

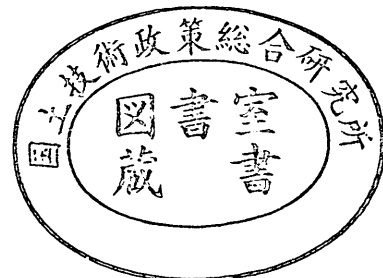
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 30 NO. 4 DEC. 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (Report of P. H. R. I.)

第30巻 第4号 (Vol.30, No.4) 1991年12月 (Dec.1991)

目 次 (CONTENTS)

1. 直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法
.....高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均.....3~34
(Experimental Study on Wave Forces Acting on Perforated Wall Caisson Breakwaters
..... Shigeo TAKAHASHI, Ken-ichirou SHIMOSAKO and Hitoshi SASAKI)
2. 信頼性理論による防波堤の滑動安定性に関する理論的検討
.....高山知司・藤井 久.....35~64
(Probabilistic Estimation of Stability of Slide for Caisson Type Breakwaters
..... Tomotsuka TAKAYAMA, Hisashi FUJII)
3. 繰り返し载荷を受ける粘土の強度・変形特性
.....山崎浩之・善 功企・加賀谷宏基・館下 徹.....65~83
(Strength and Deformation Characteristics of Clays due to Cyclic Loading
..... Hiroyuki YAMZAKI, Koki ZEN, Hiroki KAGAYA and Toru TACHISHITA)
4. RI を利用した海底密度測定器の開発
.....石塚浩次・根本孝志.....85~109
(Development of Mud Layer Density Meter Using Radio Isotope
.....Koji ISHIZUKA and Takashi NEMOTO)

4. RI を利用した海底密度測定器の開発

石塚浩次*・根本孝志**

要 旨

海底が軟弱な海域につくられた航路においては、粒径の細かい粘土、シルトからなる大量の泥土埋没があり、航路水深の維持管理上の課題となっている。その課題の一つに航路水深を埋没泥土の密度によって管理する必要性が求められており、海底の密度の測定技術が必要となっている。

本論文は、航路埋没泥土等の密度測定器開発のため、ガンマー線の泥土内の吸収または散乱特性を利用する場合の泥土密度とガンマー線の計数との相関について理論および室内実験により基本的な検討を行っている。これらの検討結果から、泥土密度の測定においては、ガンマー線の泥土内の吸収特性を利用することが測定性能上優れていることを明らかにした。更に、ガンマー線の泥土内吸収特性を利用した密度測定器の開発を行い、模擬泥土を用いた試験により測定精度、性能を明らかにしている。開発した測定器は、放射線源数量3.7 MBq 以下のガンマー線源を用いており、密度検出部、データ表示・演算部から構成される。また、実海域における密度測定のため、船上からの操作により泥土内を上下に移動し密度の垂直分布を測定するシステムを提案している。開発した測定器の主な測定性能は、以下の通りである。

- (1)泥土密度の測定精度は、サンプリング密度に対してほぼ±1%以下である。
- (2)測定データの安定性は、ガンマー線計数の平均時間が10秒以上になると安定し、標準偏差は0.01 g/cm³以下になる。
- (3)泥土内の垂直方向の密度測定は、30cm/min 程度の移動速度により連続測定が行える。

キーワード：航路埋没、シルテーション、泥土密度測定、放射線源、維持浚渫

* 機械技術部 主任研究官

** 機械技術部 計測施工研究室

4. Development of Mud Layer Density Meter Using Radio Isotope

Koji ISHIZUKA *
Takashi NEMOTO **

Synopsis

The large volume of fluid mud deposits with soft sediment properties like silty sand or clay in the approach channels has become the significant obstacles for keeping sufficient water depth. In these circumstances, it is eager to demand to develop new measuring system for the mud density at the sea bottom in order to grasp the situations of fluid mud existing on regular sea bottom.

In this study, the development of mud layer density meter with gamma ray is described, and theoretical or experimental discussion on the relationship between gamma ray counts and mud density are also treated. From the results of the study, it is revealed that the use with gamma ray absorption should have advantages on measuring stability compared to those with gamma ray scattering. Finally, in the study, the layer density meter for practical use was developed on the basis of gamma ray absorption system, which brought another experimental results on its measuring characteristics, accuracy, etc. against provided pseudo fluid mud. The density meter developed hereupon uses gamma ray source of which activity is below 3.7 MBq, and consists of density sensor unit, data processing unit and data display section. Furthermore, the practical measuring system is proposed, which is controlled easily from survey boat and can give sufficient vertical density profiles of fluid mud.

The principal characteristics of the mud layer density meter are in the followings.

- (1) Measuring accuracy for the density of fluid mud is less than $\pm 1\%$.
- (2) Measured data could be stable for the averaging time over 10 second, and, then, the standard deviation is kept under 0.01 g/cm^3 .
- (3) Satisfactory measurement on vertical density configuration can be achieved continuously at the moving speed of around 30cm/min.

Key Words : Deposits at approach channels, Siltaion, Mud layer density, Gamma ray source, Maintenance dredging

* Senior Research Engineer, Machinery Division.

** Member of Working Craft Development Laboratory, Machinery Division.

目 次

要 旨	85
1. まえがき	89
2. 泥土埋没航路の維持管理	89
3. γ 線による物質密度の測定原理	89
3.1 γ 線と物質の相互作用	89
3.2 γ 線の物質内減衰	91
3.3 γ 線を利用した物質密度の測定原理	92
4. γ 線の泥土内の基本特性実験	93
4.1 実験の内容, 条件	93
4.2 実験結果	96
5. 実験結果と計算結果の比較	99
6. γ 線吸収型密度測定器の開発	101
6.1 開発機器の概要	101
6.2 開発機器の測定性能, 精度	103
7. 泥土内密度測定システム	106
8. あとがき	108
参考文献	109

1. まえがき

我が国の港湾は比較的天然の地形に恵まれた海域に整備されてきたため、河川に位置する場合を除き、航路および泊地水深の維持管理を特に必要としないものが多い。しかし、熊本港に見られるような海底が軟弱な海域につくられた港の航路においては、粒径の細かい粘土、シルトからなる泥土の埋没が予想され、航路水深の維持管理上の課題となっている。その課題の一つとして、波、潮流によって容易に運ばれ航路に埋没した泥土が、初期の状態においては必ずしも船舶の安全航行に支障をきたさないものの、通常の音響測深器ではその表面近くが測深されることがある。そのため、船舶の安全航行の観点と維持浚渫の経済性との相反した問題として航路水深を管理する必要に迫られている。

このような泥土の航路埋没問題は、ヨーロッパ、東南アジア諸国等の航路に数多く見られ、オランダのユーロポート港においては可航水深 (Nautical Depth) として、密度 1.2 g/cm^3 (SI 単位) と定義している。この密度 1.2 g/cm^3 の泥土層と音響による測深値の差は大きい場合には $1 \sim 2 \text{ m}$ となり、維持浚渫の経済性に大きな影響を及ぼしている。この泥土密度の測定は、放射線源を用いた測定器が多く用いられている。放射線源としてはガンマ線源 (以下 γ 線源とする) が用いられ、線源から放射された γ 線の泥土内の吸収減衰量が密度に比例することを利用して、 γ 線源を用いて泥土密度を測定する場合、強い線源ほど γ 線の放射量が多くなるため、1 点当たりの測定が短時間に行える。しかし、一方でその取り扱いが線源の強さが規定された数量以上になると、法的な安全対策と管理体制が必要になる。ヨーロッパで開発された γ 線源を用いた泥土密度測定器¹⁾²⁾³⁾⁴⁾は、いずれも日本国内においては原子力関係法の適用を受け、実海域で使用することは事実上難しいものが多い。一方、日本国内においても、浚渫船の排砂管の含泥率測定、また陸上の地下検層⁵⁾等に放射線源が数多く利用されている。しかし、比較的強い放射線源が用いられていることや、海底の泥土密度測定を目的に開発したものはない。

開発した海底密度測定器は、放射線源の強度 3.7 MBq 以下の γ 線源を用いたもので、調査船等から直接海底の底質密度を測定できるものである。測定器は γ 線の密度検出部、表示・演算部および密度検出部全体の泥土内上下動装置から構成され、法的規制を受けることなく容易に現場調査が行えるものである。そのため、日本国内においても粘土、シルト等により埋没する航路および泊地の適正な維持管理、また他の同様な港湾工事の調査にも

利用できるものとする。

2. 泥土埋没航路の維持管理¹⁾³⁾⁶⁾

粒径の細かい粘土やシルトからなる泥土は、波、潮流によって容易に運ばれ航路や泊地に堆積し、堆積の直後には含水率の高いフルードマッドと呼ばれる浮泥層を形成する。この浮泥層は船舶の航行に直接影響を及ぼすことはないが、時間の経過と共に泥土の自重圧密が進行し、やがてある層を境にして密度、粘性も高くなり、船舶の航行に支障のある層とない層に分かれる。ヨーロッパ等においては、このような航路水深の測深に $33 \text{ kHz} / 210 \text{ kHz}$ の 2 周波の音響測深器がよく用いられている。音響周波数による泥土の検出面については未だ研究の余地はあるが、 210 kHz によって泥土の表面を測深し 33 kHz によって泥土の下層付近を測深しているものである。 $33 \text{ kHz} / 210 \text{ kHz}$ の 2 周波の測深器による測深記録例を図-1 に示す。2 周波による測定値からの泥土の厚さは図-1 に示す例でも 1 m 以上になり、 33 kHz の測深値はレッドの測深値とはほぼ同様な位置を検出している。このような泥土で埋没する航路のユーロポート港における航路水深の定義を図-2 に示す。この密度による可航水深は、タンカー、またドラグサクソン船等の実際の船舶による泥土埋没航路における航行試験を基に、次の 2 つの基準を満足するものとしている。

- ①最大喫水時でも船体に何ら損傷を与えないこと。
- ②船の航行自体に影響を及ぼさないこと。

そして、音響測深の測定結果と密度の測定結果を併記した水深図により管理している。

一方、我が国においては航路水深は音響測深によって行われており、周波数を $100 \sim 200 \text{ kHz}$ として海上保安庁水路部との協議により定めている。この周波数では、前述の通り泥土層の表面付近を測深することになる。そして、泥土の埋没や移動は波、潮流によって比較的簡単に起こるため、音響測深の測深値は測定日によっても異なることが予想される。

3. γ 線による物質密度の測定原理

3.1 γ 線と物質の相互作用

γ 線は X 線と同様に波動と考えられる電磁波であり、そのエネルギーは光子と呼ばれる量子によって運ばれる。この光子と物質との作用の中でもっとも重要な過程は、光電効果、コンプトン効果、電子対生成の 3 つである。この 3 つの効果の中で、物質密度の測定に重要な係わり合いを持つコンプトン効果とは、以下の物質構成原子と γ 線との相互作用⁷⁾をいう。

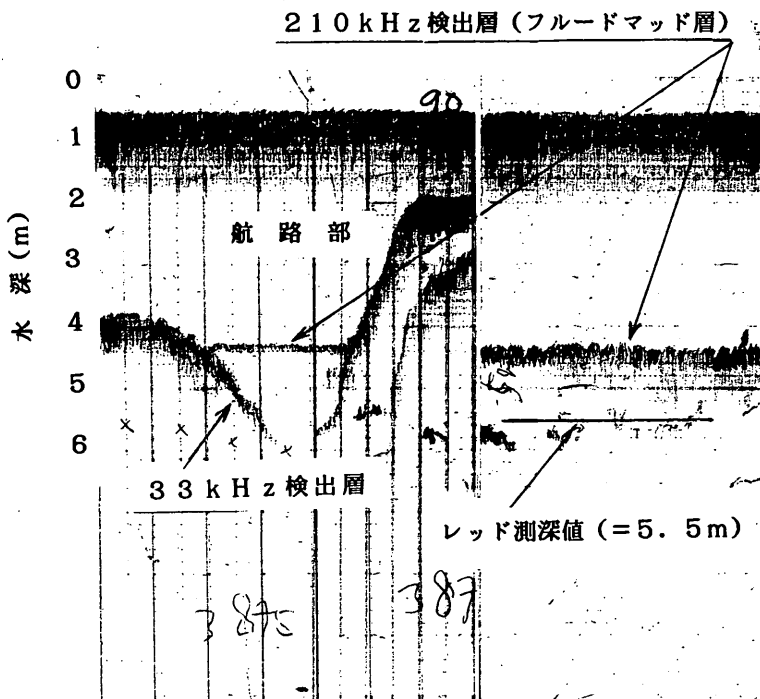


図-1 泥土埋没航路の音響測深記録

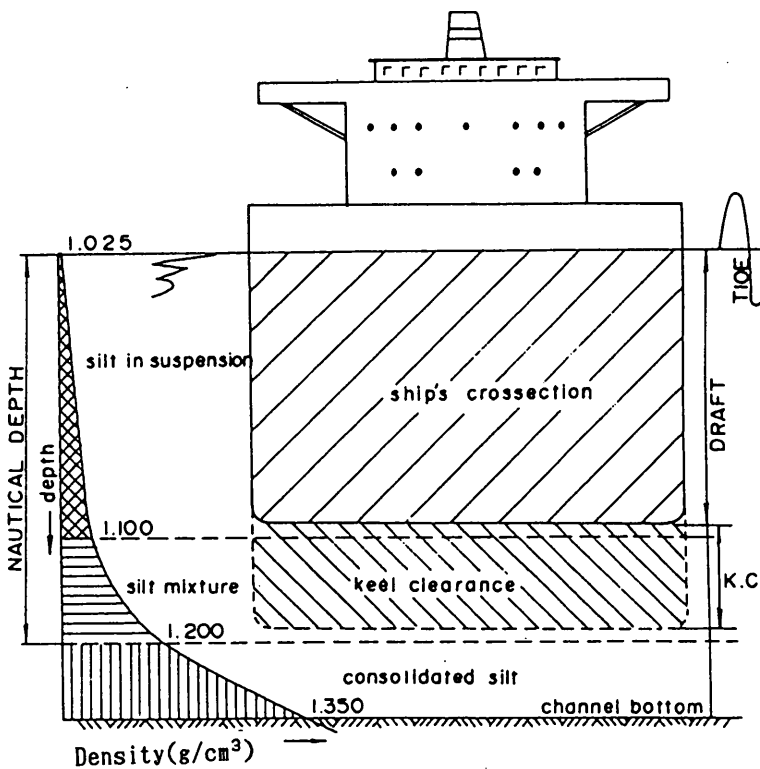


図-2 ヨーロッパにおける航路底面の定義

「コンプトン効果」

コンプトン効果は、原子のゆるく束縛されている外殻の軌道電子と光子の衝突により起こる。光子と電子の衝突の結果、光子の一部のエネルギーが電子に与えられ、光子は方向を変える（散乱という）。コンプトン効果の起こる確率は、 γ 線エネルギー E_γ と物質の原子番号 Z に対する関係 Z/E_γ で示される。

