

耕うん時の土壌－機械系の力学的挙動計測法に関する研究

米川 智司

目次

第1章	序論	
1	研究目的	1
2	既往の研究	3
3	研究方法	6
第2章	小型土壌内応力および土壌変位センサ	
1	目的	
2	設計と試作	10
3	土壌内応力の計測方法とその精度	15
4	土壌変位の画像計測方法とその精度	17
5	結語	26
第3章	土壌槽総合試験装置	
1	目的	
2	設計と試作	27
3	コンピュータ支援計測システム	39
4	データ処理システムと計測精度	49
5	結語	54
第4章	供試土壌の圧縮成形	
1	目的	
2	圧縮成形装置の試作	55
3	圧縮成形実験と再生精度	61
4	結語	73

第5章 直線運動系耕うん実験

1	目的	
2	実験方法	75
3	実験結果と考察	78
4	結語	121

第6章 回転運動系耕うん実験

1	目的	
2	実験方法	122
3	実験結果と考察	126
4	結語	145

第7章 複ブレード耕うん実験

1	目的	
2	実験方法	146
3	実験結果と考察	151
4	結語	174

第8章 結論

1	研究成果	175
2	将来の課題と展望	179

	謝辞	182
--	----	-----

	参考文献	183
--	------	-----

付録 1	限界状態理論	190
付録 2	画像処理	197
付録 3	計測ソフトウェア(MIST/CAM)プログラム一覧	203
付録 4	高速フーリエ変換 (F F T)	212

第1章 序論

1-1 研究目的

耕うん整地などの土を扱う作業は、現在の農作業体系の中では最も基本的な作業であるとともに最もエネルギーを要する作業である。このエネルギーを低減する方法としては、不耕起栽培やミニマム・ティレッジ⁷⁰⁾⁷⁵⁾など作業体系の見直しによる方法と、作業機自体の改良による方法とがあるが、いずれにせよ各々の作業体系にあった最も効率のよい作業機が求められている。

土の性質を表わすパラメータは、Coulombの法則に代表される密で静的な土壌を対象としている土質力学の分野で求められてきたものがほとんどであり、耕うんが対象としている密とは限らない土には必ずしも適さないだけでなく、動的な土の性質を直接の対象としないことが多い。また、土壌のモデル化¹⁵⁾¹⁸⁾⁴⁷⁾⁷⁴⁾はある条件の範囲内では有効ではあるが、画一的な性質を持たない全ての土壌を網羅するには困難な点がある。このように設計に用いる土壌-機械系の工学的パラメータが明確に示されていないため、設計に利用できるデータは経験的に蓄えられた概算的なものがほとんどである。このため耕うん機器の開発の現状は、試行錯誤によって碎土や反転状況、作業安定性や所要動力などを改善して

いくといった非常に費用と手間と経験および直感力が要求されるものであり、理想的な機器を開発することは容易ではない。さらに、この方法は行なわれた作業結果を評価の対象にしているため、耕うん過程のエネルギーの差異までは正確に判断できない。

そこで、画一的な性質を持たない土に対して一義的なパラメータを示そうとするのではなく、耕うんモデル実験から土壌－機械系の力学的挙動を表わすデータを得、それを蓄積してデータベースとして利用する方法を考えた。最近のコンピュータの発達・普及によって、たとえ膨大な非線形データであっても、利用者側に使い易い形ならば問題なく用いることができると考えられる。むしろ、どうやってデータベースに組み込むデータを採取して行くかが問題である。また、データベースの応用性を高めるために、基礎的なデータでデータベースを構築すべきであり、そのためには現象を微視的に分析する必要がある。

本研究はこの考えを念頭におき、耕うん時の土壌－機械系の力学的挙動について多種のデータが同時に得られるような装置システムを開発することによって、上記のデータベース構築に有用なデータを採取可能なものにしようとしたものである。

1 - 2 既往の研究

土壌－機械系の力学状態とは、土粒子の集合体に対して耕うん機器が仕事をするとき、機械側からみれば機器にかかる力の状態はどの様になっているかなど¹¹⁾⁷⁴⁾、また土側からみれば土の力学状態は機器との位置関係によってどの様になっているかなどということである。これが例えば乾燥した砂などではある時間間隔をおいて同じ力学状態が連続的に起こり、中程度の水分状態の壤土などではせん断破壊が周期的に起こると考えられている²⁷⁾¹³⁸⁾。つまり、上記のデータベースを構築する際には、土や機器にかかる力学状態を相互の位置と時間の関数として求める必要がある。

土壌－機械系の力学的挙動のパラメータを求める際の大きな問題は土壌側のパラメータをどう求めるかである⁴²⁾。土壌は多種多様な混合物であり、鉱物質もあれば水分も存在し、さらに数限りない微生物なども含んでいる。この土壌を物理的、化学的、生物的視点からあたかも1つの物質、環境として扱うことにより様々な分野の学問が発達してきた。

農業機械学の分野では、主に土壌を物理的側面から巨視的に1つの連続体材料として扱ってきた。つまり、弾性力学⁸²⁾を応用することにより、応力－ひずみ関係を適用する試みが行なわれた。しかし、土壌が弾性体として挙動する範囲が限られているため、von Mises や Tresca の

降伏基準に代表される塑性力学⁸²⁾ や、Navier-Stokes の方程式に代表される粘性力学⁶⁸⁾ を応用することにより、連続体力学の適用範囲を拡大してきた。特に、Mohr-Coulomb に代表される弾塑性体として土壌が挙動するとする考え方が土質力学³⁾ として発達し、農業機械や土工機械を設計する際に主に用いられてきた^{4) 5) 24) 36) 54) 57) 58) 71)}。弾塑性力学では、材料強度は温度、時間的変動、化学的環境が一定の時ほど同じ値を示し^{20) 21) 67) 79)}、材料強度と構造物強度が応力-ひずみ関係を用いることにより同一に扱えるという考え方をとる。

しかし、土質力学の考え方はかなり密な土壌を対象としているため、農業機械が対象としている容積変化を伴う土壌^{40) 64) 65) 80)} に適用するには問題がある。これに対して Roscoe、Schofield および Worth によって理論づけられた限界状態理論（限界状態土壌力学）^{56) 72)} は、耕うんが対象としている土壌をより現実的に捉えている。この理論は、平均垂直応力 σ_m 、偏差応力 σ_d および間隙変化を表わす比容積 v を用いた $\sigma_m - \sigma_d - v$ 座標による三次元表現によって土壌の応力-圧縮変形および破壊条件に関する基本的挙動を示したものであり、降伏条件などは面として表わされる。近年、この理論に即した研究^{6) 12) 16) 17) 32) 43) 44) 73)} がなされるようになり、種々の機械的作用はその座標内を辿る経路（状態経路）として表わされてきた。しかし、状態経路の取り方が機械によって複雑に異なるとともに一定しておらず、かつ平均垂直応力と

偏差応力の関係が明確でないことが問題とされている⁷⁶⁾。さらに、これらの研究が比較的高い応力レベルでの実験であることが問題であると考えられる。なお、この理論の基本的考え方を巻末の付録1に掲載してある。

間隙が存在していることを前提にして土壌を扱うことは、物質内にクラックが存在することを前提にしている破壊力学⁵¹⁾の考え方を参考にできる。破壊力学はGriffithの脆性破壊理論から発達してきたもので、構造物の強度は形状や寸法、外力の大きさの影響を受けるとする考え方であり、応力拡大係数等の力学環境パラメータを加えた理論体系である。つまり、低い応力レベルでも破壊が起こることが前提にある。

以上のことより、低い応力レベルでの限界状態理論の応用が引張り破壊²⁷⁾³⁴⁾³⁸⁾⁵⁵⁾の導入とともに重要であると考えられる。高い応力レベルで力を加えることは、土壌内の間隙を少なくする方向、つまり圧縮せん断破壊を起こさせることを前提に考えていることになり、よりエネルギーが少ない耕うん状態を追求する実験とは言い難いからである。

耕うんのメカニズムを解析するのに際し考え方は異なるが、土壌-機械系の力学変化のデータを実験的に求める方法として注目されるのが畑村らによる研究²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾である。その特徴は、二次元直線切削(耕うん)での土壌-機械系の力学変化を千々岩らが開発した土中セル¹³⁾なる測定器で土壌内応力を計測している点と、土壌側面に格子縞を

描いて土の流れを観察している点、さらに、耕うん刃上に小型の圧力計と摩擦力計¹³⁾を取り付けて刃にかかる力を刃面上の力の分布から考察している点、そして、土壌側から得た力学変化と機械側から得た力学変化を結び付けようとした点にある。

土の変位を測定する試みは、供試土壌側面に等高線を書き入れる方法⁴⁹⁾⁵⁰⁾⁷⁷⁾⁸¹⁾、格子縞を書き入れる方法⁷³⁾⁶³⁾⁶⁹⁾、ピンを差し込んでおく方法²²⁾²³⁾、カメラのシャッターを解放して撮影する方法¹⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾⁵³⁾、X線を用いる方法³⁷⁾、モアレ縞を用いる方法⁴⁵⁾、ティッシュペーパーを用いる方法⁷⁸⁾などがある。特に、供試土の側面に線などを書き入れて土壌槽のガラス壁越しに観察する方法がよく使われているが、一旦側壁を取り外すか彩色した土を用いるかするため全ての条件の土に適用できるわけではない。

1-3 研究方法

以上のように、農業機械の分野では土壌を物理的に扱うという巨視的視野に立っている。この前提のもとに、従来行なってきた圃場実験などによるパラメータの収集、分析方法は、巨視的視野で起こる現象を巨視的水準で扱っているといえる。しかし、巨視的視野での土壌-機械系の基礎的データ、つまり、データベースを構成すべきデータは、巨視的視

野で起こっている現象を微視的水準で分析することによってはじめて収集できると考えられる。つまり、今までは全体の流れや平均値として扱われてきた現象を、より詳細に分析できるような装置システムの開発を目指した。

そこで、計測が比較的難しい間隙を多く含むある状態の土壌を用意し、そこで土側と機械側から耕うんの際の力学状態変化を位置と時間の関数として測定する。特に、土壌の力学状態を内部分布の形で測定する必要がある。ある状態の土壌の再生が可能でかつ実験結果に再現性のあることが確かめられれば、ある土壌でのデータが得られたことになり、これがデータベースの1つのデータ群となる。将来これを土壌と機器の形状および作業状態について拡張して行けば、データベースの完成となるわけである。

土壌内での力の伝わり方や、破壊の起き方などを解析する上で土壌内の応力分布を求めることは重要であると考えられる。この点では千々岩らが開発した土中セルは有用ではあるが、土壌粒子に比べて形状が大きすぎるために、例えば壤土などにおいてはセル付近に応力集中が起こりセルをとりまく土壌に亀裂が生じ正確な計測ができなくなるばかりでなく、同一土壌内の多点で用いることができないことが問題である。

そこで、できるだけ土壌の環境を乱さないような小型の土壌内応力計を開発し、間隙が存在する中で低いレベルの応力を同時多点計測できる

ようにすることと、応力と土の変位とを対応できるように両項目を同時に同一土壌で計測することを目的とした、小型土壌内応力および土壌変位センサの開発を試みる。本センサは、技術的に実現が容易である二次元計測器とし、土壌内応力検出部に市販の超小型圧力計を利用するとともに、土壌変位の測定に光ファイバと画像計測を応用することでセンサ本体の小型化を図る（第2章）。

そして、多種の耕うんモデル実験が可能な装置の開発を行なう。本装置は小型土壌槽と各種耕うんモデル実験に用いるブレードユニットをできるだけ柔軟性をもたせて組み合わせたものとし、多チャンネルのデータの計測にはCAMの手法を取り入れて迅速正確なデータ処理を行なう（第3章）。

さらに、同一条件の土壌の再生手段として、本研究では水分量を調節した土を一旦細粒化し、土壌槽充填後に一定圧力の元で圧縮成形するという機械化した成形方法を用いることで、同一の成形過程で供試土壌の再生を行なう。なお、土壌の再生状態の確認には、土質力学で常用されている指標を用いる。また、圧縮成形時に土壌内応力／土壌変位センサから得られるデータと既往の圧縮試験のデータを照らし合わせることで、センサの静的性能試験を行なう（第4章）。

さらに、本装置と複数の小型土壌内応力／土壌変位センサを用いて、平板ブレードによる直線運動系耕うんのモデル実験を行ない、既往の研

究を参考にして本装置の性能および土壌の再生状態と土壌内応力／土壌変位センサの動的性能試験を行なう。さらに、モールドボードプラウに代表される直線運動系の耕うん機器の研究が多くなされているので¹³⁸⁾、それらの研究結果が本装置システムで再現できるかを確かめることと、土壌－機械系の力学状態において新たな知見をデータベースのデータ群に加える必要があるかも探る（第5章）。

次に、ロータリ耕うん機に代表される回転運動系の耕うんのモデル実験を本装置で行なう。、回転運動系耕うんは直線運動系耕うんと並んで現在の耕うん機器の主流をなしており、研究も多くなされているので¹³⁸⁾、直線運動系耕うん実験と同様の考察を行なう（第6章）。

さらに、直線と回転運動の組合せといった新しい耕うん方法に本装置システムが対応できるかを、複ブレード耕うん³⁸⁾ モデル実験を行なうことで確かめる（第7章）。

以上の方法で、耕うん時の土壌－機械系の力学的挙動データベースの構築に必要なデータを取得するための装置システムの開発を行ない、将来改良すべき問題点を考察する。さらに、将来の装置システムにおいて採取可能なデータと、データベースに組み込むべきデータ群を検討する（第8章）。

第2章 小型土壌内応力および土壌変位センサ

2-1 目的

土壌内の応力・変位およびひずみ分布の計測を行なう機器として、小型土壌内応力／土壌変位センサ（SSDセンサ）を開発する。

2-2 設計と試作

試作器では、千々岩らの土中セル¹³⁾をモデルとして、圧力センサを用いて土壌内応力を求め、外部から画像計測を行なってセンサ位置等を求めることにより一層の小型化を図った。

土壌内応力は、小型化が技術的に可能である耕うん刃中央部の二次元平面を測定対象とし、円周三等分上に設けられた3つの圧力センサの出力 $\sigma_a \cdot \sigma_b \cdot \sigma_c$ （図1参照）から、平均垂直応力 σ_m 、偏差応力 σ_d 、最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 、および主応力方向 θ を以下の式で求める。

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_a + \sigma_b + \sigma_c)$$

$$\sigma_d = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\sigma_a - \sigma_b)^2 + (\sigma_b - \sigma_c)^2 + (\sigma_c - \sigma_a)^2}$$

$$\sigma_1 = \sigma_m + \sigma_d$$

$$\sigma_2 = \sigma_m - \sigma_d$$

$$\theta = \begin{cases} \sigma_a - \sigma_m \geq 0 ; & \frac{1}{2} \sin^{-1} - \frac{1}{\sqrt{3} \sigma_d} (\sigma_b - \sigma_c) \\ \sigma_a - \sigma_m < 0 ; & 90^\circ - \frac{1}{2} \sin^{-1} - \frac{1}{\sqrt{3} \sigma_d} (\sigma_b - \sigma_c) \end{cases}$$

圧力センサには外径φ6mm、厚さ0.6mmの円板状の市販の超小型圧力センサ（表1参照）を用いた。これを取り付けるためのセンサ断面の最小外径は約8.5mmとなる。この値でセンサを作れば改良された土中セル⁴⁵⁾に比べても直径比で約40%以下にできる（図2参照）。ところが、主応力方向はセンサ自体の姿勢角の影響を受ける場合が起こり得る。このため前記の土中セルは片持ち梁を用いた傾斜センサでセルの姿勢角を計測している。この方式はセルが見えない状態での測定には効果的ではあるが、セル自体の移動を伴う耕うん等の土壌内応力の測定に用いるには適さないといえる。むしろ、土壌槽のガラス壁越しにこのセンサの動きを観察することにより、センサの姿勢角のみならず変位をも計測しようというのが本センサの特徴の一つである。この方式のセンサを多数用いることにより、センサを取り巻く土壌の変形を測定することが可能となる。

センサの姿勢角を把握するためには、外径8mm内外のセンサ側面の最少2点の座標値を求める必要がある。本センサでは画像計測の手法を用い、センサ座標の識別目標には多点計測と安価な画像処理システムに対

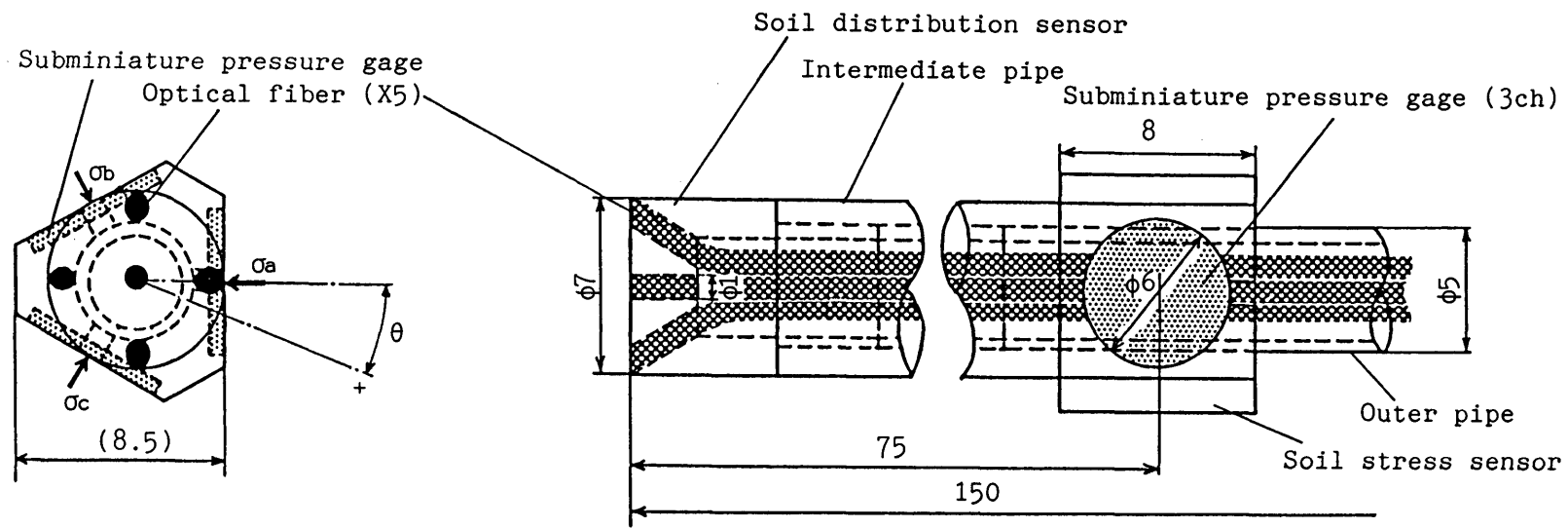


図1 小型土壌内応力／土壌変位センサ(SSDセンサ)

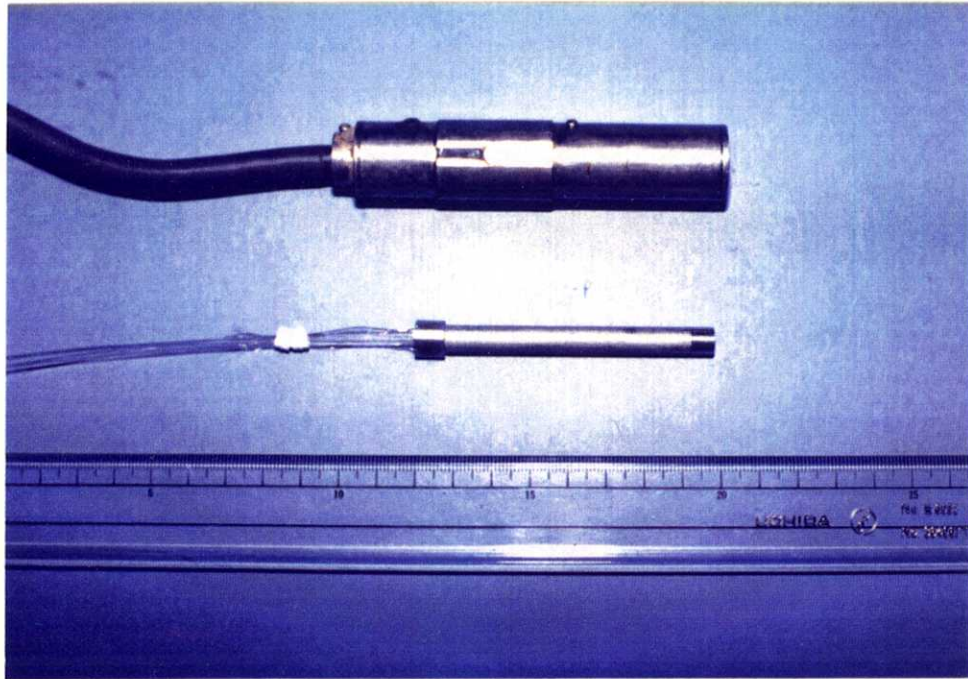


図2 小型土壌内応力／土壌変位センサ(SSDセンサ)と土中セル
(土中セル⁴⁵⁾ (上) と開発したSSDセンサ (外側のパイプは外してある)

応できるように、発光点をセンサの側面に設けることにした。これは、ガラス壁越しにセンサの座標計測目標点を撮影する際に、細かな土粒子が目標点を遮ることが起こると予想されるからである。発光点を目標点とすれば少量の土粒子の影響は無視でき、発光点が周辺部に比べて十分明るければこの効果はさらに高まると考えられる。ところが、8mm内外の2点で同時に高輝度の光源を発光させると1点の光源として識別されることになり、2点を明確に区別するのに特別なフィルタ操作³⁵⁾⁴⁶⁾を行なう必要があるのである。さらに、多点のセンサの区別をするためにも発光点は点滅可能なものにした。発光点として直径1mmの光ファイバを直径7mmのセンサ側壁にとりあえず設置可能な5本をセンサ側面中央と放射状の4ヶ所に取り付け、これらを組み合わせて点滅させたものを画像計測して各センサの座標位置および姿勢角を求めた。

試作したSSDセンサは図1のように発光点がある変位センサ部、超小型圧力センサを取り付けてある圧力検出部と2つのパイプからできており、材質にはすべてステンレスを用いている。変位センサ部と圧力検出部を接続しているパイプ内には5本の光ファイバが、そして圧力検出部から反対側に延びるパイプ内にはこれらに加えて超小型圧力センサの出力コード12本が通っている。図2には、開発したSSDセンサと改良された土中セル⁴⁵⁾の比較を示した。

2-3 土壌内応力の計測方法とその精度

表1は製作した12個のSSDセンサの仕様である。表中の出力感度は液圧によって校正されていると考えられ、粉粒体の場合は実際の接触面積が問題となる。同形の圧力センサではないが、液圧と粉粒体の圧力の校正が同じ値を示すと考えられる粉粒体の最小粒子径は受圧板直径の約20%までという報告がある¹³⁾。これによると土壌は圧力センサからの見かけ上、直径が1mm程度以下の粒によって構成されているのが望ましいことになる。被計測土壌と圧力センサの受圧面積およびSSDセンサの断面積との関係に適正値が存在し得るかの検証を本研究では行なわないが、すべての被計測土壌に各々最適な形状を有するSSDセンサの開発を将来期待したい。

計測に用いたA/D変換器は-5V~+5Vの範囲を12bitに分解するので、1bit当りの分解能は約2.5mVとなる。一方、圧力センサからは0~約200kPaの圧力を0~約2Vで出力するので、したがってデータ処理された0.1秒毎の土壌内応力の分解能は約0.3kPaとなる。なお、応力の方角については次節で、また計測方法と計測装置の詳細および変位検出も含めたSSDセンサの静的性能については第4章で述べ、動的性能については第5章で触れる。

表1 SSDセンサ主仕様一覧

部品名	型番	会社名
超小型圧力センサ	PS-2KA	共和電業
主仕様	容量	2 kgf/cm ²
	定格出力電圧	0.8 mV/V
	非直線性	1 %R.0.
	許容過負荷	150 %
	外径	φ 6 mm
	厚さ	0.6 mm ± 0.1

出力感度クラス	出力感度 (較正值)
C	0.839 mV/V
D	0.856 mV/V
G	0.910 mV/V
V	0.774 mV/V

センサID	出力感度クラス		
	σ_a	σ_b	σ_c
sp1	C	C	C
2	V	V	V
3	C	C	G
4	C	C	C
5	C	C	C
6	D	D	D
7	C	C	C
8	D	D	D
9	D	D	D
10	D	D	D
11	C	C	C
12	D	D	D

2-4 土壌変位の画像計測方法とその精度

SSDセンサの位置を求めるために用いた画像入力装置の仕様は、画素数 256×256 、階調数がモノクロ64輝度(6Bit)であるが1画素に8Bitを割り当てているのでメモリサイズは1フレームで64 KByteであり、1フレームのサンプリングに要する時間が1/60秒である。この装置を用いた画像処理システムではリアルタイムで各センサの座標を求めることは不可能であるので、一旦録画してからオフラインで処理した(次章図9参照)。なお、録画の際には処理の円滑化のために、実験IDおよび1/100秒単位までの時間をモニタさせた。

SSDセンサの座標位置、姿勢角および時間を求めるための発光点である光ファイバの点滅には、光度が高輝度LEDの数万倍あるハロゲンランプを光源とし、この光を光ファイバで伝送して発光点にする方式を用いた。点滅の制御は、光源と光ファイバの一端との間に一部分をくり抜いた円盤状のゲートを設け、これをパルスモータで一定角度ずつ回転させる方法で行なった(次章図11参照)。具体的な点滅の方法は、初期位置に上方に位置している発光点、下方に位置している発光点、右方に位置している発光点を各0.25秒間ずつ順次点灯させ、0.25秒間全部を消灯させる方式をとった。つまり、上方と下方の発光点の座標値からSSDセンサの位置と傾きを求め、右方の発光点の座標値からセンサの反転の有無

を求める。この方式では各発光点の点滅間にもセンサが移動しているので、位置はともかくとしても、姿勢角については正確な値が求まらない。しかし前述のように、近接している2～3個の発光点の座標位置を求めるには本研究で用いる安価な画像処理システムでは不可能であり、SSDセンサの開発の第一目標は小型化することであるから発光点間の距離を広げることが適切ではないと考えこの方式をとった。

発光点の明るさは、画像入力時に輝度あふれが起こるくらい発光点を明るく撮った場合でも、平滑化の空間フィルタ処理を行なうことで発光点を中心とした輝度分布をなめらかにして極値を持たせることができる（図3～5参照）。この極値を発光点の中心座標とする方法、あるいは輝度分布の稜線の傾きから発光点の中心座標をより精度よく求める方法などが考えられるが、本研究では前者の方法で行なった。用いた平滑化フィルタは次の行列で表わされる。

$$f(i, j) = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

このフィルタは主に画像の雑音除去用に用いられる領域が3×3の空間フィルタで、画像のシャープさを保持する働きもある。フィルタで処理した後、しきい値を定めて極値のみを抽出すれば発光点の座標値が求まる。しかし実際には、ガラス面とSSDセンサとの間に細かい土粒子が入

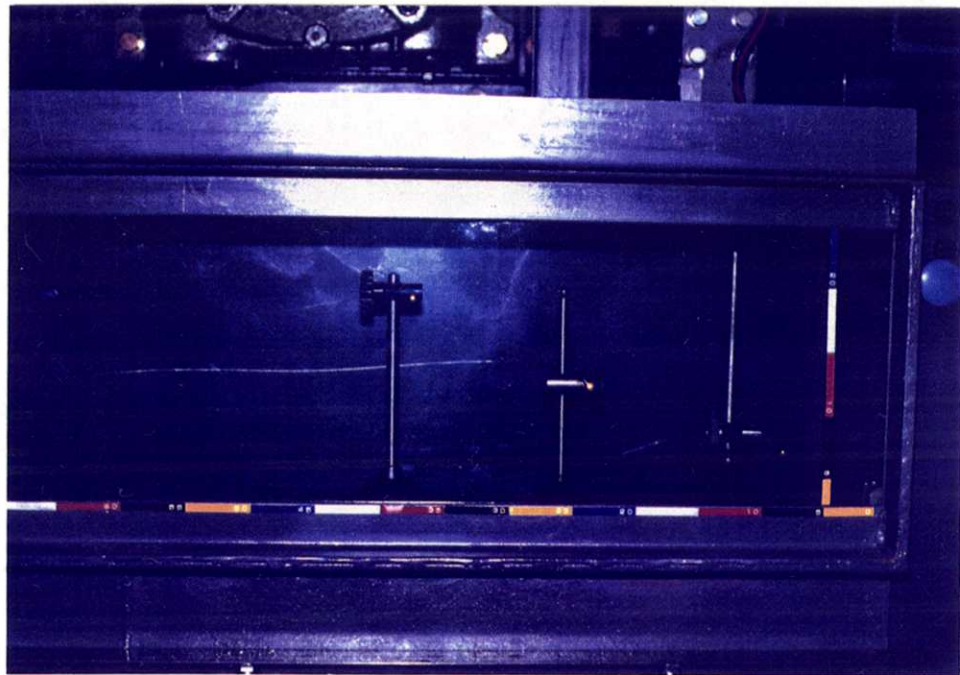


図3 光ファイバを用いた発光点の較正実験

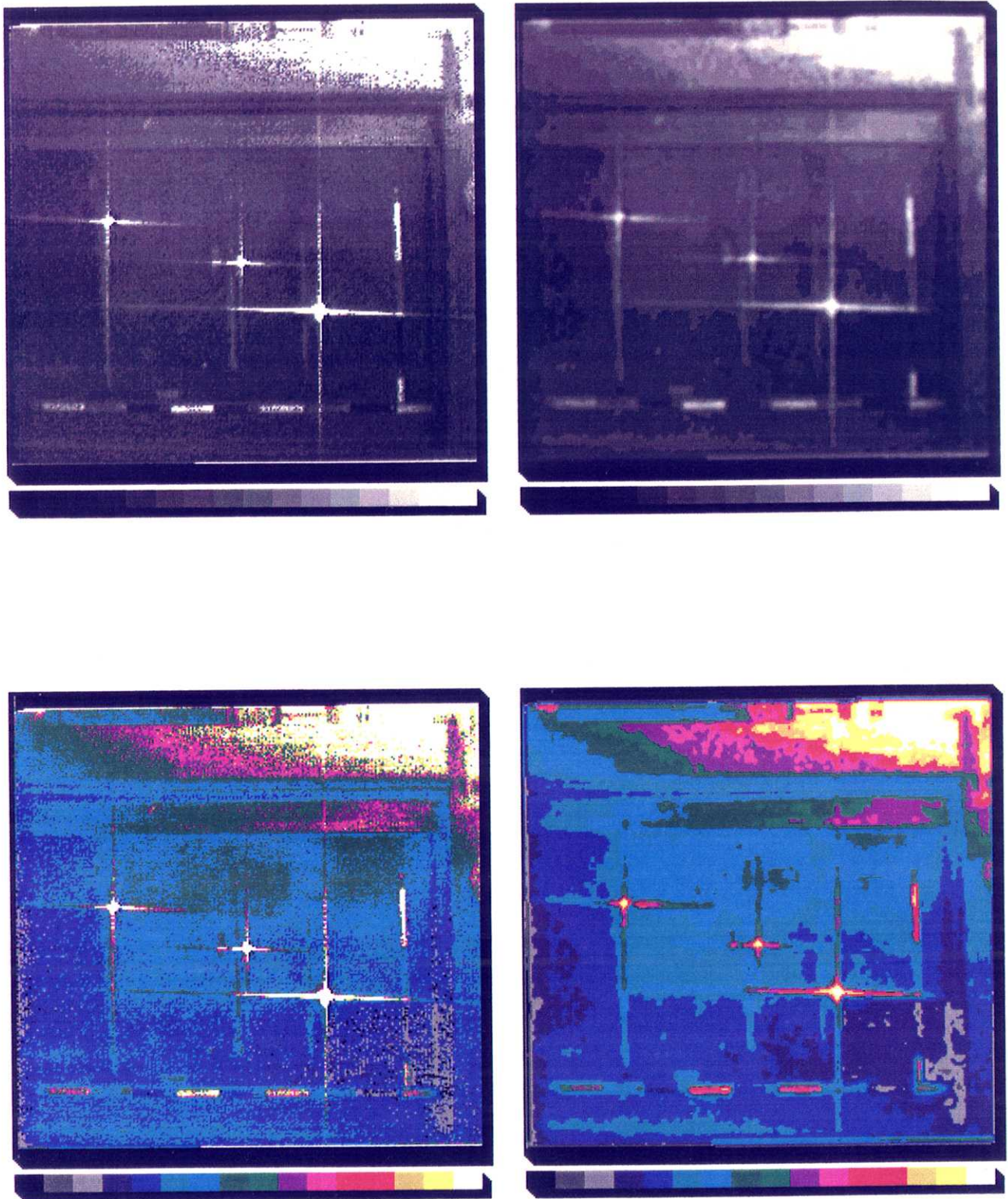


図4 画像処理による発光点座標の検出方法

(原画像(左)に平滑化フィルタ処理をして輝度分布にピーク値をもたせる(右). 下はモノクロ画像(上)に着色してある. 撮影時にクロススクリーンフィルタを用いている)

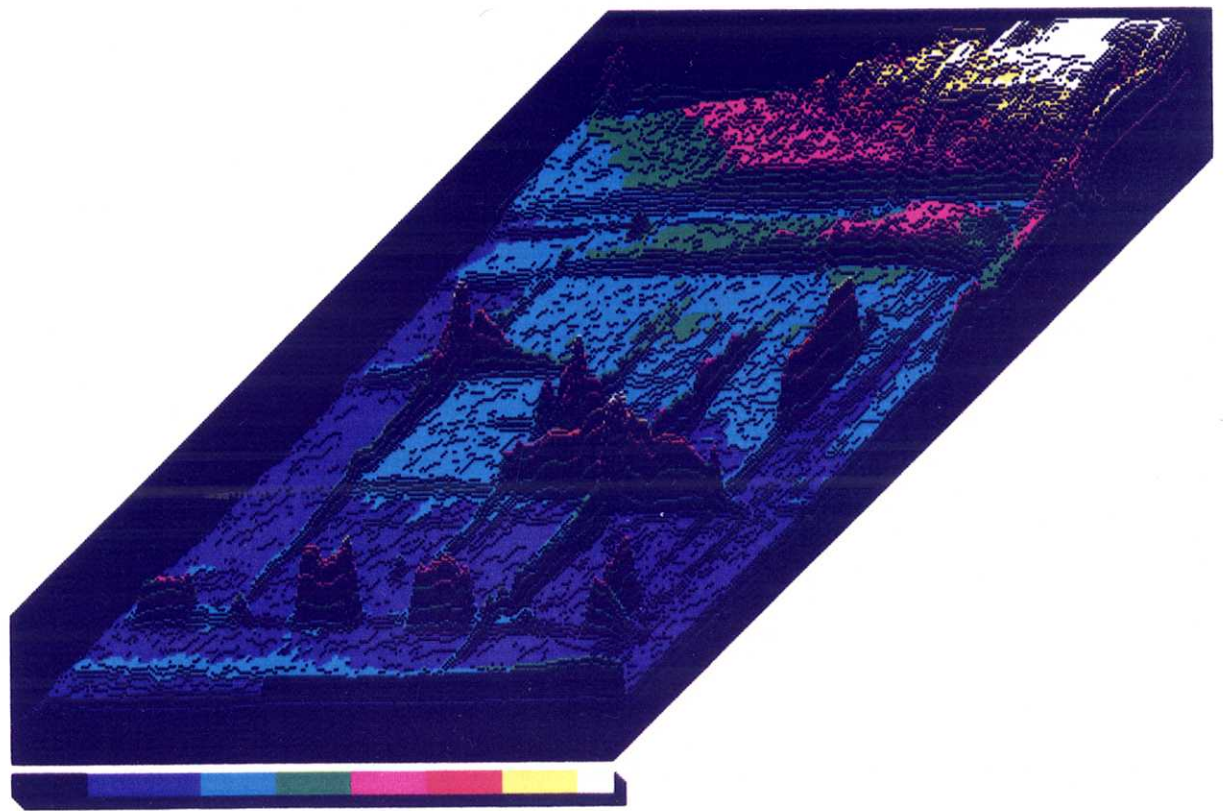
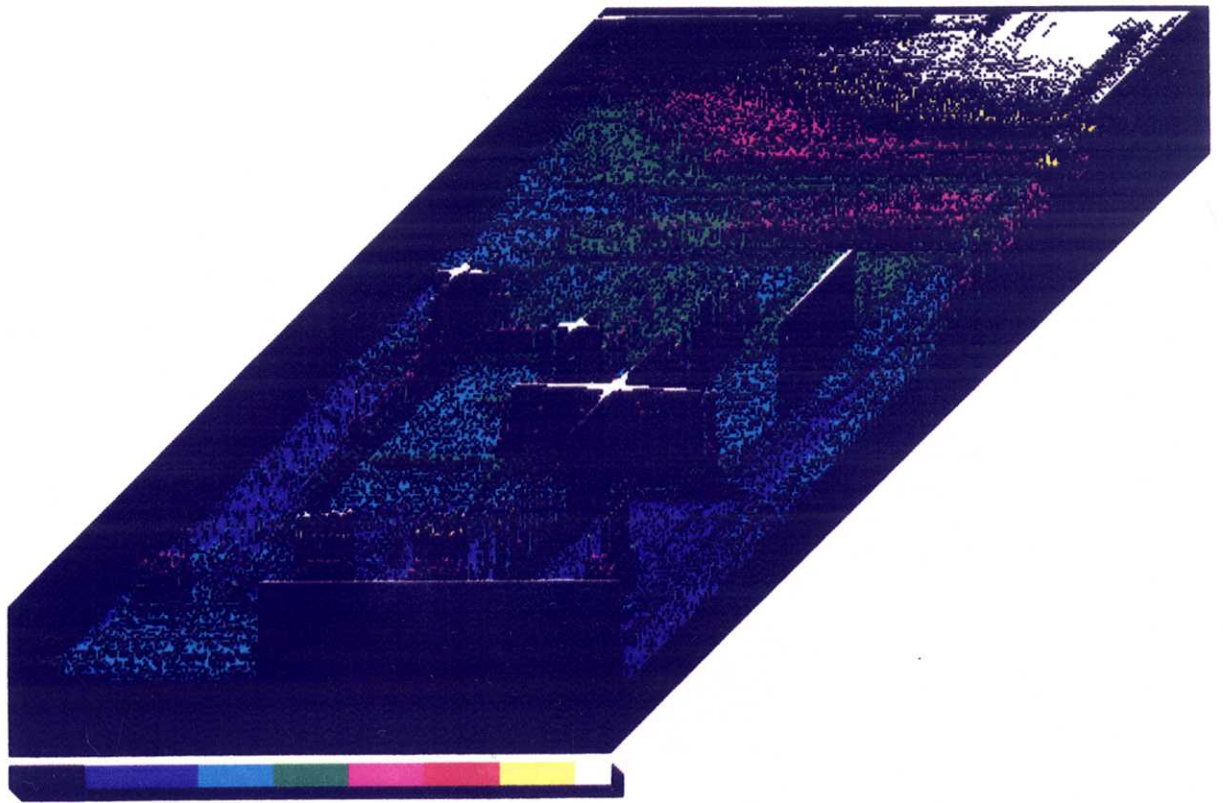


