

熱伝導率測定による土中水分量の推定

岐阜大学工学部 ○佐藤 健
岐 建 木 村 野 村 英 明
日 特 建 設 小 出 勝 利

1 まえがき

不飽和土の透水特性や力学特性を考えるうえで、土の水分保持曲線がたいへん重要になる。この曲線は、通常、サクション-飽和度関係として表示されることが多い。サクション測定に関する研究もいろいろ行われている。土中水分量（飽和度，体積含水率）を計測する方法として、

(1) 原理的方法（土試料採取による直接計測）

(2) 電気的方法（電気誘導率や水分密度計など）

が考えられている。(1)は方法が簡単で、測定結果の精度も良好であり、試料採取が手際よく行えるならば土中水分量測定法として最も確実な方法である。(2)は土中水分量に応じて変化する、(i)電気抵抗、(ii)静電気容量、(iii)放射性中性子の散乱度を測定する方法である。室内透水試験では、ガンマー線密度計を用いて、時々刻々変化する土中水分量を計測することに成功している。

本論文で示される方法も、基本的には(2)に分類されるものである。熱伝導率測定によって土中水分量（飽和度）を推定しようとした理由は、これが従来あまり行われたことのない方法であることに加えて、

(a) 放射性物質のような特別の物質を使用せずに測定できるので、比較的安価な装置で済み、取扱いが簡単である。

(b) 古くから研究されている熱伝導論の援用により、不飽和土の各状態量と熱伝導率の理論的關係を得ることができるので、(2)の方法で常に問題になる較正關係の作成がこの方法では不要である。

等の利点が考えられたからである。

熱伝導率は地盤の熱的性質を表わす指標の一つで、その測定法がいろいろと考えられている。しかしながら、土の熱伝導率を測定するための定まった方法はまだ確立されていない。したがって、本研究の所期の目的を達成するためには、測定方法が簡単で、誰でも精度のよい結果の得られる熱伝導率測定法の開発も不可欠であると考えている。

2 熱伝導率を推定する従来の方法

熱伝導現象を表わす種々のモデルが提案されており、不飽和土に焦点を絞った三野らの研究²⁾にしたがってそれらを整理すると次のようになる。

(1) 不連続体モデル

(2) 連続体モデル

(3) 組み合わせモデル

不連続体モデルは、不飽和土を構成する土粒子、水、空気の各相が独立して熱伝導をつかさどる。最も簡単な例として平行モデルが知られており、そのマクロ的熱伝導率は各相の熱伝導率の体積平均で得られる。モデルが簡単なこともあり、実際の熱伝導現象に合致するような工夫を施したモデルがその他にもいくつか提案されている。

(2)では、二相系の不均質混合体に対して誘導された Maxwell モデルを不飽和土にまで拡張した De Vries の方法¹⁾が有名である。De Vries モデルでは、完全分散系しか考えていないとの反省から、土粒子どうしの接触効果を考慮したモデルも考えられている。

不飽和土は、低水分領域では熱伝導率の増加率は小さいが、水分量が多くなるとその増加率が大きくなる

Evaluation of Saturation by Measuring Thermal conductivity in Soil. T.Sato (Gifu Univ.),
H.Nomura (Giken Kimura Co.) and K.Koide (Nittoc Construction Co.,)

傾向を示すことが多い。熱橋作用と呼ばれているが、こうした特徴を示す不飽和土の熱伝導を考えるため、三野²⁾は、間隙を水分が直接熱伝導に関与しない間隙（Ⅰ間隙）、水分量の変化によって熱伝導が著しい変化を示す間隙（Ⅱ間隙）、さらに十分飽和に近づいたときに熱伝導率がそれ程変化しない役目をする間隙（Ⅲ間隙）に分けた。そして各水分量の段階で、De Vries式を適用して不飽和土のマクロ的熱伝導率を推定する方法を提案した。これは、(1)のモデルと(2)のモデルを巧みに組合わせた方法で、(3)として整理しておく。

この他に、飽和度をパラメーターにして、熱伝導率をロジスチック曲線で近似する方法も提案されている。この方法は飽和度との理論的關係を示したというよりも、熱伝導率測定結果にロジスチック曲線をフィッティングさせて、飽和度との経験的關係を示そうというもので、本論文で議論している推定法とは少し異なる性格のものとして位置づけされる。

