

〈 目 次 〉

第 1 章	試験概要	1
1.1	概要	1
1.2	キレートマリンを使用した底質改善で想定される効果	2
1.3	実証試験の概要	3
1.4	実証試験の工程と気象条件	4
1.5	とりまとめの実施方針	6
第 2 章	周辺環境の整理	7
2.1	河床調査結果	7
2.2	底質調査結果	11
2.3	周辺環境のまとめ	12
第 3 章	生物の生息状況の評価	13
3.1	底生生物の生息状況の評価	13
3.2	底生微細藻類の生息状況の評価	14
3.3	シジミの育成試験	16
第 4 章	キレートマリンの効果・メカニズムの検証	18
4.1	キレートマリンの効果継続性に係る試験	18
4.2	基礎生産力調査	20
第 5 章	キレートマリンの環境改善効果の評価	22

第1章 試験概要

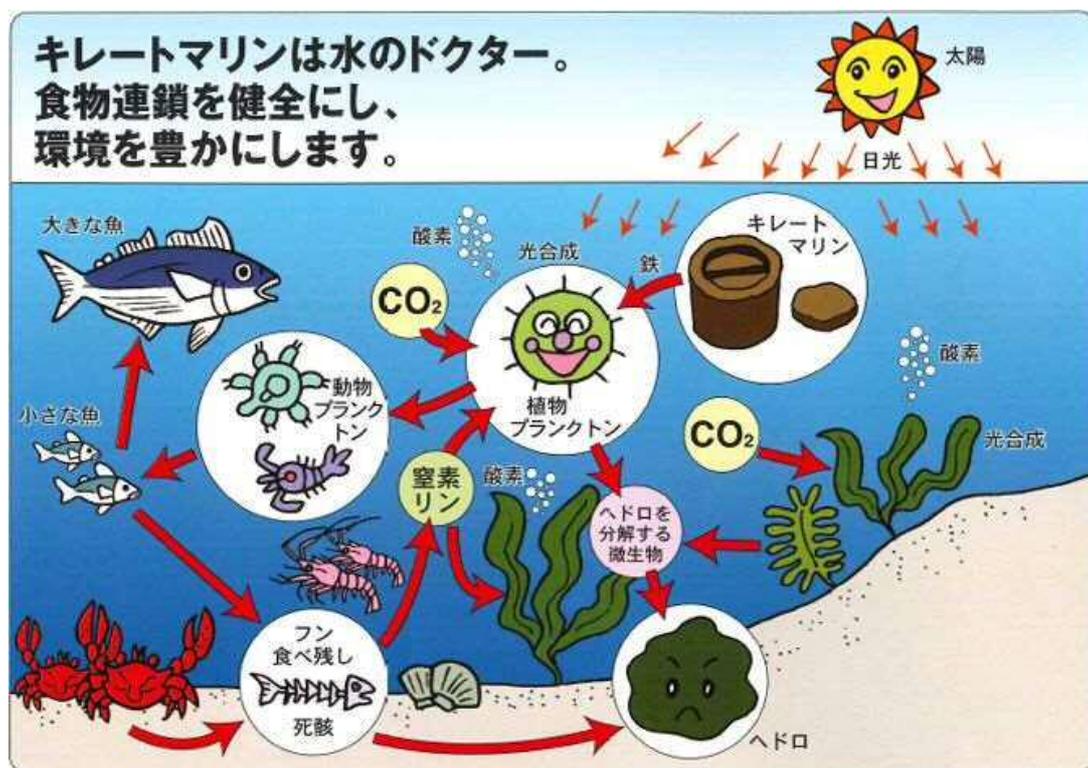
1.1 概要

- ・ 広島県では、河川環境整備の一環として底質の悪化した河川の再生を図るため、県内中小企業を対象に公募を行い、応募された技術から学識経験者等からなる委員会の審査を踏まえ、平成25年2月に「新たな河川底質改善」の技術を選定した。
- ・ 本報告書は、選定された技術である「キレートマリン（応募者：日の丸産業㈱）」による底質改善効果について、約4年にわたるモニタリング調査を実施し、その効果を評価したものである。

- ・ 試験期間：平成25年度～平成28年度
- ・ 試験場所：一級河川太田川水系京橋川 稲荷大橋左岸下流付近
- ・ 採用技術：キレートマリンを使用した底質改善
- ・ 期待する効果：ヘドロの浄化・改善効果、生物生息場のづくり効果

1.2 キレートマリンを使用した底質改善で想定される効果

- キレートマリンは、広島大学の長沼教授により開発された環境改善技術である。
- 水域にキレートマリンを設置すると、キレート鉄と珪素が溶出し、ケイ藻類（善玉の植物プランクトン）が増え底質や水中の光合成活性が増すことで酸素 O_2 が増える。
- また、微生物による好気的な有機物分解が活性化し、ゴカイ類やエビ類などの底生生物による「泥食い」や「掘り返し」などによる分解効果もある。
- さらに、キレート鉄を溶出させるため嫌気土壌から発生する底生生物に有害となる硫化水素を無害な硫化鉄に変換する。これに関連して、還元状態から酸化状態に変化するため、酸化還元電位が上昇することが期待できる。



図ー 1.1 キレートマリンによる底質改善効果の概念図（出典 日の丸産業 HP）

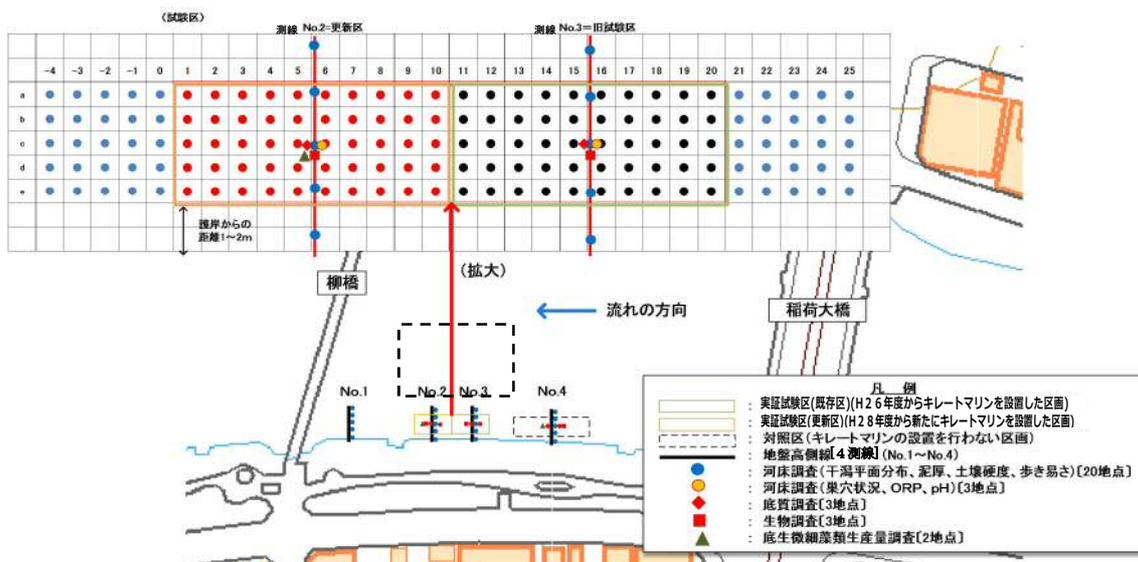
1.3 実証試験の概要

- ・実証試験は、京橋川の稲荷大橋下流左岸側で実施した。
- ・平成25年10月にキレートマリンを1m×1m間隔で計100個設置し、底質や生物に関する調査を実施した。
- ・また、平成28年5月には、キレートマリンからの鉄の溶出量の低下が見られたことを考慮し、新品のキレートマリン50個を設置しなおした。



(実証試験の実施箇所)

