

第6章 覆砂による底質改良

宍道湖においては、近年富栄養化による赤潮の多発・長期化および貧酸素水塊の形成により、湖底に有機物を多く含む黒色軟泥が発達してきている（坂本ら，1991）。

このように、底質が悪化したため、第2章で述べたようなヤマトシジミの生息を制限する要因が強まり、著しく漁場価値を低下させている。そこで水域の底泥に覆砂することで底質を改善し、ヤマトシジミの生息制限要因の排除を試みた。ここでは漁場の生産を回復させることを目的とした、覆砂工法と呼ばれる底質改良法（水産庁研究部漁場保全課，1983；日本水産資源保護協会，1985）によってヤマトシジミの漁場拡大の可能性を検討した。

これまで覆砂による底質改良試験は高知県浦ノ内湾（高知水試，1983）、愛知県三河湾（俵ら，1983）、大分県豊前湾（神園ら，1994）等の内湾で行われているが、その効果を生物学的に長期間にわたって追跡調査した研究報告はなされていない。また、汽水湖において覆砂工法が行われた事例はない。

そこで、本章では汽水湖、宍道湖において、ヤマトシジミの漁場の拡大のため、覆砂による底質改良実証試験を行った。1993年より1996年の3年間にわたり、経月的に行った水質・底質とベントス調査結果より、ヤマトシジミを中心に覆砂による底質改良効果について検討した。

調査地および方法

調査地 覆砂実験区（以下覆砂区とする）は、1993年9月に宍道湖北西部の平田沖約1.5km、水深約4mの地点に設定し、縦100m×横100mの範囲に30～70cmの厚さで斐伊川の砂を散布して造成した（Fig. 6-1）。覆砂区と比較するため実験区より西方に100m離れた地点（水深約4m）を覆砂しない実験対照区（以下対照区とする）として設定した。

環境要因調査 底層水の水温、塩分濃度、DO濃度（DO飽和度）を、1993年10月より1996年9月までの3年間毎月、ベントス採集と同時に船上から、現場型水質計YSI社3800型を用いて計測した。さらに、1994年7月22日にバンドン採水器により採水した直上水を実験室に持ち帰り、化学的酸素要求（COD）を過マンガン酸カリウムの酸素消費量、NO₂-Nをナフチルエチレンジアミン吸光光度法、NO₃-Nを銅・カドミウムカラム還元-ナフチルエチレンジアミン吸光光度法、NH₄-Nをインドフェノール青吸光光度法で測定した。

間隙水と底質分析用のサンプルは、1994年5月23日に柱状採泥器（KK式）を用いて採泥し、上層の0cmから5cmまでを容器に入れ密封した後、冷蔵して実験室に持ち帰り、間隙水と底質を分離し、分析した。間隙水のNO₂-N、NO₃-N、NH₄-Nを底層水と同様の方法、PO₄-Pをモリブデン青（アスコルビン酸還元）吸光光度法で測定した。底質は、全硫化物量をヨウ素滴定法、全窒素量（T-N）

をインドフェノールブルー吸光光度法，全リン量（T-P）をモリブデン青（アスコルビン酸還元）吸光光度法，強熱減量（IL）を 700℃，24 時間燃焼，化学的酸素要求（COD）を過マンガン酸カリウムの酸素消費量により測定した。底質の粒度組成はふるい分け法と沈降法により求めた。

マクロベントス調査 調査は 1993 年 10 月より 1996 年 9 月までの 3 年間にわたり毎月行った。マクロベントスの採集に用いた採泥器は，覆砂区では Smith-McIntyre 型採泥器（採泥面積 0.05 m²）であったが，対照区は底質が柔らかく Smith-McIntyre 型採泥器は使用不可能であったので，Ekman-Birge 型採泥器（採集面積 0.025 m²）を用いた。覆砂区は，1993 年 10 月～1995 年 3 月までは 3 地点で，1995 年 4 月以降は，1 地点で 2 回のくり返し採泥をした。対照区は，覆砂区との採集効率の差をなくするために，1 地点 4 回採泥した。採集した泥は，0.5mm 目合の篩を用いてマクロベントスを分離し，篩上に残ったすべてのマクロベントスを 5%ホルマリン溶液で固定した後，種の同定および個体数の計測を行った。結果は 1m² 当たりの個体数として求めた。ヤマトシジミは殻長の計測も行った。さらに，ヤマトシジミの着底稚貝を調べるため，1994 年 4 月～1996 年 9 月の間，1994 年 5 月と 7 月を除き毎月，縦 5cm×横 5cm×深さ 2cm のコアサンプルを実験区，対照区ともに 3 回ずつ採泥した。着底稚貝用の採集サンプルは 5%ホルマリンと同時にローズベンガル（生体染色液）を入れ保存した後，実体顕微鏡と VIDEO MICRO METER（オリンパス，VM-10）を用いて採集個体の殻長を測定した。

結果

環境要因 調査地点での 1993 年 10 月から 1996 年 9 月までの底層水の水温，塩分濃度，DO 飽和度の変動を Fig. 6-2 に示した。水温，塩分濃度，DO 飽和度すべてで，覆砂区と対照区においてほとんど差は見られなかった。水温は 2.2℃ から 29.8℃ の範囲であり，季節変化は大きい。塩分濃度は，1.1 psu から 14.7psu の範囲内にあるが 1995 年 8 月に 14.6psu と高い数値を記録した。DO 飽和度を見ると毎年夏期 7～9 月で低下して，その値は 10%以下になる月もあった。特に 1994 年の 9 月には DO 飽和度 3%，DO 濃度は 0.3mg/l になり，無酸素状態に近かった。

直上水の水質分析結果を Table 6-1 に示した。COD，NO₂-N，NO₃-N，NH₄-N いずれの分析項目についても，その値に覆砂区と対照区でほとんど差がなかった。

