

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
PORT AND HARBOUR TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORTATION, JAPAN

No. 13 August, 1964

放射性同位元素の漂砂模型実験への

利用について……………佐藤昭二・田中則男・入江 功

昭和 39 年 8 月

運輸省港湾技術研究所



放射性同位元素の漂砂模型実験への利用について

目 次

緒 言	2
1. R・Iトレーサーと他のトレーサーの比較	2
2. トレーサーとしてのR・Iの選択	3
3. トレーサーの比放射能の決定	6
4. トレーサーの製作方法	7
5. 作業者の健康と環境汚染の管理	9
6. 測定装置及び測定法	14
7. 漂砂模型実験へのR・Iトレーサーの利用の実例	19
a. 水路における、沖浜帯での砂移動に関する実験	19
b. 砕波帯における砂移動に関する実験	22
c. 砂浜上に立てられた直立壁前面での洗掘に関する実験における利用	22
d. 平面模型実験への利用	25
8. 結びに	27
参考文献	27

放射性同位元素の漂砂模型実験への利用について

佐藤 昭 二* 田 中 則 男** 入 江 功**

緒 言

放射性同位元素 (R・I) の理工学における利用の方法は、基本的に二つに大別することが出来る。その第一は、R・I による放射線の透過作用、散乱作用、写真作用、電離作用等の諸性質を利用するものであり、第二は、R・I のもつ特異な検出能力を利用し、物理、化学の反応や運動を追跡する所謂追跡法 (tracer 法) である。R・I の漂砂模型実験への利用はその後者に属する。

R・I を海底物質 (砂、沈泥) の現地調査に利用するという試みは 1954 年、我国の苫小牧港及び、英国の Thams 河々口で行われて以来、世界各国で行われ多くの成果を上げている。これと同時に、R・I を漂砂模型実験に応用しようとする試みも幾つかなされて来た。しかし、R・I を用いて波による砂移動の本格的実験を行った例としては、平面水槽で 1962 年、米国の Taney の実験、造波水路では同じく 1962 年、著者等の実験が報告されているのみである。

著者等は、1961 年より今日まで、R・I を造波水路及び水槽での漂砂模型実験に利用して、漂砂現象の定性的理解のために多少の成果を上げて来た。しかし、R・I のトレーサーとしての優秀性を考えるとき、我々が R・I を充分活用し得たとは言えない。特に漂砂現象の定量的な問題への利用法、並びにその現地への応用方法の開発に関して、R・I は未だ多大な可能性を残しているものと考えている。

本報告では、現在までの諸実験を基に、漂砂模型実験への R・I の利用の方法とその実例について述べるものである。

1. R・I トレーサーと他のトレーサーの比較

実験室並びに現地での漂砂現象の調査研究の方法には、漂砂の原因である波や流れの性質、並びにその結果として生じる底質の分布や海底変動から間接的に漂砂現象を把握する方法と、着色砂や蛍光砂のように標識された粒子によって漂砂そのものを追跡する直接的な方法とがあり、この両者が充分行われて初めて漂砂現象は適確に把握しうるものであるが、この直接的な方法は R・I トレーサーの出現によって初めて、ほぼ完全な形で出来るようになったと言える。

種類	着色砂	蛍光砂	R・I トレーサー
製 法	自然砂に顔料を接着剤に附着させる。	蛍光顔料、接着剤、自然砂を混合、固粉の微粉砕	R・I を化学的に自然砂に附着
製作は面倒か	簡 単	や、面倒	簡 単
自然砂から顔料等が実験中脱落する	ほとんどない	ほとんどない	ほとんどない
トレーサーの比重は検出方法	自然砂より小さい 明析の困難	自然砂より小さい 濁時に紫外線燈	自然砂に同じ R・I 検出器
検出の難易	散粒の存在の検出は不可能	一粒でも可能	一粒でも検出可能
トレーサーが砂に埋もれている時の検出はどうか	不 可 能		砂に或程度埋もれていても検出可能
接近し実験が出来るか	不 可 能		短半減期のもののみ可能
其 他	障害防止に関する注意不要		注意必要

表-1 R・I トレーサーと他のトレーサーの比較

このような直接的漂砂研究法における漂砂のトレーサーとして現在用いられているものに着色砂、蛍光砂及び R・I トレーサーの三種があり、各々の特質については表-1 に示す通りである。この表からわかるように、

* 漂砂研究室長 ** 漂砂研究室

R・Iトレーサーはその一粒が或程度砂中に埋もれていても検出することが出来、他のトレーサーに比べて著しく検出能力が高い上に、検出、計数が全たく機械的に行われるために検出が簡単で、しかも高精度で行われる等、トレーサーとして他のものより極めて有効である。更に、R・Iトレーサーの利点として重要な点は実験砂の粒径が小さくなると、蛍光砂や着色砂では砂を包んでいる接着剤の比重が砂より小さく普通1.0前後であるために、トレーサー粒子の比重が自然砂に比べるとかなり小さくなり、トレーサーに自然砂と同一な運動を期待することが出来なくなるのに反して、R・Iトレーサーでは粒径が極めて小さくなくても、その比重が自然砂と同じであるということである。

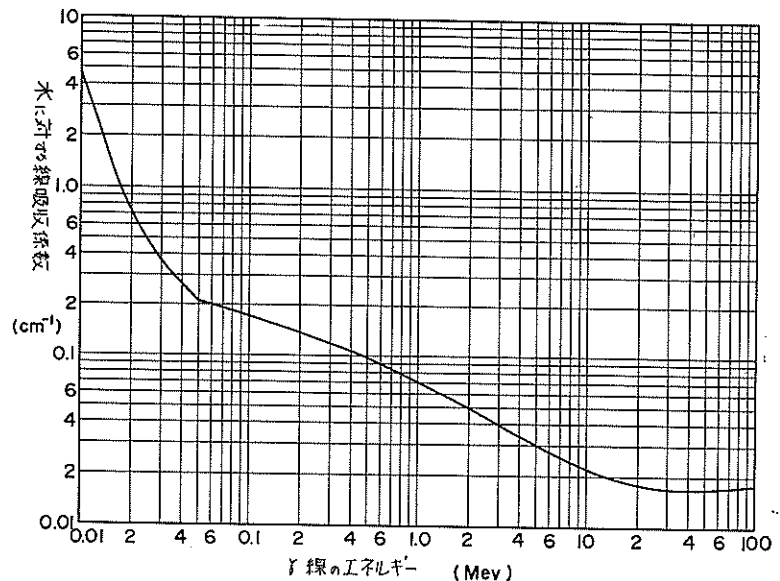
R・Iトレーサーはその取扱いに際して放射線による障害防止に対する留意が必要であり、トレーサーの製作価格が他のものに比べてやや高いという欠点はあるが、前述したトレーサーとしての優秀性はこの欠点を補って余りあるものであり、現在では漂砂実験用トレーサーとして最も優れたものである。

2. トレーサーとしてのR・Iの選択

使用するR・Iは、測定に有効であり、且つ又、作業員や環境への悪影響を最少限度におさえることを念頭におき、そのR・Iが放出する放射線の種類、エネルギー、R・Iの半減期、化学的性質、価格及び入手の難易等を考慮して選定する。

放射線の種類——同一エネルギーの α 、 β 、 γ 線が同一物質中を通過するときの透過能は α 、 β 、 γ の順に強くなる。特に、 α 線の物質透過能は極めて小さく、我々の目的には全然使用することが出来ない。エネルギーが1MeVの β 線が0.4cmの水によって完全に吸収されるのに反して、1MeVの γ 線は10cmの水によってその強度が半減するにすぎない。それ故、 β 線は作業員の健康、環境の管理上は使用しやすいが、測定上は γ 線の方がはるかに有効であり、現在漂砂の調査研究にはすべて γ 線放射体が用いられている。しかし、サンプリングして鉛製測定台中で、自然放射線を遮蔽して測定するか、又は放射線フィルムによる写真測定を行えば、 β 線放射物質の使用も可能である。

エネルギー——R・Iから放出される放射線の物質透過能は、一般に放射線エネルギーの高いもの程強いが、それと同時に、人体組織への影響も高エネルギーのもの程著しい。従って、環境並びに作業員の健康管理の上からは出来得るかぎり低エネルギーのものが望ましいのであるが、反面エネルギーが低すぎるとその検出が困難になるというこ



図—1 水に対する吸収係数と γ 線エネルギーの関係 (木村健次郎編「放射線データブック」頁178より)

ともあって、このような技術的問題からその下限が定まって来る。そこで今、R・Iから空気中で一定距離離れた点における計数率を I_0 として、線源と検出器の間に厚さ d の遮蔽体をおいた場合の計数率を I とすれば、

$$\frac{I}{I_0} = Be^{-\mu x} \quad (1)$$

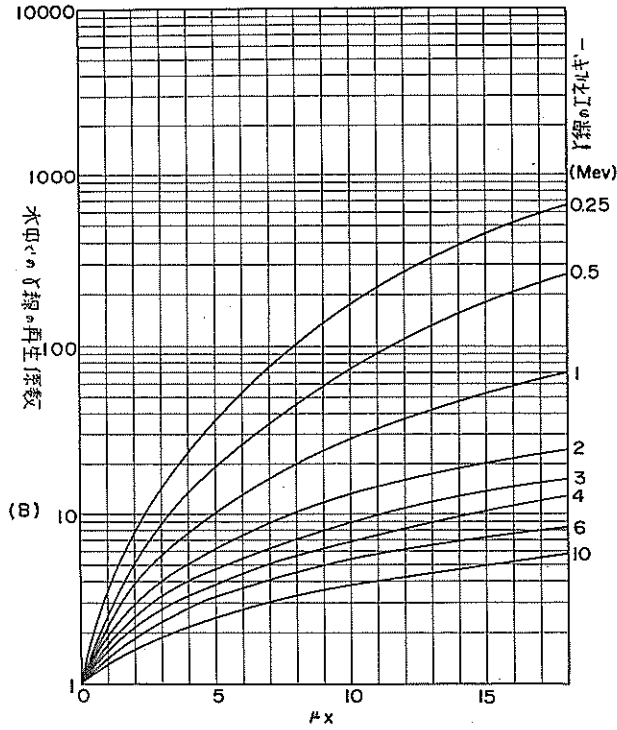


図-2 水に対するγ線の線量ビルドアップ係数とγ線のエネルギー及び水層の厚さの関係 (日本放射線同位元素協会編「アイソトープ便覧」頁756より)

なる関係がある。ここに μ は吸収係数 (cm^{-1}) と呼ばれ遮蔽体の放射線吸収能力を意味しており、普通一定物質については放射線のエネルギーの関数である。図-1 は水に対する吸収係数とエネルギーの関係を示すものである。又 B は再生係数と呼ばれており、遮蔽体により散乱をうけて検出器に入射する放射線の割合を意味しているが、放射線のエネルギー及び遮蔽体の厚さ及び種類によって変化する係数で、水に対しては図-2 に示す通りである。そこで、図-1、及び図-2 によって式 (1) を水に対して計算すると図-3 の如くなった。これによると、水の層の厚さが薄い間は、水による吸収効果は小さく、むしろ再生係数のために計数率が増加しており、この傾向は低エネルギーのもの程著しい。更に水が厚くなると、エネルギーの低いもの程吸収されて計数率の減少が急である。従って、トレーサーの分布の測定を行う際エネルギー

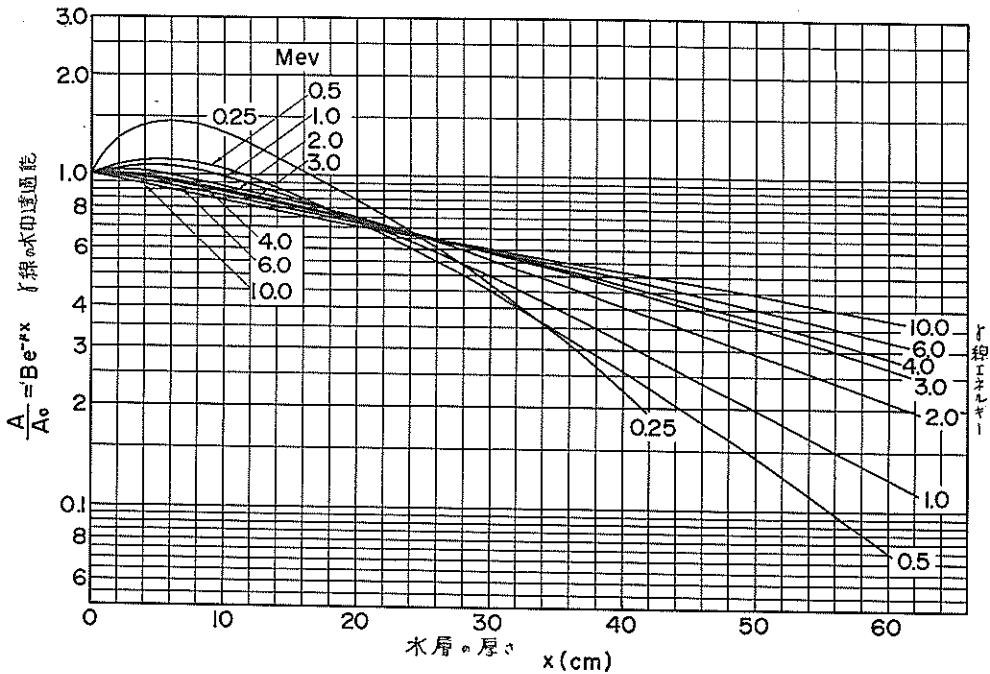


図-3 水に対するγ線の透過能

の低い $R \cdot I$ では検出器に近く分布しているトレーサーのみが有効に計測されるのに反して、高エネルギーのも

のでは、検出器からかなり離れたトレーサーによる放射線も計数していることになり、トレーサー分布の測定精度は低エネルギーのもの程高いことになる。しかしエネルギーがあまりにも低いと、砂中にトレーサーが埋れたときの検出が困難になること、並びに放射線によって検出器中に生ずるパルスが低くなること等も考慮すれば、大体0.1~1ないし2 MeV程度のエネルギーのものが適当のようである。

