

表層土壌水分の空間分布特性に関する調査と検討

Characteristics of Spatial Distribution of Surface Soil Moisture in Bare Field

砂田憲吾^{*}・伊藤 強^{**}・虫明功臣^{***}・開發一郎^{****}

By Kengo SUNADA, Tuyosi ITO, Katumi MUSIAKE and Ichiro KAIHOTU

It is important to know characteristics of spatial distribution of surface soil moisture in conditions of various kinds of land use. This paper reports some results of the preliminary field survey for investigating the characteristics in bare fields. First, a method of surface soil sampling itself is examined. Second, some characteristics of soil moisture conditions in a dry field and wet paddy fields are studied. Last, spatial scale of distribution of soil moisture content in the relatively wide field is discussed.

Keywords: soil moisture, spatial distribution, soil sampling

1. はじめに

アクティブマイクロ波リモートセンシング (AMRS) の水文学への応用が本格的に開始されつつある。こうした背景にあって、種々の土壌条件・土地利用下での実際の表層土壌水分の空間的 (平面的) 分布特性を把握しておくことは今後のAMRSの観測仕様や地上分解能の設定のために重要である。他方、地表面熱・水フラックスなどの算定のためには、土壌水分分布特性やその空間スケールについての基本的条件設定を欠くことができない。もとより水文量の空間スケールについては対象・目的に応じて議論される必要がある¹⁾。本研究は、地表土壌水分の評価方法の確立および土壌水分の空間的分布状態とその特性を明らかにすることを目的として現地調査を中心にこれまでの考察²⁻⁵⁾を踏まえて検討を行ったものである。基本的に不均一性を有する土壌水分を的確かつ効率的に把握するためには、土壌水分量の測定方法そのものの検討も必要である。本稿では、裸地 (農地) での土壌水分量測定データを中心に、土壌サンプルのサイズの見直しから始め、必要なサンプリングの個数とスケールについて行った基礎的考察の結果をまず示す。続いて、30~50a 程度の規模の田畑内の水分分布特性について調べ、さらに、20~30ha規模での水田地域の場合について検討する。

本研究はERS-1土壌水分検証グループ (代表者: 東京大虫明教授)、および土木学会水理委員会陸域-大気

-
- | | | | | | |
|-----------------|-----|----|---------|------------|--------------------|
| [*] | 正会員 | 工博 | 山梨大学助教授 | 工学部土木環境工学科 | (〒400 甲府市武田4-3-11) |
| ^{**} | 正会員 | 工 | 山梨大学技官 | 工学部土木環境工学科 | (同 上) |
| ^{***} | 正会員 | 工博 | 東京大学教授 | 生産技術研究所第5部 | (〒106 港区六本木7-22-1) |
| ^{****} | 正会員 | 理博 | 広島大学助教授 | 総合科学部自然環境 | (〒724 東広島市鏡山1-7-1) |

系の水循環過程解明研究班（琵琶湖プロジェクト・代表者：山梨大砂田助教授）における、それぞれ千葉県、滋賀県の農場・農地で実施された共同観測のうち、土壤水分に関する資料に基づいて考察したものである。データとしては、変換やキャリブレーションを経ることなく、直接的な状態量いわば“生データ”のままで検討するものである。土壤水分の測定・サンプリングの方法については、これまでの報告²⁾を要約して示す。

2. 土壤水分量の測定とサンプリング²⁾

本研究では、不攪乱試料採取による直接測定である炉乾燥法（重量法）により測定を行うものとし、土壤水分量は体積含水率を基本に評価する（測定では常に同時に含水比も求めておく）。土壤サンプルの採取深さは、マイクロ波の水分反応深さとして報告されている 5cm程度⁶⁾をひとまず基準に設定し、一部に 2.5cmのものについても補足的に考察する。

