

モデル解析及び実証試験計画（案）

1. 栄養塩類の循環バランス向上対策の実効検討

今後、栄養塩類の循環バランス向上対策を具体的に検討するために、現地調査、モデル解析及び実証試験を実施する予定である。

そこで、資料3に整理した循環バランス向上対策の考え方にそって、その具体的なイメージ、各方法のメリットや実施上の留意事項を整理（表 1.1）し、効果検証の方向性を検討した。

来年度以降は、効果検証の方向性に基づいたモデル解析及び実証試験を行って効果を検証し、三河湾における栄養塩類の循環バランスを向上させる対策の具体的な手法を選定しつつ、三河湾地域におけるヘルシープランを策定していく予定である。なお、具体的な個別の手法については、実施可能性の問題もあることから、今後、実施期間や実施量の議論が進んでから、最適な手法を選択することとする。

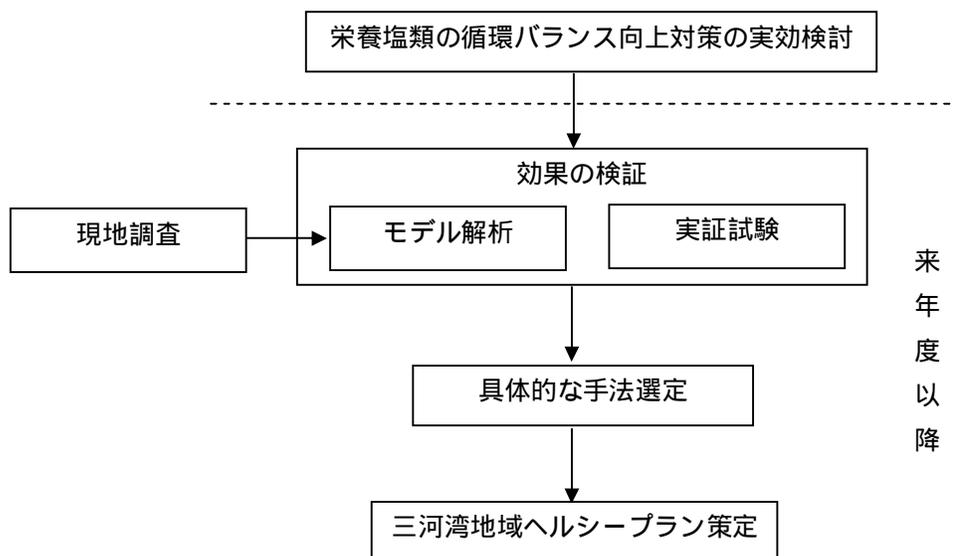


図 1.1 検討の流れ

表 1.1 具体的な向上対策イメージとメリット及び実施上の留意事項

循環バランス向上対策の考え方	具体的なイメージ	メリット	実施上の留意事項	効果検証の方向性		
生産性の向上対策（植物プランクトンを上位の生物へ大きく循環させるための対策）	生息場を確保する	<ul style="list-style-type: none"> 干潟・浅場、藻場の再生 港湾内の生物生息場の再生 	<ul style="list-style-type: none"> 干潟・浅場造成は実績があり、有効性も検証されている。 相乗効果として、十分に呼吸できる水質環境の確保（貧酸素水の改善）や生物の幼体の成育場の確保も相乗効果として期待できる 	<ul style="list-style-type: none"> 必要な実施規模や有効な実施場所の検討がされていない 実施するための材料の確保が必要 	モデル解析及び実証試験より、必要な実施規模や有効な実施場所を検討	
	良好な生息環境を確保する	良好な餌環境の確保	<ul style="list-style-type: none"> 生息場への生産性の高い水の導入 より効果の上がる再生場の選定 	<ul style="list-style-type: none"> 即効性が高い これまで再生した生息場の機能を向上させることができる 	<ul style="list-style-type: none"> 具体的な向上策を計画するための知見が少ない 	具体的な方策を実証試験から想定し、その効果をモデル解析
		十分に呼吸できる水質環境の確保	<ul style="list-style-type: none"> 酸素の供給 苦潮遡上の防止 鉛直混合の促進 	<ul style="list-style-type: none"> 酸素の供給など即効性の高い方法もある 	<ul style="list-style-type: none"> 直接酸素を供給する方策は、技術的な問題等から海域における費用対効果は小さいと考えられる 	上記及び下記の方策を実施した総合的な効果としてモデル解析
	直接生物を導入する	<ul style="list-style-type: none"> 二枚貝類の導入 動物プランクトンの導入 	<ul style="list-style-type: none"> 即効性が高い これまで再生した生息場を活用できる 漁業有用種であれば、漁業によって栄養を取り出す相乗効果が得られる 	<ul style="list-style-type: none"> 安定して効果的に機能する種類の選定が難しい 三河湾に生息していない種を導入することは生態系の安定性を損ねるリスクを伴う 	実証試験により有効な導入種を選定し、その効果をモデル解析	
多様性の向上対策（一次生産者の多様性を向上させることにより生態系のアンバランスを改善する対策）	生育場を確保する	<ul style="list-style-type: none"> 藻場の再生 藻類増殖場の設置 	<ul style="list-style-type: none"> すでに取り組み（藻場再生、ノリ養殖）が行われている これまで再生した生息場の機能を向上させることができる 漁業との両立を視野に入れた対策となる 	<ul style="list-style-type: none"> 必要な実施規模や有効な実施場所の検討がされていない 藻類の養殖など人為的な確保は管理を伴う 	モデル解析及び実証試験より、必要な実施規模や有効な実施場所を検討	
	良好な栄養環境を確保する	<ul style="list-style-type: none"> 生産性の高い水の導入 より効果の上がる再生場の選定 	<ul style="list-style-type: none"> 即効性が高い これまで再生した生息場の機能を向上させることができる 	<ul style="list-style-type: none"> 具体的な向上策を計画するための知見が少ない 	具体的な方策を実証試験から想定し、その効果をモデル解析	
	直接生物を導入する	<ul style="list-style-type: none"> 藻類の導入 	<ul style="list-style-type: none"> 即効性が高い これまで再生した生息場を活用できる 漁業有用種であれば、漁業によって栄養を取り出す相乗効果が得られる 	<ul style="list-style-type: none"> 全国的な導入事例から、より良い方法を選定する必要がある 三河湾に生息していない種を導入することは生態系の安定性を損ねるリスクを伴う 	効果をモデル解析	

2. 平成 23 年度現地調査（案）

三河湾における物質循環状況の解析、不健全の要因の抽出、対策検討のために実施すべき「現地調査」の内容としては、平成 22 年度に取得したデータが考えられ、これまで夏季から冬季までの 3 季のデータを得ていることから、残りの春季調査を実施する。

春季は、三河湾の健全性のキーポイントとなる植物プランクトンの増殖が起る季節である。植物プランクトンの季節による変動を踏まえて今後方策を検討することが必要になることから、春季調査が必要である。

2.1 微小ピコ・ナノプランクトン調査

・実施時期

春季（平成 23 年 5 月）

・調査地点

三河湾内の 10 点（右図参照）

・調査方法

<微小ピコ・ナノプランクトン>

バンドーン採水器（図 2.1 参照）を用いて、表層（海面下 0.5m）において採水する。

試水 100～500mL を褐色（又は黒色）ポリビンに入れ、グルタルアルデヒドが最終濃度 1～2%となるように加えて、プランクトンを固定する。

固定した試料は、暗所に冷蔵保管して実験室に搬入する。

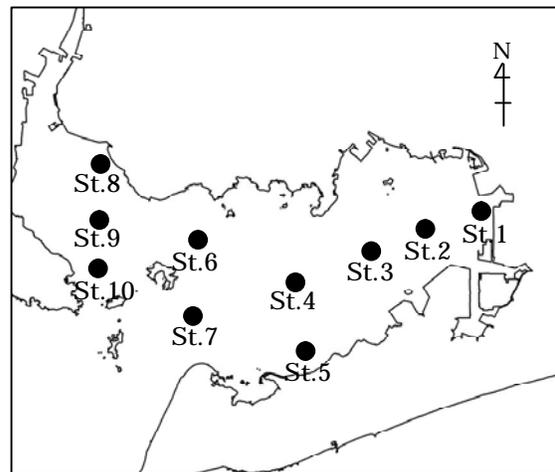
試水一定量を孔径 0.2 μ m のヌクレポアフィルター（黒色）でろ過し、フィルター上にピコ・ナノ植物プランクトンを捕集する。