図5 画像処理による発光点座標の検出方法の三次元表示

(原画像(上)に平滑化フィルタ処理をして輝度分布にピーク値をもたせる(下). 撮影時にクロススクリーンフィルタを用いている)

り込んで光を遮断される発光点がでてくるため各発光点間の輝度差が大きくなり、極値検出に用いるしきい値を一意的に選択するのは困難である。しかし、輝度が低くても SSD センサを取り巻いている周辺の土の輝度よりも 2~3 輝度高ければ座標値を十分求めることができた。なお、画像処理の基本については、巻末の付録 2 を参照されたい。

表 2、3 は画像処理に用いる自作したソフトウェア (DIPS) の構成モジュールの一覧である。各モジュールは一部を除いてアセンブラ言語¹⁾ (52) で記述した。SSD センサの座標を求める方法をこれらのモジュールを用いて思索検討した結果得られた最適手順とそれに用いたモジュール (モジュール No.) を以下に述べる。

まず、ビデオテープをスローで再生しながら内容を Through Image (3) でモニタテレビに映し出す。この映像中の光ファイバの点滅状態とタイマの時間表示を見ながら、Freeze Image (2) で画像のサンプリングを行なう。各実験の最初の画像には、Draw 2-D Image (1) でディスプレイに表示し、Histogram (9) や Profiles (10) を用いて発光点と土壌の区別が明瞭化するように Color Set (6) で画面表示の際に参照するカラーテーブルの設定を行なった。なお、土壌と発光点の輝度差が小さい場合には設定を随時変更した。次のサンプル画像からは Draw 2-D Image (1) でディスプレイに表示し、前述した平滑化フィルタ操作を行なう Spacial Filter (11) を用いて輝度分布にピークをもたせ、次に

Profiles (10) を用いてマニュアル操作で各座標点を求めるか、または Search Peaks (26) を用いて自動的に各座標点を求める。そして、次の画像をサンプリング行なうという操作を繰り返す。SSDセンサの座標位置は1秒毎に求めることにしたので、1秒間の映像内で3画像のサンプリングを行なうため、30秒間の実験ではこの操作を90回繰り返すことになる。なお、必要に応じて Save File(28) や Print Out (PR801) (29) などのモジュールを使用した。

本研究では長さ1mの土壌槽のうち、計測区間を中央部の幅約30cmの区間で行なうこととして、SSDセンサを最多で縦に3段、横に4列の合計12個用いた。このため、撮影範囲と画像入力装置との関係より、実際の解像度はx軸方向で約2.3mm、z軸方向で約2.1mmとなる。本実験では土壌槽外枠の3点に常時点灯の定発光点を設け、これとSSDセンサの発光点との相対距離でSSDセンサの座標位置を求める方法を用いた。また、上記の方法で求めた3定点の画像入力誤差は±1画素以内であった。このことより、1個のSSDセンサ内のファイバ間の最長距離が6mmであることから姿勢角の分解能は約40°となったので、センサの姿勢角、つまり、応力の方向について論じることにはなるべく避けることにした。しかし、本研究で行なう低速度の耕うん実験ではSSDセンサの姿勢角は初期姿勢とほとんど変わらないことが多かった。

本システムは、本研究の目的上ではある程度満足できる精度を持って

表2 画像処理ソフトウェア (DIPS) モジュール一覧 (その1)

モジュール No.	モジュール名	処理内容	実行時間 [約S]
1	Draw 2-D Image	ディスプレイに16色 (カラー/モノクロ) でバンクメモリ*1上の画像を表示する	1
2	Freeze Image	新たな画像の入力を停止し、入力画像を画像メモリ上に固定する	0*2
3	Through Image	画像を1/60S毎に画像メモリ上に入力する	0
4	Memory Transfer	バンクメモリ間で画像の転送を行なう	1
5	Draw 3-D Image	ディスプレイにバンクメモリ上の画像を三次元 (鉛直軸は輝度) で表示する	15
6	Color Set	ディスプレイに表示する際参照するカラーテーブルの設定を行なう	2*4
7	Clear Memory	バンクメモリの内容をクリア (0に) する	1
8	Fill Memory	バンクメモリの内容を設定値 (0~256) で満たす	1
9	Histogram	バンクメモリ上の画像の輝度ヒストグラムを表示する	2
10	Profiles	バンクメモリ上の画像の水平輝度断面、垂直輝度断面およびカーソル位置の座標値と輝度を表示する	14*3
11	Spacial Filter	バンクメモリ上の画像に雑音除去用の空間フィルタ処理を行ない結果を他のバンクメモリ上に転送する	4
12	Binarization (1)	バンクメモリ上の画像をしきい値を境にして二値化 (0; 暗/63; 明) する	1
13	Half Transfer	バンクメモリ上の画像を縦横 $\frac{1}{2}$ に圧縮し他のバンクメモリ上の指定した場所に転送する	0
14	Average	2つのバンクメモリ上の画像の輝度平均画像を一方のバンクメモリ上に転送する	1
15	Exclusive Or	2つのバンクメモリ上の画像の輝度の排他的論理和を一方のバンクメモリ上に転送する	1
16	Subtraction	2つのバンクメモリ上の画像の輝度の差を一方のバンクメモリ上に転送する	1
17	Area Filter	バンクメモリ上の指定区域を設定値で満たす	1
18	And	2つのバンクメモリ上の画像の輝度の論理積を一方のバンクメモリ上に転送する	1
19	Laplacian	バンクメモリ上の画像をラプラシアンフィルタを用いて境界抽出を行い他のバンクメモリ上に転送する	3
20	Flattening	バンクメモリ上の画像をヒストグラム平滑法を用いて鮮明化し他のバンクメモリ上に転送する	3

注) *1) バンクメモリには画像メモリを含む

*2) 0は瞬時を示す

*3) カーソル移動50ステップ時

*4) BASICルーチンを用いている

表3 画像処理ソフトウェア (DIPS) モジュール一覧 (その2)

モジュール No.	モジュール名	処理内容	実行時間 [約S]
21	Clear Left Side	ディスプレイ左側の表示画面枠内を消去する	1~12* ⁴
22	Clear Right Side	ディスプレイ右側の表示画面枠内を消去する	1~12* ⁴
23	Clear Screen	ディスプレイ上の表示画面を消去する	0* ⁴
24	Level 64 Transfer	画像の輝度を63以下にしながらバンクメモリ間で画像の転送を行なう	1
25	Move Pulse Motor	パルスモータの制御を行なう	—
26	Search Peaks	バンクメモリ上の画像でしきい値以上の輝度である座標を抽出し画面上またはプリンタに表示する	2* ⁵
27	Load File	フロッピーディスク上の画像データをバンクメモリ上に呼び出す	5* ⁴
28	Save File	バンクメモリ上の画像をフロッピーディスクに保存する	47* ⁴
29	Print Out (PR801)	バンクメモリ上の画像またはディスプレイの画面をイメージプリンタに出力する (疑似カラー/モノクロ)	170* ⁶
30	Binarization (2)	バンクメモリ上の画像の2つのしきい値間の輝度を0 (暗) にして他のバンクメモリ上に転送する	2
31	Horiz. Template	バンクメモリ上の画像に水平線テンプレートマッチング処理を施し結果を他のバンクメモリに転送する	3
32	Vert. Template	バンクメモリ上の画像に垂直線テンプレートマッチング処理を施し結果を他のバンクメモリに転送する	3

注) *4) BASICルーチンを用いている

*5) 座標表示時間を含まない

*6) 縦横2倍サイズ (81mm×81mm) で印刷時

いるといえ、将来に解像度や階調数の増加によるシステムの改善を図ることで、同様の方法で精度の高い測定が可能になると考えられる。

2-5 結語

本センサを用いることによって、周辺土壌への影響を低減し、土壌内多点での応力分布測定が可能となるばかりでなく、同時に土壌変位が測定できるため、土壌の応力-ひずみ関係を時間と位置の関数として求めることができると考えられる。さらに、土壌へ埋め込むだけでよいので、ほとんどの状態の土壌で使用可能であると考えられる。

第3章 土壤槽総合試験装置

3-1 目的

多種の耕うんモデル実験を行ない、土壤-機械系の力学的挙動変化を検出できるように、多点同時計測が可能な装置を開発する。

3-2 設計と試作

耕うん機器の運動形態を分類すると、モールドボードプラウ等の直線運動系の機器とロータリ等の回転運動系の機器に大別できる。そこで装置は、供試土をつめた土壤槽に直線運動と回転運動を行なうブレードユニットを各々独立に作用させる方式にした（図6参照）。

土壤槽は、長さ1m、深さ30cm、幅20cm（容積60ℓ）で前面は強化ガラス製で土壤槽中の土の動きを観察できるようにした。耕うん実験および実験後に土壤槽から土を排除するために、土壤槽の両側面は脱着可能にし、底面は土の成形時のプレス圧力に耐えられるようにした。この土壤槽は各種耕うん実験に適応できるように、スライドボールベアリングを介し、土壤槽を観察しやすいように地上から約1mのところ position している長さ2.2mのレール上を可動させた。土壤槽の駆動にはストローク600mm、速度4～40mm/sと、ストローク400mm、速度8～80mm/sの2つの電動

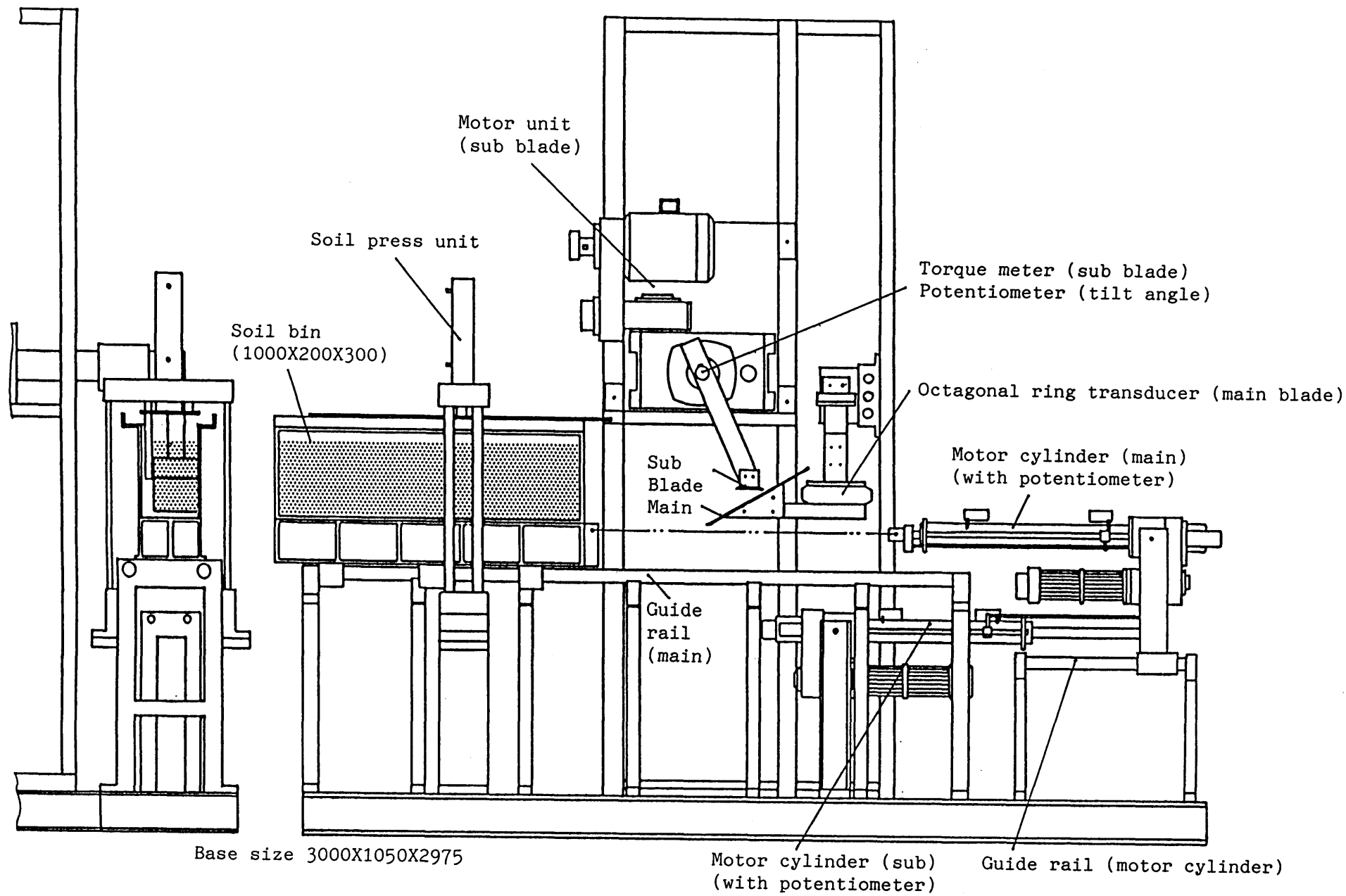


图6 土壤槽総合試験装置

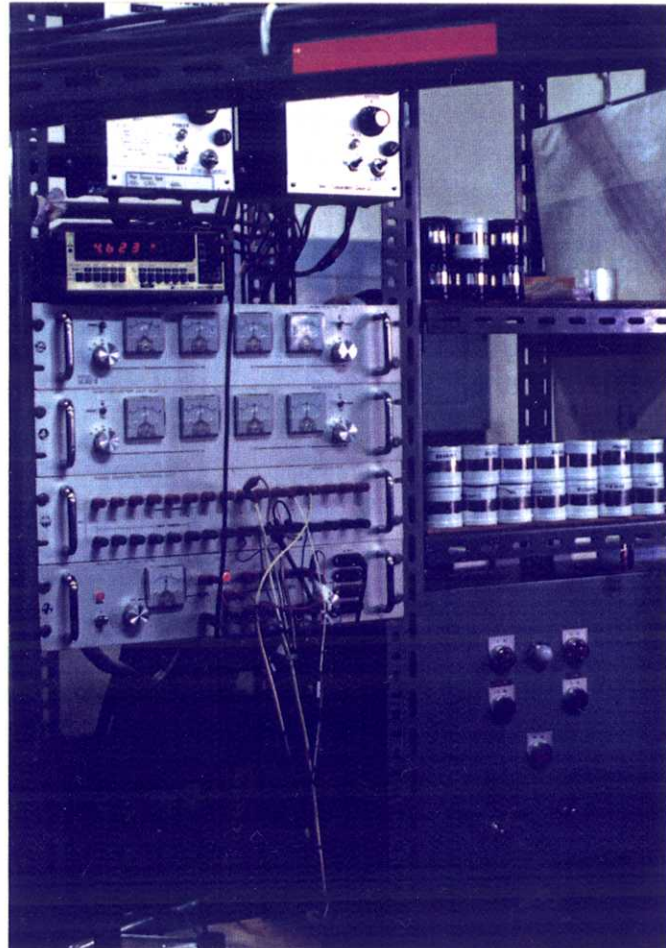


図7 土壌槽総合試験装置制御部

(電動シリンダ制御器(左上), 位置表示器(左), 変速プーリモータ制御器(右下))

シリンダを用いた。各電動シリンダは無段変速モータの回転速度を制御することによって前後進速度の調節を行なえ、取り付けたポテンショメータで土壌槽の位置と速度がモニタできるようにした（図7参照）。

耕うん刃は、直線運動系の耕うん実験に用いる主ブレードユニットと、回転運動系の耕うん実験に用いる副ブレードユニットを備えた。刃幅150mm、長さ400mmで直刃の主ブレードは、切削角と耕深が調節可能で、八角型三分力計を取り付けて、x軸（耕うん刃の進行方向水平軸）方向とz軸（鉛直軸）方向の力およびy軸廻りのモーメントが測定できるようにした。さらに、ブレード面上には10個の小型圧力センサと8個の小型摩擦力センサを取り付け、主ブレード面上の力の分布の測定ができるようにした。刃幅150mm、長さ80mm、厚さ6mmで直刃で両刃の副ブレードは、主ブレード同様に切削角と耕深が調節でき、トルク変換器を介して変速プーリモータで駆動させた。この変速プーリモータは、0.22～1 rpmで副ブレードを回転させることができ（図7参照）、土壌槽の動きと副ブレードの回転方向の組合せ方によってアップカット耕うんやダウンカット耕うんのモデル実験ができる。さらに、副ブレード面上には表側に4個、裏側に2個の超小型圧力センサを取り付け、刃面にかかる力を測定できるようにした。また、両ブレードを使用して複ブレード耕うん実験³⁸⁾や、2つの電動シリンダの速度と駆動方向を組み合わせることによって振動耕うん実験^{9) 10)}などにも適用できるようにした。表4には本

表4 実験可能項目一覧

(使用する装置を○で示してあり、△および()は使用度が低いものを指している)

	measuring soil stress distribution	measuring soil displacement	moving soil bin	moving motor for sub blade	press
* variation of moisture content and soil type/texture					
model of soil compaction or loosening by drying and wetting cycles	○	△	-	-	-
model of soil compaction by rollers, wheels and tires	○	△	-	-	○
model of soil tillage by rectilinear motion plow bodies	○	○	○	-	-
model of soil tillage by rotational motion plow bodies	○	○	○	○	-
model of soil tillage by double blades (using both blades)	○	○	○	○	-
model of soil tillage by vibratory motion plow bodies	○	○	○	(○)	-

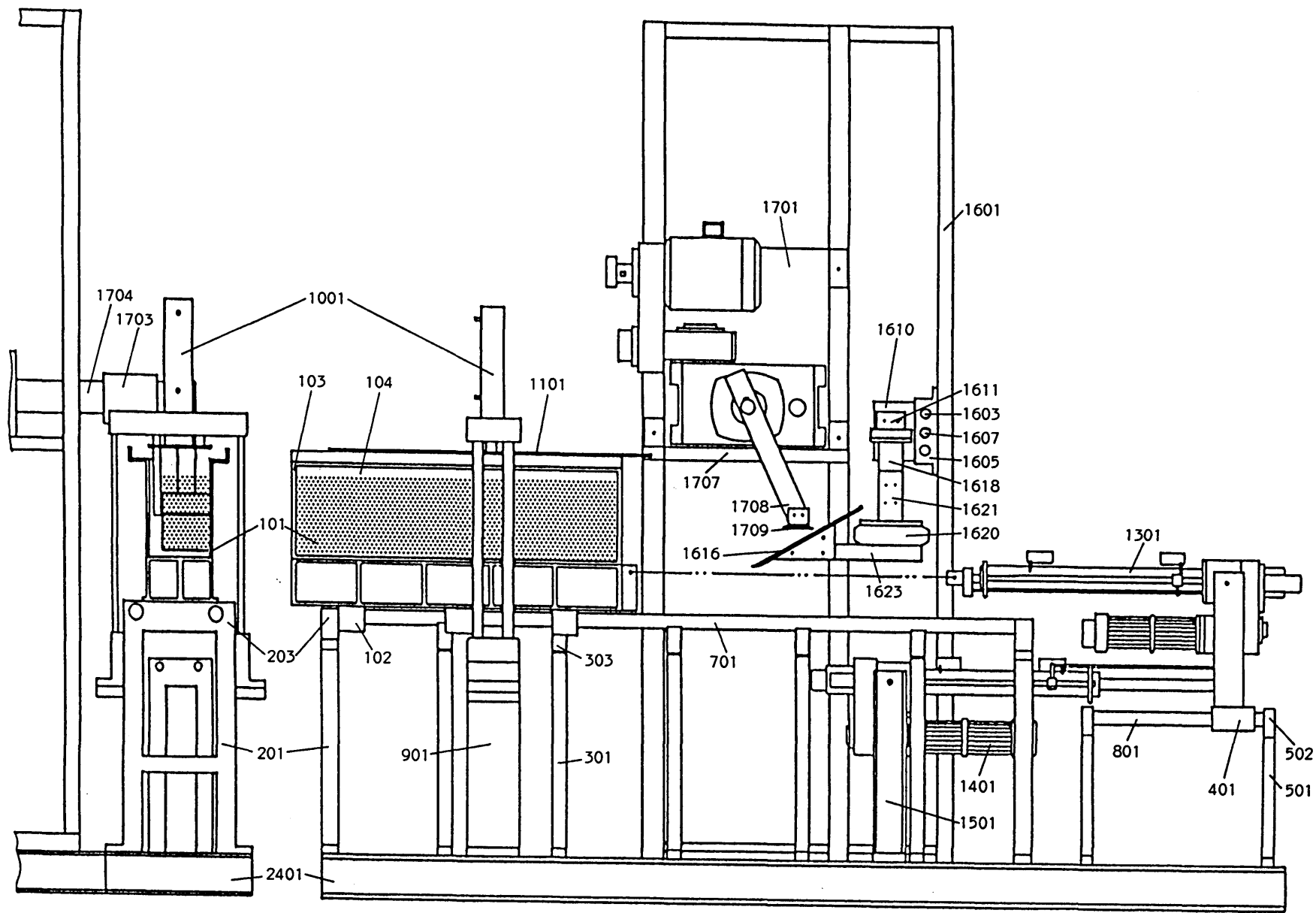


図8 土壤槽総合試験装置部品位置図

表5 土壌槽総合試験装置部品一覧（その1）

部品番号	部 品 名	数量	材質	型番
101	土壌箱本体	1	SS41	
102	ガイドドライブ	3	SS41	
103	脱着壁	2	SS41	
104	強化ガラス	1		
105	ガイドドライブ取付ボルト	6	S20C	M10
106	ガイドドライブ軸受止ネジ	6	S45C	M5
107	スライドボールベアリング	6	SUJ2	SM40-0P*
201	主ガイドレールエンド	2	SS41	
202	主ガイドレールエンド取付ボルト	4	S20C	M10
203	シャフトサポータ	4	FC20	SH40
204	シャフトサポータ取付ボルト	8	S20C	M10
301	主ガイドレールスタンド	5	SS41	
302	主ガイドレールスタンド取付ボルト	10	S20C	M10
303	主ガイドレールスタンドブッシュ	10	SS41	
304	主ガイドレールスタンドブッシュ取付ボルト	20	S20C	M6
401	電動シリンダレールドライブ	1	SS41	
402	スライドボールベアリング	4	SUJ2	SM25*
403	スライドボールベアリング止ネジ	4	S45C	M5
501	電動シリンダレールエンド	2	SS41	
502	シャフトサポータ	4	FC20	SH25
503	シャフトサポータ取付ボルト	8	S20C	M6
701	主ガイドレール	2	SUJ2	φ40×2200*
801	電動シリンダガイドレール	2	SUJ2	φ25×600*
901	プレスフレームスタンド	1	SS41	
902	プレスフレームスタンド取付ボルト	4	S20C	M10
903	プレスフレーム取付ボルト	4	S20C	M8
1001	プレスユニット	1		RR-1012他*
1101	載荷板	1	SS41	
1102	載荷板用フランジ取付ボルト	6	S20C	M8
1103	ネジ切りアダプタサドル	1		NPT1 1/4
1301	主電動シリンダ	1		LPW250M6-LP-S*
1401	副電動シリンダ	1		LPW125H4-LP-S*
1501	副電動シリンダスタンド	1	SS41	
1502	副電動シリンダスタンド取付ボルト	2	S20C	M10
1601	ブレードユニットフレーム	1	SS41	
1602	ブレードユニットフレーム取付ボルト	8	S20C	M10
1603	ガイドレール	2	SUJ2	φ30×500*
1604	ガイドレール止ネジ	4	S45C	M5
1605	ガイドエンド	2	SS41	

注) 取付ボルトはナット・平座金・バネ座金を含む

*) 表7～9に説明あり

表6 土壌槽総合試験装置部品一覧（その2）

部品番号	部品名	数量	材質	型番
1606	ガイドエンド取付ボルト	4	S20C	M10
1607	ボールネジ軸	1	S55C	32RC8*
1608	ボールナット	1	SCM415	F03201*
1609	ボールナット取付ボルト	6	S20C	M8
1610	主ブレードガイドドライブ	1	SS41	
1611	ガイドステー	1	SS41	
1612	ガイドステー取付ボルト	4	S20C	M10
1613	ハンドル	1	FC20	
1614	スラスト自動調心ボールベアリング	2	SUJ2	3705u*
1615	スラスト自動調心ボールベアリング止ネジ	2	S45C	M5
1616	主ブレード	1	SS41	*
1617	スライドボールベアリング	2	SUJ2	SM30*
1618	ステー-ブレード支持ジョイント	1	SS41	
1619	ステー-ブレード支持ジョイント取付ボルト	4	S20C	M10
1620	八角型三分力計	1	SS41	
1621	八角型三分力計支持	1	SS41	
1622	八角型三分力計支持取付ボルト	4	S20C	M10
1623	主ブレード-八角型三分力計支持	1	SS41	
1624	主ブレード-八角型三分力計支持取付ボルト	4	S20C	M10
1701	プーリモータ	1		PDG-15KH*
1702	プーリモータ取付ボルト	4	S20C	M16
1703	トルク変換器	1		TMB-50KM**
1704	プーリモータトルク変換器カップリング	1	SS41	
1705	平行キー	1	S45C-D	
1706	平行キー押エネジ	2	S45C	M5
1707	副ブレードモータ押エ	1	SS41	
1708	副ブレード支持	1	SS41	
1709	副ブレード	1	SS41	*
1710	副ブレード取付ボルト	4	S20C	M10
1801	ミキサ台	1	SS41	
1802	車止メ	4	SS41	
1901	ミキサ	1		TMU-3.5*
2001	ベルトコンベア（A）	1		KMN35-5*
2101	ベルトコンベア（B）	1		KMT35-3*
2201	コンベアスタンド（A）	1	SS41	
2202	コンベアスタンド（B）	1	SS41	
2203	コンベアスタンド（C）	1	SS41	
2401	ベース	1	SS41	

注) 取付ボルトはナット・平座金・バネ座金を含む

*) 表9, 10に説明あり

***) 表11に説明あり

表7 土壌槽総合試験装置主仕様一覧（その1）

部品番号	部品名	
	形式名, 型番 (会社名)	
	主仕様	
107	スライドボールベアリング	
	スライドボールベアリング, SM40-OP (日本ベアリング)	
	基本負荷容量	250 kg/50km
	静的負荷容量	470 kg
	サイズ	40 mm (内径) × 60 mm (外径) × 80 mm (全長)
	重量	675 g
	開放型	50°
402	スライドボールベアリング	
	スライドボールベアリング, SM25 (日本ベアリング)	
	基本負荷容量	100 kg/50km
	静的負荷容量	160 kg
	サイズ	25 mm (内径) × 40 mm (外径) × 59 mm (全長)
	重量	240 g
701	主ガイドレール	
	シャフト, φ40×2200 (日本ベアリング)	
	外径	40 mm
	全長	2.2 m
	硬度	HRC60°以上
	表面粗さ	1.5 μmRmax
	最大たわみ	0.25 mm (3000 kg, 間隔350 mm)
801	電動シリンダガイドレール	
	シャフト, φ25×600 (日本ベアリング)	
	外径	25 mm
	全長	60 cm
	硬度	HRC60°以上
	表面粗さ	1.5 μmRmax
	最大たわみ	0.28 mm (100 kg, 間隔600 mm)
1001	プレスユニット	
	複動用電動ポンプ, PER-2042 (ENAPAC, 東洋油圧機械)	
	方式	VS-4, 4方電磁弁切換
	タンク油量	7.5 ℓ
	吐出圧力	0~700 kg/cm ²
	吐出量	高低2段自動切換
		2.7 ℓ/min (圧力35 kg/cm ² , ギヤポンプ)
		0.57 ℓ/min (圧力700 kg/cm ² , プランジヤポンプ)
	モータ定格	200 V, 0.75 kW
	重量	59 kg

表8 土壤槽総合試験装置主仕様一覧(その2)

部品番号	部品名	
	形式名, 型番 (会社名)	
	主仕様	
1001	プレスユニット	
	複動用油圧シリンダ, RR-1012 (ENAPAC, 東洋油圧機械)	
	能力	10.0 ton (押) / 2.7 ton (引)
	ストローク	305 mm
	受圧面積	14.4 cm ² (押) / 4.6 cm ² (引)
	許容圧力	700 kg/cm ² (押) / 560 kg/cm ² (引)
	重量	12 kg
	シリンダ速度	44 mm/s (押, 低圧) / 132 mm/s (引, 低圧)
	その他 (ENAPAC, 東洋油圧機械)	
	圧カスイッチ, PS-700	
	圧カスイッチ用ダンパーバルブ, V-10	
圧力計, GP-1000-100 ブルトン管, 容量1000 kg/cm ²		
ダンパーバルブ, V-9		
10トンプレス台, A-258 重量49 kg		
作動油 粘度指数 100, 粘度 32.0~35.2 cSt/40°C		
1301	主電動シリンダ	
	パワーシリンダ, LPW250M6-LP-S (椿本チェーン)	
	定格推力	250 kg
	速度	4~40 mm/s
	ストローク	600 mm
	重量	約45 kg
	据付方法	トラニオンマウント
	ブレーキ構造	シュータイプ電磁ブレーキ
	ブレーキ定格制動トルク	0.2 kgf-m
	制動方式	無磁励作動形 (スプリング制動方式)
	ポテンショメータ, リミットスイッチ付	
	変速モータ, SCT200ML (椿本チェーン)	
	制御盤, SCT200F (椿本チェーン)	
	出力	0.2 kW (単相200V)
	回転速度	120~1200 r.p.m.
	定格電流	2.7 A
	定格トルク	0.12 kg-m
制御方式	SCR無段変速制御, タコジェネレータフィードバック	
タコジェネレータ仕様	12V/1800 r.p.m. × 3mA	
ダイナミックブレーキ, ソフトスタート, 負トルク制御, マルチドライブ		
速度計付		
1401	副電動シリンダ	
	パワーシリンダ, LPW125H4-LP-S (椿本チェーン)	
	定格推力	125 kg
	速度	8~80 mm/s
	ストローク	400 mm
	重量	約42 kg
	以下の仕様は主電動シリンダに同じ	

表9 土壤槽総合試験装置主仕様一覧（その3）

部品番号	部品名	
	形式名, 型番 (会社名)	
	主仕様	
1603	ガイドレール	
	シャフト, $\phi 30 \times 500$ (日本ベアリング)	
	外径	30mm
	全長	50cm
	硬度	HRC60°以上
	表面粗さ	1.5 μ mRmax
1607	ボールネジ軸	
1608	ボールナット	
	一般工業用ボールネジ, 32RC8, F03201 (椿本精工)	
	基本動定格荷重	570kgf
	基本静定格荷重	6800kgf
	軸方向すきま	0.14mm
1614	スラスト自動調心ボールベアリング	
	スラスト自動調心ボールベアリング, 3705u (NTN東洋ベアリング)	
	基本定格荷重	2240kgf, 5150kgf
	重量	172g
1617	スライドボールベアリング	
	スライドボールベアリング, SM30 (日本ベアリング)	
	基本負荷容量	160kg/50km
	静的負荷容量	280kg
	サイズ	30mm (内径) \times 45mm (外径) \times 64mm (全長)
	重量	275g
1701	プーリモータ	
	変速プーリモータ, PDG-15KH (三木プーリ)	
	出力	1.5kW
	変速機	AK-140, PE-185, ベルト式無段変速機
	変速比	1:4
	減速機	SKKH-135, ウォーム減速機
	減速比	1/2500
	回転速度	0.22~1 r.p.m.
	出力軸トルク	140kg-m
	低圧電磁スタータ, EYD-K (三菱電機)	
	主要構成	
		S-K形電磁接触機
		TH-K形サーマルリレー
	SRS-H形タイマ	
	WLCA12形リミットスイッチ (立石電機)	

表10 土壌槽総合試験装置主仕様一覧（その4）

部品番号	部品名 形式名, 型番 (会社名) 主仕様																		
1616 1709	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="387 371 1177 450">主ブレード</td> <td data-bbox="1185 371 1468 450">副ブレード</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="387 461 1468 965"> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>1616</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>1709</p> </div> </div> </td> </tr> </table>	主ブレード	副ブレード	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>1616</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>1709</p> </div> </div>															
主ブレード	副ブレード																		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>1616</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>1709</p> </div> </div>																			
1901	<table border="1"> <tr> <td colspan="2" data-bbox="387 976 1468 1014">ミキサ</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="387 1014 1468 1052">モルタルミキサ, TMU-3.5 (日工)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1052 718 1090">容量</td> <td data-bbox="726 1052 1468 1090">97ℓ</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1090 718 1128">動力</td> <td data-bbox="726 1090 1468 1128">100V, 750W, ギヤードモータ</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1128 718 1167">羽根回転速度</td> <td data-bbox="726 1128 1468 1167">33r.p.m. (50Hz)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1167 718 1205">サイズ</td> <td data-bbox="726 1167 1468 1205">φ800mm (ドラム径) × 310mm (ドラム深さ)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1205 718 1243">総重量</td> <td data-bbox="726 1205 1468 1243">890mm (全高) × 1150mm (全長)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1243 718 1317">羽根の一部改造, 排出口にメッシュサイズ15mm×7mmの金網を取付</td> <td data-bbox="726 1243 1468 1317"></td> </tr> </table>	ミキサ		モルタルミキサ, TMU-3.5 (日工)		容量	97ℓ	動力	100V, 750W, ギヤードモータ	羽根回転速度	33r.p.m. (50Hz)	サイズ	φ800mm (ドラム径) × 310mm (ドラム深さ)	総重量	890mm (全高) × 1150mm (全長)	羽根の一部改造, 排出口にメッシュサイズ15mm×7mmの金網を取付			
ミキサ																			
モルタルミキサ, TMU-3.5 (日工)																			
容量	97ℓ																		
動力	100V, 750W, ギヤードモータ																		
羽根回転速度	33r.p.m. (50Hz)																		
サイズ	φ800mm (ドラム径) × 310mm (ドラム深さ)																		
総重量	890mm (全高) × 1150mm (全長)																		
羽根の一部改造, 排出口にメッシュサイズ15mm×7mmの金網を取付																			
2001	<table border="1"> <tr> <td colspan="2" data-bbox="387 1328 1468 1366">ベルトコンベア (A)</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="387 1366 1468 1404">標準ベルトタイプ, KMT35-3 (光洋機械産業)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1404 718 1442">機長</td> <td data-bbox="726 1404 1468 1442">3m</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1442 718 1480">ベルト幅</td> <td data-bbox="726 1442 1468 1480">350mm</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1480 718 1518">最大運搬能力</td> <td data-bbox="726 1480 1468 1518">21m³/h</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1518 718 1556">出力</td> <td data-bbox="726 1518 1468 1556">1kW (3相200V)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1556 718 1594">ベルト速度</td> <td data-bbox="726 1556 1468 1594">38m/min</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1594 718 1626">重量</td> <td data-bbox="726 1594 1468 1626">116kg</td> </tr> </table>	ベルトコンベア (A)		標準ベルトタイプ, KMT35-3 (光洋機械産業)		機長	3m	ベルト幅	350mm	最大運搬能力	21m ³ /h	出力	1kW (3相200V)	ベルト速度	38m/min	重量	116kg		
ベルトコンベア (A)																			
標準ベルトタイプ, KMT35-3 (光洋機械産業)																			
機長	3m																		
ベルト幅	350mm																		
最大運搬能力	21m ³ /h																		
出力	1kW (3相200V)																		
ベルト速度	38m/min																		
重量	116kg																		
2101	<table border="1"> <tr> <td colspan="2" data-bbox="387 1637 1468 1675">ベルトコンベア (B)</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="387 1675 1468 1713">クライマータイプ, KMN35-5 (光洋機械産業)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1713 718 1751">機長</td> <td data-bbox="726 1713 1468 1751">5m</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1751 718 1789">ベルト幅</td> <td data-bbox="726 1751 1468 1789">350mm</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1789 718 1827">最大運搬能力</td> <td data-bbox="726 1789 1468 1827">4.4m³/h (30°)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1827 718 1865">出力</td> <td data-bbox="726 1827 1468 1865">1kW (3相200V)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1865 718 1904">ベルト速度</td> <td data-bbox="726 1865 1468 1904">38m/min</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1904 718 1942">重量</td> <td data-bbox="726 1904 1468 1942">178kg</td> </tr> <tr> <td data-bbox="387 1942 718 1971">ヒレピッチ</td> <td data-bbox="726 1942 1468 1971">500mm</td> </tr> </table>	ベルトコンベア (B)		クライマータイプ, KMN35-5 (光洋機械産業)		機長	5m	ベルト幅	350mm	最大運搬能力	4.4m ³ /h (30°)	出力	1kW (3相200V)	ベルト速度	38m/min	重量	178kg	ヒレピッチ	500mm
ベルトコンベア (B)																			
クライマータイプ, KMN35-5 (光洋機械産業)																			
機長	5m																		
ベルト幅	350mm																		
最大運搬能力	4.4m ³ /h (30°)																		
出力	1kW (3相200V)																		
ベルト速度	38m/min																		
重量	178kg																		
ヒレピッチ	500mm																		

装置を用いて行なえる実験例を示した。なお、両ブレードとも土壌成形時には土壌槽より退避できるようになっている。

本装置の主仕様（性能）一覧を図8および表5～10に示す。

3-3 コンピュータ支援計測システム

本実験では最多で12個のSSDセンサを用いており、取り付けられている圧力センサの出力の合計は36チャンネルとなる。また、主ブレード面上には小型圧力計10個と小型摩擦力計8個を取り付けた。圧力計の内2個はSSDセンサに用いたものと同型の超小型圧力センサを用い、刃先から20mmと40mmの刃面中央に取り付けた。残り8個の圧力計と摩擦力計は千々岩らが試作したもの¹³⁾と同様の構造で感知部を圧力計で $\phi 7$ mm、摩擦力計で $\phi 10$ mmとやや小型化したものである。これらを刃先から80mmのところから40mm間隔で、刃先中央線をはさんで対称に間隔20mmで設置した。よって、主ブレード面上のセンサの出力の合計が18チャンネル、さらに主ブレードに取り付けた八角型三分力計の出力が3チャンネルある。また、副ブレード面上にはSSDセンサに用いたものと同型の超小型圧力センサを刃表面側両刃先から9mm、17mm、裏面側両刃先から15mmのところの刃面中央に設置し、この出力の合計が6チャンネルとなる。副ブレード駆動軸の軸トルクとこの軸に取り付けた傾斜型ポテンシオメー

タ、および土壌槽駆動用の電動シリンダのポテンショメータの出力が各々1チャンネルずつで、実験装置全体では66チャンネルを同時に計測する必要がある。この様な多チャンネルの計測とデータの円滑迅速な処理を行なうために、測定にはCAM (Computer Assisted Measuring) の手法³³⁾を導入して行なった(図9参照)。

