

干潟における熱収支の観測

松永信博*・児玉真史**・福田和代**・杉原裕司***

1. はじめに

干潟は潮汐の作用による十分な水の供給と日射のエネルギーにより非常に高い生物生産力を有している。このため貝類・甲殻類をはじめゴカイ類など多くの底生生物が生息し、幼稚魚の保育・育成の場となっている。また、これらを餌とする渡り鳥の越冬地・中継地としての機能も有している。一方で干潟は、沿岸水域における水質浄化の場として重要な役割を担っている。しかしながら、近年埋め立てや沿岸開発などにより干潟は消失し続けており、人工干潟の開発のための研究(李ら, 1997)も進められている。干潟の熱環境特性は、その水質浄化機能を定量化する上で重要な要素である。干潟の熱環境に関して、林ら(1996)は干出時を対象として現地計測および数値シミュレーションを行っている。そこで本研究では、冠水・干出が繰り返す場合を対象とし、干潟における熱収支の現地観測をもとにその熱環境特性について検討した。また干潟の水温分布および地中温度分布の予測モデルの構築を試みた。

2. 観測概要

観測が行われた和白干潟は博多湾最奥部に位置し(図-1)、南側から流れ込んだ唐原川の前方に発達した前浜干潟である。底質は一部砂泥質の部分があるものの、ほぼ全域が砂質で構成されている。その干出面積が大潮時に最大で 80 ha 程度と比較的小さな干潟であるが、日本海側に面し朝鮮半島に近いという地理的特性から渡り鳥の格好の越冬地・中継地となっている。そのため自然保護の観点からもその価値が注目されている。

観測は 1996 年冬季(12 月)、1997 年夏季(8 月)、1997 年冬季(12 月)の合計 3 回実施した。風向、風速、気温、湿度、上向き・下向きの短波および長波放射量、水温、地中温度および水位の連続計測を行った。1996 年冬季の観測では、観測地点は満潮時にも干出した状態であった。1997 年夏季(8 月)の観測では約 5 時間の冠水と 7 時間の

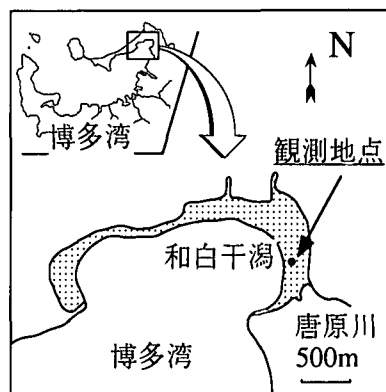


図-1 観測地点

干出を繰り返した。1997 年冬季(12 月)の観測では、約 4 時間の冠水と 8 時間の干出を繰り返した。満潮時の水位はそれぞれ約 90 cm, 50 cm であった。

3. 気象概要

図-2 に 3 回の観測における風速 U および風向 WD の日変化を示す。また、図-3 に気温 T_a 、比湿 q_a 、表面温度 T_s および水位 wl の日変化を示す。これらは、全て高度 2.5 m における観測値である。表面温度 T_s は干潟表面が干出している場合には地表面温度を、冠水している場合には水表面温度を表している。

1996 年冬季の観測では、観測当日は西高東低の冬型気圧配置で日中は北西の風が強く吹き、夕方からは西の風へと変化している。地表面温度 T_s は日射の増加にともなって最大 13°C 近くまで上昇している。一方気温 T_a は、明け方から徐々に下がりに続いている。このため気温と地表面温度の差は最大で 8°C に達している。比湿 q_a は前日の雨の影響で明け方までに下がり、それ以降はあまり変化していない。

1997 年夏季の観測日は、太平洋高気圧に覆われ晴天夏日であった。深夜から明け方にかけては南東からの風(陸風)が吹き、日中は北西からの風(海風)へと変化する海陸風に支配された風系となっている。風速は日中に大きくなり午後 3 時頃には 4.0 m/s に達した。夜間の風速は比較的小さく概ね 2.0 m/s 以下であった。表面温度 T_s