ろ過したフィルターをスライドガラスの上ののせ、無蛍光油浸オイルを滴下して、カバーガラスを被せて検鏡用試料とする。

（ナノプランクトンの場合）ろ過前の試水を DAPI 及び FITC で染色する。

検鏡用試料を落射蛍光顕微鏡のステージののせ、G 励起と B 励起で観察する。倍率 400～1000 倍とする。

一定視野、一定面積のピコ・ナノプランクトンを計数する。



2.2 形態別栄養塩類調査

- ・実施時期

春季（平成 23 年 5 月）

- ・調査地点

三河湾内の 10 点（微小ピコ・ナノプランクトン調査と同様）

- ・調査方法

バンドーン採水器を用いて、表層（海面下 0.5m）及び下層（海底上 0.5m）から採水する。採取した試料は現場処理を行い、速やかに分析施設へ搬入し、各項目について分析を行う。また、調査時に、現地において測定機器を用いて、水温、塩分、DO について 50cm 毎に鉛直的に測定する。

植物プランクトン分析用の試水は、採水した試料を、ポリ容器（2L 容量）に移し、最終濃度が 2% になるようにホルマリンを添加して固定する。

採水試料を用いて、クロロフィル a、植物プランクトン、窒素（T-N、DIN（アンモニア態、亜硝酸態、硝酸態）、DON、PON）、リン（T-P、DIP、DOP、POP、PIP）について分析する。分析項目及び分析方法を表 2.1 に示す。

表 2.1 形態別栄養塩類調査の分析項目及び分析方法

分析項目	分析方法	備考
クロロフィル a (Chl-a)	海洋観測指針 6.3 蛍光光度法	
植物プランクトン	顕微鏡下で種の同定を行い、種毎の細胞数を計数	
COD	JIS K0102 17 COD	下限 0.5mg/L
TOC	JIS K0102 22.1 燃焼酸化-赤外線式 TOC 分析法	下限 0.5mg/L
全窒素 (TN)	JIS K0102 45.4 ペルマンニウム硫酸カリウム分解 Cd-Cu カム還元法	下限 0.01mg/L
溶存態全窒素 (DTN)	ガラスフィルター (GF/C) をろ液について、TN 測定	下限 0.01mg/L
溶存無機態窒素 (DIN) アンモニア態窒素 (NH ₄ -N)	JIS K0102 42.2 インドフェノール青法	下限 0.01mg/L
溶存無機態窒素 (DIN) 亜硝酸態窒素 (NO ₂ -N)	JIS K0102 43.1.1 ナフチルエーゼン アミン吸光度法	下限 0.002mg/L
溶存無機態窒素 (DIN) 硝酸態窒素 (NO ₃ -N)	JIS K0102 43.2.3 銅カミウム還元カリウムナフチルエーゼン アミン吸光度法	下限 0.01mg/L
溶解性有機態窒素 (DON)	(DTN) - (DIN = NH ₄ -N + NO ₂ -N + NO ₃ -N) より計量	下限 0.01mg/L
懸濁態有機窒素 (PON)	ろ過したフィルターを CHN 分析計により分析	下限 0.01mg/L
全リン (TP)	JIS K0102 46.3.1 ペルマンニウム硫酸カリウム分解-吸光光度法	下限 0.003mg/L
溶存態全リン (DTP)	ガラスフィルター (GF/C) をろ過後 TP 測定	下限 0.003mg/L
溶存無機態リン (DIP)	ろ過後 JIS K0102 46.1.1 モリブデン青 (アスコルビン酸還元) 吸光度法	下限 0.003mg/L
溶解性有機態リン (DOP)	(DTP) - (DIP) より計量	下限 0.003mg/L
粒子状有機態リン (POP)	(PIP) の 1molHCl 洗液処理後のろ紙について (TP) 測定	下限 0.003mg/L
粒子状有機態リン (POP)	(TP) - (DTP) - (PIP) より計量	下限 0.003mg/L
粒子性無機態リン (PIP)	ろ過後、ろ紙上残滓の 1molHCl 洗液について JIS K0102 46.1.1 モリブデン青 (アスコルビン酸還元) 吸光度法	下限 0.003mg/L
粒子性無機態リン (PIP)	(PO ₄ -P) - (DIP) より計量	下限 0.003mg/L

注 1) 「海洋観測指針」とは、海洋観測指針 (1999 年版) をいう。

注 2) 「JIS K0102」とは、日本工業規格 K0102 (2010 年改正) 工場排水試験方法をいう。

注 3) DON, PON, DOP 等、試水のろ過は、Whatman GF/C による。

2.3 面的底生生物調査

底生生物は、三河湾の海底における有機物の分解を担う重要な生物であり、物質循環の健全性を評価する際に重要な生物である。しかし、その面的な分布状況は情報が少なく、夏季には貧酸素水の影響によって極端に減少するなど季節的な変化も大きい。

春季は、アサリなどの底生生物が新規加入する時期であり、季節による変動を踏まえて今後方策を検討することが必要になることから、春季調査が必要である。

- ・実施時期

春季（平成 23 年 5 月）

- ・調査地点

マクロベントス・メイオベントス・周辺水質・周辺底質

：三河湾内の 10 点（微小ピコ・ナノプランクトン調査と同様）

- ・調査方法

- <マクロベントス>

スミス・マッキンタイヤ型採泥器（図 2.1 参照）を用いて海底泥を 3 回採泥し、採泥した泥を 1mm メッシュのふるいでふるい分けし、メッシュ上の残存物を試料（ホルマリン固定）とする。

試料について顕微鏡下で種の同定を行い、各種の個体数を計数し、湿重量を測定する。

- <メイオベントス>

アクリルコアを用いて海底泥を 1 回採泥し、船上で表層 10cm までの底泥を分取して、試料（ローズベンガル入りホルマリン固定）とする。

実験室内において、試料を 1mm メッシュ及び 0.04mm メッシュのふるいでふるい分けし、1mm 目のフルイを通過して 0.04mm 目のフルイに残ったものを試料とし、顕微鏡下で種の同定を行い、各種の個体数を計数し、湿重量を測定する。

- <周辺底質>

調査時に、スミス・マッキンタイヤ型採泥器を用いて海底表層泥を 1 地点当たり 3 回以上採取し、均一混合したものを分析試料とする。

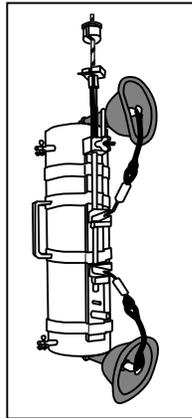
採取した試料は保冷状態で実験室へ搬入し、分析を行う。分析項目及び分析方法を表 2.2 に示す。

表 2.2 面的底生生物調査の底質分析項目及び分析方法

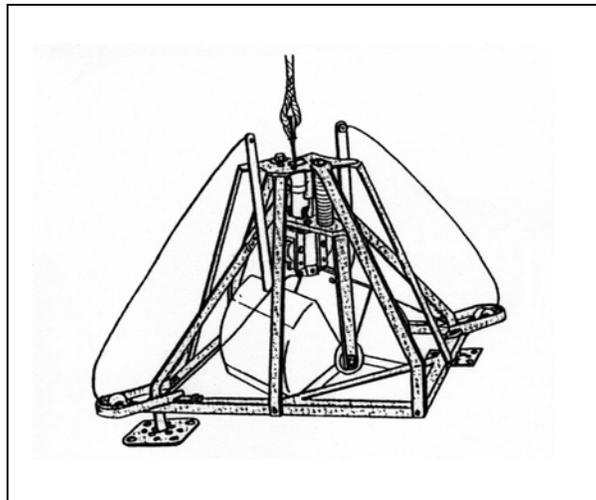
分析項目	分析方法	備考
粒度組成	JIS A1204	下限 0.1%
強熱減量	底質調査方法 .4.2	下限 0.1%
全硫化物 (TS)	底質調査方法 .4.3	下限 0.1mg/g
化学的酸素要求量 (COD)	底質調査方法 .4.4	下限 0.1mg/g
全窒素 (TN)	底質調査方法 .4.5.1.2	下限 0.01mg/g
全リン (TP)	底質調査方法 .4.6	下限 0.001mg/g

注1)「JISA1204」とは、日本工業規格 A1204 (2009 年改正) 土の粒度試験方法をいう。

注2)「底質調査方法」とは、「底質調査方法 (平成 13 年 3 月、環境省)」をいう。



バンドーン型採水器 (6L)



