

成層化水域における水面冷却対流を考慮した溶存酸素の鉛直一次元解析

速水, 公佑
九州大学大学院生物資源環境科学府

原田, 昌佳
九州大学大学院農学研究院

平松, 和昭
九州大学大学院農学研究院

田畑, 俊範
九州大学大学院農学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/1916210>

出版情報：農業農村工学会九州沖縄支部大会講演要旨集. H29, pp.2-3, 2017-11-01. 農業農村工学会九州沖縄支部

バージョン：

権利関係：本論文の著作権は(公社)農業農村工学会に帰属します



成層化水域における水面冷却対流を考慮した溶存酸素の鉛直一次元解析

九州大学大学院生物資源環境科学府 ○(学) 速水公佑

九州大学大学院農学研究院 (正)原田昌佳, (正)平松和昭, (正)田畑俊範

1. はじめに 有機汚濁水域の水温成層に起因する無酸素化への対策は、水環境保全を考える上で必要不可欠である。水面冷却に伴う冷水塊の沈降により生じる鉛直対流は、無酸素化の解消に大きく関わる水理現象である。本研究では、水面冷却対流による無酸素化の解消を通じた水質改善効果に着目し、その基礎研究として、冷水塊沈降に伴う DO の輸送量を検討した。まず、水温の鉛直 1 次元拡散モデルから算定される冷水塊の沈降速度を利用し、水面冷却対流による移流効果を考慮した DO の鉛直 1 次元解析を行い、この結果の妥当性について、水槽スケールでの水面冷却実験、および実水域での水温・DO の現地観測を通じて検証した。また、強固な水温成層を有する水域を対象に、水面冷却対流を考慮した水温・DO の 1 次元連成解析手法を提案した。

2. 推定方法 水面冷却対流の鉛直 1 次元解析モデルは次式で表される (木村ら, 1993)。

$$C_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = C_p \rho \frac{\partial}{\partial z} \{(\theta - \theta')q'\} + k \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここで、 θ は水温、 θ' と q' はそれぞれ水面から沈降する冷水塊の水温と沈降量を表し、これらは水深 z の関数である。また、 C_p 、 ρ は水の比熱と密度、 k は熱伝導係数である。実験・観測等により水温鉛直分布 $\theta(z)$ の時系列データが得られ、また水面冷却によって水深 z_m で最大水温 θ_m をとるものとする。加えて比例定数 a を用いて沈降量を $q'(z) = a \cdot (\theta - \theta')$ で表すと、式(1)を区間 $[z_m, z]$ で積分することで得られる次式より $(\theta - \theta')$ は算定できる。

$$q'_{z_m} = \frac{1}{\theta_m - \theta'_m} \sqrt{\chi_m} \quad (2)$$

$$\chi_m = \frac{1}{a} \left\{ \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z_b} - \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z_m} - (z_b - z_m) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \Big|_{z_b} \right\} \quad (3)$$

$$\theta - \theta' = \sqrt{\frac{1}{a} \{ \chi + q'_{z_m} (\theta_m - \theta'_m) \}} \quad (4)$$

$$\chi = (z - z_m) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} - \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_z + \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z_m} \quad (5)$$

ここで、 $\bar{\theta}$ は区間 $[z_m, z]$ の平均水温で、 λ は温度伝達率である。2 成層化水域を対象とするため、式(3)の z_b を冷水塊の沈降流が反射する密度界面の水深と定義し、また、冷水塊の沈降速度は比例定数 β を用いて $w(z) = \beta \cdot q'(z)$ と表した。水面冷却対流速を $w(z)$ とみなすと DO の鉛直輸送に関する基礎式は、冷水塊沈降による移流項を考慮に入れた次式で表す。

$$\frac{\partial C_{DO}}{\partial t} + \frac{\partial (w C_{DO})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial C_{DO}}{\partial z} \right) + k_{DO} \cdot C_{DO} \quad (6)$$

