat. Sci. Rev.*, **7**, pp.509–514.
- Fukuchi, T., 1989, Theoretical study on frictional heat by faulting using ESR. *Appl. Radiat. Isot.*, **40**, pp.1181–1193.
- Fukuchi, T., Imai, N. and Shimokawa, K., 1985, Dating of the fault movement by various ESR signals in quartz — cases of the faults in the South Fossa Magna, Japan. In *ESR Dating and Dosimetry*, edited by Ikeya, M. and Miki, T., pp.211–217. IONICS, Tokyo.
- Fukuchi, T., Imai, N. and Shimokawa, K., 1986, ESR dating of fault movement using various defect centres in quartz; the case in the western South Fossa Magna, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **78**, pp.121–128.
- Hiraga, S. and Nagatomo, T., 1995, How to confirm “Complete Zeroing” in TL dating of fault movement — Case of the Higashiura Fault, Awaji island in Japan —. *Bull. Nara Univ. Educ.*, **44**(2), pp.17–25.
- 平賀章三・吉田有香子, 2000, 最新断層活動時におけるパレオドースゼロリング度の定量的評価—微粒子法の初適用: 野島地表地震断層の場合—, 奈良教育大学紀要, **49**(2), pp.37–45.
- 平賀章三・森本 晃, 2001, 断層活動年代測定における完全ゼロリング検証法—TL信号強度に対する熱パルスの加熱効果の実験的検証から—, 奈良教育大学紀要, **50**(2), pp.31–37.
- Hiraga, S., Morimoto, A. and Shimamoto, T., 2002, Stress Effect on Thermoluminescence Intensities of Quartz Grains —For the Establishment of a Fault Dating Method—. *Bull. Nara Univ. Educ.*, **51**(2), pp.17–24.
- Ikeya, M., Miki, T. and Tanaka, K., 1982, Dating of a fault by electron spin resonance on intrafault materials. *Science*, **215**, pp.1392–1393.
- 伊藤谷生・澤田臣啓, 1984, ESR断層年代測定法における採用信号と試料採取幅. 月刊地球, **6**, pp.247–252.
- Lee, H. K. and Schwarcz, H. P., 1993, An experimental study of shear-induced zeroing of ESR signals in quartz. *Appl. Radiat. Isot.*, **44**, pp.191–195.
- Lee, H. K. and Schwarcz, H. P., 1994, Criteria for complete zeroing of ESR signals during faulting of the San Gabriel fault zone, southern California. *Tectonophysics*, **235**, pp.317–337.
- Lee, H. K. and Schwarcz, H. P., 1996, Electron spin resonance plateau dating of periodicity of activity on the San Gabriel fault zone, southern California. *GSA Bull.*, **108**(6), pp.735–746.
- 林 愛明, 1989, 伊那谷南部・飯田地域の活断層のESRおよびTL年代測定. 活断層研究, **7**, pp.49–62.
- 松田時彦, 1995, 活断層. pp.1-242, 岩波書店, 東京.
- 三木俊克・池谷元伺, 1981, 断層のESR年代測定—その物理的基礎—. 月刊地球, **3**, pp.500–504.
- Miki, T. and Ikeya, M., 1982, Physical basis of fault dating with ESR. *Naturwissenschaften*, **69**, pp.390–391.
- 森本 晃・平賀章三, 1997, 活断層のTL年代評価—細粒試料がより若いTL年代を示すとは限らない—. 奈良教育大学紀要, **46**(2), pp.17–25.
- 森山昭雄・池谷元伺・松田時彦, 1984, 三河山地における活断層のESR年代. 月刊地球, **6**, pp.258–262.
- Nishimura, S. and Horinouchi, T., 1989, Thermoluminescence ages of some quartz in fault gouges. *Jour. Phys. Earth*, **37**, pp.313–323.
- 大村一夫・桜本勇治・豊蔵 勇・辻 喜弘・山戸武史・池谷元伺, 1981, 電子スピン共鳴測定法による断層の活動時期測定の試み—六甲断層を例として—. 月刊地球, **3**, pp.510–516.
- Sato, T., Suito, K. and Ichikawa, Y., 1985, Characteristics of ESR and TL signals on quartz from fault regions. In *ESR Dating and Dosimetry*, edited by Ikeya, M. and Miki, T., pp.267–273. IONICS, Tokyo.
- 田中和広・金折裕司・宮腰勝義・池谷元伺・三木俊克, 1981, 電子スピン共鳴測定法による跡津川断層の活動年代測定の試み. 月刊地球, **3**, pp.505–509.

