

調整池工事で発見された縄文早期東名遺跡の埋没環境と保存対策

松山泰治・松末和之・龍田優美
林満年・奈良秀樹・宮口新治

Burial Environment and Countermeasures for Preservation of the Early Jomon Period Higashimyo Ruins, Discovered by the Regulating Reservoir Construction

Taiji Matsuyama, Kazuyuki Matsusue, Yumi Ryuda,
Mitsutoshi Hayashi, Hideki Nara and Shinji Miyaguchi

Abstract

The Kosegawa regulating reservoir has been constructed to store floodwater with the aim of reducing flood damage from Saga City. During the reservoir construction, six shell middens were discovered in May, 2003, which were named Higashimyo Ruins. The remains of wood products found from two of them were identified to be the Early Jomon period (about 7,000 years ago) by the result of archeological investigation. As for four remaining ruins, the City's Board of Education decided that the locale should be left as they are, because there is not enough time for investigation until the construction deadline.

According to surveys on soil- and groundwater-environments, the deterioration of ruins was considered to be caused by 1) atmospheric oxidation, 2) effect of oxygen dissolved in groundwater, and 3) environmental fluctuation of soils between dry and wet.

The best countermeasure proposed for preservation of four shell middens was the capping fill above ruins. The test in-situ was executed to decide the wide range of capping fill that prevents influence of oxygen dissolved in groundwater. Installation of monitoring wells was followed to analyze groundwater and soil qualities in various horizons around ruins. The observation results show that the ruins are gradually recovering the initial reduction state.

Keywords: Higashimyo ruins, soil environment, groundwater environment, capping fill

(要 旨)

佐賀市の洪水被害軽減を目的とする巨勢川調整池の掘削工事中に、縄文時代早期東名遺跡の貝塚が6箇所発見された。2箇所の貝塚の発掘調査により、わが国最古級の木製工芸品等が多数発見された。残る4貝塚は事業完成まで期間がないことから現状保存することとされ、限られた時間の中で掘削による遺物劣化メカニズムの究明と保存対策の立案が求められた。

調査の結果、遺跡の劣化要因としては、①大気(酸素)の影響、②地下水(溶存酸素)の影響、③周辺土壌の乾湿繰り返し、の3つの要因が考えられた。

対策工法は基本的に遺跡をキャッピングすることとし、キャッピング外から流入する地下水の影響を受けないキャッピング範囲を決定するための現地実験を行った。

対策工法の有効性を検証するため、現状保存する4貝塚のうち1貝塚において現地試験施工を行い、土壌及び地下水環境モニタリングを約半年にわたり実施した。現在のところ遺跡の保存環境は掘削前の還元状態に徐々に戻りつつある。

キーワード: 東名遺跡, 土壌環境, 地下水環境, キャッピング

1. はじめに

佐賀導水事業は、筑後川、城原川、嘉瀬川を全長約23kmの導水路で結び、河川の流量を調整して流況の改善を図る事業であり、洪水調節や内水排除等の治水目的に加え、流水の正常な機能の維持と水道用水の補給という利水目的も有している(図-1)¹⁾。

このうち、洪水調節を行い、佐賀市街部を洪水被害から守る施設として巨勢川(こせがわ)調整池が建設中である。この巨勢川調整池掘削工事中に約7,000年前の縄文時代早期東名(ひがしみよう)遺跡の6つの貝塚が発見され、佐賀市教育委員会により発掘調査が進められてきた。

しかし、4つの貝塚は調整池計画高まで掘削が進んだこと、また調整池は平成20年度完成を目標としており、現状のまま調整池内に保存するという方針が決定された。そのため、残り短い事業期間の中で、治水施設の完成と治水規模を縮小することなく遺跡の現状保存を行うという、相反する難しい課題を解決することが求められた。

2. 巨勢川調整池について

2.1 概要

巨勢川調整池は洪水調節用の掘込式調整池で、工事は平成2年度より着手し、平成20年度完成予定であり、一部を除き掘削は終了している。

調整池は標高約4.8mの水田地帯に位置し、東西約900m、南北約600m、面積約55haで、標高-0.5m～

-1.5mまで掘り下げ、周囲を巡らした堤防(堤高+6.10m)により標高+5.5mまで湛水する計画で、洪水調節最大容量は220万 m^3 である。調整池で調節した水は、調整池内のポンプにより西方を南流する嘉瀬川に排水するしくみとなっている(写真-1)²⁾。

2.2 遺跡調査の経緯

巨勢川調整池工事に関連する考古学関係の調査としては、平成2年度の工事開始時に遺跡確認調査により縄文早期の東名遺跡群が確認されており、平成5年度から平成8年度にかけて発掘調査が実施され、調整池西部の久富二本杉遺跡および調整池東部の標高3m(地表から約



写真-1 巨勢川調整池航空写真²⁾

Photo 1 Aerial view of the Kosegawa regulating reservoir.



図-1 巨勢川調整池位置図¹⁾

Fig. 1 Map showing the locality of the Kosegawa regulating reservoir.

2m) 付近で東名遺跡の集落跡及び墓地が発見されていた。

調整池掘削工事が計画深度に近い標高 -0.5m 付近まで進んだ平成15年5月に新たに貝塚層が発見された。引き続き平成15～16年度に実施された緊急発掘調査により、縄文時代早期の貝塚が全部で6箇所確認された(図-2、図-3)。

調整池の中央水路(標高 -2.50m まで掘削予定)に位置する第1、第2貝塚については、佐賀市教育委員会による本格的な発掘調査が実施され、わが国における最古級の貴重な木製品、網籠、装身具、木櫛などの遺物とともにドングリ類の貯蔵穴など、7,000年前の縄文人の生活の

様子がわかる遺構が発見された。

一方、残る第3～第6貝塚については、調整池工事の完成工期(平成20年度)が迫っており発掘調査の時間的余裕がないことから、現状保存することになった。

2.3 調整池付近の地形・地質

巨勢川調整池は、北側の背振山地と南側の有明海の間に広がる筑紫平野のほぼ中央、現在の海岸線より14～15 km陸地側の標高 +4.8m 程度の沖積低地(水田地帯)に位置する。

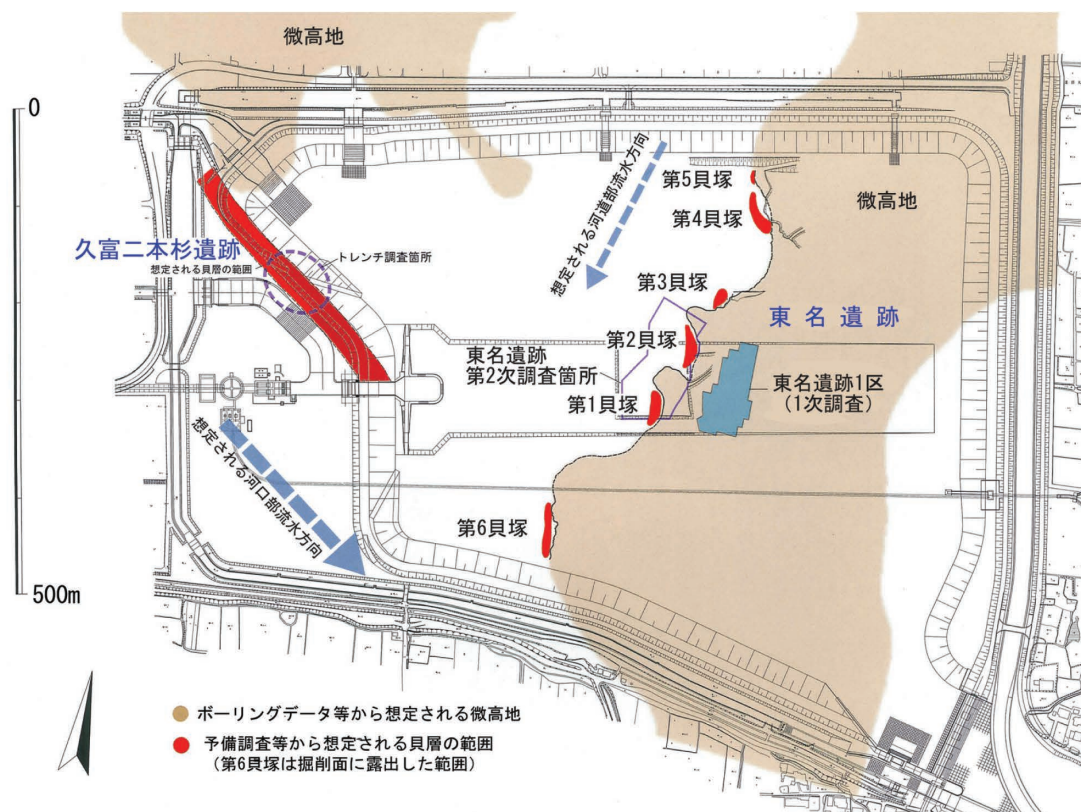


図-2 巨勢川調整池における遺跡分布図²⁾

Fig. 2 Map showing six shell middens discovered on the bottom of the Kosegawa regulating reservoir.

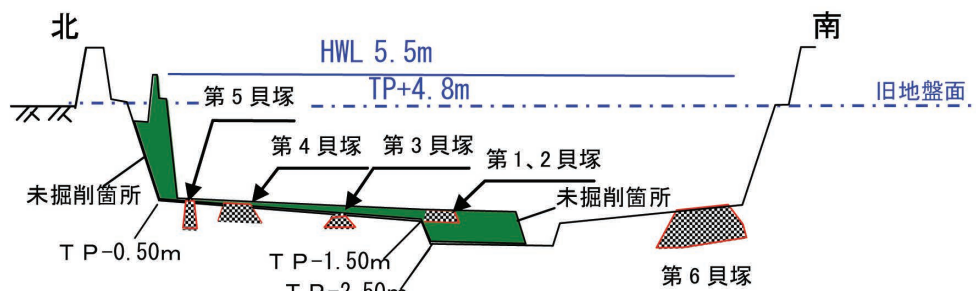


図-3 巨勢川調整池断面図

Fig. 3 Cross section of the Kosegawa regulating reservoir.

