

## ソイルパラメータの自動計測システムに関する研究

### ソイルハードネスセンサの開発

小松 實\*・加藤 昭\*\*・坂本克美\*

(昭和63年5月31日受付)

## Study on the Automatic Measurement System of Soil Parameters Development of Soil Hardness Sensor

Minoru KOMATSU\*, Akira KATO\*\* and Katsumi SAKAMOTO\*

This paper presents the results of a study on a microcomputer-based instrumentation system to measure soil hardness using a disk tool sensor. The system was operated by a Hewlett-Packard 9816s microcomputer. The soil hardness was calculated from measured disk penetration resistance. The developed system is based on real-time processing, and the acquisition results are drawn out as a soil hardness map of the measured field. Measured data are recorded with the source wave, and put to use for data analysis by the secondary processing programs.

The typical field hardness data are measured by the developed soil hardness sensor. The major results are given in Fig. 5 and 10. As mentioned above, the developed soil hardness sensor gave better results for efficient measuring of field hardness.

### 緒 言

農業機械のインテリジェント化は、主として実用面で急速な進歩を見せている。しかし、土や作物更には自然的な時間経過と空間で作動する機械的な手段にとっては、個別的な高度化は可能であっても、システムとしてのそれは成立し難い側面がある。特に技術の発展段階としては、各種のセンサやサーボが主体となる測定・制御機能

に多くの未解決の分野が残されている。したがって、組織化された知能機能の段階には至っていない。

本研究は、こうした背景のもとに、比較的容量の大きいマイクロコンピュータを基幹とする測定・制御システムを具体事例に即して開発することを目的としている。その一環として、農用トラクタのけん引、ロータリ耕うんについてのアプローチであるコンピュータ計測システムは既に報告した<sup>1,2)</sup>。更に、それらの高性能化を目的とし

\* 鳥取大学農学部農林総合科学科生産環境工学講座

\* Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University

\*\* 太陽鉄工株式会社

\*\* Taiyo Co., Ltd.

たソイルパラメータの測定に関する基礎成果も報じている<sup>3)</sup>。これらの基本は、機械性能関連因子の同時計測・処理・表示であり、特にリアルタイム処理を対象にする主因子は、テストあるいは機械制御などの別によって選択される。本報では、機械性能に最も関連のある土の硬度を自動計測するシステムについて報告する。このソイルハードネスセンサはフィールドでの連続的な測定が可能であること、作業部に接してデータ取得がなされ、その処理情報が主作動部を事前制御する即時性、あるいはオペレータの判断性の高いものでなければならない。

### ソイルハードネスセンサの開発

著者らは、1982年以来、土壌硬度を連続測定する機具として、従来から多用されてきたコーンによる貫入抵抗と互換性のあるディスクの作用特性について検討してきた<sup>3)</sup>。ディスクがある作用深さで地表をけん引されるときに発生する土壌反力を水平・垂直分力に分けて測定し、ディスク軸心に作用する合力の大きさと方向をディスクサイズ、作用深さ、円すい貫入抵抗及び単位容積重などを変量として明らかにした。また、ディスク抵抗から円すい貫入相当の抵抗を求め、これを主因子としたロータ

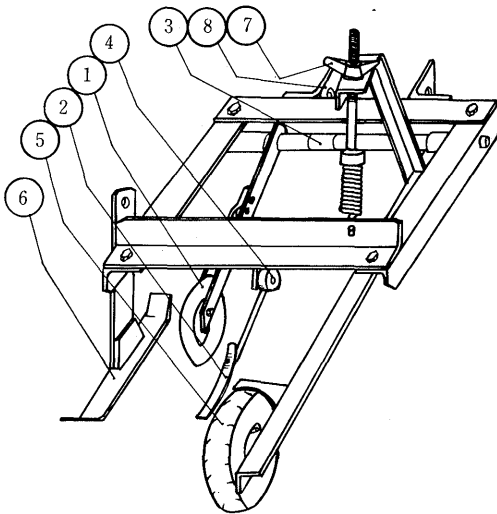


Fig. 1 Schematic of the soil hardness sensor used in the experiment : ① Disk tool, ② Depthmeter for disk tool, ③ Torsion bar, ④ Potentiometer, ⑤ Ground wheel type speedometer, ⑥ Depth control shoe, and ⑦ Controller of disk penetration force.

