

河川美化・緑化調査研究報告書（論文）

助成番号 2001-1（イ）

さまざまな護岸工事による湖沼沿岸帯の環境改変が
生物多様性に及ぼす影響に関する研究

茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター

中里 亮治

目次

要旨

1. はじめに
 - 1.1. 調査地概況
 - 1.2. 指標生物の概略
 - 1.3. 指標生物としてのユスリカ
 - 1.4. 本研究の目的
2. 方法
 - 2.1. 調査項目と調査地点
 - 2.2. 環境要因の調査手法
 - 2.3. ヨシ群落性状の調査手法
 - 2.4. 大型無脊椎動物の調査手法
 - 2.5. 底質環境と大型無脊椎動物群集の関係についての解析手法
3. 結果
 - 3.1. 北浦全域ライン調査
 - 3.2. 水際線の調査
 - 3.3. 消波堤周辺における調査-2002年4月の結果について
 - 3.4. 消波堤周辺における調査-2002年7月の結果について
 - 3.5. 砂質帯におけるユスリカ幼虫の個体群動態と鉛直分布
 - 3.6. ヨシ群落周辺における貝類の分布
4. 考察
 - 4.1. 底質環境
 - 4.2. ヨシ群落性状
 - 4.3. ヨシ群落の大型無脊椎動物群集
 - 4.4. 貝類の分布
 - 4.5. 砂質帯のユスリカ幼虫の分布
 - 4.6. 現在の湖岸植生再生事業の課題と今後の方向性について
5. 謝辞
6. 参考文献

要 旨

近年、茨城県の霞ヶ浦（主として西浦および北浦）において湖岸植生帯の再生・保全事業が行われているが、これらの事業で施工されているさまざまな護岸工事が湖沼沿岸帯の生物多様性におよぼす影響についてはこれまで不明であった。本研究では、北浦の湖沼沿岸全域を対象にした広域的な調査を行うことで北浦沿岸の特性を明らかにすると同時に、消波堤やヨシ群落周辺で集中的な調査を行い、底質環境および大型無脊椎動物群集、特にユスリカ幼虫の分布と波浪影響の関係を明らかにすることを目的とした。

調査の結果、北浦沿岸全域には淘汰のよい砂質が堆積し、鉛直的に酸化環境が維持される砂質帯（湖棚地形）が広がっていた。その砂質帯ではオオミドリユスリカ属の1種である *Lipiniella* sp. 幼虫が優占し、高い二次生産量を示していた。この *Lipiniella* sp. 幼虫は砂質堆積物中への潜行能力を有するため、魚類などによる捕食を受けにくいと推察された。

消波堤の設置による波浪影響の傾度は、砂質帯にさまざまな底質環境を生み出していた。消波堤内側における有機物の堆積は *Lipiniella* sp. の分布を制限する一方、沖帯で優占するオオユスリカ (*Chironomus plumosus*) やヨシ群落で優占するハイイロユスリカ (*Glyptotendipes tokunagai*)、特殊な摂餌生態を有するアシマダラユスリカ属の1種 (*Stictochironomus* sp.) などの定着を可能にしていた。

ヨシ群落は、砂質帯と比較して大型無脊椎動物の種多様性が高く、消波堤の生み出す波浪影響の傾度が群集組成に明確に反映されていた。同時に消波堤による波浪影響の緩和はいくつかの分類群の現存量を高めることで、低次から高次生産者への、より効率的な物質移動を促している可能性が示唆された。また、消波堤内側への有機物の堆積は還元的な底質環境を生み出し、従来の沿岸域生態系とは異なった物質移動経路を創出していた。

上記の結果から、消波堤の設置によってもたらされた沿岸砂質帯およびヨシ群落における波浪影響の傾度は、生物多様性を増大させること、またそれによって湖沼沿岸域にさまざまな物質循環過程が構築される可能性のあることが示唆された。

1. はじめに

1.1. 調査地概況

北浦は茨城県の南東部、霞ヶ浦（狭義の霞ヶ浦、以降は西浦と称する）の東側に位置する浅い富栄養湖である（図 1・1）。正式には、北浦は霞ヶ浦の一部を指し示すものであり、この北浦、西浦、常陸利根川、外浪逆浦を合わせて霞ヶ浦と呼ぶ。北浦の平均水深は約 4.5 m、最大水深は 7 m、湖面積は 35.2 km²、湖岸線は 75 km である。北浦・霞ヶ浦は海跡湖として位置付けられており、斉藤らの地史的研究⁽¹⁾では、1400 A. D. から 1600 A. D. に海水準の変化による水理環境の変化で低鹹（カン）汽水化し、淡水化が進んできたといわれている。その後、江戸幕府による利根川東遷（1654 年通水）など人為的な改修を経て、昭和 38 年（1963 年）、常陸利根川の河口に設置された逆水門の完成により完全な淡水湖となった。

霞ヶ浦開発事業による「水がめ化」は人為的富栄養化とともに近年の霞ヶ浦の変遷を特徴付けるものである。霞ヶ浦開発事業⁽²⁾は、湖岸堤と湖岸諸施設の新改築、流入河川改修、常陸利根川等の改修、常陸川水門による湖水位の調節で沿岸の洪水被害を防除すると同時に、霞ヶ浦周辺地域をはじめ首都圏の水需要に対処することも目的とした。その事業区域は、西浦、北浦、常陸利根川であり、工期は昭和 43 年～平成 8 年、事業費は約 2,590 億円であった。この事業は平成 8 年度から管理に移行しており、その詳細は霞ヶ浦意見交換会にて報告されている⁽³⁾。管理水位は Y. P. +1.3 m とし、夏季制限期間は治水容量を確保するため Y. P. 1.2 m 以下に制限されている。ただし、霞ヶ浦の周辺環境等を考慮して、ヨシを主体とした植物の生育期、開花・結実期である 4 月から 10 月中旬は、Y. P. +1.1 m を中心として管理されている。また、近年の湖岸植生帯の減少傾向を鑑み、平成 12 年 10 月より湖岸植生帯の緊急保全対策を実施することとなったため、冬期の水位は Y. P. +1.1 m で運用されてきた。この緊急保全対策工事は、平成 14 年 3 月末で概ね完成したが、冬季の波浪の影響等の調査を継続する必要があるため、平成 14 年度の冬期も Y. P. +1.1 m で運用されている。

近年の霞ヶ浦における湖沼環境の変化については、霞ヶ浦工事事務所によって簡便にまとめられている⁽⁴⁾。これによると近年の霞ヶ浦の水質は、人為的富栄養化の進行に伴って悪化傾向を示している。昭和 48 年の夏にはアオコが大発生し、酸欠による養殖ゴイの大量斃死、取水障害、悪臭などが社会問題化した。平成に入ってから植物プランクトンの種組成が変化したことからアオコの発生は少なくなったが、平成 13 年度における COD は 8.1 mg L⁻¹ と、環境基準を大幅に上回っており、依然として長期的な水質汚濁は続いている。元来霞ヶ浦は、平地に広い流域面積を持つ上に水深が浅いという、自然的富栄養化が進みやすい性質をもっている。これに加え、外部から流れ込む生活・産業廃水等の人為的富栄養化によって霞ヶ浦の水質汚濁は進行し続けている。霞ヶ浦を汚す主要な外部要因の一つは家庭排水であるが、流域の特性としては、30 万頭以上の養豚、沿岸地帯に広がる約 1,600 ha の蓮田や湖内のコイ養殖があげられる。

桜井(1994)は霞ヶ浦や諏訪湖の湖沼沿岸植生帯において詳細な研究を行った⁽⁵⁾。これによると湖沼沿岸帯は沖帯と異なり、さまざまな環境条件の影響を受けることが分かっている。それらの傾度は変化に富む生息環境を形成し、湖沼全体の生物多様性を維持する上で非常に大きな役割を担っている。霞ヶ浦沿岸にはかつて大規模な水草帯が存在したため、さまざまな環境傾度のもとで多様な生物群集が成立していたと考えられる。しかしながら、現在までに霞ヶ浦は本来持っていた水草帯の多くが失われた。その減少過程と主な原因については、霞ヶ浦意見交換会において詳細が報告されている⁽⁶⁾。これによると、水がめ化による水位調節、コンクリート垂直護岸堤防の設置、富栄養化による透明度の低下などが水草帯減少の主たる原因とされている。このような現状を鑑みて、最近では沿岸環境の復元を目指した湖岸の再自然化工事が活発に行われている。それらの工事がそこに生息する生物群集に何らかの影響を与えるであろうことは予想されるものの、沿岸生態系の特性に関する基本的な知見さえも乏しいのが現状である。一方海外では、生物多様性に対する関心の高まりもあり、湖沼沿岸帯に関する研究が精力的に行われ始め、指標生物とし大型無脊椎動物を用いた研究も報告されている^{(7)~(8)}。

1.2. 指標生物の概略

河川環境における生物群集の調査法および環境改変の評価法は、玉井らによってまとめられている⁽⁹⁾。生物の分布や生育状態は、生息する場の環境条件を反映していると考えられる。こうした考えに基づいて、生物の種類や個体数・大きさなどを調査して、環境の状況を推定するということが一般的に行われる。このような目的で調査される生物を「指標生物」といい、その手法や手段、特に調査結果を解釈するための尺度を「生物指標」と呼ぶ。河川では付着藻類や底生動物などの指標生物を用いたさまざまな評価手法が確立されている。また、水質汚濁など水に関わる条件だけでなく、堆積環境などの流れや流路の条件、河畔植生などの周辺部陸上の条件、集水域内の土地利用などの広域的な条件、生物的環境条件などと多岐に渡る環境条件についても同様に調査法や評価基準などの定式化が進んでいる。

河川環境の現状を生物指標によって評価する生物モニタリング手法はこれまで数多く提案され、発展してきた。その主な手法は、生物学的水質判定、生活型構成比による群集比較、多変量解析による種組成の解析などである。特に多変量解析は、多数の地点で得られた種組成のデータから生物群集が場所に応じて変化するパターンを明らかにし、その要因を検討するために群集生態学で利用されてきた手法である。多変量解析によるパターンの抽出は分類、序列化および直接傾度分析の3つに分けることができる。分類とは、類似の種組成を示すサンプルをグループにまとめるものである。クラスター分析やTWINSPANがこれに当たる。序列化あるいは間接傾度分析は、種組成が連続的に変化するものと考えてその変化の系列を明らかにするやり方である。主成分分析、因子分析、DCAがこれに当たる。直接傾度分析は、主要な環境要因をあらかじめ抜き出し、その要因の測定値と種組成の対応関係を調べるものである。重回帰分析、判別分析、CCA(Canonical Correspondence Analysis)⁽¹⁰⁾がこれに当たる。CCAは序列化と直接傾度分析の両方の性格をもち、データ構造の再現能力に極めて優れる⁽¹¹⁾。また、調査地点、種、環境変数のすべてを同一の図に表示できるため解釈が容易で、その利用は近年増加している。

1.3. 指標生物としてのユスリカ

“ユスリカ”とは、ハエ目(Diptera)ユスリカ科(Chironomidae)に属する昆虫の総称である。このユスリカ科幼虫の多くは水生であるが、他に陸生、半水生、寄生性など、その生息域および生態は極めて多様である。これまで日本ではおよそ1,000種が、世界では10,000種程度が記載されている⁽¹²⁾。中栄養もしくは富栄養湖に生息する底生動物の中で、ユスリカ幼虫は出現頻度の極めて高い分類群である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。特に沿岸域においてその出現種数が多く、ユスリカ群集を対象として生物多様性の研究を行うメリットは非常に大きい。本研究の調査地に隣接する西浦(霞ヶ浦)では、このユスリカ成虫に焦点をあてた生物多様性に関する研究⁽¹³⁾が行われている。また、指標生物としての側面だけでなく、湖沼環境、特に富栄養湖においては物質循環に大きく関わる生物群集としても認識されており、魚類の餌資源としての役割や羽化による湖外への有機物除去能などの研究も行われている⁽¹²⁾。

1.4. 本研究の目的

上記の観点を踏まえ、本研究では、全面コンクリート護岸が施工された茨城県北浦において、湖沼沿岸全域を対象にした広域的な調査を行うことで北浦沿岸の特性を明らかにすると同時に、かろうじて残存した自然植生のヨシ帯、波浪対策のために多自然型護岸工法による離岸堤(消波堤)が設置されたヨシ帯、その近傍のコンクリート護岸、を主たる調査場所として選択し、ユスリカ類を中心とした大型無脊椎動物群集の種組成、個体数、現存量などの動態を調査することで、様々な形態の護岸工事によってもたらされるであろう環境の均一性・不均一性とそれによって支えられる生物多様性との関係を、明らかにすることを主目的とした。

2. 方法

2.1. 調査項目と調査地点

消波堤の設置などの護岸工事の影響を捉えるためには、北浦沿岸の現状を知る必要がある。このために、北浦を横断する5本のラインを設定し、全域調査をした(図1・1)。魚群探知機で湖底地形を把握した後、沿岸域を中心に両岸合わせて6~8の調査地点を設定し、底質環境および大型無脊椎動物を調査した。

さらに、消波堤(写真2・1a)が、ヨシ群落の性状、底質環境および底生大型無脊椎動物におよぼす影響を理解するため、北浦の東岸に位置する鹿嶋市爪木地区のヨシ群落(写真2・1b)の沖側に設置された消波堤周辺で調査をした(写真2・1c)。この爪木地区の湖岸には、全面にコンクリート護岸が設置されており、岸に沿ってヨシを優占種とした抽水植物帯(以降ヨシ群落)が断続的に存在している。また、明確な沈水植物群落は存在せず、浮葉植物群落は調査地の北東に位置する流入河川の周辺に小規模のアサザ(*Nymphoides peltata*)群落が存在するのみであった。消波堤は石積みではなく粗朶を沈めたもので、ヨシ群落までの距離が40mの地点と20m以下の地点に大きく分けられる(図1・1)。

この爪木地区で以下に挙げる①~⑦までの7項目の調査、すなわち、①水際線に沿ったライン調査、②湖岸から沖へのライン調査、③ユスリカ幼虫の季節消長調査、④堆積物中のユスリカ幼虫の鉛直分布調査、⑤同定点における底質環境の鉛直調査、⑥貝類の分布調査および⑦消波堤内における有機物の分布調査、を行った。

①水際線の調査では、水際線に沿って始点から終点まで1kmのラインを設定し、20mごとにヨシ群落際の性状(茎密度、茎直径、草高)と堆積物組成を調査した。爪木地区のヨシ群落は前縁部の根がむき出しており、崖状にえぐれている(写真2・1d)。ヨシ群落が存在する地点では、この崖地形のすぐ外側を堆積物の採取地点とした。ヨシ群落が存在しないコンクリート護岸の場合は、その前縁で堆積物を採取した。

②湖岸から沖までのライン調査では、湖岸から100m沖まで20mごとに堆積物および環境要因の調査地点を設定した(図1・1)。ラインはコンクリート護岸(St.1)、消波堤のないヨシ群落(St.2)、沖側40mに消波堤が設置されたヨシ群落(St.4)、沖側20mに消波堤が設置されたヨシ群落(St.7)の4本を設定した。また、同様のライン上で40mごと(岸から0m、40m、80m)に大型無脊椎動物群集の調査地点を設定した。ヨシ群落が存在するラインにおいては、ヨシ群落際(e)および内部(i)も環境要因、堆積物および大型無脊椎動物群集の調査地点に加えた。特に消波堤のないヨシ群落(St.2)では、通常のヨシ群落の地点(St.2A)以外に大きく湾状に入り込んだヨシ群落(St.2B)にも調査地点を設けた。消波堤が存在するラインでは、消波堤の沖側(St.4-2'、St.7-2')と岸側(St.4-2、St.7-2)に調査地点を設けた。また、上記のラインの間にSt.3、St.5、St.6の調査地点をそれぞれ設けた(図1・1)。

