

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成24年4月1日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2011

課題番号：23656557

研究課題名（和文） 先在き裂の相互干渉に基づく岩石の新しい破壊理論

研究課題名（英文） New theory of rock fracture based on interaction between pre-existing microfractures

研究代表者

松木 浩二 (MATSUKI KOJI)

東北大学・大学院環境科学研究科・教授

研究者番号：10108475

研究成果の概要（和文）：コンピュータ上に作成した単一鉱物多結晶岩石試験片について、一軸引張応力条件における破壊解析と粒界の粘弾性挙動に基づく応力解放時の岩石の損傷評価を行った。前者では、破面の最終形成段階では必ず引張破壊からせん断破壊へのモード転換が生ずることなどの破壊メカニズムを明らかにし、後者では、DSCAによって主応力方向と主応力比がある程度正確に評価できる応力領域が存在し、地下深部になるほどこの応力領域が広がることなどを明らかにした。このことから、応力条件をさらに拡張することにより岩石の新しい破壊理論構築に向けたアプローチが可能になった。

研究成果の概要（英文）：Using specimen models of monomineral polycrystalline rock created on a computer, we performed both analysis of uniaxial tensile fracture and estimation of rock damage due to the viscoelastic behavior of grain boundaries during stress relief. In the former, we have clarified fracture mechanisms such that the conversion of failure mode from tension to shear always occurs during the completion of the final failure plane. In the latter, it has been shown that there is a stress region for which both the magnitudes and directions of the principal stresses can be accurately estimated by DSCA and this region becomes wider as the depth increases. Thus, we can now approach to the construction of a new theory of rock fracture by extending stress conditions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：地殻環境技術

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：多結晶岩石、一軸引張破壊、粒界き裂、関連流れ則、粘弾性、コアの損傷、DSCA、  
応力解放

## 1. 研究開始当初の背景

脆性材料の破壊理論は1920年代のGriffith理論に端を発し、1950年代にIrwinにより応力拡大係数の概念が提案され、金属材料の単一き裂に対し破壊力学として大きな発展を遂げた。しかし、岩石の破壊理論は、問題の複雑さから、依然として約90年前のGriffith理論の枠組み内に留まったままである。すなわち、二次元の単一き裂や周期的に配列した孤立き裂からのき裂の発生と成長を扱うのみであり、岩石内の実際の微小き裂が、ガラスなどの潜在き裂よりはるかに大きくかつ

三次元的な形状と配置をしていること、さらに、岩石の透水試験結果が示しているように、岩石内の微小き裂は多かれ少なかれ連結して最初から相互干渉を起こしていることなどの重要な事実を無視してきた。この結果、これまでの理論は、き裂間の相互干渉が支配的になる実用的に最も重要な強度破壊（最大応力点）やその後の変形・破壊挙動を定量的に説明するためには無力であり、さらに、破壊強度に及ぼす試験片形状の影響やMogiによって初めて明らかにされた破壊条件に及ぼす中間主応力の影響も説明できないのが

現状であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、多結晶岩石を対象として、三次元有限要素法、塑性理論における関連流れ則および引張—せん断軟化則に基づく引張破壊挙動のシミュレーションコードを開発し、まず一軸引張条件における破壊解析を行うことにより、三次元構造をなす粒界き裂の相互干渉に基づく岩石の新しい破壊理論を構築するための基礎を完成させる。次に、岩石の引張破壊に関連して生ずると考えられている応力解放時の岩石の損傷について、多結晶岩石中の粒界の粘弾性挙動に基づく新しいメカニズムを提案し、この考え方を単一鉱物多結晶岩石モデルに適用し、応力解放に伴う残留応力を評価した後、粒界のみが破壊すると仮定して一般的な応力場における岩石の損傷度とクラック密度を評価し、与えた応力場とクラック密度を比較することにより、DSCAにおける基本仮定の妥当性とともDSCAの適用性について検討する。