スミス・マッキンタイヤ型採泥器

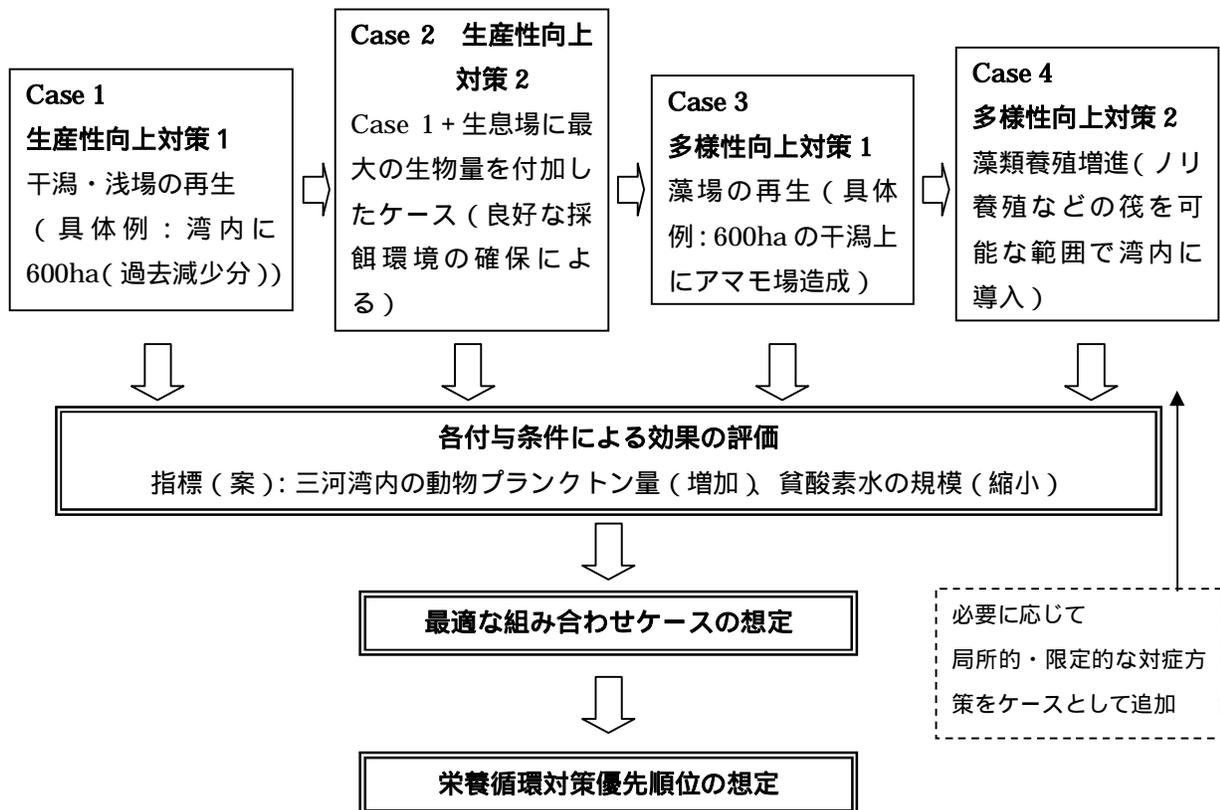
図 2.1 水質・底生生物等調査使用機器

3. モデル解析計画（案）

3.1 計算ケースの設定（案）

モデル解析では、1章において想定した各対策を三河湾において最大限実施した場合に、三河湾が本当に健全化する目途がたてられるのか、また、実施対策の規模や組み合わせ方によって、物質循環そのものがどのように変化するのかを検討する。この情報が、最終的には、現在想定している物質循環の向上策を具体化する重要な指針となる。

モデル解析では、資料3に示した生息場の再生（干潟・浅場・藻場の再生）を基本として、さらに、再生した場の機能を高める条件（良好な餌条件、水質条件）を付与した場合、物質循環のどこに、どの時期に、どの程度の変化が現れてくるかを順に感度解析する。



3.2 現地調査結果のモデル解析への応用

三河湾において必要な対策を精度良く検討するためには、まず現状の物質循環状況を精度よく再現することが必要である。特に三河湾における生態系のバランスをより忠実に再現するためには、次の2点の重要性が考えられたことから、現地調査によりデータを取得しており、今後モデル解析に応用していく予定である。

微小ピコ・ナノプランクトンの存在

三河湾では、基礎生産の元となる無機態の窒素やリンがやや減少しているにも関わらず、クロロフィル a はやや増加している。クロロフィルの増加要因としては、これまで過去の同様の検討ではあまり注目しなかった微小プランクトンの存在が考えられる。微小プランクトンはそのサイズ特性から、アサリなどの生物には利用されないものと考えられ、生態系のバランスが崩れている要因のひとつとして注目している。

底生生物の分布

底生生物の分布は通常水深に応じて概ね線形に変化するが、三河湾のように貧酸素水等のインパクトがある水域では、必ずしもそうではない。底生生物は、水中や海底の栄養塩類を取り入れるとともに、その栄養塩類を捕食されるという形で生態系上位の生物に循環させていく大きな役割を担っている。

以下に、この2点に関わる現地調査結果とそのモデルでの解析方針について検討した。

1) 微小ピコ・ナノプランクトンの評価と換算について

微小ピコ・ナノプランクトンは、夏季に非常に多く、調査を実施した 10 地点において平均約 10 万細胞/mL (約 10,000 万細胞/L)、水深 16m の St.4 では約 25 万細胞/mL が確認されたが、秋季以降は少なかった。なお、健全な海域を構成する生物量として、微小ピコ・ナノプランクトンが占める適正な割合については今後検証が必要である。

微小ピコ・ナノプランクトンはそのサイズが非常に小さいが、多量に存在していることから、三河湾における物質循環において無視できない存在であると考え、モデル計算へ導入したいと考えている。

なお、微小ピコ・ナノプランクトンの炭素量の変換については、Verity *et al.* (1992) の式 (式 1~3) を用いて求めることを検討している。以下の式は、固定細胞の長径及び短径から PSV を求め、これを BV に変換し、炭素量に換算するものである。

$$PSV = (\pi/6) \times L \times B^2 \quad \dots \text{式 1}$$

$$\text{Log}_{10}PSV = -0.002 + 0.991 \times \text{log}_{10}BV \quad \dots \text{式 2}$$

$$C = 0.433 \times BV^{0.863} \quad \dots \text{式 3}$$

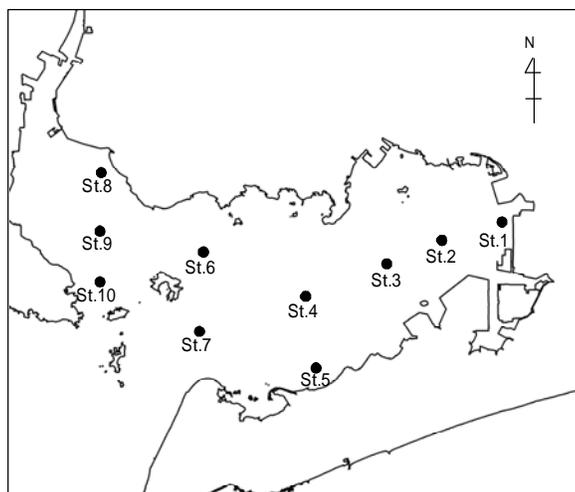
PSV : Prolate spheroid volume ($\mu\text{m}^3/\text{cell}$) (楕円形の体積)

L : length (μm) (長さ)

B : breadth (μm) (幅)

BV : biovolume (μm^3) (細胞の体積)

C : carbon weight (pgC/cell) (炭素量)