巨勢川調整池周辺の地質層序表を表-1に示す。巨勢川調整池では、下位より中原層、火山灰層、三田川層、蓮池層が分布し、火山灰層以外は各々砂質土と粘性土に区分される。

調整池付近では、三田川層の上面標高は起伏に富んでおり、調整池の東半部では標高 +2~ +3m のほぼ南北方向の尾根状の高まりとなっており、西半部では標高 -5m に達する南に開いた谷となっている。この起伏は最終氷

期における河川侵食によると考えられ、貝塚はこの谷斜面に沿うように分布している(図-4)。現在は蓮池層によって覆われて地表は低平な沖積低地となっており、三田川層は露出してない。

下山他³⁾によれば、筑紫平野における第四紀層の特徴・堆積環境は以下の通りである。

中原層は最終間氷期(12~13万年前)の三角州、氾濫原、扇状地を構成する非海成層である。巨勢川調整池

表-1 巨勢川調整池周辺の地質層序表
Table.1 Stratigraphy around the Kosegawa regulating reservoir.

時代	テフラ (y. BP)	有明海北岸低地 (下山他, 1994) ³⁾		巨勢川調整池周辺		
		地下地質	表層地質	地質名	透水係数 (cm/sec)	層相
完新世	K-Ah (6,300)	有明粘土層	蓮池層上部	蓮池層粘性土	$10^{-8} \sim 10^{-6}$	黒灰色を呈し、含水費が高く軟質な粘性土である。多数の葎等の腐植物を混入する。
			蓮池層下部	蓮池層砂質土	$10^{-4} \sim 10^{-1}$	暗灰色を呈し、粒径は不均質な中砂を主体とする。所々にシルトを挟入する。
更新世	AT (22,000)	三田川層	三田川層粘性土	三田川層粘性土	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	暗灰色を呈し、比較的軟質な粘性土で、比較的均質である。部分的に腐植物を混入する。
			三田川層砂質土	三田川層砂質土	$10^{-5} \sim 10^{-1}$	暗青灰色を呈し、径2~10mmの軽石を混入する粒径の不均質な砂である。石英粒が主体で花崗岩礫を含むことから、花崗岩起源の砂である。
	Aso-4 (85,000)	阿蘇-4火砕流堆積物	火山灰層	火山灰層	$10^{-6} \sim 10^{-2}$	黒灰~褐灰色を呈し、径10~30mmの軽石礫を混入する火山灰質砂である。本層上部では軽石礫が風化し、粘性土状を呈する場合がある。
		Aso-3 (120,000)	高木瀬層	中原層上部	中原層粘性土	$10^{-7} \sim 10^{-6}$
中原層下部	中原層粘性土			$10^{-5} \sim 10^{-2}$	暗青灰色を呈し、礫を混入する花崗岩起源の砂である。	

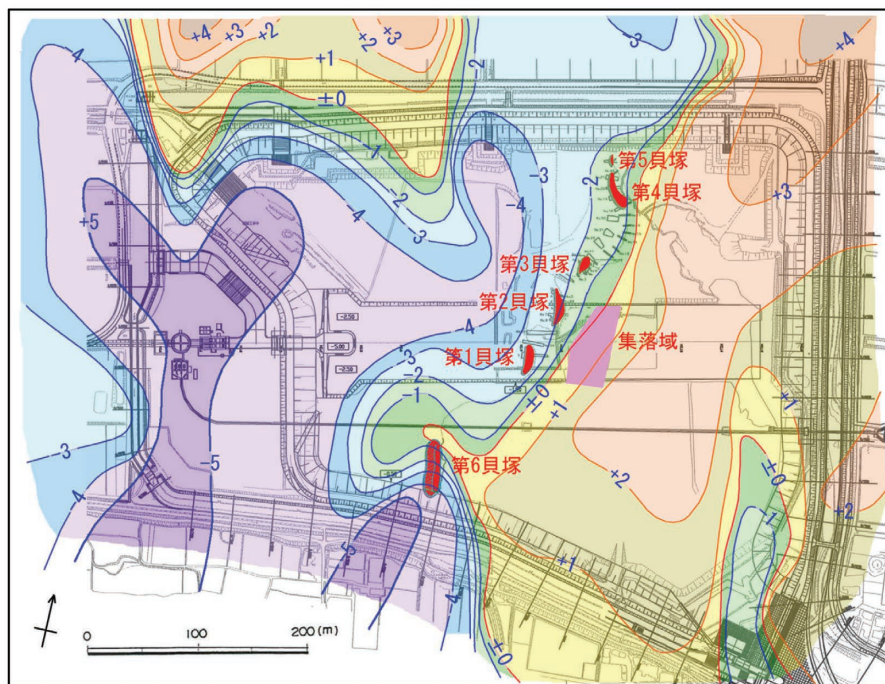


図-4 三田川層の上面等高線図。等高線の数値は標高(m)
Fig.4 Contour map of the upper surface of the Mitagawa Formation. Numbers show the altitude above sea level in meters.

で火山灰層としている地層は、阿蘇-4火砕流堆積物(約8.5万年前)に相当する。三田川層は山麓の扇状地から氾濫原において形成された河成堆積物を主体としている。蓮池層は、汽水域から淡水域で堆積した粘土、シルト、砂、礫からなり、含水率が高く軟弱で植物繊維を含む。なお、蓮池層と同時異相関係にある有明粘土層は貝化石を含む海成層で、調整池付近には分布しない。

下山他³⁾による有明粘土層の分布から推定される縄文海進ピーク時期(約6,000年前)の海岸線の位置を図-5に示す。一方、有明粘土層の上面高度から推定される有明海北部地域における縄文海進ピーク時の海水準は、+3~+5mとされる。

調整池近傍では有明粘土層の上面は標高-1.9mと低いが、縄文海進ピーク時に海水準が+3~+5mまで上昇した際には、調整池周辺では満潮時に海成粘土が浮泥化して河川を遡上し、蓮池層の汽水成粘性土が現在の地表である標高+5mまで厚く堆積したと考えられる。

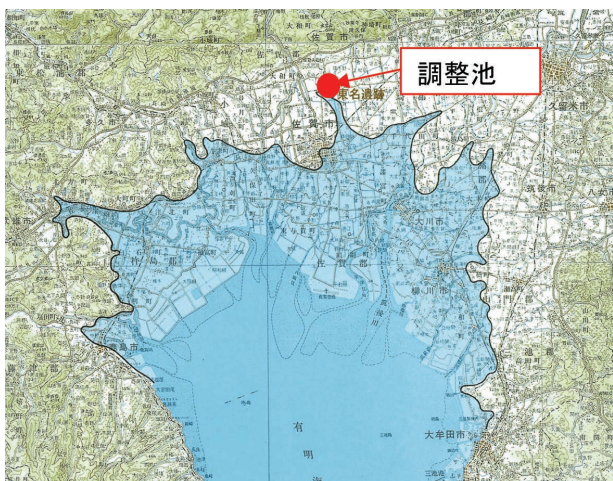


図-5 縄文海進ピーク時の海岸線の推定位置³⁾

Fig. 5 The shoreline at the maximum ascent of sea level about 6,000 years ago (Jomon transgression) in the northern part of the Ariake Sea (after Shimoyama et al., 1994).

3. 遺跡の立地と環境

3.1 遺跡の立地と保存環境

東名遺跡が木製品等を含め、現在まで良好な状態で残存したメカニズムについては、以下のように推定される。

(1) 遺跡の形成時の環境(約7,000年前)

地質調査や発掘調査結果から遺跡が形成された約7,000年前は、調整池の東半部に三田川層からなる微高地が分布し、西側は谷となっていた。

遺跡は標高+2~3mの微高地上に集落が、谷斜面の標高-0.5~-1.5m付近に貝塚が分布し、ドングリ貯蔵穴は貝塚よりやや下がった位置に分布している。

貝塚には浅海の貝類(ハイガイ、ヤマトシジミ、アゲマキ、カキ)が多く含まれていること²⁾、遺跡を包含する蓮池層から淡水生と汽水生の珪藻化石が産出すること⁴⁾から、遺跡付近は河口の汽水環境であったと考えられる。

遺跡周辺では現在の有明海沿岸と同様に、満潮時に海水とともに海底に堆積した粘性土(有明粘土層)が浮泥となって遡上して堆積していたと推定される。

(2) 蓮池層の堆積

遺跡が形成された約7,000年前は後氷期の海面上昇期で、海面は約6,000年前の縄文海進のピークに向かってさらに上昇した。

上述したように縄文海進ピーク時に有明海北部沿岸で海水準が+3~+5mまで上昇した際に、調整池周辺では満潮時に海成粘土が浮泥化して河川を遡上し、蓮池層の汽水成粘性土が現地表面(標高+5m)まで厚く堆積したと考えられる。

この結果、ドングリ貯蔵穴や貝塚及び微高地にあった集落も、蓮池層粘性土に厚く覆われた。

(3) 遺跡の保存環境

遺跡を包含する蓮池層粘性土は、汽水成の粘性土である。後述するように海水に由来する硫酸イオン(SO_4^{2-})が含まれることから、蓮池層粘性土は、海成の有明粘土ほどではないが、酸化環境においては好気性微生物等の活動により酸性土に変化する可能性があった。しかし、東名遺跡の貝塚や木製遺物は7,000年間良好な状態で保存されてきている。この遺跡保存のメカニズムは以下のように推定される。