## 3. 研究の方法

新たな岩石の破壊理論構築にアプローチするためには、岩石の現実的な力学モデルに基づく破壊解析に関する研究が不可欠である。本研究では、すでに開発した核からの結晶成長に基づく単一鉱物多結晶岩石の三次元構造生成コードを用いて、まず単一鉱物多結晶岩石試験片モデルをコンピュータ上に作成し、き裂の力学モデルとして二次のJoint要素を用いることにより有限要素法に基づく応力・破壊解析コードを作成し、これらに基づいて一軸引張破壊解析と粒界き裂の粘弾性挙動に基づく応力解放時の岩石の損傷解析を行った。

岩石の破壊基準としては図1に示す拡張Coulomb基準を用いた。せん断領域は従来のCoulomb基準（ピーク強度と残留強度の摩擦

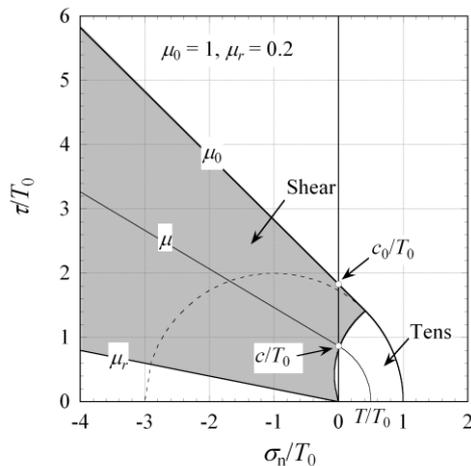


図1 拡張Coulomb基準

係数はそれぞれ $\mu_0$ と $\mu_r$ ), 引張領域では岩石の圧裂引張破壊における応力条件（一軸引張強さ $T_0$ ）を考慮し、これらの二つの基準を滑らかに接続するため、破壊の全過程について、粘着力（ $c$ ）は一軸引張強さ（ $T$ ）と摩擦係数（ $\mu$ ）から求めた。

一軸引張破壊解析では、本破壊基準に塑性理論における関連流れ則と引張—せん断軟化則（等価永久変位に対する引張強さの低下速度に関する係数 $\alpha$ ）を適用して粒界き裂の構成則を求め、破壊過程における破壊モードの変化等を調べた。一方、応力解放に伴う粒界の損傷解析では、まず、地質学的時間経過に伴って岩石の応力がより一様になるように粒界き裂の剛性が変化し、応力解放時の弾性変形に伴う弾性応力の解放によって残留応力が発生し、これが拡張Coulomb基準に基づいて粒界を破壊させるとの基本仮定により岩石の損傷を評価した。

## 4. 研究成果

単一鉱物多結晶岩石の一軸引張破壊解析と粒界き裂の粘弾性挙動に基づく応力解放時の岩石の損傷解析について得られた研究成果はそれぞれ以下のものであり、本研究における応力条件を圧縮等に拡張することにより全ての応力条件についての一般的な破壊理論にアプローチできる見通しを得た。

### (1) 一軸引張破壊解析

一軸引張破壊過程を詳細に分析するため、図2に示すように、結晶数が25、28と少ない試験片モデルを用いた。一軸引張破壊の全過程における軸応力—軸ひずみ曲線と破壊モード（弾性、引張破壊、せん断破壊、除荷）数の関係の例を図3に示す。ただし、軸応力—軸ひずみ曲線は粒界の一軸引張強さ（ $T_0$ ）と有効ヤング率（ $E_{\text{eff}}$ ）で基準化してあり、また、図中、基準化軸応力—基準化軸ひずみ曲線上の白抜きの丸印は、1が破壊開始点、2が除荷開始点、3がピーク強度点、4がせん断破壊開始点、5が引張破壊モード数が最大になる点、6が新たな破壊がほぼ生じなくなる点（弾性変形の節点数がほぼ一定になる点）を示しており、白抜きの四角印（I~IV）における粒界の破壊状況を図4に示す。ただし、粒界の一部のみが引張破壊している場

