

# 三津湾物質循環モデルの構築状況と施策検討の結果

## 目次

1. 検討の経緯と進捗状況 .....	2
2. 物質循環モデルの構築 .....	3
2-1 物質循環モデルの計算条件 .....	3
2-2 物質循環モデルの計算結果 .....	6
2-3 物質循環フラックスの計算結果 .....	12
3. 物質循環モデルによる施策の検討 .....	17
3-1 モデルでの施策の取り扱い .....	17
3-2 ケース1・人工中層海底の設置 .....	18
3-3 ケース2・耕耘＋底質改善材の混合 .....	29
4. 本年度の進捗状況と今後の課題 .....	38

## 1. 検討の経緯と進捗状況

本資料では、三津湾の物質循環モデルの構築の進捗状況と、三津湾の物質循環改善方策のモデルによる検討結果を示す。

検討の経緯と進捗を表 1.1 に示す。本年度第 2 回三津湾地域検討委員会（平成 24 年 12 月）までに、流動モデルの構築を行い、三津湾内の流れは、平均的には時計回りに流れること、滞留時間は概算 2.5 日であることを明らかにした。

本年度第 3 回三津湾地域検討委員会（平成 25 年 2 月）では、物質循環モデルの構築結果および物質循環の状況、改善方策の検討結果を報告した。本資料では、この検討結果について示す。

表 1.1 検討の経緯と進捗

流動モデル	
2011 年度第 3 回地域検討委員会	ベースモデルの作成（900-300m メッシュ）
2012 年度第 1 回地域検討委員会	詳細モデルの作成
2012 年度第 2 回地域検討委員会	詳細モデルの再現性向上、滞留時間の計算
物質循環モデル（水質—底質結合生態系モデル）	
2011 年度第 3 回地域検討委員会	ベースモデルの作成（900-300m メッシュ）
2012 年度第 1 回地域検討委員会	なし
2012 年度第 2 回地域検討委員会	詳細モデルの作成
2012 年度第 3 回地域検討委員会	詳細モデルの構築・再現性向上、施策検討

## 2. 物質循環モデルの構築

### 2-1 物質循環モデルの計算条件

地域からのモデルに対する要望と三津湾の現況、これまでの検討経緯を踏まえ、三津湾地域における物質循環モデルの構築を行った。

#### 1) 計算項目、計算領域

計算を行う項目、生物種を表 2.1、表 2.2 に示す。なお、改善方策の評価を行うために、フロー・ストックの出力も行っている。物質循環モデルの物質循環模式図を図 2.1 に示す。

なお、海藻類（ガラモ）は主な分布域が計算範囲外であること、アサリは現場にて確認されなかったことから、計算を行っていない。

表 2.1 三津湾地域で構築する物質循環モデルの計算項目

計算項目	
水質	植物プランクトン、動物プランクトン、有機物（デトリタス）、栄養塩類、溶存酸素、酸素消費物質（ODU）
底質	有機物、栄養塩類、マンガン、鉄、硫黄、メタン、溶存酸素
生物	付着藻類、懸濁物食者、堆積物食者、海草類の現存量

表 2.2 三津湾地域で構築する物質循環モデルで考慮する生物種

構成要素	生態系モデルで考慮する生物種
植物プランクトン	大型、小型珪藻
動物プランクトン	カイアシ類
海草類（SGS）	アマモ
付着藻類(DIA)	付着藻類
懸濁物食者(BSF)	カキ
堆積物食者(BDF)	ベントス

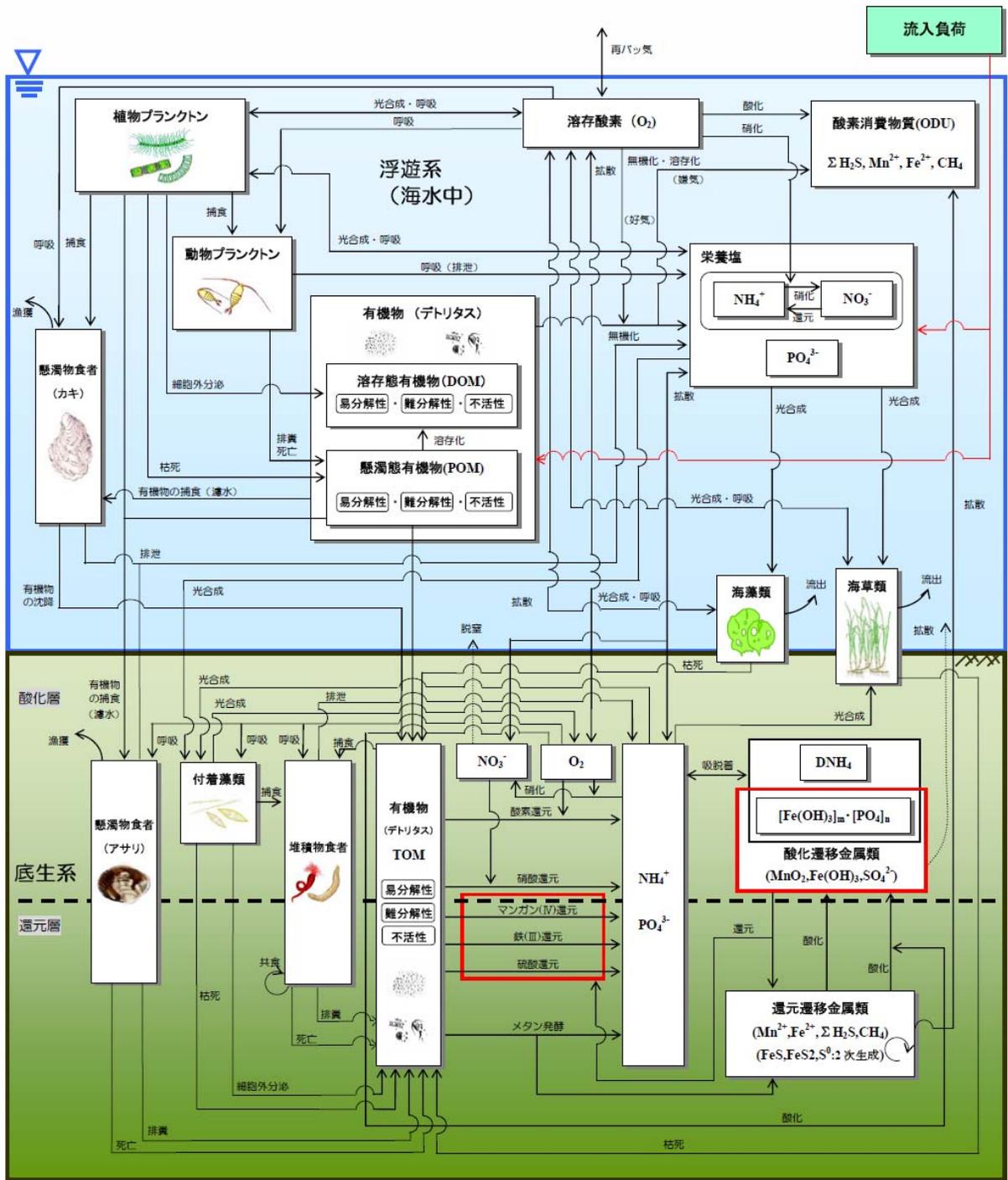


図 2.1 物質循環モデルの物質循環模式図 (当初、アサリおよび海藻類は考慮する予定だったが、計算範囲内で確認されなかったため、考慮しないこととした)

計算期間、水平格子分割、鉛直層分割は流動モデルと同一とした。ただし、計算対象領域は、水質濃度の勾配が小さい三津湾周辺の状況、調査結果の有無、流れの特徴を鑑みて、図 2.2 で示す三津湾およびその周辺領域を計算範囲とした。また、水質モデルはメッシュモデルであり、水平格子間隔 100m で分割したが、底質モデルおよび生態系モデルはボックスモデルであり、三津湾内を 38 のボックスに分けて計算した。

表 2.3 物質循環モデルの計算条件

項目	設定内容
再現対象年	2011 年
計算期間	2010 年 12 月 1 日～2011 年 12 月 31 日 (初めの 1 カ月は準備計算期間)
鉛直層分割	13 層 (0-3、3-5、5-7、7-9、9-11、11-13、13-15、15-17、17-19、19-22、22-25、25-30、30m 以深)
水平格子分割	三津湾周辺：100m、図 2.2 に示す範囲
ボックス分割	計算範囲を 38 ボックスに分割 (図 2.2)

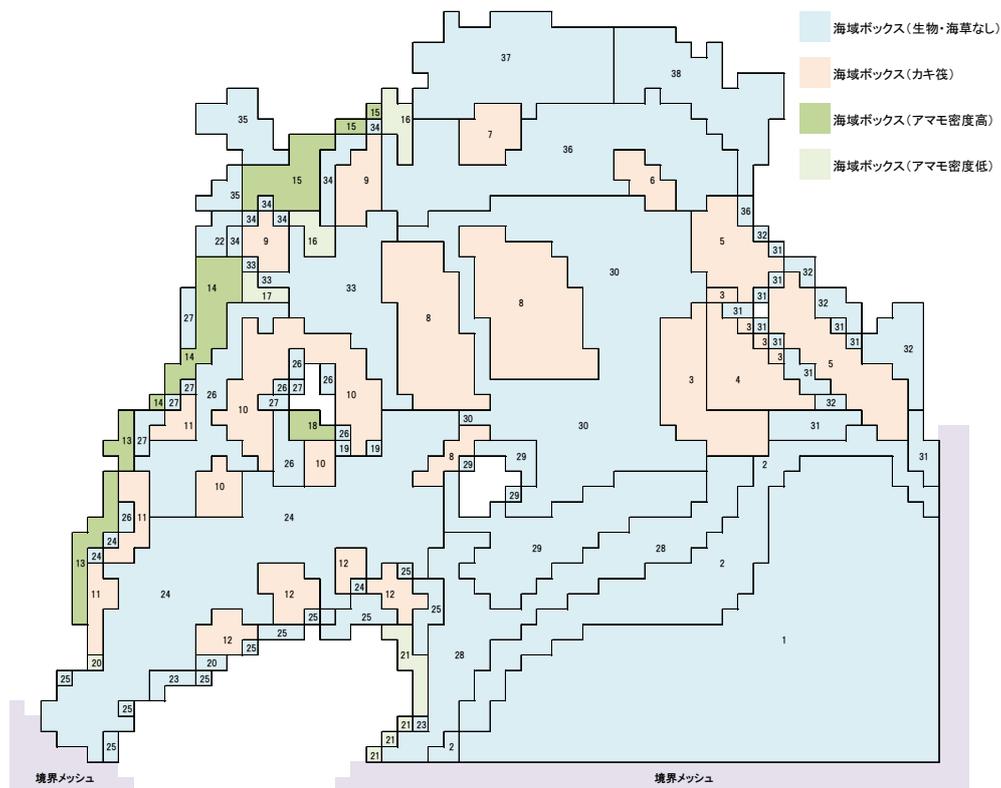


図 2.2 計算領域および底質・生態系モデルのボックス分割図

## 2-2 物質循環モデルの計算結果

地域検討委員会より提供された河川負荷データ、水質・底質データ等から、境界値、負荷量、初期値等の計算条件を作成し、パラメータチューニングを行って三津湾の物質循環モデルを構築した。以下にその結果を示す。

再現性比較結果については、地域検討委員会に提供した資料に詳述している。

### 1) 水質の計算結果

水質の時系列変動を、地域検討委員会の調査結果と比較したところ、概ね三津湾の特徴は捉えられていると評価した。

図 2.3 に、8月の水質濃度水平分布図を示す。T-N、T-P、TOC、Chl-aのいずれも、湾口で低く、湾奥で高い分布傾向であった。しかし、最大値でも T-P が 0.1mg/L、T-N が 0.29mg/L 程度と一般的な都市域の沿岸部と比べると低く、濃度勾配は小さかった。DO は、湾奥東部では低く、湾奥西部で高かったが、最小値でも 7.0mg/L と、貧酸素状態では確認されなかった。これは地域検討委員会の調査結果とも整合していた。