リ耕うん抵抗並びにトラクタのけん引力の関係をコンピュータ計測システム<sup>1,2)</sup> 利用によって究明した。

以上の基礎研究に基づき、実用型として作成したソイルハードネスセンサの概要図がFig. 1である。センサ用ディスクサイズは、直径180mm、肉厚8mm、刃先角20度のもので3-Sクラスの加工精度、材質S15Cである。シルト質ローム並びに粘土質ローム土との摩擦係数はそれぞれの塑性限界の含水比で0.394と0.386であった。トラクタの三点リンクヒッチに装着し、作用ディスク深さが一定となる構造とし、土の硬さに抗してディスクが貫入するための調節部を持つ。ディスク自体は土との摩擦力によって接地回転し、回転質点を通して軸心に作用する土の反力が、取付レバーを介してトルク測定用ゲージをちよう付したトーションバーで測定される。トーションバーは、材質SCM21で軸径25mm、ゲージファクタ2.15のひずみゲージによる4ゲージ法とした。実際の作用深さはポテンシオメータによる電圧変化で計測し、作用速度（トラクタ走行速度）は、ラバータイヤのグランドホイールに装置したタコメーターゼネレータによる出力電圧変換方式を採用している。

Fig. 2において $D_0$ の作用深さでけん引されるディスクは、土壌との間の摩擦力 $F$ によって回転しながら軸心に土の反力 $S_R$ を受けて進む。回転の質点 $B$ の位置は

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{V_R}{S_R} \right)$$

によって定まり、摩擦力 $F$ はこの $B$ 点の接線方向に作用し、その大きさは、土とディスクとの間の摩擦係数を $\mu'$ とすると

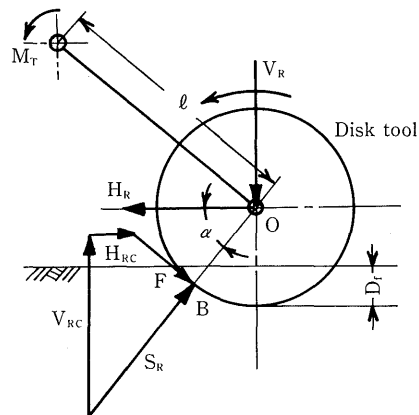


Fig. 2 Location and direction of forces acting on a disk tool.

$$F = \mu' S_R$$

となる。土の反力 $S_R$ は、この摩擦力 $F$ と垂直反力 $V_{RC}$ 並びに水平反力 $H_{RC}$ のベクトル和で示される。ここで

$$V_{RC} = S_R (\sin \alpha + \mu' \cos \alpha)$$

$$H_{RC} = S_R (\cos \alpha - \mu' \sin \alpha)$$

トーションバーでは、ねじりを $M_T$ とすると

$$M_T = l S_R, (N \cdot m)$$

で計測される。

### 計測システムの概要

基本システムは、代表的な土作用機械の作業態様に合わせて構成される。土の硬度は、これらの土作用機械に関連する性能因子の一つであって他の因子、例えば含水

比、単位容積重などとともにソイルパラメータとして取扱われる。Fig. 3は、トラクタのけん引力テスト時のシステム構成の例である。単純なほ場の硬度測定や実用域での作業時の負荷制御システムではより簡易化される。多くのピックアップが装備されている中から、例えば後述のソイルハードネスマップの作成では、ディスクセンサによる土壌硬度、そのディスクの作用深さ並びに走行速度などに限られてデータ取得される。これらのセンサからのアナログ出力電圧は、それぞれのセンサ出力特性によって増幅され最大2V以内の電圧量でA-Dコンバータに入力される。供試のA-Dコンバータは、入力チャンネル数32ch、データバッファ16Kデータ、サンプリングスピード25 $\mu$ s (40kHz) ~ 0.82s (1.2Hz)、分解能12bitのもので、多量のデータを高速度で取得する能力がある。変換データはテクニカルコンピュータ (CPU: モトローラMC6800, クロック周波数: 8 MHz, メモリ容量: 2.5MB) に入り処理される。関係データは生データと処理データの双方ともプリントアウトされ、更にマッピング関係データはプロッタでプロットやラベリングされてソイルハードネスマップを作成する。

