

放射性同位元素を利用した河川の流量測定

Measurement of Riquid Flow in Streams Using Radioactive Isotopes

佐藤 乙丸*

Otomaru SATO

河川の流量を放射性トレーサによって測定する技術は、その他の流量測定法と比べて、いく多の利点があるため、近年先進諸国では流量測定の基準として日常的に用いる傾向にある。ここでは、この流量測定法を適用する場合の問題点、すなわち、放射性トレーサの水中損失、横拡散、いくつかの測定法の比較、測定精度と使用放射能などに重点をおいて解説を行なった。

1. ま え が き

放射性同位元素を河川流量測定に応用する試みは、ここ 10 数年来大幅に進歩し、すでに英国においてはこの流量測定法を 1965 年以来 B.S. 規格に採用している¹⁾。

一般に、主として使用されてきた河川流量測定法には、河川流速と断面積から求める方法と、トレーサ法とがある。前者は流速と水深を細かに測定することにより、流量測定の誤差をかなり小さくすることができるという利点があるが、時間がかかることおよび河川の状態が時間とともに変動することなどのため、おのづから制約される。また流速が大で流速計を使用できない場合、山間地の急流、および漂石などの障害物のため不規則な形状をなしている河川には適用することができない。

これに対して、トレーサ法は流速も断面積も測定する必要がないので、特に激流や、河床に凸凹の多い河川の流量測定に好んで用いられる。これらのトレーサ物質としては食塩、硫酸マンガン、硝酸ナトリウム、重クロム酸カリウムなどの塩類、およびローダミンBその他の螢光染料が主として用いられ、たまにはバクテリア類も使用されてきた。このうち、ローダミンBが最も有望なトレーサとされており、Mawson²⁾の報文によれば、放射性トレーサと比べて、しゃへいや汚染の心配がなく、安価であること、および測定感度の点においても、水中における ^{24}Na の検出限度を $2 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/l}$ とした場合、100 g のローダミンBが 1 Ci の ^{24}Na に相当することから、場合により最も好ましいトレーサとしている。

しかしこのローダミンBも、最近の実験によると、放射性トレーサより水中損失が大きいことが明らかとなっており、正確な測定を要求される場合には、水中損失が小さくかつ検出感度の高い放射性トレーサを用いる必要がある。

放射性トレーサを河川水の流下速度や拡散に初めて使用したのは Joly³⁾であり、彼は 1922 年にラジウムをトレーサとする実験を行なった。1946 年以降多くの実験が各種の放射性トレーサを用いて行なわれてきたが、1958 年、Hull⁴⁾は全計数法による河川流量測定法を発表した。この時使用した放射性核種は ^{134}Cs である。その

後各国において新しい流量測定法が試みられ、1963 年東京で開催された IAEA Symp. on Radioisotopes in Hydrology⁵⁾でその成果が発表されて、日常的に用いられるようになった。以下にその後の開発研究も含めて、流量測定上の問題点を明らかにしよう。

2. 流量測定の原理^{6,7)}

(1) 流量測定法の比較

流量測定法は、放射性トレーサの注入方法によって、連続注入法と瞬間注入法とに大別できる。後者には、下流の2点間を通過する放射性トレーサ水塊のタイミングを行ない、平均流速を求め、断面積を乗じて流量を算出する方法も含まれるが、これは断面積が一定と考えられる水路、パイプなどの場合に有効である。特にパイプの場合、外側から計測することもできるので好んで用いられる。注入数量も小量ですむ利点がある。これを Velocity (二点測定) 法と称している。

最近 Integrated pulse velocity 法と称して、普通のレートメータの代わりに、自然計数率をさし引いた積分型レートメータを用いて図1のように記録させ、トレー

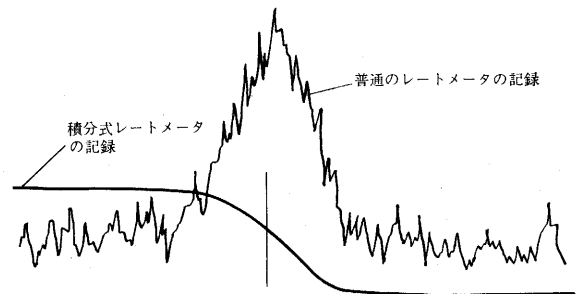


図1 瞬間注入2点測定流量測定法の記録の例

サ濃度曲線の面積の中心を求めやすくした方法⁸⁾が考えられている。この方法は、計数率の統計誤差が小さいため、曲線の立ち上りの中間からトレーサ通過時間を簡単に読みとれるほか、注入放射能数量をかなり少なくすることができる。

その他の方法はいずれも、希釈法の原理に基づくもので、流速や河川の形状に無関係であるという利点がある。しかし、この原理が成り立つためには、測定中の流量、および注入地点と測定地点との間のトレーサ量がともに