間隙水の水質分析結果を Table 6-2 に示した。覆砂区と対照区で比べると，NO₃-N のみ対照区より覆砂区の方が高かったが，NO₂-N，NH₄-N，PO₄-P は，覆砂区の方が低く，それぞれ対照区の約 1/6，1/13，1/5 倍であった。

底質の分析結果を Table 6-3 に示した。覆砂区と対照区で比較すると，硫化物量，T-N，T-P，IL，COD はいずれも対照区に比べて実験区の方が低い値であった。

底質の粒度組成を Table 6-4 に示した。覆砂区では，粗砂が最も多く，礫と合わせると 90%近くになった。それに対し，対照区では，礫と粗砂は全くなく，シルトとクレイで 90%以上になった。

マクロベントス群集 1993 年 10 月から 1996 年 9 月までの 3 年間の調査期間中に，ヤマトシジミ，

カワグチツボ *Falsicingula elegans* , ゴカイ *Neanthes japonica* , ヤマトスピオ *Prionospio (Minuspio) japonica* , イトゴカイ科の一種 *Notomastus* sp. , ケヤリ科の一種 *Chone* sp. , イトミミズ類 Tubificidae , ユスリカ類 Chironimidae , ヨコエビ類 Amphipoda , キクチスナウミナナフシ *Cyathura kikuchii* , クマ目 Cumacea の 11 種が確認された。

1993 年 10 月から 1996 年 9 月までの 3 年間に、覆砂区・対照区に出現したマクロベントスの個体数組成の経月変化を Fig. 6-3 , Table 6-5 に示した。

覆砂区においては覆砂工事が終了し、調査を開始した 1993 年 10 月から 1994 年 2 月までの約 5 ヶ月の間は、出現総個体数は少なく約 500 個体 / m²前後であったが、1994 年 3 月から徐々に増加した。1994 年 8 月に 34,260 個体 / m²に急増したが、9 月には 11,187 個体 / m²に減少した。その後再び増加し、1994 年 11 , 12 月にはそれぞれ 30,327 個体 / m² , 42,490 個体 / m²になった。しかし、1995 年 8 月には前年夏の個体数程度まで減少がみられ、その後、約 10,000 ~ 20,000 個体 / m²の間で推移した。対照区は実験の開始後 1994 年 6 月までは覆砂区より総個体数が多かったが、7 月からは逆転し、以後、調査終了時まで引き続いて覆砂区より明らかに少ない生息個体数を示した。対照区も覆砂区同様 2 年目に個体数の増加がみられたが、対照区ではその増加のほとんどがヤマトスピオによるものであるのに対し、覆砂区では、ヤマトスピオに加えて、ヤマトシジミとカワグチツボの増加が大きかった。

ヤマトシジミ ヤマトシジミの個体数の経月変化を Fig.6-4 に示した。覆砂区におけるヤマトシジミの個体数変動は、マクロベントスの総個体数の変動と同様のパターンを示した。覆砂区では 1993 年 10 月 ~ 1994 年 7 月までは約 1,000 個体 / m²以下であり、対照区の方が約 2,000 ~ 5,000 個体 / m²と覆砂区より多く生息していた。覆砂区では 1994 年 8 月に急激に増加し、13,197 個体 / m²となり、9 月、10 月は、それぞれ 1,560 個体 / m² , 77 個体 / m²に減少するもののその後さらに増加した。しかし、1995 年 9 月に 7,600 個体 / m²に減少し、それ以降は 5,000 ~ 10,000 個体 / m²で推移した。一方、対照区では、1994 年 7 月までは覆砂区よりも多いもののその後ほとんどの月で個体数は 1,000 個体 / m²以下であり、一番多い月でも 2,000 個体 / m²を越えることはなかった。

ヤマトシジミの湿重量の経月変化を Fig.6-5 に示した。覆砂区における、ヤマトシジミの湿重量の変動は、覆砂 2 年目に急激に増えた個体数の変動とは異なり、多少の上下はあるものの 3 年間で徐々に増加し、1996 年 8 月に湿重量は 2809.2 g / m²になった。

ヤマトシジミの生息個体の体サイズ分布変化を明らかにするために、殻長 4mm 以上のヤマトシジミの殻長組成を、月ごとに 1mm 単位で表して Fig. 6-6 に示した。対照区では 1994 年 8 月以降ほとんど出現していないのに対し、覆砂区では、1995 年 6 月までは殻長の大きな個体はほとんどみられず、8 月以降に着底したと思われる稚貝は、その後、徐々にではあるが、殻長組成のピークが殻長の大きい方へと移動しており、ヤマトシジミが成長していることが確認できた。

着底稚貝の状況を見るために、コアサンプルにより採集されたヤマトシジミのうち殻長 1.5 mm 以下の個体の殻長組成を、月ごとに 0.1mm 単位で表したものを Fig. 6-7 に示した。これをみるとヤマ

トシジミの初期着底稚貝は殻長 0.2 ~ 0.4mm であると思われる。覆砂区と対照区を比較してみると、対照区ではほとんど出現していないのに対し、覆砂区では、1994 年 8 月、1995 年 4 月と 10 月に多量に出現しており、殻長から、1994 年 8 月と 1995 年 10 月の個体が着底初期の稚貝であったと思われる。特に、1994 年 8 月は多量に出現しており、殻長 0.2 ~ 0.3 mm が 6,000 個 / m²、0.3 ~ 0.4 mm が 8,400 個 / m²、0.4 ~ 0.5 mm が 4,666 個 / m²であった。