ここで、 C_{DO} は DO 濃度、 ε は分子拡散係数あるいは乱流拡散係数を表す。また、上式の右辺第 2 項は水面のみで考慮される再曝気項であり、 k_{DO} は再曝気係数を表す。

3. 実験水槽における DO の推定 低温恒温室にて、断熱材で被覆した縦×横 30cm、高さ 90cm のアクリル水槽内に表層・躍層・深水層からなる水温成層を形成させ、水面を冷却した状態で、水温鉛直分布の連続測定を行った。また、 Na_2SO_3 を用いて深水層を貧酸素状態とし、水面、密度界面、水底の 3 か所で DO の連続観測を行った。表層を水温 35°C、厚さ 30cm、深水層を水温 20°C、深さ 60cm として、室温 15°C で水面を冷却したときの DO の推定結果と測定結果を図 1 に示す。同図より、冷水塊沈降量の計算結果を利用した DO の鉛直 1 次元解析の妥当性が示された。

4. 実水域における DO の推定 九州大学伊都キャンパス内の水深約 8m の 5 号調整池にて、水温鉛直分布の連続観測と DO 鉛直分布の定期観測を行った。前者では 9~11 月、後者では

水温が一様となる 12 月までのデータを得た。水温鉛直分布の観測結果から水面冷却対流速を算定し、式(6)に基づき DO 鉛直分布を推定した。なお、式(6)中の ε は乱流拡散係数であり、風速を入力変数とし、成層化による鉛直拡散の抑制効果を考慮したモデル式より算定できる(原田ら, 2009)。図 2 に DO の観測結果と計算結果を示す。また、従来の拡散のみを考慮した場合の DO の計算結果を併記した。移流を考慮に入れた DO の計算結果は、水深方向全域に渡って観測結果と概ね一致した。特に、温度躍層の影響から DO の季節変動が大きい水深 4m においても良好な再現結果を得たことから、2 成層化した実水域においても本手法の有効性が示された。次に、水面冷却対流を考慮した水温・DO の鉛直 1 次元解析を以下の手順で行った。まず、気象データを計算条件として、乱流拡散項のみを考慮した 1 次元モデルより水温鉛直分布を計算する。ついで、水温分布の時間変化から冷水塊の沈降量を計算し、鉛直対流による熱輸送を考慮するために、移流方程式より水温の鉛直分布を補正する。さらに、冷水塊の沈降速度を用いて式(6)より DO の鉛直分布を計算する。以上の手順による DO 鉛直分布の計算結果を観測結果と併せて図 3 に示した。また、従来の鉛直 1 次元モデルによる DO の計算結果も示した。同図より、従来法と比較して本モデルでは、混合層や躍層での DO の季節変化を良好に再現できた。この点で、本研究で提案した水温・DO の 1 次元解析手法の有効性が示された。

5. おわりに 水温鉛直分布に基づく冷水塊の沈降量の算定方法を組み込んだ、水温・DO の 1 次元移流・拡散モデルを提案し、実測値との比較によってその妥当性を示した。従来のモデルでは水面冷却対流が考慮されない点で課題があったが、本研究ではその点を克服したことで、無酸素化解消の定量的評価に向けて重要な知見を得られた。

