事例研究 CASE STUDY

長良川河口堰湛水域における一時的な水温成層の形成

村上 哲生¹⁾・服部 典子²⁾

1) 名古屋女子大学家政学部生活環境学科

2) 名古屋女子大学大学院生活学研究科生活環境学専攻

Tetuo MURAKAMI¹⁾ and Noriko HATTORI²⁾ : Formation of temporary thermal stratification in impoundment of the Nagara Rivermouth Barrage. *Ecol. Civil Eng.* 4(2), 179-184, 2001.

1) *Department of Life Environmental Science, Faculty of Domestic Science, Nagoya Women's University, 3-40, Shioji-cho, Mizuho-ku, Nagoya 457-0003, Japan*

2) *Division of Life Environmental Science, Graduate School of Domestic Science, Nagoya Women's University, 3-40, Shioji-cho, Mizuho-ku, Nagoya 457-0003, Japan*

**Ecology and
Civil Engineering**
応用生態工学

Abstract : Continuous hourly measurements of the vertical distribution of water temperature and dissolved oxygen concentration in the impoundment of the Nagara Rivermouth Barrage showed that temporary thermal stratification developed under fine weather conditions with light wind and that it obstructed vertical mixing of the water, which in turn, might lead to an oxygen deficit in the bottom water. The temporary thermal stratification was maintained for a few days. Diurnal minimum oxygen concentration in the bottom water was recorded at twilight, and vertical mixing caused by cooling of the surface water at midnight recovered the oxygen deficit. However, complete mixing including the bottom water did not occur every day. Judging from the rapid oxygen consumption rate by the water column and sediment, the temporary thermal stratification could cause frequent oxygen deficit in the impoundment in summer.

Key words : dam impoundment, Nagara Rivermouth Barrage, oxygen deficit, temporary thermal stratification, water temperature

はじめに

水温躍層の発達による表層水と底層水の混合の阻害が、夏季の湖や貯水池の底層に貧酸素水塊を形成することはよく知られている。しかし、初夏から秋にかけての長期間の水温成層の維持は、深い湖のみに見られる現象であり、浅い池沼では、風の攪乱により、全層が混合され、底層の貧酸素化は深刻な問題とならない場合が多い。

長良川河口堰の湛水域については、堰建設以前に、西條・渡辺(1990)が、表層の浮遊藻類の増殖の結果、底層では沈降した藻類遺骸の分解に伴う酸素消費が増加し、

貧酸素水塊が生ずる可能性を指摘しているが、堰湛水域の水深は、6 m 程と季節的な水温成層が形成されるには浅すぎ、また、流れによる混合の効果も期待できるため、この予測は、広く受け入れられることはなかったように思われる。

長良川河口堰運用開始後、村上(1996)は、一時的な底層水の貧酸素化とその解消について報告し、建設省による水温と溶存酸素の連続観測記録に基づき、日単位の持続時間を持つ水温成層の形成が短期間の貧酸素化を引き起こす可能性について述べている(村上 2000)。1995, 96, 97 年 8 月の観測結果によれば(建設省・水資源開発公団 1996, 1997, 1998)、底層溶存酸素濃度の減少は、表層と底層の水温差が大きくなる時期に見られる

2001 年 4 月 16 日受付, 2001 年 9 月 21 日受理

1) e-mail: murakami@nagoya-wu.ac.jp

ことが多い。

夏季の高水温の時期、季節的な水温躍層より浅い表層水に、二次的な躍層が形成される現象は、既に Welch (1952), や Ruttner(1953) により報告されており、季節的な躍層が形成されない浅い池沼や貯水池においても、岡本 (1974), 石川他 (1989), 糟谷・小竹 (1993), 木内 (1998), 池田他 (1998) が、日単位の持続時間を持つ一時的な成層（日成層）を観察している。

現在、河口堰湛水域では、三水深について連続的な水温等の測定が行なわれているが、ごく狭い範囲の深さで見られる成層状態の把握は難しいものと思われる。本報告は、堰湛水の水温鉛直分布の経時的な観測により、一時的な水温躍層の発達と解消の過程を記述し、気象条件等との関連を見ることを目的とするものである。流れが維持されている堰湛水域において、一時的な躍層がどのような気象条件の下で形成されるかを知ることは、底層の酸素状態やそれに関連する環境変化を理解する上できわめて重要であると考えられる。

