

平成 21年 5月 21日現在

研究種目： 基盤研究（C）
 研究期間： 2005～2008
 課題番号： 17500703
 研究課題名（和文） プリント基板配線を用いた改良型ストレインプローブの開発

研究課題名（英文） Development of print circuit type strain probe

研究代表者

倉茂 好匡 (Kurashige Yoshimasa)
 滋賀県立大学・環境科学部・教授
 研究者番号 20241383

研究成果の概要：

従来型のストレインプローブでは、土壌のクリープ性変形を検出することは可能であったが、土壌のせん断変形を検出することはできなかった。その最大の原因は、プローブの芯材に貼付したストレインゲージから伸びるコードの数が多くなりすぎ、このコードの剛性のためにプローブ本体の弾性変形が阻害されることにあった。そこで、プローブの中心材にフレキシブルプリント基板配線を用いたところ、土壌のせん断変形を十分な精度で検出できるようになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,700,000	0	1,700,000
2006年度	300,000	0	300,000
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,700,000	510,000	4,210,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：地理学・地理学

キーワード：ストレインプローブ，土壌変形，せん断変形，FPC，自記測定

1. 研究開始当初の背景

ストレインプローブとは、バネ鋼を芯材とし、その表面に歪ゲージを多数貼り付け、さらにそこにシリコン等でのコーティングを施したものである。そして、土中にこのストレインプローブを挿入し、土壌の移動に伴ってストレインプローブに生じた撓みを歪ゲージで検出する構造になっている。

この方法自体は1957年にWilliamsにより考案された。しかし、1990年代になるまで、実用に供せるものにはなっていなかった。なぜなら、一般に歪ゲージは非常に鋭敏なセンサーであり、歪ゲージが土壌中に礫などが存

在することに伴う局所的変形を検出してしまい、土壌全体の変形を検出しなかったためである。

Yamada and Kurashige が1996年に開発した改良型ストレインプローブ法は、上述の欠点を克服した。彼らは大型の歪ゲージ4枚をプローブの1区間10cmの領域に貼り付け、これによりこの区間の平均的曲率を検出できるようにした。この改良により土壌のクリープ性変形を自動検出することが可能になった。しかしこの方法では、土壌のせん断変形を検出することはできなかった。土壌のせん断変形は、変形層の層厚がせいぜい数cm

である。しかし、Yamada and Kurashige 式のストレインプローブでは、1 区間 10 cm での平均的曲率を検出することしかできない。その最大の原因は、区間数を大きくするとストレインプローブの芯材に貼付したストレインゲージから伸びるコードの数が多くなりすぎ、このコードの剛性のためにプローブ本体の弾性変形が阻害されるためである。

土壌のせん断変形を検出するためには、ストレインプローブの 1 区間の長さを数 cm 程度まで短くする必要がある。従来法では、ストレインゲージから伸びるコードの数があまりにも多くなりすぎ、目的を達成することができない。コードを介さずにストレインゲージの信号をプローブ上端まで送る技術を開発しなくてはならない。

2. 研究の目的

前述した問題を克服するため、ストレインプローブの芯材にフレキシブルプリント基板回路 (FPC) を施すことを考えた。この状態の芯材に歪ゲージを貼り付け、その信号を FPC 経由でストレインプローブ上部まで送るようにすれば、プローブの区間長を数 cm 程度まで短くすることは可能だと考えた。

本研究では、このコンセプトに基づいたストレインプローブを試作し、この精度を検証した。さらに、これを実際の野外に設置し、そこでの土壌せん断変形を検出することを試みた。