(1) サンプリングのサイズと個数

すばやい試料保存などの条件を満たす円筒型貫入式のサンプラーを用いる。測定値のバラツキはサンプルのサイズにも関係するので、作業性を考慮してその大きさを 5.60cm^3 から 330.00cm^3 までの8種類に変化させて、それぞれ一地点から10個のサンプルをとり、そのバラツキを調べた。Fig.1 は砂質表層土壌における各サンプルサイズでの変動係数を示す。 15.15cm^3 以上ではそのバラツキも小さく、 20cm^3 以上においては変動係数がほとんど 0.1以下である。本研究では最適サンプラーとして、縦横比が 1:1に近い形状が望ましいことや混入砂礫の影響を考慮して、内径 5.5cm (118.79cm^3 、公称：100ccサンプラー)を用いることとした。

ある一地点付近を代表する水分量を効率的に把握するために必要な最低サンプリング個数についての検討を行った。まず、ある地点を中心に直径1mの範囲内で50個の土壤標本を採取し、この50個のデータの平均値をその地点の水分量を表す真値 (M_i) とみなす。50個のデータの中からランダムに n ($2 \sim 49$) 個を抽出し、その平均値を $M_{n,i}$ とする。ランダムに n 個を抽出する作業 i を何回（本研究では100回）も繰り返す。この一連の操作により、抽出個数について M_i に対する $M_{n,i}$ の変動係数を求めるとFig. 2のようになる。サンプルサイズの検討の時と同様に変動係数0.1を判断基準にすればサンプリング個数4個程度で急激に精度向上が期待できるようである。ただし、変動係数の絶対値は後述するように水分状態によっても異なるので、ここでは相対的な精度として理解しておく方がよい。

