

水生植物の繁茂する閉鎖性水域の水面熱境界に関する考察

濱上, 邦彦

九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻生産環境情報学研究室

井上, 寿人

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門生産環境科学講座生産環境情報学研究室

森, 健

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門生産環境科学講座生産環境情報学研究室

平井, 康丸

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門生産環境科学講座生産環境情報学研究室

<https://doi.org/10.15017/13168>

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 63 (2), pp.187-194, 2008-10-29. 九州大学大学院農学
研究院

バージョン：

権利関係：

水生植物の繁茂する閉鎖性水域の水面熱境界に関する考察

濱上 邦彦¹・井上 寿人
森 健*・平井 康丸

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門生産環境科学講座生産環境情報学研究室
(2008年6月27日受付, 2008年7月16日受理)

Thermal Boundary on the Water Surface in a Closed Water Body with Aquatic Plants

Kunihiko HAMAGAMI¹, Hisato INOUE, Ken MORI*
and Yasumaru HIRAI

Laboratory of Bioproduction and Environment Information Sciences, Division of Bioproduction and
Environment Information Science, Department of Bioproduction Environmental Science,
Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

貯水池や湖沼などの閉鎖性水域では、外部との流入・流出が少ないため、河川に比べて滞留時間が長く、物質が蓄積されやすい。また、自浄作用が小さいため富栄養化が深刻化しやすい。このような水域では、植物プランクトンの一次生産が極めて高いため、アオコなどがしばしば観測され生態系の多様性に大きな影響を与えている。これに伴い水辺周辺地域の景観悪化、さらには悪臭といった水環境への悪影響も懸念されており、水質改善が極めて重要な課題となっている。

閉鎖性水域における水質悪化は、水温差や水質濃度差に基づく密度成層の顕在化により物質の鉛直輸送・混合が抑制されることに起因する。この成層状態を解消する駆動力としては、水面における風の作用による機械的擾乱に基づく流れである吹送流、および日中の日射・夜間の放射冷却作用による熱的擾乱に基づく流れである熱対流があり、この2つの擾乱に対する水域の応答である流動と水環境物質の挙動との関係を解明することが重要な問題である。比較的水深が浅い閉鎖性水域における熱対流については、季節変動による水

温躍層は一般に存在せず、日サイクルでの水温成層化および水温混合層の形成が支配的となり、水質の悪化が問題となる夏期の水質変動に重要な影響を及ぼすことが報告されている(森ら, 2001, Hamagami *et al.*, 2008)。

一方、これら閉鎖性水域において顕在化する富栄養化問題を解決するために、水域内に繁茂する水生植物を活用した水質浄化が提案されている。これは、水生植物による栄養塩の吸収能を用いて、水生植物に栄養塩を吸収させた後に域外へ除去することで、水域内の栄養塩の蓄積を抑制するものである。水生植物の有する水質浄化能力の活用については、効果的な自然浄化手法として多くの研究がなされている。水面で生育する浮遊性植物に関する研究としてはオオサンショウモ(嶋田ら, 1988, 渡辺ら, 1988)やホテイアオイ(石井・則直, 2005)などの有用性が報告されている。しかし、水面に繁茂する浮遊性水生植物(以下、単に水生植物と呼ぶ)は、水域内流動の駆動力となる熱的擾乱の規模に影響を及ぼすことが考えられる。その結果、水域内の流動が抑制され、底層に堆積している栄養塩類の上層への輸送も抑制され、水生植物による効率的

¹九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻生産環境情報学研究室

¹Laboratory of Bioproduction and Environment Information Sciences, Division of Bioproduction and Environment Information Sciences, Department of Bioproduction and Bioenvironmental Science, Graduate School of Bioresource and Environment Science, Kyushu University

*Corresponding author (E-mail: moriken@bpes.kyushu-u.ac.jp)

な水質浄化ができなくなる。すなわち水生植物を用いた水質浄化を行う際には、その存在が水域内の流れに及ぼす影響を把握し、水生植物の水質浄化能が効率的に作用するための繁茂量および繁茂形態を規定することが必要となる。このように水生植物が閉鎖性水域に繁茂した場合の水域内循環および物質輸送メカニズムに関する研究例は少ない。

