

様式 6

平成 18 年度共同利用実施報告書(研究実績報告書)

1. 研究種目名 特定共同研究(A) 2. 課題番号 2006-A-14

3. 研究課題(集会)名 和文：地震発生の素過程
英文：Elementary Process of Earthquake Occurrence

4. 研究期間 平成 18年 4月 1日 ~ 平成 19年 3月 31日

5. 研究場所 東大地震研究所他

6. 研究代表者所属・氏名 東京大学地震研究所・吉田真吾
(地震研究所担当教員名) (吉田真吾)

7. 共同研究者・参加者名(別紙)

8. 研究実績報告(成果)(別紙にて約1,000字A4版(縦長)横書)(別紙)

10. 成果公表の方法(投稿予定の論文タイトル、雑誌名、学会講演、談話会、広報等)
(別紙)

備考

・研究成果を論文等で発表される場合、以下の形式の文章を謝辞等に記載して下さい。

(英語)This study was supported by the Earthquake Research Institute cooperative research program.

(和文)本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました。

・特定共同研究Bについては、プロジェクト終了年度に冊子による報告書の提出が必要です。

・研究成果について、本所の談話会、セミナー、「広報」での発表を歓迎いたします。

7. 共同研究者・参加者名

No	氏名	所属機関	官職名	備考
1	吉岡直人	横浜市立大学	教授	
2	増田俊明	静岡大学・理学部	教授	
3	大槻憲四郎	東北大学・大学院	教授	
4	渡邊 了	富山大学・理学部	准教授	
5	佐藤博樹	兵庫県立大学大学院生命理学研究科	教授	
6	田中秀実	東京大学・大学院	講師	
7	角森史昭	東京大学・大学院	助教	
8	清水以知子	東京大学・大学院	助教	
9	佐藤隆司	産総研	主任研究員	
10	中谷正生	東京大学地震研	助教	
11	土屋範芳	東北大学・大学院	教授	
12	加藤護	京都大学・大学院人間・環境学研究科	助教	
13	川方裕則	立命館大学理工	准教授	
14	道林克禎	静岡大学・理学部	准教授	
15	矢部康男	東北大学大学院理	助教	
16	堤昭人	京都大学大学院理	助教	
17	増田幸治	産総研	主任研究員	
18	堀高峰	JAMSTEC	研究員	
19	吉田真吾	東京大学地震研	教授	
20	阪口秀	JAMSTEC	グループリーダー	

8 . 研究実績報告 (成果)

地震サイクル等の数値シミュレーションで説得力のある結果を提出するためには、確かな根拠に基づいて破壊・摩擦構成則のパラメータの分布を与える必要がある。最近、種々の構造探査により、P 波速度(V_p)、S 波速度(V_s)、比抵抗、減衰の程度を表す Q などが同一断面上にマッピングされるようになってきた。それら観測可能な V_p 、 V_s 、比抵抗、 Q などから、どのような物質がどのような状態にあり、どのような破壊・摩擦特性をもっているのか推定できるようになることを目指した、実験的・理論的研究を推進する。そのためには、室内実験により V_p 、 V_s 、比抵抗などと、破壊・摩擦特性を様々な条件下で同時測定することが必要である。また、 V_p 、 V_s 、比抵抗、 Q などは地殻中の水の状態に強く依存するため、間隙水の実態に関する研究、浸透率構造に関する研究なども併せて推し進める。

また、摩擦破壊現象の物理化学的素過程を実験的に明らかにしていくことによって、アスペリティの実体、摩擦破壊現象のスケーリング則などについて理解を深めることを目標とする。

ア . 摩擦・破壊現象の物理・化学的素過程

(蛇紋岩等の変形特性)