(2) サンプリングのスケール

4つの正方形格子9点で全体で1つの正方形を作りその一辺の距離（スケール： L ）を 3m～300m に変化させ

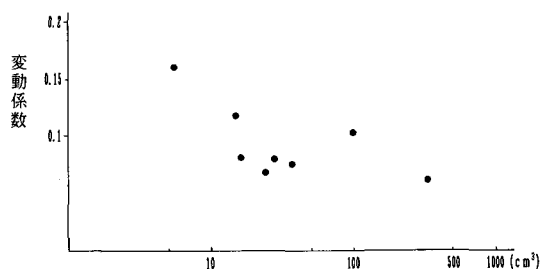


Fig. 1 サンプルサイズと体積含水率、変動係数

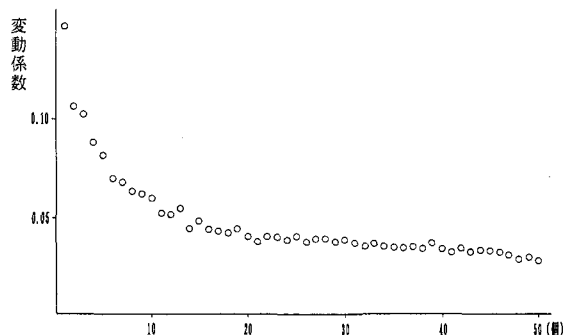


Fig. 2 サンプリング個数と変動係数

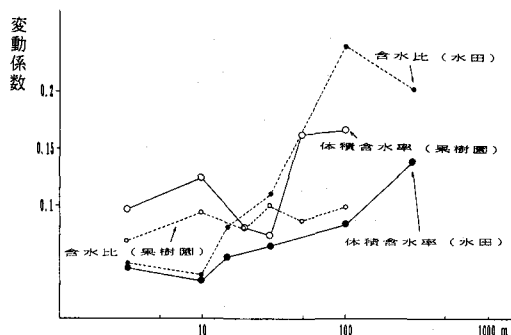


Fig. 3 スケールによる変動係数の変化

て、サンプリング個数1地点4個の測定方法で、そのバラツキを調べた。測定対象地域は広域にわたり平坦で均一な土地利用がなされている甲府盆地内の水田地帯と果樹園(桃)地帯であり、結果はFig.3のようになる。これによれば水田地帯においては体積含水率の変動係数が $L=30\text{m}$ の範囲内で0.1を下回っている。これに対して同一の水田の大きさを越える $L=50\text{m}$ 以上のスケールになると変動係数は急激に大きくなり、今回の測定地域の水田では、表層土壌水分量は水田1枚単位で分布していると考えられる。一方、果樹園においては水田地帯ほど明確な畑単位の区切りのない含水率の分布を示している。水田について、降雨後日数による含水率変化をスケール(L)=10m, 100mで調べるとFig.4のようになる。晴天乾燥の継続とともに両スケールとも標準偏差は減少する傾向にある。降雨により含水率は増加し、直後の1~3日では飽和状態により近いため標準偏差は小さいが、5日以後は $L=10\text{m}$ においてもバラツキが増している。これは、降雨後5日目以後の数日間は各地点の土壤構成の違いによる蒸発乾燥過程の違いが原因と考えられる。

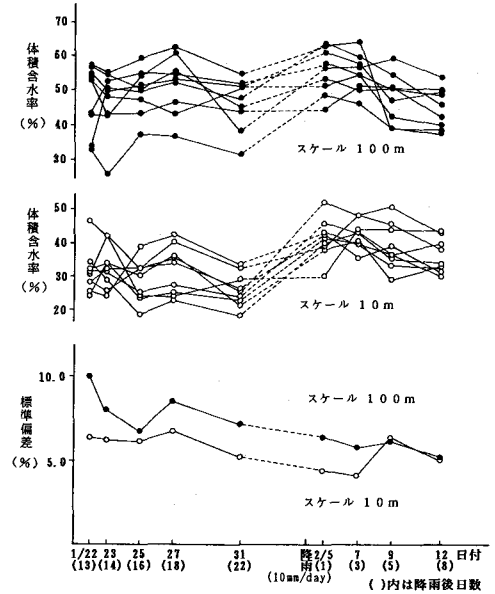


Fig.4 体積含水率の経日変化

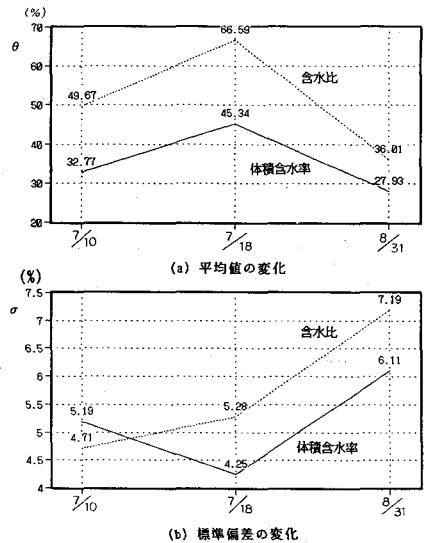


Fig.5 土壌水分量の変化(千葉)

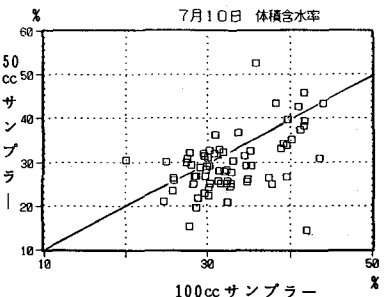


Fig.6 サンプラーの違いによる比較

3. 同一農地内の水分分布の評価

田や畑1枚ごとに平均水分量が変化するという前節までの結果をもとに、30a~50a規模の裸地(農地)での水分分布状況を把握する。フィールドはERS-1(SAR)による土壌水分検証の対象とした千葉県農業試験場農地(畑地)と琵琶湖プロジェクト集中観測田(米収穫後)である⁷⁾。前述のように、ここでも体積含水率を主に取り上げて考察する。また、以下の検討では多少の精度低下があっても全体の作業能率を考慮して1地点1個ないし2個のサンプリングで進めている。このフィールド検証では、能動方式マイクロ波の地表面土壌水分感応深さの検討も兼ねて100ccサンプラーと共に50ccサンプラー(深さ2.5cm)による測定も同時に行っているが、100ccサンプラーの結果を中心に考察する。

