

4. カキ礁造成による貧酸素水塊軽減効果の検証（小課題2-1-3）

4.1 カキ礁造成による貧酸素水塊軽減効果の検証

カキ礁による貧酸素水塊の影響軽減効果を評価するために、令和2年度までに構築した物質循環モデルを用いて、カキ礁の分布条件を変更した解析を実施し、得られた解析結果より、カキ礁条件による貧酸素水塊の軽減効果を検討した。

以下に、設定モデルによる解析結果より、貧酸素水塊の軽減効果を評価した。

4.1.1 方法

(1)物質循環モデルの概要

1)物質循環モデルの構造

平成31年度までに構築した物質循環モデル（図49）では、カキ礁のカキによる有機物の除去効果だけでなく、図50に示す漁場図のように佐賀県沿岸にアサリ漁場のほか、サルボウガイ漁場も広く分布することから、これら二枚貝による有機物除去効果も考慮できるように構築した。

カキ礁による貧酸素水塊の軽減には、カキ礁が摂餌および排糞、排泄を通じてモデルの最下層の物質とやり取りを行うことで関わっている。モデルに設定する各種パラメータは、本事業で得られた現地調査結果、および独立行政法人水産総合研究センター（2013）および山口ほか（2015）を参考に設定した。

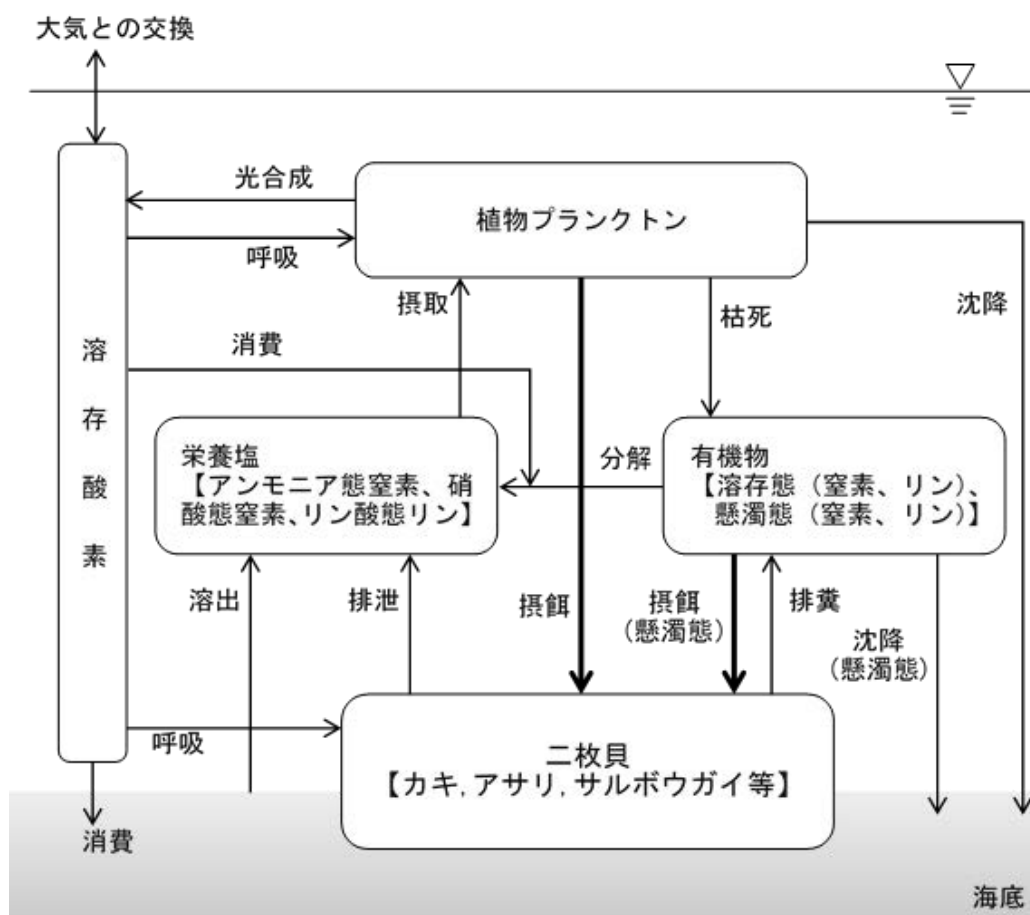


図 49 物質循環モデルのイメージ図

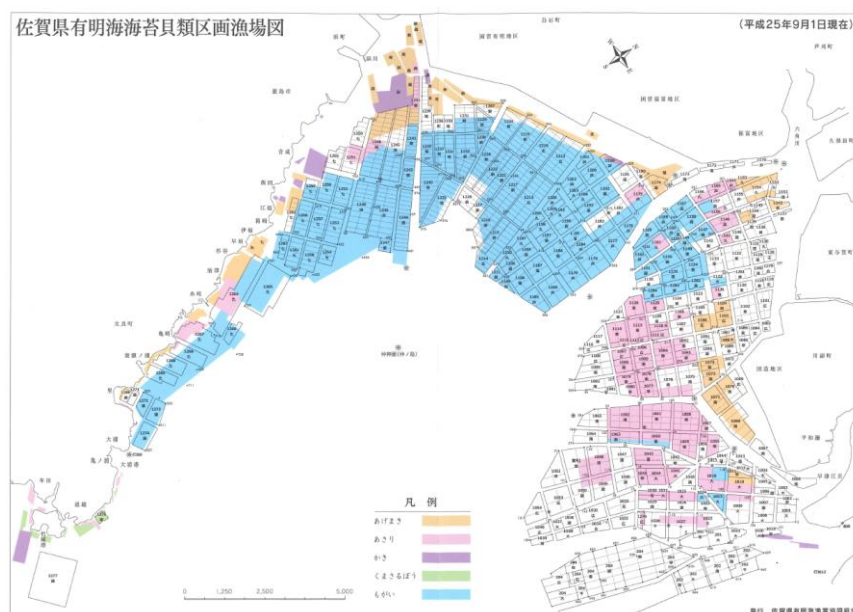


図 50 佐賀県沿岸の貝類の漁場図

2) 物質循環モデルにおけるカキの主な基礎式

カキによる摂餌や呼吸等の反応式は、独立行政法人水産総合研究センター (2013) および山口ほか (2015) を参考に設定した。

以下に主な反応式を示した。

a. 摂餌

カキによる摂餌は、カキ礁の分布場所での底層水中での植物プランクトン量 (炭素, 窒素, リン) と懸濁態有機物量 (炭素, 窒素, リン) に濾水速度を積算して算定した。濾水速度には、水温, 塩分その他、懸濁物濃度や、カキの生息密度の影響を考慮している。

$$BS_1 = (Pc + Pn + Pp + POC + PON + POP) \times FR$$

$$FR = f(T, S) \times f(SS) \times f(BSF) \times Xm^{FRc}$$