具体的には、パーソナルコンピュータ(NEC製PC9801)をホスト機として用い、±5Vの範囲に調整された出力信号をA/D変換器を用いてコンピュータのメモリ上に一旦取り込んで、実験終了後にフロッピーディスクに保存した。A/D変換器は分解能12 Bit、逐次比較方式で変換速度50 μ sのものを32チャンネル分用意した。これではA/D変換器のチャンネル数が不足するので、ストレインアンプ等で増幅された後の出力信号とA/D変換器の間に低熱起電力型リードリレーを使用したチャンネルセレクトを設け、これをパラレル出力モジュールで切り換えて入力信号の選択を行なった(図9、10参照)。

このリードリレーの安定動作時間やSSDセンサの発光点点滅用ゲート開閉動作時間などを考慮に入れた上で、データのサンプリング周期を20 Hz(50msおき)とし、1実験に要する最長時間を土の圧縮成形のために30秒、耕うん実験に30秒の合計1分とした。よって、1データは1 Wordを占有しているから使用メモリは正味約155KByteとなる。なお、出力信号にはノイズ対策を十分行なうとともに、ストレインアンプからの出力

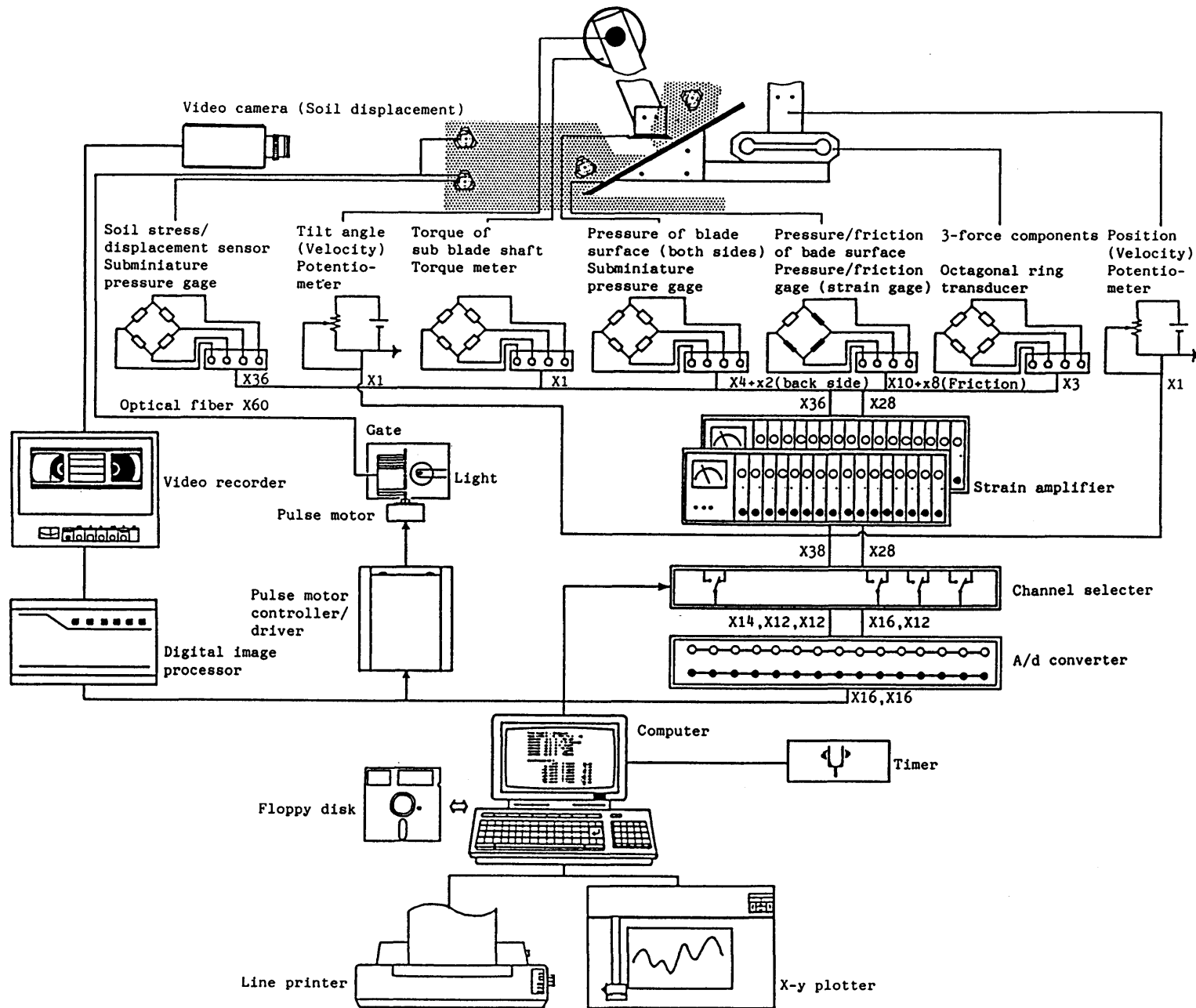


图9 計測装置

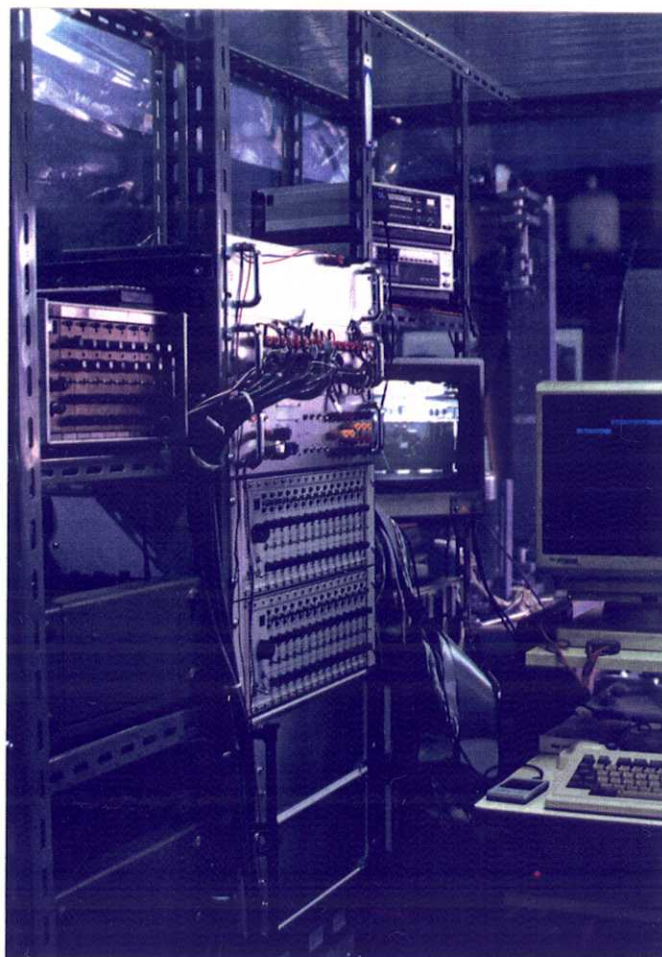


図10 計測装置概略

(左側上からストレインアンプ DPM-8H, DPM-6E×2, 次の列上からチャンネルセレクタ, ターミナルユニット, タイマ/電源ユニット, ストレインアンプ DPM-220A×2, ロードセルコンバータ×2, 電源, 次の列上からビデオレコーダ, モニタテレビ, 拡張I/Oボックス, 右側ホストコンピュータ PC9801)

信号にはローパスフィルタを通した。

図11は自作した計測ソフトウェア (MIST/CAM) の主ルーチンのフローチャートである。タイマカウンタモジュールによって50ms毎にこのルーチンに割り込んでくると、まず CPUの全レジスタを退避させてからアドレスカウンタ (初期値 0) をセットする。次に、最初に A グループと D グループが入力されるようにパラレル出力モジュールを通してチャンネルセレクトを切り換える。A グループは主ブレード面上の小型圧力計と摩擦力計の16チャンネルで構成され、D グループは SSDセンサの σ_a 12チャンネルと主ブレード面上の超小型圧力センサ2チャンネルとで構成されている。次に、各グループの転送先先頭アドレスをアドレスカウンタを加算してセットし、A / D変換したデータをメモリに転送する。以下、同様の操作をB、E、C各グループについて行なう。Bグループは SSDセンサの σ_b 、E グループはSSDセンサの σ_c 各12チャンネルで構成されており、Cグループは主ブレードの三分力と副ブレード面上の圧力、主ブレードと副ブレードの位置と副ブレード軸トルクの12チャンネルで構成されている。なお、チャンネルセレクトの切り換え後に動作安定のためにウェイトを行なっている。こうして66チャンネルのデータが1回サンプルされ、アドレスカウンタをアップして次のデータのサンプルに備える。次に、パルスモータカウンタ (初期値 0) に1を加算してからこれを参照し、カウンタが5であれば SSDセンサの発光点を切り換える

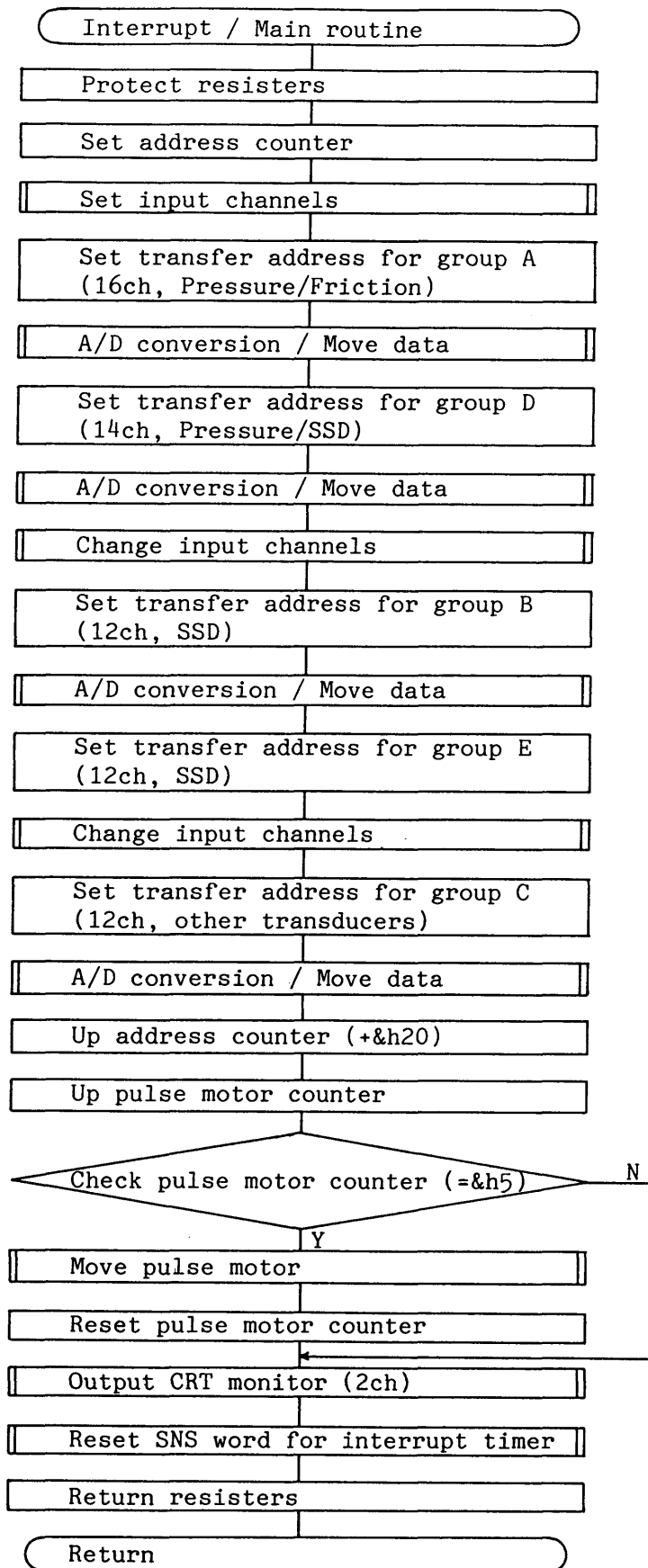


図11 計測ソフトウェア (MIST/CAM) の主ルーチンのフローチャート

表11 計測装置主仕様一覧 (その1)

品名, 型番 (会社名)	
主仕様	
主ブレード/副ブレード用超小型圧力センサ, PS-2KA (共和電業)	
容量	2 kg/cm ²
定格出力電圧	0.8 mV/V
非直線性	1 %R. O.
許容過負荷	150 %
外径/厚さ	φ 6 mm / 0.6 mm ± 0.1
傾斜センサ, PMP-45u (緑測器)	
感度	2.5 %Vin/10°
直線性	± 4 %FS
入力インピーダンス	18 kΩ ± 30 %
入力電圧	最大 10 V
測定範囲	± 45°
トルク変換器, TMB-50KM (新興)	
定格容量	50 kg-m
定格出力	1.5 mV/V ± 1 %
非直線性	0.3 %R. O.
定容過負荷	120 %R. C.
小型圧力計/摩擦力計用ストレインゲージ, KFC-5-C1-11 L30 (共和電業)	
ゲージ率	2.1
寸法	5 mm × 2 mm
ベース寸法	10 mm × 3.7 mm
ストレインアンプ, DPM-8H, DPM-220A, DPM-6E (共和電業)	
測定点数	8 (8H), 16 (220A), 6 (6E)
応答周波数範囲	0 ~ 5000 Hz
SN比	40 ~ 50 dBp-p
電子式オートバランス, ローパスフィルタ付 (8H, 220A)	
ロードセルコンバータ, LC630-13 (ユニパルス)	
測定点数	13
ゼロドリフト	0.6 μV/°C
ゲインドリフト	50 ppm/°C
印加電源ドリフト	25 ppm/°C
非直線性	0.005 %
ノイズ	0.3 μVP-P/0.1~2Hz
ローパスフィルタ付	
チャンネルセレクタ用リードリレー, TRD-4005SF (沖田)	
接点構成	4M
接点定格	50W
寿命	1億回以上 (機械的)
定格電圧	DC 5V
コイル抵抗	150 Ω
動作時間	2 msec 以下
復旧時間	20 ~ 40 μsec

表12 計測装置主仕様一覧 (その2)

品名, 型番 (会社名)	
主仕様	
チャンネルセレクト用パラレル出力モジュール, PO32, PIO16/16 (コンテック)	
形式	フォトカプラ絶縁によるオープンコレクタ
定格	最大DC3.5V 200mA
出力点数	32 (PO), 16 (PIO)
応答時間	1msec以内
占有ポート数	8ビット 4 (PO), 2 (PIO)
外部電源	DC1.2~2.4V
消費電源容量	5V 550mA (PO), 480mA (PIO)
A/Dコンバータモジュール, AD12-16 (コンテック)	
入力仕様	非絶縁バイポーラ0から±5V
入力点数	16
分解能	12ビット
変換方式	逐次比較方式
変換速度	50 μsec
占有ポート数	2
電源	DC5V 600mA
パルスモータ, PI-62C1 (日本パルスモータ)	
相数	4
ステップ角度	1.8°
ステップ角度誤差	±5%
温度上昇	70°
最大静止トルク	1.5 kg-cm
ロータ慣性	$4.6 \times 10^{-1} \text{g-cm-s}^2$
重量	1400g
パルスモータドライバ, CD-402u (日本パルスモータ)	
励磁方式	2相, 1-2相
励磁電流	2A (1相当り)
パルスモータコントロールモジュール, PMC-2 (コンテック)	
使用LSI	PPMC-102
駆動点数	2
出力信号	非絶縁論理オープンコレクタ 50 μs
入力信号	フォトカプラ絶縁入力 1.2~2.4V 2kΩ
占有ポート数	8ビット 4デバイス
消費電源容量	5V 650mA
ビデオカメラ, M-4075 (長田電機)	
撮像管	ニュービコン可視光線
解像度	550本 (水平) × 350本 (垂直)
感度	0.3 Lx
出力信号	1.0 Vp-p, 75 Ω (NTSC)
レンズ	f=25mm, F1.8
重量	1.1 kg

表13 計測装置主仕様一覧 (その3)

品名, 型番 (会社名)	
主仕様	
ビデオレコーダ, NV-8480 (松下)	
録画方式	回転2ヘッドアジマス記録VHS規格
テレビジョン方式	日米標準方式525本60フィールド
変調方式	輝度信号FM変調, 色信号低域変換 $\pi/2$ 移相
画像入力装置, IFM-PC/F (三谷), FDM98-1 (フォトロン)	
サンプリング時間	1/60sec/17レーム
画素数	256×256
階調数	64 (モノクロ)
メモリサイズ	128K ^{ビット} (2画面 (IFM)), 64K ^{ビット} (FDM)
ディスプレイ (ビデオモニタ), KX-14HD1 (SONY)	
ブラウン管	トリニトロン90°偏向14型ブラックファインピッチ
ドットピッチ	0.37mm
水平周波数	15kHz~34kHzマルチスキャン
ビデオ入力	NTSC, 1V _{p-p} , 75 Ω
パーソナルコンピュータ, PC9801-F2/VM2 (NEC)	
CPU	8086-2 (i8086コンパチブル) クロック約5/8MHz μ PD70116-10 (V30) クロック約8/10MHz
ROM	96K ^{ビット}
RAM	ユーザーズメモリ384K ^{ビット} (増設を含む (F2)) テキスト用VRAM 12K ^{ビット} グラフィック用VRAM 192K ^{ビット}
ディスプレイ, PC-8853N/N5913 (NEC)	
ブラウン管	14インチカラー90°偏向, 無反射ダークフェイス(N5913)
ドットピッチ	0.31mm
解像度	640ドット×400ライン (56.4Hz)
水平周波数	24.83kHz
プリンタ, PC-PR201HC/PC-PR101L (NEC)	
印字方式	インパクトドットマトリックス (24ピンプリントヘッド)
インターフェイス	セントロニクス社仕様準拠
レーザープリンタ, PC-PR406LP (NEC)	
印刷方式	レーザービーム走査+乾式電子写真方式
インターフェイス	セントロニクス社仕様準拠
フルカラーイメージプリンタ, PC-PR801 (NEC)	
印刷方式	ドロップオンデマンド型インクジェット方式
インターフェイス	セントロニクス社仕様準拠 (セントロスルー機能あり)
XYプロッタ, GD9311F (グラフテック)	
形式/駆動方式	グリッドローリング/ デジタルサーボ
最大作図速度	400mm/s
メカニカルステップサイズ	5 μ m
精度	$\pm 0.2\%$ 以下 (距離), 0.2mm以下 (反復)
インターフェイス	RS-232-C

表14 計測装置主仕様一覧（その4）

品名, 型番 (会社名)	
主仕様	
拡張 I/O ボックス, FA-PAC98-13 (コンテック)	
マザーバス信号レベル	TTL コンパチ
スロット数	13
電源	DC5V 10A
消費電力	AC100V 50W
タイマカウンタモジュール, TIR-6 (コンテック)	
基準時間	0.1msec, 1msec
占有ポート数	8ビット 16
消費電源容量	5V 650mA

ためにパルスモータを駆動させ、カウンタをリセットする。そして、ディスプレイにモニタする2チャンネルのデータを表示し、次の割り込みのためにタイマをリセットし、レジスタを復帰させ、本ルーチンを終了する。なお、本プログラムはアセンブラ言語で記述した¹⁹⁾⁵²⁾。巻末の付録3に主ルーチンのソースリストを掲載した。

完成した計測装置で正しい測定点のデータがサンプルされているかどうかの試験は、ファンクションジェネレータからパルス波および正弦波を発生させ、オシロスコープの波形と本装置で得られたデータの波形とを照合して行なった。

計測装置の主仕様（性能）一覧を、表11～14に示す。

3-4 データ処理システムと計測精度

フロッピーディスクに保存されたバイナリデータを入力し、以下に示す較正式を用いてデータ変換を行ない、ランダムアクセスファイルまたはシーケンシャルファイルへ出力した。こうして得られるデータ量は1実験につき1チャンネル当り600データになる。実験結果より急激な変化を示すデータがないことが確かめられたので、データ量を $\frac{1}{2}$ に圧縮した。しかし、データによってはS/N比の低下が原因であると考えられる比較的高い周波数のノイズを含んだ出力が得られたので、256個のデー

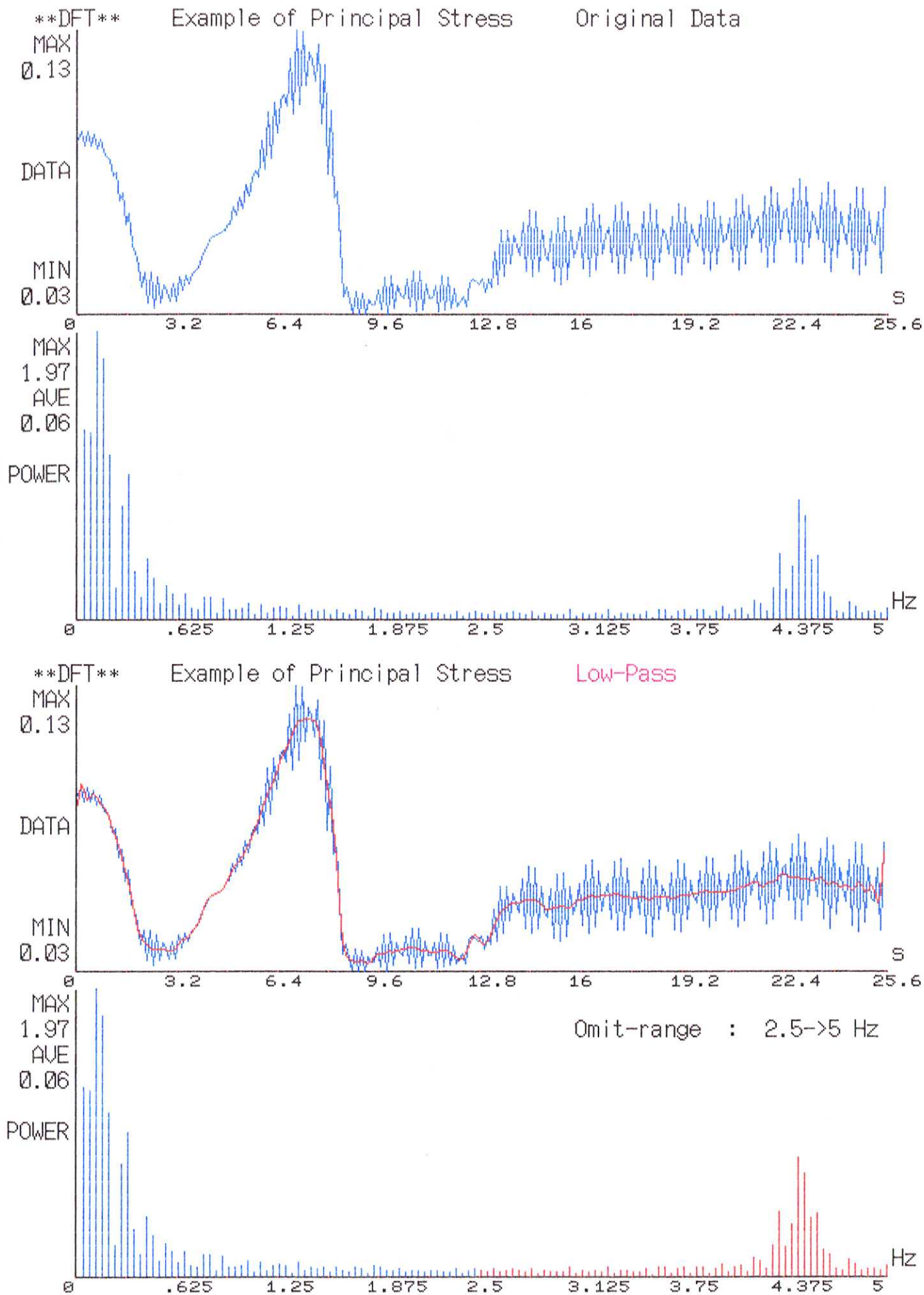


図12 高速フーリエ変換出力例

(データとパワースペクトル図. 上が原データ, 下がローパスフィルタ処理したデータとカットしたパワースペクトル(レッド))

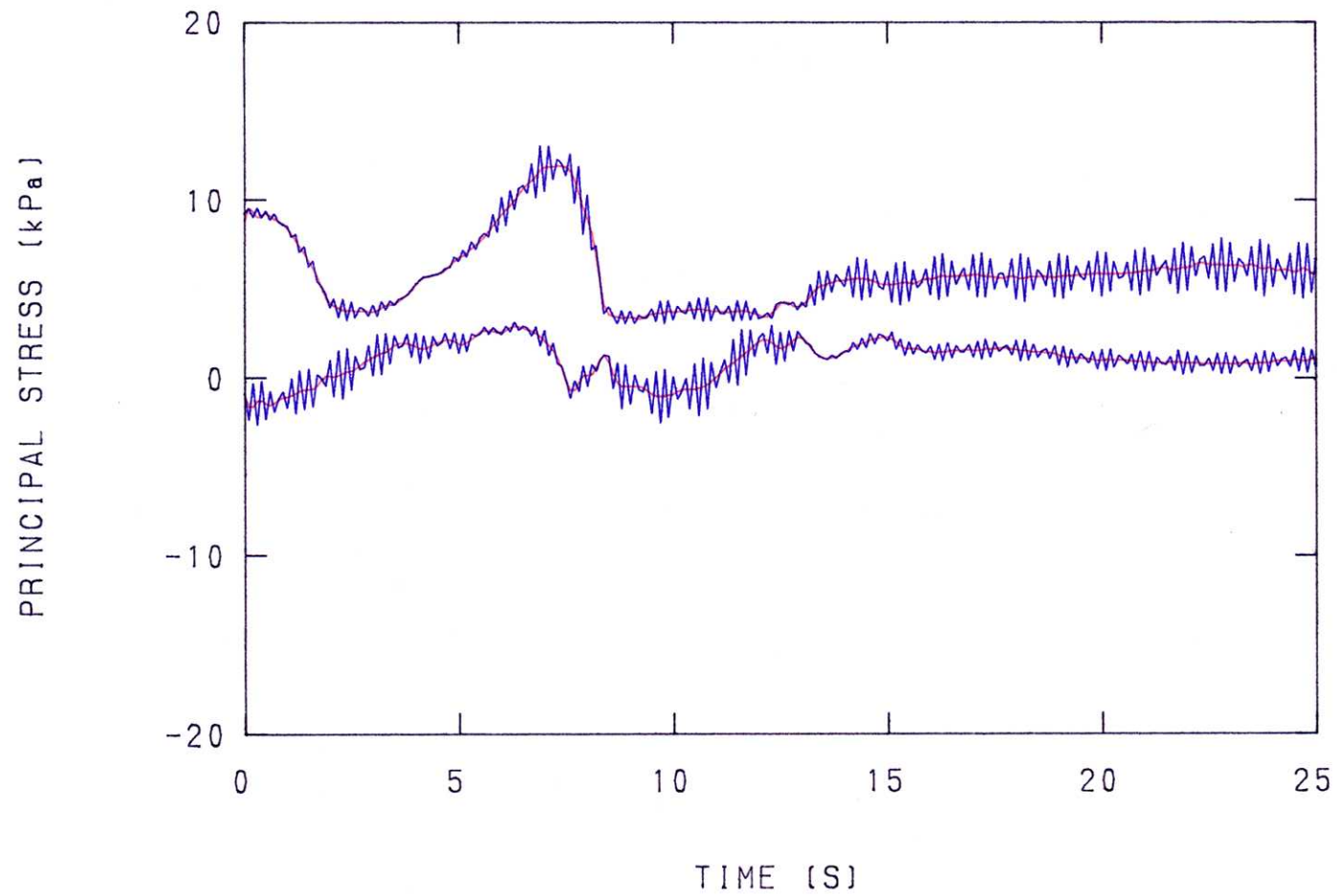


図13 耕うん実験の応力出力例

(ブルー：原データ，レッド：ローパスフィルタ処理したデータ)

タについて高速フーリエ変換（離散形のフーリエ変換。巻末の付録4参照）を利用したローパスフィルタ処理を施してノイズ成分の除去を行なった⁸⁾³⁹⁾（図12、13参照）。それでも実験全体としては大量となるデータに対処するため、ファイル管理テーブルやファイルIDテーブルなどを備えたデータファイル管理システム（FSOS）を自作し、出力ファイルを管理した。

各データは0.1秒毎に出力されてはいるが、実際には計測に用いたA/D変換器の変換速度やデータのメモリへの転送速度およびチャンネルセレクタの動作時間などのために、データサンプル時に各チャンネル間で約55 μ s \sim 2msの時間差を生じており、同じ時間表示のデータでも最大約10msの時間差がある。

SSDセンサ、主ブレード、副ブレードに用いた超小型圧力センサの較正式は、センサの容量をp、出力感度をx、出力電圧を較正して求めたひずみを ϵ として次式で表わせる。

$$\sigma [\text{kPa}] = \frac{p}{2000 \times x} \times \epsilon \times 98$$

なお、主および副ブレードに用いたセンサの感度クラスはVである（表1参照）。センサの分解能は第2章でも述べたように、A/D変換器の分解能約2.5mVと圧力センサの出力から、約0.3kPaとなる。

主ブレードの八角型三分力計の較正式は、x軸方向の力をF_x、z軸

方向の力を F_z 、 y 軸廻りのモーメントを M_y 、出力電圧を校正して求めたひずみを ε として次式で表わせる。

$$F_x[\text{N}] = 0.38 \times \varepsilon \times 9.8$$

$$F_z[\text{N}] = 0.36 \times \varepsilon \times 9.8$$

$$M_y[\text{Nm}] = 0.05 \times \varepsilon \times 9.8$$

また、実験では $300 \mu \varepsilon$ で約 1 V 出力するように設定したので、分解能は F_x 、 F_z で約 2.8 N、 M_y で約 0.4 Nm となる。

副ブレードの軸トルク T_q は、出力電圧を校正して求めたひずみを ε として次式で表わせる。

$$T_q[\text{Nm}] = \varepsilon / 60 \times 9.8$$

実験では $1000 \mu \varepsilon$ で約 1 V 出力するように設定したので、分解能は約 0.4 Nm となる。

土壌槽の位置（主電動シリンダのポテンショメータ） B_p と副ブレードの回転角度 S_a は、初期電圧を V_i 、出力電圧を V として以下の式で表わせる。

$$B_p[\text{mm}] = 6.68 \times 10^3 \times (V_i - V)$$

$$S_a[\text{deg}] = \frac{V - V_i}{1.78 \times 10^{-2}}$$

分解能は B_p で約 1.7 mm、 S_a で約 0.2° となる。

なお、主ブレードに用いた小型圧力計と摩擦力計は感度が好ましくな

かったので計測結果は定量的なデータとしては扱わなかった。さらに、求めたデータは、X-Yプロッタとこれに対応する自作したソフトウェア（XYPLOT、XYZPLOT）を用いて、二次元または三次元グラフに書き表わした。

3-5 結語

直線運動系と回転運動系の耕うんモデル実験を各々独立して行なえる土壌槽総合試験装置を試作した。本装置とSSDセンサを用いることにより、垂直ひずみ、せん断ひずみを求めたり、ヘロンの公式などを使ってSSDセンサが囲む領域の面積を求め、それに容積重のデータを加えることにより比容積のデータを求めることができ、応力とひずみの関係や、限界状態理論で用いる平均垂直応力と偏差応力および比容積のデータを求めることができると考えられる。

第4章 供試土壌の圧縮成形

4-1 目的

土壌槽総合試験装置を用いて行なった耕うんモデル実験結果の再現性を確かめるのに必要な、同一条件の供試土壌の再生を行ない、装置の静的性能試験も行なう。

4-2 圧縮成形装置の試作

同一条件の供試土壌を再生するには、ランマー等を用いて段階的に土を固めていく方法では各層毎に硬度勾配が生じるとともに、層間にクラックが生じやすいなどの問題がある。そこで土の成形には、傾斜型ベルトコンベア（図14参照）上でほぼ一様の水分調節がなされた土を、回転羽根を改造して土の団粒粗大化の防止とかくはん性の向上をはかるとともに、取り出し口に15mm×7mmのひし形メッシュ状の金網を設けたミキサ（図14参照）を用いて強制的に土を細粒化し、これをベルトコンベア（図14、16参照）で土壌槽に搬入しながらSSDセンサを所定の位置に設置し、油圧プレス装置（図15、16参照）で成形板を介して一定時間圧縮を加えて土を締め固める方法を用いた。土の成形方法を以上のように機械化することによって、ほぼ一定の条件のもとで土壌の再生ができ、土

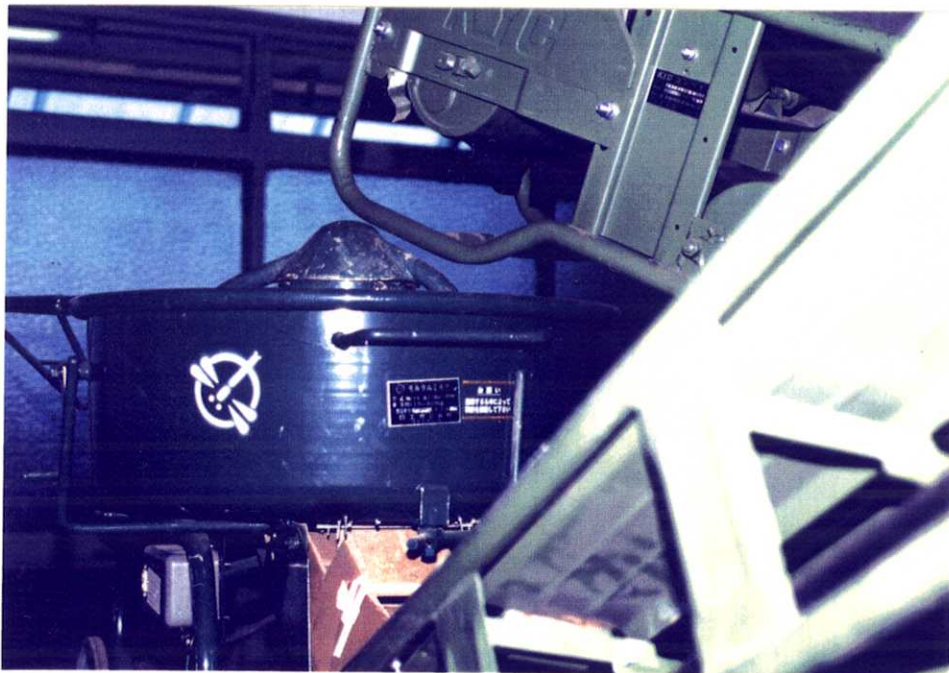


図14 圧縮成形装置のミキサとベルトコンベア

(供試土は、傾斜型ベルトコンベア(奥)→ミキサ→ベルトコンベア(手前)の順で処理される)

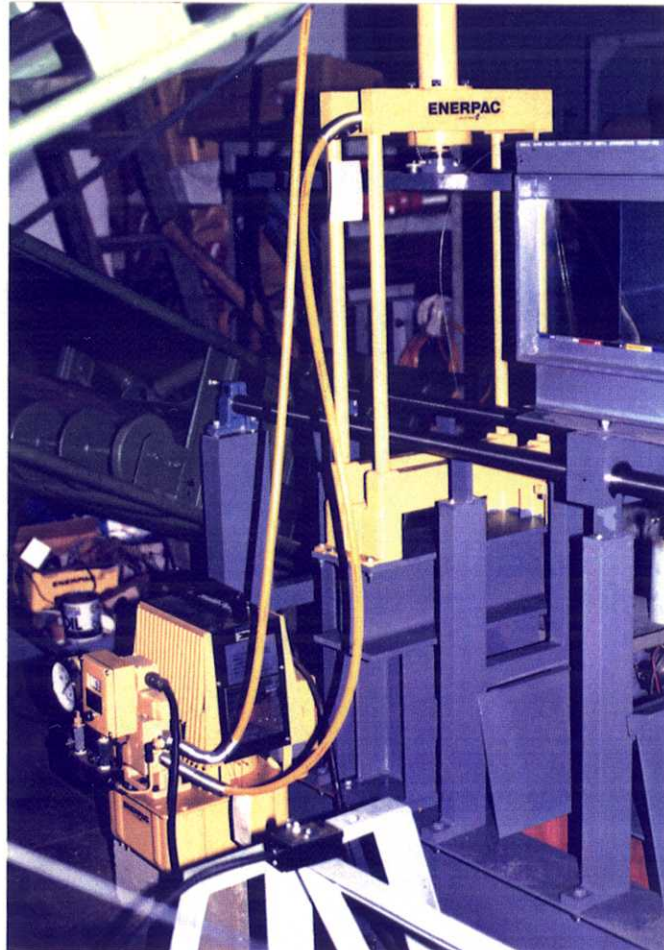


図15 圧縮成形装置の油圧プレスユニット

(黄色塗装のもの. 左下に油圧ポンプ, 右上にプレス台, 油圧シリンダ等がある)

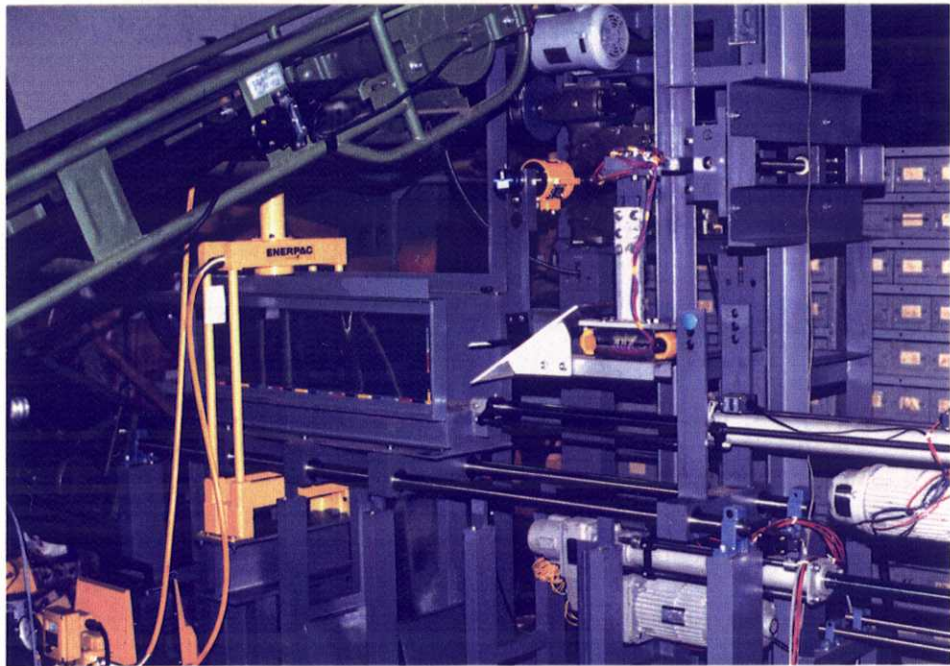


図16 圧縮成形装置を加えた土壌槽総合試験装置

(左上がベールコンベア(濃緑), 左側に油圧プレスユニット(黄), 中央が土壌槽(灰), その右側がプレートユニット, 右下が土壌槽駆動用電動シリンダ(明灰))