3つの過程の原子断面積の和 σ_{tot} （3つの効果の起こる確率）は、光電効果、コンプトン効果、電子対生成による確率をそれぞれ τ 、 σ 、 κ とすれば、

$$\sigma_{tot} = \tau + \sigma + \kappa$$

となる。また、それぞれおこる確率は、 γ 線のエネルギーと物質の原子番号によって決まり図-3に示すようになる。図より低エネルギー側で光電効果、高エネルギー側で電子対生成、中間領域でコンプトン効果が主なものとなる。さらに、低い原子番号の物質では γ 線の広いエネルギー範囲でコンプトン効果が主要なものとなる。

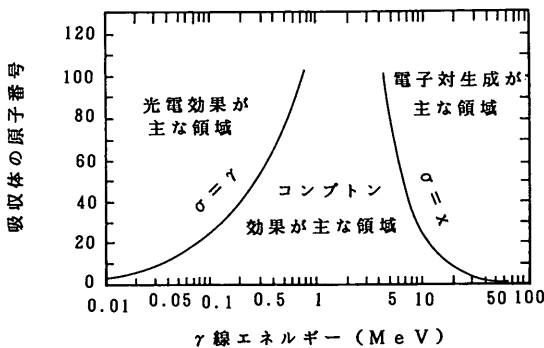


図-3 γ 線の主要3効果の相対的重要度

3.2 γ 線の物質内減衰

物質内に照射された γ 線は、先に述べた3つの過程によって減衰する。この γ 線の減衰量の測定は通常図-4(a)に示すように、点状の線源から出た γ 線をコリメータで細いビームにし、検出器はできるだけこのビームのみを感じるようにして行われる。コリメータを出た γ 線ビームの通路に物質を置き、この内部で散乱された γ 線は検出器に入らないようにする。すなわち、物質の中で前述の3つの効果のいずれかを起こした γ 線は測定からはずれる。このような条件のもとで、最初の強度 I_0 の単一エネルギーの γ 線が厚さ x の物質を通った後の強度 I は、次の式⁹⁾によって表される。

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \tag{1}$$

ここで、 μ は γ 線エネルギーと吸収物質によってきまる定数で減弱係数である。また、図-4(b)に示すような、線源から出た γ 線がコリメートされない状態では透過線以外にも散乱線が検出され、(1)式より多い γ 線数が観測される。この場合、(1)式で散乱線も考慮した次の式になる。

$$I = B I_0 \exp(-\mu x) \tag{2}$$

ここで、 B は物質内で散乱線の発生による増加分を表すものでビルドアップ係数と呼ばれ、 γ 線エネルギー、照射条件、物質などによって変わる。

(1)、(2)式に示される減弱係数 μ は、物質の厚さ x を単位長さで測った線減衰係数と単位面積あたりの質量で測った質量減弱係数が用いられる。質量減弱係数(μ_m)を用いると、(1)、(2)式は μ の替わりに $\mu_m = \mu / \rho$ により表せる。

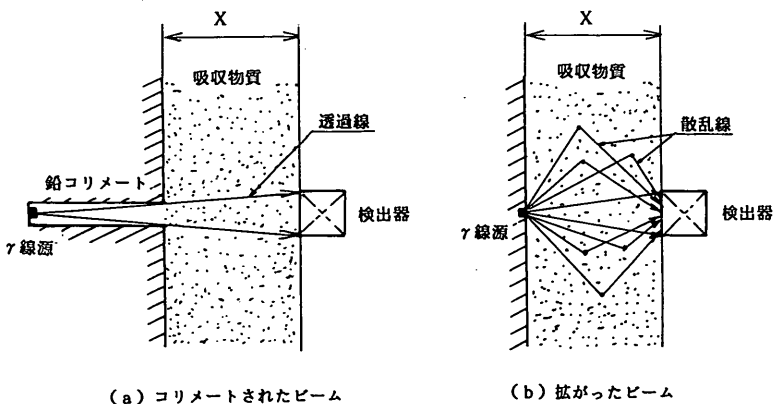


図-4 γ 線の物質内吸収

3. 3 γ 線を利用した物質密度の測定原理

(1) γ 線減衰と密度との関係

コンプトン効果が支配的な場合には、質量減弱係数 $\mu_m^{(9)}$ は、

$$\mu_m = N_0(Z/A)\sigma \quad (3)$$

ここで、A : 原子量

Z/A : 水素をのぞいて0.5

N_0 : アボガドロ数

σ : コンプトン散乱断面積

となり μ_m は一定な値になる。したがって、(1)式は下式に表せるようになる。

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho x) \quad (4)$$

(4)式において図-4(a)に示すように γ 線が十分コリメートされ、散乱線が計測されなく、しかも I_0, x が一定な場合、物質密度 ρ は両辺の自然対数をとり以下のように求められる。

$$\rho = \frac{\ln(I) - \ln(I_0)}{-\mu_m x} = C(\ln(I) - \ln(I_0)) \quad (5)$$

ここで、 $C = 1/(-\mu_m x)$

(5)式から水(w)及び測定対象物質(m)の密度は、以下の式になる。

$$\rho_w = C(\ln(I_w) - \ln(I_0)) \quad (6)$$

$$\rho_m = C(\ln(I_m) - \ln(I_0)) \quad (7)$$

(6)式から $\ln(I_0)$ を求め、(7)式に代入すると次の式になる。

$$\begin{aligned} \rho_m - \rho_w &= C(\ln(I_m) - \ln(I_w)) \\ \rho_m &= C \ln(I_m/I_w) + \rho_w \end{aligned} \quad (8)$$

すなわち、線源の強さにかかわらず水及び測定対象物質透過後の γ 線の強さをもとに密度が求められる。

(2) γ 線の散乱と密度との関係

図-4(b)に示すように拡がった媒質の中での γ 光子の透過の物理的な表現は、Boltzmannの定常状態の輸送方程式⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾によって表される。Boltzmannの輸送方程式は物質中の γ 光子束の分布関数を(位置ベクトル, 初期エネルギー, 単位長さの方向ベクトル)で表したとき

(単位体積あたりの γ 光子束の失われる割合) + (衝突による損失) = (全ての空間からの入る γ 光子の散乱割合) + (γ 光子の発生量)

で示される。この Boltzmann の輸送方程式は幾何学形態

の最も簡単な無限媒質に限られるうえ、物質内の γ 光子束分布を求めるのに膨大な数値計算を必要とする。

輸送方程式の解を求める近似的な方法として、 γ 光子束の空間分布に関する解を対象とする拡散近似法がある。これは種々な幾何学的形態の問題に適用できる。この近似解法は γ 光子束分布が角度に関して等方的であるとし、また単位エネルギー当たりの γ 光子束 ϕ が変数分離され、位置のみの関数、すなわち空間分布に関する解 $\phi_1(r)$ とエネルギーのみの関数 $\phi_2(E)$ との積で表され、また Fick の拡散法則が成立するという仮定によって、次の定常状態の拡散方程式が導かれる。すなわち

$$\begin{aligned} D \nabla^2 \phi_1(r) - \langle \Sigma_a \rangle \phi_1(r) &= -Q(r) \\ \text{あるいは} \\ \nabla^2 \phi_1(r) - \frac{1}{L^2} \phi_1(r) &= -\frac{Q(r)}{D} \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 $\phi_1(r)$ は γ 光子束、 $\langle \Sigma_a \rangle = (\Sigma_a(E) \phi_2(E) dE)$ 、 Q は γ 光子の発生率であり、 L, D は γ 光子束に関する拡散距離、拡散係数である。 γ 光子束を光速 c で割った値、すなわち γ 光子密度 $n = \phi_1(r)/c$ で表す場合には上式は次の形になる。

$$\nabla^2 n(r) - \frac{n(r)}{L_0^2} = -\frac{Q(r)}{D_0} \quad (10)$$

ここに、 L_0, D_0 は、 L, D と同様に γ 光子密度に対する拡散係数、拡散距離であり、 γ 光子の平均寿命 $1/\langle \Sigma_a \rangle c$ を T_0 で表すと次の関係がある。

$$D_0 = cD, L_0 = (D_0 T_0)^{1/2}$$

(10)式は密度測定の幾何学条件を入れて解くことができる。しかし、解は線源の近く、あるいは系の境界の近くでは、(9)式を導いた2つ仮定条件が成り立ちにくいとされ、十分な精度は期待できないとされる。

(10)式から、強度 Q の点線源が均質な無限媒質内にあるとき、線源から距離 r の点での n は次式で表される。

$$\nabla^2 n - \frac{n}{L_0^2} = -\frac{Q}{D_0} \delta(R) \quad (11)$$

ここに、 $\delta(R)$ は点線源を表す Dirac の δ 関数である。(11)式は図-5に示すように円筒の内部とその外側に均質な無限媒質 F がある場合、円柱の中心軸上の線源 S の位置を原点とした円筒座標 (r, θ, z) によって表し以下の式⁽⁹⁾が導かれる。なお、図-5に示した線源、検出器の幾何学関係および円筒は、本開発における模型実

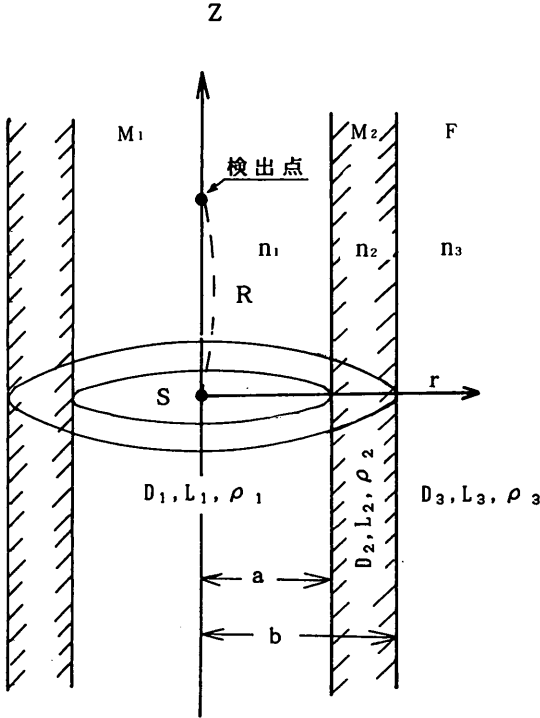


図-5 3 媒質系における計数率計算模図

驗状態を示している。すなわち、物質 M1, M2, F の ρ , n および拡散パラメータにそれぞれ添字 1, 2, 3 を付けて表すと

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 n_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial n_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 n_1}{\partial z^2} - k_1^2 n_1 &= -\frac{Q}{D_1} \delta(r) \delta(z) \\ \frac{\partial^2 n_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial n_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 n_i}{\partial z^2} - k_i^2 n_i &= 0 \quad (i=2,3) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$r = \infty$ のとき $n_3 = 0$ に注意するとこれらの解は 3 つ得られ、円柱の軸上の n_1 は

$$n_1 = \int [A_1(\lambda) I_0(r(\lambda^2 + k_1^2)^{1/2}) + B_1 K_0(r(\lambda^2 + k_1^2)^{1/2})] \cos \lambda z d\lambda \quad (13)$$

ここで、 $B_1 = Q / 2 \pi^2 D_1$

境界条件として

(1) $r = a$ のとき $n_1 = n_2$, $r = b$ のとき $n_2 = n_3$

(2) $r = a$ のとき $D_1(\partial n_1 / \partial r) = D_2(\partial n_1 / \partial r)$

$r = b$ のとき $D_2(\partial n_1 / \partial r) = D_3(\partial n_1 / \partial r)$

を考慮すると

$$n_1 = \frac{Q}{4\pi^2 D_1} \left[\frac{e^{-k_1 z}}{z} - \frac{2}{\pi} \int_0^\infty F(\lambda) \cos \lambda z d\lambda \right] \quad (14)$$