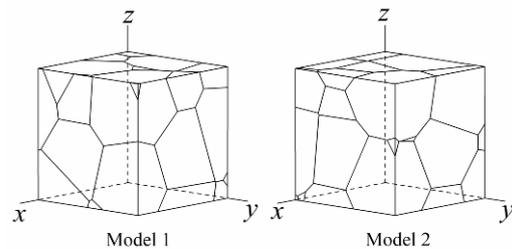


図2 一軸引張破壊解析用試験片モデル

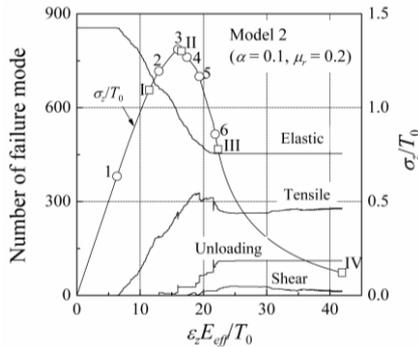


図3 基準化軸応力-基準化軸ひずみ曲線と破壊モード数の変化 (Model 2,  $\alpha = 0.1$ ,  $\mu_r = 0.2$ )

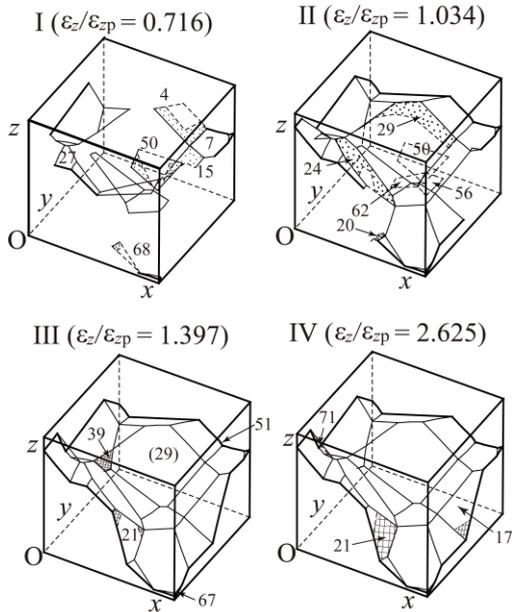


図4 図3のI~IVの各点における粒界破壊の状況

合は粒界面における破壊領域を小さな点を付した破線領域で表わし、除荷モードの粒界は境界を破線で、せん断破壊モードの領域は二重のハッチングで示してある。ただし、粒界が重なって図が煩雑になることを避けるため、段階IIIと段階IVでは、除荷モードの粒界を除いてある。また、破壊が試料の側面に及んでいる場合で最終破面と一致する場合は、側面との交線を太い実線で表わした。

これらの結果から、単一鉱物多結晶岩石の一軸引張破壊は以下のように進行することが明らかになった。すなわち、まず、法線方向が荷重軸方向に近い粒界からランダムな位置で引張破壊が開始し、ピーク強度に達する前には、引張破壊した粒界のうちで最終破面を構成しない粒界の除荷が生じ、ピーク強度点では、法線方向が荷重軸から大きく傾斜している粒界の一部または全部が未破壊で残る。最終破面が完成するのは、ピーク強度以後の軸応力-軸ひずみ曲線の変曲点付近