引用文献 木村ら(1993): 水面冷却によって生じる熱対流量の鉛直 1 次元モデルによる推算, 農土論集,

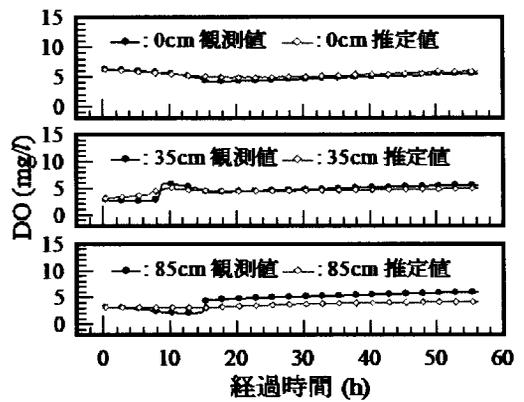


図 1 実験水槽スケールでの DO の推定値と観測値の比較

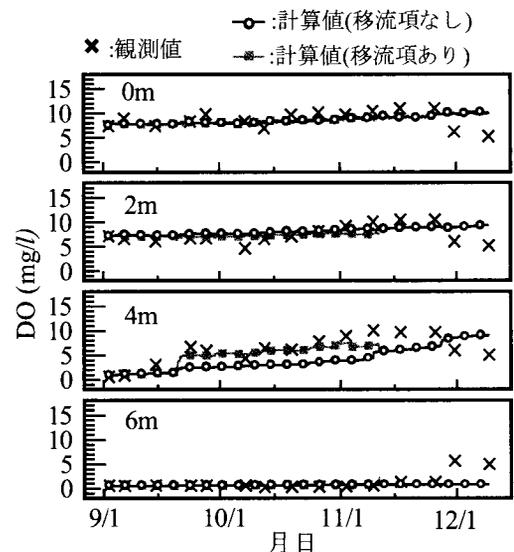


図 2 水温の連続観測結果に基づく DO の計算結果と観測結果

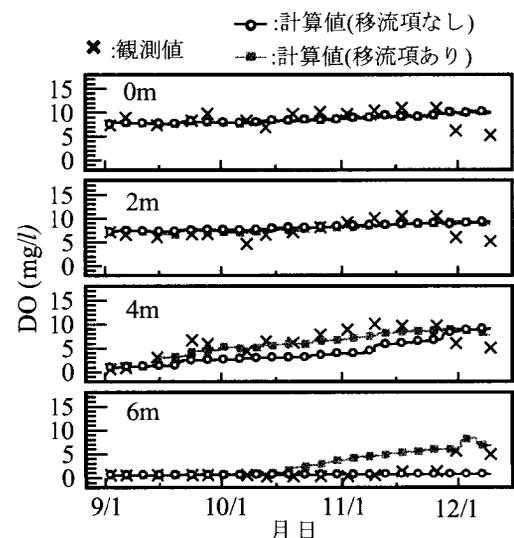


図 3 水温・DO の鉛直 1 次元解析モデルによる DO の計算結果と観測結果

166, pp.9-14. 原田ら(2009): 寡少な水中光環境下にある富栄養化水域水質の動態特性. 雨水資源化システム学会誌, 14(2), pp. 87-96.

成層化水域における水面冷却対流を考慮した溶存酸素の鉛直一次元解析

九州大学大学院生物資源環境科学府 ○(学) 速水公佑

九州大学大学院農学研究院 (正)原田昌佳, (正)平松和昭, (正)田畑俊範

1. はじめに 有機汚濁水域の水温成層に起因する無酸素化への対策は、水環境保全を考える上で必要不可欠である。水面冷却に伴う冷水塊の沈降により生じる鉛直対流は、無酸素化の解消に大きく関わる水理現象である。本研究では、水面冷却対流による無酸素化の解消を通じた水質改善効果に着目し、その基礎研究として、冷水塊沈降に伴う DO の輸送量を検討した。まず、水温の鉛直 1 次元拡散モデルから算定される冷水塊の沈降速度を利用し、水面冷却対流による移流効果を考慮した DO の鉛直 1 次元解析を行い、この結果の妥当性について、水槽スケールでの水面冷却実験、および実水域での水温・DO の現地観測を通じて検証した。また、強固な水温成層を有する水域を対象に、水面冷却対流を考慮した水温・DO の 1 次元連成解析手法を提案した。