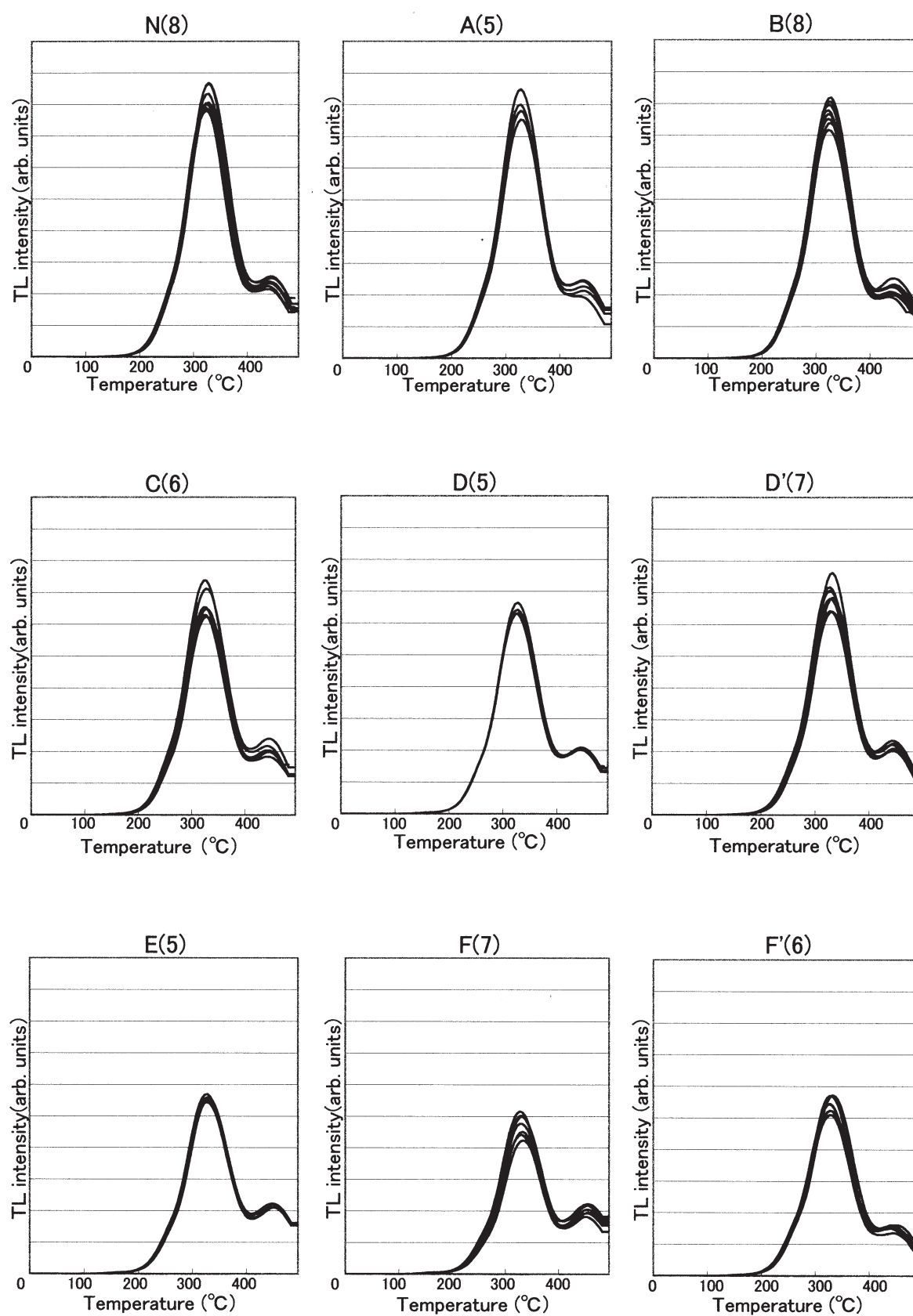
田中和広・金折裕司・宮腰勝義, 1984, 電子スピン共鳴測定法
による跡津川断層の活動年代測定の試み (その 2), 月刊
地球, **6**, pp.253-257.