これらのリアルタイム処理の流れとは別に、ブランチによって、測定のアナログ波はデータレコーダで記録され、事後の二次的な再生処理によっての解析に供される。なお、デジタルボルトメータはmV単位の読み取りが可能で、データ取得中の各データチャンネルのチェックや、基本線図のX軸に配される主要パラメータ (例えばけん引力-進行低下率線図での進行低下率, 耕うん抵抗-耕深線図での耕深) の制御用としてオペレータによって利用される。

これらのリアルタイム処理の流れとは別に、ブランチによって、測定のアナログ波はデータレコーダで記録され、事後の二次的な再生処理によっての解析に供される。なお、デジタルボルトメータはmV単位の読み取りが可能で、データ取得中の各データチャンネルのチェックや、基本線図のX軸に配される主要パラメータ (例えばけん引力-進行低下率線図での進行低下率, 耕うん抵抗-耕深線図での耕深) の制御用としてオペレータによって利用される。

### プログラムの構成

土壌硬度測定専用プログラムのフローチャートをFig. 4に示す。内容は、硬度のマッピング、性能テストに関連する事前測定、同時制御以外での作業条件設定用データ測定及びその他のモードを基本とするプログラムで、これらのモードに共通する方眼

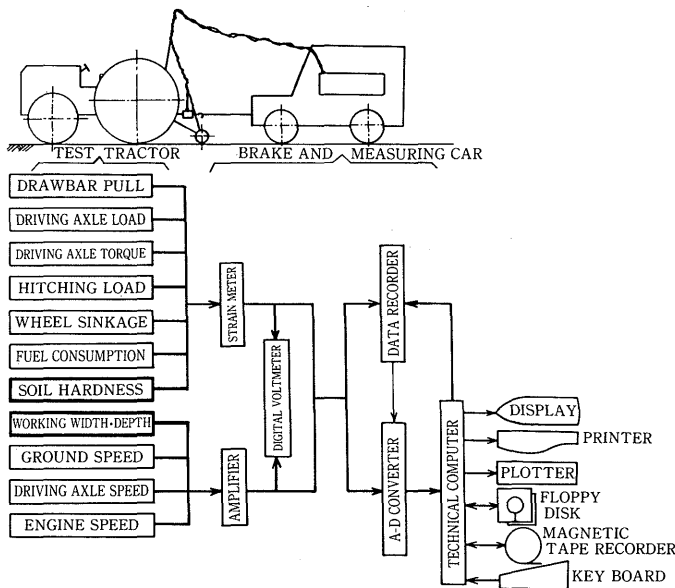


Fig. 3 Block diagram of the microcomputer-based instrumentation system for the tractor test.

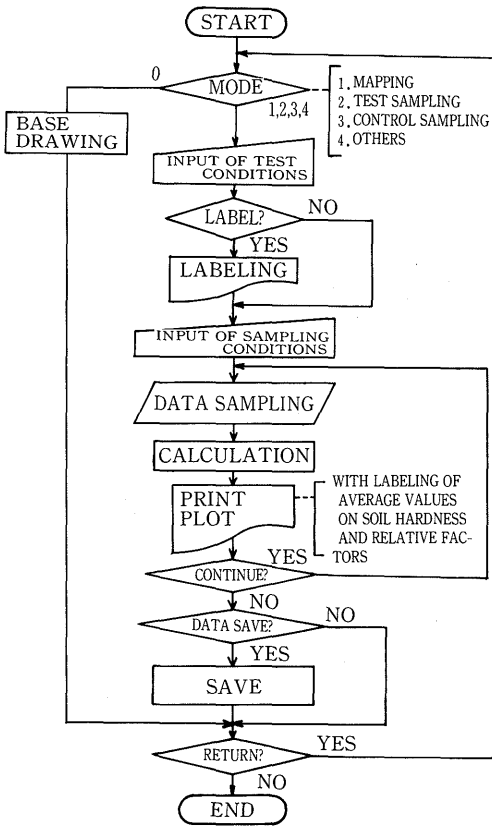


Fig. 4 Flowchart of field measuring program for soil hardness.