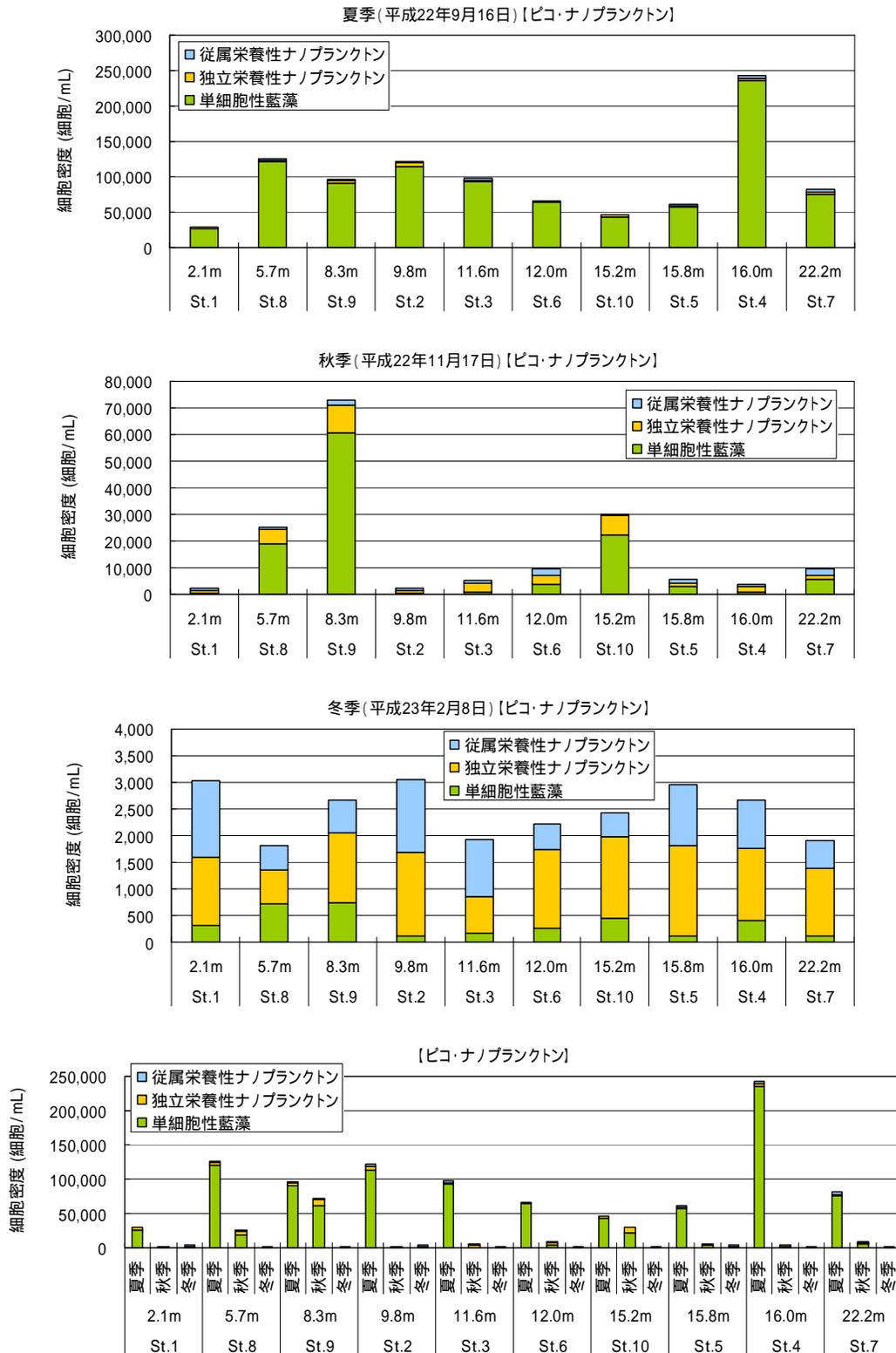


図 3.1 ピコ・ナノプランクトン調査結果

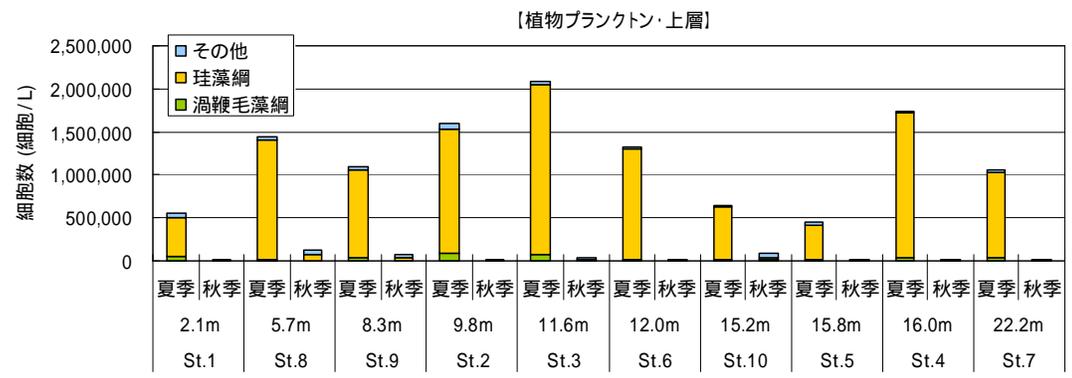
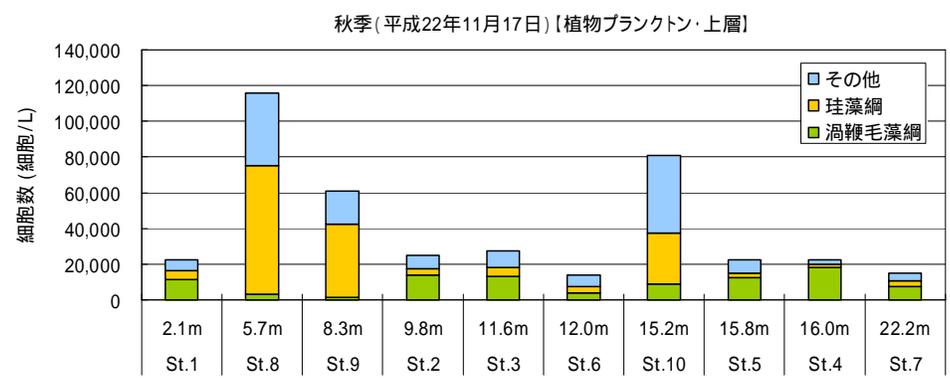
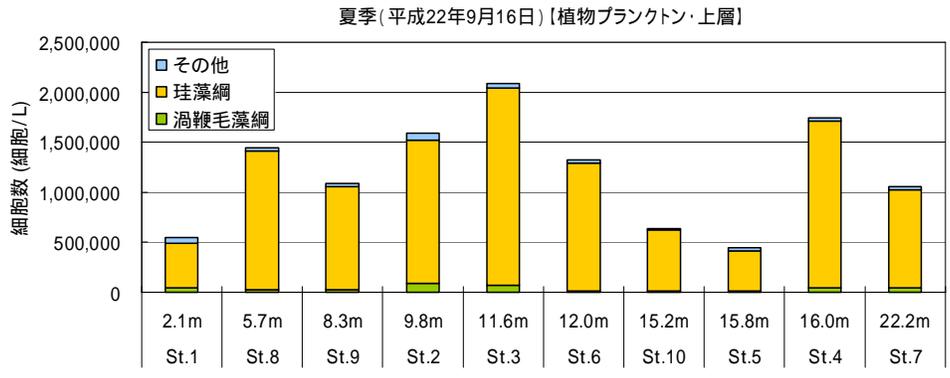


図 3.2(1) 植物プランクトン調査結果(上層)

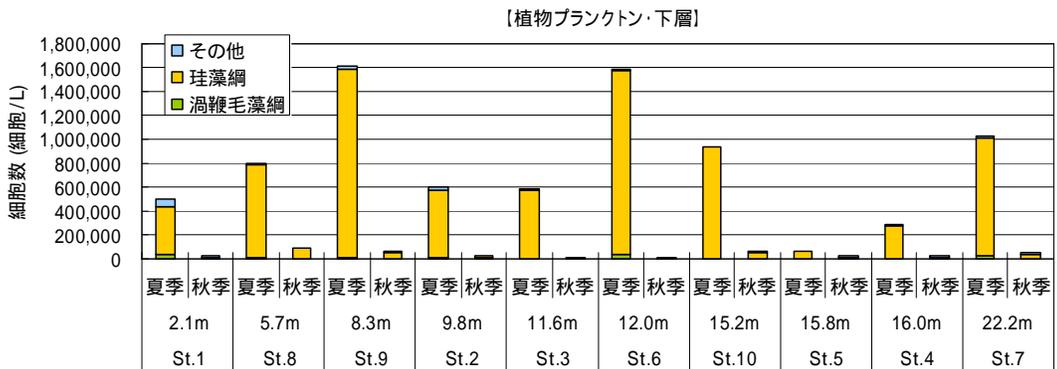
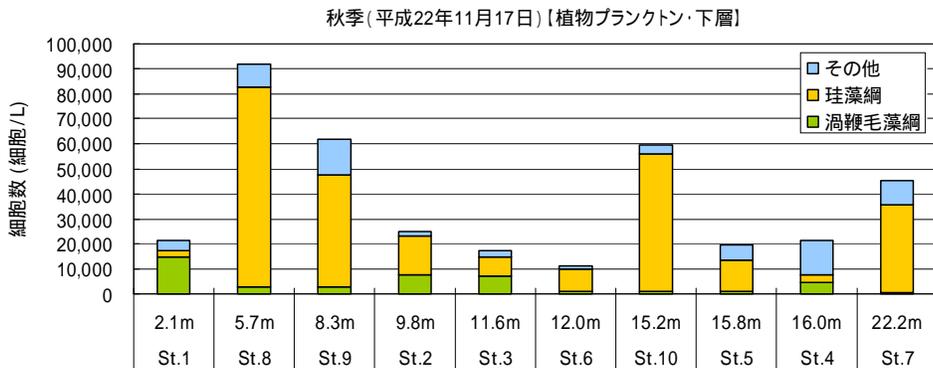
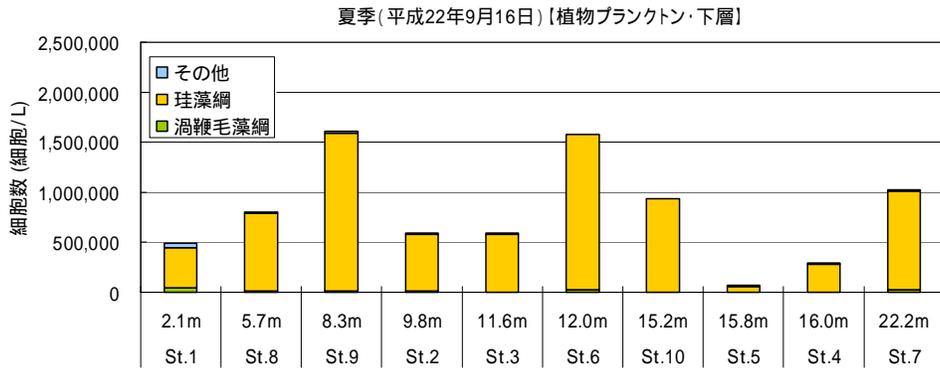