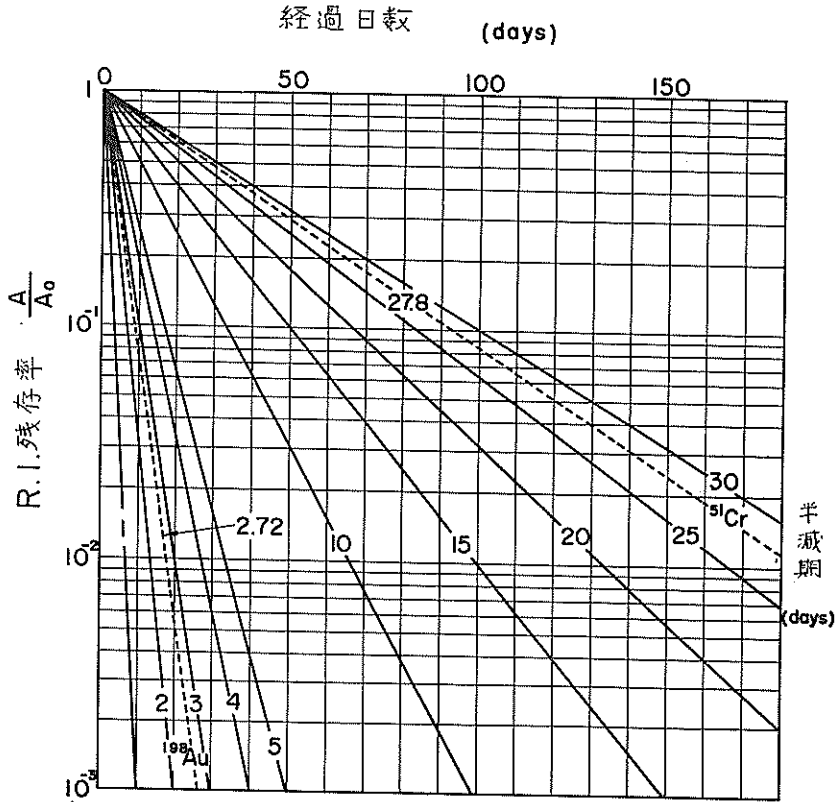


図-4 R・Iの半減期と減衰率の関係

半減期——現地調査の場合と異なり、投入されたR・Iトレーサーの稀釈の度合いが弱く、又附近に人の往來の頻繁な実験室使用では短半減期のR・Iを用いることが特に必要である。又実験にによって汚染された砂の処理、実験施設の運用の点からも短半減期のものが望まれる。

今投入時のR・Iの放射能を A_0 とし、投入後 t 日後の放射能を A 、R・Iの半減期を T とすると

$$\frac{A}{A_0} = e^{-\frac{0.693}{T} t} \quad (2)$$

の関係があり、これを図示すると図-4の通りである。そこで、普通投入されたトレーサーの放射能が投入時の $1/10^3$ に減衰したときその上に新たに他のトレーサーを投入して実験を行っても、前のトレーサーの放射能に邪魔されることはないから図-4によって、半減期1日のもので約10日、2日のもので約20日に一回宛水路中の砂を取り代えることなしに実験を行うことが出来る事がわかる。又我国の放射線障害の防止に関する法規に言う放射性物質とは、「放射線を放出する同位元素及びその化合物並びにこれらの含有物で、放射線を放出する同位元素の数量が、半減期30日以下の放射線を放出する同位元素に対しては $10\mu\text{C}$ (半減期30日以上のものについては、 $1\mu\text{C}$ 、 α 線を放出するもの及び ^{90}Sr については $0.1\mu\text{C}$ 、 ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 、 ^{18}F 等については $100\mu\text{C}$) 以上であって、濃度が $0.002\mu\text{C}/\text{gr}$ 以上のもの」(放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行令S.35年、政令第259号第1条)を指すもので、放射線を出す物質であってもその数量及び濃度が前記の値以下のものにつ

いては法律的にはR・Iと見做されず、従って、R・Iの取扱い、貯蔵、廃棄に関して法律の適用を受けないわけであるが、今仮に一回の実験で500 μC のトレーサーを投入したものとすると、これが実験の結果2~3kgの自然砂と混合されることは充分期待されるから、投入されたトレーサーが法律上R・Iとしての取扱いを受けないためには、数量500 μC が10 μC に減衰し（即ち $^{10}/_{500}$ に減衰する）且又濃度 $^{500}/_{1000}$ ($\mu\text{C}/\text{gr}$)が0.002 $\mu\text{C}/\text{gr}$ に（即ち $^{1}/_{125}$ に減衰する）減衰する必要がある、これに要する経過日数は半減期1日のもので約7日、2日のもので15日となる。

以上のように、取扱い上種々な意味で短半減期のものが有利なのであるが、実験の行程と関連して、自ずとそれにも限度があり、大体、半減期2~3日程度から20日前後までのものが取扱い上でも、実験行程上でも最も便利なのである。

化学的性質——実験室用R・Iトレーサーの製法には、後述する如くガラスの溶融過程でR・Iを混入するものと、自然砂表面にR・Iをコロイド吸着させる方法とがある。従って、漂砂の実験におけるトレーサーとして利用しうるR・Iはガラス成分として安定であること、及び、自然砂への吸着が可能であること、即ち、少なくとも金属であることが必要であり、他にも有毒でなく、水に溶解しないものでなくてはならない。

以上、漂砂実験に用いるトレーサーとして利用するR・Iの具備すべき性質について述べたことを要約するとR・Iは

- a. γ 線放射体であること
- b. 0.1~1.0 ないし 2.0 MeV 程度のエネルギーの放射線を放出すること
- c. 半減期が2.0から20日前後であること
- d. ガラス材料として安定であるか、或いは 砂にコロイド吸着しうるものであること
- e. 入手が容易で価格が安いこと

等の条件を満たすものでなくてはならない。このようなものとして ^{51}Cr （半減期27.8 days エネルギー0.32 MeV） ^{140}Ba — ^{140}La （半減期12.8 days エネルギー0.54, 0.31, 0.16 MeV） ^{198}Au （半減期2.7 days エネルギー0.412, 0.68, 1.09 MeV）等があるが、著者等はこのうち ^{198}Au を主として用い、一つの実験が長期に渡りそのような場合や、補助的なものとして ^{51}Cr も時折用いている。

3. トレーサーの比放射の決定

トレーサーの比放射能、即ち、トレーサー1gr当りの放射能をどの程度にとるべきかは、調査の目的、検出器の感度、環境の汚染等の観点から決定すべきであるが、実験室においては図-5に示すように、砂中へ ℓ_1 (cm) 埋もれているR・Iを砂面上 ℓ_2 (cm) の水中において、半径R (cm) のシンチレーターで計ったとき十分検出が可能であるような比放射を取ることにしている。即ち、今トレーサー粒子の粒径をd (cm)、密度を ζ (gr/cm^3) 比放射能をa (キューリー/gr) とし、一崩壊当りn本の放射線が放出されるとき、トレーサー1粒子から1秒当り放出される放射線数は

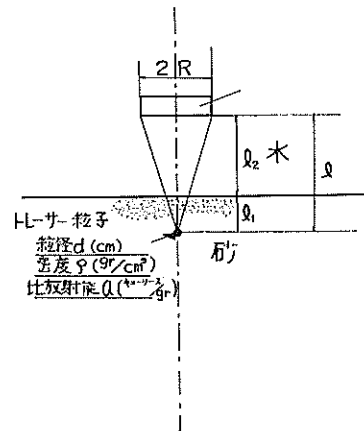


図-5

$$I_0 = \frac{3}{4} \pi d^3 \zeta a n \times 3.7 \times 10^{10} \quad \text{本/sec}$$

である。しかるに線源に対してシンチレーターのはさむ立体角は

$$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\ell}{\sqrt{R^2 + \ell^2}} \right)$$

であるから、粒子から出る全放射線のうち計数されるものは、シンチレーターの検出効率を ϵ 、水及び砂の密度を ζ_1, ζ_2 、線吸収係数を μ_1, μ_2 再生係数を B_1, B_2 とすると、水及び砂による吸収を考慮して

$$A = \frac{3}{4} \pi \zeta d^3 \cdot a \cdot n \cdot \epsilon \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\ell}{\sqrt{R^2 + \ell^2}}\right) B_1 e^{-\mu_1 \zeta_1 \ell_1} \times B_2 e^{-\mu_2 \zeta_2 \ell_2} \times 3.7 \times 10^{10} \quad \text{cps} \quad (3)$$

となる。そこで、実験に用いた ^{198}Au と ^{51}Cr についてトレーサー粒子が砂中に 1 cm 埋れており、砂面上 2 cm の位置に径が $1 - \frac{1}{2}$ in のシンチレーターをおいて計数するとした場合、式 (3) の各項の値を求めてみると表—

核種	エネルギー (MeV)	(A)				(B)	(C)	(D)	(E)		
		n	ℓ_1	ℓ_2	R	ϵ	$\frac{3}{4} \pi \zeta d^3$	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\ell}{\sqrt{R^2 + \ell^2}}\right)$	$B_1 e^{-\mu_1 \zeta_1 \ell_1}$	$B_2 e^{-\mu_2 \zeta_2 \ell_2}$	$A \times B \times C \times D \times E$
^{198}Au	0.412(100%)	1	2.0 cm	1.0 cm	1.8 cm	0.6	2.305×10^6	0.052	1.15	0.97	8.05×10^9
	0.676(13%)					0.75			1.22	0.975	
^{51}Cr	0.325(9%)	0.09	2.0 cm	1.0 cm	1.8 cm	0.6	2.305×10^6	0.052	1.15	0.97	8.05×10^9
	0.320(10%)					0.75			1.22	0.975	
	0.65(10%)					0.6			0.75	1.22	

$\zeta_1 = 1.0 \text{ g/cm}^3$ $\zeta_2 = 1.8 \text{ g/cm}^3$

表—2 ^{198}Au 並びに ^{51}Cr を用いるときの式 (3) の各項の値

2 の通りとなり、従って式

(3) は次のように書きなおされる。即ち

^{198}Au について

$$A = 8.05 \times 10^9 d^3 a \quad \text{cps} \quad (3'-1)$$

^{51}Cr について

$$A = 9.65 \times 10^8 d^3 a \quad \text{cps} \quad (3''-1)$$

ここで表—2 中の ϵ の値は後述の図—12 から、又 $B_1 e^{-\mu_1 \zeta_1 \ell_1}$ の値は図—3 から、 $B_2 e^{-\mu_2 \zeta_2 \ell_2}$ は ^{51}Cr に対しては後述の実測値図—18 から求め、 ^{198}Au については同図から外挿した。

更に普通このシンチレーション検出器による水中での自然計数率は 5 ~ 6 cps であるから、トレーサーによる計数率が自然計数の倍、即ち、10 cps 以上であるとき検出が可能であると考えて、砂中 1 cm の位置にあるトレーサー10数粒が検出されるためには、その比放射能はトレーサーの粒径に関して

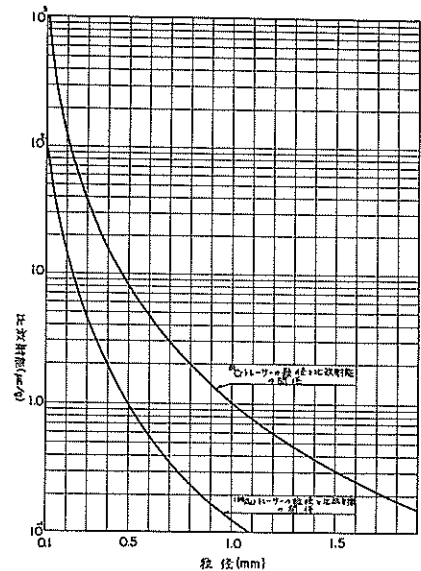
^{198}Au について

$$a \geq \frac{10}{8.05 \times 10^9 d^3 \times 10} = \frac{1.24 \times 10^{-10}}{d^3} \quad \text{キュリー/gr} \quad (3'-2)$$

^{51}Cr について

$$a \geq \frac{10}{9.65 \times 10^8 d^3 \times 10} = \frac{1.035 \times 10^{-9}}{d^3} \quad \text{キュリー/gr} \quad (3''-2)$$

の関係をもちねばならない。図—6 は上式を示すもので、これによると実験に用いる粒径の範囲では数 $\mu\text{c/gr}$ にとればよいようである。



図—6 ^{198}Au 並びに ^{51}Cr を用いるときのトレーサーの粒径と必要な比放射能の関係

4. トレーサーの製作方法

現在行われている漂砂の調査研究用トレーサーの製作法には次のような方法がある。即ち

- ガラスの溶融過程で R・I を混融するもの
- 或る目的とする元素を含むガラス砂を原子炉中で中性子照射する方法
- 自然砂を中性子照射し、自然砂中の Na, Ca 等を放射化するもの
- 放射性物質のコロイド溶液を自然砂と混合し、自然砂表面にコロイド吸着させるもの

等である。(a)の方法は、必要なときにすぐトレーサーを造ることが出来るという利点はあるが、トレーサーの製作の過程即ち、ガラスの溶融、粉碎、篩分け作業中に作業者が放射線は被ばくされるおそれが多い。(b)の

方法は原子炉での照射が必要なために、手軽にトレーサーを作るわけにはいかないし、又照射に際して目的元素以外のガラス成分の Na , Ca , Si 等も同時に放射化され、短半減期ではあるが強い放射線を発生するために目的元素による $R \cdot I$ が或程度長い半減期をもつものでなくてはならないため、実験室での使用に適さない。しかし、一度に多量の $R \cdot I$ トレーサーを得るといふ点では最も優れた方法であるために、現地調査では一番よく用いられている。(c)の方法は放射化された ^{24}Na (半減期 15.7 hr) ^{47}Ca (半減期 4.7 days) 等の半減期が短かいために、照射用原子炉に遠い地域では、放射化されたトレーサーの輸送と関連して不利であるために、普通は用いられない。最後に (d)の方法は主としてシルトに対するトレーサーを作るのに用いられている方法で、トレーサー製作が比較的手軽である上に、トレーサーが砂自身であるためにガラス粒子のトレーサーを用いた時のような自然砂とトレーサーの形状の相異(ガラス砂は自然砂に比べて角張っており、やや扁平になる傾向がある)がなく、トレーサーは実験砂とまったく同一挙動をしていると考えられる利点がある。それに反して、後述するように、砂に対する吸着率がシルトに対するものよりかなり低くなるために現状では砂に対するトレーサーの製法として現地では用いられていない。しかし実験室におけるトレーサーの製法としては最も手軽で便利である。

本文に示した実験例においては、前述の方法のうち、主として (d) の吸着法を用い、補助的に (a) の溶融方法を併用したし、実験室でのトレーサー利用では、これらの方法が有効であると思われるので、以下ではこれら二方法のみについて詳述する。

ガラスへ混融する方法——出来上り比重が自然砂と同じになるようにガラス原料を配合し、その中に ^{51}Cr を混合して、 ^{51}Cr が均一に混るまで十分混合した後、電気炉で約 $1200^{\circ}C$ に加熱して溶融し、これを冷水中に流し込んで急冷した後乾燥させ、粉碎、篩分けして実験砂と同様な粒度分布になるように調整する。この作業過程中粉碎、篩分けにはかなりの時間がかかるし、 $R \cdot I$ を含むガラス粉末が飛散する可能性があるため、作業に当っては作業者にマスク、ビニール製胸当て、腕抜き等を着衣させ、更に粉碎及び篩分け器具をポリエチレンシートで完全に包む等の考慮が必要である。自然砂と同じガラスの原料配合法については「港研資料 No. 5」27頁に詳述したが、比重 2.65 のガラスに対する配合の例を示すと、