(1) 畑地での水分分布と空間相関

土壌水分量の測定は同一畑地で前述の測定法で3回行われた。測定フィールドの広さは90m×60mで、縦横10mピッチでサンプリングした。Fig.5は畑地全体の水分量の平均値と標準偏差の変化である。降雨後にあたる7月18日に湿潤状態になり、8月31日にはかなり乾燥状態が進み、同時にデータのバラツキも大きくなっている。この点は測上ら⁸⁾により50ccサンプラーを用いた一連の資料からも指摘され、前項Fig.4の結果とも符合する。まず、7月10日におけるサンプラーの違いによるフィールド全体のデータを比較すればFig.6のようになる。50ccサンプラーによる結果は100ccのものに較べて値も小さくバラツキのは、より表面で付近

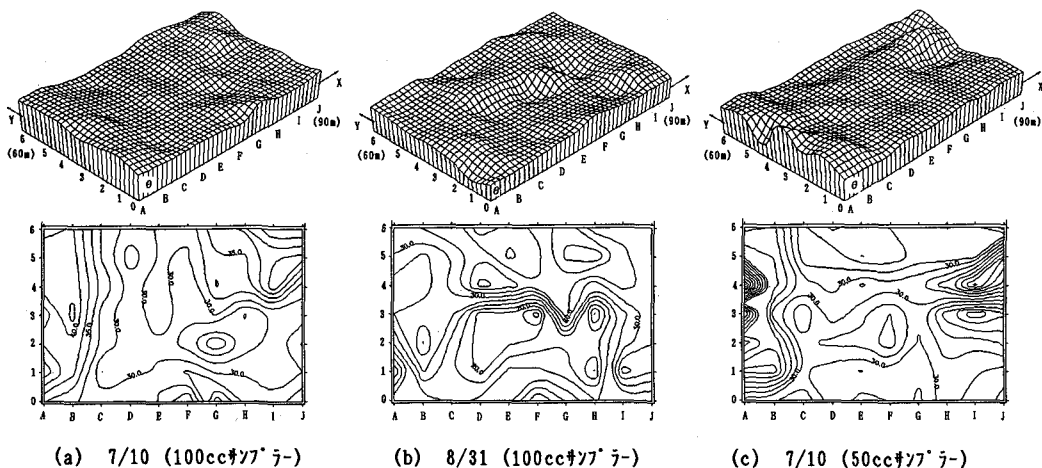


Fig. 7 畑地の体積含水率 θ (%)とその等高線 (千葉; x, y軸各目盛は10m²/f)

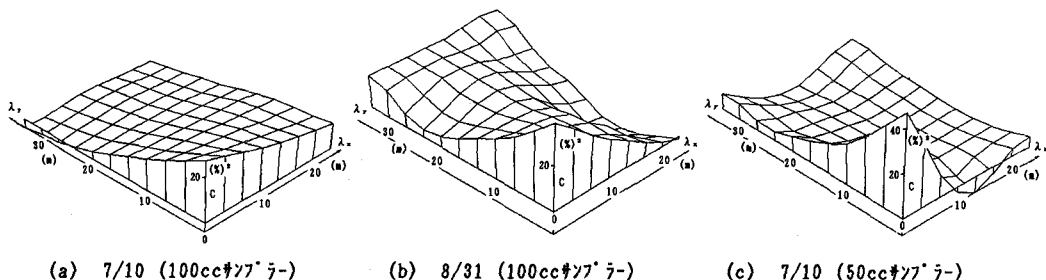


Fig. 8 畑地の体積含水率の空間相関C (千葉)

の土壤乾燥過程の違いを反映しているためである。100ccサンプラーによる7/10、8/31の両日の体積含水率の分布とその等高線を示せば Fig. 7 (a), (b) のようになる。ピッチ10m以内の値は内挿して描かれている。中間に降雨を含む50日の経過にもかかわらず、保水のパターンの大略は類似している。この傾向は水分量の多かった7/18日にも認められることから微地形や土壤構造などが影響していると考えられる。一方、これらの分布に対する空間自己相関関数を次式(1)のように定義して算定する。すなわち、

