

土 木 研 究 所 資 料

ゲート設備の設備設計のための防食性能試験
— 河川環境における暴露試験結果 —

平成14年3月

独立行政法人土木研究所
技術推進本部先端技術チーム

Copyright © (2002) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

—河川環境における暴露試験結果—

(元)機械研究室 研究員 江 原 正 隆***

現 国土交通省 關東地方整備局 霞ヶ浦導水工事事務所 機械課

はじめに

わが国は、梅雨や台風期等の豪雨のある気象条件と低地に市街地や農耕地が多い急峻な地形条件により、洪水等の水害が発生しやすい環境にある。この被害を食い止め、国民の快適な生活を守るために、ダム・堰・水門等のゲート設備は長期間にわたりその機能が維持される必要があるが、腐食や防食処理の劣化が機能低下の原因となることがある。ゲート設備は、その腐食発生・進展や防食処理の劣化傾向の適切な把握と予測に基づいて、設備設計・計画段階からの十分な防食方法の検討(防食設計)がなされる必要がある。しかし、ゲート設備の腐食・防食対策は、腐食現象が非常に複雑な電気化学的現象であることや、水質環境等の複数の腐食要因が複雑に作用する河川環境下の問題であることから、未解明な事項が多く、画一的な取り扱いが困難である。材料の防食性能評価からは予想外の腐食が発生する場合もある。そのため、設計段階でゲート設備の特徴を考慮した防食性能試験を行い、防食方法を決定する必要がある。

本研究は、ダム・堰・水門等のゲート設備のための防食設計方法の確立を目的に、検討の第一段階として、ゲート設備の特徴を考慮した暴露試験のケーススタディを行うとともに、防食性能試験方法の検討を行うものである。本報は、土木研究所技術推進本部先端技術チーム(旧機械研究室)と河川用ゲート設備の防食検討委員会(財団法人土木研究センター)が実施した暴露試験結果を基礎として、国土交通省関東地方整備局江戸川工事事務所の依頼に基づき、防食性能の検討を行ったものである。

河川用ゲート設備の防食検討委員会

委員長	辻川 茂男	東京大学大学院	工学系研究科金属工学専攻	教授
委員	松川 徹	石川島播磨重工業株式会社	鉄構事業部水門設計部 基本設計グループ	課長
	中山 元	石川島播磨重工業株式会社	技術研究所 材料研究部 腐食・防食グループ	課長
	横山 弘善	川崎重工業株式会社	鉄構・機器事業部 水門技術部	参事
	佐藤 昌宏	川崎重工業株式会社	関東技術研究所 新材料研究部	主事
	玉田 明宏	日本鋼管株式会社	総合エンジニアリング事業部部長 エンジニアリング技術総括部	
	千葉 幸憲	日本鋼管株式会社	鉄構建設部 水門技術室	次長
	坂本 秀樹	日立造船株式会社	鉄構部 水門プロジェクトグループ	部長代理
	高橋 和夫	日立造船株式会社	鉄構・建機事業本部 東京設計部	部長代理
事務局	小野田 光之	財団法人土木研究センター	技術研究所研究開発2部	部長
	小山 博司	財団法人土木研究センター	技術研究所研究開発2部	

目次

はじめに

1. 研究総論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究内容	2
1.4 本報の内容と構成	3
2. 暴露試験概要	4
2.1 暴露試験条件の設定	4
2.1.1 試験環境	4
2.1.2 試験対象設備	4
2.2 暴露試験場所	5
2.3 試験体	7
2.3.1 試験体の設計方針	7
2.3.2 試験体の設計	9
2.3.3 試験体製作結果	10
2.4 計測項目	10
2.4.1 水質環境の調査（環境条件その1）	10
2.4.2 微生物相の調査（環境条件その2）	11
2.4.3 腐食状況の調査	12
2.5 計測方法	13
2.5.1 調査スケジュール	13
2.5.2 連続計測	14
3. 暴露試験結果	15
3.1 試験体設置状況	15
3.2 水質環境	15
3.3 微生物分析結果	16
3.4 腐食状況の調査結果	16
3.4.1 試験体表面状況の調査結果（2000年1月14日）	16
3.4.2 腐食発生状況の中間調査結果（2000年4月19日）	19
3.4.3 腐食発生状況の最終調査結果（2000年12月6日）	25
3.5 連続計測の結果	37

