

溪流における溶存酸素の乱流拡散と混合特性

Transfer and Mixing Process of Dissolved Oxygen by Turbulent Diffusion in Natural Streams

北村 泰一
Hirokazu KITAMURA

Abstract

The supply of oxygen into water by reaeration and subsequent transfer process is one of the most significant self-purification processes in natural streams. Thus, the purpose of this paper is to investigate the transfer process of dissolved oxygen by turbulent diffusion in a natural stream.

Velocity during 300 seconds with 1 second interval at the maximum-velocity point was measured and analyzed based on the Taylor's turbulent-diffusion theory by the assumption that Lagrange's velocity in natural streams depends on the velocity of flow direction in each section.

The results are summarized as follows: 1) the strongest correlation is observed between velocity and the strength of turbulence, 2) the turbulent diffusion process is accelerated by subsurface flows which consist of the periodical long wave and the short wave of auto-correlation function, and 3) a clear and accurate linear relationship exists between turbulent diffusivity and mixing rate depending on the length of residence time.

Auto-correlation function of subsurface flows and residence time are strongly influenced by discharge and topographical conditions such as water depth, river width and head. The turbulent diffusion process is, therefore, thought to be, the multiple effects of these factors in natural streams. Consequently, conservation and effective use of the self-purification process in natural streams is possible when erosion control techniques incorporate these aforementioned factors skillfully into minor bed fishway and so on.

Key Words: stream environment, reaeration, turbulent diffusion, Taylor's theory, mixing characteristics

1. はじめに

再曝気は自然溪流における自浄機能の1つと見なされ、砂防工事においても、再曝気による大気から水中への酸素の供給およびその後の輸送過程を正しく評価し、溪流環境整備に反映させなければならない。

筆者は前報¹⁾において、自然溪流の淵では落下波に伴う再曝気の進行によって溶存酸素濃度分布は流心部で高く沿岸部で低いものとなるが、地形的要因などある条件下では沿岸(横断)方向への酸素の輸送が卓越し流心部と沿岸部での溶存酸素濃度の差が小さくなり、濃度分布がほぼ一様になることを指摘し、この原因として、乱流拡散による物質輸送に類似する現象が自然溪流の淵においても生じている可能性があると推論した。

以上のような経緯のもとに、本研究は自然溪流の淵を乱流場と見なし、再曝気によって溪流水中に供給された酸素の沿岸方向への輸送過程とそれを支配する要因を明らかにすることを目的としたものである。

本研究を行うにあたり、労を惜しまず現地取調に協力

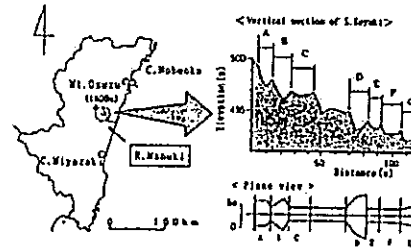
* 九州大学工学部

して頂いた九州大学水士保全学研究室の祖父江功昌君、井岡伸充君、渡部律子さん、友利美希さんに深く感謝の意を表します。なお、本研究は文部省科学研究費補助金(基礎研究(CX)2)07660204)によるものである。

2. 研究対象溪流の概要

本研究で対象とした溪流は、前報と同じく宮崎県中部に位置する尾鈴山(標高1,405 m)を源として日向灘に流入する名賀川の上流域の1支流ケヤキ沢の一部区間(流域面積5.94 km²; 区間長130 m, 標高差9 m, 平均河床勾配1/14; 図-1)である。ケヤキ沢流域一帯は新第三紀石英安山岩を基岩とし、シイ、タブ、ツガ、モミを主体とする天然林やスギの人工林に覆われ、特に上流は尾鈴山瀑布群として天然記念物に指定されている大小の滝が連続する清流であり、砂防治山施設はない。研究の対象とした区間は、ケヤキ沢と名賀川合流点より約200~330 m上流に位置しており、対象区間の川幅は3~10 mで、基岩や巨礫から成る1 m前後の、stepとpoolが連続したいわゆる「階段状河床形態」(以下、落ち込み地形)が10~20 m間隔で分布している。この落ち込み地形によ

北村: 溪流における溶存酸素の乱流拡散と混合特性



Classification of investigated sections

Section	Stream size (m)	Distance (m)	Depth (m)	Classification
A	60	1.8	1.8	pool
B	58	2.0	2.0	pool
D	85	2.2	2.2	pool
C	56	2.0	2.0	pool

図-1 対象溪流の位置と各 Section の比較
Fig. 1 Site location of Nanuki River and comparison of investigated sections

て対象区間は A~G の 7 Section に区分できるが、このうち A, B, D, G は最大水深 1.5~2.2 m の淵で、C, E, F は最大水深 0.5~0.7 m の荒瀬である。

3. 研究方法

3.1 乱流場における物質移動の考え方

水理学的には、流れのレイノルズ数が 4×10^4 を超えると流れは完全な乱流状態になるが²⁾、川幅や水深、河床勾配が一様でなく様々な径長の礫が点在する自然溪流は、粗さのレイノルズ数が 70 以上となる完全相面乱流領域として定義され、すべての箇所が乱流場とみなされる。乱流場では分子拡散よりもはるかに速い速度で物質は拡散するため、溪流水中に供給された酸素も乱流拡散により周辺に輸送されるものと推定される。