3. 研究の方法

(1) FPC を用いたストレインプローブの試作と検定

幅 4 cm、厚さ 0.3 mm のバネ鋼を芯材とした長さ 48 cm、区間長 4 cm、区間数 12 のプ

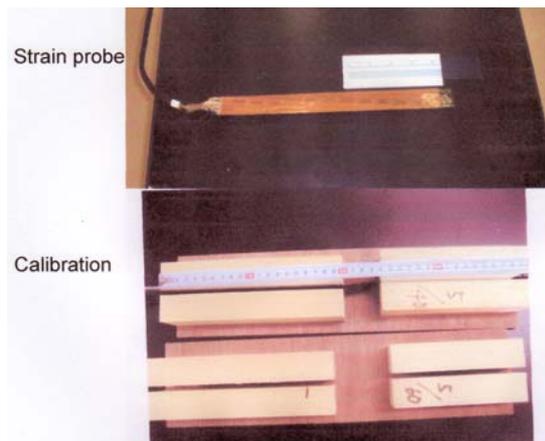


写真 1 新型ストレインプローブとせん断変形測定実験の方法

ローブを試作した。これに対し、変位 5 mm のせん断変形をせん断層厚 6 cm, 4 cm, 2 cm の 3 ケースについて与えた。同時に従来型のプローブにも同様の変形を与えた。そして、

検出した土壌変位について検討した。

(2) 野外での観測

連携研究者の園田が表層土クリープの観測をしている測定斜面が奈良県明日香村細川にある (図 1 左)。その斜面で 2007 年から 2008 年にかけて、新型ストレインプローブの適用実験をした。

測定斜面は風化花崗岩地質で森林植生に覆われており、図 1 左の縦断面図に示すように、尾根から下方に 30 m 余りの区間である。P1 から P9 までは平均傾斜 35 度の上部斜面、P10 から下方は傾斜 46 度以上の中腹部斜面である。P12 の下方は 1982 年に表層が崩壊している。

園田は、この斜面の P1 から P12 までの各地点の地表面から斜面に垂直な深さ 97cm まで従来型ストレインプローブを取り付け、そのうち 4 地点はロガーを用いて自動観測、残り 8 地点は 1 年に数回、手動で静歪の測定を行ない、2003 年から 2009 年現在まで観測を継続中である。

その結果、表層土下部に明確なせん断変形が現れることが分かった。しかし、ストレインプローブの設置深さと、測定器自体のせん断変形への対応性が十分でないため、それらを改善して現象の詳細を確かめる必要があった。そこで、今回開発した新型ストレインプローブを P5 と P9 地点の表層土下部 (せん断変形発生位置付近) に取り付けた。これら 2 地点では同等の観測を行ったが、紙面の関係上、観測方法の説明と結果はともに、P9 地点についてのみ述べる。

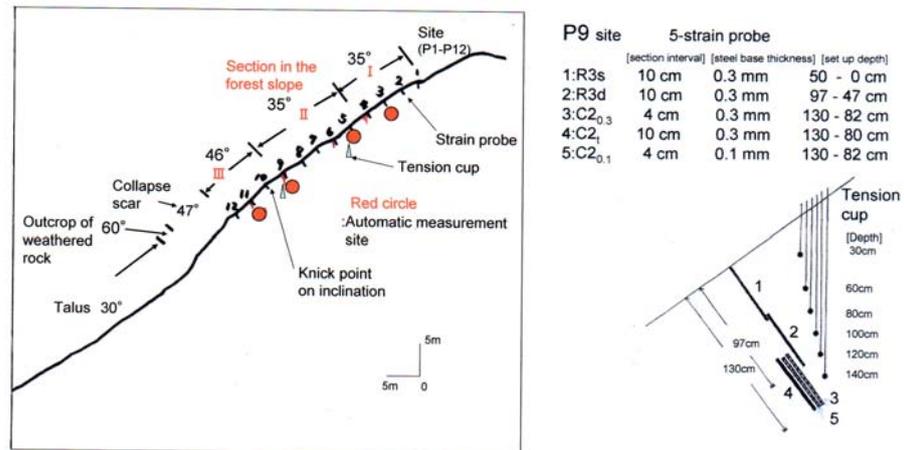
図 1 右のように、P9 地点には、従来型 (R3s, R3d, C2i) と新型 (C2_{0.3}, C2_{0.1}) の合計 5 本のストレインプローブを設置した。新型の設置深さは、斜面に垂直な深さ 130~82 cm である。5 本のプローブはすべてロガーに接続し、1 時間ごとの自動測定をした。また、土壌体の変形と土壌水分変化との関係を見るために、プローブに近接した位置に、自記テンシオメーターのテンシオカップを設置した。テンシオカップの設置深さは鉛直深で示し、歪プローブの深さ表示 (斜面に垂直な深さ) とは異なる。

