

(8) ガストレーサー法による小河川の再曝気係数の実測

FIELD MEASUREMENT OF REAERATION COEFFICIENT USING GAS TRACER TECHNIQUE

細川 恭史*

Yasushi HOSOKAWA*

ABSTRACT; Using the new gas tracer technique, the stream reaeration coefficient was measured in the field. Ethylene (C_2H_4) is used as a tracer gas and Rhodamine WT as a dispersion and advection tracer. After the step-type-injection of both tracers, water samples are taken from three recoveries downstream.

The temporal distribution of the tracers are compared and analyzed for the decay rate of the gas tracer. The volatilization rate of ethylene in the flow is estimated by the peak method and the mass method. The mean velocity, the mean depth and the longitudinal dispersion coefficient are also calculated by the results of the dye study. The estimated value of the reaeration coefficient is within a reasonable range and shows good agreement with the predicted values.

The gas tracer technique proves to be very useful for the study of the reaeration coefficient of the shallow streams.

KEYWORDS; REAERATION, TRACER, GAS TRACER, STREAM, ETHYLENE

1. はじめに (ガストレーサー法とは何か)

水系の水質の管理のうち最も基本的なものは、酸素濃度の確保である。河川等の流水の酸素濃度の維持については1920年代の Streeter-Phelps 以来様々の研究がなされてきている。特に河川の再曝気係数の理論・予測については、O'Connor-Dobbins式や村上の式などで一応のまとまりがついたものの、小河川での予測はむずかしく実測の重要性は依然大きい。また、分解速度の遅い有機塩素系化合物は、水系内に蓄積しやすく、その長期的挙動の解析が必要だが、長期的な挙動にとって『ゆっくりとしているが永続する素過程』の1つとして、水面からの揮散が無視しえない。

小河川での再曝気係数の実測や、難分解物の揮散速度の見積りといった今日的問題にとってガストレーサー法はきわめて強力な研究手段である。ガストレーサー法とは、トレーサーとして酸素の代わりに他のガスを用い、このガスの減少より揮散速度を求め、揮散速度係数から酸素の再曝気係数を算定する方法である。ガスをトレーサーとして用いる試みは、米国USGSの手による放射性同位元素でラベルしたクリ

* 運輸省港湾技術研究所

Port and Harbour Institutes, Ministry of Transport

ブトンガスを用いた方法以来の歴史を有する。我国では主に室内実験や小水路での実験例が報告されている。酸素が自然水系中で様々な消費・供給因子を有するのに比べて、適当なトレーサーガスを選べば水表面を横切る移動量のみをとり出して測定できる点に大きな特徴がある。ここでは、①基礎的理論を概観し、②流れのある場でのガストレーサー法の利用、解析方法を述べ、③実河川適用上のいくつかの工夫について提案してみた。ここでは1983年9月に実施した小河川での実測と解析・検討をとりまとめているが、筆者の経験の紹介が今後の関連研究の御役に立てば幸いである。

2. ガス交換と再曝気機構に関する既応の研究（異なるガスで再曝気係数とどう関連づけるのか）

気液の境界面を横切って移動するガスについては、古典的な二境膜理論がある。よく知られているように、薄い気膜・薄い液膜の両境膜内でガスの濃度勾配を考えており、気液の境界面では気膜側の境界濃度と液膜側の境界濃度との間にヘンリーの法則による平衡が成り立っているとしている。両境膜内での拡散によるガスの移動フラックス（N）が定常状況では等しいことと、ヘンリーの法則の成立とを連立させて解き、溶解・揮散を含めガスの移動を次式で説明している。

$$N = K_L \cdot \left(\frac{C_G}{H} - C_l \right) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_l} + \frac{1}{H \cdot k_g} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 K_L は総括ガス移動速度係数、 C_G は気相のガス濃度、 C_l は液相のガス濃度、 H は無次元のヘンリー定数、 k_l, k_g はそれぞれ液側と気側のガス移動速度係数。酸素のように難溶解性ガスは大きな H の値（酸素でほぼ30）をもち、式（2）より、 K_L に対する k_g の寄与が無視できる。 K_L に対する k_l の重要度は、 H の値によって支配されており、 H の値はガスの種類によって異なる。

