

# 講 座

## 放射性同位元素と土木工学 (I)

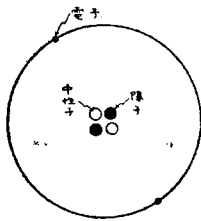
理学博士 四手井 綱 彦\*

工学博士 岩 井 重 久\*\*

### 1. 放射性同位元素

(1) 同位元素 物質を構成している原子は太陽系のような構造を持つており、太陽に相当する原子核を中心として、ちょうど遊星と同じように、電子がそれぞれ定まった軌道上を運動している。原子核では、電気量  $+e$  ( $e=4.8 \times 10^{-10}$  静電単位) の正電気を持つ陽子が  $Z$  個と、電気を持たない中性子  $N$  個とが、直径  $10^{-12}$ cm 程度の空間中に密に結合しているが、陽子、中性子各 1 個の質量はほとんど等しく、原子単位 (質量の単位で、1 原子単位は  $1.6603 \times 10^{-24}$ g) で測るとどちらも 1 にきわめて近い値を持つている。この原子核のまわりで直径  $10^{-8}$ cm 程度の空間内を運動している電子はやはり  $Z$  個あり、それぞれが  $-e$  の負電気を持つているので、原子全体としては電氣的に中性である。電子の質量は陽子や中性子にくらべるとずっと小さいから、原子の質量はほとんど原子核の質量で定まっている。従つて、 $(Z+N)$  原子単位にきわめて近い値となる原子核質量を指示するものとして、整数  $(Z+N =)A$  を質量数と名づけ、原子番号  $Z$  とともに、原子特性を示すのに用いる。例えば普通のヘリウムは 2 個

図-1  ${}^4_2\text{He}$  原子



の陽子と 2 個の中性子とからなる原子核を持つから、原子番号  $Z=2$ 、質量数  $A=4$  である (図-1)。しかし一定の  $Z$  に対して、 $N$  はいくつもの値をとることができる。例えば、 $Z=8$  の酸素は  $N=8$  のもの以外に、 $N=6, 7, 9, 10, 11$  と合計 6 種類の組合せをとらうが、このうち天然には  $N=8, 9, 10$  従つて  $A=16, 17, 18$  の 3 種類が存在する。化学の領域では、この 3 種の天然酸素の混合物の質量を 16 と定めているが、物理学では厳密に  $N=8$  の酸素の質量を 16 と定め、これを単位として質量を測つているので、両者の間には 0.027% の違いがある。

これらの酸素のように  $Z$  が等しくて  $N$  が相異なる一

\* 京都大学教授，工学部応用物理学教室

\*\* 京都大学教授，工学部土木工学教室，正員

群の原子核を同位元素 (Isotope) と呼び、個々の原子\*を区別するためには、 ${}_{8}\text{O}^{16}$ 、 ${}_{8}\text{O}^{17}$ 、 ${}_{8}\text{O}^{18}$  のように原子番号  $Z$  を左下に、質量数  $A$  を右肩につけるが、 $Z$  は省略することが多い。一般元素の化学的性質は軌道電子の数  $Z$ 、従つて原子核中の陽子数  $Z$  によつて定まるから、同じ  $Z$  を持つ同位元素の化学的性質はほとんど同じで、多孔質の壁を通しての拡散とか、融点等でわずかに異なつた性質を示すに過ぎず、これらが混つているときに分離するのは一般に困難である。

自然界に存在する原子は 92 種と考えられていたが、現在は 100 数種が知られており、その後の同位元素の発見、さらにその人工的製造によつて、現在までに発見されている原子の種類中安定なものが 280 ならず、不安定なものを加えると 1000 以上に達している。