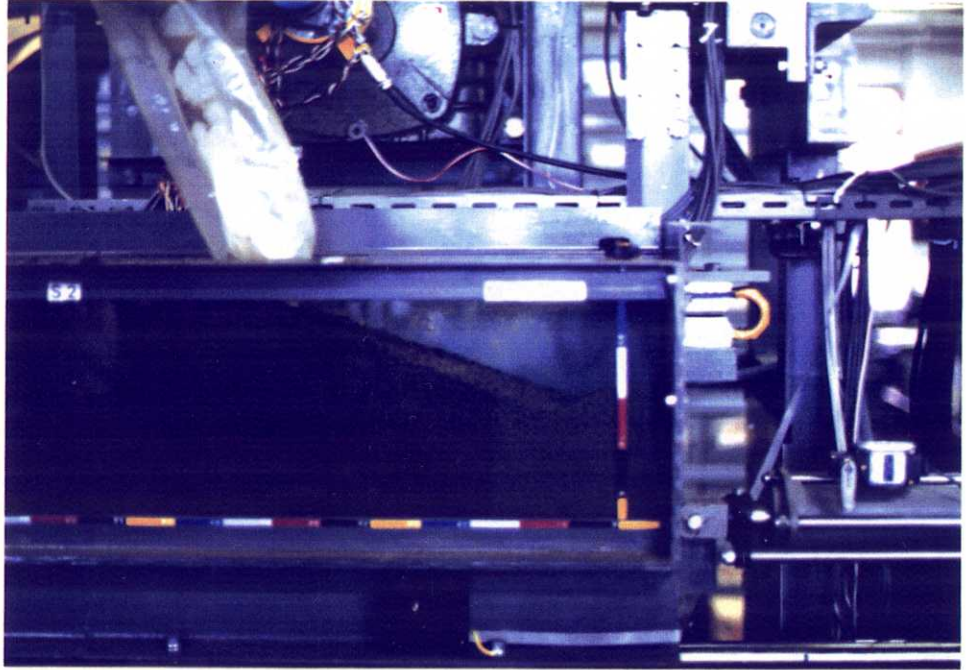


図17 土壌槽への土の搬入

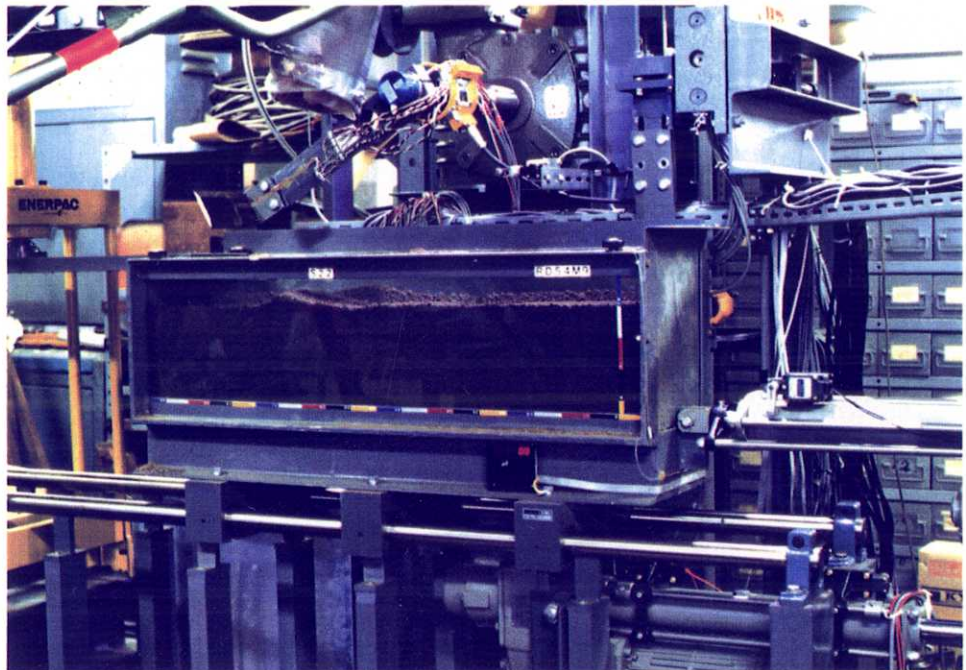


図18 土壌槽への土の充填が完了した状態

表15 成形後の土壌状態

(データは同一実験日での平均値を表わし、()内は標準偏差を表わしている)

Date	Number of samples	Cone index [kPa]		Moisture content [%d.b.]	Void ratio [%]	Bulk density [kg/m ³]
		surface	depth=5cm			
a	2	83.5 (4.50)	64.0 (0.00)	14.5 (0.30)	43.0 (2.00)	1330 (50.0)
b	4	108.6 (16.8)	89.8 (7.01)	14.6 (0.14)	44.3 (4.32)	1305 (95.2)
c	3	103.0 (11.2)	71.3 (6.12)	13.4 (0.77)	47.0 (1.41)	1270 (35.5)
d	2	121.5 (15.5)	73.0 (23.0)	15.0 (0.05)	41.5 (0.50)	1345 (15.0)
e	3	134.0 (19.6)	93.3 (3.77)	14.4 (0.16)	42.6 (1.24)	1320 (0.0)
f	3	88.3 (19.1)	70.0 (18.3)	13.2 (0.58)	44.3 (0.47)	1316 (9.4)
total	17	107.1 (23.1)	78.6 (16.1)	14.1 (0.77)	44.0 (2.89)	1311 (56.5)

の成形時間の短縮によって成形中の土の水分変化も抑えられると考えられる。

4-3 圧縮成形実験と再生精度

実験に用いた土は中川下流の沖積土で、土性は国際土壌学会法の区分で粘土 9.0%、シルト 19.5%、細砂 54.0%、粗砂 17.5% であり、分類上砂壤土 (SL) にあたる。Atterberg 限界は、塑性限界 (LL) 20.9%、液性限界 (PL) 29.5%、塑性指数 (PI) 8.6% である。また、土粒子の比重は2.7である⁴⁵⁾。

予め水分調整がなされた土はミキサによって細分され、図17、18のように側壁が閉じられ、両ブレードが退避している土壌槽に充填される。またこの時、SSDセンサはガラス壁面に貼り付けられた設置位置目標に従って埋め込まれる。その後、油圧プレス装置で約8.4 kNの集中荷重が中央部に加えられた成形板を介して圧縮成形される。

表15は、耕うん実験においてせん断破壊面が形成されるように比較的低水分で土壌を成形したときの土壌状態を示したものである。各実験日には2~4の実験を行い、合計17の実験期間は約1ヶ月にわたっている。土壌水分量はいずれも塑性限界より小さくなっており、耕うんによって土壌の団粒状態が破壊されない状態にあると考えられる。全期間での平

均値と標準偏差の比率は、土壤硬度（山中式土壤硬度計で計測）は土壤表面で21.6%、深さ5cmのところで20.5%と比較的ばらつきが大きい、含水比は5.5%、間隙率6.6%、密度は4.3%とばらつきが小さくなっている。土壤硬度のばらつきが比較的大きいのは、計測手段固有のものと考えられる。しかし、これらのばらつきは同じ実験日内では小さくなっている場合が多い。

図19、20は土壤成形前と成形後のSSDセンサの発光の様子を示している。ここで用いた12個のSSDセンサの内、最も左側の列（プレス台の黄色い支柱の間、センサIDがSp4,11,2）と、左から3列目（右側から2列目（支柱に隠れている列がある）、Sp7,8,9）の6個のセンサの変位を5秒間の代表値でプロットしたものを図21に示す。また、図22にはSSDセンサを土壤槽の上部と下部に分け、同時刻のセンサ位置を線で結び各々4個のセンサで囲まれる領域の変形を表わした（上部がSp4-11-8-7、下部がSp11-2-9-8）。さらに、図23には上部のSSDセンサの縦（y軸）方向と横（x軸）方向の垂直ひずみ変化を、図24には下部の同様な垂直ひずみ変化を示した。なお、縦軸の正方向は膨張を、負方向は圧縮を表わし、横軸は変化前の時刻を表わしている。これらの図より、縦方向に0～10秒で比較的大きな変形を伴った圧縮が起こり、10～15秒では変形が小さくなり、15～25秒では除荷とともに膨張が起こっていることが分かる。さらに、この弾性回復は深くなるほど変形量が小さくなるととも

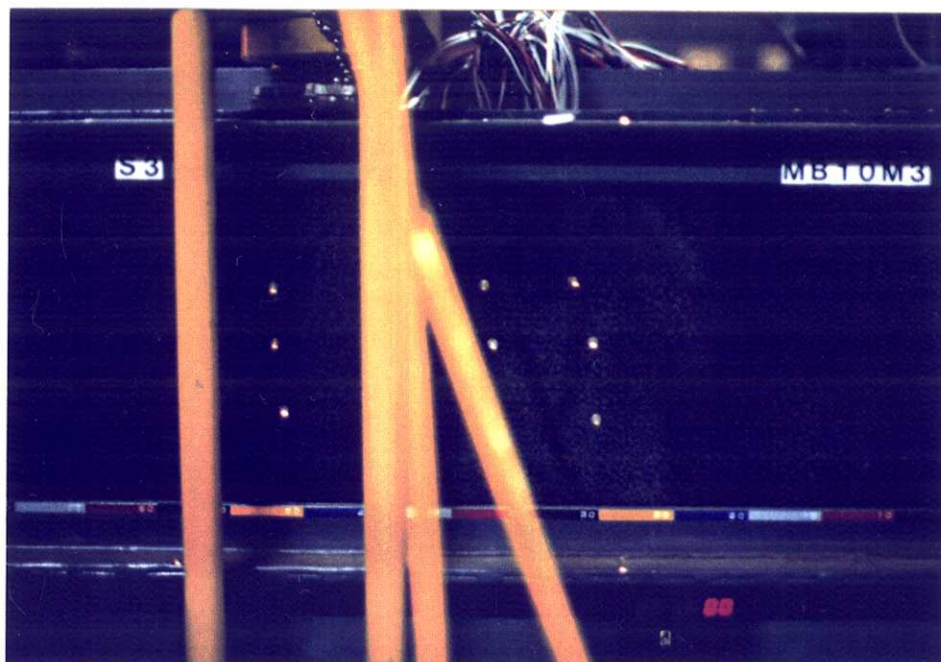


図19 圧縮成形前の土壌でのSSDセンサの発光

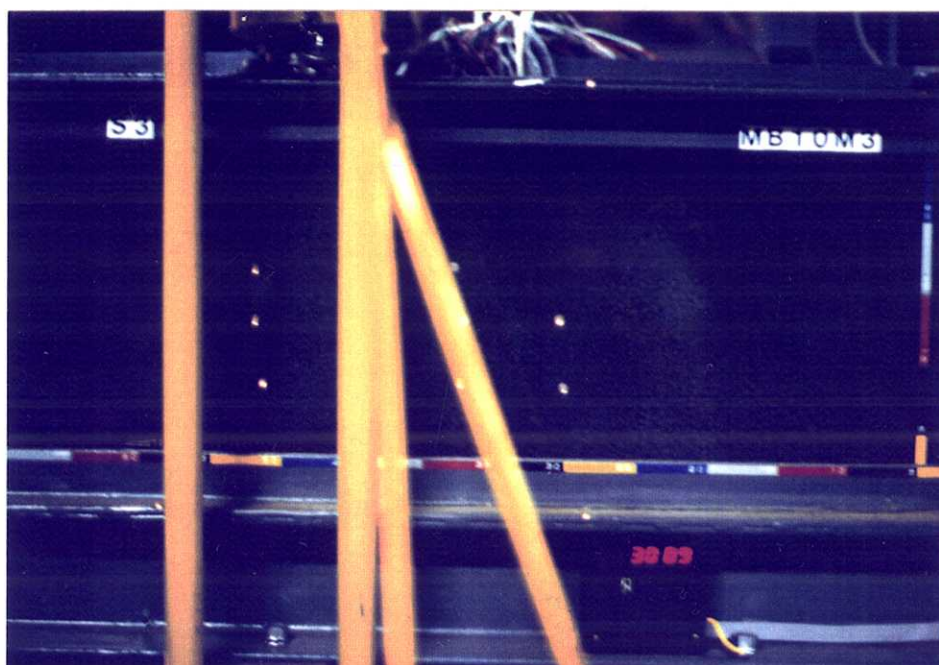


図20 圧縮成形後の土壌でのSSDセンサの発光

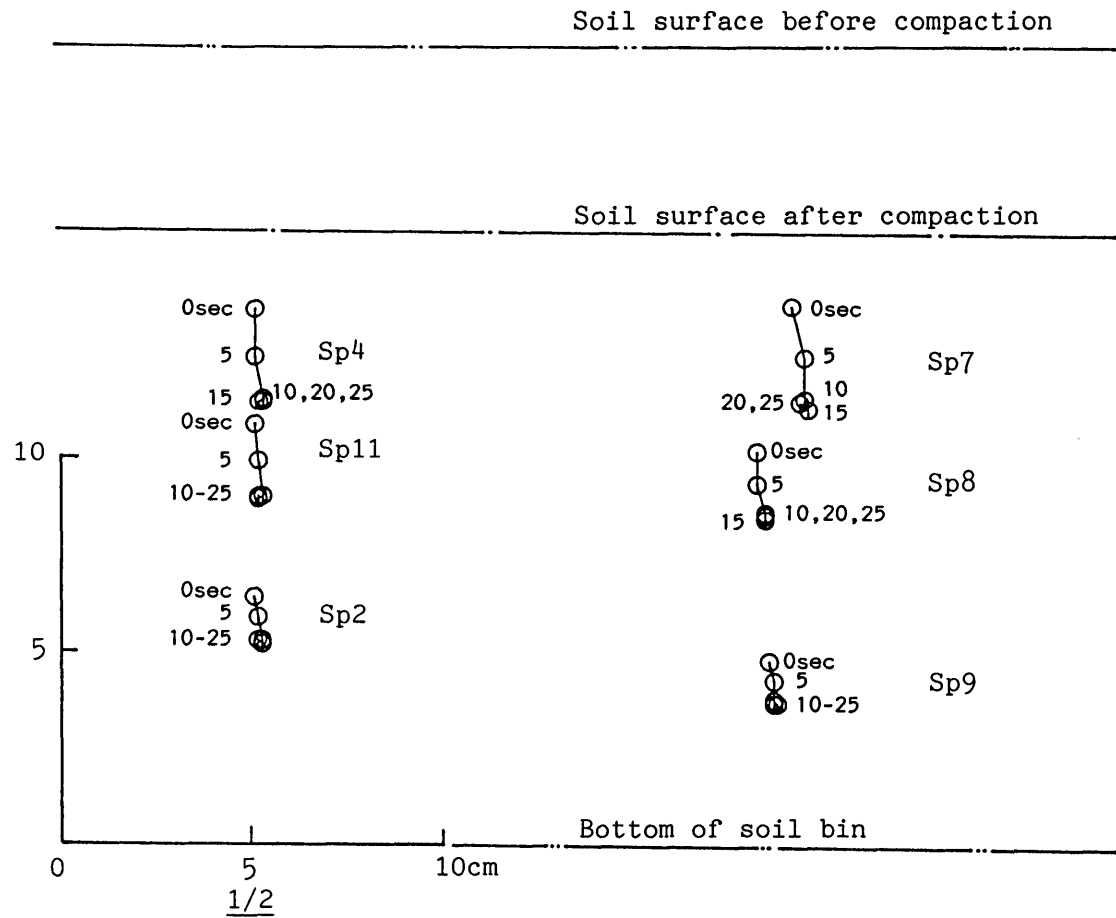


図21 圧縮成形時の土壤変位

(6つのSSDセンサの変位を5秒おきに示した。プロット横の数字は時間)

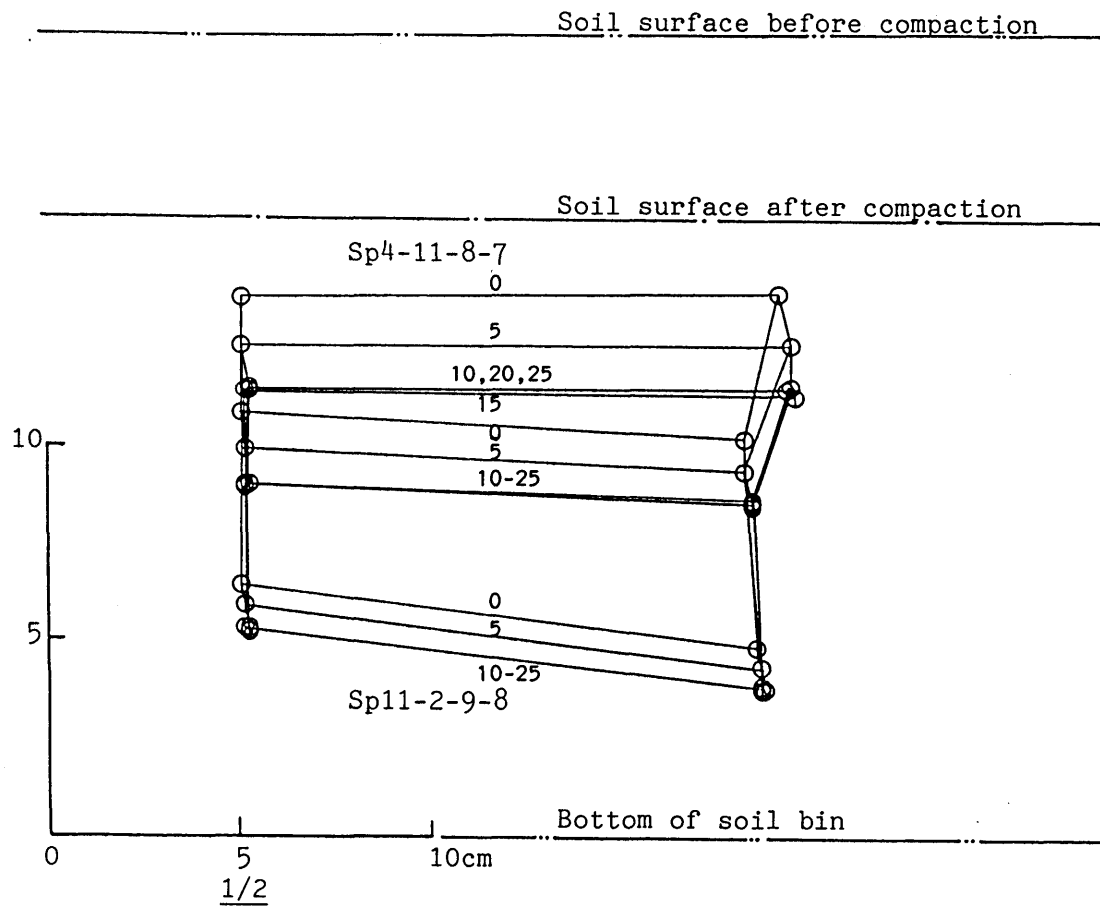


図22 圧縮成形時の土壌変形

(4つづつのSSDセンサの位置を結んだ2つの領域の変形を示した。線上の数字は時間(秒)を表わす)

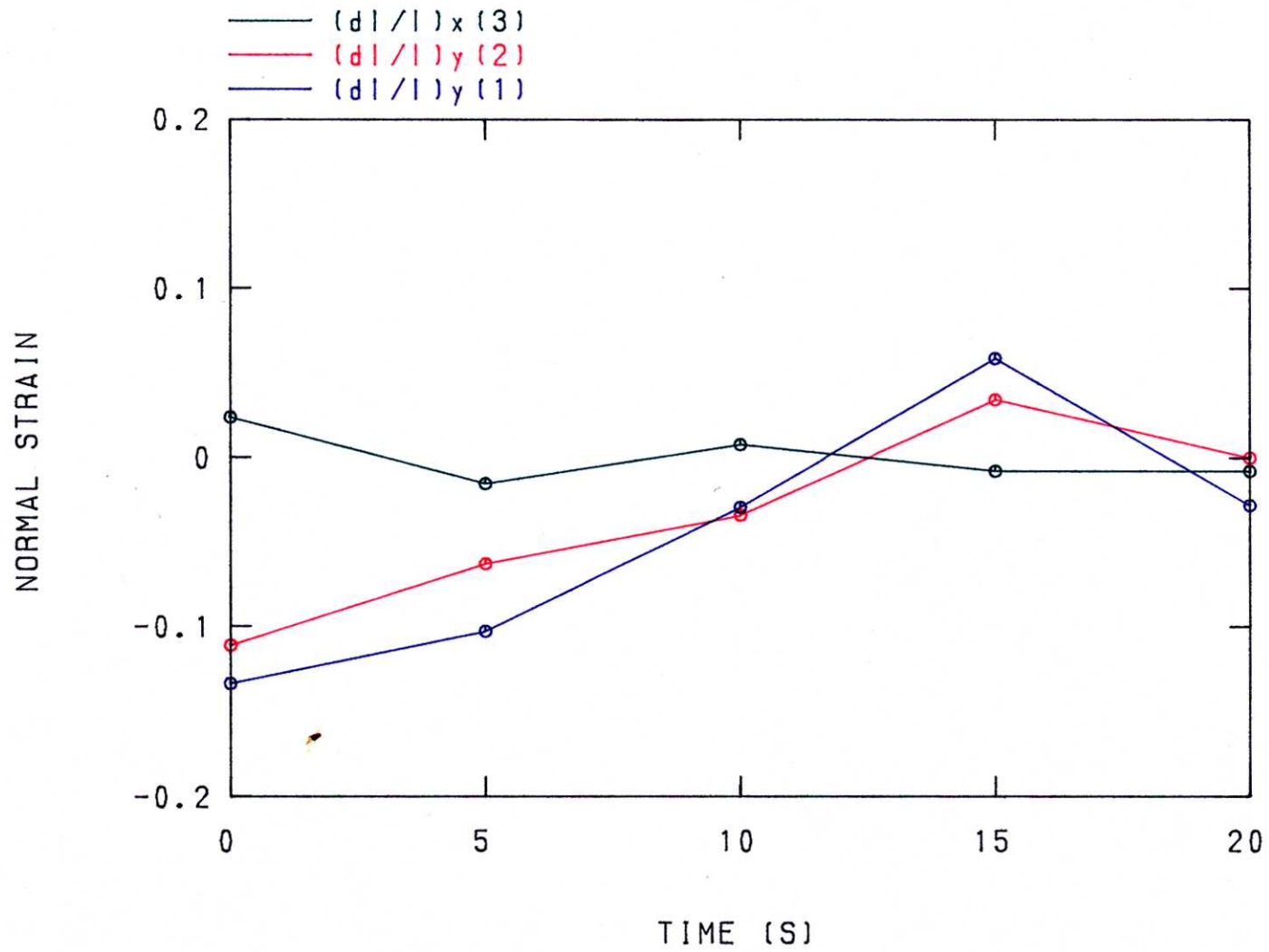


図23 圧縮成形時の土壌上部の垂直ひずみ変化

(ブルー: Sp7-8[y軸方向], レッド: Sp4-11[y軸方向], グリーン: Sp4-7[x軸方向])

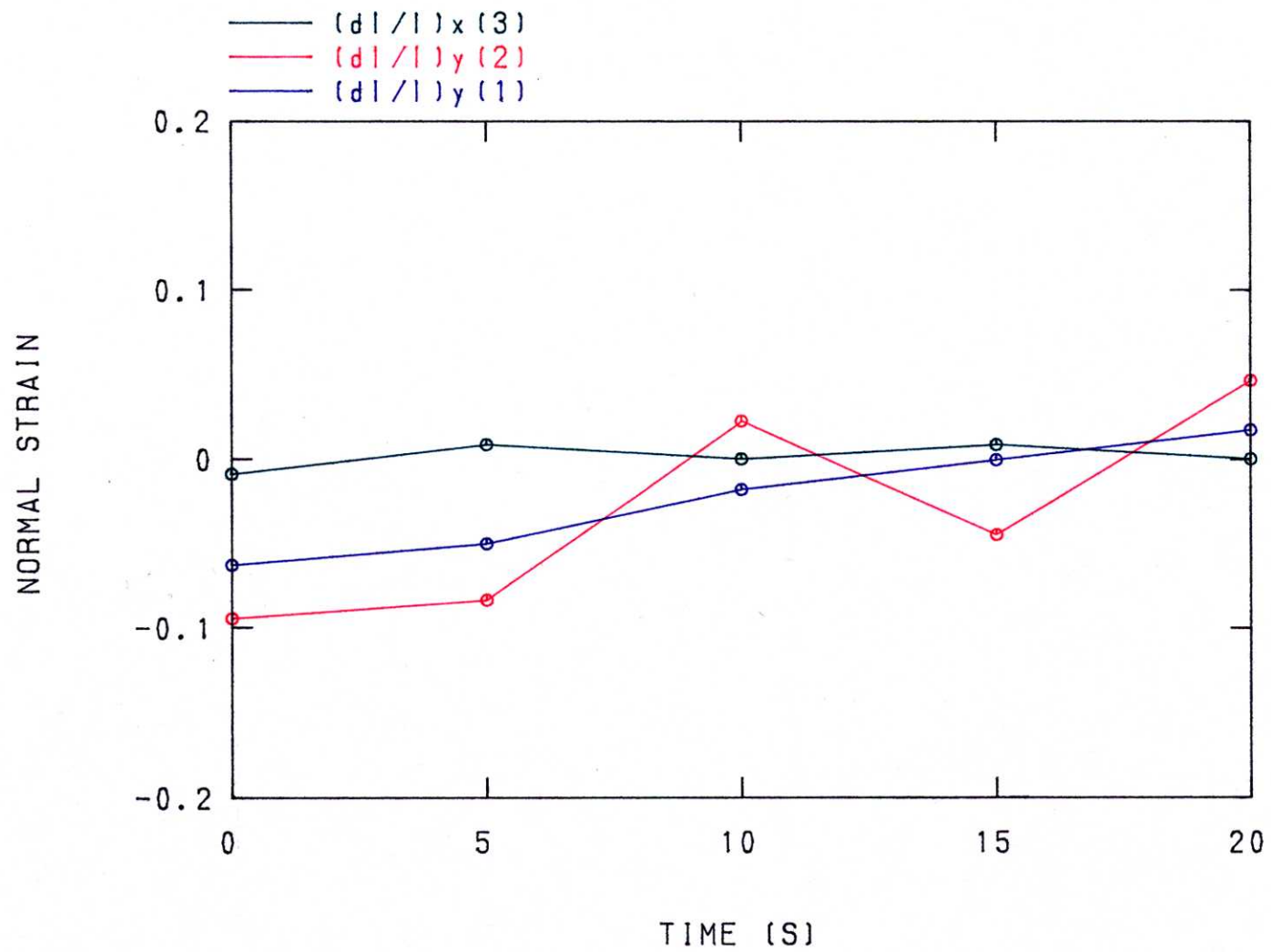


図24 圧縮成形時の土壌下部の垂直ひずみ変化

(ブルー：Sp8-9[y軸方向], レッド：Sp11-2[y軸方向], グリーン：Sp11-8[x軸方向])

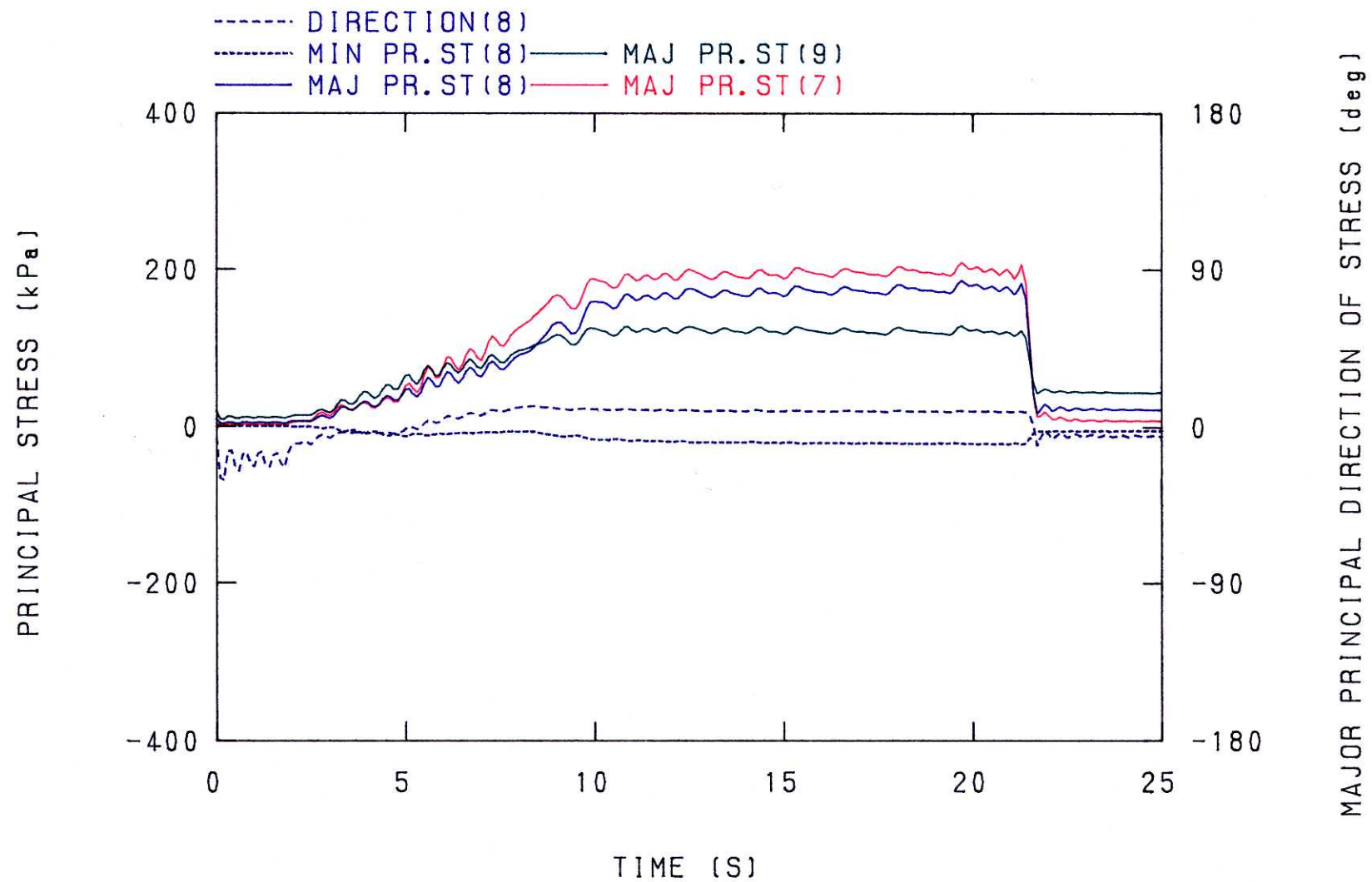


図25 圧縮成形時の土壌内応力変化

(レッド：Sp7の最大主応力，ブルー：Sp8の最大主応力（直線）と最小主応力（破線）および最大主応力方向（点線），グリーン：Sp9の最大主応力）

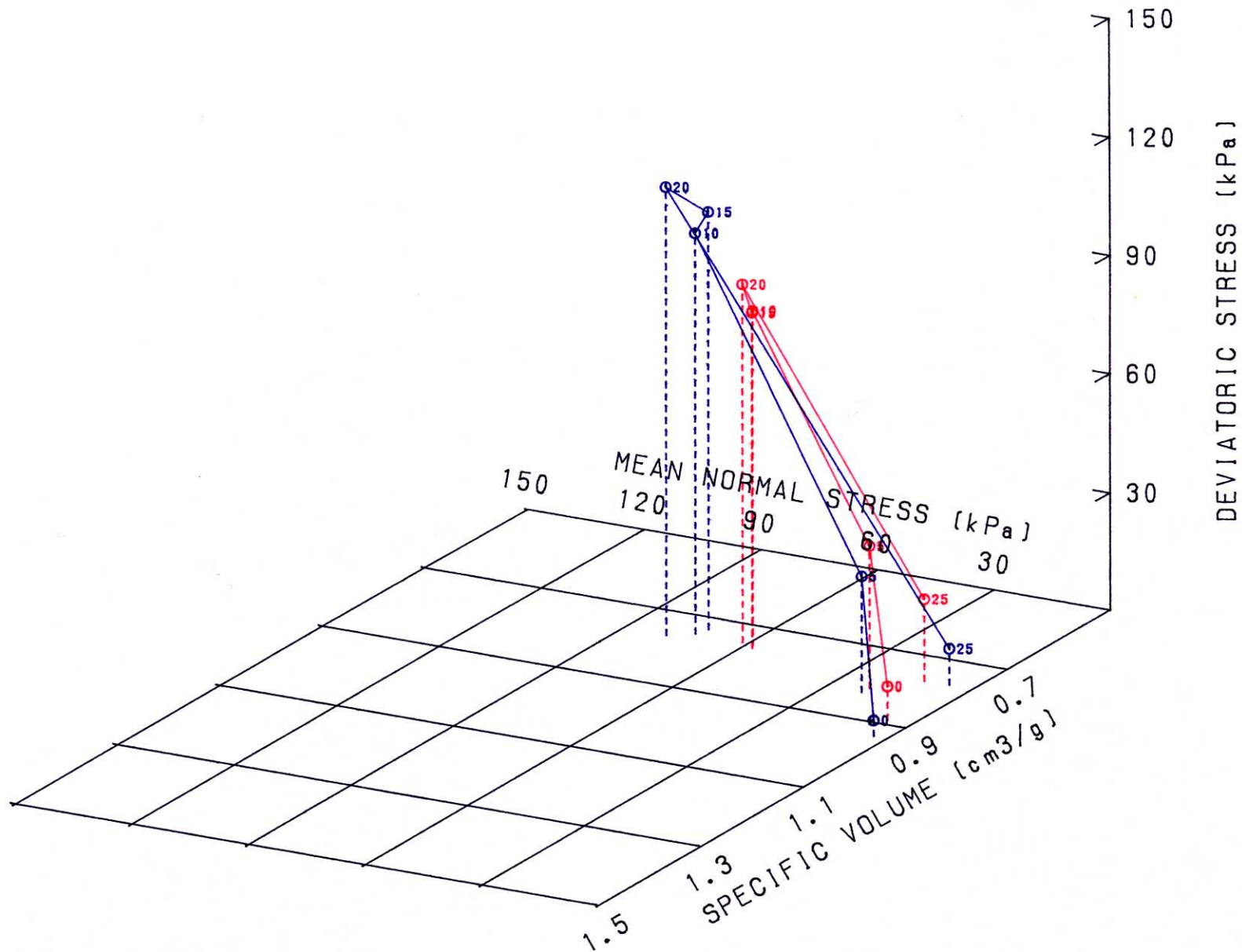


図26 圧縮成形時の状態経路 (ブルー：上部領域 (Sp-4-11-8-7)，レッド：下部領域 (Sp-11-2-9-8)．数字は時間 (秒) を表わす)

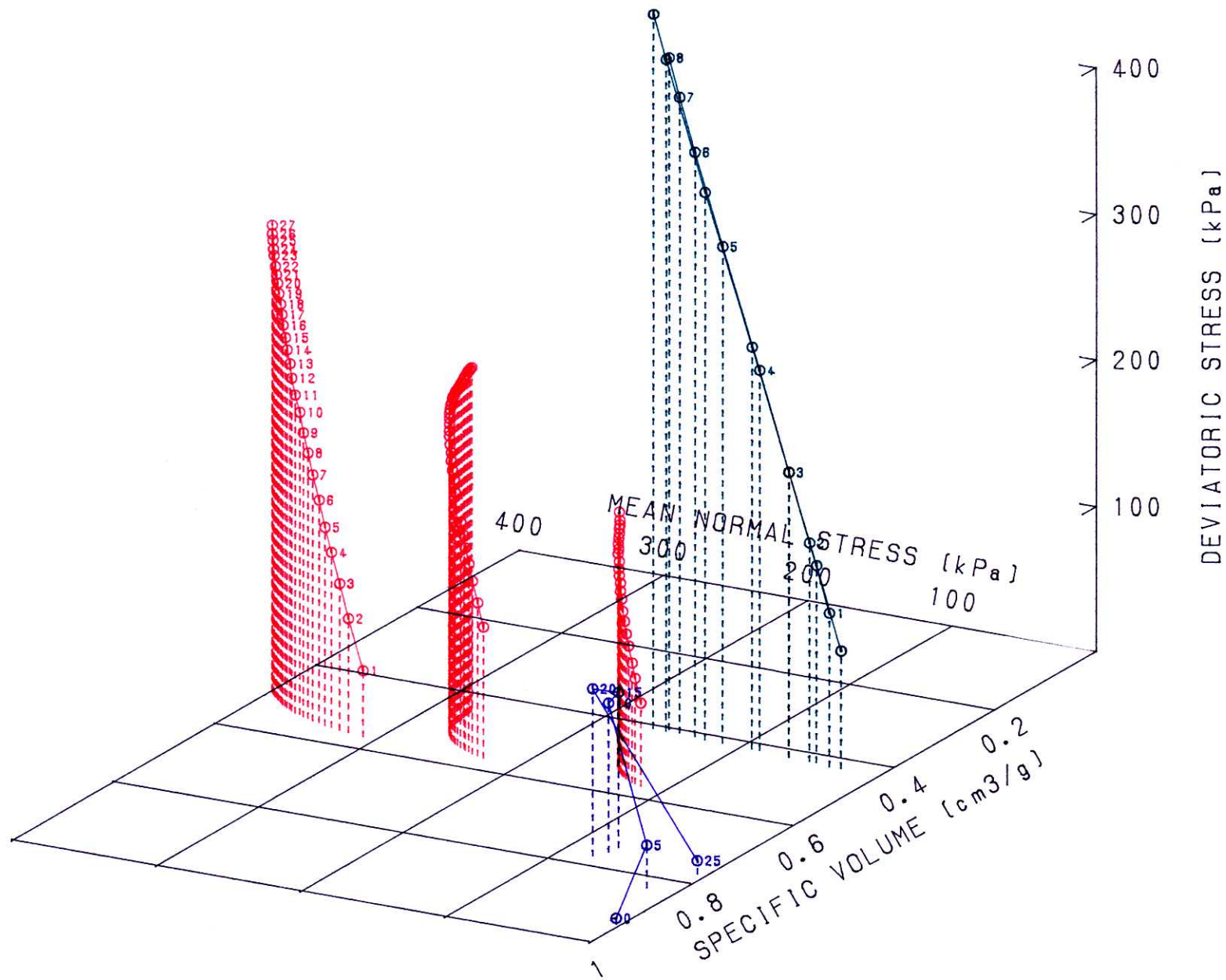


図27 一軸圧縮試験，三軸圧縮試験，圧縮成形時の状態経路比較 (グリーン:一軸圧縮試験,レッド:三軸圧縮試験,ブルー:圧縮成形)