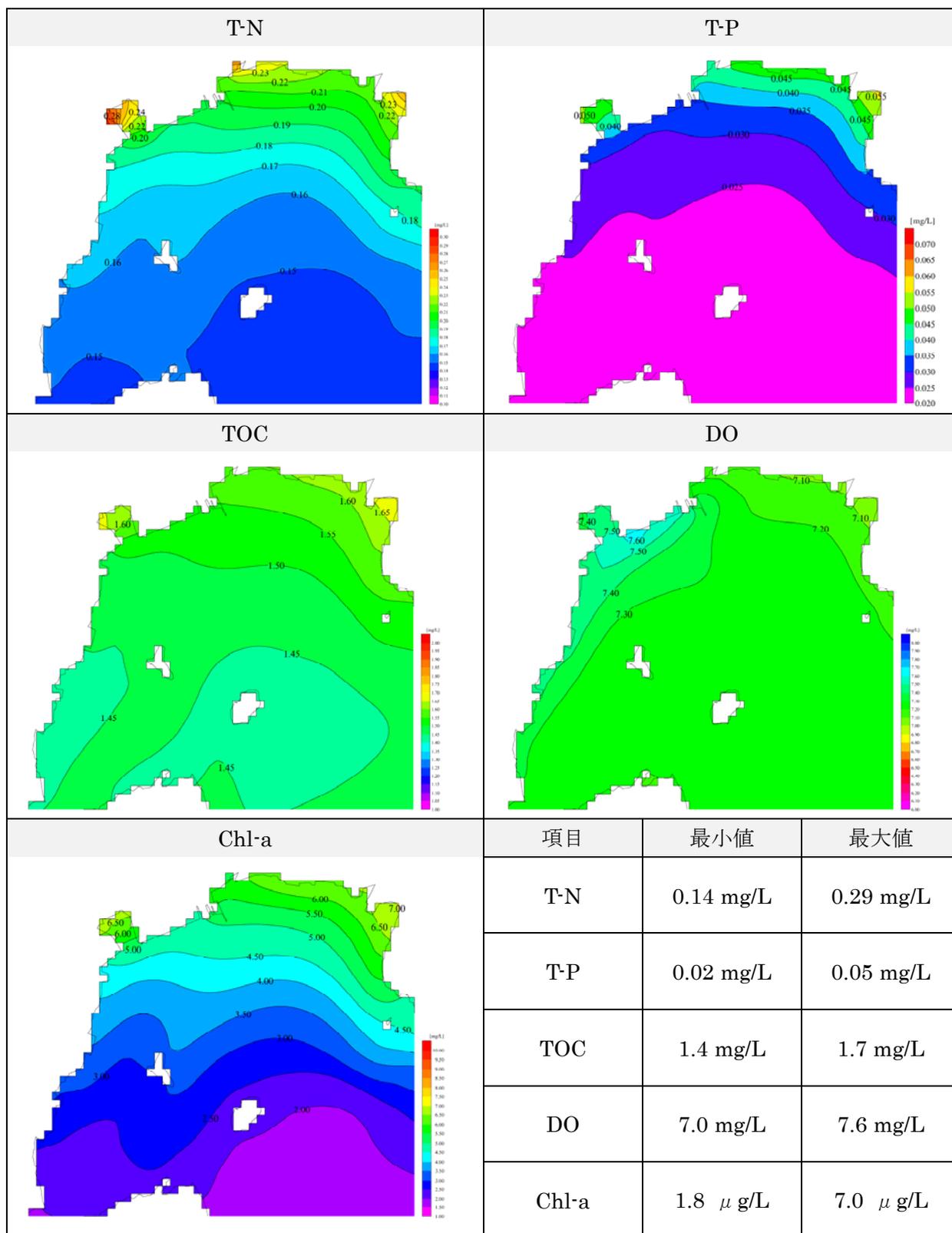


図 2.3 水質水平分布図と三津湾内の最大・最小値（8月平均値）

2) 底質の計算結果と再現性検討

ボックス別の底質濃度を図 2.4 に示す。期間は 8 月平均、0~3cm 層の値である。いずれも、カキ直下のボックス(ボックス 3~12)で高い値を示した。

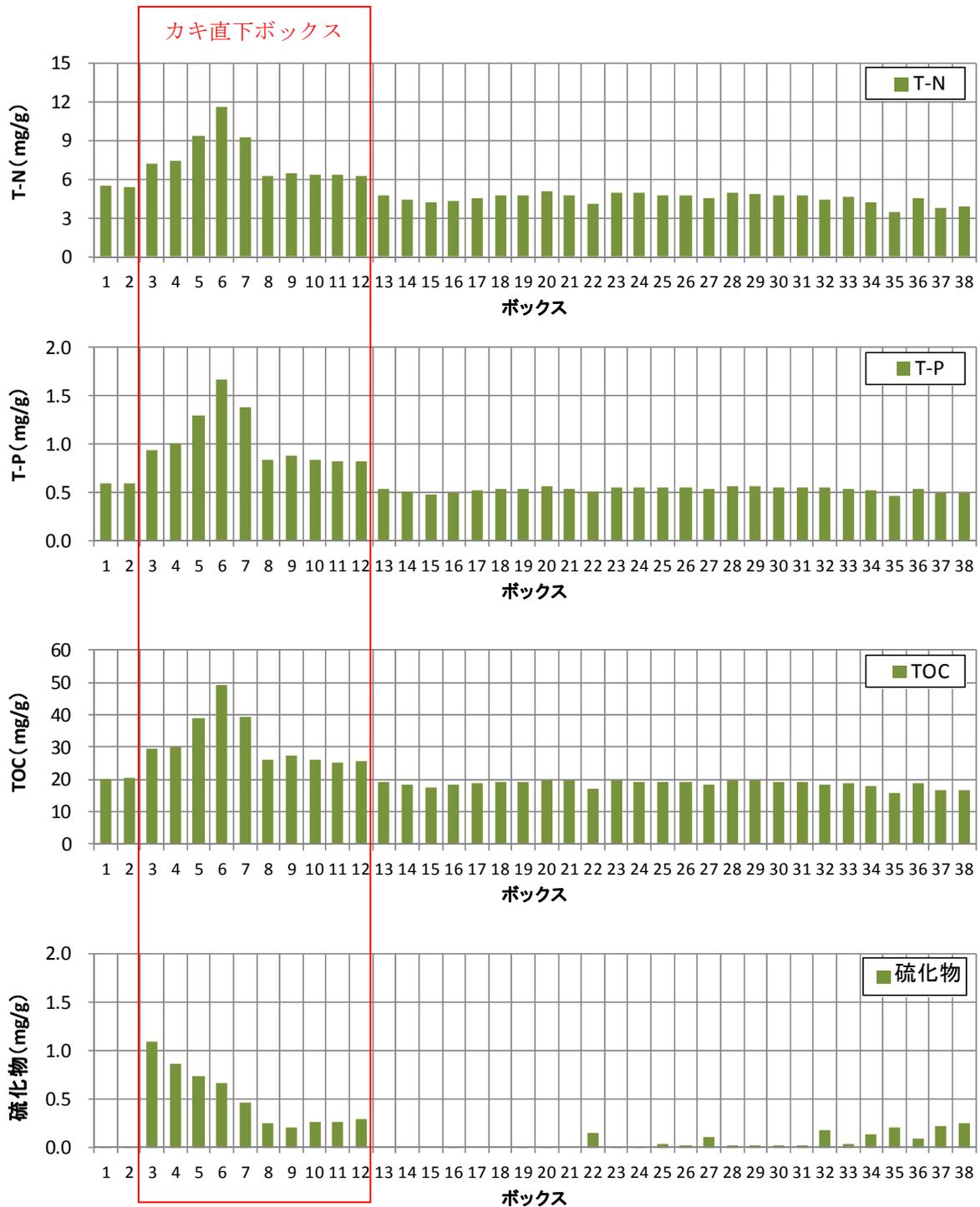


図 2.4 ボックス別底質濃度 (8 月平均、0~3cm 層)

### 3) 生物の計算結果

カキ、アマモ、付着藻類、ベントスの現存量（炭素換算）の時系列変化図を図 2.5～図 2.8 に示す。カキは冬季から春季にかけて漁獲によって減少し、その後増加、夏季の高水温によって成長が鈍化し、秋季に再び増加する。アマモ、付着藻類、ベントスはいずれも 5～6 月頃に現存量が最大となった。付着藻類、ベントスの現存量は、カキ直下のボックスの現存量が際立って多く、次いで湾奥の浅海域ほど高い傾向にあった。

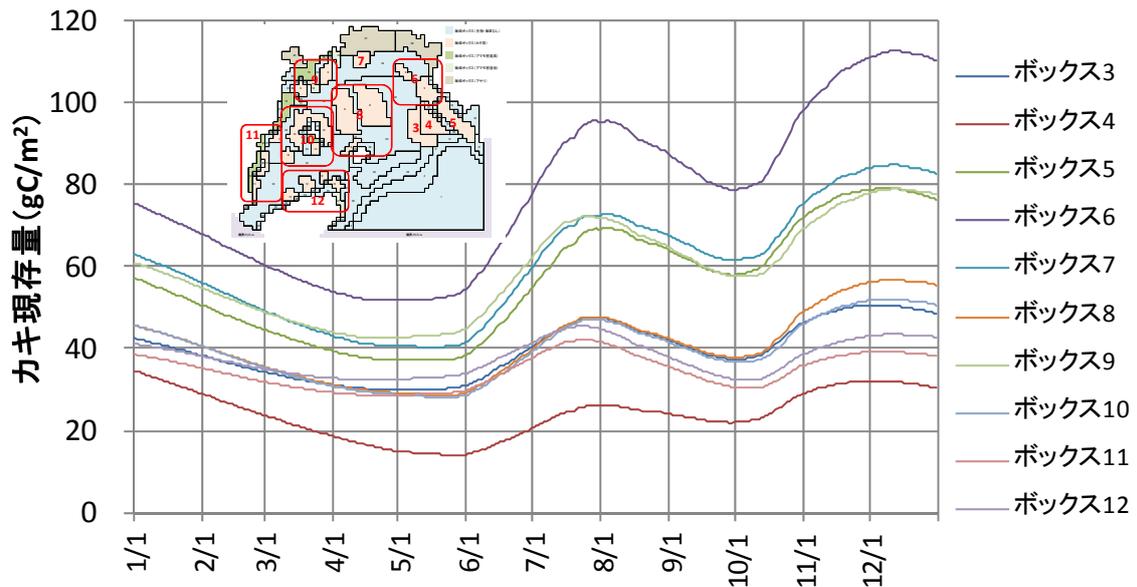


図 2.5 各ボックスにおけるカキの現存量時系列図

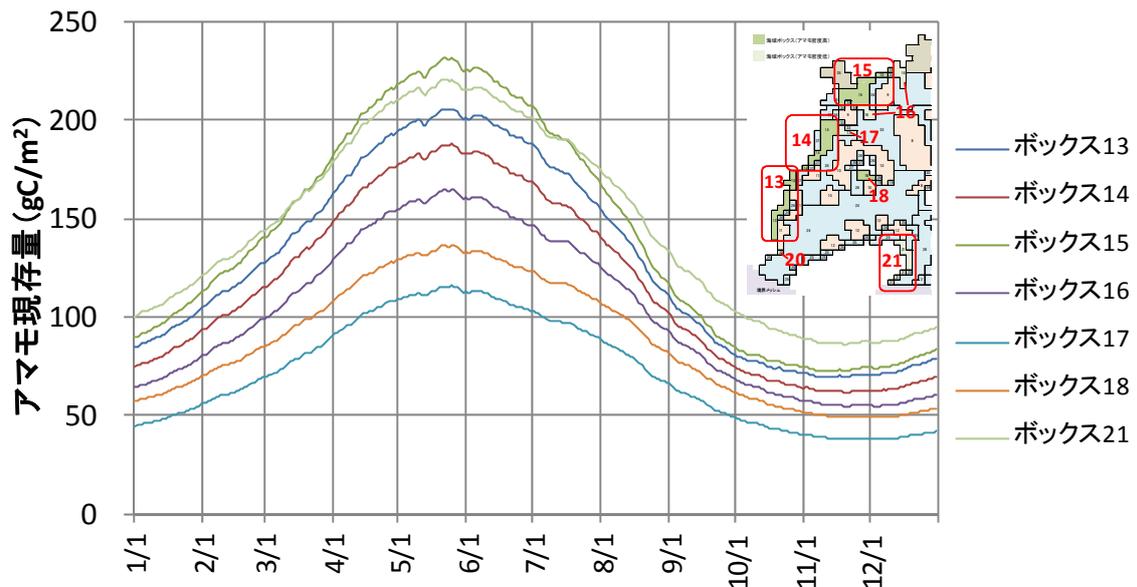


図 2.6 各ボックスにおけるアマモの現存量時系列図

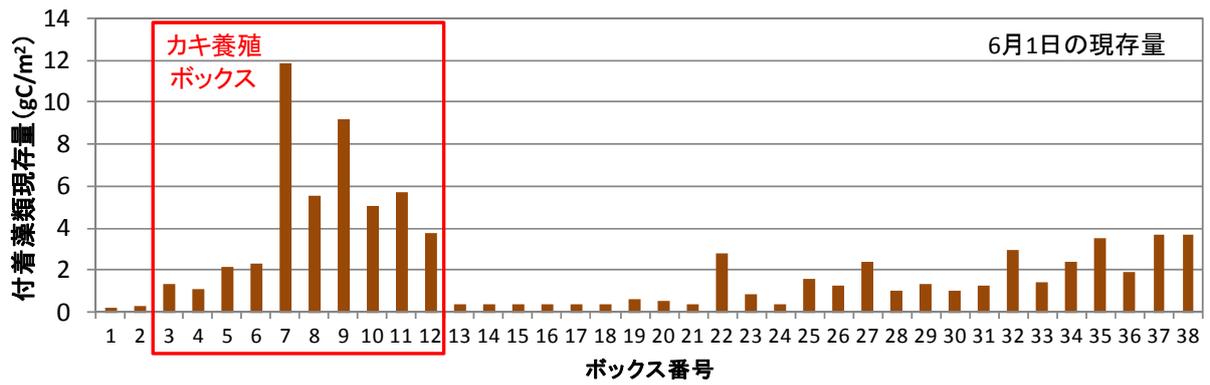
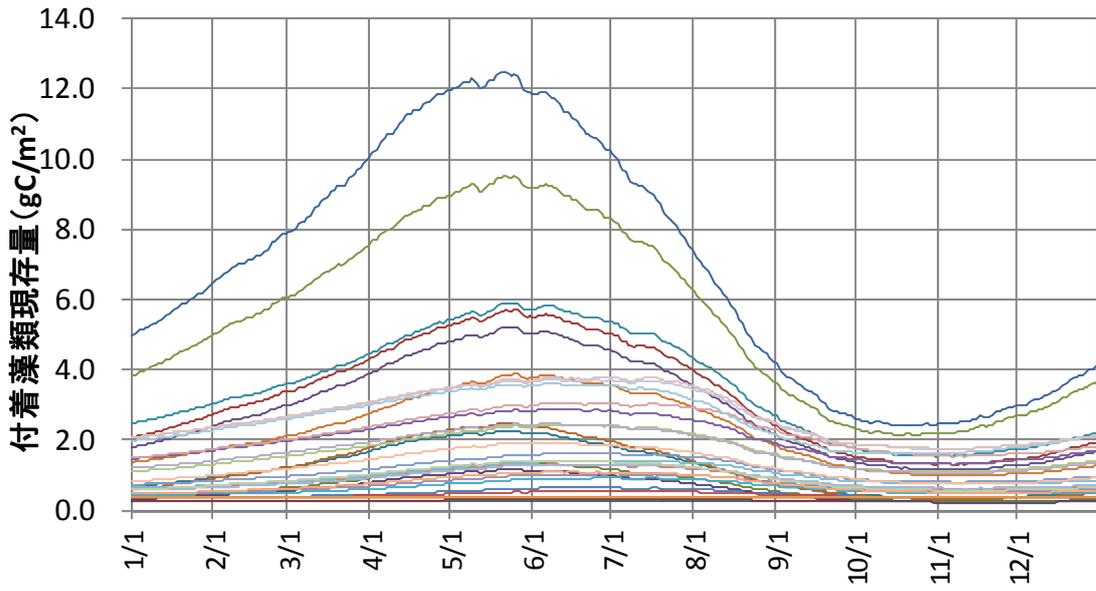


図 2.7 各ボックスにおける付着藻類の現存量時系列図 (全ボックスに設定)

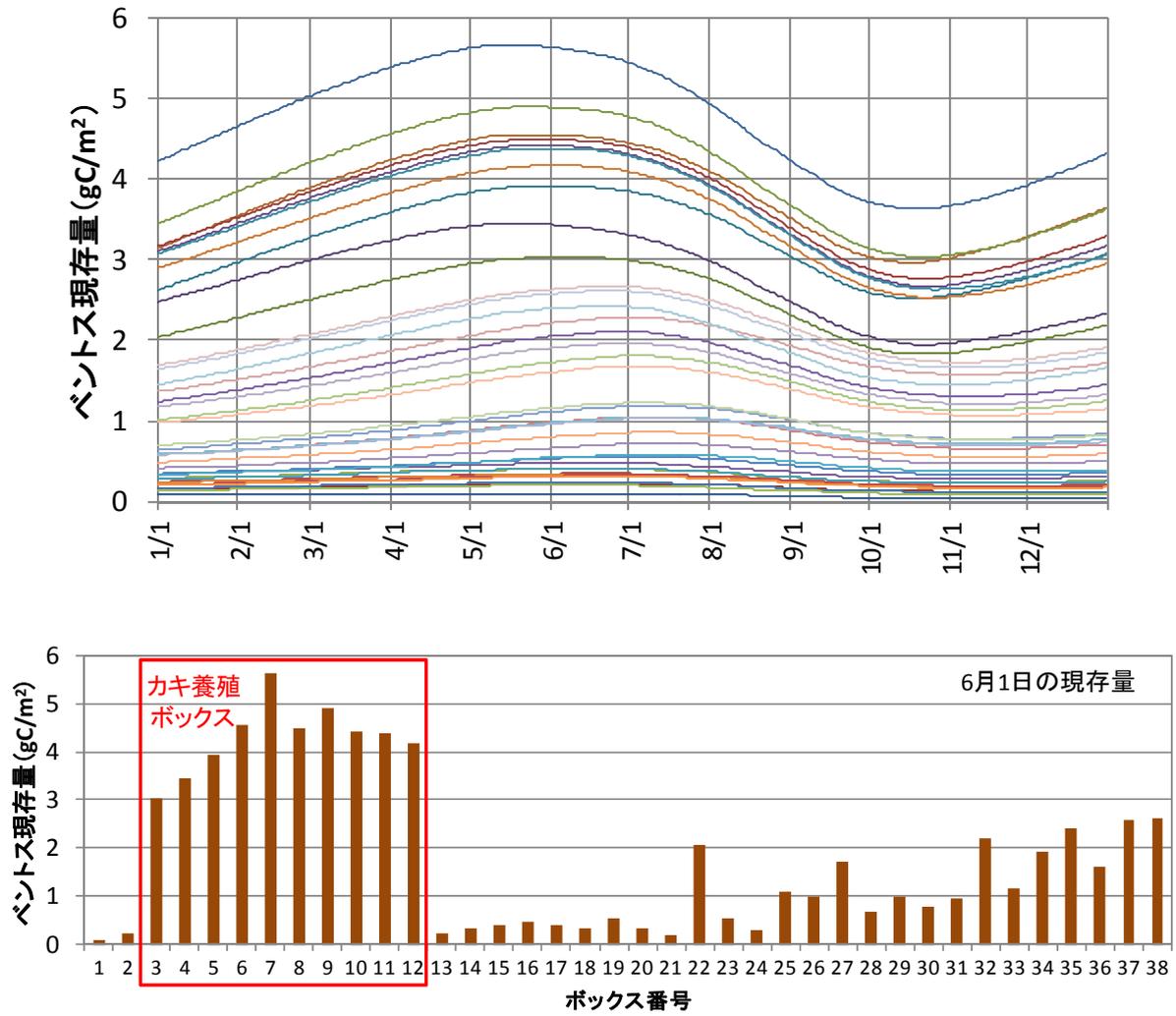


図 2.8 各ボックスにおける堆積物食者の現存量時系列図

## 2-3 物質循環フラックスの計算結果

物質循環モデルの計算結果を用いて、三津湾の物質循環フラックスを算出した。

外海からの移流フラックスは、三津湾湾口を、図 2.9 に示すように三津口湾との境界、三津湾湾口西部、三津湾湾口東部の 3 区間に分けて算出した。

流量フラックスを図 2.10 に、リンの移流フラックスを図 2.11 に示す。なお、地域検討委員会では窒素・炭素の移流フラックスについても報告している。いずれも、大潮・小潮によって移流量は大きく変動していた。季節によっても変動し、9 月頃に最も小さく、冬季に大きい傾向があった。形態別の比率は、 $\text{PO}_4\text{-P}$  が最も多かった。窒素は DON、炭素は DOC が全体の 80~90% を占めていた。ただし、これは境界に与えた分画比による影響が大きい。