そこで、本研究では、水生植物の存在が水域内の流れに及ぼす影響を検討する上でまず必要となる、水面における熱輸送の抑制効果を水槽実験より明らかにする。富栄養化の進行した浮遊性植物優占型の閉鎖性水域を対象として、熱的擾乱が卓越した場合を仮定し、水生植物の種類およびその密生度により抑制される水面での熱フラックスを明らかとするため、日中の日射および夜間の放射冷却における水生植物による照度の遮蔽率および熱フラックスの遮蔽率を測定する。ついで、これらの結果を数値シミュレーションにおける水面での境界条件として適用し、水温分布の変化を調べる。これより水面における水生植物の繁茂が水温混合層の発達過程に及ぼす影響について検討を行う。

実験概要

本水槽実験では、水生植物の種類・密生度に応じた水面での熱輸送の抑制効果を明らかとするため、各水生植物について全水面に占める水生植物の繁茂量を変化させ、水温鉛直分布の時間変化および水面直下における照度を測定した。なお、水生植物は水面に均等に繁茂させており、例えば繁茂量50%では全体にまばらに繁茂することになる。その意味で水生植物の繁茂量に関しては、繁茂率50%と呼ばず、密生度50%と呼ぶことにする。実験水槽は、深さ100cm、直径64cmの亚克力板製の円柱形水槽である(図1参照)。水深を80cmとし、その上部20cmを防風壁とした。水槽側面からの熱の授受を防ぐため、側壁を厚さ1cmの発泡スチロールで覆い、また水槽内壁での光の乱反射を防止するために水槽内部には遮光シートを貼付している。水温測定には熱電対を用い、水深4cmから鉛直方向に8cm間隔で計10点設置した。また、照度計を植物体直下の水中に設置し、また正味の日射量を測定するために日射計を水槽の隣に設置した。測定周期は30秒である。実験は周辺に障害物のない屋外で行い、実験用流体としては、水道水を使用している。水槽は計5つ設置し、4つの水槽には、特徴の異なる水生植物をそれぞれ繁茂させ、残る1つの水槽には水生植物を繁茂させなかった(水生植物なし)。

本研究において使用した浮遊性植物はアオウキクサ、オオサンショウモ、アマゾンフロッグピット、ホテイアオイの4種類である。これらはすべて浮遊性植物ではあるが、その大きさ、繁茂形態は異なっている。アオウキクサは葉の長径3-6mm、短径2-4mmと非常に葉面積が小さいが、繁殖力が強く群生して水面を覆う(写真1(a))。オオサンショウモは葉の長径2-3cm、短径2-2.5cmであり、表面に長さ2-3mmの針状の毛を密生する(写真1(b))。アマゾンフロッグピットは葉の長径1-4cm、短径1-3cmであり、葉裏がスポンジ状になっており強い浮力を有する(写真1(c))。ホテイアオイは大形の浮遊性多年草であり、成長すると浮き袋状の葉柄は径3-5cm、長さ5-15cm、葉は3-20cm程度となり、群生し折り重なることで全体の背丈は40cmにもなる(写真1(d))。これらを写真1のように水面に均等に分布するように繁茂