ここに Q は線源の強さ、 z は線源と検出器の距離、また $F(\lambda)$ は

$$F(\lambda) = -\frac{-D_1 \lambda_1 K_1(a \lambda_1) [m I_0(a \lambda_2) + K_0(a \lambda_2)]}{-D_1 \lambda_1 I_1(a \lambda_1) [m I_0(a \lambda_2) + K_0(a \lambda_2)]} - \frac{-D_2 \lambda_2 K_0(a \lambda_1) [m I_1(a \lambda_1) + K_1(a \lambda_2)]}{+D_2 \lambda_2 I_0(a \lambda_1) [m I_1(a \lambda_1) + K_1(a \lambda_2)]}$$

更に、 m は以下の式によって表される。

$$m = \frac{D_2 \lambda_2 K_0(b \lambda_2) K_1(b \lambda_2) - D_3 \lambda_3 K_0(b \lambda_2) K_1(b \lambda_2)}{D_2 \lambda_2 I_1(b \lambda_2) K_0(b \lambda_3) - D_3 \lambda_3 I_0(b \lambda_2) K_1(b \lambda_3)}$$

ここに、

$$\lambda_1 = (\lambda^2 + k_1^2)^{1/2}, \quad \lambda_2 = (\lambda^2 + k_2^2)^{1/2},$$

$$\lambda_3 = (\lambda^2 + k_3^2)^{1/2}$$

$$k_1 = \rho_1 / L_0, \quad k_2 = \rho_2 / L_0, \quad k_3 = \rho_3 / L_0$$

$$D_1 = D_0 / \rho_1, \quad D_2 = D_0 / \rho_2, \quad D_3 = D_0 / \rho_3$$

$\rho_1, \rho_2, \rho_3 =$ 各密度

また、 $I_0(\lambda), I_1(\lambda), K_0(\lambda), K_1(\lambda)$ はそれぞれ変形されたベッセル関数である。

実際の密度測定においては、線源の初期エネルギーからコンプトン散乱エネルギー領域の下限までの弁別エネルギー領域の n が対象となる。一方、拡散方程式は一定エネルギーの γ 光子に対してのみ適用できる。そのため、対象とするエネルギー領域を一括して 1 組と考える”組分け拡散”を適用する。すなわち、 γ 光子はすべてただ 1 つのエネルギーを有した形で発生し、それらの光子が対象とするエネルギー領域から逸脱するために必要な平均回数の散乱を受けるまで、このエネルギーのままで拡散すると仮定する。したがって、密度測定において一括 1 組と考えるエネルギー領域は、初期エネルギーと弁別エネルギーとの間の領域に相当する。実際の γ 線測定器の指示する係数率はこのようにして求めた n と光速度 c の積に比例する。(14) 式の計算は、すなわち図-5 で示した幾何学形態で、線源からある距離での n_1 の値は、(11) 式に示された拡散パラメータ L_0, D_0 を特定の初期エネルギーと弁別エネルギーに対して求めることによって算出できる。

4. γ 線の泥土内の基本特性実験

4.1 実験内容、条件

泥土密度を γ 線の泥土内の散乱、吸収特性を利用して測定する場合、線源と検出器の配置は一般的には図-6

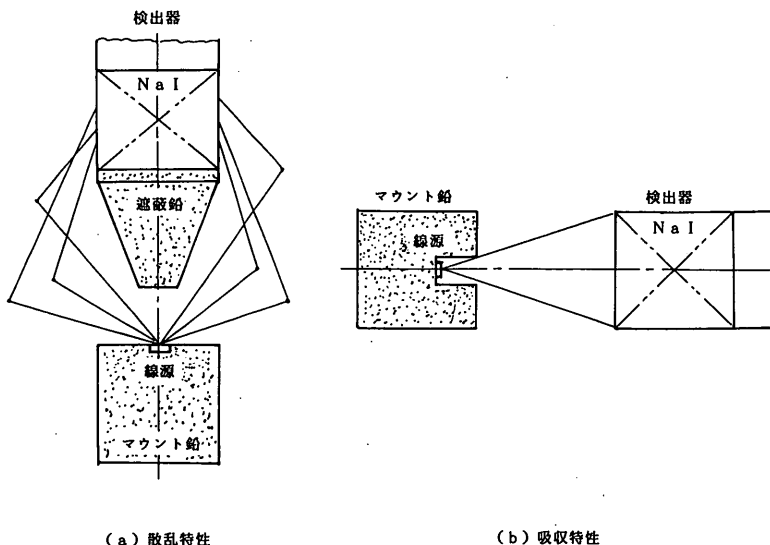


図-6 線源と検出器の配置

に示すようになる。まず、散乱特性においては、線源と検出器の間に遮蔽鉛を配置する。この遮蔽鉛によって線源から直接入射する γ 線を遮蔽し、泥土内でコンプトン散乱した γ 線のみを検出するためのものである。次に、吸収特性の場合は、鉛によって十分コリメートされた状態で γ 線を泥土内に照射し、検出器も検出部以外は鉛によって遮蔽する。すなわち、散乱特性においては散乱エネルギー量のみを、吸収特性においては線源の固有エネルギーの減衰量のみを検出する。そして、吸収エネルギーは固有エネルギーを計数するのに対して、散乱エネルギーは線源の固有エネルギー以下の範囲を計数することになる。

泥土密度を γ 線の散乱特性を利用して測定する場合、主に以下の3つのパラメータによって密度相関特性が変化する。

① γ 線の種類、強度

γ 線源としては一般的にはセシウム137 (662 KeV) の他にコバルト60 (1173, 1132 KeV) があり、線源の持つエネルギーが2倍程度異なる。エネルギーの大きさはコンプトン散乱の起こし易さに、線源の強度は物質内の散乱の数量に直接影響する。なお、強度とは線源からの γ 線の放射量(単位:ベクレル=Bq)を示すものである。

②検出器の種類、大きさ

γ 線の検出器としてはシンチレーションの他にGM計数管があり、シンチレーションはGM計数管に比べ

表-1 模型実験条件および内容

実験名	実験条件及び内容
散乱特性実験	<ul style="list-style-type: none"> 線源の種類 : ^{137}Cs 模擬泥土 : フライアッシュ、カオリナイト混合水 密度相関実験 (1)泥土密度 <ul style="list-style-type: none"> フライアッシュ : $1.075 \sim 1.46 \text{ g/cm}^3$ (含水比=680~73%) カオリナイト : $1.128 \sim 1.20 \text{ g/cm}^3$ (水比=451~275%)
	<ul style="list-style-type: none"> (2)線源と検出器の : 6, 7.6, 10.2, 12.6cm 距離 (3)線源と遮蔽鉛の : 2.5, 5.0, 7.5, 10.0cm 距離 泥土境界層実験 (1)泥土密度 : 清水+フライアッシュの沈降層
吸収特性実験	<ul style="list-style-type: none"> 線源の種類 : ^{137}Cs 模擬泥土 : カオリナイト混合水 泥土の密度 : $1.016 \sim 1.191 \text{ g/cm}^3$ (含水比=3871~290%) 線源と検出器の距 : 5, 7, 9, 11, 15, 20cm 距離

てエネルギー感度特性が優れているとされる。また、シンチレーション検出器は γ 線の光電変換部（NaI部）の大きさに比例して γ 線の計数率が増加する。

③線源と遮蔽鉛および検出器の位置

遮蔽鉛は γ 線を吸収遮蔽するもので、線源との距離が大きくなるにしたがって γ 線の泥土内への照射量が多くなる。また、更に検出器の位置は、泥土内でコンプトン散乱した γ 線を検出する位置であり、その位置によって計数率の測定値が大きく左右される。

本実験においては γ 線源としてコバルト60に比べてエネルギー強度が弱く、半減期30年のセシウム137（以下 ^{137}Cs とする）を用いている。更に、検出器は2インチのシンチレーション（NaI(Tl)）を用いている。その結果、散乱特性実験においては、上述のパラメータの中で③の要素を主に変化させて行った。すなわち、線源と遮蔽鉛との距離および線源と検出器の距離を変化させ

た。また、吸収特性の実験においては、線源と検出器の距離のみのパラメータにより実験を行っている。表-1に散乱、吸収特性実験の内容を示す。散乱特性実験の線源と検出器の距離については、大きくなるにしたがって散乱範囲が広範囲となり泥土層の測定分解能が低下するため、陸上の地下検層等の数分の1程度に設定している。散乱特性実験に用いた遮蔽鉛は、円錐形のもので高さ2.5、5.0、7.5、10.0cmの4種類である。更に、この遮蔽鉛上面と検出器の下面を密着させているため、検出器の側面のみで入射 γ 線を計測している。

実験は図-7に示すように、板厚10mm、大きさは50×50×51cmの亚克力製水槽内に円筒（ポリカーボネイトパイプ）を垂直に設け、その内部に線源と検出器を配置して行っている。密度相関実験における模擬泥土状態は、ロータによって絶えず攪拌し、水槽内の泥土密度を一様にして行っている。また、泥土境界層実験においては、攪拌ロー

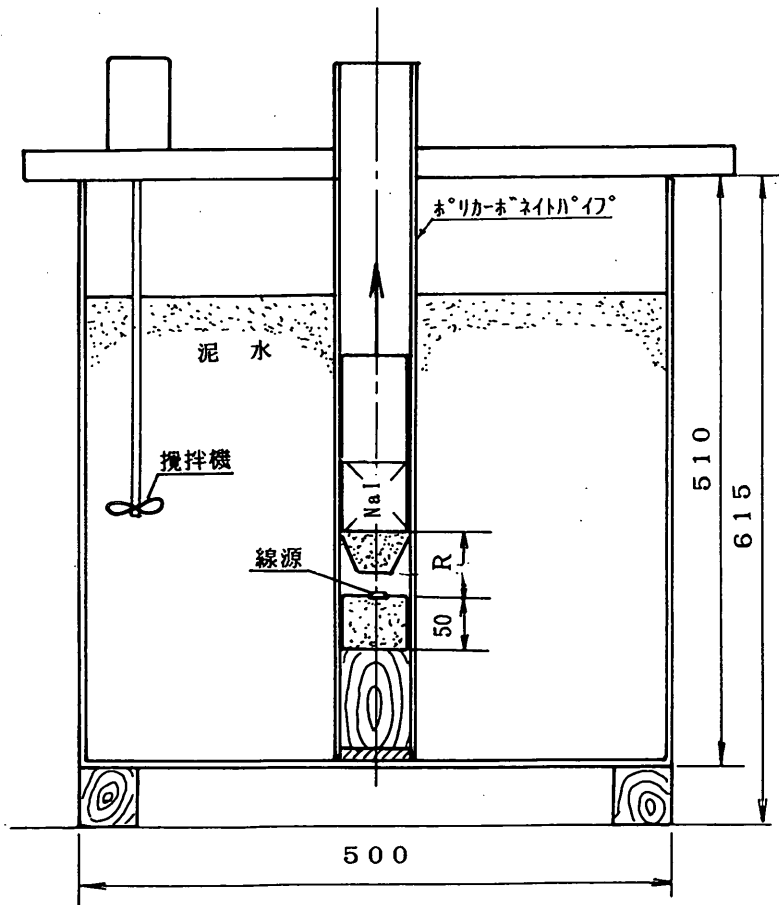


図-7 模型実験水槽

表一 線源およびγ線計測機器性能

機 器 名	機 器 の 仕 様
シンチレーションプローブ ・シンチレータ ・光電子増倍度 ・前置増幅器出力 ・分解能 ・プローブ材質 ・外形寸法	アサノ電子(株)製 NaI(Tl) : 2"φ×2" 6.3×10 ⁵ 0～7V 9%以下 (¹³⁷ Cs) アルミ (表面アルマイト処理) 66φ×330mm
マルチチャンネルアナライザー (1)メモリーボード ・チャンネル容量 ・カウント容量 (2)A/D変換 ・入力信号 ・変換利得 ・積分非直線性 ・微分非直線性 ・立上り/立下り パルス幅	㈱ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション製 4096ch 2 ³² -1/ch 0～10V 256,512,1024,2048,4096ch/8V ±0.05%以内 ±0.75%以内 0.1～10μs 最小1μs

表一 供試試料の物理的試験結果

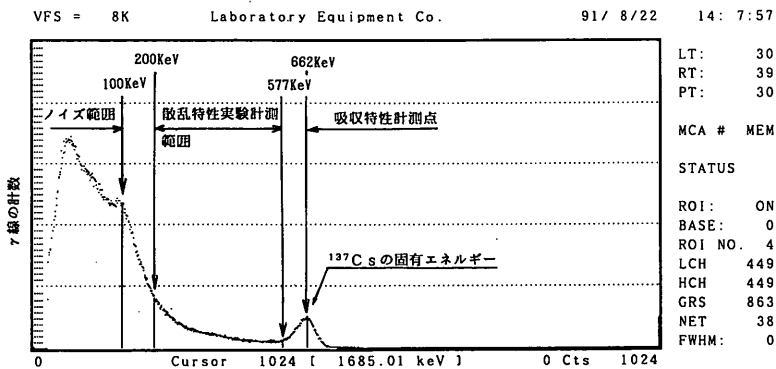
試験項目	試 料 名		備 考 (熊本泥)
	フライアッシュ	カオリナイト	
粒子の比重	2.20	2.670	2.670
中央粒径	10.0μm	0.8μm	4.6μm