③ユスリカ幼虫の季節消長、④ユスリカ幼虫の鉛直分布および⑤底質環境の鉛直変化は、消波堤がない砂質帯(St.2-2)と消波堤の設置された砂質帯(St.4-2)で調査した。また⑥貝類の分布はSt.2-1、St.4-1およびSt.7-1で調べた。また、⑦消波堤内における有機物の分布調査はヨシ群落沖側40mに消波堤が存在する区画で行った。

2.2. 環境要因の調査手法

水温および溶存酸素量の測定にはポータブルDOメーター(YSI社、Model195)を用いた。本研究の調査地となった北浦沿岸帯には基本的に砂が堆積しているため、堆積物試料の採取には、通常用いられているエクマンバジ採泥器ではなく、直径5.4cmのコアサンプラー(写真2・1e)を使用した。堆積物表層の底質を調査するため、柱状試料の表層1~2cmのみを採取した。堆積物分析用試料から含水率、強熱減量、含礫率、含砂率をそれぞれ測定した。含礫率、含砂率の測

定には湿式の篩い分け法を用いた。ただし、北浦全域ライン調査においては、含礫率、含砂率、含泥率を乾式の篩い分け法を用いた。それぞれの粒度組成から中央粒径値を算出した。

底質環境の鉛直変化を調査するために上述のコアサンプラーを用いて深度 20 cm の柱状試料を採取した（写真 2・1e）。柱状試料を現場で 2 cm 毎にスライスし、ポータブルメーター（HORIBA 社 D-22）を用いて層別に ORP（酸化還元電位）を測定した。層別に採取した試料は実験室に持ち帰り、強熱減量を測定した。

2.3. ヨシ群落性状の調査手法

ヨシ群落の性状調査として、ヨシ茎密度、茎直径、草高を調査した。茎密度の測定には 30 cm × 30 cm のコドラート（方形枠）を用い、計数対象は当年に伸長した茎のみとした。茎直径は現場にてデジタルノギスを用いて測定した。また、ヨシ群落性状の 3 要因について主成分分析を行い、その特性を検討した。

2.4. 大型無脊椎動物群集の調査手法

生物調査用試料は堆積物試料と同様にコアサンプラーで採取した（繰り返し数、n=3）。採取した深度 10~20 cm の柱状試料のすべてを冷蔵して実験室に持ち帰り、飽和食塩水を用いて砂等の堆積物と検鏡用試料に分離した。なおこの分離作業によるユスリカ幼虫の採集効率は 99.8% であることが予備実験から分かっている。5% 中性ホルマリンで固定した検鏡用試料から、実体顕微鏡下で大型無脊椎動物を分別した。ただし、ミジンコ類やセンチュウ類はその対象外とした。底生動物の中でも貧毛類は、塩水処理による収縮や攪拌による体の切断といったサンプル処理の影響を強く受けたため、正確な個体数の把握や同定が行えなかった。

分別したユスリカ幼虫はそれぞれプレパラートを作成した後、位相差顕微鏡下で属レベルまで同定した⁽¹⁴⁾。また、一部のユスリカ幼虫については、同場所で別途採集した幼虫を室内飼育し、羽化してきた雄成虫を用いて種を同定し、幼虫と成虫の対応をつけた。この作業により一部の幼虫については位相差顕微鏡下において種レベルまでの同定が可能となった。すべての幼虫は 1 個体毎に体長を測定し、体長-体重関係式⁽¹⁵⁾から個々の体重を求めて現存量を算出した。その他の大型無脊椎動物は実体顕微鏡下で同定・計数のみを行った。

ユスリカ幼虫の定期調査は基本的に月 2 回、上記と同様に行った。また、ユスリカ幼虫の鉛直分布を調査するためにコアサンプラーを用いて図 2・1f に示したような柱状試料を表層から 20 cm の深度まで採取した（n=5）。これらの柱状試料は Wouter の手法⁽¹⁶⁾を用いてその場で 2 cm おきにスライスした後に、冷蔵して実験室に持ち帰った。サンプル処理は上記と同様である。

大型無脊椎動物群集の中でも、貝類は個体数密度が低いものの、高い現存量を示す分類群であり、コアサンプラーではサンプルサイズが小さい。従って、大型貝類を定量的に捕獲するために、別途 1 m² のコドラートを設定し、貝取り鋤簾（ジョレン）を用いて堆積物を採取した（n=5）。冷蔵して持ち帰った試料から、生きている貝類を肉眼で分別した後、同定および計数を行った。

2.5. 底質環境と大型無脊椎動物群集の関係についての解析手法

大型無脊椎動物の分類群と底質環境の対応関係を理解するために、多変量解析として CCA を用いた。その有効性については Palmer⁽¹¹⁾ や加藤⁽¹⁷⁾ により検討が行われている。本研究では、多変量解析ソフト PC-ORD（MjM Software Design Version 4 for Windows）を用いて以下の条件で CCA を実行した。生物群集の個体数データと底質環境のデータはすべて LN(n+1) 変換を行った。底質環境の要因として、水深、含礫率、含水率、強熱減量、含ヨシ根率を用いた。調査地点のスコアは環境要因との線形結合スコアを図にプロットした。軸スコアは標準化したもので、軸のスケールは分類群と調査地点の折衷表示とした。また、固有値および種-環境の相関の結果を検定するためにモンテカルロ検定を行った（n=1,000）。

3. 結果

3.1. 全域ライン調査

2003年の2月10日～14日に全域ライン調査を行った。魚群探知機による湖底地形の調査から、北浦沿岸には湖棚地形が形成されていることが確認された(図3・1)。砂質帯は湖岸に近いほど礫、粗粒砂および中粒砂を含む傾向がみられたが、基本的には淘汰の良い細粒砂が堆積していた(表3・1)。しかし、ライン西岸のように入り江状を呈する沿岸では明確な湖棚地形を示さず、有機物に富んだ堆積物組成を示した(図3・1、表3・1)。

5本のライン全22定点において採集されたユスリカ幼虫は16分類群、その他の分類群は5分類群であった(表3・2)。全調査地点の平均個体数密度は $2,554 \pm 2,328 \text{ ind m}^{-2}$ (平均±SD)、平均現存量は $2.5 \pm 2.3 \text{ g DW m}^{-2}$ であった。最も採集個体数が多かったユスリカ幼虫はオオミドリユスリカ属の1種(*Lipiniella* sp.)であり、全体の65%を占めた。この分類群の最大個体数密度は $7,579 \pm 1,114 \text{ ind m}^{-2}$ 、最大現存量は $4.0 \pm 0.3 \text{ g DW m}^{-2}$ であった。この値と、軟泥で優占するオオユスリカ(*Chironomus plumosus*)の本研究で得られた最大値を比較すると(個体数密度: $1,684 \pm 842 \text{ ind m}^{-2}$;現存量: $9.7 \pm 4.7 \text{ g DW m}^{-2}$)、個体数密度で約5倍、現存量では約半分に達していた。

ユスリカ幼虫の分布と底質環境の関係について、CCAを用いて解析した(図3・2、表3・3)。その結果、第1軸によって、砂や礫が堆積した水深の浅い沿岸帯と、泥や有機物が堆積した水深が深い沖帯に分離された。分類群の多くは沿岸帯の特性を示す領域に、一方、オオユスリカ、スギヤマヒラアシユスリカ(*Clinotanypus sugiyamai*)、ウスイロカユスリカ(*Procladius choreus*)は沖帯の特性を示す領域に配置されていた。また、*Lipiniella* sp. は含砂率と強い関係を示し、オオユスリカは強熱減量や含泥率と強い関係を示した。

3.2. 水際線の調査

2002年6月6日～7日に水際線に沿ったヨシ群落の性状および底質を調べた。その結果、岸沿いの水深は、コンクリート護岸で深く、ヨシ群落前で浅い傾向があった(図3・3a)。含礫率は始点付近で高かったが、消波堤が設置されているヨシ群落から終点に向かって減少傾向を示した(図3・3b)。有機物量(強熱減量)は、始点から終点にかけていくつかのピークを示したが、消波堤の有無による明確な差は観察されなかった(図3・3c)。ヨシ茎の密度は最小で 97 本 m^{-2} 、最大で 361 本 m^{-2} 、平均は $195 \pm 63 \text{ 本 m}^{-2}$ となった。それぞれのヨシ群落(St.2、St.4、St.7)毎に茎密度を見ると、始点側である南側で高く、終点側の北側で低い傾向がみられた(図3・3d)。茎直径の最小値は 3.3 mm 、最大は 7.6 mm 、平均は $5.7 \pm 1.1 \text{ mm}$ であった。茎直径はSt.2のある南側で小さく、St.7のある北側ほど大きくなった(図3・3e)。ヨシの草高は最小で 53 cm 、最大で 230 cm 、平均は $159 \pm 53 \text{ cm}$ であった。草高も茎直径と同様に調査ラインの南から北へ向かって高まる傾向がみられた(図3・3f)。

主成分分析の結果、草高が高く、茎直径が太く、茎密度が低いという<健全型>ヨシ群落と、草高が低く、茎直径が細く、茎密度が高いという<貧弱型>ヨシ群落の対立項が第1主成分として抽出された。第1主成分は、始点から消波堤のないヨシ群落が終わるまで負の値(貧弱型)を示した(図3・3g)。その後、消波堤が設置されたヨシ群落から終点までは正の値(健全型)をとった。第1主成分を目的変数、底質要因を説明変数とした重回帰分析を行ったところ、含礫率のみに有意な負の相関が得られた($p < 0.05$)。

3.3. 消波堤周辺における調査-2002年4月の結果について

2002年4月19日に行った消波堤周辺の砂質帯におけるユスリカ幼虫調査の結果、全14定点か

ら 133 個体 10 分類群のユスリカ幼虫が採集された (表 3・4、図 3・4)。採集個体数が多かった分類群は *Lipiniella* sp.、アシマダラユスリカ属の 1 種 (*Stictochironomus* sp.) であった。*Lipiniella* sp. は、比較的水深の深い地点に出現し、本調査の最大密度および現存量は St. 2-3 で $2,105 \pm 1,263 \text{ ind m}^{-2}$ 、 $2.7 \pm 1.4 \text{ g DW m}^{-2}$ であった。*Stictochironomus* sp. は消波堤内側から出現し、最大密度および現存量は St. 5 で $2,386 \pm 1,353 \text{ ind m}^{-2}$ 、 $2.9 \pm 1.3 \text{ g DW m}^{-2}$ であった。

3.4. 消波堤周辺における調査-2002 年 7 月の結果について

2002年7月4日に環境要因 (水温と溶存酸素) を測定した結果、水温および溶存酸素の平均値はそれぞれ $23.3 \pm 1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $9.8 \pm 1.3 \text{ mg L}^{-1}$ であり、溶存酸素量の最低値は St. 2B-i の 6.9 mg L^{-1} であった (図 3・5)。夏期においても貧酸素もしくは低酸素環境は観察されなかった。ヨシ群落における底質の基本構成要素は、ヨシの糸状根と砂礫であった。ヨシ群落における含礫率は最大で 51.8% となり、ヨシ根率は最大で 8.8% となった。また、ヨシ群落の中央粒径値と強熱減量の平均はそれぞれ $1.4 \pm 1.3 \phi$ 、 $3.2 \pm 1.3\%$ であった。一方の砂質帯における中央粒径値と強熱減量の平均はそれぞれ $1.6 \pm 1.2 \phi$ 、 $2.1 \pm 1.4\%$ であった。砂質帯において特徴的な底質を示したのは、含礫率が 68.4% を示したコンクリート護岸の前縁 (St. 1-1)、強熱減量が 4% を超えた消波堤の内側 (St. 4-1、St. 4-2、St. 7-1) および強熱減量が 6.3% に及んだ水深 3.1 m の地点 (St. 7-3) であった。St. 4、St. 5 を含む消波堤内において、堆積物中に含まれる有機物量 (強熱減量) の分布調査を行った結果、消波堤内の有機物は南側に偏った分布を示した (図 3・6)。また、消波堤のすぐ内側には有機物が多く堆積する傾向がみられた。

2002年7月4~6日の調査では、全 22 定点から 6,469 個体 31 分類群の底生動物が採集された (図 3・7、3・8、表 3・5)。調査定点の平均出現分類群数は、ヨシ群落で 14 ± 4 、砂質帯では 7 ± 4 であり、ヨシ群落で有意に多かった (t 検定, $p < 0.01$)。また、採集個体数 ($n = 3$ の合計) の平均値はヨシ群落で 578 ± 320 個体、砂質帯で 132 ± 130 となり、ヨシ群落で有意に多かった (t 検定, $p < 0.01$)。ユスリカ幼虫は、全分類群数の 48%、全採集個体数の 41% を占めた。採集個体数が多かった分類群は上位から、ハイイロユスリカ (*Glyptotendipes tokunagai*)、*Kamaka* sp.、タナイス類の 1 種 (*Zeuxo* sp.)、貧毛類 (Oligochaeta) であり、これらの合計で全採集個体数の 79% を占めた。ハイイロユスリカはヨシ群落の調査地点の平均で個体数密度が $22,754 \pm 20,235 \text{ ind m}^{-2}$ 、現存量が $6.4 \pm 6.1 \text{ g DW m}^{-2}$ であり、最大値はそれぞれ、 $58,947 \pm 9,537 \text{ ind m}^{-2}$ 、および $16.3 \pm 9.2 \text{ g DW m}^{-2}$ であった。St. 2B-e において、*Zeuxo* sp. は本研究における単一分類群の最大密度 $115,368 \pm 4,017 \text{ ind m}^{-2}$ を記録した。また、*Kamaka* sp. と貧毛類は、ヨシ群落と砂質帯を問わずに高密度で出現し、全定点の平均でそれぞれ $8,459 \pm 7,959 \text{ ind m}^{-2}$ 、 $6,947 \pm 5,430 \text{ ind m}^{-2}$ の値を示した。

砂質帯はヨシ群落と比較して出現した分類群数が貧困であった。*Lipiniella* sp.、オオユスリカ、*Stictochironomus* sp. の 3 種のユスリカ幼虫は、砂質帯でのみ採集された。*Lipiniella* sp. の最大個体数密度および現存量はそれぞれ $6175 \pm 1753 \text{ ind m}^{-2}$ および $3.1 \pm 0.8 \text{ g DW m}^{-2}$ であった。また、オオユスリカは、最大値でそれぞれ $3368 \pm 1114 \text{ ind m}^{-2}$ 、 $2.4 \pm 1.7 \text{ g DW m}^{-2}$ 、*Stictochironomus* sp. は消波堤の内側において最大値 $702 \pm 243 \text{ ind m}^{-2}$ と $1.6 \pm 0.1 \text{ g DW m}^{-2}$ を示した。