乱流場における物質移動については、Taylor³⁾が乱れを連続的な偶然量と考え、乱流場を記述するために 2 地点における速度間の相関関係と等方向性の過程を導入し、1個1個の粒子の追跡に基づいた確率過程論の観点から乱流拡散を論じている。すなわち、流体の流下方向を x 軸、その水平方向と直角に y 軸をとり、x, y 方向の流速を U_x, U_y 、その時間平均を $[U_x], [U_y]$ 、乱流成分を U_x', U_y' とすると、時間 $t=0$ で $y=0$ にあった流体粒子が y 方向に運動するとき、その位置は

$$y(t) = \int U_y(t) dt$$

で示される。ある時間ある場所での流速は、一般にある時間の間の平均値とそれからの偏差である変動速度(乱流成分)から成り立っているので、 $U_y(t) = [U_y(t)] +$

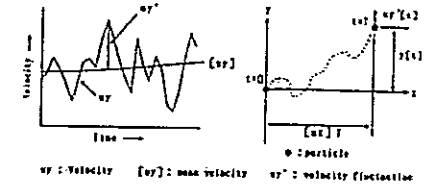


図-2 乱流の速度変動と流体粒子の移動
Fig. 2 Movement of particle in flow caused by velocity fluctuation

$U_y'(t)$ と書き表せる(図-2)。したがって、流体粒子が時間 $t=T$ までに y 方向に移動した距離 $Y(T)$ は、

$$Y(T) = \int_0^T U_y(t) dt = \int_0^T U_y(t - \xi) d\xi \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここで、 $U_y'(t)$ は流体粒子が観目している地点 A に移動したときの流速の乱流成分であり、 $U_y'(t - \xi)$ はその粒子の ξ 時間以前の時点での乱流成分である。従って、 $Y(T)$ の広がりを表す統計量 $[Y(T)^2]$ の時間変化率を求めると、

$$\frac{d[Y(T)^2]}{dt} = 2[U_y(t)] \int_0^T U_y'(t - \xi) d\xi \\ = 2 \int_0^T [U_y(t) U_y(t - \xi)] d\xi = 2[U_y'^2] \int_0^T R_y(\xi) d\xi \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $R_y(\xi)$ は 1 つの流体粒子を追跡したときの自己相関(Lagrange 相関)であり、等方向性の一様な乱流場を想定すると、

$$R_y(\xi) = \frac{[U_y'(t) U_y'(t - \xi)]}{[U_y'^2]}$$

として定義されるものである。

一方、ランダム運動による粒子の拡散係数 D_t は移動距離 $Y(T)$ と平均流速 U_y の積として表されるので、

$$D_t = [Y(T) \cdot U_y] = [Y(T) \frac{dY(T)}{dt}] \\ = \frac{1}{2} \left[\frac{dY(T)^2}{dt} \right] = \frac{1}{2} \frac{d[Y(T)^2]}{dt} \dots \dots \dots (3)$$

(2), (3)式より

$$D_t = [U_y'^2] \int_0^T R_y(\xi) d\xi \dots \dots \dots (4)$$

よって、(4)式で表される D_t が乱流場における物質の広がりを示す尺度、すなわち乱流拡散係数となる。

3.2 流速・溶存酸素濃度の測定方法

3.2.1 流速

前述の Taylor の乱流拡散理論は、大気中における煙霧の乱流拡散から導かれたもので自然溪流の流れに適用された例はないが、実際の乱流構造や乱流による物質移

動現象を十分に反映していると考えられるので、本研究では Taylor の乱流拡散理論をもとに考察をすすめた。

ただし、Taylor 理論は個々の流体粒子の経路をたどるもので、時間経過に対応した個々の粒子の流速を問題としているが、このような Lagrange 的流速成分は測定が困難である。自然渓流の類では地形的な影響も含めて流速・流向が場所と時間によって3次元的に不規則に変動し、これによって乱流拡散が進行するものと思われるが、流下方向への流速に対して深岸(横断)方向への流速は十分小さく、しかもその強さや方向は主流に支配されている。したがって、本研究では主流に対して水平方向に垂直な方向での流体粒子の Lagrange 的流速成分は、流の最大流速地点における主流に相関があるものと仮定し、その地点での流速を測定の対象とした。

ここで、実際の流の流れを代表している流速として、どの地点の流速を対象とするかを明らかにしなければならぬ。対象区間において、流下方向にほぼ1m間隔で観測点を設定し各観測点の水深10cm毎の20秒間平均流速の分布の一例をみると(図-3)、落下部から2m地点までは落下流の影響を受けて流速も大きく、かつ深部にまで流速分布が認められるが、それより下流になると最大流速は前者2地点と比較してはるかに小さくなり、河床の凹凸や反転流の影響により、流速が認められる範囲は水面付近に限られるようになる。したがって、対象区間では落下部から2m以内の流速が周辺の流れに大きく影響しその区間を代表していると考えられるので、流(Section A, B, D, G)の落下部から1m地点(Point-1)と2m地点(Point-2)を流速測定地点とした。測定は各 Point で水面から10cm間隔で行った。

また、本研究では乱流拡散の強さと溶存酸素の輸送との関連を明らかにすることを目的としているため、少なくとも大気から水中に取り込まれた酸素が溶存酸素となって溪床まで輸送される時間が流速測定の遅延時間として必要となる。ここでは、落下流によって形成された

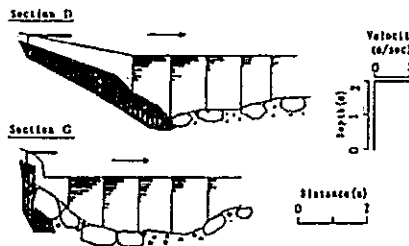


図-3 流下方向における流速分布の一例
Fig. 3 An example of the progression of vertical distribution of velocity at 10 cm intervals along the flow direction