P9 地点の斜面内部の物理性については、鉛直な深さで、地表面から深さ 80 cm までが、簡易貫入試験で N_{10} 値 10 以下の、腐植を含む完全に土壌化した森林褐色土壌 (表層土の上層) で、80 cm から 140 cm は、 N_{10} 値が 10 から 50 への移行帯で、土壌化してはいるが、長石粒子を多く含み、細粒化が不十分な部分 (表層土の下層) である。それより斜面内部方向には、土壌化していない花崗岩の物理的風化帯が続く。土壌サンプルを採集して実験室で調べた結果によると、表層土の上層・下層ともに飽和透水係数は 10^{-2} から 10^{-3} cm/sec

オーダーで、体積水分率は45%～15%、有効空隙率は25～12%である。

図1左. 測定斜面の縦断面図

図1右. P9地点の土壌断面と測定器の配置



4. 研究成果

(1) FPC を用いたストレインプローブの試作と検定

変位 5 mm のせん断変形を FPC 型および従来型のプローブに与え、それによりせん断変形検出成功率を算出した。測定はすべて 21 回行い、その中でせん断変形を検出したと認定できたものの頻度をパーセンテージで算出した。この結果を表 1 に示す。

従来型では、いずれのせん断層厚に対してもせん断変形検出成功率は 0% だった。それに対し、FPC 型は、せん断層厚 6 cm および 4 cm の場合は成功率 100% で検出した。ただし、せん断層厚 2 cm のときは、検出成功率 33.3% にとどまった。

表 1. 従来型および FPC 型プローブでのせん断変形検出成功率

せん断層厚	FPC 型	従来型
6 cm	100%	0%
4 cm	100%	0%
2 cm	33.3%	0%

試作した FPC 型プローブは 1 区間 4 cm のものであった。この結果は、せん断層厚が FPC 型プローブの区間長以上であれば、FPC 型プローブはせん断変形を十分に検出することを示した。

次に、FPC 型プローブで検出した変位と層厚を表 2 に示す。

表 2. FPC 型プローブで検出したせん断層厚とせん断変位

せん断層厚 (cm)	検出層厚 (cm)	検出変位 (mm)
6	13.14 ± 1.85	4.85 ± 0.58
4	11.24 ± 1.61	5.71 ± 0.54
2	9.14 ± 1.95	5.51 ± 1.20

注：平均±標準偏差

実際に与えた変位 (5 mm) に対し、検出変位

は同等のものだった。ただし検出層厚は、実際に与えたせん断層厚よりも大きかった。これは、実際にせん断変形の生じたプローブの区間より上下にある区間に歪が伝播したためであると判断した。特に今回試作したプローブの場合、区間長が 4 cm であるから、これより上下に歪が伝搬すれば、せん断層厚を 8 cm あるいは 12 cm のように読み取らざるを得なくなる。

一方、検出変位は実際に与えた変位に近いものだった。これより、プローブの歪が上下区間に伝播してしまうことを考慮に入れば、FPC 型プローブは土壌のせん断変形を十分に検出可能であり、しかもその検出変位は実際の変位に近くなる。すなわち、FPC 型プローブは実際の土壌のせん断変形を十分に検出可能であると判断した。

(2) 野外観測の結果

図2はP9地点の2007年の測定結果である。この年は例年と異なり、7月に多雨であった。そのため、8月の土壌の乾燥が例年より弱く、9月に残暑が厳しく、土壌が乾燥した。図2の2段目は従来型ストレインプローブC2_t（芯材の厚さ0.3mm、セクション間隔10cm）の歪変化であるが、セクション数が5で測定数が少なく、隣接セクションの歪変化に連続性が乏しい。それに比べ、図2・3段目の新型ストレインプローブC2_{0.3}（芯材の厚さ0.3mm、セクション間隔4cm）の歪変化は、プローブの長さは旧型とそう変わらないが、セクション数12で測定数が多く、隣接したセクションの連続的な変化を捉えていると言える。従来型では捉えていない6月9日の乾燥した後の降雨による動きを新型では捉えている。又、7月17日の連続降雨の後半には、両者ともに動きを捉えている。