図 3.2(2) 植物プランクトン調査結果(下層)

2) マクロベントス・メイオベントス結果のモデルへの与え方について

マクロベントスの調査結果をモデルに与える際には、単純に線形補間せずに、水深帯ごとに生物量を設定することが好ましい。

夏季に実施した調査結果から、マクロベントスの出現状況を見ると、個体数・湿重量ともに最も水深が浅い St.1 (水深 2m) で最も多くなっている。個体数は最も水深が深い St.7 (水深 22.2m) で 2 番目に多くなっているが、St.7 は環形動物門が優占しているため、湿重量は小さくなっている。また、湿重量が次いで大きい地点は 2 番目に水深の浅い St.8 (水深 3.9m) であり、3 番目に湿重量の大きい St.9 (水深 8.6m) に比べて 200 倍程度の量であった。

マクロベントスは湿重量換算でモデルに与えられるため、夏季の結果から、以下に示す水深帯ごとに生物量を与えることを検討している。

水深 0～2m : St.1 (水深 2.0m) における調査結果を使用

水深 2～5m : St.8 (水深 3.9m) における調査結果を使用

水深 5～10m : St.9 (水深 8.6m) における調査結果を使用

水深 10m 以深 : St.2～7 及び St.10 における調査結果の平均値を使用 (夏季の生物量はごくわずかである)

また、夏季のメイオベントスの出現状況を見ると、マクロベントスの出現状況とは異なる傾向がみられた。

メイオベントスの個体数は、三河湾西部の St.8～St.10 及び湾口部に近い St.7 で多かった。また、三河湾東部の St.1～St.6 では、出現が確認されていない地点もあるが、概ね水深に応じた分布と考えられた。

メイオベントスについては、以下のようにモデルに適用することを検討している。

矢作川河口部から三河湾湾口部 : St.7～St.10 における調査結果を使用

その他の海域 : St.1～St.6 における調査結果を用いて水深による線形補間により使用

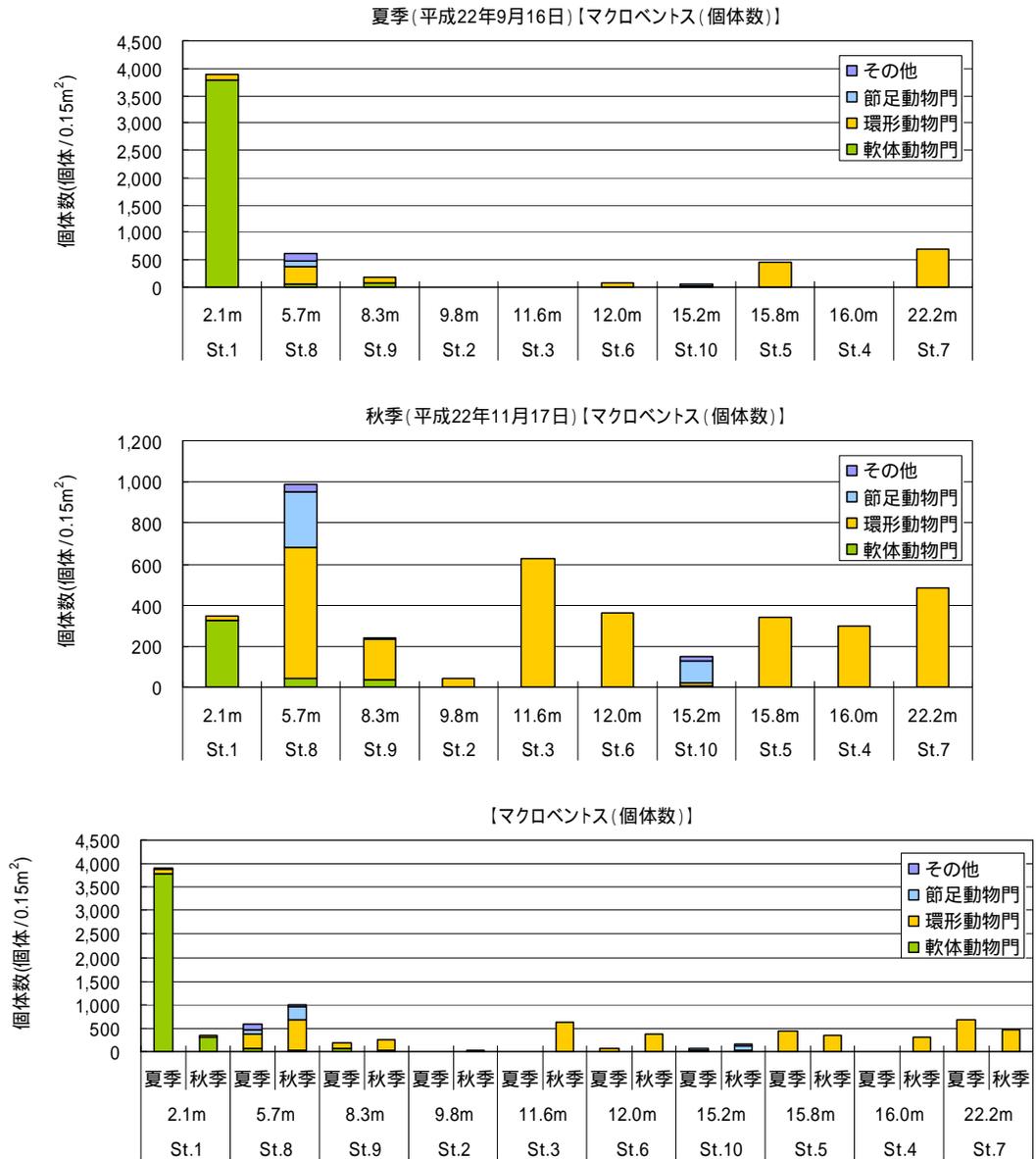


図 3.3(1) マクロベントス調査結果(個体数)