調査方法

水温と溶存酸素の鉛直分布の測定は、長良川河口堰 0.6 km 上流の伊勢大橋流心付近（水深 6 m）で、2000 年 8 月 7～8 日、8 月 19 日に、1 時間毎に行った。水温は、サーミスタ式温度計、溶存酸素は投げ込み式隔膜電極で測定した。7～8 日は、終日 $0 \sim 3 \text{ msec}^{-1}$ の弱い風の日であり、19 日は、観測時間を通して強風が吹いていた。天候は、両観測日とも快晴ないしは晴れであり、日中の照度は 10,000 Lux 以上に達した。

また、伊勢大橋・河口堰間（水深 6.5 m）に、水温測定のためのデータ・ロガーを、鉛直方向に 17 個設置し、8 月 19 日から 9 月 3 日までの二週間の水温分布の変化を測定した。

日照、風力等の気象情報は、津気象台・桑名測候所の観測資料を用いた。

調査結果

弱風時の水温と溶存酸素の日変動

Fig. 1 は、弱風時の水温変化を示す。日照により暖められた表層水は、最高 29.5°C に達した。一方、底層水温は、終日 $25 \sim 26^{\circ}\text{C}$ であった。表層と底層の水温差は、最高 3.8°C であった。

鉛直方向への水温の低下は一様ではなく、0.5 m の深

Fig. 1. Isopleth of water temperature at Ise-Oohashi Bridge in impoundment of the Nagara Rivermouth Barrage during a light wind (7-8 Aug. 2000).

Fig. 2. Isopleth of dissolved oxygen at Ise-Oohashi Bridge in impoundment of the Nagara Rivermouth Barrage during a light wind (7-8 Aug. 2000).

度差につき 1°C 以上の水温低下が見られる場合もあった。このような躍層が形成される位置は、水温が上昇しつつある午前中は水深 1 m 付近であったが、それは時間とともに深い位置に移り、躍層を境とする上下層の水温差も小さくなる傾向が認められた。躍層の深度低下は、翌朝の日照が強くなる時間まで続いたが、河底に達すること

Fig. 3. Isopleth of water temperature at Ise-Oohashi Bridge in impoundment of the Nagara Rivermouth Barrage with the wind blowing hard (19 Aug. 2000).

はなく、全層の混合は認められなかった。日照の強い時間帯には、表層と底層の二箇所に躍層がみられることもあった。

浮遊藻類の生産、及び、躍層の形成と移動に伴い、溶存酸素の分布も著しい日変動を示した (Fig. 2)。日中の表層の溶存酸素濃度は飽和濃度の 200% 近くにも達したが、底層まで拡散することはなく、4 m 以深では、終日、不飽和の状態が維持された。また、酸素飽和 100% の境

Fig. 4. Isopleth of dissolved oxygen at Ise-Oohashi Bridge in impoundment of the Nagara Rivermouth Barrage with the wind blowing hard (19 Aug. 2000).

界は午後から夜間にかけて上昇し、20 時頃には 2 m の水深に達した。底層酸素濃度 (水深 5 m) は、この時間に日間最低値の 4.23 mg l^{-1} (52.2%) を記録した。酸素飽和 100% の境界は 21 時以降、再び深部へ移動した。

強風時の水温と溶存酸素の日変動

Fig. 3, 及び Fig. 4 は、強風時の、水温と溶存酸素の日変動を示す。日中、表層水に高水温で酸素過飽和の状態が見られるものの、鉛直方向への水温、酸素濃度の傾斜

Fig. 5. Vertical profiles of water temperature from 19 August to 2 September 2000 at midday (upper) and midnight (lower).