4. 暴露試験結果の評価	40
4.1 暴露試験環境の評価	40
4.1.1 腐食発生に関係する水質環境の特定	40
4.1.2 微生物の繁殖状況	40
4.2 腐食発生時期	41
4.2.1 暴露試験開始から中間調査まで	41
4.2.2 中間調査から最終調査まで	43
4.3 腐食発生の評価	44
4.3.1 孔食の発生	44
4.3.2 片面溶接部非開先側に発生したすき間腐食	44
4.3.3 水密部に発生したすき間腐食	45
4.3.4 ローラ部に発生した腐食	46
4.4 既存の報告との比較	46
4.4.1 局部腐食臨界電位と腐食発生の可能性	46
4.4.2 短冊試験片の暴露に基づく耐食性評価との比較	47
5. まとめ	50
参考資料	

1. 研究総論

1.1 研究の背景

わが国は、梅雨や台風期等の豪雨のある気象条件と低地に市街地や農耕地が多い急峻な地形条件により、洪水等の水害が発生しやすい環境にある。ダム・堰・水門等は、この被害を食い止め、国民の快適な生活を守るための社会資本として大きな役割を有しており、長期間にわたりその機能が維持され、災害等の緊急時に確実に機能する高い信頼性が必要とされる。ダム・堰・水門等のゲート設備の機能に影響を与えるものとして、腐食や防食処理の劣化に関するものが多くある。一般的に工業用材料として用いられる鋼材は、腐食速度が異なるだけで必ず腐食する。人為的な処理による鋼材の保護は可能であるが、決して恒久的な防食効果が得られるわけではない。そのため、ゲート設備は、その腐食発生・進展や防食処理の劣化傾向の適切な把握と予測に基づく、設備設計・計画段階からの十分な防食方法の検討(防食設計)がなされる必要がある。

金属材料の水環境中腐食(湿食)は、水環境に接して、かつ酸化剤の働きを受ける時に発生するが、腐食するか否かは、pH等の水質条件や、優れた下地保護性を有する表面皮膜を形成できるかという金属材料の性質に依存する¹⁾。これまでに土木研究所において、ゲート設備の防

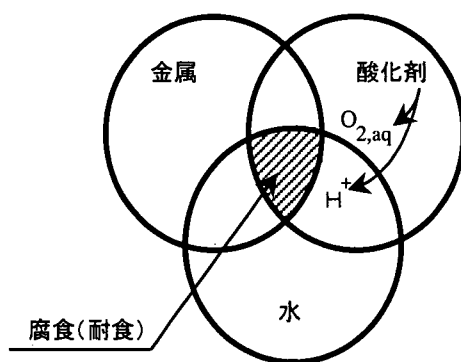


図-1.1 湿食のおこる条件

食技術の高度化を目的として、多くの耐食性材料や防食材料の実河川での暴露試験が行われている²⁾。これらの成果は、ゲート設備の防食性能向上のために、河川環境下における各種材料の防食性能評価を示す大きな意義のあるものとなっている。また、近年のゲート設備の設計・施工・維持管理技術に関して、関係技術基準が整備されるとともに、その向上が図られている。腐食・防食技術についても多くの検討が行われている。1999年3月に改訂、発刊されたダム・堰施設技術基準(案)(基準解説編・マニュアル編)では、防食に関する事項が拡充されるとともに、新技術・新素材の適用を含めた「防食マニュアル」が策定されている³⁾。

しかし、ゲート設備の腐食・防食対策は、腐食現象が非常に複雑な電気化学的現象であることや、水質や酸化剤として複数の腐食要因が複雑に作用する河川環境下の問題であることから、未解明な事項が多く、画一的な取り扱いが困難である。JIS等の各種規格で示されている防食性能試験では、ゲート設備の実態に則した防食性能評価を得ることが困難である。これまでに

設備設計

構造計算等

防食性能評価

防食性能試験

既知情報の活用

現在の知見、技術

- ・土木研究所資料第3093号
ダム用ゲートにおけるステンレス鋼の特性調査
- ・土木研究所資料第394号
ダム・堰構造物におけるステンレス鋼の溶接継手効率に関する調査
- ・土木研究所資料第3558号、第3545号、第3546号
ダム施設における鋼構造物の防食に関する調査報告書
- ・日本機械学会、日本材料学会、金属学会、腐食防食協会、etc