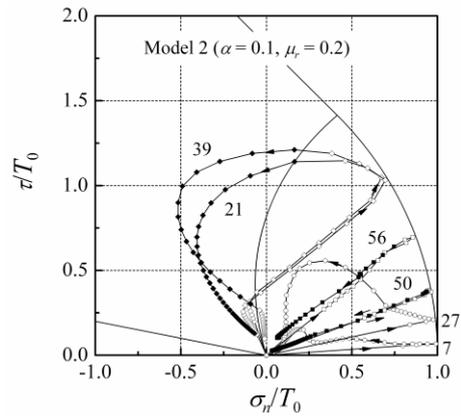


図5 図4に示した粒界における応力軌跡の例

であり、この後は破壊モードの転換を主体とする破壊過程になる。

図5に、図4に示した粒界における応力軌跡の例を示す。粒界7と27(丸印)は初期段階で引張破壊し、最後まで引張破壊モードであったもの、粒界50と56(四角印)は引張破壊後除荷になったもの、粒界21と39(ひし形)は、引張破壊後せん断破壊モードに転換したもので、粒界21は最終段階でもせん断破壊モード、粒界39は最終的に引張破壊モードになったものである。外側の破壊条件(ピーク強度の破壊条件)に達して引張破壊が始まるが、全破壊過程で引張破壊モードの粒界(7と27)ならびに途中で除荷になった粒界(50と56)は、破壊前にも引張破壊領域内にあり、破壊後は引張破壊領域内で原点に近づいている。一方、途中でせん断破壊モードになった粒界(21と39)は、破壊前の弾性変形の段階で垂直応力が圧縮で増加した後引張破壊領域に入って引張破壊し、その後、軸変位が主としてせん断変位になるために、垂直応力は減少するもののせん断応力があまり変化しないまま引張破壊領域からせん断破壊領域へ進入し、垂直応力が圧縮になった状態で原点へ近づいている。この最終段階では、粒界21がせん断破壊領域内、粒界39が引張破壊領域内にあるが、両者とも垂直応力は圧縮で小さな値であり、かつ引張破壊とせん断破壊の境界付近にあることから、最終破壊段階での破壊モードの差は大きな物理的意味を有しないことがわかる。

このように、法線方向が荷重軸と大きく傾いた粒界では、粒界間の相互干渉により、弾性変形の段階で圧縮の垂直応力が生じ、最終的に破面を形成する段階でも同様な状態になることがわかる。一軸圧縮応力場では、法線方向が荷重軸と大きく傾いた粒界で引張の垂直応力が発生し、これが圧縮応力場における引張破壊源になるが、一軸引張応力場では、法線方向が荷重軸と大きく傾いた粒界に逆に圧縮の垂直応力が発生し、引張応力場で

のせん断破壊源になる。多数の孤立した微小き裂に基礎をおくモデルでは、このような現象は生じず、き裂が連結しない限り引張応力場で圧縮の垂直応力が生ずることはない。

この他、引張—せん断軟化則の係数 $\alpha$ が小さいほど等価永久変位に対する粒界の引張強度低下が緩やかになるため、ピーク強度に達するまでに多くの粒界が破壊し、ピーク強度までに必要なエネルギーが大きくなることによりピーク強度が大きくなること、残留摩擦係数は、ピーク以後軸応力—軸ひずみ曲線の変曲点で最終破面が完成するまではほとんど影響を及ぼさないことなども明らかになった。

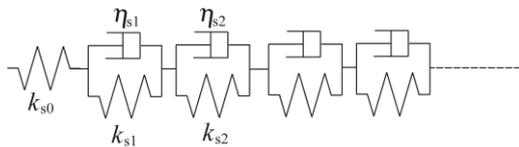
(2) 粒界き裂の粘弾性挙動に基づく応力解放時の損傷解析

本研究では、多結晶岩石について以下の基本的な仮定をした。

- ①岩石中の結晶粒子（実質部）が等方かつ弾性的性質を有するのに対し、粒界は面内等方かつ線形粘弾性的性質を有する。
- ②地質学的な時間経過により粒界の応力集中が緩和し、岩石内（従って、粒界上）の応力はより一様になる方向に変化する。
- ③応力解放によりまず粒界の弾性変位が解放され、この時粒界に生ずる残留応力により粒界が破壊する。

すなわち、地質学的な時間経過に伴って、岩石内の粒界の応力が一様になる方向に変化して岩石の変形が収束状態に達し、ボーリング等によって応力解放されると瞬時に弾性変位が解放され、この時に発生する残留応力により岩石内に微小き裂が生ずると考える