国土地理院配信の地図データを使用

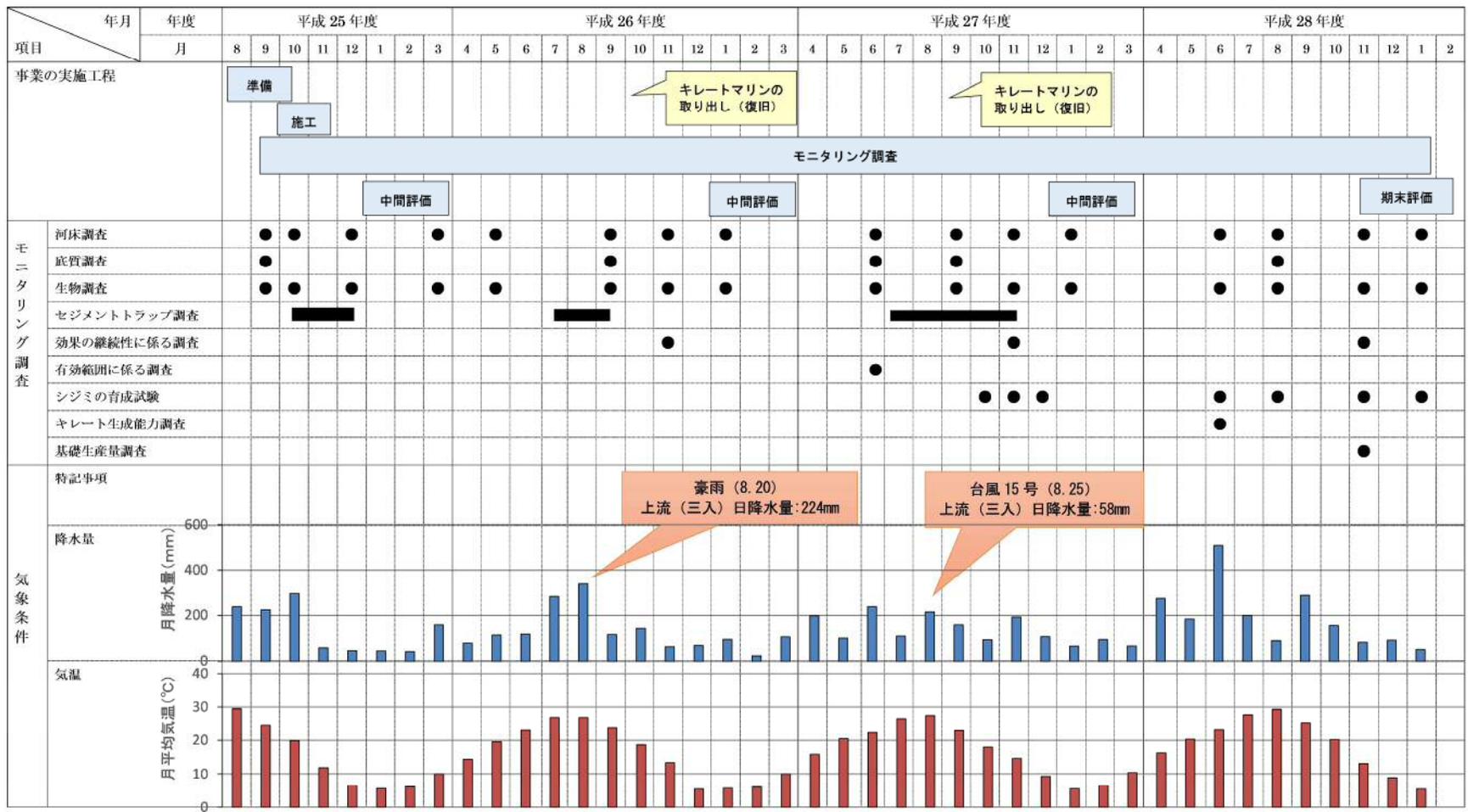


(調査地点図)

図一 1.2 実証試験の実施箇所と調査地点図

1.4 実証試験の工程と気象条件

- 実証試験区の施工は平成 25 年 10 月に実施した。モニタリング調査については、施工直前の平成 25 年 9 月より開始しており、以降年 4 回程度のモニタリングを実施している。
- 気象条件としては、平成 26 年 8 月 20 日に記録に残る豪雨が発生し、実証試験区においても土砂によるキレートマリンの埋没が生じ、同年 10 月に覆いかぶさった土砂からキレートマリンを取り出す復旧作業が行われた。
- 平成 27 年 8 月 25 日にも台風 15 号の上陸に伴う出水があり、土砂による実証試験区の埋没が生じた。このため、9 月初旬に土砂からのキレートマリンの取り出しを行った。
- 平成 28 年は、梅雨期の降水量が平年値の 2 倍近くに達していた。一方で、夏季に大型の台風の襲来（広島への上陸）はなく、キレートマリンの埋没はなかった。



図一 1.3 実証試験の実施工程と気象条件

1.5 とりまとめの実施方針

- ・キレートマリンによる主要な底質改善効果は、①「キレート鉄の溶出に伴うケイ藻類の活性化」にあると考えられる。また、副次的な効果として、②「キレート鉄の溶出に伴う硫化水素の固定に伴う還元環境の改善」も期待される。
- ・しかしながら、今回のように現地での実証試験は周囲に開放された系であるため、実証試験区周辺の本来の※環境勾配や、出水などの気象条件といった周辺環境の影響を強く受けることが予想される。
- ・そのため、まずは、地盤高や河床の状態、底質などから、②の副次的な効果も含めた実証試験期間中の「Ⅰ：周辺環境の状態の整理」を行う。その上で、底生物や底生微細藻類といった「Ⅱ：生物の生息状況」から①の主要な効果の発現状況について評価を行った。また、現地実証試験のモニタリング結果から推定される「Ⅲ：キレートマリンの効果やメカニズムの検証」を、現地や室内での実験系より行った。

とりまとめの視点	実施内容	関係する調査
Step I : 周辺環境の状態の整理 (副次的な効果の整理)	<ul style="list-style-type: none"> ・実証試験区周辺における環境勾配や気象条件に伴う環境の変動状況について整理する。 ・実証試験区での副次的な底質改善効果の発現状況についても整理する。 	河床調査、底質調査
Step II : 生物の生息状況の評価 (主要な効果の評価)	<ul style="list-style-type: none"> ・主要な効果であるケイ藻類の活性化や底生物の増加が得られているかを評価する。 	生物調査 シジミ育成試験
Step III : 効果・メカニズムの検証	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングでは明確にならない効果やメカニズムを実験系より検証する。 	キレートの生成能力に係る調査 効果の継続性に係る調査 基礎生産量調査

図－ 1.4 とりまとめの実施方針

※環境勾配：場所毎に周りの環境が変化すること

第2章 周辺環境の整理

2.1 河床調査結果

(1) 景観 図－ 2.1

- ・実証試験区に設置したキレートマリンは、平成 26 年 8 月豪雨時にも流去されず、安定的に地盤に設置されていた。
- ・平成 26 年 8 月および平成 27 年 8 月に出水に伴う土砂堆積があり、キレートマリンが土砂に埋没した状態となったが、キレートマリンを地盤上へ引き上げることで復旧している。

(2) 底質性状等 図－ 2.2

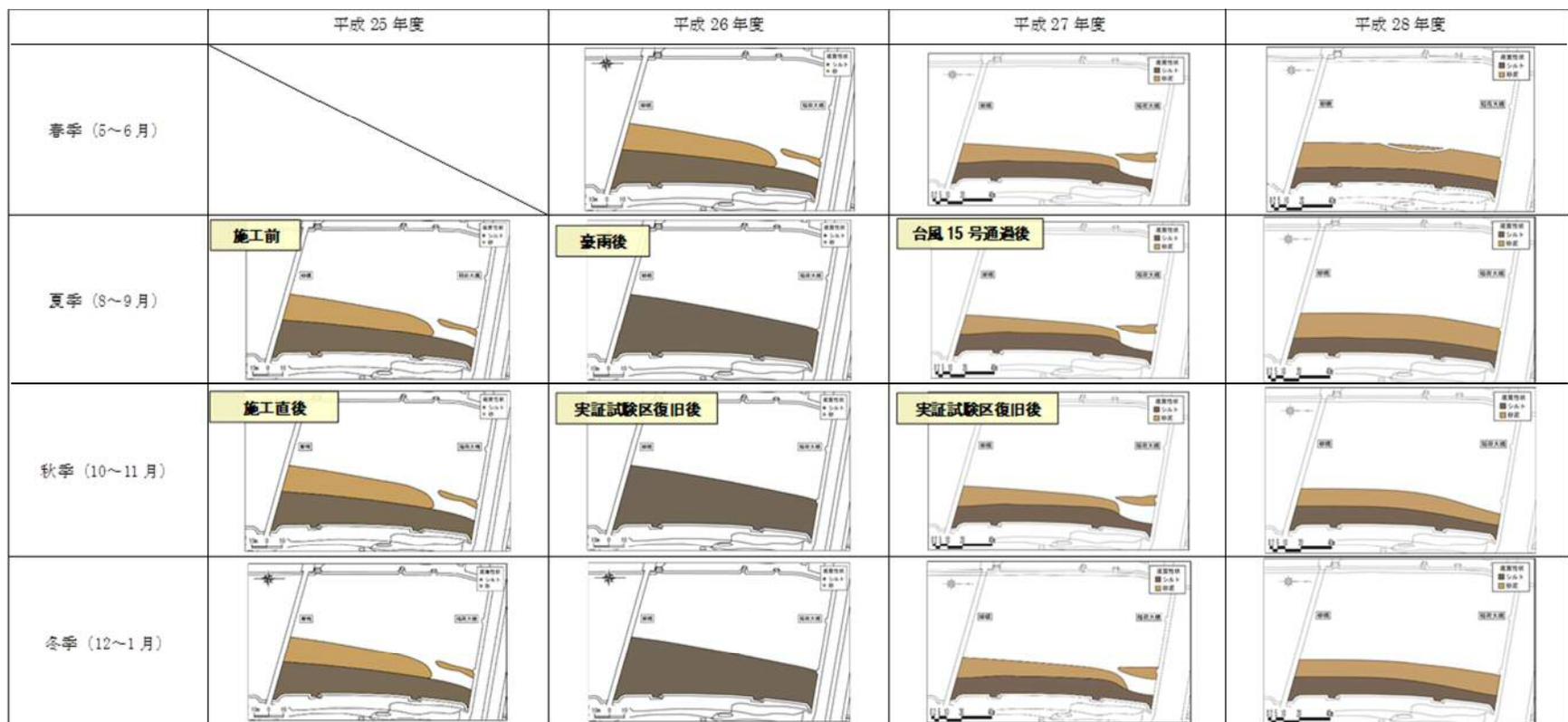
- ・底質性状・色調については、実証試験区の施工前には実証試験区周辺の左岸側にシルト質が堆積しており、流心に向けて砂質の底泥が広がっていた。
- ・実証試験区の施工後も同様の分布傾向であったが、平成 26 年 8 月の豪雨で土砂が大量に堆積し、観測範囲全域がシルト質となった。実証試験区の復旧後も同様の傾向にあった。
- ・平成 27 年 5 月には、流心側で再び砂質が見られ、豪雨で堆積していたシルトが徐々に流去もしくは分解し、元の河床の状態に戻ってきていると考えられる。
- ・平成 27 年 9 月の台風通過後は、平成 26 年 8 月の豪雨後と比べ、砂質の底泥範囲が広く残っており、土砂堆積の影響が相対的に少なかったと考えられる。
- ・平成 28 年 8 月は、調査前に豪雨や台風の通過がなく、底質性状に大きな変化は見られなかった。