気泡からの酸素吸収の大部分は気泡形成と同時に起こることが実験的に確かめられており、特に当該区間においては流岸方向への酸素の輸送は滞留時間300秒を超えるとほぼ終了することが明らかにされていること¹⁾から、流速測定の遅延時間を300秒、測定間隔を1秒とした(横川ウエザック社製の電田流速計(精度:標示値の±1%+1cm/sec、測定範囲:0~5m/sec)を使用)。

3.2.2 溶存酸素濃度の測定と再曝気の評価方法

再曝気による2地点間の酸素移動を示す指標として、前報¹⁾で提示しその妥当性が確かめられた総括酸素移動係数を、本研究でも採用した。すなわち

$$R = \frac{X^* - X_d}{X^* - X_u} = \exp\left[-\frac{(KL \cdot A)_{or}}{Q}\right] \dots\dots\dots(5)$$

ここに、(KL·A)_{or}: 渓流における総括酸素移動係数

Q: 流量 (m³/sec)

X*: その水温での飽和溶存酸素濃度 (mg/l)

X_d: d地点の平均溶存酸素濃度 (mg/l)

X_u: u地点の平均溶存酸素濃度 (mg/l)

R: 上流部に対する下流部の酸素不足量比

さらに、流下方向(u地点→d地点)での総括酸素移動係数 (KL·A)_{or1} とともに、溶存酸素の横断方向への輸送を示す深岸方向(u地点→s地点)での総括酸素移動係数 (KL·A)_{or2} も求め、両者の比を流における溶存酸素の混合比とした(図-4)。

3.2.3 測定期間および測定回数

測定は、1996年7月30日~9月6日の期間において、Section A, B, Dで3回づつ、Section Gで5回行った。今回の調査は、水温が上昇する夏期に行ったが、これは水温の上昇に伴う飽和溶存酸素濃度の低下が再曝気

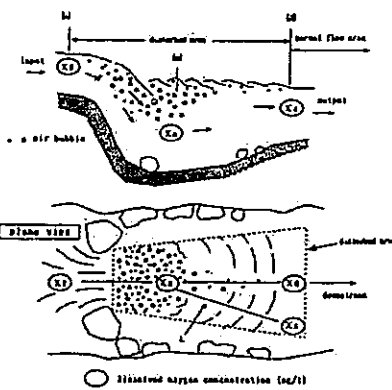


図-4 溶存酸素濃度の測定方法
Fig. 4 Measurement method and sampling points of dissolved oxygen concentration

を促進する1つの要因であり¹⁾、当該区間においても同様な傾向がこれまでの調査で明らかにされているからである。

4. 流における乱流拡散

(4)式から乱流拡散係数を評価する場合、拡散時間 T の設定の仕方によって数値が変化すると考えられる。ここでは、当該区間においては、流の容積を流量で割った値として定義する滞留時間が溶存酸素の流岸方向への移動の度合いと関連していることが明らかにされていること¹⁾から、T=滞留時間として以下の解析を求めた。

4.1 流速と乱流拡散

各測定時における流量、各 Section での Point 別の最大流速と平均流速(5分間平均流速)、最大乱流拡散係数、平均乱流拡散係数および総括酸素移動係数を、表-1に示す。ここで、5分間平均流速と平均乱流拡散係数は各水深毎で得られた結果を平均したものである。当該流域では、1996年8月7日~15日にかけて台風12号の停滞による降雨(総雨量587mm; 神門観測所)が続いたため、8月16日には当該区間としては非常に大きい流量(5.762 m³/sec)が記録され、これ以降は漸次減水している。

今回の測定では、水面から河床までの全層で流速が観測されたことはなく、流量規模や各 Section の地形的な特徴に影響され、水面付近で流速が観測された場合や河

床付近で観測された場合などが確認された。図-5に、各水深毎の乱流拡散係数と流速(5分間平均流速および最大流速)との関係を整理した。図-5から、各 Section において乱流拡散係数は平均流速よりも最大流速と強い関連性があり、Point-1でその傾向が著しい。

さらに、各測定時におけるそれぞれの Section において、最大流速と最大乱流拡散係数が観測された水深を Point 別に示すと図-6(a)のようになり、最大流速は水面付近で、また最大乱流拡散係数は水深20cmより深い部分で記録されることが多いことがわかる。その傾向は Point-2で明確で、特に最大乱流拡散係数の半数は水深50cmよりも深い部分で記録されている。また、図-6(b)には最大流速が生じた水深と最大乱流拡散係数が観測された水深との差を示したが、Point-1では、両者の水深は概ね一致しており、一致しない場合でも最大流速が記録された水深付近(±10cm)で乱流拡散係数も最大値を記録している。しかしながら、Point-2ではこのような関連は明確ではなく、最大流速が記録された水深と最大乱流拡散係数が記録された水深は必ずしも一致しない。

なお、Point-1とPoint-2の乱流拡散係数の関係をもとらつきは見られるが、Point-D, Gにおいては比較的高い相関関係(相関係数0.47)が認められた(図-7)。乱流場における2地点間の流速の相関は、2地点間(Point-1とPoint-2)の距離が乱流(渦)が生じている範囲よりも小さい場合は両者の間には高い相関が存在す