CCA の結果 (図 3・9、表 3・6)、第 1 軸は水深と強い正の相関を示した。一方、第 2 軸は底質要因と高い相関を示さなかったが、含礫率とは正、含ヨシ根率とは負の傾向がみられた。ヨシ群落前縁の砂質帯はヨシ群落に近い配置を示した。砂質帯の調査地点に特徴的な分類群は、オオユスリカ、*Lipiniella* sp.、カマガタユスリカ属の 1 種 (*Cryptochironomus* sp.)、*Stictochironomus* sp.、エダヒゲユスリカ属の 1 種 (*Cladotanytarusus* sp.)、ヨコエビ類の 1 種 (*Kamaka* sp.)、イシガイ (*Unio douglasiae*)、貧毛類 (Oligochaeta) であった。消波堤内側は、*Kamaka* sp.、貧毛類および *Cladotanytarusus* sp. によって特徴付けられた。その他の定点のスコアは水深に従ってほぼ直線に配置され、水深の深い所は *Lipiniella* sp. とオオユスリカによって、水深の浅い所は *Cryptochironomus* sp. と *Stictochironomus* sp. によって特徴付けられた。また、ヨシ群落内の調査地点は、含ヨシ根率の高い地点と含礫率の高い地点に分離される傾向がみられた。前者の調

査地点を特徴付ける分類群は、メスグロユスリカ、コガタシマトビケラ属の1種 (*Cheumatopsyche* sp.)、ヨコエビ類の1種 (*Jesogammarus spinopalpus*) などであったが、後者の調査地点を特徴付ける分類群は、*Zeuxo* sp.、*Cyathura* sp. などであった。

3.5. ユスリカ幼虫の個体群動態と鉛直分布

St. 2-2 と St. 4-2 で行った定期調査の結果、*Lipiniella* sp. およびオオユスリカ幼虫個体群の動態は2地点で明らかに異なっていた (図 3・10)。St. 2-2 において、調査期間中に採集された *Lipiniella* sp. 幼虫の個体数は全ユスリカ幼虫数の 92.1% を占めていた。また、St. 4-2 においてオオユスリカは 29.8% を、*Lipiniella* sp. は 25.0% をそれぞれ占めていた。

St. 2-2 における *Lipiniella* sp. 幼虫個体群についてみると、7月下旬、10月中旬および5月中旬に個体数密度の増加がみられた。現存量は冬期に増加し、2月にピークを迎えた。St. 4-2 のオオユスリカは、10月中旬、2月上旬に個体数および現存量のピークをそれぞれ迎えた。St. 2-2 のオオユスリカ、St. 4-2 の *Lipiniella* sp. は個体数および現存量ともに明確なピークを示さなかった。

2003年11月に行った調査の結果、消波堤の有無によって底質環境 (強熱減量および ORP) の鉛直的な変化は有意に異なった (Two-way ANOVA, $p < 0.01$) (図 3・11)。St. 4-2 の強熱減量は堆積物表層から 10 cm 以深まで高い傾向にあった。また同地点の ORP は表層から還元的であったが、St. 2-2 では 4~6 cm まで酸化的であった。これは砂質堆積物の色調が明色から暗色に変化する深度とほぼ一致した。このような色調の変化は2月の全域ライン調査においてもほとんどの砂質帯で観察された。

同調査におけるユスリカ幼虫の鉛直分布をみると、St. 2-2 の *Lipiniella* sp. は大型個体になるほど堆積物の表層には生息しない傾向が見られ、その幼虫は表層から 7 cm の深度の範囲で存在していた (図 3・12a)。一方、St. 4-2 では *Stictochironomus* sp. が 7 cm 以深まで潜行していたが、同地点で出現したオオユスリカは必ずしも潜行せず、大型個体であっても表層に生息するものが多くみられた (図 3・12b)。

3.6. ヨシ群落周辺における貝類の分布

2003年11月に St. 2-1、St. 4-1、St. 7-1 の3地点でコドラートを用いて貝類調査を行った結果、イシガイ、ヒメタニシ (*Sinotaia quadrata*)、ドブガイ (*Anodonta woodiana lauta*)、シジミガイの一種 (*Corbicula* sp.) およびカワナ類の一種 (*Semisulcospira* sp.) などが採集された。その中でもイシガイの採集個体数がもっとも多く、その全採集個体数に対する割合は 73.7% であった。イシガイは St. 4-1 において、本研究における最大密度 57 ind m^{-2} を記録した。平均密度は St. 2-1 で $6.2 \pm 4.4 \text{ ind m}^{-2}$ 、St. 4-1 で $28.2 \pm 17.0 \text{ ind m}^{-2}$ 、St. 7-1 で $22.8 \pm 5.9 \text{ ind m}^{-2}$ であった。イシガイは消波堤の設置されていない St. 2-1 よりも消波堤の設置された St. 4-1、St. 7-1 で有意に多かった (One-way ANOVA, $p < 0.05$)。次に全採集個体数に対する割合が高かったのはヒメタニシで 18.6% であった。ヒメタニシは消波堤の設置されていない St. 2-1 では採集されなかったが、St. 4-1 で $10.8 \pm 8.8 \text{ ind m}^{-2}$ 、St. 7-1 では $3.6 \pm 4.3 \text{ ind m}^{-2}$ の平均密度を示した。また、イシガイ、ヒメタニシともに St. 4-1、St. 7-1 の間に有意差はみられなかった。

4. 考察

4.1. 底質環境

北浦における陸水学研究は、これまで生物学的・化学的な研究が主であり、地質学的研究はほとんどなされてこなかった。このような状況下で、近年、茨城大学の納谷友規らによって精力的に進められつつある地質学的研究によって、北浦の過去から現在までの環境変遷と、湖底堆積物

の堆積過程が明らかにされつつある⁽¹⁸⁾。本研究でみられた沿岸における湖棚地形の特徴は、この納谷らの研究⁽¹⁸⁾においても同様に確認されている。

北浦沿岸に見られる湖棚地形の場所への消波堤の建設は、それが粗朶を用いた工法であろうとも、内側に有機物を堆積させる効果をもたらすことが本研究により確認された。消波堤の建設がもたらすこのような底質環境への影響は、特に消波堤のすぐ内側で顕著に表れるが、消波堤から湖岸まで距離がある場合には、消波堤が湖岸周辺におよぼす影響は比較的少ないようであった。北浦沿岸における有機物の分布が不均一であったことから、消波堤によって生み出される波浪影響にも傾度があることが示された。また、消波堤が崩壊する過程で流れ出す粗朶の破片なども有機物の堆積に少なからぬ影響を与えているだろう。

湖棚地形の堆積物の特徴は、淘汰のよい砂質が厚く堆積し、鉛直的に酸化環境が維持される点であった。一方で、消波堤内側の堆積物は表層から有機物が多く、還元状態を呈していた。還元的な環境に陥るのは、湖棚地形の砂質のように高頻度の攪乱による酸素の供給がないためと思われる。

ヨシ群落では、底質環境の傾度として含礫率と含ヨシ根率が存在した。消波堤が設置されていないヨシ群落は含礫率が高く、消波堤が設置された群落では含ヨシ根率が高かったので、底質環境の傾度は、波浪影響の差異によって生み出されていると考えられる。調査時の観察では、波浪影響が弱い地点のヨシ根は柔らかいマット状だったが、波浪影響の強い地点のヨシ根は間隙に砂礫がきつく堆積していた。ヨシ群落の際は直線状ではなく、大小さまざまな湾曲がみられている。水際線調査の結果(図3・3)から、このような湾曲は波浪影響の差異を生み出し、底質環境に傾度を与えるものと考えられる。

4.2. ヨシ群落性状

ヨシ群落性状調査の結果から、北浦の爪木地区のヨシ群落は健全型と貧弱型に分けることができた。貧弱型のヨシ群落は消波堤の設置されていない地点から観察されたため、ヨシ群落の貧弱化には波浪が大きく影響していると考えられる。第1主成分と含礫率が相関を持ったこともこれを裏付けるだろう。爪木地区のヨシ群落は貧弱化の傾向にあるが、消波堤によって波浪が和らげられたヨシ群落では、その健全性が維持されているといえる。健全な性状を示すヨシ群落においても、沖側の地形が緩傾斜でない限り、群落自体の拡大は望めない。一方で、ヨシ群落が湾上に入り込んだ調査地点では、消波堤の有無に関わらず水深が浅くなり、場合によっては砂質の緩傾斜が成立している地点がみられた。このような緩傾斜の存在する地点は群落も健全なため、部分的ではあるがヨシ群落の拡大が期待できるだろう。群落全体にわたって緩傾斜が復元されるには砂質の供給源が不可欠と考えられるが、消波堤の設置はそのような直接的な効果をもたないと思われる。したがって、消波堤の設置はヨシ群落の衰退スピードを抑える効果のみを期待するべきであろう。

4.3. ヨシ群落の大型無脊椎動物群集

ヨシ群落の大型無脊椎動物群集として最も特徴的な分類群はハイイロユスリカである。土谷ら(未発表)の観察から、この種はヨシの根に保持された堆積物表層に砂などを基質とした明瞭な管状の巣を作ることが分かっている。またこの幼虫は沖から供給される懸濁物を濾過摂食していると推定される。

ハイイロユスリカの現存量は、ヨシ群落の平均で $6.4 \pm 6.1 \text{ g DW m}^{-2}$ 、最大で $16.3 \pm 9.2 \text{ g DW m}^{-2}$ であった。1982年～1986年の岩熊の研究⁽¹⁹⁾によると、霞ヶ浦・北浦の沖帯底泥から大量発生していたアカムシユスリカの現存量は平均で $4.4 \pm 3.1 \text{ g DW m}^{-2}$ 、最大で 25.8 g DW m^{-2} であり、同時期のオオユスリカの現存量は平均で $0.5 \pm 0.6 \text{ g DW m}^{-2}$ 、最大で 6.6 g DW m^{-2} であった。このことから、ハイイロユスリカはこれら2種と同等の現存量を持つといえる。

一方で、発育有効積算温度はアカムシユスリカで810～950日度、オオユスリカで710～1,360

日度であるのに対し、ハイイロユスリカは 340 日度である⁽¹²⁾。ハイイロユスリカは 1 個体当たりの現存量が小さいが(体長で比較するとアカムシユスリカ幼虫の 80%、オオユスリカの 50%程度)、春から秋にかけて発育し、他の 2 種と比較して成長速度が速く、世代数も多い。したがって、ハイイロユスリカの生産量は、これら 2 種で見積もられている値⁽²⁰⁾(アカムシユスリカ:年平均 3.69 g DW m⁻²; オオユスリカ:年平均 3.22 g DW m⁻²)の数倍に達すると考えられる。さらに、ハイイロユスリカはヨシ群落に生息しているため、沖帯よりも高い捕食圧にさらされていると考えられる。実際、ヨシ群落が発達する北浦沿岸帯に生息する魚類の消化管内容物調査から、魚類の中で優占種となっているヌマチチブなどのハゼ科魚類の餌資源として積極的にハイイロユスリカ幼虫が利用されていることが分かっている(村松ら、未発表)。

これらのことから、単位面積当たりで考えると、ヨシ群落に生息するハイイロユスリカは沖帯のアカムシユスリカやオオユスリカよりも物質循環への寄与は大きいと思われる。湖岸線の大半がコンクリート護岸化されている今日、辛うじて残存したヨシ群落が維持する生態系機能の特徴として、物質循環に果たすハイイロユスリカの役割は見逃せない。湖沼全体でみるとその寄与はそれほど大きくないと考えられるが、沿岸砂質帯で優占する *Lipiniella* sp. の魚類に捕食されにくい特性(詳しくは後述)を考え合わせると、沿岸生態系の中で占める役割は大きいだろう。また、消波堤の設置されたヨシ群落は設置されていない群落と比較して、ハイイロユスリカの個体数密度、現存量が高かった。ヨシ群落に対する波浪影響の緩和は、群落堆積物中のヨシ根率を高めることで、ハイイロユスリカの生息空間の増加させているかもしれない。

CCA の結果から、ヨシ群落と砂質帯における大型無脊椎動物群集の特性は明らかに異なっていた。砂質帯では出現分類群数が比較的少なく、明確な傾度が得られなかった。ヨシ群落に出現した大型無脊椎動物群集は多様であり、過去のユスリカによる研究事例⁽¹³⁾を支持するものであった。ヨシ群落に出現した大型無脊椎動物群集は底質環境の傾度に伴ってはっきりと変化した。このことから、ヨシ群落に対する波浪影響の傾度は、大型無脊椎動物群集の多様性を明確に増大させるといえる。

北浦のヨシ群落では大型無脊椎動物群集の個体数密度を用いた多変量解析(CCA)により、環境傾度とそれに対する生物群集の応答を把握できることが確認された。今後行われる自然再生事業は沿岸帯の水生植物群落とその周辺をフィールドとするため、それらの影響評価を行う場合には、本研究のような調査手法をとることが有効な手段であろう。そのためには本研究の結果でも明らかのように、大型無脊椎動物全般の分類はもちろんのこと、特に出現種数および出現頻度の多いユスリカ幼虫についての詳細な分類が必要不可欠である。

4.4. 貝類の分布

消波堤の設置された砂質帯ではイシガイやヒメタニシなどの貝類が有意に多かった。ヒメタニシは雑食性で、付着藻類やデトリタスなどを摂餌し、礫、水草、杭などの構造物に付着するのが一般的である⁽²¹⁾。本調査地においてもヨシなどに付着しているのが容易に観察されるが、消波堤内は波浪の影響が少ないため、その分布域を砂質帯まで拡大したと考えられる。または消波堤内の粗朶などの破片に付着していた可能性もある。イシガイは濾過摂食性で水中の懸濁物質を水管から吸い込んで摂餌する。通常、砂の中に殻を半分差込んで生活するが、底質上をよく動き回る性質も持つ。イシガイ科の二枚貝は、タナゴ類やヒガイなどの産卵場として重要である⁽²¹⁾。この種が消波堤内で多かった理由は明らかでないが、稚貝の定着率や餌量、波浪による攪乱の程度などが影響していると考えられる。消波堤の設置は、砂質帯において貝類の現存量を高める効果を持つといえる。このような現存量の増加は物質移動経路の拡大を意味し、貝類による水質浄化能を高めることとなる。

4.5. 砂質帯のユスリカ幼虫

納谷らによる地質学的底質調査⁽¹⁸⁾と同時に筆者が所属する広域水圏センターの生物環境研究

グループによってユスリカ幼虫の水平分布調査が行われた。エクマンバージ採泥器によるこの水平調査は、砂質堆積物の採取が定量的でなくなるというデメリットをもっていただけ、沿岸域に生息するユスリカ群集に関しては明確な結果が得られなかった。特に *Lipiniella* sp. の採集個体数は少なく、その分布は不明確であった。本研究ではエクマンバージ採泥器のかわりにコアサンプラーを用い、沿岸砂質帯のユスリカ群集を定量的に調査して、その分布状況を明らかにした。

爪木ライン調査の結果では、ヨシ群落と比較して砂質帯の出現分類群数が少なかったため、消波堤周辺における CCA の結果から明確な底質環境の傾度を見出すことができなかった。しかしながら、*Lipiniella* sp.、オオユスリカおよび *Stictochironomus* sp. は砂質帯において特徴的な分布を示した。この 3 種のユスリカ幼虫について、餌資源、摂餌生態および捕食圧などを考慮することで、底質環境との関係を詳しく検討した。