(3) 地盤高 図－ 2.3

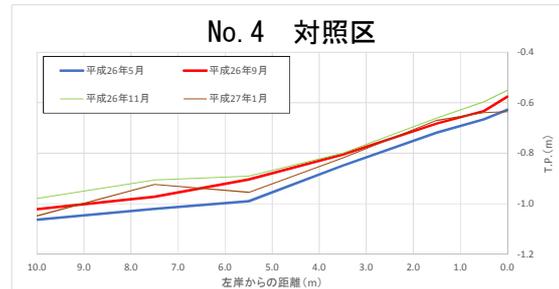
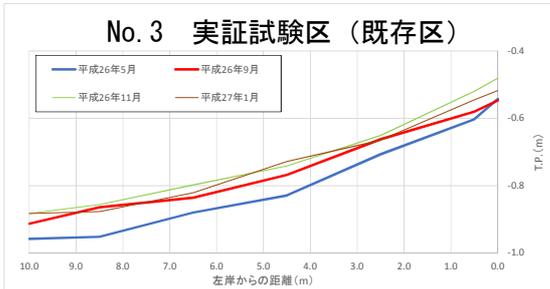
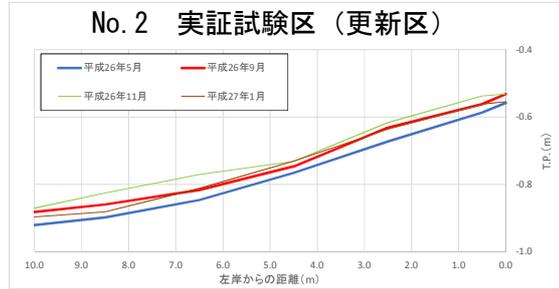
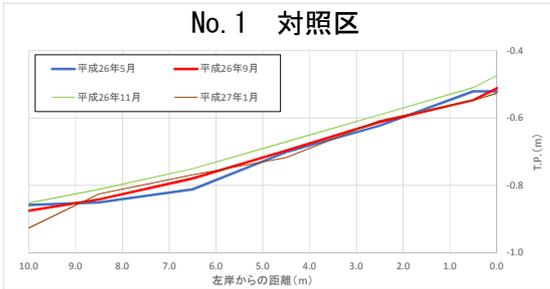
- ・実証試験区の施工前後において、数 c m 程度の変化しか見られず、地盤高の状態は比較的安定していた。
- ・平成 26 年 8 月の豪雨により、特に上流側の測線 No.3 および No.4 の中央付近において地盤高が 10 c m 程度上昇しており、土砂が堆積したことを示していた。その後、僅かながらに地盤高は降下していた。
- ・平成 27 年 8 月の台風 15 号通過後は、実証試験区の No.2 付近で土砂堆積が顕著であったが、5 c m 未満の地盤高の変化であり、平成 26 年よりは全体的な土砂堆積量は少なく、堆積傾向は不明瞭であった。

	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度
	近景撮影位置 i	近景撮影位置 i	近景撮影位置 i	近景撮影位置 i
春季 (5~6 月)				
夏季 (8~9 月)	 施工前	 豪雨後	 台風 15 号通過後	
秋季 (10~11 月)	 施工直後	 実証試験区復旧後	 実証試験区復旧後	
冬季 (12~1 月)				

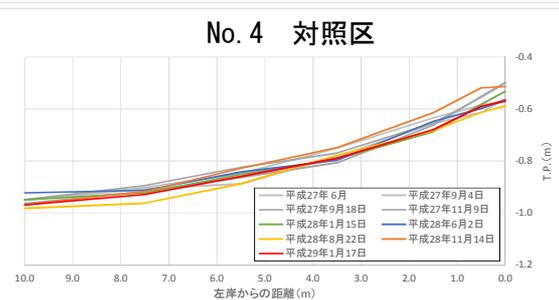
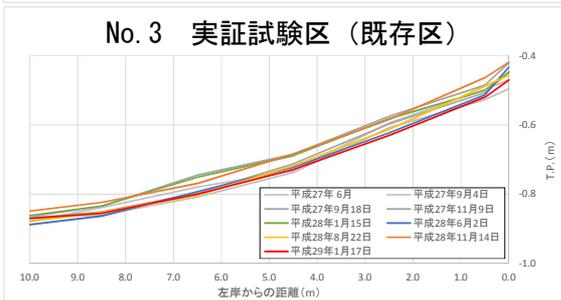
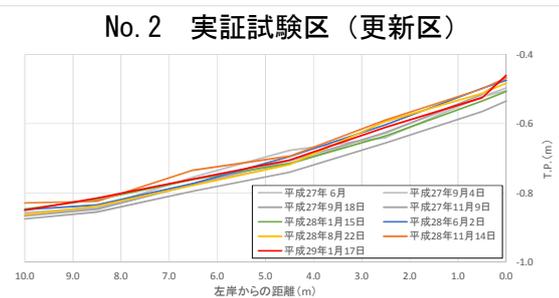
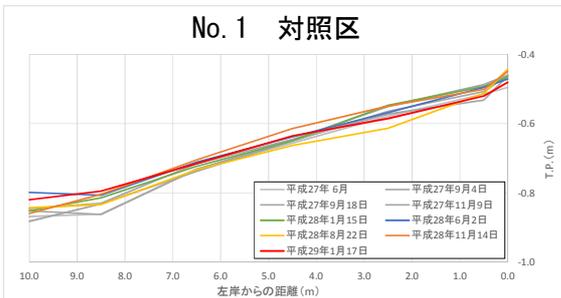
図－ 2.1 実証試験区の景観の調査結果