作図を別モードとして加えている。

モード1のマッピングは、モード2及び3の内容を立体図として表示する試みのもので、ほ場全域にわたっての土壌硬度を一目に供することができる。モード2と3では、これとは別にデジタルの資料が利用対象になる。本報告では、モード1を主とし、各測定トラックごとの土壌硬度の平均表示並びに変動の表示、更に関連取得パラメータの平均表示を行う。

データのサンプリング条件の主なものは、サンプリングデータ数とそのインターバルの設定である。測定トラック全長にわたって均等にデータが取得され、それが適当な間隔でプロットされて線図化されることである。実際のプロットは、前回プロットされた点からのデータが平均化されてプロットされるから厳密な意味では同期描出ではない。データ数の多少による取得結果の安定性はこれまでのコンピュータ計測同様<sup>1,2,3)</sup>、およそ40点以上のサンプリングであれば問題はない。データ数が少ない場合は、耕うん抵抗やけん引力波形に比し高感度測定にみられるスパイク波状の変動が顕著に表われる傾向がみられた。いずれにしても、けん引するトラクタの走行速度を勘案して均等なサンプリングの設定がポイントになる。

実動中の直接のデータサンプリングの指令は、コンピュータが発する前指令によるデータ取得完了信号によって発せられる。この場合、予め設定した測定点域にあることの確認が伴う。若しトラクタの走行変動が原因して、設定測定点と大きく変位している場合はここで調整される。なお、モード2や3の場合は、測定トラック内での

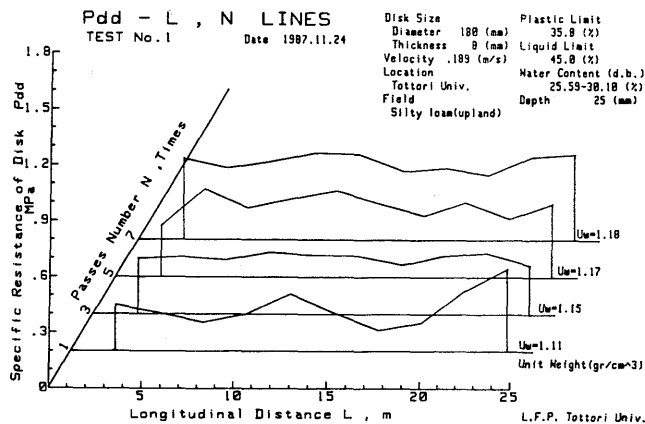


Fig. 5 Soil hardness map of the farm carrier running field, drawn by the real-time processing program.

測定点数を決めこれを実行した後の繰返しで行う。開発プログラムには、土壌硬度の作用深さによる変動を考慮して、ある範囲の作用深さにおいてのみデータサンプリングを行うことができる方法も構成してある。

この外、データレコーダ記録のアナログ波の解析用プログラムである原波形描出、自己相関、パワースペクトル、ひん度分布及びデータ処理をサポートする統計解析や多変量解析プログラムなどが準備されている。

ほ場の土壌硬度測定例

1. キャリア走行面の測定 ロータリ耕うんと砕土整

地後のほ場を、機体質量およそ470kgの6輪駆動キャリアを走行させ、その走行面の土壌硬度を測定させた。モード1で行い、通過数ごとの走行でマッピングを実行させたのがFig. 5である。各走行ごとの土壌硬度の平均は省き、これに代って単位容積重の平均値をラベリングさせている。関連するテスト条件は、同図に記入しているとおりである。ここでプリントアウトさせた各トラックのディスク比抵抗の平均値を示すと、1回踏圧で0.23、3回踏圧0.29、5回踏圧0.38、7回踏圧では0.41MPaであった。