その他のマクロベントス 覆砂区、対照区両区において出現したマクロベントス各種の個体数の経時変化を Fig. 6-8 に示した。カワグチツボはヤマトシジミと良く似た変化を示した。しかし、ヤマトシジミほど生物量は多くなく、9、10 月における減少は大きくはない。対照区ではほとんど出現しなかった。ヤマトスピオ、ユスリカは今回の調査で出現したマクロベントスの中では覆砂区と対照区の差異が少なかった。ゴカイ *Notomastus* sp. は比較的ヤマトシジミと同じ出現パターンであり、*Chone* sp.、ヨコエビ類、キクチスノウミナナフシ、クマ目は 1994 年 5 ~ 9 月の塩分濃度の高いとき多く出現している。*Chone* sp.、キクチスノウミナナフシ、クマ目は 1995、1996 年は覆砂区、対照区共にほとんど出現していなかった。

考察

覆砂区と対照区の底質、間隙水の水質を見ると、間隙水の NO₃-N を除き覆砂区の方が低かった。覆砂区の底質の IL、COD、硫化物、T-N そして T-P は、それぞれ対照区の 0.04 倍、0.01 倍、0.27 倍、0.02 倍、0.08 倍であった。間隙水もまた底質同様に、覆砂区の NO₂-N、NH₄-N、PO₄-P は、それぞれ対照区の 0.07 ~ 0.2 倍程度であった。この覆砂区の底質、間隙水の分析値は宍道湖のヤマトシジミの生息分布の範囲内にある（中村ら、1983）。

一方、直上水の各項目では覆砂区、対照区ともに大きな差異はなかった。内在性の底生生物であるヤマトシジミは、直上水の水質が生息に不適になると、底質間隙水を利用すること（李・中尾、1985；中尾、1990）から、明らかに今回の結果は、覆砂により底質間隙水が改良され、しかも粒度組成は第 2 章で述べたヤマトシジミに適する砂質底となっていることから、覆砂をすることによってヤマトシジミの生息可能な底質環境を作り出すことは可能であると考えられる。ただ、直上水の連続観測結果を見ると、夏期、覆砂区、対照区ともに、DO 濃度がヤマトシジミの生息限界以下に減少しているが、これは、湖心部の貧酸素水塊の移動によるものと思われる（中村ら、1996）。今後、覆砂を効果あるものにするためには、この貧酸素水塊の移入を防ぐ対策も必要と思われる。

覆砂区・対照区のマクロベントス群集の種組成を検討すると（Fig.6-3）、その時間的变化はあるものの、覆砂区では第 2 章第 1 節で検討した宍道湖湖棚部に見られるヤマトシジミを優占種とする群集が形成され、第 2 章第 1 節での群集型解析での A 群集型にはほぼ一致する。また、対照区ではヤマトスピオを優占種とする群集がみられ、前述の B 群集型に相当する。宍道湖のヤマトシジミ漁場を指標する A 群集型が覆砂区に形成されたことは、覆砂区における生物的・非生物的環境条件の複

合が、ヤマトシジミ漁場としての特性を満たしていたことの反映であると考えられる。

1.5mm以下のヤマトシジミの殻長組成の変化 (Fig. 6-7) を見ると、ヤマトシジミの初期着底稚貝は殻長 0.2~0.4mm であると思われる。殻長から、1994年8月と1995年10月の個体が着底初期の稚貝であったと思われる。覆砂区と対照区を比べると、ヤマトシジミ幼生の着底数は覆砂区で圧倒的に多い。ベントスの浮遊幼生は着底直前の時期に底表すれすれの層を流されながら底質と接触し、好適底質に接すると変態着底する基質選択性を持つ種が多いこと、その際選択のきっかけとなるのは、底表堆積物の粒度であるが、砂粒表面のバクテリア皮膜などの誘因性も重要であるといわれている (Sanders, 1958)。今回の覆砂区は川砂を覆砂されているため粒度が大きく、ヤマトシジミが覆砂区を好適な生息場所として選択したと推察される。あるいは、基質選択性を持たない場合、覆砂区、対照区の双方に無選択に定着したとしても、対照区では生息に不適な環境であったため短期間に死んでしまったとも考えられる。いずれにしろ、覆砂することにより浮遊幼生の定着に適した湖底環境に改良することができた。また、1995年4月に、覆砂区に1.5mm以下の稚貝が約10,000個体/m²出現したが、初期着底稚貝 (殻長 0.2~0.4mm) と思われるサイズの個体が出現していなかった (Fig. 6-7)。アサリ (柿野, 1996)、ハマグリ (中村・三村, 1990) では、波の影響により稚貝が着底後移動させられることが報告されており、1995年4月に覆砂区に出現した稚貝も、着底後覆砂区以外の場所から波浪等の作用により移動させられたと考えられる。1995年5、6月に1.5mm以下の稚貝はそれぞれ 3,733 個体/m²および 4,533 個体/m²出現していることから、移動させられた稚貝は、そのまま覆砂底で生存し続けたと思われる。

ヤマトシジミの1m²あたりの個体数と湿重量の経月変化を覆砂区と対照区で比較してみると (Figs. 6-4, 6-5)、覆砂した翌年の夏以降ずっと圧倒的に覆砂区の方が多かった。覆砂から3年後の1996年9月に、個体数は覆砂区 3,570 個体/m²、対照区 100 個体/m²、湿重量は覆砂区 1,665.9 g/m²、対照区 27.0 g/m²であり、覆砂区は対照区の 35.7 倍の個体数、61.7 倍の重量のヤマトシジミが生息していた。また、4mm以上の連続殻長組成 (Fig. 6-6) を見ると、対照区では1994年9月以降ヤマトシジミがほとんどみられなくなったのに対し、覆砂区においてヤマトシジミが着実に成長していることがわかる。このことは少なくとも覆砂後3年目までは覆砂が、ヤマトシジミの生息量の増大に役立っていると考えてよいであろう。