図－ 2.2 底質の性状の調査結果



【平成 26 年 8 月 20 日 豪雨前後の地盤高の変化】

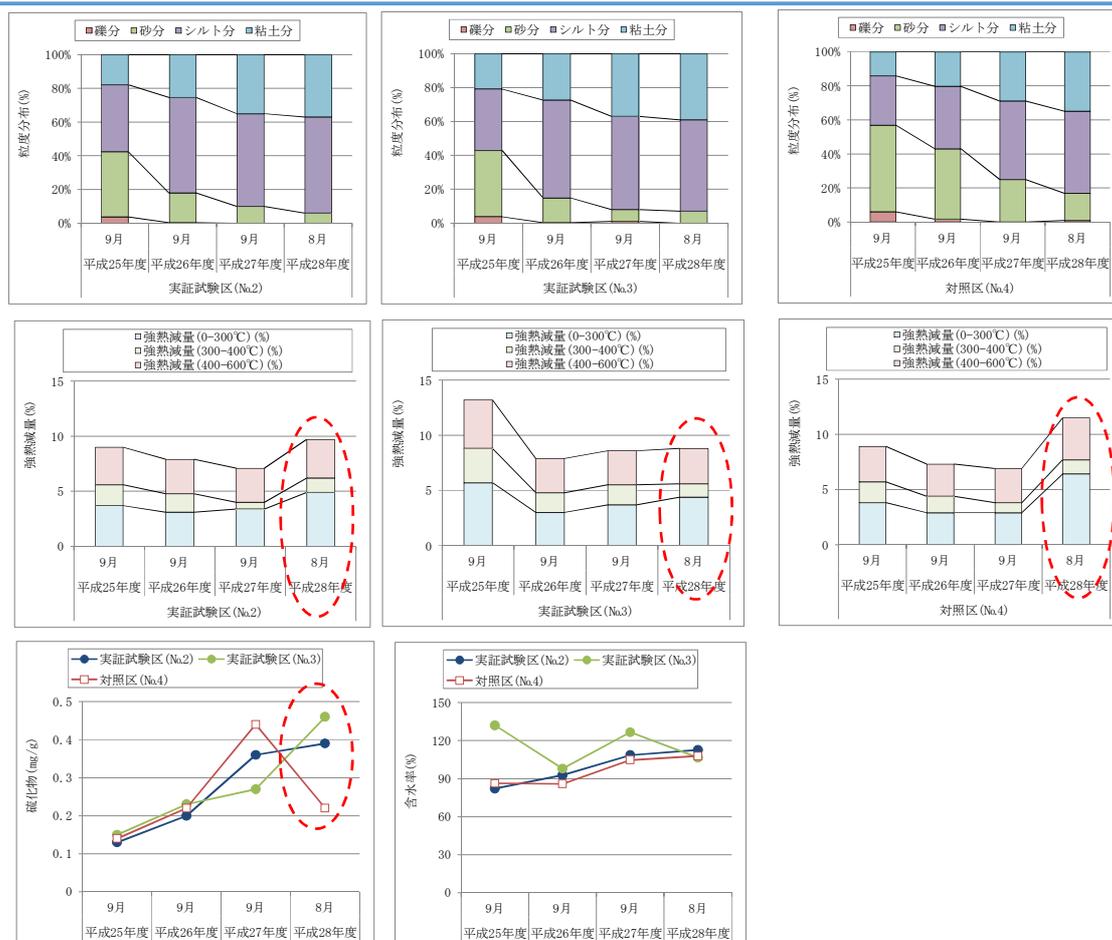


【平成 27 年 8 月 25 日 台風 15 号前後の地盤高の変化】

図一 2.3 大規模な出水前後の地盤高の変化

2.2 底質調査結果

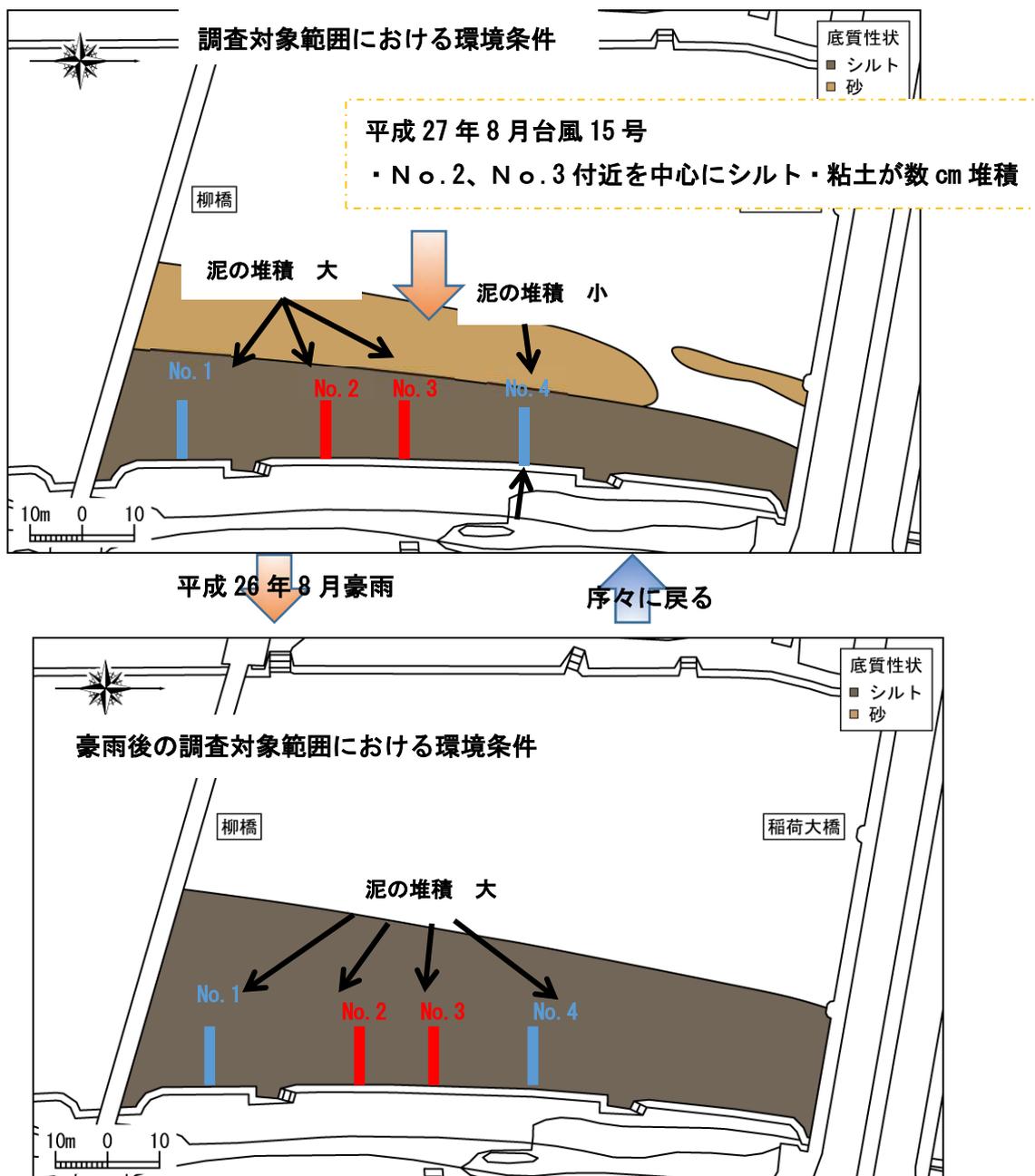
- ・施工前の底質は、上流側の対照区（No.4）よりも実証試験区（No.2、No.3）の方が底泥中の有機物量が多かった。
- ・平成26年の豪雨後には、地点間の底質の差が少なくなり、堆積した土砂の影響と考えられる。
- ・平成27年の台風通過後は、実証試験区（No.2、No.3）でシルト・粘土分が多く、土砂堆積の影響が強かったことが伺える。
- ・豪雨や台風に伴う土砂の堆積は実証試験区の底質へ強い影響を与えることが示された。
- ・豪雨や台風の影響が比較的少なかった平成28年度は、実証試験区（No.2、No.3）で強熱減量が対照区（No.4）よりも低く、特に低温度で燃焼する易分解成分の低下が見られることから、生物活性が増加し、底泥の有機物量が減少していた可能性も考えられる。
- ・また、平成28年度は、硫化物が実証試験区（No.2、No.3）で高い傾向にあり、鉄が多く供給されることで、硫化鉄が生成しやすくなっていた可能性もある。



図ー 2.4 底質（粒度組成、強熱減量、硫化物、含水比）の変化

2.3 周辺環境のまとめ

- ・調査対象範囲の自然条件として、上流側の対照区は、泥の堆積量が少なく、底泥環境が相対的に良好な箇所であったと考えられる。
- ・実証試験区周辺は、豪雨や台風による出水などの周辺の外的環境要因の影響が強い場であり、生物の生息環境も定期的に攪乱を受けていると考えられる。



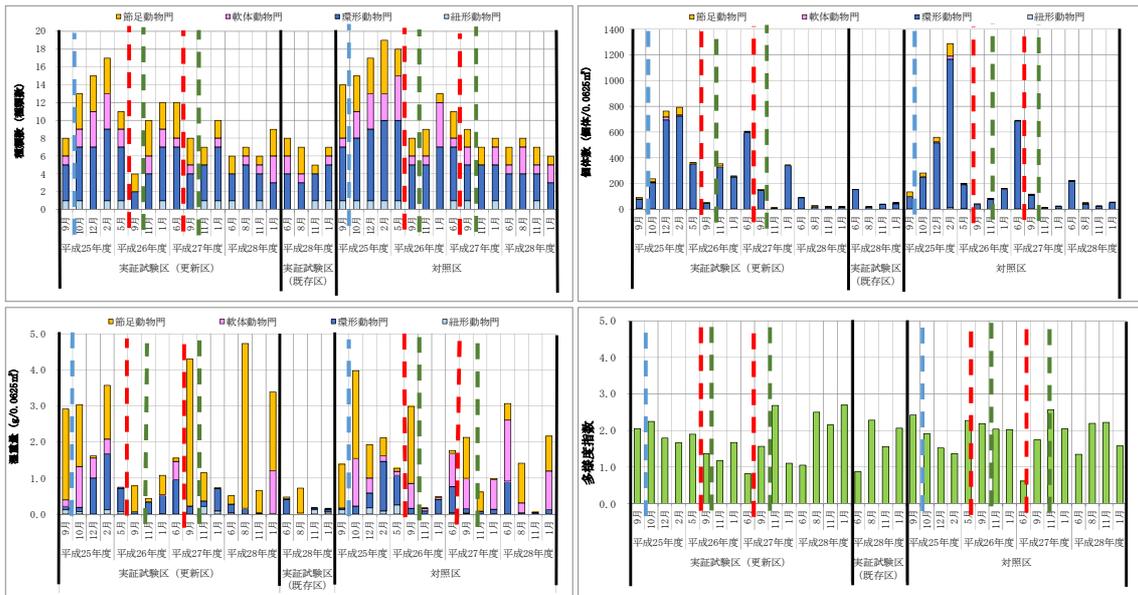
図一 2.5 実証試験区の周辺環境の模式図

第3章 生物の生息状況の評価

3.1 底生生物の生息状況の評価

- ・底生生物については、実証試験開始前では、種類数、多様度指数については対照区の方が僅かに高く、個体数、湿重量は実証試験区で高い傾向があった。この傾向は実証試験中も変化がなかったことから、生態系を攪乱せずに、活性化していることが示唆される。
- ・調査期間中の平均値に統計的な有意差は見られないものの、豪雨および台風通過後の底生生物の個体数や湿重量は、対照区より実証試験区で高い傾向があり、キレートマリンの効果である可能性がある。