データのサンプリング条件は、データ数60、インターバル2000とし、25 $\mu$ sが基本となっているから3sで1測

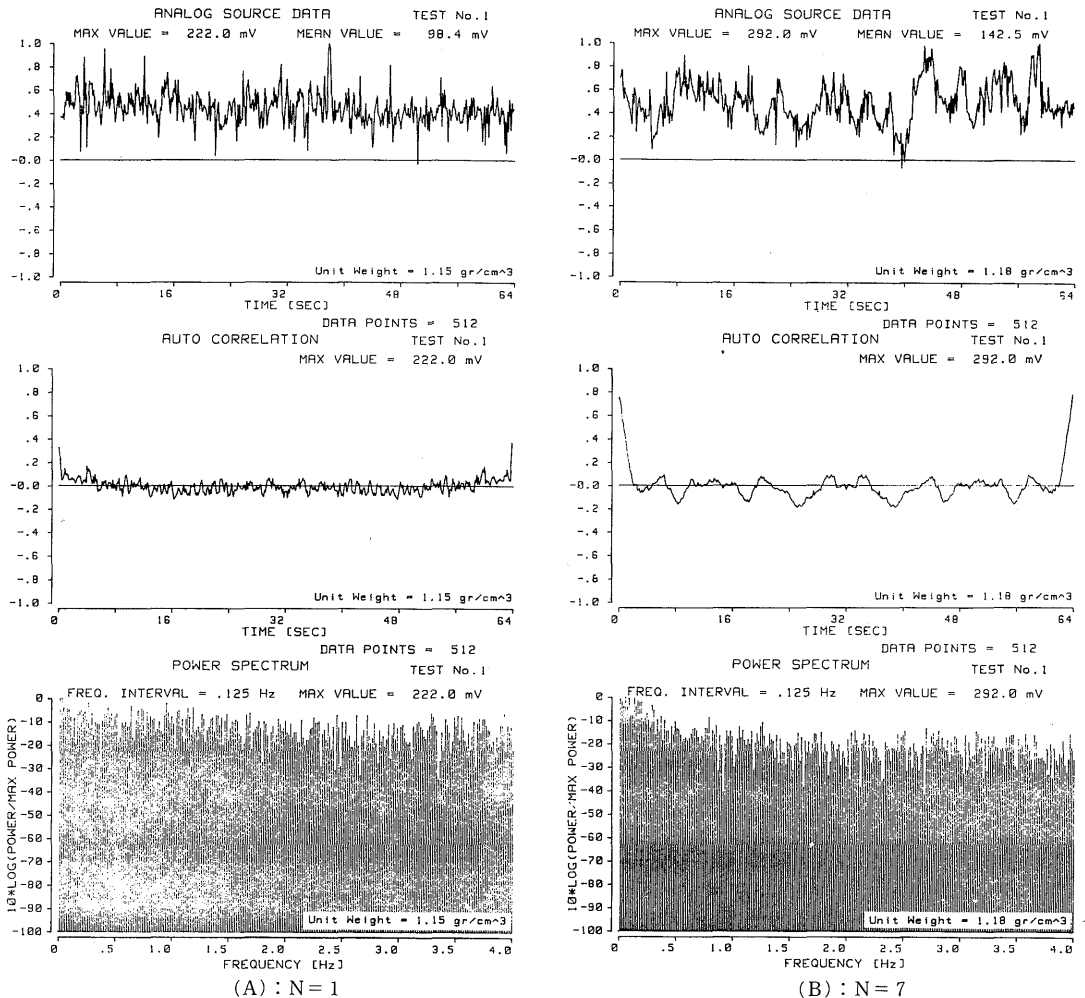


Fig. 6 Example of analog source data, auto correlation and power spectrum analysis on the measured soil hardness waves, drawn by the secondary processing program (test as in Fig. 5).

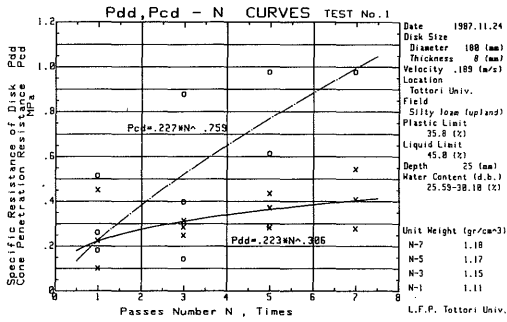


Fig. 7 Comparative soil hardness curves for different measurement systems in the farm carrier running field (same test as Fig. 5).