BS_1 : カキによる摂餌量、 Pc, Pn, Pp : 植物プランクトン体炭素, 窒素, リン、 POC, PON, POP : 懸濁態有機炭素, 懸濁態有機窒素, 懸濁態有機リン、 FR : カキの濾水速度、 Xm : カキの平均個体乾燥重量、 FRc : カキの濾水速度に関する定数、 $f(T, S)$: カキの濾水速度に対する水温・塩分の依存関数であり、次式で表される。

$$f(T, S) = T_{Coef} \times T + S_{Coef} \times S + cst$$

T_{Coef}, S_{Coef} : 水温, 塩分に関する係数、 cst : 定数である。 $f(SS)$: 懸濁物濃度 (SS) による摂餌制限関数であり、次式で表される。

$$f(SS) = A_{SS} \times \exp (B_{SS} \times SS)$$

A_{SS}, B_{SS} : SS による摂餌制限に関する係数である。 $f(BSF)$: 濾水速度に対するカキ密度依存関数であり、

ミカエリスメンテン型の次式で表される。

$$f(BSF) = \frac{K_{BSF}}{BSF + K_{BSF}} A_{SS}$$

K_{BSF} : カキ密度の半飽和定数である。

b. 排糞

カキによる排糞は、摂餌量 (BS_1) のうち同化しない分が、糞生産速度に従い懸濁態有機物量 (炭素, 窒素, リン) として底層に排出するとして、次式で表される。

$$BS_2 = \alpha_{bsf} \times (1 - ASSI_{bsf}) \times BS_1$$

BS_2 : カキによる排糞量、 α_{bsf} : 糞生産速度定数、 $ASSI_{bsf}$: 同化係数、 BS_1 : カキによる摂餌量である。

c. 排泄

カキによる排泄は、個体サイズおよび水温が影響するように、次式で表される。

$$BS_3 = \beta_{bsf} \times 10^{Q_{10}BS_3 \times T} \times X_m^{\beta BS_3 X_m + \alpha BS_3 X_m \times T}$$

BS_3 : カキによる排泄量、 β_{bsf} : アンモニア排出速度定数、 $Q_{10}BS_3$: アンモニア排出の温度係数、 $\alpha BS_3 X_m$: アンモニア排出と個体サイズの関係についての温度係数、 $\beta BS_3 X_m$: アンモニア排出と個体サイズの関係についての定数である。