表-1 観測結果の総括
Table 1 Comparison of sampling results and calculated values

date	section	Q (m ³ /sec)	Point-1				Point-2				Overall oxygen transfer coefficient (KL·A) _{or1} (KL·A) _{or2} (m ² /sec)	Temp (°C)	
			Velocity (m/sec)		Turbulent diffusivity (m ² /sec) ²		Velocity (m/sec)		Turbulent diffusivity (m ² /sec) ²				
			max	mean	max	mean	max	mean	max	mean			
1996.7.30	A	0.939	1.82	0.57	0.8839	0.1539	0.81	0.14	0.2361	0.1392	-1.6598	-1.6598	20.2
1996.7.30	B	0.939	2.06	0.68	0.8151	0.2403	1.40	0.53	1.5087	0.5440	-0.3782	-0.3782	20.4
1996.8.5	G	0.811	0.70	0.35	0.2058	0.1247	0.58	0.35	0.1281	0.0376	0.1419	0.0683	20.9
1996.8.16	G	5.762	2.41	1.23	2.3883	0.7626	1.70	0.40	0.8366	0.5790	10.5918	0.8000	18.4
1996.8.19	D	4.432	3.36	1.57	7.2123	3.4464	2.02	0.92	0.6775	0.1757	1.2222	1.2222	18.7
1996.8.19	G	4.432	1.86	1.23	1.4368	0.4682	1.51	1.06	0.3448	0.1372	2.4034	1.6731	18.9
1996.8.20	A	2.192	1.30	0.68	3.9701	1.2647	0.48	0.16	0.1120	0.0472	0.0000	-0.6196	18.5
1996.8.20	B	2.192	2.61	1.56	2.4077	0.8671	1.30	0.15	0.9228	0.4100	2.8049	2.2991	18.9
1996.8.23	D	1.200	0.93	0.64	0.4140	0.0903	1.17	0.40	1.1806	0.7053	1.7535	0.5815	19.1
1996.8.23	G	1.200	1.81	0.97	2.9226	1.0300	0.94	0.67	0.3508	0.1043	1.4134	1.4134	19.4
1996.9.5	D	0.766	0.89	0.63	0.0054	-0.4084	0.40	0.19	0.0010	-0.0336	0.3401	0.0967	19.0
1996.9.5	G	0.766	1.20	0.88	0.0539	-0.0179	0.53	0.37	0.1845	0.0447	0.3579	-0.2429	18.6
1996.9.6	A	0.558	0.53	0.16	0.4225	0.0249	-	-	-	-	0.0000	-0.1986	18.6
1996.9.6	B	0.558	1.38	0.80	0.1272	0.0369	0.73	0.51	0.0564	0.0091	0.1031	0.0643	18.6

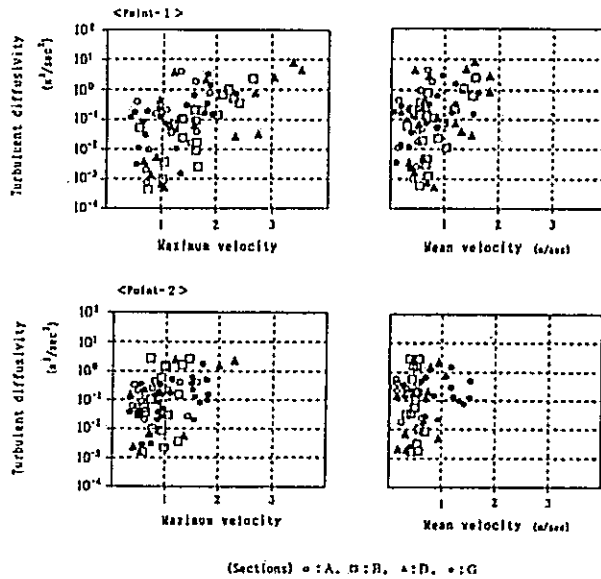


図-5 各水深層の流速と乱流拡散係数との関係
Fig. 5 Relation between velocity and turbulent diffusivity at each measured point

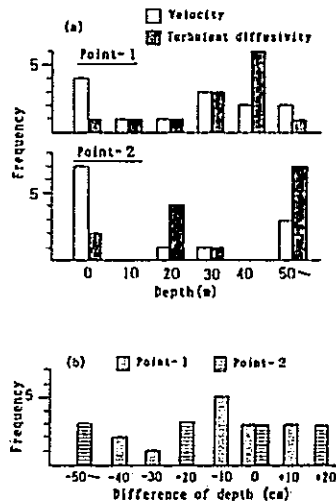


図-6 (a)最大流速、最大乱流拡散係数の水深別発生頻度と
(b)水深差(最大流速地点-最大乱流拡散地点)の頻度
Fig. 6 Distribution of maximum velocity and maximum turbulent diffusivity in the vertical direction and difference of depth between maximum-velocity point and maximum-turbulence point

流速成分は淵の主要地点の流れに支配されるという前述の仮定を裏付けているものと考えられる。しかしながら今回の測定方法では、Point-1の流速とPoint-2の流速は同時に測定されたものではなく、両者の測定には時間的なずれがあり、しかもずれの度合いが測定時によって異なっている点を留意しなければならない。

4.2 乱流拡散の強さの2地点間の比較

自然渓流での再現性は、流水に投入された粒子が分散していく過程に類似しており、両者の特性は流れのレイノルズ数(以下レイノルズ数)に関係する。そこで、5分間平均流速を用いて各観測時におけるレイノルズ数を水深毎に求め乱流拡散係数と比較した(図-8)。