凡例 施工：—、豪雨・台風による実証試験区の埋没：—、復旧作業（キレートマリンの取り出し）：—



図－ 3.1 底生生物の種類数・個体数・湿重量・多様度指数の変化

表－ 3.1 底生生物の種類数・個体数・湿重量・多様度指数の平均値と差の検定結果

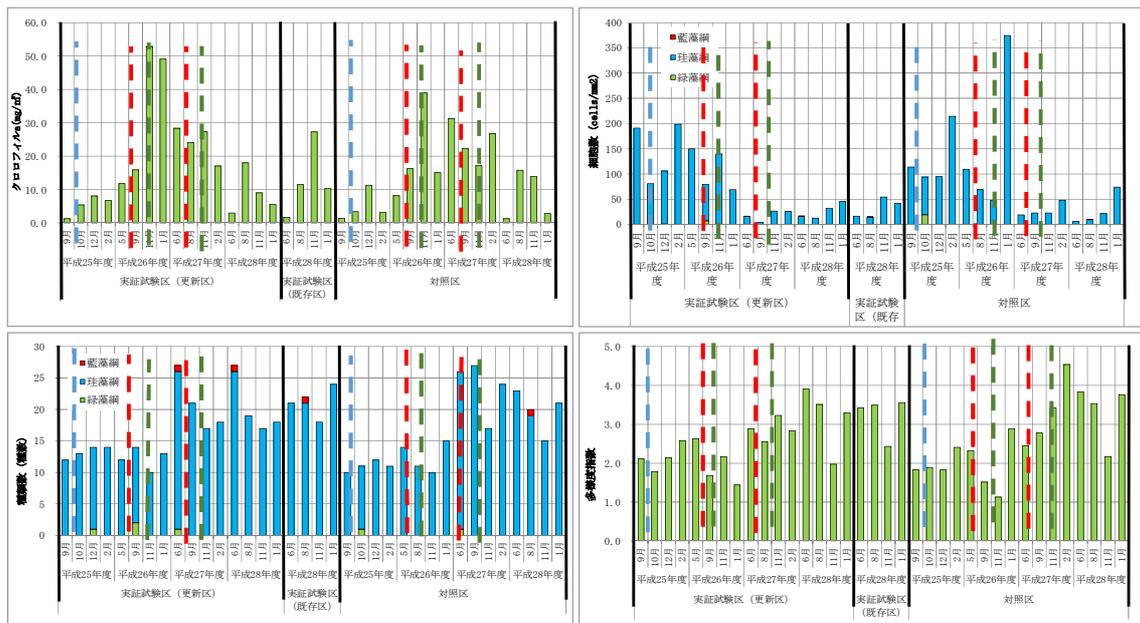
	実証試験区			対照区			p 値 (両側検定)
	n	平均	標準偏差	n	平均	標準偏差	
種類数	15	9.9	3.54	15	10.8	4.44	0.19
個体数	15	274	267	15	256	349	0.69
湿重量	15	1.89	1.49	15	1.68	1.13	0.56
多様度指数	15	1.76	0.60	15	1.84	0.49	0.75

※p 値はウィルコクソンの符号順位和検定より求めた。

3.2 底生微細藻類の生息状況の評価

- ・クロロフィル a の平均値については、実証試験区において高く、キレートマリンによるキレート鉄供給の効果により、底生微細藻類の活性が活発になっている可能性がある。
- ・細胞数、種類数、多様度指数については両区の違いは不明確なものであった。
- ・調査期間中の全平均値に統計的な有意差は見られないものの、豪雨および台風通過から数ヶ月後のクロロフィル a は実証試験区で高く、キレートマリンの効果である可能性がある。
- ・夏季にまとまった降水のなかった平成 28 年の 11 月では、実証試験区におけるクロロフィル a の顕著な増加はなく、実証試験区と対照区で同程度であった。

凡例 施工：—、豪雨・台風による実証試験区の埋没：—、復旧作業（キレートマリンの取り出し）：—



図ー 3.2 クロロフィル a および底生微細藻類の種類数・細胞数・多様度指数の変化

表ー 3.2 クロロフィル a、底生微細藻類の種類数・細胞数・多様度指数の平均値と差の検定結果

	実証試験区			対照区			p 値 (両側検定)
	n	平均	標準偏差	n	平均	標準偏差	
クロロフィル a	15	18.8	15.3	15	15.2	11.1	0.25
種類数	15	16.7	4.7	15	17.1	5.9	0.76
細胞数	15	67.1	58.8	15	82.1	97.4	0.81
多様度指数	15	2.6	0.7	15	2.7	1.0	0.92

※p 値はウィルコクソンの符号順位と検定より求めた。

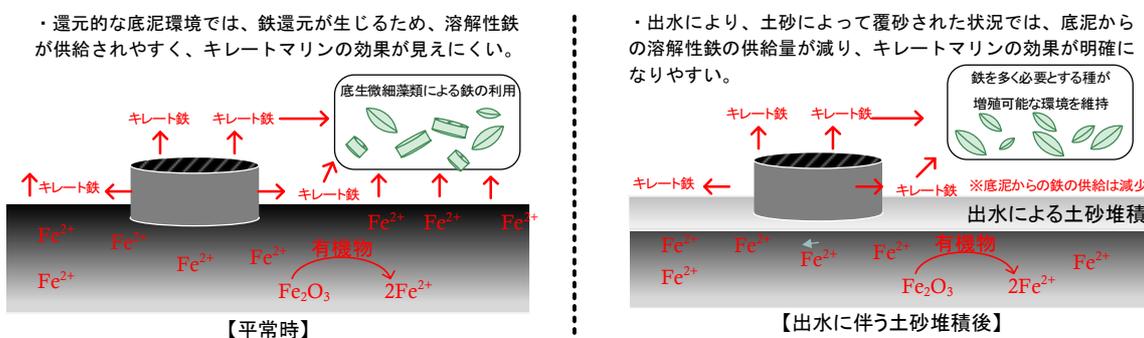
- ・各実証試験区における底生微細藻類の種組成を確認したところ、クロロフィル a の増加がもっとも顕著であった平成 26 年 11 月には、実証試験区と対照区で優占種が異なっており、底質環境に何らかの差があったと考えられる。
- ・大規模な出水により、土砂による覆砂が生じ、河床からの鉄の供給量が減少したことで、鉄供給の効果が顕著になった可能性が考えられる。

表一 3.3 各調査日で優占していた底生微細藻類種

調査日	実証試験区	対照区
平成 25 年 9 月 18 日	オビジュウジケイソウ (110)	オビジュウジケイソウ (50)
平成 25 年 10 月 18 日	フネケイソウ (26)	フネケイソウ (22)
平成 25 年 12 月 18 日	ニセタルケイソウ (70)	ニセタルケイソウ (78)
平成 26 年 2 月 28 日	メロシラ (62)	メロシラ (83)
平成 26 年 5 月 29 日	オビジュウジケイソウ (31) ホシガタケイソウ (22)	オビジュウジケイソウ (15) ホシガタケイソウ (26)
平成 26 年 9 月 8 日	ニセタルケイソウ (41)	ニセタルケイソウ (50)
平成 26 年 11 月 8 日	ギロシグマ (41) ニッチア (17)	ギロシグマ (4) ニッチア (22)
平成 27 年 1 月 9 日	ニッチア (30)	ニッチア (180)
平成 27 年 6 月 2 日	ナビキュラ (3.7)	ナビキュラ (3.7)
平成 27 年 9 月 3 日	アクナンテス (1.2)	アクナンテス (5.5)
平成 27 年 11 月 10 日	アクナンテス (7.0)	アクナンテス (4.1)
平成 28 年 1 月 14 日	ディアトーマ (9.6)	ディアトーマ (15.3)
平成 28 年 6 月 2 日	ニッチア (3.1) アクナンテス (2.5)	ニッチア (0.7) アクナンテス (0.9)
平成 28 年 8 月 22 日	ナビキュラ (2.5) フラギテリア (1.3)	ナビキュラ (1.3) フラギテリア (2.4)
平成 28 年 11 月 15 日	スリレラ (21.6)	スリレラ (13.0)
平成 29 年 1 月 18 日	アクナンテス (7.6) ナビキュラ (13.2)	アクナンテス (11.4) ナビキュラ (9.6)