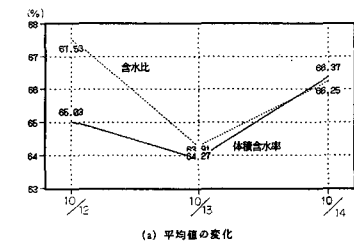
$$C(\lambda x, \lambda y) = (\theta(x, y) - \bar{\theta})(\theta(x + \lambda x, y + \lambda y) - \bar{\theta}) \quad (1)$$

ここに、 $C(\lambda x, \lambda y)$ は空間自己相関関数 (以下、空間相関と略称)、 $\theta(x, y)$ は x, y における体積含水率 (含水比)、 $\bar{\theta}$ は体積含水率 (含水比) の平均値である。

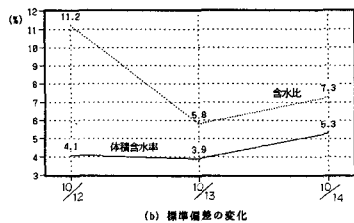
Fig. 6 に対して計算される空間相関は Fig. 8 (a), (b) のようになる。あまり判然としないが、空間スケールとして10m~20m程度と考えられる。水分量の大きかった7/18では空間スケールとして高々10mが得られており、乾燥化と共にスケールは若干増大する傾向にある。同様に50ccサンプラーによる場合について7/10の結果を示せば、Fig. 7 (c)、Fig. 8 (c) のようになる。これらの図から、フィールド内の水分量の相対的な分布状況は100ccの場合と概ね一致していることも判る。表面付近の場合 (50cc) ではより敏感で変化が大きい。

(2) 水田での水分分布と空間相関

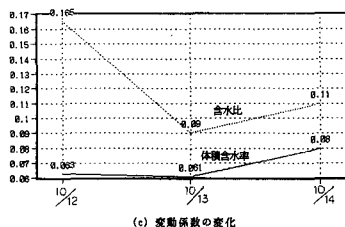
琵琶湖で共同観測として実施された集中観測田の位置は後掲のFig. 12中のAブロック (29-42) 番に示され、100m×30mの広さを持つ。前項と同じ10mピッチで土壌水分が測定され、連続3日間での平均値・標準偏差の変化はFig. 9のようであり、かなり湿潤状態にあった。12日未明と14日に小雨があり13日は晴であった。前項の畑の場合とは逆に、水分量の増加と共にばらつきが増している。10/12と10/13における体積含水率の分布



(a) 平均値の変化

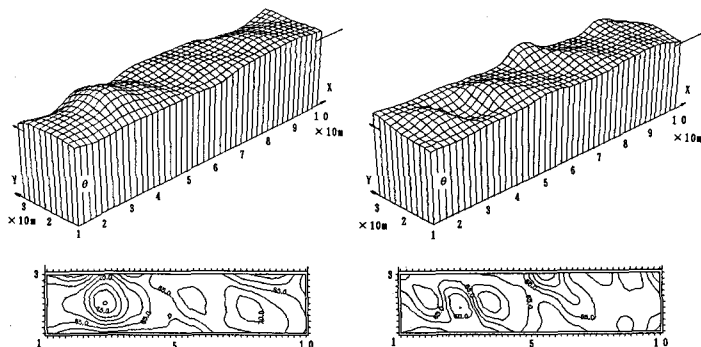


(b) 標準偏差の変化



(c) 空間相関係数の変化

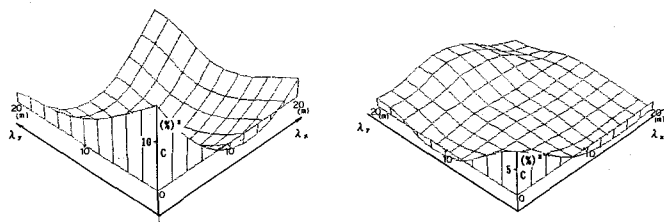
Fig. 9 土壌水分量の変化 (琵琶湖)