「水」が沈み込み帯の岩石の力学的性質に及ぼす影響を調べるため、高封圧 (800 MPa) 下における蛇紋岩と石英岩 (メノウ) の変形実験を行なった。高温型蛇紋岩 (アンチゴライト) はこの圧力下で、650 前後で脱水反応を起こし、オリビンとタルクに分解する。遅い歪速度では脱水軟化が起こり、定常的なクリープ挙動がみられたが、速い歪速度では剪断帯の形成とともに歪硬化を起こすなどの興味深い結果が得られた。メノウの変形実験では、歪エネルギーに駆動される再結晶による結晶方位の選択配向がみられた。東大理では、より高圧 (~2GPa) を達成できる変形試験機を新たに設計製作中であり、18 年度は装置本体が完成した (東京大学理学系研究科)。

(高速摩擦特性)

ロータリー式摩擦試験機を用いた中すべり速度領域の実験において、トルク計測部に軸力干渉の問題があることが判明したため、軸力の影響を受けないトルクセンサーを開発

し、試験機に組み込んだ。これを用いて、外径40mmの斑レイ岩試料について、0.035～35mm/秒の速度レンジでの摩擦実験を行い、定常摩擦の速度依存性を調べるための実験を行った。予察的ではあるが、1MPa程度以下の低垂直応力条件下の実験では、大きな負の速度依存性が現れる100mm/秒を超える高速域の手前に、僅かに速度依存性が正の領域が存在する可能性が明らかになりつつある(京都大学)。

地殻流体状態方程式の実験装置を改良し、実験精度を高めた(純水:圧力50-200MPa、常温-500 で、体積の誤差1%以下、H₂O + 10mol%CO₂:圧力50-200MPa、常温-300 で、体積の誤差3%以下、H₂O + 20mol%CO₂:圧力50-200MPa、常温-300 で、体積の誤差4%以下)。四万十帯と台湾 Chelungpu 断層からのシュードタキライトの分析を行った。特に Chelungpu 断層のシュードタキライト(TCDP hole-B)の溶融度は極めて低く、elastohydrodynamic lubrication が作動したかもしれない浅部の直下では、摩擦発熱による低溶融層がすべりを抑制したかもしれない。この他、固着すべり実験を実施し、数十ミクロンのすべりの後に flash melting すること、生成されるガウジ自身がすべり距離とほぼ等しいアスペリティーとなり、flash melting を促進することを明らかにした。また、模擬ガウジを挟んだ固着すべり実験を実施し、リーデルシアがガウジとプレカット面と交わる付近で固着すべりの核が生成されるらしいことを突き止めた(東北大学)。

(大変位滑り実験)

平成17年度におこなった実験と過去の実験の若干の相違の原因を検討したところ、変位計測器の信号・雑音比が低いために、すべり速度の測定が正確になされていない可能性が高まった。そこで、対雑音性の高い変位計を取り付けて実験をおこなうこととした。変位計の取り付けは完了したが、使用していた実験室にアスベスト吹き付け材が使用されていることが判明し、その除去工事のため、12月以降、実験室の使用が禁止されたので、実験を行うには至っていない。信号・雑音比の低い変位計を用いた実験で、AE原波形の収録を試みた。得られた波形を解析したところ、多数の相似イベントが発生していることがわかった。プレート境界で観測されている repeating earthquake の比較という点で、相似イベントとすべり速度の関係を検討することは興味深い。前述のように、変位の測定精度がよくないために、両者の関係の詳細な検討はおこなっていない(東北大理)。

(広帯域 AE 計測)

平成16-17年度に設計された、封圧の影響を受けないようにセンサーが封入できる圧盤の性能向上のために、信号取り出し部に改良を加え、また、ノイズ低減のためにセン

サーシールド部を圧盤本体から絶縁させた。稲田花崗岩試料を用いて封圧 80MPa 常温下で三軸圧縮試験を実施し、記録された A E 信号の振幅と卓越周期に正の相関が見られることを示した。このことは、A E の規模と卓越周期の関係が定性的に自然地震と同じであることを示唆されるとともに、広帯域センサーが機能していることが明らかにされた(立命館大)。