2. 推定方法 水面冷却対流の鉛直 1 元解析モデルは次式で表される (木村ら, 1993)。

$$C_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = C_p \rho \frac{\partial}{\partial z} \{ (\theta - \theta') q' \} + k \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここで、 θ は水温、 θ' と q' はそれぞれ水面から沈降する冷水塊の水温と沈降量を表し、これらは水深 z の関数である。また、 C_p 、 ρ は水の比熱と密度、 k は熱伝導係数である。実験・観測等により水温鉛直分布 $\theta(z)$ の時系列データが得られ、また水面冷却によって水深 z_m で最大水温 θ_m をとるものとする。加えて比例定数 a を用いて沈降量を $q'(z) = a \cdot (\theta - \theta')$ で表すと、式(1)を区間 $[z_m, z]$ で積分することで得られる次式より $(\theta - \theta')$ は算定できる。

$$q'_{z_m} = \frac{1}{\theta_m - \theta'} \sqrt{\chi_m} \quad (2)$$

$$\chi_m = \frac{1}{a} \left\{ \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z_b} - \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z_m} - (z_b - z_m) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \Big|_{z_b} \right\} \quad (3)$$

$$\theta - \theta' = \sqrt{\frac{1}{a} \{ \chi + q'_{z_m} (\theta_m - \theta') \}} \quad (4)$$

$$\chi = (z - z_m) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} - \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_z + \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z_m} \quad (5)$$

ここで、 $\bar{\theta}$ は区間 $[z_m, z]$ の平均水温で、 λ は温度伝達率である。2 成層化水域を対象とするため、式(3)の z_b を冷水塊の沈降流が反射する密度界面の水深と定義し、また、冷水塊の沈降速度は比例定数 β を用いて $w(z) = \beta \cdot q'(z)$ と表した。水面冷却対流速を $w(z)$ とみなすと DO の鉛直輸送に関する基礎式は、冷水塊沈降による移流項を考慮に入れた次式で表す。

$$\frac{\partial C_{DO}}{\partial t} + \frac{\partial (w C_{DO})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial C_{DO}}{\partial z} \right) + k_{DO} \cdot C_{DO} \quad (6)$$

ここで、 C_{DO} は DO 濃度、 ε は分子拡散係数あるいは乱流拡散係数を表す。また、上式の右辺第 2 項は水面のみで考慮される再曝気項であり、 k_{DO} は再曝気係数を表す。

3. 実験水槽における DO の推定 低温恒温室にて、断熱材で被覆した縦×横 30cm、高さ 90cm のアクリル水槽内に表層・躍層・深水層からなる水温成層を形成させ、水面を冷却した状態で、水温鉛直分布の連続測定を行った。また、 Na_2SO_3 を用いて深水層を貧酸素状態とし、水面、密度界面、水底の 3 か所で DO の連続観測を行った。表層を水温 35°C、厚さ 30cm、深水層を水温 20°C、深さ 60cm として、室温 15°C で水面を冷却したときの DO の推定結果と測定結果を図 1 に示す。同図より、冷水塊沈降量の計算結果を利用した DO の鉛直 1 次元解析の妥当性が示された。

4. 実水域における DO の推定 九州大学伊都キャンパス内の水深約 8m の 5 号調整池にて、水温鉛直分布の連続観測と DO 鉛直分布の定期観測を行った。前者では 9~11 月、後者では

水温が一様となる 12 月までのデータを得た。水温鉛直分布の観測結果から水面冷却対流速を算定し、式(6)に基づき DO 鉛直分布を推定した。なお、式(6)中の ε は乱流拡散係数であり、風速を入力変数とし、成層化による鉛直拡散の抑制効果を考慮したモデル式より算定できる(原田ら, 2009)。図 2 に DO の観測結果と計算結果を示す。また、従来の拡散のみを考慮した場合の DO の計算結果を併記した。移流を考慮に入れた DO の計算結果は、水深方向全域に渡って観測結果と概ね一致した。特に、温度躍層の影響から DO の季節変動が大きい水深 4m においても良好な再現結果を得たことから、2 成層化した実水域においても本手法の有効性が示された。次に、水面冷却対流を考慮した水温・DO の鉛直 1 次元解析を以下の手順で行った。まず、気象データを計算条件として、乱流拡散項のみを考慮した 1 次元モデルより水温鉛直分布を計算する。ついで、水温分布の時間変化から冷水塊の沈降量を計算し、鉛直対流による熱輸送を考慮するために、移流方程式より水温の鉛直分布を補正する。さらに、冷水塊の沈降速度を用いて式(6)より DO の鉛直分布を計算する。以上の手順による DO 鉛直分布の計算結果を観測結果と併せて図 3 に示した。また、従来の鉛直 1 次元モデルによる DO の計算結果も示した。同図より、従来法と比較して本モデルでは、混合層や躍層での DO の季節変化を良好に再現できた。この点で、本研究で提案した水温・DO の 1 次元解析手法の有効性が示された。