全域沿岸ライン調査の結果から、*Lipiniella* sp. は水深 2 m 前後で礫質や有機物を含まない淘汰のよい砂質が堆積する湖棚地形で優占する分類群であることが明らかになった。この種の個体数変動から判断すると、5 月上旬、7 月中旬、10 月上旬の年 3 回の羽化期をもつと考えられる。羽化期直前の現存量を積算することで最小生産量を概算することができるが⁽²²⁾、これを用いると *Lipiniella* sp. の年間生産量は 10 g DW m⁻² 前後になる。この値は、前述のアカムシユスリカ（平均 3.7 g DW m⁻²、最大 14.2 g DW m⁻²）、オオユスリカ（平均 3.2 g DW m⁻²、最大 9.4 g DW m⁻²）の生産量⁽¹⁹⁾とほぼ同等の値といえるだろう。*Lipiniella* sp. の鉛直分布調査の結果から、酸化的な砂質堆積物下層への分布が確認された。また、実験室での観察においても、当該 4 令幼虫が砂質堆積物中にすばやく潜行する行動がみられた。*Lipiniella* sp.、特に 4 令幼虫は、このような高い潜行能力を有するため、魚類による捕食圧はほとんど受けていないと考えられる。したがって、*Lipiniella* sp. が優占する現在の北浦沿岸帯は、ユスリカ幼虫から魚類へと流れる物質移動量が大きいとはいえないようである。その一方で、*Lipiniella* sp. の高い生産量が確認されたため、羽化による湖外への有機物除去能力は比較的高い可能性がある。

筆者を含めた茨城大学広域水圏センターの研究グループが北浦で実施しているユスリカ成虫モニタリング調査において、現在、個体数的にもっとも多く採集される分類群は *Lipiniella* sp. である。このことは、*Lipiniella* sp. が湖から大量発生する不快昆虫として今後問題視されていく可能性を示唆するものである。*Lipiniella* sp. の餌資源は砂質堆積物の表層に一時的に沈降してきた有機物と考えられるが、その詳細は未知である。2 定点における定期調査では、有機物が堆積した消波堤の内側における密度が消波堤のない砂質帯よりも低かった。したがって、沿岸全域ライン調査の結論と同様に、有機物の堆積を伴うような底質環境の改変は *Lipiniella* sp. の分布を制限するものといえる。

比較的大型である *Stictochironomus* sp. の 4 令幼虫は、個体数密度は低いものの、消波堤内側の砂質帯からのみ採集された。この種は還元的な環境である消波堤内側の堆積物下層に分布する。安定同位体比による琵琶湖深底部の底生動物の食物網解析において、*Stictochironomus* sp. と同じ属の *Stictochironomus pictulus* はメタン資化細菌を摂食している可能性が指摘されている⁽²³⁾。したがって、本研究で消波堤の内側から *Stictochironomus* sp. が採集されたことは、消波堤内の砂質帯において特殊な物質移動経路が生み出されている可能性を示している。

オオユスリカは、沖帯の軟泥で優占する比較的大型のユスリカ幼虫である。沿岸全域ライン調査の結果では *Lipiniella* sp. とは対照的な分布を示し、含泥率・含水率・強熱減量の高い地点を好んだ。この種が有機物の堆積した消波堤の内側で冬期に多く採集されたことは、その底質環境がオオユスリカに好適であることを示している。それにも関わらず、春から秋にかけて同地点で採集されない理由は、オオユスリカの表層分布と沿岸帯の高い捕食圧によって説明できるだろう。オオユスリカは、軟泥が厚く堆積する沖帯では鉛直的に営巣するが、泥質の層厚が限られた沿岸では水平的に営巣することが知られている⁽²⁴⁾。基本的に砂質である消波堤内側では鉛直的に営巣できず、魚類の活性の高い春から秋に強い捕食圧を受けているのであろう。消波堤の設置による波浪影響の緩和とそれに伴う有機物の堆積は、沖帯で優占するオオユスリカの砂質帯への分散を可能にした。この分布域の拡大は、砂質帯のユスリカ幼虫から魚類へ流れる物質移動経路を増大させているかもしれない。

消波堤の設置による波浪影響の傾度はさまざまな底質環境を生み出し、元来砂質帯でメジャーでない生物群集を定着させることで生物多様性を増大させた。同時に波浪影響の緩和はいくつかの分類群の現存量を高めることで、低次から高次生産者への、より効率的な物質移動を促しているかもしれない。また、消波堤内側への有機物の堆積は還元的な底質環境を生み出し、従来とは異なった物質移動経路を創出した。このように、湖沼再自然化事業の環境影響評価を行う上で、生物群集の種多様性だけではなく、沿岸域生態系の構造的多様性をも捕捉して評価をすることは、健全な湖沼環境を取り戻すための再自然化事業を立案する上で重要な指針を与えるものとなるだろう。

4.6. 現在の湖岸植生再生事業の課題と今後の方向性について

本研究から消波堤のさまざまな影響が確認されたが、湖岸植生再生事業の手法として今後も利用すべきか否かにはついては疑問が残る。少なくとも今回対象にした消波堤は湖岸の景観上に大きな問題があると思われる。今回得られた知見を解釈する際に、最も注意したいのは、消波堤の設置は北浦沿岸帯のポテンシャルを見出すきっかけに過ぎないという点である。波浪影響の不均一性を生み出すのは消波堤だけではない。湖岸の湾曲や湖底勾配、あるいは抽水植物・沈水植物・浮葉植物等の存在は、波浪影響の不均一性をもたらす大きな要因となる。このような、より自然状態に近い湖岸環境は、さまざまな底質環境を生み出すことで、多様な生物群集を維持することになるだろう。

最近用いられている湖岸植生再生工事の手法として、コンクリート護岸の沖側に砂を入れ、法止め工を施すものがある。消波堤のように景観を損なわずに緩傾斜を維持できることがこの工法のメリットであろう。しかしながら、波浪影響が強く酸化的な砂質堆積物は *Lipiniella* sp. の好適な生息環境になるため、その大量発生には注意が必要である。また、基本的には波浪影響の不均一性を内在しないので、生物多様性の観点からは消波堤の設置に劣るだろう。

本研究により、北浦沿岸帯の生物群集とその特徴に関する詳細な知見が得られた。同時に、施工した、もしくは施工する湖岸植生再生事業に対して影響評価を行う手法が検討された。今後は継続的なモニタリングを通じて、湖沼沿岸帯に生息するより多岐にわたる分類群の構造、およびそれらの相互作用を含めた生態的機能に関する詳細な知見を得るとともに、さまざまな事業形態に対して影響評価を行っていくことが必要である。特に、今後期待される沈水植物群落の再生と生物群集の応答に関する研究は、もっとも重要な研究課題となるだろう。

5. 謝辞

本研究は、茨城大学理工学研究科博士前期課程の土谷卓氏の全面的かつ献身的な協力の下に遂行されたものである。彼無しに今回の調査研究は決して成り立たなかつたろう。ここに深く感謝する次第である。本研究は土谷氏の茨城大学理工学研究科の修士論文研究の一部として行われ、ここに報告した研究成果は近々、土谷氏と筆者を連名とする学術論文にまとめられる予定である。

富山市科学文化センターの布村昇氏には、タナイス類およびウミナナフシ類の分類を行っていただいた。茨城大学理学部の森野浩教授にはヨコエビの分類についてご助言をいただいた。茨城大学理工学研究科博士後期課程の納谷友規氏には粒度分析と多変量解析についての議論をいただいた。同研究科博士前期課程の村松充氏および肥後麻貴子氏、同卒業生の櫻井秀明氏、同大学理学部の木村篤治氏、清水美紗子氏、刈部甚一氏、藤崎智幸氏、町隆幸氏にはサンプリングおよびサンプル処理を手伝っていただいた。その他、同大学広域水圏環境科学教育研究センターの関係者の方々にはさまざまな面でご助言とご協力をいただいた。この場を借りて感謝の意を表させていただく。

6. 参考文献

- 1) 齊藤文紀・井内美朗・横田節哉 (1990) : 霞ヶ浦の地史 : 海水準変動に影響された沿岸湖沼環境変遷史, 地質学論集, No. 36, pp. 103~118.
- 2) 水資源開発公団 霞ヶ浦開発事業建設部 (1988) : 霞ヶ浦開発.
- 3) 国土交通省霞ヶ浦工事事務所・水資源開発公団霞ヶ浦総合管理所・茨城県(2003) : 第 3 回霞ヶ浦意見交換会, 水位に関する基礎資料.
- 4) 国土交通省 霞ヶ浦工事事務所 (2002) : 霞ヶ浦の環境保全—すべての生き物とともに—.
- 5) 桜井善雄 (1994) : 水辺の自然環境—特に植生のはたらきとその保全について, 人と自然, No. 3, pp. 1~15.
- 6) 国土交通省霞ヶ浦工事事務所・水資源開発公団霞ヶ浦総合管理所・茨城県(2003) : 第 4 回霞ヶ浦意見交換会, 生態系に関する基礎資料.
- 7) Brodersen, K. P., P. C. Dall and C. Lindegaard (1998) : The fauna in the upper stony littoral of Danish lakes: macroinvertebrates as trophic indicators, *Freshwater Biology*, No. 39, pp. 577~592.
- 8) Tolonen, K. T., H. Hamalainen, I. J. Holopainen and J. Karjalainen (2001) : Influences of habitat type and environmental variables on littoral macroinvertebrate communities in a large lake system, *Archiv für Hydrobiologie*, No. 152, pp. 39~67.
- 9) 玉井信行・奥田重俊・中村俊六 編 (2000) : 河川生態環境評価法, 東京大学出版会, 東京.
- 10) Ter Braak, C. F. (1986) : Canonical Correspondence Analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis, *Ecology*, No. 67, pp. 1167~1179.
- 11) Pulmer, M. (1993) : Putting things even better order: The advantages of Canonical Correspondence Analysis, *Ecology*, No. 74, pp. 2215~2230.
- 12) 近藤繁生・平林公男・岩熊敏夫・上野隆平 共編 (2000) : ユスリカの世界, 培風館, 東京.
- 13) Ueno, R., T. Iwakuma and S. Nohara (1993) : Chironomid fauna in the emergent plant zone of Lake Kasumigaura, *Japanese Journal of Limnology*, No. 54, pp. 293~303.
- 14) Wiederholm, T. (ed.) (1983) : Chironomidae of the Holarctic region: Keys and diagnoses. Part 1. Larvae, *Entomologica Scandinavica, Supplement*, No. 19, pp. 191~457.
- 15) Smit, H., E. D. Van Heel and S. Wiersma (1993) : Biovolume as a tool in biomass determination of Oligochaeta and Chironomida, *Freshwater Biology*, No. 29, pp. 37~46.
- 16) Wouter, J. B. and D. Groenendijk (1994) : Seasonal dynamics and burrowing of littoral chironomid larvae in relation to competition and predation, *Archiv für Hydrobiologie*, No. 132, pp. 213~225.
- 17) 加藤和弘 (1995) : 生物群集序列化分析のための手法の比較研究, *環境科学会誌*, No. 8, pp. 339~352.
- 18) Naya, T., Amano, K., Okada, M., Nakazato, R., Kumon, F. and Nirei, H. (2004) : Characteristics of bottom surface sediments in relation to wind and wave action in Lake Kitaura, central Japan, *The Journal of the Geological Society of Japan*, No. 110, pp. 1~10.
- 19) 岩熊敏夫 (1990) : 霞ヶ浦沖帯におけるユスリカ幼虫の密度と現存量の変動 (1982~1990 年), 国立環境研究所霞ヶ浦全域調査資料, 昭和 62 年度~平成元年度, pp. 53~79.
- 20) Iwakuma, T. (1987) : Density, biomass and production of Chironomidae (Diptera) in Lake Kasumigaura during 1982-1986, *Japanese Journal of Limnology*, No. 48, pp. S59~S75.
- 21) 財団法人リバーフロント整備センター (1996) : 川の生物図典, 山海堂, 東京.
- 22) 半田暢彦・金成誠一・井内美朗・沖野外輝夫 (1987) : 湖沼調査法, 古今書院, 東京.
- 23) 成田哲也 (2002) : 安定同位体比による琵琶湖深底部底生動物の食物網解析の試み, *陸水学会誌*, No. 63, pp. 157~159.
- 24) McLachlan, A. J., M. A. Cantrell (1976) : Sediment development and its influence on the distribution and tube structure of *Chironomus plumosus* L. (Chironomidae, Diptera) in a new impoundment, *Freshwater Biology*, No. 6, pp. 437~443.

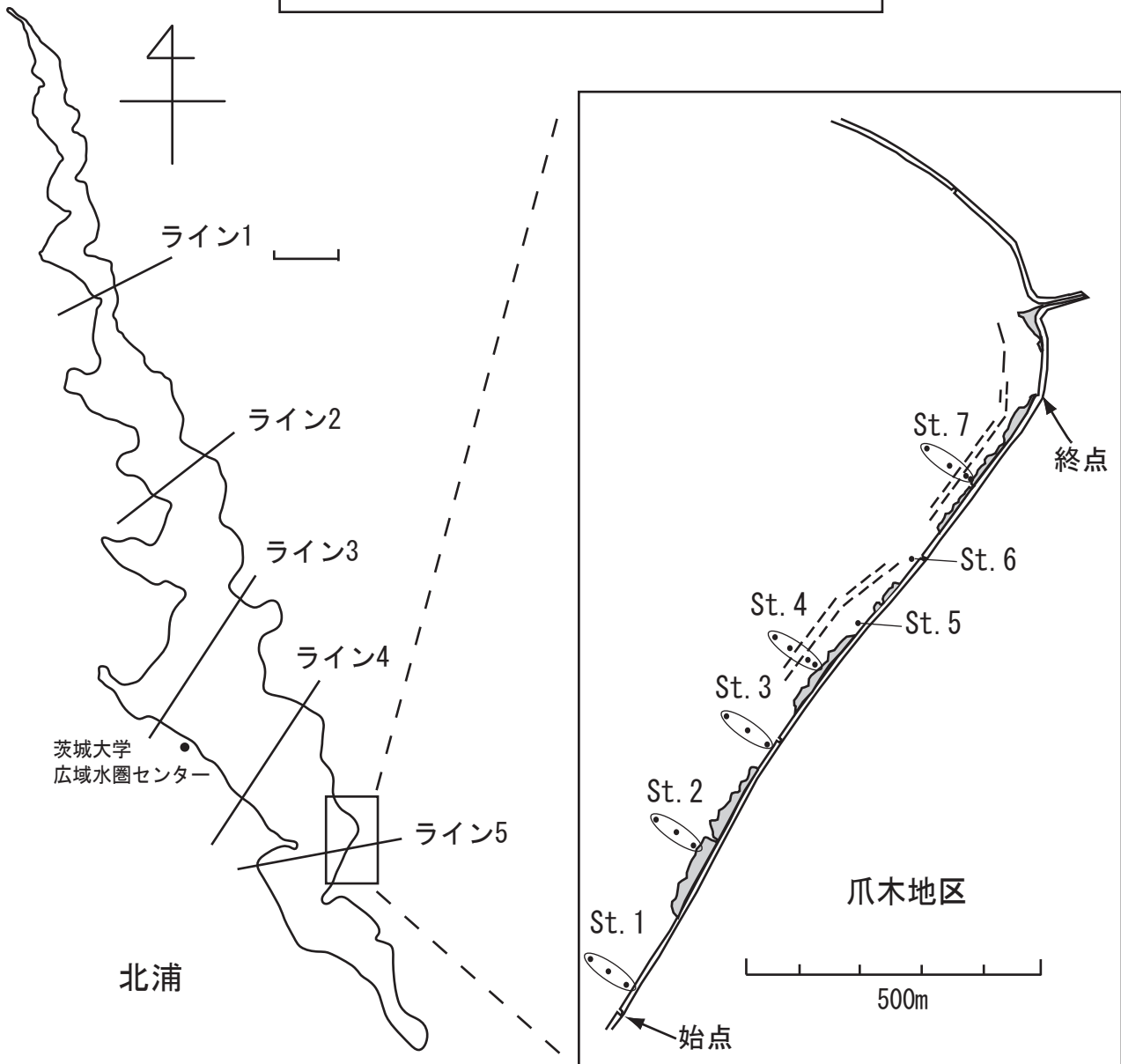
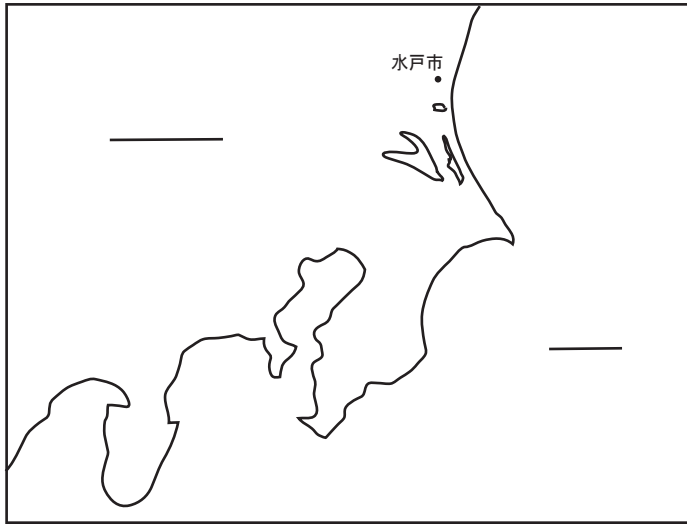