図1 実験装置図

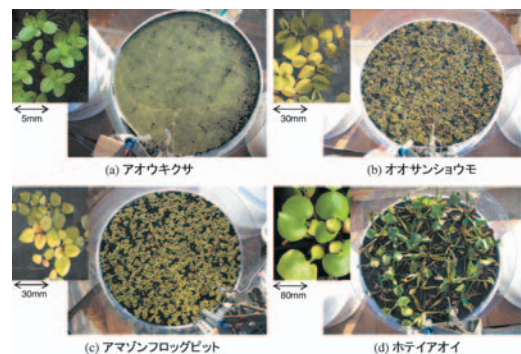


写真1 水生植物の種類と繁茂状況

表1 実験条件

実験番号	密生度					最高気温 (°C)	最低気温 (°C)	レーリー数 $R_a(\times 10^{14})$
	アオウキクサ	オオサンショウモ	アマゾンフロググピット	ホテイアオイ	水生植物なし			
Exp.1	0.91	0.75	0.62	0.78	0.00	12.1	3.2	2.22
Exp.2	0.90	0.82	0.67	0.78	0.00	15.3	4.1	2.30
Exp.3	0.91	0.65	0.66	0.78	0.00	14.2	5.3	1.53
Exp.4	0.86	0.66	0.63	0.61	0.00	16.1	7.1	1.46
Exp.5	—	—	—	0.61	0.00	14.4	7.5	1.64
Exp.6	0.78	0.65	0.61	0.59	0.00	15.4	4.5	1.72
Exp.7	0.81	0.62	0.65	0.59	0.00	17.1	6.9	0.95
Exp.8	0.77	0.62	0.53	0.54	0.00	15.9	7.5	1.51
Exp.9	0.68	0.52	0.51	0.54	0.00	17.8	5.4	1.93
Exp.10	0.50	0.55	0.45	0.46	0.00	19.6	9.1	1.06

させた。また、密生度は写真1から画像処理によって全水面における水生植物の占める割合を求めた。

実験開始を午前9時前後とし、夜間に水温鉛直分布が一様となるまで観測を行った。表1に実験条件を示す。表1末欄のレーリー数 R_a は、放熱期における熱対流の規模を表すパラメータであり、(1)式で定義される。表1には水生植物なしの場合における数値を示している。

$$R_a = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\kappa_T v} = \frac{\beta F_H H^4}{\rho c_p \kappa_T^2 v} \quad (1)$$

ここに、 β は体膨張係数、 ΔT は空気と水の温度差、 H は水深、 κ_T は熱伝導率、 v は動粘性係数、 F_H は熱フラックス、 ρ は代表密度、 c_p は定圧比熱、 g は重力加速度を表す。(1)式の計算においては $\beta = 2.5 \times 10^{-4}$ 、 $\kappa_T = 1.4 \times 10^{-4}$ とした。

実験結果と考察

1. 照度の特性

図2はExp.1における各水槽での照度の経時変化を示している。午前9時頃より日射量が大きくなっているが、この日は曇り空であったため、最大日射量は $700\text{W}/\text{m}^2$ 程度であり、また時間とともにその値は大きく変動している。どの時間帯においても各水槽における照度が日射計の値を超えることはないが、その変動波形は類似している。

水生植物なしの場合は日射計とほぼ同様の値であり、次にアオウキクサ、アマゾンフロググピット、オオサンショウモ、ホテイアオイの順に値が小さくなっている。アマゾンフロググピットはアオウキクサやオオサンショウモに比べて葉厚が厚いにも関わらず、照度の減少が少なくなっている理由は、密生度が小さいため

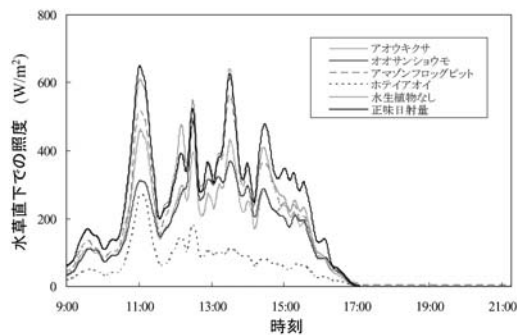


図2 Exp.1における照度の経時変化

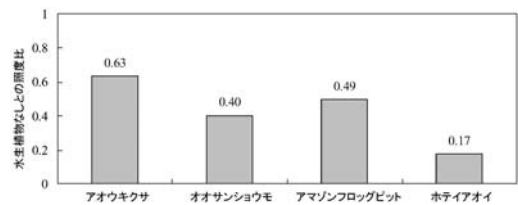


図3 各水生植物における照度の減衰

に植物体が照度計を覆っていない時間帯があったこと、また葉の大部分がスポンジ状の構造をしていることが考えられる。ホテイアオイの照度が大きく減少しているのは、ホテイアオイでは水面上で葉が重なっていることや、浮き袋および根による影響も大きいと考えられる。

図3は水生植物なしの場合の照度に対する、各水生植物における照度の比を示している。図より、アオウキクサは63%、アマゾンフロググピットは49%、オオサンショウモは40%、ホテイアオイは17%程度まで、照度が遮蔽されることがわかる。