* 正会員 工博 九州大学助教授 大学院総合理工学研究科

** 学生員 工修 九州大学大学院 総合理工学研究科博士後期課程

*** 正会員 工修 九州大学助手 大学院総合理工学研究科

は夜間の一部を除いて常に気温 T_a よりも高く、干潟上の大気が不安定であったことがわかる。比湿 q_a は水位変化の影響を受け、水位の上昇とともに増加し、干潟が干出した午後3時には大きく減少している。

1997年冬季の観測日は、1997年夏季と同様、夜間には

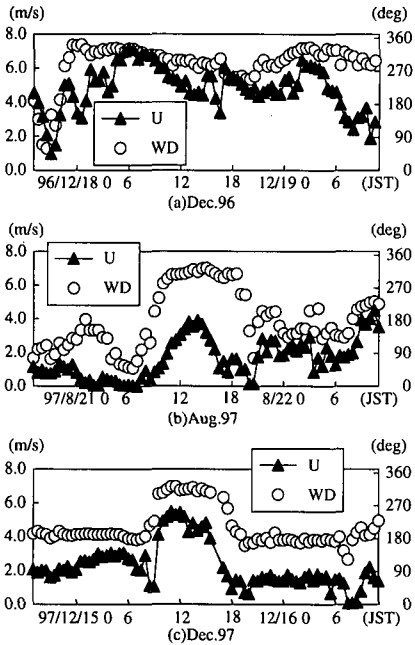


図-2 高度2.5 mにおける風速Uおよび風向WDの日変化

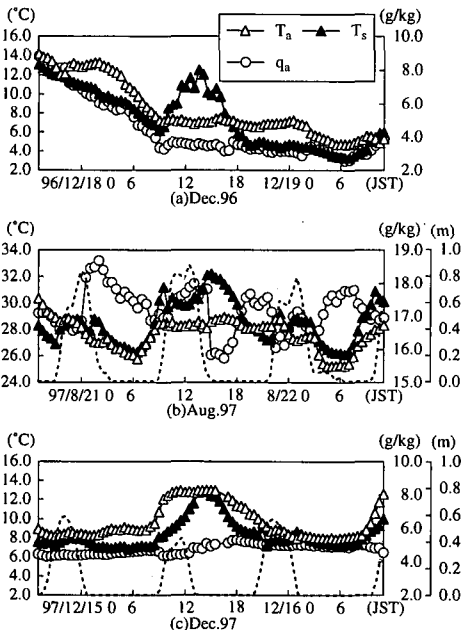


図-3 高度2.5 mにおける気温 T_a 、比湿 q_a および表面温度 T_s の日変化 (ただし、破線は水位を示す)

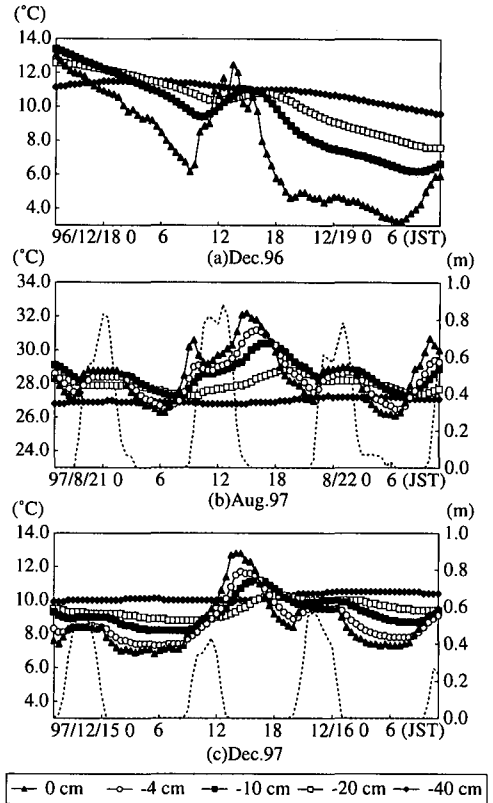


図-4 地中温度分布の日変化 (ただし、破線は水位を示す)

南からの陸風が吹き、日中は北西からの風(海風)へと変化している。風速は日中に大きく、5.0 m/s に達している。夜間陸風時の風速は2.0 m/s 以下であった。観測期間中は常に表面温度 T_s より気温 T_a の方が高く、干潟上の大気は安定した状態であった。また、大気中の比湿 q_a は干出・冠水時、日中・夜間を通じてほぼ一定であった。

