

材の補強効果は高い。

#### 4.4 モデル斜面解析の考察

ある潜在的なすべり面を持つ斜面またはのり面を、補強土工法により補強する場合、その斜面の下部に補強材を配置することが、根入れ長及びすべり面に対する打設角という点から見て効果的である。ただし、斜面下部に配置された補強材は頭部処理が十分でないときは補強材頭部より引き抜けを起こし十分補強力を発揮できないことも考えられ、さらに同一斜面内にいくつかのすべり面が考えられるときはすべてのすべり面が設計安全率となるように補強材を配置しなければならないなど注意が必要である。

#### 5. まとめ

今回、鉄筋補強材の斜面補強効果について、地盤の変位に着目した補強力計算の理論解析法を考案した。この方法を用いることにより、補強材の諸元（本数、直径、剛性等）、打設角、地盤条件を変えても補強力、安全率の

計算が可能である。また複数の補強材補強力についても、地盤の変位を考慮した、より適切な補強力の評価ができる。

ただしこの計算において、補強材の地表面は法面処理により固定されていると仮定している。今後は、支圧プレート等を用いた、簡易な法面処理の場合の頭部引き抜けなどについても考慮した解析法を検討することにより補強材補強力の評価法についての改良を行っていききたいと思う。

#### 参考文献

- 1) 土質工学会編: 補強土工法, pp. 357, 1987
- 2) 日本道路公団: 鉄筋補強土工法設計施工要領, pp. 4-14~4-19, 1994
- 3) 中村良光・杉原忠弘・川村公平: 補強土工法の現場への適用, 土木技術資料, 第34巻, 第1号, pp. 68~73, 1992
- 4) 中村浩之・土屋 智: 地すべり変位を考慮した地すべり抑止杭の解析, 地すべり, Vol. 24, No. 2, pp. 17~23, 1987 (原稿受理 1995年3月23日)

〈報告〉

### 「新砂防」表紙図案および学会ロゴマーク入選決定

編集部

新砂防誌上等で公募していた「新砂防」に表紙図案および学会ロゴマークの選考会が平成7年10月4日に砂防学会事務局において行われました。応募は表紙図案18点、ロゴマーク21点で、入選等は以下の方々の作品に決定いたしました。(選考委員: 小橋澄治, 安斎千鶴子, 天田高白, 鈴木雅一, 眞板勇二)

#### 表紙図案

入選: 鈴木牧子 (京都精華高校)  
佳作: 矢島重美 (建設省土木研究所)  
佳作: 沼本晋也 (東京大学農学部)

#### ロゴマーク

入選: 秋山智弘 (筑波大学生物資源学類)  
佳作: 熊谷朝臣 (東京大学農学部)  
佳作: 曹 崇銘 (東京大学農学部)

〈論文〉

## リエアレーションによる溪流への酸素の供給と対流・拡散\*

Supply and Transfer of Oxygen in Natural Stream Water Body by Reaeration

北村 泰一\*\*

Hirokazu KITAMURA

#### Abstract

In mountain streams, the supply of oxygen from atmosphere to water body, which is called reaeration, would be accelerated due to the disturbance of the water surface with water falls and rapids. Oxygen is not only essential to all forms of aquatic life but also contributes to the degradation of the organic matter in the water body. Thus, reaeration is the self-purification process in the streams, and, therefore, it is one of the most significant aquatic environments which must be preserved in erosion control works.

Our accumulated data indicates the following: (1) the high rate of reaeration occurs during high discharge and high temperature when the saturated concentration of dissolved oxygen is low, (2) the increasing degree of reaeration depends on the disturbed area of the water surface, which is in proportion to the amount of potential energy of falling water, and (3) the maximum degree of reaeration occurs within 100 seconds of residence time determined by the topographical volume of pools because of convective mass transfer pattern, and after 100 seconds of residence time lateral movement of dissolved oxygen is dominant due to diffusive mass transfer pattern.

Consequently, reaeration in natural streams depends on a combination of environmental factors such as temperature and discharge, and topographical conditions such as water depth, river width and head. Conservation and effective use of the self-purification process in natural streams will, therefore, be possible with erosion control techniques incorporating these factors skillfully.

Key Words: Stream environment, Reaeration, Dissolved oxygen, Residence time, Mass transfer pattern

#### 1. はじめに

水中に供給された酸素は、溶存酸素として魚類や水生昆虫の呼吸、緑色植物の光合成に利用されるばかりでなく、水質汚濁の原因のひとつである有機汚濁負荷の分解や、濁りの原因ともなる $Fe^{2+}$ イオンなどの酸化やアンモニア態窒素( $NH_4^+ - N$ )の硝化にも寄与している。溪流では平地河川に比べて溶存酸素濃度が高く、この原因として地形落差や荒瀬等に起因する落下流や流れの擾乱による大気から水中への酸素の供給(再曝気; リエアレーション)が活発に行われることが推測される。この推測が正しいものであるならば、再曝気による酸素の供給はいわば河川の自然浄化機構とみなされ、その度合いは溪流水質の評価・保全には必要不可欠な因子であるため、砂防工事においても考慮すべき溪流環境のひとつとなると考えられる。