この論文で示すモデルも、基本的には(2)に属するものである。(1)の不連続体モデルは、土を単純化しすぎており、(3)に分類される三野らの方法は、熱橋作用を表現するために3つの間隙を設けたけれども、各間隙に対応した水分量の推定が不明で、今のところ仮定値を用いざるを得ない等の問題点が残されている。筆者がここで示す熱伝導率と飽和度の関係式には、実験定数あるいはフィッティングのための仮定値は含まれていない。精度は少し落ちるかもしれないが、不飽和土を連続体とみなして、空間平均化されたマクロ的な熱伝導率と飽和度の理論的關係を導いておけば、不飽和土の水分量推定の際、事前の較正曲線を作成する手間が省ける。また、熱伝導率の測定結果との比較によって推定法の精度向上への足がかりも得られるものと考えている。

3 熱伝導率と飽和度の関係

筆者らは、De Vries式のような実験定数を用いずに巨視的熱伝導率の表現を試みた。提案する方法の流れをFig.1に示したが、微視的空間でもフーリエの熱伝導則が成り立つと仮定し、温度場の支配方程式を(Ⅰ)式のように考えて、この支配方程式をフーリエ級数展開によって順次巨視的空間へと移動させる。また、空間内の熱伝導率を確率変量として扱え、(Ⅱ)式のような密度関数を仮定した。(Ⅲ)式中の計算は、(Ⅳ)式の平均化操作によって計算した。筆者らの提案式には、De Vries式のような実験定数は入っていない。したがって、各相の熱伝導率（本当はこの値を測定するのが非常に難しい）が与えられれば、その土の任意の飽和度における熱伝導率は、Fig.1の手順で推定できることになる。

熱伝導率と飽和度の関係は、Fig.1中の(Ⅳ)式で表現される。導かれた巨視的熱伝導率の特徴を示せば、

(1) 熱伝導率に関係する要因として、間隙率、飽和度が挙げられるが、従来言われている土粒子径は入らない。(Fig.2, 3)。

(2) 熱伝導率の値は、不飽和土の各成分の体積平均から求まる並列モデルの値より常に小さくなる。

(Fig.4)

4 他の方法との比較

筆者らの式の適用性を見つめるために、不飽和土の熱伝導率に関する既往の実験データとの比較を行った(Fig.4)。縦軸に熱伝導率、横軸に体積含水率をとっている。用いた実験データは、農業土木学会論文集、第103号³⁾に掲載された北海道落部近辺のクロボク土である。De Vries式においては、形状係数 g_i を $\frac{1}{3}$ と仮定している。なお、空気、水の熱伝導率 (cal / cms²°C) はそれぞれ、 5.8×10^{-5} 、 1.43×10^{-3} と仮定した。土粒子の熱伝導率については文献³⁾に示された値にもとづき、 1.43×10^{-3} と仮定し比較している。

5 熱伝導率の測定

熱伝導率の測定方法には定常法と非定常法がある。地盤の熱伝導率の測定法として考えておくべきことは、少ない温度変化で測定できて、しかも短時間で測定することができる方法を選ぶことである。そのような条

件を具備していると思われたプローブ法⁴⁾を用いた。

試料の間隙率が一定($\gamma_d = 1.50 \text{ gf/cm}^3$)になるように注意しながら、飽和度をいろいろ変えた円柱供試体を作成し、熱伝導率の測定を行った。その結果を Fig.5 に示した。絶乾状態と完全飽和状態では、10倍ほど熱伝導率に変化している。高飽和度域における熱伝導率の増加割合はそれほどではないが、絶乾状態から飽和度20%位までは、飽和度の増加とともに熱伝導率はかなり急激に増加する。いずれにしても、土中水分量と熱伝導率の間にはかなり高い相関のあることが分かる。

Fig.5中には、ヒート・プローブ法によって測定された熱伝導率⁵⁾も示した。今回の測定試料にくらべ間隙率の変動が大きく($\gamma_d = 1.30 \sim 1.59 \text{ gf/cm}^3$)になっているが、概ね同様な値を示しており、測定結果の妥当性が確認される。