(2)物質循環モデルによる解析

2)カキ礁の分布条件による貧酸素水塊の軽減効果の予測

上記(1)の物質循環モデルを用いて、図 51 に示すように過年度に検討されたカキ礁造成可能域を 3 エリア (ケース 1~ケース 3) に区分し、それぞれのエリアに造成するカキバイオマスを変えた条件で解析した。ケース 4 のエリアでは新たな造成可能域は設定していないが、各ケースとの比較用に浜川河口部のカキ礁バイオマスを変更したケースとして設定した。なお、カキ礁分布条件の基本となる 2007 年のカキ礁分布条件は、国立研究開発法人水産研究・教育機構 西海区水産研究所より調査結果の提供を受け設定した。

また、カキ礁の空間スケールは、計算格子サイズ (200 m×200 m) に比べて小さく、各格子によってカキ礁の密度が異なる。そこで、山口ほか (2015) を参考に、カキ礁が占める面積割合を被覆度 (0 から 1.0) で表し、各格子のカキ生物量を次式で表した。

$$\text{各格子のカキ生物量} = \text{各格子の面積 (m}^2\text{)} \times \text{被覆度} \times \text{カキ礁の平均密度 (gC/m}^2\text{)}$$

各解析ケースにおけるアサリおよびサルボウガイの設定に関しては、図 52 に示した伊藤 (2005) による 2000 年代のアサリ漁場の図よりアサリの分布域を設定し、前掲図 50 の漁場図よりサルボウガイの分布域を設定した。各生物量は、中村ほか (2003) が整理しているアサリおよびサルボウガイの生物量と漁獲量の比

率を参考に、アサリは漁獲量の約 1.5 倍 ($0.6\text{gC}/\text{m}^2$)、サルボウガイは漁獲量の約 4.5 倍 ($14.4\text{gC}/\text{m}^2$) を設定した。漁獲量は、第 55 次佐賀県農林水産統計年報（九州農政局, 2009）の報告値を用いた。なお、カキ礁内には、カキ以外の二枚貝も現地調査により存在することが確認されていることから、二枚貝としてアサリを設定し、生物量は、調査結果よりカキ生物量の 15% を設定した。

実施する計算ケース一覧は、表 10 のとおりである。。

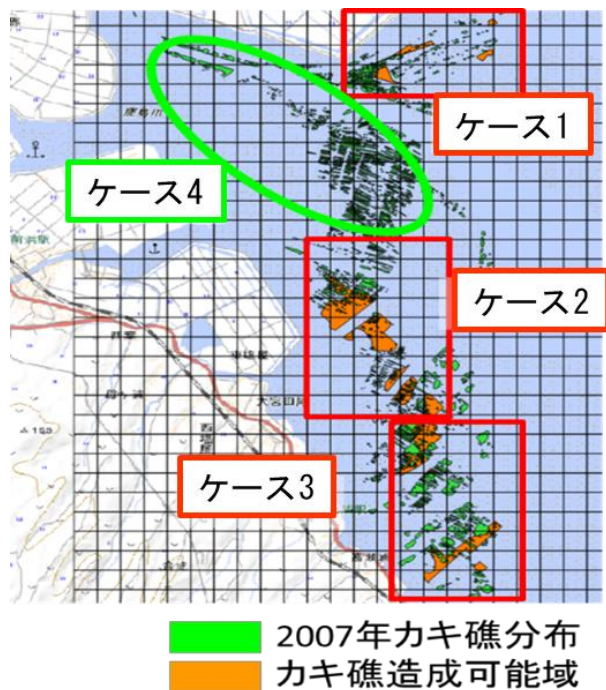
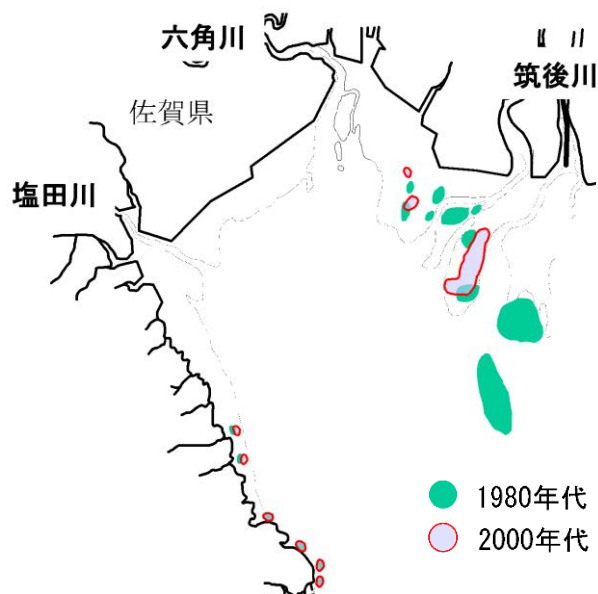