に、浅いところほど早く起こっていることが分かる。また、この圧縮方式では横方向の変形が少ないことも分かる。

図25は、この内左側から3列目のSSDセンサの最大主応力を0.1秒おきにプロットしたグラフで、Sp8については最小主応力および最大主応力方向も示した。最大主応力は、約2秒から徐々に圧縮が加えられて行くとともに増加し、約10～22秒に最高設定圧力の下で圧縮を受ける。このときグラフが波打っているのは圧力スイッチによって断続的に圧力が加わっているためである。最大主応力は、約22秒で除荷されると急激に低下しているが、除荷後にも応力が残っていることが分かる。圧縮を受けているときの最大主応力の値は、上段のSp7が約200 kPa、中央段のSp8が約180 kPa、そして下段のSp9が約170 kPa、除荷後の最大主応力はそれぞれ約10kPa、18kPa、および35kPaとなっており、圧縮時には浅いところ（集中荷重点からの距離が短いところ）ほど応力が高く、除荷後には深いところほど高くなっている。また、Sp8の最大主応力方向はほぼ真上を向いていることも分かる。さらに、最も左側の列の応力レベルがこの列の応力レベルより低いことも測定された。これは、横幅1mの成形板に集中荷重を加えて圧縮成形を行なったために、成形板中央の荷重点を中心とした応力の伝わり方をしたためであると考えられ、この圧力下では土壌が完全弾性体として挙動しないことが分かる。なお、表15に示した実験で耕うん刃が通過する6点のSSDセンサの除荷後の最大主

応力の平均値は9.2kPaであり、標準偏差は6.0kPaであった。なお、この応力図と先の変形、ひずみ図で時間に若干のずれがあるのは、先に述べたように変形の表示をサンプル時刻付近の代表値にしたためである。このことを考慮した上で、上部と下部のSSDセンサが囲む領域について、限界状態理論で用いる形式で表わした三次元グラフが図26である。比容積は圧縮成形後に測定した容積重から変形前の値を逆算する形で求めた。図のように上部、下部ともに同一の平面内の経路を辿っていることが分かる。

図27は用いた土壌の一軸圧縮試験と三軸圧縮試験の状態経路と上記の圧縮成形時の経路を比較したものである。本装置で得られた土壌状態はかなりゆるい状態なので、三軸圧縮試験に用いるサンプルにはさらに圧縮を加え、一軸圧縮試験のサンプルにはそれより強い圧縮を加えてかなり密な状態にしてから各試験を行なった。それでも三軸試験では、圧縮を高めて行くと横方向の膨張が起こり、いわゆる太鼓型にサンプルが変形し、せん断面がはつきりと確認できなかつた。よつて、図の比容積は実際より少なめに表示されていると考えられる。図のように土質力学で用いられる試験の応力状態がいかに高いかが分かる。なお、両圧縮試験より得られた破壊線は次式であつた。

$$\tau \text{ [kPa]} = 30 + 0.36 \sigma \quad : \quad \phi \approx 20^\circ$$

4 - 4 結語

この様にほぼ静的な領域において従来から示されている応力の伝わり方や応力状態が、開発した SSD センサによって実験的に得られることが分かり、土の不均一性の度合を考慮に入れれば、本実験で求めていたシステムの能力がほぼ達成できた。しかし、今後改良すべき問題点も明確にされた。それは、SSD センサを取り巻く土粒子の状態の影響によって、SSD センサの出力にばらつきが出る点。含水比が多い場合にはミキサでのかくはん時に土塊が粗大化する傾向があり、細粒化が難しくなるとともに、締め固めの際の変形の度合が大きくなるため土壌槽充填時と圧縮成形後との地表面差が大きくなり、成形後の土の容積が小さくなる点。載荷板に集中荷重を加えて土を成形する方法では、土壌に圧力勾配が生じる点。さらに、20秒程度の迅速締め固めではより硬度の高い土を成形するのは困難である点などがあげられる。しかし、含水比や硬度を高くすれば、圧力センサと土との接触状態がよくなるため、応力の測定はかえってしやすくなると考えられる。

土の成形方法にはまだ多少の改良の余地があると考えられるが、本実験で用いた方法によって、最大約200kPa程度の応力状態で圧縮成形され、除荷後に3～15kPa程度の応力状態を持ち、密度と含水比の平均値に対する標準偏差が5%程度の土壌を最低1カ月間はつくれることが確かめら

れたと考えられる。

第5章 直線運動系耕うん実験

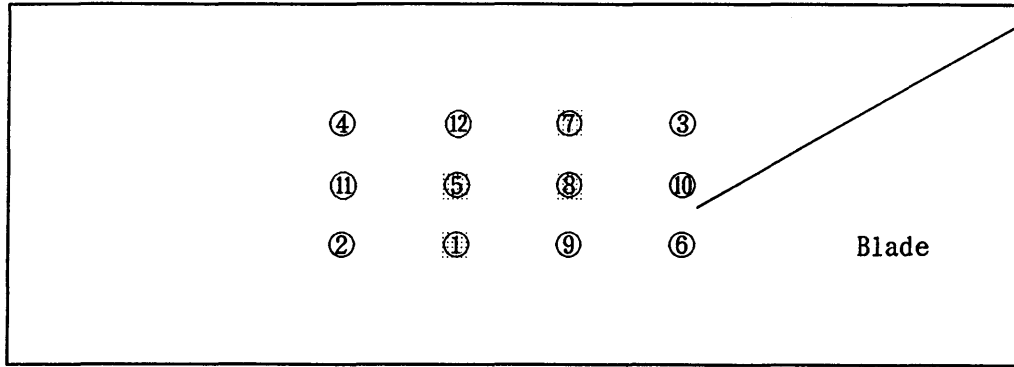
5-1 目的

動的性能試験も兼ねた直線運動系の耕うんモデル実験を行ない、本装置システムから得られるデータを分析する。

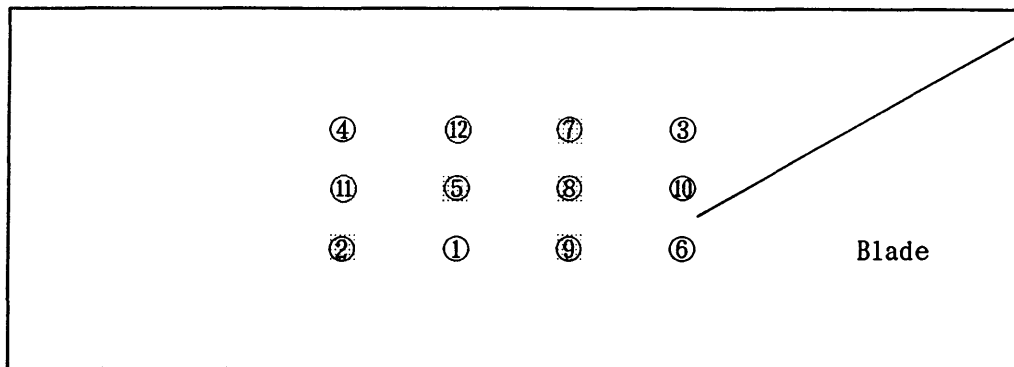
5-2 実験方法

圧縮成形された供試土について、主ブレードを用いて直線運動系耕うんモデル実験を行なった。実験に用いたブレードの切削角は、水平軸方向の力 F_x が比較的小さく⁵³⁾、周期的にせん断破壊面が形成され、かつ、刃先延長部分に引張り破壊が生じやすいと考えられる²⁸⁾約 30° とした。

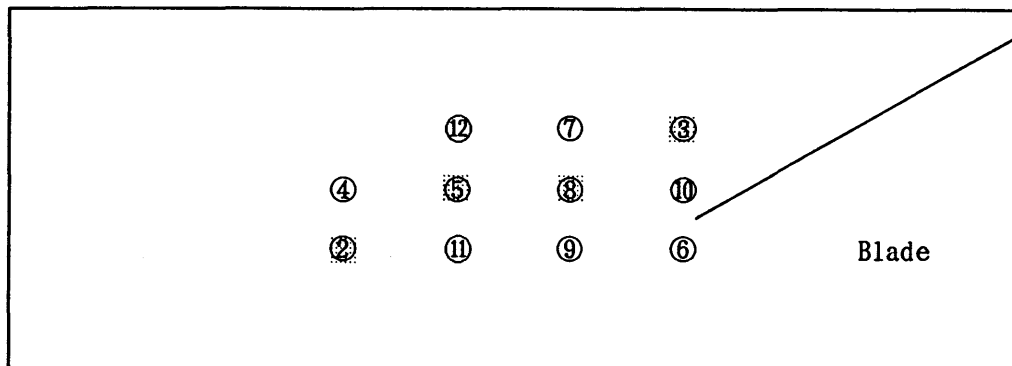
実験は、耕うん速度 13mm/s で密度 1300kg/m^3 、含水比 15% の条件で行なった実験①、これより耕うん速度を 35mm/s と早くして密度 1380kg/m^3 、含水比 14% のもとで行なった実験②、耕うん速度は 13mm/s 、密度 1360kg/m^3 で、含水比を 17% と高くして土壌を比較的硬くした実験③の3種を、結果の再現性を確かめるために各々複数回行なった。なお、山中式土壌硬度計で測定した成形土壌の硬度は実験①、②、③の順に土壌表面で 150kPa 、 80kPa 、 205kPa 、深さ 5cm のところでは 100kPa 、 65kPa 、 115kPa であった。



a) 実験①



b) 実験②



c) 実験③

図28 直線運動系耕うん実験でのSSDセンサの配置
(センサIDで表示. ■■■はデータを掲載したID.)

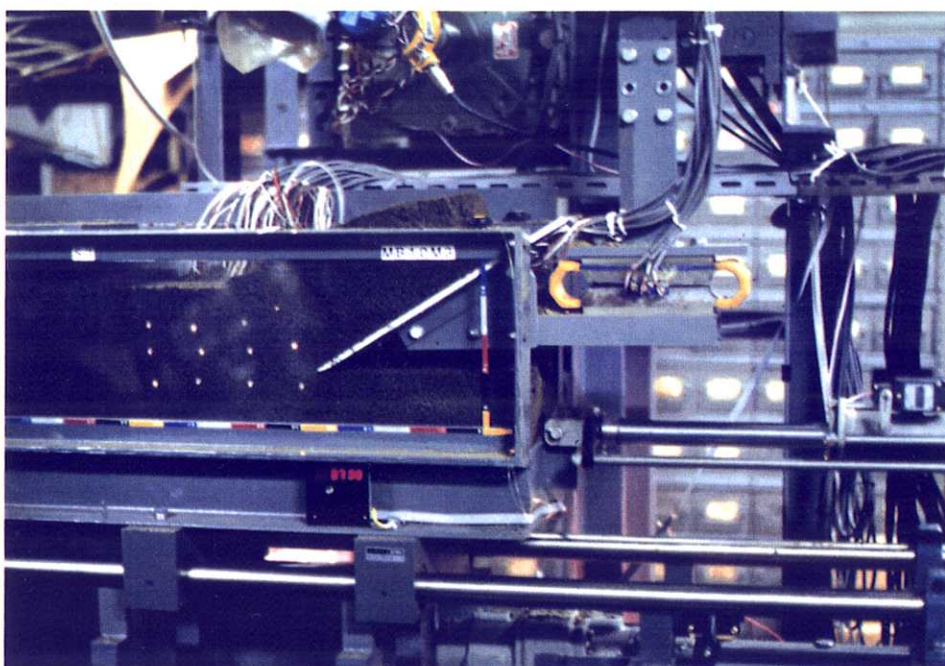


図29 直線運動系耕うん実験（1）

（測定開始約7秒後で、刃先がSSDセンサに接近している）

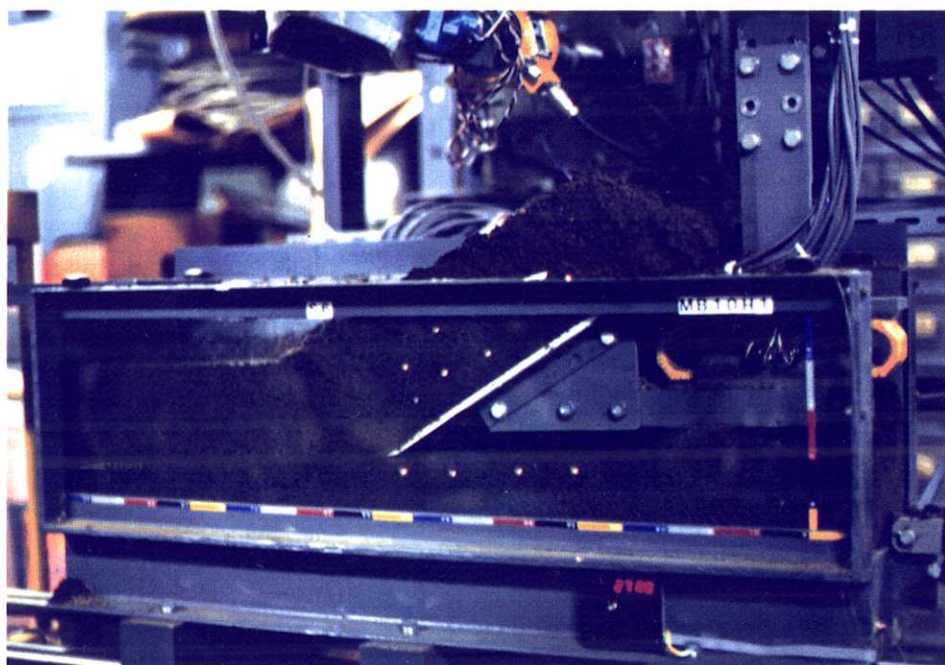


図30 直線運動系耕うん実験（2）

（測定開始約27秒後で、SSDセンサが未耕土と刃面上とに二分されている）

図28に用いたSSDセンサの配置を示す。最初、SSDセンサを12個用いていたが、実験②の実験後にセンサが1個破損したので実験③以降の実験ではセンサを11個用いた。

5 - 3 実験結果と考察

図29、30に SSDセンサを用いた実験の様子を示す。

図31～33に各実験におけるブレードにかかる水平方向分力 F_x (Draft に相当する)、および刃先より20mmのところと40mmのところのブレード面上にかかる圧力 P_a 、 P_b を示す。図のように F_x は周期的な変動を示しており、この周期の平均値は実験①で約0.2Hz、実験②で約0.7Hz、実験③で約0.2Hzとなっていた。これをブレードの動く距離にすると各々約66mm、53mm、62mmとなる。この周期性は土壌が圧縮とせん断を繰り返すために起こるものと考えられ、一般にせん断周期と呼ばれている。壤土において周期的せん断破壊は、耕うん速度の増加や含水比の増加によりやがて塑性流動になると報告されている⁷³⁾。また連続的な流れが起こるのは、砂のようにせん断破壊が連続的に起こるためであるとする報告もある²⁸⁾。本実験では図30のように土壌表面近くにせん断面が明確に確認できたが、せん断面はブレード近くになるとその鮮明さが失われていた。これは主にブレード面上の土の自重と、ブレード面と土壌との

摩擦力によるものと考えられるが、前述したように用いた摩擦力計の感度不良によりその量を確認することはできなかった。また、実験①における F_x のレベルが実験②、③よりも高かったのは、耕深が深かったためであると考えられる。つまり、本実験の範囲内ではれき土の重量が F_x の主因子になっていると考えられる。さらに、ブレード面上の圧力は、 F_x の波動とほぼ一致して瞬時に上昇する傾向がみられた。 P_b の出力が P_a に比べ低下しており、ブレード面上の圧力は刃尻の方に向かうにつれてほぼ一定の低い値になっていた。 P_a は F_x の山の部分で高い値を示す傾向があり、 F_x の波動が主に刃先にかかる力に左右されていることが分かる⁶⁶⁾。つまり、土壌の圧縮が主にブレードの刃先部分の作用によることが分かる。さらに、せん断周期が比較的長い実験①と③の P_a 、 P_b の出力が、せん断周期が比較的短い実験②より大きくなっており、土の圧縮性が大きいほど刃先にかかる力が大きいことが分かる。また、実験①と実験③の F_x を比較すると、波形の各山と谷の差である振幅が、含水比が高い実験③の方が小さくなっていることが分かる。この傾向がれき土の、周期的せん断破壊から連続的な流れへの変化と関係があると考えられる。

図34は実験①の4つのSSDセンサの動きで土壌変位を表わしたものである。図中プロット横の数字は時間を表わしている。図より、ほぼ同じ水平位置にあるSp8とSp5が同様の軌跡を辿っていることが分かる。この

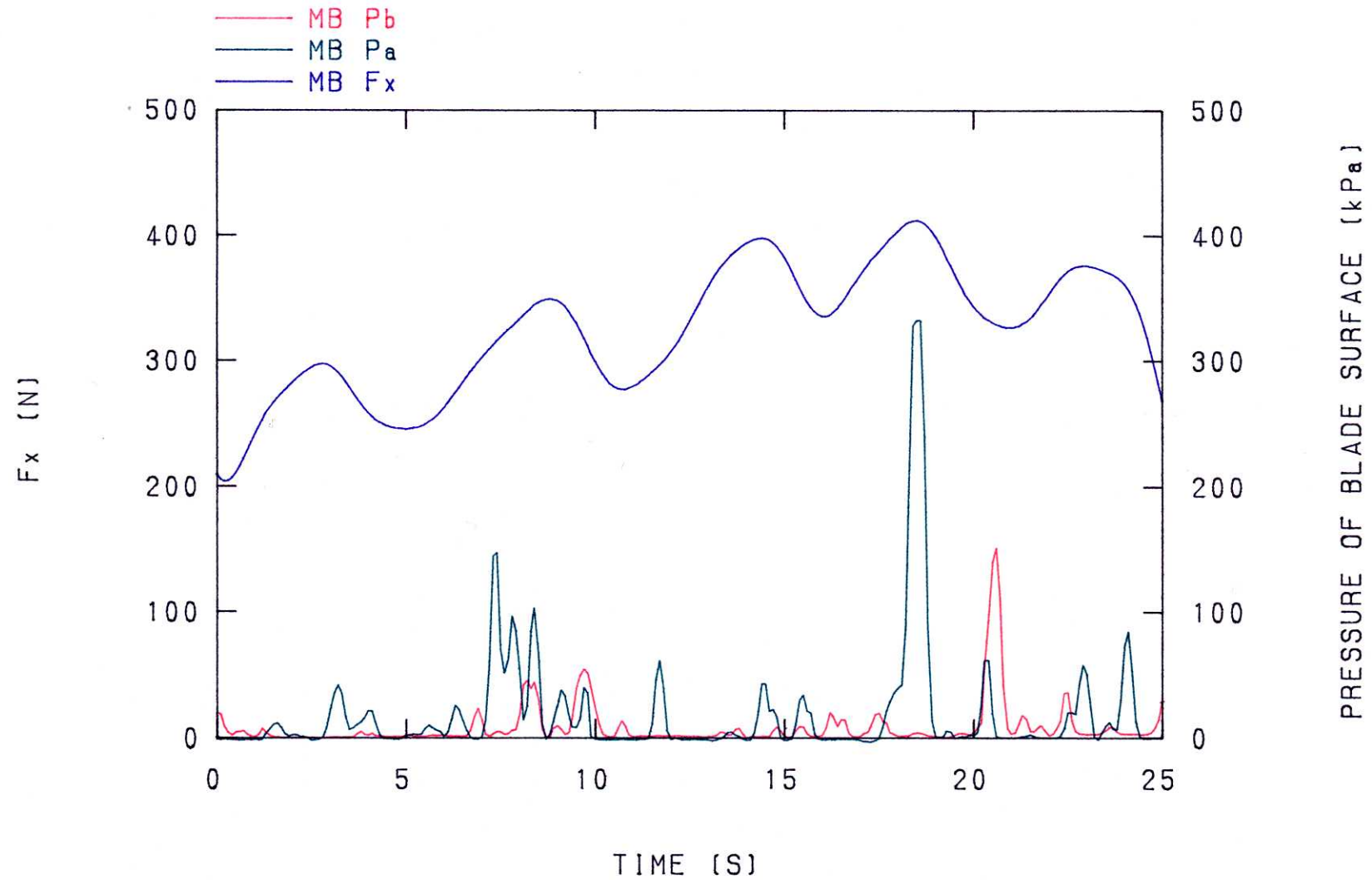


図31 直線運動系耕うん実験①の水平分力 F_x とブレード面上の圧力 P_a , P_b

(ブルー：水平方向分力 F_x , グリーン：刃先から20mmのところの刃面上にかかる圧力 P_a , レッド：刃先から40mmのところの刃面上にかかる圧力 P_b)

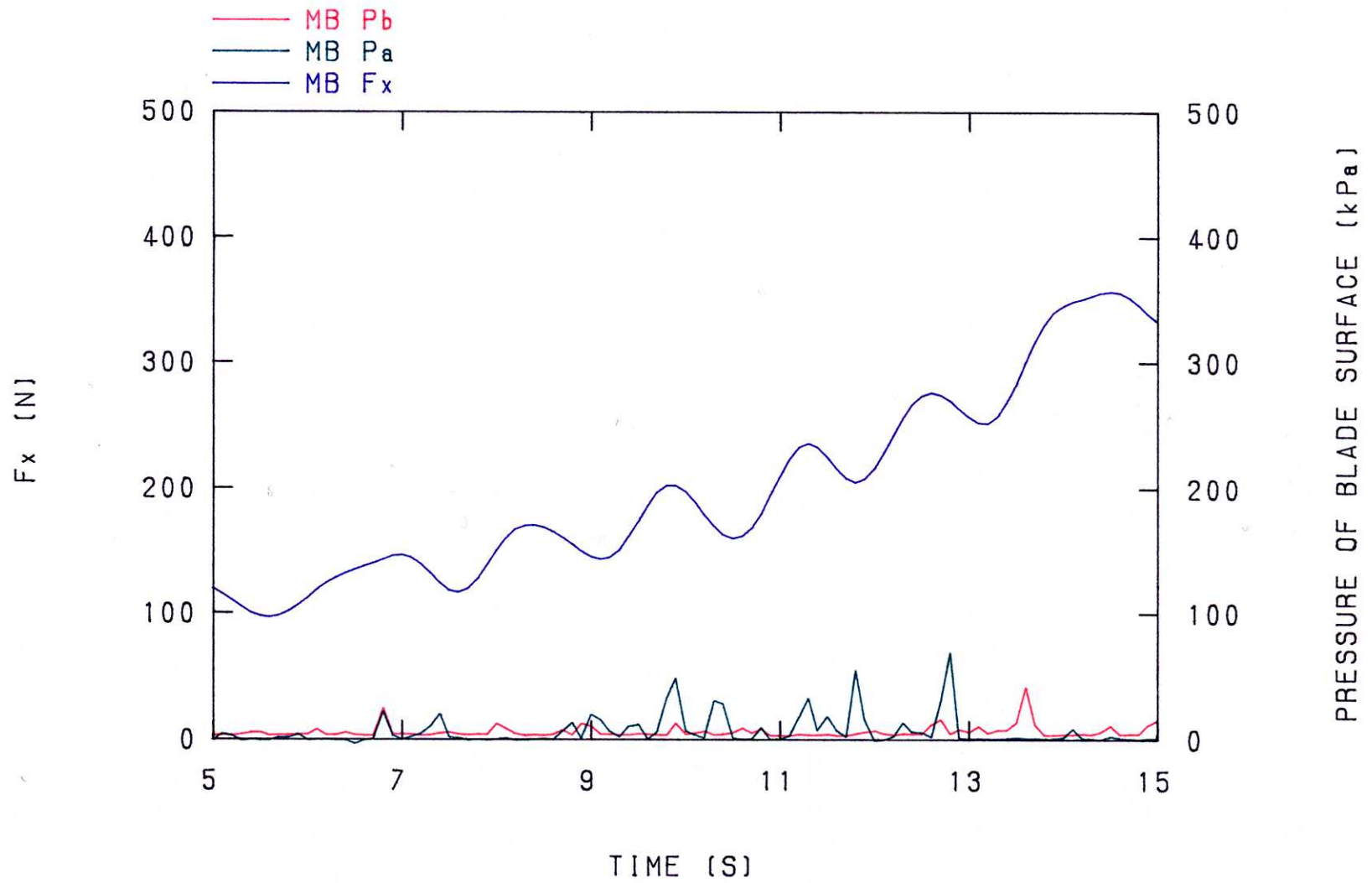


図32 直線運動系耕うん実験②の水平分力 F_x とブレード面上の圧力 P_a , P_b

(ブルー：水平方向分力 F_x , グリーン：刃先から20mmのところの刃面上にかかる圧力 P_a , レッド：刃先から40mmのところの刃面上にかかる圧力 P_b)

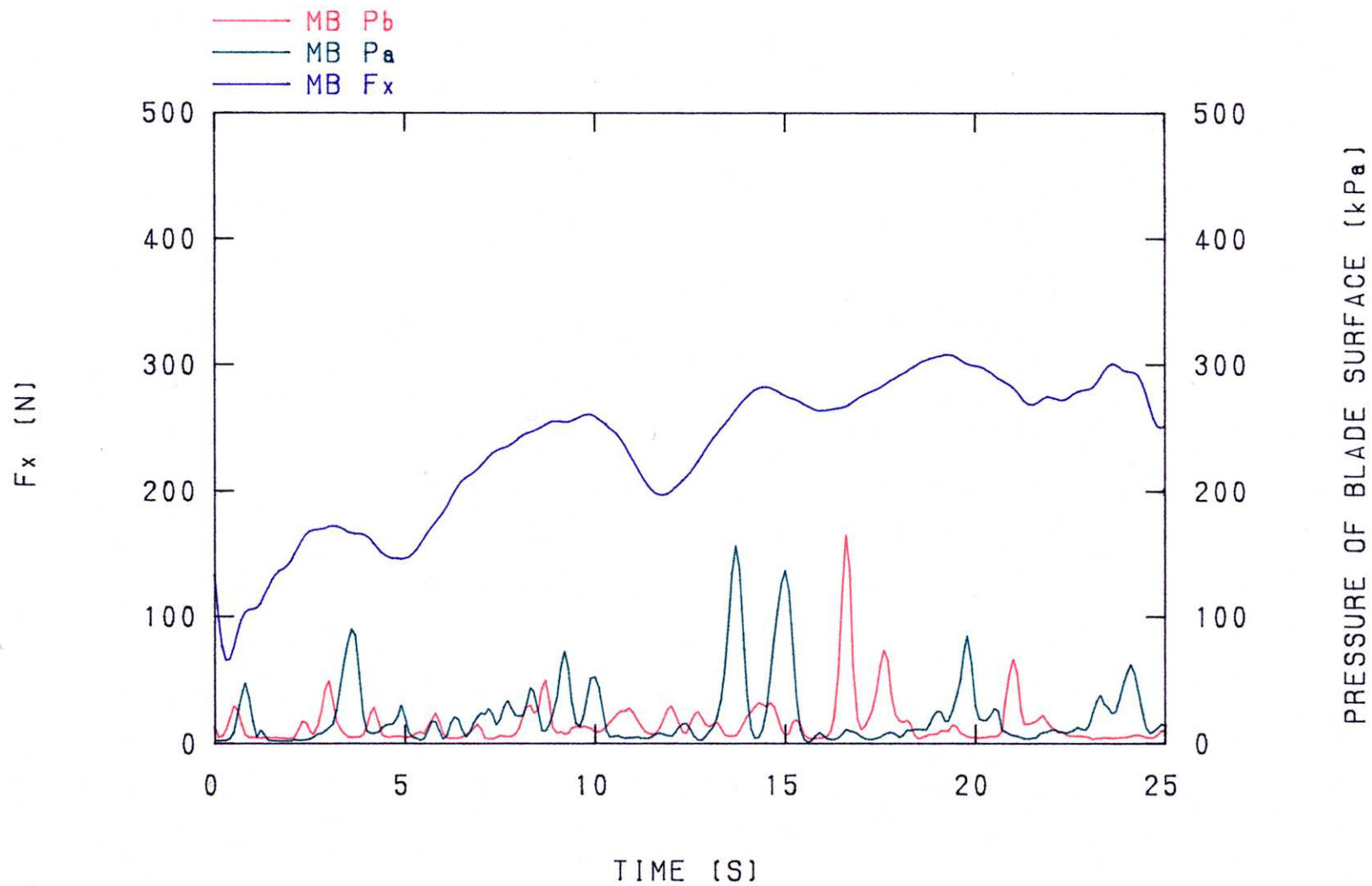


図33 直線運動系耕うん実験③の水平分力 F_x とブレード面上の圧力 P_a , P_b

(ブルー：水平方向分力 F_x , グリーン：刃先から20mmのところの刃面上にかかる圧力 P_a , レッド：刃先から40mmのところの刃面上にかかる圧力 P_b)

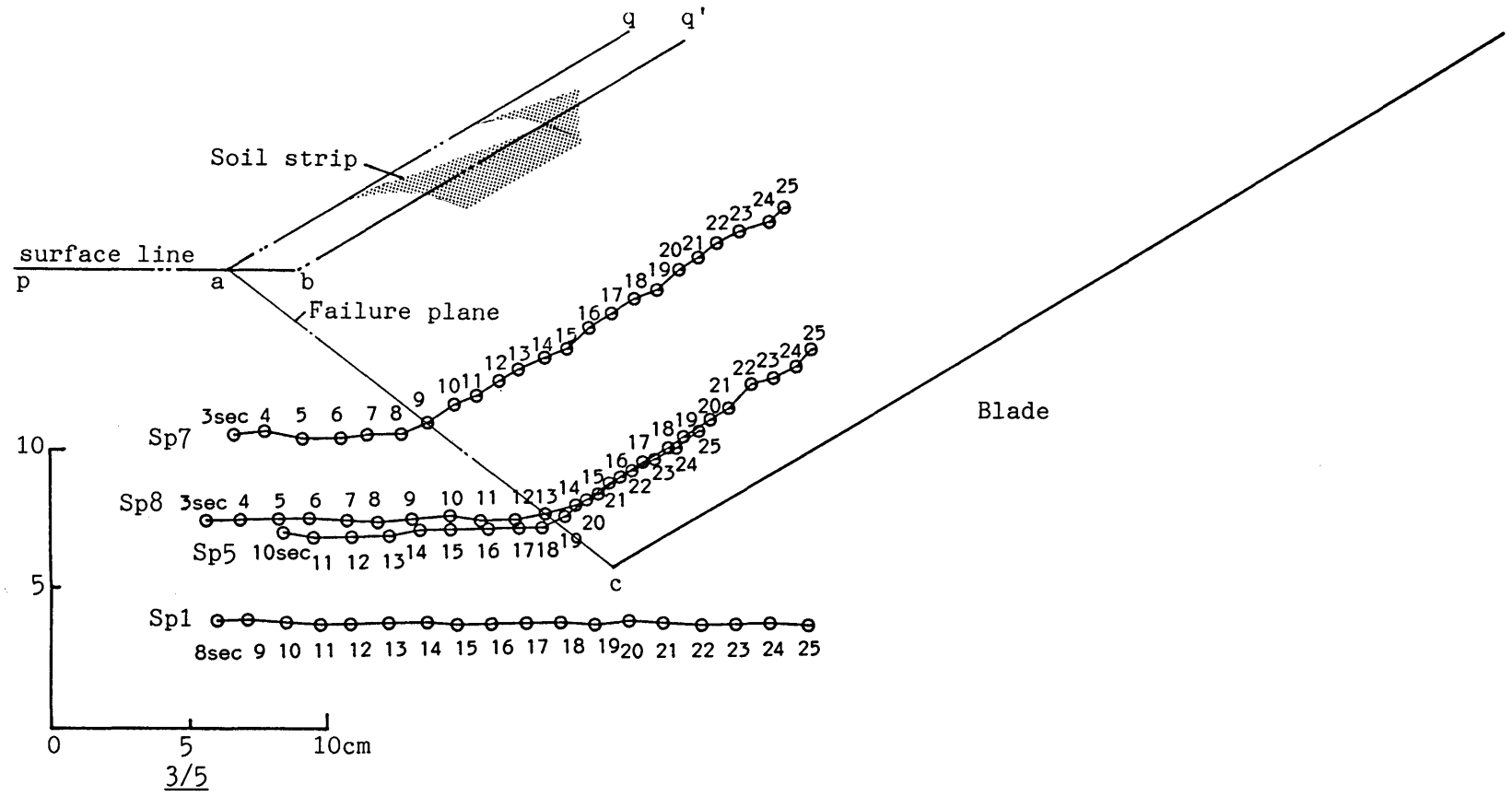


図34 直線運動系耕うん実験①の土壤変位

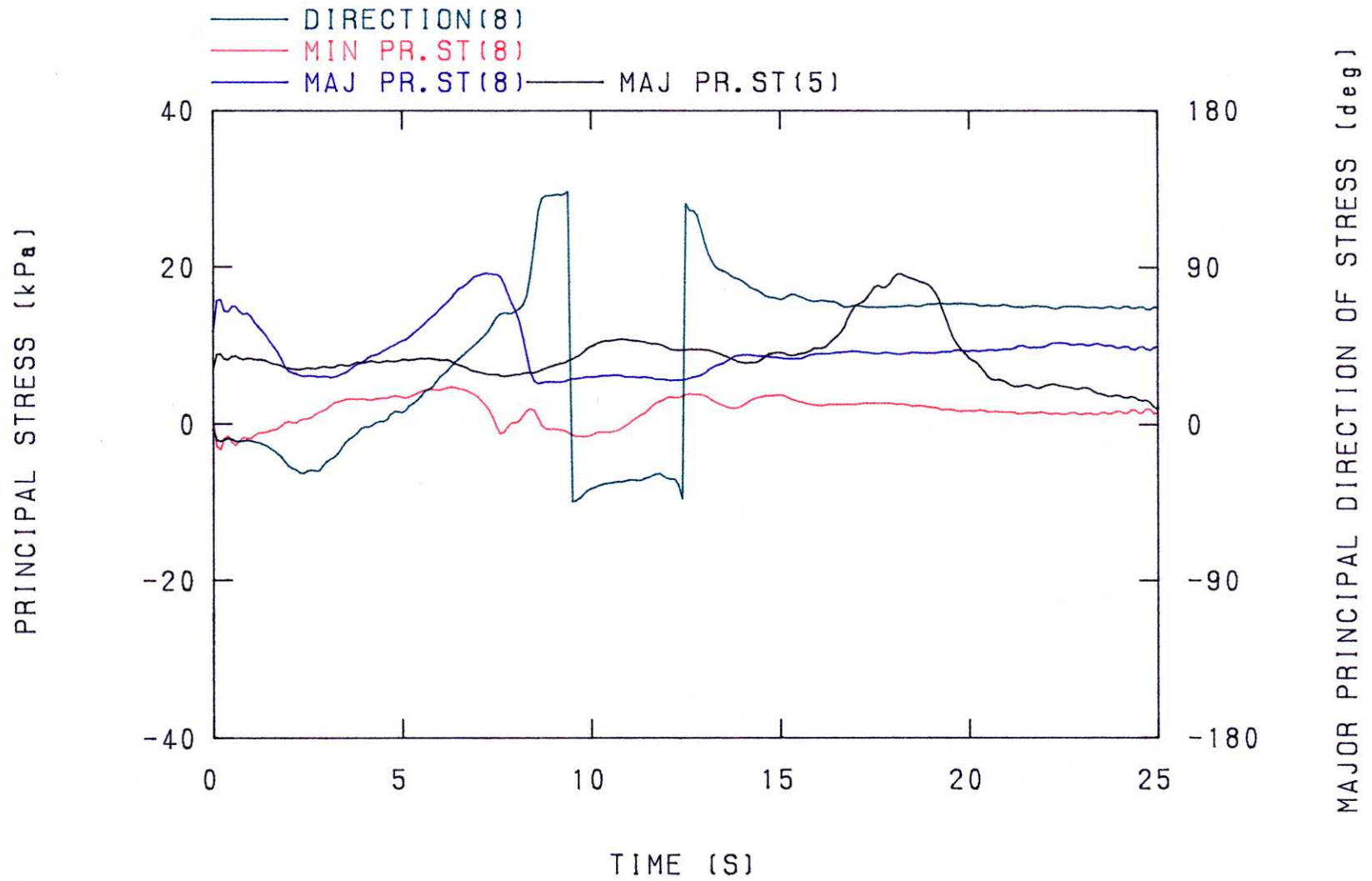


図35 直線運動系耕うん実験①の土壌内応力変化 (その1)

(ブルー: 最大主応力 (Sp8), レッド: 最小主応力 (Sp8), グリーン: 最大主応力方向 (Sp8), ブラック: 最大主応力 (Sp5))

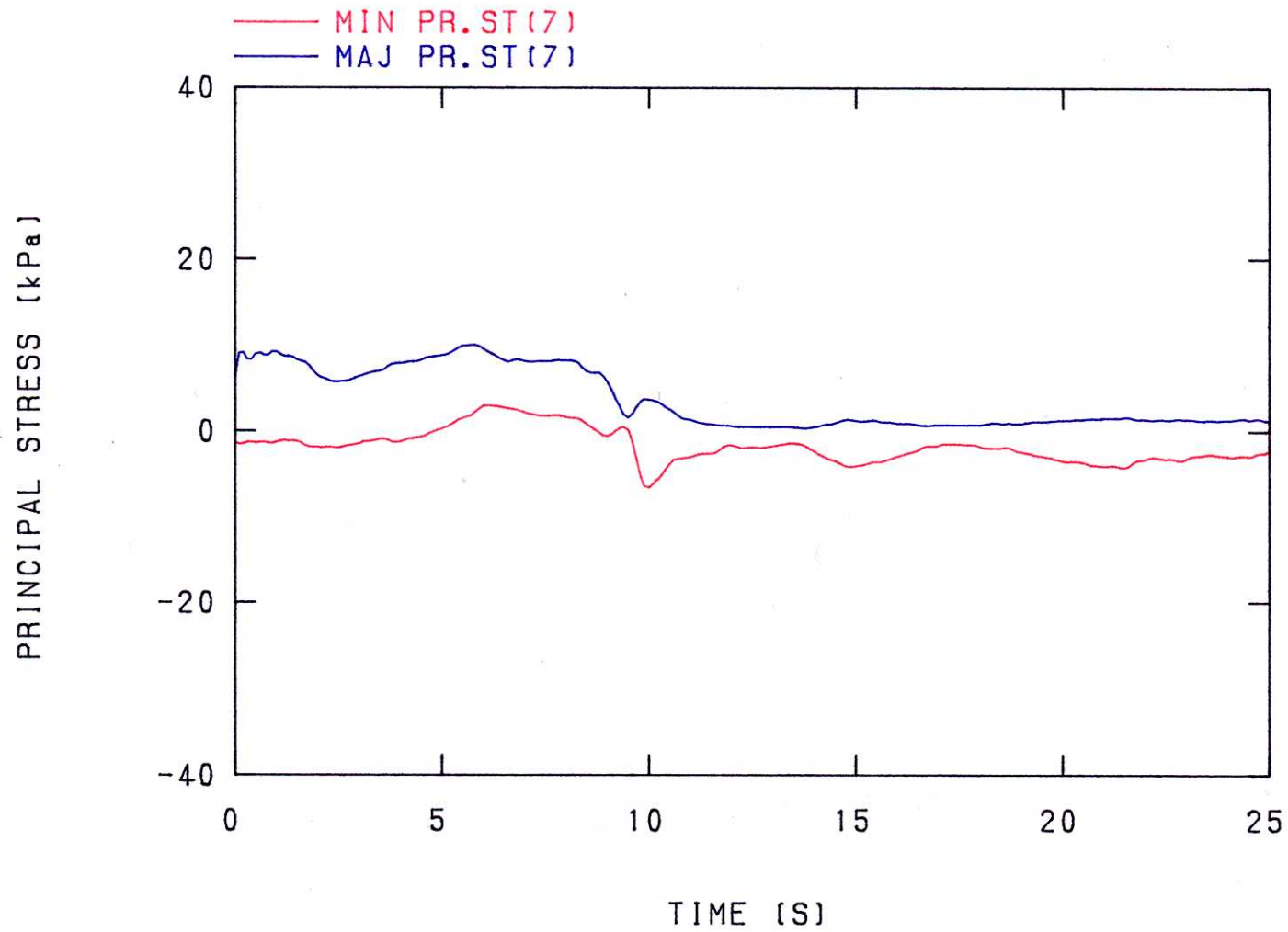


図36 直線運動系耕うん実験①の土壌内応力変化 (その2)