* 東京大学生産技術研究所第4部

表1 流量測定法の原理と特徴

| 測定方法 | 流量 Q を求める式およびトレーサの変化曲線 | 特徴 |
|--|---|---|
| 連続注入希釈法 一定流量 q で濃度 C_1 のトレーサを連続注入し、採水濃度 C_2 を求める (C_0 は天然濃度). | $Q = \frac{(C_1 - C_2)}{(C_2 - C_0)} q$ | <ul style="list-style-type: none"> ○連続定量注入装置がある。 ○拡散が大きいほど、長時間注入の必要があるので大量の放射能がある。 ○測定点で濃度が一定となったときに採水する必要があるため、これをたしかめる手段がある。 ○$C_1/C_2, q$ ともに正確に求められるので誤差が小さい。 |
| 瞬間注入希釈法 a. トレーサ濃度の時間的変化曲線を連続記録、または採水試料から求め積分する。 | $Q = A / \int (C - C_0) dt$ | <ul style="list-style-type: none"> ○注入数量 A を正確に求めるのがむずかしい。 ○A の一部を希釈し C と比較測定して、A からの誤差を小さくするため、連続記録の場合には水槽が必要である。 ○採水する場合は手間がかかる。 |
| b. 一定時間間隔で一定量を採水して貯水し、その平均濃度 \bar{c} を求める。 | $Q = A / \bar{c} (t_2 - t_1)$ | <ul style="list-style-type: none"> ○採水しなければならないが、\bar{c} は時間をかけて求められるので誤差を小さくできる。 ○t_1 と t_2 のきめ方によって誤差が入る。 ○放射能の測定は \bar{c} の測定だけでよい。 |
| c. 一定流量 p で連続的に採水して貯水し、その放射能 a を求める (トレーサ積分法). | $Q = p \cdot A / a$ | <ul style="list-style-type: none"> ○トレーサ到着前から採水し、完全にトレーサが通過するまで採水できるので誤差が小さい(採水時間を長くできる)。 ○p をつねに一定に保つ必要がある。 ○時間をかけて a を求めることができるので計数誤差を小さくできる。 ○$A/a, p$ ともに $\pm 0.1\%$ 以下で求められる。 |
| d. 測定地点のトレーサ水塊の一部からの放射線を全計数する。 F は計数効率 (計数積分法, 全計数法). | $Q = A \cdot F / N$ | <ul style="list-style-type: none"> ○移動中の放射能を計数していること、および計数値の統計的変動による誤差が大きい。 ○河川中に放射線検出器を浸けて測定する場合、F が変わるときがある。 ○連続採水して一定の計数条件で測定する場合、河川中の放射能で BG が変わるおそれがある。 |

一定であることが必要である。また測定地点の断面上の各点において、連続注入の場合はトレーサ濃度が、また瞬間注入の場合はトレーサ濃度の時間積分値が、それぞれ一定であることが要求される。

表1にこれらの方法の原理、特長などをまとめてみた。連続注入法は、微動モーターを用いてピストンを動かしトレーサを押し出す方式の注入器が開発され、注入流量の誤差を $\pm 0.05\%$ 以下に押えることが可能となったので、瞬間注入法と比べて、測定時間が長くなり使用トレーサ数量も2~3倍多くなるという欠点はあるが、十分な注意を払えば最も正確な結果をうることができる。しかし現場実験という観点からみれば、大量の放射性溶液を連続注入するための作業や、測定地点においてトレーサが定常状態に達していることを確認する手段、注入継続時間の決定などいくつかの問題点を含んでいる。

これに対し、瞬間注入法は、注入が容易でトレーサ量も少なく済み、また混合距離より下流に測定地点を設けさえすれば、拡散の激しい河川にも適用することができる。すなわち、経済的にも技術的にも無難である。この意味で連続注入法より有利であるとされている。ただし、測定時間中に流量が変化するような特別な場合には、連続注入法に頼らざるを得ないことはいうまでもない。

(2) トレーサ測定法による瞬間注入法の比較

瞬間注入法にもいくつかの方法があるが、連続的にトレーサ濃度を記録したり全計数する方法と試料を採取する方法とに分けられる。前者の場合は、以前は河川水中に検出器を浸して測定⁹⁾していたが、最近はポンプを用いて連続的に採水し、検出器を内蔵する計数容器を通過させて測定する方式が用いられている。この方式の利点は注入放射能の一部を同じ容器中に投入して測定地点の放射性濃度の計数率と比較することにより、注入数量の標準測定に伴う測定誤差をさけることができる点にある。しかしこの方法を用いても、時間とともに変化しつつあるトレーサ濃度を測定していること、および放射線計数に統計的ゆらぎを伴うことなどによる測定誤差が無視できない。