図 51 各ケースカキ礁分布条件



引用:伊藤(2005).有明海における二枚貝について「主要種の漁獲量減少要因の分析」.第15回有明海・八代海総合調査評価委員会 配布資料3より一部抜粋

図 52 アサリの分布条件

表 10 計算ケース

ケース名	設定バイオマス	造成場所 (造成可能域面積)
ケース 1-1	20 wet-kg/m ²	造成可能域 北部 (4.24 ha)
ケース 1-2	10 wet-kg/m ²	
ケース 1-3	5 wet-kg/m ²	
ケース 2-1	20 wet-kg/m ²	造成可能域 西部 北側 (22.80 ha)
ケース 2-2	10 wet-kg/m ²	
ケース 2-3	5 wet-kg/m ²	
ケース 3-1	20 wet-kg/m ²	造成可能域 西部 南側 (13.98 ha)
ケース 3-2	10 wet-kg/m ²	
ケース 3-3	5 wet-kg/m ²	
ケース 4-1	10% 増加	浜川河口沖
ケース 4-2	20% 増加	

3.1.2 結果

カキ礁造成による貧酸素水塊の影響軽減効果を評価するために、カキ礁の分布条件の違いによる、解析結果の差を検討した。

以下に、カキ礁の分布条件を変更した解析結果を用いて、貧酸素水塊の軽減効果を評価した。

(1) カキ礁の分布条件による貧酸素水塊の軽減効果の予測

1) 底層 D0 分布の比較

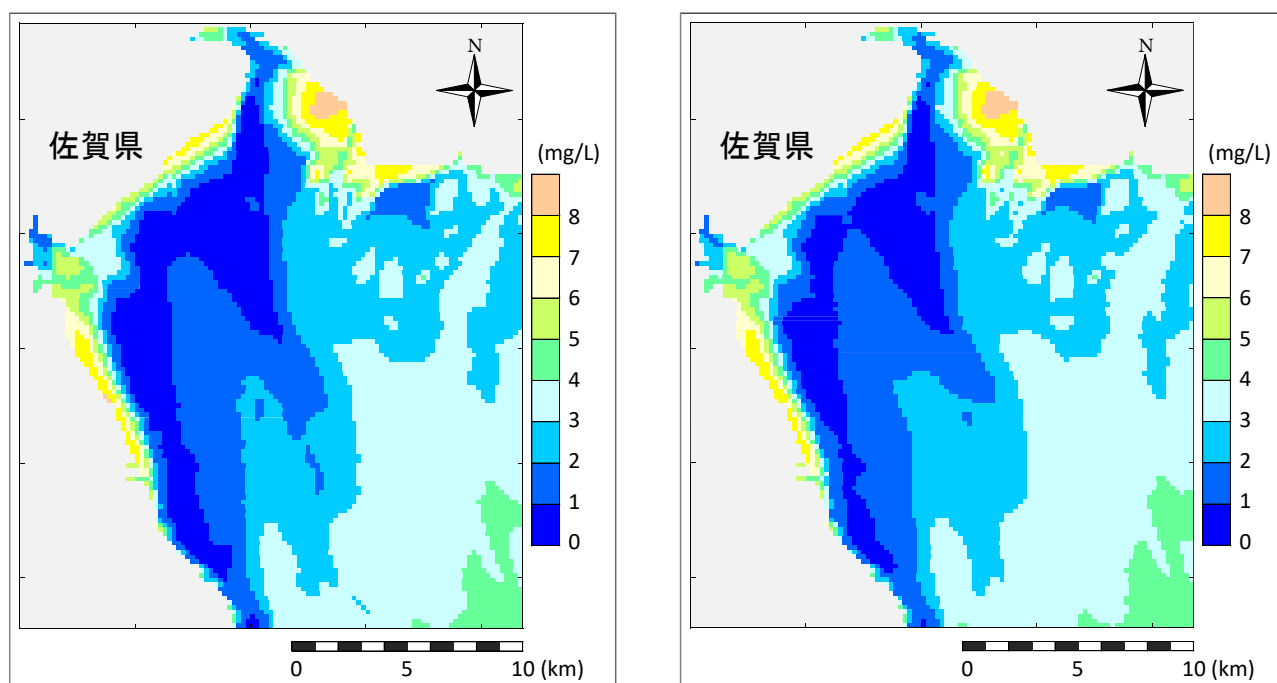
カキ礁の造成による底層 D0 分布への影響を評価するために、貧酸素化が発達した 2007 年 8 月 23 日の各ケースの底層 D0 濃度の水平分布は、図 53、図 54 に示すとおりである。