これまでの実験結果では、覆砂することによって、着底稚貝が多くなり、それが生残、成長すること、そして、覆砂しないところと比べて覆砂3年後に個体数で約35倍、重量で約60倍もの多くのヤマトシジミの生息が認められることなどによって、覆砂の効果が確認できた。しかし、覆砂区の1994年8月に定着した稚貝 42,267 個体/m²が、9月には1,600 個体/m²に減少し、10月では全く採集されなかった。この原因は、貧酸素水塊が1994年9月に覆砂区に移入して (Fig. 6-2)、直上水の酸素不足をきたし、8月に定着した稚貝が死亡したと考えられる。

覆砂実験区は、通常、貧酸素水塊が発生する場所に設定される場合が多いが、このとき実験区の底層水が改善されても、隣接した水域から貧酸素水塊の移入が考えられるので、覆砂実験区

の選定が大切であり、貧酸素水塊の移入防止策を考えておかなければならない。また、黒色軟泥などが堆積している環境の中では新生堆積物も非常に多いため、覆砂区がどのくらいの期間、効果を維持できるのか、あるいは、シジミ漁業を行うとき覆砂した底質の形状が乱れないのか等、まだ検討しなければならない課題もある。今後はこれらのことについても調査し、覆砂による底質改良をより有効なものにしていく必要がある。

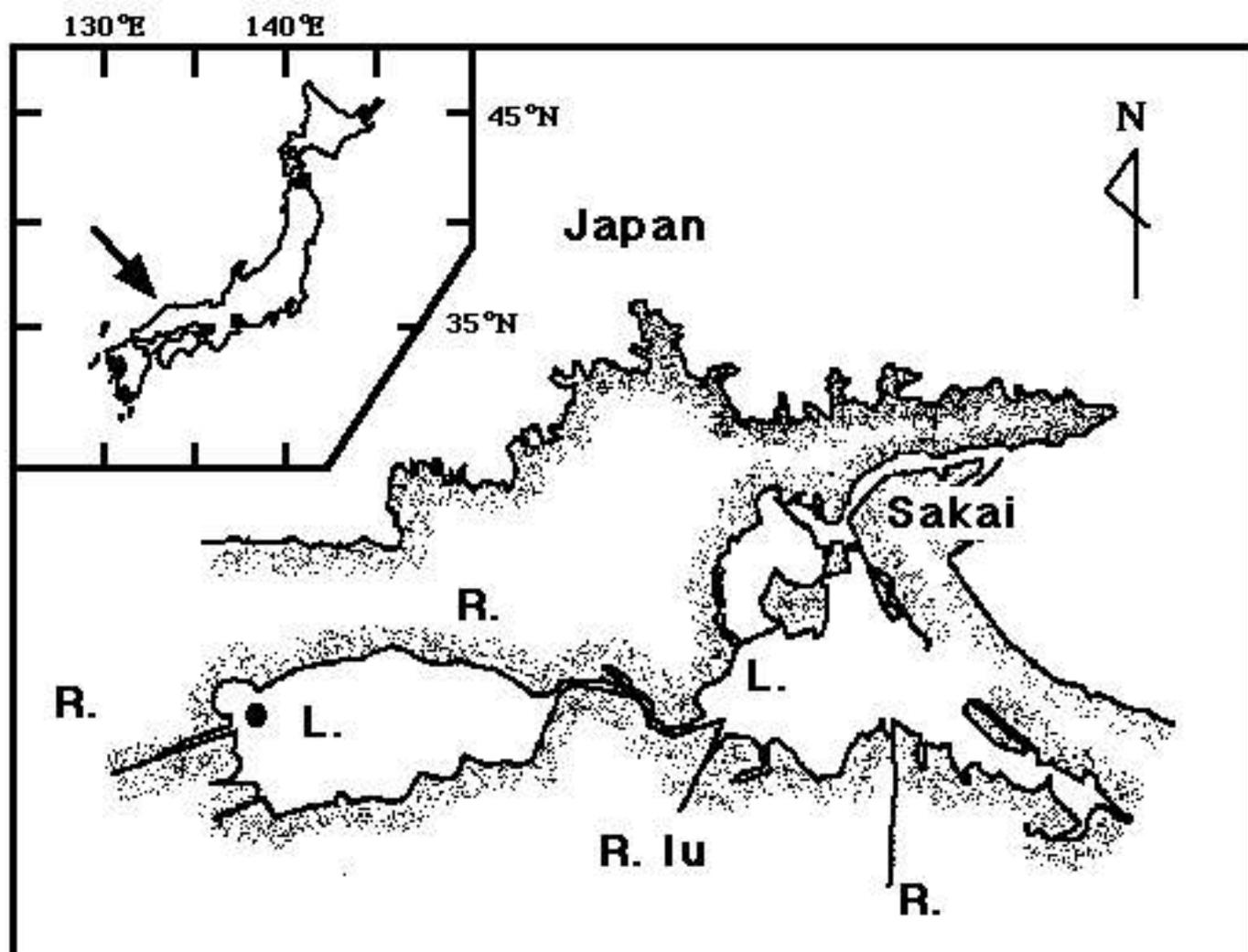


Fig. 6-1. Location of the test site(●) in Lake Shinji.