図1.1

(a)

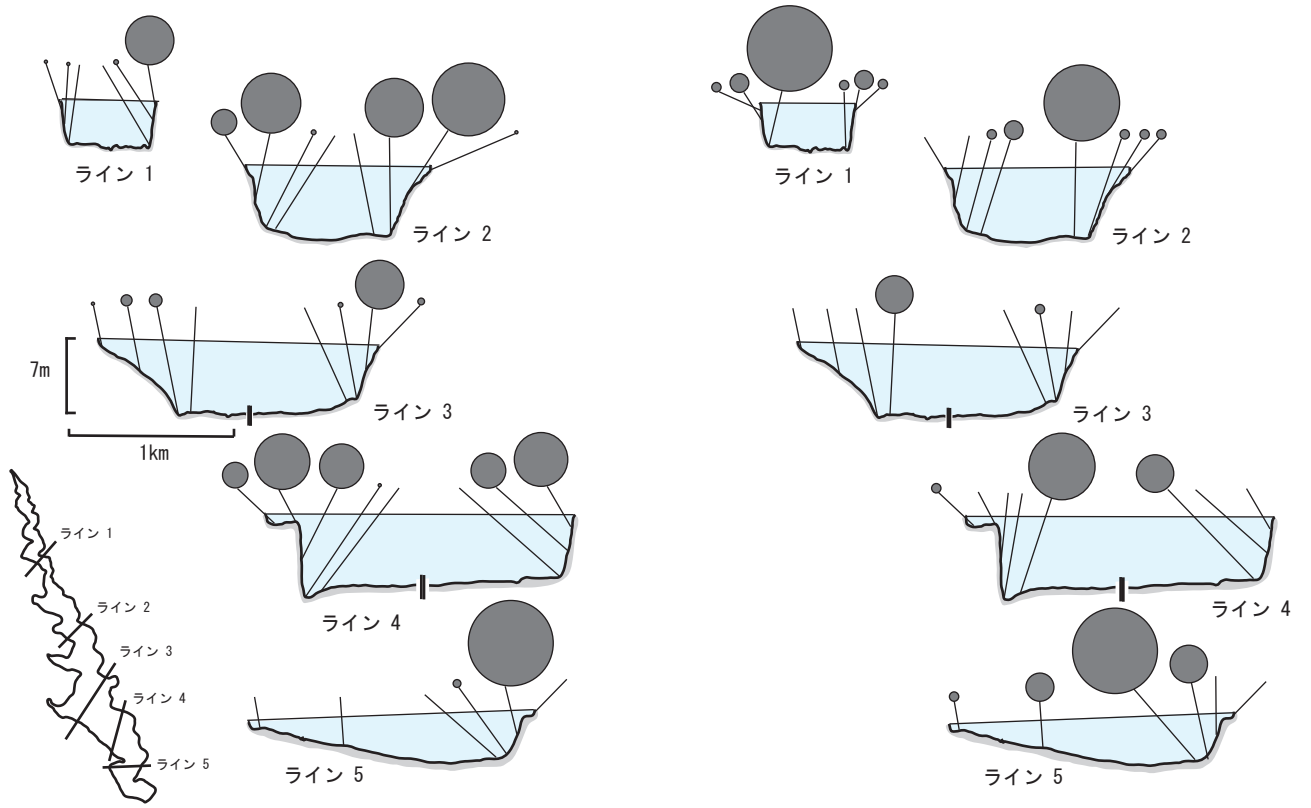


図3.1

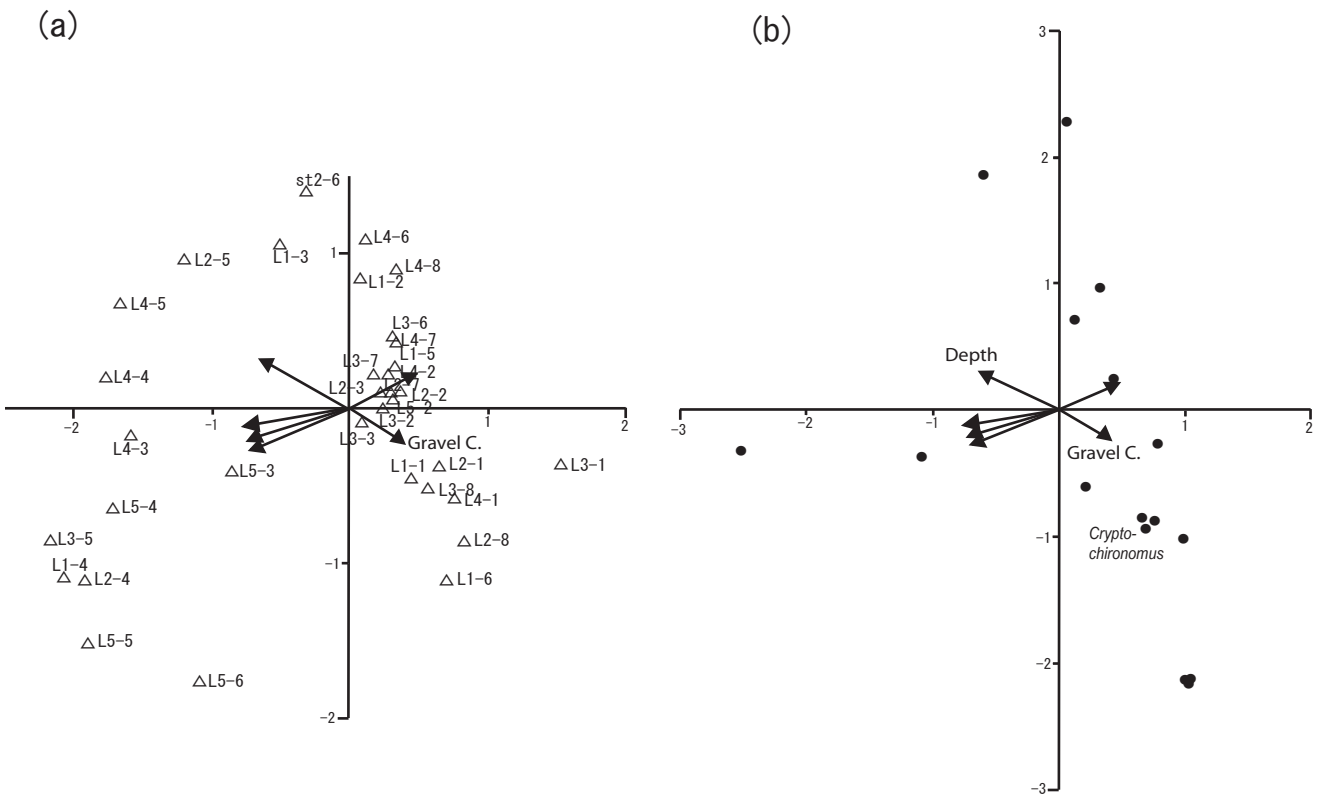


图3.2

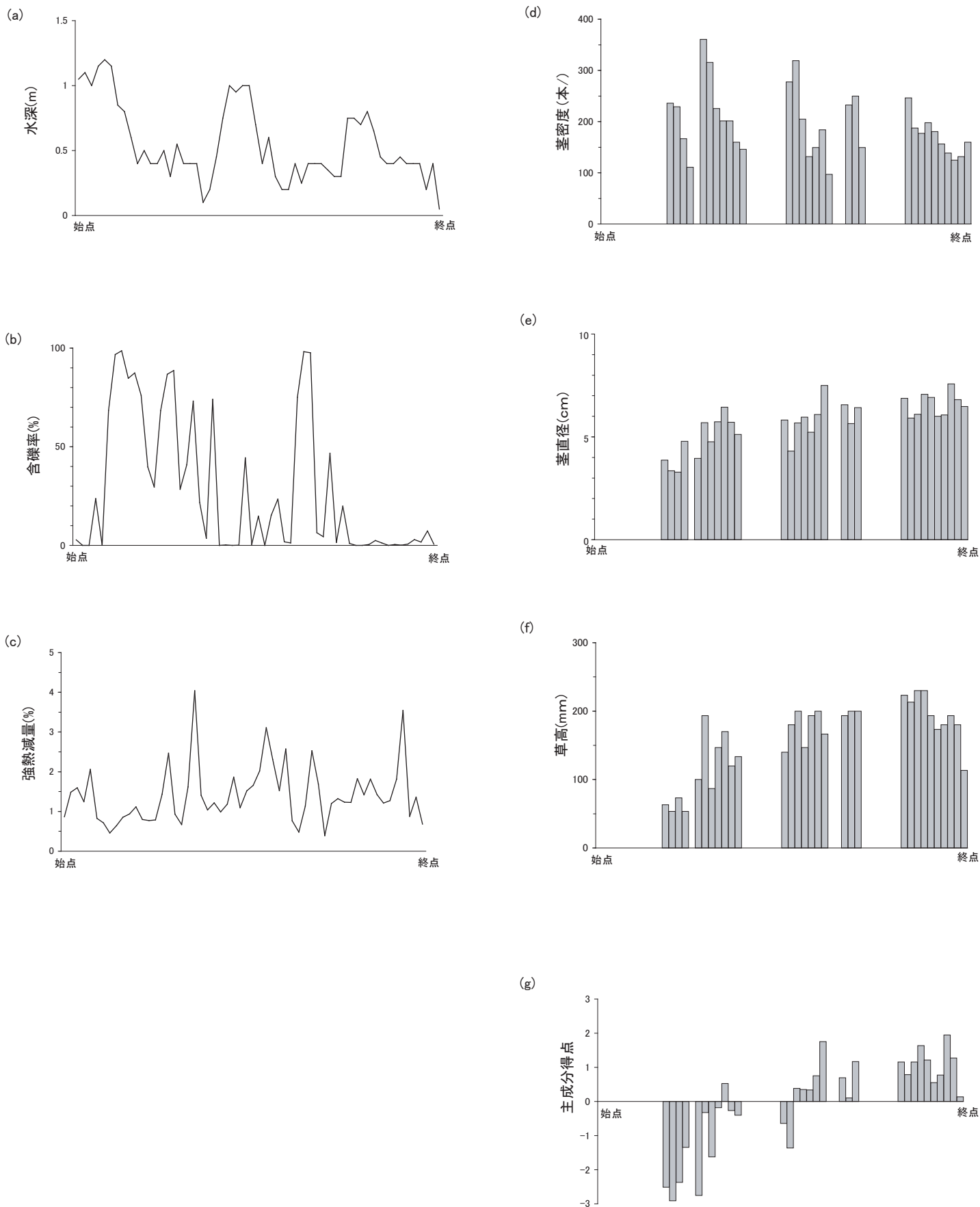
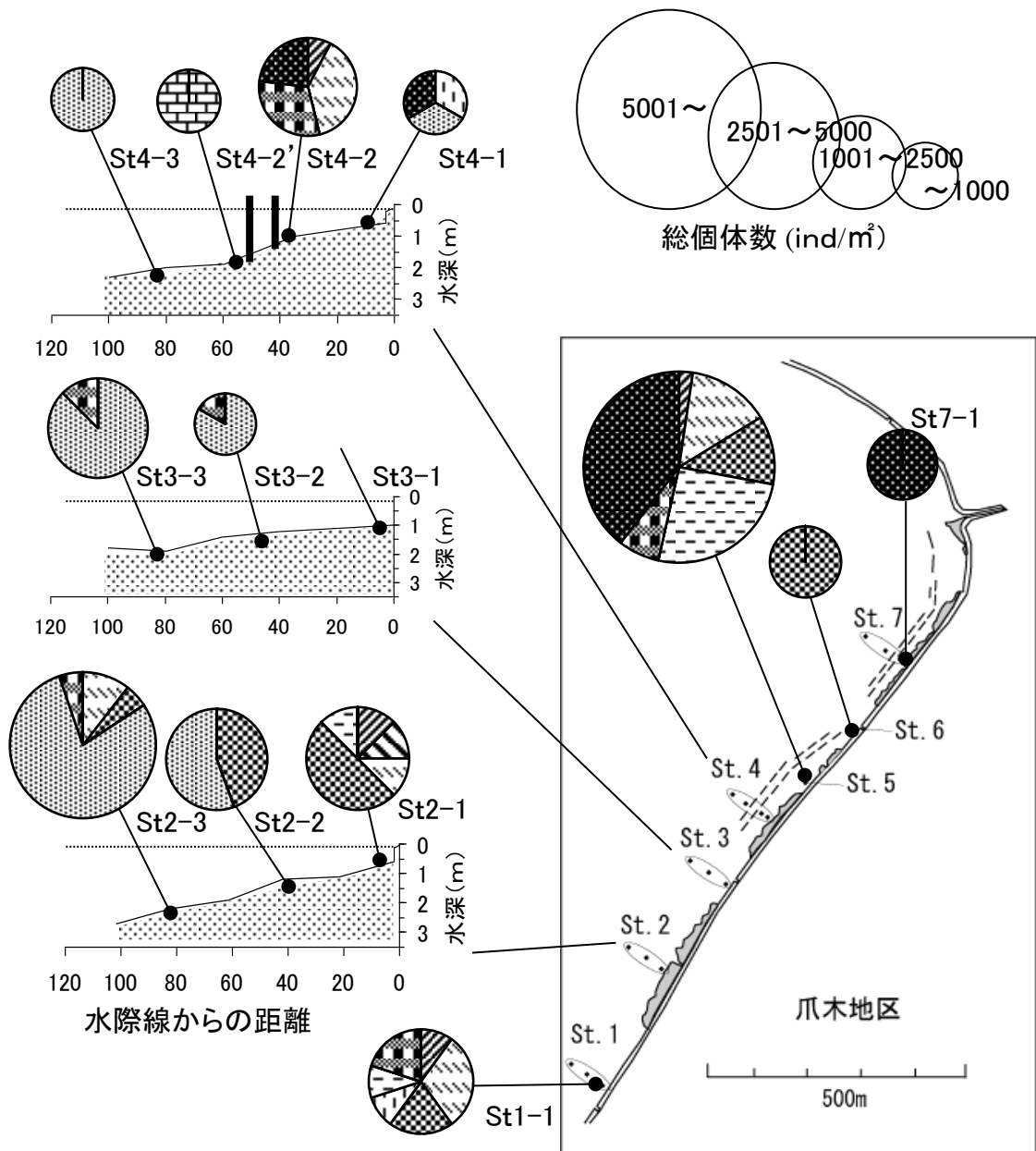