珪酸	($Si O_2$)	150 gr 或いは	150 gr
炭酸カルシウム	($Ca CO_3$)	50 gr	40 gr
炭酸ナトリウム	($Na_2 CO_3$)	50 gr	50 gr
硝酸ナトリウム	($Na NO_3$)	4 gr	4 gr
四三酸化鉛	($Pb_3 O_4$)	9 gr	三酸化コバルト ($Co_2 O_3$) 21 gr

の通りである。

自然砂へ吸着させる方法—— ^{198}Au , ^{140}Ba , ^{140}La 等の或種の金属は適当な処理によって自然砂及びシルト表面に吸着されることが知られている。例えば、 ^{198}Au のシルトへの吸着について Australia⁵⁾ で行われた例は次の通りである。

- a. 3 gr の ^{197}Au を中性子照射して 25mc の ^{198}Au を得る。
- b. これを暖かい王水中に溶解し、余剰な酸を除くために蒸発乾固する。
- c. これに 5 ml の水を加え、そのうち 2 ml を取って、粒径が 0.1~0.01 mm のシルト 100 gr に加えて機械的に攪拌する。

この結果、攪拌時間30分で ^{198}Au の 88%、3時間で 99% がシルトに吸着される。更に、 ^{198}Au の吸着したシルトに 100 ml の海水を加え、約 2 週間攪拌し、トレーサーからの ^{198}Au の離脱を調べた結果、攪拌時間15分程度までの間に約 0.3% が離脱するが、それ以後は離脱が見られない旨報告されている。尚、 ^{140}Ba — ^{140}La については、混合攪拌に先立ってシルトを以下のように前処理している。即ち

- a. シルトを水で洗う
- b. 1N の NaOH で洗う
- c. 水で充分洗って NaOH を洗い落とす
- d. アセトンで洗って乾燥させる。

そこで著者等は同様な方法で ^{198}Au を砂へ吸着させることを試みたのであるが、その吸着率は10~25%程度にすぎなかった。その原因は砂とシルトの粒径の相異にあるのではないかと考えているのであるが、現在のところ吸着の機構すら充分理解するに至っておらず、R・Iの自然砂への吸着については今後一層の研究を進めるつもりである。そこでここでは著者等が試みた一、二例を示し、参考に供するに止める。

* 攪拌中の温度と吸着率——前述した ^{198}Au の吸着過程中、 ^{198}Au の王水コロイド溶液を蒸発乾固せず、砂との攪拌中温めながら、攪拌を行ったものと、全然温めずに攪拌した場合について、砂に吸着した ^{198}Au によるカウント値と、砂と共に攪拌したR・I全部によるカウント値の比、即ち吸着率を比べると、温めたもので29.4%温めないもので19.6%であった。但し、この場合は粒径が1.0~0.5mmの砂45cm³(100g)と ^{198}Au 溶液1mcを各々混合したものであり、砂は事前に濃苛性ソーダ溶液で洗浄した。

* ^{198}Au 溶液中に砂をつけておく時間と吸着率—— ^{198}Au の王水溶液5mcを蒸発乾固し、粒径0.25~0.5mmの砂を苛性ソーダで洗浄したものをを用いて約30分攪拌の後の吸着率は5.9%であったが、これをそのまま一昼夜放置後の計測では、吸着率が11.0%になっていた。この場合、攪拌中は温めていない。

5. 作業者の健康と環境汚染の管理

R・Iによる放射線の人体への影響はそのほとんどが破壊的なものであり、放射線によって引起される人体障害には、しきい値(或る特定な値以上の被ばくを受けたとき初めて起る型の障害)のある型としきい値のない型があると言われている。皮ふや血液の障害は前者に属し、放射線による遺伝的影響は後者に属する。従って、放射線被ばくは如何に微弱なものであっても受けないようにすべきものである。このような放射線障害を防止する目的で我国では、詳細で、しかも世界的に厳しい規定をもうけてR・Iの使用、取扱いを規制している。その内で、

	作業従事者	管理区域にとまどき入る者	管理区域周辺に在る者	集団全体
全身 (<small>生殖腺を除く</small>)	* 3 rem/3月 D=5(N-18)rem <small>以下</small>	1.5 rem/年 <small>以下</small>	(0.5 rem/年) <small>以下</small>	
皮ふ (<small>甲状腺</small>)	8 rem/3ヶ月 <small>以下</small>	3 rem/年 <small>以下</small>		
手・前腕・足 足関節	20 rem/3ヶ月 <small>以下</small>			
	使用施設中人が常時入る処	管理区域	作業所内	外部
許容線量率	100 m rem/週 <small>以下</small>	30 m rem/週 <small>以下</small>	30 m rem/週 <small>以下</small> 10 m rem/週 <small>以下</small>	10 m rem/週 <small>以下</small>
空气中濃度 水中濃度	(MPC)a × 2.5/8hour <small>以下</small> (MPC)w × 2.5/8hour		$\frac{1}{10}$ (MPC)a / 8hour $\frac{1}{10}$ (MPC)w / 8hour <small>以下</small>	$\frac{1}{10}$ (MPC)a / 3ヶ月 <small>以下</small> $\frac{1}{10}$ (MPC)w / 3ヶ月
物の表面における 最大許容表面濃度	(MPC) 以下		$\frac{1}{10}$ (MPC) 以下	

表一3 我国の関係法の規定する許容被ばく量並びに最大許容照射線量率等の一覧

作業及び作業場所周辺の環境条件に関する規定を総括すると表-3の通りである。R・Iを使用する実験は少なくとも常にこの規定内で行わねばならないことは勿論である。この表からもわかるように、R・Iによる人体障害防止の方向は、R・I自体が人体内に摂取されることを防ぐ方向と、R・Iによる放射線にさらされることを防ごうとする二つの方向があるが、実験室での利用に関しては、使用する核種の半減期が短かいし、使用の過程でR・Iが空気中や水中に飛散する可能性がほとんどないので、前者に対する問題は少ない。従って、実験室での利用においては放射線に対する作業員及び一般人の防護に重点をおいて考えてさしつかえない。

作業員の健康及び環境の管理上から考えたR・Iの最大可能使用量——実験に必要なR・Iトレーサーの全量は、使用の目的、砂の運動の激しさによって決まるもので、それを一律に論ずることは出来ない。実験の各ケース毎に実験者が適当に決めるべきである。但し、使用量は必要最小限に止めるべきことは言うまでもない。実験室において使用可能なトレーサーの最大限度については作業員の健康及び環境管理の点より自ずと定まって来る。

即ち、現行の関係法規によると表-3に示した通り、作業員（R・Iの取扱いに常時従事し、その被ばく量、健康状態等を管理されているもの）に対する最大許容被ばく線量は $3rem/3$ カ月、使用施設中で作業員が常時立入場所における照射線量率は $100mr/週$ 以下とし、照射線量率が $30mr/週$ 以上の地域は管理区域として非作業員の立入を制限しなくてはならない旨を規定している。そこ今、或点の照射線量率を $A_0(mr/hr)$ とし、それから t (hr)後の線量率を $A(mr/hr)$ 、R・Iの半減期を T とすると、

$$A = A_0 e^{-\frac{0.693}{T}t} \quad \text{—————(4)}$$

なる関係がある。そこでその t (hr)の間の照射線量 \bar{A} (mr)は

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \int_0^t A dt = A_0 \int_0^t e^{-\frac{0.693}{T}t} dt \\ &= \frac{T}{0.693} A_0 (1 - e^{-\frac{0.693}{T}t}) \quad \text{—————(5)} \end{aligned}$$

となる。上式で $\bar{A} = 30 mr$ 、 $t = 24 \times 7 hr$ (実際には当研究所の勤務時間が一日8時間である故 $8 \times 7 = 56 hr$ ととってよいのであるが、安全のため一日 $24 hr$ を取った)及び $A = 100 mr \cdot t = 24 \times 7 hr$ とにおいて、各々の A_0 と T との関係を図示すると図-7の通りになる。この図で実線は使用施設内での線量率が使用したR

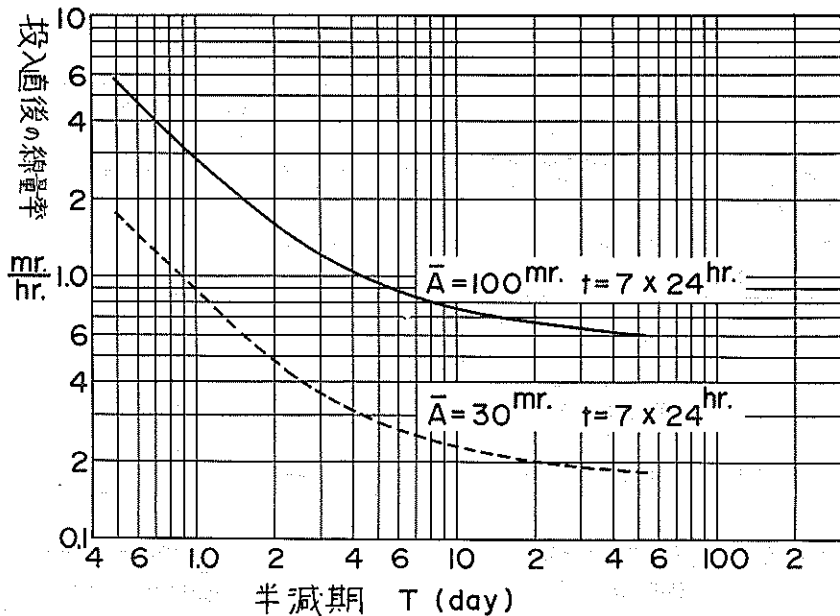


図-7 一週間の線量率が法定値以下になるため要求される投入時の最大線量率

・Iの半減期に応じてこの曲線で示す値以下である区域には作業員を立入らせることが出来、この曲線が示す値以上であるときには作業員の立入りを制限すべきであることを意味しており、図中破線は作業員以外の一般人に

対して同様な意味をもつ。

更に、水路及び水槽中にR・Iが投入されたとき、即ち図-9の凡例に示すように点P(水深 ℓ_w cm)にC mcのR・Iがあるとして、P点より $\ell_o=1$ mの点Aにおける照射線量率を計算してみる。即ち

* 1崩壊当り、1本の放射線が放出されるとすれば、C mc (3.7×10^7 dps) から放出される放射線のうちA点の単位面積を通るもの数は水による遮蔽を考慮して

$$\phi = \frac{3.7 \times 10^7 C}{4\pi \ell_o^2} B e^{-\mu \zeta \ell_w}$$

本/sec cm²

ここでBは水に対する再生係数、 μ , ζ は水の吸収係数及び密度である。

* γ 線のエネルギーをE(MeV), その空気

中での吸収係数のうち電離にかかわるものを μ_i とすると、 γ 線によって空気1 cm³中で消費されるエネルギーは

$$\phi E \mu_i = \frac{3.7 \times 10^7 C E \mu_i}{4\pi \ell_o^2} B e^{-\mu \zeta \ell_w} \quad \text{MeV/sec cm}^3$$

* しかるに1 roentgen は「X又は γ 線によって空気1 cm³ (0.00129 gr) に発生したイオンが1 esuの正負電荷をもつようなX又は γ 線」と定義され、電子の電荷は 4.8×10^{10} esuである故、1 esuの電荷は $1/4.8 \times 10^{10}$ 個のイオンによってつくられる。又イオン1個を発生するのに必要なエネルギーは平均34 eVであるから

$$1 \text{ roentgen} = 34/4.8 \times 10^{10} = 7.08 \times 10^{-10} \text{ eV} = 7.08 \times 10^4 \text{ MeV}$$

* 従って

$$\begin{aligned} \phi E \mu_i &= \frac{3.7 \times 10^7 C E \mu_i \times 3.6 \times 10^3}{4\pi \ell_o^2 \times 7.08 \times 10^4} B e^{-\mu \zeta \ell_w} \\ &= 1.5 \times 10^8 \frac{C E \mu_i}{\ell_o^2} B e^{-\mu \zeta \ell_w} \quad (\text{roentgen/hr}) \end{aligned}$$

ℓ_o を meter 単位でとると

$$\phi = 1.5 \times 10^4 \frac{C E \mu_i}{\ell_o^2} B e^{-\mu \zeta \ell_w} \quad (\text{roentgen/hr}) \quad (6)$$

上式で水の吸収を考えない、空気中における線源と照射線量率との関係、即ち

$$\phi = 1.5 \times 10^4 \frac{C E \mu_i}{\ell_o^2}$$

に関しては、C=1(mc), $\ell_o=1$ mの場合について実測によって図-8に示す曲線が与えられている。そこでこの曲線と図-3に示した水による吸収の関係を用いて点Pに1(mc)のR・Iがあるとき、P点より1 m離れた点Aにおける照射線量率を式(6)から求めて見ると図-9の通りになる。この図は水深が ℓ_w (cm)の点PにエネルギーEのR・I 1(mc)があるとき、点Pから1 mの点Aにおける照射線量を示すもので、もしR・Iの量がC(mc)のときは、この図から求まる値のC倍、又PAの距離が ℓ_o (m)のときには $1/\ell_o^2$ 倍にすればよいことになる。尚図中の破線は水深零、即ち空気中の場合に対する値で、図-8に示す曲線にひとしい。

ここで具体的に本所実験水路の例について考えてみる。図-10は実験室(本所、中型漂砂実験水路)の断面のスケッチを示すものであるが、図中の点線より水路側は実験中作業者の常時立入りを制限する区域であり、一点

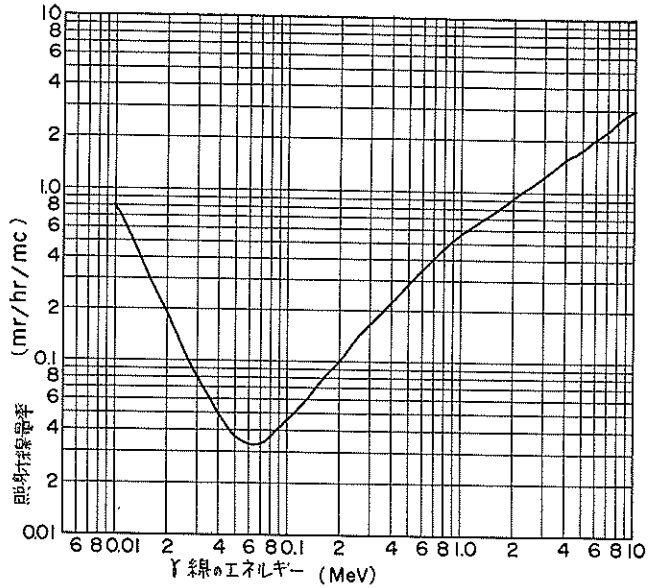


図-8 1 mc の線源から空气中で1 m離れた点での線量率 (データブック⁴⁾ 頁181より)