再曝気に関する研究は、Streeter-Phelpsが古典的基礎モデル<sup>1)</sup>を提示して以降発展し、今日では下流中小河川や人工水路での汚濁河川の水質改善を目的として理論

\* 一部平成6年度砂防学会研究発表会で発表  
\*\* 九州大学農学部造園学科

的実験的に行われることが多いが、実際の溪流において再曝気の過程を実証的に説明したものはない。

このような観点から、本研究は九州山地東端を流れる名貴川上流支流のケヤキ沢を対象溪流として、再曝気によって大気から水中に供給された酸素の挙動を類推し、再曝気を指標とした溪流水質の評価と保全の方向について検討したものである。

本研究を進めるにあたり、現地測定で多大な協力を賜った当時九州大学学生の青山朋央氏(加藤建設科)、小倉航平氏(錦ナチュラルグループ)に心から御礼申し上げる。なお、本研究の一部は平成6年度砂防学会研究発表会で発表したものである<sup>3)</sup>。

#### 2. 研究対象地の概要

本研究の調査の対象とした溪流は、九州山地東端に位置する尾鈴山(標高1,405 m; 宮崎県)を源として日向灘に流入する名貴川の上流支流ケヤキ沢の一部区間(流域面積5.94 km<sup>2</sup>, 区間長130 m, 標高差9 m; 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、天然林や人工林に覆われ、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

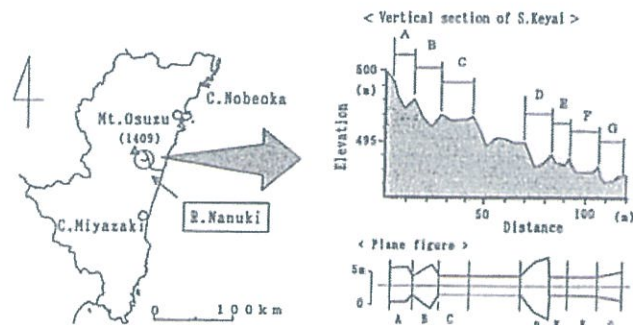


図-1 対象渓流の位置  
Fig. 1 Site location of the investigated stream



写真-1 上部より区間 A, B, C  
Photo 1 Views of section A, B and C



写真-2 下部より区間 D, E, F, G  
Photo 2 Views of section D, E, F and G

であり、砂防治山施設はない。

研究の対象とした区間は、ケヤキ沢と名貫川合流点より約 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って対象区間は 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(表-1, 写真-1, 2 参照)。なお、溶存酸素濃度に影響する各種イオンや浮遊物質、汚濁負荷の流入はない。

### 3. 接触面の定義と溶存酸素の測定方法

渓流での落ち込み地形付近では、落下流より 3 次元的に複雑な流向・流速をもった流れによって水面が攪乱された部分が形成され、その後流下距離の増加と共に水

表-1 調査区間の面積、最大水深の比較  
Table 1 Classification of investigated sections

Section	Stream area (m <sup>2</sup> )	Maximum depth (m)	Classification
A	60	1.8	pool
B	58	2.0	pool
C	42	0.7	rapid
D	85	2.2	pool
E	26	0.6	rapid
F	32	0.5	rapid
G	56	1.5	pool

面の攪乱は小さくなり、やがては流向・流速も流心方向に安定した流れの場合へと変化している。この区間での気泡の生成・輸送についてみると、落ち込み地形直後では落下流による気泡の生成が著しく水面が白く激しく泡立ち、その後流下距離の増加とともに気泡の生成が少なくなり、流下方向への流向が卓越する通常の流れが回復さ

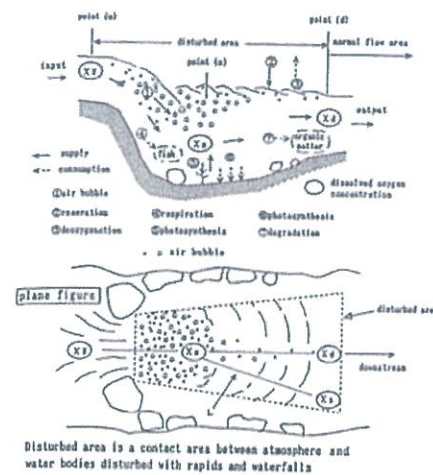


図-2 渓流での酸素の供給消費と溶存酸素測定地点  
Fig. 2 Oxygen balance in stream water body and sampling points of dissolved oxygen concentration

れる部分では流されてきた気泡は消滅する。

大気中から水中への酸素の供給は、表面が攪乱されない状態では水温、気圧、塩分濃度に支配される<sup>1)</sup>が、渓流では落ち込み地形での落下流や荒瀬で巻き込まれた気泡からの供給(図-2中①)と攪乱された表面からの供給(②)が著しく、再曝気が進行すると推測される。そこで本研究では、運搬されてきた気泡が消滅し通常の流れが回復する部分(対象区間での観察では 10 秒間に 1~2 個の気泡が運搬され消滅する部分にほぼ相当している)と、落ち込み地形、および気泡の生成と水面の攪乱が生じている部分を台形に近似した範囲を接触面と定義した。さらに、落下直前地点(u)、落下流による気泡の取り込みと水面の攪乱が最も著しい地点(m)、下流部で通常の流れが回復される地点(d; 接触面の下流端)、および接触面の側方端地点(s)での流速と溶存酸素濃度、それぞれの距離を測定し、再曝気量と再曝気で供給された酸素の水中での移動過程を類推した。