图3.3



	<i>Hydrobaenus kondoi</i>		<i>Orthocladius sp.</i>		<i>Chironomus plumosus</i>
	<i>Glyptotendipes tokunagai</i>		<i>Cryptochironomus sp.</i>		<i>Dicrotendipes pelocuroris</i>
	<i>Stictochironomus sp.</i>		<i>Lipiniella sp.</i>		<i>Polypedilum spp.</i>

図3.4

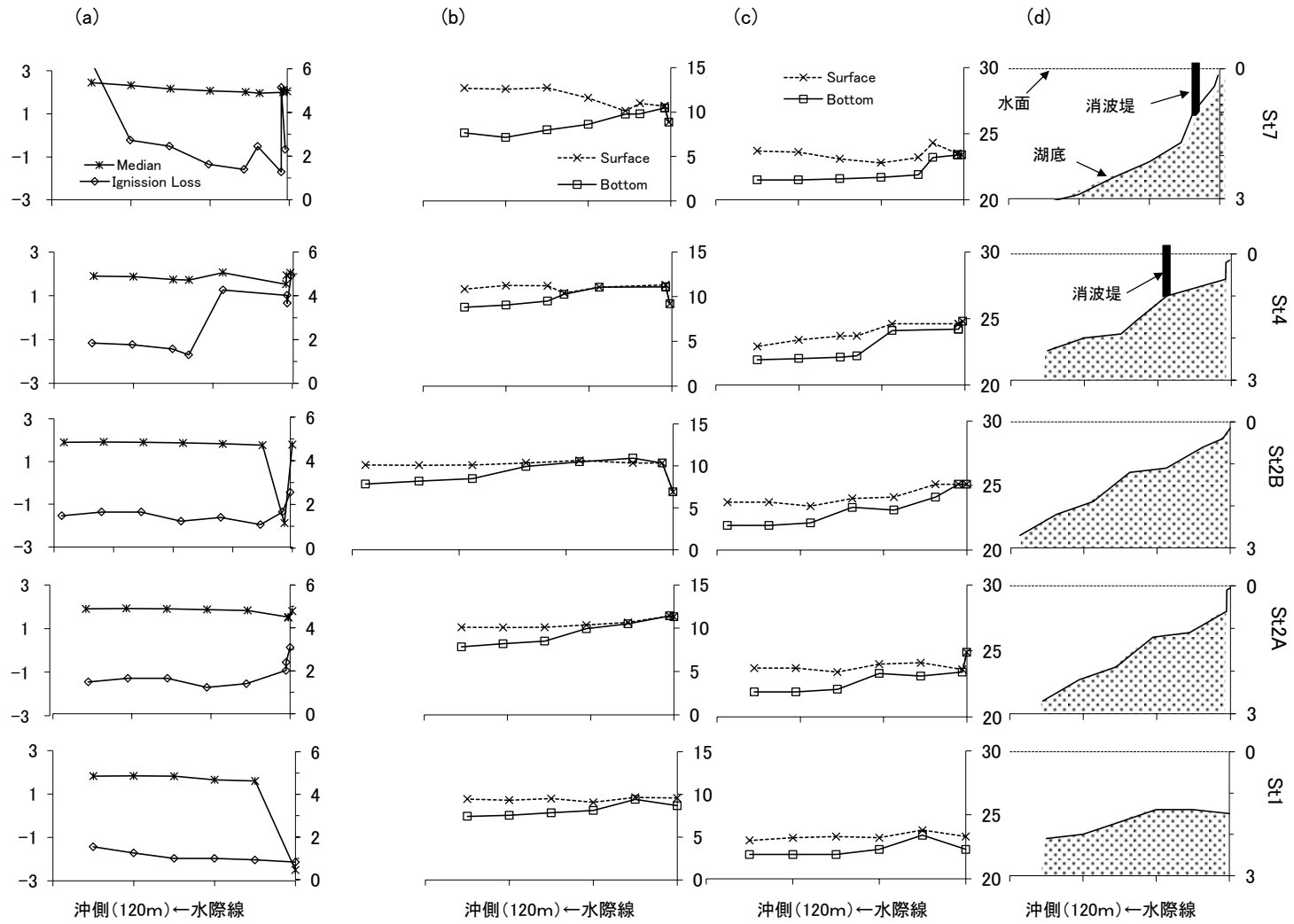


図3.5

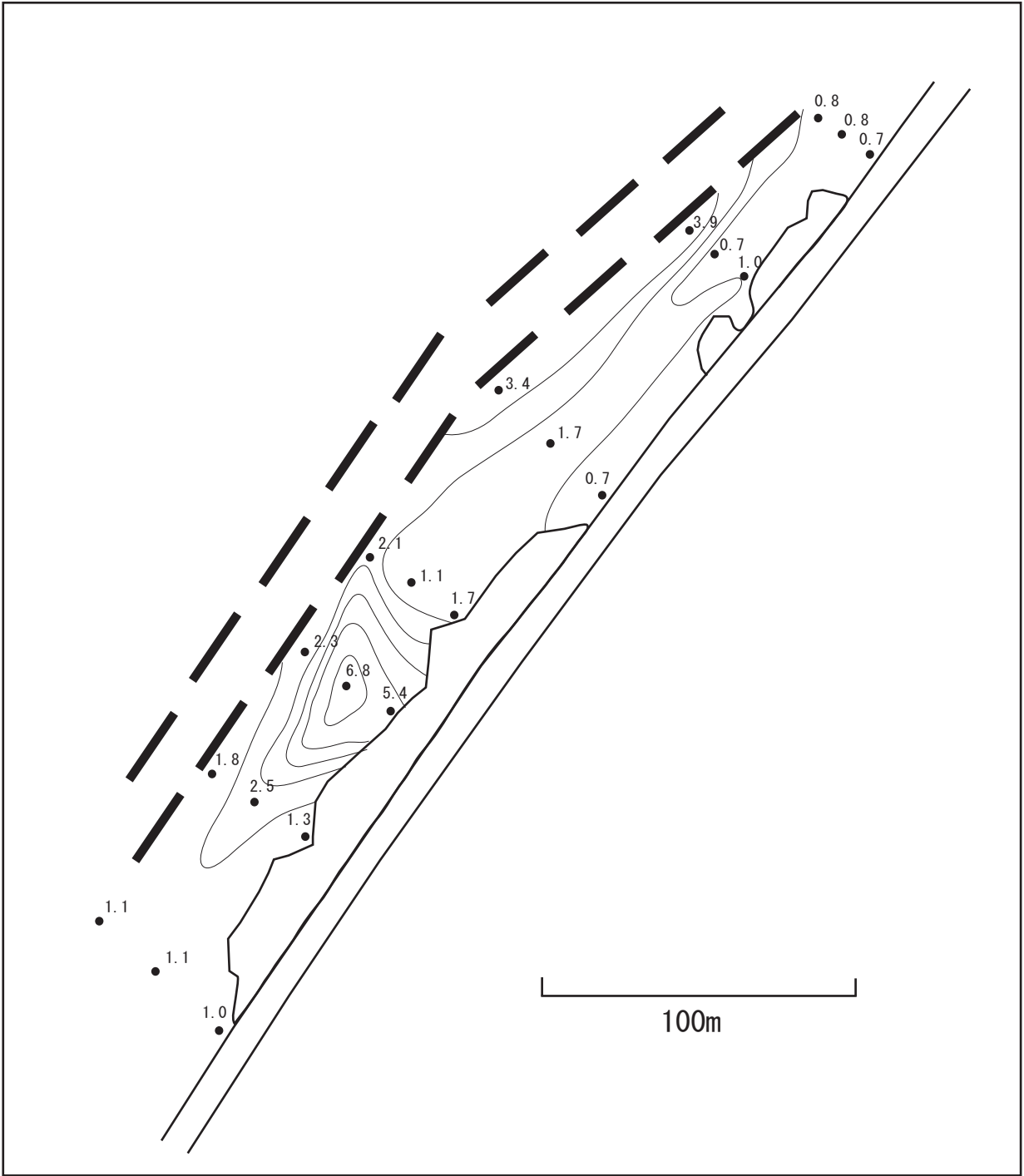


图3.6

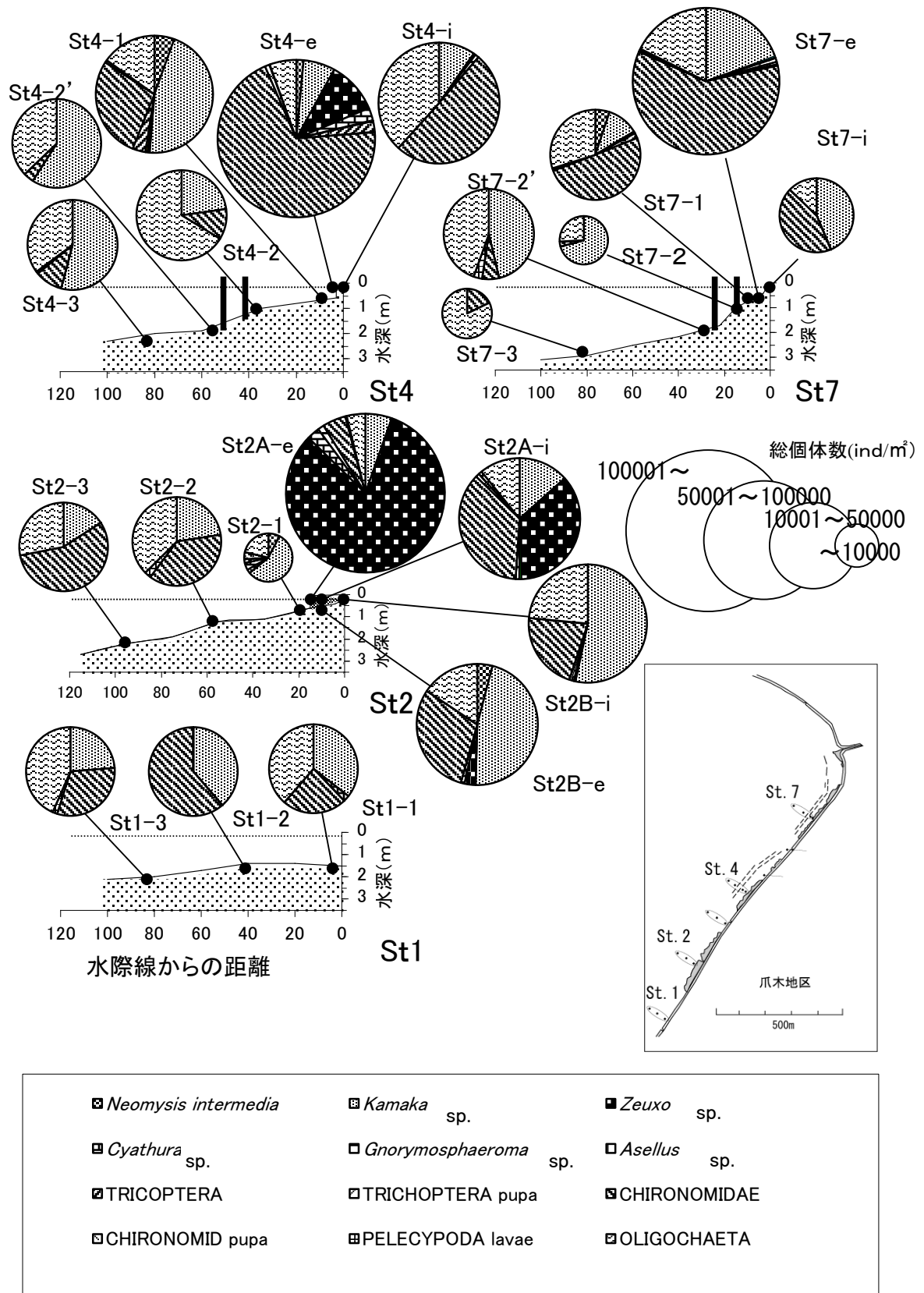
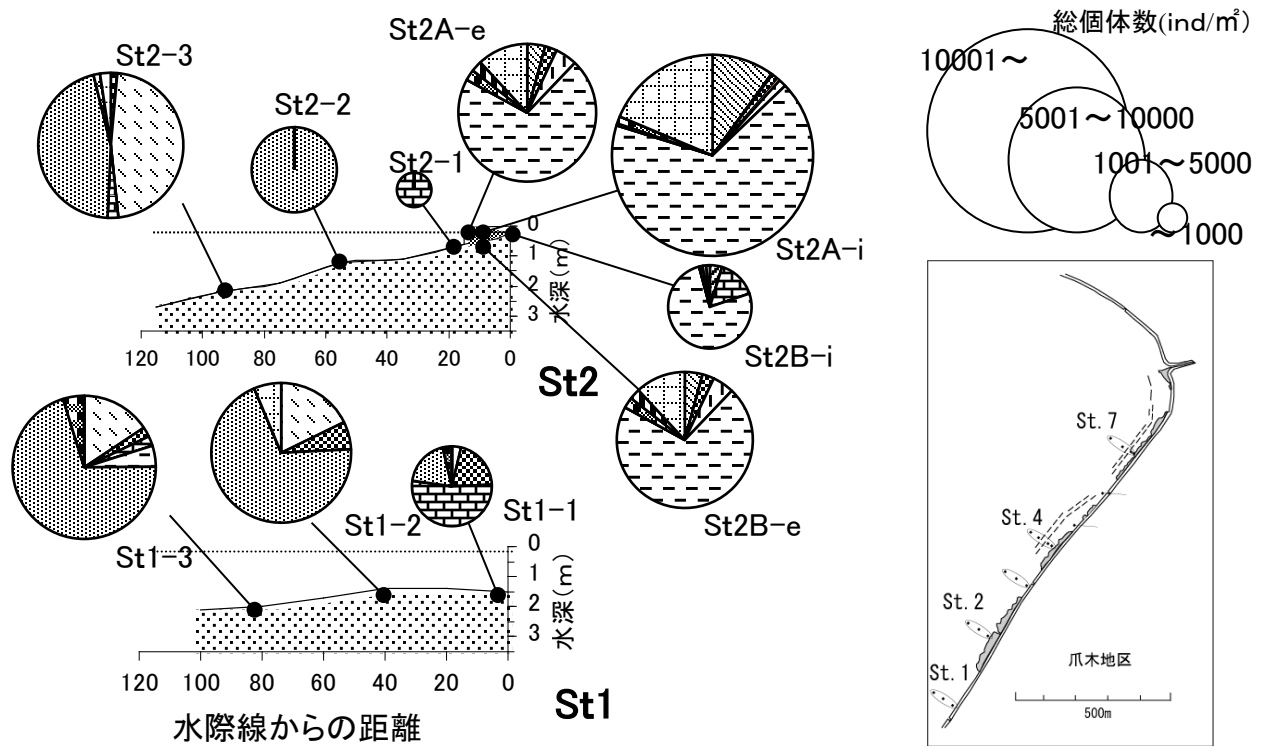
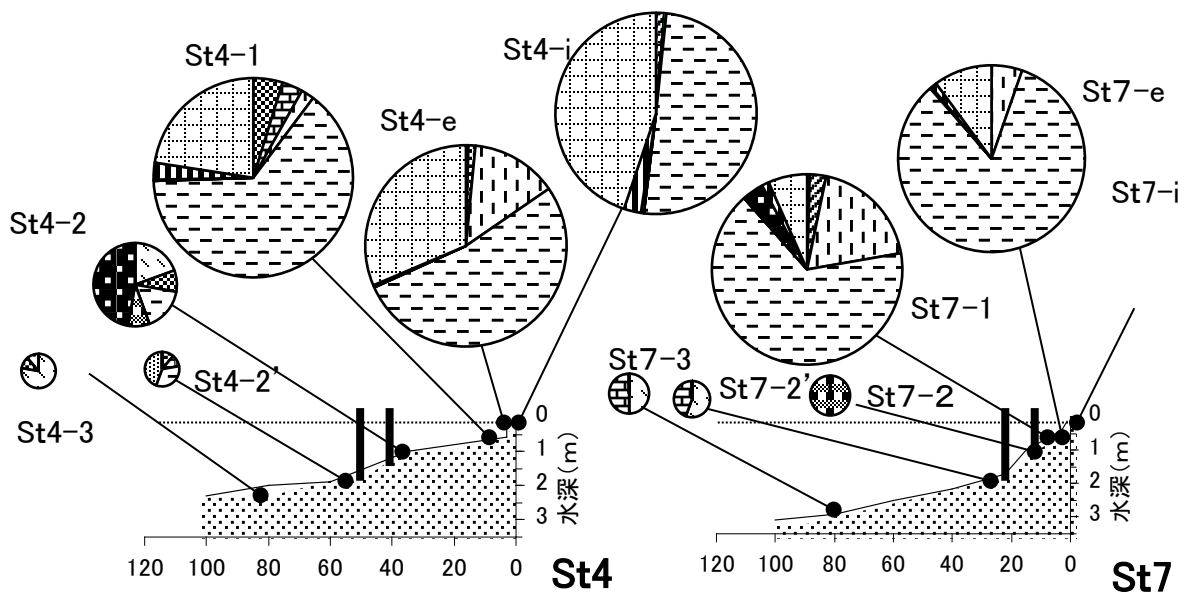