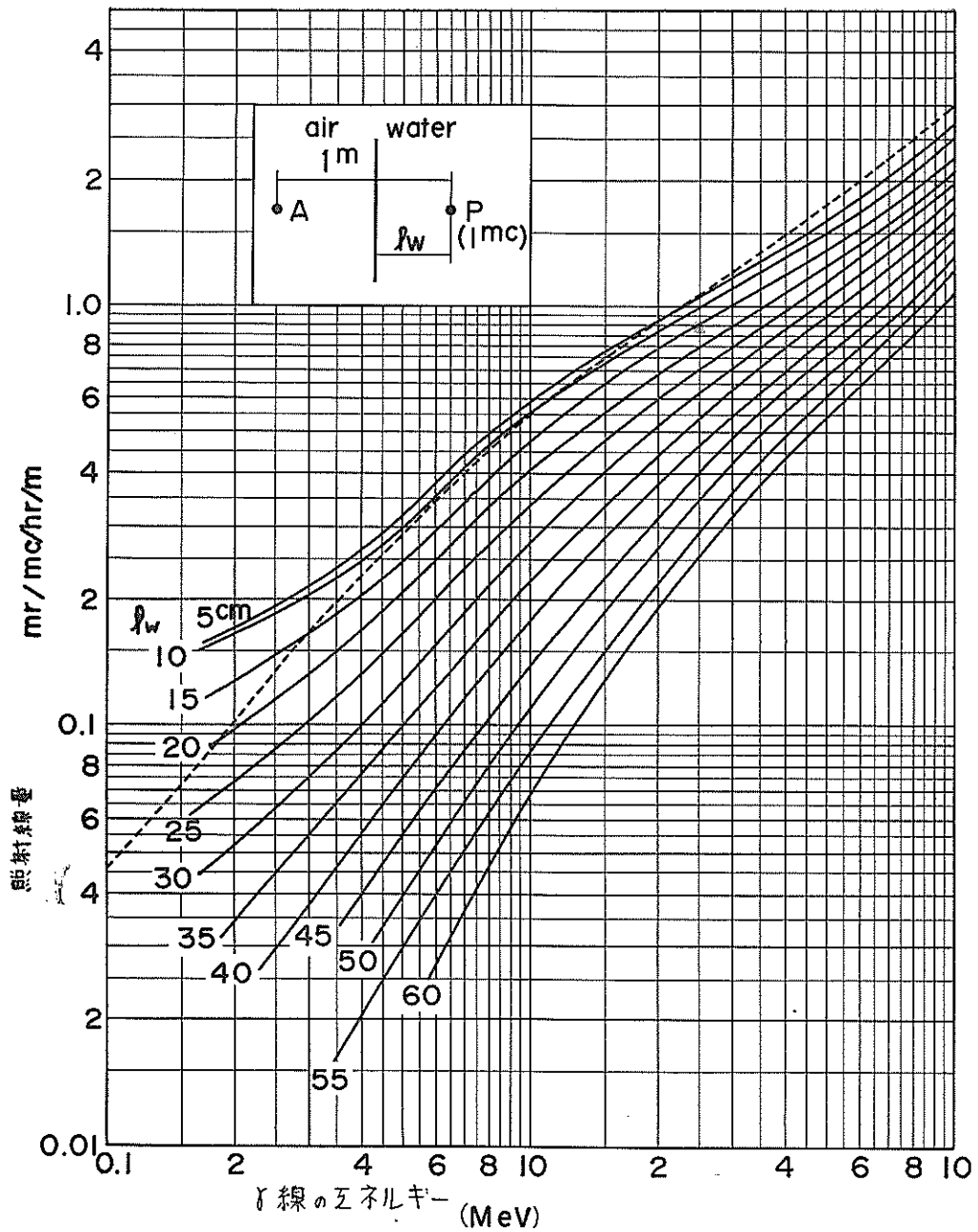


図-9 1 mc の線源が水深 l_w (cm) の水中にあるとき、線源から 1 m 上 (但し $l_w < 1 m$) での線量率

鎖線は管理区域の境界を示すものであるとした場合、実験に用いた ^{198}Au , ^{51}Cr , $^{140}Ba-^{140}La$ について水路で使用しうる最大量を図-9、及び図-7を用い求めてみると表-4の通りであり ^{51}Cr は最大約 12 mc まで、 ^{198}Au は 2 mc, $^{140}Ba-^{140}La$ は約 3 mc まで一回に投入することが出来るという結果を得る。しかるに、これらの計算の過程で

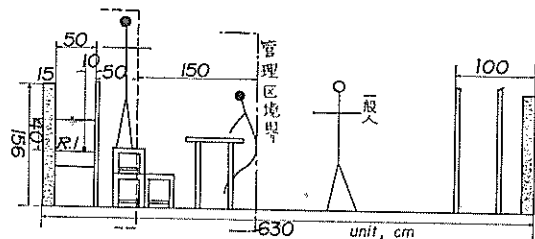


図-10 実験室断面図

用いた図-7は一週間を $24 \times 7 = 168$ hr として計算されたものであったのに、作業者の実労時間及び、使用施設の近くに一般人が立入る時間は本所の場合せいぜい一日当り8時間程度であるから、上述した最大投入量は充分の余裕を見込んだ値である。更に、本文に示す実験例においては最大投入量を0.5mcと内規しそれを超過する

核種	半減期	放射線線のエネルギー (MeV) と放射率	A	B	a	$\frac{a}{(0.6)^2}$	$\frac{a}{(2.1)^2}$	$\frac{A}{(0.6)^2}$	$\frac{B}{(2.1)^2}$	可能最大投入量 mc
¹⁹⁸ Au	2.7d	0.412 (100%)	1.400	0.39	0.25	0.694	0.061	2.02	6.4	2.02
⁵¹ Cr	27.8d	0.325 (9%)	0.64	0.194	$0.215 \times 0.09 = 0.0194$	0.054	0.00475	11.85	40.8	11.85
¹⁴⁰⁻¹⁴⁰ Ba-La	12.8d	0.537 (25%)	0.72	0.22	$0.315 \times 0.25 = 0.0788$	0.219	0.0192	3.28	17.45	3.28

- A: 管理区域境界での投入時の線量率 (図-7 破線より) mr/hr
 B: 作業者立入り制限区域境界での線量率 (図-7 実線より) mr/hr
 a: 水10cm遮蔽を受けたとき線源1mcから1mの点での線量率 (図-9より) mr/hr

表-4 ¹⁹⁸Au, ⁵¹Cr 並びに ¹⁴⁰Ba-¹⁴⁰La の水路内への最大投入量の計算

ことはなかったし、又実験の目的から0.5mc以上のトレーサー量を必要とすることもなかった。従って、投入されたトレーサーによって測定者や一般人が障害を受けるということは全たく考えられないと言ってよい。

トレーサーの製作中並びに投入作業中の被ばく——トレーサーの製作中、作業者は最も強い放射能のR・Iを取扱う必要がある。しかし、その作業時間は短かく、せいぜい一時間程度である。今、⁵¹Crを含むトレーサーを混融法で、¹⁹⁸Auを含むトレーサーを吸着法で、各々0.5mc作る場合について、その作業内容と計算被ばく線量を求めると表-5の通であり、⁵¹Crについては0.35mr、¹⁹⁸Auについては4.2mrの被ばくが予想されることになる。

⁵¹Cr カラスの製作

作業内容	取扱量の量 mc	作業時間 min	被曝量 mr
1 母液30mcから2mcを取出す	30	5	0.16
2 2mcをガラス原料に混合	2	5	0.0107
3 電気炉で溶融 (人は近づくない)	2	5	0.0107
4 出来上りガラスを水中へ流して急冷	2	5	0.0107
5 粉碎	2	30	0.064
6 篩分け	2	30	0.064
7 投入	2	10	0.0214
計			0.351

¹⁹⁸Au の石への吸着

1 母液30mcから2.5mcを取出す	30	5	2.4
2 これを蒸発乾固	2.5	5	0.2
3 砂と攪拌	2.5	20	0.8
4 洗浄	2.5	10	0.4
5 投入	2.5	10	0.4
計			4.2

- 1) R.I はすべて人体から0.5m 離して取扱う
- 2) R.I 1mc から空气中1mの点での照射線量率は
¹⁹⁸Au に対して 0.24 mr/hr
⁵¹Cr に対して 0.016 mr/hr
- 3) 砂に対する Au の吸着率は20%であり、ガラス砂を粉碎して目的粒径の粒子が25%得られる。従って、トレーサーを10mc作るには
¹⁹⁸Au に対して 0.5 5 = 2.5 mc
⁵¹Cr に対して 0.5 4 = 2.0 mc
 が必要である。

表-5 トレーサー製作並びに投入作業中の計算被ばく線量

著者等が実際に行った例のみみるとポケット線量計による実測値は¹⁹⁸Auについて2~3mr、⁵¹Crの場合ではほとんど被ばくはない。いずれにしてもトレーサーの製作に使用するR・Iを母液(R・Iは普通10~50mc宛購入して貯蔵しておき、必要に応じてこれを分離して使用する)から分離する際、簡単な鉛ブロック等による遮蔽さえ行えば、トレーサー製作、投入に際しての被ばく量は問題にする程の量ではない。

環境汚染への考慮——R・Iの使用に際しては使用しているR・Iが何らかの原因で使用施設外へ搬出され、普通人の居住する区域を汚染する可能性について考慮しなくてはならない。図-11は本文に示す実験に関連した使用施設を示す。ここで実験水路は屋内にあるので、実験中トレーサーが水路外に出ることは考えられない。又トレーサーのR・Iは

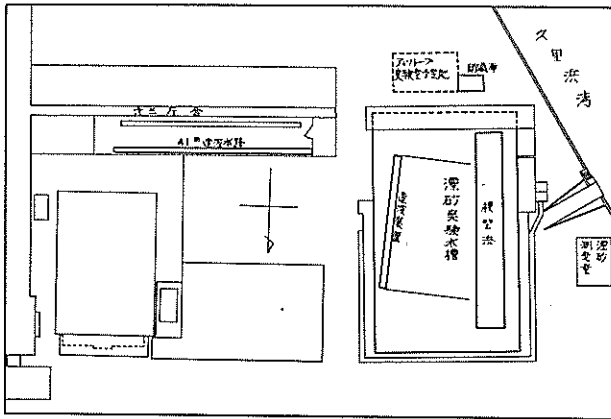


図-11 使用施設平面図

槽外へ飛散する可能性も考えられる。それに備えて屋外水槽は二重壁として外壁と内壁の間に5mの水域をおいた。これによって模型浜から飛散して水槽外へ出るものは全飛砂量の約1%以下におさえることが出来るであろう。⁹⁾

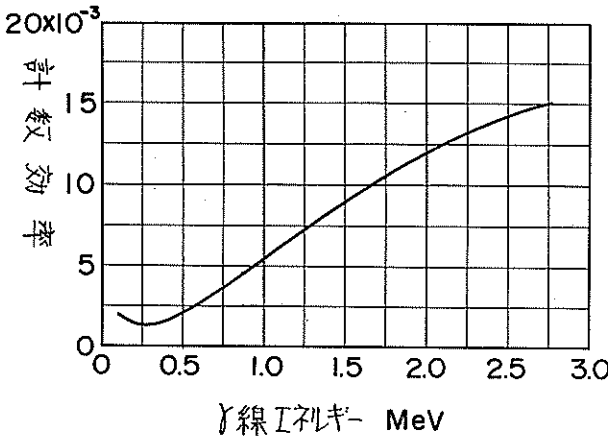


図-12・a G-M計数管の線に対する計数効率の比較
 (「アイソトープ便覧」頁323より)

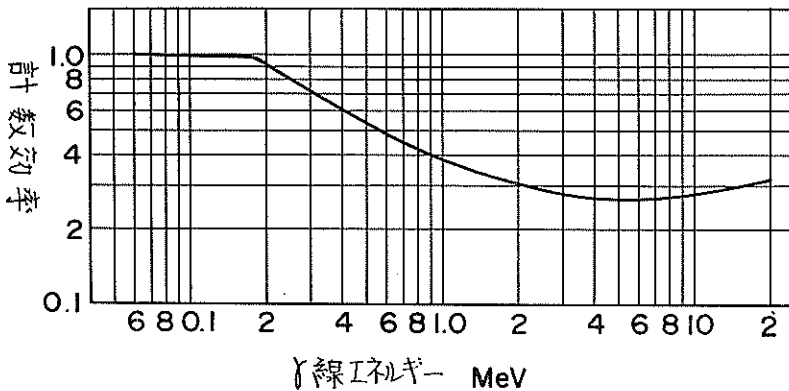


図-12・b シンチレーション検出器の線に対する計数効率の一例(但し
 1½ in φ × 1 in NaI結晶に対するもの「アイソトープ便覧」頁333より)

ほとんど水に溶解することはないが、仮に投入量 0.5 mc の全量が水に溶解したとしても水路(長さ41m, 幅0.5m, 水深45cm)中の水で $500/41 \times 0.5 \times 0.45 \times 10^6 = 5.42 \times 10^{-5} \mu\text{c}/\text{cm}^3$ に希釈されるわけであるから、 ^{51}Cr の排水中の許容濃度 $2 \times 10^{-3} \mu\text{c}/\text{cm}^3$ に比べるとはるかに薄し、 ^{198}Au の許容濃度 $5 \times 10^{-5} \mu\text{c}/\text{cm}^3$ に比べてもわずかに濃すぎるにすぎない。従って、R・Iが水に溶解することによる危険性は全然考えられないと言ってよい。屋外の水槽では実験中模型砂浜に打ち上げられたトレーサーが水

6. 測定装置及び測定法

現在、 γ 線の測定に用いられている測定器には、G-M管検出器とシンチレーション検出器の二種がある。G-M管検出器は現在最も普及している放射線測定器で、普通アルゴンとアルコール、或いはメタンとの混合気体中に放射線が生じしめたイオンを高圧をかけた陰陽極へ集積するものであり、シンチレーション検出器は γ 線エネルギーの吸収によって発光する物質シンチレーターからの発光を光電膜によって電子に変え、これを光電子倍增して電圧、或いは電流パルスの形で計測するものである。両者の γ 線に対する計数効率

の一例を図-12に示した。ここに言う計数効率とはG-M管及びシンチレーターの有効体積中に入射する γ 線のうち何%が計数放電を引き起すかを示すものである。このような γ 線の計数効率はG-M管にあっては計数管の寸法や壁材の材質、厚さ、又シンチレーターにおいてはその材質、寸