既存の実験データの詳細な解析を行い、AE 活動の統計的性質の時間変化を調べ、巨視的破壊の直前に、エネルギー放射率の加速度的増加、b 値の減少、フラクタル次元、相関距離の減少から増加への変化を特徴とするフェーズの存在が確認された(図 1)。これらの特徴がクラック集団の競争的な成長モデルと臨界点モデルで統合的に説明できることを見出した。複数のパラメータの変化に着目することにより、巨視的破壊発生の予測の信頼性が増す(産業技術総合研究所, Lei 2006, Lei & Satoh 2007, Satoh & Lei 2006, Moura et al. 2006)。

(南ア大深度鉱山における超高周波までの破壊過程観測)

南アフリカ Mponeng 鉱山内の地下 3500m 地点で、近い将来、誘発地震が期待されるダイク-母岩境界を取り囲むようにボーリングを 10 本程度行った。現在、この孔に 2 種の A E センサ、ハイドロホン、3 軸加速度計の埋設作業が進行中である。また、孔底接触型の A E センサについては、現場の環境にあわせて、取り付けロッドのストロークの長い押し付けばねを組み込むなどの新たな方式を開発した。これらの信号を収録するために、16 チャンネル、500kHz サンプリングのレコーダを地下に設置し、これを日本からリモートコントロールするための通信設備をセットアップした。また、現場での応力変化をモニターするための石井式歪み計を埋設した(東京大学地震研究所)。

(弾性波による摩擦強度のモニター)

破砕物質を挟んだ模擬断層について断層面を透過した弾性波動の変化を観測する実験を実施した。2面直せん断試験により slide-hold-slide 試験を hold 時のせん断応力や hold 時間を変えながら行い、透過波振幅、剪断応力、ガウジ層の厚さなどを測定した。せん断応力のデータからは、時間に依存した強度回復の他に hold 時のせん断応力に依存した強度回復が見られた。Nakatani (1998)が指摘するように、時間に依存した強度回復は、hold 時のせん断応力が高い時にはすべり開始時のせん断応力ピークとして現れるが、hold 時のせん断応力が低い時にはこのピークは観察されない。しかし透過弾性波の振幅データからは、透過振幅が hold 開始時のせん断応力の減少に伴って増加するとともに、

hold 時のせん断応力の値に関わらず hold 時間の対数に比例して増加することが観察された(図 2)。また hold 後の微小変位による透過振幅の急激な減少が見られた。この変化は Yoshioka and Sakaguchi (2005)で報告されている前兆的な振幅の減少に対応するものと考えられるが、今回観察されたのは高々20%程度の変化であった。

計画に加え高温高圧下での真の3軸圧縮実験を行い、岩石のクリープ特性が中間主応力の影響を強く受けることを明らかにした(図 3)。(東京大学地震研究所, Nagata et al., 2006a, b, 吉田・他、2007)

(破壊に伴うガス放出)

フロースルー型の破壊反応実験機の要である流体接触部分を不活性なセラミクスへ変更し、本体への装着を完了した。昇温用のヒーターを設計し、本体の試料アッセンブル部分への取り付けを可能にした。200MPa まで加圧できる油圧ユニットを接続し、上記の各部品を装着後に圧力リーク試験及び昇温試験を行った。また、フロースルー型の破壊反応実験と比較検討するため、Kameda et al., [2004a], [2004b] と同様の遠心式ボールミルを用いた密閉型の破壊反応実験を跡津川断層の宮川コアを用いて行った。その結果、断層破砕帯の断層コアへのメタンガス濃集の吸着仮説とダメージゾーン部分からの破壊放出仮説を得た。この成果は、今後フロースルー型の破壊反応実験機において行われる「放出-吸着プロセスの検証」のための重要な基礎実験と考えられる(東大理)。

岩石破壊に伴って放出されるガスの空間的な起源を詳細に調べ、どのような条件でガス放出が起きるのかについて検討を行った。これを直径 50 mm、長さ 100 mm の円筒状に整形した。長軸方向の圧縮を可能にする専用の真空容器に試料を入れ、11 kN/m²s と 22 kN/m²s の二つの圧縮速度で圧縮を行い、真空容器内に放出されてくるガスの量と組成を四重極質量分析計で計測した。7 秒ごとの組成変化の記録から、22 kN/m²s の圧縮速度のときは、破壊点においてのみ多くのガス放出が認められたが、11 kN/m²s のときは、破壊圧力の 6 割程度に達したところからメタンの緩やかな上昇が観測された(図 4)。破壊時を含め、放出される全ガス量は圧縮速度に依存しなかったことから、圧縮速度の違いがメタンの放出挙動に影響を与えたと考えられる。