これに対して後者は、試料を採取するという余分な手間がかかるが、測定時間を長くかければ測定誤差はかなり小さくなる。この場合、個々の試料を測定しないとトレーサ濃度曲線は求められないが、流量を測定するだけならば、一定時間毎に採取した試料の一定量づつを混合し、その平均濃度を求めることによって流量を算出する方法のほうが、一回の計数ですむから簡単であり、誤差も少ない。

表 2 流量測定に用いられる放射性トレーサ

| 放射性同位元素 | 化学的形狀 | 半減期 | 飲料水中の最大許容濃度, $\mu\text{Ci/cc}$ | 放射線の種類 (MeV) | | γ 線の rhm |
|------------------|------------------------|---------|--------------------------------|--------------|--------------|-----------------|
| | | | | β 線 | γ 線 | |
| ^3H | HTO | 12.26 年 | 3×10^{-2} | 0.018 | — | — |
| ^{24}Na | NaHCO_3 | 15 時間 | 3×10^{-4} | 1.39 | 1.37, 2.75 | 1.93 |
| ^{82}Br | NH_4Br | 36 時間 | 4×10^{-4} | 0.44 | 0.55~1.48 | 1.50 |
| ^{51}Cr | Cr-EDTA | 27 日 | 2×10^{-2} | 0.005 | 0.323 (8%) | 0.017 |
| ^{131}I | Iodide | 8 日 | 2×10^{-5} | 0.61ほか | 0.36(80%)ほか | 0.231 |
| ^{125}I | Iodide | 2.26 時間 | 6×10^{-4} | 0.73~2.12 | 0.67, 0.78ほか | 1.18 |

Guizerix ら¹⁰⁾が提案した方法は、放射性トレーサが測定地点を通過する間の前後もふくめて、一定流量 p の割合で連続採水して容器に貯め、その採水液中の放射能 a をきめて河川流量 Q を求めるやり方 (表 1 参照) で、いま説明してきた両者の長所をとり入れたものといえる。さらにこの方法は、河川断面の任意の箇所から採水できる特長があるので、筆者ら¹¹⁾も空知川の流量と拡散を調べる実験に際して、測定地点の左岸・右岸・流心部の 3 か所に適用してみた。その結果、連続採水器が満足に動作しさえすれば、好結果が得られることがわかった。

3. トレーサの選定

(1) 放射性トレーサの性質

放射性トレーサを選定する場合に考慮すべき事項は、半減期、放射線の種類とエネルギー、飲料水中の最大許容濃度、最大比放射能などのほか、トレーサの費用および水中損失、溶解度、安定性などである。現在まで、以上の諸点を考慮した上で各種の放射性トレーサ物質が使用されてきたが、最近では表 2 にまとめた数種のものが最も好ましいものとされている。

このうち ^3H は最も理想的なトレーサで、半減期が長いという欠点はあるが水中損失は見られない。また低いエネルギーの β 線しか放射しないので、大量の放射能でも取り扱いが容易である。しかし、その放射能検出は、液体シンチレーション計数法によらざるを得ないため、現場で測定するわけにはいかない。さらに ^3H は自然界の水サイクルの研究に使用されている関係上、この研究に影響を及ぼさないよう考慮して使用する必要がある。 ^3H はその他のトレーサと同時に使用して、後者の水中損失を調べる目的にもよく使用される。

^{24}Na は半減期が短いことから河川を汚染することがなく、また原子炉で製造しやすいためよく用いられる。ただ水中損失がみられるので、河川水中に同一化学形状の Na が存在するときのみ使用すべきである。

^{82}Br は半減期約 1.5 日で、 ^{24}Na よりも水中検出効率が大きく、かつ γ 線エネルギーが小さいため容易にしゃへいでき、水中損失も小さいという特長をもっている。しかし、原子炉で製造中に Br が遊離するので、シリカチューブに密封して炉に入れ、照射した試料をチオ硫酸ソーダ液にとかし、遊離した Br を再結合させることが

必要となる。

^{131}I 、 ^{51}Cr は半減期の長いものが必要なときに用いられる。このほか、 ^{198}Au も用いられてきたが、 Au は河川中のシルトや河床物質によって吸着されやすい欠点があるので注意しなければならない。このように水中における損失の大小が、河川水のトレーサにとってきわめて大切な特性となってくる。

(2) トレーサの水中損失

トレーサの水中損失を推定する一つの方法は、河川中のシルトや砂を採取し、それらへの吸着状況をたしかめることである。堀口ら¹²⁾は、フラスコ中に放射性トレーサ液と砂を入れて振とうさせ、トレーサの比放射能の時間的変化から水中損失を求めたところ、図 2 のように、