二境膜理論では、難溶解性ガスの K_L （≒ k_l ）は、液膜での分子拡散係数と膜厚との比で決まってくる。一方、その後展開された更新理論では、分子拡散係数と更新頻度との積の平方根で決まってくる。液膜厚や更新頻度は水表面付近の水理的条件に左右され、分子拡散係数は個々のガスの物性として決まってくるとされている。しかし、同一水理条件下でも各種の難溶解性ガス間の K_L の比は、必ずしも分子拡散係数比の0.5乗もしくは1乗となっている訳ではない。また、ヘンリー定数 H の値が大きく異なるガスでは、式（2）右辺第2項の差異の影響が出てき、 K_L の比が k_l の比とならない（つまり分子拡散係数のみの関数とならない）こともある。

異なるガスの K_L の値の関係は、以上のように、理論的に換算比が定められにくいので、できるだけ実測換算比を用いることが望ましい。現状では、トレーサーとしてのガスの選定では、できるだけ酸素に近い物性を有するもので、酸素との K_L の関係がはっきりしているものを選ぶ必要がある。

3. ガストレーサー法による再曝気係数測定の理論（流れ場での解析方法）

トレーサーの揮散速度と酸素の再曝気係数との関係は前章で見た。ここでは、流れ場でのトレーサーの揮散速度の測定方法を述べる。流水中では、移流・拡散により濃度が場所的、時間的に変化し式（1）では扱えない。流れ場を1次元拡散場とみなせば、トレーサーの溶存濃度（C）の変化は次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} + k \left(\frac{CG}{H} - C \right) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、Dはx方向の乱れによる拡散係数、uは流速、kはトレーサーの揮散速度係数。

染料のようにトレーサーの揮散がなければk=0となる。また、ガストレーサーのうち、大気分圧が無視できるガスであれば右辺第3項のCG=0とみなせ、揮散の項は一次反応型の式（-kC）となる。瞬間投入に対する式（3）の解は良く知られているが、ガストレーサーの投入は瞬間的に行いにくい。ステップ状に投入した時の式（3）の解は、投入時間を τ 、投入時の投入点での初期濃度をC0とすれば次式で表わされる。

$$C = \frac{C_0}{2} \exp\left(-\frac{kx}{u}\right) \left[\operatorname{erf} \frac{x-u(t-\tau)(1+H')}{\sqrt{4Dt(t-\tau)}} - \operatorname{erf} \frac{x-ut(1+H')}{\sqrt{4Dt}} \right] \quad \dots \dots \dots (4)$$

ただし $H' = \frac{2kD}{u^2}$, erf 誤差関数

式（4）がピーク濃度になる時刻tMは、次のとおり。

$$tM = \frac{x}{u(1+H')} + \frac{\tau}{2} \quad \dots \dots \dots (5)$$

そこで、ガストレーサーと同時に、同じ投入点で同時間だけ染料トレーサーを投入し、下流側の採水点x=xでの通過トレーサーの濃度経時変化を考える。流れが卓越している小河川ではH'《1とみなせ、ピーク到来の時間差は極くわずかである。染料とガスのピーク濃度の比は、式（4）より次式となる。

$$(\dot{C}_g / \dot{C}_d)(x) = \exp\left(-\frac{kx}{u}\right) \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $\dot{C}_g, \dot{C}_d$ はそれぞれガス、染料のピーク濃度。

これによりピーク濃度比の対数を流下時間（x/u）に対してプロットすれば揮散速度係数（k）が求められる。これがピーク法である。

各採水点での通過トレーサー量を求め、通過量が流下につれて式（1）に従って減少してゆくとしてkを求める方法が総量法である。総量法は、拡散の効果を無視しており、流下時間が採水点での通過時間に比べて充分長い場合に利用できる。