(a) Shear mode



(b) Normal mode

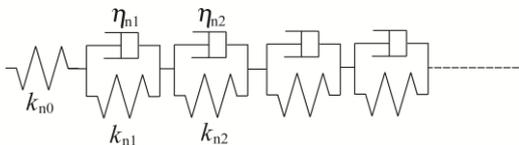


図6 粒界の剛性の粘弾性モデル

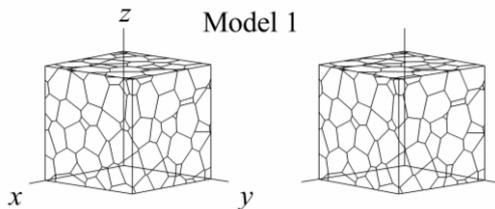


図7 応力解放時の損傷解析用単一鉱物多結晶岩石試験片の例

わけである。図6は、粒界の(a)せん断剛性( $k_s$ )および(b)垂直剛性( $k_n$ )の線形粘弾性モデルである。弾性的性質を表す $k_{s0}$ と $k_{n0}$ は試験片のヤング率が硬岩の典型的な値になるように設定し、無限の地質学的時間経過後の剛性 $k_{s\infty}$ と $k_{n\infty}$ は、すでに $k_s/k_n$ が1に近いほど岩石内の応力が一様になることが分かっていることから、それぞれ、 $k_{s0}$ と $k_{n0}$ よりは小さい値で $k_{s\infty}/k_{n\infty}$ が $k_{s0}/k_{n0}$ よりも大きくなるように設定した。また、応力条件としては、主応力( $\sigma_i$ )を平均応力( $\sigma_m$ )で基準化することにより全ての圧縮応力場を考慮し、深さを表す平均応力としては、 $\sigma_m/T_0 = 5, 10, 15, 20, 30, 40$ の場合について解析した。ただし、 $T_0$ は粒界の一軸引張強さである。

図7は用いた単一鉱物多結晶岩石試験片の例である。応力解放前の粒界の剛性値として幾つかのケースについて検討したが、以下のことは全てのケースに共通な知見である。

幾つかの応力の場合について、粒界の法線方向ステレオ投影図に描いた粒界の損傷度の等高線分布を図8に示す。本研究で提案し

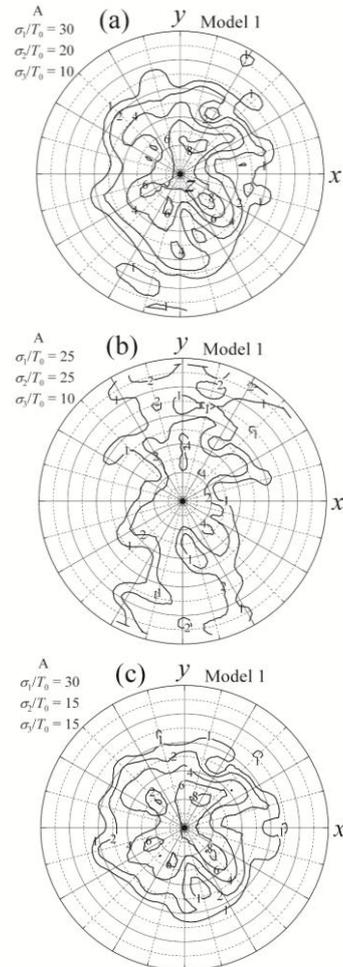


図8 粒界の法線方向ステレオ投影図における損傷度の等高線分布 ( $\sigma_1/T_0, \sigma_2/T_0, \sigma_3/T_0 =$  (a) 30, 20, 10, (b) 25, 25, 10, (c) 30, 15, 15) (Model 1, Case A)