6 飽和度の推定

巨視的熱伝導率は、プローブ法によって測定できるので、Fig.1の(v)式によって、土中水分量を推定できないか検討してみた。(v)式を用いるには、土粒子、水、空気各相の熱伝導率が既知となっていないとてはならない。水と空気の熱伝導率は、理科年表等によって比較的容易に知ることができる。しかしながら、土粒子だけの熱伝導率を知るとは大変難しいと思われた。実験では、飽和状態つまり水・土粒子の二相構造のときの熱伝導率にもとづいて、(v)式の近似をはかった。(v)式の計算に必要な熱伝導率の空間平均値の近似式を示せば次のようになる。

$$\langle \lambda \rangle = n(1 - S_r) \lambda_a + (1 - n + n S_r) \lambda_{w+s}$$

ここで、 λ_a ; 空気の熱伝導率 ($5.8 \times 10^{-5} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$) ; λ_{w+s} ; 飽和状態の熱伝導率

近似モデルから得られた飽和度の値と計測直後の含水比測定によって求めた飽和度を比較したところ、Fig. 6, 7 程度の対応度を示した。飽和度50%程度までは比較的良好な精度で飽和度が推定されるが、50~80%において、いく分大き目の値が推定される結果となっている。今後更に計測例の蓄積をはかるとともに、精度向上に努める予定である。

参 考 文 献

- 1) D.A De Vries : Thermal Properties of Soils, Physics of Environment, W. R. North-Holl and Pub. Co. pp.210~235, 1963.
- 2) 三野 徹, 石田智久, 丸山利輔 : 三相土壌の熱伝導率モデルと熱伝導率計算による推定, 農業土木学会論文集, 第103号, pp.35~43, 1983.
- 3) 前田 隆, 相馬尅之, 池端克則 : 主として保水性からみたクロボク土の熱的性質, 農業土木学会論文集, 第103号, pp.13~20, 1983.
- 4) T. Kasubuchi : Twin transient-state cylindrical probe method for the determination of thermal conductivity of soil, Soil Science, No.124, pp.255-258, 1977.
- 5) 姚 義久, 柳沢栄司 : 土の伝熱特性, 土の凍結に関するシンポジウム発表論文集, pp. 75~80, 1986.