は緩く、温度成層の発達は顕著ではなかった。さらに夕刻に至れば、5 m 以浅では、均一な温度分布となった。

躍層の形成と解消の観測

Fig. 5 は、8 月 19 日から 9 月 2 日までの日中 (13:00) と夜間 (0:00) の水温の分布を示す。調査期間中、雨天であつた 8 月 31 日を除き、表層 2 m 以浅に水温が急変する層が毎日見られた。特に、日射が強く、風のない 8 月 21 日、26 日、9 月 1 日には、水深 1 m 付近に、明瞭な水温躍層が観察された。

日中の躍層は、夜間解消してしまう日もあったが、表層と底層の間に 1℃ 以上の水温差が残ることもあった。

考 察

無風の調査日、河口堰はオーバーフロー操作がされており、堰上流の表層水の交換はあったものの、日中 1℃ 程度の温度差を持つ水温躍層が観測された。これは躍層を境とし、約 0.1% の密度差が生じたものと考えられるが、田中・石川 (1989) は、その程度の密度差でも鉛直方向への物質輸送が抑制されると推定している。表層の浮遊藻類群集の生産 (明瓶・暗瓶法による純生産速度 $0.32 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ 、呼吸速度 $0.06 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ 、浅井他、未発表) による溶存酸素過飽和状態にも関わらず、4 m 以深の層は不飽和の状態を維持し、夕刻から、さらに不飽和の層が表層へ拡大していることは、躍層を介しての酸素の移動が制限されていることを示している。

夜間、表層水の冷却と混合により、躍層は深部へ移動するが、それに伴い、飽和した水層も表層から底層へ拡大し、宵の内に見られた飽和度 60% 以下の貧酸素状態は解消される。つまり、底層における日間の最低の酸素濃度も、不飽和層の最大の厚さも、宵の内に記録され、深夜から夜明にかけて酸素状態は回復することが示されている。富栄養化した湖沼では、底層酸素濃度は、夜間の継続的な酸素消費により、夜明前に最低となることが多く、魚介類の斃死事件もその時刻に発生することが多いが (例えば、相崎他 1979)、一時的な躍層が形成される場合には、最も深刻な酸素不足は日没後数時間に生じることは注目すべきであろう。連続測器による観測資料 (建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社、1997) でも、宵の内の酸素減少と夜間の回復が記録されている (Fig. 6)。酸素状態の改善のための曝気やフラッシュ・アウト操作はこの時刻に、特に効果的になるに違いない。

Fig. 7 は、日中の表層水と底層水の最大の水温差と桑

Fig. 6. Diurnal changes in dissolved oxygen (DO) at bottom layer of Ise-Oohashi, 20-23 Aug. 1996 when major algal development was recorded (from MoC & WRDPC 1997). Twilight decrease and midnight recovery in DO is observed each day.

名測候所で記録された日照時間及び平均風速との関係を示したものである。観測期間中、風向は晴天時には北から、雨天時には南からの場合が多く、いずれも河川軸方向であった。最大水温差は、日照時間と正の相関 ($r = 0.56$) が、また平均風速とは弱い負の相関 ($r = -0.33$) が、それぞれ認められた。風速は、成層の安定性の指標となる Wedderburn 数を決定する重要な因子であり、その変化により浅い池の成層状態が変化すると観測例もあるが (池田他 1998)、本研究では、成層の発達との明瞭な関連は見出せなかった。これは、観測期間中の風速が、日成層を破壊するとされている $3 \sim 4 \text{ msec}^{-1}$ の閾値 (石川他 1989, 木内 1998) 以下であったためと思われる。もちろん、厳密な躍層形成の過程の解析については、日照時間よりも水に伝わる熱エネルギーの量の測定が不可欠であり、また、風向・風速についても、微地形を考慮した現場測定値について議論すべきであろうが、一時的な水温躍層の形成と維持に及ぼす日照と風向・風速の二要因の重要性は否定できないものと考えられる。

弱風日に形成された躍層は、夜間、水深の深い位置に移動するが、底まで達することはないこともあり、琵琶湖の内湾 (岡本 1974) や手賀沼 (木内 1998) などの、

Fig. 7. Relationships between maximal difference in water temperature (surface-bottom), and daylight hours (left) and daily mean wind velocity (right) at Kuwana Observatory, Mie Pref., $r=0.56$ and $r=-0.33$ (datum on rainy day (●) is omitted), respectively.