図-4 に、それぞれの観測における地中温度分布の日変化を示す。一般に冠水時に比べて、干出時の温度変化が大きくなっている。日中、地表面温度は(a), (b), (c) いずれの場合も日射の影響を受けて大きく上昇している。日中の上下層の格差は、冠水時、干出時ともに日射量の多い夏季(b)に大きくなっている。一方夜間では、地表面温度は放射冷却により急激に下降するが、水位の上昇とともにその変化は緩やかになっている。地表面温度は大きな日変化を示すのに対し、深さ40 cm における地中温度は表面の温度変化の影響を受けずにほぼ一定となっている。

4. 干潟の熱環境特性

干潟表面では、冠水時、干出時に関わらず、正味放射量 R_{net} が顕熱輸送量 H 、潜熱輸送量 LE および水中あるいは地中への貯熱量 G とバランスしていると仮定すると

以下の式が成立する。

$$R_{\text{net}} = H + IE + G \dots\dots\dots (1)$$

ここで干潟表面で吸収される正味放射量 R_{net} は、全天日射量 S_d 、干潟表面からの反射日射量 S_u 、大気からの長波放射量 L_d および干潟表面からの長波放射量 L_u を用いて次式で表すことができる。ただし、いずれも干潟表面に入射する向きを正する。

$$R_{\text{net}} = S_d + S_u + L_d + L_u \dots\dots\dots (2)$$

本研究では、これらの各放射量をそれぞれ個別の測器で計測した。 H および IE の熱フラックスはバルク法 (近藤, 1994) により算定した。貯熱量 G は、正味放射量から顕熱輸送量および潜熱輸送量を差し引いた残差として求めた。

図-5 に、 R_{net} 、 S_d 、 S_u 、 L_d および L_u の日変化を示す。冬季の全天日射量は、(a)、(c) いずれの場合も日中 300 から 400 W/m^2 程度であり、夏季 (b) のそれは 600 から 700 W/m^2 に達している。一方長波放射に関しては、季節に関わらず、大気からの長波放射と干潟表面からの長波放射量が日中、夜間を通じてバランスしている。このため、正味放射量は概ね日射の収支とバランスしている。その値は冬季では最大で 400 W/m^2 程度、夏季では 700 W/m^2 に達している。また夜間の正味放射量は、夏季、冬季いずれの場合もほぼ 0 となっている。

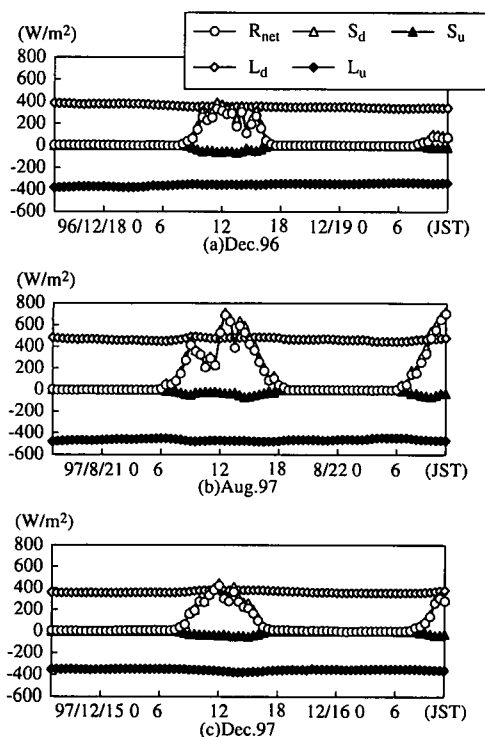


図-5 各放射量の日変化

図-6 に、冠水時の水深 h に対する干潟表面のアルベド α_w の変化を示す。水深 h の増加にともない α_w の値が小さくなるのがわかる。水深が 40 cm 以上ではその値は 0.10 以下でほぼ一定となっており、これ以上の深さではほとんどの日射が水中で吸収されている。また、干出時のアルベドは平均 0.18 程度で、一般にいわれている草地や裸地に近い値となっている。