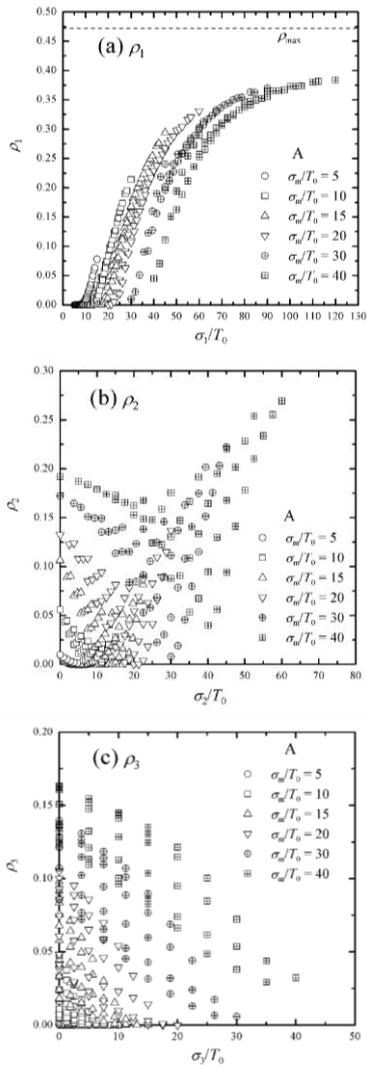


図9 各主応力と各主クラック密度の関係 (Model 1, Case A)

たメカニズムにより岩石が損傷する場合、岩石の損傷は主応力の最大値方向に法線方向を有する粒界を中心に生じ、その他の主応力方向に法線方向を有する粒界の損傷は極めて小さい。これは、最大値ではない主応力の解放に伴って生ずる残留引張応力が主応力の最大値の解放に伴って生ずる残留圧縮応力によって打ち消されるためである。図9に、各主応力 ( $\sigma_i$ ) と各主クラック密度 ( $\rho_i$ ) の関係の例を示す (Model 1, Case A)。最大クラック密度 ( $\rho_1$ ) は最大主応力 ( $\sigma_1$ ) とともに増加するが、 $\sigma_1$  に比例するわけではなく、平均応力 ( $\sigma_m$ ) が大きいほど  $\rho_1$  は小さくなる。

中間クラック密度 ( $\rho_2$ ) は中間主応力 ( $\sigma_2$ ) とともに単調に増加することはなく、大略、 $\sigma_2/\sigma_m < 1$  では  $\sigma_2$  とともに減少し、 $\sigma_2/\sigma_m > 1$  では  $\sigma_2$  とともに増加する。また、最小クラック密度 ( $\rho_3$ ) は最小主応力 ( $\sigma_3$ ) とともに減少する。従って、 $\rho_1$  が  $\sigma_1$  方向に法線方向を有

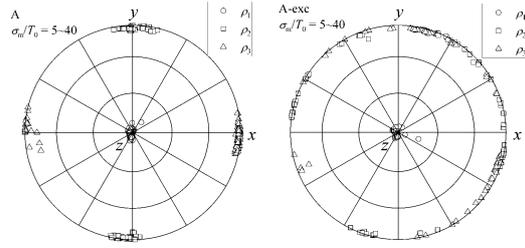


図10 全ての主クラック密度の方向と主応力方向がほぼ一致する場合(左)と一致しない場合(右) (Model 1, Case A)

する境界の破壊を中心に生じ、 $\sigma_1$  が大きいほど  $\rho_1$  が大きくなることについては DSCA の基本仮定に近い仮定が成立するが、 $\sigma_2$  や  $\sigma_3$  によってその方向に法線方向を有する粒界が損傷して  $\rho_2$  や  $\rho_3$  が生ずるという DSCA の基本仮定は全く成立しない。

図10は、全ての平均応力について、主クラック密度の方向を、全ての主クラック密度の方向と主応力方向がほぼ一致する場合(左)と一致しない場合(右)に分けて示した例 (Model 1, Case A) である。ただし、 $z$  軸が  $\sigma_1$  方向、 $y$  軸が  $\sigma_2$  方向、 $x$  軸が  $\sigma_3$  方向である。また、図11は、全ての主応力方向が主クラック密度とほぼ一致する応力領域の例 (Model 1, Case A) で、境界線の右側で全ての主応力方向が主クラック密度とほぼ一致する。クラック密度の主値の方向は、 $\sigma_m$  が大きくなると、大略、全圧縮領域の半分を占める  $\sigma_1/\sigma_m \geq -5(\sigma_2/\sigma_m) + 6$  の領域で主応力の方向とほぼ一致する。また、殆どの応力条件で  $\rho_1$  の方向は  $\sigma_1$  の方向とほぼ一致する。このように、地下深部になるほど DSCA により主応力方向を正確に評価できるようになるが、こ