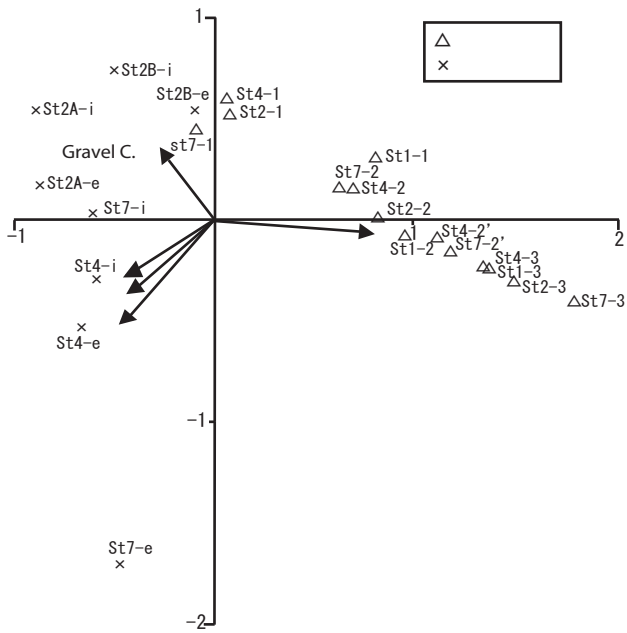
図3.7



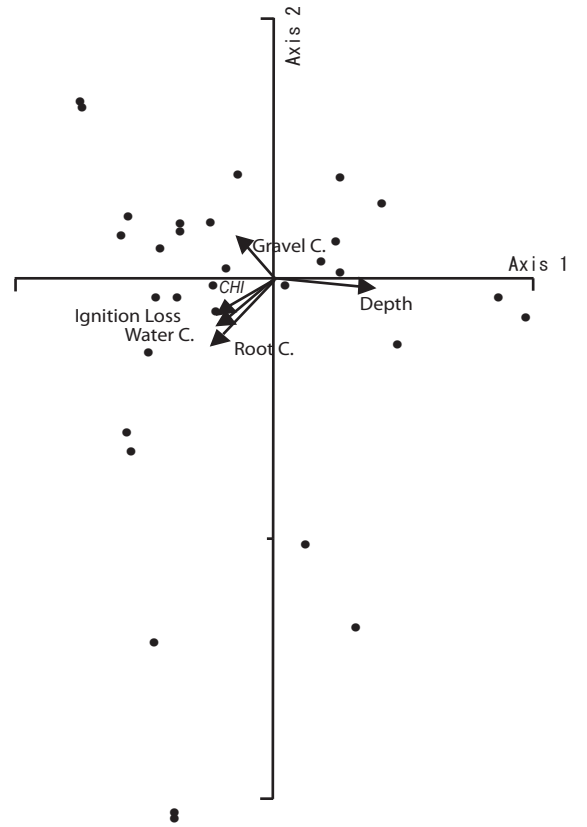
■ <i>Clinotanypus sugiyamai</i>	▣ <i>Cricotopus</i> sp.	▣ <i>Hydrobaenus kondoi</i>
▣ <i>Chironomus plumosus</i>	▣ <i>Cladotanytarsus</i> sp.	▣ <i>Cryptochironomus</i> sp.
▣ <i>Dicotendipes pelochloris</i>	▣ <i>Glyptotendipes tokunagai</i>	▣ <i>Lipiniella</i> sp.
▣ <i>Polypedilum</i> spp.	▣ <i>Stictochironomus</i> sp.	▣ <i>Tanytarsus</i> sp.
▣ CHIRONOMINAE 1st inster		

図3.8

(a)



(b)



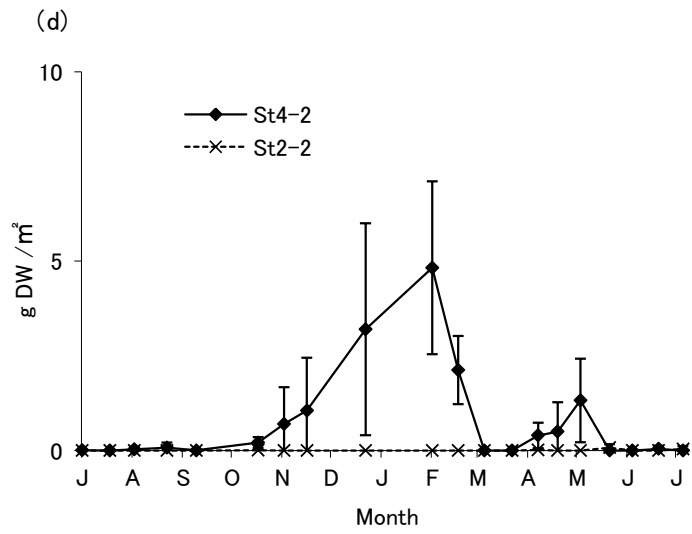
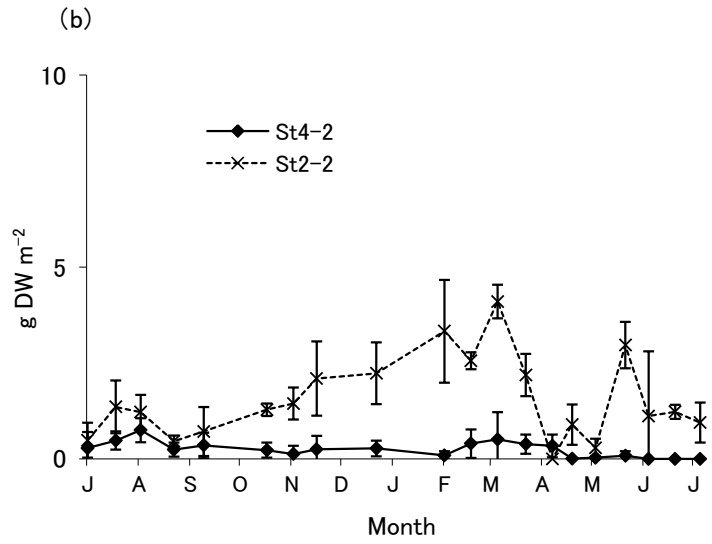
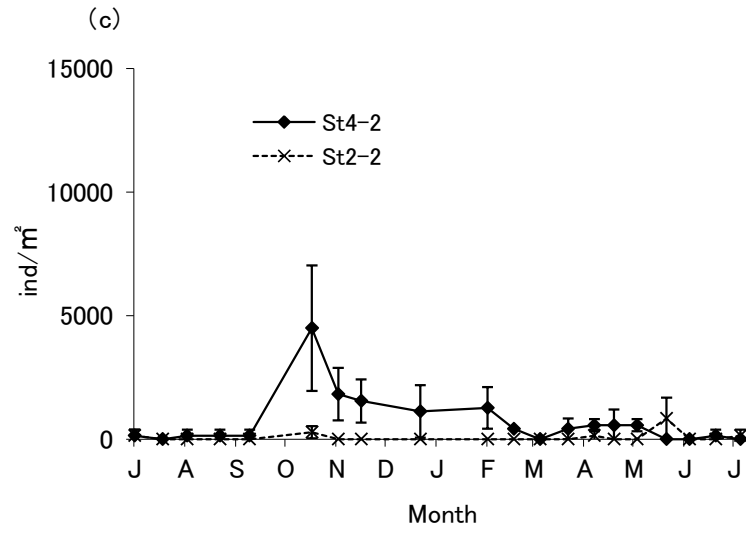
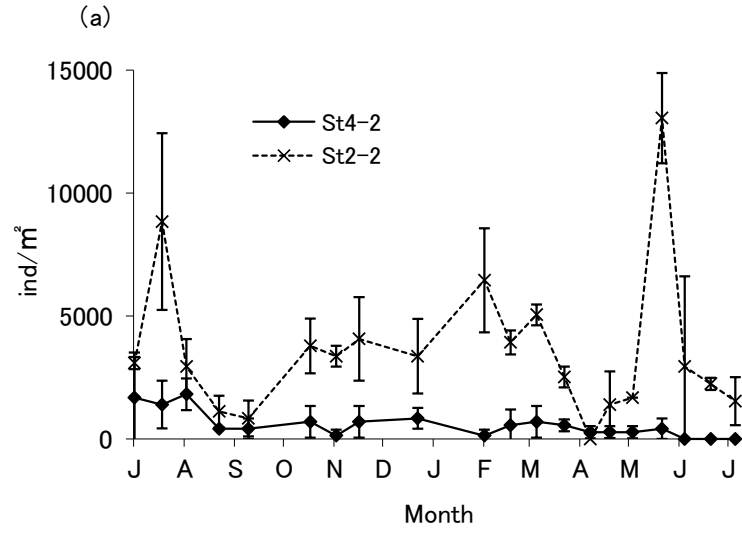


图3.10

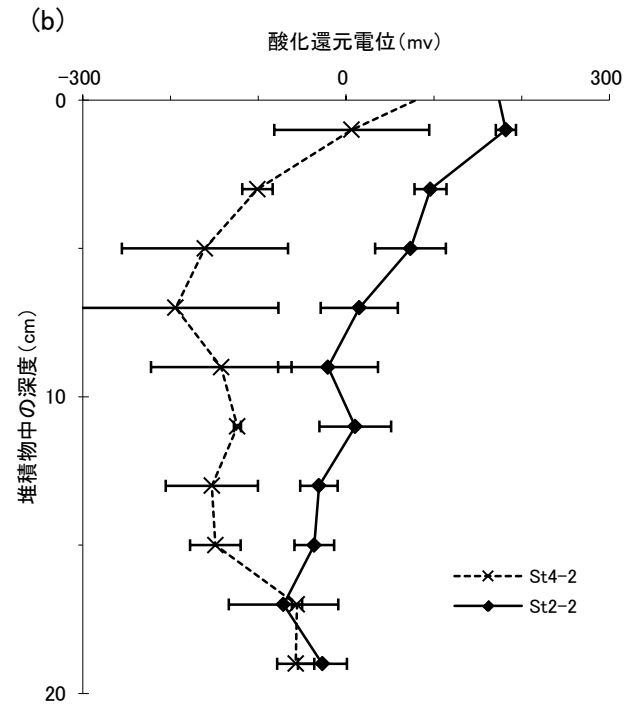
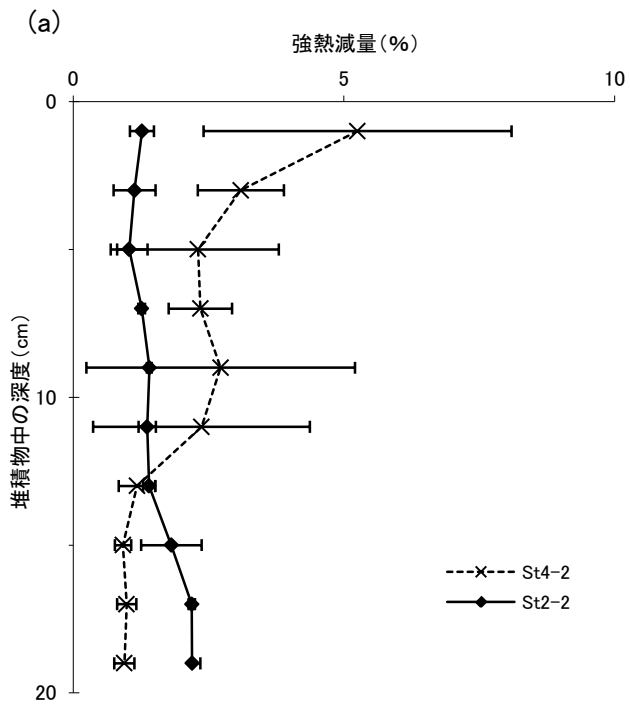