タによって一定時間攪拌しロータ停止後、泥土粒子の沈降層を対象に行っている。表一にはγ線の検出に用いたシンチレーションとγ線の計数に用いたマルチチャンネルアナライザの仕様を示す。また、模擬泥土はフライアッシュ、カオリナイト (ASP 600) の2種類を用いている。表一には模擬泥土に用いたフライアッシュ、カオリナイトの物理的性質を示す。

4. 2 実験結果

(1) γ線計数率の計測方法

図一に示すような実験状態で、すなわち線源と検出器を円筒内に鉛直線に配置し、遮蔽鉛2.5cmの時のγ線エネルギー分布をマルチチャンネルアナライザにより計数すると図一に示すようになる。図は約1685 KeVのエネルギーをマルチチャンネルアナライザにおいて1024チャンネルに分割し測定したものである。¹³⁷Csの固有エネルギー (662 KeV) は、遮蔽鉛が薄いため検出されており、このエネルギー以下は基本的にコンプトン散乱して減衰しているものである。更に、100 KeV以下の低エネルギー範囲は各種のノイズ等が含まれているとされる。散乱特性、吸収特性実験のγ線の計数率 (単位時間当りのγ線の数: 単位 = cpm または cps) の計測は、図に示したエネルギー範囲および固有エネルギー点を計測した。散乱特性の計数においては、低エネルギーにおいてはノイズが含まれていることや実験水槽の壁の影響等を考慮して、弁別エネルギー (マルチチャンネルアナライザにおいてはチャンネル No) を選定している。すなわち、図に示した弁別エネルギー範囲約200～577 KeVの範囲の選定は、実験水槽が比較的小さいことや遮蔽鉛が薄い場合固有エネルギーが計測されるためである。この弁別エネルギーにおける泥土計測範囲は、以



図一 ¹³⁷Csのγ線エネルギースペクトル

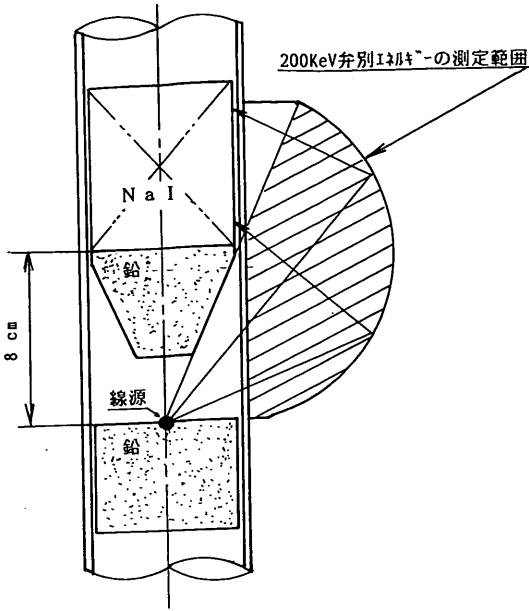


図-9 模型実験における泥土の測定範囲

下の式⁹⁾に示す衝突前後のエネルギーおよび衝突角によって求められる。

$$Er' = \frac{Er}{1 + 1.96 Er (1 - \cos \theta)} \quad (15)$$

ここで、 Er' : 散乱後のエネルギー
 Er : 衝突前のエネルギー
 θ : 衝突角

上式によって ^{137}Cs の 662 KeV のエネルギーが 1 回の衝突により 200 KeV のエネルギーとなる範囲は、線源と検出器の距離が約 8 cm のとき図-9 に示すようになる。すなわち、弁別エネルギー 200 KeV 以上になる泥土内の散乱範囲は、線源と検出器の距離の倍の約 15 cm 程度の球になる。そのため、実験水槽の壁（中心から約 25 cm）等の影響は無いものと考えられる。

一方、吸収特性実験における γ 線（662 KeV のエネルギー）の計数率は、実験が十分コリメートしていない状態で行っているため、マルチチャンネルアナライザーにおいて 662 KeV のエネルギーに相当するチャンネルのみを設定して計測した。

(2) 散乱特性実験結果

遮蔽鉛と検出器との端面を密着させた状態で、線源と遮蔽鉛の距離を変えて行った実験結果を図-10 に示す。実験は図中の付図に示すように、遮蔽鉛の高さによって、

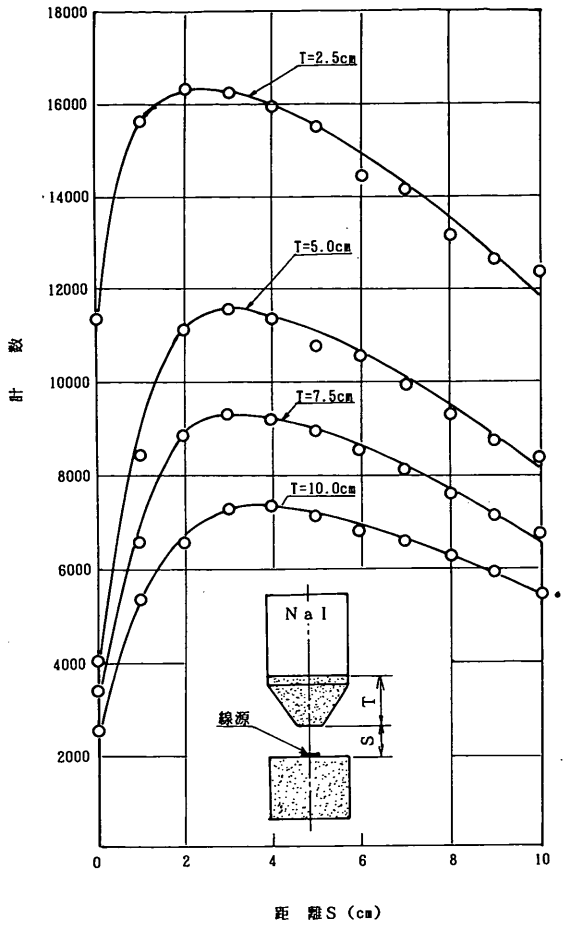


図-10 線源と検出器の距離の関係

線源と検出器間の距離も異なる。実験結果は線源と検出器間のトータル距離により計数率は大きく異なるが、線源と遮蔽鉛との距離については、各ケースともおよそ 3 cm 前後で計数率が最大になる。

上記の実験結果から線源と遮蔽鉛との間隔は約 3 cm 程度に固定して泥土密度相関実験を行った。図-11 に散乱特性密度相関実験結果を示す。図の縦軸は前述の弁別エネルギー範囲の γ 線を 30 秒間計測し、cps 単位により表したものである。また、横軸の泥土密度は、攪拌状態の泥土をビニールチューブによって採泥し、100 cc の比重ビンにより測定したものである。計数率と密度の関係は密度に比例して増加するが、その変化率はそれ程大きくなく、線源とシンチレーションとの距離が 10 cm 以上になるとほとんどフラットなものとなる。更に、計数率は、線源とシンチレーションとの距離が大きくなると急激に減少する。なお、カオリナイトの計数率がフライアッシュの計数率に比べて下回っているのは、実験日が異なり、

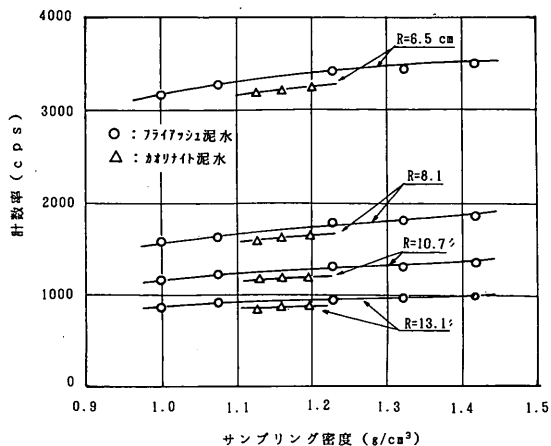


図-11 模擬泥土と密度計数率の実験結果

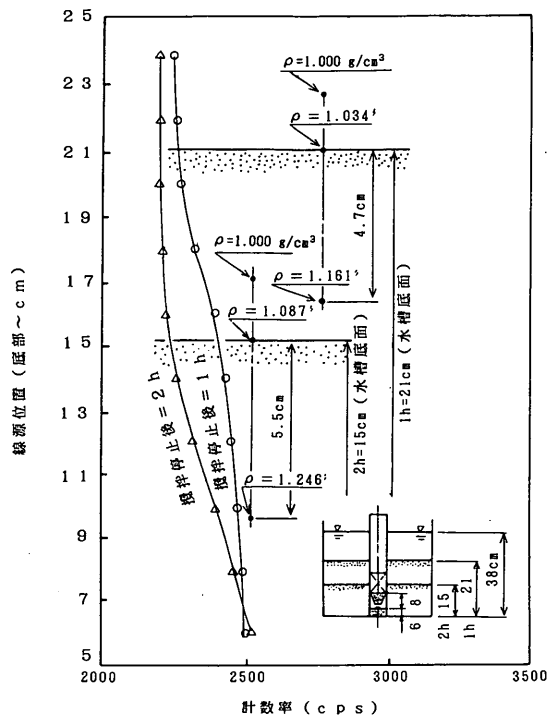


図-12 泥土境界層測定結果

弁別エネルギーの設定範囲等が多少異なったためのもの
と考える。

図-12は泥土境界層の測定性能実験結果を示したもので、泥土の攪拌停止状態から一定時間経過後（1時間、2時間後）の泥土層と上層の清水（密度=1.0 g/cm³）と比較的密度の異なる境界層に対して、2 cm間隔で計測し

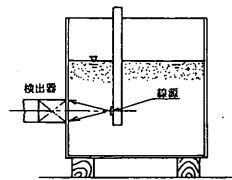


図-13 γ線吸収特性実験の機器配置

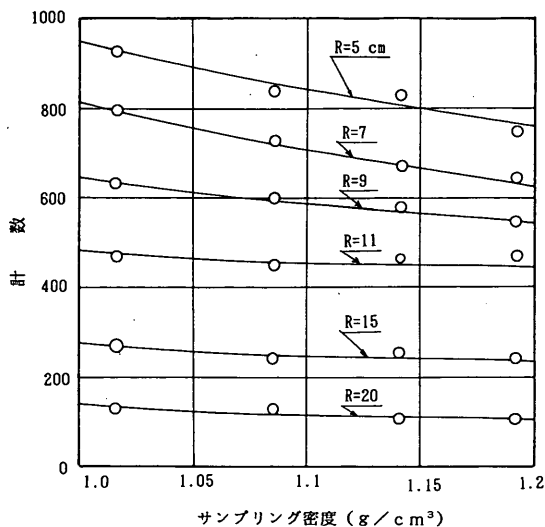


図-14 γ線吸収特性実験結果

ている。なお、NaI 中心位置と線源との距離は、約11cmとして行っている。この線源と NaI の距離によるγ線の散乱範囲は、図-9に示したように11cm以上になるもの考える。そのため、線源および NaI 部全体が清水内に位置する場合は単一密度を測定するが、清水-泥土層にまたがって位置する場合は清水および泥土内で散乱したγ線を計測する。すなわち、清水内に位置した計測値は一樣になっているが、清水から泥土境界層またがって位置した計測値は緩やかな変化となっている。したがって、散乱特性を利用する場合の境界層の測定分解能は、主に線源と NaI の距離によって決まるものとする。

(3) 吸収特性実験結果

吸収特性の実験においては、図-13に示した線源と検出器の配置において泥土内で吸収され減衰した¹³⁷Csの線源の固有エネルギーを測定した。すなわち、662 KeVに相当するエネルギーをマルチチャンネルアナライザ上の1チャンネル分として設定して計数している。計数時間30秒の時の測定結果を図-14に示す。泥土密度との関係は、(8)式に示したように指数的に減少しているが、

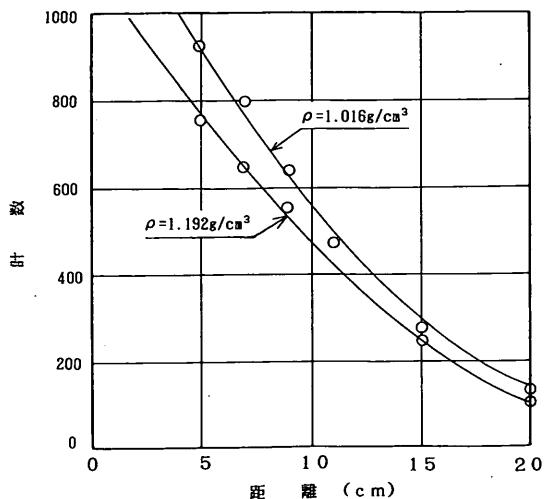


図-15 γ 線計数と線源、検出器間の距離の関係

計数の変化率は実験の密度範囲ではそれ程大きくない。特に、線源と検出器の距離が大きい範囲では変化が少なくなり、ほぼフラットなものとなる。一方、線源と検出器との距離の計数に対する関係は、図-15に示すように泥土密度と同様に指数的に減少する。