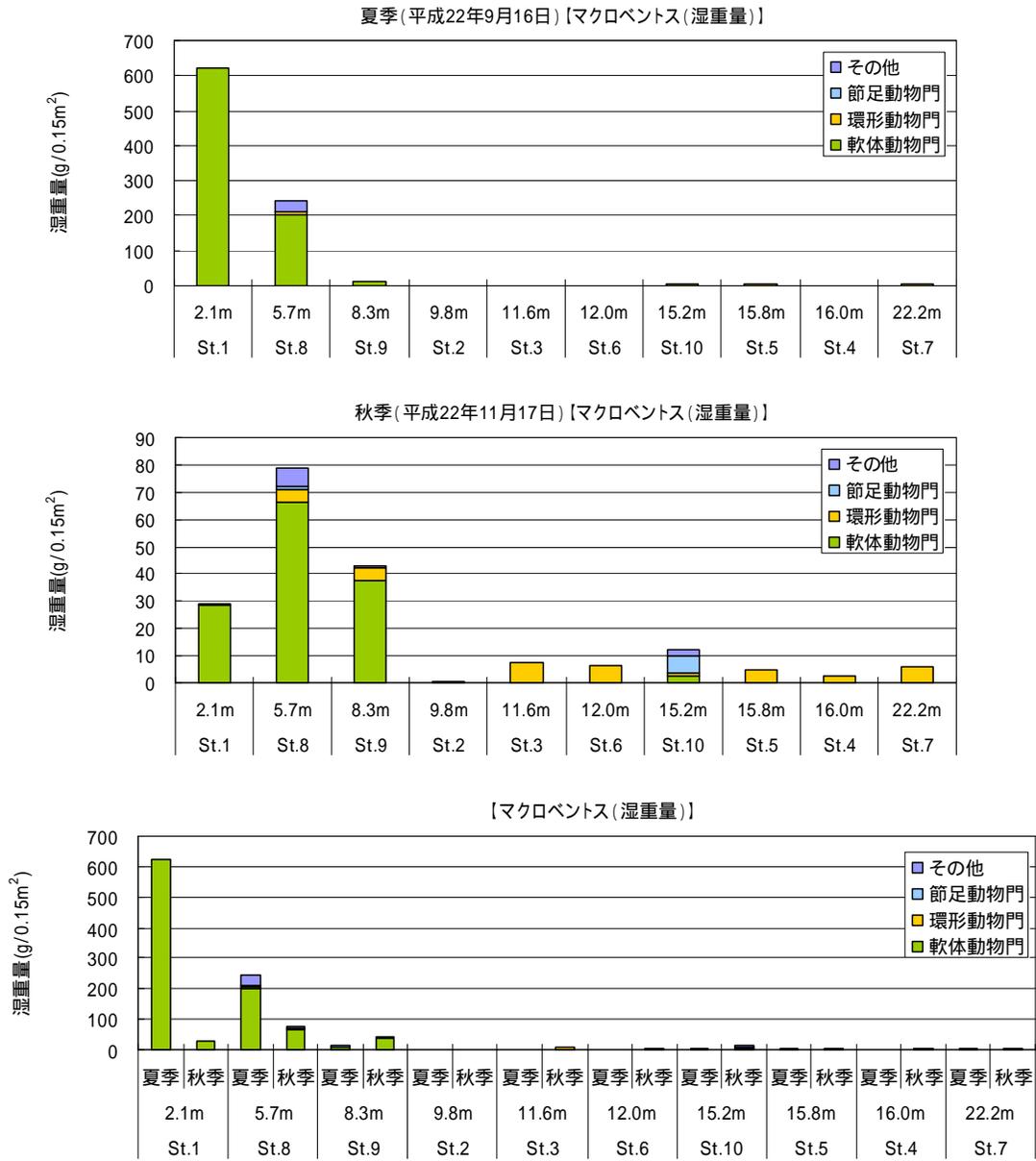


図 3.3(2) マクロベントス調査結果(湿重量)

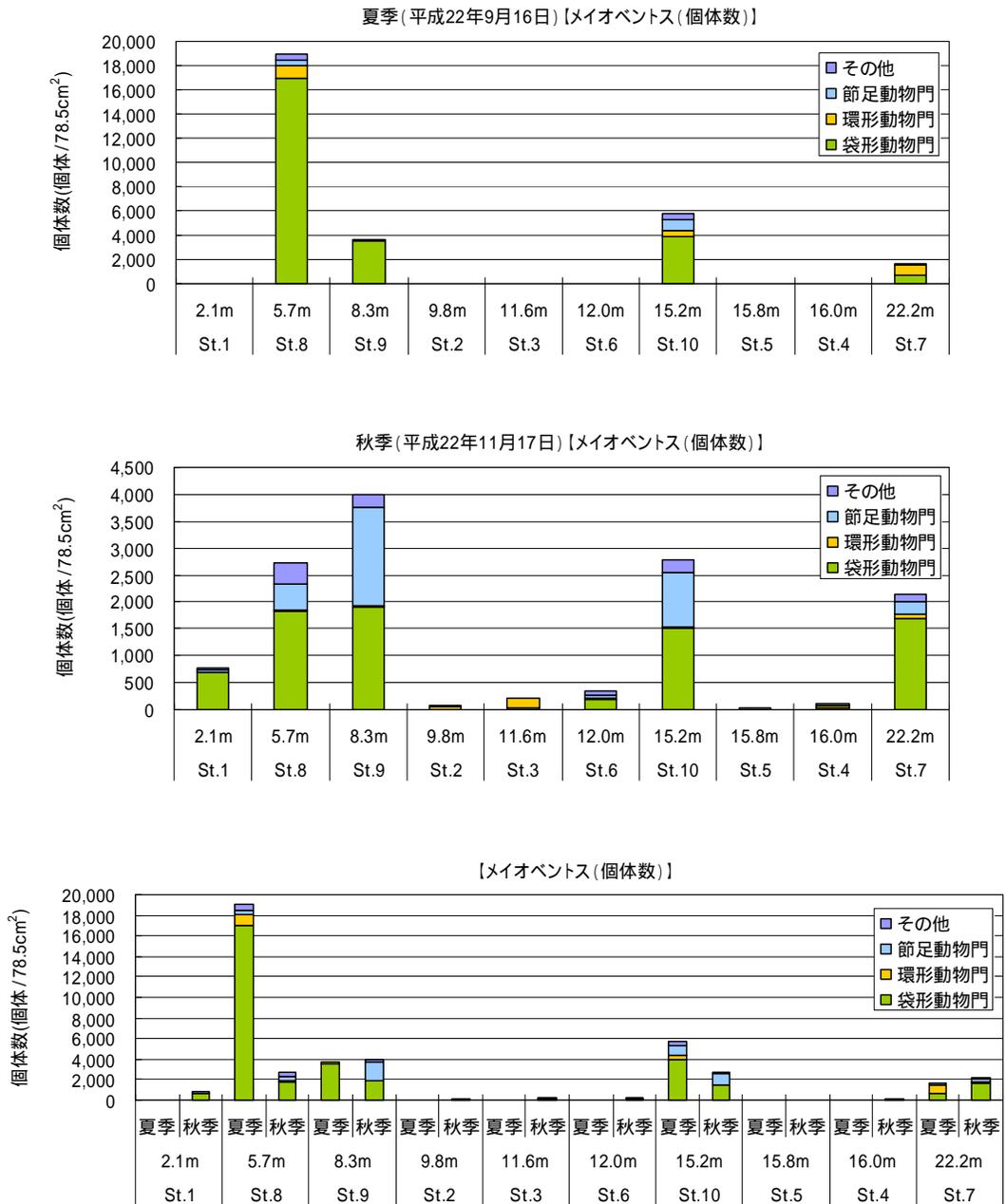


図 3.4(1) メイオベントス調査結果(個体数)(全地点)