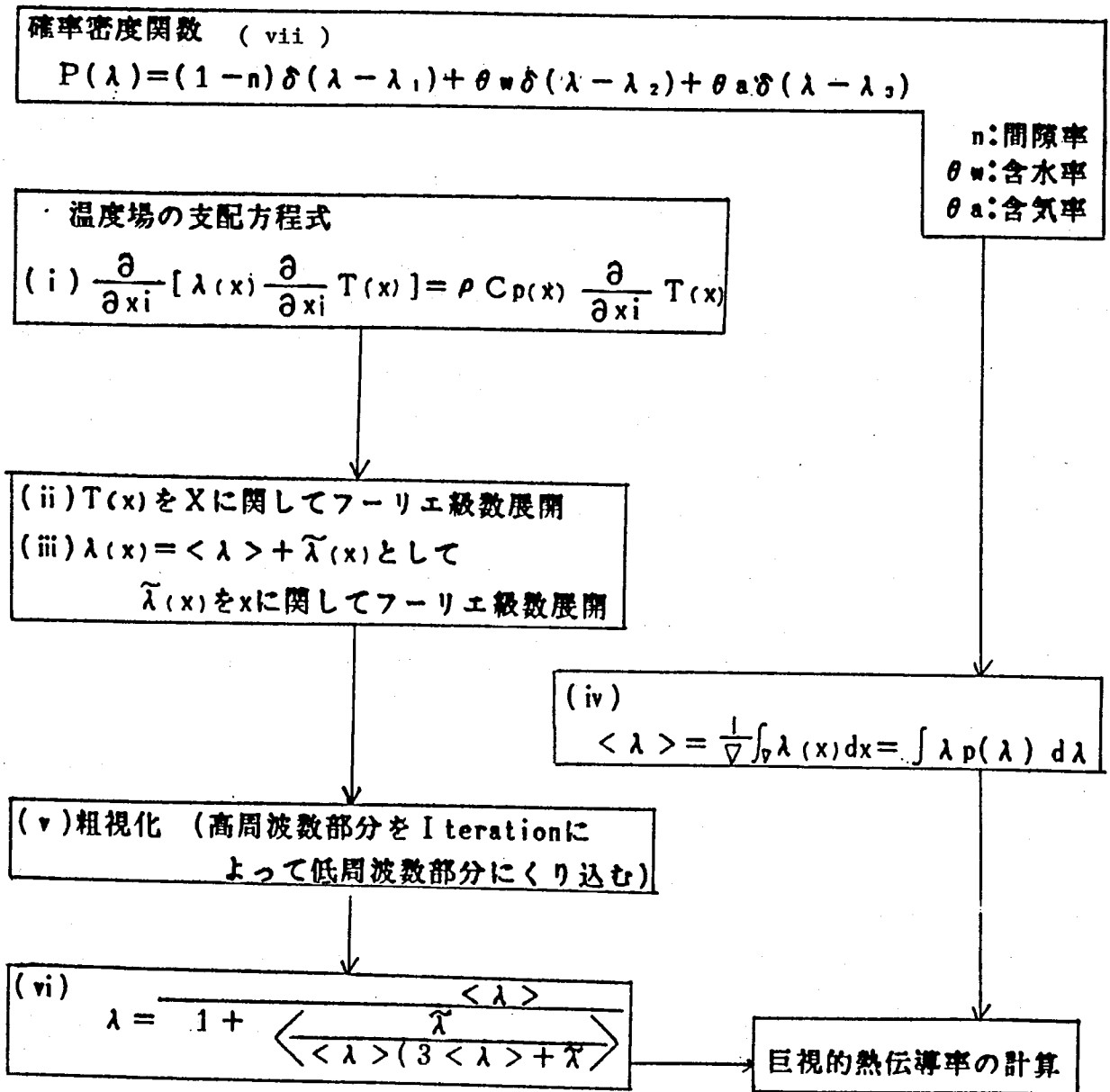


Fig.1 熱伝導率推定のフロー

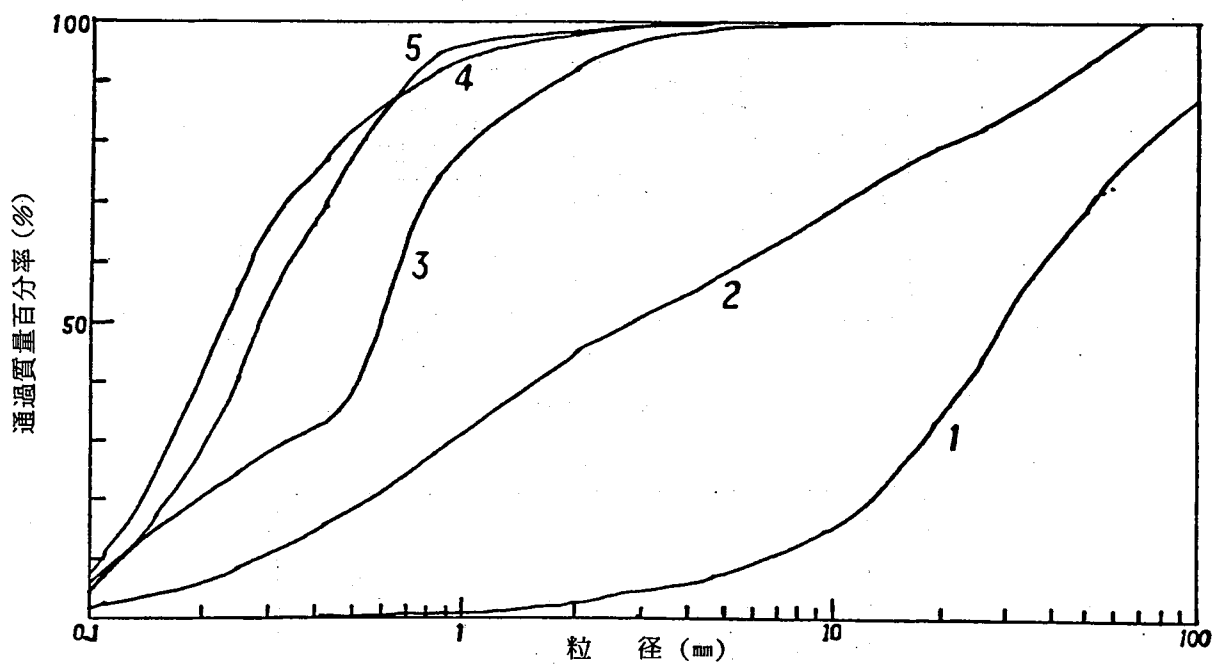


Fig.2 粒径加積曲線 (A)