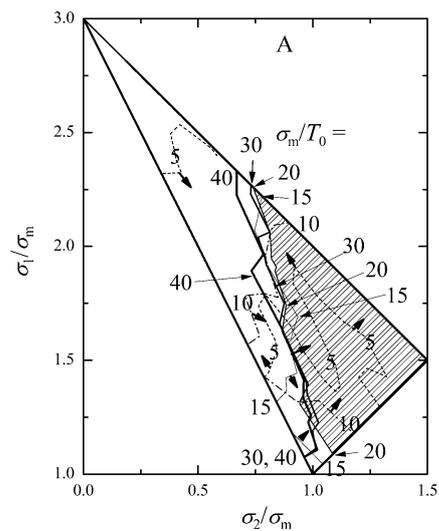


図11 全てのクラック密度の方向が主応力方向とほぼ一致する場合の応力領域 (Model 1, Case A)

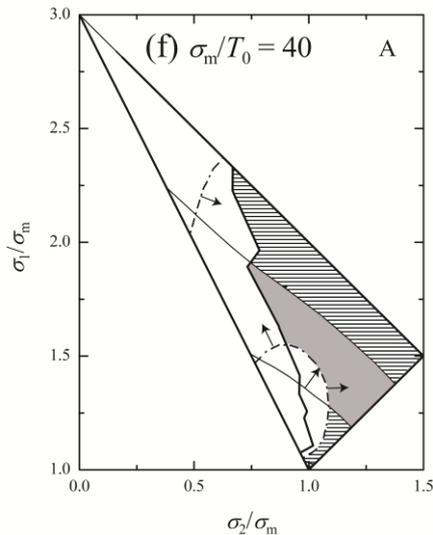


図 12 DSCA により主応力の方向と主応力比がほぼ正確に評価できる応力範囲 (Model 1, Case A,  $\sigma_m/T_0 = 40$ )

これは、 $\sigma_1$  により  $\sigma_1$  方向に法線方向を有する粒界を中心に生じた損傷が静水圧下のひずみに及ぼす総和効果の結果である。

上記の結論にもかかわらず、DSCA によって主応力比がある程度正確に評価できる応力領域が存在する。一例を図 12 に示す (Model 1, Case A,  $\sigma_m/T_0 = 40$ )。同図では、ハッチ部が DSCA により全ての主応力方向と  $\sigma_2/\sigma_1$  がほぼ正確に評価できる領域、薄墨部は全ての主応力方向と  $\sigma_2/\sigma_1$  および  $\sigma_3/\sigma_1$  がほぼ正確に評価できる領域を表している。地下浅部ではこの応力領域は限られた狭い範囲にあるが、地下深部で  $\sigma_m$  が大きくなると、大略、主応力方向が正確に評価できる上記で述べた  $\sigma_1/\sigma_m \geq -5(\sigma_2/\sigma_m) + 6$  の領域内で  $\sigma_2/\sigma_1$  がある程度正確に評価でき、その領域のさらに約半分の領域では  $\sigma_3/\sigma_1$  もある程度正確に評価できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. 松木浩二, 及川寧己, 坂口清敏, 木崎彰久, 粒界の粘弾性挙動に基づく応力解放時の岩石の損傷評価, Journal of MMIJ, 査読有, 128 巻, 2012 年, 121-133.

[学会発表] (計 1 件)

1. K. Matsuki, Y. Karino, K. Sakaguchi, A. Kizaki, Analysis of uniaxial tensile fracture of monomineral polycrystalline rock based on intergranular cracking, 12th Congress of ISRM, 2011 年 10 月 20 日, 北京

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松木 浩二 (MATSUKI KOJI)

東北大学・大学院環境科学研究科・教授

研究者番号 : 10108475

### (2) 研究分担者

坂口 清敏 (SAKAGUCHI KIYOTOSHI)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授

研究者番号 : 50261590

木崎 彰久 (KIZAKI AKIHISA)

東北大学・大学院環境科学研究科・助教

研究者番号 : 60344686

### (3) 連携研究者

なし