メタンが岩石中のどこにあるかを調べるため、花崗岩をジョークラッシャーや乳鉢などで調粒し、分離精製された鉱物を岩石粉碎用真空容器の中で、衝撃破壊を行って粉碎し、放出される全ガス量と組成を測定した。その結果、メタンはほとんど鉱物内にあり、鉱物が破砕されることによるのみ外に放出されることわかった。(東京大学理学系研究科)。

(透過弾性波とDEMで探る応力下のガウジの挙動)

粒度分布がフラクタル分布をするガウジ層に対して実験を行うとともに、DEMによるシミュレーションを実施した。また柔らかな物性をもつガウジ層に対しても実験を行った。前者については、透過波動の変化がより早い段階から現出することが確かめられたが、後者についてはまだ十分な成果が得られていない。また、計画にはなかったが、光弾性物質を用いてせん断実験を行い、ガウジ層内の応力鎖の変化を捉える試みを行い、これが可能であることを示した(図5)(横浜市立大学, Yoshioka and Sakaguchi, 2006, Yoshioka and Iwasa, 2006, Hori et al., 2007)

イ. 地殻・上部マントルの物質・物性と摩擦・破壊構成則パラメータ

(高温高压での弾性波速度の測定)

アンチゴライト結晶粒子の配向が強い蛇紋岩を使用し、多方向での物性測定から物性をテンソルとして求めることを目指した。(1) 常温封圧下で18面体に整形した蛇紋岩試料の弾性波速度を測定し、試料の全弾性定数を決定した。アンチゴライトを含む高温型蛇紋岩が低温型に比べて、高速、低ポアソン比であることを確かめた。また、圧力1GPa、常温~600°CでP波速度を測定し、 a 軸に平行な方向が直交する方向に比べて著しく高速であること、温度依存性が a 軸方向では小さいことを明らかにした(図6)(富山大学)。

(岩石の電気伝導度測定)

蛇紋岩中で支配的な電気伝導経路となる磁鉄鉱の分布を調べた。主として、低温型では分散的、高温型では脈状であることが分かった。これは、蛇紋岩化の際に存在した流体の動きを示唆するものと考えている。磁鉄鉱の合成多結晶体の電気伝導度測定を行い、電気伝導度の温度依存性を明らかにした。単結晶の物性との比較から結晶粒界の伝導が支配的な伝導メカニズムであることがわかった。(富山大)。

まとめ

「地震発生の素過程」は第2次新地震予知研究計画から始まった研究計画であるが、3年目にあたるH18年度は、建議で推進すべきと謳われている複数パラメータの同時測定を含め、地震発生条件での力学・物性データが着実に得られており、個々の素過程のメカニズムを明らかにする研究も着実に進展した。断層面の状態を透過弾性波によってリモートセンシングする研究は、ガウジ層をはさむ模擬断層を使った研究に発展した。

すべらせなければわからない断層面の状態をすべらせなくてもわかるようにしたい , というのがモチベーションであったが , ガウジ層の場合 , すべらせたのでは失われてしまう情報が透過弾性波でわかることが示された . 実際の断層に適用できるかどうかの検討が今後の重要課題である . 室内実験および数値実験によりガウジ層の応力鎖に関する理解が深まり , また , 破壊に伴うガス放出メカニズムが実験により明らかになった .