本研究では、落ち込み地形によって区切られた A~G の Section 毎(図-1 参照)に各事項を測定した。溶存酸素濃度は隔膜透過法による溶存酸素測定器(東亜電波工業社製 WQC-20 A)を使用し、水深 10 cm 間隔で測定した。ただし、隔膜透過法による測定の場合、気泡が隔膜に付着すること、及び十分な流速がないとセンサーの応答性が低下することによって、測定値が左右される可能性が危惧されたので、センサーをただ単に水没させるのではなく隔膜部分が流水とぶつかるように水平方向に沈め、かつ、流下方向に沿って前後に小刻みに振動をあた

えた。また、水温に対するセンサーの応答が安定するまである程度時間を要するため、センサーの投入から 1 分後の表示値を測定値とした。さらに、機械誤差を考慮し測定は 1 台の計測器で行い、一定出力を確保するため、電池は測定の都度交換し校正も 1 日 2 回行った。

なお、現場対応型の吸光分析機(アメリカ HACH 社製 DR/700)を併用し比較測定も数回行ったが、測定値に大きな差は認められなかった。

このほか、流速は電磁流速計(横川ウエザック社製)を用いて測定し、流量は対象区間最上流部(Section A の直上流地点)で流速、水深、流下幅を測定し求めた。

測定は 1993 年 6 月から 1995 年 4 月の期間において、増水期、洪水期、高温期、低温期を対象に 1~2 ヶ月に 1 度の頻度で 14 回行った。

なお、この他に、水中での酸素供給には緑色植物の光合成(⑤)があり、接触面からの放出(③; おもに過飽和の場合)、魚類やバクテリアの呼吸(④, ⑥)、有機物等の分解(⑦)によって消費されるが、対象区間ではこれらの過程による酸素の供給消費は極めて微小<sup>2)</sup>と考えられるので無視した。

### 4. 河川の溶存酸素濃度の季節変化

再曝気による大気中から水中への酸素の供給を考察する前に、渓流での溶存酸素濃度の一般的季節変化を把握した。図-3 は、今回の測定結果から各観測時毎の溶存酸素濃度の平均値とその範囲、平均水温、及び流量をア

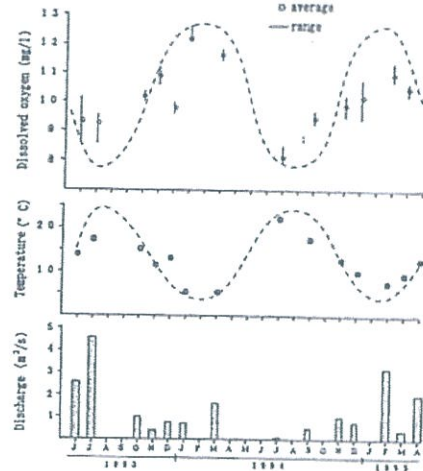


図-3 測定結果と溶存酸素濃度の季節変化の推定  
Fig. 3 Sampling results

Variations in DO can occur seasonally, or even over 24 hours periods, in relation to temperature.

ロットしたものである。ここで、1994年夏季の観測値が欠落しているが、この時期は全国的に気象観測史上希有な猛暑小雨が記録された時期であり、この時期での溶存酸素濃度、水温、流量は1994年7月の測定値とほぼ同様な値であると推測している。

図-3より、対象区間での溶存酸素濃度は8~12 mg/lの範囲で変動しているが、溶存酸素濃度は水温が低い冬季に高く、水温が高い夏季において低いことが明らかである。これは、前述のように気液界面で生じる大気中から水中への酸素の移動が、おもに気温、気圧に支配されるためであり、特に水温が低いほど飽和溶存酸素濃度は高くなる。したがって、渓流での溶存酸素濃度そのものも、水温の変化に応じた時間変化を示すものと思われる。さらに、各測定時で認められる溶存酸素濃度の範囲は、各ポイント間で溶存酸素濃度に差のあることを示しており、その主要因となるものが再曝気による酸素の供給であると推定される。対象流域のような清流での飽和溶存酸素濃度はもともと高く、対象渓流での飽和度も80~102%であった。なお、溶存酸素濃度そのものと流量との間には、明瞭な関連はない。

### 5. 落下流による水中への酸素の供給

#### 5.1 再曝気の評価方法

再曝気によって大気中から水中に酸素が供給された度合いは(d)地点の溶存酸素濃度と(u)地点の溶存酸素濃度を比較することによって知ることができるが、上記のように溶存酸素濃度は水温の影響を受けて変動するため、異なる水温での測定結果を比較することはできない。そこで本研究では、前述の方法で測定した各地点での溶存酸素濃度、流量を用いて総括酸素移動係数を求め、これを目安として渓流水に酸素が供給された度合いを検討した。