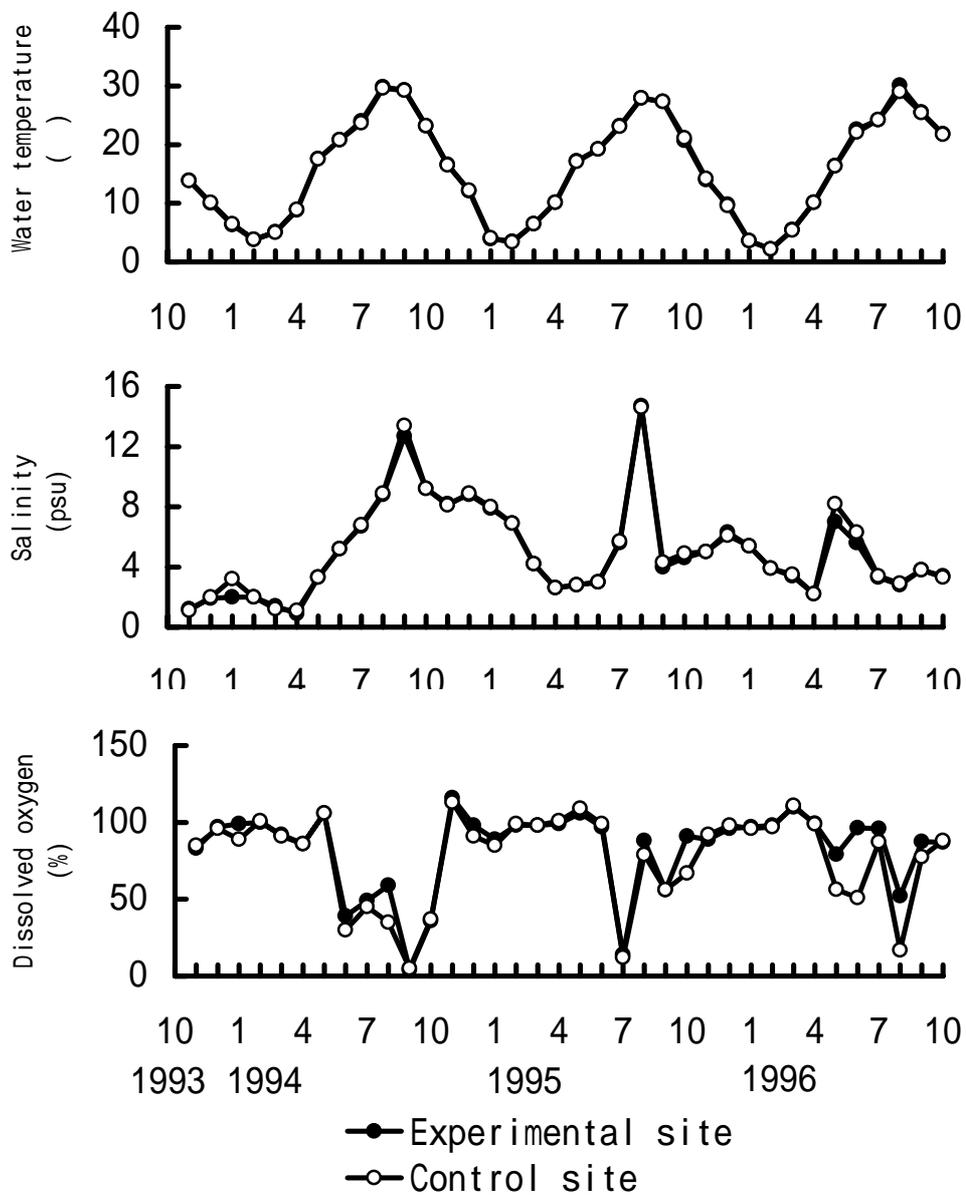


Fig. 6-2. Seasonal changes in water temperature, salinity and dissolved oxygen at experimental and control sites from October, 1993 to September, 1996.

Table 6-1. Water quality of bottom water.

	Experimental site	Control site
COD(mg/ ℓ)	3.7	3.6
NO ₂ -N(mg/ ℓ)	0.001	0.002
NO ₃ -N(mg/ ℓ)	0.009	0.008
NH ₄ -N(mg/ ℓ)	0.19	0.31

Note : Date of sampling is 22 July, 1994.

Table 6-2. Water quality of interstitial water.

	Experimental site	Control site
NO ₂ -N(mg/ ℓ)	0.005	0.012
NO ₃ -N(mg/ ℓ)	0.082	0.041
NH ₄ -N(mg/ ℓ)	0.35	4.71
PO ₄ -P(mg/ ℓ)	0.047	0.229

Note : Date of sampling is 23 May, 1994.

Table 6-3. Characteristics of bottom soil.

	Experimental site	Control site
IL(%)	0.4	11.0
COD(mg/kg)	0.3	29.2
Sulfate(mg/kg)	0.9	31.5
T-N(mg/kg)	39.3	2580.0
T-P(mg/kg)	85.0	1019.0

Note : Date of sampling is 23 May, 1994.

Table 6-4. Grain scale composition(%) of bottom soil.

	Experimental site	Control site
Pebbles	1	0
Granules	17	0
Coarse sand	70	0
Fine sand	12	6
Silt	0	63
Clay	0	31

Note : Date of sampling is 23 May, 1994.