法等によって異なるものでこの図は単なる一例にすぎないが、いずれにしても、シンチレーション検出器に比べてG-M検出器のγ線に対する検出効率は著しく低い。従って、γ線の測定には断然シンチレーション検出器が有効であり、本文に示す実験ではすべてシンチレーション検出器を用いている。

図-13に本実験で用いた測定装置の要項を示した。計数器としては、1秒当りの平均計数率を示すレートメーター（計数率計）とスケアラ（計数計）があるが、計数率が低くなるとレートメーターでは計数精度が低下するため、実験室では普通スケアラが用いられている。図中の可変抵抗は入力電圧の調整のために用いるものである。

図-14及び写真-1は水路実験における検出部で、防水型シンチレーションヘッドを測定台車に取りつけたものである。又、図-15及び写真-2は水槽実験における検出部で、下部円筒中にシンチレーションヘッドを内蔵している。これらの両者で下端に鉛の遮蔽部を取りつけたのは測定値が周辺の影響をうけず、出来るかぎり狭い範囲のトレーサーのみによる計数値を示すものという意図によるものである。

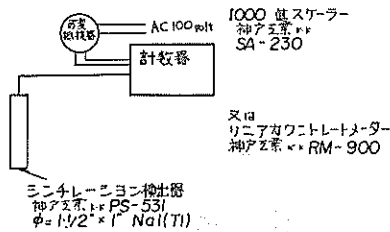


図-13 R・Iトレーサー測定装置要項

測定値に対する考え方—以上のようにして計測されたカウント値は検出器直下にあるトレーサー量を近似的に示すものと考えられており、又後述するように、現在までのような定性的実験においてはこのような考えてさしつかえないようである。しかし、厳密にはカウント値は種々な要素を含んでおり、計数値の意味は複雑である。

そこで今、図-16に示すように厚 d の放射性砂層の表面から h の高さの中にある表面積 S のシンチレーターに入る放射線数を考えてみる。

* 砂表面の単位面から水中へ向って放出される放射線数 図-16において砂面上の一点 $0'$ を頂点とする円錐形の環要素の微小成分 $V \sin \theta' d\phi' \cdot V' d\theta' dV'$ から放出される放射線数 dI_0' は砂層の単位体積から毎秒放出される放射線数を $S_A = f(V, \theta', d')$ とすると

$$dI_0' = f(V, \theta', \phi') \ell'^2 \sin \theta' dV' d\theta' d\phi'$$

この内、砂面上 $0'$ 点での単位面積を通過するものの数は吸収係数を μ_s 、再生係数を B_s すると、

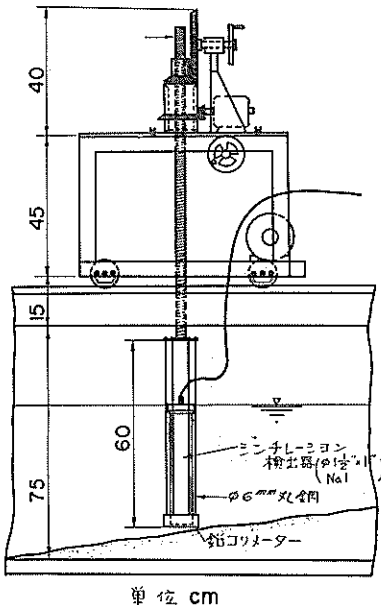
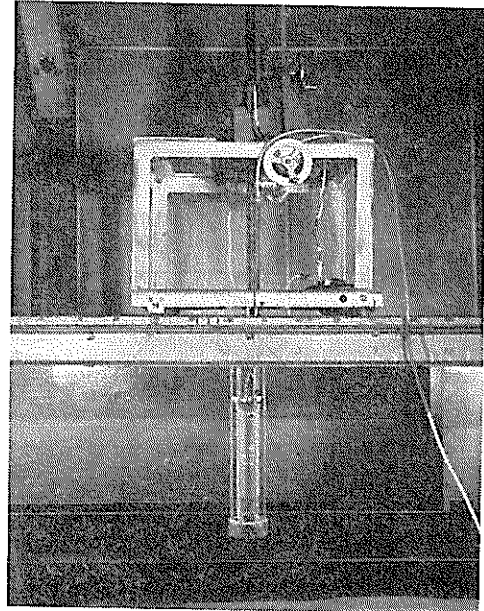


図-14 水路実験用の検出部



写-1 水路実験用検出部

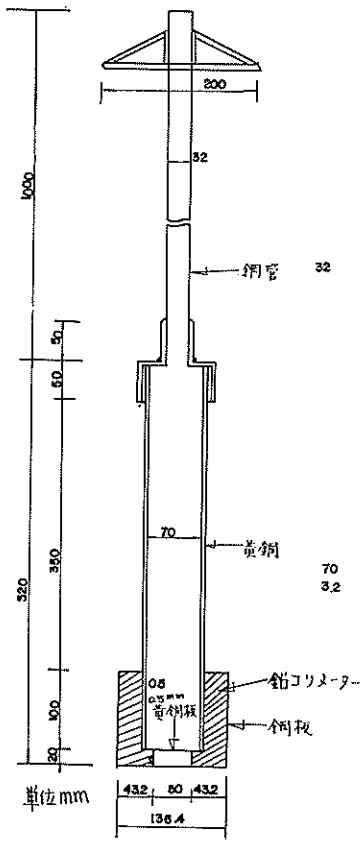
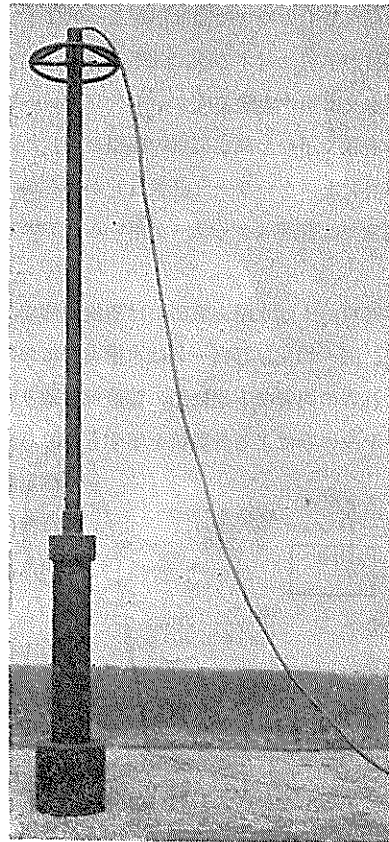


図-15 平面水槽用検出部



写-2 平面水槽用検出部

$$dI = f(\ell', \theta', \phi') \ell'^2 \sin \theta' \frac{\cos \theta'}{4\pi \ell'^2} B_s e^{-\mu_s \ell'} d\ell' d\theta' d\phi'$$

故に、この単位面積から水中へ向って放出される全放射線数 $F(r, \phi)$ は

$$F(r, \phi) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{d \cos \theta'}{r}} f(\ell', \theta', \phi') \sin \theta' \cos \theta' B_s e^{-\mu_s \ell'} d\ell' d\theta' d\phi' \quad (7)$$

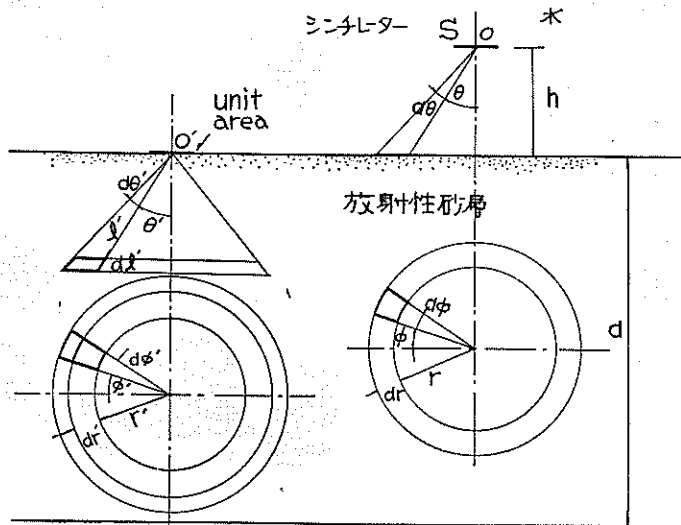


図-16

上式中で $f(\ell', \theta', \phi') = \text{constant}$ 即ち、トレーサーの自然砂中への混合濃度が均一だとすると

$$F(r, \phi) = \frac{S_A}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{d \cos \theta'} \sin \theta' \cos \theta' B_w e^{-\mu_w \ell'} d \ell' d \theta' \quad (8)$$

となり、 d が一定であれば $F(r, \phi)$ は砂面上何処でも一定値になる。

ガラス砂層が単位幅の帯状である場合には直角座標系を考へて微小成分は $dx'dy'$ 、点 $0'$ と微小成分との距離は $\sqrt{x'^2 + y'^2}$ と表わされる故、式 (7) は

$$F(x) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \int_0^d f(x', y') \frac{y'}{(x'^2 + y'^2)^{\frac{3}{2}}} B_w e^{-\mu_w \sqrt{x'^2 + y'^2}} dy' dx' \quad (9)$$

と書き換えられる。

* 水中へ放出された放射線中シンチレーターを通るものの数 砂面上の単位面積から毎秒 $F(r, \phi)$ 本の放射線が放出されるとすれば、砂面上の点 $0'$ にある微小面積 $r d\phi dr$ から出る放射線のうち、シンチレーターを通過するものの数は、水の吸収係数を μ_w 、再生係数を B_w として

$$dI = F(r, \phi) \frac{S \sqrt{r^2 + h^2}}{2\pi(r^2 + h^2)} B_w e^{-\mu_w \sqrt{r^2 + h^2}} r \cdot dr \cdot d\phi$$

故にシンチレーターに入る全放射線数は

$$I = \frac{Sh}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty F(r, \phi) \frac{r}{(r^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} B_w e^{-\mu_w \sqrt{r^2 + h^2}} dr \cdot d\phi \quad (10)$$

と表わされる。又、単位幅の帯状放射性砂層に対しては

$$I = \frac{Sh}{2\pi} \int_0^\infty F(x) \frac{1}{(x^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} B_w e^{-\mu_w \sqrt{x^2 + h^2}} dx \quad (11)$$

となる。

そこで、図-17の凡例に示すように水路床に5 cm厚に砂を敷き砂面上2 cmの水中にシンチレーション検出器をおいて、検出器の直下を通る砂面上の一直線の種々な位置に $^{51}\text{Cr} 200 \mu\text{c}$ をおいて各々の線源位置における計数値を計ると図-17の下側の曲線(特性曲線)の如くなる。曲線検出器直下に線源がある場合の計数値(C_0)を単位に採って各点の計数値(C)をそれに対する比で示してある。この曲線は又、均一濃度で単位幅、無限長の帯状線源の検出器直下の単位成分による計数値と、任意の位置にある単位成分による計数値の比を示すものと考えることが出来るから、この曲線の積分値は前述の(11)式と物理的に同様な意味をもつものである。図-17右上の曲線は下の実線を積分したもので、 $\int \frac{C}{C_0} dx$ と x の関係を示している。この曲線は理論的には極限値を持たない。しかし、検出器から線源が遠くなるとその計数値は自然計数に等しくなり、トレーサーを検出し得なくなるために実質的には極限値が存在すると考えてよい。このテストの場合には線源が80 cm以遠になると $R \cdot I$ は検知されず、検出器直下から ± 7 cm以内の線源による計数値が全計数値の90%以上を占めると言える。もしトレーサー濃度が高くなり、単位成分中の線源強度が強くなると、より遠くのトレーサーも検知されることになるであろうが、その全体に占める割合は極めて弱いもので、図-17に示した曲線は実質上変化しないと考えてよい。但し、使用する $R \cdot I$ の核種が異なるとそのエネルギー、従ってその吸収係数の相違のためにこれらの曲線も変化し、より高いエネルギーのものに対しては図-17の曲線は拡がる傾向があり、積分曲線はより緩やかな上昇曲線になるはずである。しかし、実験に使用した $^{51}\text{Cr} (0.32 \text{ MeV})$ $^{198}\text{Au} (0.412 \text{ MeV})$ についてはそのエネルギーの差は小さく、従って図-1に見るようにその吸収係数の差も小さいため、図-17に示す傾向にそれ程の差はない。又検出器下端にコリメーターを取りつけると方向特性曲線は尚一層シャープになり、従って検出器に近いトレーサーのみを有効に計測することが出来ることになる。

更に、砂による放射線の吸収効果の実測値を図-18に示した。図中の曲線①は線源と検出器を水中で一定距離

21 cm に保って、線源上に砂を積んでいった場合の再生係数を含んだ砂中の放射線の透過能即ち、式(9)中の $Be^{-\mu \cdot \sqrt{x^2+y^2}}$ に相当するものであり、曲線②は検出器を砂面上に密着し線源を砂中の種々な深さに埋めた場合の計数值即ち、式(9)の被積分函数に類似したものである。又曲線③は曲線②の積分値、即ち、式(9)の y に対する積分値に相当している。これ等の曲線はすべて ^{51}Cr 200 μc 線源によるものである。又この図には ^{51}Cr の水に対する透過能 $B_{wc}^{-\mu_{wc}x}$ も曲線④で示してあるがこの曲線に対してのみ図の横軸は水層の厚さと読み代えるものである。図-18に示したこれらの曲線に対しても図-17の場合に述べたトレーサー濃度及びトレーサーのエネルギーに対する曲線の傾向はそのまま通ずるであろう。又検出器と砂面との距離が遠くなると図の曲線②はより緩やかな勾配になり、従って積分曲線はゆるやかな上昇曲線になることが予想され、全計数中砂面近くの線源による計数値の占める割合が相対的に小さくなって来るであろう。

図-17に見たように、検出器による計数値のうちそのほとんどは検出器の極近傍、即ち、コリメーターが施されている場合にはおそらく検出器の下面の広さ程度

の位置にあるトレーサーによるものであることから投入直後のように一点に強い線源が固まっている場合を除き、カウント分布はトレーサー分布であると考えてほとんど誤まることはないであろうから、一般に検出器による砂面上での測定値から、砂の移動方向を推定してよいであろう。特に沖浜帯における実験のごとく、移動にあ