実績データ

- ・土木研究所資料第2909号
ダムにおけるステンレス鋼材の利用実態調査報告書
- ・土木研究所資料第3554号
河川用ゲート設備の腐食特性に関する実態調査

未解明の問題に関する検討

データの活用

対象設備

・材質、防食処理
・構造、部位
・設置条件、環境

なると推察する。そこで、本研究では、ゲート設備の特徴を考慮した暴露試験を行うこととした。ゲート設備の形状や加工等において、腐食発生に影響を与える要因となると予想されるものには、以下のものがある。

1. 設備の構造上のすき間部に生じる溶存酸素濃度の差による通気差電池の発生
2. 設備の構造上のすき間部等における塩化物イオン濃度の濃縮
3. 溶接ビートの熱影響部に生じた溶接劣化による粒界腐食
4. 設備各部での微生物の繁殖
5. 複数種類の材料の組み合わせによる異種金属接触

暴露試験においては、これらを考慮した暴露試験体を検討・製作し、暴露試験を行った。

1.4 本報の内容と構成

本報は、本研究の第1報として、ケーススタディとして行った、ゲート設備の特徴を考慮した暴露試験の実施方法の検討、実施結果とそれから得られた防食性能評価のデータを取りまとめたものである。本報の構成は図-1.3に示すとおりである。本試験結果に基づく、防食性能試験方法の提案については、別報により報告する予定である。

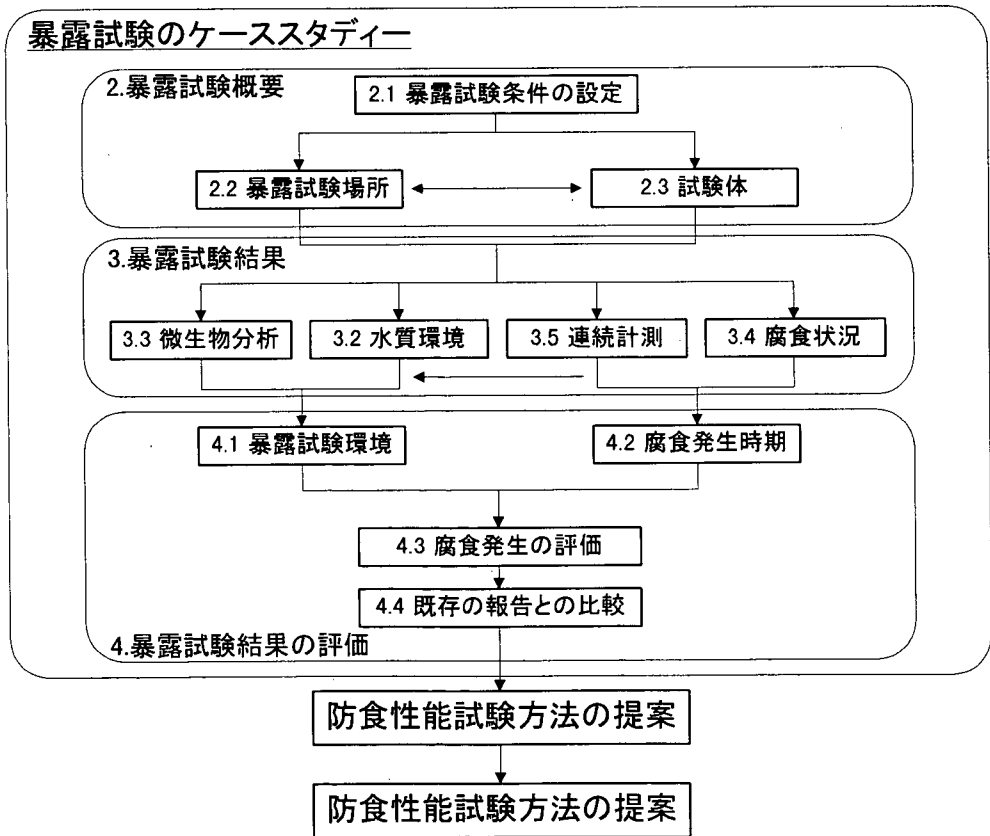


図-1.3 本報の構成

2. 暴露試験概要

2.1 暴露試験条件の設定

2.1.1 試験環境

一般に、淡水域より海水域や汽水域は、腐食環境が厳しく、これらの環境に曝されているゲート設備は、より高い防食性能が必要とされている。また、腐食・防食研究において、海洋構造物に関する検討は多くあるが、河川構造物