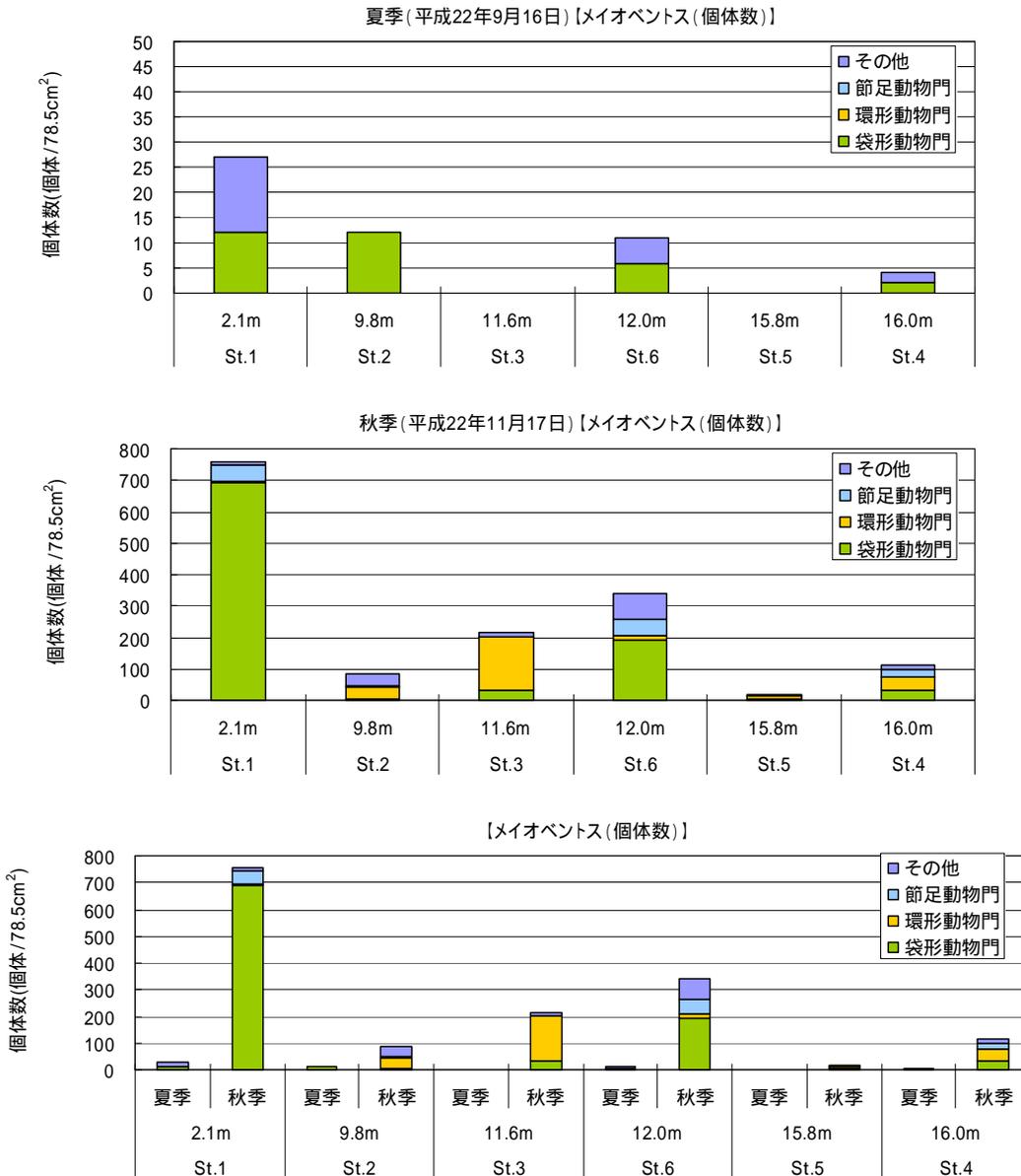


図 3.4(2) メイオベントス調査結果(個体数)(St.1~St.6のみ抜粋)

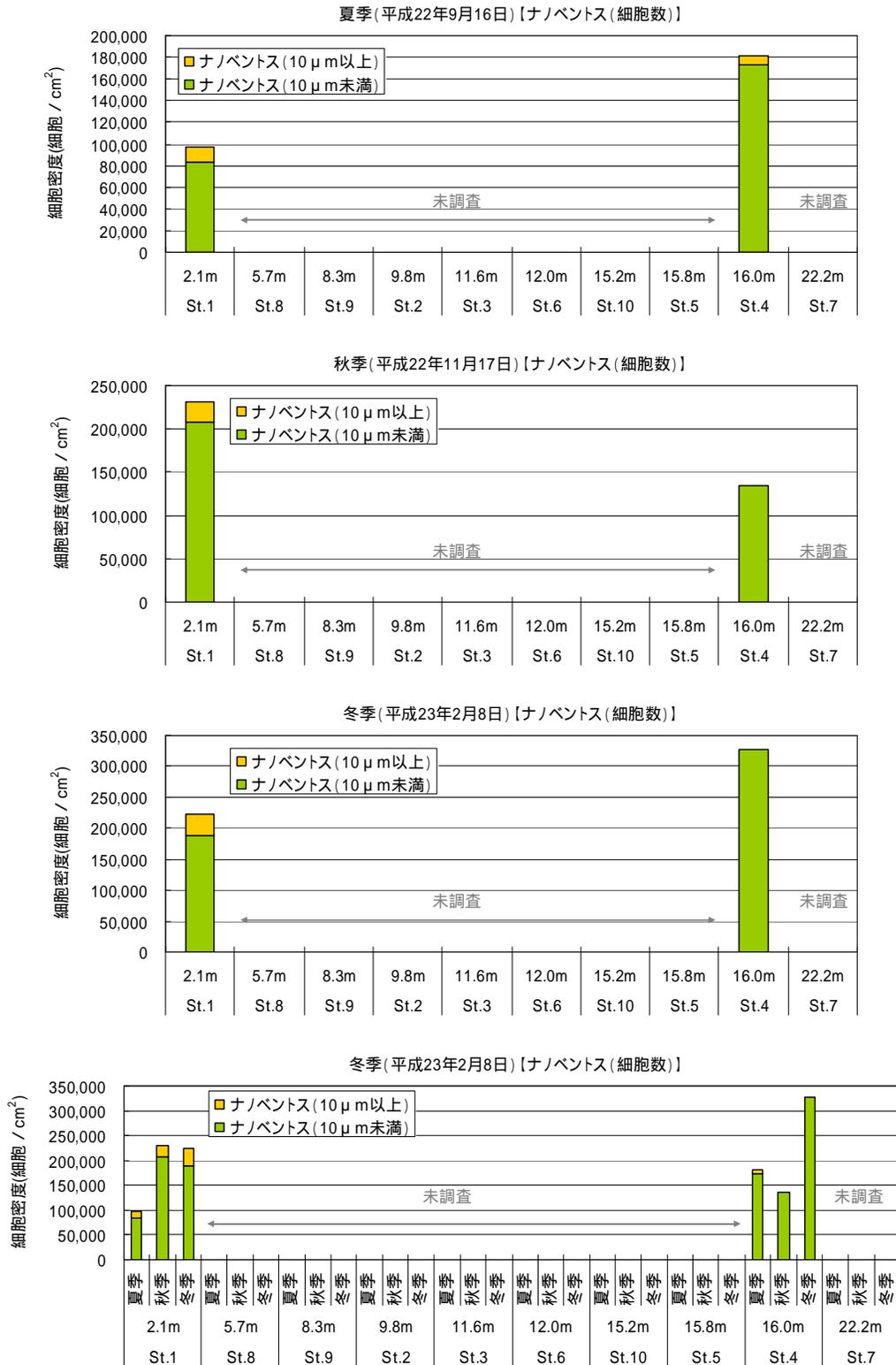


図 3.5 ナノベントス調査結果(個体数)

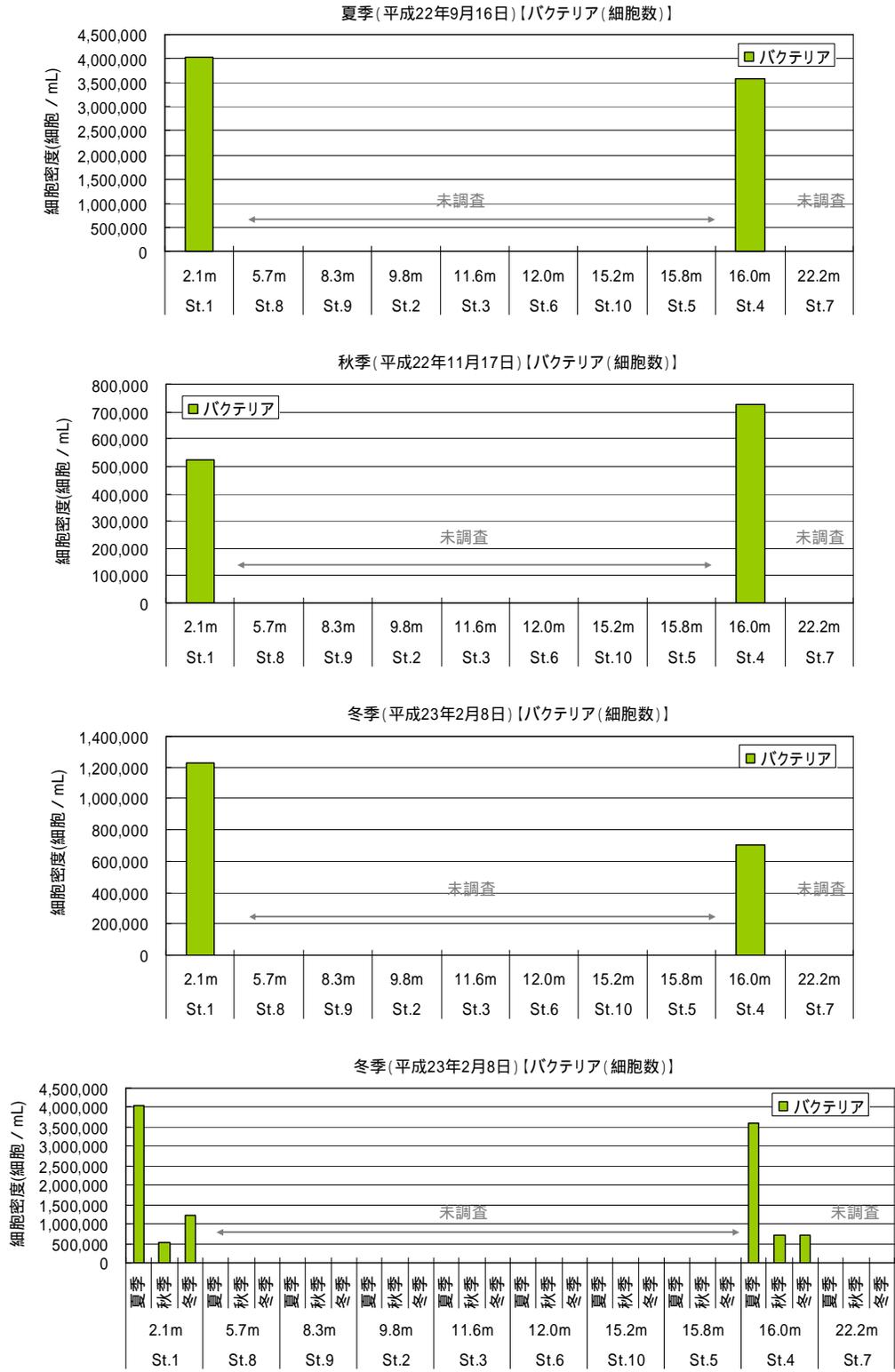


図 3.6 バクテリア調査結果(細胞数)