(ブルー: 最大主応力 (Sp7), レッド: 最小主応力 (Sp7))

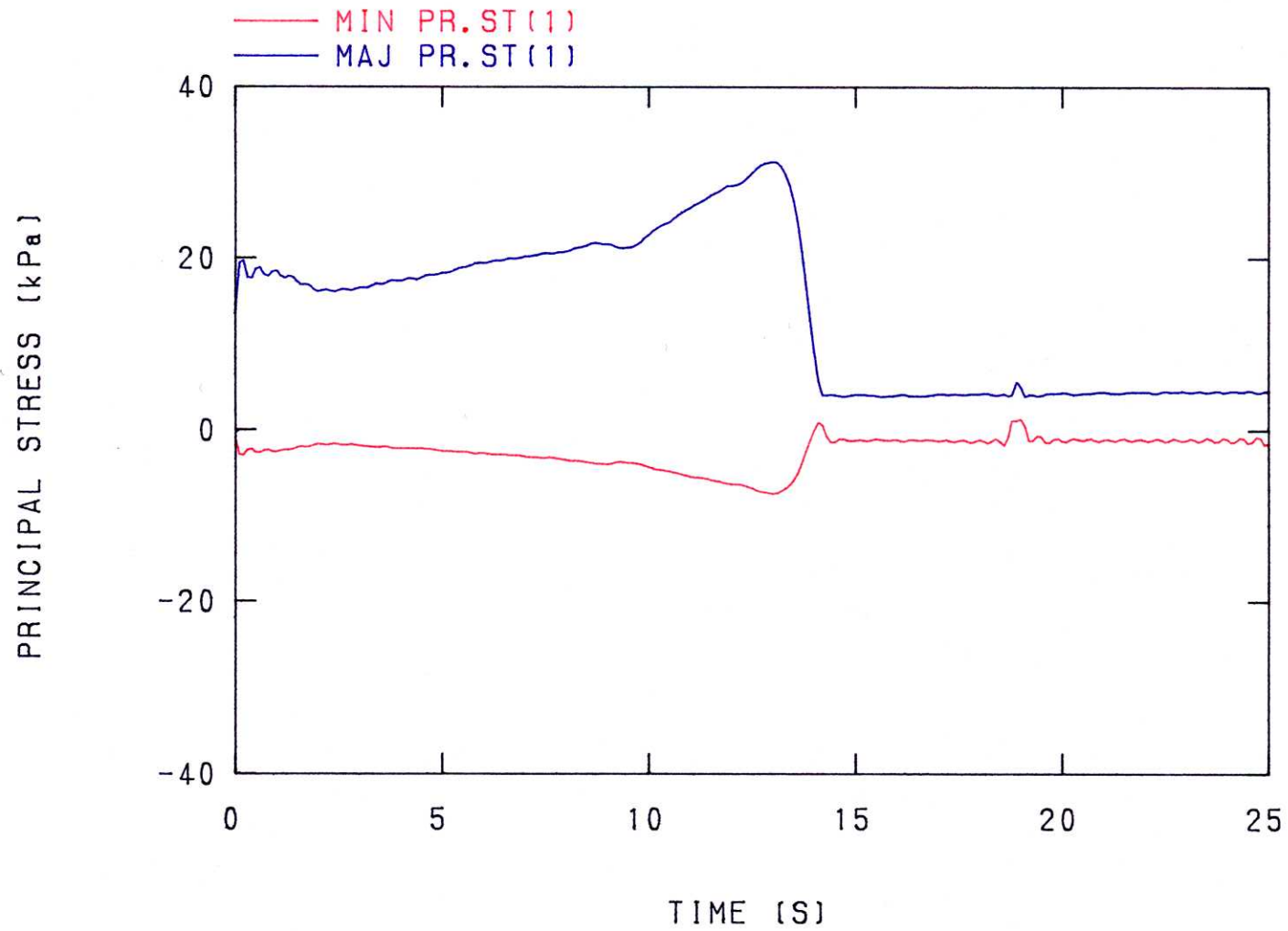


図37 直線運動系耕うん実験①の土壌内応力変化（その3）

（ブルー：最大主応力（Sp1），レッド：最小主応力（Sp1））

2つのセンサの土壌内応力を表わしたものが図35である。これらのセンサはブレードによって最も応力が高くなる刃先上方に位置しているが、それでも最大主応力の最大値が20 kPa程度になっており、低い応力レベルで耕うんが行なわれていることが分かる。図のように2つのセンサは時間遅れを持ちながらほぼ同じ波形の出力を示した。このことより SSD センサによる土壌内応力測定の実現性がほぼ確かめられたといえる。しかし詳しく分析してみると、最大主応力の極大値を取る位置が少しずれている。その時間はSp8が約8秒で、位置はせん断破壊線より左側になっているのに対し、Sp5 では約18秒でほぼせん断破壊線上となっている。これは形成されるせん断破壊面とセンサの位置関係によるものと変位図でのわずかな軌跡の差から推定できる。つまり、せん断周期と SSD センサの間隔が等しくなっていれば、同じ時間間隔で極大値を示すものと考えられる。さらに、センサを取り巻く土壌の状態の影響と、せん断周期自体のばらつきによる影響も考えられる。これらのことより、SSD センサでは土壌内応力計測が土壌変位計測に比べてはるかに外的環境の影響を受け易いことが分かる。これを解決するには周辺環境に影響を与えずさらに多点同時計測が可能な、光ファイバを用いた圧力測定器の開発⁴⁾などによるセンサのより小型化が必要であると考えられる。

ほかに、せん断角 β ($\angle cab$) は 37° で、 $45 - \frac{1}{2}\phi \approx 35$ (ϕ : 内部摩擦角)⁸⁶⁾ とほぼ等しい値が測定された。ところで Söhne⁶⁶⁾ によれば、せ

ん断線はブレード上のれき土の頂点(q)と未耕土表面の接点(a)と刃先(c)を結んだ線となるが、本研究で用いた画像計測では土壌と土壌槽の境界線がはつきりと観測できないために、土壌表面を直線 paqではなく直線 pbq' と測定しがちである。このため、土壌変位図における土壌表面を示す線(2点鎖線)は概略であり、若干の誤差を含んでいる。

図35の Sp8の出力に注目してみると、破壊面の形成後刃面上では最大主応力はほぼ一定の値をとっており、その方向はブレードと平行になっている。このことから、れき土同士がゆるやかな圧縮をしながらブレード面上を移動していることが分かる。また、最小主応力の値より、ブレード近上部では圧縮せん断破壊が起こっていることが確認できる。

図36はSp8よりも表面に近いところに位置しているSp7の最大および最小主応力の出力である。Sp7はSp8と時間的に同様の傾向を示しているが、その出力レベルは破壊面形成時およびブレード面上を移動していく際の両方で低い値をとっている。破壊面での土壌内応力分布は、砂の場合は刃先から土壌表面に近づくにつれて減少していき土壌表面部で0になり、壤土の場合は破壊面上で一定の値をとると報告されている²⁸⁾。つまり、本研究で用いた砂壤土の場合は砂の応力分布の傾向を示しているといえるが、砂の場合と同様に土壌表面部で0になるか、それとも、0にはならず砂と壤土を折衷した傾向を示すかは本実験では測定できなかった。ブレード面上での応力差は破壊面の現れ方(図30参照)からいえるように、

ブレード面上に近いき土の方が摩擦力の影響を強く受けて圧縮傾向が高いことが推定できる。

図37はブレードより下に位置している Sp1の最大および最小主応力の出力である。最大主応力は刃の延長線よりも前方で極大値をとったあと急激に低下し、以後ほぼ一定値をとっている。またこの時、最小主応力が負の値を示している。これは、壤土などを小さな切削角のブレードを用いて耕うんした時に生じるき裂の発生⁴¹⁾ (裂断型²⁷⁾) と類似した現象が起こったためと考えられ、刃先より前方下部において引張り破壊が起こること²⁸⁾を示している。

つぎに、図38～41に実験②の、図42～45に実験③の土壌変位および土壌内応力変化を示す。

実験②では、ブレードより上方に位置しているSp7、8の最大主応力は、せん断破壊面上で極大値をとり、その値は実験①よりも高く表面に近い部分でも減少せず、壤土の応力分布と同じ傾向を示した。また、ブレード下方 (Sp9) の応力変化傾向は実験①と同様であるが、そのレベルは低かった。これは土壌のゆるさに原因があるものと推定できる。

実験③では、圧縮成形後の残留応力レベルが下層ほど高くなっていた。これは含水比の上昇による土壌の圧縮性の増加が原因であると推定できる。この傾向は耕うん中でも現れ、最大主応力の極大値は実験①よりも4倍近い値を示した。また、ブレード上方の応力分布の仕方は、実験②

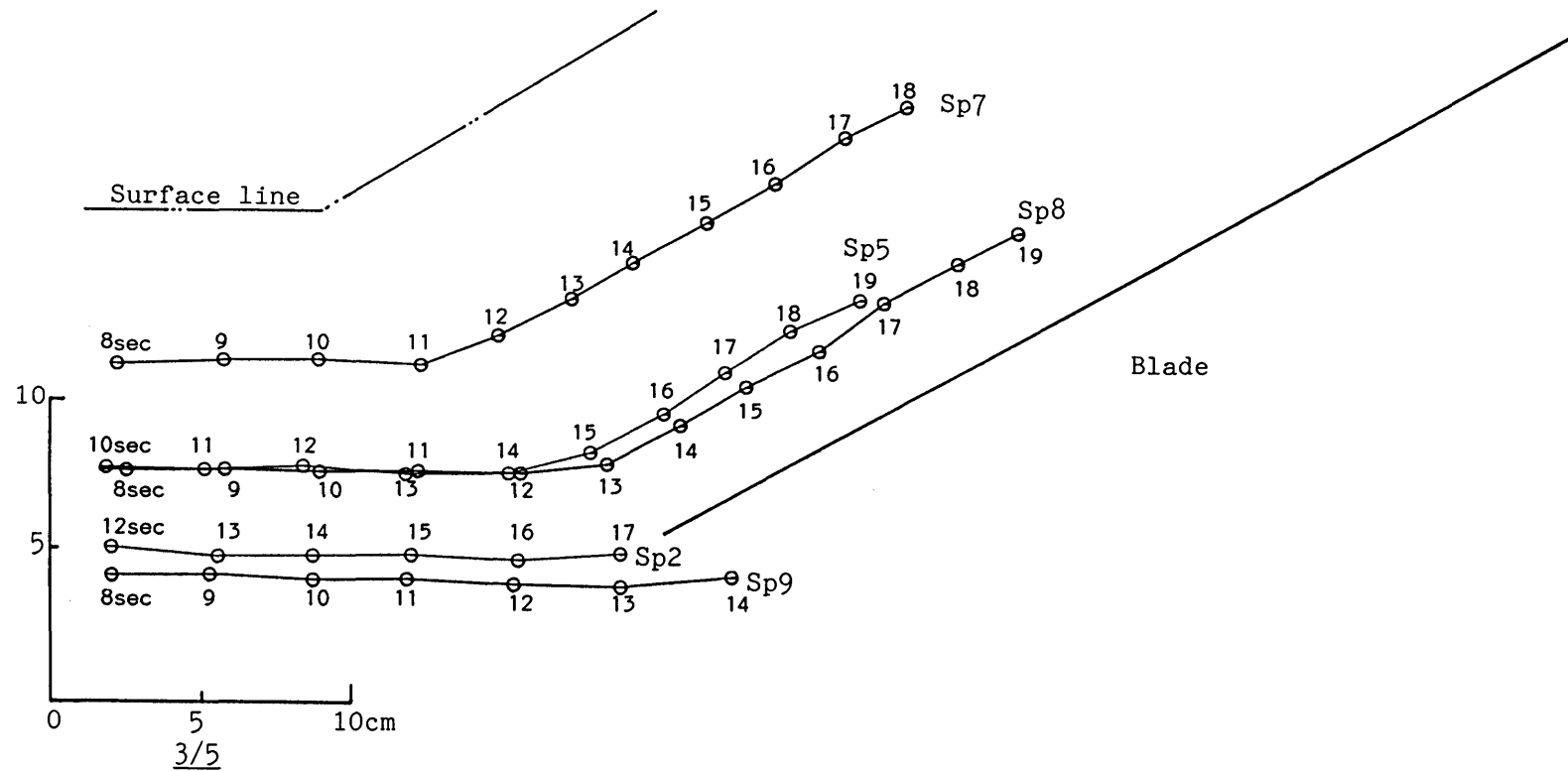


図38 直線運動系耕うん実験②の土壌変位

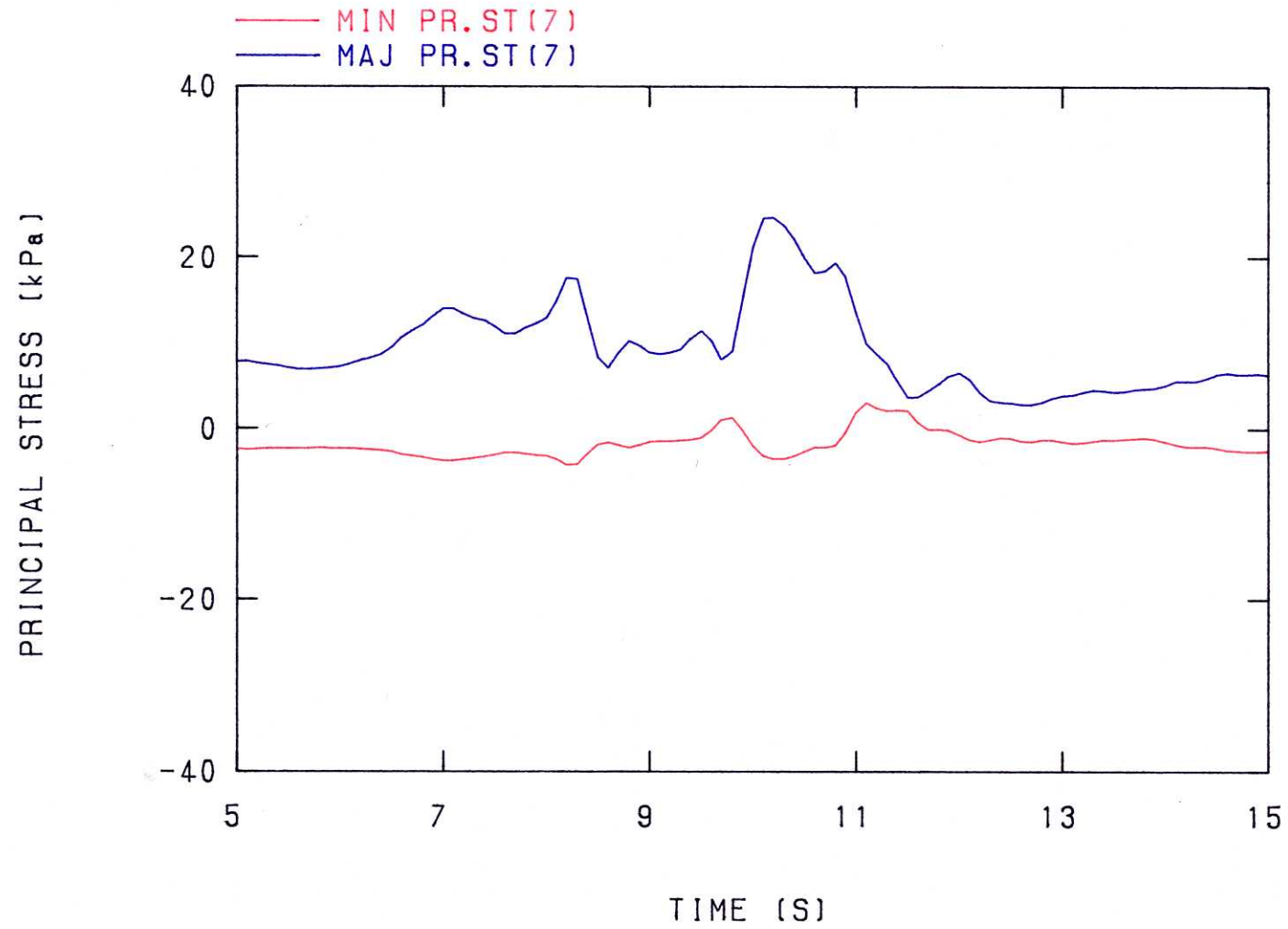


図39 直線運動系耕うん実験②の土壌内応力変化 (その1)

(ブルー：最大主応力 (Sp7) , レッド：最小主応力 (Sp7))

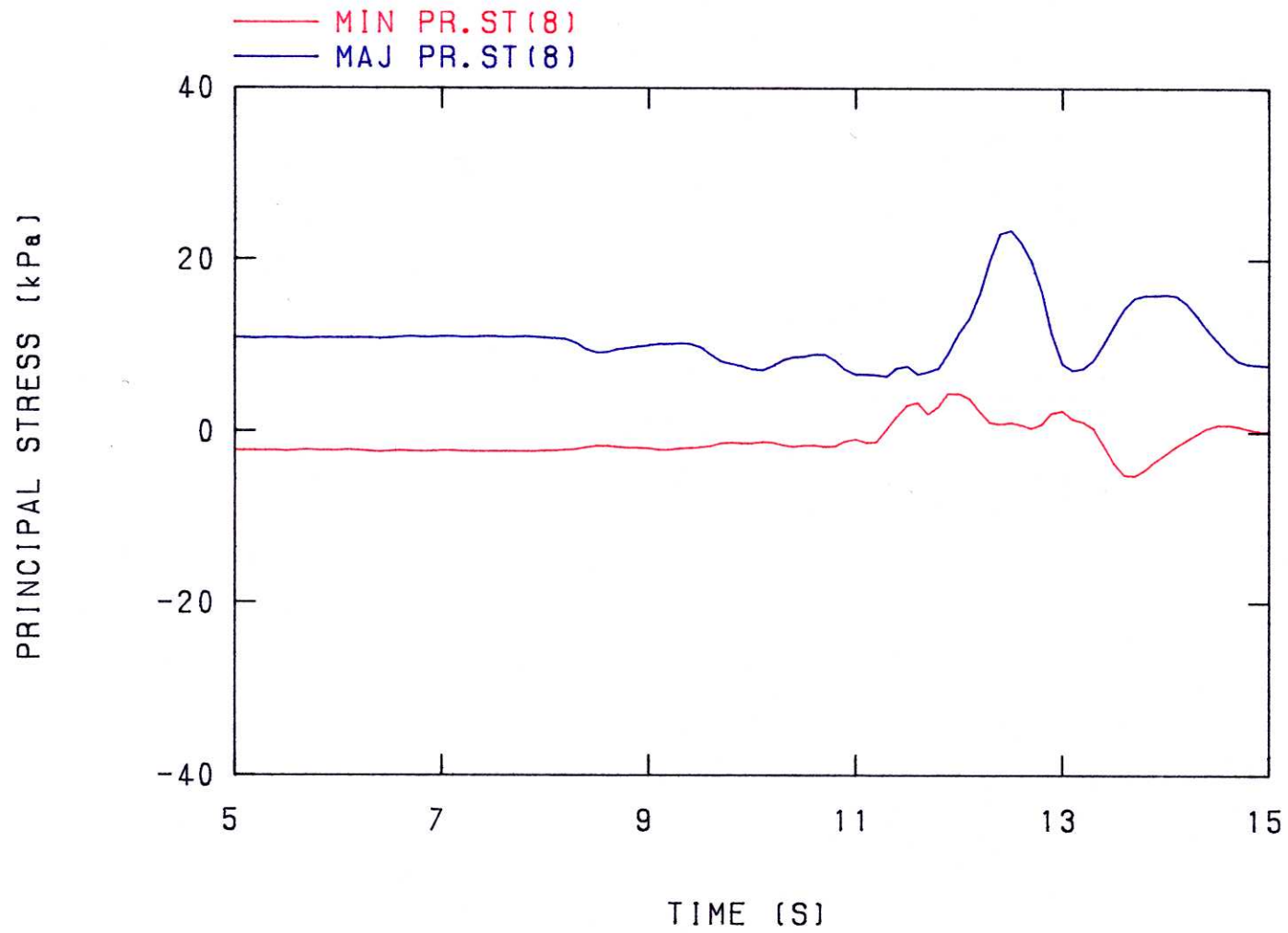


図40 直線運動系耕うん実験②の土壌内応力変化 (その2)

(ブルー：最大主応力 (Sp8) , レッド：最小主応力 (Sp8))

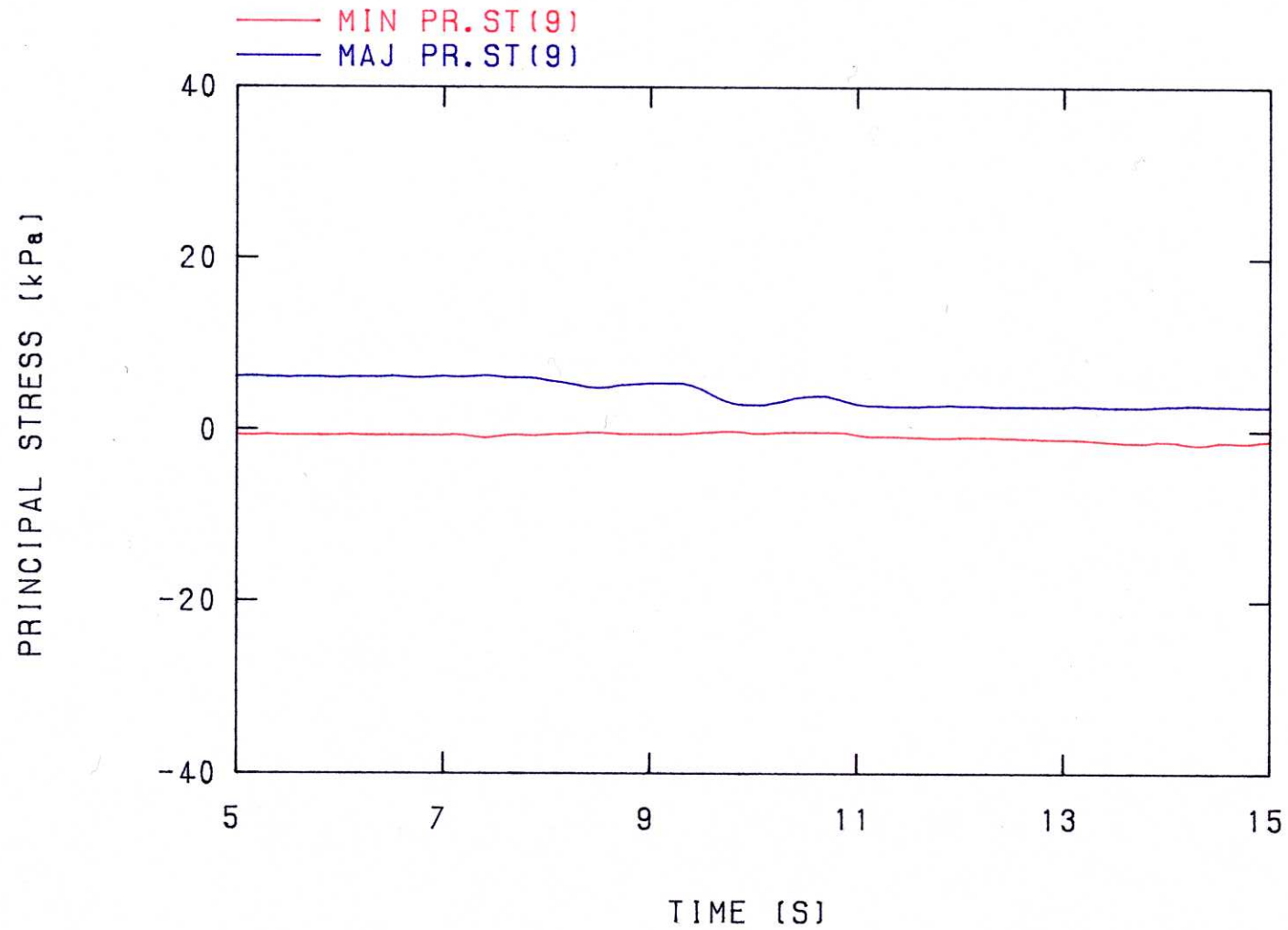


図41 直線運動系耕うん実験②の土壌内応力変化 (その3)

(ブルー: 最大主応力 (Sp9), レッド: 最小主応力 (Sp9))

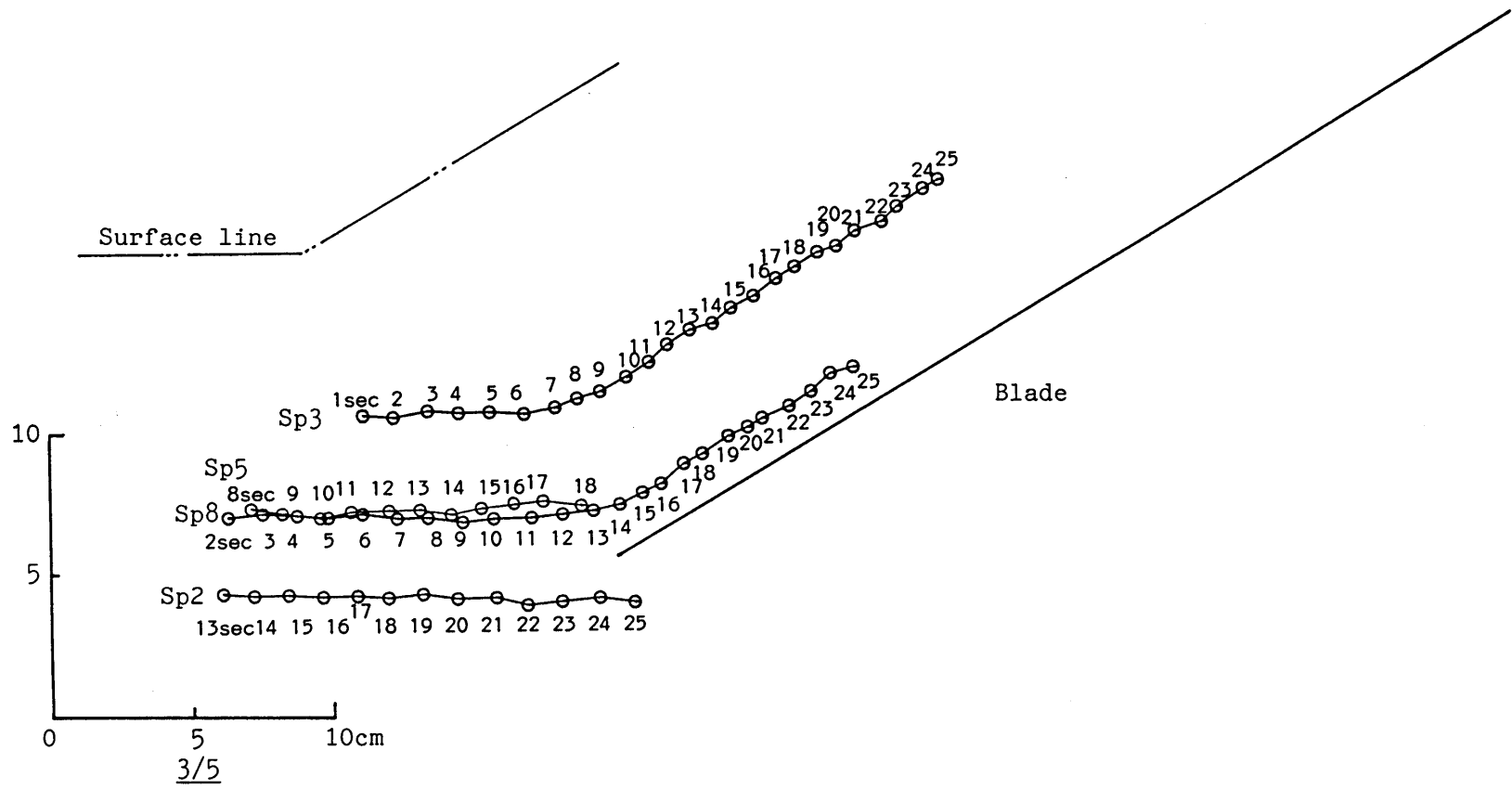


図42 直線運動系耕うん実験③の土壤変位

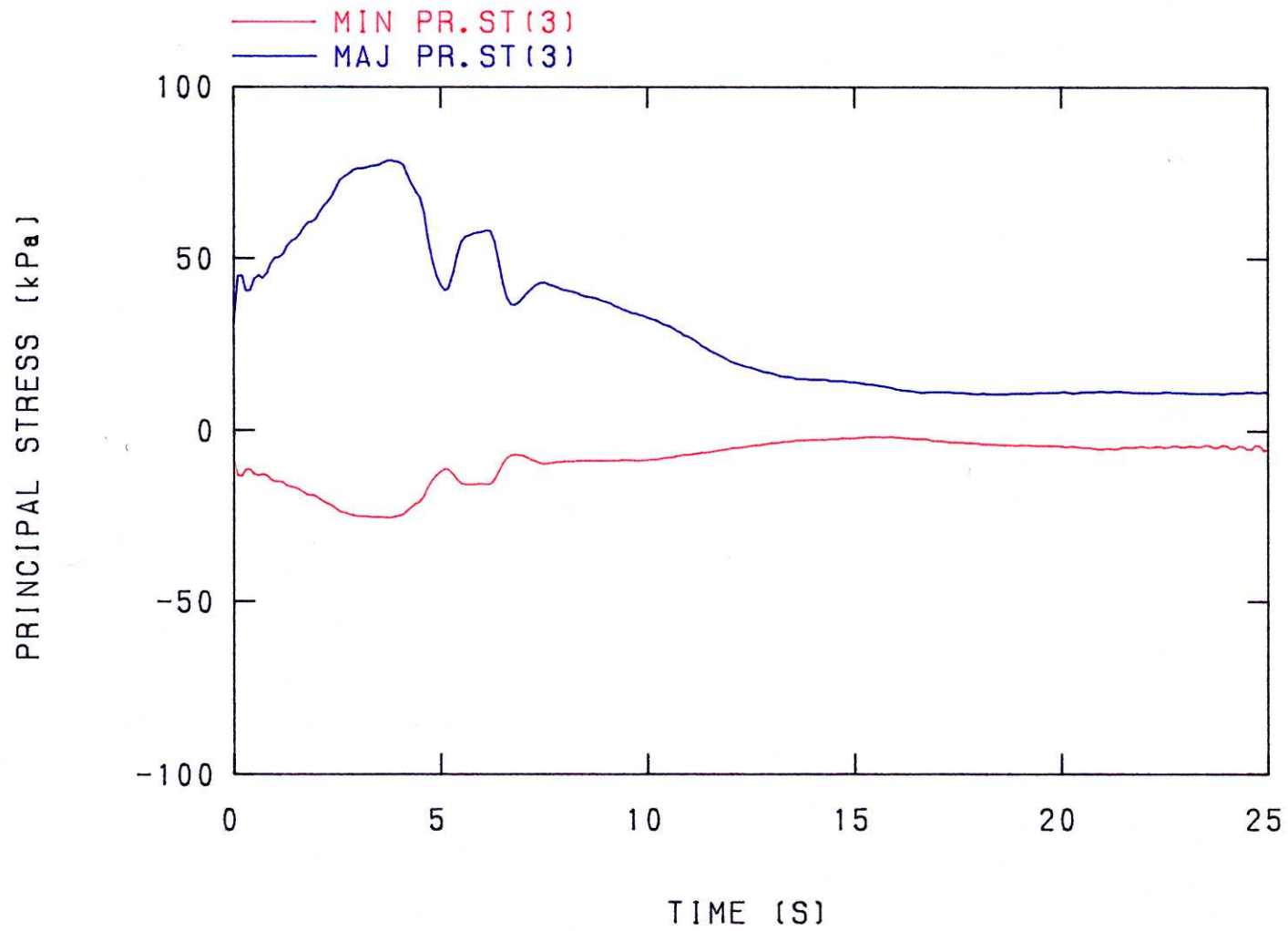


図43 直線運動系耕うん実験③の土壌内応力変化 (その1)

(ブルー: 最大主応力 (Sp3), レッド: 最小主応力 (Sp3))

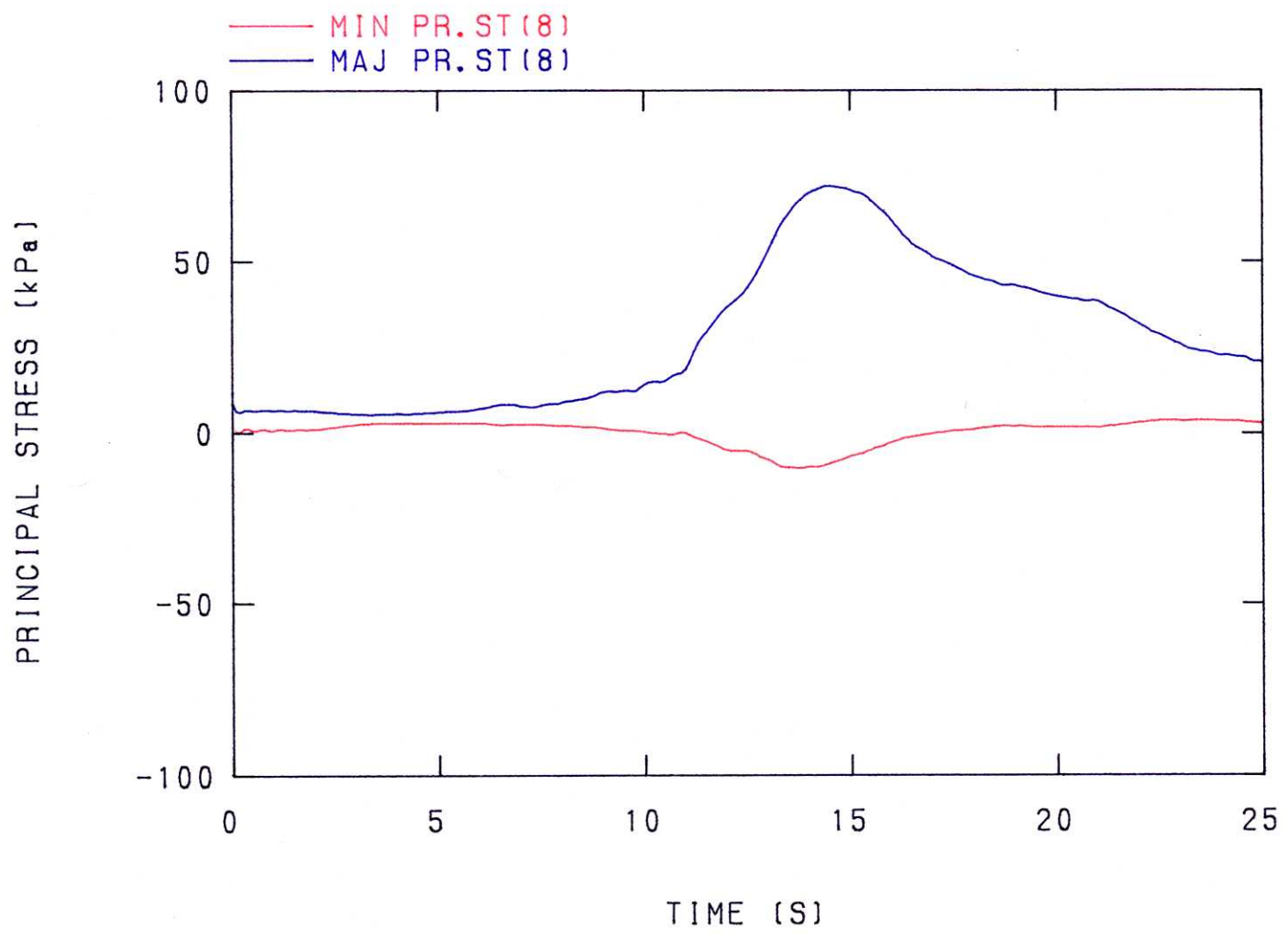


図44 直線運動系耕うん実験③の土壌内応力変化 (その2)

(ブルー：最大主応力 (Sp8) , レッド：最小主応力 (Sp8))

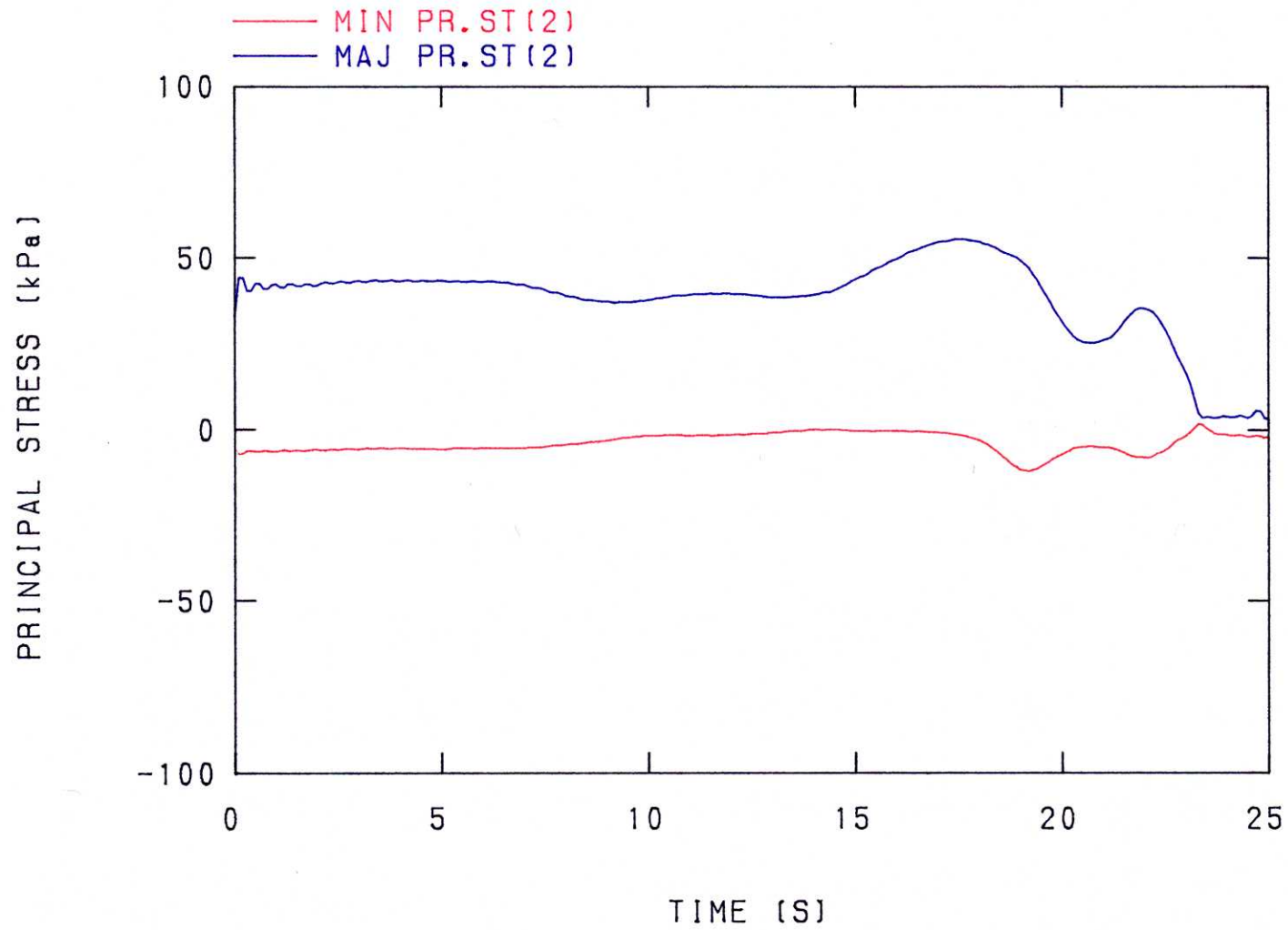


図45 直線運動系耕うん実験③の土壌内応力変化 (その3)