図2の4段目は、C2_{0.3}ストレインプローブで測定した歪から2007年の5つの時点（図2・3段目の△印1から5）における土壌変位のプロファイルをYamada and Kurashige(1996)式で計算したものである。これによると、斜面に垂直な深さ120cm（鉛直深さでは146cm）付近で、せん断変形が起きていることが読み取れる。これは、花崗岩の土壌化している部分と土壌化していない物理的風化帯の境界付近に当たる。

図3はP9地点の2008年の観測結果である。この年は、夏季の降水量の分布が平年並みで、気温が高く雨が少なかった8月に土壌の乾燥が進み、8月下旬にそのピークを迎えた（図

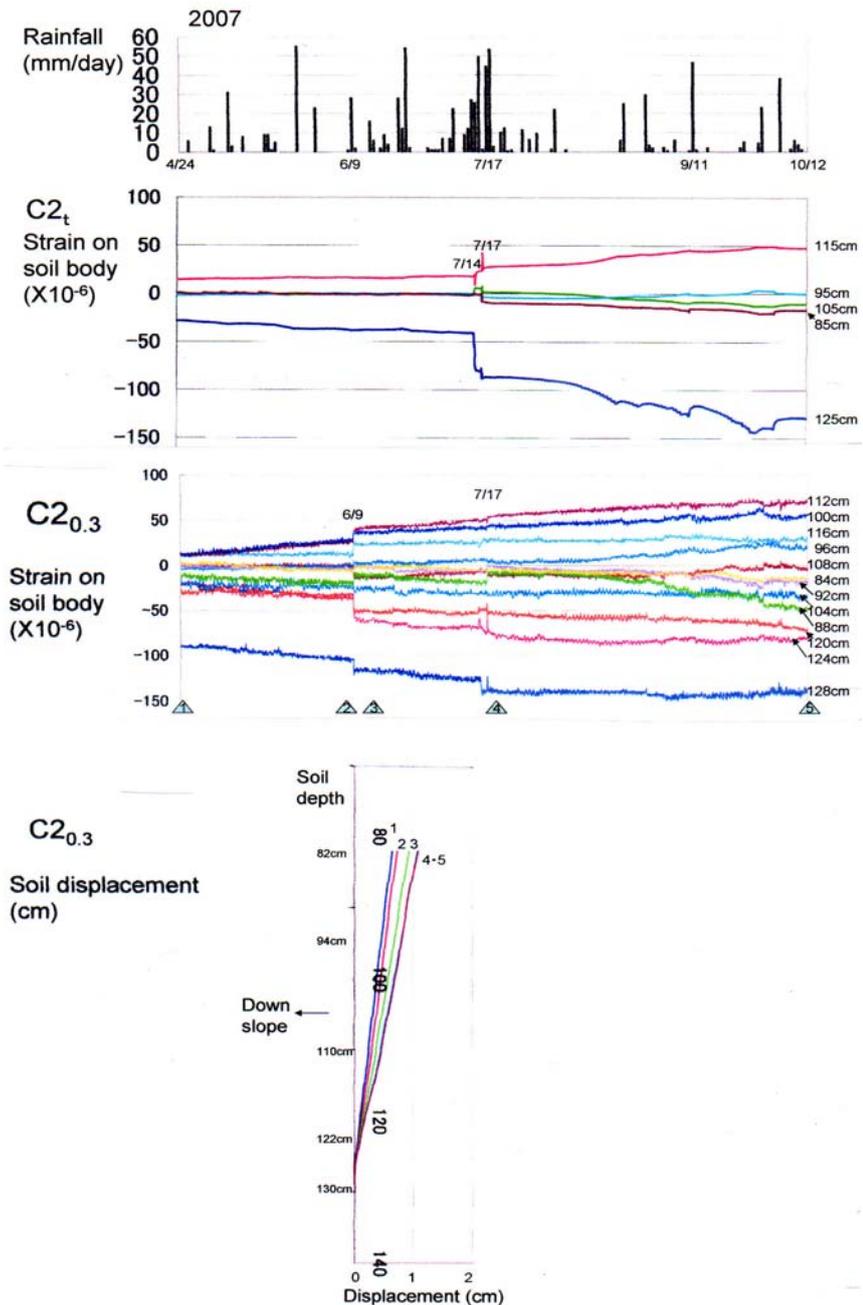


図2
 1段目 2007年現地における日降水量
 2段目 C2_tストレインプローブの歪変化
 3段目 C2_{0.3}ストレインプローブの歪変化
 4段目 C2_{0.3}ストレインプローブの歪から計算した5つの時点における土壌変位のプロファイル