総量法は、染料トレーサーのデータが不要であるが、流下時間の算定に注意が必要である。いずれの方法でもk値の精度向上のためには、濃度変化の把握が充分な精度でできる限り長い流下距離を取ることが望ましい。Rathbunは、kと流下時間との積が1以下となると誤差が急激に拡大するとしている。

4. 野外での実験方法

対象とした河川は、米国ニューヨーク州キャッキル山地を流下するデラウェア河の支流の1つである。流量は $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であり、近隣の村の下水処理場の処理水の排水口から下流 800mまでを対象としている。採水点は図-1に示す位置に計3ヶ所もうけ、5分毎に採水を行っている。処理場排水口付近は流れがよどみ、河床はシルト混泥質であるが、流下とともにすぐに河床はレキとなっている。河川幅は6mで、水深は浅く、流心で20cm程度であり、水草やコケの付着はほとんどない。

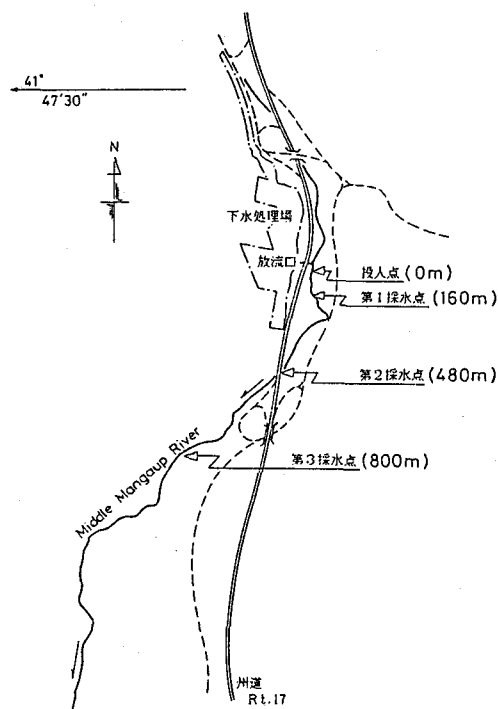


図-1. 調査地点付近図

使用したトレーサーは、染料トレーサーとして蛍光染料ローダミンWT、ガストレーサーとしてエチレン (C_2H_4) である。20℃でエチレンのヘンリー定数は、 $1.02 \times 10^4 \text{ atm}/(\text{mol}/\text{mol H}_2\text{O})$ であり、これは無次元表示すると8となる。1/KL に対する 1/kI の寄与は99.9%程度の難溶性ガスである。酸素再曝気係数との換算比は、詳細な室内実験例があり、再曝気係数の 0.87 ± 0.02 倍とされている。

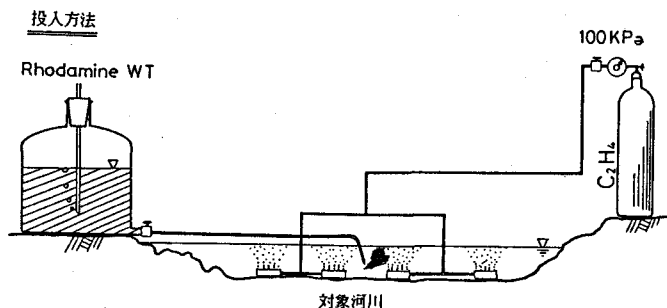
両トレーサーの投入は、ステップ状の投入となるように注意した。染料トレーサーは、マリOTT容器を用い定量投入をはかったが、残量が小さくなると定量性の維持のために下口の弁の操作が必要となった。ガストレーサーは減圧弁を通し定圧を維持し、河床に設けた4基のデフューザーより均一に投入した。