また、三津湾湾口西部で流入する際と三津湾湾口東部で流出する際で、形態別比率に大きな差はなかった。

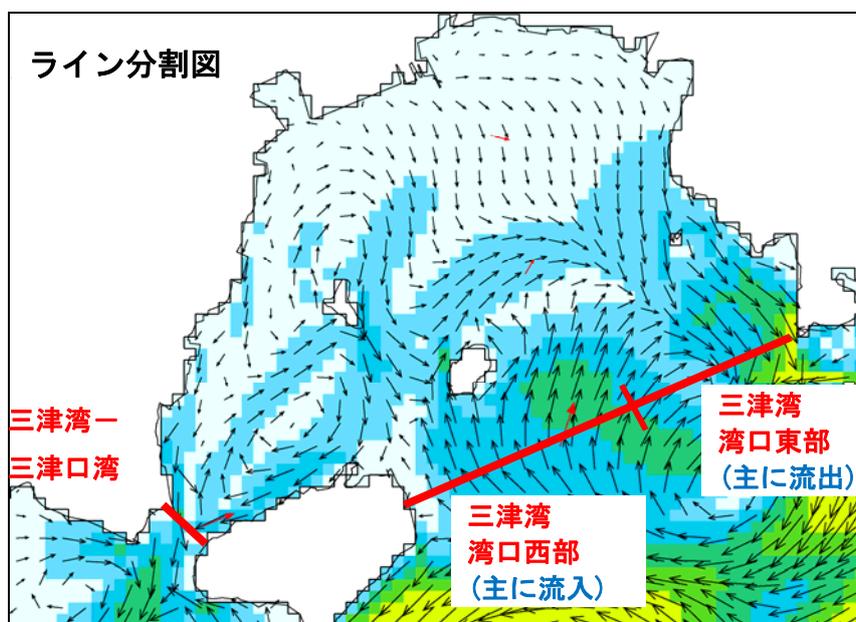


図 2.9 ライン分割図

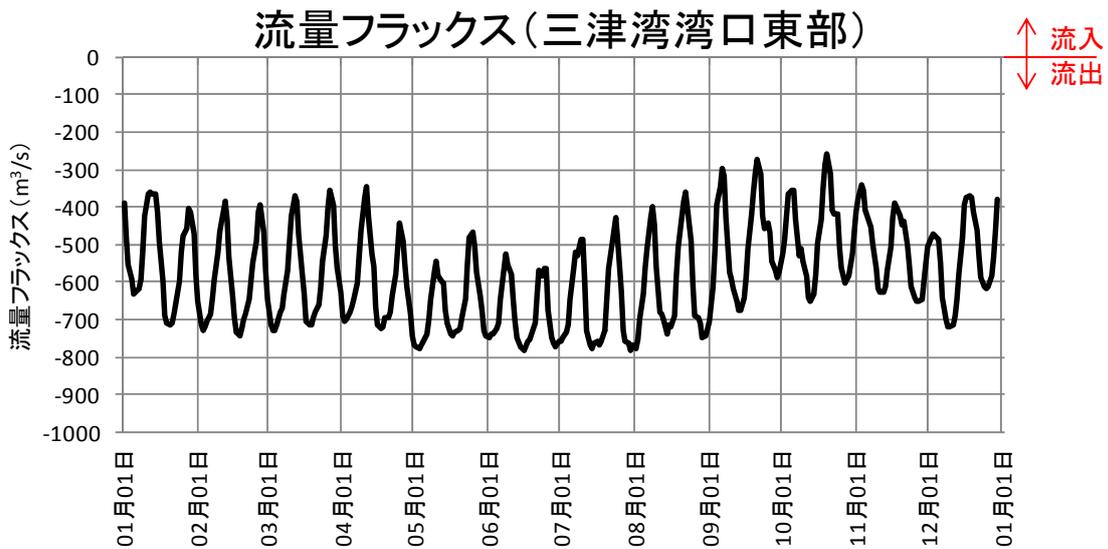
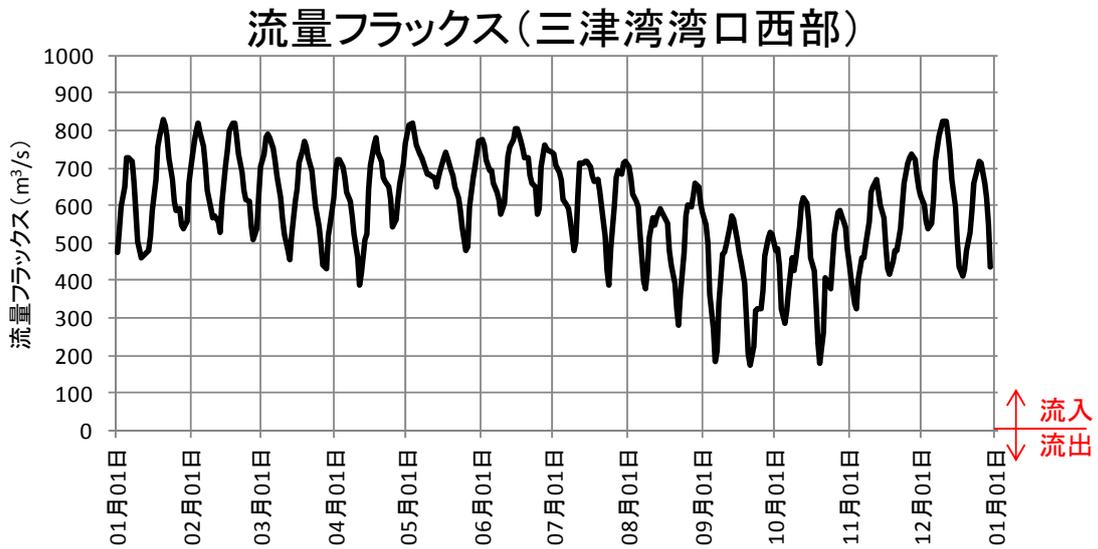
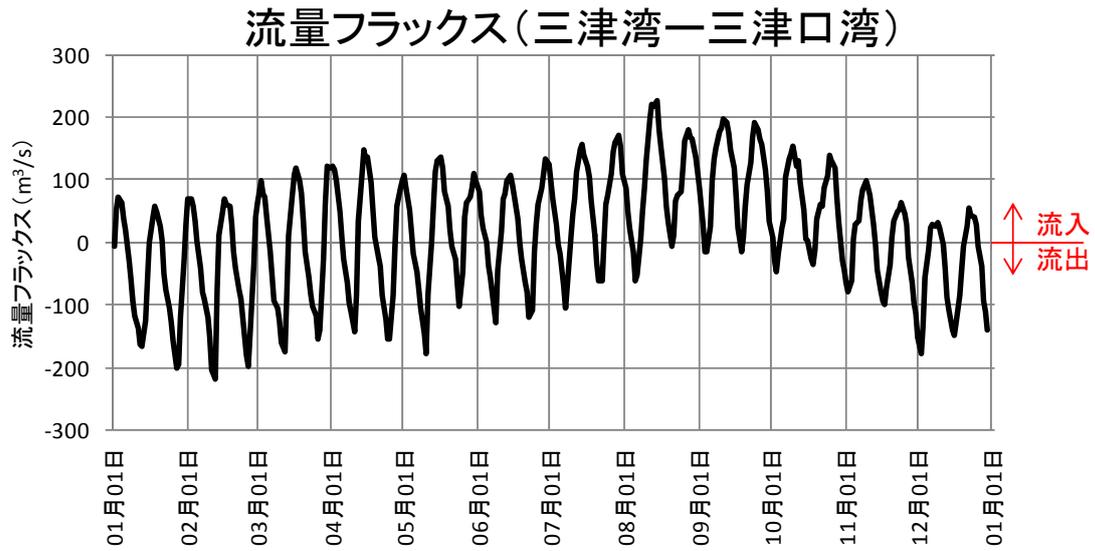


図 2.10 流量フラックス

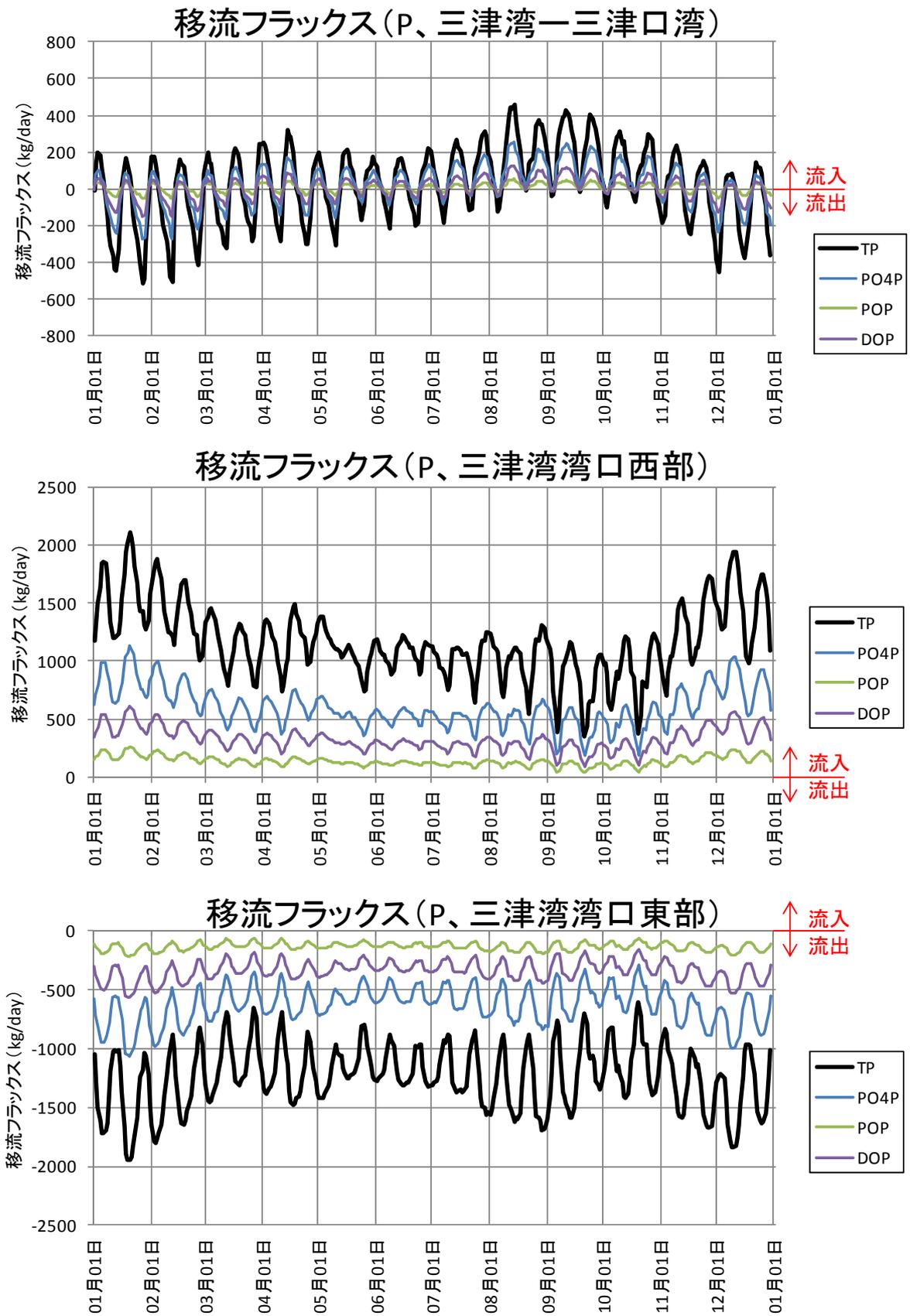


図 2.11 リンの移流フラックス

三津湾のリンの物質循環フローを図 2.12 に示す(1月および7月の平均値)。いずれも、移流による外海とのやりとりが最も多く、カキに関するフラックスと底泥への沈降・底泥からの溶出フラックスは1オーダー小さい。その他の生物や流入負荷に関するフラックスは、さらに1オーダー小さかった。また、生物および底泥に関連するフラックスは、1月より7月の方が活発であった。

カキのないボックスでは1月は底泥からの溶出はなかったが、カキ筏直下では季節に関係なく溶出があった。溶出量を単位面積あたりに換算すると、7月はカキ筏直下ではカキのないボックスの約6倍の溶出があった。カキによる排糞を除く堆積量は同等であった。これはカキのないボックスが堆積量の多い河口付近を含んでいるためと考えられる。