水深 1 m 程度のごく浅い止水で観測されたような全層の循環は、常に認められるものではない。日中、表層と底層附近の二箇所に躍層が見られることがあるが、後者は前日の躍層の水温差が解消されず残存しているものと考えられる。同様な現象は、糟谷・小竹 (1993) も水深 3 m の溜池で観察している。

水深 6 m に達する河口堰湛水域では、季節的な成層は認められないものの、夏季、晴天で無風の天候が続けば、強風か増水が生じない限り、一時的な水温の成層は日を越えて維持されるものと考えられる。観測現場付近の底層水の酸素消費速度については、石橋 (1995) が、浮遊藻類が発生していない時期、約 $1 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}\text{day}^{-1}$ の減少を観測しており、顕著な浮遊藻類の発生が認められた本調査時期では、前述の観測 (浅井, 未発表) に基づけば、酸素消費速度は、計算上 $1.4 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}\text{day}^{-1}$ にも達する。数日間の底層水の停滞が、深刻な酸素不足を生じることが充分予想される。河口堰湛水域の底層酸素不足の原因究明や、その改善の方策の検討に当たっては、一時的な温度成層の形成と解消の過程の理解は不可欠であろう。

摘 要

長良川河口堰湛水域において、水温と溶存酸素の鉛直分布を一時間毎に連続観測し、快晴で弱風の気象条件の下で、一時的な水温成層が発達することを明らかにした。成層は水柱の鉛直混合を阻害し、さらに、底層の酸素不足を引き起こす可能性があることが示された。底層酸素濃度は、宵の内に最も低い値が記録され、深夜には表層水の冷却による鉛直混合のために底層の酸素不足は解消された。しかし、底まで達する全水層の完全な混合は毎

日起こるわけではなく、一時的な水温成層は、数日間維持されることもあった。水柱や堆積物による急速な酸素消費速度から判断すれば、一時的な水温成層は、夏季の湛水域底層でしばしば観測される酸素不足の原因となる可能性がある。

引用文献

- 相崎守弘・福島武彦・大槻晃・手塚和彦 (1979) ブルーム時の水草帯における溶存酸素量の日変動。国立公害研究所報告 6: 133-137.
- 池田裕一・木内崇偉・須賀堯三 (1998) 渡良瀬貯水池における日成層現象の観測。環境技術 27: 825-830.
- 石橋雅子 (1995) 建設省の監視体制と浮遊生物の異常増殖。陸水学雑誌 56: 71-72.
- 石川忠晴・田中昌宏・小関昌信 (1989) 浅い日成層が水質に及ぼす影響。土木学会論文集 411: 245-254.
- 糟谷真宏・小竹美恵子 (1993) 富栄養ため池の水温成層が水質に及ぼす影響および用水導入の水質改善効果。愛知県農業総合試験場報告 25: 275-279.
- 建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社 (1996) 平成 7 年度長良川河口堰モニタリング年報 第 1 巻。建設省・水資源開発公団.
- 建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社 (1997) 平成 8 年度長良川河口堰モニタリング年報 第 1 巻。建設省・水資源開発公団.
- 建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社 (1998) 平成 9 年度長良川河口堰モニタリング年報。建設省・水資源開発公団.
- 木内浩一 (1998) 手賀沼における夏の温度成層とその水質について。千葉県水質保全研究所年報 平成 9 年度: 103-108.
- 村上宗洞 (1996) 堰稼働後の環境変化に関する調査報告及び建設省河口堰調査・モニタリング委員会見解に対する反論 (水質編)「長良川河口堰事業の問題点一第三次報告一」(日本自然保護協会・長良川河口堰問題専門委員会編) pp. 23-43. 日本自然保護協会, 東京.
- 村上哲生 (2000) 溶存酸素「河口堰の生態系への影響と河口域の保全」(日本自然保護協会保護委員会河口堰問題小委員

- 会編) pp. 5-6. 日本自然保護協会, 東京.
- 岡本巖 (1974) 琵琶湖の水循環. 「びわ湖 1. 自然をさぐる」 (滋賀大学湖沼研究所編), pp. 39-94. 三共出版, 東京.
- Ruttner, F. (1952) *Fundamentals of Limnology* (2nd ed.). University of Toronto Press, Toronto. (Translated by Frey, D. G. and Fry, F. E., 1953)
- 西條八束・渡辺泰徳 (1990) 長良川河口堰付近の水質変化の予測. 「長良川河口堰事業の題点 中間報告」 (日本自然保護協会・河川問題調査特別委員会・長良川河口堰問題専門委員会編) pp. 39-49. 日本自然保護協会, 東京.
- 田中昌宏・石川忠晴 (1989) 日成層形成時の吹送流の特性について. 土木学会論文集 **405**: 63-72.
- Welch, P. S. (1952) *Limnology*. McGraw-Hill, New York.