(2) 放射性同位元素 陽子と中性子とが集まつて原子核を形成しうるためには  $(N/Z)$  の値に一定の制限がある。この  $(N/Z)$  値は、小さい原子核では 1 であるが、 $Z$  が大きくなるにつれて大きくなり、 $\text{Pb}(Z=82)$  では 1.5 程度になる。 $(N/Z)$  値がこの範囲からそれているような原子核は不安定で、 $(N/Z)$  をこの範囲に持つてこようとして核内の中性子が陽子になるか、陽子が中性子になり、余分になつた陰電子または陽電子を外へ放出する ( $\beta$  崩壊)。また特に  $(Z>82)$  の原子で  $Z$  が多くなりすぎると、2 個の陽子と 2 個の中性子の塊りである  $\alpha$  粒子 ( ${}^4_2\text{He}^+$ ) を出して  $(N/Z)$  の比を上げ、安定になろうとする ( $\alpha$  崩壊)。こうして  $\alpha$  または  $\beta$  崩壊をした後の原子核には、ただちに基底状態とはならず、それより少しエネルギーの高い励起状態とどまるものもあり、その場合には一般にさらに  $r$  線の形で余分のエネルギーを放出して基底状態に落着く ( $r$  崩壊)。その他、割合にまれな  $K$  電子捕獲といわれる崩壊型を含めて、この 3 種の放射線を出す元

\* 同位元素という語は、 $Z$  が等しく  $A$  の異なる種々の原子核の全体を指す場合と、その一つ一つの原子核を区別して指す場合とがある。この曖昧さを避けるために、最近前者に対して *Isotopes*、後者に対して *Nuclide* という語が用いられることがある。

素を放射性同位元素と総称する。天然に存在する ( $Z > 83$ ) の元素は 1 回の崩壊では安定せず、続けて何回も放射線を出し、アクチニウム、ウラニウム、トリウムの 3 種の崩壊系列のうちのどれかをたどりながら、最後に ( $Z=82$ ) の Pb の同位元素となつてやつと落着く。 ( $Z < 81$ ) の天然同位元素はほとんど非放射性であつて、わずかに  ${}_{19}\text{K}^{40}$ ,  ${}_{37}\text{Rb}^{87}$ ,  ${}_{62}\text{Sm}^{152}$  等が放射性を示すにすぎない。原子物理学が発展するとともに安定な非放射性の元素を人工的に放射性同位元素に変える方法が見出され、特に原子炉が発明されて以来実に多種多様な人工放射性同位元素が大量に製造されるようになった。

原子核の自然崩壊ではないが、核が行う原子核反応のうちで特に重要なものとして原子核分裂を挙げねばならない。  $Z$  の大きな原子核は非常に不安定で、そのまま放置しておいても前述の系列をたどつて崩壊してゆくが、特に  ${}_{92}\text{U}^{235}$  や  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$  などは、中性子を 1 個つかまえると原子核がほとんど真二つに分裂する。この現象を原子核分裂と称し、このときに分れた破片の原子核はやはり放射性で、分裂の仕方によつて多種多様な放射性同位元素ができる。核分裂に際しては莫大なエネルギーが放出されるので、これを利用して原子力発電を行つたり、原子爆弾を作つたりする。

(3) 放射性同位元素の製造法 1919 年に E. Rutherford が軽元素に  $\alpha$  線をあてると放射性同位元素となることを発見したが、その後 E. Fermi により中性子が衝撃する方法が発見され、現在はほとんどこれによつて同位元素を作つている。大量に製造するための装置としてサイクロトロンや原子炉等がある。

サイクロトロンは陽子または重陽子 ( ${}^2\text{H}^+$  の原子核) を加速する装置で、種々の安定同位元素をこの高速粒子でたたいて放射性同位元素に変えたり、あるいは  ${}^1\text{H}^+$ ,  ${}^9\text{Be}^+$  等をたたいて出てくる中性子を使つて放射性同位元素を作る。

原子炉は、1942 年に完成されたもので、非常に強力な中性子線を出すから、現在放射性同位元素の大部分はこの装置で中性子核反応を利用して作られている。その構造や作用については省略するが、種々の質量数を持つた同位元素の混合物を作り、これらは分離しなければならぬという欠点にもかかわらず、量産しうること、特に  $\text{U}^{235}$  および  $\text{Pu}^{239}$  の原子核分裂によつて  $\text{Cs}^{137}$ ,  $\text{Sr}^{90}$  その他を安価に作りうる等の利点があることを付記しておく。

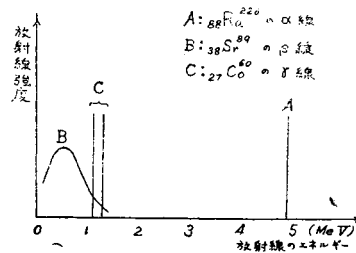
原子爆弾が爆発すると U, Pu 等の核分裂で生じた放射性原子が多量にまき散らされるほかに、爆発時に放射される強烈な中性子線によりその付近にある安定