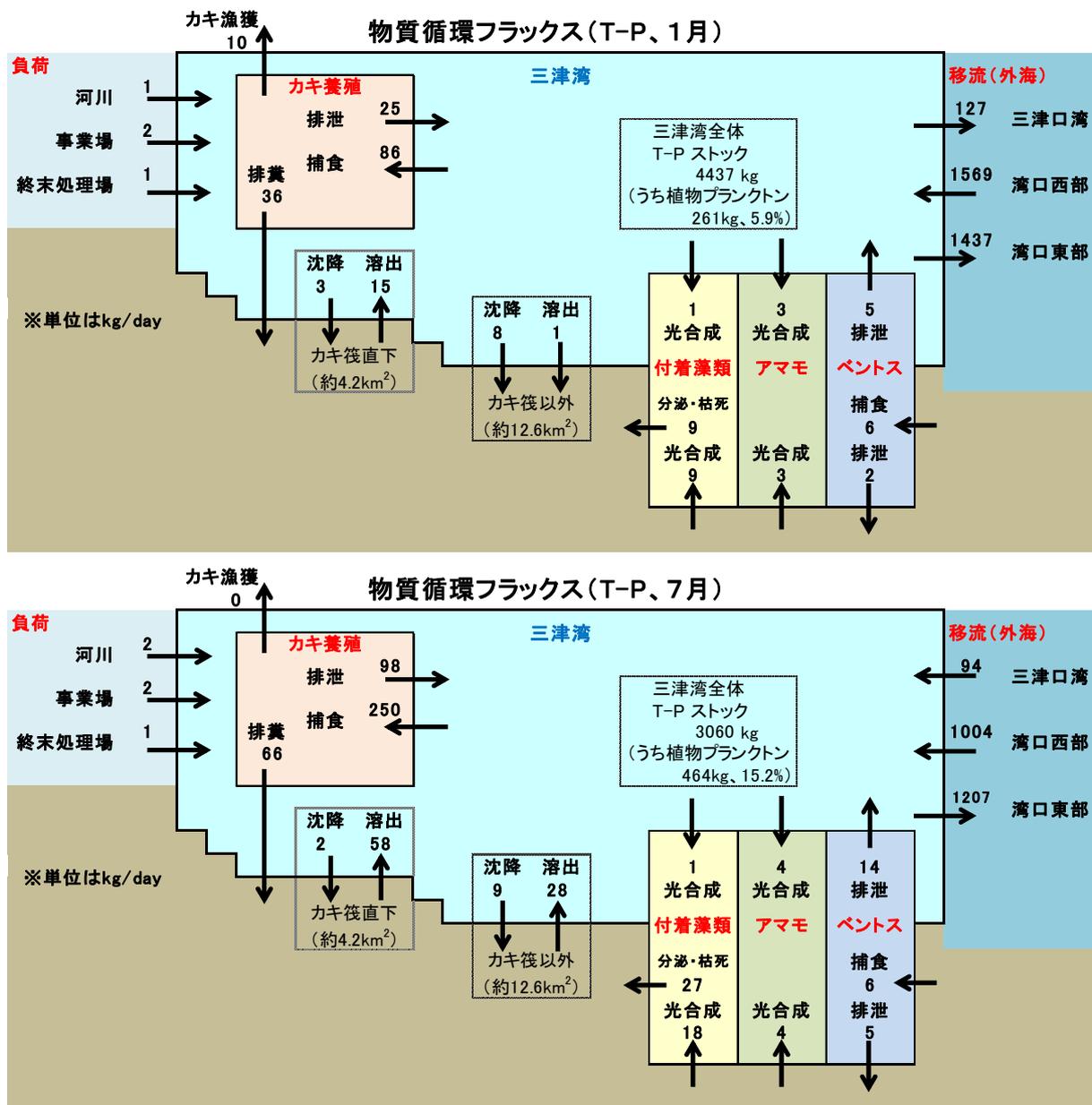


図 2.12 リンの物質循環フラックス

### 3. 物質循環モデルによる施策の検討

#### 3-1 モデルでの施策の取り扱い

地域WGによる検討結果に従って、構築した物質循環モデルで施策の効果の予測を行った。施策は「人工中層海底の設置」「耕耘+底質改善材の混合」「施肥」の3ケースである。「人工中層海底の設置」については、既往論文を参考に中層海底の効果を設定したが、冬季の堆積量増加は中層海底上で新たな底生系が形成された影響があると考えられるため、冬季の堆積量増加を考慮するケース、考慮しないケースの2通りを計算した。

いずれの施策でも、カキ筏があるうち、湾奥の「ボックス7のみ」で施策を行った場合、「カキボックス全て(ボックス3~12)」で施策を行った場合、2通りの計算を行った。

表 3.1 施策の計算条件

ケース1：人工中層海底の設置			
方法	カキ筏直下に人工中層海底を設置		
効果	カキ筏からの沈降有機物（排糞）の捕捉		
設定方法	カキ筏からの排糞量を底泥に堆積（移行）させる際に、中層海底による捕捉をモデル外除去／追加として係数をかけて増減（カキからの排糞量自体は変化させない）		
係数		ケース1①	ケース1②
		冬季堆積量増加あり	冬季堆積量増加なし
	12～5月	1.29倍	1.00倍
	6、11月	0.94倍	0.94倍
	7～10月	0.906倍	0.906倍
期間	計算全期間で設定		
設定根拠	山本ら(2009)		
ケース2：耕耘+底質改善材の混合			
方法	底質に焼成カキ殻を1:1で混合		
効果	硫化水素の吸着、リンの溶出削減		
設定方法	①底泥間隙水中の硫化水素濃度を0mg/Lとする ②リンの溶出を54%削減		
期間	計算全期間で設定		
設定根拠	浅岡ら(2011)、山本・日比野(2009)、広島大学HP		
ケース3：施肥（施策による変化が微小であったため、省略）			
方法	カキ殻を筏に付けて海域に投入し、付着物・貝柱を分解させる		
効果	海域への直接負荷		
設定方法	筏1つあたりカキ200個分の負荷を算出 →T-N 1.50g/メッシュ/day、T-P 0.17g/メッシュ/day		
期間	5月1日と10月15日に投入し、30日間効果が持続		
設定根拠	地域WGによる分析結果		

### 3-2 ケース 1・人工中層海底の設置

施策により、変化が現れると考えられるのは、以下の項目である。

- ・設定ボックスの底泥濃度
- ・設定ボックスの底泥からの溶出量、底泥への沈降量
- ・設定ボックスの生物量（カキ、付着藻類、ベントス）変化
- ・設定ボックス付近の水質濃度
- ・周辺ボックスとのフラックス

本モデルでは、カキからの排糞を直接底泥へ堆積させているが、カキからの排糞量は変化させず、それを底泥へ堆積させる際に堆積量を係数倍することで中層海底の効果を表現した。実際には、中層海底設置後十分な時間が経過すると、中層海底上に底生系が形成され、底泥や海水と物質のやり取りが行われることが予想される。また、中層海底で捕捉された排糞が巻き上げられることは考慮していない。

ケース 1 ①では、冬季～春季のカキ排糞による底泥への供給量を 1.29 倍としたが、これは人工中層海底上で長期間沈降物を捕食することによって形成された生態系の影響が大きいものと考えられる。したがって、設置直後は削減効果のみが見込まれるものと思われるため、冬季～春季を 1.00 倍（現況と同じ）としたケース 1 ②も計算した。

図 3.1 に、ボックス 7 で底泥へ供給される堆積量（炭素換算）を示す。ケース 1 ①では、冬季～春季はカキの排糞量に対して底泥へ供給される量を 1.29 倍にしたため増加している。夏季～秋季にかけては、排糞量を 0.94 倍、0.906 倍にしたために、減少している。

図 3.2 に、ボックス 7 における生物量の時系列と変化量を示す。生物量は、ケース 1 ①では増加、ケース 1 ②では減少する傾向にある。変化は最大で 2% 程度である。カキは、ケース 1 ①をカキ BOX 全てで行った場合、1% ほど増加した。

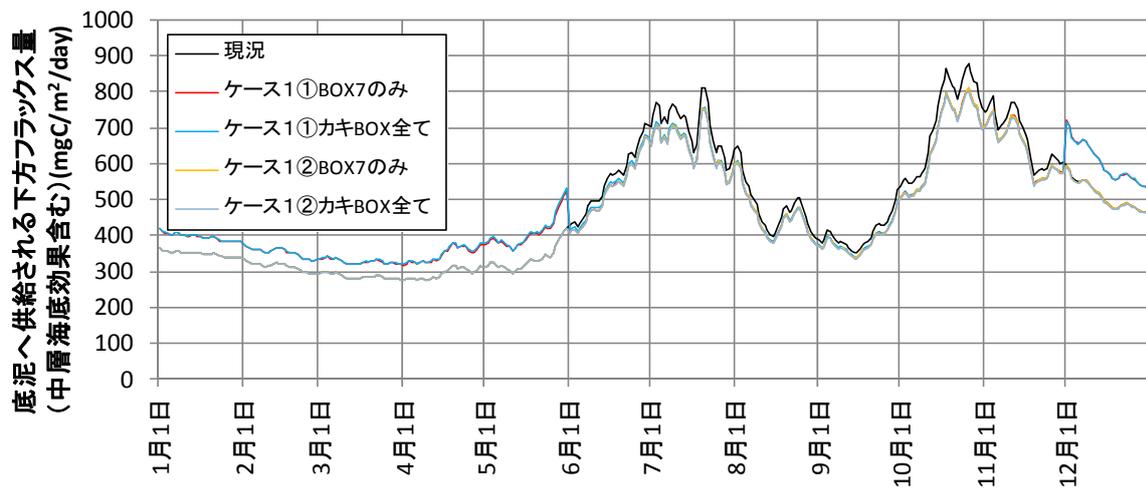
ボックス別の底泥濃度変化およびボックス 7 の溶出量の時系列変化を図 3.3～図 3.4 に示す。底泥の T-N、T-P、TOC 濃度は、ケース 1 ①では最大で 1.1% 増加、ケース 1 ②では最大で 0.8% 減少した。ボックス 7 のみの施策でも、他ボックスの底泥濃度はわずかながら上昇した。溶出量、酸素消費速度は、ケース 1 ①では現況に比べて 5 月まで増加（T-N 溶出量が最大 10%、T-P 溶出量が最大 12%、酸素消費速度が最大 7% 増）したが、夏季は 2% 程度の減少に転じた。ケース 1 ②では、5 月までは現況と計算条件が同じであるため差はなかったが、夏季は 4% 程度減少した。

図 3.5 に、ボックス 7 直上の水質濃度の時系列変化を示す。水質に大きな変化はなかった。

三津湾全体の T-P の物質循環フラックスの変化を、図 3.6 に示す。ここでは、現況とカキボックス全てのケースを比較した。カキの増加により、カキに関するフラックスに大きな変化はみられなかったが、夏季には中層海底の捕捉効果によって、排糞が底泥へ

沈降する量は減少した。

図 3.7 には、ボックス7に着目した T-P の物質循環フラックスの変化を示す。ここでは、現況とボックス7のみのケースを比較した。中層海底設置の影響で、底泥からの溶出が増加した。また、7月はカキ周りのフラックスも増加するとともに、周辺ボックスとの移流量も、水質濃度の上昇に伴って増加した。



※「BOX7のみ」の結果は、「カキBOX全て」の結果と重なっている

※「現況」の5月末までの結果は、「ケース1②」の2線と重なっている

図 3.1 ボックス7で底泥へ供給される、カキの排糞による堆積量（中層海底効果係数考慮）

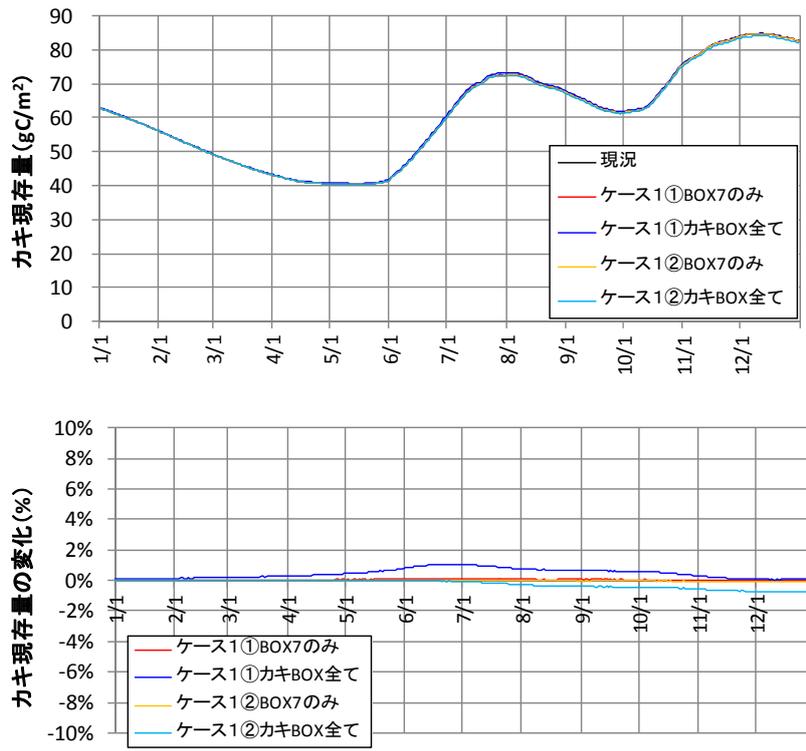


図 3.2(1) ボックス7のカキ現存量 (上) と施策による変化率 (下)

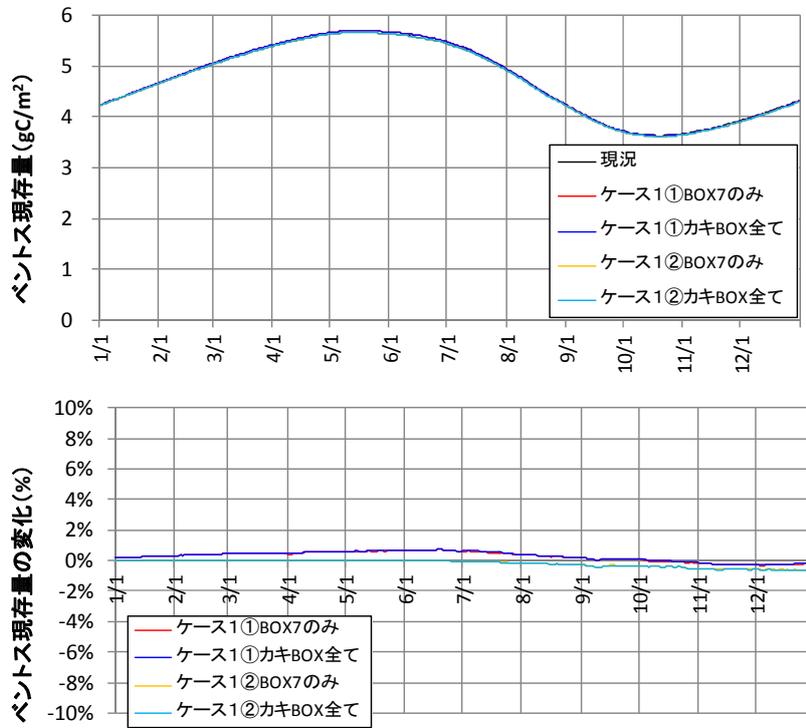


図 3.2(2) ボックス7のベントス現存量 (上) と施策による変化率 (下)