(ブルー：最大主応力 (Sp2)，レッド：最小主応力 (Sp2))

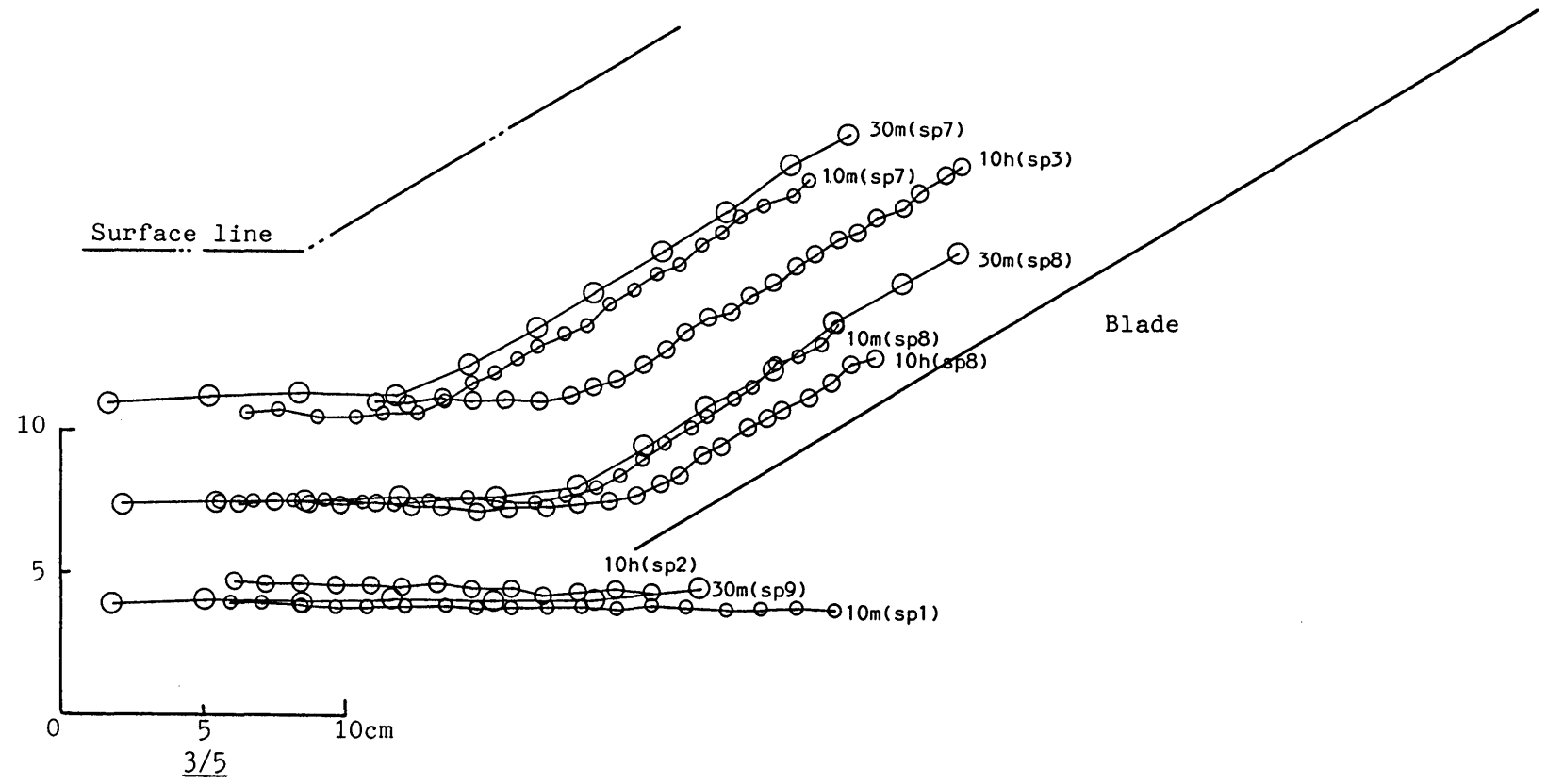


図46 直線運動系耕うん実験での土壌変位比較

(10m：実験①，30m：実験②，10h：実験③)

と同様に壤土型の分布を示したが破壊面の位置は刃先よりやや面上に寄っていた。さらに、ブレード下方の応力からは実験①同様に裂断が起きていることが分かる。しかし応力レベルが高い割には F_x の出力レベルが実験①や②に比べて実験③が高いわけではないことから（図31～33参照）、土壌内応力の上昇は F_x の波形の違い、つまり波形の谷の部分に影響を与えていると考えられる。それも極大値そのものではなく、刃先からブレード面上にかけての応力分布の差にあると考えられる。実験①や②では破壊面前方で極大値をとった後急激に応力が減少しているのに対して、実験③では徐々に応力が減少している。このことと、図46に示すように土壌の軌跡が実験③だけブレード面に接近していることから、実験③ではせん断破壊面の形成後に速やかに応力が解放されず、れき土がまだ圧縮を受けた状態にあることが F_x の出力に影響を与えていると考えられる。

図47は実験①の隣あう4つのSSDセンサ位置（図34参照）を線で結び囲まれる領域の変形を表わしたものである（Sp7とSp8のn秒とn+1秒で囲まれる領域、Sp5とSp1のn秒とn+1秒で囲まれる領域）。また図48には、Sp7の1秒間に移動する長さのx軸方向成分の垂直ひずみ変化、Sp8の1秒間に移動する長さのx軸方向成分の垂直ひずみ変化、および、Sp7とSp8の距離のy軸方向成分の垂直ひずみ変化を代表時間でプロットしてある。図49には、Sp1の1秒間に移動する長さのx軸方向成分の垂直ひ

ずみ変化、およびSp1とSp5の距離のy軸方向成分の垂直ひずみ変化を代表時間でプロットしてある。なお、縦軸正方向は膨張を表わし、負方向は圧縮を表わす。図48より、刃先前方に位置する7秒から13秒にかけて土壤が縦方向に膨張し、横方向には圧縮を受ける傾向がみられる。この位置はせん断破壊面の位置であり土壤内応力が極大値をとる位置とも一致している。また、図50に示すようにせん断ひずみ $\frac{1}{2}d\theta$ （n秒におけるSp7とSp8 およびn+1秒におけるSp7がつくる角度を θ とする）は、8、9秒で膨張を示し、10秒～13秒では圧縮を示した。このように、土壤変位計測によってせん断面の形成の様子を詳しく示すことができた。さらに、ブレード面上の土壤（14秒以降）は縦方向にはほとんど変化せず、横方向の変化はブレード面に近いところより土壤表面に近いところで変化が激しいことが分かる。このことはせん断面の見え方をうらづけている。また、刃先下部の土壤は引張り破壊が生じたと考えられる13秒付近で縦方向に変化していることが図49より分かるが、その変化量はわずかである。

ところで、図に示したx方向の1秒間の変位量は約10mmであり、変位計測の精度を考慮に入れると、S/N比の低下により垂直ひずみで0.2程度が誤差として考えられる。これが図に示されるようなx方向の垂直ひずみが上下する原因の一つとして考えられる。しかし、巨視的にみると定常的な流れに見える土の動きが、微少な圧縮、膨張を繰り返しながら

ら動いているとも考えられるので、あえて平均化しなかった。x方向の土の流れが微視的にみるとどちらかであるのは、画像処理システムの精度の向上をもって解決できると考えられる。一方、y方向の垂直ひずみがx方向の垂直ひずみにより比較的安定しているように見えるのは、SSD センサ間がx方向の1秒間の移動量より比較的距離を保っていたので、S/N比が向上したためと考えられる。それでも変動量が決して一定であるともいえず、このことが先の定常的な流れを否定する一因でもある。同様の考え方がせん断ひずみについてもいえる。つまり、今までは定常的な流れと判断されていたものも、微視的な視野で見ると、微少な圧縮膨張を繰り返しながら流れている可能性が高いことが示せた。またこのことは、力の伝わり方、特に塑性波と関係があるとも考えられる。

以上のひずみ変化を SSDセンサの囲む領域の比容積で表わすとともに、図35～37で示した土壌内応力変化を領域内で平均化して平均垂直応力と偏差応力に置き換え、限界状態理論で常用される三次元座標にプロットしたものが図51である。この図では比較のため土壌の圧縮成形時と同じ尺度（図26）を用いた。このように耕うん時の応力レベルは圧縮成形時に比べて非常に低くなっていることが分かり、三軸圧縮試験のような従来行なわれている土質試験の応力レベルがいかに高いかが分かる。いいかえれば、低い応力レベルでも十分土の破壊、つまり、耕うんが行なわれることが分かった。しかし、これでは耕うん時の状態経路がはっきり

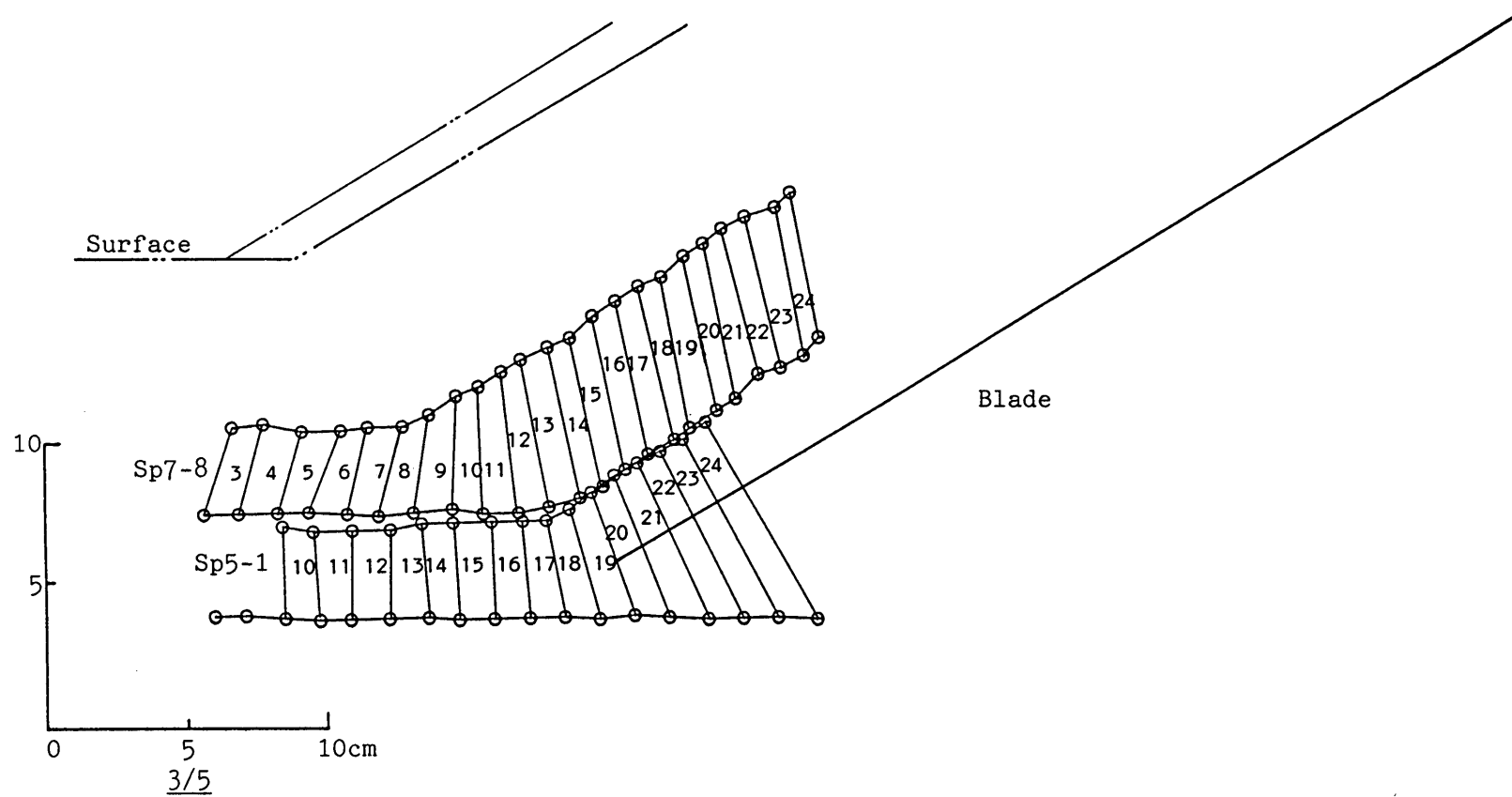


図47 直線運動系耕うん実験①の土壌変形
 (領域内の数字は代表時間(秒)を表わす)

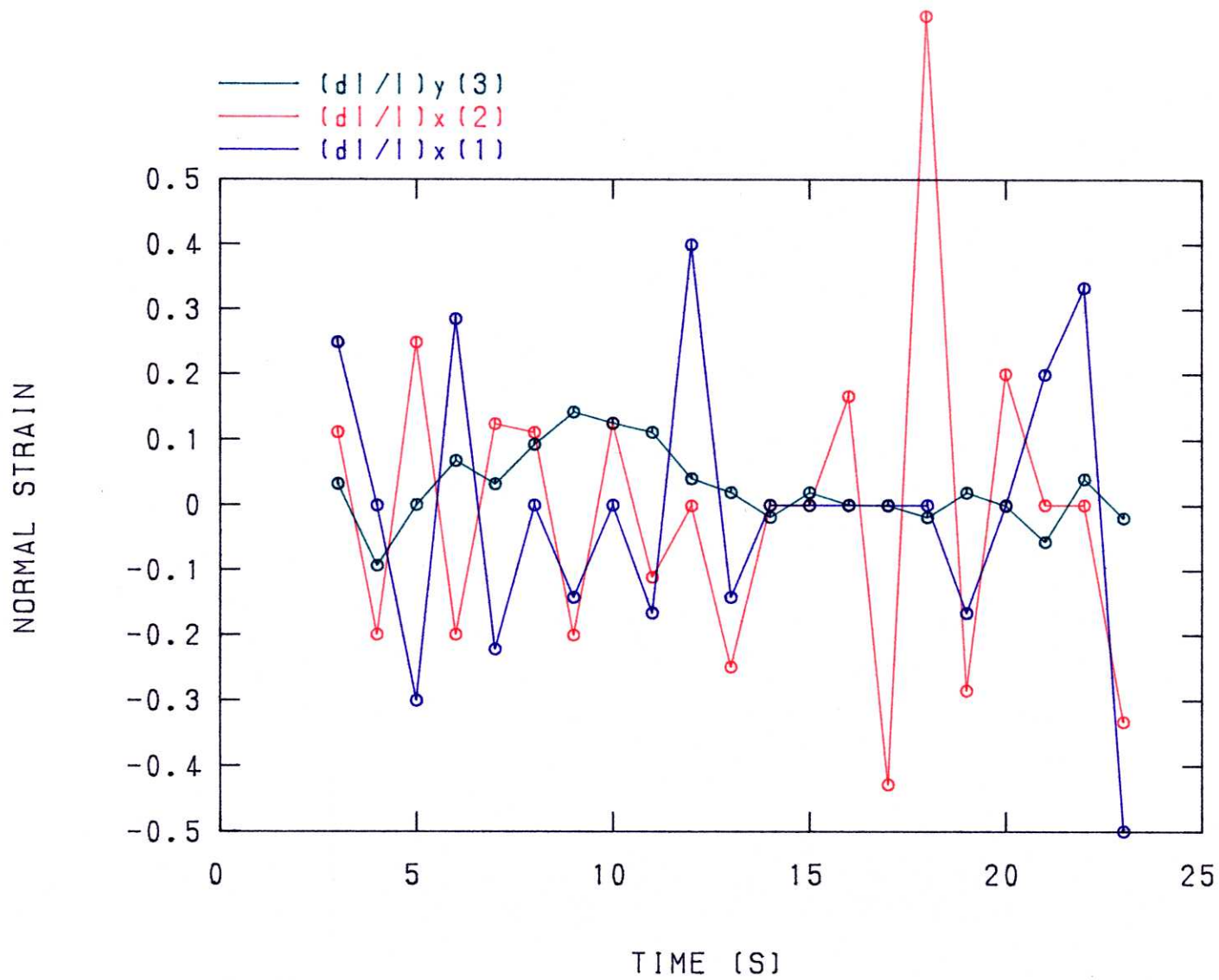


図48 直線運動系耕うん実験①の土壌上部の垂直ひずみ変化

(ブルー: $Sp7(n+1)-Sp7(n)$ [x軸方向], レッド: $Sp8(n+1)-Sp8(n)$ [x軸方向], グリーン: $Sp7(n)-Sp8(n)$ [y軸方向])

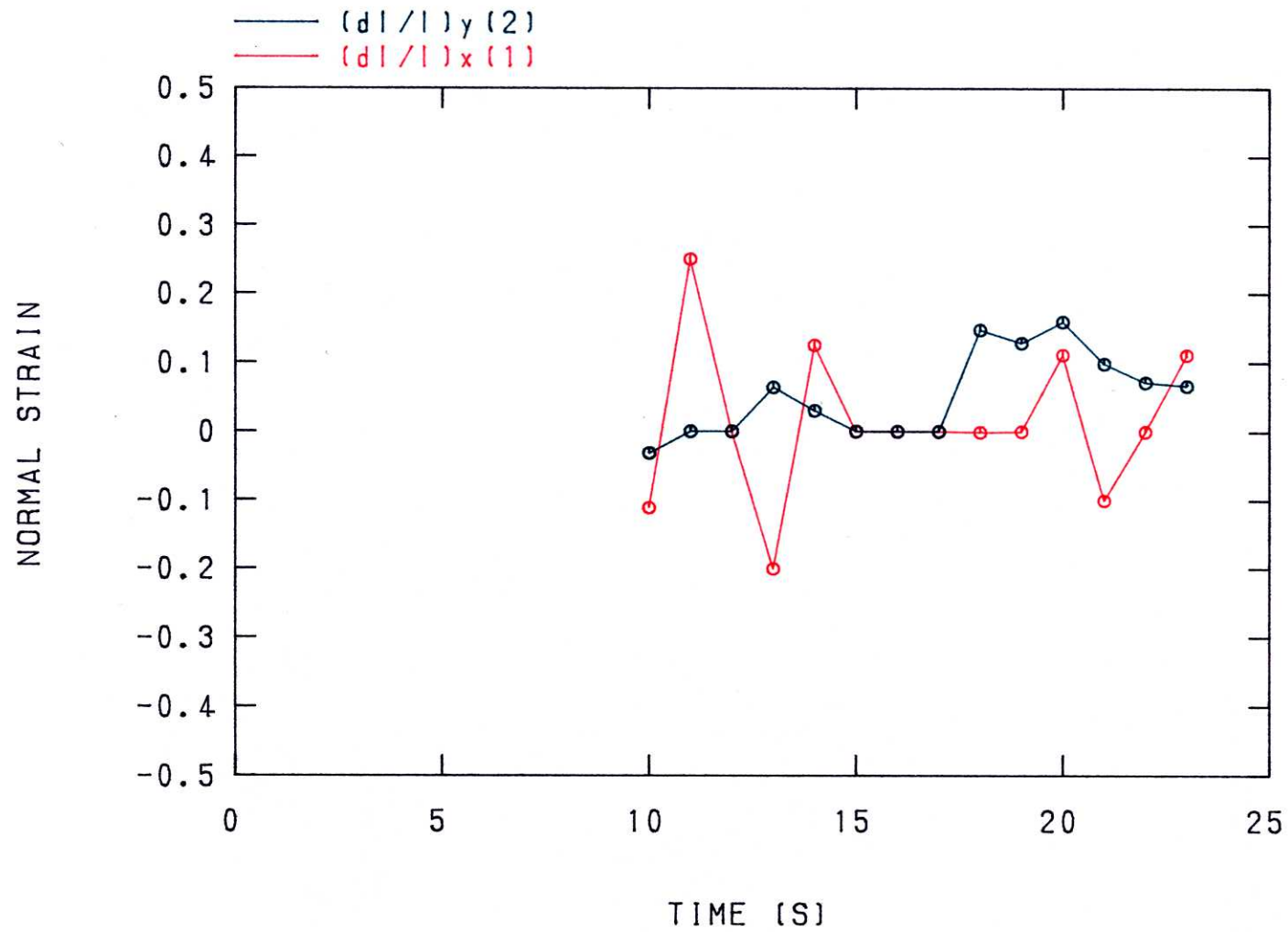


図49 直線運動系耕うん実験①の土壌下部の垂直ひずみ変化

(レッド: Sp1(n+1)-Sp1(n) [x軸方向], グリーン: Sp1(n)-Sp5(n) [y軸方向])

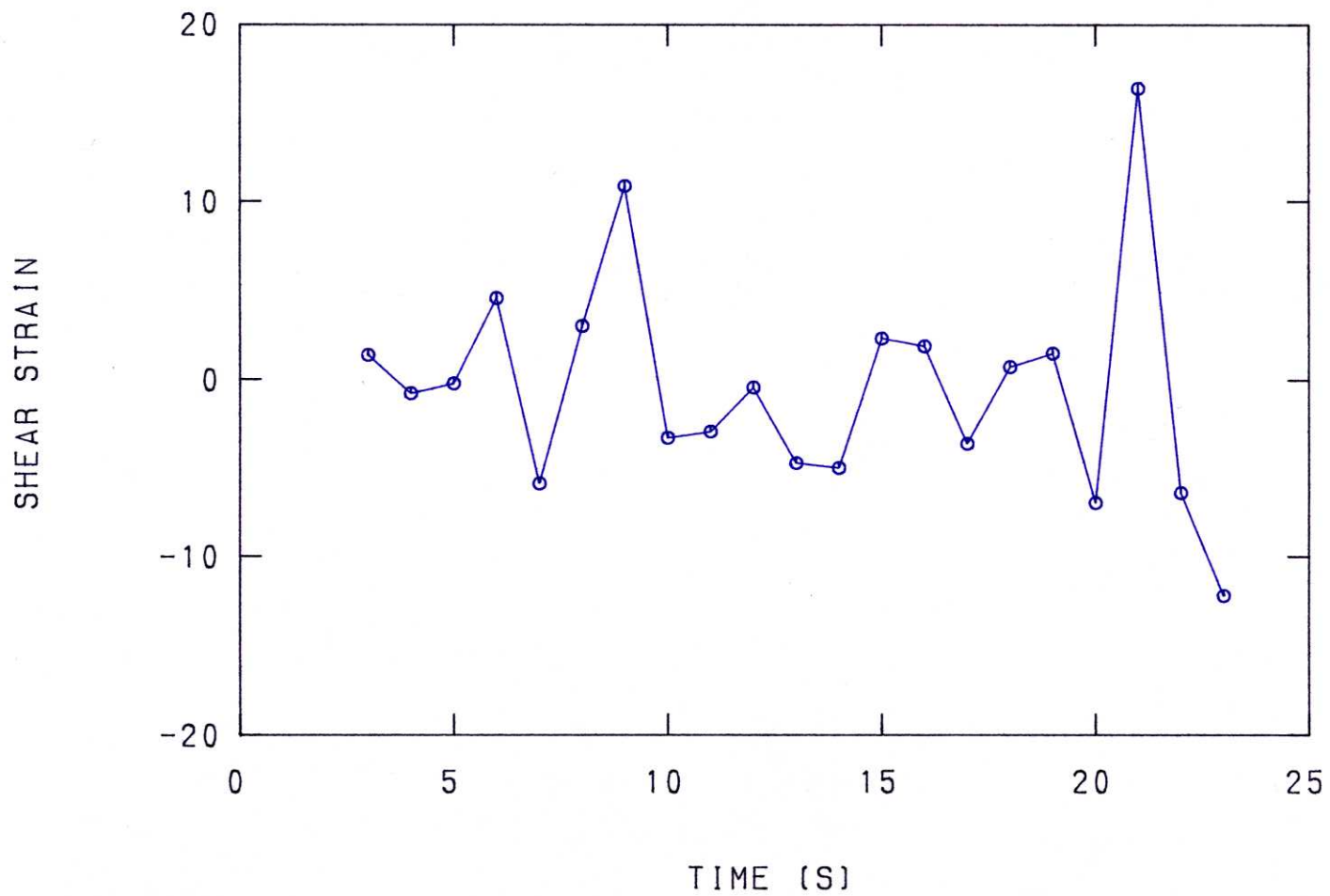


図50 直線運動系耕うん実験①の刃先上部のせん断ひずみ変化

$$(\theta = \angle (\text{Sp8}(n) - \text{Sp7}(n) - \text{Sp7}(n+1)))$$

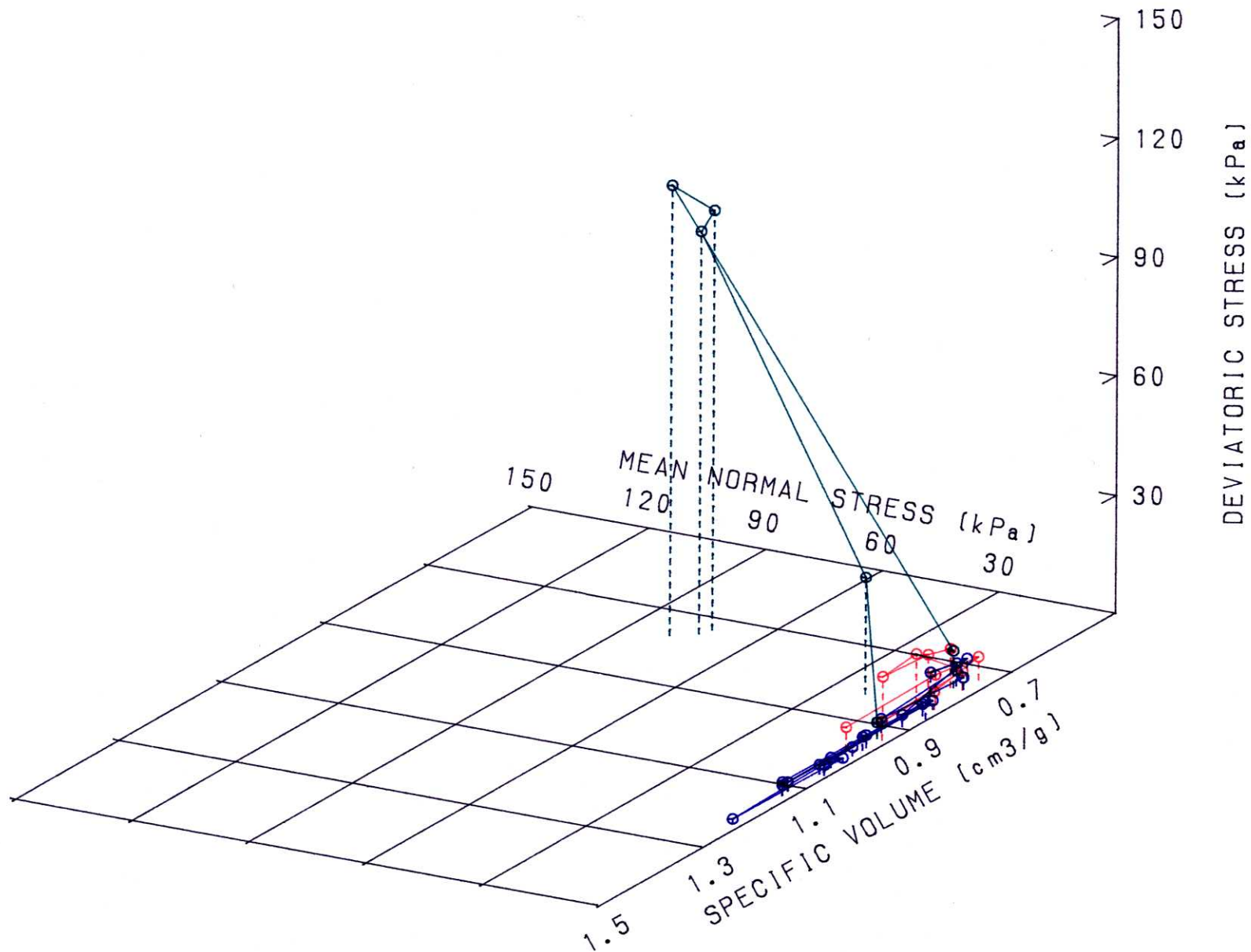


図51 直線運動系耕うん実験①と圧縮成形時との状態経路比較 (ブルー: 上部(Sp7-8), レッド: 下部(Sp5-1), グリーン: 圧縮成形時)

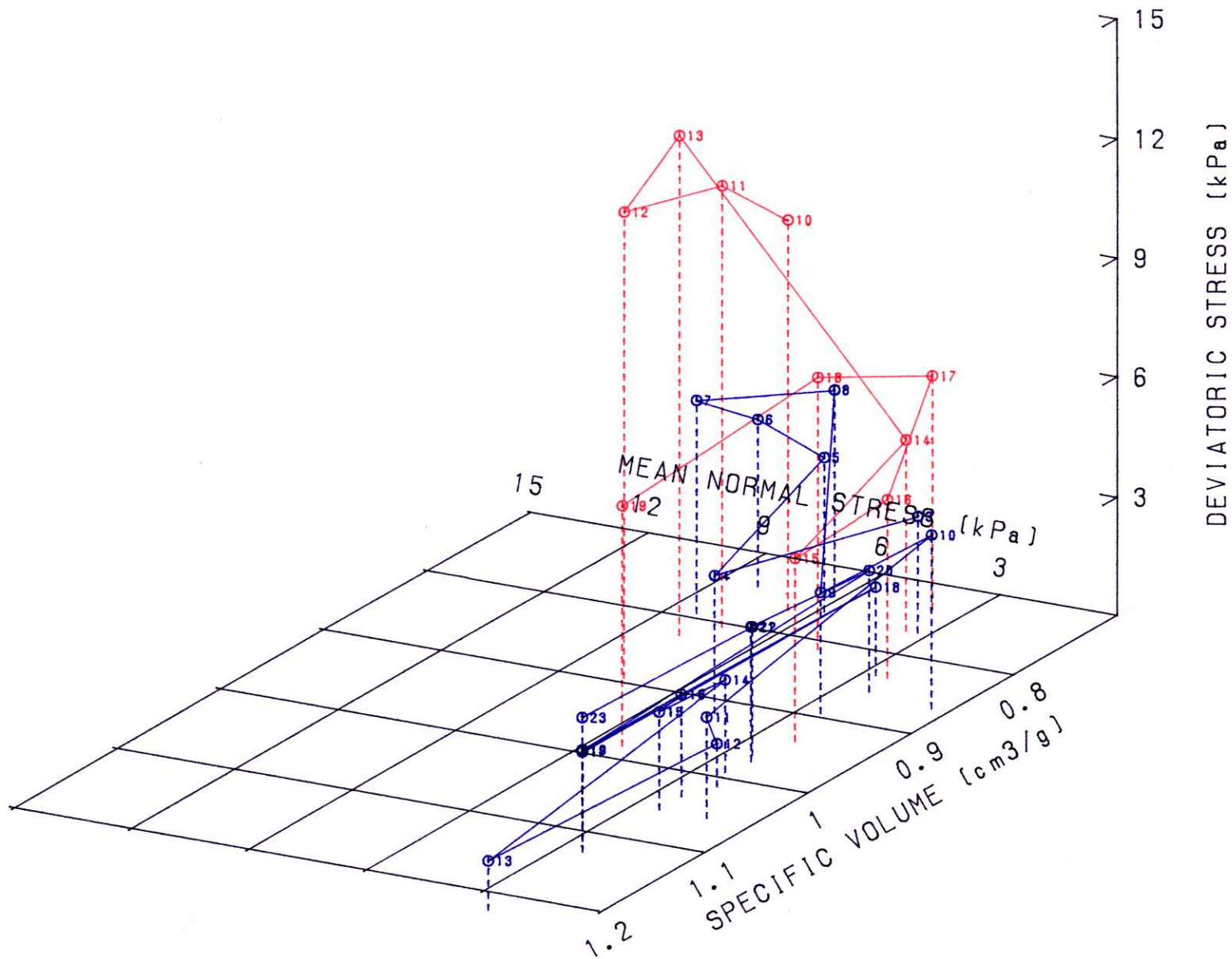


図52 直線運動系耕うん実験①の状態経路 (ブルー：上部 (Sp7-8)，レッド：下部 (Sp5-1)．数字は代表時間 (秒))

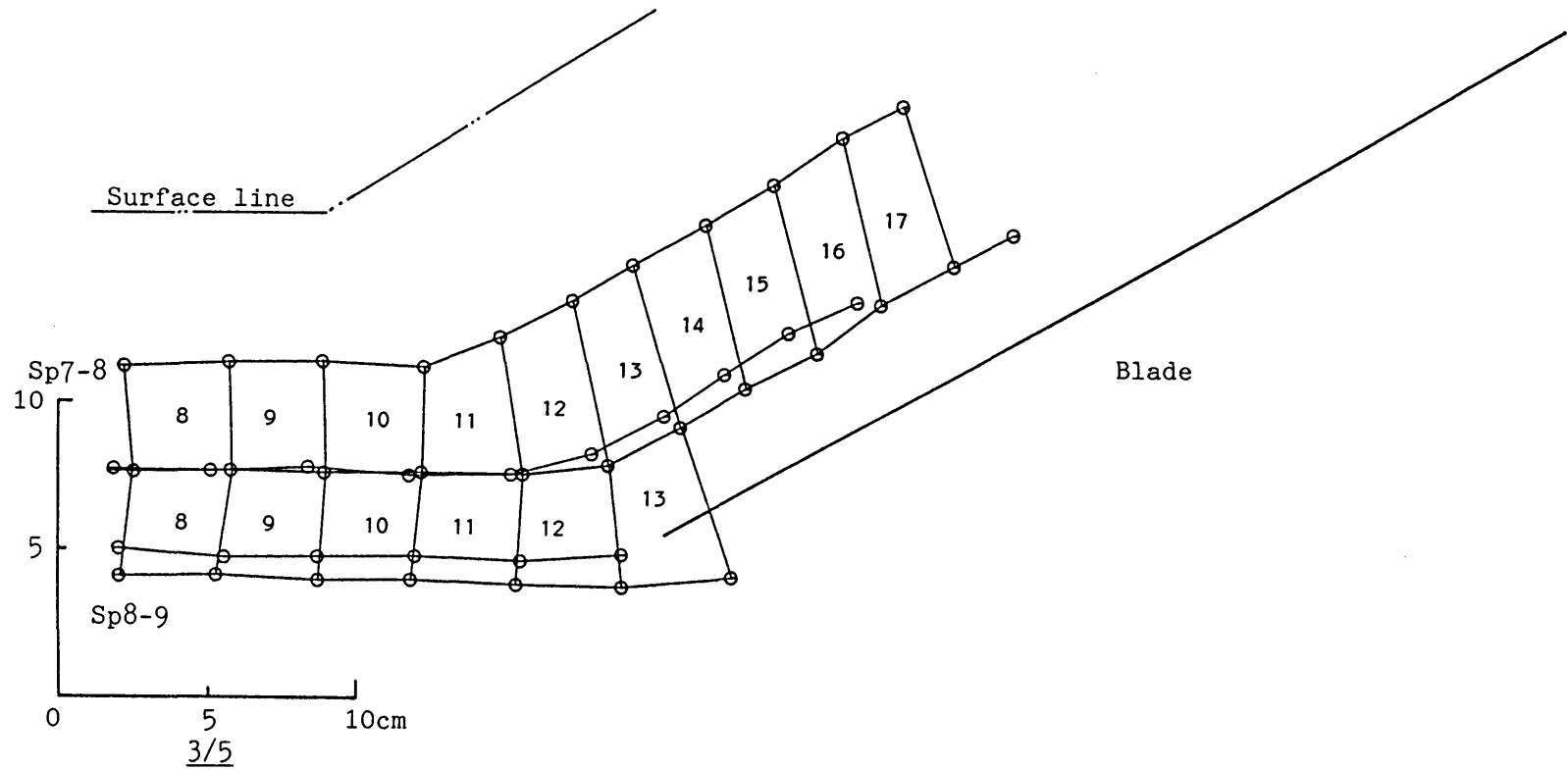


図53 直線運動系耕うん実験②の土壌変形

(領域内の数字は代表時間(秒)を表わす)