遺跡周辺は形成直後の海面上昇によって、粘性土によって急速に覆われたと推定される。一般に透水性の悪い粘性土中では、有機物の分解や好気性微生物の活動により土壌中の酸素が消費され、還元状態となると考えられる。さらに、こうした還元状態の粘性土中では、土壌中の硫酸イオン(SO_4^{2-})が硫酸還元菌等により還元されて硫化水素イオン(HS^-)となり、それが粘性土中の第一鉄イオンと反応し、黄鉄鉱(FeS_2)を生成する。

東名遺跡においては、遺跡形成直後に蓮池層粘性土に急速に覆われた結果、遺物周辺が還元状態となった。その後、海面が現在の海水準に低下しても地下水位は地表付近に留まり、遺跡を覆う蓮池層粘性土は間隙水で飽和されたままとした。さらに、貝塚に大量に含まれる貝殻の炭酸カルシウム分は、遺跡周辺の酸性化を抑制する作用を持つと考えられ、遺物の保存に寄与していたと推定される。

3.2 土壌・地下水環境調査

調整池工事による掘削により、遺跡周辺の土壌環境は還元状態から酸化状態へと大きく変化したと考えられる。

この環境変化の程度の確認と地下水の流れによる遺跡への影響を検討するため調査を行った。調査地点は、調査池の北側の調整池外で No.4, No.5 の2箇所、調整池内では保存対象の第4, 5貝塚を挟んで No.1, No.6, 第3貝塚を挟んで No.2, No.7, 第6貝塚を挟んで No.3, No.8 の計6箇所とした(図-6)。

各調査地点では、中原層、火山灰層、三田川層、蓮池層の地層毎にボーリングを行い、地下水の水質分析と土壌分析を行って、地下水観測井を設置した。ただし、調整池内の蓮池層は、掘削により削割されているか、残っていても薄いため、No.3地点以外では観測井戸を設置

できなかった。図-7に調整池の南北地質断面図及び各帯水層における地下水位の概要を示す。

(1) 掘削前の土壌環境(調整池外)

遺跡が保存されてきた掘削前の環境を把握するために、調整池外で土壌分析を行った(表-2)。工事前の調査により調整池周辺の地下水は北から南へ向かって流れていることが確認されており⁵⁾、調整池北側の2箇所(No.4とNo.5地点)で調査を実施した。

遺跡を包含する蓮池層の粘性土層については、地表から-4~-8mの試料について土壌分析を行った。蓮池層

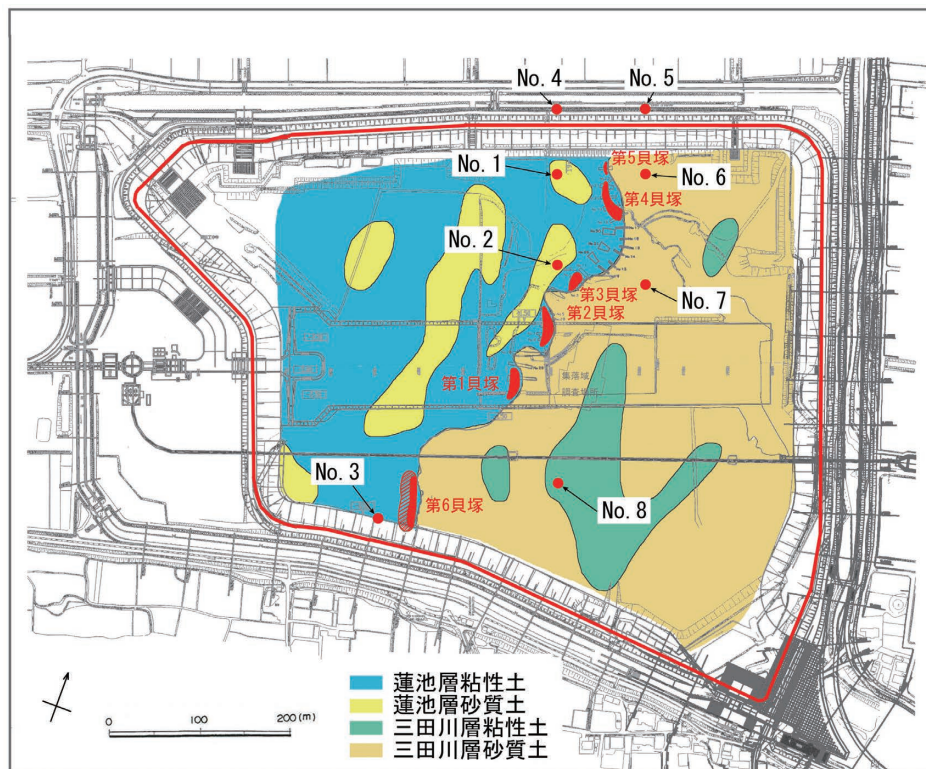


図-6 掘削底盤における地質分布と地下水観測孔位置図

Fig. 6 Geology on the bottom of the Kosegawa regulating reservoir. Nos. 1-8 indicate the locations of groundwater monitoring wells.

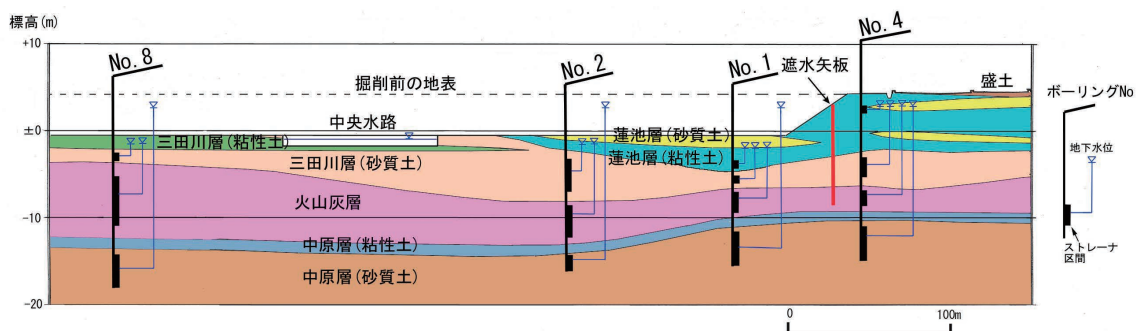


図-7 調整池の南北地質断面図と地下水観測孔における概略の水位

Fig. 7 Geological section (N-S direction) of the Kosegawa regulating reservoir. Groundwater levels measured at different aquifer units are shown.

粘性土は全硫黄含有量が 14,500mg/kg と多く、過酸化水素を用いた酸化促進試験では pH (H₂O₂) は 2.4 を示し、酸性環境で硫酸酸性に変わる可能性があることを示した。しかしながら、現在の pH は 7.6 とほぼ中性で、酸化還元電位もマイナスの値を示しており、地表から数 m 深くなれば還元状態に保たれていることが分かった。

(2) 掘削後の土壌環境 (調整池内)

調整池工事により深度 5～6 m 程度掘り込んだ調整池

内における各地層毎及び掘削底盤に露出する蓮池層粘性土の表層の土壌分析を実施し、掘削による土壌環境への影響を確認した。

その結果、蓮池層は掘削底盤から -0.72 m 以深では、ほぼ中性を示し、酸化還元電位もマイナスで、還元環境を維持していることが確認された (表-3)。

一方、掘削により直接大気や地表水にさらされるようになった遺跡周辺に分布する蓮池層粘性土の表層部 (表面より 30cm 程度以浅) では、一部の試料が pH 5 以下と

表-2 土壌分析結果 (調整池外)

Table. 2 Analytical data of pH(H₂O), pH(H₂O₂), Eh, total sulfur, sulfate-sulfur, and the average percent of sulfate-sulfur / total sulfur of soil samples from different beds (taken at the outside of the reservoir).

地層区分		採取位置		pH		酸化還元電位 Eh(mV)	硫黄含有量(mg/kg)		硫酸態硫黄/全硫黄(平均)
		深度 GL(m)	標高 TP(m)	(H ₂ O)	(H ₂ O ₂)		全硫黄	硫酸態硫黄	
蓮池層	粘性土	-3.58～-7.93	-1.90～-2.45	6.7～8.2 (7.6)	2.0～2.8 (2.4)	-99～-128 (-112)	8,000～22,000 (14,500)	13～31 (26)	0.18%
	砂質土	-6.60～-7.85	-0.62～-2.00	8.0～8.2 (8.1)	2.5～2.9 (2.7)	-94～-141 (-118)	2,700～4,500 (3,600)	21～37 (29)	0.81%
三田川層	砂質土	-8.60～-10.60	-2.57～-4.75	6.5～7.8 (7.2)	4.2～7.2 (5.8)	-140～-154 (-147)	130～1,200 (600)	2.3～3.4 (4.0)	0.67%
火山灰層	火山灰質土	-12.98～-14.70	-6.95～-8.85	5.5～6.4 (6.0)	6.3～7.3 (6.8)	-108～-127 (-116)	24～600 (206)	5.2～53 (24)	12%
中原層	粘性土	-15.88～-19.50	-9.85～-13.65	6.8～7.6 (7.2)	4.8～8.0 (6.1)	-125～-126 (-125)	32～890 (524)	1.2～5.7 (3.9)	0.74%
	砂質土	-18.23～-22.23	-12.20～-16.38	7.0～7.4 (7.2)	8.5～8.6 (8.6)	-164～-179 (-172)	18～20 (19)	2.1～2.5 (2.3)	12%

■ pH ≤ 3.5 酸性硫酸塩土
() 平均

表-3 土壌分析結果 (調整池内)

Table. 3 Analytical data of pH(H₂O), pH(H₂O₂), Eh, total sulfur, sulfate-sulfur, and the average percent of sulfate-sulfur / total sulfur of soil samples from different beds (taken within the reservoir).