なお、図には令和 2 年度に解析されたカキ礁無しケースおよび 2007 年カキ礁分布条件の結果も示し、各実施ケースのうち、各区域内でカキ礁を多く造成したケース（ケース 1-1、ケース 2-1、ケース 3-1）と比較用に実施したケース 4-1 を示した。

各ケースの D0 の濃度の水平分布図を見ると、カキ礁無しケースでは、湾奥西部の広い範囲に 3.0 mg/L 以下の分布が見られた。さらに、岸に近づくに従って濃度低下しており、鹿島市地先では岸から約 2～5 km 沖合に 1.0 mg/L 以下の貧酸素水塊が分布した。

2007 年度カキ礁分布ケースでは、鹿島市地先から七浦付近にかけての沿岸部のほか、六角川や筑後川の河口沖にカキ礁が分布した効果により、カキ礁分布域と、その近傍域で濃度上昇し、特に 1.0 mg/L 以下の分布域の縮小が見られた。

ケース 1-1、ケース 2-1、ケース 3-1、ケース 4-1 の水平分布は 2007 年カキ礁分布ケースと同様の分布となった。

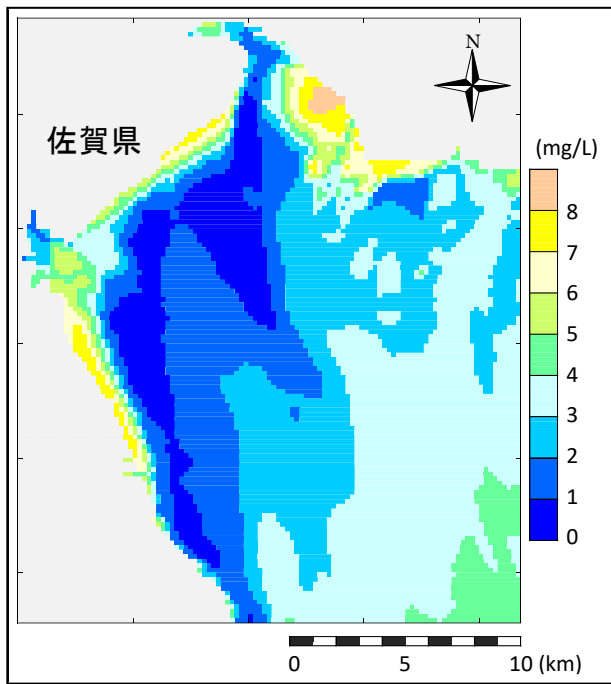


カキ礁無しケース

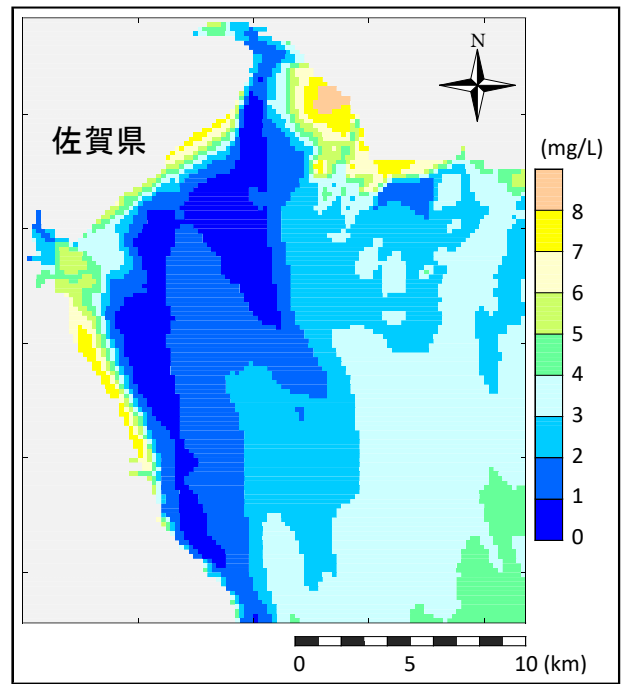
2007 年カキ礁分布ケース

※両ケースともに令和 2 年度解析結果

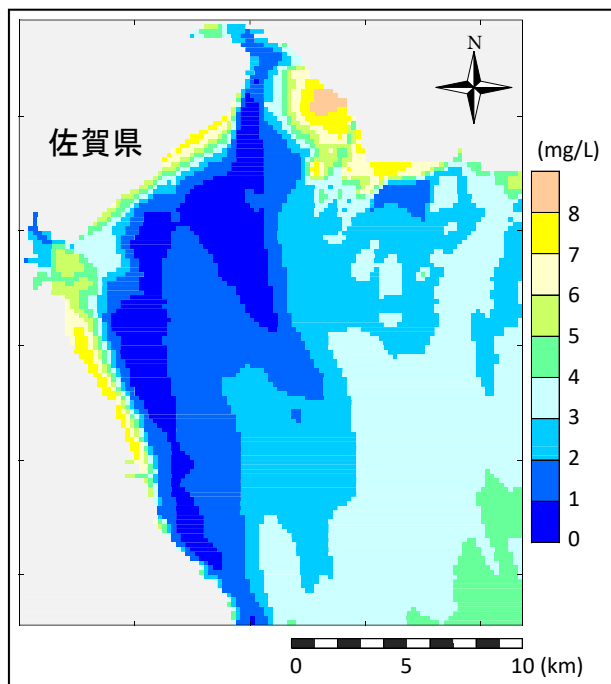
図 53 底層 D0 の水平分布比較(1)



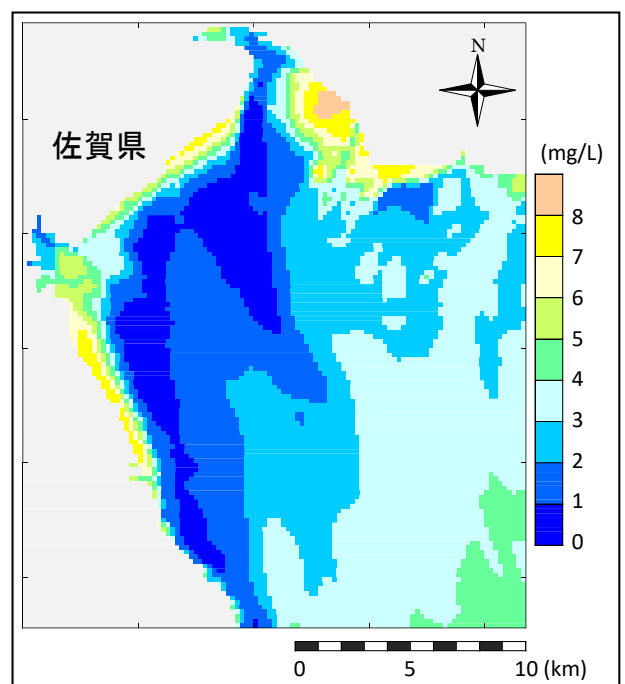
ケース 1-1



ケース 2-1



ケース 3-1



ケース 4-1

図 54 底層 DO の水平分布比較 (2)

2) 貧酸素水塊の容積の比較