Tanaka, K. and Shidahara, T., 1985, Fracturing, crushing

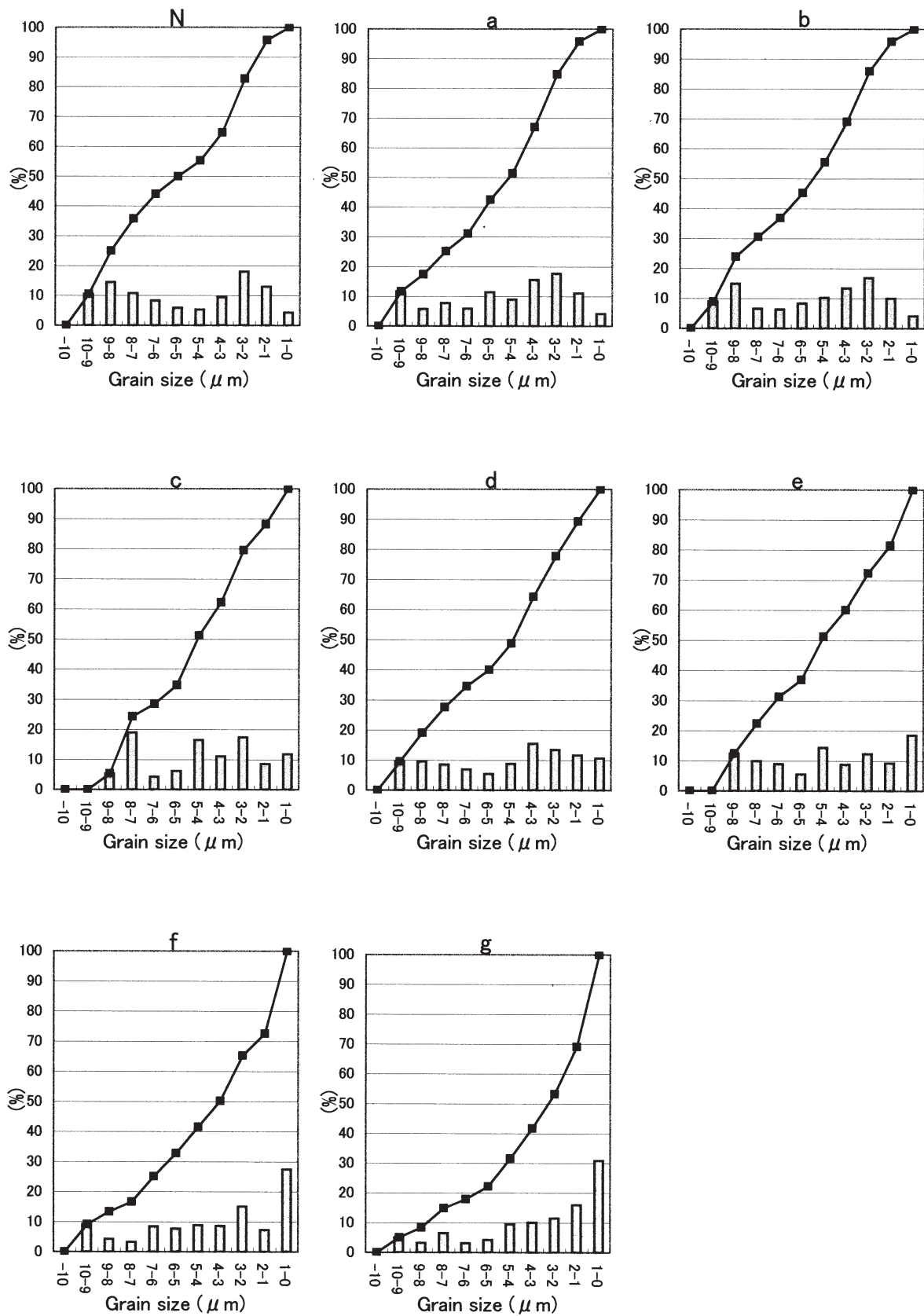
and grinding effects on ESR signal of quartz. In *ESR
Dating and Dosimetry*, edited by Ikeya, M. and Miki,
T., pp.239-247. IONICS, Tokyo.