次にバルク法によって算定した H 、 IE および G の日変化の特性について検討する。図-7 に、次式の入力放射量 R に対する各熱フラックスの占める割合を示す。

$$R = S_d + S_u + L_d \dots\dots\dots (3)$$

1996 年冬季 (a) の干出時においては、潜熱の占める割合

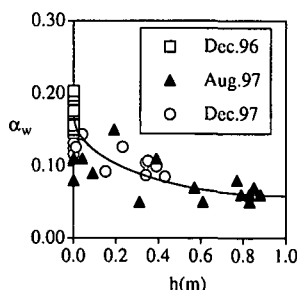


図-6 水深に対するアルベド α_w の変化

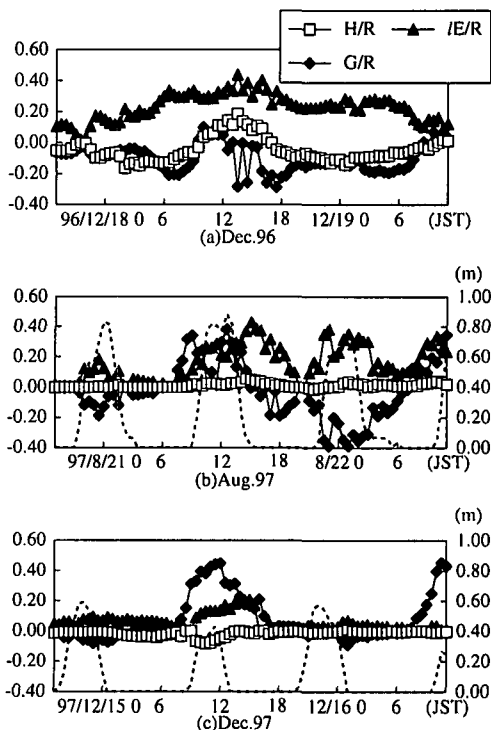


図-7 入力放射量 R に対する各熱フラックスの占める割合 (ただし、破線は水位を示す)

合が大きく、日中では入力放射量のうち2割から3割が潜熱輸送量として大気へ放出されている。また顕熱輸送量および地中貯熱量への寄与は、いずれも日中1割程度である。この結果、入力放射量のうち残りの約5割が干潟表面からの長波放射として放出されていることになる。また夜間には、地中貯熱量の多くが潜熱として大気へ放出されている。顕熱輸送量が小さいため、ボーエン比は日中0.3から0.4程度である。一方、夜間では地表面温度が気温より低くなることから顕熱輸送量は負となり、ボーエン比は-0.5程度となっている。

次に冠水と干出が繰り返す1997年夏季および冬季(b), (c))について検討する。まず日中では、(b), (c)いずれの場合も冠水時には水中貯熱量への寄与が大きく入力放射量の40%程度が水中に貯えられている。この時、潜熱輸送量の占める割合は(b), (c)ともに約20%である。水位の低下にともなって貯熱量の占める割合は減少し、潜熱輸送量の占める割合が増加する傾向が見られる。また冠水時、干出時に関わらず、日中は入力放射量のうち4割から6割が干潟表面からの長波放射として放出されている。

一方夜間では各フラックスの占める割合において夏季と冬季で差異が見られる。入力放射量の潜熱輸送量への寄与は、(b)の夏季夜間の冠水時では日中と同程度である。しかし(c)の冬季夜間では、冠水・干出時を通じて10%以下でほぼ一定である。また顕熱輸送量への寄与は、夏、冬いずれの場合も日中・夜間を通じて冠水、干出時に関わらず非常に小さい。