4. 実証試験計画（案）

三河湾の改善シナリオに示したように、物質循環を健全化するためには、植物プランクトンを利用する捕食者や栄養の競合者である生物が生息できる生息場の再生が必要となる。さらに、再生した生息場のコストパフォーマンスを上げるためには、再生後のできるだけ早い段階から生物を安定的に定着させることが必要となり、そのためには良好な成育環境の提供が必要である。

三河湾では、これまで生息場の再生がすでに大規模に実施されており、この生息場の生物生息機能をさらに高めることができれば、多大なコストをかけずに効果が見込める対策となる。

この具体的な方法として、再生した生息場への生物の導入が考えられるが、再生した場所に潤沢な栄養を送り込む、もしくは潤沢な栄養が存在する場所に生物を導入することが、導入した生物の安定的な個体群維持につながる。

そこで、再生場の生物に潤沢な栄養を送り込むとどのような効果がありそうなのか、また、どのような生物を導入することが効果的なのかを実証するための試験を計画する。三河湾の物質循環が不健全になることによって局所的に滞った栄養を生物の多い場所でより多く消費してもらうことを目的にした実証試験である。

具体的に想定している対策と実証試験内容との関係を図 4.1 に示す。

なお、実証試験とは、本来、ここまでの様々な検討から効果が見込める対策を実際に海域において実証する試験のことを想定していたが、以上の対策をある程度効果が見込める対策を現地で実証するためには、さらに情報が必要であると判断した。平成 24 年度の早い段階には、平成 23 年度に取得した情報をもとに、本来の現地における実証試験を実施したいと考えている。現時点で想定される実証試験としては、以下のようなものが考えられる。

- ・生産性の高い場所における生物増殖試験
- ・生物生産性の低い生息場への高生産水の誘導試験

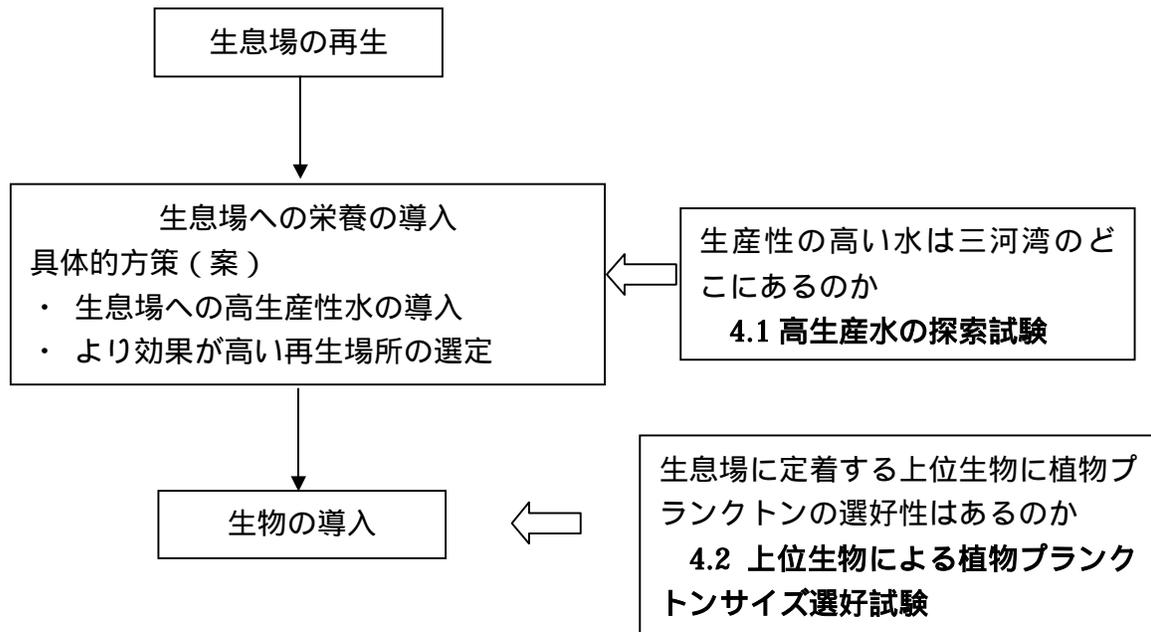


図 4.1 具体的に想定している対策と実証試験内容との関係

4.1 高生産水の探索試験

干潟・浅場上や港湾内などの三河湾内の海水を対象として、AGP 試験を行う。供試藻類は、三河湾においても一般的な海産珪藻である *Skeletonema costatum* を用いる (図 4.2)。試験の基本的な方法は、国立公害研究所 (1981) の AGP 試験方法に従う。試験条件は表 4.1 のとおりとする。

試験前に窒素 (T-N (ろ過前・ろ過後)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$)、リン (T-P (ろ過前・ろ過後)、 $\text{PO}_4\text{-P}$)、珪素 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) を分析する。試験開始前には、試験ケース毎に同分析項目を分析する。

試験中の各試験水 (ケース) の供試藻類の増殖量は、蛍光光度計により蛍光強度を測定することによって把握する (図 4.3)。測定は最大増殖に至るまで継続する。また、蛍光強度から細胞数への換算のため、供試藻類の蛍光強度測定と細胞数計数を同時に行い、蛍光値 - 細胞数の換算式を作成する。

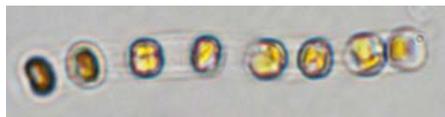


図 4.2 供試藻類 (*Skeletonema costatum*)

表 4.1 試験条件

項目	試験条件
試験水（試験ケース）	干潟・浅場上（水深 1m：六条干潟、汐川干潟） 河口部（水深 1m、周辺水深 5m：豊川河口、矢作川河口） 港湾内（水深 1m、水深 5m：三河港内） 合計 8 試験水（試験ケース）
水温	20（恒温器：インキュベーター）
照度・明暗サイクル	白色蛍光灯 3,000～5,000lux、12 時間明期・12 時間暗期



図 4.3 蛍光光度計（ターナーデザイン社 モデル TD-700）

4.2 上位生物による植物プランクトンサイズ選好試験

1) 二枚貝による植物プランクトン摂餌状況の確認

試験容器に二枚貝類（アサリ、カキ、バカガイなど）を入れ、三河湾海水を満たし、実験開始時、中間時 3 回程度、終了時のプランクトン量の変化、クロロフィル量の変化を測定する。

プランクトンは動物プランクトン、植物プランクトン、ピコ・ナノプランクトンを採水分析する。クロロフィルはサイズ分画（20 μm 以上、2-20 μm 、2 μm 未満）毎に計測する。

以下の実験ケースを想定している。

- ・ 実験区 A : 二枚貝類 + 三河湾海水
- ・ 実験区 B : 二枚貝類 + 処理した三河湾海水 (海水を希釈したり、濃縮したりしてプランクトン量を変化させる)

2) 動物プランクトンによる植物プランクトン摂餌状況の確認(補足情報として)

試験容器に三河湾海水を満たし、実験開始時、中間時 3 回程度、終了時のプランクトン量の変化、クロロフィル量の変化を測定する。

プランクトンは動物プランクトン、植物プランクトン、ピコ・ナノプランクトンを採水分析する。

クロロフィルはサイズ分画 (20 μm 以上、2-20 μm 、2 μm 未満) 毎に計測する。以下の実験ケースを想定している。

- ・ 実験区 A : 三河湾海水
- ・ 実験区 B : 処理した三河湾海水 (プランクトンネットで海水をろ過して、動物プランクトンの組成を変化させる)