原子核が放射性を帯びてくる。こうして最もいとうべき放射性同位元素の生成が行われるのである。

## 2. 放射能とその測定法

(1) 放射線の性質 前述のごとく  $\alpha$  線の本体は  ${}^4\text{He}^+$  の原子核で、一般に  $Z$  の大きい放射性元素から放出される。電荷量  $e$  を持つ粒子が 1 Volt の電位差の間で加速されたときにうるエネルギーを 1 eV と定義し、1 MeV =  $10^6$  eV の単位によると、 $\alpha$  線のエネルギーは大体 4 MeV ~ 8 MeV の間にあるが、それぞれの放射性元素については一定の値を持つている (図-2)。  $\alpha$  線が物質を通過する際には、電離作用が大きいためごく薄い膜で止つてしまい、空気中では数 cm を飛ぶに過ぎない。原子核が  $\alpha$  崩壊すると、 $\{{}_{88}\text{Ra}^{226} \rightarrow {}_{86}\text{Rn}^{222} + {}_2\alpha^4\}$  のように原子番号は 2 つ減り、質量数は 4 つふえる。

図-2 放射線のスペクトル



$\beta$  線は原子核から出る高速電子で、約 2 MeV 以下の種々のエネルギーを持ち、空気中では数 m を通過する。物質を電離する作用は  $\alpha$  線より小さいが、電離する以外に他の原子核と弾性衝突して方向を大きく変えることが多いので、その通過経路を Wilson 霧函 (後述) で見ると非常にジグザグになつている。その上、1 つの放射性元素の出す  $\beta$  線エネルギーは、0 からその元素に固有な最大エネルギーの所まで連続的に分布している (図-2)。物質に吸収されるときは状況ははなはだ複雑である。しかし実際には、吸収物質のいかにかわらずその  $t$  g/cm の吸収層を入れたときの放射線強度  $I$  は、吸収層のないときの放射線強度  $I_0$  と、 $I = I_0 \exp(-\mu t)$ 、ここに  $\mu$  は  $\beta$  線の最大エネルギーのみに関する常数、の関係にあり、 $I_0$ ,  $I$ ,  $t$  を実測すれば  $\mu$  より  $\beta$  線エネルギーを推定しうるのである。前述のとおり、原子核中の中性子が陽子になるときに余分となつた  $-e$  の電子が  $\beta$  線として放出されるから、 $\beta$  崩壊においては、 $\{{}_{6}\text{C}^{14} \rightarrow {}_{7}\text{N}^{14} + \beta^-\}$  のように  $Z$  は 1 つ増し、 $A$  は変化しない。

$\gamma$  線は原子核が励起状態から基底状態に遷移するとき放出されるエネルギーであり、両者の状態のエネルギーはそれぞれ一定しているため、その差である  $\gamma$

線のエネルギーも一定となる(図-2)。 $\gamma$ 線は光やX線と同じく電磁波であるために $\gamma$ 崩壊に際してはZもNも変化しない。物質に対する作用は主として軌道電子をはねとばす現象であるが、その確率は小さいので物質を透過しやすい。

放射性同位元素は、こうした種々の崩壊を行いつつだんだんと他の元素に移つてゆく。その親元素の減り具合は、最初時間  $t=0$  で  $N_0$  個あつた放射性原子が、 $t$  時間後に  $N$  個になつたとすると、次の関係式が成立する。

$$N = N_0 \exp\{- (0.693/T)t\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $T$ は親元素がもとの数の半分になるまでの時間で、半減期と呼ばれ、元素の種類によつて非常に短かいものから、 $10^{12}$  年にいたるものまで存在する。

多種の放射性元素が混合している場合、その減衰状況はきわめて複雑であるが、最近問題になつている  $U^{235}$  の原子核分裂による生成物については、全体としてほぼ次式で表わされる。