注 1) 最も細胞数の多かった種を優占種と定義した。種名横の () は細胞数 (cells/mm²) を示す。

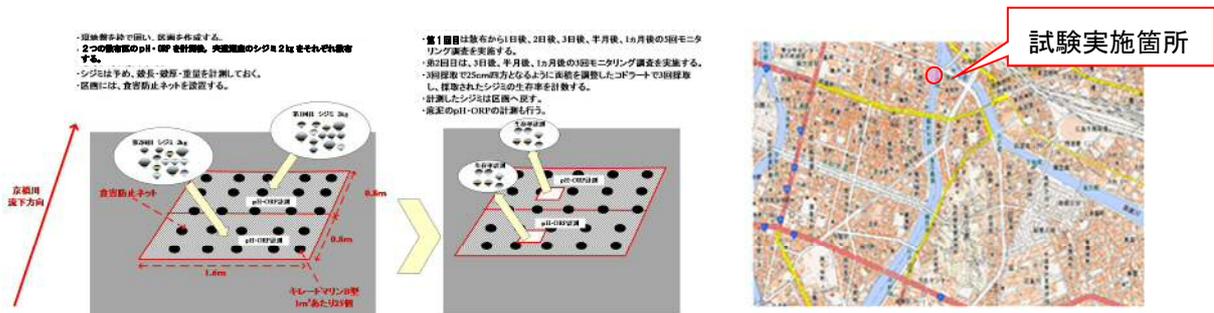
注 2) 実証試験区と対照区で異なった種が優占していた場合は、両種の細胞数をそれぞれに記載した。



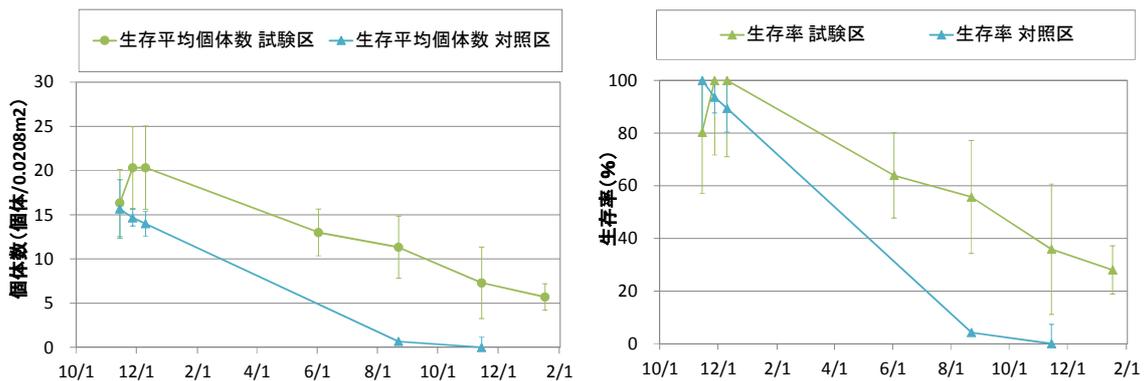
図一 3.3 キレートマリンによる底生微細藻類増殖に関する仮説

3.3 シジミの育成試験

- ・キレートマリンの生物への効果をより明確に検証するため、実証試験区の上流側で、シジミの育成試験を実施した。
- ・シジミの育成試験は、1.6m×1.6mの区画を1区画作成し、キレートマリンB型を1m²あたり25個設置した。その後、区画を2つにわけ、宍道湖産のシジミ2kgを2回にわけて散布した。
- ・試験区と同じ大きさの対照区も作成し、キレートマリンは設置せずに、宍道湖産のシジミ2kgを散布した。
- ・試験区では、平成28年8月でも生存率は50%以上と高かったが、対照区では平成28年8月にはほぼ0%となっていた。

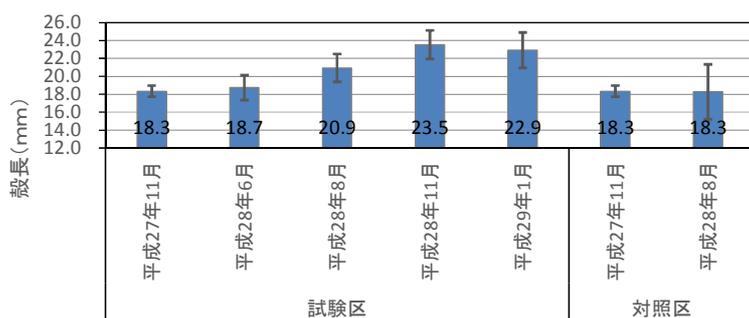


図一 3.4 シジミの育成試験の実施要領

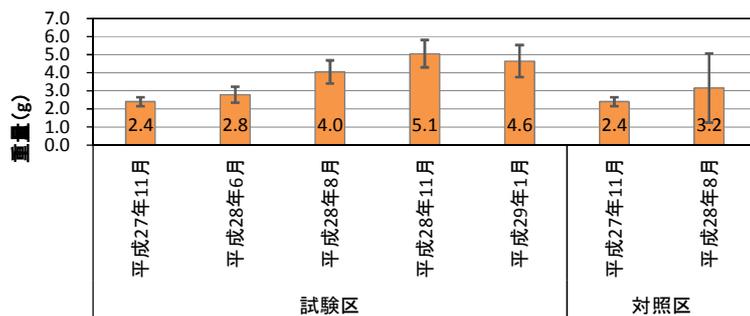


図一 3.5 第2回目散布のシジミの生存・死亡個体数（左）および生存率（右）の変化

- さらに、試験区では、シジミの殻長や重量の増加が見られ、現地でシジミが生育していることが示された。
- 平成 28 年 11 月に、試験区の底泥のクロロフィル a を対照区と比較したところ、試験区では、クロロフィル a が高くなっており、キレートマリンを設置することで、餌の多い環境になっていることが示された。

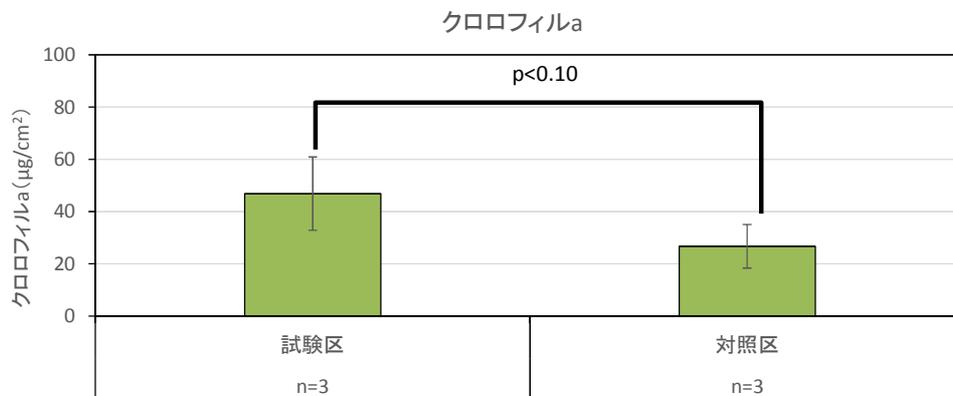


試験区のシジミ(H28年8月)



試験区のシジミ(H28年11月)

