

平成 21年 5月20日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18510158  
 研究課題名 (和文) ガウジの S I P (せん断分極) 特性の定量化と岩盤の破壊予測への適用  
 研究課題名 (英文) Qualification of SIP (Shear-induced Polarization) for the gouge and the application to the prediction of rock failure  
 研究代表者  
 中川 康一 (NAKAGAWA KOICHI)  
 大阪市立大学・都市研究プラザ・名誉教授  
 研究者番号：80047282

研究成果の概要：ガウジ（断層粘土）は岩盤の破壊に伴って、母岩が細粒化された結果生成されたものであり、断層破碎帯に普遍的に存在するものと考えられる。この物質は岩盤とは大きく異なり、細粒であるため、大変特殊な性質を持つことが期待される。その最も顕著な特性の1つは、せん断分極で、これのごく定性的な性質については以前に報告したが、今回は、岩盤のせん断破壊の予測について、その可能性を検討するための、分極メカニズムについて、より詳細に吟味を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	690,000	4,090,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：活断層, ガウジ, 震源過程, 自然電位, せん断分極, 破壊予測

## 1. 研究開始当初の背景

断層破壊のダイナミクスを論じるとき、断層破碎帯を構成する材料の特性を知ることは大変重要と思われる。従来は震源近傍のガウジ(断層粘土)については、その存在自体が疑われてきたものである。しかし、最近の研究では、地表で見られるものとあまり変わらない破碎帯が震源域にも形成されていることがほぼ明らかになってきた。

ガウジの重要性がこれまであまり省みられてこなかったことの大きな理由は、強度が小さく

応力を蓄積し得ないとされてきたことによるとみられる。おそらく地表で見られるガウジを想定しての根拠と考えられるが、これを裏付けるような実験もほとんど行われてこなかった。我々はこれまでガウジの物性に関する研究を積み上げ、多くの知見を得ている。ガウジ中に含まれる石英やイライト鉱物は大きな塑性ひずみを被っていることから、地表付近で形成されたとは到底考えられない。また、ガウジの粒度分布は通常の堆積性粘土とは異なり、分級度が低く、百分の1ミクロン以下の極めて細粒に

至る広い分布となっている。したがって、高拘束圧下では予想以上に収縮することが可能で、空隙率を極端に小さくできることから、せん断によってダイラタンシー特性を示すと予想され、実験によってもこれが明かとなっている。ガウジが単に摩擦を除去するだけの潤滑剤としてのみ挙動するのか、脆性カップリング剤として有効に働くかは震源過程における破壊ストーリーを考えるうえで極めて重要なポイントとなり、この研究によって全く新しい分野が開拓される可能性がある。

さらに重要なトピックスとして、ガウジがせん断を受けた時、電気的分極(Shear-induced Polarization)をするという全く新しい知見が得られた。ガウジのこのような性質についての報告例は我々のもの以外になく、この現象の解明はガウジの材料科学的な性質を理解するうえで極めて重要であるばかりでなく、地震発生前後に現れる電磁気異常現象とも深く関連するため、早急な全容解明が必要となっている。

## 2. 研究の目的

これまでの研究により、粘土のような細粒な粒子集合体には、せん断変形によって、電気的な分極が見られることが明らかになったが、これがどのようなメカニズムで発生するのか、それが破壊とどのように関連しているのか、それが実際に野外で観察されるのかというような事項を明らかにすることが今回の研究の目的となっている。さらに、地下で破壊が進行するにあたって、ひずみは強度の小さな破砕帯に、とりわけガウジ帯に集中するものと考えられる。このように考えると、主破壊の発生前に、何らかのせん断分極の信号が検出される可能性が期待される。以上のような事項に関して、言及することも目的となっている。

## 3. 研究の方法

せん断に伴う電気分極のメカニズムを把握するためには、その実態を詳細に調べる必要がある。このような分極には粘土粒子と周囲の電解質溶液との間に物理化学的相互作用が働くと考えることから、電位検出のための電極は電池形成などの影響を抑制するような材料でなければならぬが、ここでは室内・野外とも金属を用いず、炭素棒を電極として用いた。室内試験に用いる試料については、地下で見られる現象を具体的に検討したいことから、活断層の露頭から実際に採取した断層粘土を用いた。野外における観測では、断層の近傍で断層の動きと関連した電気信号を検知したいところであるが、地震の起こ