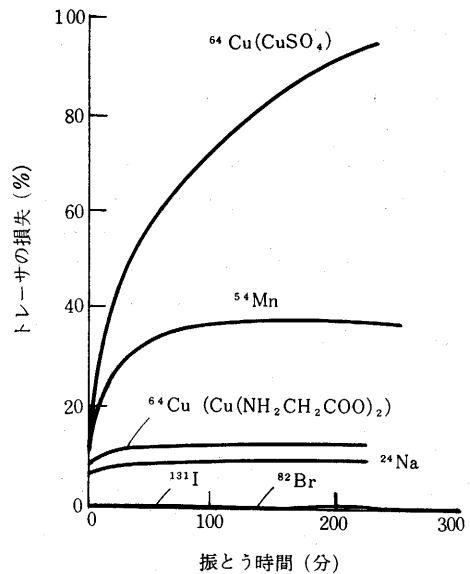


図 2 振とう法によるトレーサの水中損失

^3H 、 ^{82}Br 、 ^{131}I には損失がないが、 ^{24}Na 、 ^{54}Mn 、 ^{64}Cu にはかなりの吸着が認められることを明らかにした。

Eden ら¹³⁾は Hertfordshire 川の泥砂 1g を入れた 10 ml 中で 30 分間放射性トレーサを振とうした結果、表 3 の結果を得ている。またコンクリート下水溝の壁による損失を ^{82}Br とダブルトレーサとして用い、滞留時間の比較と回収した放射能の関係から求め、 ^{24}Na 、 ^{131}I 、 ^{32}P 、 ^{35}S などの損失が少ないことを示した。

表3 河川泥砂による水中損失

| 放射性同位元素 | 水中損失 (%) | 濃度比 | 放射性同位元素 | 水中損失 (%) | 濃度比 |
|------------------|----------|-----|-------------------|----------|-----|
| ³⁶ Cl | 0 | 0 | ⁸⁶ Rb | 43 | 41 |
| ⁸² Br | 0 | 0 | ¹⁴⁰ Ba | 85 | 305 |
| ¹³¹ I | 47 | 48 | ¹⁴⁴ Ce | 92 | 620 |
| ²⁴ Na | 8 | 4 | | | |

注 1) 1g の泥砂を 10ml の放射性液中で 30 分振とうした。
 注 2) 濃度比は泥砂 1g と水 1g 中の放射能比。

しかしこのような実験結果をそのまま河川中の水中損失とみなすことは危険である。そこで水中損失がほとんどないと考えられる ³H とダブルトレーサにして、実際の河川で調べる方法が用いられてきた。Clayton ら¹⁴⁾は ⁸²Br, ²⁴Na, ³²P の順に損失が大きくなり、かつ測定地点で最大濃度に達する時間も遅れることを述べている。また ³²P (NaH₂PO₄) を用いたとき、キャリアを加えないで 50% の損失を見た区間で、キャリアを添加して再実験したところ数 % の損失におさえることができた。

筆者ら¹¹⁾は空知川において ²⁴Na と ⁸²Br の水中損失を調べるのに、測定地点を通過するトレーサ量と注入数量 A との比を求める方法を用いた。すなわち採水試料を分析して描いた濃度曲線の面積 $S = \int c \cdot dt$ は、採水地点を通過した全トレーサ量に比例する。したがって ³H と ²⁴Na または ⁸²Br の場合の S/A の無次元量を求めて比較すれば水中損失がわかる。

三つの測定区間のうち、最下流測定点の左岸、右岸、流心部の S/A を求めた結果は表 4 のとおりで、²⁴Na については、³H より小さい値となっていることから明らかに損失が認められる。⁸²Br の場合は ³H よりも大きくなっているが、これは注入数量の誤差によるものである。左・右・流心部の平均値をとって ⁸²Br/³H を求めると、平和橋 (8.3 km) で 1.14, 空知橋 (10.7 km) で 1.08 となることから、⁸²Br も長い距離流下する間に水中損失を受けることがわかった。

水中損失は水中の諸成分との化学的反応のほか、水中の沈積物による吸着やイオン交換作用などによる場合が多い。一般に陰イオンは陽イオンより損失が少なく、また金属のキレートも有利である。非放射性的の同一物質を多量に添加するとかなり損失をへらすことができる。さらにバクテリアや水中の有機物などによる水中損失も、無視することができない。蛍光染料などはこの影響で損

失をこうむる。

測定区間内で表面水が地下にもぐる場合や、逆に地下から湧出したり、支流から合流したりすると流量が変わり、測定結果に影響する。合流する場合はわかるが、湧出や浸透していく場合はわかりにくいので、その可能性の少ない区間を選んで測定する必要がある。特に地下に浸透していく場合はトレーサの水中損失と同じ結果となるので注意しなければならない。

(3) アクチバブルトレーサ

アクチバブルトレーサ法は、測定地点において採水した試料を放射化分析して流量を求める必要があるもので、表 1 の全計数法を除いた測定法が用いられる。この方法は放射線障害防止の立場から放射性物質を用いることが困難な場合に有利であるが、放射性トレーサ法と比べて、トレーサの検出感度が劣りまた放射化分析を行なうため時間、経費ともにかさみ、測定誤差も大きくなるなどの欠点がある。