地層区分		採取位置		pH		酸化還元電位 Eh(mV)	硫黄含有量(mg/kg)		硫酸態硫黄/全硫黄(平均)
		深度 GL(m)	標高 TP(m)	(H ₂ O)	(H ₂ O ₂)		全硫黄	硫酸態硫黄	
蓮池層	粘性土	-0.72～-2.02	-1.20～-2.52	5.9～8.0 (7.0)	2.2～2.9 (2.5)	-110～-158 (-135)	4,900～7,400 (6,000)	69～553 (263)	4.4%
	砂質土	-2.40	-2.89	6.9 (6.9)	2.4 (2.4)	-146 (-146)	2,100 (2,100)	79 (79)	3.8%
三田川層	粘性土	-0.99～-1.11	-1.95～-2.60	6.7～7.2 (7.0)	3.5～6.6 (5.1)	-162～-164 (-163)	120～1,100 (610)	6.6～73 (40)	6.6%
	砂質土	-1.50～-7.52	-2.20～-8.00	6.0～7.7 (7.1)	2.5～10 (6.9)	-130～-192 (-163)	4～2,800 (668)	0.97～290 (31)	4.6%
火山灰層	火山灰質土	-3.00～-11.50	-3.84～-11.99	5.5～8.4 (7.3)	3.6～10 (8.0)	-153～-220 (-176)	4～470 (68)	0.72～33 (6.8)	10%
中原層	粘性土	-9.50～-16.50	-10.26～-16.99	7.5～8.0 (7.7)	7.0～8.0 (7.6)	-69～-125 (-107)	16～2,000 (506)	1.5～7.9 (3.6)	0.71%
	砂質土	-10.87～-18.50	-11.37～-18.99	6.6～7.4 (6.9)	7.0～8.3 (7.8)	-128～-185 (-161)	20～750 (229)	3.9～12 (8.4)	3.7%

■ pH ≤ 3.5 酸性硫酸塩土
() 平均

酸性で、酸化還元電位もプラスの値を示し、表層から酸化が進行していることが確認された(表-4)。ただし、追加調査により深度50cm以深では還元状態が保たれていることが確認されていた。

(3) 地下水位と地下水の流れ

調整池外(No.4)と調整池内(No.3)における各帯水層の地下水位と調整池湛水の水位の変化を図-8に示す。

掘削前の状況を示すと考えられる調整池外(No.4)で観測された各地層の地下水位は標高+2~+3mである。

調整池内の湛水は、発掘中の第1, 第2貝塚が水没す

るのを防ぐため、標高-1.5m付近に保たれており、降雨等による増水時にはポンプで排水されている。

調整池内(No.3)における各地層の地下水位は、調整池外(No.4)とほぼ同じ水位を示す中原層を除き、掘削底盤(TP-1.5~-0.5m)付近まで低下している。

三田川層の地下水は、調整池内の各観測井の地下水位より中央水路の北側では南へ、南側では北へ流れており、中央水路へ向かって傾斜する底盤の傾斜にほぼ沿っている(図-9)。このことは、調整池内の三田川層の地下水が火山灰層まで挿入された遮水矢板により調整池外と完全に遮断されていることを示している。

表-4 遺跡周辺表層土壌分析結果(2006年3月9日)

Table 4 Analytical data of pH(H₂O) and Eh of soil samples taken from different depths (5, 15 and 30 cm) just around Nos. 1-2 shell middens.

採取場所	土質区分	表面より5cm		表面より15cm		表面より30cm		
		pH(H ₂ O)	酸化還元電位 Eh(mV)	pH(H ₂ O)	酸化還元電位 Eh(mV)	pH(H ₂ O)	酸化還元電位 Eh(mV)	
第2貝塚①	粘性土	6.5	496	7.2	484	7.4	269	
	砂質土	3.8	688	4.0	555			
第2貝塚②	粘性土	3.5	670	5.0	495			
	砂質土	4.5	574	4.8	534	4.7	227	
第1貝塚①	粘性土	貝塚上	6.5	544				
		貝塚中	6.8	413				
		貝塚下	7.1	413	7.3	152	7.4	84
	砂質土	貝塚下	4.0	463	4.0	-183	(地下水により測定困難)	
第1貝塚②	粘性土	3.5	535	5.2	497	5.5	356	

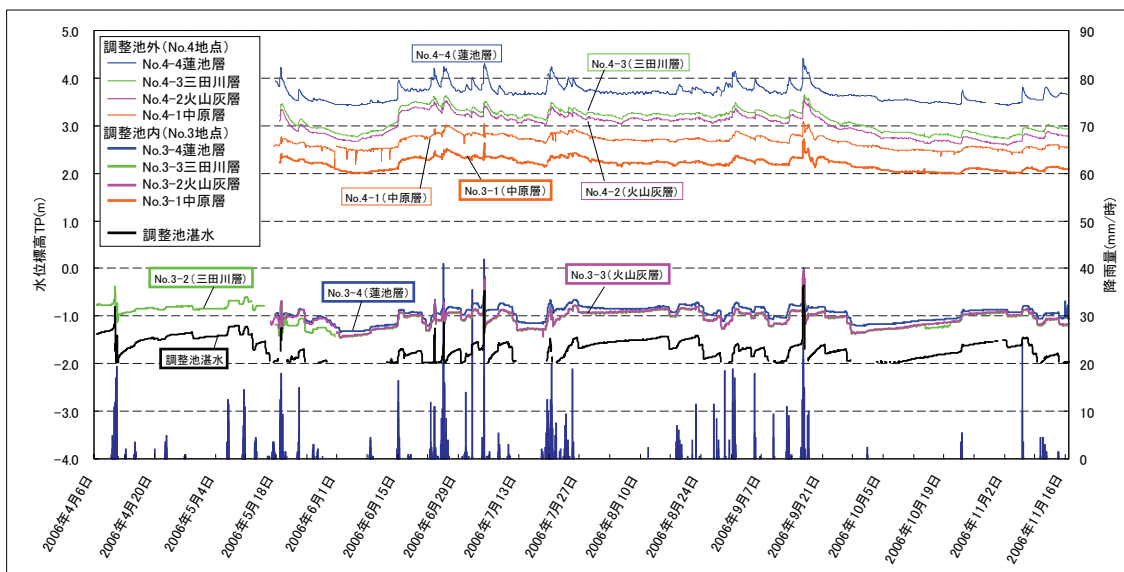


図-8 調整池湛水と地下水の水位経時変化

Fig. 8 Temporal variations of groundwater and reservoir water levels, and bar graphs of daily rainfalls.

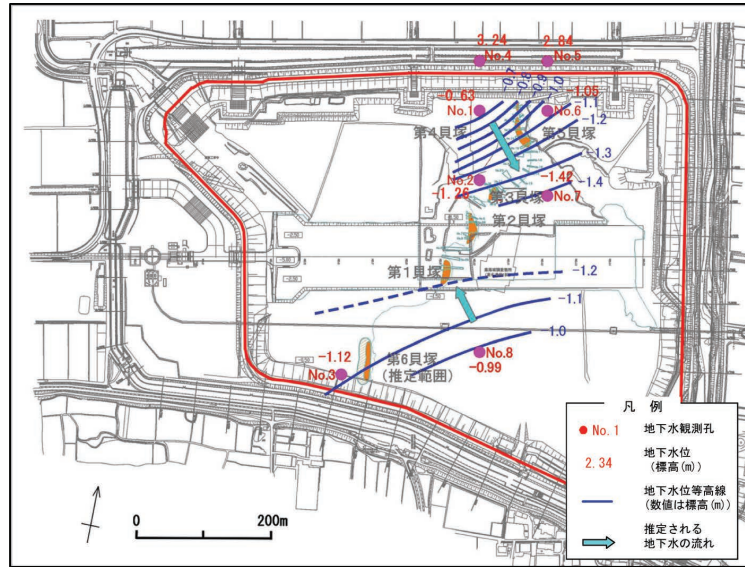


図-9 調整池内の三田川層の地下水流動 (2006年5月20日)

Fig. 9 Groundwater flow directions in the Mitagawa Formation (measured at May 20, 2006).

(4) 地下水の水質

調整池外 (No.4 と No.5 地点) の各地層の地下水の水質分析結果を図-10に示す。

中原層, 火山灰層, 三田川層の地下水の水質には明瞭な差は見られない。しかし, 蓮池層では炭酸水素イオン濃度が低く, 硫酸イオン濃度が高いことから, 蓮池層に含まれる硫黄分が溶存酸素を含む地表水の影響を受けて, 酸化がある程度は進行していることが認められた。

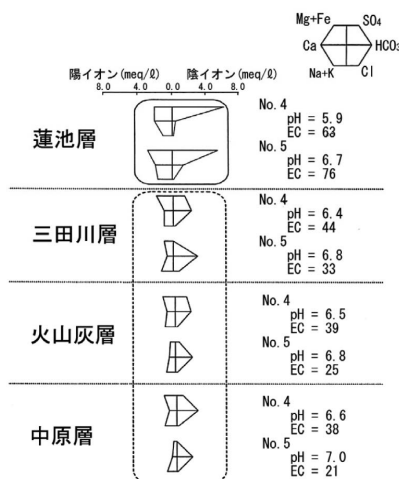


図-10 掘削前の各地層の地下水の水質

Fig. 10 Stiff diagrams of groundwater from different formations. The water samples were taken before the beginning of the construction of Kosegawa regulating reservoir.