2. 水温鉛直分布の特性

図4はExp.1での各水槽・各水深における水温の時間変化を示す。いずれの水槽においても、日中は日射および気温の上昇によって加熱され水面より層状に水温成層が形成される。そして夜間の放射冷却によって水面より水温が一様な層（混合層）が発達し、水温成層は解消される。しかし、水生植物が繁茂する場合は水温変動の特徴が異なる。表層付近の水温が大きく上昇し、下層の水温の上昇幅は小さくなっており、すなわち下層まで十分に熱が伝わっていないことがわかる。この傾向は水生植物の種類によっても異なり、特にホテイアオイの場合（図4(d)）では下層における熱変化の量は非常に小さくなっていく。

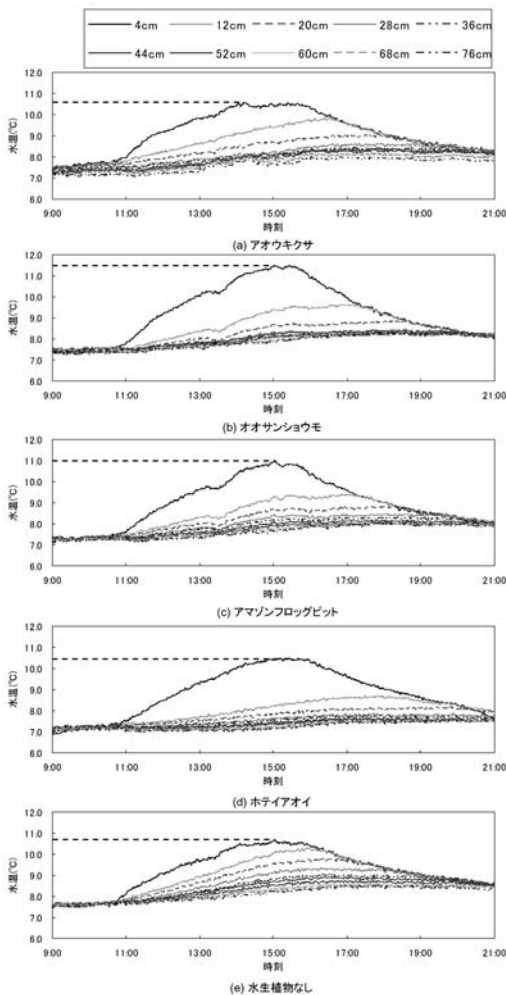


図4 Exp.1における各水槽の水温の経時変化

図5はEXP.1における日射量の経時変化、各水槽における熱量および水面での熱フラックスの経時変化を示している。水深 H の単位面積の水柱における熱量は以下の式で求められる。

$$Q = \int_0^H \rho c_p T dz \quad (2)$$

ここに、 Q は熱量、 T は水温を表している。(2)式による熱量の算出には密度および比熱の値を1とした。熱量は日中、日射のある時間帯では増加し、日射のなくなる夕方時間帯に最大となる。それから日没後は気温の低下に伴い熱量は減少する。水生植物なしの場合の熱量が観測期間全体を通して最も大きく、水生植物が繁茂する場合は熱量は受熱期の増加率および放熱期の減少率ともに小さくなり、ホテイアオイの場合で最小となる。これらの傾向は水生植物の葉の厚さに対応して変化していることがわかる。また、単位面積、単位時間当たりの熱フラックス F_H は、熱の授受が水面でのみ行われると仮定すると、以下の式で表される。

$$F_H = \Delta Q / \Delta t \quad (3)$$

ここに、 Δt は測定間隔をあらわし、 ΔQ は熱量 Q の Δt における変化量を表す。熱フラックスは大气から水中へ向かう熱（受熱）を正としている。日射のなくなる夕方以降、熱フラックスが正から負に転じており、本実験ではこれを熱フラックスが正の時間帯である受熱期、負の時間帯である放熱期の境界と定義した。受熱期においては、その値は水生植物なしの場合が平均的に大きく、ホテイアオイの場合が最も小さい。放熱期においても同様の傾向が見られる。