る確率は現実の観測期間にとっては、非常に低いため、せん断分極の検証には、あまり得策とはならない。そこで、断層の動きと類似である地すべり地がその候補となった。

地すべりは重力によってすべり面に沿って滑動する現象をいうが、そのすべり面には、断層と同じように地すべり粘土と呼ばれるガウジが存在している。したがって、SIPの検証には地すべり地を選択するメリットは充分にある。野外でのSIPの検証として、新潟県中越地方の伏野地すべりと高知県の怒田・八畝地すべり地を選んだ。

## 4. 研究成果

### (1) SIPとは

SIPはせん断によって発生する電気分極現象を、またその発生した電位(Shear-induced Potential)を言う。その一般的性質は下図の



図1. SIPの概念図。

ようである。

ガウジ供試体を図のように変形させた場合、圧縮されたところには負の、膨張したところには正電荷の発生が観測される。この現象は、一見間隙水の移動による流動電位として認識できるかも知れない。しかし、せん断変形は本質的には体積変化が発生しないこと、また変形速度よりも他の要因によって発生する電位変化の方が大きいことから、流動とは区別した方がよいと考えられる。一般に粘土のような細粒物質の集合体においてはこのようなSIPが観測されるが、工作用の油粘土では全く観察されないことから、この現象には間隙流体が水のような電氣的に双極性の流体が大きく関与していることが明らかである。

### (2) SIP強度

SIPの発生メカニズムを考察するためには、変形のモードや発生する電圧を詳細に記述する必要があるが、その手法は確立されていない。あまり複雑でなく、再現性のある手法が要求される。そこで、平面ひずみ圧縮試験を実施し、そのせん断変形によって、発生する平均電位を「SIP強度」と定義することを考えた。以下に実験結果の1例を示す。用いた試料は柳ヶ瀬断層の露頭から採取したも

ので、手の平サイズの直方体(100x50x30:mm)の各面に電極を貼り付け、変形と共に発生する電圧を計測した。基準電極は試料の真中に埋め込んだ。

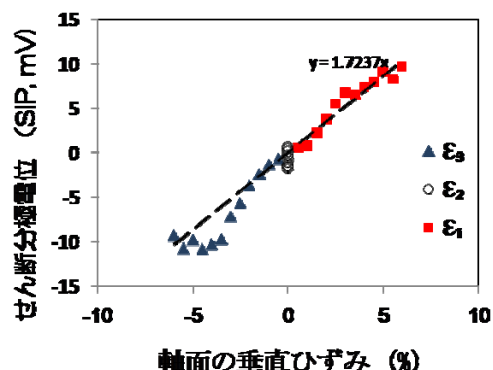


図 2. 平面ひずみ圧縮試験で各軸面に発生した平均 SIP.  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  はそれぞれ最大, 中間, 最小ひずみ軸を示す. ここで, 引張を正とする.

ひずみ速度 0.4%/分のせん断試験によって得られた結果は図 2 に示す通りである. なお, それぞれの軸面のひずみは圧縮軸のひずみから, 載荷面の摩擦を無視し, 非排水で体積一定の仮定のもとに, 他の軸面ひずみを計算した. 図にみられるように, 発生電圧とひずみの間に大略比例関係が認められる. この場合, SIP 強度は発生電圧をひずみで割ればよいから, 172.4mV の値が得られる. 発生電圧はいずれの材料であっても, 小ひずみ領域ではひずみに比例すると考えられる. しかし, SIP 強度は材料によって大きく異なり, 一般に, 細粒物質が多い程, 間隙水の電解質濃度が高い程, 圧密が進んでいるものほど高いということが経験的にわかっている. これはちょうど粒子間結合の強さと大きな相関がある.