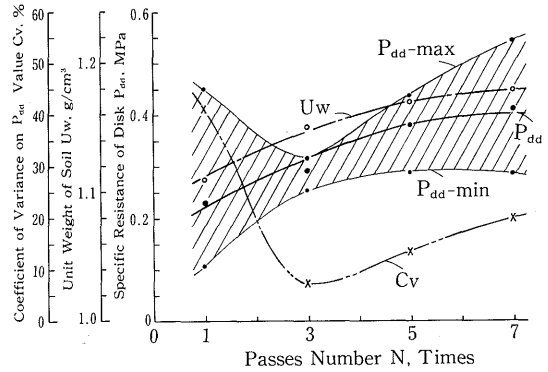


Fig. 9 Influence of the farm carrier running on the soil parameters  $P_{dd}$  and  $U_w$  (test as in Fig. 5).

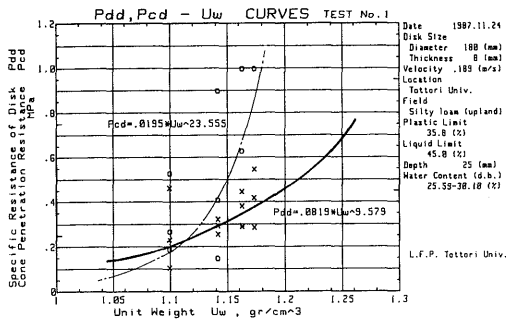


Fig. 8 Comparative soil hardness curves for different measurement systems at various soil unit weights (test as in Fig. 5).

比例する関係を示している。Fig. 8も同様に二次処理によるもので、単位容積重に対するディスク比抵抗、人手測定による円すい貫入抵抗を表示した。これも単位容積重  $U_w$  のべき乗に比例して増加する線図である。この両図の関係からも伺えるとおり、円すい貫入抵抗の各変量に対する増加度合がディスク比抵抗より大きくなっている。これは、それぞれの接地部の形状差によるもので、土中貫入部の鋭利性がディスクツールで高いことに起因している。Fig. 9は、Fig. 7におけるディスク比抵抗  $P_{dd}$  の変動をみたもので、各走行通過数ごと測定した10測定点の最大値  $P_{dd-max}$ 、同様に最小値  $P_{dd-min}$ 、並びに変動係数を示したものである。一般のトラクタの耕うん土上の

定点のデータが取得される。図は測定点データ数10でプロットさせている。なお、トラクタの走行速度は0.181m/sであったから走行距離0.543mで1測定点のデータが得られたことになる。Fig. 6に通過数1回(A)と7回(B)での二次処理例を示した。硬さの増す通過数が多くなるにつれて広範囲の周波数をもつ周期成分がみられるようになる。Fig. 7には、前図同様の二次処理によるキャリヤ通過数に対するディスク比抵抗並びに人手測定による円すい貫入抵抗を示した。ディスク比抵抗は、各測定トラックごとの平均値である。両者ともに通過数  $N$  のべき乗に

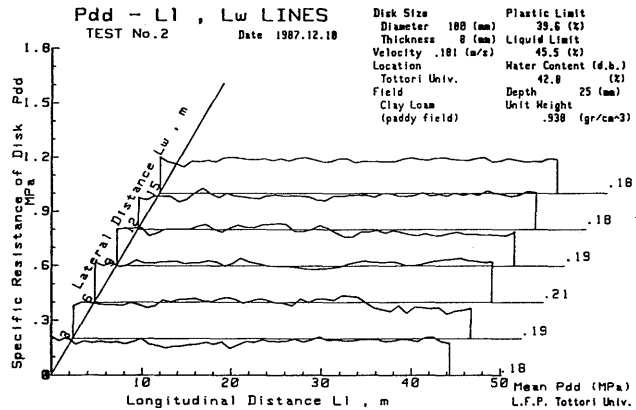


Fig. 10 Soil hardness map of the paddy field, drawn by the real-time processing program.