すなわち、完全混合状態にある体積Vの水界が表面積Aで大気と接している時、再曝気による溶存酸素濃度の変化は次式で示される。

$$\frac{dX}{dt} = \frac{KL \cdot A}{V} (X^* - X) \quad (1)$$

ここに KL: 物質移動係数

X\*: その水温での飽和溶存酸素濃度

X: 溶存酸素濃度

一般に河川での再曝気は、式(1)に基づき平地河川における日単位での酸素の供給を取り扱っているが、渓流では前述の流れの攪乱に起因して数秒~数十秒単位で酸素の供給が進むため対象とする時間間隔が非常に短いこと、および図-2中の酸素供給の過程①と②を個別にとらえることは困難であること等の理由から、落下直前地点(u)から下流部で通常の流れが回復される地点(d)まで

を総括的にひとつの連続的な物質移動過程としてとらえると、溶存酸素濃度の変化を次式で示すことができる。

$$R = \frac{X^* - X_d}{X^* - X_u} = \exp \left[ - \frac{(KL \cdot A)_{ov}}{Q} \right] \quad (2)$$

ここに

(KL · A)<sub>ov</sub>: 渓流における総括酸素移動係数

Q: 流量 (m<sup>3</sup>/sec)

X\*: その水温での飽和溶存酸素濃度 (mg/l)

X<sub>d</sub>: (d) 地点の平均溶存酸素濃度 (mg/l)

X<sub>u</sub>: (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

#### 5.2 再曝気に影響を及ぼす因子

再曝気は落下流によって取り込まれた気泡や、攪乱された水面(接触面)を通して生じる、大気中から水中への酸素の移動であるので、水中の溶存酸素濃度を支配する因子である水温のほか、水面の攪乱を引き起こす諸条件が、再曝気の数値を左右する因子となる。さらに後者には、落下流に影響する流量と落差、およびその流れを受け入れ水面の攪乱が生じる場の水深、面積が挙げられる。

##### 5.2.1 水温と流量

(u) 地点から (d) 地点への溶存酸素飽和度の上昇率と総括酸素移動係数の多寡の間には、比較的確な相関関係が認められたため、これによって総括酸素移動係数が再曝気による酸素供給の度合いを論じることが可能であると推定される。

図-4は、落下直前地点(図-2でのu地点)の水温と総括酸素移動係数との関係を、流量ごとに示したものである。今回の測定では、総括酸素移動係数が最大となったのは、水温が約17°C(1993年6月18日調査)での6.23(m<sup>3</sup>/sec)の時であり、これにより飽和度は5%上昇

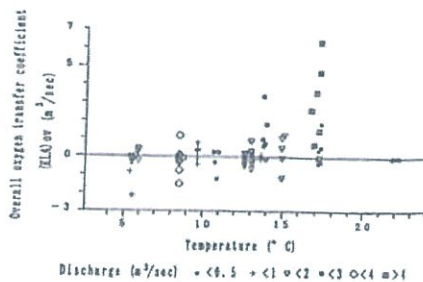


図-4 水温、流量が再曝気に及ぼす影響  
Fig. 4 Basis governed reoeration in natural stream water body

The oxygen content of natural stream water varies with temperature, water discharge and surface turbulence.

北村: リエレーションによる渓流への酸素の供給と対流・拡散

したが、総じて水温が高いほど総括酸素移動係数が高く再曝気が進む傾向が認められた。また、水温が同様な場合では、流量が大きいほど総括酸素移動係数は高く再曝気が進行する Section が認められた。一般に飽和濃度が下がれば成分を取り込む余地は減少し、取り込む速度も低下する。したがって実際の渓流では、水温のみならず流量や地形など様々な因子が再曝気を支配していると推定される。単に水温が高いだけで流量が少ないケース(図-4において水温22°Cの時)や、増水時であっても水温が低く飽和溶存酸素濃度が高いケース(同じく水温約9°Cの時)では、再曝気は進行しない。

なお、総括酸素移動係数がマイナスの値を示しているのは、d地点の溶存酸素濃度がu地点に比べて結果的に小さくなったケースである。

##### 5.2.2 流れのエネルギーと接触面積

気泡の取り込みや水面の攪乱は落下流の位置エネルギーと運動エネルギーに依存すると考えられるが、通常の河川の場合では運動エネルギーの寄与は小さいといわれている。そこで、流量(Q)と落差(H)から落下流の位置エネルギーを(ρgHQ)として評価し、接触面積との関連を Section 別にとらえた。結果を図-5に示す。ここで、Section A, B, D は水深1.5~2.0mの淵であり、Section C, E, F は水深0.5~0.7mの急瀬である。各 Section での落差は0.2~1.0m(図-1参照)と大きな差はないが、流れのエネルギー(ρgHQ)と接触面積の間には明瞭な相関関係が認められ、特に淵(Section A, B, D, G)においては流れのエネルギーの増大とと