図一 3.6 シジミの殻長（上）、重量（下）の変化

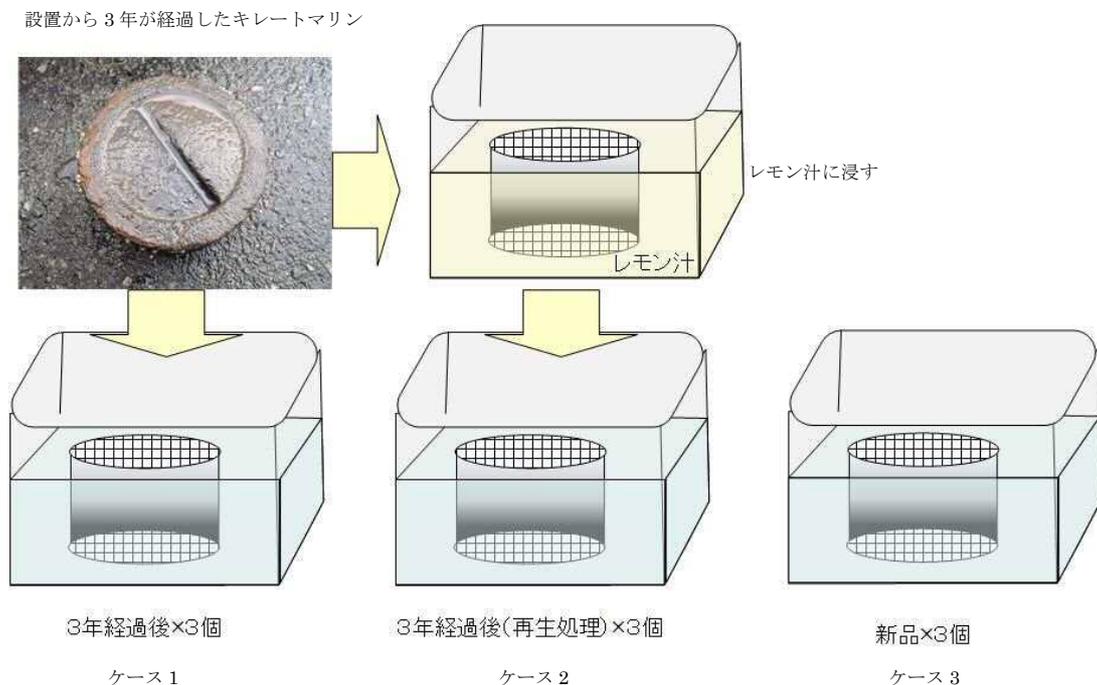


図一 3.7 試験区と対照区における底泥クロロフィル a (平成 28 年 11 月)

第4章 キレートマリンの効果・メカニズムの検証

4.1 キレートマリンの効果継続性に係る試験

- キレートマリンの効果の継続性を検証するため、3年経過後のキレートマリン（ケース1）と、レモン汁による再生処理を行ったキレートマリン（ケース2）、新品のキレートマリン（ケース3）の3ケースで鉄の溶出試験を実施した（各ケース3個ずつ実施）。
- 3年経過後の全鉄の溶出量は、新品の20%程度と、低下していたが、レモン汁による再生処理を行うことで、新品の50%近くまで回復した。
- 植物プランクトンへの効果を考える上で重要となる溶解性鉄の溶出量は、3年経過後ではほぼ0と新品から大きく低下した。
- 一方で、レモン汁による再生処理を行うことで、溶解性鉄の溶出量は新品よりも2倍ほど高くなり、全鉄に占める溶解性鉄の割合は70%近くと、新品の20%と比べても明確に高かった。
- キレートマリンの効果を継続的に得るには、年1回ほどのレモン汁による再生を行うことが効果的であることが示された。

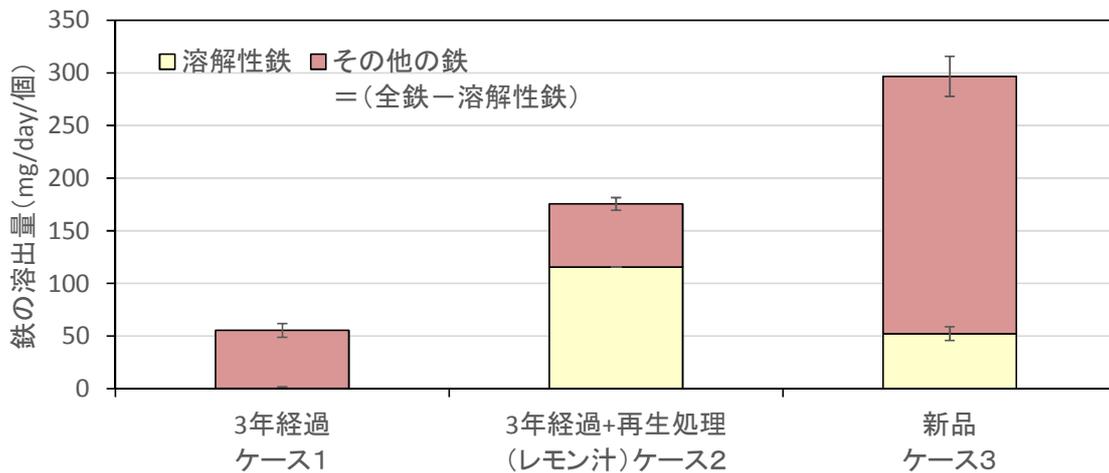


図－ 4.1 効果継続性に係る試験の実施ケース

表－ 4.1 溶出試験結果（平成 28 年度）

溶出試験 の溶媒	キレートマリンの 条件	試料番号	溶出濃度 (mg/L)		キレートマリン1個・ 1日あたりの鉄の溶出 量 (mg/day/個)
			全鉄	溶解性鉄	
人工海水	3年経過 (ケース1)	1	21	0.1	70
		2	19	0.0	63
		3	10	0.0	33
		平均	17	0.0	55
		標準偏差	6	0.1	20
人工海水	3年経過+ レモン汁再生処理 (ケース2)	1	74	32	247
		2	47	42	157
		3	37	30	123
		平均	53	35	173
		標準偏差	19	6	64
人工海水	新品 (ケース3)	1	83	17	277
		2	88	16	293
		3	96	14	320
		平均	89	16	297
		標準偏差	7	2	22

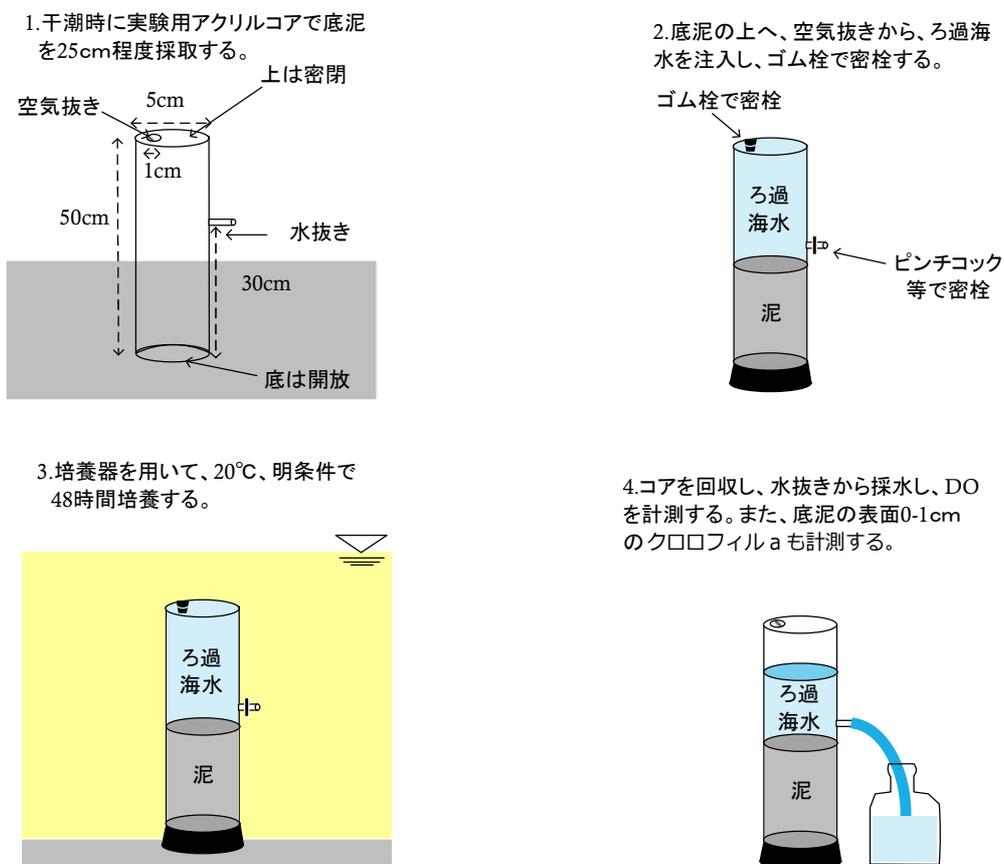
単位換算； (mg/day/個) / (mg/L) = 2.5 (L) × 24 (h) / 18 (h)



図－ 4.2 各ケースにおける全鉄と溶解性鉄の溶出量

4.2 基礎生産力調査

- キレートマリンにより底生微細藻類の活性が増加しているかを確認するため、底生微細藻類の一次生産量の計測を行った。
- 計測は酸素法により、明条件および暗条件下での溶存酸素の増減から一次生産量を計算した。
- 実験は過年度の調査でクロロフィル a の増加効果が最も顕著に見られる 11 月に実施し、実証試験区（更新区）(No.2) と対照区 (No.4) で調査を行った。