5. 実験結果と計算結果の比較

(14)式の計算にあたっては予め拡散計数および拡散距離を求めておく必要があり、本実験の弁別エネルギー 200 KeV の場合、拡散計数 $=3.62/\rho$ 、拡散距離 $=11.5 c/\rho$ (c :光速、 ρ :物質密度)になる。この数値を基に、実験に用いた円筒の密度 ($\rho_2=1.2$)、円筒寸法 ($a=3.5\text{cm}$, $b=3.8\text{cm}$)、円筒内の物質を空気 ($\rho_1=0.0123$)、更に線源の強度 $Q=1$ として計算すると図-16に示すようになる。図には1媒質の場合の無限地盤状態の計算結果、すなわち(13)式]内の左辺の項のみを考慮した計算結果を含めて示している。計算結果によれば、中心軸上の計数率は無限地盤の場合、物質密度0~2.0の範囲において密度に応じて増加するが、検出器との距離が大きくなるにしたがって密度1.0付近で最大値を示すようになる。それに対して円筒内の場合の計数率は、検出器との距離による変化は小さく密度に応じて緩やかに増加する。円筒内の場合の計数率とその変化率が小さいのは、円筒内の密度を空気としたためである。

一方、この計算式は線源と検出器が十分離れている場合、(13)式に示した境界条件を満足するため、比較的容易に適用が可能なものと考えられる。しかし、図-17に示す本実験状態の線源と検出器が比較的短い場合、NaI

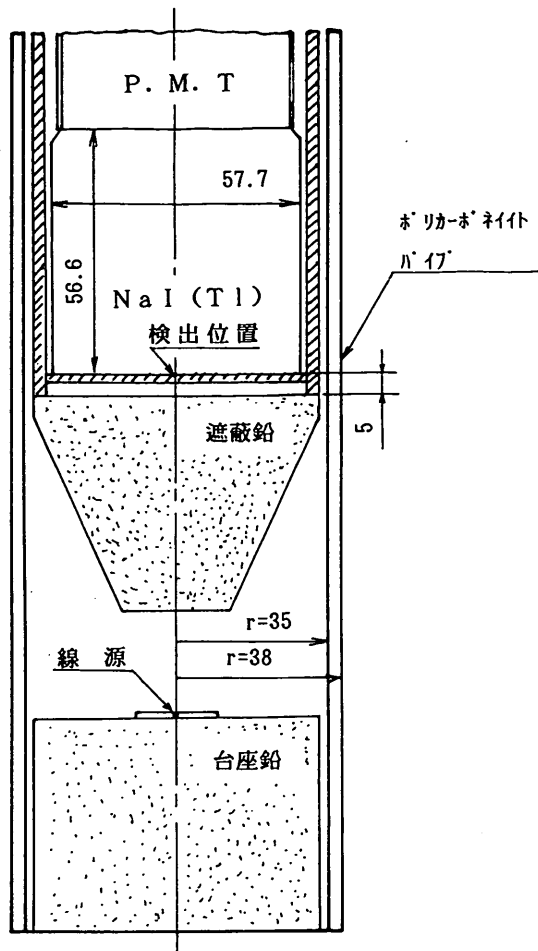


図-16 γ 線散乱特性実験状態模図

部は ϕ 2インチ \times 2インチの大きさであるため、計算式と同様に点としての取り扱いが難しい等の問題がある。更に、円筒内にはシンチレーション検出器等があり、その取り扱いが明確でない。すなわち、シンチレーション検出器自体の外側容器(アルミ)は、円筒と同様に考慮する必要があるものと考えられる。そのため、本計算においては円筒内の密度を設定し、 γ 線の検出位置をNaI部の中心軸上の線源よりの位置(図-16に示した位置)として計算した結果を図-18に示す。なお、線源と検出点の距離は、実験条件のパラメータに合わせて計算している。図の計算結果は密度1.0から1.5の範囲において、密度1.0の計数率に対する変化率として示している。また、フライアッシュ泥土の実験結果を図-18と同様に、密度1.0に対する計数率の変化率として表したものが図-19である。

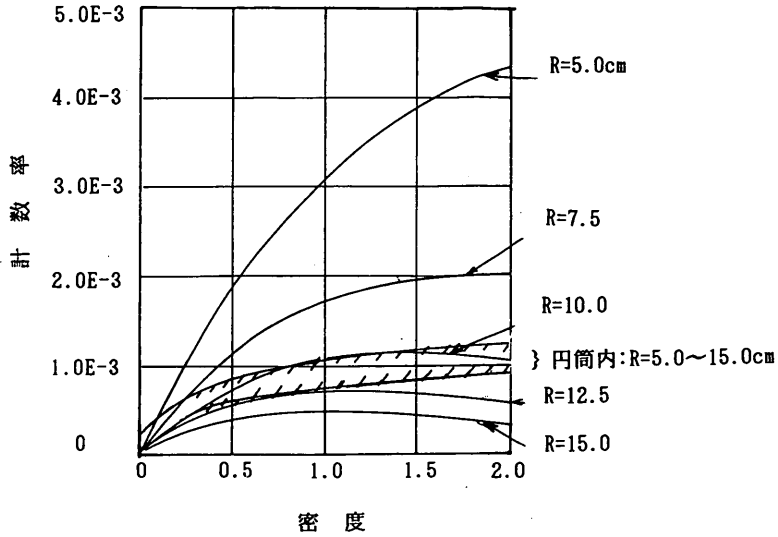


図-17 3 媒質系における理論計算結果

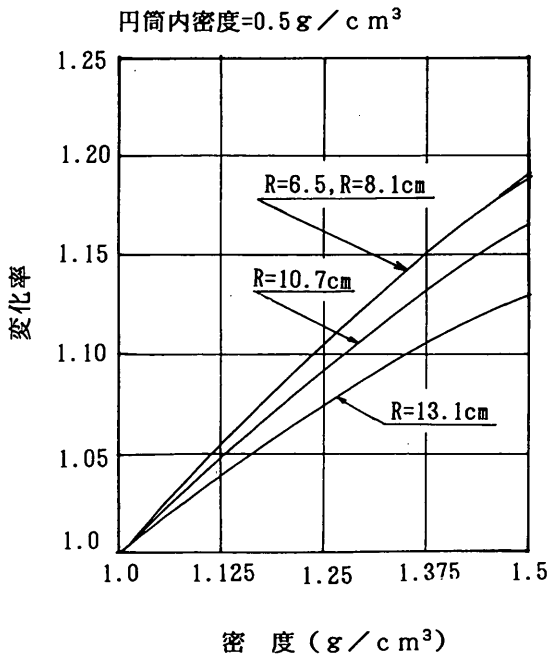


図-18. 計数率の泥土密度に対する変化率理論計算結果

計算結果は比較的实验結果と一致し、密度との相関関係は定性的に良く表している。線源と検出器の距離の関係は $R = 7.0\text{cm}$ を除き、線源と検出器の距離が大きくなるにしたがって変化率は小さくなる。しかし、円筒内密度、また NaI 部の検出位置等については、本実験のよう

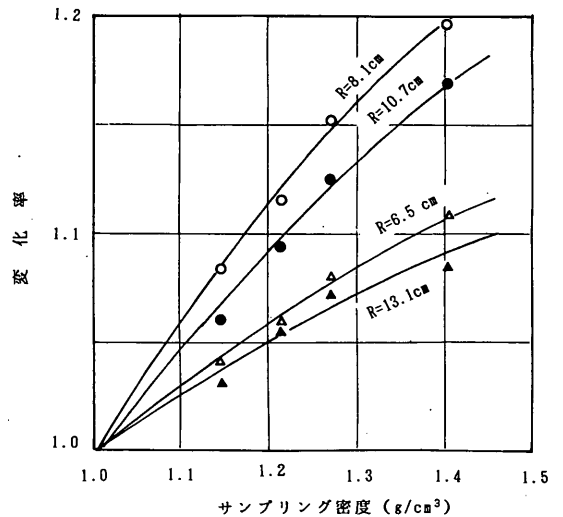


図-19 計数率の泥土密度に対する変化率実験結果

に線源と検出器が短い場合、計算式の条件と異なるため、厳密には一致しにくいものとする。円筒内密度を 0.5 g/cm^3 と仮定した根拠は、シンチレーションのアルミ外筒部の重量 (NaI 部長さ相当分約 125 g) を円筒の内容積 (NaI 部長さ相当分約 240 cm^3) で割った平均密度 (= 0.5 g/cm^3) に近い値をとったものである。

一方、吸収特性における泥土密度は、(8)式によって理論的に清水密度1.0の計数率を基に求められる。図一

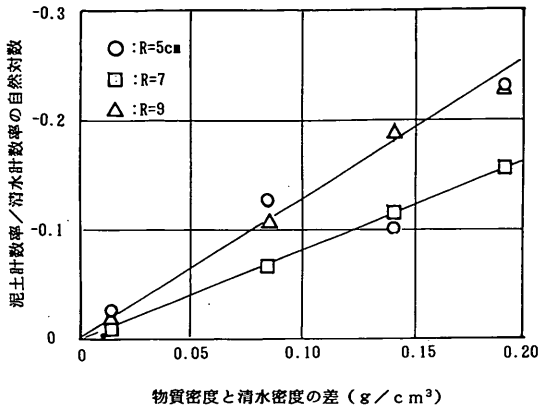


図-20 γ線吸収特性の泥土密度に対する比例関係

14に示した実験結果の密度1.0点の計数を外挿して求め、各泥土密度点の計数率との比の自然対数を取り出すと、図-20に示すようになる。すなわち、R = 5 cmの1

点を除き密度とはほぼ直線近似になる。この実験結果は、(8)式において比例定数Cが、線源と検出器の距離が決った場合一定となることを示している。

6. γ線吸収型密度測定器の開発

6.1 開発機器の概要

泥土密度は理論および実験で示したように、γ線の散乱、吸収を利用することによって測定できるが、吸収特性の方が散乱特性に対して以下の2つの点で優れている。

①線源と検出器の距離が一定の場合、計数率の泥土密度の間には直線的な関係がある。また、理論的な取り扱いが比較的簡単である。

②機構的に垂直方向の測定範囲を狭くできるために、泥土層の空間測定分解能を小さくすることができる。

そのため、本開発においては吸収特性を利用した密度測定器を開発することとした。図-21に開発した泥土密

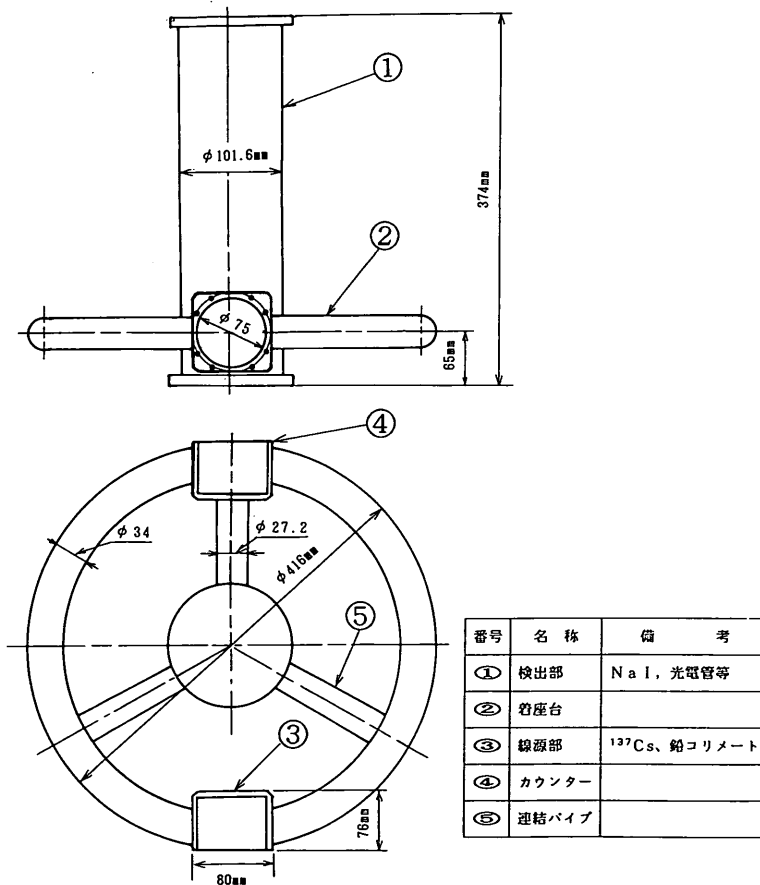


図-21 γ線吸収型泥土密度測定器

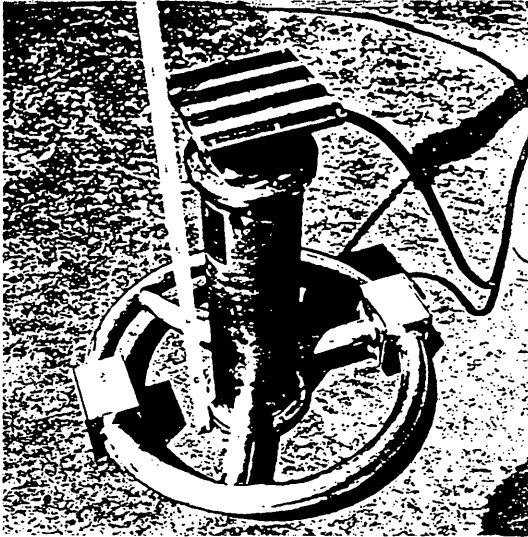


写真-1 γ線吸収型密度測定器

密度測定器の外観形状、寸法を示し、写真-1に外観を示す。また、本測定器の機器仕様、測定性能を以下に示す。

「密度検出器」 仕様および性能

- 方式 : γ線透過式
- 検出器 : シンチレーション検出器
(NaI : φ 2 インチ×2 インチ)
- 線源 : セシウム137(強さ=3.7 MBq×1 個)
- 密度測定範囲 : 0.00~2.90 g/cm³
- 測定対象物 : 気体および流体密度
- 本体重量 : 空中=25.5kg, 水中=20.0kg
- 使用温度 : 0~50℃