に関する検討は、土木研究所によるものの他に多くないのが現状である。そこで、本試験においては、海水が遡上し、水質が汽水域となる河川水域を対象とすることとする。

2.1.2 試験対象設備

ゲート設備の形状や材質等は各々の設備によって異なる。ダム・堰施設技術基準(案)によれば、表-2.1に示す種類のゲート設備がある³⁾。海水域や汽水域に設置される河川構造物で、その機能に高い信頼性が要求されるものに堰がある。本試験においては、大規模可動堰に用いるゲート形式の1つであるシェル構造ローラゲートを対象とすることとする。但し、本試験では、水門扉のみに着目し、戸当たりと固定部は対象外とする。シェル構造ローラゲートの扉体構造の概略図を図-2.2に示す。

また、近年、ゲート設備は、防食性能向上を目的として、ステンレス鋼等の耐食性材料が構造用部材に適用されている。適用実績としては、SUS304やSUS316等のオーステナイト系ステンレス鋼が多く、特に海水域や汽水域に設置されるゲート設備での適用実績が多い⁶⁾。今後は、より耐食性が高いSUS316の適用実績が増加することが予想できる。これらのことから、本試験では、SUS316とSUS304を対象とすることとする。

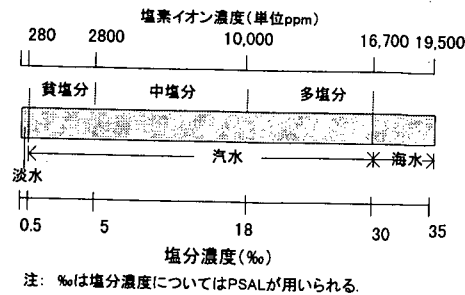


図-2.1 水質条件と水質環境

表-2.1 ダム・堰・水門等におけるゲート形式

ローラ形式	ローラゲート	その他の形式	ローリングゲート
	高圧ローラゲート (オリフィスローラゲートを含む) キャタピラゲート リングシールゲート シェル構造ローラゲート 多段式ローラゲート		円形多段式ゲート 横引きゲート 角落とし フローティングゲート 橋式ゲート
スライド形式	スライドゲート 高圧スライドゲート ジェットフローゲート リングホロウゲート	バルブ	ホロージェットバルブ コーンスリーバルブ フィクストコーンバルブ スルースバルブ
	サニットゲート		
ヒンジ形式	ラジアルゲート 高圧ラジアルゲート (オリフィスラジアルゲートを含む) ダムフラップゲート		
	起伏式ゲート ドラムゲート フラップゲート パイサゲート ライジングセクタゲート セクタゲート マイタゲート スイングゲート		

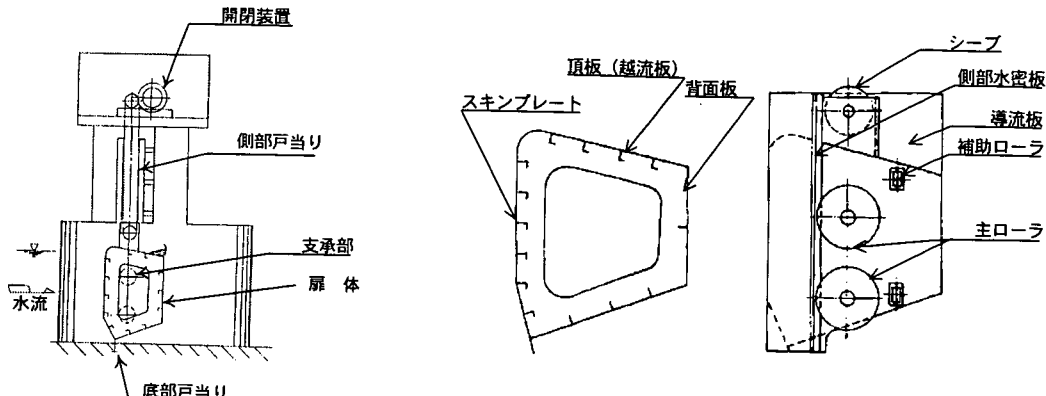


図-2.2 シェル構造ローラゲートの扉体構造例

2.2 暴露試験場所

暴露試験場所は旧江戸川（河口より約9km 地点）を選定した。暴露試験場所を図-2.3、2.4に示す。また周辺状況の写真を写真-2.1、2.2に示す。暴露試験場所は、潮の干満や水門の放流による水質の日変化や年変化が著しく、塩化物イオン濃度も10ppm から 10^4 ppm 程度まで変化する場所である。