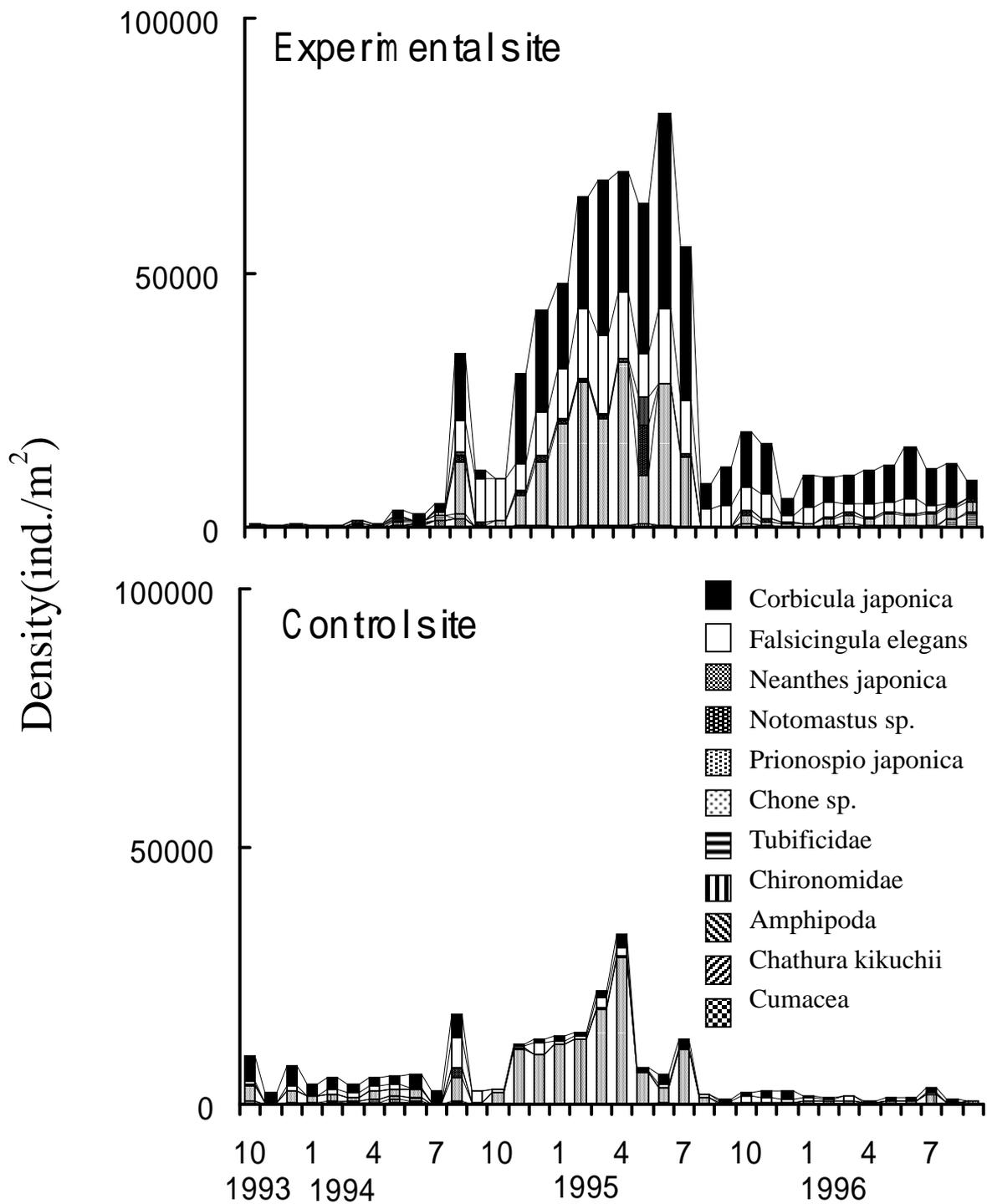


Fig. 6-3 Seasonal variations in density and species composition of macrobenthos at experimental and control sites from October, 1993 to September, 1996.

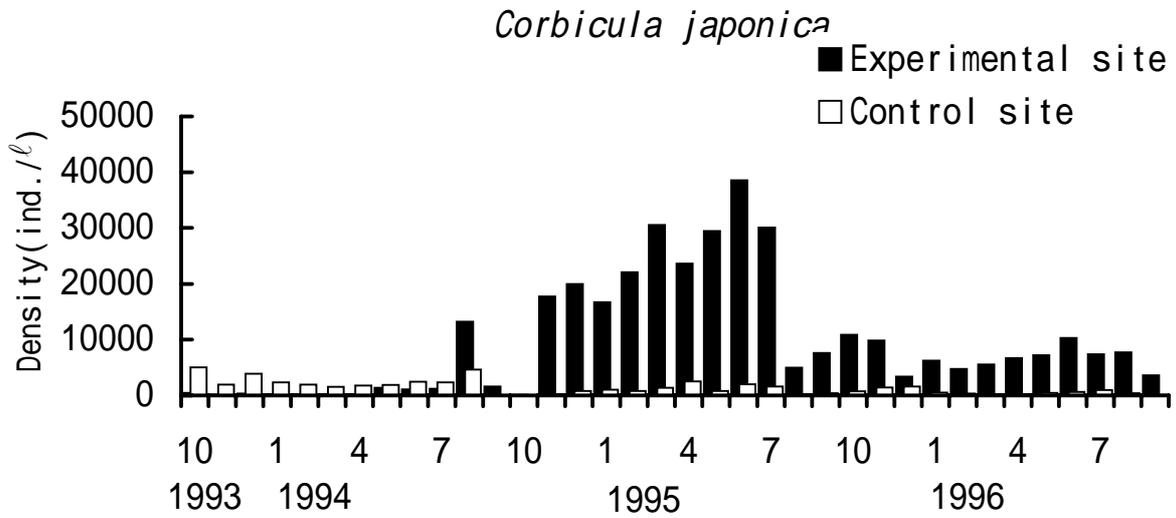


Fig. 6-4. Seasonal variations in density of *C. japonica* at experimental and control sites from October, 1993 to September, 1996.