採水は、染料用容器とガス用容器とを区別して実施した。染料用容器は採水後暗所に保管した。ガス用容器は定容量(160ml)のSerum ビンを用い、泡立てぬよう採水後ピペットで20mlを除去し空気スペースとした。その後直ちに気密キャップを施し、冷暗所に保管した。投入・採水の概念図を図-2に示す。

トレーサーの分析は採水後24時間以内に実施している。染料濃度は蛍光強度計で分析した。ガス試料容器は手で激しく混合後静置し、空気スペースと試水とのガス濃度の平衡を促進した。その後空気スペースに直接シリンジ針を差し入れ、水滴を吸入しないように注意して採気し、ガスクロマトグラフ(GC)計を用いて気相濃度を測定した。使用したGC計は、キャリアガスとして大気を用いている簡便型であり、多少感度は落ちるが今回の実験には十分な精度であった。気相濃度から当初の試水中のガス濃度の換算は、ヘンリー定数と空気-試水容積比とから換算係数を算定し、気相濃度に乘じて求めている。

ステップ状の投入は、23分間継続し打切っている。採水は、トレーサー投入後約3時間で終了している。

紫外線をさければ染料の分解はほとんど無視できる。エチレンガスの中での吸着・分解も無視できる。従って、系外への消滅過程は、エチレンガスの揮散のみと考えて良い。



5. 結果の検討

1) 濃度の経時変化

河川水の水温は 17.5°C であった。各採水点での染料濃度の経時変化を図-3に、河川水中のガス濃度の経時変化を図-4に示す。第3採水点では、濃度の立ち上がり部が欠測となっている。図-3、4の横軸は、両トレーサー投入開始時からの経過時間をとってある。

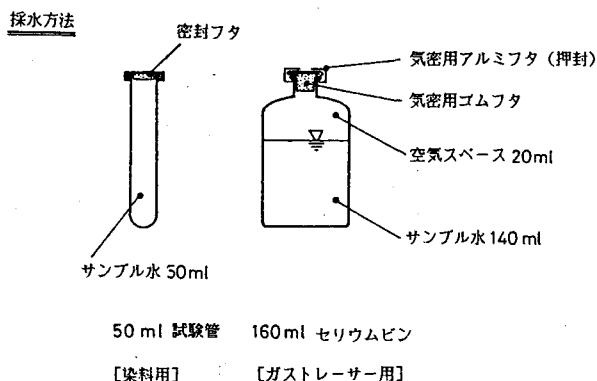


図-2 投入-採水の概念図

図-3では、第1採水点（ $x=160\text{ m}$ ）のピークがステップ状の投入の影響で平坦となっている。第2採水点以降では、とがったピークが見られる。式（4）より明らかなように、各採水点の経時変化曲線は左右非対称となる。また、流下距離がのびるにつれ、尾の部分が長く延びる傾向もわかる。下水処理水の影響と思われるバックグラウンド値 $\langle C_d \rangle$ が見られ、真の染料濃度はこの $\langle C_d \rangle$ 値を除いた濃度としている。図中の t_c は、各採水点毎に求めたセントロイド時刻である。

第1採水点でのピーク濃度 $13.5\mu\text{g/l}$ を用い、投入点での染料投入量 1.86mg/s より河川流量を求めると $0.14\text{m}^3/\text{s}$ となる。別途に流速を測定して求めた流量は $0.11\text{m}^3/\text{s}$ となった。

図-4のガストレーサー濃度の経時変化も図-3と同様の傾向が見られる。第1採水点での平坦なピークは見られない。各採水点のピーク濃度を、採水点の位置に対してプロットすると、図-5のようになる。ピーク濃度は、染料よりガスの方が減少が早いことがわかる。また、図-4にも各点の t_c を記入してある。染料に比して、ガストレーサーの t_c はやや小さく、尾の部分での減少が早いことをうかがわせる。

両トレーサーのピーク濃度（ $\dot{C}_d$, $\dot{C}_g$ ）、ピーク時刻（ t_M ）、通過総量（mass）、セントロイド時刻（ t_c ）をとりまとめて表-1に示す。ここで、通過総量は、河川流量を $0.14\text{m}^3/\text{s}$ として算定してある。