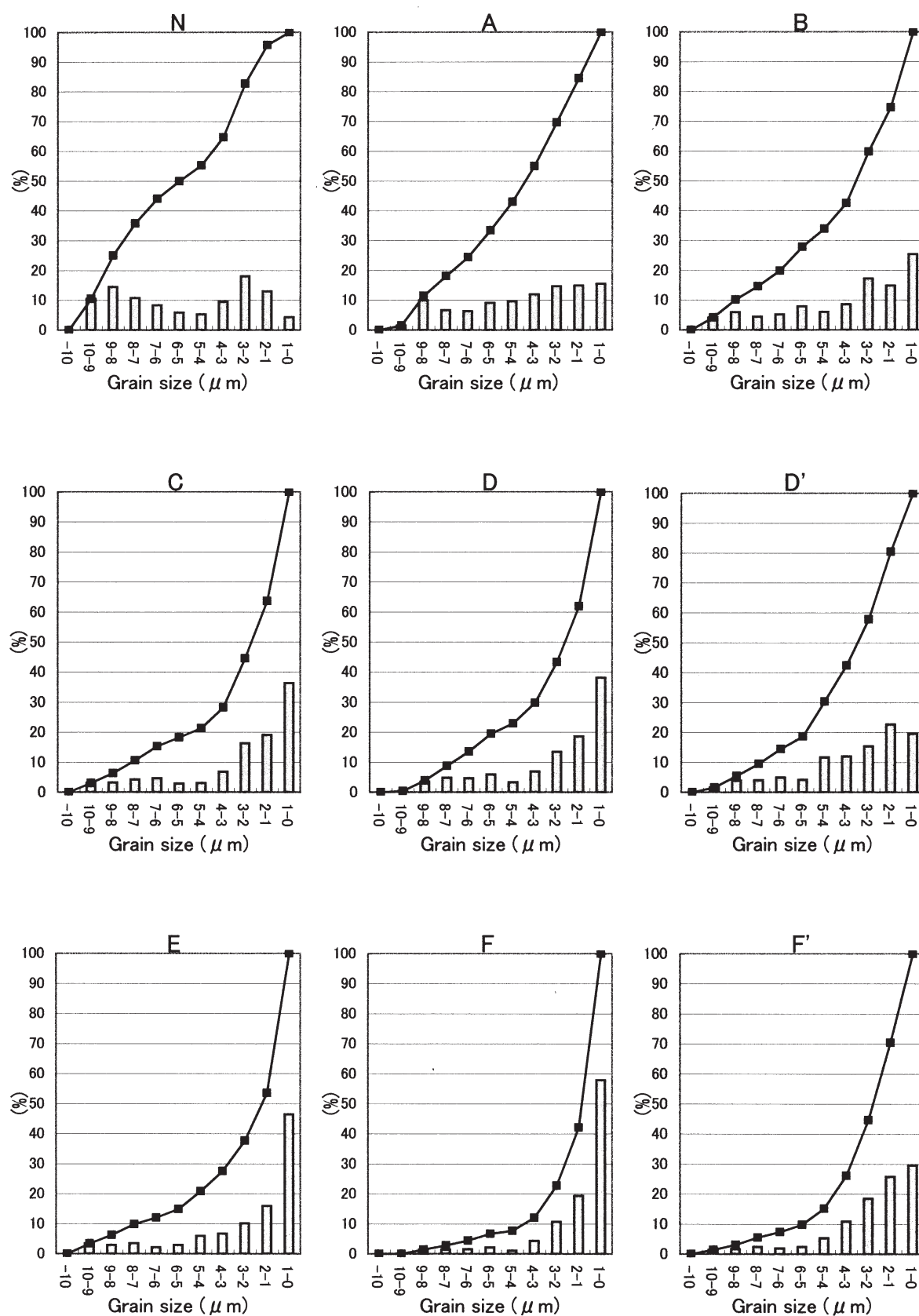
App. 1-1 TL glow curves of natural and only pre-pressed quartz from the St. Peter Sand. On the sample notation, see the text. All the figures in parentheses after sample name are the number of TL measurements.



App. 1-2 TL glow curves of natural and sheared quartz from the St. Peter Sand. On the sample notation, see the text. All the figures in parentheses after sample name are the number of TL measurements.



App. 2-1 Grain-size distribution and cumulative curve of natural and only pre-pressed quartz from the St. Peter Sand. On the sample notation, see the text.



App. 2-2 Grain-size distribution and cumulative curve of natural and sheared quartz from the St. Peter Sand. On the sample notation, see the text.