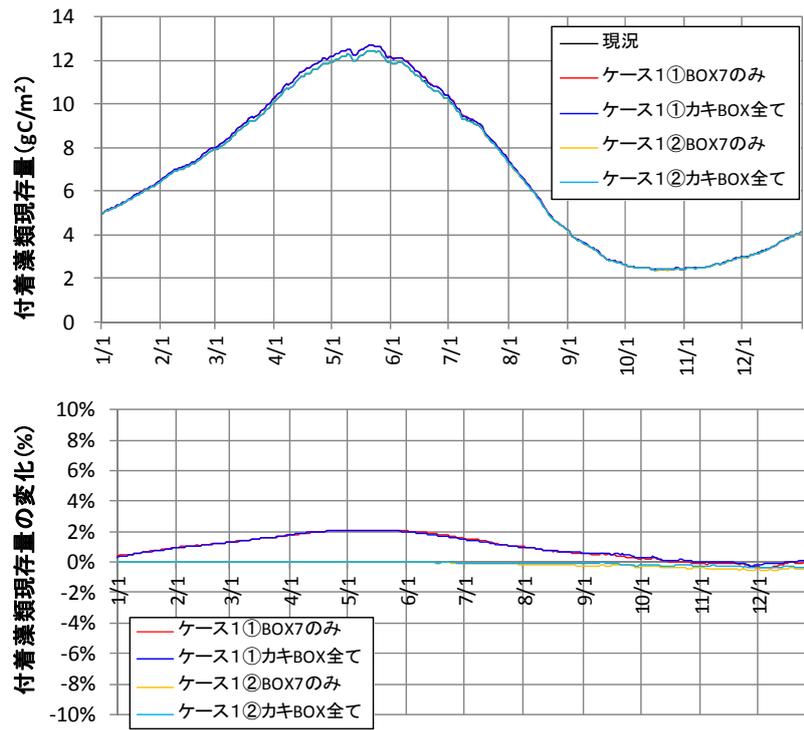


図 3.2(3) ボックス7の付着藻類現存量（上）と施策による変化率（下）

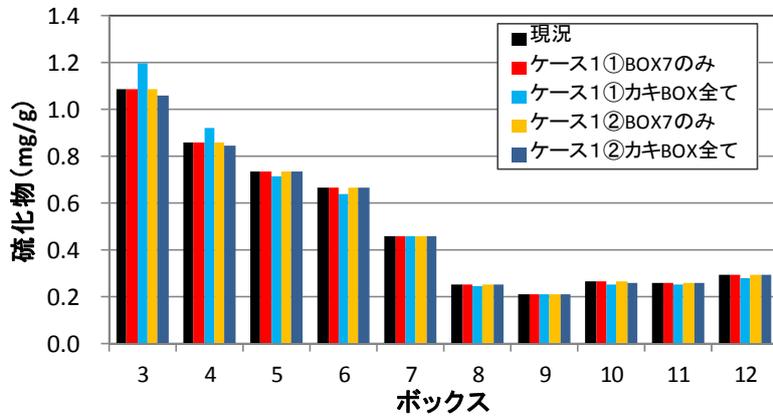
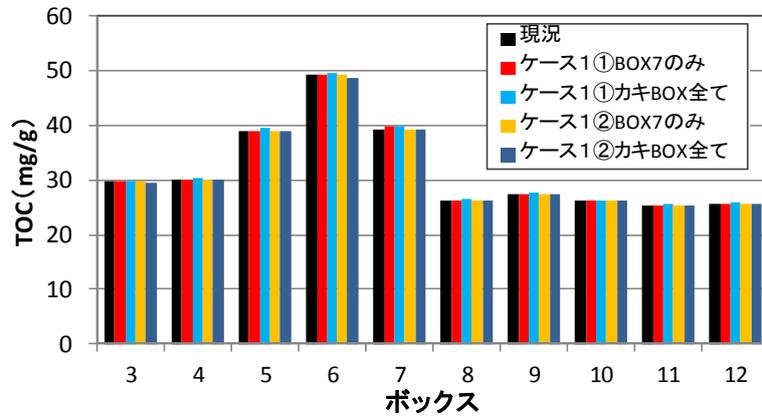
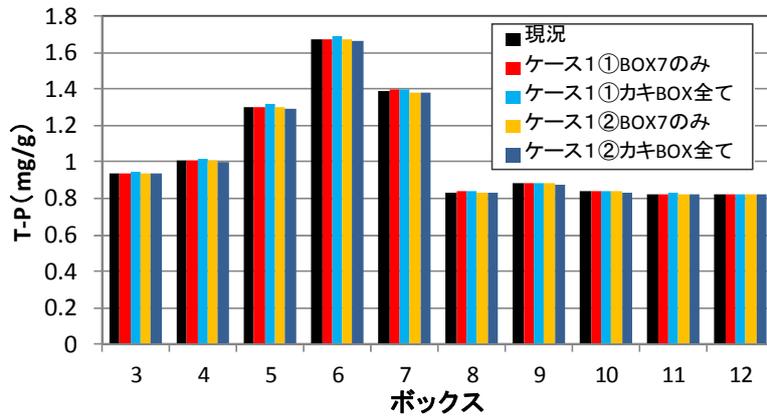
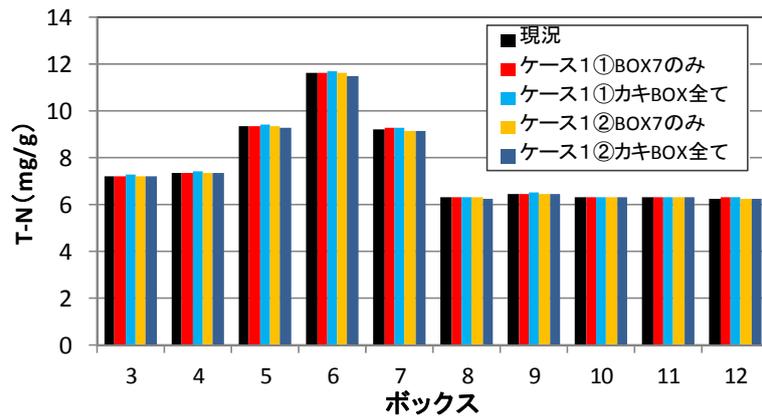
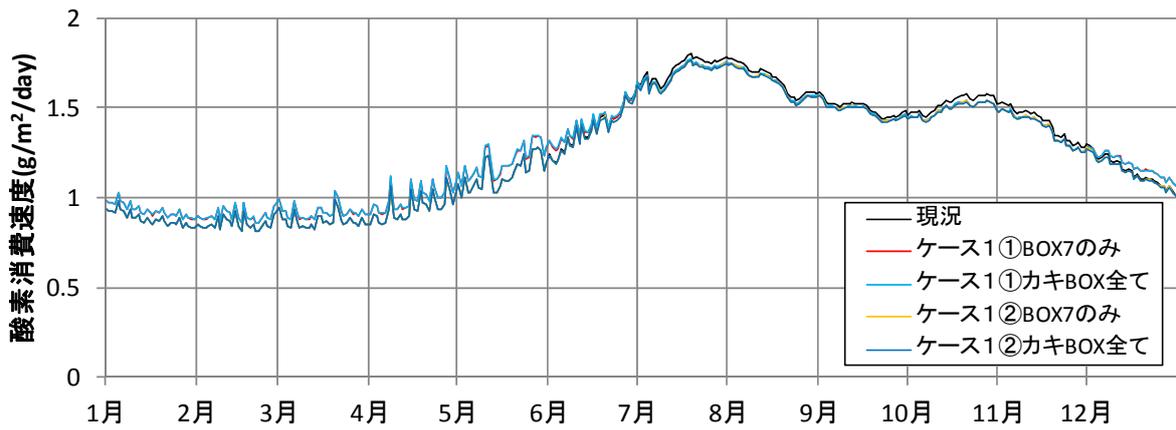
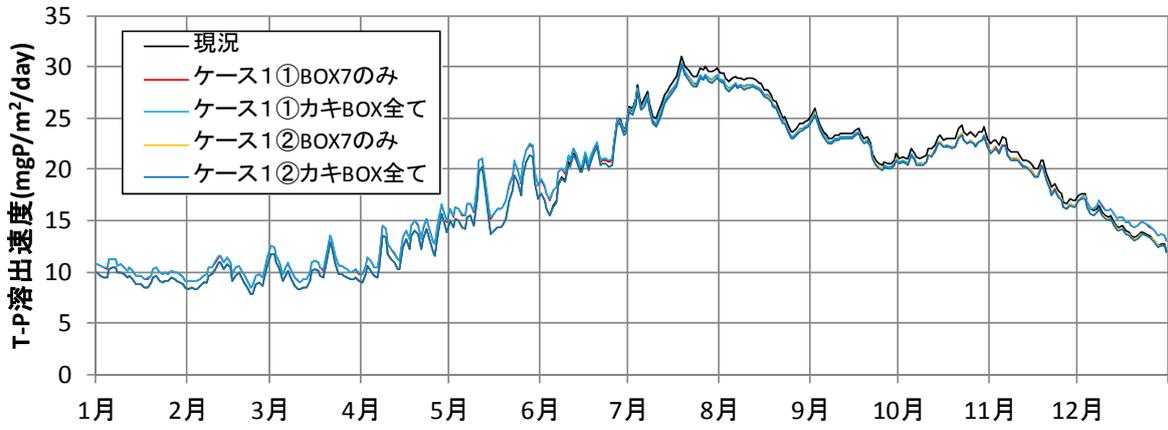
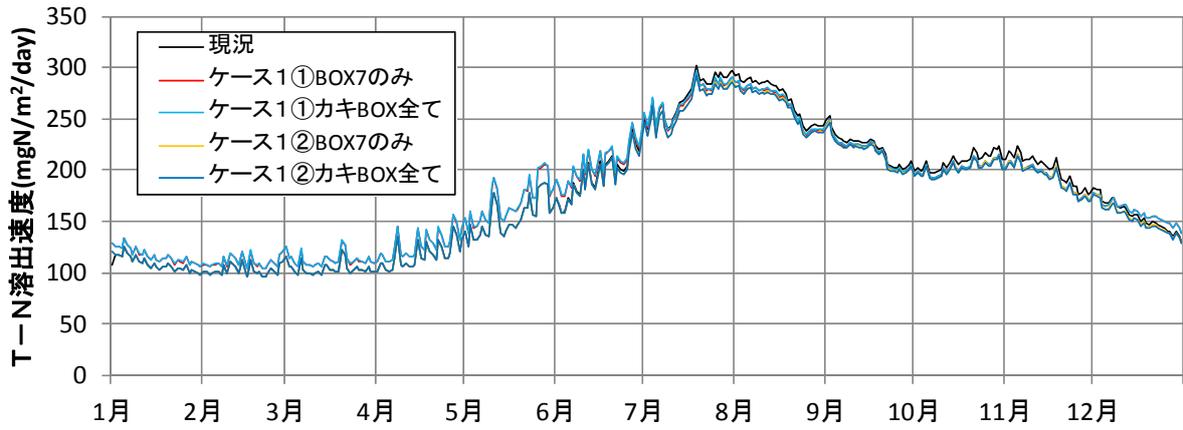
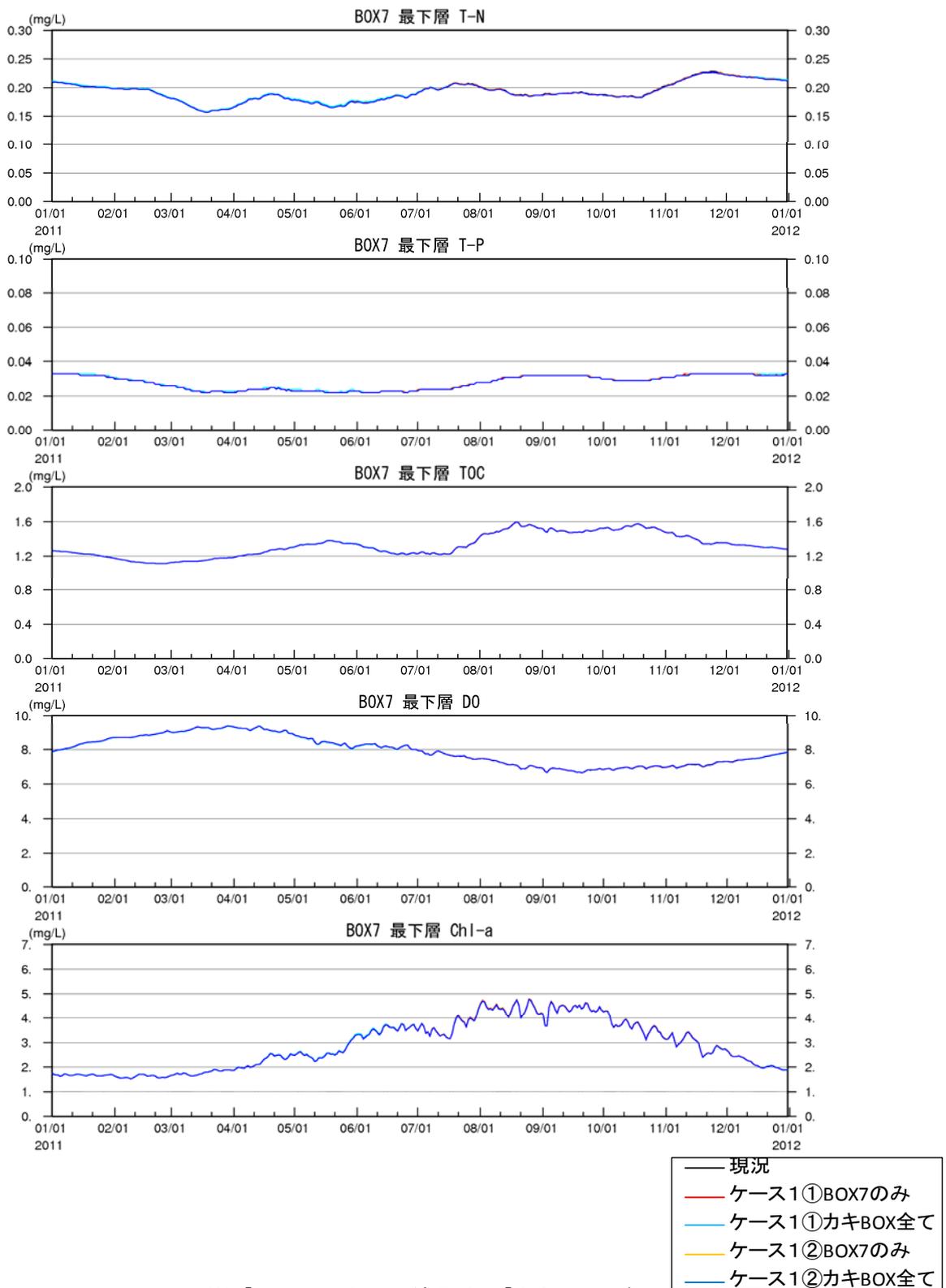


図 3.3 底泥濃度の変化 (ボックス別、8月平均値)



※「BOX7のみ」の結果は、「カキBOX全て」の結果と重なっている

図 3.4 ボックス7の底泥からの溶出量の変化



※「BOX7のみ」の結果は、「カキBOX全て」の結果と重なっている

図 3.5 ボックス7直上の水質濃度の時系列変化

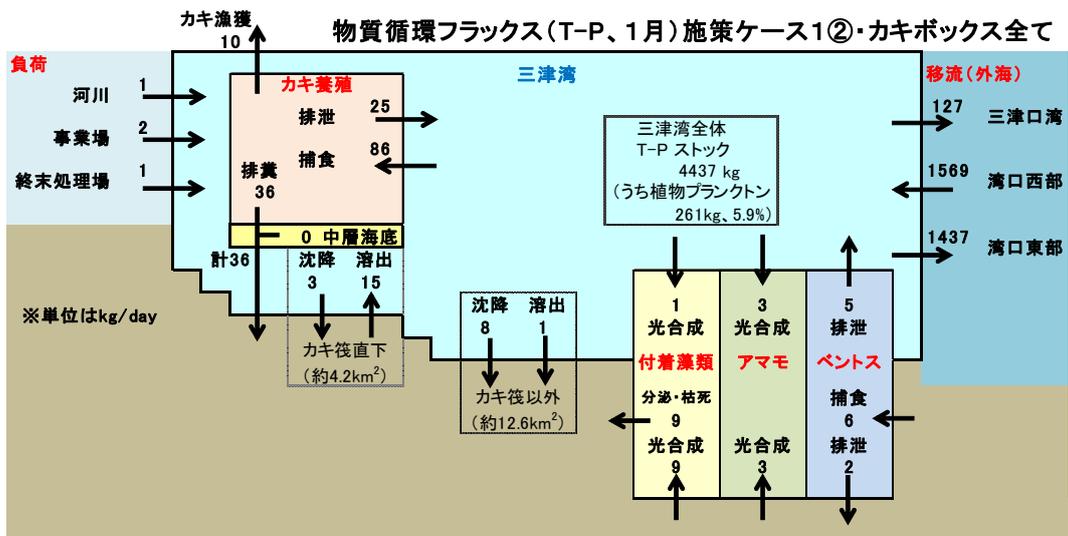
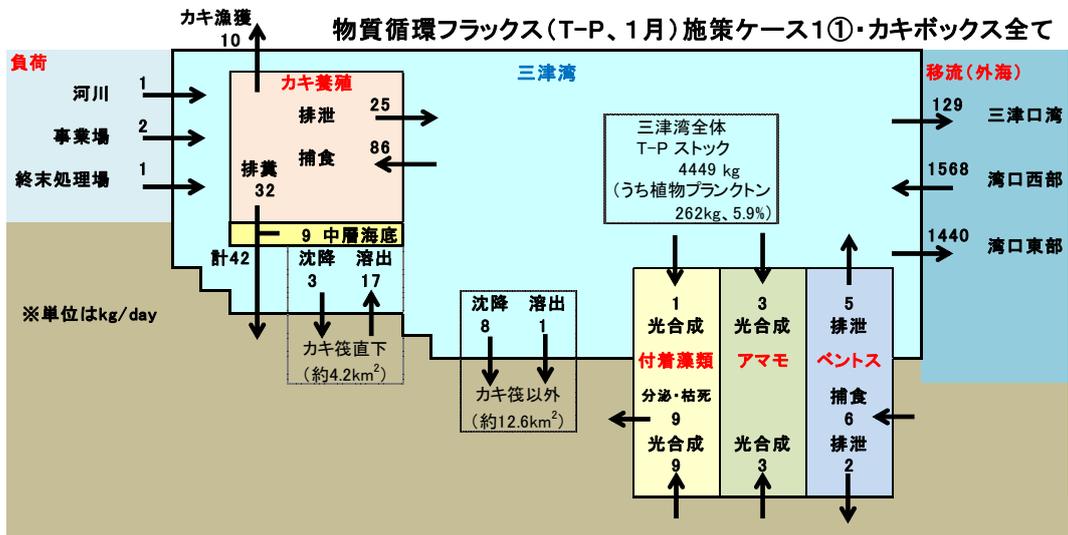
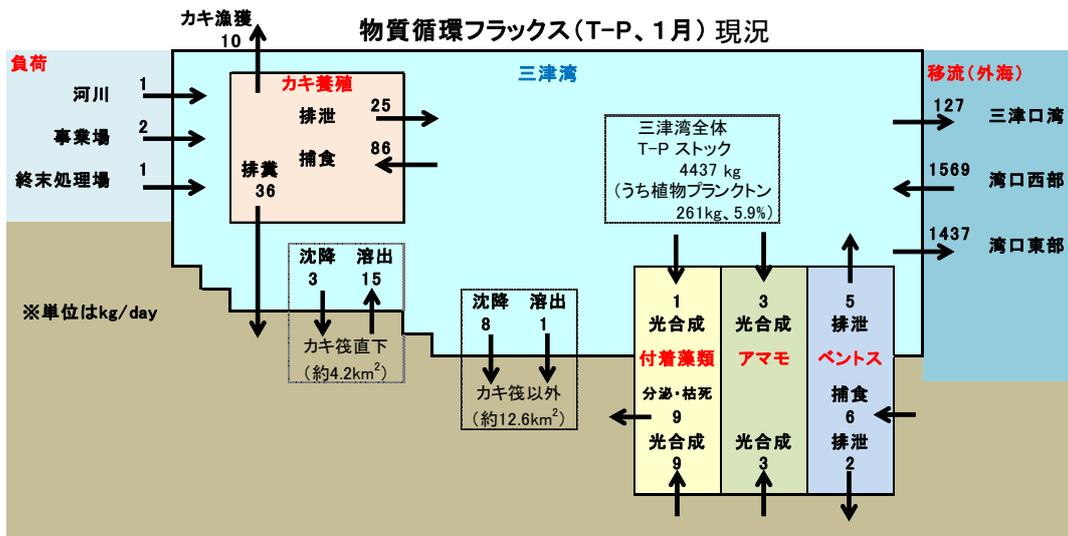