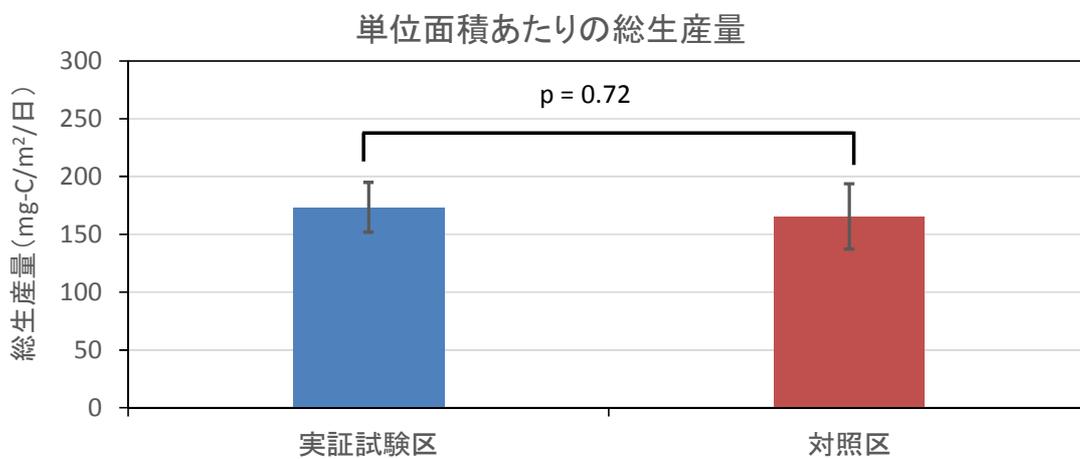


図－ 4.3 一次生産量の測定要領

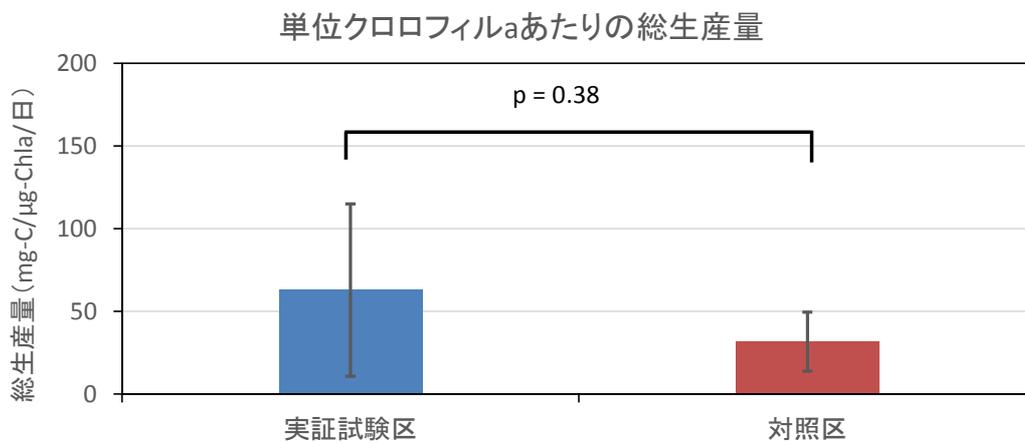
表－ 4.2 一次生産量の測定ケース

調査地点	ケース	検体数	備考
実証試験区 (更新区)	明条件	3	—
	暗条件	3	遮光した条件
	コントロール	1	ろ過海水のみの条件
対照区	明条件	3	—
	暗条件	3	遮光した条件
	コントロール	1	ろ過海水のみの条件

- 室内試験の結果、単位面積あたりの総生産量は実証試験区（更新区）が僅かに高い程度であった（図－ 4.4）。
- 一方で、実験終了時の単位クロロフィル a あたりの総生産量は、実証試験区（更新区）で 2 倍近く高く、キレートマリンからの鉄の供給により生産能力が活性化している可能性がある（図－ 4.5）。



図－ 4.4 単位面積あたりの総生産量



図－ 4.5 試験終了時の単位クロロフィル a あたりの総生産量

第5章 キレートマリンの環境改善効果の評価

環境改善効果の特徴

- キレートマリンからは、キレート鉄が多く溶出し、底質および生物に良い効果をもたらすことが確認され、サプリメント的な効果がある技術と評価できる。
- 底質は、夏季に発生する有害な硫化水素がキレート鉄と結合し、無害化される効果があることが示唆された。また、キレート鉄の供給により、有機物の分解が促進される可能性もある。
- 生物は、鉄の供給により生物の餌となる底生微細藻類の活性が活発になり、大型の生物も増えることが確認された。これらの効果は、既存の生態系を攪乱せず得られることが示された。
- キレートマリンからの鉄の溶出量は1年程度で大きく減少するものの、レモン汁に漬すことで容易に再生可能であることも確認された。

1) キレートマリンによる環境改善効果

○キレートマリンからはキレート鉄が溶出し、底質中の硫化水素を無害化するとともに、底生微細藻類および微生物の活性を活発にする。

○これらの効果により、底生物量も増加し、それによってさらに底泥の浄化が進むことで、場の環境が改善に向かう好循環を作り出すことが期待される技術である。

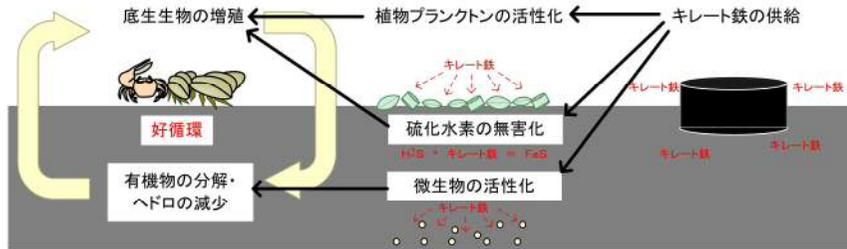


図1 キレートマリンによる環境改善効果のイメージ

2) ヘドロの浄化・改善効果に関する主な試験結果

○底質中の全硫化物量は、キレートマリンを設置した実証試験区で高く、キレートマリンから溶出するキレート鉄が硫化水素を吸着し、無害化しているためと考えられる。

○底質中の強熱減量は、キレートマリンを設置した実証試験区で低く、キレート鉄の供給により、微生物の活性が増加することで、有機物の分解が促進していた可能性がある。

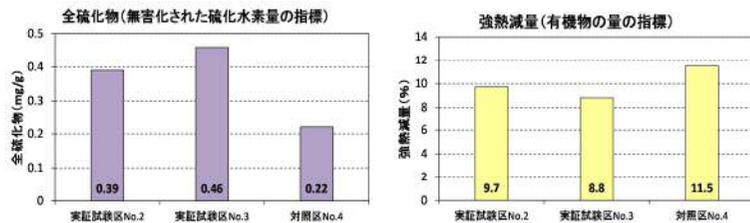


図2 底質中の全硫化物(左)と強熱減量(右)の比較

(豪雨や台風等の気象擾乱の影響の少なかった平成28年9月のデータのみを示した。)

3) 生物生息の場づくりに関する主な試験結果

○底質のクロロフィルa量は、キレートマリンを設置した実証試験区で高い傾向が見られた。キレート鉄の溶出により、底生微細藻類の活性が増加することが示された。

○底生生物の現存量を示す指標として適している湿重量は、特に夏季や秋季において、キレートマリンを設置した実証試験区で高くなることが示された。これは、鉄の溶出により、餌が多いことに加え、硫化水素が無害化されているためと考えられた。

○生物の種構成にはほとんど変化がなく、生態系を攪乱せずに活性化を促していることが示された。

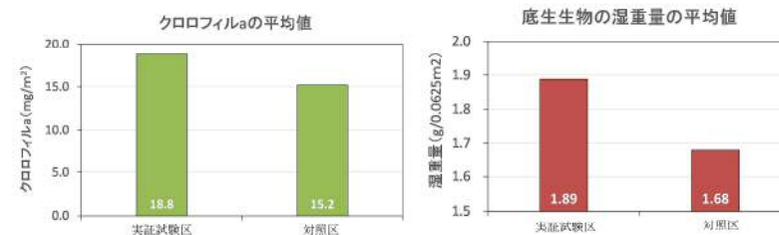


図3 底質のクロロフィルa量(左)と底生生物の湿重量(右)の試験期間中の平均値

4) キレートマリンの効果の継続性に関する主な試験結果

○キレートマリンからの全鉄の溶出量は、設置から1~3年程度で10%程度まで低下するとともに、キレートの生成能力も徐々に失われることが室内試験より示された。

○一方で、キレートマリンをレモン汁に一晚漬すだけで、キレートマリンからの鉄の溶出量は回復し、溶解性鉄の生成能力は、新品よりも高くなることが明らかとなった。

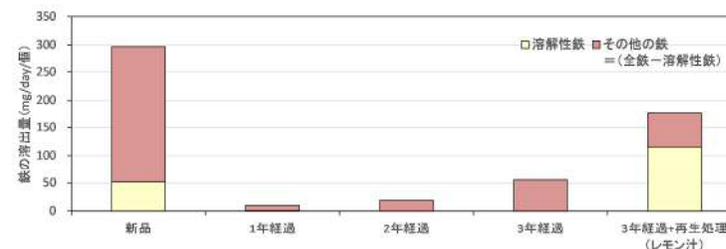


図4 溶出試験で示されたキレートマリンからの全鉄と溶解性鉄の溶出量の変化