- 保管温度 : -20~60℃
- 容器材質 : SUS-304
- 耐水圧 : 2 kg/cm²
- 漏洩γ線強度 : 機器表面で6.0 μSv/時間

「演算表示部」

- 密度表示 : 小数点以下3桁, データ更新=1秒
- 密度演算時定数 : 1~240秒の内で2種類設定, 表示切替え

密度校正曲線 : 内部校正曲線および登録設定校正曲線

密度測定器は泥土層内を上下方向に移動させながら密度を測定できる構造としている。線源は円形の着座台(SUSパイプ)に鉛にマウントされた状態で取り付けられており、検出部のNaIの方向にコリメートされている。検出部はステンレスパイプの中にシンチレーション、光電管等が収納され、NaI部はγ線の入射方向に直径4cmの穴がある以外は鉛板によってカバーされ、コンプトン散乱したγ線の入射を防いでいる。すなわち、本測定器の泥土密度の測定範囲は図-22に示すように、10cmの厚さの泥土を最大4cmの広がりを持つ円錐形の内側で測定することになる。そのため、検出器を上下方向に移動させた時の密度層の測定分解能は基本的には4cmになるものと考えられる。

また、密度演算のための積分時定数(移動平均時間)は1~240秒の間で任意に設定できるが、これは、γ線の計数率により密度を測定しているために時定数に応じて測定精度が向上する。すなわち、線源からγ線の一定時間に発生する確率は一般的にポアソン分布になり、γ線の計数に基づく測定精度も統計的に表される。いま、γ線をt時間測定して全計数Nを得たとすると、毎分の計数率n、およびその標準偏差(σ)、変動係数(cv)

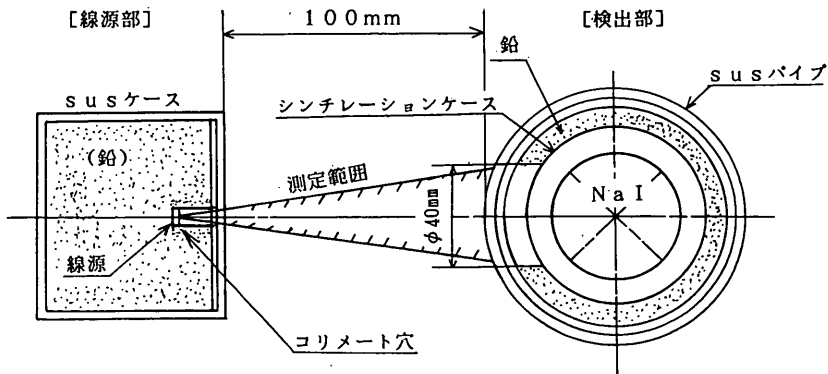


図-22 密度測定器の測定範囲

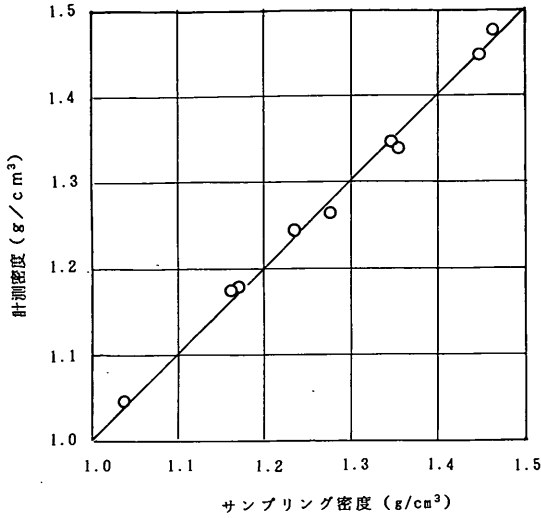


図-23 密度測定器の泥土密度測定精度

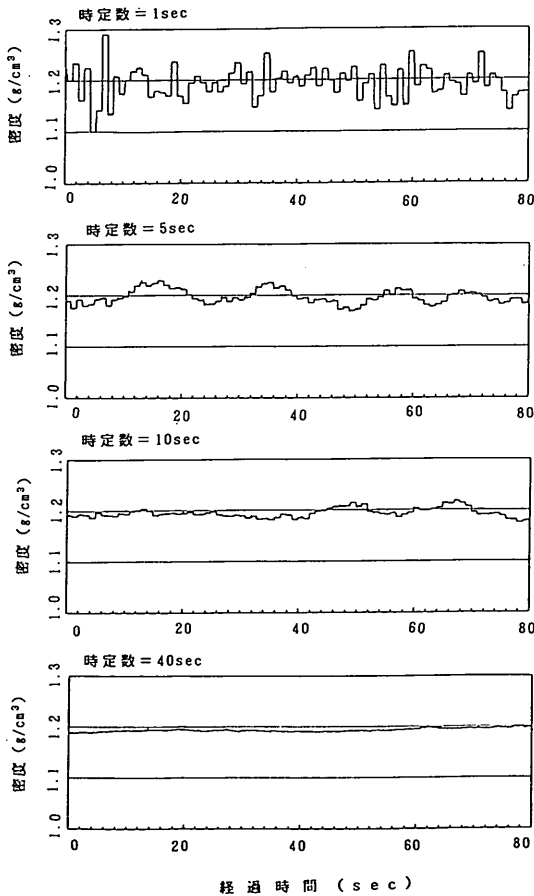


図-24 積分時定数による測定データ状況

は以下ようになる。

$$n = N/t \text{ (c/min) の時}$$

$$\sigma = \pm N^{0.5}/t \text{ (c/min),}$$

$$cv = \pm 1/N^{0.5} \times 100(\%)$$

すなわち、測定精度を表す変動係数は全計数Nによって決まり、1分間で10,000カウントの計数の場合 $cv = \pm 1\%$ となる。したがって、測定時間に比例して計数され、測定時間の平均値としての時定数に応じて測定精度が向上することになる。

6. 2 開発機器の測定精度、性能

測定器の測定精度、性能は、図-7に示した実験水槽において基本特性実験と同様にフライアッシュの混合水を用いて行った。図-21は積分時定数を240秒にして行った密度相関実験結果である。サンプリングによる密度測定値は多少のバラツキがあるため、厳密には測定精度を把握できないが、本測定器との密度測定値の差は最大±0.01 g/cm³程度である。

次に、積分時定数1, 5, 10, 40秒の時の一定密度(約1.2 g/cm³)の泥土内での測定値の変動状況を図-24に示す。測定値は時定数1, 5秒程度においては大きく変動しており、1秒の時の変動幅は最大で約±0.1 g/cm³程度になる。しかし、10秒以上になると比較的安定し、30, 40秒における変動幅は±0.01 g/cm³程度になる。この測定の実験結果を標準偏差によって表すと、図-25に示すようになる。すなわち、10秒以上になると急激に安定性は増してくる。

図-26, 27は本測定器によるカオリナイト泥土境界層

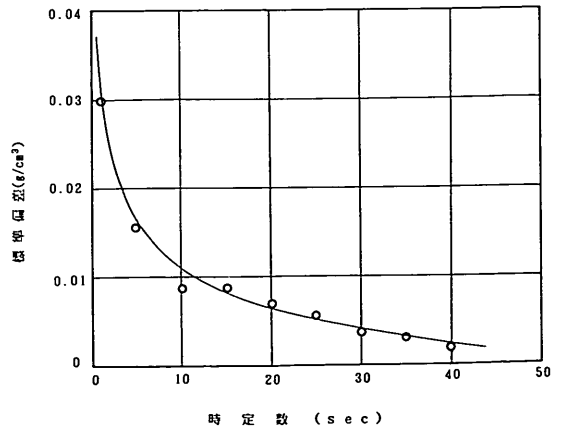


図-25 積分時定数による測定精度

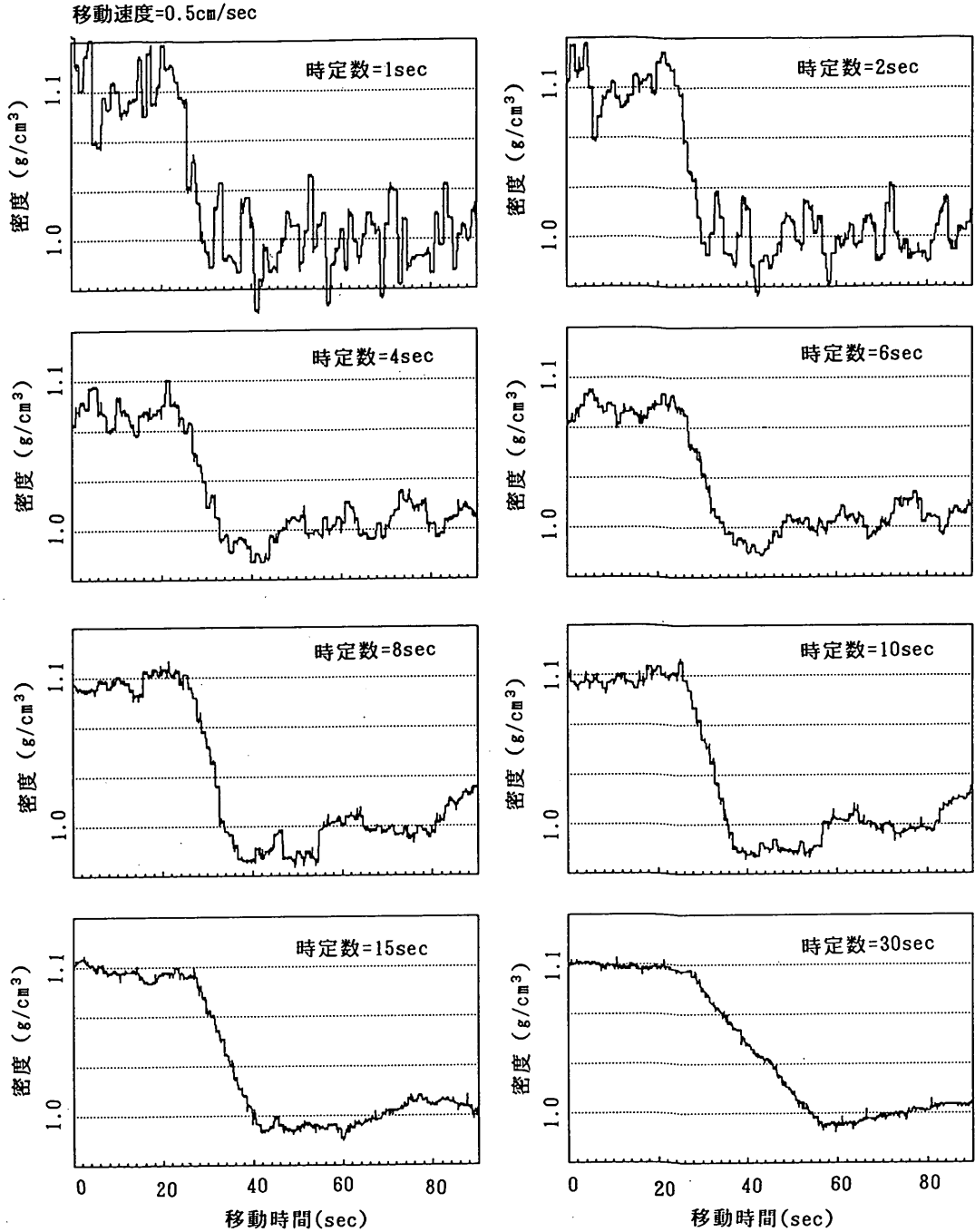


図-26 泥土内移動測定性能

の測定性能実験結果を示したものである。実験は泥土攪拌停止後の沈降層（密度1.0と1.1 g/cm^3 の境界層）を、一定速度（移動速度=0.5, 0.79 cm/sec ）で上下させて

いる。移動速度0.5, 0.79 cm/sec において、時定数1および2秒においても密度1.0と1.1 g/cm^3 の測定は可能であるが、測定値の変動は大きい。しかし、時定数が8-