$$N = N_0 t^{-1.2} \dots\dots\dots (2)$$

原子の崩壊現象は純確率的なもので、式(1)も統計的則から導かれていた。単位時間に崩壊する原子数  $I$  (放射線強度) は、式(1)から、

$$I = - \frac{dN}{dt} = \frac{0.693}{T} N(t) \dots\dots\dots (3)$$

と表わせるが、この値は、いわば“真の平均値”とも名づけるべきもので、実際に測定される値は、この値を中心として統計的動揺を示しつつ表われる。

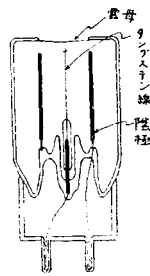
(2) 放射能の単位 放射能の単位には、崩壊原子数にもつづいたキュリー (Curie, c), と放射線の電離能力を測るレントゲン (röntgen, r), röntgen equivalent physical (rep), röntgen equivalent man (rem) 等がある。1秒間に1個の原子が崩壊する放射性同位元素の放射能強度を、1 dps (disintegration per second) というが、 $1c = 3.7 \times 10^{10} dps$  であつて、これは1gのRaの毎秒についての崩壊原子数が約  $3.7 \times 10^{10}$  個となることから定められた。便宜上cの代りに用いるカウントとは単位時間に計数管で算えられる放射線の数であり、たとえば1分間についてはcpm(counts per minute) 単位で示すが、厳密には計数管の効率で補正換算し、cの単位で表わすのが望ましい。

1rとは乾燥空気を電離してその1cc中に1静電単位の正または負のイオンを生ずるような $\gamma$ 線およびX線の量である。生物体に対する放射線の作用は重要問題であるので、 $\gamma$ 線以外の粒子線によつても生物組織が受ける影響をもしらべる目的で、rep, remが定められている。1repとは、組織が1rの $\gamma$ 線とほぼ

等しい量のエネルギーを吸収するような粒子線の量で、厳密には組織1gについて83 ergが吸収されるような粒子線の量と表現しうる。1remとは、人体組織に吸収されて、1rの $\gamma$ 線が吸収された場合と等しい効果を与えるような粒子線の量である。

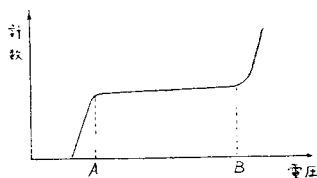
(3) 放射線の測定装置 こうした種々の装置は放射線の種類、エネルギー、放射線強度、測定目的等に応じて使いわけられ、また年々新測定法が考案されつつある。次に主として応用面で大切なものを列挙してみよう。放射線の測定法を大別すると、その粒子の1個1個を測定する方法と、線の電離能力を全体として測る方法との2種類になる。その装置として、前者には、ガイガー計数管 (Geiger-Müller Counter), シンチレーション計数管 (Scintillation Counter), 原子核乾板, ウィルソン霧函 (Wilson Cloud Chamber), 電離函, 結晶計数管等が、後者には積分型電離函 (Integration Ionization Chamber), 写真乾板, ローリツェン (Lauritsen) 検電器等がある。

図-3 ガイガー計数管 (a) ガイガー計数管: 最も普通に用いられている。



この装置には種々の型があるが、ここでは $\beta$ 線用2 $\pi$ 計数管として市販されているものを例示する(図-3)。真空管に似た外形の硝子管にアルゴンとアルコールの蒸気を10 cm Hg内外の圧力で封入し、その中に銅または不銹鋼の円筒を入れ、その中心には、先端に小さい硝子玉をつけた細いタングステン線を張る。管頂部は $\beta$ 線の入りやすいように薄い雲母を張り、陰極円筒と陽極中心線との間に1000V程度の電圧をかけて働らかす。放射線を入射すると、内部の気体は電離されてイオンとなり、電子が中心線に引きよせられる。中心線の付近では電場が非常に強くなるので、このあたりでうんと加速された電子はガスの気体分子と衝突し、それを再び電離して2次電子を出す。この2次電子はさらに気体分子を電離し、このようにして中心線に集まる電子の数は鼠算的に急増し、電子の雪崩を生ずる結果、入射線が作ったイオン電流は、計数管内で大いに増巾される。アルコール蒸気を混入するのは、こうして生じた電子雪崩を速かに消すためであり、雪崩は $10^{-4}sec$ 程度で消えて次の入射線を数える準備を整える。この $10^{-4}sec$ の間は放射線が続いて入つてきても感じないので不感時間と呼ばれるが、ガイガー計数管ではこの時間が割合に長いために、せいぜい