今回の調査では、レイノルズ数は概ね $10^4 \sim 10^5$ 、乱流拡

散係数は $10^{-3} \sim 10^1$ の範囲に認められるが、Section D, Section Gではレイノルズ数の増加に伴って乱流拡散係数も増大するという関係が認められるのに対し、Section A, Section Bでは両者の関係は明確ではなく、その傾向はPoint-2で著しい。この原因としては、後述するように淵における物質輸送に影響する地形的要因の違いがあげられる。また、乱流強度(変動速度の2乗平均の平方根)と乱流拡散係数との関係は図-9のように示され、Point-2の乱流強度の分布はPoint-1の約2分の1に相当している。したがって、Point-2では乱れの強さがかなり相殺されていることがわかる。この点については、ほとんどの場合において乱流拡散係数の最大値がPoint-1で記録されていることから裏付けられている。

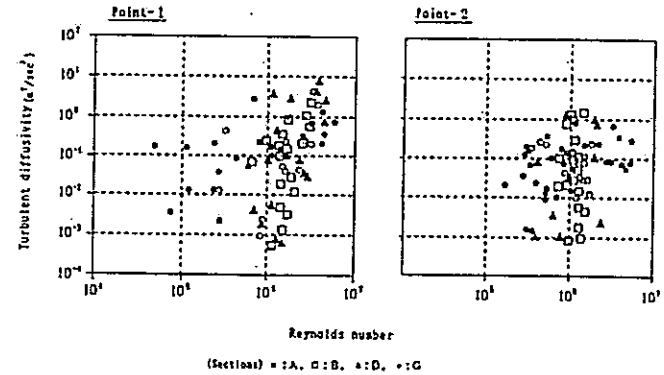


図-8 レイノルズ数による乱流場の比較
Fig. 8 Turbulent diffusivity versus Reynolds number of flows at each measured point

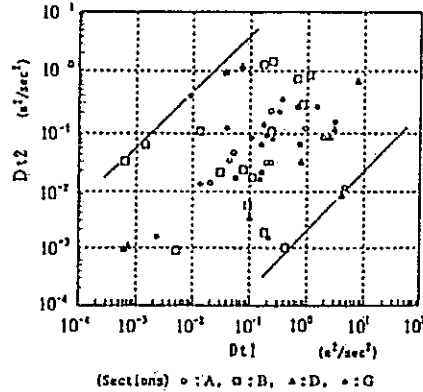


図-7 Point-1とPoint-2の乱流強度係数の関係
Fig. 7 Correlation of turbulent intensity between Point-1 and Point-2

ることになり、このような相関関係は Euler 相関¹⁾に代表されるように乱流の規模や渦の寿命の尺度になる。このため、Point-1とPoint-2との間にある程度の相関があることは十分に予測されたことであり、これは、横断方向への流速に比べて流下方向への流速が十分に大きい渓流においては、淵に投入した流体粒子の Lagrange 的

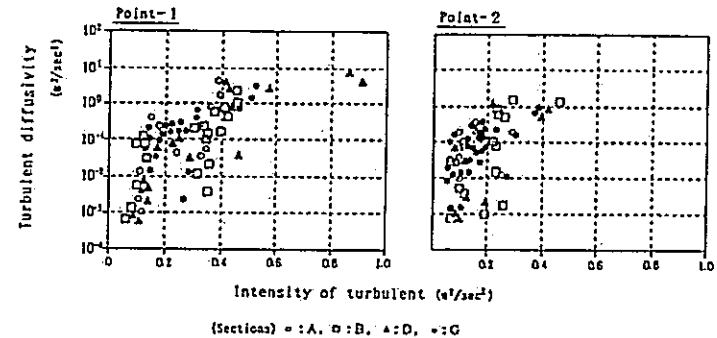


図-9 乱流強度の比較
Fig. 9 Comparison of the intensity of turbulent between point-1 and point-2

5. 考察

5.1 乱流拡散の尺度

以上のように、当該区間では乱流拡散係数が最大流速と強い相関関係にあり、ほとんどの場合、Point-1において乱流拡散係数の最大値が記録されている。そこで、Point-1における最大流速と最大乱流拡散係数、および平均流速と平均乱流拡散係数との関係を図-10に整理した。

Point-1では、流速と乱流拡散係数との間には明確な相関関係が認められるが、特に最大流速と最大乱流拡散係数との関係が、より幅広い範囲の中で明確な相関を示している。したがって、当該区間における乱流拡散現象は、Point-1(落下地点から1m程度の地点)における最大流速と最大乱流拡散係数を指標として説明できる。

5.2 流速の自己相関と乱流拡散の度合い

淵における流れの強さや同期変動の特徴と乱流拡散との関連性を知るために、対象区間において最も規模の大きいSection Dを対象として、乱流拡散係数が最大となった8月19日と最小となった9月5日のPoint-1における最大流速、平均流速、乱流拡散係数、および5分間流速の自己相関係数を水深毎に整理した(図-11)。

乱流拡散が進行した8月19日についてみると、流速は水面〜水深10cm付近に3m/secを超える強い流れが認められ、河床に近づくにつれて減少している。また、乱流拡散係数は流速と同様に水面〜水深10cm付近で非常に大きい値を示し、水深30cm地点で一時的に小さくなっているほかは、流速が存在する部分のほぼ全層にわたって強い乱流拡散が進行している。この時の自己相関をみると、水面には、約20秒の周期性を示す短い周期波と、水深40cmでみられるものと同様な約150秒の周期性を持つ大きい周期波とが複合したパターンが認めら