参考文献

- Yoshioka, N. and K. Iwasa, A laboratory experiment to monitor the contact state of a fault by transmission waves, *Tectonophys.*, 413, 221-238, 2006.
- Yoshioka, N. and H. Sakaguchi, An experimental trial to detect nucleation processes by transmission waves across a simulated faults with a gouge layer, in "Advance in Geoscience, Vol.1, Solid Earth" (eds. Wing-Huen Ip, Yun-Tai Chen), World Scientific, 105-116, 2006.
- Hori, T., H. Sakaguchi, N. Yoshioka, and Y. Kaneda, Shear resistance reduction due to vibration in simulated fault gouge, in AGU Monograph, Radiated Energy and the Physics of Earthquake Faulting, American Geophysical Union, in press.
- Nagata, K., M. Nakatani, and S. Yoshida, Monitoring frictional strength with acoustic wave transmission, AOGS 3rd Annual Meeting, Paper ID: 59-SE-A1051, Suntec Singapore, 2006a.
- Nagata, K., M. Nakatani, and S. Yoshida, Probing Contact State With Acoustic Wave Transmission: A Quantitative Experiment, AGU Fall Meeting 2006, S33A-0223, San Francisco CA. USA, 2006b .
- 吉田真吾・永田広平・中谷正生 , 速度・状態依存摩擦則の物理 , 物性研究 , 2007.
- Koizumi, S., Tsunomori, F., Notsu, K., "Methane emission from granite samples under uniaxial compression", AGU Fall meeting (2006).
- Koizumi, S., Tsunomori, F., Sumino H., and Notsu K., Changes in chemical composition of emitted gas. from rock under an uniaxial compression (II), AOGS, 2006.
- 堤 昭人・白井信正 , 岩石の破壊電磁気現象に関する実験的研究 , 構造地質 , 49 , 77-81 , 2006 .
- Lei, X., Typical phases of pre-failure damage in granitic rocks under differential compression,

- Geological Society Special Book, 261, 11-29, 2006.
- Moura, A., Lei, X., and Nishizawa, O., Self-similarity in rock cracking and related complex critical exponents, *J. Mech. Phys. Solid*, 54, 2544-2553, 2006.
- Satoh, T., and Lei, X., Importance of AE study for fracture process of heterogeneous solid material - High-speed, multi-channel AE measurement system in Geological Survey of Japan/AIST -, *NDE-2006 Proceedings, National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, 271-275, 2006.
- Lei, X., and Satoh, T., Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage, 431, 97-111, 2007.
- Kitamura, K., Masuda, K., Takahashi, M. and Nishizawa, O., The influence of pore fluids on seismic wave velocities under high temperature and high pressure conditions - Development of a new technique with gas apparatus at AIST, Japan -, *Earth, Planets and Space*, 58, 1515-1518, 2006.