4. 遺跡保存対策工

4.1 保存対策の方針

遺跡保存対策は, 遺跡保存に適していた掘削以前の環境に近づけるため, ①大気による酸素の影響を遮断する, ②遺跡を劣化させる恐れのある溶存酸素を含んだ地下水の流入を抑制する, ③土壌の乾湿の繰返しを避ける, の3つの方針に基づく対策を行い, 図-11⁶⁾の白矢印で示すように, 掘削によって酸化状態に劣化している遺跡周辺の状態を還元状態に戻すことを目標とした。

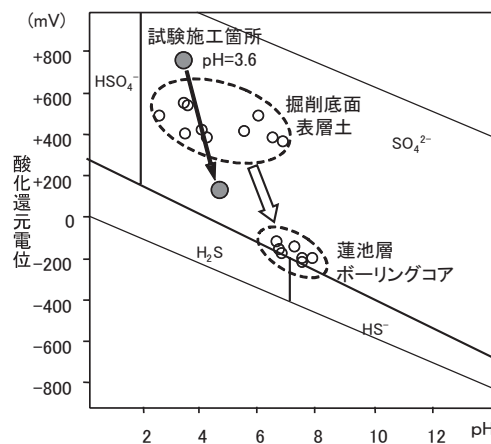


図-11 蓮池層掘削前後の環境変化を示す硫黄種の pH-Eh 図 (25°C, 1atm)⁶⁾。白矢印は掘削により劣化した環境の掘削前への復元の目標を示す。黒矢印は試験施工箇所における遺跡環境の回復状況を示す

Fig. 11 Comparison of Eh-pH values between soil samples taken from the bottom of the reservoir and those taken from the same horizon of the Hasuie Formation by boring. The values are plotted on the Eh-pH diagram of sulfur species at 25°C, 1 atm. White arrow shows the environmental change of deteriorated soils from acidic-oxidizing to neutral-reducing conditions. Black arrow indicates the expected recovering trend of soil conditions at the test site of capping fill.

4.2 遺跡保存対策の検討

保存方法として、遺跡を大気から遮断し、土壌の乾湿繰り返しを防ぐために基本的には遺跡を覆うキャッピング工法とした。ここでは覆土、改良土、遮水シート等の組み合わせ全体をキャッピングと呼ぶ。

キャッピング外の地表より溶存酸素を含む雨水が浸透して遺跡を酸化する恐れがあるため、遮水壁併用案も検討したが、遺跡への工事の影響、経済性、工期等を考慮して遮水壁は採用しなかった。

この場合、キャッピング外の地表より流入する溶存酸素の影響については、地下水中の溶存酸素は地層中の有機物や好気性微生物により消費され、最終的には無酸素の還元状態になると考えられることから、地層中を浸透する地下水の溶存酸素が消費される距離以上の範囲を覆うことで対応することとした。

次に、キャッピング工法として、土質系キャッピング工法とシート系キャッピング工法を比較検討した(表-5)。後者は、貝層上面に粘性土や遮水シートなどの難透水性材料を敷設するもので、経済的である。しかし、シートの施工性や乾燥収縮亀裂、地下水位上昇時の浮き上がり等の問題点が考えられたため不採用とした。

最終的には表-5に示す材料と構造の比較を行い、蓮池層の粘性土と三田川層の砂質土とを混合して粒度調整し、セメントを添加した改良土による土質系キャッピング

工法(セメント改良層と覆土層による)を選定した。

保存の基本方針を満たすためには、キャッピング材料は以下の条件をクリアする必要があった。

- 1) 目標とする遮水性(透水系数)の確保
- 2) キャッピングの厚さと範囲の決定
- 3) 乾燥収縮亀裂対策
- 4) 最少セメント量による施工性の確保





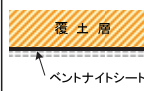
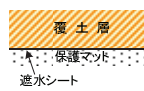
乾燥収縮亀裂対策については、堤体に対して亀裂を生じにくいことが経験的に把握されている粒度分布を目安に、現地砂質土を混合した粒度調整を行い、また固化による団粒化の影響を軽減するため、セメント添加量を最少に抑えることにより対応することとした。

さらに、セメント改良層には夏期などの高温、乾燥による旱天亀裂の発生や、植物根の浸入などにも対応するため、1.0m厚の覆土を施すこととした。この覆土層厚は、過去の異常気象時(平成6年)に近隣堤防で観測された地中温度の記録より、外気温度変化の影響がなくなる厚さを参考として決定した。

次に、セメント改良層の厚さと遮水性は、「廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領(平成13年)」⁷⁾を参考に以下のように設定した。

厚さ 50 cm, かつ透水系数が 1×10^{-6} cm/s 以下

表-5 キャッピングの材料と構造の比較表
Table.5 Comparison among six kinds of construction methods for capping fill.

分類	土質系キャッピング工法				シート系キャッピング工法	
	粘土層工法	毛管バリア工法	安定処理土工法		土質遮水工法	遮水シート工法
断面構造						
材質	粘土	砂+礫	現地発生土+石灰	現地発生土+セメント	ペントナイトシート	遮水シート
概要	透水性の低い粘土によるキャッピング	毛管力の働きによって形成される遮水層による工法	雨水浸透防止と石灰の中和反応を有した工法	セメント改良を行い、雨水浸透及び洪水等による浸食を防止する	ペントナイト等を用いた土質遮水工法	人工素材を用いた雨水遮断工法
施工性	△	△	○	○	○	△
遮水性	○	△	○	○	△	○
耐久性	△	○	△	○	△	△
経済性	◎	○	○	○	△	△
問題点	①含水比が高く施工性が悪い。 ②表面に亀裂が生じ遮水性能が低下する。 ③酸化するとキャッピング自体から硫酸を発生する可能性がある。 ④乾燥防止のため、覆土が必要である。	①完全な遮水構造ではないため、水没の可能性がある場所では、目詰り等により機能が不十分となる可能性が高い。 ②洪水時に流失する可能性があるため、覆土が必要である。	①表面に乾裂が生じ雨水が浸透する可能性がある。 ②酸性水が発生しても石灰で中和するが、石灰が消費尽くされると効果がない。 ③乾燥防止のため覆土が必要である。	①表面に乾裂が生じ雨水が浸透する可能性があるため、覆土が必要である。 ②耐久性は石灰処理土よりも高い。	①電解質イオンを多く含む浸出水に対して膨潤が抑制され、遮水性が低下する。	①シート単独では、破損の恐れが高い(自己修復する材料もある) ②洪水時に水没した場合に揚圧力により浮き上がって流出する恐れがあり、覆土が必要となる。
総合評価	△	△	○	◎	△	△

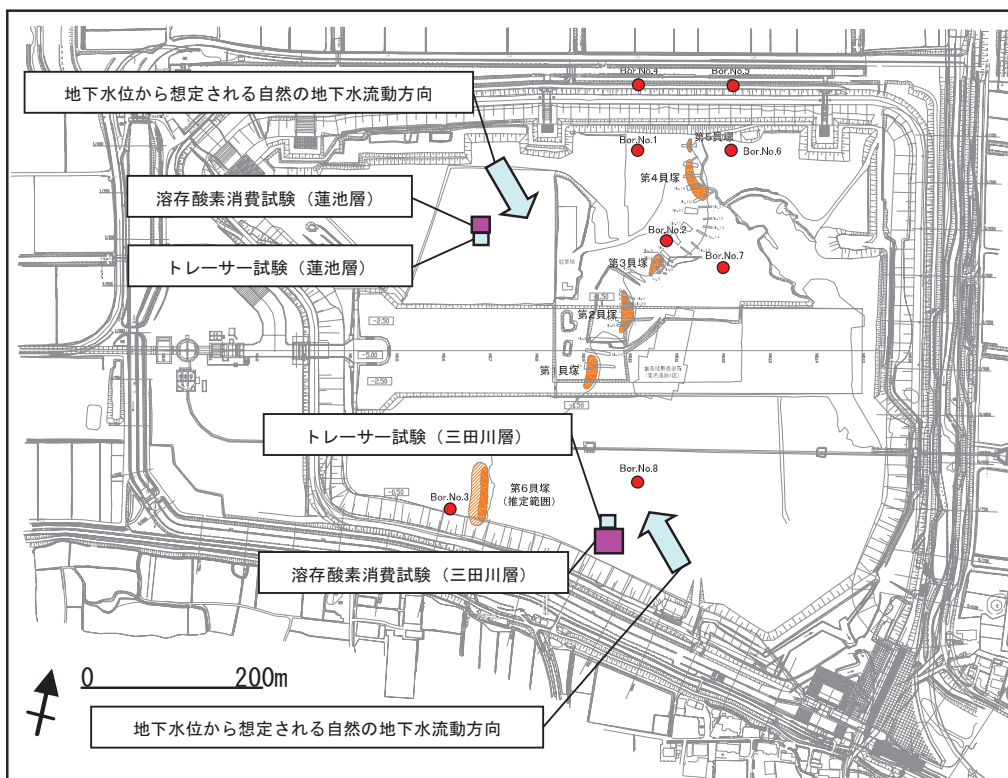


図-12 トレーサー試験と溶存酸素消費試験の位置図

Fig. 12 Location of tracer test and dissolved oxygen test sites on the bottom of the reservoir. Two arrows are the directions of groundwater flow directly estimated from the tracer tests.