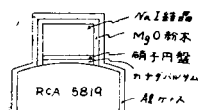
図-4 ガイガー計数管の計数特性



1分間に100000個しか放射線を数えないという欠点がある。陰、陽極間にかかる電圧と感度との関係は図-4のようになるが、電圧が低すぎると計数管の感度が悪く、高すぎると電子の雪崩が止らなくて放電が持続して計数管が壊れてしまう。図中のA、B間では電圧が少々変動しても計数管の感度は変わらないので、この間をプラトー (plateau) という。計数管はプラトーの範囲内で使用するもので、普通この範囲が200V程度であれば使用にたえる。プラトーの範囲が広く、またその部分の曲線傾斜がゆるいものほど、計数管としては上等である。ガイガー計数管は、入射した $\beta$ 線のほとんど100%を計数するに反し、 $\gamma$ 線感度は1%程度にしかならない。ガイガー計数管による計数が少ないときにはスピーカーを通した音を耳で聞いても数えられるが、数が多くなると計数回路という特別な電気回路を使う。これには10進法、2進法等の種類があるが、最近発明されたDecatron管を使うのが一番便利で、今後はもつぱらこの方式になつてゆくものと思われる。近来多種多様の型のガイガー計数管が考案、市販されており、上述の $\beta$ 線計数管以外に、紫外線や可視光線に感じやすい光計数管、X線用計数管、宇宙線用大型計数管、医学用超小型計数管、無陰極計数管、その他放射性物質を含む液体の測定に便利な液浸型計数管等枚挙するにいとまがない。また付属回路についても、携帯用に便利なSurvey Meterや、計数をメーターで読取るようにしてあるRate Meter等が販売されている。

(b) シンチレーション計数管： $\gamma$ 線に対する感度が低く、不感時間も長いために強い放射線を測りえないというガイガー計数管の欠点を解決するのがシンチレーション計数管である。結晶または液体が放射線をうけて蛍光を発する現象を利用するもので光感性のよい光電子増倍管 (Photomultiplier) を利用してこれを測

図-5 シンチレーション計数管



る。大体図-5のような構造で、光電子増倍管の先に反射率のよいMgOで包んだ蛍光結晶をはりつけ、発した光をできるだけ能率よくこの増倍管の中に入れる。ガイガー計

数管に比べると $\gamma$ 線に対する効率がきわめてよく、10%にも達する。光の強さは $\gamma$ 線エネルギーとともに大きくなるという性質を適当に利用すると、 $\gamma$ 線エネルギーを測定することができる。分解時間も $10^{-8}$ 秒程度でガイガー計数管よりはるかによく、相当に強い放射線をも測ることができる。蛍光結晶にはNaI、アントラセン、ナフタレン等のほか、最近では有機溶液の蛍光体がよく使われ、またプラスチックに蛍光物質を分散した優秀なものができている。光電子増倍管には、米国製の931-A、5819、英国製の6262等が普通に使われる。わが国においては、こうした高性能の増倍管が未完成で、製作費も嵩むため、シンチレーション計数管はもつぱら輸入により入手されているが、これは $\gamma$ 線の測定用には不可欠であつてその普及を希望したい。

(c) 原子核乾板：英国のC. Purcell (1950年ノーベル賞) が発達せしめた方法であつて、長時間 $\alpha$ または $\beta$ 放射線に特殊写真乾板をさらしておく、その間に起つた現象が全部感光記録され、後でゆつくりと調べうる。例えば、微量の $\alpha$ 放射能を持つ物質は、他の装置では検出することがはなはだ困難となるが、これを原子核乾板上に長時間のせた後に現象すれば、その間の $\alpha$ 放射能がたしかめられる。しかし顕微鏡で検査するのに相当の労力を要するのが欠点である。 $\beta$ 線にもこの方法は利用できる。

(d) ウィルソン霧函：水蒸気が過飽和状態にある大気中を、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線等の荷電粒子が通過して空気を電離すると、生じたイオンを中核として水蒸気が凝結し、これらの線の通つた跡があたかも飛行雲のように霧となつてしばらく残る。ウィルソン霧函はこの原理を使つて、C.T.R. Wilsonが発明したもので(1927年ノーベル賞)、荷電粒子の飛跡が直接肉眼で見える点で優れ、原子核物理学の発展に大いに寄与した。函の中には空気と水に限らず、例えば空気とアルコール、アルゴンとアルコール等各種のものが使われ、過飽和状態を作り出すには、密閉したウィルソン霧函の底板を急激に下し、中の気体を断熱膨脹させて作ることが多い。しかし膨脹後、数分の1秒しか感じないという欠点をなくするために、最近上蓋と底との間に大きい温度差を作り、蒸気の熱拡散により連続的に過飽和状態の層を作るような拡散型ウィルソン霧函が研究されたが、これは将来大いに有望視されている。