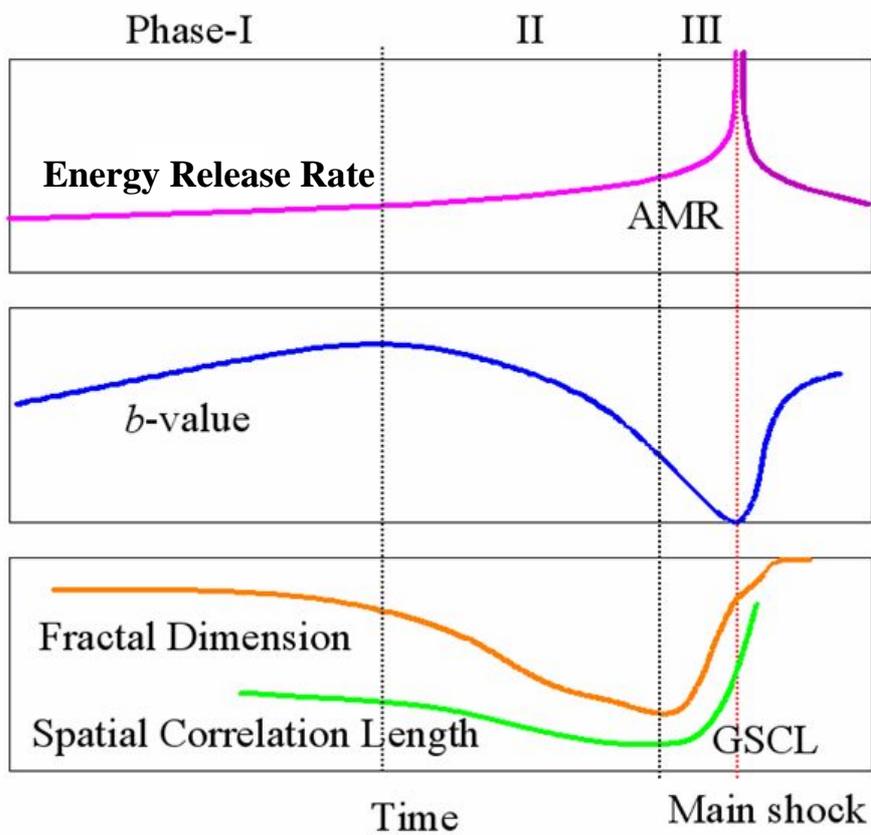


図 1：岩石破壊に至る AE 統計パラメータの時間変化。

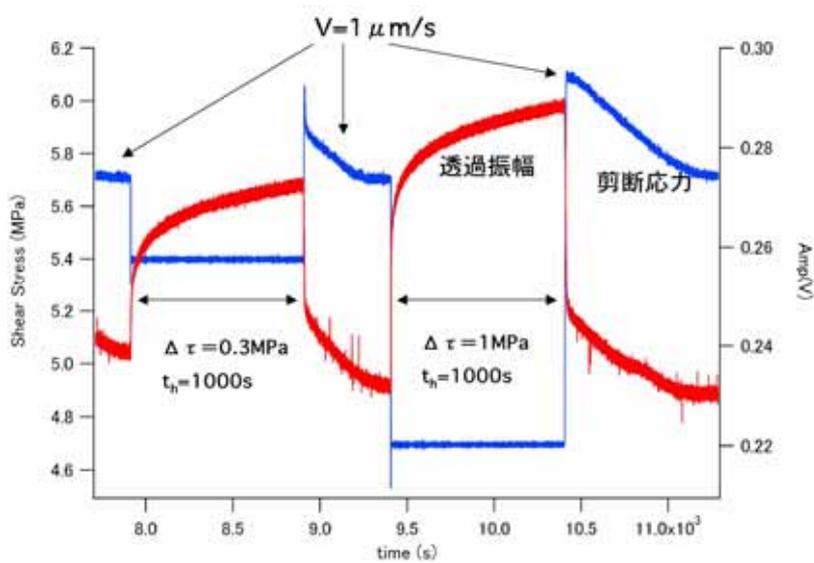


図 2：slide-hold-slide 試験におけるガウジ層を透過した P 波振幅と剪断応力．剪断応力を 1MPa 下げて hold してから slide させたとき，剪断応力の観察からは log t healing が見えないが，透過振幅からは hold 中に log t に比例して強度が回復しているのがわかる．

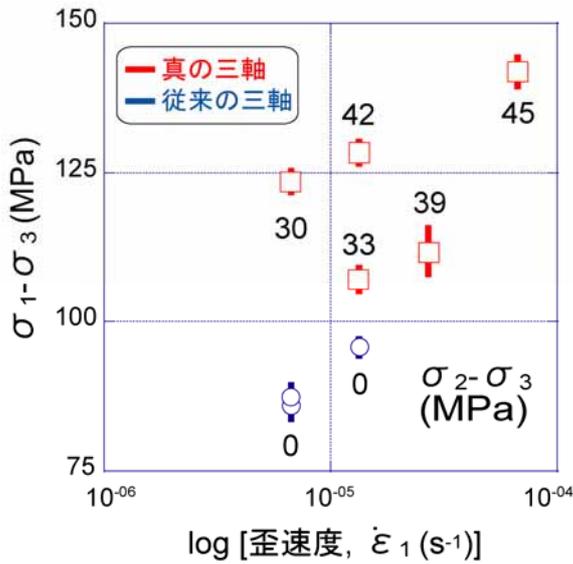


図 3：真の 3 軸圧縮応力実験で得られた，定常クリープ時における歪速度に対する最大主応力-最小主応力．中間主応力が増すと，同じ歪速度で変形させるのに要する最大主応力が増加する．