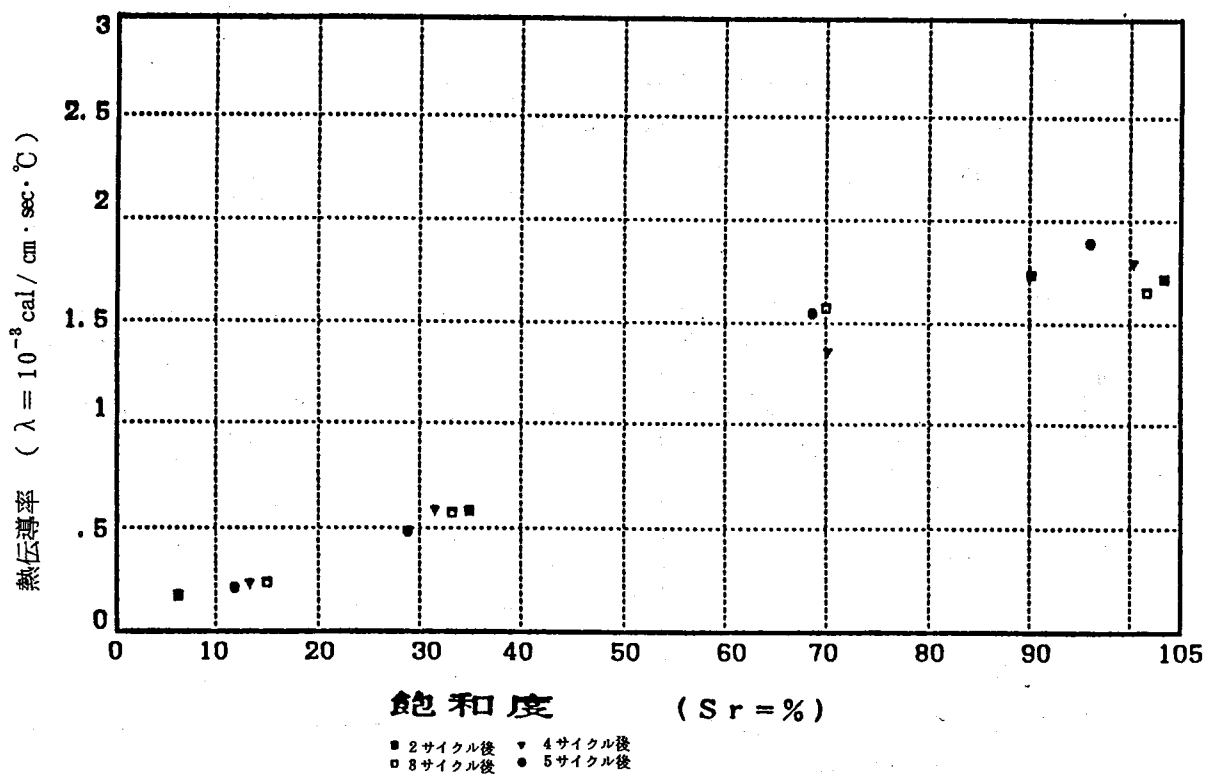


Fig.3 各サイクル毎の熱伝導率と飽和度の関係

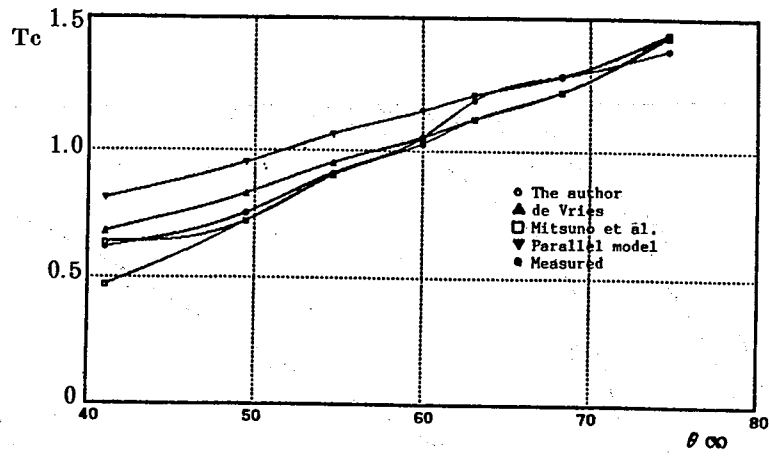


Fig.4 推定値と各方法による値との比較

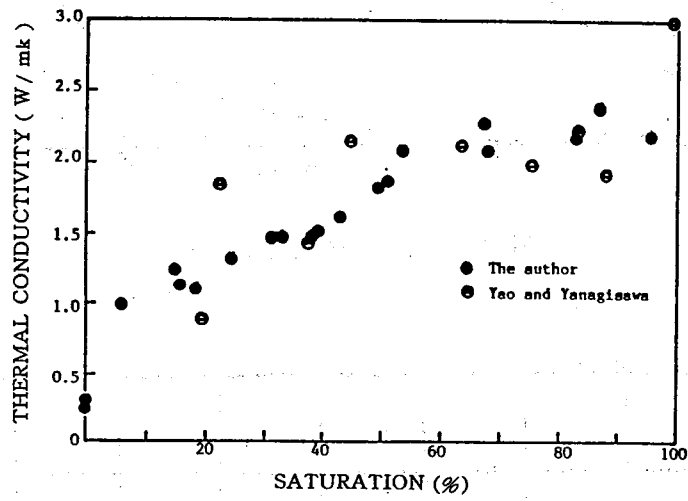