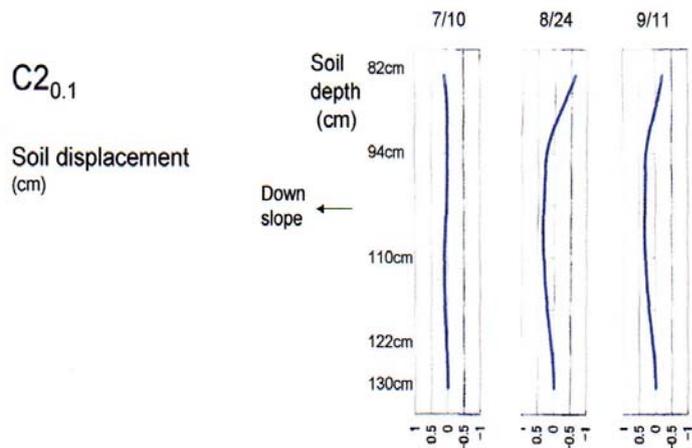
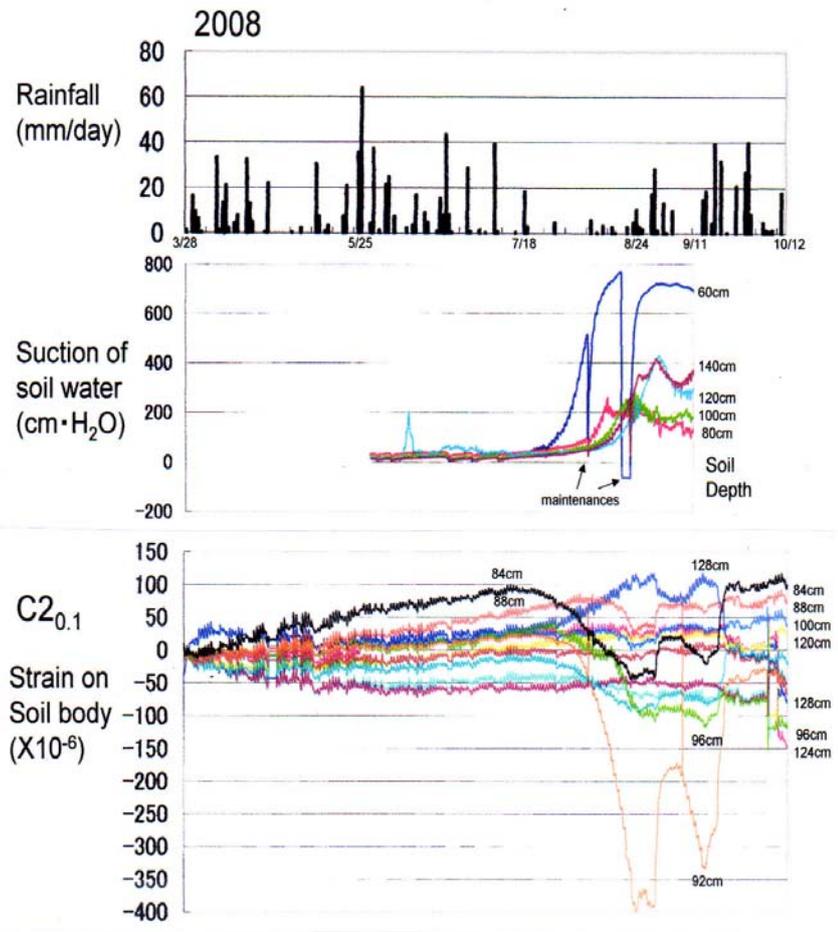
3・1段目と2段目)。