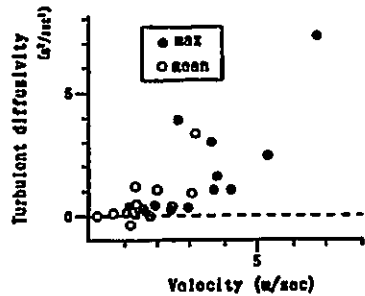


図-10 Point-1における流速と乱流拡散係数の関係
Fig. 10 Relation between velocity and turbulent diffusivity at Point-1 in each section

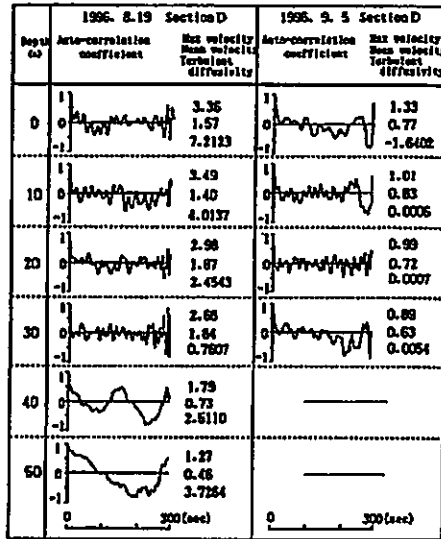


図-11 流れの自己相関パターンの水深毎の変化と乱流拡散の強さの違い
Fig. 11 Comparison of the strength of turbulent diffusion based on the pattern of auto-correlation coefficient transition in the vertical direction

れ、その後は河床に近づくにつれて短い周期は徐々に不鮮明になっていく。一方、乱流拡散係数が小さい値を示した9月5日についてみると、流速は水面で大きく水深とともに減少しているが、乱流拡散係数は8月19日のものとは異なり、水面で小さく水深の増加に伴って増大している。自己相関も、水面や水深10cm地点では10~30秒の周期波は認められるが、水深の増加とともにノイズとの識別が難しくなり、水深によってはその周期波が持続されることはなく、短い周期波と長い周期波とが複合したパターンも認められない。

8月19日において長い周期波が記録された理由としては、流速が遅いことがあげられる。すなわち、前述のように乱流拡散係数と流速の間には明確な関連があり流速が遅いほど乱流拡散係数は大きくなるが、これは流速方向(落下方向に対して水平方向に直角な方向)への波の伝播が促進されることを意味している。流れの方向と波の伝播方向とが一致している場合は波長がほぼ一定の波長が観測されるが、両者が一致せずに傾いている場合は、波長間隔が長くなるためより波長の長い波として観測される。本研究においても、乱流拡散係数と流速の最大値は8月19日に記録されている。

今回の測定では、大きい乱流拡散係数が記録されたほ

とんどのケースにおいて、8月19日と同様な短い周期波と長い周期波が複合したパターンの存在が認められ、強い乱流拡散が生じていることが観測された。従って、再曝気によって水中に供給された酸素が乱流拡散によって輸送されるためには、水面の激しい擾乱に加えて、短い周期波と長い周期波が複合した自己相関のパターンをもつ流れを必要とすることが推測される。

5.3 渓流における混合特性

自然渓流において、流心部と流岸部での溶存酸素濃度差が小さくなり濃度分布がほぼ一律になるのは、乱流拡散による混合が生じた結果に他ならない。そこで、再曝気により水中への酸素の供給が生じたケースを対象として、落下方向(u地点→d地点)での総括酸素移動係数(KL・A)_{or1}と流岸方向(u地点→s地点)での総括酸素移動係数(KL・A)_{or2}との比を淵における溶存酸素の混合比とし、乱流拡散係数との関連を調べた。

図-12には、その結果が示されている。この図から明らかのように、上層の方法で定義した混合比と乱流拡散係数との間には、各Section毎に明確な直線関係が認められた。これは再曝気によって水中に取り込まれた気泡が溶存酸素となる過程が比較的短時間のうちに行われ、その後の乱流拡散の進行に伴って流心部と流岸部との溶存酸素の混合が進行することを示している。また、各Section毎の回帰直線の傾きに差が認められることから、混合が促進される度合いは各Sectionにおいて一様ではなく、川幅や流入地点付近の局所河床勾配、落差、水床、石礫の位置、および水面の擾乱に影響する地形的要因⁹とも強く関連していることが推測される。表-2には、地形的要因と考えられる最大水深、面積、流入地点での川幅、落ち込み地形の落差、流入地点での局所河床勾配、最大粒径、平均粒径、相対粗度を、各Section毎に示した。ここで最大粒径と平均粒径は、各Sectionにおいて1m間隔の格子点上に位置する表面積の最大値と平均値

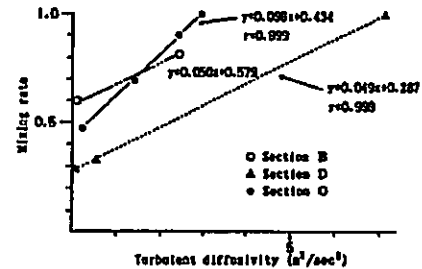


図-12 乱流拡散係数と混合比との関係
Fig. 12 The mixing rate of dissolved oxygen in each section tends to rise linearly as the turbulent diffusivity increases

表-2 地形的特徴の比較
Table 2 Comparison of geographical characteristics

Section	Md (m)	S (m ²)	B (m)	h (m)	θ (°)	d max (cm)	d m (cm)	Rr
A	180	60	350	50	70	160	39	0.2167
B	200	58	250	80	35	135	49	0.2450
D	220	85	200	60	30	200	85	0.3864
G	200	56	120	50	26	225	74	0.3700