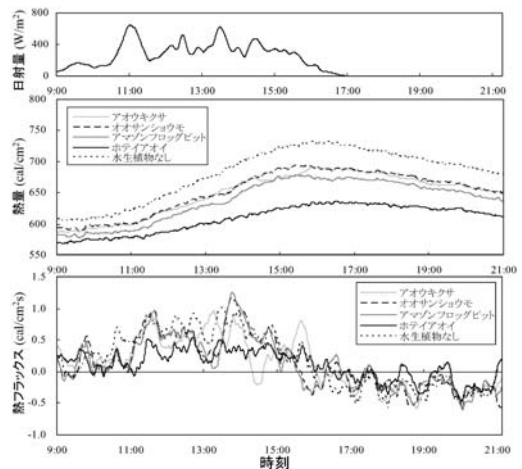


図5 Exp.1における日射量、熱量および熱フラックスの経時変化

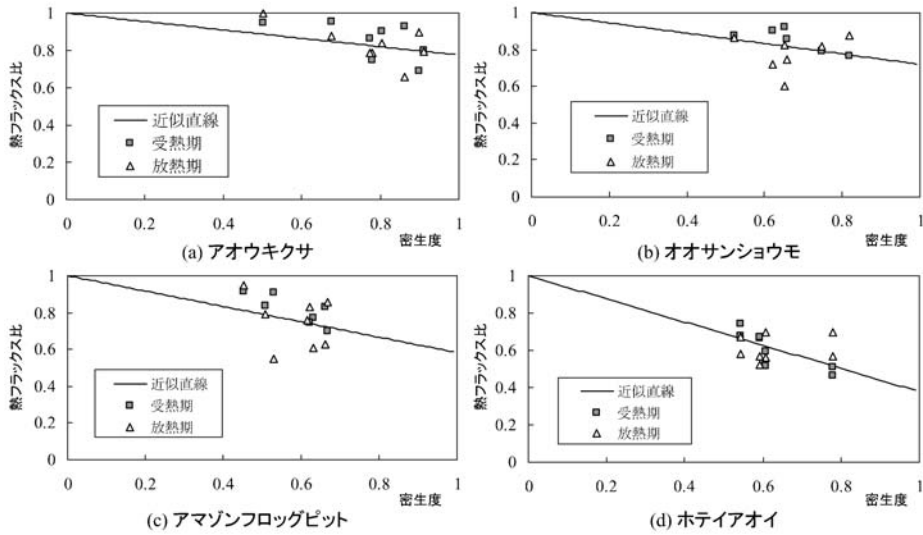


図6 各水生植物における熱フラックスの減衰

図6は、受熱期および放熱期それぞれについて、水生植物なしの場合の熱フラックスの平均値に対する、各水生植物の熱フラックスの平均値の比を示している。全体的に受熱期、放熱期ともに密度が増加すると熱フラックスが減少することがわかる。その熱フラックス比は水生植物の種類により異なっており、同密度においてはアオウキクサの場合が最も大きく、ホテイアオイの場合が最も小さくなる結果を得た。

図7は水生植物なしの場合の混合層発達速度に対する、各水生植物の混合層発達速度の比を示している。全体として密度が高くなるほど、混合層発達速度が小さくなる。水生植物なしの場合との比は、水生植物によって大きさが異なり、アオウキクサの場合が最も大きく、ホテイアオイの場合が最も小さい。これは密度と熱フラックスの関係と同様の傾向を示しており、混合層の発達速度が水生植物の種類とその密度に基づく熱フラックスに強く依存していることを示している。

水温予測モデル

水槽実験より、各水生植物において密度によって水面での熱輸送量に変化することを示した。つぎに、これらの結果を水面における熱輸送の境界条件として適用して、水生植物の密度に対応した混合層の発達速度を予測する水温モデルの作成を試みる。水槽実験では、水生植物を水面に一樣に繁茂させたため、水槽内に水平方向の温度差は生じていないものと仮定し、

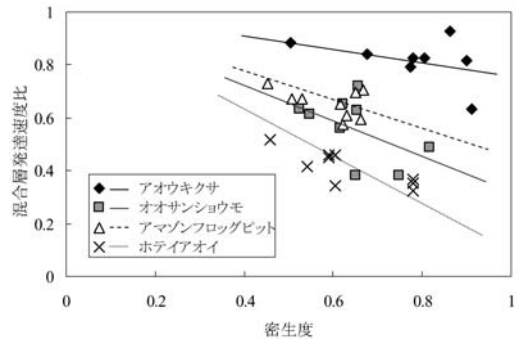


図7 各水生植物における混合層発達速度の減衰

鉛直一次元水温モデルを作成した。鉛直一次元熱輸送方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right\} - \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial q}{\partial z} \quad (4)$$