佐賀県沿岸に広く漁場が存在するサルボウガイ、および有明海における水産有用二枚貝の一つであるアサリで見ると、無酸素状態（水温 25℃, DO 0.05mg/L）の海水による飼育実験で、アサリは1日目に死亡個体が出現し、サルボウガイでは7日目まで死亡個体が出現しなかったことが中村ほか（1997）により報告されている。また、日向野ら（2009）は、貧酸素に加えて高水温や硫化水素の影響を考察している。海水中の硫化物に関しては、海水中の DO が 1.0mg/L 以下になると上昇することが柿野（1985）により報告されている。

そこで、各ケースで造成したバイオマスが多いケース 1-1、ケース 2-1、ケース 3-1、そして比較用に実施したケース 4-1 の底層 DO が 1.0mg/L 以下となる水塊の容積の変化を図 55 に示した。前掲の図 53、図 54 の水平分布で見られた結果と同様に、積算容積の変化では、カキ礁無しケースと他の各ケースで容積の違いが確認された。しかしながら 2007 年カキ礁分布ケースと、今年度を実施した各ケースの結果では顕著な違いが見られない。そこで、貧酸素水塊に接する時間を考慮して 8 月 1 ヶ月間の積算容積を整理して図 56 に示し、2007 年カキ礁分布ケースの結果より減少した積算容積を図 56 に示した。

ケース 1-1 を例に見ると、造成可能域の面積は約 4 ha であり、この範囲にカキ礁を造成することで、貧酸素水塊の積算容積が 2007 年カキ礁分布条件の結果に比べて、約 0.03 km³・h（約 3,000 万 m³・h）減少する結果となった。この減少量は、ケース 4-2 と同程度であり、浜河口沖のカキ礁域を全体的に 20 %増量した事と同程度の効果になると予測された。