図 3.6(1) T-P の物質循環フラックス (1月、現況・施策ケース1 (カキボックス全て) 比較)

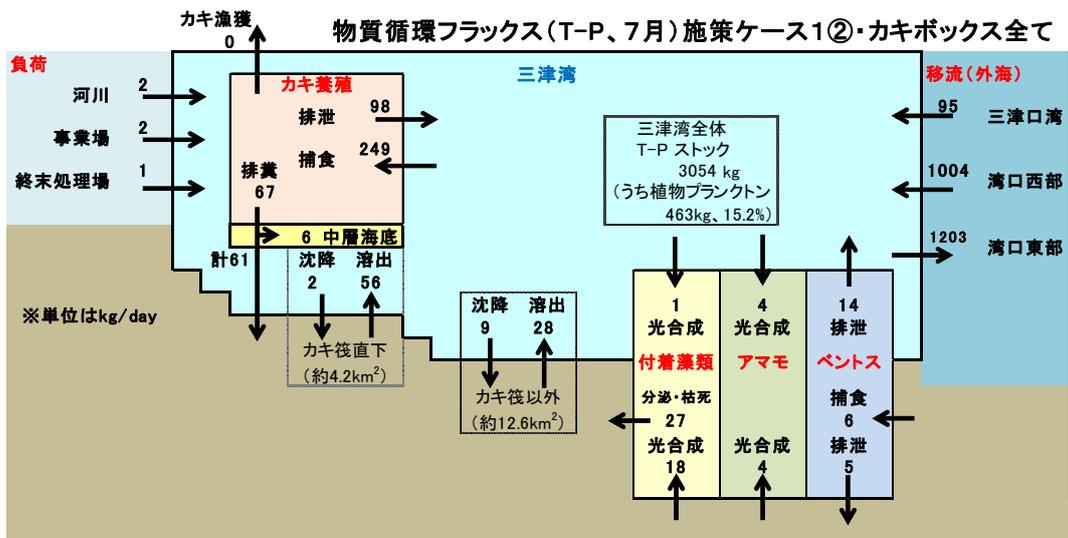
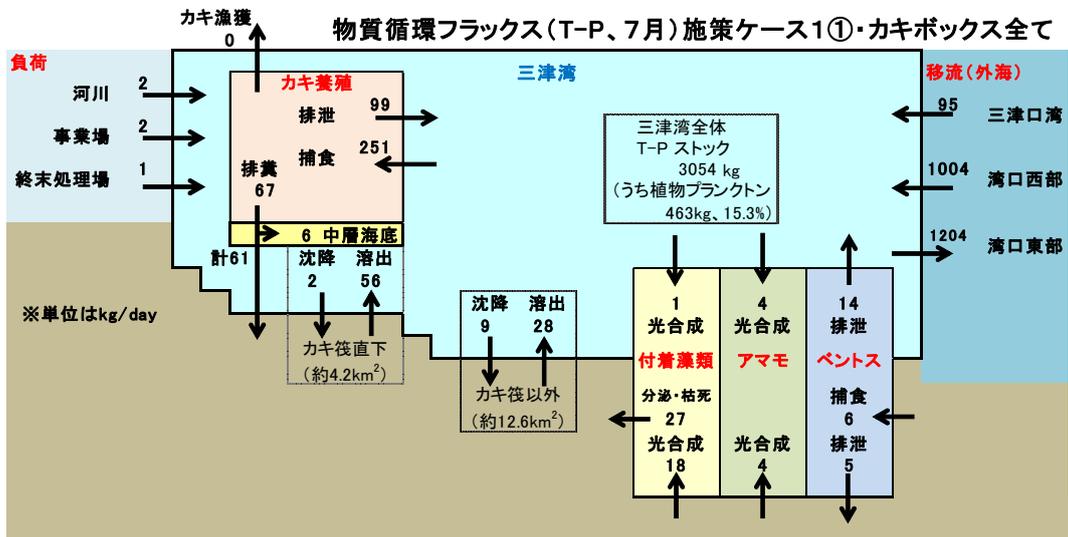
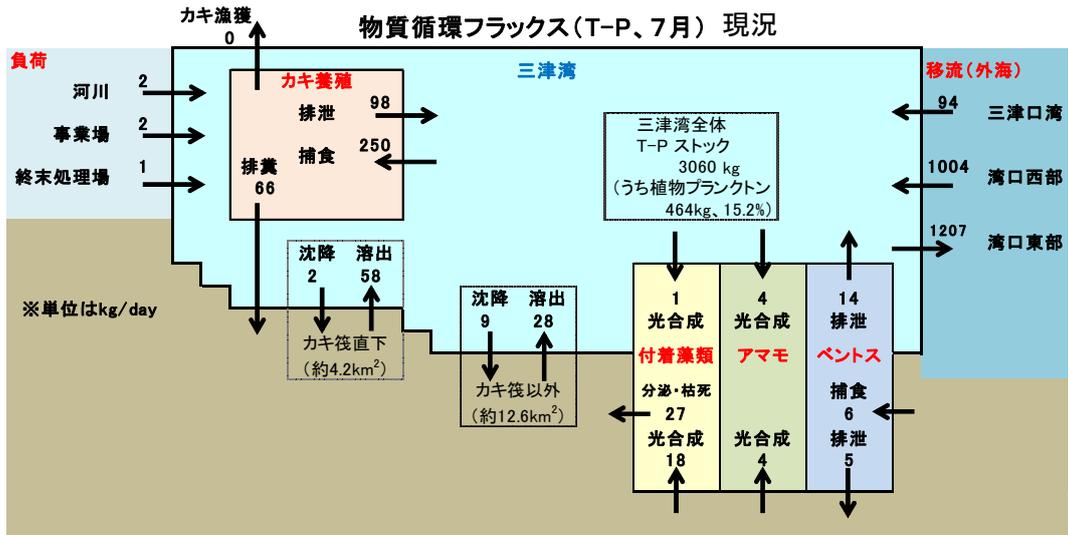
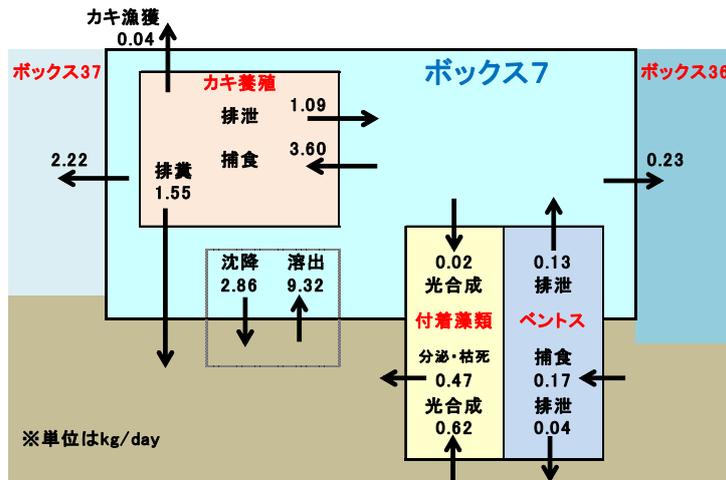
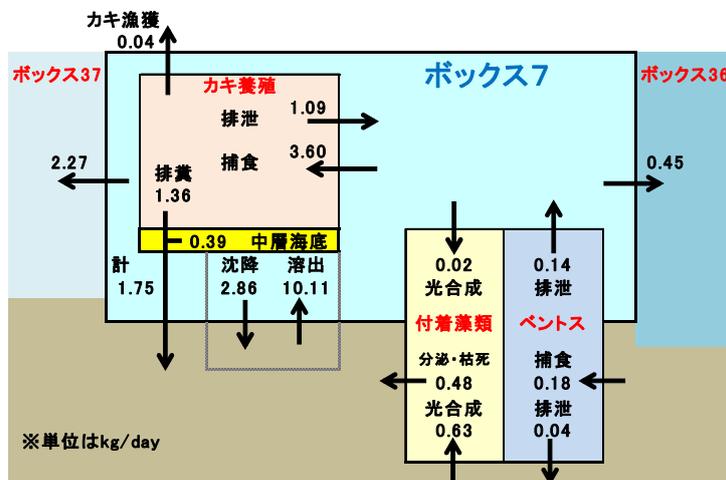


図 3.6 (2) T-P の物質循環フラックス (7月、現況・施策ケース1 (カキボックス全て) 比較)

物質循環フラックス(T-P、1月)現況



物質循環フラックス(T-P、1月)施策ケース1①・ボックス7のみ



物質循環フラックス(T-P、1月)施策ケース1②・ボックス7のみ

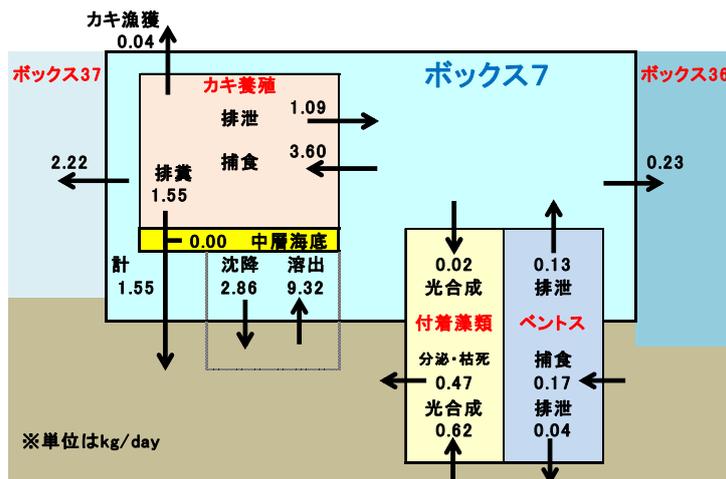
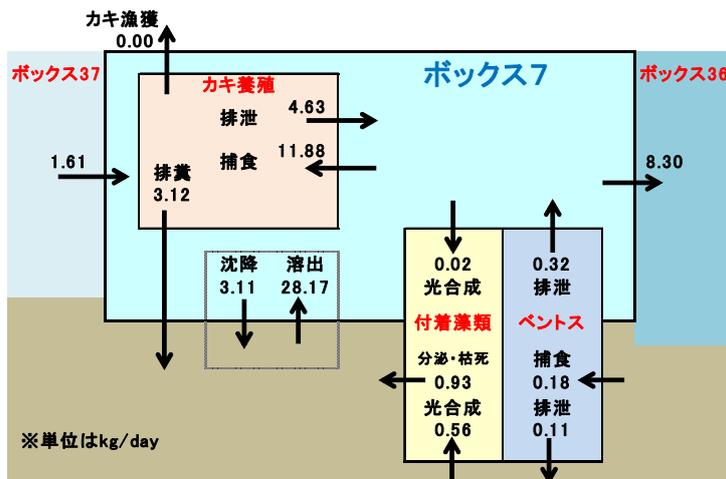
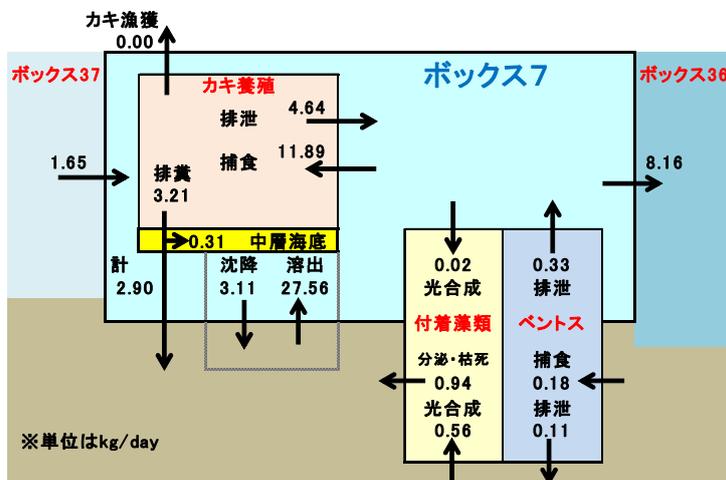


図 3.7(1) ボックス7の T-P の物質循環フラックス (1月、現況・施策ケース1 (ボックス7のみ) 比較)

物質循環フラックス(T-P、7月) 現況



物質循環フラックス(T-P、7月) 施策ケース1①・ボックス7のみ



物質循環フラックス(T-P、7月) 施策ケース1②・ボックス7のみ

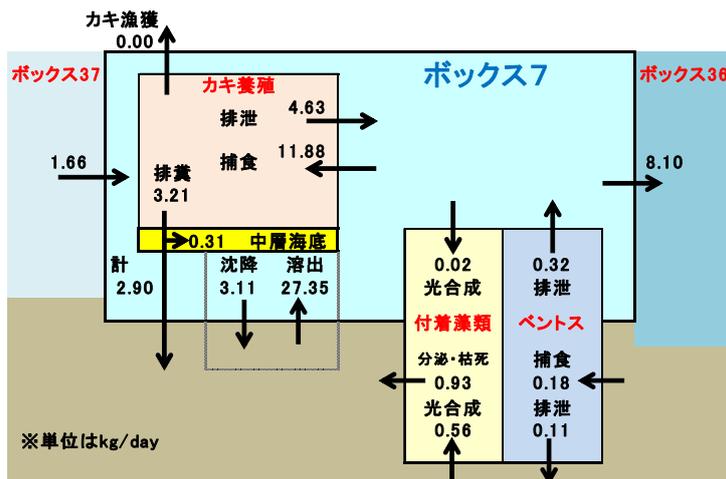


図 3.7(2) ボックス7の T-P の物質循環フラックス (7月、現況・施策ケース1 (ボックス7のみ) 比較)