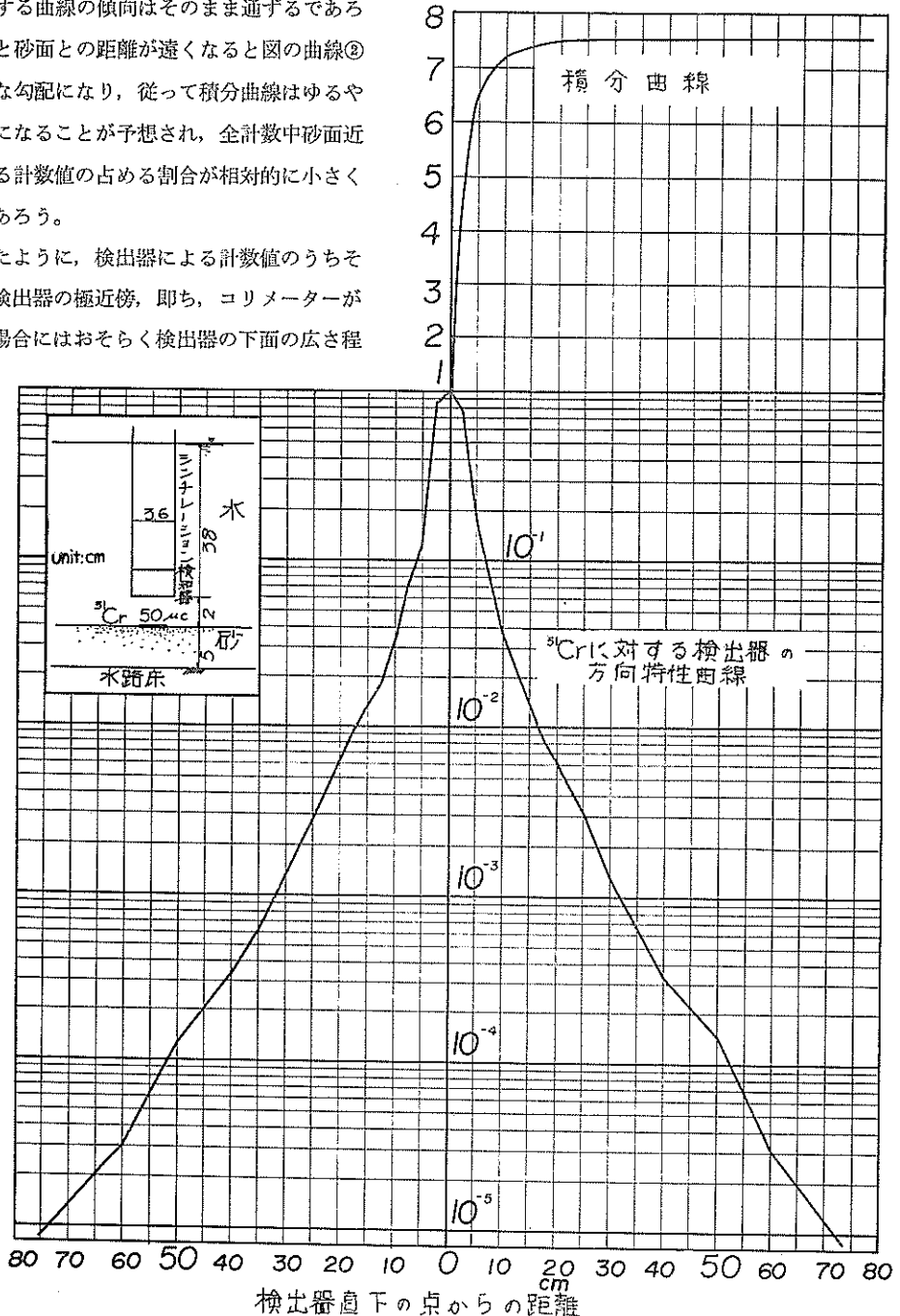


図-17 シンチレーションの検出器の方向特性

ずかる砂層の厚さがほぼ一定であり、しかも、その深さの方向にはトレーサーが均一に混合されることが予想される場合には砂面上でのカウント分布と砂中のトレーサー分布は高い精度で一致するであろうから、問題の定量的な取扱いもある程度可能となるであろう。しかしいづれにしても、カウント値の大半が検出器の極近傍のトレーサーによるものである以上、カウント値を決める重要な因子は移動砂層中のトレーサーの濃度と移動砂層の厚さであるのでR・Iトレーサーによって砂移動を定量的に取扱う場合には検知器による砂面上での平面的なカウント分布に加えて、サンプリングによる垂直トレーサー分布を明らかにすることが必要であろう。

7. 漂砂模型実験へのR・Iトレーサーの利用の実例

a. 水路における、沖浜帯での砂移動に関する実験

1961年から1962年にわたって、著者等は水平床において砂の移動限界並びに漂砂の方向と波の諸元、及び底質の関係について一連の実験を行った。この結果、或る底質に対して一定波高の波をかけ、その周期を次第に短かくしてゆくと、底質は次のような移動形式の段階を経てゆくことが知られた。即ち

- (i) — a. 初期移動；水底表面の比較的突出した粒子が岸向きに動き出す。
- b. 集団移動；水底面の第一層の砂のほとんどが岸向きに動き出す。
- c. リップルが発生する。
- (ii) 漂砂量が沖向きである。リップルの形は岸向きに傾むいている。

(iii) 漂砂量が岸向きになる。リップルの形はほぼ対称に近づく。

そしてこれらの各領域における砂の移動機構を明らかにするために、 ^{51}Cr を含むガラス砂をトレーサーとして各領域での個々の砂の運動を明らかにしようと試みた。

実験方法——この実験は、幅0.5m、高さ0.8m、長さ37m（後の実験からは41mに延長）の鋼製ガラス張りフラッター式造波水路を用いた。この水路の造波板から8mと14mの間を図-19に示すようにガラス板で仕切り、砂を5cm厚さに敷いて水深を砂面上40cmとして一定の波を当て、リップルが形成された後、リップルの一つ（リップルの

谷の線から上部)を ^{51}Cr を含むガラス砂と実験砂を1:4



図-19 実験水路断面図

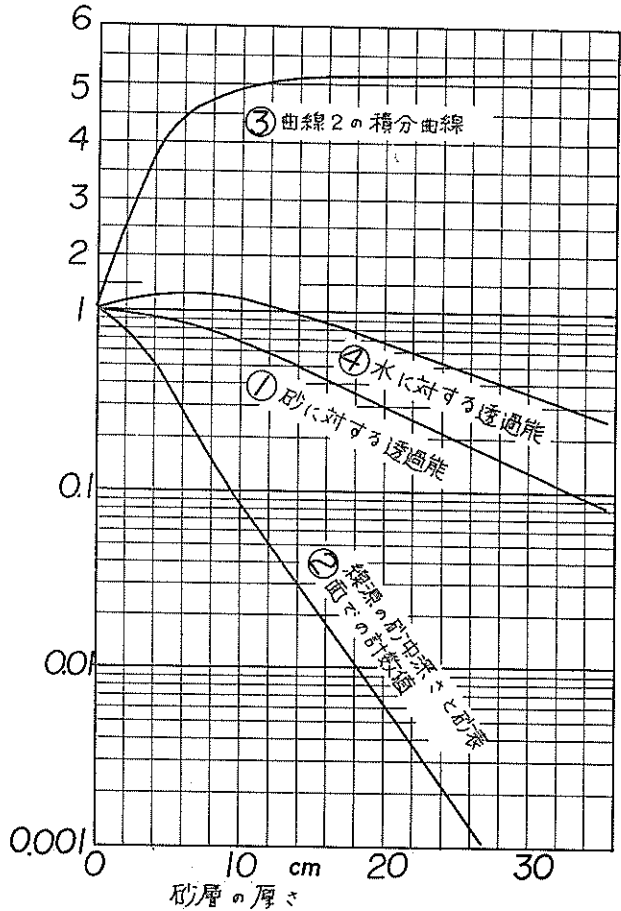


図-18 ^{51}Cr からの γ 線の砂による吸収

の割合で混合したものでおきかえ、その移動を調べた。ガラス砂の比放射能は、 $2 \sim 3 \mu\text{Ci/gr}$ 、比重は、2.65で使
 用したトレーサーの全量は $100 \sim 150 \mu\text{Ci}$ であった。ここでリップルの部分のみを置換えたのは、最初にガラス面
 に接した部分の砂を砂層の深さいっぱい着色砂で柱状におき代えたところ、一旦リップルが形成されてしま
 うと、移動にあずかるのはリップルの谷より上部の砂のみであって、それより底の砂は全然動かないことがわ
 かったためである。トレーサーの分布は図-14に示した方法で測定したが、この実験の場合は図の検出器下端に示
 した鉛コリメーターは取りつけてない。又実験中は検出器下端がリップルの山の頂から 2.5 cm の位置にあるよ
 うに保って各リップルの山の上で計測した。

実験結果—— この実験によって水平床における砂移動
 はリップルの進行に伴って掃流状に行われるものと、波に
 よって攪乱され浮游状に行われるものがあり、前者は常
 に岸向きの漂砂量を生じ、後者は主として沖向きの漂砂量
 を生じて、この両者の強弱関係によって、正味の漂砂量が
 岸向き、或いは沖向きになることを明らかにしたが、これ
 についてはすでに港研報告 No.1「水平床における砂移動
 に関する究研」に報告済みである。

カウント分布から漂砂量求める試み—— 水路水平床に
 関する実験の如く、巨視的に見て漂砂現象に場所的著し
 い相異がなく、何処でもほぼ同じ動きが見られる場合には、
 カウント分布から近似的に漂砂量を求めることが出来る。
 即ち、今

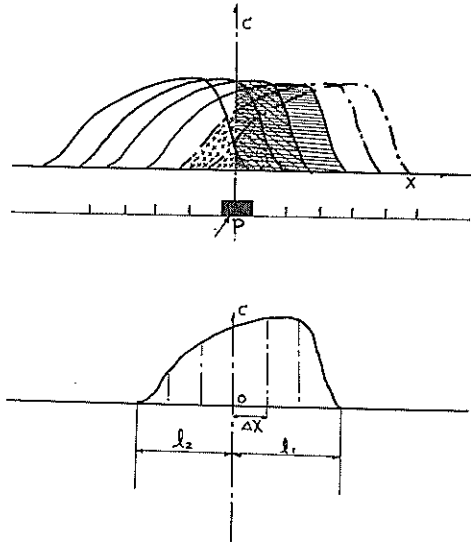


図-20

a) 漂砂現象には場所的に著しい相異がない。

b) トレーサ

ーは或る位
 置で移動に
 あずかり得
 る総べての
 砂を代表し
 ている。

c) カウント

分布は即ち
 トレーサー
 分布を考え
 ることが出
 来る

とすれば、図-
 20のPに投入さ
 れたトレーサー
 が投入後 t 分後
 に同図(b)の如
 く分布したとす

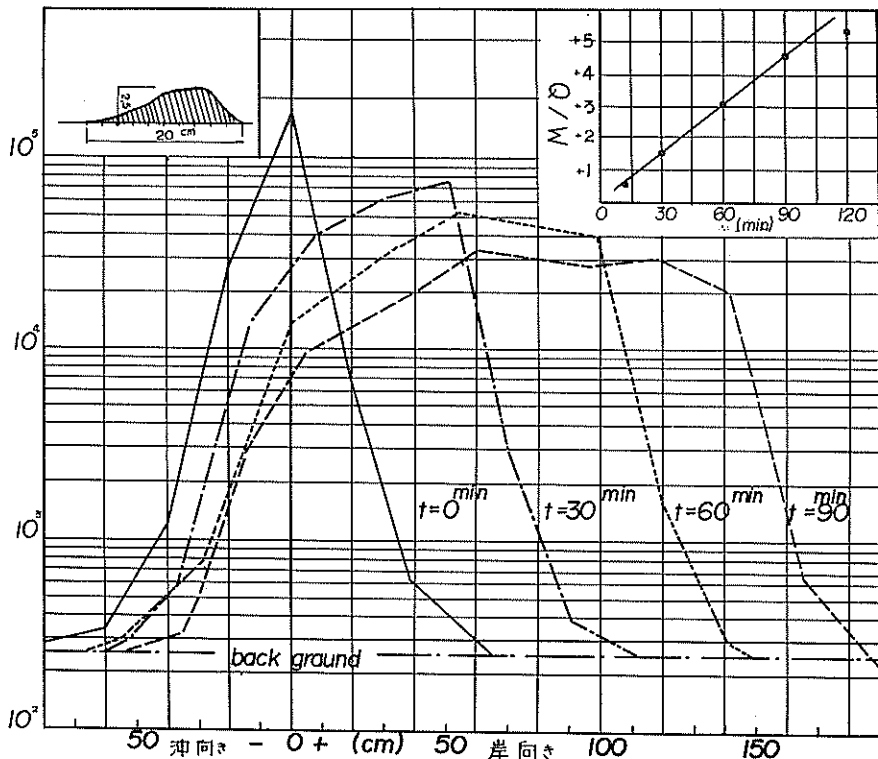


図-21 波高 19.0 cm 周期 2.5 sec の場合実験例

ると、仮定したところによって、水路中の他の位置に投入されたトレーサーもこれと全く同じ分布をするものと考えられるから、トレーサーが代表している砂の量をW、或る位置でのカウントを $C=f(x)$ 、としてt分間に断面 a-a' を通る正味の漂砂量Qは

$$Q = \frac{W}{C} \left[\int_0^{\ell_1} c dx + \int_{\Delta x}^{\ell_1} c dx + \dots + \int_{n\Delta x}^{\ell_1} c dx - \int_{\Delta x}^{\ell_2} c dx - \int_{2\Delta x}^{\ell_2} c dx \dots \right] \quad (10)$$

$$\text{但し } C = \int_{\ell_2}^{\ell_1} c dx$$

の如く表わされるのである。Wの値はもしリップルが出来ず砂が完全に掃流状態に移動する場合に移動可能な砂層の厚さdを求めておきその厚さまでトレーサーでおき変えておけば、水路の断面 a

n	C _n Δx	C _{n-1} Δx	$\frac{C_n \times C_{n-1}}{2}$	$\frac{1}{\Delta x} \int C dx$	
				自然計数	
	cpm	cpm	cpm	-5425	+1500
				-6925	
3	250	320	285		285
2	320	1500	910		1195
1	1500	7000	4250		5445
1	7000	13000	10000	185665	
2	13000	20000	16500	175665	
3	20000	33000	26500	159165	
4	33000	29000	31000	132665	
5	29000	28000	28500	101665	
6	28000	30000	29000	73165	
7	30000	21000	25500	44165	
8	21000	1400	17500	18665	
9	1400	340	870	1165	
10	340	250	295	295	
			+191110	+892280	
自然計数			-3250	-13750	
			+187860	+878530	