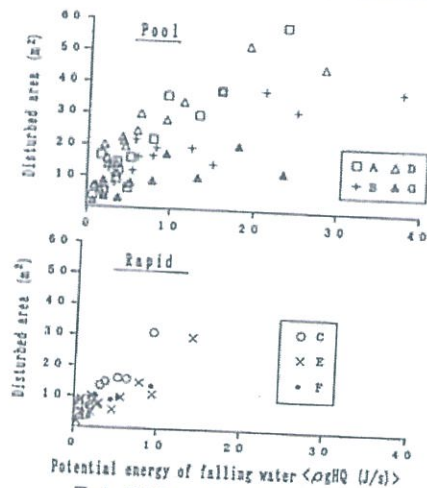


図-5 落下流のエネルギーと接触面積  
Fig. 5 Increase of disturbed area by potential energy of falling water

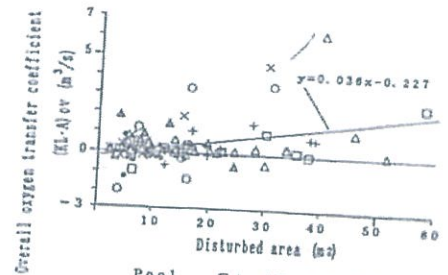


図-6 接触面積の増大と再曝気  
Fig. 6 Correlation between overall oxygen transfer coefficient and disturbed area

もに接触面積も広がる。荒瀬では、落差が小さく流れのエネルギーも小さいことのほか、水深が浅く水面の攪乱が河床礫の位置や大きさに影響されているため、流れのエネルギーと接触面積の間にはほどほどの明瞭な関連は認められないが、流れのエネルギーと接触面積が正の相関関係にあり、接触面積の拡大にしがたが再曝気も進行する(図-6)。

なお、Section B, G などでは、ρgHQの増大にもかかわらず接触面積の変化が横ばいとなっているが、この原因には淵の面積そのものが相対的に狭いことのほか、巨礫の分布が流れに影響を及ぼし接触面形成の妨げになっていることが挙げられる。

### 6. 溶存酸素濃度分布と酸素の輸送形態の類推

#### 6.1 滞留時間

落下流によって水中に取り込まれた気泡が渓流水に溶け込み溶存酸素となるためには、落下によって生成された気泡がある程度の時間、水中に留まることが不可欠な条件であると考えられる。実際の渓流での流れは単一方向・一定速度という単純なものではなく、河床形や礫の影響を受け3次元的に極めて複雑な様相を呈していることは、現地渓流での落葉・生物遺体の破片の動き等を通して認識しているところである。淵に取り込まれた落葉の破片が、流心方向ではなく側方に輸送され、やがては河岸近くの流速のない水域に漂着し、そこで沈積することは容易に観察される。したがって、落下流によって取り込まれた気泡についても同様で、大粒の気泡は生成後短時間のうちに浮上し消滅するが、十分粒の小さい気泡であれば一定時間の間水中に留まることは想像するに難くない。

そこで流水の滞留時間を、淵の容積/流量(淵の容積は、表-1から Stream area × maximum depth とした)とし、総括酸素移動係数との関係を見た(図-7)。滞留

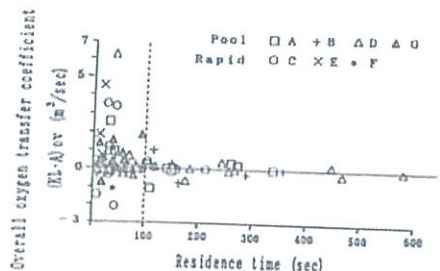


図-7 滞留時間ごとの再曝気の度合い  
Fig. 7 Drastic decline of  $(KL \cdot A)_{ov}$  after about 100 seconds of residence time