(a) 10/12 (100ccサンプラー)

(b) 10/13 (100ccサンプラー)

Fig. 10 集中田の体積含水率 θ (%)の分布とその等高線 (琵琶湖)



(a) 10/12 (100ccサンプラー)

(b) 10/13 (100ccサンプラー)

Fig. 11 集中田の体積含水率の空間相関C (琵琶湖)

はFig. 10のようになり、分布のパターンは両日でありていない。一方、空間相関はFig. 11のようになり、サンプリングのピッチ 10mと同じスケールではほぼ相関はなくなる。この程度の湿潤状態になると圃場内で水分量の場所的な特徴が少なくランダムになるようである。

4. 広域サンプリングによる水分分布特性

琵琶湖プロジェクト (第1回試験観測) では、前述した集中観測田での密なサンプリングと同時に420m×600mにおけるより広い範囲での 100cc土壌サンプリングが行われた。集中田サンプリングに対して、ここでは便宜上「広域サンプリング」と呼称する。Fig. 12は行われたサンプリングの範囲を示している。この場合も作業能率を考慮して1枚2点のサンプリングを行っている (Fig. 12中に測点番号)。

前節と同様、10/12、10/13における全域の体積含水率分布、分布等高線はFig. 13のようになる。xはほぼ南北方向、yはほぼ東西方向を示す。水分量についての全体の平均は晴れた13日に減少しているが、分布のパターンは両日で極めてよく似かよっている。一方、空間相関はFig. 14に示される。標準的な田は南北 (x方向) に100m、東西 (y方向) に30mである。12日、13日両日の空間相関値もよく類似しており、空間スケ

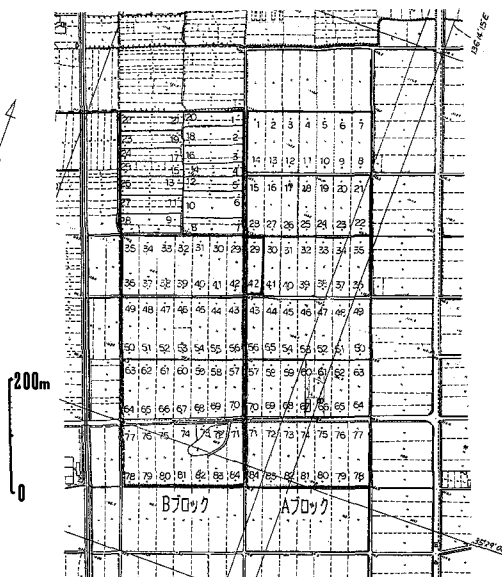


Fig. 12 広域サンプリング対象フィールド (琵琶湖)

ールとしてx方向に100m、y方向に60m程度と判読することができる。地形は緩やかに東西方向に傾斜していることもあり、東西に隣接する2~3枚の田の水分状態が似ていることを反映している。よく耕地整理された類似の土地利用の場合には、同様な水分状態にもなり得るようである。

5. おわりに

農地を中心とする現地調査の結果をもとに表層土壌水分量の空間分布特性について検討した。まだ限定的な地表面を対象としたものに留まるが結論的に得られた事項を要約すれば以下になる。

1. サンプラーとしては最低20cm³以上の容積が必要で、対象土壌と目的によりサイズを増大するのがよい。

2. 1点4個のデータで測定 of 精度の格段の向上が期待できる。

3. 田では基本的に1枚ごとに土壌水分量が異なるが、畑（果樹園）ではその傾向は弱い。

4. 田でも管理・利用方法により隣接する田では類似した土壌水分状態を示すことがある。

5. 乾燥化により同一田畑内の水分量のばらつきが増大する。

より一般的な表層水分分布特性を知るためには、さらに多様な水文条件、土地利用条件のもとでの系統的なデータの収集、蓄積が必要である。ここでの結果をもとに今後も現地の調査と検討を進めて行きたい。