$$W = 391/17 = 23 \text{ cm per cm}$$

$$C = \int_{\ell_2}^{\ell_1} c dx = 187860$$

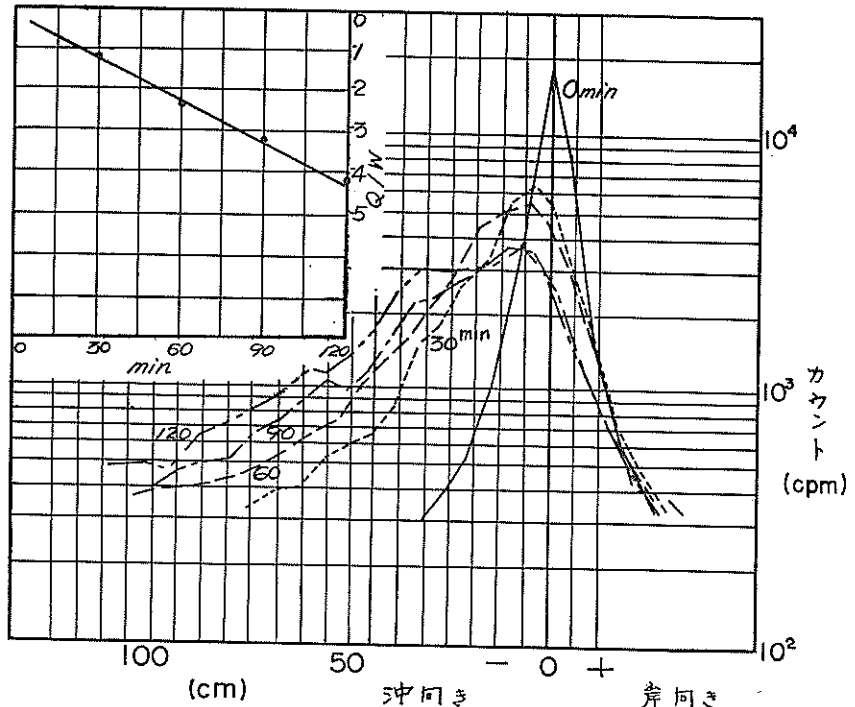
$$\sum_{i=0}^n \int_{i\Delta x}^{(i+1)\Delta x} c dx - \sum_{i=1}^n \int_{(i-1)\Delta x}^{i\Delta x} c dx = 878530 - 5425 = 873105$$

$$\frac{Q}{W} = \frac{1}{C} (\sum \int c dx - \sum \int c dx)$$

$$\frac{Q}{23} = \frac{873105}{187860} = 4.65$$

表一 漂砂量の計算例 (波高 19.0 cm, 周期 2.5 sec の場合)

a-a' の幅bとして $W = d \cdot b \cdot \Delta x$ であり、又、リップルが出来る場合には、リップルの波長を Δx にとって、リップルの谷から上部の砂量をWとする。尚トレーサー投入直後は、置換部分の表面状態、砂のしまり具合等が他の部分と異っているために投入後 t_1, t_2, t_3, \dots 等について各々 Q_1, Q_2, Q_3, \dots を求めておき、Qとtとの関係を図示して得られた直線の勾配として単位時間の漂砂量を求めるべきであろう。



図一 22 波高 8.5 cm, 周期 1.5 sec の場合のカウント分布と漂砂量の例

図—20(a)は波高 19.0 cm, 周期 2.5 sec, 粒径 2.0~1.0 mm, 水深 30 cm の場合に対するカウント分布図を示すが、この場合のリップル形状は同図左上部に示した。この図を用いてトレーサー投入後90分間に断面 a—a'を通る漂砂量を求める場合の計算過程を表—6に示した。この場合 Δx はリップルの波長 20 cm にとり W は 23 cm^3/cm , 水路幅は 17 cm であった。これと同様にして $t=30 \text{ min}$, 60 min , に対する Q_{30} , Q_{60} をも各々求めて Q と t との関係を示すと図—20(b)の如くなり、この直線の勾配として漂砂量 1.2 $\text{cm}^3/\text{cm-min}$ が求められる。図—21(a)(b)は波高 8.5 cm, 周期 1.5 sec, 粒径 0.71~0.35 mm, 水深 30 cm の場合に対するカウント分布図と、前述の方法で求めた Q と t の関係を示すもので、この場合は $\Delta x=6 \text{ cm}$, $W=4.8 \text{ cm}^3/\text{cm}$ にとり計算された漂砂量は 0.77 $\text{cm}^3/\text{cm-min}$ であった。

b. 碎波帯における砂移動に関する実験

碎波帯における砂移動は沖浜帯に比べると著しく激い、又その機構も全然異ったものである。前述した実験によって沖浜帯における砂移動は普通リップルを伴って起り、その移動の深さはリップルの深さまでに止まることを示した。しかるに碎波帯では碎波とそれに伴う射流状の流れが砂移動の主要な外力であって、普通リップルの形成は見られない。そこで、このような碎波による砂移動の機構並びに、勾配砂浜の断面形状の変化に伴う砂の動きを明らかにするために、1963年、R・Iを利用した実験を行った。

実験方法 実験は前の例と同じく、鋼製ガラス張りフラッター式造波水路で行った。水路の一端に $1/10$ 勾配の勾配板をおき、水路のガラス面から 18 cm のところに鋼板壁をおいて水路をその長手方向に仕切り、この 18 cm 幅の部分にだけ、実験中床板面が露出しないように砂を敷いた。水深は沖浜の水平部分で砂面上 40 cm とした。実験波々高は、沖浜砂面(水深 40 cm)上で常に 10 cm とし、周期は 1.5 sec と 4.0 sec の二種とした。砂の粒径は 1.0~0.5 mm と 0.5 mm~0.25 の二種を用いた。先ず、或粒径の砂浜に或一定な波(例えば波高 10 cm 周期 1.5 cm)を当て平衡勾配を作った後、この平衡勾配に周期の異った別の波(例えば波高 10 cm, 周期 4.0 sec)をかけたのであるが、これに先立って後の波の碎波点と思われる地点と碎波帯に R・I トレーサーを投入しておき、波によるその分布と海底形状の変化を測定した。トレーサーとしては ^{51}Cr を含むガラス砂と ^{198}Au を吸着した自然砂を用いたが、その比放射能は 1~2 $\mu\text{c}/\text{gr}$ であった。このトレーサーと自然砂を 1:5 程度の割合で混合し、この混合砂を碎波帯附近では水路の幅方向に 10 cm, 長手方向に 2 cm, 深さ 10 cm 程度の実験砂と置換え、沖浜では一つのリップルの内、幅 2 cm 程度の部分をリップルの波長にわたって実験砂と置換えた。尚トレーサー分布の測定は図—14に示したシンチレーション検出器でその下端が砂面上 2 cm になるようにして測定し、断面変化はレベルによって計った。

実験結果 実験結果については、⁷⁾ 港研資料 No. 5「港湾建設計画に関連した漂砂の研究」138—140頁に報告済みである。

c. 砂浜上に立てられた直立壁前面での洗掘に関する実験における利用

著者等は1963年から1964年にかけて、現地での洗掘観測を行うと同時に、砂浜海岸に立てられた直立壁の前面での洗掘についての水路実験を行っているが、その詳細については後刻報告する予定である。この実験によると、実験室での壁体前面の洗掘の様相は大別して二つに分けられるようである。その一つは、前面が波によって徐々に掘られていって或水深に達して安定し、それ以後は掘られなくなる型のものであり、今一つは、波によって一旦は前面が急激に洗掘されるが、更に波をかけておくと、前面が或る水深にまで掘られたところで逆に埋戻される場合である。このような二つの異った様相は勿論底質、壁体の位置、波の性質等の相異によって引き起こるのであろうが、その問題については後報で検討を加えることとして、本文中では、これら二つのケースにおける砂の動きの相異を知るために R・I トレーサーを使用したので、その一例を示すに止める。

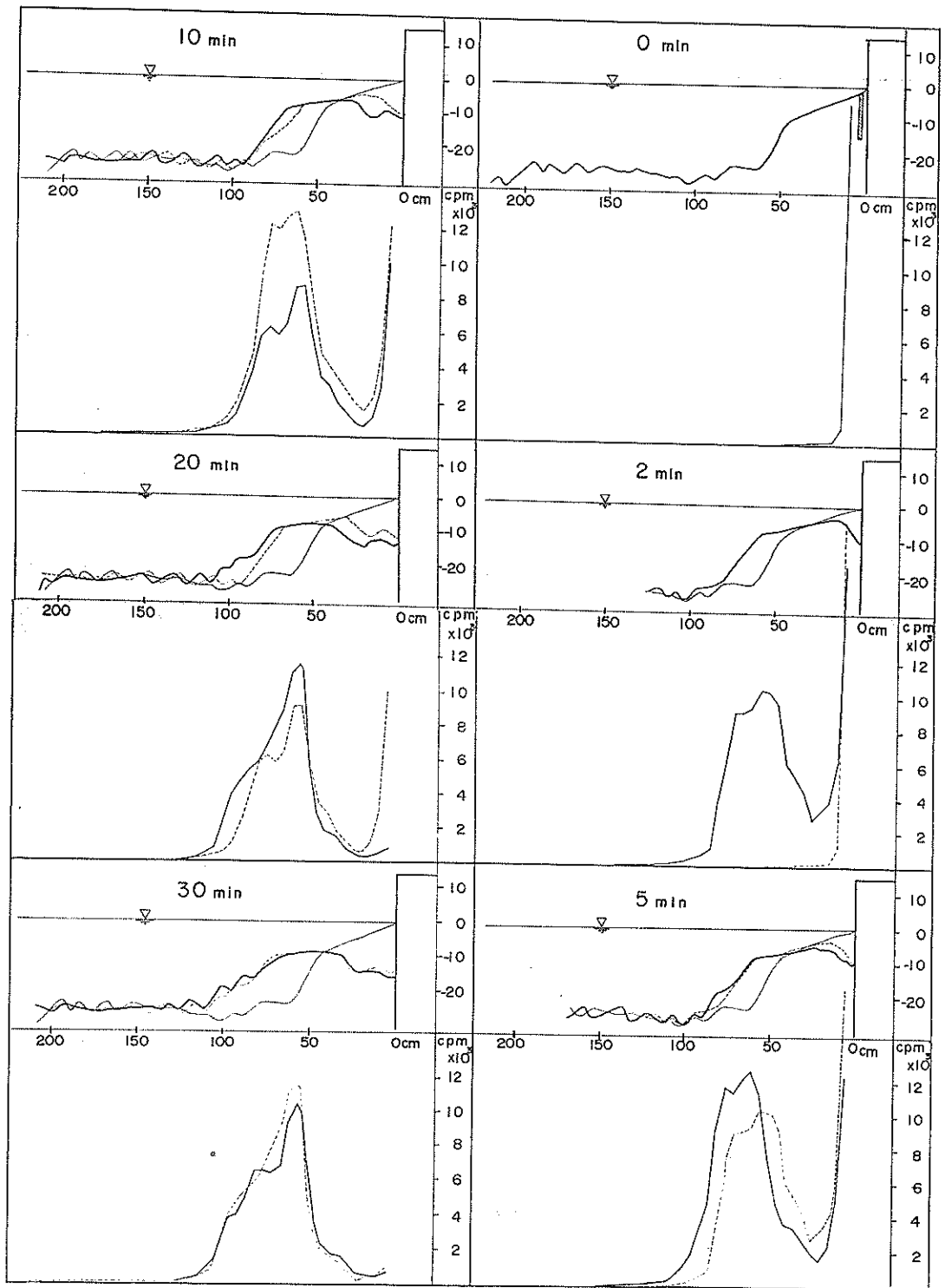


図-23(a) 砂浜勾配上に立てられた直立壁前面での洗掘過程とカウント分布の変化

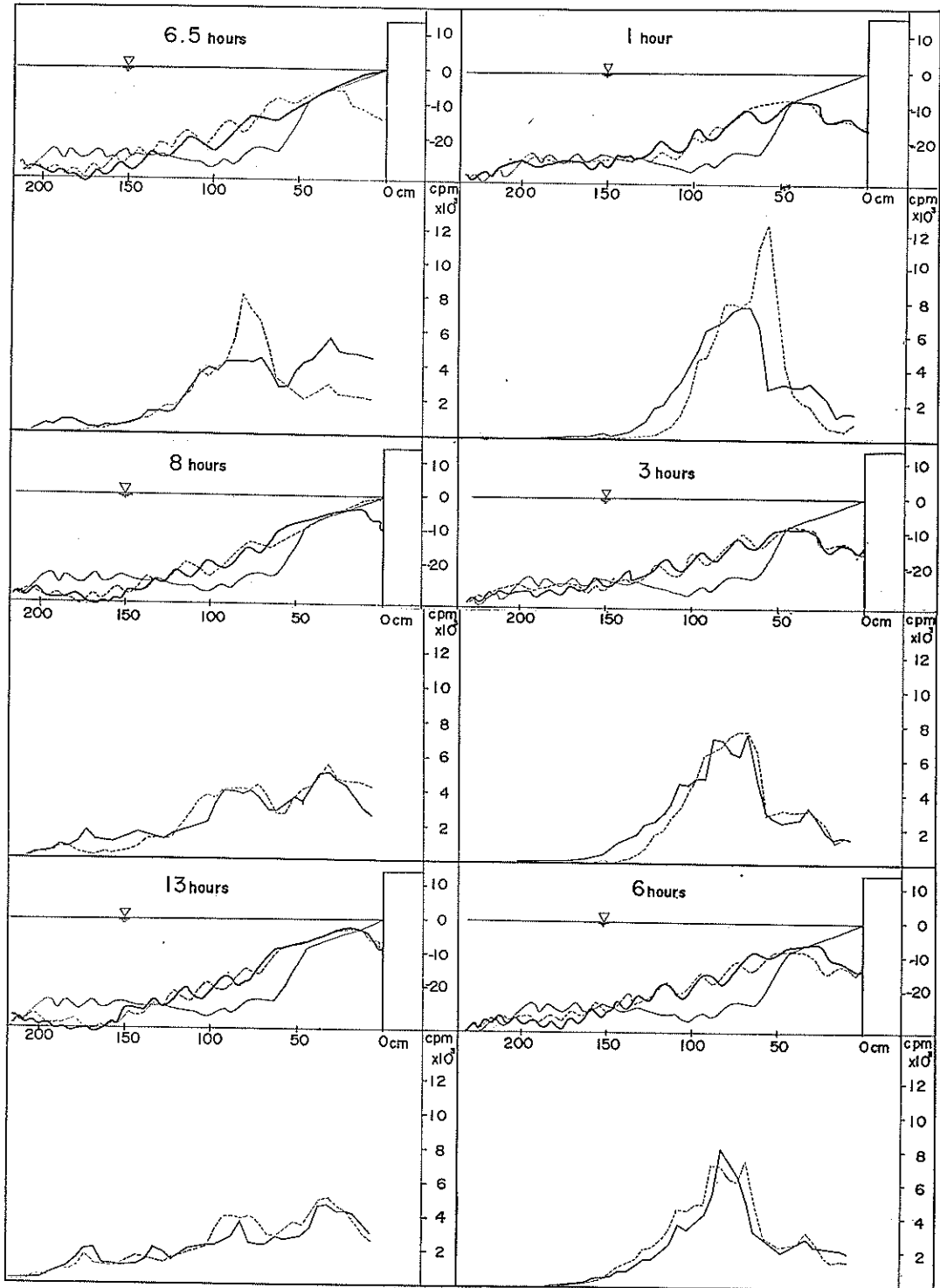


図-23(b) 砂浜に立てられた直立壁前面での洗掘過程とカウント分布の変化

実験方法 この実験も前2例と同じ水路で行つ。水路端に木製の $1/10$ 勾配板をおき、水路をその長手方向に各々 17 cm 幅宛に 3 等分し、水路ガラス面に近い二つの区割に砂を敷いて或一定な波をかけ、平衡勾配を作つた。この際、砂の厚さは実験中底が露出しないように充分厚くし、水深は常に沖浜平坦部で 40 cm とした。平衡勾配が出来ると、汀線附近の或る位置に直立壁を設置し、その前面に $\phi=2$ cm、長さ 10~15 cm の円柱状にトレーサーを投入して平衡勾配を造る際にかけたと同一の波を作用させ、断面変化をカウント分布を測定した。カウント分布の測定には前二例と同様にシンチレーション検出器下端が砂面上 2 cm の点にあるように保つた。使用したトレーサーは ^{51}Cr を含むガラス砂と ^{198}Au を吸着した砂で、その比放射能は 1~2 $\mu c/gr$ 程度である。