ここに、 K_z は鉛直渦動拡散係数 (cm^2/s)、 q は短波放射による水中の熱フラックス ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)を表す。

また、 q は短波放射の熱源関数であり、次のようにパラメタ化を行った。

$$q(z) = (1-\beta)Q_s e^{-\eta z} \quad (5)$$

ここに、 β は短波放射のうち水面近傍で吸収される割合、 η は消散係数、 Q_s は正味の短波放射量である。水生植物の影響を考える上では、水面における境界条件が重要なパラメータであり、水面での熱フラックス

は水面と大気間の熱収支を考え、

$$K_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = - \frac{Q_T - (1-\beta)Q_s}{\rho C_p} = \frac{Q}{\rho C_p} \quad (6)$$

とした。ここに、 Q_T は全熱交換量、 Q は短波放射以外の熱フラックスをあらわす。水槽実験の結果を用い、水面における熱フラックス量から水面における照度を減算し、水面における熱フラックス Q を与えることとした。また、水底との境界では断熱条件とし、水底における境界条件は次式で表す。

$$K_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0 \quad (7)$$

なお、鉛直渦動拡散係数 K_z の値は実験結果との整合性を考慮して0.005~0.01とした。基礎方程式は独立変数が t, z の二つであるコントロールボリュームで二重積分を行い、オイラー陽解法により離散化を行った。

図8にExp.1条件下での水生植物なしの場合の実験結果および計算結果を示す。受熱期においては日射および水中へ向かう熱フラックスによって水域内に水温成層が形成されていく様子がわかる。放熱期においては大気へ向かう熱フラックスによって水面付近より混合層が形成され、時間とともにその厚みが増していくことがわかる。このモデルにおける水面熱境界に水生植物による熱移動の遮蔽効果を追加し、その結果水域

内の混合層の発達速度にどのような影響を及ぼすかを検討する。まず、照度の減衰に関しては実験結果から、被覆された部分だけが遮蔽効果を受けると考えて、

$$Q_{sc} = \{(1-\beta)(1-\gamma) + \lambda\gamma\} Q_s \quad (8)$$

とする。ここに、 Q_{sc} は水生植物に被覆されたときの短波放射量 ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)、 γ は密度度 ($0 \sim 1$)、 λ は水生植物の種類によって異なる照度の減衰率をあらわし、図3に示す値を採用する。また水面における熱フラックスに関しては以下のように求めた。

$$Q_c = (1-\sigma\gamma) \cdot Q_T - Q_{sc} \quad (9)$$

ここに、 Q_c は水生植物に被覆されたときの短波放射以外の熱フラックス ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)、 σ は水生植物の種類によって異なる熱フラックスの減衰率をあらわし、図6に示す近似直線の傾きを採用する。これらをパラメータとして、密度度を変化させて計算を行った。

図9にExp.1条件下でのオオサンショウモの場合の実験結果および計算結果を示す。水生植物によって日射が遮蔽されることで、下層まで十分に光が届かず、水面近傍において水温の上昇が大きくなっている。また放熱期においては水面での熱フラックスが抑制されるため、混合層の発達速度が小さくなっていることがわかる。計算結果における水温分布は実験結果と同様の傾向を示しており、これより計算結果が実験結果を良好に再現できていると言える。