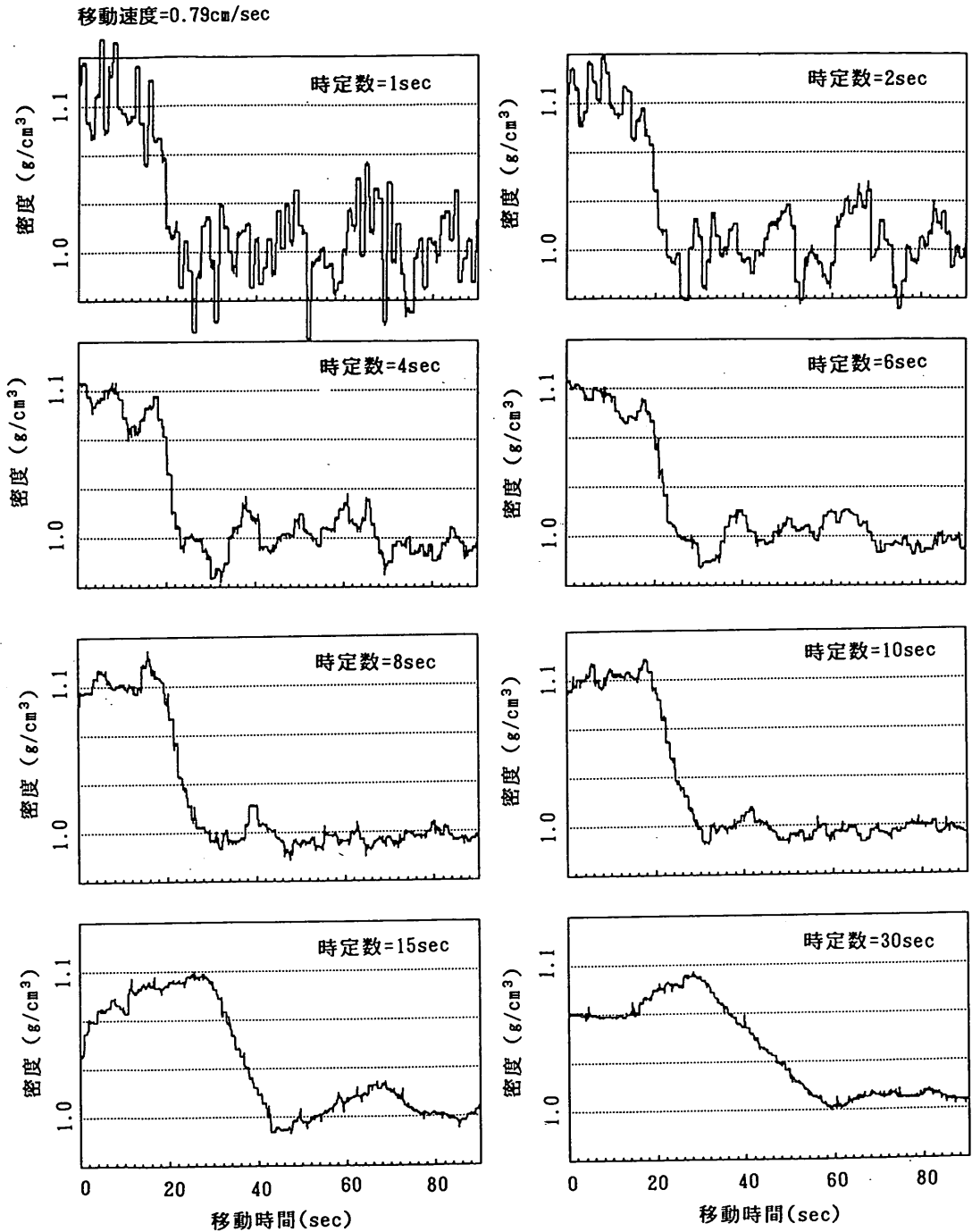


図-27 泥土内移動測定性能

10秒以上になると測定値は安定する傾向を示す。一方、境界層に対する測定分解能は、移動速度一定な場合においても時定数によって異なる。実験結果からは、移動速

度0.5cm/secの時、時定数6秒までは本測定器の基本的な分解能の4cmを多少上回った5cm程度以下である。しかし、それ以上においては時定数に応じて大きくなり、

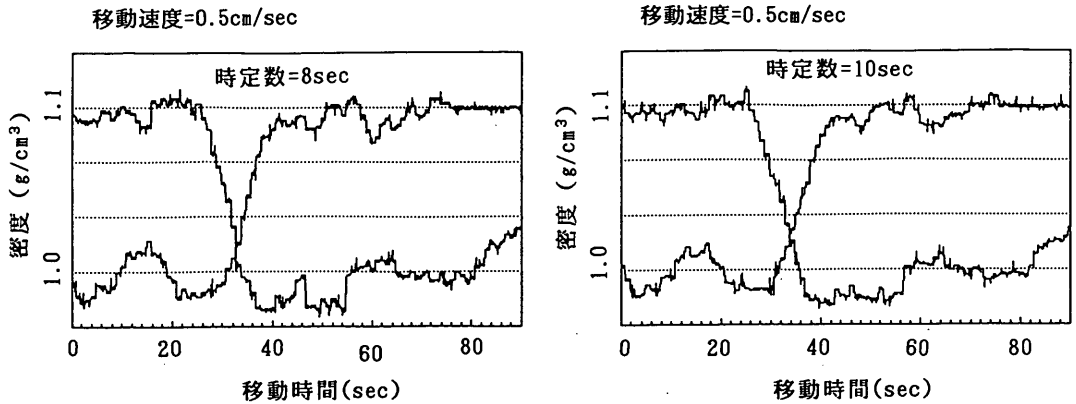


図-28 泥土内上下移動測定性能

時定数30秒においては約15cm程度になる。しかし、測定値は非常に安定してくる。図-28は移動速度0.5cm/secの時の積分時定数8, 10秒で境界層に対して上昇および下降しながら測定したものを示す。移動速度0.5cm/sec程度においては、測定器の上昇および下降によっても測定値はほぼ同様な値になり境界層の乱れも少ないものと考えられる。

7. 泥土内密度計測システム

γ 線の泥土内の吸収特性を利用した本密度測定器は、高い精度で測定する場合には時定数を10秒以上で測定することが必要になる。したがって、1点当たり10秒程度の測定時間が必要であるが、移動速度0.5cm/sec程度以下であれば泥土内を垂直方向に連続的に測定することも可能である。すなわち、1~2mと想定される実海域の埋没泥土層に対して、上下方向に低速で移動させながら測定することができる。そのため、図-29に示すような

上下移動装置を開発した。図に示した移動装置は密度検出器の上部に取り付け、内部の小型モータにより2つの巻き取りドラムを回転させ、シンカーに連結したワイヤーロープの巻き取り、巻き出しを行うものである。測定部全体は図-30に示すように、装置全体の水中重量を上回る浮体によって吊られた状態にあり、巻き取りドラムのワイヤーロープはその吊力を上回る重量のシンカーと連結されている。この状態でワイヤーロープを巻き取れば測定部全体は下降し、泥土密度の連続測定が行える。全体システムの水中重量、浮力の関係および性能を表-4に示す。シンカーも含めた装置全体は、シンカー重量-(浮体の浮力-装置全体の水中重量)=2kgの重さで海底に着地することになる。シンカーはリング状のもので、泥土内に沈降する時に乱れを少なくしている。密度測定部の上下移動はモータ駆動により、5mの範囲を連続移動、または停止が行えるもので、移動速度は連続可変できる。なお、検出器の泥土密度測定水深については、水

表-4 上下移動装置の性能表

機器名称等	重量、浮力、性能
装置全体の重量、浮力の関係	
①密度測定器本体重量	20kg (水中)
②上下巻き上げ装置重量	7kg (水中)
③浮体の浮力	30kg
④シンカー重量	5kg
上下速度	約0.2~1.0 m/min
移動範囲	約5m
測定水深圧力センサー	-25m、精度=±0.1%FS

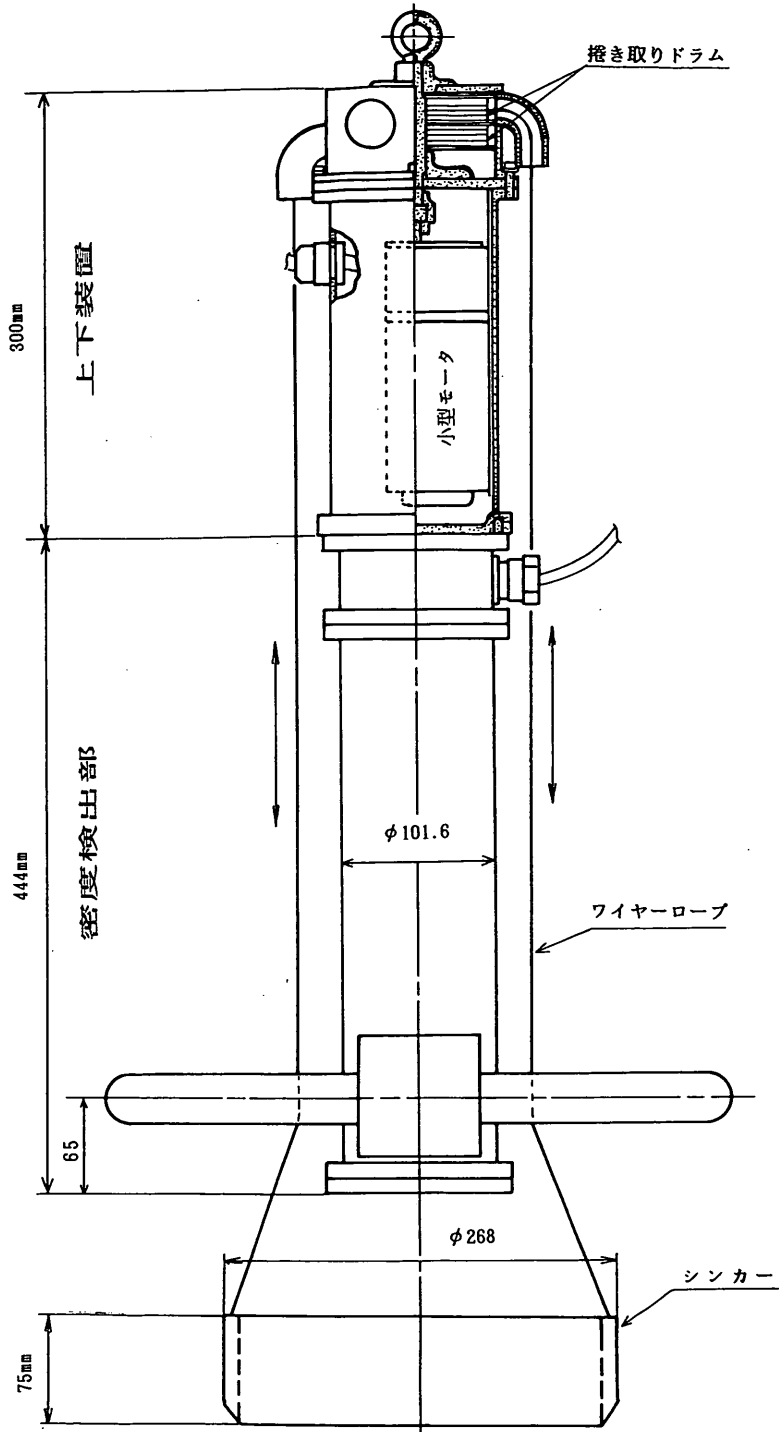


図-29 泥土内上下移動測定装置

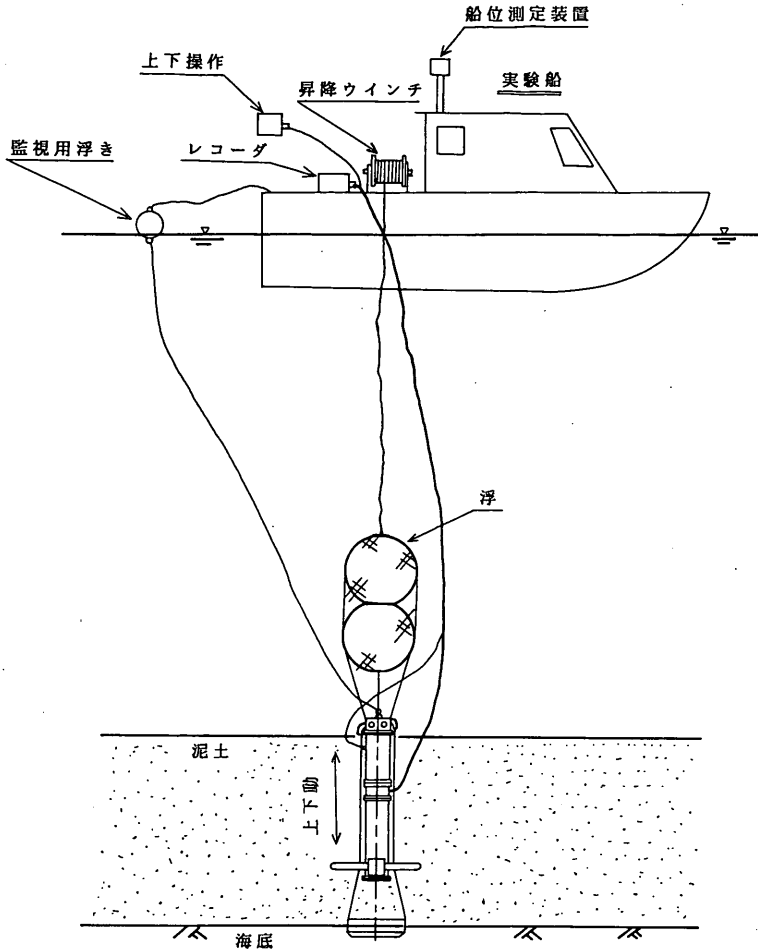


図-30 全体測定システム

圧センサーにより測定するものとしている。また、検出器の位置測定は、調査船等の電波および光波測距装置を予定している。

8. あとがき

3.7 MBq 以下の微弱な γ 線源を用いた海底泥土密度の測定器の開発を行った。海底に堆積した泥土の密度を直接測定することは、日本国内ではこれまで全く行われていない。海底に堆積した泥土の問題は、航路埋没のみならず港湾工事においては床掘り等の舞い戻り土、閉鎖湾における堆積泥土の音響測深値が通常海底より浅くなる問題として述べられてきている。音響測深器で海底を測深することは、作業性の面で他の測定機器に比べて優