5. 現地試験

キャッピングによる遺跡の保存対策工については前例がないことから、その施工性や有効性の確認のため、現地試験を実施し、その効果を検証する必要がある。

5.1 溶存酸素消費試験

遺跡を覆うキャッピングの範囲を決定するためには、キャッピング外より流入する溶存酸素を含む雨水が地層中の有機物や好気性微生物により消費され無酸素の還元状態になる範囲を確認する必要がある。このため、地下水の溶存酸素が消費される浸透距離を把握するための試験を提案し、実施した。

試験は地下水到達時間を把握するためのトレーサ試験と溶存酸素消費試験の2段階で実施した。

試験は遺跡周辺の掘削底盤に露出する三田川層と蓮池層の砂質土を対象とした(図-12)。

(1) トレーサ試験

溶存酸素消費試験においては、観測井に地下水が到達したことを確認する必要がある。到達確認のトレーサーとしては塩水が有効であるが、塩水により溶存酸素を消費する土壌中の微生物の活動を阻害する可能性がある。

そこで、溶存酸素消費試験における地下水到達状況(到達時間)をあらかじめ把握するため、塩水トレーサにより地下水の流動速度を確認した。

トレーサ試験は、本試験である溶存酸素消費試験に影響を与えないよう本試験範囲の地下水流動方向の下流側(中央水路側)で行った(図-12)。

トレーサ試験の設備は注水井、観測井、揚水井からなり、観測井は注水井からそれぞれ1m、3m離れた位置に設置した。試験は、調整池の水を水タンク内に流入し、食塩を投入して導電率を高めた後、注水井に注入し、注水井、観測井での地下水位と導電率の変化を観測した(図-13)。

この結果、塩水の到達時間は、蓮池層では、No.2(注水井から1m離れ)で5分、No.3(注水井から3m離れ)で2時間、三田川層では、No.2(注水井から1m離れ)で31分、No.3(注水井から3m離れ)で3時間54分であった(表-6)。

この結果より、塩水は確実に地下水下流方向へ流動していることが確認され、本試験での計測時間はトレーサ試験結果を考慮し、到達予想時間の10倍以上を確保する計画とした。

(蓮池層:2時間×5m/3m×10=40時間 ⇒2日以上 / 三田川層:3.9時間×10m/3m×10=130時間 ⇒6日以上)

(2) 溶存酸素消費試験

キャッピングの範囲を決定するのに際し、地下水中の溶存酸素が地層中で消費されるのに必要な長さを検討するために溶存酸素消費試験を実施した。

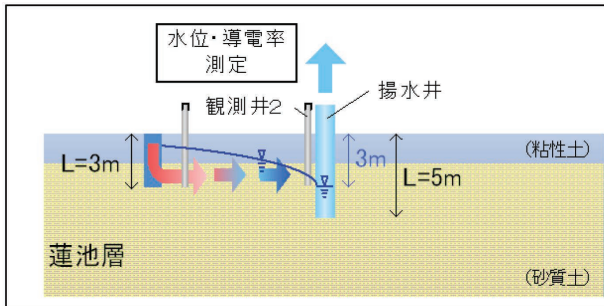


図-13 トレーサ試験概要図 (蓮池層)
Fig. 13 Schematic showing the location of tracer test in the Hasuike Formation.

表-6 トレーサ試験による地下水到達時間
Table. 6 Data for times since tracer injection.

		地下水到達時間	
		No. 2	No. 3
地層名	観測井	注入井より 1mの観測井	注入井より 3mの観測井
	蓮池層 砂質土	5分	120分 (2時間)
	三田川層 砂質土	31分	234分 (3時間54分)

溶存酸素消費試験は、注水井、観測井、揚水井からなり、観測井は注水井からそれぞれ1m, 3m, 5m離れた位置に設置した。試験は、調整池の水を貯めた水タンク内にエアポンプで酸素を送り酸素飽和状態とした後、注水井に注入し、注水井、観測井での地下水位、電気伝導度及び溶存酸素濃度の変化を観測した(図-14)。

① 地下水到達時間

図-15に蓮池層における各観測井の電気伝導度の経時変化を示す。試験前の地下水の電気伝導度は80~90 mS/mであったが、注入した調整池の水の電気伝導度は40 mS/mと低く、注入水の到達により各観測井戸において電気伝導度が低下した(図-15)。この電気伝導度の低下は各観測井に地下水が到達したことを示すと考えられる。

電気伝導度の低下による各観測井戸への地下水到達時間を判断した(表-7)。蓮池層では、No.2(注

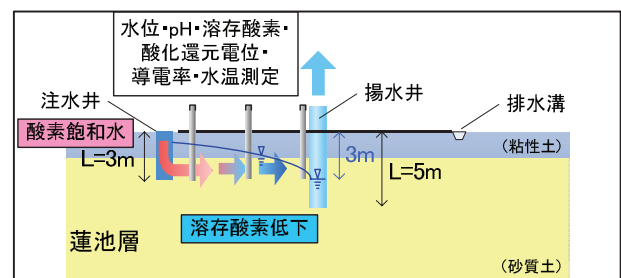


図-14 溶存酸素消費試験概要図 (蓮池層)
Fig. 14 Schematic showing the location of dissolved oxygen-test in the Hasuike Formation.

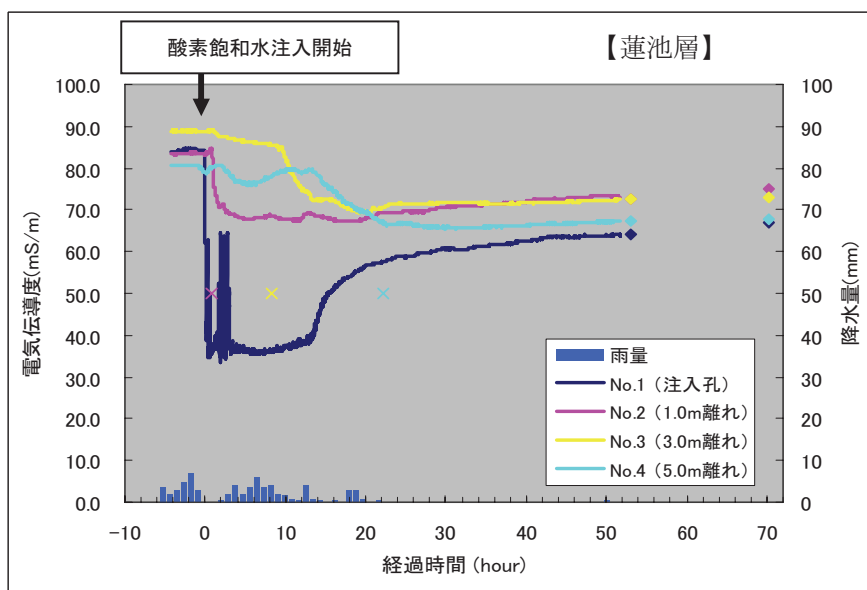


図-15 溶存酸素消費試験における各観測井における電気伝導度変化 (蓮池層)
Fig. 15 Result of dissolved oxygen-test at Nos. 1-4 monitoring wells in the Hasuike Formation, showing electric conductivity vs. lapsed time since injection of oxygen saturated water.

表-7 電気伝導度の観測結果から求めた地下水到達時間と室内試験から求めた理論値
 Table. 7 Comparison between lapsed time since tracer injection and calculated time from permeability coefficient obtained by laboratory soil test.

観測井 地層名	地下水到達時間		
	No.2	No.3	No.4
	注入井より 1mの観測井	注入井より 3mの観測井	注入井より 5mの観測井
蓮池層 砂質土	0.8時間 (50分)	9時間	14時間
三田川層 砂質土	<24時間	—	48時間
蓮池層砂質土の 透水係数から求 めた理論値	0.9時間	8.3時間	22時間

水井から1m離れ)で50分(0.8時間), No.3(注水井から3m離れ)で9時間, No.4(注水井から5m離れ)で14時間であった。

三田川層では, No.2(注水井から1m離れ)で24時間以内(一部欠測のため), No.4(注水井から5m離れ)で48時間と判断した。なお, No.3(注水井から3m離れ)では電気伝導度に変化が認められなかった。

これらの値は, ボーリングによる透水試験から求めた地下水到達時間の理論値(図-15の×印)とも比較的整合的である。

なお, 溶存酸素消費試験における地下水到達時間は, 事前のトレーサ試験による推定到達時間より遅い結果となったが, これは地盤の不均質性等に起因するものと推定される。

② 溶存酸素消費

図-16に蓮池層における各観測井の溶存酸素濃度の経時変化を示す。図中の×は, 室内試験結果から求めた各観測井への地下水到達時間を示す。

蓮池層では, No.2(注水井から1m離れ)で約13時間後にピーク値(2.76 mg / ℓ)を示しており, No.3

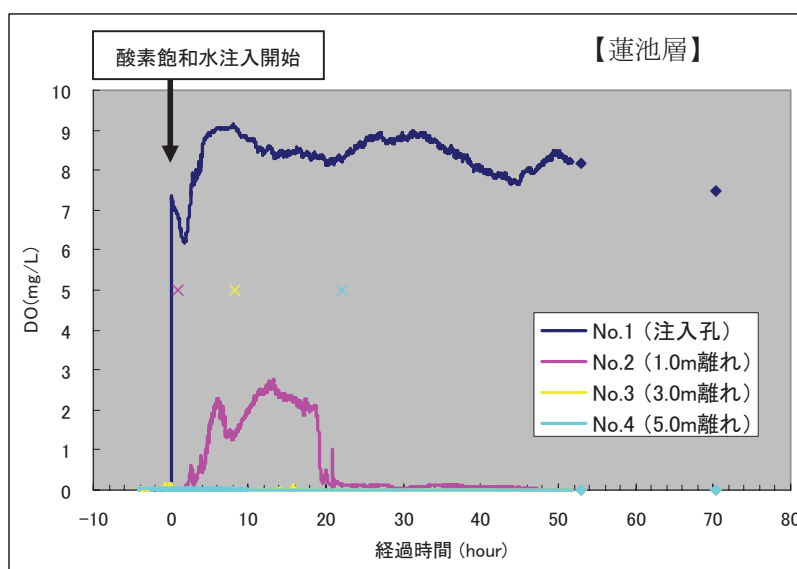


図-16 溶存酸素消費試験結果。(蓮池層) ×印は室内試験結果から求めた各観測井への地下水到達時間を示す
 Fig. 16 Dissolved oxygen content vs. lapsed time since injection, observed at Nos. 1-4 monitoring wells in the Hasuike Formation. The "x" mark indicates calculated time from permeability coefficient obtained by laboratory soil test.