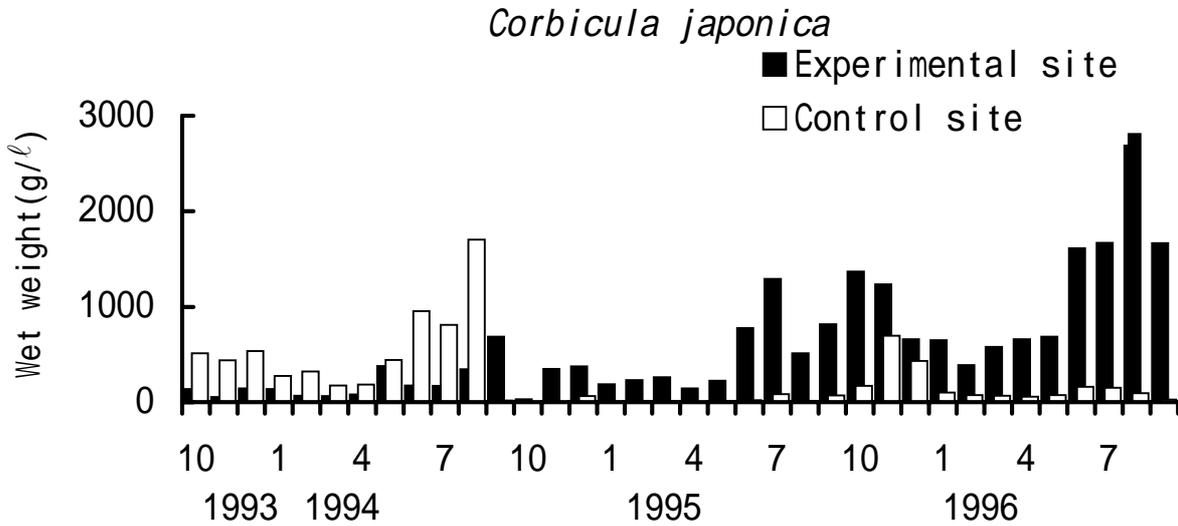


Fig. 6-5. Seasonal variations in wet weight of *C. japonica* at experimental and control sites from October, 1993 to September, 1996.

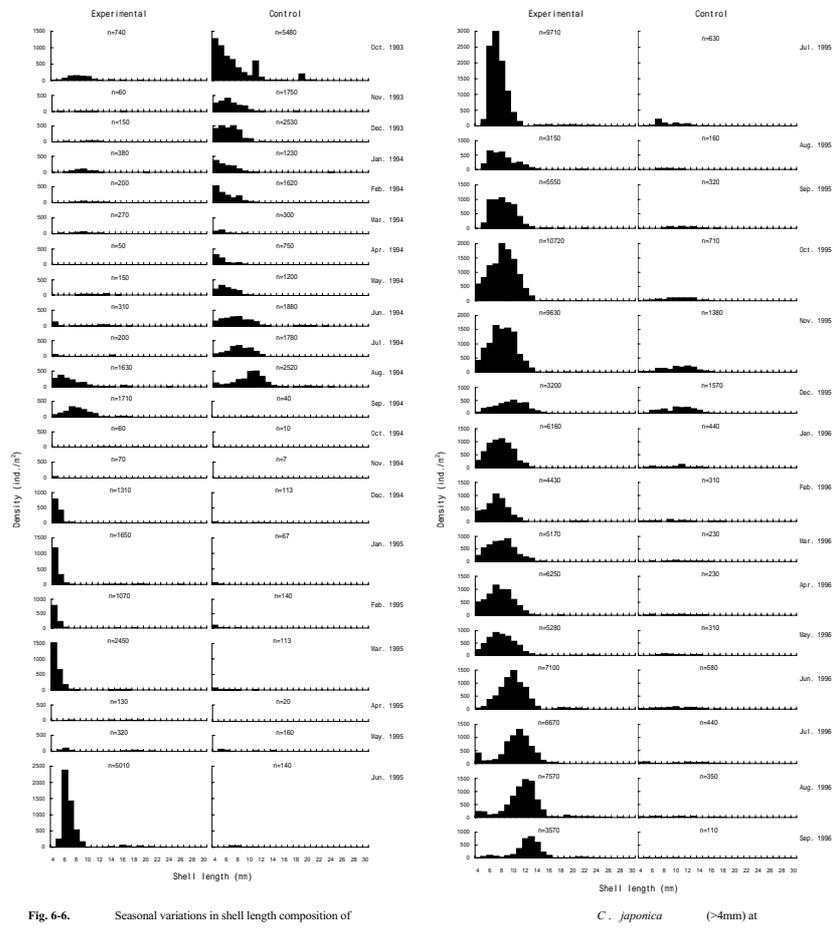


Fig. 6-6. Seasonal variations in shell length composition of experimental and control sites from October, 1993 to September, 1996.