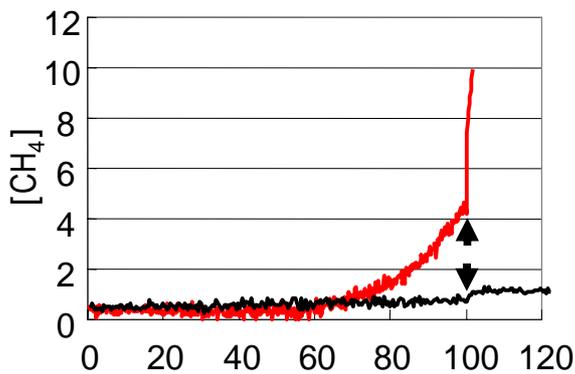


図 4：岩石圧縮に伴うメタン濃度の増加の様子。横軸は破壊時刻が 100 となるように規格化した時間。赤線が 11 kN/m²s、黒線が 22 kN/m²s のときを示す。

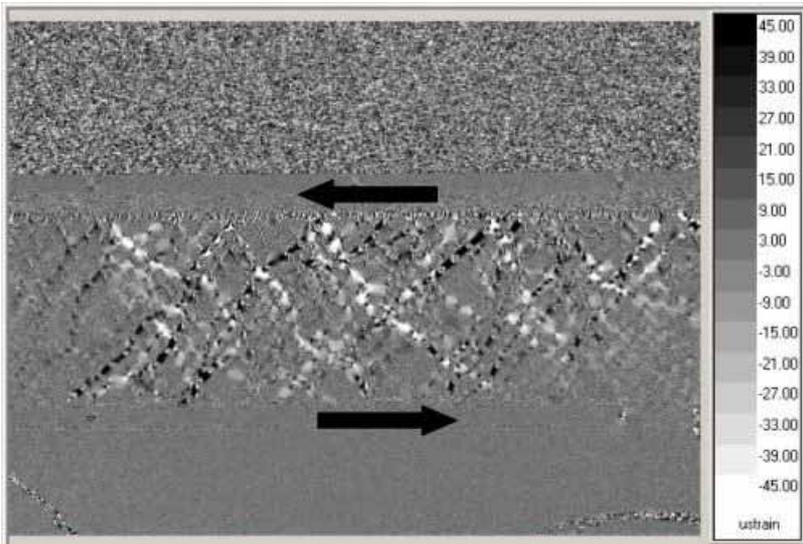


図 5：図の上下中央が光弾性材料による模擬ガウジ層．矢印は剪断力の方向．剪断力を増加させたときに撮った二枚の写真の比較（差）図．図の黒い部分は歪が増えた部分で，白い部分は歪が減少した部分．水平方向から 45 度の方向に，柱構造が形成されつつあるのが分る．

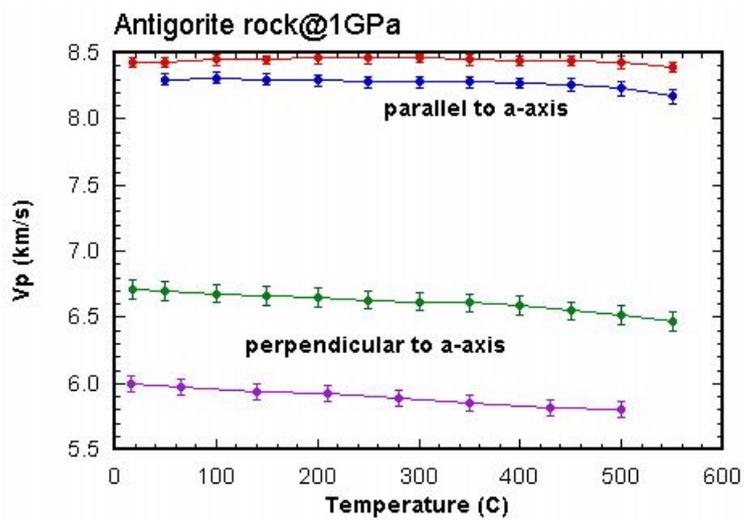


図 6：蛇紋岩の P 波速度．