実験結果 図-22は埋戻しが著しい場合の実験結果の一例を示すものであるが、この場合用いた実験砂の粒径は 1.0~0.5 mm、実験波沖波々高は 8.7 cm、周期は 3.0 sec であり、壁体は自然状態での汀線上に設置した。トレーサーは直立壁の前面 5 cm 沖側に径 2 cm の円柱形に砂面下 14 cm の点まで挿入してある。沖波々高 8.7 cm、周期 3.0 sec に対する直立壁のないときの海底形状は図-22(a) にしめしてある。波を分かつた後、壁体前面は砕波後の射流状の水が壁体当って作る渦と壁体前面での水塊の落下によって約 8 cm 近く掘られ、その大半は自然状態での砕波点附近に推積する。その後壁前面での洗掘は徐々に進んでゆき壁前の水深を増すと同時に洗掘部分の断面積も増加してゆき、20分後には壁前面水深が 14 cm に達し、壁前が 45 cm、沖側まで拡がっている。それと同時に壁前面で洗掘された砂による前記の推積部分が沖向きに伸び、その沖側勾配が徐々に緩やかになる。しかしこの部分の沖側ではほとんど断面変化は見られない。更に時間が経過して 1~3 時間までの間は壁前面の洗掘部分の断面には著しい変化は見られないが、唯、推積部分の沖側面の勾配が緩やかになり、大きいリップル状の凹凸が生じ、推積部分より沖側の平坦に近い部分に多少の洗掘が見られる。トレーサー分布もこのような断面変化に伴って最高カウントの位置はあまり変化しないが分布が徐々に沖向きに尾を引くと共に、壁体に近い部分でも多少岸向きにも伸びて来た。その後 6 時間頃まで、断面、カウント分布共に大きい変化はないが、多少壁前面の洗掘部分が埋戻され、そこにカウント分布の小さい山が明瞭に現われ始めた。ところが、波を始めて 6 時間以後 6.5 時間頃までの間に、実に急激な埋戻しが起る。即ち、洗掘部分のすぐ沖側にあった凸部の沖側斜面が一樣に侵蝕され、その砂によって洗掘部分が埋められて壁前水深がほぼ零になると共に、カウント分布のピークが完全に

二つに分れ壁体に近い山がむしろ高くなって来た。更に時間が経過すると壁体前面から 12~13 cm までの間が再び洗掘され、壁前面の水深が約に 10 cm 達し以後 13 時間に至るまでほとんど変化しない。このように急激に埋戻しが起る原因は判然とし

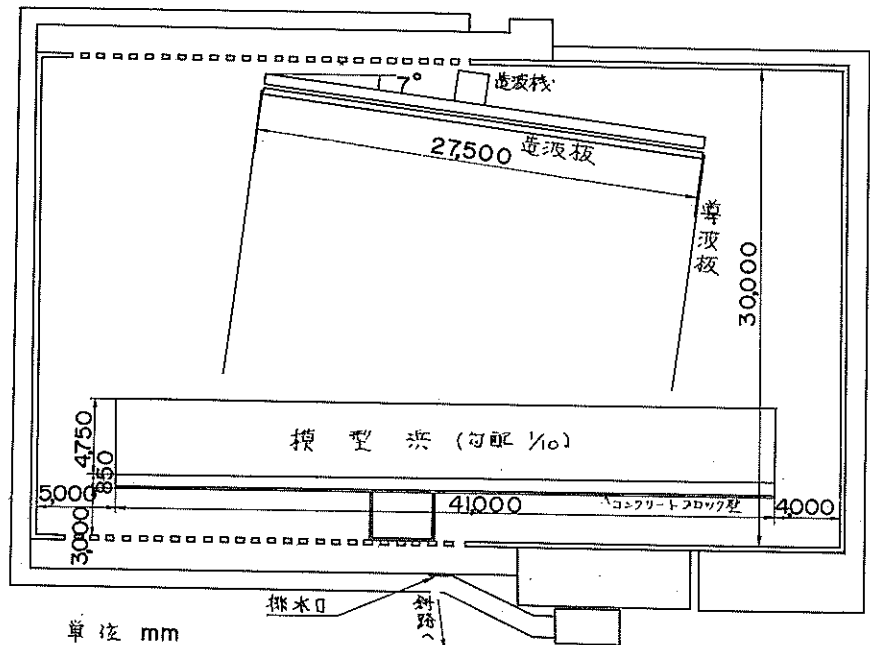


図-24 平面水槽平面図

ないし、その検討は後報にゆずるとしても、この実験で壁前面を埋戻す砂は、そのほとんどが壁前で洗掘されてすこし沖側に推積していた砂であって、沖浜から運ばれて来た砂ではないであろうこと、並びに、壁前面で洗掘された砂が沖浜へ運び去られることはないであろうことが理解される。

d 平面模型実験への利用

著者等は1963年より鹿島港の漂砂、特に港口附近の防波堤の配置と港口より侵入する漂砂の関係についての模型実験を行おうとしている。ところが移動床に関する問題については相似則が成立せず模型実験の方法も確立さ

れていないため、実験を有効に行うためには実験の目的に応じて模型での現象と現地でのそれが定性的により近いものになるように、種々な便法を考えて行わざるを得ない現状である。そこで、この実験においては現在までに行った多くの R・I による現地観測から得られたトレーサーの分布状態、即ち砂移動の激しさの程度と波の諸元及び底質粒径の関係を基にして、現地での設計波に対する港口附近での砂移動の様相を知り、模型中で任意の波に対

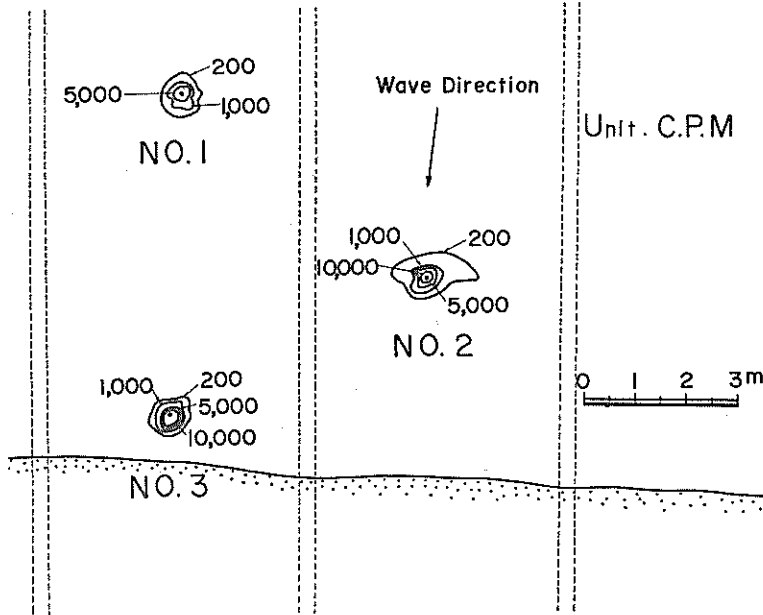


図-25(a)

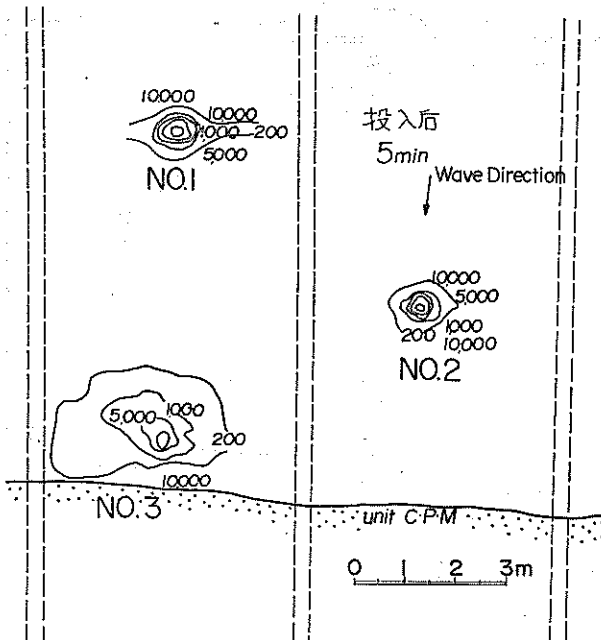


図-25(b)

する砂移動の様相が前述した現地でのそれに類似する位置に港口をおくことにしようと思っている。そのために R・I トレーサーを用いて防波堤をおかない自然状態での模型浜の砂の動きの状態を種々の波に対して調べた。本文では平面水槽における R・I トレーサーの利用例としてその一例を述べる。

実験方法 この実験は 図-24 に示す 50×30m、深さ0.8mのコンクリート平面水槽で行った。この水槽の長辺にそって水槽壁から5mの位置に長さ41m高さ0.8mのコンクリートブロック壁を立て、それを背にして水槽の中央側へ1/10勾配のモルタル製の斜面をつくり、その上に約10cm厚に砂を敷いて砂浜模型とした。実験砂の平均粒径は0.22mm比重は2.65である。この砂浜に造波板の

長さが27.5mのプランジャー型造波機によって沖浜平坦部の平均波高10cm, 周期1.4 secの波を最初の汀線に対して7.8°の角度から当て(即ち, 汀線と造波面延長のなす角が7.8°) コンクリート面が露出した部分に砂を補い, 且つ汀線が最初の方向を保つように波のエネルギーの汀線に平行方向成分上手側で砂を補給しつつ5時間波を当てた。その後図-24に示す水深40cmの沖波平坦部31cmの勾配部, 14cmの沿岸砂洲内側部分に100 μ c (100g) 宛の¹⁹⁸Auを吸着したトレーサーを投入した。投入は, 投入地点にパイプを立て, その中へトレーサーを落とし, トレーサーが分散せず一点にかたまってしまうように行った。投入後同様な波を当て, カウント分布を計った。この場合, カウント測定には図-15に示した検出器を用いた。

実験結果 図-25(a)(b)は実験結果の一例を示すもので, 前者は投入直後のカウント分布, 後者は投入後35分波を当てた後のカウント分布である。この図でカウント値は自然計数を差引いて後, 減衰に対する補正を行って投入直後のカウント値に換算した値を示した。この分布を見ると一番浅い砕波帯内ではトレーサーが多少沖向きに分散しつつ沿岸砂洲の谷にそって波のエネルギーの汀線に平行な成分の方向に流される傾向を示しており, 勿論砂の動きも一番激しい。水深31cmの勾配部に投入されたものは, 等カウント線の分布が岸側に密, 沖側に疎になることから多少波向きにおされる傾向はあるが, それより汀線に平行な方向に分散される傾向の方が目立つ。沖の平坦部でもこれに近い傾向はあるが波によって岸向きにおされる傾向は極めて弱い。これら沖側の二点でのカウント分布は現地でのカウント分布の分類中(港研資料No.5 147頁) 第四群, あるいは幸うじて第三群に入るもので, 砂の動きの状態は砂の移動が工学的にほとんど問題にならない状態であろうと思われる。

8. 結びに

以上の漂砂の模型実験におけるR・Iトレーサーの利用について述べて来たわけであるが, これらによって漂砂の現象を観察し, 現象に対する考え方への確証を得るという点でトレーサー実験が極めて有効であり, 且つ, 漂砂現象に対するトレーサーとしてR・Iトレーサーが他の螢光砂, 着色砂等と比べると測定上でも, 自然砂とトレーサーの現象の一致という点でも断然優れているということが理解出来るであろう。極言すれば, 漂砂現象に対する研究調査の一面はR・Iトレーサーの利用によって一層完全な形で行い得るようになったとも言えるのである。

R・Iトレーサーによる砂面上でのカウント値の平面的分布と砂中のトレーサー分布の一致については, その間に, 水や砂による放射線吸収とか, 測定の幾何学的条件とかのかなり複雑な因子が介在しており未だ多くの問題点を残してはいるが, 本文中にも述べた如く問題が定性的である場合には, 一般に砂表面でのカウント分布から砂の平面的移動をおしはかることが出来るし, 又沖浜帯における実験の如く, 移動が砂面近くにかざられている場合には, 現段階でも砂面でのカウント分布から砂移動の定量的取扱いも可能であろう。更に将来, 漂砂の研究調査の対象は現象の定量的問題に向うべきであり, その手段としてR・Iは未だ多大な可能性を残している。従って今後, R・Iの定量的問題への利用の方法の開発に努めねばならないと考えている。

最後に, R・Iトレーサーの実験室における利用においては, その取扱いに重大な過失のないかぎり実験者及びその周辺に居住する人に対して放射線障害のおこる可能性はほとんどないことは本文中にも述べた通りである。

参考文献

- 1) N. E. Taney; Laboratory application of radioisotopic tracers to follow beach sediments, Proc. of 8th Conf, on Coastal Eng. 1962
- 2) 佐藤昭二, 田中則男; 沖浜帯における砂移動について 港研報告 No.1 1963
- 3) 日本放射性同位元素協会編: アイソトープ便覧 丸善

- 4) 木村健次郎編：放射線データブック 地人書館
- 5) Allon Pattison and others; The Formulation and Operation of Field Experiments Using Radio-active Isotope for Tracing Silt Movement 1961.
- 6) 本間仁, 石原藤次郎, 応用水理学 中 I P.53
- 7) 佐藤昭二：港湾建設計画に関連した漂砂の研究 港研資料 No. 5 1963

港湾技研資料 No.13

1964年8月

編集兼発行者 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市川間162

印 刷 所 柿野屋印刷所
横浜市鶴見区鶴見町394