### 3-3 ケース 2 ・ 耕耘＋底質改善材の混合

「耕耘＋底質改善材の混合」の施策により、変化が現れると考えられるのは、以下の項目である。

- ・ 設定ボックスの底泥濃度
- ・ 設定ボックスの底泥からの溶出量
- ・ 設定ボックス付近の水質濃度
- ・ 設定ボックスの底生生物量の変化
- ・ 周辺ボックスとのフラックス

本検討では、耕耘＋底質改善材の混合を、底泥間隙水中の硫化水素濃度を 0mg/L とすること、底泥からのリンの溶出を 54%削減することで表現した。なお、現在のモデルには、硫化水素による生物の死亡は、情報が不足していることもあり考慮していない。また、耕耘による底泥への酸素供給も考慮していない。

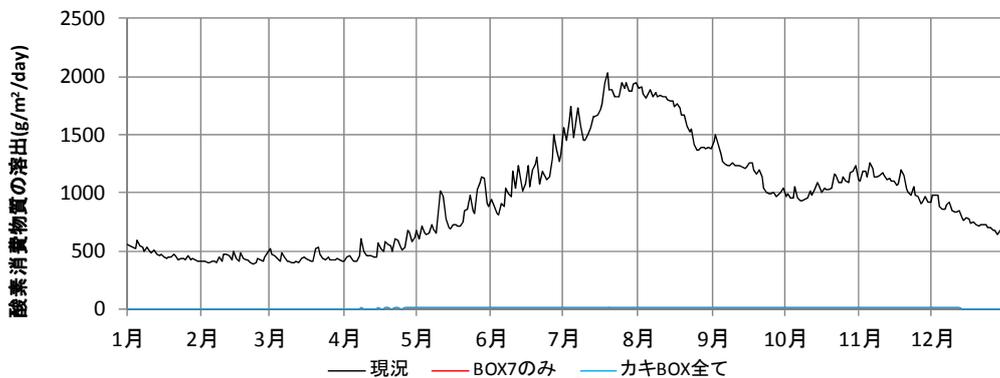
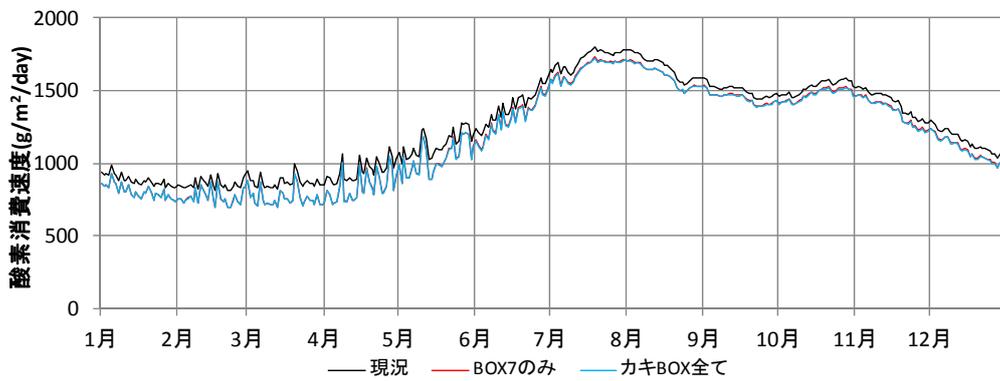
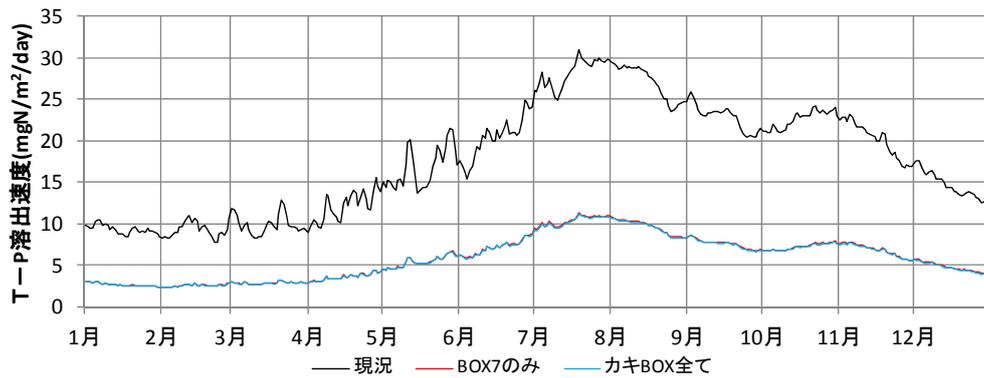
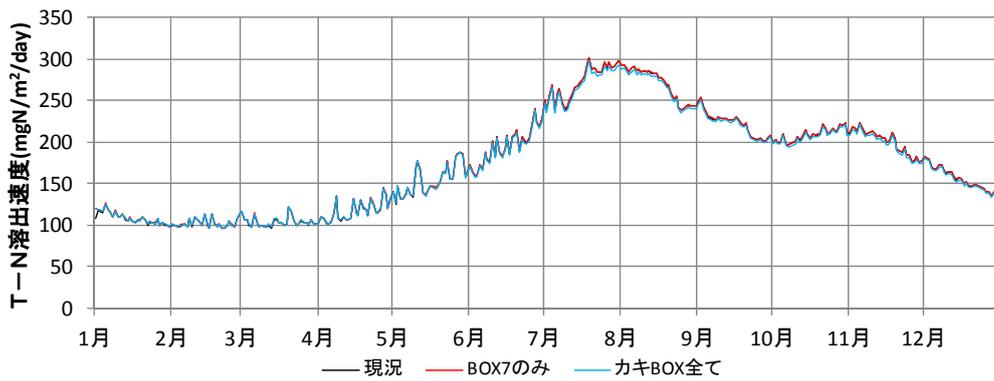
ボックス 7 の底泥からの溶出量の変化を、図 3.8 に示す。リンの溶出量を削減し、硫化水素濃度をゼロにしたことによって、リンの溶出速度は大きく減少し、酸素消費速度も春季には 15%程度減少した。

図 3.9 に 8 月の底泥濃度を示す。T-N、T-P、TOC 濃度は、施策の有無によって最大 1%程度減少した。硫化物は、施策を行うことでほぼ 0.1mg/g 未満に減少した。

図 3.10 に、ボックス 7 の生物量の変化を示す。カキ、ベントスはわずかに減少する傾向にあり、付着藻類は増加する傾向にあった。

三津湾全体のリンの物質循環フラックスの変化を、図 3.11 に示す。ここでは、現況とカキボックス全てのケースを比較した。リンの溶出を削減したために、カキ筏直下からの溶出量は大きく減少した。それに伴い、三津湾から湾外への移流量も減少した。図 3.12 には、ボックス 7 に着目した T-P の物質循環フラックスの変化を示す。ここでは、現況とボックス 7 のみのケースを比較した。溶出が減少した影響は、移流量の変化に現れている。

なお、水質濃度は、リンの溶出減少により、T-P 濃度、Chl-a 濃度がわずかに減少した。



※「BOX7のみ」の結果は、「カキBOX全て」の結果と重なっている

図 3.8 ボックス7の底泥からの溶出量の変化

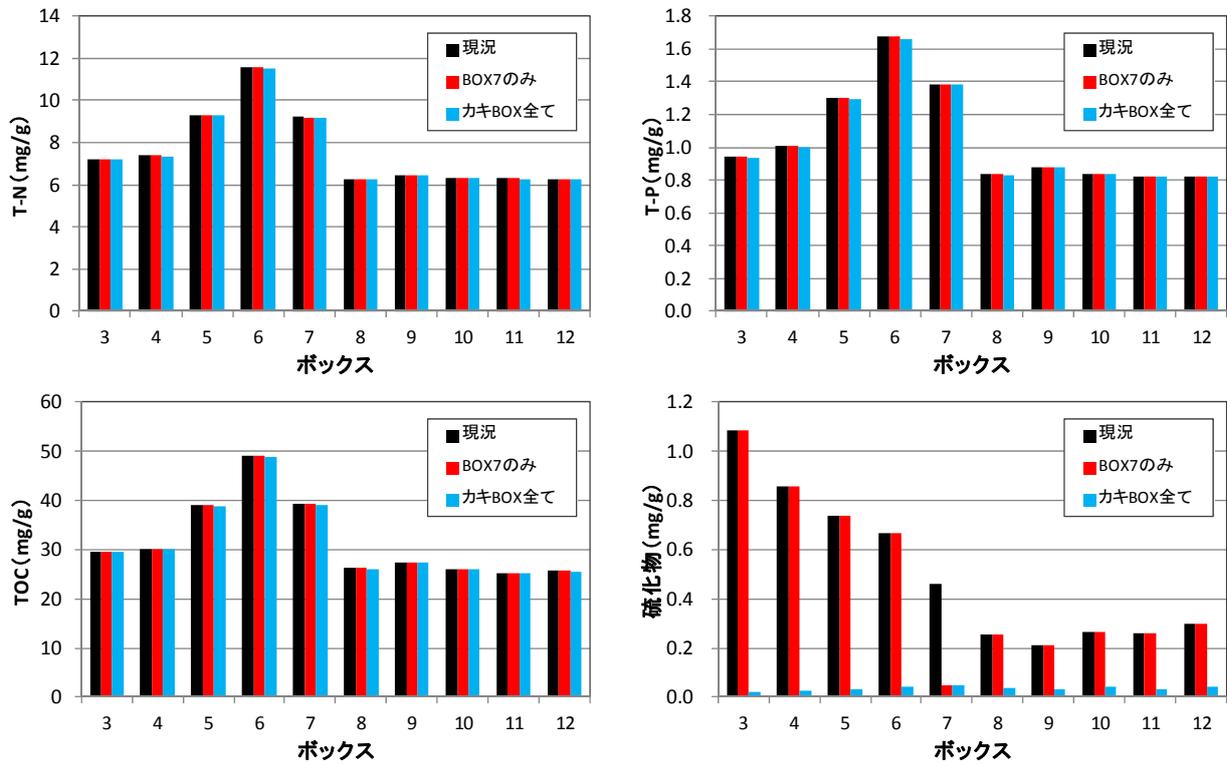


図 3.9 底泥濃度の変化 (ボックス別、8月平均値)

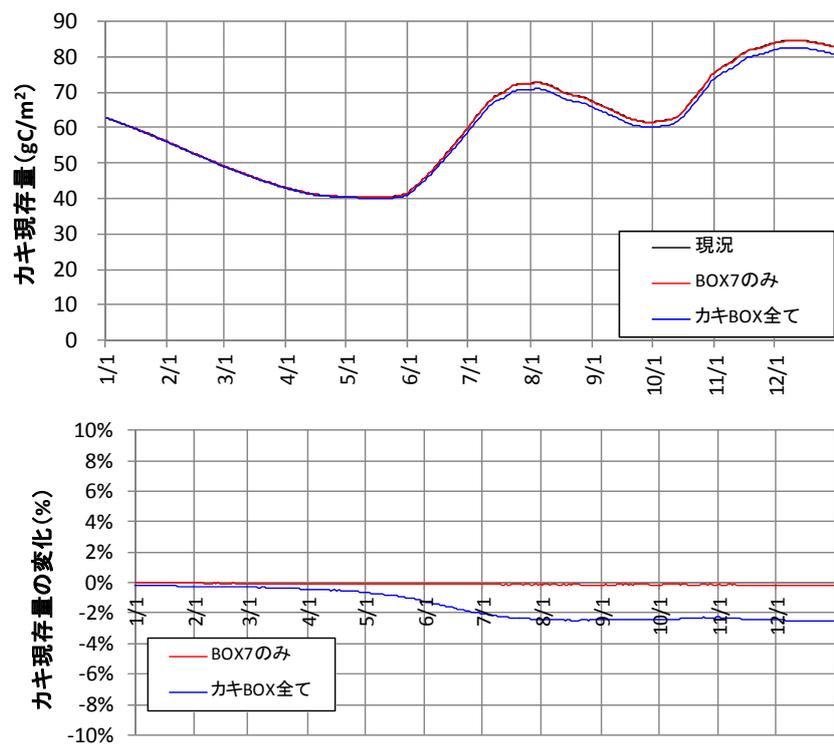


図 3.10(1) ボックス7のカキ現存量 (上) と施策による変化率 (下)

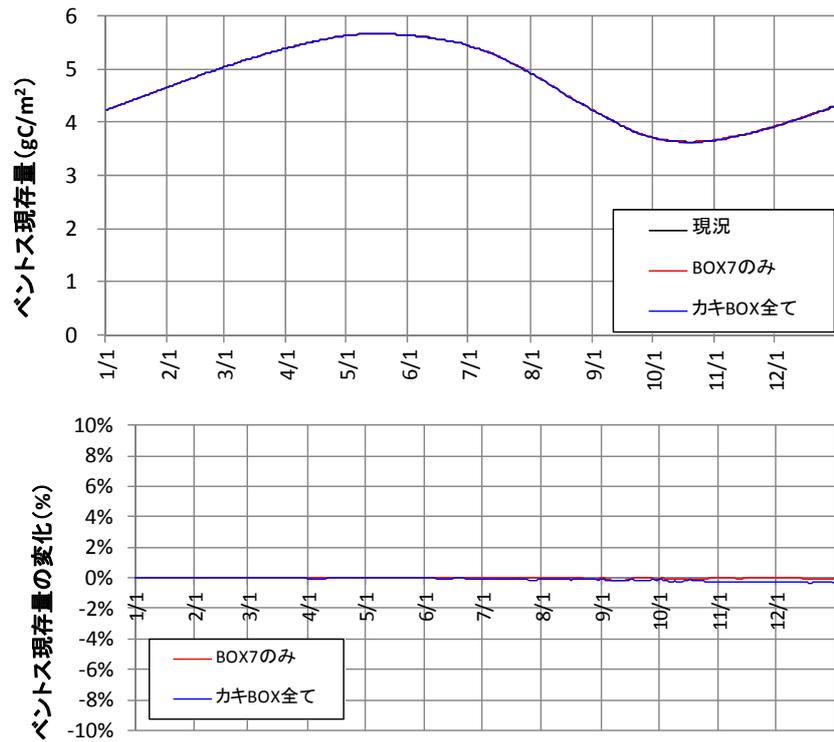


図 3.10(2) ボックス7のベントス現存量 (上) と施策による変化率 (下)

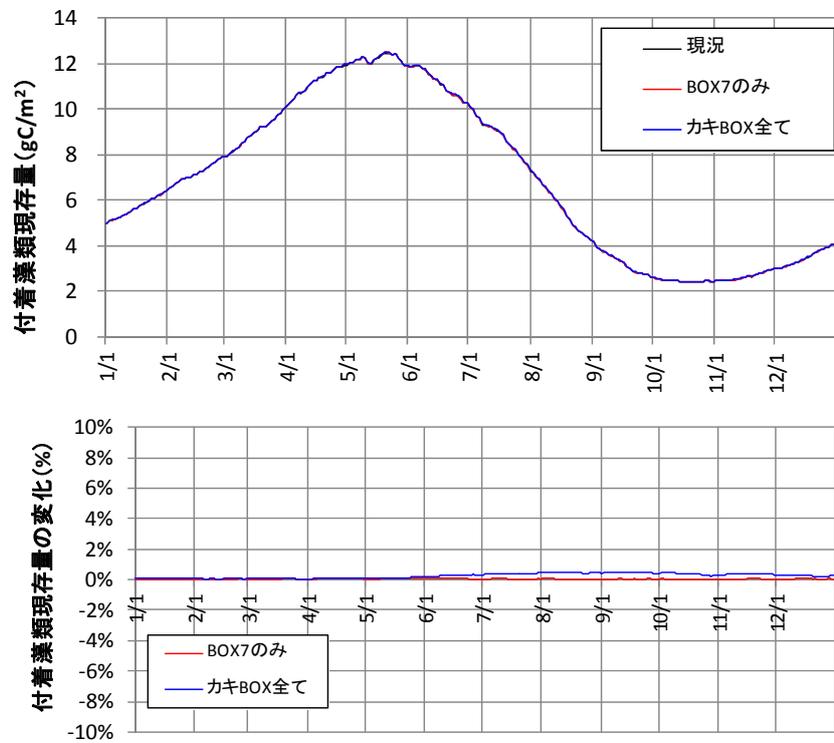


図 3.10(3) ボックス7の付着藻類現存量 (上) と施策による変化率 (下)