園田の観測によると、この地の森林斜面表層の土壌体に歪が発生する主な場合は2種類ある。1つは多雨の時で、表層土中に飽和斜面流が発生し、その水流力により土壌体に変形すると考えられる。もう1つは、土壌の乾燥が激しい時で、特に夏季に無降雨が続いた

ときに大きな歪が発生する。この歪は、降雨があって土壤の乾燥が解消されれば元に戻るが、戻らない変形部分があり、結果的に土壤クリープが進むというのが、園田の観測結果である。P9 地点の 2007 年の 7 月には、多雨の場合の土壤体の変形、2008 年 8 月・9 月には、夏季の乾燥による土壤体の変形が見られる。

図 3・3 段目の C2_{0.1} (芯材の厚さ 0.1 mm, セクション間隔 4cm) の新型ストレインプロブの歪は、8 月の土壤の乾燥に伴い増大している。歪変化が大きい深さの中心は 2 か所あり、一つは 128 cm 付近、もう一つは 92 cm 付近である。隣接のセクションにも似た傾向の歪変化が見られる。

図 3・4 段目は、この C2_{0.1} の歪値から、2007 年の場合と同じ方法で計算した土壤変位のプロファイルである。7 月 10 日には殆ど変位がなかったが、8 月 24 日には大きく変位が現れ、8 月末の降雨により、9 月 11 日には変位がかなり戻っている。8 月 24 日のプロファイルで、変位方向が転換する(せん断変形が見られる)深さは 120cm 付近で、2007 年 7 月の多雨で動いた深さと、ほぼ同じである。もう一か所、深さ 92cm で大きな歪が現れる。周りから飛び離れた大きな歪は、同時に観測している従来型ストレインプロブ R3d の 92cm でも、明確に現われている。ただし、R3d の場合はプラス歪で、C2_{0.1} の場合はマイナス歪であるので、逆センスである。土壤体のほぼ同じ位置で捉えた大きな歪が逆センスの場合は、一概には言えないが、この部分で土壤の破壊が起きている可能性が高い。また、深さ 92cm は、どちらのプロブでもその端図 3



- 1 段目 2008 年日降水量の変化 (現地)
- 2 段目 P9 地点の土壤水のサクション変化
- 3 段目 C2_{0.1} ストレインプロブの歪変化
- 4 段目 C2_{0.1} ストレインプロブの歪から計算した 7 月 10 日、8 月 24 日、9 月 11 日の土壤変位のプロファイル

に近く、ストレインプロブの特徴として、途中の部分に比べ端の部分は、平均的な土壤の動きよりも局所的な誇張した動きをすることがあり得るのではと考えられる。ともかく、この P9 地点の表層土断面では、120 cm 付近と 92 cm 付近の 2 つの深度でせん断変形

が起こっている可能性が高いことが確認された。

園田美恵子
京都文教大学・人間学部・非常勤講師

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 Yoshimasa Kurashige, Shuji Yamada, Mieko Sonoda and Michinobu Nonaka, Flexible Print Circuit Type Strain Probe for Monitoring of Shearing Deformation of Soil, Transactions Japanese Geomorphological Union, 29, 329-339, 2008, 査読有.

[学会発表] (計4件)

① 園田美恵子, 倉茂好匡, 山田周二, 日本地形学連合 2008 年度秋季研究発表会, 2008 年 10 月.

② Yoshimasa Kurashige, Shuji Yamada, Mieko Sonoda and Michinobu Nonaka, Taiwan and Japan Joint Symposium on Geomorphological Hazards and Management, March 2008.

③ 園田美恵子, 倉茂好匡, 山田周二, 日本地形学連合 2007 年度秋季研究発表会, 2007 年 11 月.

④ 倉茂好匡, 山田周二, 園田美恵子, 日本地形学連合 2007 年度春季研究発表会, 2007 年 3 月.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 歪ゲージ付き可撓性配線基板

発明者: 倉茂好匡

権利者: 公立大学法人滋賀県立大学

種類: 特許

番号: 特願 2006-348793

出願年月日: 平成 18 年 12 月 26 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉茂好匡

滋賀県立大学・環境科学部・教授

研究者番号: 20241383

(2) 研究分担者

山田周二

大阪教育大学・教育学部・准教授

研究者番号: 80295469

(3) 連携研究者