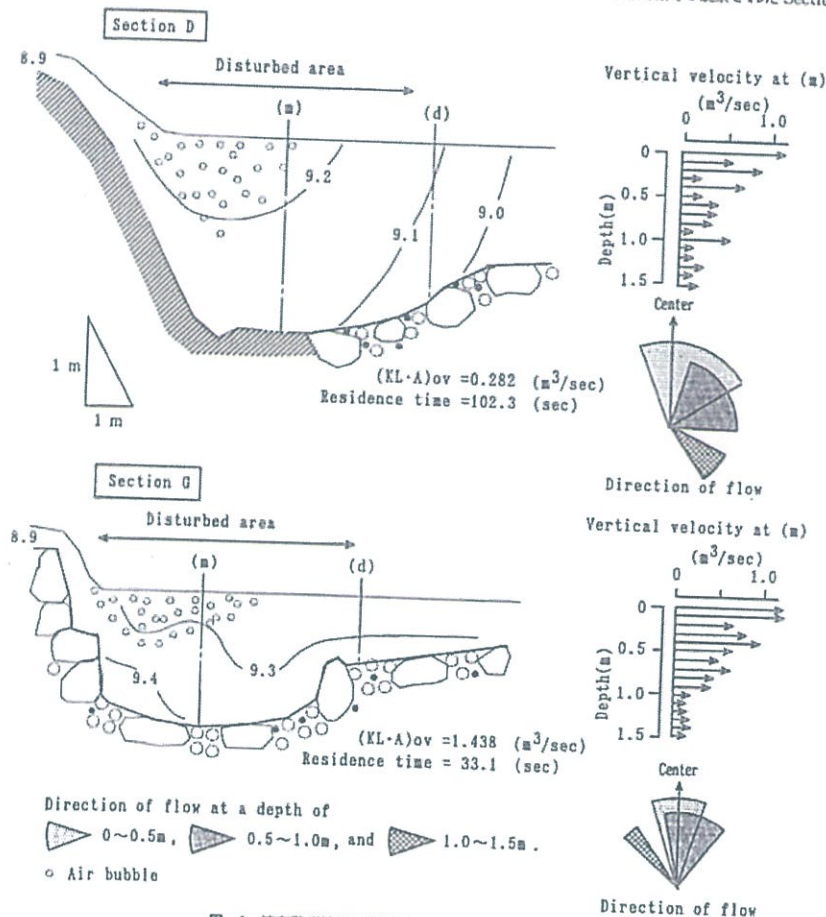


図-8 溶存酸素濃度の縦断分布、流速、流向の比較  
Fig. 8 Comparison of distribution of DO concentration (mg/l) and vertical velocity and direction of flow between section D and section G

時間は気泡が滞留する空間の容積に左右されるため、水深の浅い荒瀬 (Section C, E, F) では滞留時間は短い。また、瀬であっても容積の小さい Section G で滞留時間は短く、容積の大きい Section D で滞留時間は長くなっている。しかしながら、各 Section ごとで滞留時間の占める範囲は異なるもの、総じて滞留時間が 50 秒以内において総括酸素移動係数が最も大きくなり、滞留時間が 100 秒を越えると総括酸素移動係数は小さくなる。

6.2 溶存酸素濃度分布のパターン

前述のような瀬での多様な流れと、それに基づく滞留時間の違いが、瀬での溶存酸素濃度の分布に及ぼす影響を見るために、図-8 に調査期間で観察された Section D

北村: リエアレーションによる渓流への酸素の供給と対流・拡散

と Section G における流速、流向、溶存酸素濃度の縦断方向での分布の 1 パターンを示した。ここで、流速は水深 10 cm ごとの平均流速を、また流向は水深 0~50 cm, 50~100 cm, 100~150 cm の 3 層に分けて示した。流速についてみると、表面流速は Section D と Section G でほぼ同じであるが、水面下の流速は、Section D で 1 (m/sec) を越える部分と 1 (m/sec) 以下の部分とが交互に出現しているのに対し、Section G では水深が増すにしたがって流速は漸次減少するという単純な流速分布を示している。また流向は、Section D では 180 度に近い範囲で分布しているのに対し、Section G では流下方向に近い範囲に集中している。換言すると、Section D では蒸留水を満たしたビーカーをガラス棒で攪拌する場合に生じる乱流と同様な、流向・流速が 3 次的に安定しない流れが生じているが、Section G では流心方向への流れが卓越する比較的安定した層流に近い流れ方となっているといえる。

こうした流れ方の違いは、溶存酸素濃度の縦断分布に影響を及ぼしていると考えられる。すなわち、Section D では落ち込み地形周辺の水面~水深 1 m の部分で高く、その後流下距離の増加とともに同心円状に減少し、かつ、水面に近い部分で溶存酸素濃度は高くなるという分布を示しているが、Section G では河床付近に溶存酸素濃度の高い部分があり、この部分が流下方向に沿って連続するという分布となっている。接触面下流端地点 ((d) 地

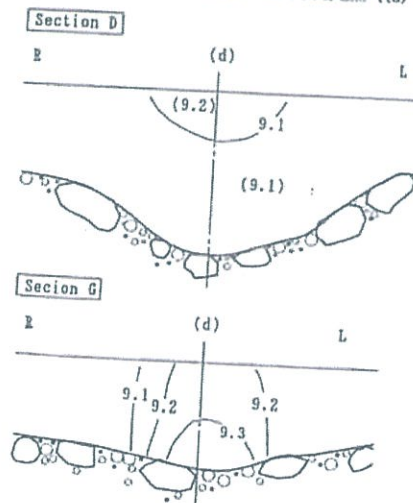


図-9 接触面下流端地点での溶存酸素濃度 (mg/l) の横断分布パターンの一例  
Fig. 9 Cross-sectional distribution of DO concentration (mg/l) at point (d)

点)での溶存酸素濃度の横断方向での分布 (図-9) も、Section D において均一であるのに対し、Section G では流心付近に溶存酸素濃度の高い部分が集中している。

この時の総括酸素移動係数と滞留時間は、Section D で 0.282 (m³/sec) と 102.3 (sec), Section G で 1.438 (m³/sec) と 33.1 (sec) であった。これらの溶存酸素濃度分布のパターンは、総括酸素移動係数がそれぞれ低い時 ( $(KL \cdot A)_{ov} < 1.0$ ) および高い時 ( $(KL \cdot A)_{ov} > 1.0$ ) の溶存酸素濃度分布パターンとして、D, G 以外の Section で確認されたパターンである。