表5 アクチバブルトレーサ用の元素

| 核種名 | 存在比 (%) | 放射化断面積 (バースン) | 生成放射性同位元素 | |
|-------------------|---------|---------------|--------------------|--------|
| | | | 核種 | 半減期 |
| ²³ Na | 100 | 0.536 ± 0.01 | ²⁴ Na | 15 h |
| ⁵¹ V | 99.76 | 45 ± 0.9 | ⁵² V | 3.76m |
| ⁵⁵ Mn | 100 | 13.2 ± 0.2 | ⁵⁶ Mn | 2.58 h |
| ⁸¹ Br | 49.48 | 3.1 ± 0.5 | ⁸² Br | 35.9 h |
| ¹¹⁵ In | 95.77 | 155 ± 10 | ^{116m} In | 54.2m |
| ¹⁵¹ Eu | 47.77 | 1,400 ± 300 | ¹⁵² Eu | 9.2 h |
| ¹⁶⁴ Dy | 28.18 | 2,100 ± 300 | ¹⁶⁵ Dy | 2.3 h |
| ¹⁹¹ Ir | 38.5 | 700 ± 200 | ¹⁹² Ir | 74 d |
| ¹⁹³ Ir | 61.5 | 130 ± 30 | ¹⁹⁴ Ir | 19 h |
| ¹⁹⁷ Au | 100 | 96 ± 10 | ¹⁹⁸ Au | 2.7 d |

この目的に適するトレーサとしては、表 5 のようなものがあげられる。放射化断面積の大きなものはこのほかにもあるが、大量に水に溶かして使用することから安価に入手でき、かつ溶解度の大きいものでなければならない。また放射化したとき生ずる放射性核種の放射線種とエネルギーが適当でないと、トレーサの分析に時間がかかる。以上の点から ⁸¹Br, ⁵⁵Mn, ¹¹⁵In などが適するものと考えられている。

筆者ら⁷⁾は ⁸¹Br(NH₄Br), ⁵⁵Mn(MnSO₄), ⁵¹V(NH₄VO₃) を用いて、信濃川へ流入する汚水の希釈実験を行

表4 空知川における ²⁴Na, ⁸²Br の水中損失

| 測定地点 | 平和橋 | | 空知橋 | | 平和橋 | |
|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 注入点からの距離 | | | | | |
| | 6.4 km | | 10.7 km | | 8.3 km | |
| トレーサ | ³ H | ²⁴ Na | ³ H | ⁸² Br | ³ H | ⁸² Br |
| 右岸 | 4.12 × 10 ⁻⁴ | — | 3.21 × 10 ⁻⁴ | 3.42 × 10 ⁻⁴ | 4.7 × 10 ⁻⁴ | 5.4 × 10 ⁻⁴ |
| 流心部 | 4.61 × 10 ⁻⁴ | 4.21 × 10 ⁻⁴ | 3.08 × 10 ⁻⁴ | 3.36 × 10 ⁻⁴ | 4.97 × 10 ⁻⁴ | 5.48 × 10 ⁻⁴ |
| 左岸 | 3.92 × 10 ⁻⁴ | 3.56 × 10 ⁻⁴ | 3.08 × 10 ⁻⁴ | 3.35 × 10 ⁻⁴ | 4.4 × 10 ⁻⁴ | 5.01 × 10 ⁻⁴ |

数値は $\int c dt / A$ の無次元比をとっている。

なったが、堀口ら¹⁵⁾は、流量約 0.2 m³/sec の日原川の流量測定に NH₄Br, NaCl, MnSO₄, KMnO₄, MnBr₂ などを用い、Na や Mn には水中損失がみられるが、Br では ⁸²Br を用いた場合とほぼ同じ流量値となり水中損失がみられないことを示した。

4. トレーサの横拡散と混合距離

希釈法による流量測定誤差を小さくし、かつ注入放射能数量を少なくするためには、できるだけ早く横拡散が行なわれる区間を選んで測定することが大切である。注入地点から、1% 以内の誤差範囲内で河川横断面の各点のトレーサ濃度またはその積分値が均一となる測定地点までの最短距離を混合距離と称している。

(1) 混合距離の計算

Rimmer¹⁶⁾ は深さ方向の拡散が横拡散よりはるかに大きいものと仮定して次式を導き出した。すなわち混合距離を L_{mix} (m) とすれば

$$L_{mix} = 0.13 \frac{B^2 C}{Hg} (0.7C + 6) \quad (1)$$

ここで H (m), B (m) はそれぞれ測定区間内の平均水深および河幅、 C は Chezy 係数で河床の状況により $15 < C < 50$, g (MKS) は重力加速度である。