### (3) SIP の緩和現象

SIP 強度を求めるためのせん断試験において試料表面の電位が変化するが, 電位変化の主役が応力によっているのか, あるいは変形によって生じたのかは必ずしも判別できない. 粘土は塑性的な性質が強いため, 変形されて力を取り除いた場合でも, 変形は元に戻らない. また, 発生した電位は, 力を取り除いた瞬間に 0 に戻ることはなく, しばらくの間持続するが, 時間と共に指数関数的に低下していくことが観測される. したがって, SIP 強度を求めるためのせん断試験のひずみ速度をどのように設定するかについての検討が必要となる. そこで, ガウジを十分圧密させて, パルスの衝撃を加えた場合の電位波形を調べた. その結果は図 3 に示すような緩和特性を示した.

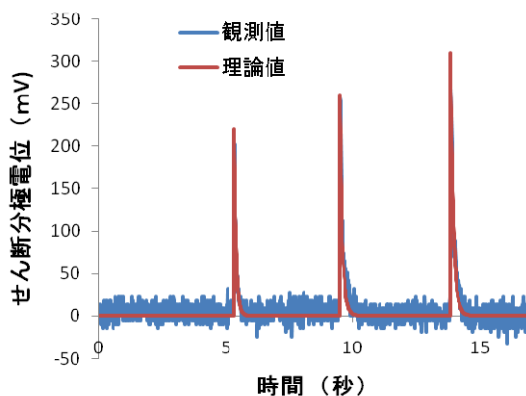


図 2. ガウジ試料の衝撃実験例 1.

衝撃は, 円筒供試体 (直径 5cm, 長さ 5cm, 300MPa にて圧密したもの) の上面をハンマーで叩くことによって与えた. ガウジ供試体は圧密によって, 岩石のように硬くなっており, 見た目には衝撃によって形が変形したり, ヒビが入ったりはしていないため, ほとんどが弾性変形に近いものと思われる.

3 回発生させた衝撃はいずれもパルス性でその幅は 10msec 以下と思われる. しかしながら, SIP の波形はそれよりはるかに広く, 100msec 程度の広がりを持つ. SIP の波形が尾を引く原因として, 試料の容量性負荷を考

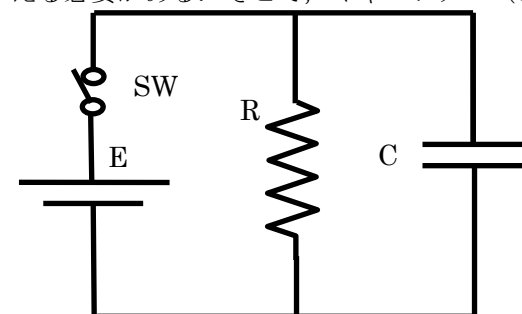


図 4. SIP の緩和を説明する単純な 1 組の RC 並列回路.

と抵抗 (R) が並列につながれたモデルを考え, SIP で発生した電圧 (E) を RC 並列回路に流した後, スイッチ (SW) をオフにした時の理論波形を赤色の理論波形として示した. 図にみられるように観測波形と理論波形はほぼ重なっており, 第 1 次近似としては RC 並列回路で説明可能である. 上記の場合のそれぞれの緩和時間 (CR) はパルス電圧が高い程延びる傾向があるものの, いずれもほぼ 100 msec となっている. さらに大きな衝撃を与えた場合の SIP 波形をみると, 上記のような単純なモデルでは説明できないように見える. 図 3 で用いたのと同じ試料に, 強い衝撃を与えた場合の結果を図 5 に示す. この試料はいろいろな条件から, SIP 強度が比較的大きいと考えられるものであるが, 実際その

ピーク値は 511mV とかなり大きな値を示した。ピークの後の方の裾野はすぐに減衰せず長時間にわたって、電荷が残存していることを示している。これは図 4 に示されるような、単純な 1 組の RC の組み合わせだけでは説明できなく、2 組以上の組み合わせが必要であることを示している。図 5 の観測波形にみられるように、電位が完全に元に戻るためには相当の時間を要することが分かる。したがって、試料を成型する際、こねたり大きな変形を加えたりすると、その影響で、初めから不均質で複雑な電位分布を示してしまい、計測に支障をきたす。

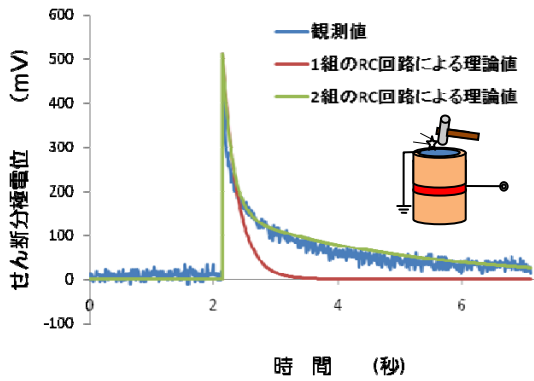


図 5. ガウジ試料の衝撃実験例 2.