6.3 瀬における溶存酸素の輸送形態

前述の総括酸素移動係数は (u) 地点から (d) 地点の方向、すなわち流心方向での酸素の移動を示すものである。その度合いは、滞留時間が約 100 秒を越えると、著しく低下した (図-7)。一方、Section D のような滞留時間が 100 秒を越える瀬では、3 次的に多様な流れ方によって溶存酸素濃度の横断分布はほぼ均一であった。そこで、供給された溶存酸素の横断方向への移動の度合いを見るために、(m) 地点から (s) 地点への総括酸素移動係数を求め滞留時間と比較した。結果を図-10 に示す。

図-10 より、(m) 地点から (s) 地点への酸素の輸送は、流心方向 (すなわち (u)→(d) 方向) への輸送とは逆に、滞留時間が 50 秒以内で低く滞留時間が 100 秒を越えると急速に回復していることがわかる。さらに図-11 は (d) 地点と (s) 地点との溶存酸素濃度の比と滞留時間との関係を示したものであるが、滞留時間の増加とともに両者の濃度差は少なくなり、横断方向での濃度分布は均一に近づくことを示している。これらのことから、滞留時間が長くなると流心方向以外への溶存酸素の輸送が卓越し、溶存酸素濃度の分布が均一化されることが推定される。これは、溶存酸素が拡散していることに他ならない。

したがって、流心方向での流れが卓越し滞留時間の短い Section (例えば Section G や荒瀬の Section C, E, F) では流心方向での酸素の輸送が進むが、長い滞留時間をもつ Section D などにおいては再曝気が進まなかったのではなく、100 秒を越える滞留時間のなかで多様な流れによって、供給された酸素が流心方向のみならず周辺にも輸送され拡散したと推定される。

換言すれば、瀬での溶存酸素の輸送には対流による流心方向への輸送と、拡散による側方 (流心方向以外) への輸送があり、これら二つの輸送形態のうちのいずれが卓越するかは滞留時間に規定されると推定される。滞留時間は流量とそれが滞留する場所の地形条件により決定される。滞留時間に影響する地形条件には、瀬の面積や水深のほか、流向に影響を及ぼす河床の大きさや位置に左右されると考えられるが、ここでは瀬の容積と滞留

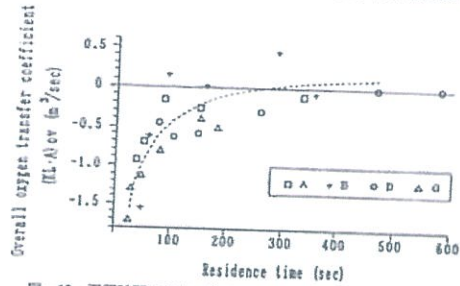


図-10 滞留時間の増加に伴う(m)→(s)方向への酸素移動の回復

Fig. 10 Recovery of dissolved oxygen transfer process from point (m) to point (s) with increase of residence time

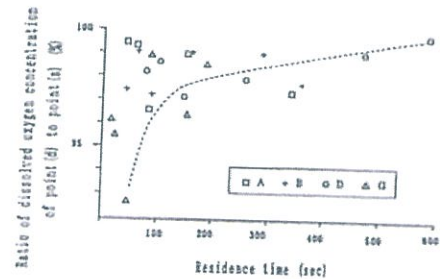


図-11 滞留時間の増加に伴う溶解酸素濃度比の変化<ポイント(d)とポイント(s)との比較>

Fig. 11 Rise in ratio of dissolved oxygen concentration of point (d) to point (s) in pools with residence time

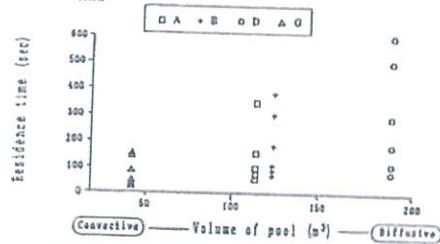


図-12 物質輸送形態と滞留時間による湖の区分

Fig. 12 Classification of pools based on mass transfer process depend on residence time

時間との関連を図-12にまとめ比較した。規模の小さい湖 (Section G) においては、滞留時間が短く対流が支配的になり、規模が大きい湖 (Section D) では滞留時間が長く拡散が卓越する。対流・拡散という物質輸送の形態は、溶解酸素のみならず、濁りの成分となる微細粒子や有機汚濁負荷など、物質の基本的な移動機構によるものである。したがって、水質変動を物質移動過程としてと

らえると、滞留時間により湖は拡散型と対流型に分けられ、その規模が区分の目安となる。

### 7. 溪流整備への適用

溶解酸素は水生生物の呼吸や緑色水生植物の光合成等、水界の生物作用には不可欠な要素であり、溶解酸素の枯渇は水界生物社会の機能と生存に重大な影響を及ぼす。さらに水質悪化の原因である有機汚濁負荷の分解作用を持っているため、再曝気による水中への酸素の供給は、自然の持つ水質浄化作用でもある。したがって砂防工事による溪流環境整備においては、その機能の保全、あるいは合理的利用が必要である。