Md: Maximum depth, S: Area, B: Local channel width at inlet point, h: Stream fall, θ: Local channel slope at inlet point, d max: maximum diameter, d m: mean diameter, Rr: Relative roughness (dm/Md)

を示したものであり、相対粗度は、平均粒径を最大水深で割った値として求めたものである。表-2において、本研究で高い総括酸素移動係数と混合比を記録したSection DおよびSection Gと他のSectionとの明瞭な違いは、流入地点の川幅、流入地点の局所勾配、相対粗度に認められ、川幅は1~2m、流入地点の局所勾配は25~30°、相対粗度は0.37以上で水中への溶存酸素の供給と混合は進んでいる。流入地点の川幅と角度は、淵に流入する水の流速に影響するもので、相対粗度は流床の粗面状態を示すものであり、これらの要因は、いずれも水面の擾乱を助長し接触面積を増大させることと密接に関連している。したがって、単に落差を付けるのではなく、流入地点に適切な川幅と角度を設け、相対粗度を考慮して河床に石礫を配置することにより、水中への溶存酸素の供給と混合が促進されると指摘できるが、これらの要因の詳細な関連については今後の課題である。

このような乱流場における物質輸送は、対流など大きな循環による輸送、乱流(渦)拡散、分子拡散という、規模や継続時間のスケールが異なる個々の移動現象の複合過程とみることが出来る。従って、自然渓流で生じる溶存酸素の乱流拡散と混合現象は流速によって一時的に定義されるのではなく、飽和溶存酸素濃度を支配する水温、流量規模、地形的要因、およびこれらから導かれる滞留時間や流れの自己相関のパターンの違いによって、対流・乱流拡散・分子拡散のいずれかが律速過程となって促進される現象であるといえる。

5.4 渓流整備への活用

渓流で生じる再曝気とその後の乱流拡散に伴う溶存酸素の混合特性は、自然渓流の水質環境を改善する自浄作用の1つである。

一般に自然状態にある山地渓流では水温が低いため飽和溶存酸素濃度が高く、また、落差が頻りに分布し河床粗度も大きいいため自然の再曝気が進行しやすいので溶存酸素濃度は高いが、地形によっては溶存酸素濃度分布に

回りが生じ、局所的に溶解酸素濃度が低下することがある¹⁰⁾。南九州地区の山地深沢では、近年、砂防工事を含む人為的影響により生態数が激減しているヤマメの団体数の回復を図るため、ヤマメ稚魚の放流が行われているが、ヤマメの場合、孵化後30日程度の稚魚の酸素消費量は高い¹¹⁾。したがって、前述のような区間において大量のヤマメを放流する場合、適切な放流環境の維持という観点から、人為的に再曝気と混合を促進し溶解酸素濃度を高める必要があると思われる。溶解酸素濃度に対する生物の生態環境保全上からの配慮は、溶解酸素の枯渇が著しい貯水ダムなどの下流区間にも当てはまる。さらに、火山山麓に多く認められるような、第1鉄イオンから水酸化鉄へという鉄の成分変化によって濁度が上昇し水質悪化を招いている深沢では、湧水直後に十分な溶解酸素と滞留時間を与えて成分変化を促進し水酸化鉄を削減することによって、下流地点の濁度を半減できることが報告されている¹²⁾。このような条件下にある山地深沢においては、深沢水質の回復という観点から溶解酸素の供給と拡散を人為的に促進する必要がある。

乱流拡散現象は、単に流量のみならず水固混濁の強さの尺度である地形落差や流れ込み地点の河床勾配にも影響されることから、たとえば(単位幅当たりの流量×地形落差)を指標として混合係数との関連を求めると、両者には明確な関連が認められる(図-13)。このような尺度を目安として、溶解酸素の供給と拡散が適切に行われるように、低水路の幅や流れ込み地点の河床勾配、落差、あるいは魚道の構造に対して工夫を施すことが深沢環境保全上の1手法となると思われる。

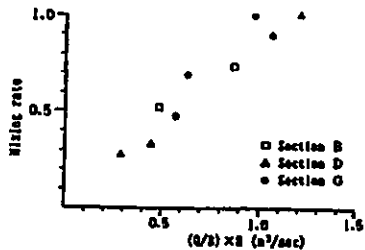


図-13 (Q/B)×H と混合比との関係
Fig. 13 Mixing rate versus (Q/B)×H. It is expected that the mixing efficiency in pools would be increased by artificial manipulation of hydraulic parameters

6. おわりに

Taylor の乱流拡散理論は、空気中で生じる煙霧の拡散など、流下方向の乱れが平均流速に比べて十分小さく主たる流れが流れと直角な方向に存在する流れでは実験結果とよく一致するといわれている¹³⁾が、自然深沢では深沢方向への乱れは流下方向の乱れと比較して十分小さい。このような流れでは、流れに直角な方向での流体粒子の Lagrange 的流速成分は河の主要地点(落下部より概ね 1 m 下流地点)の流れに相関があるものと仮定し、さらに拡散時間に沿って容積を流量で割った値として定義した滞留時間を当てはめ溶解酸素の混合現象と関連づけたいところ、自然深沢の河の流れにも Taylor 理論は比較的適合することが本研究によって確かめられた。これは、深沢(河)では複雑な地形や石礫の存在によって流速・流向が3次元的にさらに不規則となる結果、流体粒子の動きのランダム性が助長されることによるものと推測している。本方法は、滞留時間の求め方などいくつかの問題点を含んでいるが、現地深沢においては Lagrange 的流速成分の測定が非常に困難なことから、自然深沢における乱流拡散と混合特性を簡便的に表現しうるものと考えられる。今後は、より一般的な結論を得るために他流域での測定を実施する予定である。