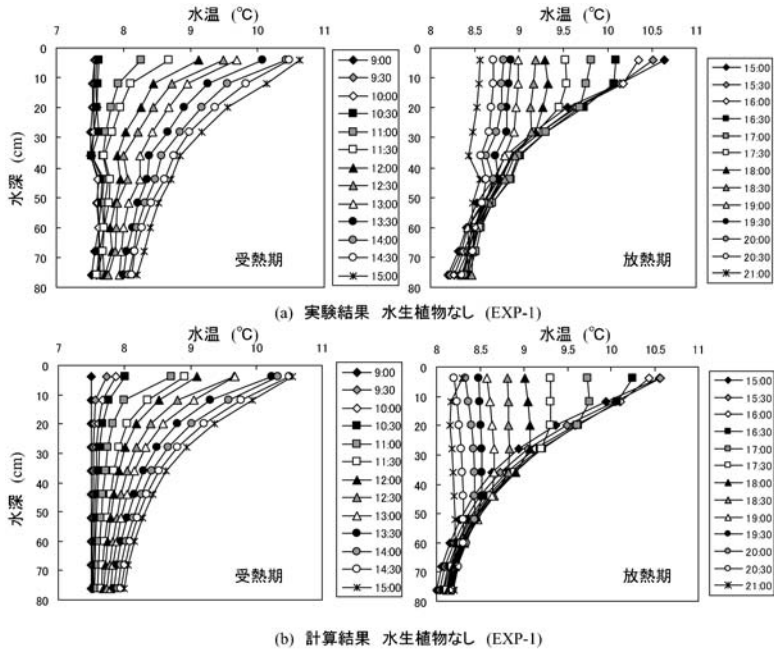


図8 Exp.1 (水生植物なし) での水温鉛直分布 (実験結果および計算結果)

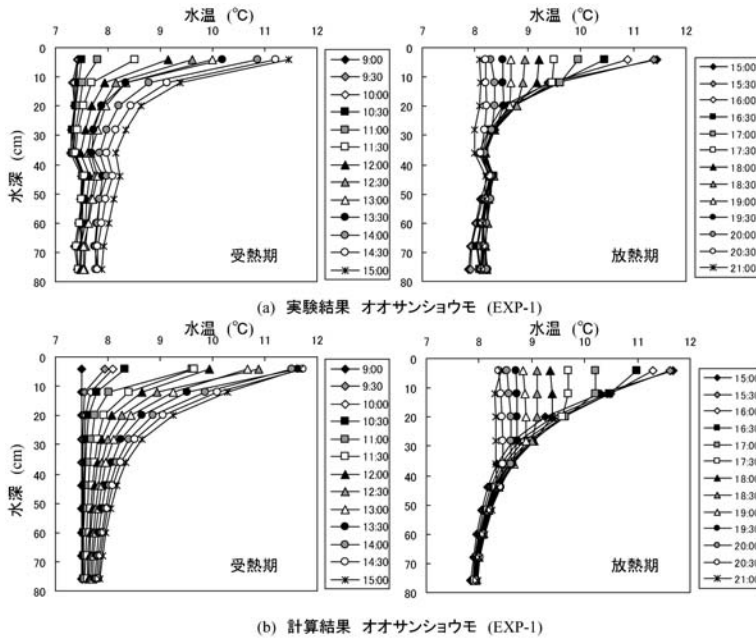


図9 Exp.1 (オオサンショウモ) での水温鉛直分布 (実験結果および計算結果)

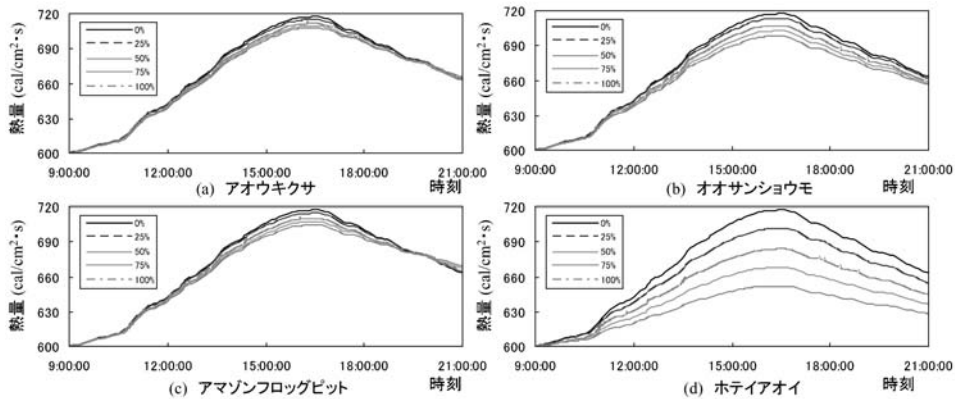


図10 各植生での密度と熱量変化の関係 (計算値)