この式は流れの軸上の一点で注入したと仮定している。多点注入の場合は L_{mix} がさらに小さな値となる。またこの式を用いると、河幅約 5 m 程度の河川では L_{min} が小さくなり、50m の河川では、大きくなりすぎるといわれている¹⁷⁾。Clayton¹⁴⁾ も 300 l/sec の小川の実験にこの式を適用し、 $C=25$ として $L_{mix}=750$ m となったが、実験の結果得られた $L_{mix}=250$ m よりかなり大きな値となることを明らかにした。

Hull¹⁷⁾ は縦拡散係数と横拡散係数が同じでしかもトレーサの拡散がガウス分布に近似できるとして次式を求めた。

$$L_{mix} = 50Q^{1/3} \quad (2)$$

ここで Q (m³/sec) は流量で、トレーサは流心部で注入している。この式は実際の混合距離よりかなり小さくなりすぎることが、多くの実験データから指摘されており、適用できない。

以上のほか有効な計算式がなく、より実際の計算式を求めることが、流量測定上の大きな問題点となっている。このため実験的に混合距離に達しているかどうかをきめざるを得ない。たとえば瞬間注入の場合、測定地点の断面上の 2~3 か所で同時測定し、その結果を比較するか、場合により螢光染料を流してその拡散状況を観測する。

(2) 混合距離を短くする方法

横拡散の程度をあらわす目安として、Timblin ら¹⁸⁾ は次式を提案している。

$$\% \text{混合度} = \left\{ 1 - \frac{|N_L - N_m| + |N_C - N_m| + |N_R - N_m|}{3N_m} \right\} \times 100 \quad (3)$$

ここで N_L , N_R , N_C はそれぞれ測定地点の左岸、右岸、流心部のトレーサ濃度または濃度積分値に比例する値で、 $N_m = 1/3(N_L + N_R + N_C)$ である。

この混合度が 98% 以上となる地点までの距離を混合距離と考えた場合、約 9 m³/sec の開水路では 776 m であった。Schuster¹⁹⁾ らは、流量約 17 m³/sec の梯形断面の水路で注入地点から 450, 610, 760, 915 m の距離で、それぞれ 73, 81, 94, 98% の混合度を得ている。

より短い距離で混合度を大きくするには、注入地点の横断面上の何か所かで同時に注入すればよい。Timblin らは流量 225 m³/sec の水路で、5 組のトレーサを幅方向に等間隔に並べて同時に注入を行なった。その結果、2.1 km 下流で全計数法によって測定した流量値が、ゲージによる観測値と 1% 以内の誤差で一致する成果を得た。

また Schuster らも前述の水路で、610 m 下流の左岸、右岸、流心部に放射線検出器を設置し、1) 左右兩岸の水面上に注入したとき、2) 同じく水中に注入したとき、3) 兩岸と流心部の 3 点で水面上に注入したとき、4) 同じく水中に注入したときの 4 種類の注入方法に対して、それぞれ 99, 92, 64, 93% の混合度を得ている。第 3 の方法を除けば、流心部でのみ注入した場合の混合度 81% より明らかに改善されている。

このように多点同時注入法は、深さ方向の拡散が横方向よりかなり早いことから、混合距離を短くする効果がある。しかし放射性トレーサを多点同時注入することは、放射性物質取り扱い上からもいろいろ問題があるので、アクチバブルトレーサ法を用いる場合に有効であると考えられる。

5. 注入数量と測定誤差

流量測定を行なうにあたり、測定値の誤差の許容範囲内で、できるだけ注入放射能を少なくすることが望ましい。また放射線障害防止上から、測定地点において最大許容濃度以下に希釈されていること、および取り扱い者が過度に被曝しないことも大切である。

(1) 最大許容注入数量

瞬間注入時の最大許容注入数量は、測定地点におけるトレーサの最高濃度が表 2 にのせた水中の最大許容濃度に等しいときの値で、次式により概算できることが Gardner²⁰⁾ によって示された。すなわち最大許容注入数量を A_{max} としたとき、

$$A_{max} = 2am\sqrt{\pi Kx}/\sqrt{v} \quad (4)$$

ここで、平均断面積 a , 平均流速 v , 注入地点からの距離 x , 平均拡散係数 K , 最大許容水中濃度 m で、 K は河川の異なるいくつかの実験データをまとめた表 6 を参

表6 四つの河川の平均拡散係数

| 河川名 | 文献番号 | 実験回数 | 平均流量 Q(ft ³ /sec) | 平均流速 v(ft/sec) | 平均断面積 a(ft ²) | 河川の曲折 | 断面積の変化 | 河底の粗度 | 縦拡散係数 K(ft ² /sec) |
|------------------------|------|------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|-------|--------|-------|----------------------------------|
| Yuma Mesa Canal | 18 | 28 | 319 | 1.33 | 237 | 小 | 小 | 小 | 4.4 |
| East Fork Poplar Creek | 22 | 7 | 33.7 | 0.813 | 41.3 | 小 | 中 | 中 | 26 |
| American River | 17 | 7 | 1,050 | 2.49 | 431 | 中 | 大 | 大 | 260 |
| 空知川 | 21 | 17 | 1,235 | 2.45 | 513 | 大 | 大 | 大 | 326 |