また、ケース 1-2、ケース 1-3 と積算容積の減少量が変化することから、同一エリア内でもカキバイオマスが多くなる事で、貧酸素水塊の軽減効果の高まる事が推測された。

さらに、最も造成可能域の面積が大きい、ケース 2-1 で貧酸素水塊の軽減効果が高いことから、造成エリア（造成面積）の違いによる軽減効果の向上も推測された。

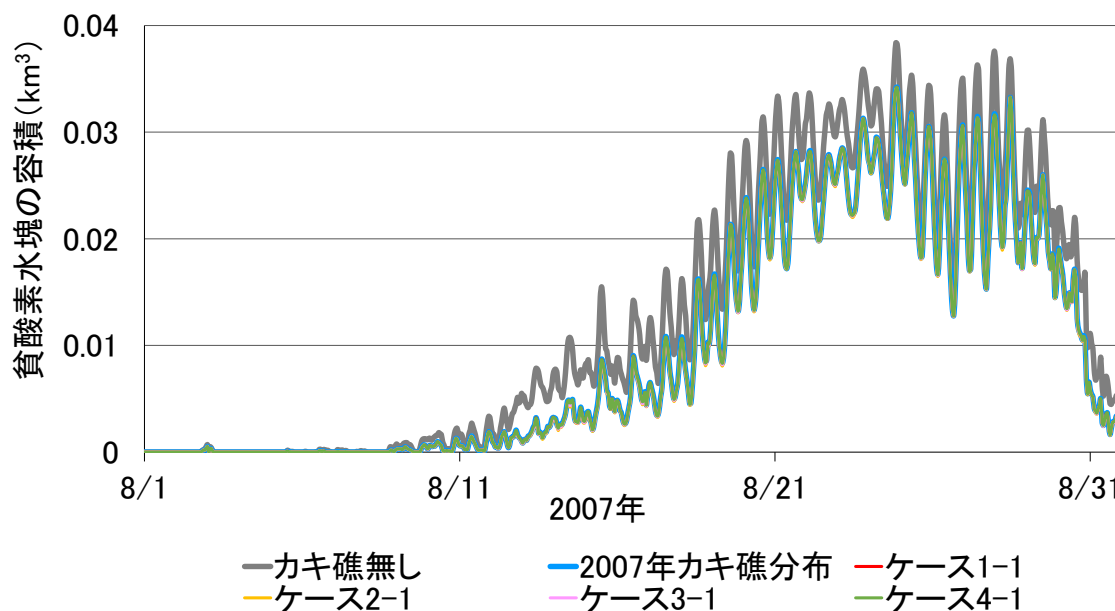


図 55 底層 DO が 1.0 mg/L 以下となる容積の変化

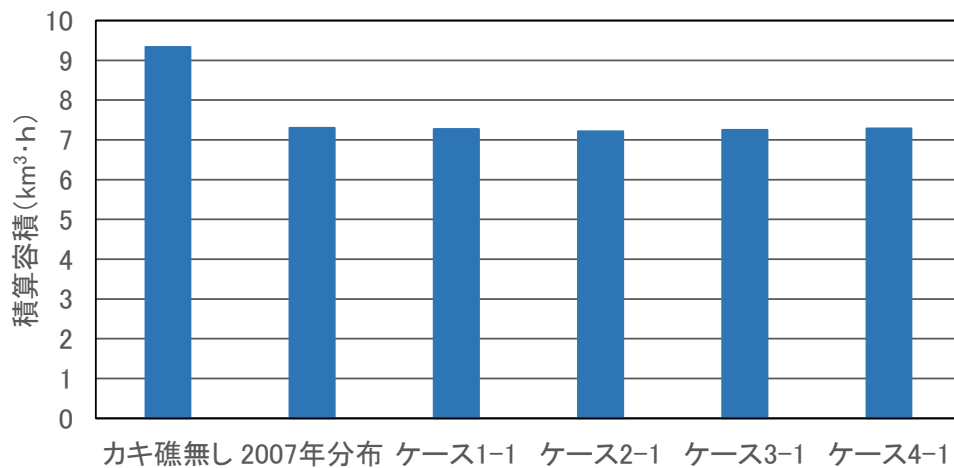


図 56 貧酸素水塊の積算容積のケース間比較

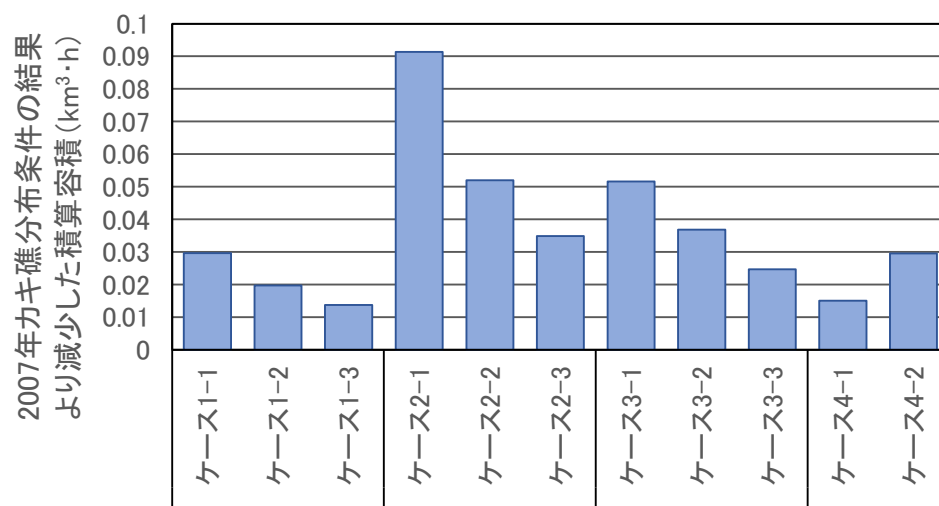


図 57 2007 年カキ礁分布ケースと各造成ケースによる貧酸素水塊の積算容積の差分

3.1.3 考察

今年度の解析では、カキ礁造成可能域として検討された場所をエリア区分し、造成エリアによる貧酸素水塊軽減効果の違いを貧酸素水塊の積算容積を用いて検討した。

しかし、各エリアの造成面積が異なることから、ケース 1-1 で造成した総バイオマス、ケース 2、ケース 3 の各造成可能域へも造成すると想定して解析を実施し、貧酸素水塊の影響軽減に効果的な造成場所を検討した。