走行にみられる傾向と同様に走行通過数の少ないときに変動が大きく、更には踏圧度合が進むと平均の硬度は高くなるが変動の少ない均一踏圧状態を示すようになる。しかし、更に踏圧度合が高くなると再び変動係数が上昇を示す。同図で単位容積重の傾向をも示したが、キャリヤ走行通過数Nの増加に対しての変化は、ディスク比抵抗の増大と類似の線図を示し、 $Uw=1.11N^{0.032}$ のべき関数式になっている。これらの線図で共通してみられる傾向は、円すい貫入抵抗は比較の変動の多い測定値を示し、これに対してディスク比抵抗は安定した変化になっている

ることである。この原因は、ディスク比抵抗は、多量のサンプリングデータの平均表示であることによる効果と、前述したようにディスクツールの鋭利性にあるものと考えられる。この接地部形態については、円すいでは主として摩擦抵抗が主要値となり、これに対してディスクは切削抵抗が主要抵抗値となるから、作業機抵抗の予測あるいは制御指標として利用する場合は、それぞれの抵抗特性により近似した傾向を出力するセンサの選択が有利であることを示唆している。

2. 10アール区画水田における土壌硬度測定 供試水

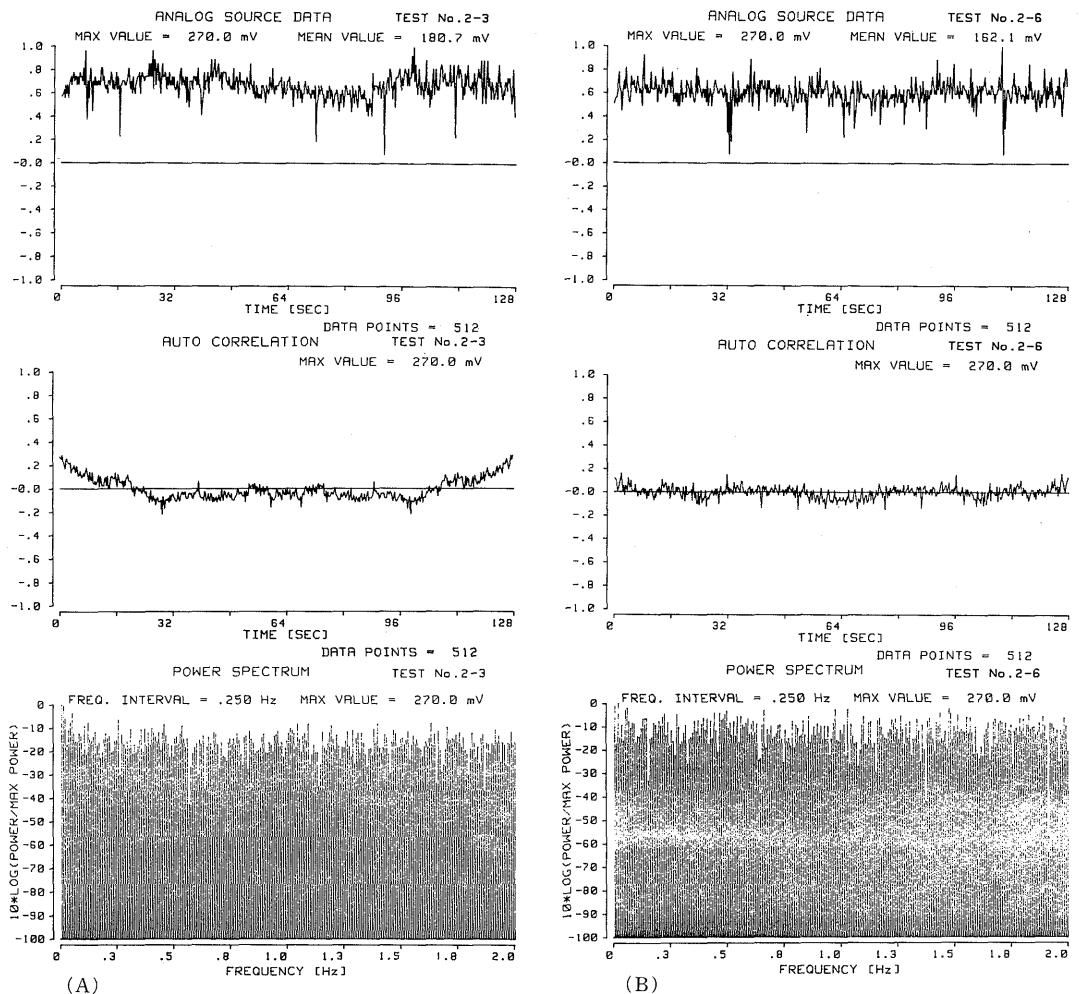


Fig. 11 Example of analog source data, auto correlation and power spectrum analysis on the measured soil hardness waves, drawn by the secondary processing program (test as in Fig. 10).