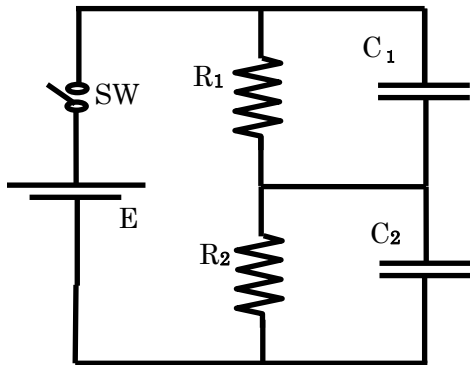


図 6. 図 5 の観測波形を説明するための等価回路。  $C_1/C_2 = 5/12$ ,  $\tau_1 (C_1R_1) / \tau_2 (C_2R_2) = 20$

#### (4) SIP の極性パターン

SIP の極性は図 1 のようであるが、せん断面との関わりが鮮明ではないので、これを把握するために、平面ひずみ圧縮試験を行った結果、図 7(a) に示されるような極性配置となった。この図は中間ひずみ軸面に投影したもので、相対的に圧縮軸面には負の電荷が、引張軸面には正の電荷が現れることを示している。この極性分布は SIP の発生メカニズムを探るうえで、大変示唆的である。(a) のような応力分布と極性パターンが与えられると、発生す

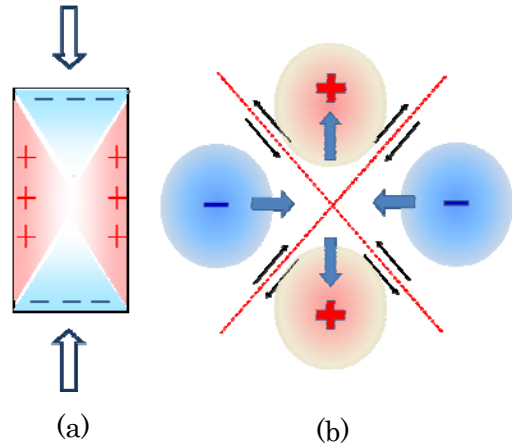


図 7. SIP の極性パターン。(a) : 平面ひずみ圧縮試験によって現れた極性分布で、中間主ひずみ軸面内の分布を示す。+ は正の、- は負の電荷分布。(b) : 平面ひずみ試験の結果を踏まえて、広域応力場により発生する断層滑りに伴う SIP の極性パターン。

る SIP の極性を予測することが可能となる。(a) の分布を基準に、広域応力場にある断層周辺の自然電位の分布を推定すると図 7(b) のようになる。

#### (5) 岩盤破壊の予測可能性

せん断変形に伴って、SIP が発生することが分かったが、すべり破壊以前の挙動に関しては詳細がまだ不明である。図 8 は地すべりを模擬した室内モデル実験の結果の 1 例である。不動土塊を基準として、すべりブロック内に設置された電極電位はすべりイベントに対応して変化していることが分かる。しかし、すべりイベントに対応していない電位変化もいくつか見受けられる。図 8 の赤色の丸印は対応していないパルス状の電位変化を示す。これらの電位変化は全体の変形を反映したものでなく、いたって局所的なものと考えられる。変位センサーの数値はある区間の平均を示すため、局所的なひずみを検出する