参考文献

- 1) 北村啓一: リネアレーションによる深沢への酸素の供給と対流・拡散。砂防学会誌(新砂防), vol. 48, No. 4, pp. 11-19, 1995
- 2) 橋本一雄: 水理学 I, 森北出版, pp. 76-90, 1973
- 3) 平岡正徳ほか: 砂防環境論, 朝倉書店, pp. 65-89, 1971
- 4) G. I. Taylor: Diffusion by continuous movements, Proc. Lond. Math. Soc., 20, 1921
- 5) John D. Parkurst and Richard D. Pomeroy: Oxygen absorption in streams. Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Sanitary engineering division, vol. 98, pp. 101-124, 1972
- 6) Krenkel, P. A. et. al: Turbulent diffusion and the reseration coefficient. Transaction of the American society of civil engineers, vol. 128, part III, pp. 235-234, 1963
- 7) Bansal, M. K.: Atmospheric Reseration in Natural Streams. Water Research Pergamon Press, vol. 7, pp. 769-782, 1973
- 8) Williams, J. M. and Svco, E. J: Ecological Engineering. A Wiley-Interscience Publication, pp. 357-374, 1989
- 9) 橋本伝三郎: 流水増殖学, 恒思社厚生館, pp. 262-263, 1961
- 10) 北村啓一ほか: 深沢における鉄の成分変化と濁り, 平成8年度砂防学会研究発表要録, pp. 41-42
- 11) 坂野 正ほか: 化学技術者のための移動速度論, オーム社, pp. 140-156, 1966

(原稿受理 1996年12月17日)

論文

床固め工群を有する河道の河床変動特性

Characteristics on Bed Variation in Rivers with a Series of Groundsels

藤田正治* 水山高久* 飯田猛行**
Masaharu FUJITA Takahisa MIZUYAMA Takeyuki IIDA

Abstract

In this paper, a few problems and points of sediment erosion control works with groundsels are discussed by means of numerical simulation of a long-term bed variation and a short-term bed variation under no sediment supply. On a long-term basis, groundsels have to reduce remarkably erosion depth as well as erosion volume at an equilibrium bed condition. So, the effect of groundsels on erosion depth was investigated with the simulation of the bed variation of a river for a time-series of water discharge with a duration of 100 years. The result has pointed out that a series of groundsels can reduce the erosion volume, but not the erosion depth because the river bed with non uniform materials is not much eroded even without the groundsels due to the development of armor coat. An increase in groundsels can not always, therefore, improve efficiency on reducing erosion depth. On a short-term basis, a role of groundsels is to protect river beds from too much erosion by a heavy flood. The simulation of bed variation for a hydrograph with a design discharge has shown that the erosion depth could be thoroughly reduced if a series of groundsels is placed only in the most upstream section with three times length of the erosion region predicted in the case of no groundsels.

Key Words: groundsels, consolidation works, bed variation model, numerical simulation

1. はじめに

床固めは河床の侵食防止を防止することによって河道の安定化を図るために設置される構造物であり、計画流量に対する安定勾配を考慮して高さや間隔が決定される¹⁾。床固めの機能はその位置の河床を固定化することによって果たすことができ、その効果は床固めの導入による河床侵食量または最大侵食深の低減率で測ることができる。また、河川環境の立場から床固めを見た場合、河川形態や生態生物に与える影響は大きいので、なるべく床固めの数を少なくすることが望まれる。したがって、床固めの効果を土砂水理学的に究明して、環境に対する影響が少ない範囲で配置計画を行うことが重要であろう。床固め工群の効果を評価するとき、100年度程度のオーダーの長期の河床変動を対象にするのか、一洪水に対する短期河床変動を対象にするのか、によって視点を定める必要がある。まず、給砂が低い場合の長期の河床変動を対象とするときについて床固め工群の効果について考えてみよう。この場合、いわゆる静的平衡河床形状が問題になり、静的平衡河床勾配の推定が重要となる。河川

が固定されかつ一様砂で構成されている河川では、与えられた流量に対する静的平衡勾配は初期河床勾配より小さくなり、かつ一時的に決定されるので、床固め工群による侵食量や最大侵食深の軽減効果は床固めの個数に比例して大きくなる。しかし、混合砂の場合には次の点に注意する必要がある。すなわち、混合砂河床では一定流量においても混砂量に影響するパラメータとして勾配と粒度分布の2つがあり、静的平衡勾配が一時的に決定されず、河床材料の粗粒化によって静的平衡勾配が初期河床勾配と同程度になることもありうる。したがって、床固めを密に配置しても、一様砂の場合のように数に比例してその効果が向上するとは限らない。

短期の河床変動に対しては、河床低下は上流から伝播してくるので、計画洪水のような大洪水によってどの領域がどれだけ侵食されるのかを知る必要がある。また、侵食量や最大侵食深を軽減するためにはどの範囲に床固め工群を設置すればよいのかということが重要になる。

以上のような点を明確にするためには、床固めの機能が十分発揮されるような条件に対して数値計算による河床変動解析を行い、床固め工群の機能を定量化して議論するのが有効であろう。本研究では、床固め工群の配置計画の基礎知識を得ることを目的とし、奥河川の一つを

* 京都大学農学研究所農林科学専攻
** 河川建設技術研究所