Fig.5 双子型プローブ法による測定値と他の方法による結果との比較

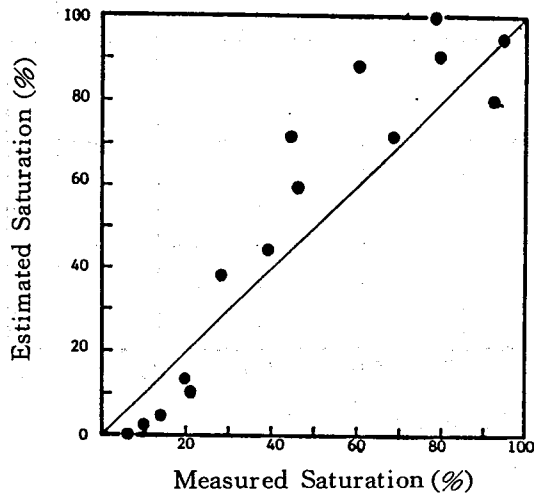


Fig.6 飽和度の推定値と計測値との比較 (標準砂)

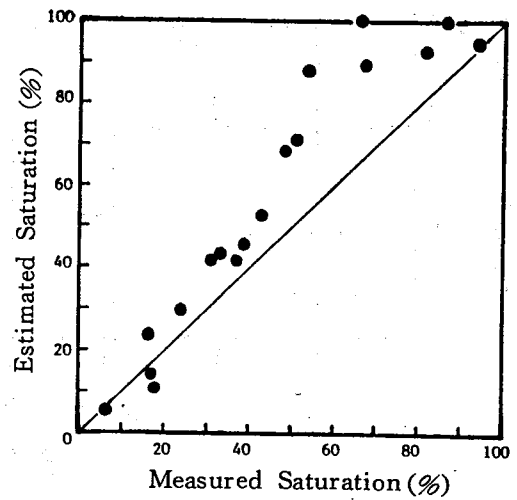


Fig.7 飽和度の推定値と計測値の比較 (シルト)