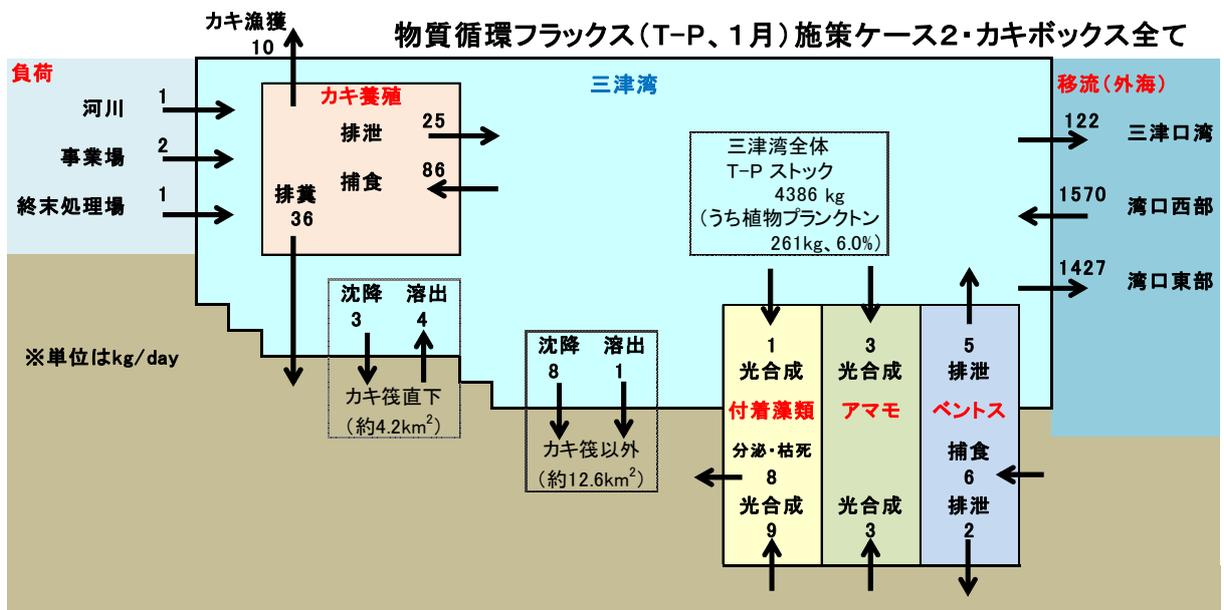
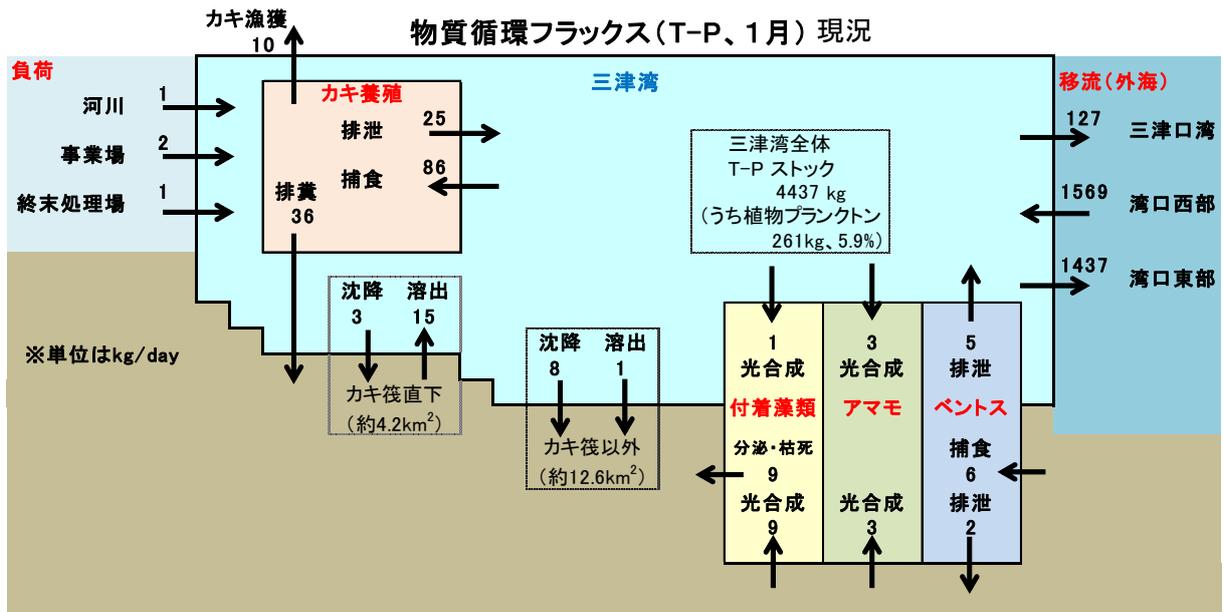


図 3.11(1) リンの物質循環フラックス (1月、現況・施策ケース1 (カキボックス全て) 比較)

現況

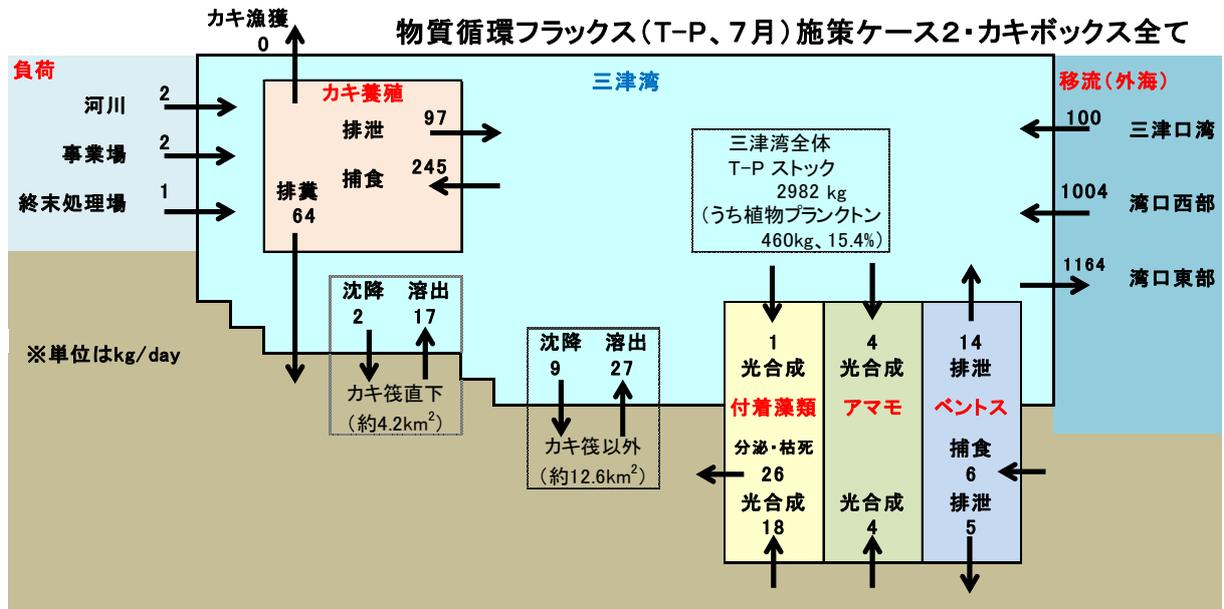
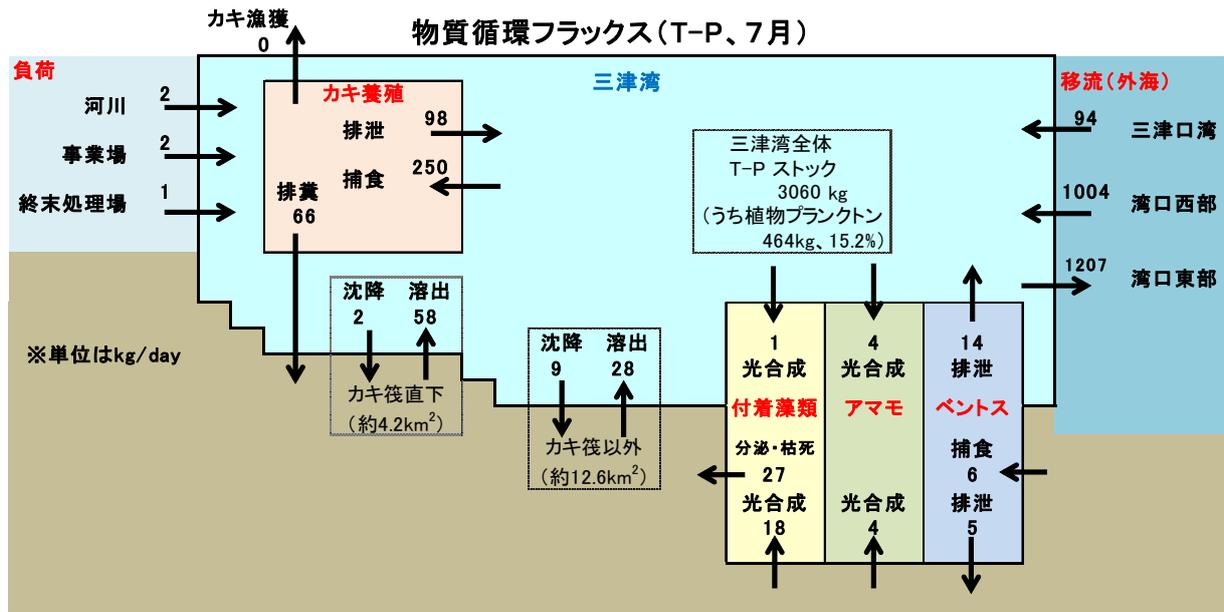
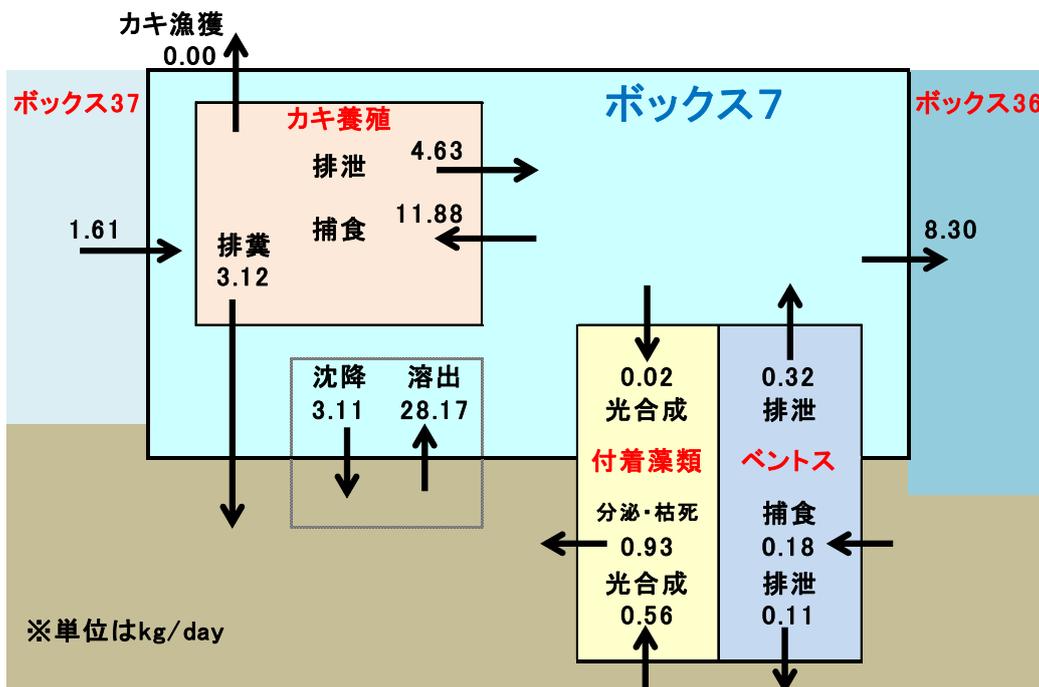


図 3.11(2) リンの物質循環フラックス (7月、現況・施策ケース1 (カキボックス全て) 比較)



### 物質循環フラックス(T-P、7月)現況



### 物質循環フラックス(T-P、7月)施策ケース2・ボックス7のみ

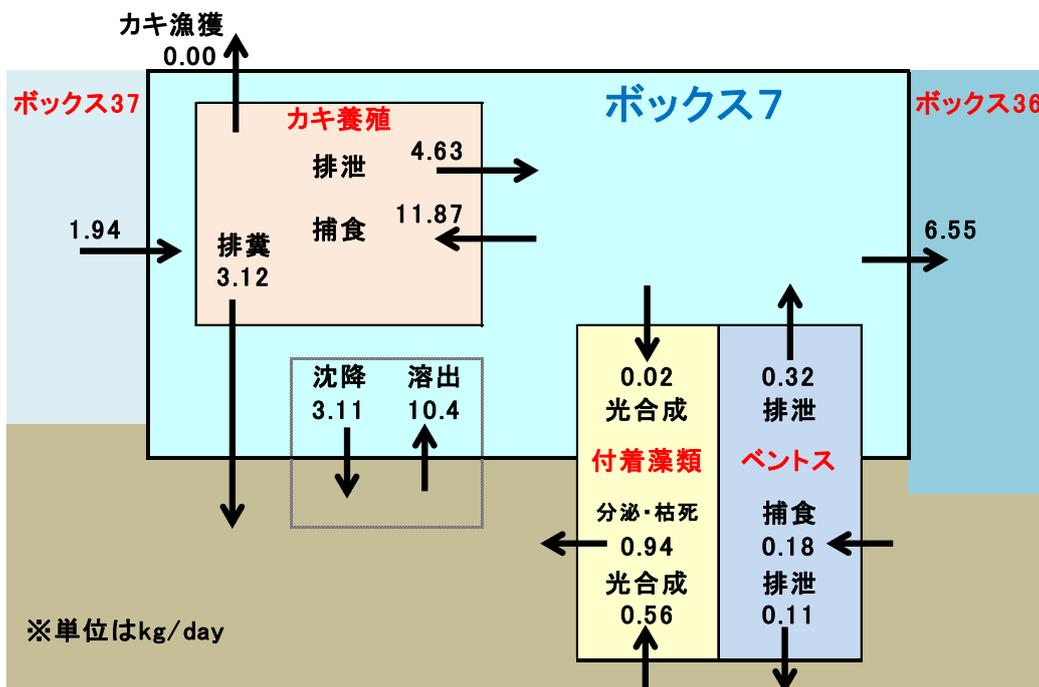


図 3.12 (2) ボックス7のリンの物質循環フラックス (7月、現況・施策ケース2 (ボックス7のみ) 比較)

#### 4. 本年度の進捗状況と今後の課題

本年度は、三津湾を対象とした流動モデル、物質循環モデルを構築し、三津湾の物質循環の状況を把握したとともに、地域検討委員会から提示された改善方策に対し、構築したモデルによって効果の検討評価を行った。

来年度は、表 4.1 に示す課題について、流動モデル、物質循環モデルのそれぞれについてさらに改良を行い、より詳細に改善方策の検討評価ができるモデルを構築するとともに、感度解析等も含めて検討する。

表 4.1 三津湾モデルの課題

<b>流動モデル</b>
・カキ筏による抵抗の考慮
<b>物質循環モデル（水質—底質結合生態系モデル）</b>
・モデルの周期定常性の改善
・パラメータの再検討
・硫化水素による底生生物の斃死の考慮
・改善方策によるベントスの種組成変化の考慮