5. 水温分布および地中温度分布の数値解析

測定された基礎データをもとに、鉛直一次元モデルにより、干潟域の水温分布および地中温度分布の数値解析を行う。

図-8は小葉竹ら(1997)が提案した水中での短波放射の収支に関する概念図である。ここで α_1 は水表面でのアルベド、 α_2 は地表面でのアルベド、 β は水中での日射の吸収率を示す。冠水時、干潟表面には全天日射 S_d と大気からの長波放射 L_d が入射するが、3 mm以上の長波長の光の吸収率は 10 m^{-1} であることから、いわゆる長波放射は実質水表面のごく薄い層で吸収・射出されてしまう。一方、入射した S_d はまず水表面において反射率 α_1 で反射され、残りの $(1-\alpha_1)S_d$ が水中に入射する。このうち $(1-\alpha_1)S_d\beta$ が水中で吸収され、残りの $(1-\alpha_1)S_d(1-\beta)$ が水底に到達する。ここで反射率 α_2 で反射した $\alpha_2(1-\alpha_1)S_d(1-\beta)$ が水中を上昇し、その途中で再び $\alpha_2(1-\alpha_1)S_d(1-\beta)\beta$ が水体に吸収され、 $\alpha_2(1-\alpha_1)S_d(1-\beta)(1-\beta)$ が水表面から出ていくことになる。こうして水表面から入射した全天日射量 S_d のうち $(1-\alpha_1)S_d\beta + \alpha_2(1-\alpha_1)S_d$

$(1-\beta)\beta$ が水中で吸収されて水温を上昇させ、 $(1-\alpha_2)(1-\alpha_1)S_d(1-\beta)$ が水中を通り抜けて地表面に入射して直接地表面を加熱する。小葉竹ら(1997)は、清水で水深が30~50 cmと比較的小さい場合でも吸収率は0.9~1.0で、日射のほとんど水中で吸収されるとしている。しかしながら、図-6に示すように干潟域では水深の変化にともなってアルベドが変化する。従って、水深の浅い場合には、日射の一部は水底まで到達して反射し、水表面から出ていくものと考えられる。

そこで図-9のような熱収支を考え、鉛直一次元のモデルにより干潟域の水温分布および地中温度分布の数値解析を行った。水温 T_w および地中温度 T_g の変動を支配する方程式はそれぞれ以下の一次元熱伝導方程式である。

$$\text{水温: } \frac{\partial T_w}{\partial t} = K_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{地中温度: } \frac{\partial T_g}{\partial t} = K_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 K_w は水の乱流拡散係数、 K_g は土の熱拡散係数である。 K_g は土の熱伝導率 λ_g と土の熱容量 $C_g\rho_g$ により、 $\lambda_g/C_g\rho_g$ で表される。地中貯熱量と表層での温度勾配の観測値から $\lambda_g = 4.25 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ が得られた。土の熱容量については、採取した土のサンプルの体積含水率から得られた土粒子および水の熱容量をもとに $C_g\rho_g = 2.54 \text{ J/K/cm}^3$ とした。また、これらの値は鉛直方向に一定とした。図-9に示すように、水表面での境界条件は、水表面に入射する正味放射量 R_{net} から顕熱輸送量 H 、潜熱輸送量 LE および水体を通り抜けて地表面に直接入射