考にして推定してきめればよい。表のKの値はかなり異なっているが、(4)式では \sqrt{K} なのでそれほど大きく影響しない。たとえば空知川の場合にあてはめると、測定地点を1,000 m 下流とし、 $m=0.1$ MPC とすれば、 ^{24}Na で1 Ci, ^3H で100 Ci となる。

(2) 最小許容注入数量と測定誤差

全計数法を用いる場合、全計数値Nの相対誤差をf以下に保つためには、最小で次の注入数量が必要であることが計算されている²³⁾。すなわち、流量Q、自然計数率の測定時間 t_0 、自然計数率 n_0 、トレーサを計数した時間 t_m 、全計数効率F、 $q=t_0/t_m$ とすれば、

$$A_{\min} = \frac{Q}{2f^2F} \left(1 + \sqrt{4n_0 f^2 t_0 \frac{q+1}{q}} \right) \quad (5)$$

となる。

さて流量の相対誤差は

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2} \quad (6)$$

したがってA、Fの誤差が大きければNの誤差が小さくとも流量の誤差が大きくなる。一般にA、Fの誤差を数%以下におさえることはかなり困難である。このため、Aの一部 A_c を正確に測って実験時と同じ容積Vの容器内にうすめて計数し、そのときの計数率を f_c とすると、

$$F = f_c V / A_c \quad (7)$$

この式を全計数法の式に代入して次式を使用する²⁴⁾。

$$Q = \frac{A}{A_c} \cdot \frac{f_c}{N} \cdot V \quad (8)$$

この式を用いれば A/A_c 、Vともに少なくとも0.1%以下の誤差にすることができ、また f_c の値も時間をかけて求めることにより正確にきめることが可能である。こうして全計数値Nの誤差によって流量Qの誤差がきまってしまうようにすることができる。

トレーサ積分法の場合、表1から

$$Q = pA/a \quad (9)$$

全計数法の場合と同様に A_c の計数率を f_c 、採取試料中の放射能aの計数率をnとすれば

$$a = A_c n / f_c \quad (10)$$

したがって

$$Q = \frac{A}{A_c} \cdot \frac{f_c}{n} \cdot p \quad (11)$$

となり、この場合は A/A_c 、 f_c/n 、pともに正確に決定することができるので、流量測定の誤差をかなり小さく

することができる。この意味からもこの方法は他の流量測定法と比べてすぐれている。

A/A_c 、 C_1/C_2 などの希釈率は 10^6 程度のとき $\pm 0.05\%$ 以下で、また計数率 f_c 、nなどは $\pm 0.1\%$ 以下で定められるので、測量Qの値はかなり正確なものとなる。

6. むすび

河川の流量測定へ放射性トレーサを利用する試みは、わが国ではまだ実験的段階に止っており、二、三の研究者が行なっているにすぎない。しかし先進諸国においてはすでに日常的に使われ始めており、特に発電所用水の流量測定が注目されている。また以上述べてきた測定法を洪水時(ただし最大600 m³/sec程度までが限度とされている)などに応用するため、自動記録する方法も検討されている。なお放射性トレーサの調製、注入、運搬など放射性物質を野外で使用する場合の技術的な問題点については割愛したが、最近IAEAから出された手引書²⁵⁾や筆者らの報文^{26,27)}を参照していただきたい。

おわりに、この解説をまとめるにあたり、ご指導して下された加藤教授に厚く感謝の意を表する。

(1967年8月30日受理)

文 献

- 1) Draft B. S. Methods of Measurement of Liquid Flow in Open Channels Using the Radioisotopes Dilution Techniques, Jan. 1966
- 2) C. A. Mawson: AECL Report, Survey of Hydrological Applications of Tracers in Canada, 1964
- 3) J. Joly: Scient. Proc., R. Dublin Soc., 16, 489~491 (1922)
- 4) D. E. Hull: Int. J. Appl. Rad. & Isotopes, 4, 1~15, (1958)
- 5) Radioisotopes in Hydrology, IAEA (1964)
- 6) 佐藤: 原子力工業, 9, 8, 24~28 (昭38年)
- 7) 加藤, 佐藤, 井上: 生産研究, 18, 10, 6~12, (昭41年)
- 8) C. G. Clayton, et al.: IAEA Symp. on Radiotracers in Industry and Geophysics, SM-84/39 (1966)
- 9) 加藤, 河添, 佐藤, 他: 生産研究, 14, 1, 11~18, (昭37年)
- 10) J. Guizerix, et al.: IAEA Symp. On Radioisotopes in Hydrology, 255~279. (1964)
- 11) 加藤, 佐藤: Radioisotopes, 15, 6, 309~316 (1966)
- 12) 岡野, 堀口: 第4回理工学における同位元素研究発表会要旨集, 19a-III-1 (昭42年)
- 13) G. E. Eden, et al.: IAEA Symp. on the Use of Isotopes in Hydrology, SM-83/13 (1966)
- 14) C. G. Clayton: IAEA Symp. on Radioisotopes in Hydrology, 1~23 (1963)
- 15) 堀口, 永塚, 鈴木, 小林: 第4回理工学における同位元素研究発表会要旨集, 19a-III-3 (昭42年)