最後に、土壌サンプリングおよび資料整理に協力された、三重県水谷 寛、住友建設篠崎信太郎、東京大学生産技術研究所、沖 大幹・小池雅洋・弘中貞之・仲江川敏之・洲上吾郎の各氏に深く感謝の意を表します。なお、本研究の一部は住友財団「92年度環境研究助成」（代表者：山梨大学・砂田憲吾）の補助を受けて行われたものであり、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 砂田憲吾・木村真章：水文学評価のための最適空間スケールに関する基礎的研究、水工学論文集、Vol. 35, pp. 675-678, 1991.
- 2) 砂田憲吾・伊藤 強・水谷 寛：表層土壌水分の空間分布特性に関する基礎調査、水文・水資源学会研究発表会要旨集、pp. 104-105, 1992.
- 3) 洲上吾郎・仲江川敏之・沖 大幹・虫明功臣：土壌サンプリングのデータの空間代表性、水工学論文集、Vol. 37, pp. 849-852, 1993.
- 4) 虫明功臣ほか：マイクロ波散乱計による土壌水分検出のための野外実験、土木学会関東支部研究発表会概要集、No. 20, pp. 130-131, 1993.
- 5) 虫明功臣・沖 大幹・梅原和貴：SARデータ利用のための土壌水分空間分布調査、土木学会関東支部研究発表会概要集、No. 20, pp. 132-133, 1993.
- 6) 例えば、深見和彦：土壌水分のリモートセンシング、水文・水資源研究のためのリモートセンシング講座、水文・水資源学会、pp. 53-69, 1990.
- 7) 砂田憲吾：陸域-大気系の水循環過程に関する共同観測・解析計画「琵琶湖プロジェクト試験観測の報告」、水文・水資源学会誌、Vol. 6, No. 1, p. 55-60, 1993.

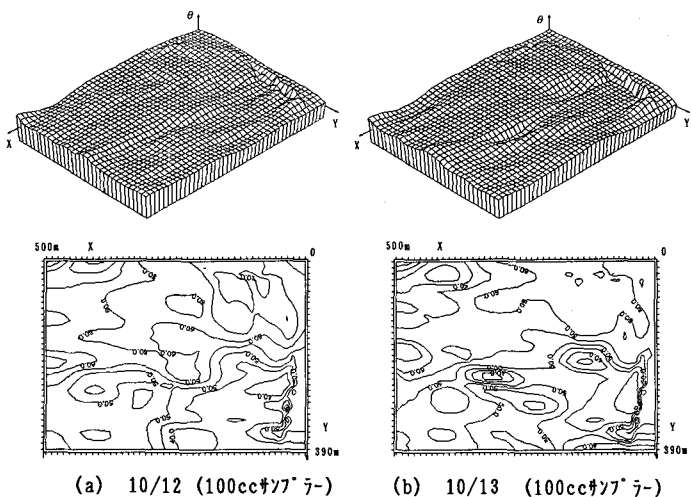


Fig. 13 広域水田の体積含水率 θ (%)の分布とその等高線（琵琶湖）

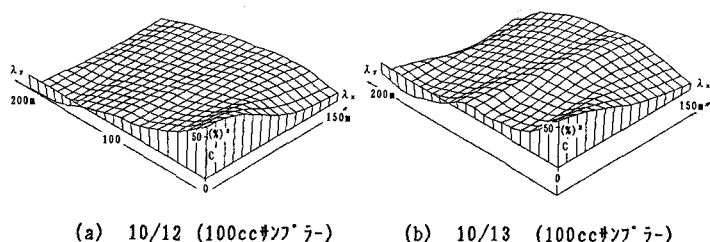


Fig. 14 広域水田の体積含水率の空間相関C（琵琶湖）