(e) 積分型電離函：ガイガー計数管で受けうる放射線量はせいぜい数万cpsで、統計誤差の小さい測定を迅速に行う場合には不適當である。積分型電離管は強い放射線ほど精密に測定しうるので上記欠点を補うも

のとして用いられる。さらに前述の測定装置はいずれも放射線粒子の数を測るものであるから、放射線量を  $r$  単位で直接知ろうとするにはこれによるほかに方法はない。 $\beta$ 線用の電離管は、2 $\pi$ 型 $\beta$ 線ガイガー計数管にしているが、中心線は太くし、電極間に2次イオンを生じない程度の弱い電場を作る。従つて内部の増巾作用はなく、放射線によつて生じたイオンのみが両電極間を動いてゆくだけで、電圧も数 10 Volt で十分である。管内には乾燥空気、アルゴン等を詰め、管の前窓は、 $\beta$ 線が通るように Al の薄膜を張つてある。増巾真空管には UX-54 など直流増巾用の特別な真空管を使うことが多い。

(f) 写真乾板または写真フィルム：前述の原子核乾板は、特に乳剤中の臭化銀の密度を大きく、臭化銀粒子を細かくし、荷電粒子の飛跡が1本1本判別できるようにしたものであるが、普通乾板でも放射線にさら

されると全体に感光する。例えば、鋳物のスを検査するには、その後X線フィルムを置き、前側から $r$ 線を当てるとスの影がフィルムに写り、その位置や大きさがわかる。さらに生物学、医学、鉱物学方面でよく使われるものにオートラジオグラフの方法がある。例えば、組織のどの部分に放射性物質があるかを検べるには、その載片をオートラジオグラフ用乾板の上のせておき、適当な時間の後に現象して顕微鏡で見ると、放射性物質が溜つている部分が感光してその位置が判明する。この方法はフィルムを要するのみできわめて簡便である。

以上の(a)~(f)のほか、ローリツェン検電器は、感度がよい割に値段が安く便利な装置であり、また $\alpha$ 粒子、中性子用に電離函、 $\alpha$ 粒子と $\beta$ 粒子とを判別できる比例計数管があり、測定状況に応じて適当に使い分けられている。

### 新講座についてお知らせ

昨年10月号をもつて完結した港湾計画論に引続き、編集部では次回講座について種々協議の結果、京大岩井教授を中心として「放射性同位元素と土工学」と題する新しい講座を本号より4~5回にわたり連載することに致しました。

問題が非常に理論的なため、かなり難解だと思われませんが、基礎的な面から実用性を帯びた面へと順次わかりやすく説明を進めてゆきたいと思っておりますので、会員各位の御支援のほどお願い申し上げます。(編集部)

### 新・刊・紹・介

谷口三郎著 土木施工法(増訂版) 昭.30.2.15発行

A5判 800ページ 定価 1300円(送料書留 120円) 風間書房刊(千代田区神田神保町1の34 振替東京1853・電(29)5729)

現在、現場に直接関係する技術者にとつて最も痛感されることは、各専門別に細分化された分野についての専門書は多数刊行されているが、これらを一つの部門に総合した技術書はきわめて少ないということである。

戦前刊行された谷口氏の「土木施工法」は、土木技術者にとつて必携の名著として広く親しまれていたのであるが、絶版のまま今日に至っている。

今度増訂版として刊行された本書は、コンクリートおよび機械化施工の部分について約200ページにわたる補追を行ったもので、平易な説明と多数の例題を付した施工の辞典ともいうべきもので、きわめて意義ある出版と云えよう。造本技術も実用性を考えた堅牢なものである。(編集部)

### お詫び

学会誌39巻12号(40周年記念号)お知らせ欄に発表いたしました関西支部発行「海岸工学研究発表会論文集」は、係の手違いから発売中と発表いたしました。同書はすでに残部なく、申込者各位に大変御迷惑をおかけいたしました。

ここに誌上より関西支部並びに申込者各位に対しまして深くお詫び申し上げます。

なお種々の都合上本書の再版は不可能でありますから念のため申し添えておきます。(編集部)