図10は Exp.1における日射量および水生植物なしの場合の水面熱フラックスを外部条件として、各水生植物での密度と熱量変化の関係を示している。いずれの水生植物の場合においても、密度の増加に伴って熱量は受熱期の増加率および放熱期の減少率ともに小さくなっている。水生植物の種類および密度によって照度および熱フラックスが減衰し、水域に付加される熱量が変化していることがわかる。

図11は水生植物なしの場合の混合層発達速度に対する、各水生植物の混合層発達速度の比の計算結果を示

している。密度が高くなるほど混合層発達速度が小さくなること、および水生植物なしの場合との比が水生植物によって大きさが異なることなど、その傾向は実験結果を良好に再現している。実験結果と比較すると混合層の発達速度の抑制効果は小さくなっているのは、今回のモデルは簡単に1次元で考えており、流れの影響を考慮していないことが考えられる。

以上の結果より、閉鎖性水域の水環境に関する熱対流の規模と浮遊性水生植物との関係については、水生植物の種類および密度をパラメータとした水面境

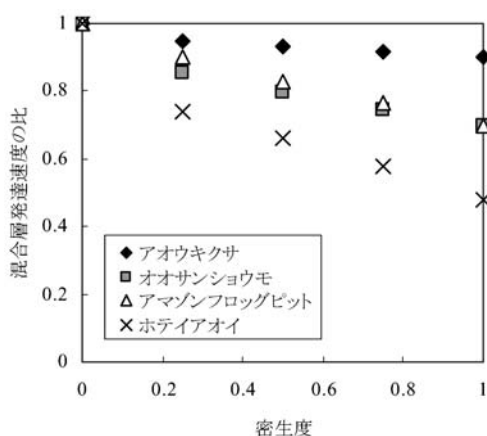


図11 各水生植物における混合層発達速度の減衰(計算値)

界条件により、評価することができると考えられる。

摘 要

水生植物の繁茂が閉鎖性水域の熱対流に及ぼす影響について、水槽実験による水温鉛直分布および水面での照度の測定から、水面における熱輸送量の遮蔽率を求めた。その結果、照度および熱フラックスは、水生植物の種類によってその遮蔽率は大きく異なり、その

大きさは特に葉の厚さに大きく依存することがわかった。また、熱フラックスの遮蔽率は水生植物の密度が増加することで大きくなり、それにより混合層の発達速度が減少することがわかった。この遮蔽率を鉛直一次元水温モデルにおける水面境界条件として適用した結果、水生植物の種類および密度をパラメータとすることで水温成層および混合層の発達速度の変化を再現しうることを示した。

文 献

- Hamagami, K., K. Mori and Y. Hirai 2008
Structure of thermal convection development based on inhomogeneous water surface cooling. *Paddy and Water Environ.*, 6(4)
- 石井 猛 2005 ホテイアオイによる水質浄化に関する研究. 日本水処理技術研究会, 46: 585-592
- 森 健・四ヶ所四男美・平松和昭 2001 浅い閉鎖性水域における溶存酸素の日サイクル運動. 水産工学, 38(1): 53-59
- 嶋田典司・矢島 聡・渡邊幸雄 1988 オオサンショウモによる水質浄化に関する研究(1) オオサンショウモによる N, P 吸収の基礎的実験. 千葉大園学報, 41: 15-21
- 渡邊幸雄・矢島 聡・嶋田典司 1988 オオサンショウモによる水質浄化に関する研究(2) オオサンショウモの栽培試験における窒素及びリンの吸収. 千葉大園学報, 41: 23-27

Summary

We examined the influence of the aquatic plants given to the magnitude of thermal disturbance in the closed water body by hydraulic experiments which examined attenuation of underwater illuminance and the thermal boundary in the covered part which depending on the kind of the aquatic plant and the vegetation density. As the result, it is understood that the attenuation rate of the illuminance is large in the plant with a thick leaf, and that the thermal flux on the water surface and the development speed of the mixed layer decreased when the vegetation density increased. The change of the water temperature stratification and the development speed of the mixed layer were reproduced by inputting the kind and the vegetation density of aquatic plants to the water surface boundary conditions in the one-dimensional model for water temperature as parameters.