(注水井から3m 離れ), No.4 (注水井から5m 離れ)では, 溶存酸素濃度の上昇は認められなかった。

三田川層では1m 離れを含め, すべての観測井において溶存酸素濃度の上昇は認められなかった。

③ まとめ

溶存酸素消費試験の結果より, 蓮池層砂質土では注水井より3m 以上離れると溶存酸素濃度はほとんど0mg/lとなることが確認された。また, 三田川層では地下水の到達を確認し, 十分な試験時間を確保したにもかかわらず, 注水井より1m 地点においても溶存酸素濃度が上がらなかった。

この結果から, 貝層を包含する地層の中で透水性が良いと考えられる蓮池層の砂質土や三田川層の砂質土においても3m 以上の距離では地下水中の溶存酸素が完全に消費されることが確認された。

したがって, キャッピング外からの雨水等の流入に対しては, 遺跡範囲の3m 外側までキャッピングで覆えば, 地下水は地層中で溶存酸素が消費されて無酸素状態になり, 遺物包含層を酸化させないと考えられる。

5.2 キャッピングの試験施工

遺跡の保存対策としてのキャッピングの有効性を確認するために, 実際の遺跡において試験施工を実施した。試験施工は, 保存対象のうち規模が小さい第5貝塚で行うこととした。

室内配合試験, セメント改良層配合試験を行い, セメント改良層の配合を決定したのち, 図-17に示す試験

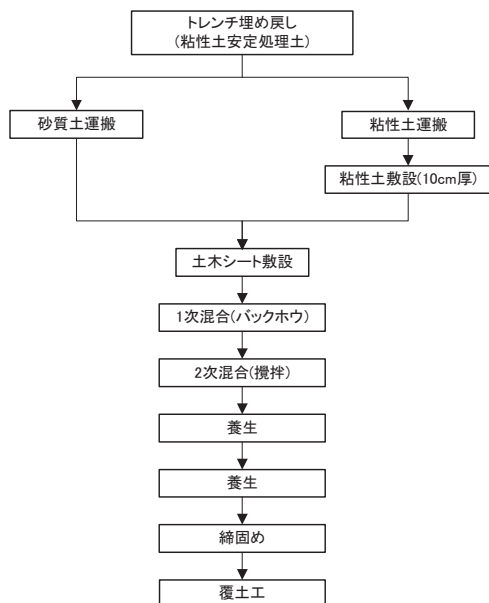


図-17 試験施工のフロー図

Fig.17 Flow chart for construction of test capping fill.

表-8 セメント改良層配合試験結果

Table.8 Test results for determining the most suitable soil-cement mixing ratio.

試験盛土番号	固化材添加量 (kg/m ³)	土質混合比 (砂質土混合比)	混合速度 (m ³ /h)	透水係数k (cm/sec)	コーン指数平均値qc (kN/m ²)
				平均	本転圧後
No.1	50	0.5	20	2.21E-05	1059
No.2			40	3.94E-06	522
No.3		1.0	20	3.56E-05	829
No.4			40	2.02E-05	783
No.5	30	0.5	32	2.23E-07	282
No.6			40	3.99E-07	218
No.7		1.0	32	3.41E-07	205
No.8	40		3.50E-07	194	

施工の流れにしたがって実施した(写真-2)。

キャッピングの施工は, 表-8の配合試験結果を参考に, 目標透水係数 (k ≤ 1.0 × 10⁻⁶ cm/sec) を満足する以下の仕様で実施した。

セメント改良層仕様 (混合土安定処理土)
 ☆土質混合比…粘性土:砂質土 = 1:1
 ☆固化材種類及び添加量…高炉Bセメント 30kg/m³
 ☆混合機種及び混合速度…バックホウ(1次混合用) + 自走式土質改良機(混合速度 40m³/h)
 ☆締固め機種…16t 級湿地ブルドーザ(接地圧 32kN/m² 程度←2層に分けて転圧)

なお, キャッピング層の最下端には, アルカリ浸出水の影響の緩和や, より高い水密性を確保するため, 10cm 厚程度の粘性土を敷設し, また散水等を行うことにより乾燥亀裂の発生に配慮した。

セメント改良土層を保護する覆土層については, 締固めが十分に行うことができるような粒度分布の良い土で, 透水性も確保 (0.075mm以下15%以上) できるように, クラックの入り難い配合とした(図-18)。

5.3 キャッピング効果確認試験

掘削の影響により酸化が進行している遺跡周辺の土壌が, キャッピングを行うことにより遺跡保存に適した還元状態に戻ることを確認するため, キャッピング下の遺跡周辺蓮池層, キャッピング外の掘削底盤に露出している蓮池層, 及びキャッピング内において, 各深度にセンサーを埋設し, 酸化還元電位, 土壌水分, 温度の変化をモニタリングした。また, キャッピング前後に遺跡周辺の蓮池層について土壌分析を行い, 土壌環境へのキャッピングによる効果を確認した。各種測定項目と測定箇



写真-2 試験施工状況(第5貝塚)

Photo 2 Photographs showing the construction procedure of the test capping fill.

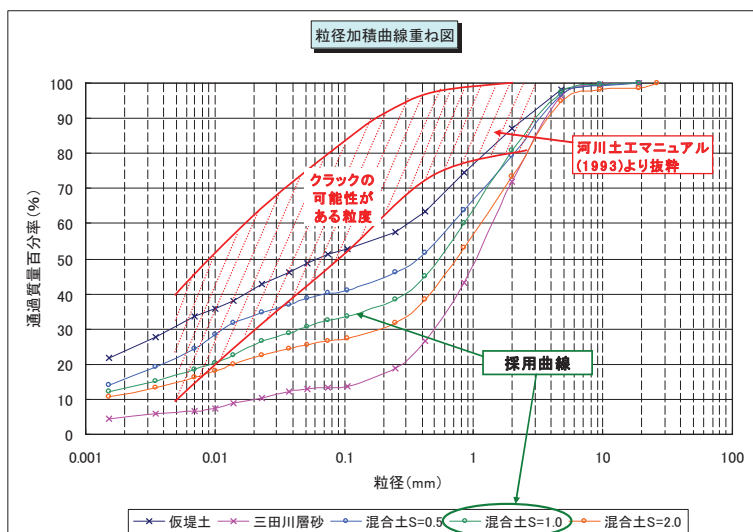


図-18 改良土層のための粒度試験結果

Fig. 18 Grain size analyses for determining the most suitable soil cement.

所を図-19に示す。

測定項目のうち、キャッピング下の蓮池層の酸化還元電位の変化を図-20に示す。

キャッピング下の地表から深度 0.5m 以下では、還元状態に保たれている。

一方、掘削の影響で酸化状態になっていた地表から

0.1m および 0.25m では、キャッピング下では酸化還元電位が徐々に低下しており、遺跡周辺が還元状態に戻つつあることが確認された。

さらに、測定期間中に日雨量 40 ~ 80mm の降雨があったにも係わらず、キャッピング下では酸化還元電位の上昇が認められず、キャッピング外から流入する溶存

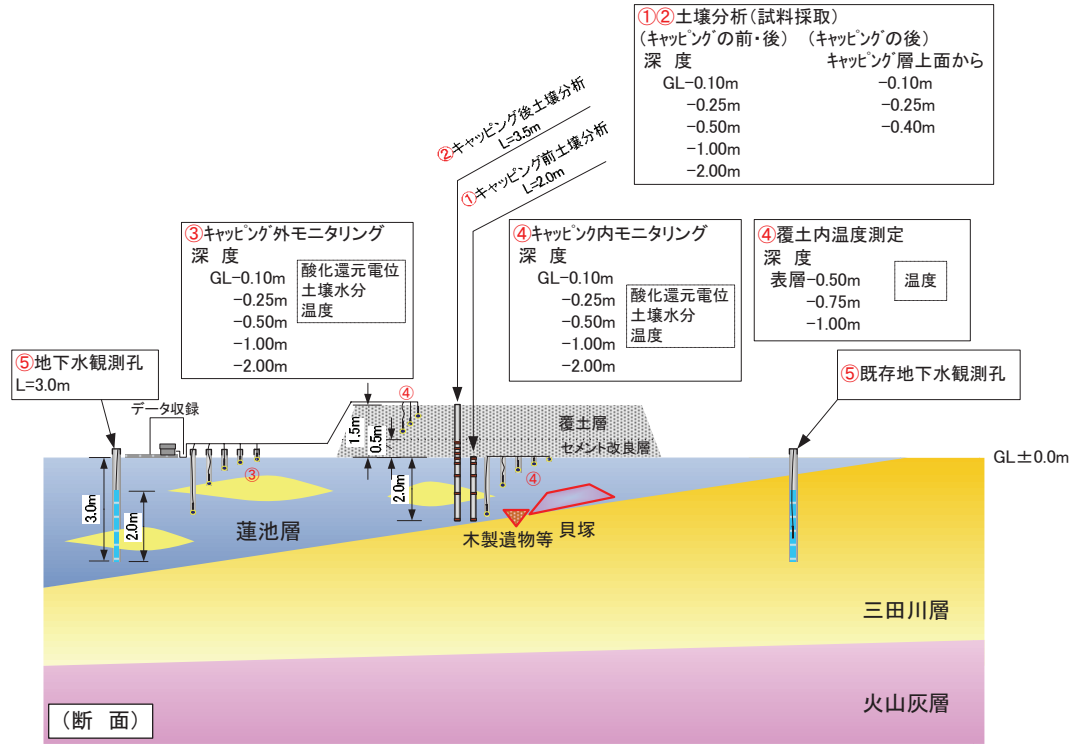


図-19 キャッピングにおける効果確認試験の観測項目と観測機器配置

Fig. 19 Schematic showing of the locations of monitoring wells installed around the test capping fill.