対象溪流では、落下流による気泡の取り込みと水面の擾乱による再曝気が進み、その度合いは接触面積の拡大とともに増加し、50秒以内の滞留時間の中で最大となり、滞留時間が100秒を超えるような流れでは溶解酸素は側方へ拡散すると推定された。接触面積は流量とその落下流のエネルギー、すなわち落差や流れ込みの角度、川幅に左右され、滞留時間は湖の面積と水深、流量で決定される。したがって、例えば平常時の流量とこれらの因子を組み合わせた溪流整備により、溪流への酸素の供給・拡散のコントロールが可能であると考える。人為的な再曝気による酸素の供給が特に必要となるケースは、ダム下流域で見られるような低流量区間で、かつ、水温が高く飽和溶解酸素濃度が低下する時であろう。このような区間では、水温が上昇しないような方策も有効である。

さらに、溪流魚など酸素呼吸を行う水生生物にとっては、溶解酸素は生存していく上での限界条件になる。例えば、ブラウンマスやカジカは7~10 ml/lの非常に高い濃度の溶解酸素濃度を必要とする。また、各地でヤマメ等の稚魚の放流が行われているが、ふ化後30日程度の稚魚の酸素消費量は高く、こうした稚魚を大量に放流する場合には、溶解酸素濃度に対する配慮が特に必要となる。これらの魚類の放流環境・生活環境の保全のためには、対流型の湖や荒瀬を組み合わせて、酸素を流心方向に積極的に供給する溪流整備が望まれる。これは有機物による水質汚濁が進行している河川においてBODの分解除去を意図するケースにも当てはまる。或いはまた、短期間の行動様式や生活史のある時期においては、身を潜める空間を必要とするような魚類にとっては、比較的規模のある拡散型の湖を配置し溶解酸素を十分に拡散させることも必要であろう。

水利用が多目的となった現在、水源開発により河川維持流量は減少の一途をたどっているような感があり、少ない流量を有効に利用し、自然の浄化機能を損なわない、あるいは合理的に生かした溪流環境整備を考える時期に

北村: リエアレーションによる溪流への酸素の供給と対流・拡散

きているのではないと思われる。

おわりに

本研究では、様々な制約により時間的に連続した測定ができなかったため、溶解酸素濃度に影響を及ぼすと推定された諸因子を考慮し、増水期、濁水期、高温時、低温時等に測定を行った。その結果、時間的に離散的な調査であった感は否めない。また、接触面については、同一の接触面を複数の人間が計測したところ大差はなかったものの、誤差なく客観的に計測することはできず、したがって測定者の恣意が入り込む余地のなることは否定できない。今後も調査を継続し、これらの諸点を改善したいと考えている。

<お知らせ>

### 「六甲I・NETニュース」の発行について

六甲砂防工事事務所では7月15日、兵庫県南部地震による被災地域の復旧・復興状況を伝える情報誌「六甲I・NETニュース」(A4・カラー)を創刊しました。

この情報誌は毎月1回、5,000部発行し、関連行政機関や学校、図書館、また銀行のような住民の方がよく利用される機関に配布しています。さらにこの情報をインターネットでも配信しています。

地震による被災状況は世界中の注目を集めました、復旧・復興については時間の経過とともに人々の意識から薄れがちです。ライフラインの復旧、交通事情、流通事情の復旧により生活は落ち着きを取り戻していますが、土砂災害の発生については今も心配される所です。六甲砂防工事事務所をはじめ兵庫県、神戸市で実施している土砂災害の発生防止のための施策を紹介し、常に土砂災害に関する何らかの情報を発信し続けることはとても重要であると考えます。

これまでに貴重なご意見をメールで幾つかいただきました。現場で復旧、復興に携わっている私たちにとりまして大変励みになります。「六甲I・NETニュース」のインターネットのサーバーは次の通りです。

URL <http://www.iijnet.or.jp/sabonowa/>

E-mail [sabonowa@po.infosphere.or.jp](mailto:sabonowa@po.infosphere.or.jp)

建設省近畿地方建設局六甲砂防工事事務所調査課長

### 引用文献

- 1) Chapman, Deborah: Water Quality Assessments. Chapman and Hall Ltd., pp. 64-66, 1992
- 2) 稲葉伝三郎: 淡水増殖学. 朝倉社厚生館, pp. 262-263, 1961
- 3) 北村幸一・青山明夫・小倉航平: 溪流におけるリエアレーション. 平成6年度砂防学会研究発表会要集, pp. 285-288, 1994
- 4) 長瀬隆子氏: 水質汚濁の生物学的研究. 朝倉社厚生館, pp. 60-64, 1972
- 5) 中島重敏: 陸水環境調査法. 森北出版, pp. 149, 1983
- 6) 大久晴彦・藤岡成治: 移動速度論. 技報堂出版, pp. 1-291, 1980
- 7) 宗宮功雄: 自然の浄化機構. 技報堂出版, pp. 223-225, 1990

(原稿受理 1995年5月16日)

富田 陽子

ROKKO I-Net NEWS

建設省近畿地方建設局六甲砂防工事事務所調査課長