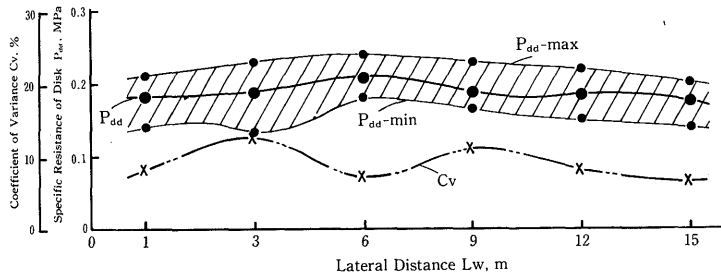


Fig. 12 Soil hardness distribution of the paddy field ( $P_{dd}$  data point is the average of 3,000 field measurements, test as in Fig. 10).

田は、水稲刈取後およそ3ヶ月経過のものである。モード1で実施した結果がFig. 10である。データサンプリングの条件は、前1項の場合と同じである。ただし、1測定レーンでの測定点数は45、横方向には3m間隔で6測定レーンを配し、縦方向はおおよそ42m間でサンプリングしている。そして区画端は、トラクタ走行回行のための空間域を約5mずつ設定している。なお、データの二次処理を考慮して、データレコードには縦方向測定個所のマーキングを行っている。実走行では、刈株上の測定もあり、区画内の含水比差などもあって、それらによる変動の傾向がみられる。同図には、各測定レーンのサンプリング終了時に、そのレーンの平均値ラベリングを実行させている。測定区画の中央レーンと側端レーンの二次処理結果をそれぞれFig. 11の(A)及び(B)で示した。同図からは明らかに中央レーンで硬度変動の大きい傾向が伺われるところであるが、Fig. 12で表わされている結果では大差のないものになっている。ほ場全体では、ほぼ中央で硬度が高く両側端に向うにつれ低い値を示している。しかし、変動係数の最大が第2レーン( $L_w=3$ m)の12.6%、標準偏差0.024MPaである。更に第4レーン( $L_w=9$ m)について5ブロックに分割したものの変動でも最大が前同様それぞれ12.5%、0.024MPaであった。Fig. 10にラベリングした供試水田の含水比や単位容積重からみて、比較的軟かい土壌状態であり、それなりの低い変動を示したと言える。

### 摘 要

ソイルパラメータの主要因子である土壌硬度の連続的な測定・集録を可能にするコンピュータ計測システムの

開発研究を行った。ディスクツールの土への作用反力を測定し、これをディスク比抵抗として表示する。本報では、キャリヤ走行による踏圧は場並びに水稲収穫後の水田でこれを供試し、測定した結果を立体的なソイルハードネスマップとして表示するプログラムなどを開発して、慣用の人手測定による円すい貫入抵抗値との比較、並びにサンプリングデータの特性解析を行った。大量のデータサンプリングやディスクツールの土作用特性もあって、ディスクセンサによる土壌硬度測定の有用性が認められた。なお、本システムは、実用を目途にしたアプローチであり、土作用機械の負荷変動に対する事前制御用センサに応用することを最終目的としている。

終わりに、本研究に協力いただいた昭和62年度の専攻学生に深甚の謝意を表する。

### 文 献

- 1) 小松 實・広田幸人・岡崎充之：フィールドテストにおけるコンピュータ計測(第1報)。農業機械学会誌, 48 103-106 (1986)
- 2) 小松 實・岡崎充之・広田幸人：フィールドテストにおけるコンピュータ計測(第2報)。農業機械学会誌, 48 242-246 (1986)
- 3) 小松 實・中尾 浩：フィールドテストにおけるコンピュータ計測(第3報)。農業機械学会誌, 49 493-496 (1987)
- 4) 増田正三・田中 孝・中西弥次郎：水田における地耐力の年間推移について。農業機械学会関西支部報, 29 77-79 (1971)