れているため、最も基本的なものとして用いられているが、超音波の反射面は周波数や底質によって異なる¹¹⁾。特に、埋没泥土のように軟らかい底質の場合は、注意を必要とする。一方で浮泥のような軟らかい泥土は、ヨーロッパにおいて確認されているように、必ずしも船舶の安全航行の障害とならないことがある。そのため、日本国内においても埋没泥土が大量になる航路、泊地等においては、船舶航行の安全性と維持浚渫の経済性の観点から密度等による水深管理の方法を加えて行く必要があるものとする。

現在、第四港湾建設局管内の熊本港の新設航路においては、既に泥土流入防止のための潜堤が築造され、平成3年度から航路浚渫が開始されている。この熊本港にお

る潜堤は、日本における最初の本格的な航路泥土埋没問題の防止策として行われるものである。しかし、潜堤によって泥土の流入を全て防止することは難しく、前述のような航路水深の維持管理上の問題解決が必要となる。しかし、航路水深の密度による管理は、日本では全く事例がなく、今後本開発の計測技術等を含めて多くの問題解決が必要となるものと思われる。本開発の泥土密度測定器は、実海域で船上から直接海底の泥土密度を高精度に測定が可能なるものであり、航路水深の維持管理の問題解決に利用されることを期待するものである。また、従来のSS測定濃度を越える範囲の濁り等の現場測定器としての利用等も期待したい。しかし、本測定器は海域の定点の垂直密度分布を測定するものであり、現場での作業性は音響測深等と比べて低い。法的規制を受ける強い放射線源を用いることで、測定器の移動速度に応じてリアルタイムに測定できる測定器の開発が基本的には可能であるが、国内の実海域においては流失防止等の技術開発課題、また管理体制等の課題が多い。そのため、広域な実海域の作業性を確保するために、従来の周波数以下の低周波数の音響測深と本密度測定器を組み合わせた水深管理技術等の研究が今後の主要な課題になるものと考えている。

最後に、本開発にあたっては国内の事例が少ないこともあり、多くの方からの御指導、また情報の提供を頂いた。特に、本測定器の開発の方向付の御指導を頂いた入江九州大学教授（前港湾技術研究所海洋水理部長）、 γ 線輸送方程式の取り扱い等の御指導を頂いた川崎地質(株)佐野部長、各種情報の提供を頂いた(株)機材研究所八木氏に対して、ここに記して感謝の意を表す。

(1991年9月30日受付)

参考文献

- 1) H. De Vlieger and J. De Clodt : Navitracker : A giant step forward in tactics and economics of maintenance dredging, *Terra et Aqua* 35, pp. 2-18
- 2) A. Caillot, G. Meyer, D. Chambellan, J. C. Tanguy : A New Nuclear Density Gauge to Measure Directly High Turbidities in Muddy Areas, *COSTAL ENGINEERING*, 1984, PP. 3172-3179
- 3) Silt Density Measurement, The Dock & Harbour Authority, 1981. 1, pp. 282-284
- 4) New Surveying Equipment and Techniques Hydraulics Research Finds a Way Through the Mud, *Dredging+Construction*, 1990. 12, pp. 19-20
- 5) 小鯛桂一：地下水調査のための密度検層（測定上の問題点と使用機器の試作について），地質調査所月報，Vol 25, 1974, pp.284-294
- 6) P. Kerckaert and H. De Vlieger : Practical Application of Maintenance Dredging Optimization Techniques in Zeebrugge, *Proc. of Wodocon VII*, 1989. 5, pp. 611-631
- 7) 関口晃：放射線計測概論，東京大学出版会，pp.27
- 8) ラジオアイソトープ密封線源とその取扱.改訂6版，日本アイソトープ協会編，pp.24, pp.112-114
- 9) 中井順二： γ - γ 検層法による岩石密度の測定と重金属鉱床の探査法について，地質調査所月報，Vol 29, pp.181-189
- 10) J. Tittman and J. S. Wahl : The Physical Foundation of Formation Density Logging (Gamma-Gamma). *Geophysics*, vol. 30, pp. 284-294
- 11) 木原純孝ほか：大水深施工検査と海底探査技術に関する現状調査，港研資料，No.411, 1982.3, pp.6

港湾技術研究所報告 第30巻 索引

論文名・著者名	巻号	頁
水工部		
遠地津波の外洋伝播計算……………後藤智明	30. 1.	3~20
砕波および反射を考慮した波浪変形計算……………高山知司・池田直太・平石哲也	30. 1.	21~68
多方向不規則波を用いた波浪変形模型実験 ……………高山知司・池田直太・小杉宣史	30. 1.	69~136
波の連なりを考慮した長周期波の波高の推定 —波崎海洋研究施設における現地観測にもとづく検討— ……………加藤一正・中村聡志・池田直太	30. 1.	137~164
現地データによる移動床模型実験の検証 —河原子海岸におけるケース・スタディー— ……………加藤一正・井上浩司・柳嶋慎一	30. 1.	165~204
現地データによる砕波帯内の岸沖漂砂量と流速特性の検討……………栗山善昭	30. 2.	3~58
避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動に関する検討 ……………平石哲也・本城 智	30. 2.	59~154
直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法 ……………高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均	30. 4.	3~34
信頼性理論による防波堤の滑動安定性に関する理論的検討 ……………高山知司・藤井 久	30. 4.	35~64
海洋水理部		
ヨシ原による水質浄化の特性……………細川恭史・三好英一・古川恵太	30. 1.	205~238
離散渦法による構造物周りの流れシミュレーション……………細川恭史・古川恵太	30. 2.	155~210
土質部		
空港コンクリート舗装の不同沈下管理に関する考察……………八谷好高・横田 弘	30. 1.	239~26
プラスチックボードドレーンで改良された不均一地盤の沈下特性 ……………田中洋行・太田一己・丸山隆英	30. 2.	211~228
杭の横抵抗における捨石層の評価……………高橋邦夫・壺岐幸史	30. 2.	229~274
サンドドレーンの効果に関する有限要素解析……………小林正樹	30. 2.	275~304
接円式深層混合地盤の挙動……………北詰昌樹・中村 健・寺師昌明	30. 2.	305~326
斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗……………寺師昌明・北詰昌樹	30. 2.	327~348

沖積粘土地盤に対する定率ひずみ圧密試験の適用性	水上純一・小林正樹・小泉和広	30. 3.	3~24
繰り返し载荷を受ける粘土の強度・変形特性	山崎浩之・善 功企・加賀谷宏基・館下 徹	30. 4.	65~83
構 造 部			
SPS による接岸ドルフィンの残留変形量と累積疲労損傷度	上田 茂・白石 悟	30. 1.	267~312
カラーコンクリートの材料特性に関する研究 ー強度特性, 色彩特性, および耐久性ー	福手 勤・山本邦夫・濱田秀則	30. 1.	313~345
液状化による矢板岸壁の変形.....	井合 進・亀岡知弘	30. 2.	349~380
盛土の地震被災事例に基づく円形すべり安定解析の検討	上部達生・長田 信	30. 2.	381~444
ねじりを受ける長大ケーソンの力学特性.....	清宮 理・山田昌郎	30. 2.	445~482
港湾コンクリート構造物の補修方法としての電着工法の適用性	阿部正美・福手 勤・横田 優・佐々木晴敏	30. 3.	25~64
計画設計基準部			
捨石による基礎マウンドの形状および力学特性に関する考察	口田 登・辻垣武彦・森田博史	30. 1.	347~382
機械技術部			
歩行式水中調査ロボットの開発 ー(第2報)軽量防水型実験機の設計ー	朝倉 修・秋園純一・岩崎峯夫・根本孝志	30. 2.	483~532
水平管における空気混入軟泥の流動特性	岡山義邦・鮎貝基和・鈴木 誠・福本裕哉	30. 2.	533~555
水中施工管理用小型計測機の開発.....	石塚浩次・根本孝志	30. 3.	65~89
RI を利用した海底密度測定器の開発.....	石塚浩次・根本孝志	30. 4.	85~109

Index of Report of P. H. R. I. Vol. 30

	Vol. No.	pp.
Hydraulic Engineering Division		
Numerical Simulation of the Trans-oceanic Propagation of Tsunami Chiaki GOTO	30. 1.	3~20
Practical Computation Method of Directional Random Wave Transformation Tomotsuka TAKAYAMA, Naota IKEDA and Tetsuya HIRAISHI	30. 1.	21~68
Hydraulic Model Test on Wave Diformation by using Directional Random Waves Tomotsuka TAKAYAMA, Naota IKEDA and Yoshifumi KOSUGI	30. 1.	69~136
Estimation of Infragravity Waves in Consideration of Wave Groups —An Examination on Basis of Field Observation at HORF— Kazumasa KATOH, Satoshi NAKAMURA and Naota IKEDA	30. 1.	137~164
Inspection of Movable-bed Model Experiments with Field Data —Case Study at Kwarago Beach— Kazumasa KATOH, Kouji INOUE and Shin-ichi YANAGISHIMA	30. 1.	165~204
Investigation of Cross-shore Sediment Transport Rates and Flow Parameters in the Surf Zone using Field Data Yoshiaki KURIYAMA	30. 2.	3~58
Characteristics of the motion and tension of a ferry moored in a storm Tetsuya HIRAISHI and Satoshi HONJYO	30. 2.	59~154
Experimental Study on Wave Forces Acting on Perforated Wall Caisson Breakwaters Shigeo TAKAHASHI, ken-ichirou SHIMOSAKO and Hitoshi SASAKI	30. 4.	3~34
Probabilistic Estimation of Stability of Slide for Caisson Type Breakwaters Tomotsuka TAKAYAMA and Hisashi FUJII	30. 4.	35~64
Marine Hydrodynamics Division		
Characteristics of Water Purification in Coastal Reed Field Yasushi HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI and Keita FURUKAWA	30. 1.	205~237
A Discrete Vortex Method for Inclined Flat Plate Yasushi HOSOKAWA and Keita FURUKAWA	30. 2.	155~210

Geotechnical Engineering Division

Differential Settlement Management of Airport Concrete Pavements on Reclaimed Ground Yoshitaka HACHIYA and Hiroshi YOKOTA	30. 1.	239~26
Performance of Vertical Drains for Soft and Ununiform Soils Hiroyuki TANAKA, Kazumi OHTA and Takahide MARUYAMA	30. 2.	211~228
Lateral Resistance of a Pile in Rubble Mound Kunio TAKAHASHI and Yukifumi IKKI	30. 2.	229~274
Finite Element Analysis of the Effectiveness of Sand DrainsMasaki KOBAYASHI	30. 2.	275~304
Reliability of Clay Ground Improved by the Group Column Type DMM with High Replacement Masaki KITAZUME, Takeshi NAKAMURA and Masaaki TERASHI	30. 2.	305~326
Influence of a Slope on the Lateral Resistance of a long Pile Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME	30. 2.	327~348
Constant Rate of Strain Test of Undisturbed Alluvial Marine Clay Jun-ichi MIZUKAMI, Masaki KOBAYASHI and Kazuhiro KOIZUMI	30. 3.	3~24
Strength and Deformation Characteristics of Clays due to Cyclic LoadingHiroyuki YAMAZAKI, Kouki ZEN, Hiroki KAGAYA and Toru TACHISHITA	30. 4.	65~83

Structural Engineering Division

Residual Deformation and Cumulative Fatigue Damage Ratio of Breasting Dolphin by Single Pile Structure Shigeru UEDA and Satoru SHIRAISHI	30. 1.	267~312
A Study on the Material Properties of Coloured Concrete —Strength, Colouring, and Durability— Tsutomu FUKUTE, Kunio YAMAMOTO and Hidenori HAMADA	30. 1.	313~346
Analysis of Deformation in Sheet Pile Quaywall Due to LiquefactionSusumu IAI and Tomohiro KAMEOKA	30. 2.	349~380
Circular Arc Analysis of Earthquake Damage of Embankments on Saturated Sand Layers Tatsuo UWABE and Makoto OSADA	30. 2.	381~444
Mechanical Properties of Long Caisson Subjected to Torsion Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA	30. 2.	445~482

Applicability of Electrodeposition as a Repairing Method for Deteriorated Marine Concrete Structures Masami ABE, Tsutomu FUKUTE, Masaru YOKOTA and Harutoshi SASAKI	30. 3.	25~64
---	--------	-------

Planning and Design Standard Division

Study on Configuration and Mechanical Properties of Rubble Mounds Noboru KUCHIDA, Takehiko TSUJIGAKI and Hirohumi MORITA	30. 1.	347~382
---	--------	---------

Machinery Division

Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection -(Second Report) Design of the Light-weight Type Aquatic Walking Robot- Osamu ASAKURA, Jun-ichi AKIZONO, Mineo IWASAKI and Takashi NEMOTO	30. 2.	483~532
---	--------	---------

Fluidity Characteristics of Muddy Slurry with Compressed Air in Horizontal Pipe Yoshikuni OKAYAMA, Motokazu AYUGAI, Makoto SUZUKI and Hiroya FUKUMOTO	30. 2.	533~555
---	--------	---------

Development of Small-size Measuring Instrument for Underwater execution control Koji ISHIZUKA and Takashi NEMOTO	30. 3.	65~89
---	--------	-------

Development of Mud Layer Density Meter by Using Radio Isotop Koji ISHIZUKA and Takashi NEMOTO	30. 4.	85~109
--	--------	--------

港湾技術研究所報告 第30巻 第4号

1991. 12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1991) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この報告書は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。