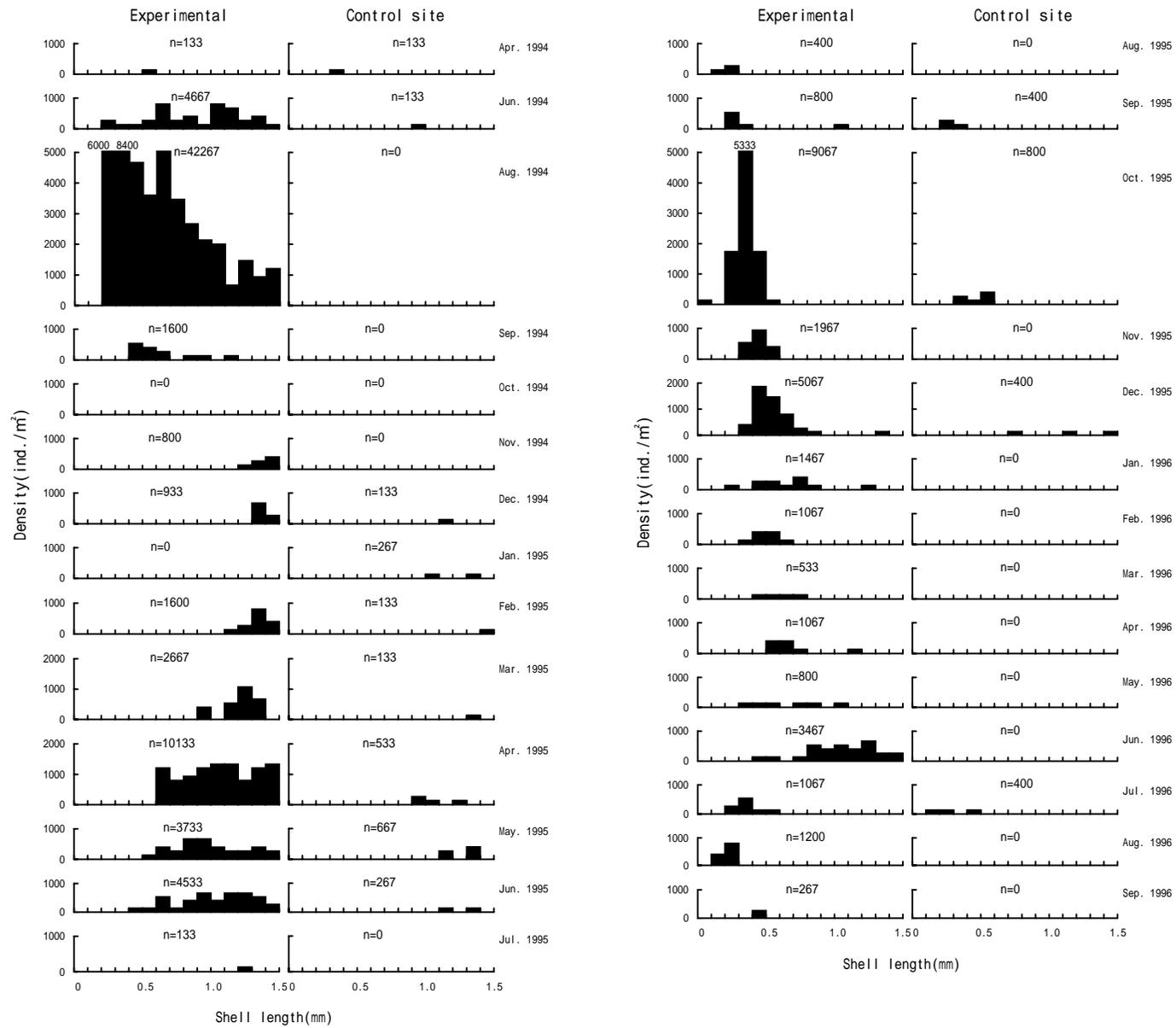


Fig. 6-7. Seasonal variations in shell length composition of juvenile, *C. japonica* at experimental and control sites from April, 1994 to September, 1996.

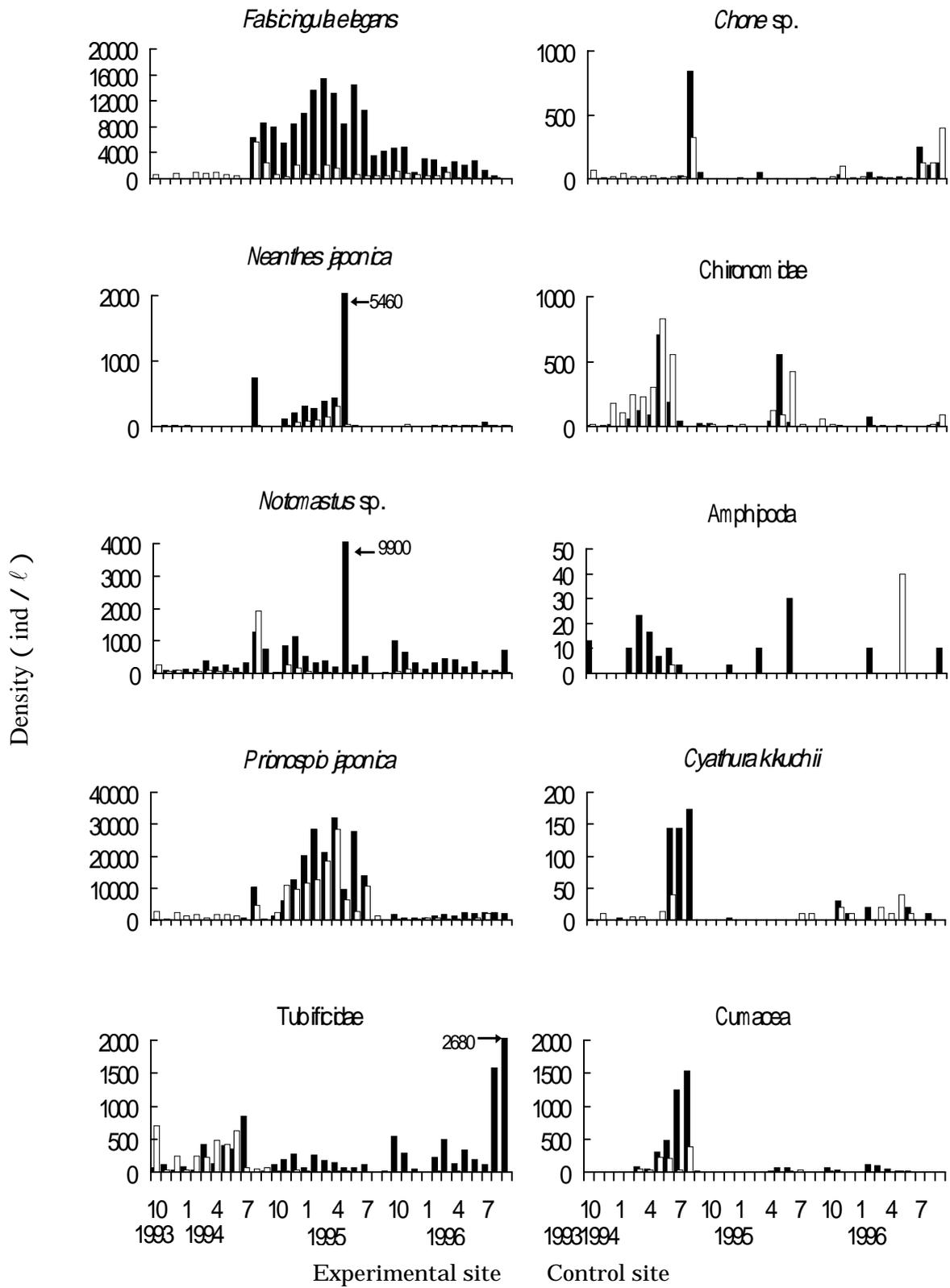


Fig. 6-8. Seasonal variation in density of macrobenthos at experimental and control sites from October 1993 to September 1996.