図3.11

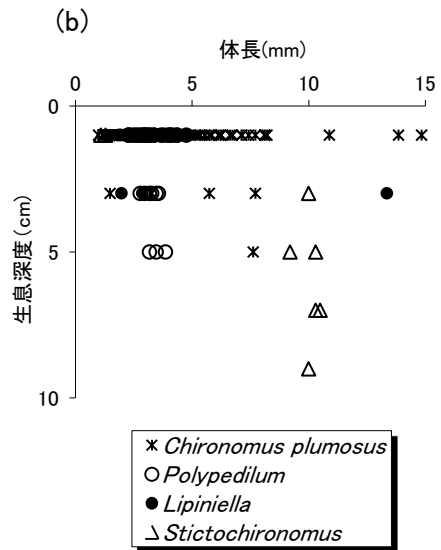
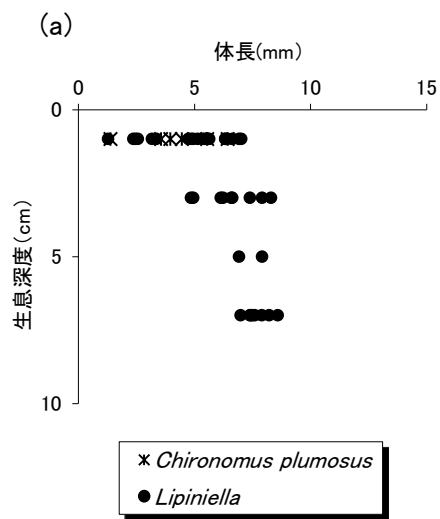


図3.12

	水深(m)	含水率(%)	強熱減量(%)	含礫率(%)	含砂率(%)	含泥率(%)	中央値(φ)	
東岸	L1-1	1.0	21.9	0.5	3.9	96.0	0.1	2.06
	L1-2	3.0	25.6	0.9	0.3	99.5	0.2	2.33
	L1-3	4.8	28.8	1.2	0.1	98.8	1.1	2.6
	L1-4	4.6	66.0	7.5	0.8	92.6	6.7	2.66
	L1-5	3.3	26.1	1.1	0.1	99.4	0.5	2.5
西岸	L1-6	1.1	21.7	1.0	2.0	97.4	0.6	1.76
東岸	L2-1	1.0	15.1	0.7	49.9	50.0	0.1	-0.95
	L2-2	2.2	24.3	1.0	0.6	99.0	0.4	2.36
	L2-3	4.6	24.1	0.8	0.5	98.8	0.6	2.14
	L2-4	6.3	77.1	13.3	0.0	0.0	100.0	>4
	L2-5	6.7	34.1	2.0	0.2	96.9	2.9	2.93
	L2-6	3.3	28.0	1.1	0.1	99.2	0.7	2.47
	L2-7	1.8	24.9	0.8	0.1	99.5	0.5	2.31
西岸	L2-8	0.8	21.4	0.5	1.0	98.9	0.1	1.86
東岸	L3-1	0.8	8.3	0.4	60.1	39.9	0.1	-1.9
	L3-2	1.6	14.7	0.7	30.0	69.6	0.4	0.83
	L3-3	4.5	28.6	2.2	1.5	97.8	0.7	2.13
	L3-4	5.5	80.9	16.5	0.0	0.0	100.0	>4
	L3-5	6.9	80.5	16.9	0.0	0.0	100.0	>4
	L3-6	4.2	24.8	1.3	0.2	99.3	0.6	1.57
	L3-7	2.1	21.1	1.0	4.4	95.4	0.2	1.62
西岸	L3-8	0.8	22.7	2.6	0.4	99.6	0.1	1.48
東岸	L4-1	1.1	19.8	0.6	2.6	97.2	0.2	1.66
	L4-2	3.5	24.5	1.1	0.0	99.0	1.0	2.13
	L4-3	5.0	60.8	7.4	0.0	97.8	2.2	2.76
	L4-4	5.0	81.8	16.0	0.0	0.0	100.0	>4
	L4-5	6.5	31.2	2.0	0.0	89.9	10.1	3.12
	L4-6	3.8	23.7	0.7	0.0	99.6	0.4	2.03
	L4-7	1.3	22.6	0.6	0.1	99.8	0.1	2.04
西岸	L4-8	1.4	19.2	0.4	0.4	99.6	0.0	1.77
東岸	L5-1	0.7	4.7	0.4	69.7	30.2	0.0	<-2
	L5-2	1.5	23.3	0.7	0.0	99.5	0.5	2.38
	L5-3	2.9	32.5	1.8	0.0	95.3	4.7	2.63
	L5-4	3.5	39.4	3.4	0.0	88.1	11.9	2.9
	L5-5	2.9	71.3	12.2	0.0	0.0	100.0	>4
西岸	L5-6	1.8	41.9	3.1	0.0	91.7	8.3	2.78

表3.1

	ライン 1						ライン 2								ライン 3								ライン 4								ライン 5																																			
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6																														
PELECYPOD, <i>Unio douglasiae</i>							○	○													○								○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○																								
OLIGOCHAETA	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○																																												
MYSIDACEA <i>Neomysis intermedia</i>																																																																		
ISOPODA <i>Gnorymosphaeroma</i> sp.							○																																																											
<i>Cyathura</i> sp.							○									○																					○																													
DIPTERA <i>Clinotanytus sugiyamai</i>																			○											○	○	○																																		
<i>Procladius choreus</i>																																																																		
<i>Cricotopus</i> sp.						○																														○																														
<i>Hydrobaenus kondoi</i>						○	○	○								○																				○																○														
CHIRONOMINAE 1st instar						○																																																												
<i>Chironomus plumosus</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○							○												○	○				○																														
<i>Cladotanytarusus</i> sp.																																																																		
<i>Cryptochironomus</i> sp.						○																																																												
<i>Einfeldia</i> sp.	○																																																																	
<i>Glyptotendipes tokunagai</i>	○					○	○	○	○					○	○	○																																																		
<i>Lipiniella</i> sp.	○	○			○	○	○	○	○			○	○	○	○	○	○														○	○				○																														
<i>Microchironomus</i> sp.																																																																		
<i>Polypedilum</i> L			○						○	○																																																								
<i>Polypedilum</i> S			○	○		○			○	○																																																								
<i>Stictochironomus</i> sp.	○					○			○	○																																																								
<i>Tanytarusus</i> sp.						○																																																												
CHIRONOMIDAE pupa	○						○																																																											

表3.2

	Axis 1	Axis 2	Axis 3
Eigenvalues	0.49 **	0.26 **	0.11
Species-environment correlation	0.90 *	0.85 **	0.72
Variance in species data % of variance explained	18.3	9.8	4.0
Intraset correlations			
Depth	-0.75	0.42	-0.30
Water Content	-0.89	-0.16	-0.19
Mud Content	-0.86	-0.28	0.01
Sand Content	0.55	0.30	-0.14
Gravel Content	0.45	-0.31	0.30
Ignition loss	-0.83	-0.37	0.01
Total variance in the species data		2.65	

表3.3

	St.1	St.2-1	St.2-2	St.2-3	St.3-1	St.3-2	St.3-3	St.4-1	St.4-2	St.4-2'	St.4-3	St.5	St.6	St.7
OLIGOCHAETA	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○
MYSIDACEA <i>Neomysis intermedia</i>		○				○						○	○	○
TANAIDACE <i>Zeuxo</i> sp.		○												
AMPHIPODA <i>Kamaka</i> sp.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ISOPODA <i>Cyathura</i> sp.	○							○						
		○												
DIPTERA <i>Gnorymosphaeroma</i> sp.		○												
<i>Hydrobaenus kondoi</i>	○	○							○			○		
<i>Orthocladius</i> sp.		○												
<i>Chironomus plumosus</i>	○	○		○					○			○		
<i>Cladotanytarsus</i> sp.	○	○	○	○								○	○	
<i>Cryptochironomus</i> sp.										○				
<i>Dicrotendipes pelochlor</i>	○							○						
<i>Glyptotendipes tokunag</i>	○	○										○		
<i>Lipiniella</i> sp.			○	○		○	○	○			○			
<i>Polypedilum</i> spp.	○			○		○	○		○			○		
<i>Stictochironomus</i> sp.								○	○			○		○
CHIRONOMIDAE pupa						○			○					

表3.4

	ヨシ群落				砂質帯							
	St.2A-e	St.2B-e	St.4-e	St.7-e	St.1-2	St.2-1	St.2-3	St.4-2	St.4-3	St.7-2	St.7-3	
	St.2A-i	St.2B-i	St.4-i	St.7-i	St.1-1	St.1-3	St.2-2	St.4-1	St.4-2'	St.7-1	St.7-2'	
GASTROPODI <i>Sinotaia quadrata</i>				○								
PELECYPODA <i>Corbicula</i> sp.				○			○					
<i>Unio douglasiae</i>				○		○		○		○	○	
PELECYPODA larvae	○											
OLIGOCHAETA	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
MYSIDACEA <i>Neomysis intermedia</i>			○	○			○	○		○		
TANAIDACEA <i>Zeuxo</i> sp.	○	○	○	○	○		○		○			
AMPHIPODA <i>Jesogammarus spinopalpus</i>	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	
<i>Kamaka</i> sp.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
ISOPODA <i>Asellus</i> sp.				○								
<i>Cyathura</i> sp.	○	○	○	○	○		○			○		
<i>Gnorymosphaeroma</i> sp.	○	○	○	○	○							
TRICOPTERA <i>Cheumatopsyche</i> sp.				○			○			○		
TRICOPTERA pupa				○								
DIPTERA <i>Cricotopus</i> sp.	○	○		○						○		
<i>Hydrobaenus kondoi</i>			○	○	○	○				○		
<i>Orthocladius</i> sp.	○											
CHIRONOMINAE 1st instar	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
<i>Chironomus plumosus</i>						○	○	○	○		○	
<i>Cladotanytarsus</i> sp.	○	○	○	○		○	○	○	○	○		
<i>Cryptochironomus</i> sp.	○	○	○			○	○	○	○		○	
<i>Dicrotendipes pelochloris</i>	○	○	○	○	○	○		○		○		
<i>Glyptotendipes tokunagai</i>	○	○	○	○	○	○		○	○	○		
<i>Lipiniella</i> sp.						○	○	○	○	○		
<i>Parachironomus</i> sp.	○				○							
<i>Polypedilum</i> spp.	○	○	○	○	○	○		○			○	
<i>Stictochironomus</i> sp.								○		○		
<i>Tanytarsus</i> sp.		○	○	○	○			○		○		
<i>Clinotanypus sugiyamai</i>							○					
CHIRONOMIDAE pupa	○	○		○	○			○		○		
CERATOPOGONIDAE				○								

表3.5

Table 1. Table of species data in sampling stations. Circles mean more than seven individuals were collected in three core samples. Crosses mean less six individuals were collected in three core samples.

	Axis 1	Axis 2	Axis 3
Eigenvalues	0.37 **	0.16 **	0.08
Species-environment correlation	0.98 **	0.90 *	0.83
Variance in species data % of variance explained	23.6	10.7	5.6
Intraset correlations			
Depth	0.99	-0.10	-0.11
Water Content	-0.55	-0.56	0.03
Root Content	-0.60	-0.79	-0.09
Gravel Content	-0.35	0.54	-0.65
Ignition loss	-0.56	-0.43	0.04
Total variance in the species data		1.58	

表3.6

(a)



(b)



(c)



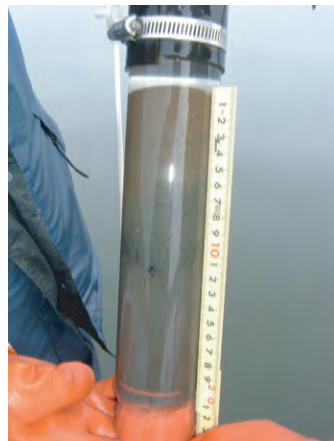
(d)



(e)



(f)



図・表・写真のキャプション

図 1・1 北浦全域におけるライン調査地点と爪木地区の消波堤周辺における調査地点.

図 3・1 全域ライン調査 (2003 年 2 月) におけるユスリカ幼虫の分布. (a) *Lipiniella* sp. の個体数密度分布, (b) オオユスリカの個体数密度分布.

図 3・2 全域ライン調査 (2003 年 2 月) における CCA の結果 (Axis 1 と Axis 2). (a) 調査地点と環境要因のバイプロット, (b) 分類群と環境要因のバイプロット.

図 3・3 水際線調査 (2002 年 6 月) の結果. (a) 水深, (b) 含礫率, (c) 強熱減量, (d) ヨシ群落前縁の茎密度, (e) ヨシ群落前縁の茎直径, (f) ヨシ群落前縁の草高, (g) 主成分 1 (ヨシ群落性状の 3 要因による主成分分析).

図 3・4 消波堤周辺のライン調査 (2002 年 4 月) におけるユスリカ幼虫の分布. 円グラフの大きさは相対的な個体数密度を表す.

図 3・5 消波堤周辺のライン調査 (2002 年 7 月) における環境要因の結果. (a) 堆積物の中央粒径値 (左軸: ϕ) と強熱減量 (右軸: %), (b) 溶存酸素濃度 (mg L^{-1}), (c) 水温 ($^{\circ}\text{C}$), (d) 水深 (m) と消波堤の位置.

図 3・6 消波堤内側における堆積物中に含まれる有機物の濃度分布図. ヨシ群落の 40 m 沖側に消波堤が設置された砂質帯での調査結果を示す.

図 3・7 消波堤周辺のライン調査 (2002 年 7 月) における大型無脊椎動物群集の分布.

図 3・8 消波堤周辺のライン調査 (2002 年 7 月) におけるユスリカ幼虫の分布.

図 3・9 消波堤周辺のライン調査 (2002 年 7 月) における CCA の結果 (Axis 1 と Axis 2). (a) 調査地点と環境要因のバイプロット, (b) 分類群と環境要因のバイプロット.

図 3・10 2 定点におけるユスリカ幼虫の個体群動態. (a) *Lipiniella* sp. の個体数密度の季節変動 (実線は St. 4-2, 点線は St. 2-2 を表し, エラーバーは標準偏差を表す), (b) *Lipiniella* sp.

の現存量の季節変動, (c) オオユスリカの個体数密度の季節変動, (d) オオユスリカの現存量の季節変動.

図 3・11 砂質堆積物中における底質環境の鉛直変化. (a) 強熱減量 (%) (実線は St. 4-2, 点線は St. 2-2 を表し, エラーバーは標準偏差を表す), (b) 酸化還元電位 (mV).

図 3・12 砂質堆積物中におけるユスリカ幼虫の鉛直分布. (a) St. 2-2 における結果, (b) St. 4-2 における結果.

表 3・1 全域ライン調査 (2003 年 2 月) における堆積物組成.

表 3・2 全域ライン調査 (2003 年 2 月) における大型無脊椎動物の出現種リスト.

表 3・3 全域ライン調査 (2003 年 2 月) における CCA の結果の要約. 星印はモンテカルロ検定による有意水準を示す (** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$).

表 3・4 消波堤周辺のライン調査 (2002 年 4 月) における大型無脊椎動物の出現種リスト.

表 3・5 消波堤周辺のライン調査 (2002 年 7 月) における大型無脊椎動物群集の出現種リスト. i: ヨシ群落内部の調査地点; e: ヨシ群落前縁部の調査地点; St. 2A: ヨシ群落前縁がえぐれた調査地点; St. 2B: 湾状に入り込む緩傾斜の調査地点; St. 4-2 および St. 7-2: 消波堤のすぐ内側; St. 4-2' および St. 7-2': 消波堤のすぐ外側.

表 3・6 消波堤周辺のライン調査 (2002 年 7 月) における CCA の結果の要約. 星印はモンテカルロ検定による有意水準を示す (** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$).

写真 2・1 (a) 消波堤の概観, (b) 消波堤内に詰められた粗朶, (c) ヨシ群落の前縁, (d) えぐれたヨシ群落前縁 (水位低下時の様子), (e) コアサンプラー, (f) コアサンプラーで採取した柱状試料.