ケース 1-1、そして追加で実施した各ケースと、2007 年カキ礁分布ケースとの貧酸素水塊の積算容積の差を求めて、図 58 に 2007 年カキ礁分布条件の結果より減少した貧酸素水塊の積算容積として示した。

この積算容積の減少量が最も大きく現れたのは、ケース 1-1 の結果であり、ケース 1 の造成可能域への造成が各エリアの中でも効果的であると推測された。

従って、カキ礁造成を効果的に実施するために、河口に近いエリアからカキ礁の造成を進める事が望まれると考えられた。

なお、河口に近い場所への造成が貧酸素水塊の軽減に効果的なことは、既往知見においても報告されている。山口ら (2015) は、筑後川河口沖、北部の佐賀県沿岸、西部の佐賀県沿岸にカキ礁を造成した解析を行い、筑後川河口沖に造成することで最も高い効果が得られており、エスチャリー循環と河口域で生成された有機物の除去による効果を考察している。本解析においても、ケース 1 の造成可能域が最も河口に近いことから、同様の効果が現れたものと考えられた。

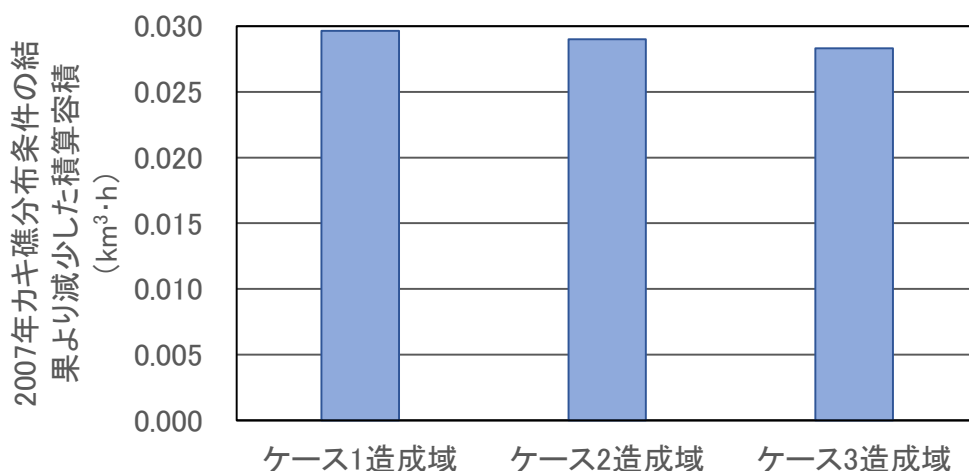


図 58 2007 年カキ礁分布ケースと各造成域の同量のカキ礁を造成したケースによる貧酸素水塊の積算容積の差分