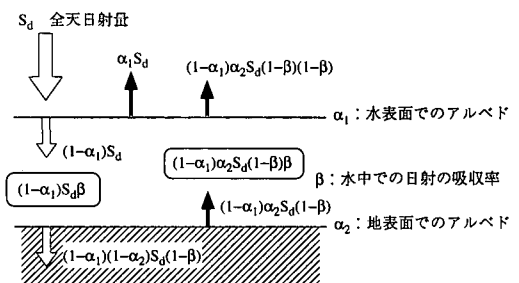


図-8 水中での吸収率を考慮した短波放射量に関する収支

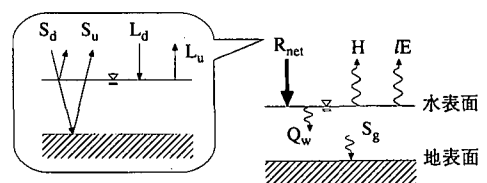


図-9 干潟表面が冠水している場合の熱収支の概念図

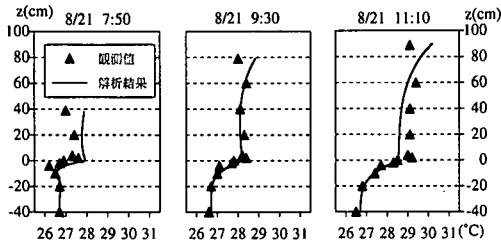


図-10 夏季日中冠水時における鉛直温度分布の解析結果と観測値との比較

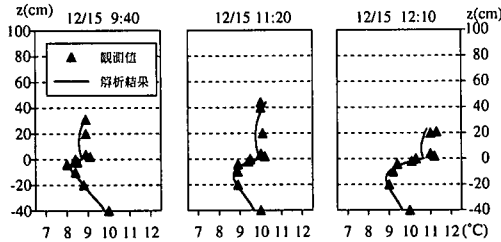


図-11 冬季日中冠水時における鉛直温度分布の解析結果と観測値との比較

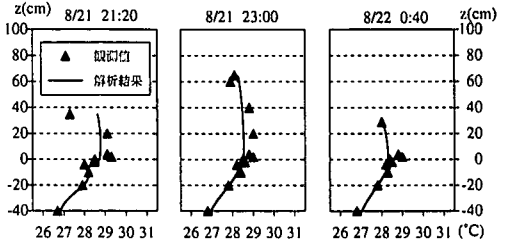


図-12 夏季夜間冠水時における鉛直温度分布の解析結果と観測値との比較

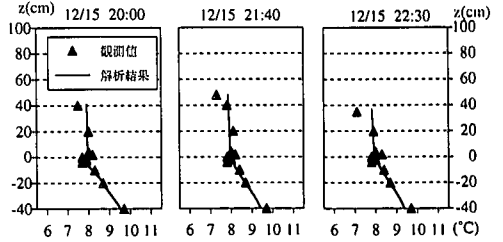


図-13 冬季夜間冠水時における鉛直温度分布の解析結果と観測値との比較

する日射量 S_g を差し引いた量 Q_w が水体をあたためると考え、観測で得られた実測値を与えた。水表面での境界条件は以下ようになる。

$$-K_w \frac{\partial T_w}{\partial z} \Big|_{z=0} = Q_w \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_w = R_{\text{net}} - H - LE - S_g \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$S_g = (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)S_a(1 - \beta) \quad \dots\dots\dots (8)$$

地表面の境界条件は、水体から地中に向かうフラックスと、地表面に直接入射する日射量 S_g の和が地中への伝導熱に等しいとして、以下のように与えた。

$$-\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = -K_w \frac{\partial T_w}{\partial z} + S_g \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$T_g = T_w \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、夜間においては $S_g = 0$ である。また地中の最下層では温度勾配を 0 とした。計算はいずれも冠水時を対象とし、夏季・日中、冬季・日中、夏季・夜間および冬季・夜間の 4 ケースについて行った。

これらの解析結果と観測値との比較を、それぞれ図-10, 11, 12, 13 に示す。水温分布については、いずれのケースも水表面付近で解析結果と観測値の間に若干の差異がみられるものの、日射の増加にともなう水温の上昇や日中夜間ともに鉛直方向に一様な分布となる特徴が計算でも再現されている。地中温度分布については解析結

果と観測値は非常に良く一致している。日中では日射による地表面の直接の加熱により形成される鉛直勾配、また冬季夜間に地中から水中へ熱フラックスが向かう特徴が再現されている。このことから、水中の熱の移動を鉛直一次元とした本モデルは、水温分布および地中温度分布を比較的良好な精度で予測できるものと考えられる。

6. おわりに

現地観測および数値シミュレーションによって干潟の熱環境特性について検討した。水温分布および地中温度分布のシミュレーションを行った結果、比較的良好な精度で実測値の特性を再現することができた。本研究では境界条件に実測値を用いたが、今後は熱環境特性を定量化し、一般的な予測を行うことが課題である。

参考文献

- 小葉竹重機, 塩田孝久, 河内信二郎 (1997): 河川水温の形成過程における光の吸収率の影響, 水工学論文集, 第 41 巻, pp. 599-604.
- 近藤純正 (1994): 水環境の気象学, 朝倉書店, pp. 99-111.
- 林 文慶, 秋山真吾, 棚瀬信夫, 田中宏昌 (1996): 干潟の熱環境特性に関する現地計測, 日本流体力学会年會講演論文集, pp. 443-444.
- 李 正奎, 西嶋 渉, 向井徹雄, 滝本和人, 沼木 徹, 平岡啓代典, 岡田光正 (1997): 自然干潟および人工干潟における構造と有機物分解能の比較-広島湾におけるケーススタディ, 水環境学会誌, 第 20 巻, 第 3 号, pp. 175-184.