- 16) G. M. Rimmer: Trudy GGI 36, 90, 18 (1952)
- 17) D. E. Hull: Int. J. Appl. Rad. & Isotopes, 13, 63~73 (1962)
- 18) L. O. Timblin, et al.: IAEA Symp. on Radioisotopes in Hydrology, 37~57 (1963)
- 19) J. C. Schuster: Proc. of ASCE, HY-2, 102~124, (1965)
- 20) R. P. Gardner: Int. J. Appl. Rad. & Isotopes, 16, 75~80 (1965)
- 21) 加藤, 佐藤, 森田, 小浜, 林: IAEA Symp. on Radioisotopes in Hydrology, 89~108 (1963)
- 22) L. F. Ballard, et al.: Final Report on AEC Contract No. AT-(40-1)-2513 (1965)
- 23) H. Moser, et al.: Atomkernenergie, 5, 462~471, (1960)
- 24) T. Dincer: IAEA Symp. on the Use of Isotopes in Hydrology, SM-83/8 (1966)
- 25) Guide to the Safe Handling of Radioisotopes in Hydrology, IAEA, Vienna, (1966)
- 26) 加藤, 河添, 佐藤: Radioisotopes, 11, 23~32 (1962)
- 27) 加藤, 佐藤, 松坂, 渡辺, 林: Radioisotopes 11, 363~372 (1962)

次 号 予 告 (12 月 号)

研 究 解 説

| | |
|--|---------------------------|
| 鉄鉱石の熱割れの機構..... ——イタピライトにおける結晶学的アプローチ—— | 榎 谷 暢 男 本 間 色 禎 文 一 |
| 生産工程無人化の基本的な手法..... | 森 政 弘 |
| Donau 川の河床状態に関する Girardon 調査について | 井 口 昌 平 |

研 究 速 報

| | |
|---------------------------|----------------------|
| ひずみ増分理論による液圧バルジ試験の解析..... | 山 田 嘉 昭 横 内 康 人 |
| 光学的自己相関計..... | 松 本 和 也 小 瀬 輝 次 |
| 軟弱層内での管路の振動実験について..... | 岡 本 舜 三 田 村 重 四 郎 |
| ガラス球充てん層の熱伝導率測定..... | 棚 沢 一 郎 永 田 眞 一 |

研 究 室 紹 介

| | |
|------------|---------|
| 坪井研究室..... | 川 股 重 也 |
|------------|---------|

研 究 速 報

(p. 37 よりつづく)

道路の外側車線や一般 2 車線道路ではその K 値が 5~7 で、追越流の特徴をもつ内側車線には K 値が 3 ぐらいのものである。自由走行流には 0.5~0.8 秒をトランケートした指数分布、または 4 車線道路の外側車線には $K=2$ のアーラン分布をあてはめたらよいであろう。

またこの結果から容量時の交通流がすべて追従車群となった場合としても、多少のバラツキが残り平均車頭時間 1.7 秒すなわち 2100 台/時が安定した可能容量といえると思う。さらに横浜新道の結果から、限界密度を越えたと追従走行車の平均車頭間隔が 2.3~2.4 秒と大きくなり、交通量が低下することがあらわれている。

次にこの理論分布を応用する上での問題点としては、不連続の観測結果を合わせた分布や、小時間の後半の観

測結果では、適合度が低いことからみて、有意な時間トレンドがある場合、時間範囲に比べて何かの乱れが大きい場合は、均質流といえず適合しない。したがって、何かの入力データとしてこの理論分布を利用する場合、同一の均質流と考えられる時間範囲、すなわち同じ平均値、分散を考えてよい範囲が問題である。確言できないが一応 20~30 分間をとったらよいと思う。このほかにまた、交通量を設定すれば平均値は定まるが、分散は未定である。しかしそれは、応用する道路の条件によって類似道路の観測結果から変動係数を仮定することによって求められる。一応 4 車線の外側車線では 0.8、内側では 1.3、一般 2 車線道路では、1.2 がめやすになるであろう。

(1967 年 9 月 1 日受理)