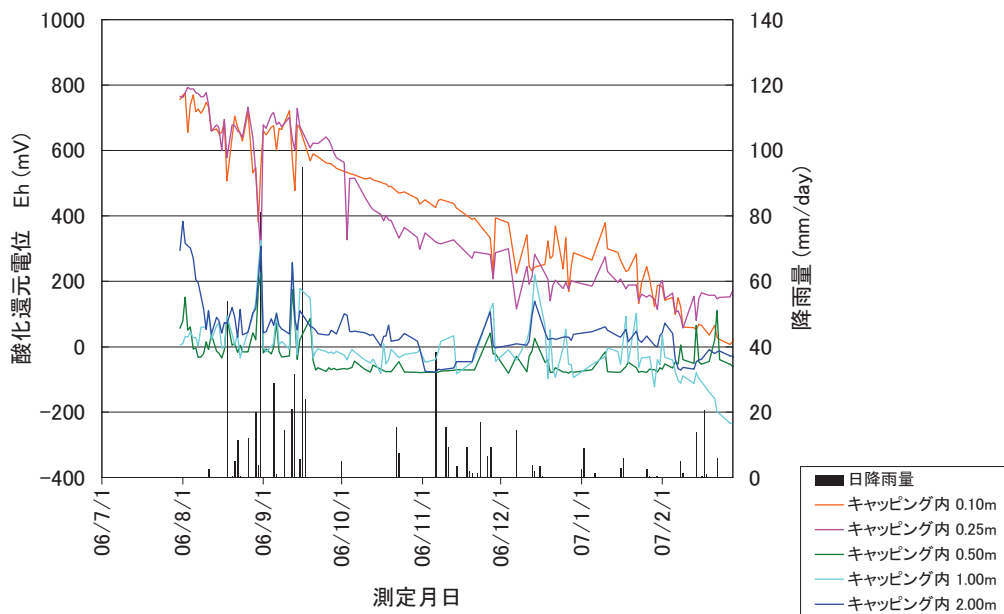


図-20 キャッピング施工後における遺跡周辺土壌の酸化還元電位の変化

Fig. 20 Temporal variation of Eh values measured at various depths within the test capping fill.

酸素を含む地下水の影響も認められないことが確認された。

また、キャッピングの前後で実施した遺跡周辺の土壌分析結果でも、図-11の黒矢印で示すように、還元状態へ戻りつつある状態が確認されている。

6. 遺跡保存計画

以上に述べた土壌環境調査、溶存酸素消費試験結果、キャッピング効果確認試験の結果を考慮し、遺跡保存対策を決定した。

調整池掘削前は5m以上の層厚の粘性土層の存在がキャッピングの役割を果たしてきた結果、還元状態が保たれ、遺跡が保存されてきたと推定される。

従って、掘削の影響により酸化状態となり劣化が進行している遺跡の現地保存対策としては、掘削前の環境に近づけるため、キャッピング(セメント改良層、覆土層)を行う。

貝塚やドングリ貯蔵穴等の遺物は、西に傾斜する三田川層の上面に沿って広範囲に分布しているため、どこまでを保護すべき遺跡範囲とするかの議論があった。調査結果から掘削後においても蓮池層粘性土の層厚が50cm以上であれば還元状態に保たれていることから、遺物が掘削底盤から50cm未満に存在する範囲を保護すべき遺跡範囲とした。

キャッピング外から溶存酸素を含む雨水等が浸透しても、地層中で酸素が消費され遺跡に影響を与えないようになる範囲として、上記遺跡範囲の3m外側までをキャッピング範囲とした。

7. 環境モニタリング計画

遺跡の保存は長期間に及ぶため、施工後の効果を検証するために土壌環境、地下水環境について監視する必要がある。保存環境が悪化した場合には原因究明と対策が必要となる。

洪水時には調整池の水位が上昇することを考慮し、測機器のケーブル長さ等からモニタリング対象とする遺跡(貝塚)は調整池の端に近い第4貝塚、第5貝塚で行うこととした。なお、第5貝塚については、平成18年7月末より実施している試験モニタリングを継続する(図-21)。

監視基準としては、遺跡周辺が還元状態に保たれている場合は遺跡保存環境としては良好と判断する。万一、還元状態が保たれていない場合は、追加対策等の検討を行うこととする。

8. あとがき

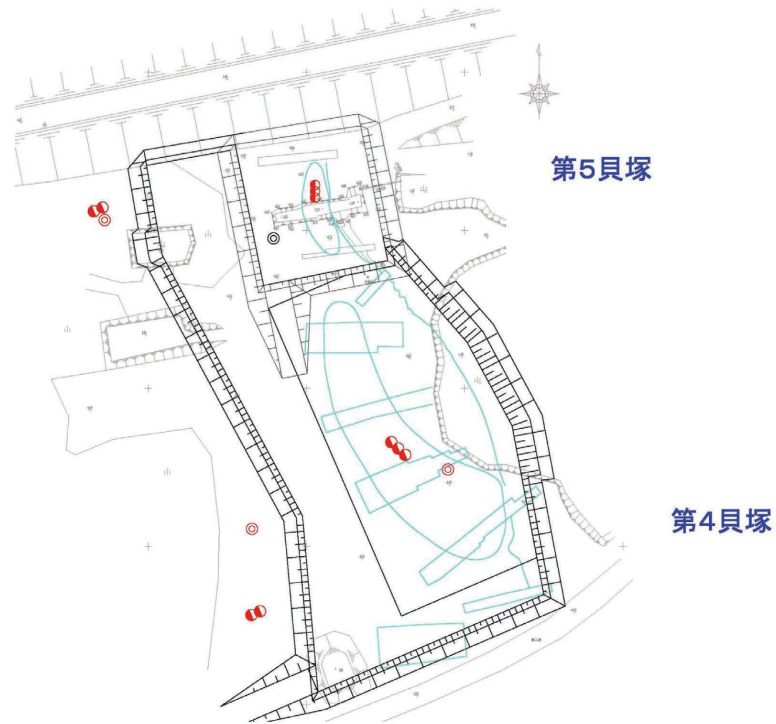
巨勢川調整池建設に伴い発見された6つの貝塚のうち、第1、第2貝塚は記録保存がなされた。残り4つの貝塚については、調整池治水機能確保を急ぐ必要があることから、現状のまま調整池内に保存するという方針のもと、前例のない文化財保存対策工事が目下実施されている。今後は、東名遺跡モニタリング委員会で環境モニタリング結果が定期的に検討され、より良い保存対策が行われることになっている。

謝辞

本論文の公表とデータの使用を許可いただいた国土交通省九州地方整備局佐賀河川総合開発工事事務所に感謝申し上げます。本論文の執筆にあたっては、同事務所の職員の方々、東名遺跡保存検討委員会の委員の方々には多くの意見や指導をいただいた。また、佐賀市教育委員会には、保存対策範囲を検討する上での有益な意見をいただいた。ここに、改めて謝意を表する。

参考文献

- 1) 九州地方計画協会：ホームページ (<http://www.k-keikaku.or.jp>).
- 2) 国土交通省佐賀河川総合開発工事事務所・佐賀市教育委員会(2006)：東名遺跡－日本最古の湿地性貝塚－，東名遺跡群発掘調査概要報告書1，pp. 1-23.
- 3) 下山正一・松本直久・湯村弘志・竹村恵二・岩尾雄四郎・三浦哲彦・陶野郁雄(1994)：有明海北岸低地の第四系，九州大学理学部研究報告，18，(2)，pp. 103-129.
- 4) 国土交通省九州地方整備局佐賀河川総合開発工事事務所(2006)：第1回東名遺跡保存検討委員会資料，佐賀市ホームページ，(<http://www.city.saga.lg.jp>).
- 5) 佐賀市教育委員会(2005)：第3回東名遺跡群調査指導委員会議事録，佐賀市ホームページ (<http://www.city.saga.saga.jp>)
- 6) Garrels, R. M. and Christ, C. L. (1965) : Solutions, minerals, and equilibrium, 450pp., Harper & Row.
- 7) (社)全国都市清掃会議(2001)：廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領(平成13年)，
- 8) (財)国土開発技術研究センター(1993)：河川土工マニュアル，





1) 土質環境の変化(地中) 	観測項目・・・酸化還元電位、土壌水分、地中温度 設置場所・・・キャッピング天端面中央付近 各遺跡1箇所 キャッピング範囲外(覆土法尻付近) 各遺跡1箇所 設置深度・・・地表面下0.2、1.0m 計2深度
2) 地下水環境の変化 	設置項目・・・水位、pH、酸化還元電位、溶存酸素、伝導率、水温、Ca ²⁺ 、SO ₄ ²⁻ 設置場所・・・キャッピング天端面中央付近 各遺跡1箇所 キャッピング範囲外 各遺跡地下水上流側に1箇所 観測対象土層・・・蓮池層砂質土、貝塚および三田川層砂質土 (貝塚はキャッピング範囲内のみ)

図- 21 保存対策工事後のモニタリング計画

Fig. 21 Monitoring plan covering the period after the regular construction of capping fills for preservation of Nos. 4 and 5 shell middens of the Higashimyo ruins.