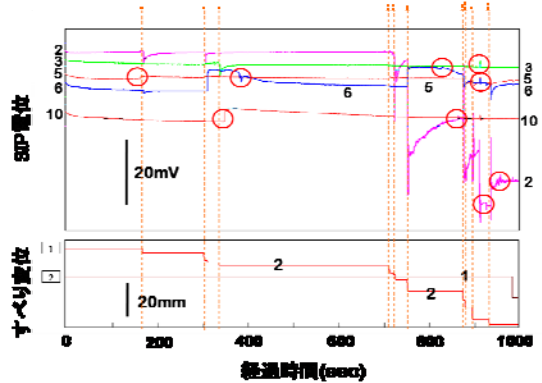


図 8 地すべりのモデル実験で得られた SIP の電位変化。赤い丸印はすべりイベントとは同期していない電位変化を示している。

ことは一般に困難である。SIP は局所ひずみを反映することから、破壊準備過程における

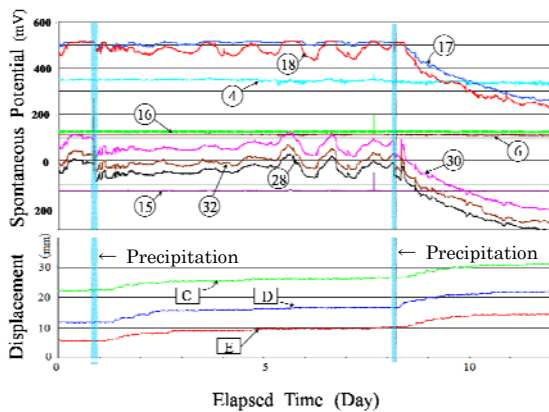


図 9 新潟県伏野地すべり地における地すべり変位と自然電位の時間変化の 1 例。

不均質ひずみの検出には適しているのかも知れない。実際に野外の自然電位観測ではどうなっているかを示したのが図 9 である。図にみられるとおり、地すべり変位と自然電位の変化の間には、日周変化のノイズが混入されているものの、両者はよく対応しているように見える。降雨の後わずかの時間を経過して、変位計の値が変化していることから、降雨終了後、しばらく遅れて地すべりが進行している。しかしながら、自然電位は降雨の後ほぼ瞬時に対応しているように見える。降雨と共に地表付近の自然電位が変化することは知られており、この影響を除去する必要がある。図 9 によると、降雨が引き金となって地すべりが誘発しているように見え、地すべり開始前後に、自然電位が激しく振動するように、連続したパルス状の変化が観測されている。これらが局所的なひずみを反映している可能性があり、そうであるとするならば、すべり破壊の前兆を示していることになる。

断層破碎帯は地下深所の震源付近まで連続していると考えられ、また周りの堅固な岩体に比べ抵抗が極端に低くなっていると思われることから、震源付近のひずみの状態変化の情報を送信するアンテナの役割を演じていると考えられることから、今後このパルス状の変化について詳細に検討していく必要がある。

#### 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 5 件)

- ① Thabet T., Nemoto H. and Nakagawa K. (2008): Variation process in stiffness inferred by nonlinear inversion during mainshocks at Kushiro Port vertical array site, *Earth Planets Space*, Vol. 60 (No. 6), pp. 581-589,

査読あり,

- ② 吉岡真弓・中川康一・登坂博行(2008) : ヒートアイランド現象緩和のための都市散水効果に関する実験的研究, 土木学会論文集G, vol. 64, No. 1, pp. 68-77, 査読あり,  
 ③ Thabet M., Nemoto H. and Nakagawa K.(2007) : Reliability of shear wave velocity models inferred from linear site response analyses using log data, *Jour. Geosci., Osaka City University*, vol.50, pp. 107-123, 査読あり,  
 ④ Mamoun K., Rashed M. and Nakagawa K.: On the contradiction of seismic wave velocity logging techniques: examples of down-hole, suspension and pulse-transmission methods, *J. Appl. Geophysics*, Vol. 6, No. 2, pp. 1-11, 査読あり,  
 ⑤ Rashed M. and Nakagawa K.(2006): The effect of different CMP stacking techniques on signal-to-noise ratio of seismic data: two examples from Osaka and Nara, Japan, *Jour. Geosci. Osaka City Univ.*, vol. 49, pp. 1-10, 査読あり,

[学会発表] (計 17 件)