2) 再曝気係数の算定

染料についての t_M の測定結果を用い、式（5）より平均流速（ u ）を算定する。 t_M と x とをプロ

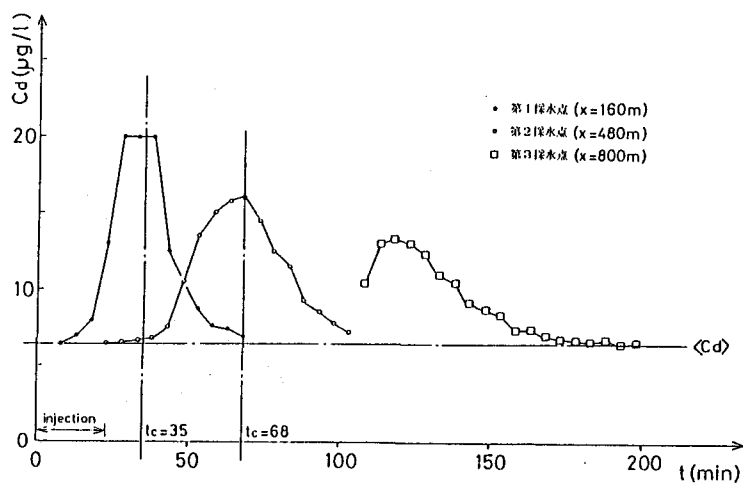


図-3 染料トレーサーの経時変化

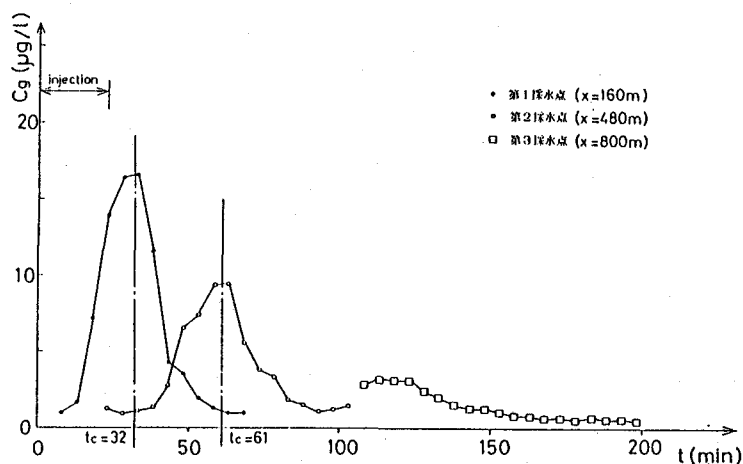


図-4 ガストレーサーの経時変化

ットし傾きを求めると、14.3 cm/sとなる。ガストレーサーについても同様に傾きを求め、式(5)より H' の値を算定すると0.084となる。解析の前堤は、 $H' \ll 1$ であるが、この河川では、積 $k \cdot D$ がやや大きいことをうかがわせる。

ピーク法と総量法とで求めたガストレーサーの揮散速度を表-2に示す。第3採水点での1部欠測のため、総量法は第1～2採水点データにししか適応できなかった。第1～2採水点でのピーク法の値がやや小さいが、揮散速度(k)として15～16/dを得る。 k と t_M との積は、第3採水点で1.2、第1採水点で0.3である。

酸素の再曝気係数は、換算比0.87および温度係数1.024を用いて算定できる。20℃で18～20/dを得る。

また、揮散速度と H' の値と

表-1 トレーサー濃度の測定結果

地点	距離	染料トレーサー				ガストレーサー			
		$\dot{C}_d$	t_M	mass	t_c	$\dot{C}_g$	t_M	mass	t_c
	(m)	(μg/l)	(min)	(g)	(min)	(μg/l)	(min)	(g)	(min)
投入点	0	----	11.5	2.56	11.5	----	11.5	----	11.5
第1採水点	160	13.5	33	2.68	35	16.5	33	3.37	32
第2採水点	480	9.3	68	2.78	68	9.4	63	2.49	61
第3採水点	800	6.6	118	----	----	3.1	113	----	----

からDの値を見積もると、 $D=5.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。

いずれの算定値もほぼ妥当な値である。

3) 予測式との比較

小河川に対して良く用いられるO'Connor (非等方) 式、Tsivoglou (小流量) 式につき、予測値を算定してみる。河床勾配は地図より読みとり $s=3.2 \times 10^{-3} (\text{m/m})$ を得ている。O'Connor式に流心の水深20cmを用いてkを算定すると19.4/dとなる。Tsivoglou 式に流速14.3cm/sを用いると14.2/dと算定される。いずれも、ガストレーサー法に

より求めた値18/dに近い。O'Connor式は、水深の -1.25乗に比例するため、与える水深により算定値が大きく変動する。河川流量と河川幅、平均流速から、平均水深を求めると12.2cmとなり、この値をO'Connor式に用いると $k=36/\text{d}$ となる。一方、Tsivoglou 式は流速、勾配の両者に対して同程度の感度を有している。山地を流下する小河川は、流速、勾配、水深といった水理量が場所的にも季節的にも大きく変動しやすい。小河川に対し、予測式を適用しての k_2 の算定には注意が必要で、正確な再曝気係数の評価には、ガストレーサー法による実測が望ましい。

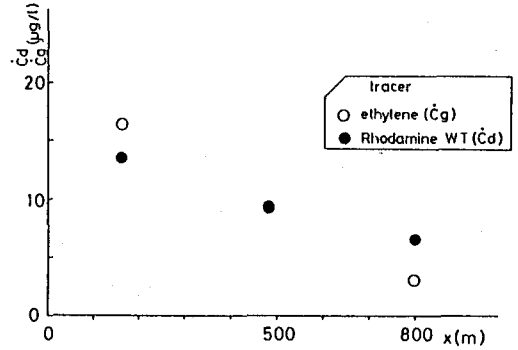


図-5 各採水点でのピーク濃度

表-2 エチレンの揮散速度より換算した再曝気係数
(単位: 1/d)

気体, 温度 手法 使用データ	エチレン 17.5℃		酸素 20℃	
	総量法	ピーク法	総量法	ピーク法
第1～2採水点	14.9	7.8	18.2	9.5
第1～3採水点	----	16.2	----	19.8

(eを底としている)

6. まとめ

ガストレーサーを用い、小河川の再曝気係数を実測した。ここで得られた主たる結論は次のとおりである。

1) 対象河川の再曝気係数として20℃の値で18/dを得た。

2) 酸素と類似の挙動をする難溶性ガストレーサーとしてエチレンが有効である。

3) エチレンの分析には、条件が整えば特殊な気化装置は不要である。また、キャリアーガスポンペを用いない簡易GC計でも解析に耐える精度が確保できる。こうした工夫は、現場での実測の際には役に立つ。

4) 再曝気係数(k)の測定値精度は、投入点と採水点との距離が長いほど良いが、浅い小河川ではk値が大きくなるため、流下時間2時間程度でも有効であった。

5) 浅い小河川の再曝気係数に対し、従来の予測式の適用には注意が必要である。

当実験は、米国マンハッタン大学留学中に実施した。Dr.O'Connor はじめ関係者に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 細川恭史: ガストレーサーを用いた流水の再曝気係数の測定, 港湾技研資料562, 1986年 9月 (印刷中)
- 2) Rathbun, R.E. et al.: Experimental modeling of the oxygen absorption characteristics of streams and rivers, Proc. IAHR 17th Conf., 1977, pp.483-490
- 3) 同著者: Laboratory studies of gas tracers for reaeration, ASCE, 104, EE2, 1978, pp.215-229