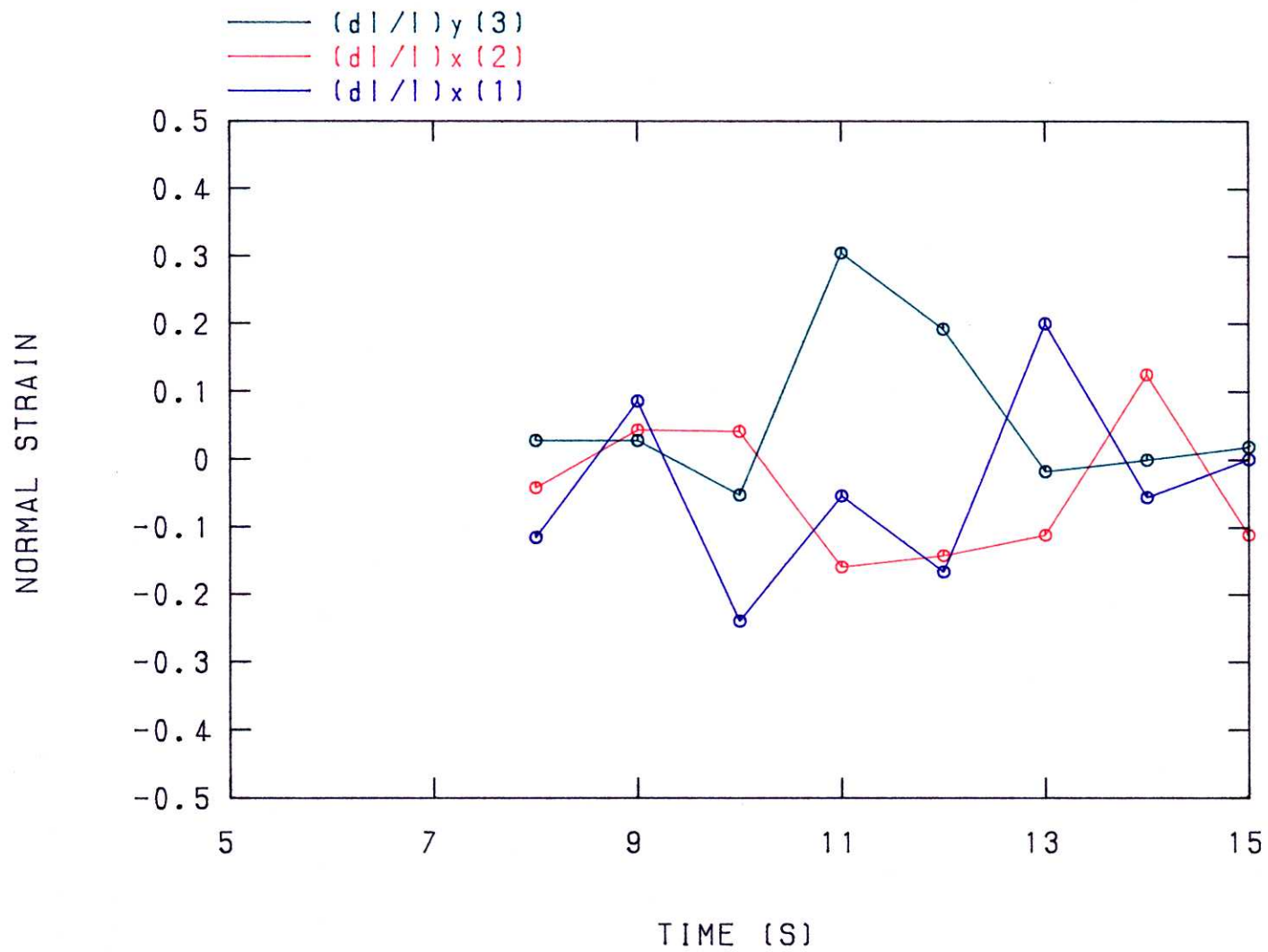


図54 直線運動系耕うん実験②の土壌上部の垂直ひずみ変化

(ブルー: $Sp7(n+1)-Sp7(n)$ [x軸方向], レッド: $Sp8(n+1)-Sp8(n)$ [x軸方向], グリーン: $Sp7(n)-Sp8(n)$ [y軸方向])

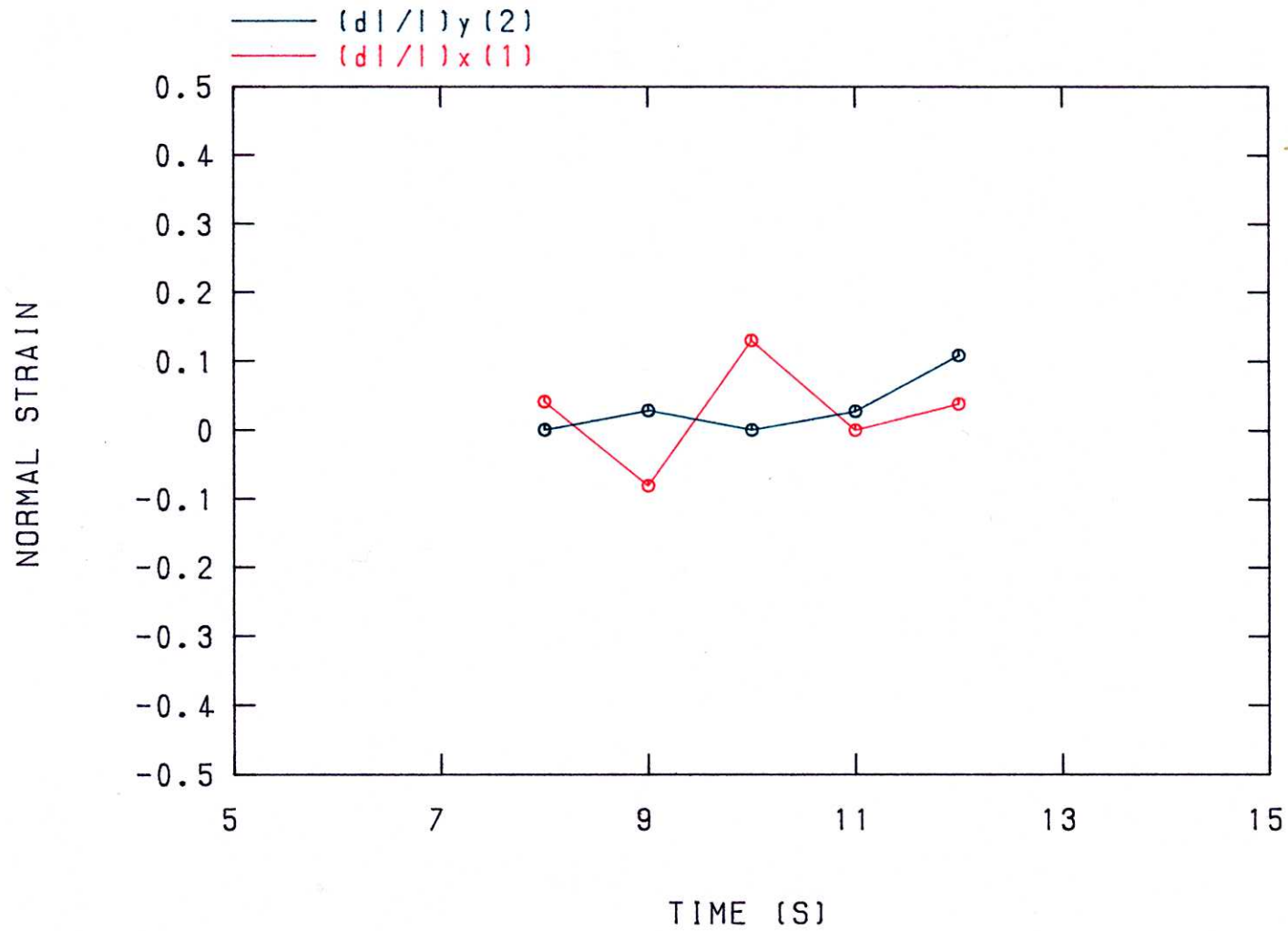


図55 直線運動系耕うん実験②の土壌下部の垂直ひずみ変化

(レッド: $Sp9(n+1)-Sp9(n)$ [x軸方向], グリーン: $Sp8(n)-Sp9(n)$ [y軸方向])

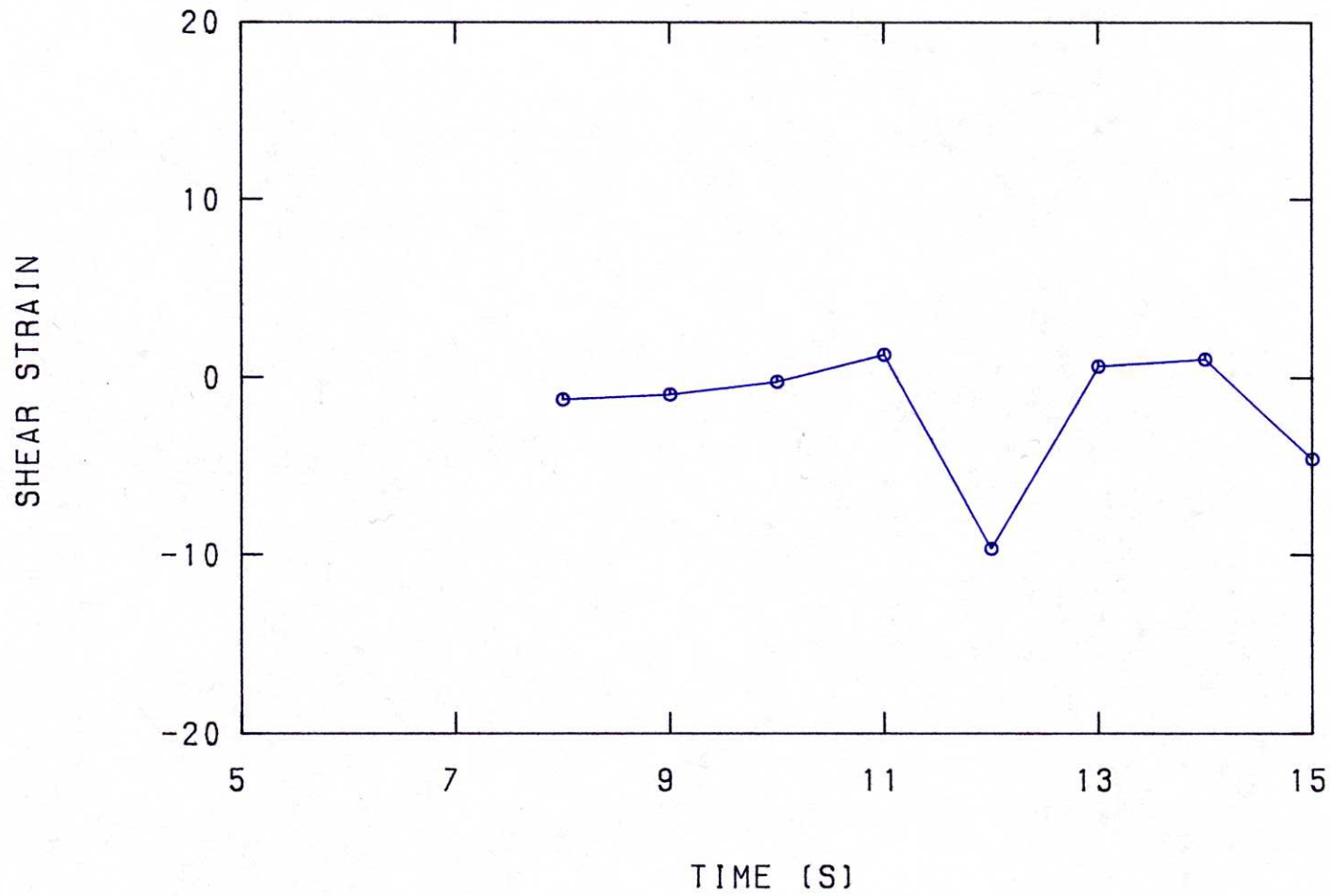


図56 直線運動系耕うん実験②の刃先上部のせん断ひずみ変化

$$(\theta = \angle (\text{Sp8}(n) - \text{Sp7}(n) - \text{Sp7}(n+1)))$$

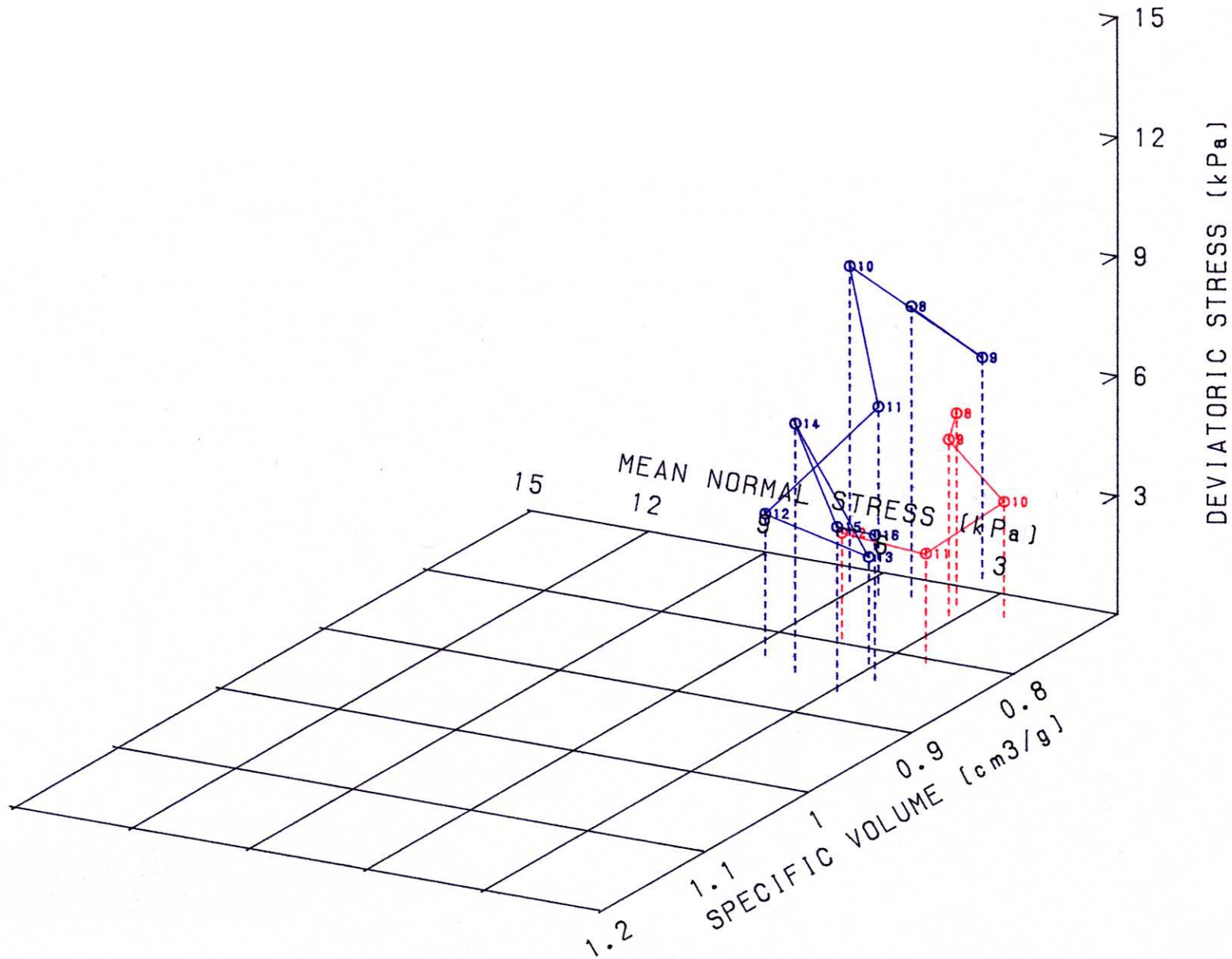


図57 直線運動系耕うん実験②の状態経路 (ブルー：上部 (Sp7-8)，レッド：下部 (Sp8-9)．数字は代表時間 (秒))

と分からないので、図52に尺度を変えて示す。実験①では、せん断破壊面前方の応力分布が砂のように土壌の浅い部分ほど応力レベルが低下しているために、上部よりも下部の応力レベルが高くなった。また、刃先前方で比較的高い応力レベルで圧縮せん断破壊面が形成された後に（降伏面上にあると推定される）、ブレード上のれき土が低い応力レベルのもとで膨張し、再び圧縮、膨張を繰り返していることが分かる。さらに、実験①では破壊面前方において、平均垂直応力の発達よりも遅れて偏差応力が発達していた。このことにより、Sp8の最大主応力の極大値の位置が破壊面よりも前方に寄っていた理由が説明でき、偏差応力がせん断破壊形成に寄与している⁷³⁾ことが証明できた。

図53は実験①と同様に実験②の隣あう4つのSSDセンサ位置（図38参照）を線で結び囲まれる領域の変形を表わしたものである（Sp7とSp8のn秒とn+1秒で囲まれる領域、Sp8とSp9のn秒とn+1秒で囲まれる領域）。また図54は、Sp7の1秒間に移動する長さのx軸方向成分の垂直ひずみ変化、Sp8の1秒間に移動する長さのx軸方向成分の垂直ひずみ変化、および、Sp7とSp8の距離のy軸方向成分の垂直ひずみ変化を代表時間でプロットしてある。図55には、Sp9の1秒間に移動する長さのx軸方向成分の垂直ひずみ変化、および、Sp8とSp9の距離のy軸方向成分の垂直ひずみ変化を代表時間でプロットしてある。さらに、図56にはせん断ひずみ α と $d\theta$ （n秒におけるSp7とSp8およびn+1秒におけるSp7がつくる角度を θ

とする)の変化を、図56には、限界状態理論で常用される三次元座標に、上部と下部領域の平均垂直応力と偏差応力および比容積の関係をプロットしてある。

これらの図より、実験②では垂直ひずみ変化は実験①と同様の傾向を示したが、せん断ひずみ $\frac{1}{2}d\theta$ は破壊面形成時に高い圧縮 (-10) を示した他は小さい値であった。また実験②では、せん断破壊面前方の応力分布が壤土のように破壊面上でほぼ一定の分布をしたため、上部の方が下部よりも応力レベルが高くなり、破壊面形成後も実験①ほどは土壤は膨張していなかった。降伏点とみられる位置での平均垂直応力と偏差応力は、実験①ではほぼ同じであるのに対し、実験②では偏差応力が平均垂直応力よりも高い値をとっている。平均垂直応力の増加は圧縮性流動を起こし、偏差応力の増加はせん断破壊を引き起こすとされている⁷³⁾。このことより、実験②では耕うん速度の増加によって刃先付近の土壤の偏差応力が平均垂直応力よりも発達したため⁷³⁾、実験①よりもせん断破壊が起こる傾向が強くなったものといえる。

図58は実験③の隣あう4つのSSDセンサ位置(図42参照)を線で結び囲まれる領域の変形を表わしたものである(Sp3のn秒とn+1秒とSp8のn+5秒とn+6秒とで囲まれる領域、Sp8のn秒とn+1秒とSp2のn+11秒とn+12秒とでで囲まれる領域)。また図59は、Sp3の1秒間に移動する長さのx軸方向成分の垂直ひずみ変化、Sp8の1秒間に移動する長さのx

軸方向成分の垂直ひずみ変化、および、Sp3とSp8の距離のy軸方向成分の垂直ひずみ変化を代表時間でプロットしてある。図60には、Sp2の1秒間に移動する長さのx軸方向成分の垂直ひずみ変化、および、Sp8とSp2の距離のy軸方向成分の垂直ひずみ変化を代表時間でプロットしてある。さらに図61には、せん断ひずみ $\frac{1}{2}d\theta$ （n秒におけるSp3とn+5秒におけるSp8およびn+6秒におけるSp8がつくる角度を θ とする）の変化を、図62には、限界状態理論で常用される三次元座標に、上部（Sp3-8）と下部（Sp8-2）の領域の平均垂直応力と偏差応力および比容積の関係をプロットしてある。

これらの図より、実験③では垂直ひずみ変化は実験①、②と同様の傾向を示したが、せん断ひずみ $\frac{1}{2}d\theta$ は刃先部分で圧縮傾向が強く出ている。また実験③では、実験①や②に比べて高い応力レベルで耕うんされており、耕うんによる土壌の体積変化は実験①で20%、実験②で15%ほどの膨張を示したのに対し、実験③では約20%の圧縮を示した。このことが図46に示されるような軌跡の違いの原因であると考えられる。つまり、わずかな含水比の変化が土壌の圧縮性に変化を与え、同じ耕うん機器を用いても違ったれき土を排出し、砕土程度に影響を与える可能性を示唆している。

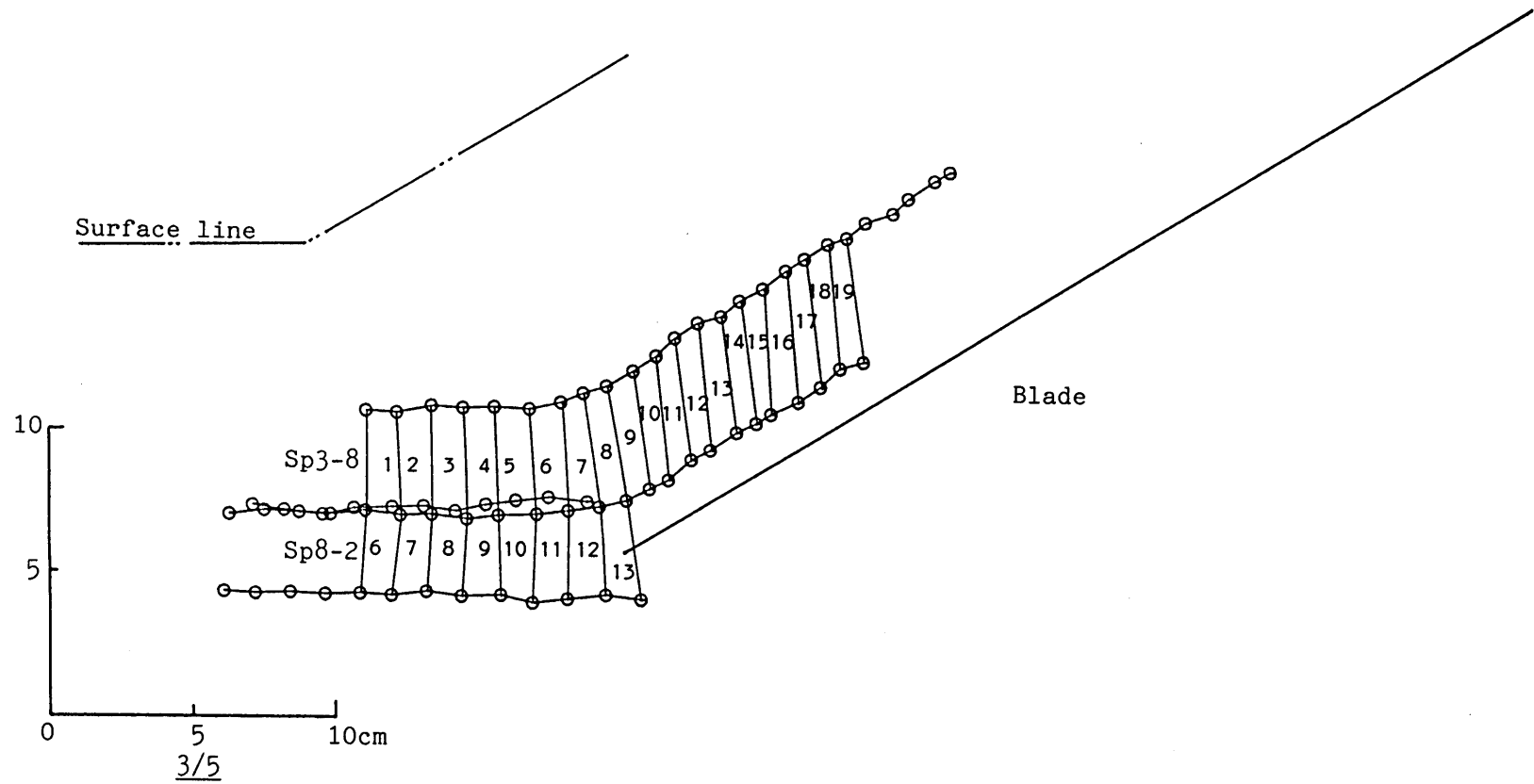


図58 直線運動系耕うん実験③の土壌変形

(領域内の数字は代表時間(秒)を表わす)

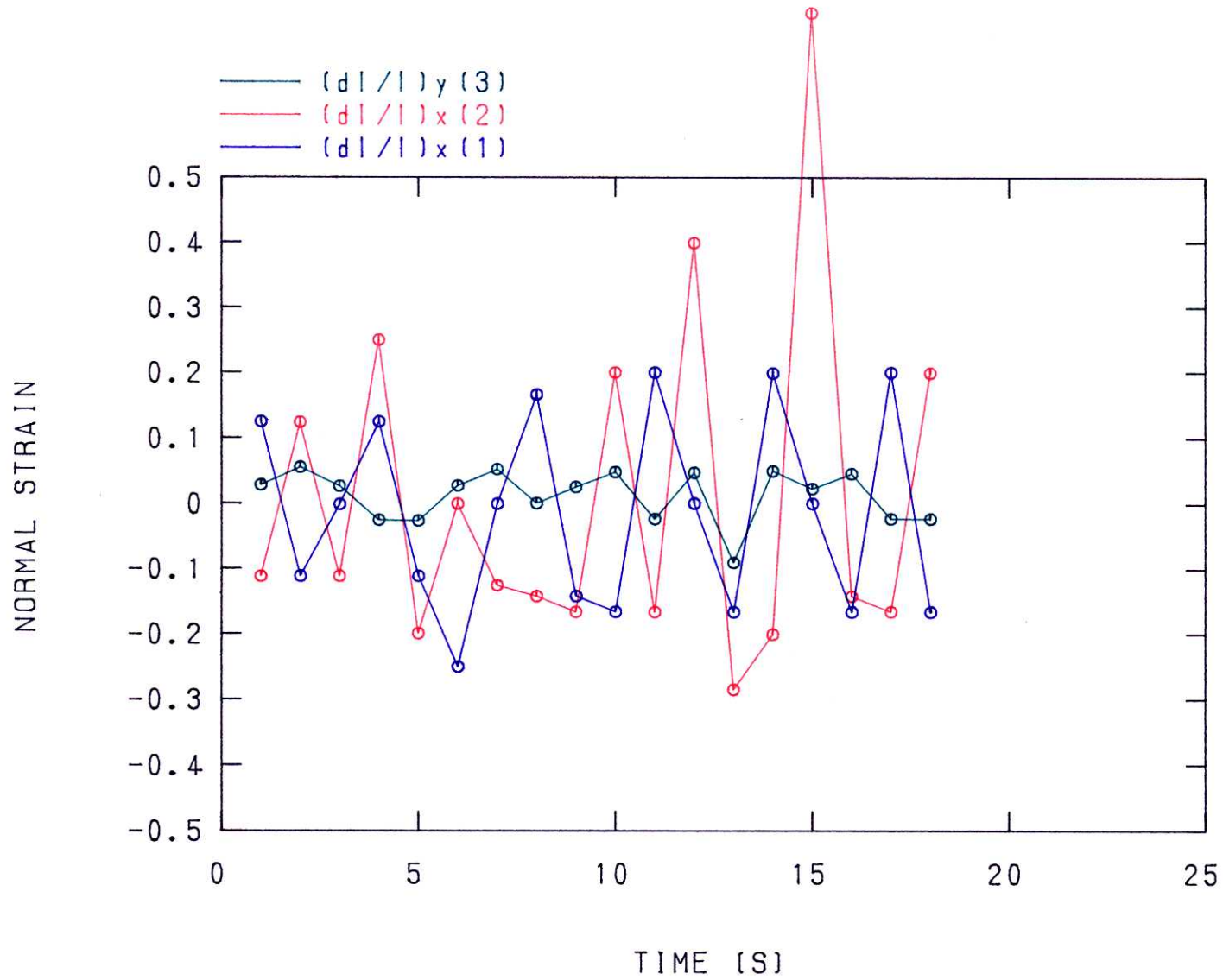


図59 直線運動系耕うん実験③の土壌上部の垂直ひずみ変化

(ブルー：Sp3(n+1)-Sp3(n) [x軸方向]，レッド：Sp8(n+6)-Sp8(n+5) [x軸方向]，グリーン：Sp3(n)-Sp8(n+5) [y軸方向])

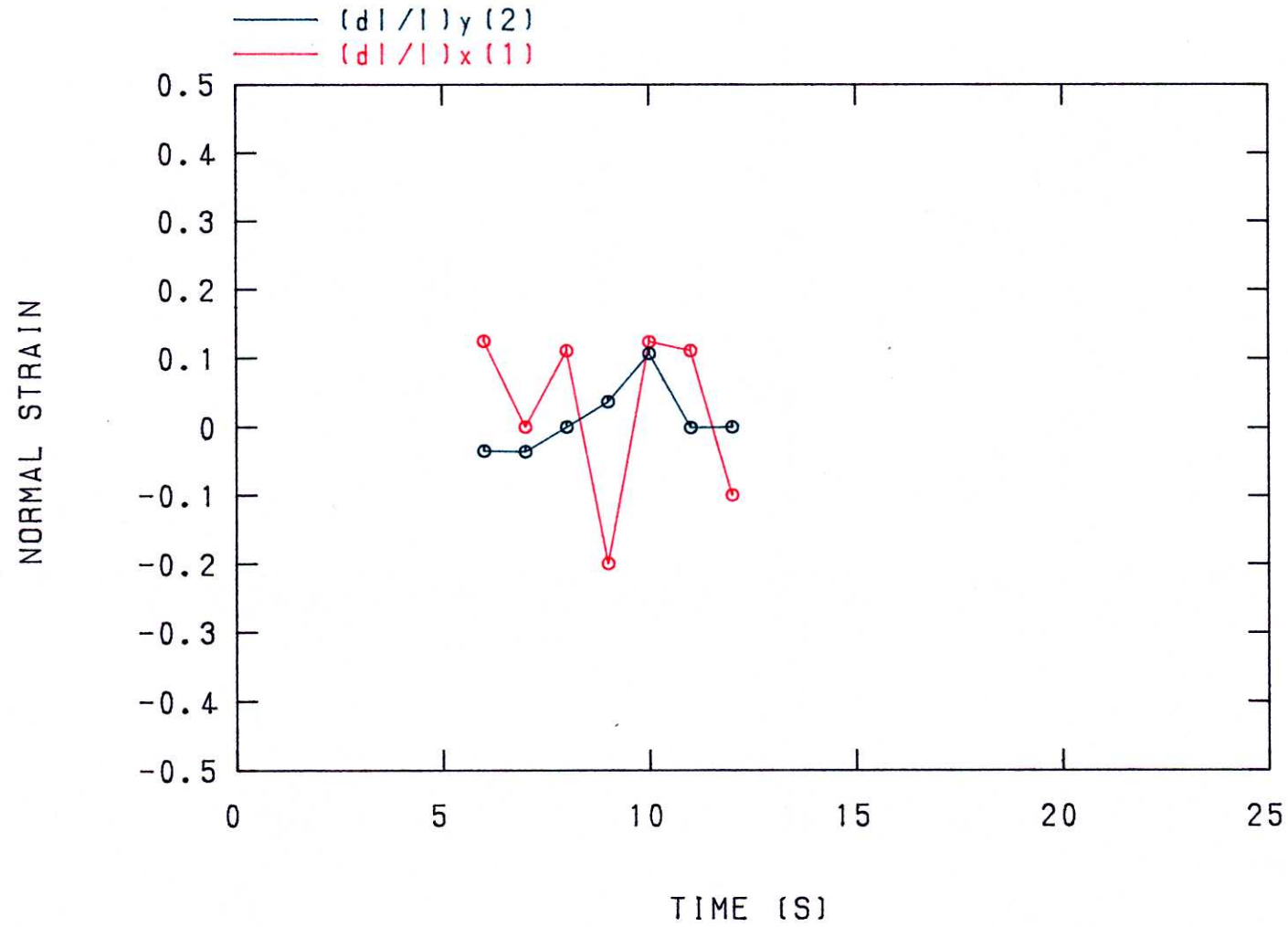


図60 直線運動系耕うん実験③の土壌下部の垂直ひずみ変化

(レッド: $Sp2(n+12)-Sp2(n+11)$ [x軸方向], グリーン: $Sp8(n+5)-Sp2(n+11)$ [y軸方向])

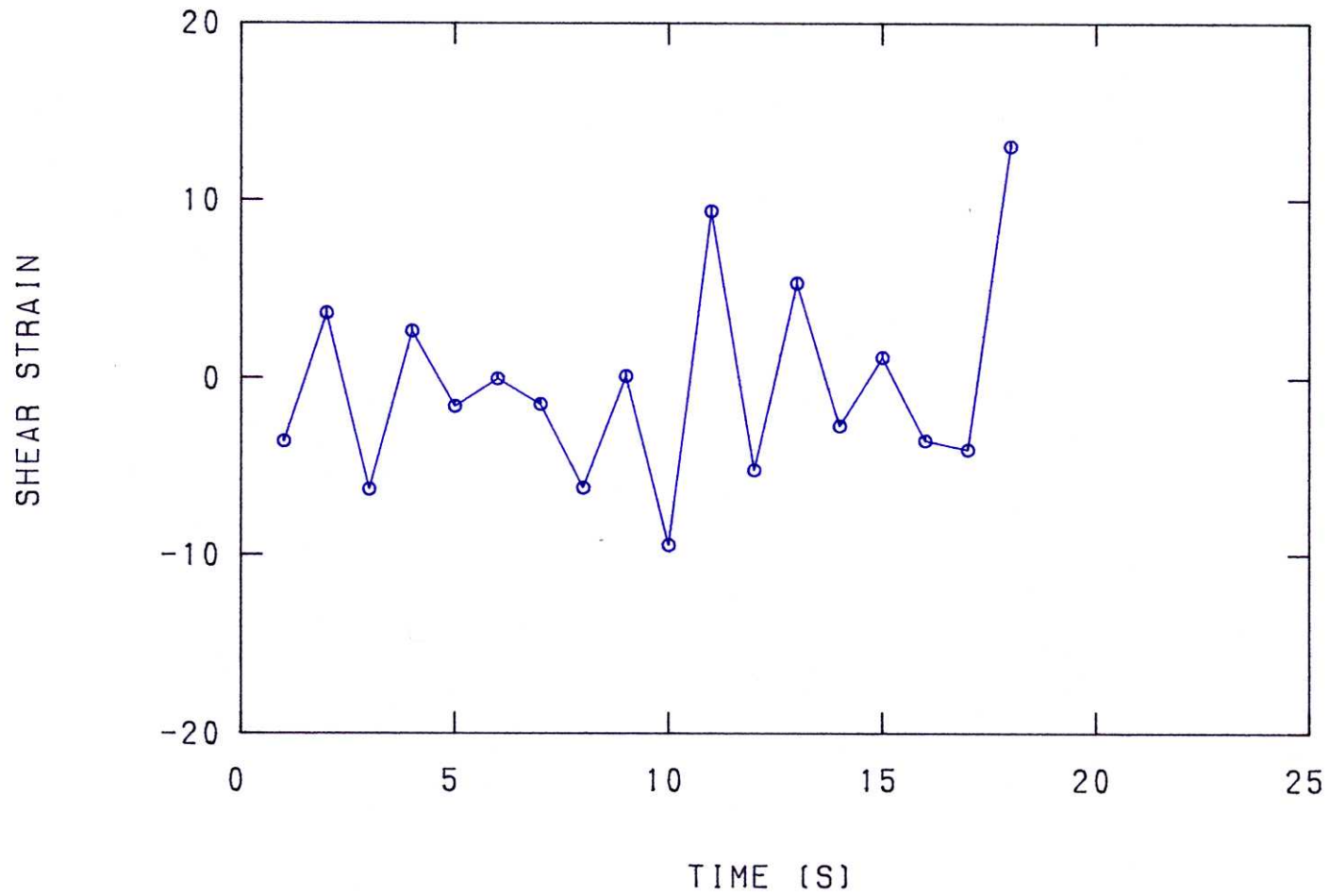


図61 直線運動系耕うん実験③の刃先上部のせん断ひずみ変化

$$(\theta = \angle (\text{Sp}3(n) - \text{Sp}8(n+5) - \text{Sp}8(n+6)))$$

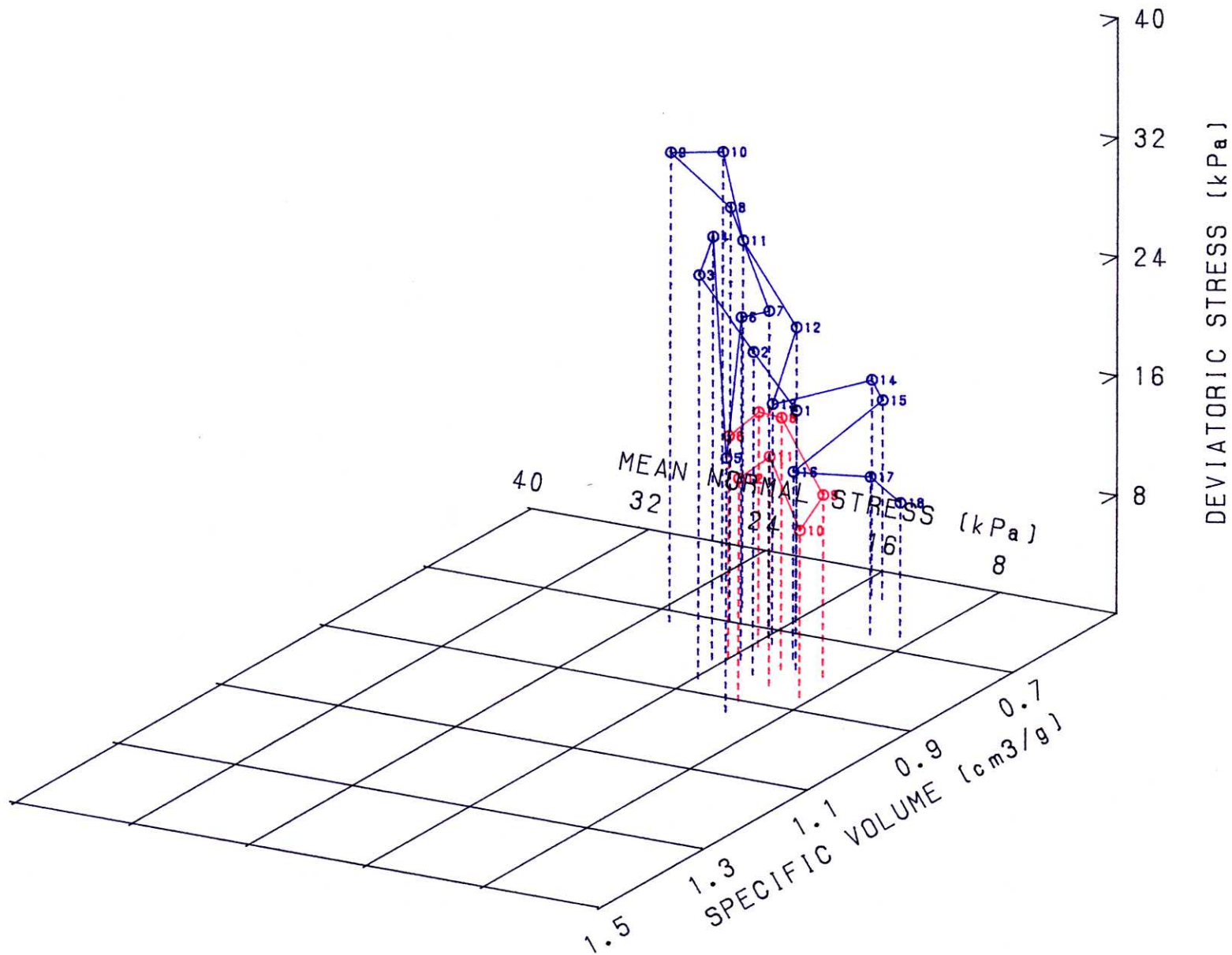


図62 直線運動系耕うん実験③の状態経路 (ブルー：上部 (Sp3-8)，レッド：下部 (Sp8-2)．数字は代表時間 (秒))

5 - 4 結語

以上のように、本装置システムを用いて直線運動系の耕うん実験を行ない、従来示されていた直線運動系耕うん刃による挙動特性のみならず、新たな土壌－機械系の動的挙動を多様な分析方法を用いることで検出できた。しかしながら、供試土壌の成形状態や SSD センサと土粒子の接触状態等の条件が少々変わるだけでデータが変化するため、繰り返し実験のデータを総合的に検討していく必要があると考えられる。