5. おわりに 水温鉛直分布に基づく冷水塊の沈降量の算定方法を組み込んだ、水温・DO の 1 次元移流・拡散モデルを提案し、実測値との比較によってその妥当性を示した。従来のモデルでは水面冷却対流が考慮されない点で課題があったが、本研究ではその点を克服したことで、無酸素化解消の定量的評価に向けて重要な知見を得られた。

引用文献 木村ら(1993): 水面冷却によって生じる熱対流量の鉛直 1 次元モデルによる推算, 農土論集,

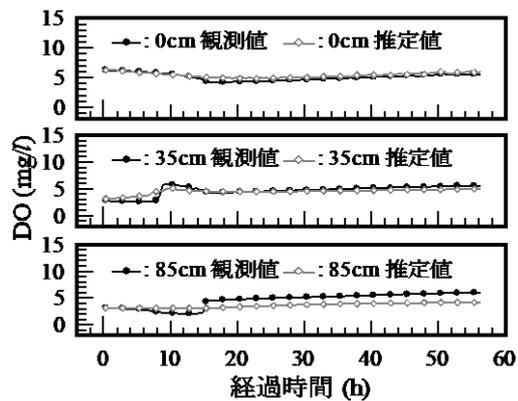


図 1 実験水槽スケールでの DO の推定値と観測値の比較

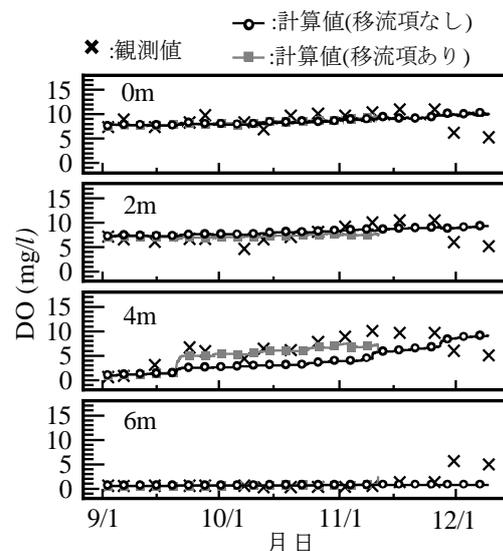


図 2 水温の連続観測結果に基づく DO の計算結果と観測結果

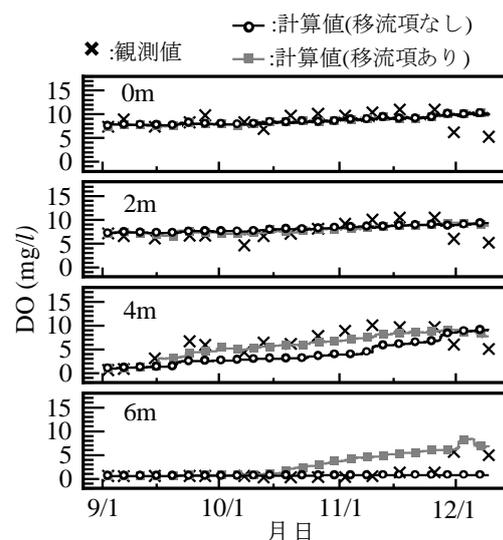


図 3 水温・DO の鉛直 1 次元解析モデルによる DO の計算結果と観測結果

166, pp.9-14. 原田ら(2009): 寡少な水中光環境下にある富栄養化水域水質の動態特性. 雨水資源化システム学会誌, 14(2), pp. 87-96.