- ① 中川康一(2008):近畿トライアングルとテクトニズム特性, 日本応用地質学会, 2008,10,30, 横浜開港記念会館。  
 ② Nakagawa K., Yamada S. and Tsuka I., (2008): Characterization of the shear-induced potential (SIP) in clay and the application to landslide, *6<sup>th</sup> Int. Conf. in Geotech. Eng.*, 2008,8,15, Arlington, VA, 6.01b, pp. 1-8, 査読あり,  
 ③ 中川康一(2008):ガウジにみられる力学特性とせん断誘発電位(SIP)の物理化学過程, 地球惑星科学連合大会, 2008,5,27, 幕張メッセ国際会議場  
 ④ 中川康一(2008): 近畿トライアングルとひずみ集中帯, 地球惑星科学連合大会, 2008,5,25, 幕張メッセ国際会議場  
 ⑤ 中川康一(2008):近畿トライアングルの構造特性とテクトニズムの背景, 日本応用地質学会関西支部 2008,5,16, 大阪市立大学メディアセンター  
 ⑥ 中川康一・塚 偉・山田茂伸・川添栄計・吉岡真弓・岡本 隆 (2007) : ガウジのせん断分極特性 (SIP)と野外への適用, 日本応用地質学会, 2007,10,12, 大阪市立大学メディアセンター  
 ⑦ 中川康一・塚 偉・山田茂伸・川添栄計・吉岡真弓(2007) : せん断分極 (SIP) の極性パターン, 日本応用地質学会, 2007,10,12, 大阪市立大学メディアセンター,  
 ⑧ 中川康一・塚 偉(2007) : せん断破壊に伴う電磁気異常のメカニズムに関する新しい

解釈, 地球惑星科学連合大会, 2007,5,21,  
幕張メッセ国際会議場

- ⑨柴山 元彦・平岡 由次・池田 正・中川 康一(2006): 深成岩体における地表 $\gamma$ 線強度分布について, 地球惑星科学連合大会, 2006,5,17, 幕張メッセ国際会議場
- ⑩吉岡 真弓・中川 康一(2006): 地下水を利用したヒートアイランド現象緩和に向けてーその3ー, 地球惑星科学連合大会, 2006,5,16, 幕張メッセ国際会議場
- ⑪中迎 誠・中川 康一(2006): 地下水位が及ぼす都市域の地震動増幅および液状化危険度への影響, 地球惑星科学連合大会, 2006,5,16, 幕張メッセ国際会議場
- ⑫川村 大作・西川 力・中川 康一(2006): 一次元圧密下における断層粘土の地震波速度の測定, 地球惑星科学連合大会, 2006,5,15, 幕張メッセ国際会議場
- ⑬中川 康一・河野 真裕美 (2006): 有効上載圧をパラメータに含めた地盤S波速度の推定式, 地球惑星科学連合大会, 2006,5,15, 幕張メッセ国際会議場
- ⑭福住 哲哉・領木 邦浩・中川 康一(2006): 逆断層を考慮した重力解析による大阪堆積盆地の地下構造モデル, 2006,5,15, 地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ国際会議場
- ⑮板井 秀典・中川 康一(2006): 新しい水銀探査法の開発と活断層への適応, 地球惑星科学連合大会, 2006,5,15, 幕張メッセ国際会議場
- ⑯中川 康一・岡本 隆・原口 強・根本 泰雄・塚 偉・吉岡 真弓・奥田 智晴(2006): 活動的地域における自然電位の多点観測および電位分布の時間変化特性, 地球惑星科学連合大会, 2006,5,14, 幕張メッセ国際会議場
- ⑰中川康一(2006):都市域の地下水コントロールセンター構想, 日本応用地質学会関西支部, 2006,5,12, 大阪市立大学文化交流センター

[図書] (計 1 件)

KG-NET・関西圏地盤研究会(中川康一, 他 40 名) (2007): 「関西地盤 ―大阪平野から大阪湾―」, KG-NET・関西圏地盤研究会, 354p+資料 66p, (pp. 229-230)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中川 康一 (NAKAGAWA KOICHI)

大阪市立大学・都市研究プラザ・名誉教授  
研究者番号: 8004782

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし