

II-23 隧道内の流下方向の乱流拡散係数

(財)日本気象協会北海道本部 正会員 松岡直基
 (財)日本気象協会北海道本部 正会員 八木史郎
 北海道大学工学部 正会員 大谷守正

1. はじめに

乱流運動にもとづく乱流拡散現象は、乱流状態の場合、流体中を輸送される拡散物質によって起こる現象である。これは古くから研究が行なわれているが、乱流運動並びに、拡散機構自体に不明な点が多く、これらの相互作用である乱流拡散現象を解明するための課題は大きい。

このうち、乱流拡散係数は乱流拡散の程度を示すもので、汚染物質の広がりぐわい、水温問題等に必要となる数値である。昭和56年と57年、隧道内における流量観測を塩水速度法を用いて行なう機会を得たので、自由水面をもつ隧道内の流下方向の乱流拡散係数について述べる。

塩水速度法は早くから用いられている方法で、トレーサー(塩水)の流下所要時間から平均流速を求めるものである。相村はこの塩水速度法を用いて、流下方向の拡散係数を求める方法を提案し、自然河川¹⁾と円管実験²⁾に用いている。筆者らも同様の方法を適用して計算をおこなった。

観測をおこなった隧道は、王子製紙株式会社の新別オス発電所と恵庭発電所にあり、両発電所はそれぞれ、尻別川と漁川本流から取水し発電をおこなっている。

2. 塩水速度法について

塩水速度法の原理は、測定区間の上流端で瞬時に塩水を投入し、下流端で電気伝導度を連続的に測定して塩分の到来を検知し、到達時間から平均流速を求めるものである。

電気伝導度は、単位面積を通過し単位長さ当りに示す電気抵抗の逆数で、単位は Ω/cm である。純粋な水の18℃における電気伝導度の値は、 $0.04\mu\text{V}/\text{cm}$ 程度であるが、塩分を加えることによってその値は大きくなる。一般に、河川の上流で数 $10\mu\text{V}/\text{cm}$ の値をもち、下流にいくにつれて汚染され数 $100\mu\text{V}/\text{cm}$ 程となり、河口では海水の混入により数千から数万 $\mu\text{V}/\text{cm}$ になる。

定常等流での乱流拡散基礎式は、次式で表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = A \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

C: 濃度 t: 時間 x: 流下方向の距離 U: 平均流速 A: 流下方向の乱流拡散係数

(1)式を無次元化するに、一次元拡散方程式となり解法が容易になる。

$$\frac{\partial C^*}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 C^*}{\partial \xi^2} \quad (2)$$

ただし $C^* = CQ t_0 / S$ $t/\tau = \tau$ $x/x_0 = \xi$ $A/U x_0 = a$ $x_0 - \tau = \xi$

Q: 流量 S: 投入塩量 x_0 : 測定区間距離 t_0 : 平均到達時間 ($x_0 = U t_0$)

この方程式の解は

$$C^* = \frac{1}{\sqrt{4\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4a\tau}\right) \quad (3)$$

となる。検出口では、 $x = x_0$ であるから $\xi = 1 - \tau$ とおき

$$C^* = \frac{1}{\sqrt{4\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{(1-\tau)^2}{4a\tau}\right) \quad (4)$$

を得る

(4)式に無次元化した拡散係数 a をパラメータとして与え、 C と C_x の関係を図-1に示す。 $C=1$ は平均到達時間の無次元化された値であるから、 a が大きくなると観測される濃度変化のピークは、平均到達時間より前に現われることを示している。今回の観測では a の値は 10^{-3} 程度であり、塩分濃度のピークを平均到達時刻とすることができた。

$C_{x \max}$ となる C を $dC_x/dC=0$ から求め、(4)式に代入し

$$C_{x \max} = \frac{1}{\sqrt{4\pi a(\sqrt{a^2+1}-a)}} \exp\left[-\frac{\sqrt{a^2+1}-1}{2a}\right] \quad (5)$$

を得る。観測で $C_{x \max}$ が得られると、(5)式から a を求め $A=aU\alpha$ によって、拡散係数 A を算出することができ

3. 観測方法

図-2、図-3に尻別オ2発電所・恵庭発電所隧道の位置を示す。両発電所とも河川本流に堰堤を設け、馬蹄形隧道を通して取水している。隧道の形状を図-4に示すが、尻別オ2が恵庭の2倍の規模を有している。

表-1. 隧道の概要

	隧道長	隧道勾配	測区間長
尻別オ2	3300m	1/1500	955m
恵庭	3638m	1/1115	715m

取水された水は取水ゲートから、自由水面をもつ隧道内に設けられた塩水投入口、検出口を通して発電所手前の水槽に到達し、圧力管で発電機へと導かれる。隧道出口にある水槽は沈砂池と余水吐の機能をもっている。発電機の出力は水槽の水位に追従しており、水槽の水位が上昇した場合には発電機の取水量も増加する。また、水槽の水位は流入量が一定になるときは、発電機の取水量によって変動する。したがって、発電機の取水量が流入量に等しくなるような水位に達したとき、水槽の水位は一定となる。このような条件下で取水ゲートを操作し、各隧道に対し9回の設定流量を設け、水位、発電量が安定したあと観測をおこなった。

現地観測は、尻別オ2発電所が1981年10月17日、恵庭発電所は1982年10月28日に実施し、1回の設定

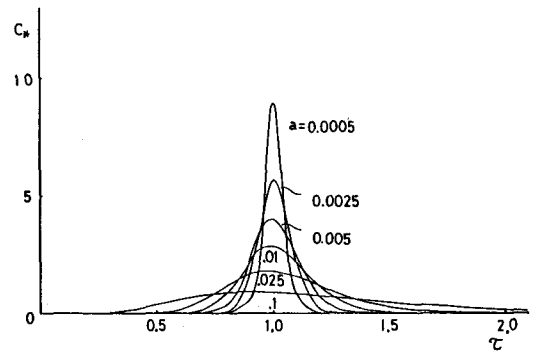


図-1 Cと C_x の関係

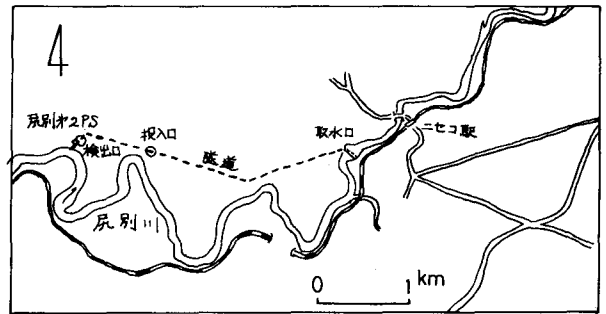


図-2 尻別オ2発電所隧道位置図

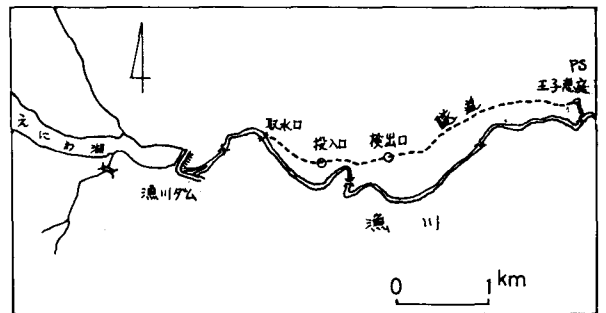


図-3 恵庭発電所隧道位置図

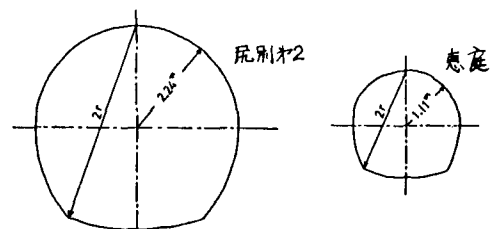


図-4 隧道の断面形状

流量の観測におよそ1時間を要した。測定区間は隧道に開口部のある区間という制約から、尻別川では隧道後半から出口まで、恵庭では前半部に設定した。

実際の観測は次の手順でおこなった。まず投入ロブドラムがんに食塩を入れて溶解し塩水を作る。そして瞬時に塩水を投入し、同時にストップウォッチを作動させる。換出口では隧道の中央に電気伝導度計の感部を固定し、電気伝導度の値を自記

記録計に記録させる。このようにして得られた自記記録を平滑化し、塩水投入時から記録のピークまでの時間を到達時間とし、測定区間の距離と到達時間から測定区間の平均流速を求めた。なお、投入口と換出口では2分～5分おきに水位観測をおこない、これから流水断面積も求め平均流速を乗じて流量を算出した。

4. 観測結果

図-6に換出口における電気伝導度の記録例を示す。これは恵庭発電所4回目の記録で、食塩75kgの投入に対し、7.5m下流の換出口で6分4秒後にピークが出現した例である。したがって、平均流速は1.81m/sとなる。

塩分濃度の変化量は、電気伝導度のピークとバックグラウンドの値をNaCl濃度に換算し、その差から求めた。この方法は直接塩分濃度を測定していないので、採水して値を比較しなければならない。しかし、ピーク時を正確に採水することはおずさしく、今回はおこなわなかった。

観測結果から、取水ゲート下流の水位と流量の関係、及び平均流速と流量の関係を、図-7～図-9に示す。

図-9によると、2つの隧道の流速と流量の関係は、異なった傾向にある。そこで、圧力管が成立する $Q=CU$ と、円管にマンニングの式を適用して導かれる $Q=CU^{3.25}$ (円管が満水に近づくとき成立しない) の直線を図中に示した。観測値それぞれがこれら直線の傾きにほぼ等しいことから、両隧道とも自由水面をもちながら、尻別川では圧力管に近い状態であることがわかる。これは発電所に近い所に、測定区間を設定したためと考えられる。

2つの隧道の各設定流量に対する測定値と、それらから得た流下方向の拡散係数値を表-2に示す。図-10は平

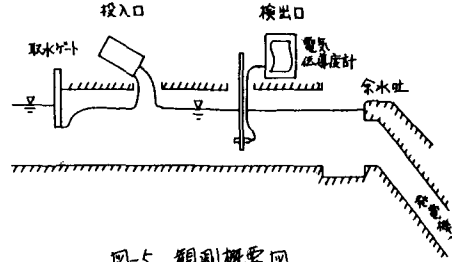


図-5 観測概要図

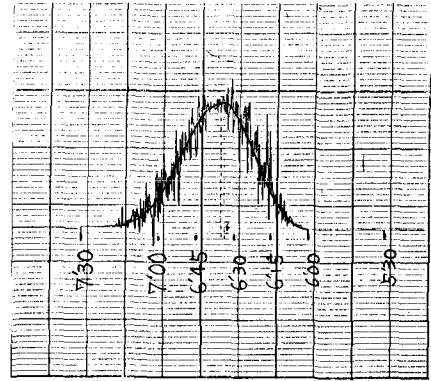


図-6 電気伝導度記録例

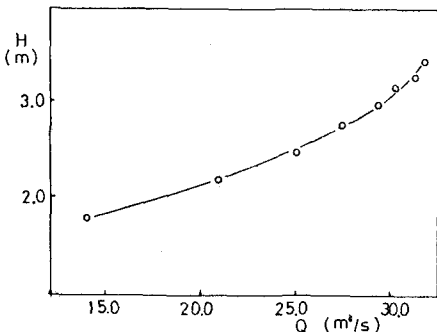


図-7 尻別川 H と Q の関係

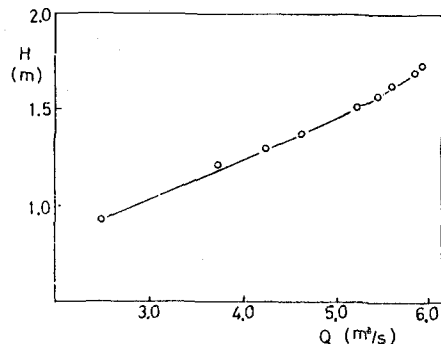


図-8 恵庭 H と Q の関係

表-2 両隧道における測定値

投入口 断面位置	平均 断面積	到達 時間	平均 流速	投入 流量	塩分 増加量	拡散 係数		
m	m ²	s	m/s	$\times 10^3$ kg/s	$\times 10^{-3}$ g/l	$\times 10^4$ cm ² /s		
尻別才2発電所隧道								
1	3.83	3.98	14.659	992	0.96	30	24	0.58
2	3.83	3.95	14.796	673	1.62	30	22	1.00
3	3.87	3.90	14.792	863	1.70	30	21	1.33
4	3.78	3.95	15.051	523	1.83	30	22	1.25
5	3.82	3.91	15.056	470	1.75	45	31	1.52
6	3.81	3.88	14.995	472	2.02	45	30	1.70
7	3.83	3.86	14.995	457	2.09	45	27	2.16
8	3.87	3.87	15.073	452	2.11	50	34	1.69
9	3.81	3.90	15.025	488	1.76	50	30	1.86
恵庭発電所隧道								
1	0.81	0.94	1.590	459	1.56	100	100	0.68
2	1.03	1.24	2.162	417	1.71	75	59	0.67
3	1.22	1.44	2.593	404	1.77	75	45	0.83
4	1.31	1.59	2.852	394	1.81	75	39	0.92
5	1.39	1.68	3.032	387	1.84	75	38	0.97
6	1.46	1.74	3.166	388	1.84	75	38	0.82
7	1.47	1.76	3.196	387	1.85	75	37	0.85
8	1.36	1.64	2.958	391	1.83	75	39	0.88
9	1.11	1.37	2.394	407	1.76	75	47	0.86

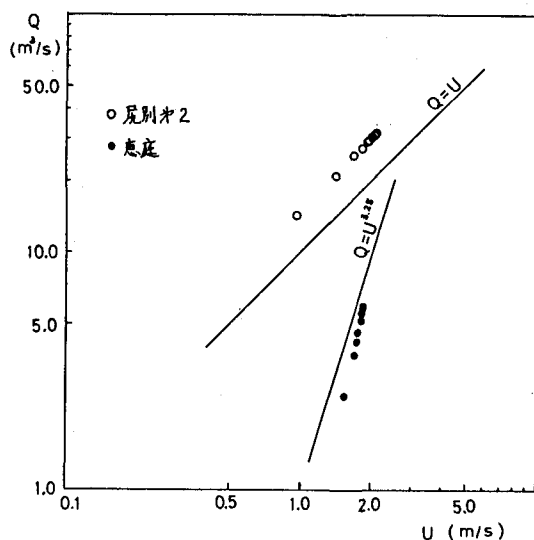


図9 平均流速と流量の関係

均流速と拡散係数との関係であるが、両隧道とも流速が大きくなるほど拡散係数も増加し乱流状態の発達を示している。しかし、同じ流速に対して拡散係数は恵庭より尻別才2が大きくなっている。この理由として次のことが考えられ

- ①尻別才2は自由水面を持ちながら、下流境界条件から圧力管に近い状態であり、見かけの拡散係数が大きくなる。
- ②隧道断面の大きさの違い
- ③隧道の底路が湾曲している流下方向の形状の違い

これら要素が複合して、このような差ができたと思われる。

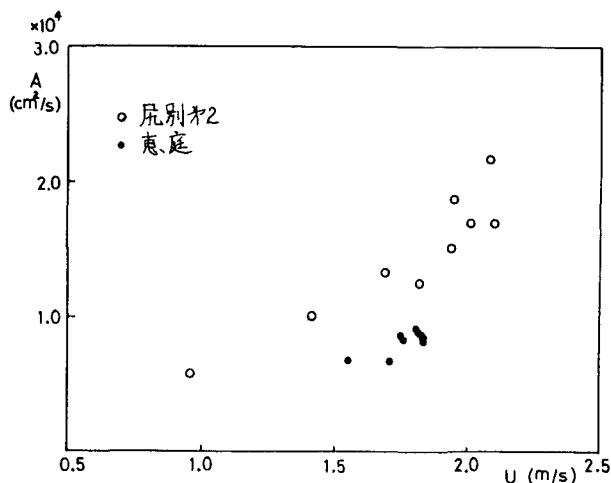


図10 平均流速と流下方向の拡散係数

5. おわりに

同一の測定手法で、スケールの違う2本の隧道の流下方向の乱流拡散係数を算出したが、測定条件等の制約から、十分な比較はおこなえなかった。今後検討を続けるとともに、機会があれば資料の蓄積もおこないたい。

なお、観測にあたっては王子製紙株式会社動力部、並びに尻別発電所、恵庭発電所の方々の多大なる御協力を得た。また、観測に際し北工学部理学オー講座の助言も受けた。記して厚く感謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) 柏村正和：空知川の縦の乱流拡散について，北大地球物理学研究報告，才5号，1957年
- 2) 柏村正和，石崎健二：円管内の縦拡散の研究（才1報），北工学部研究報告，才43号，1967年
- 3) 八鍬 功，大谷守正：隧道内を流下する流れの水温度変化（才2報），北工学部研究報告，才69号，1973年