海洋構造物の腐食・防食研究においては、海洋構造物の腐食は満潮位の上の飛沫帯が著しく、その原因は、飛沫帯における海水による濡れと大気中からの酸素の供給に起因していると考えられている。干満帯に独立して暴露される場合も、飛沫帯と同程度の腐食速度を示す。本試験において再現している堰のゲート設備は、水中部または干満帯に設置されることが多い。さらに、実際の設備においては、水中部の維持管理・点検が困難なため、水中部の防食性能の信頼性確保がより重要となる。以上の理由から、本試験では、試験体が常時水中に曝される水中部と、水位変化により乾湿繰り返し状況に曝される干満帯で実施することとした。干満帯には、

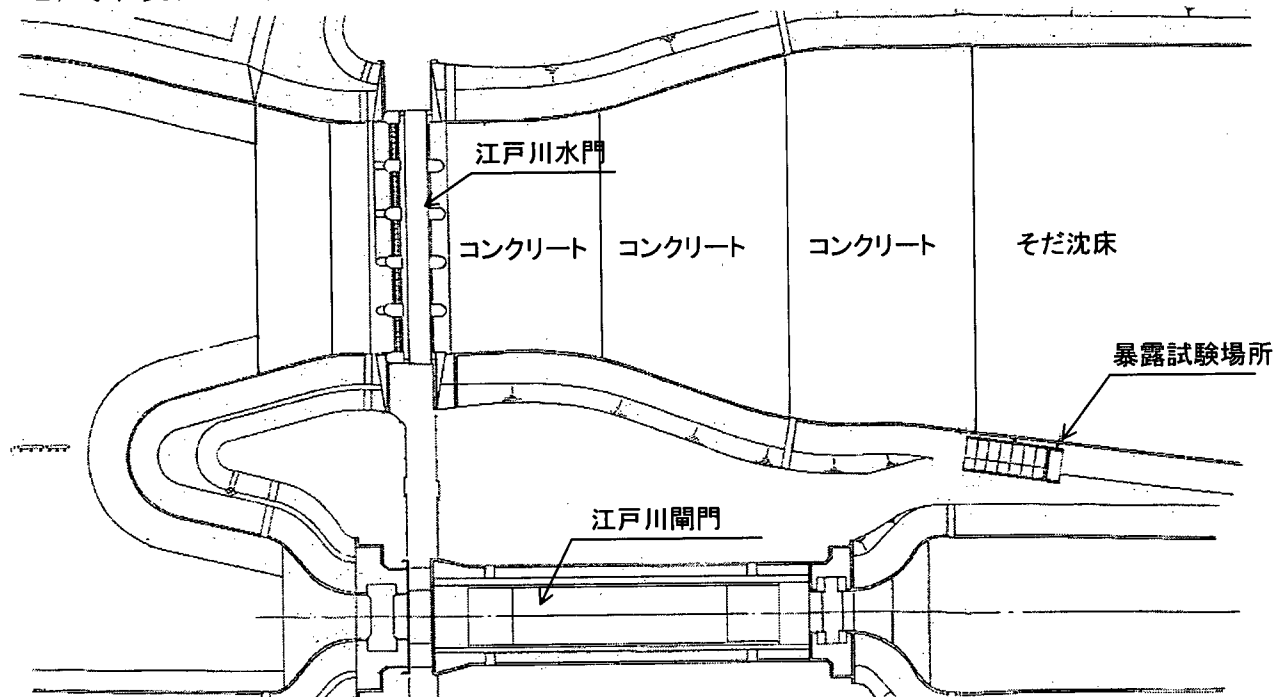


図-2.3 暴露試験実施場所

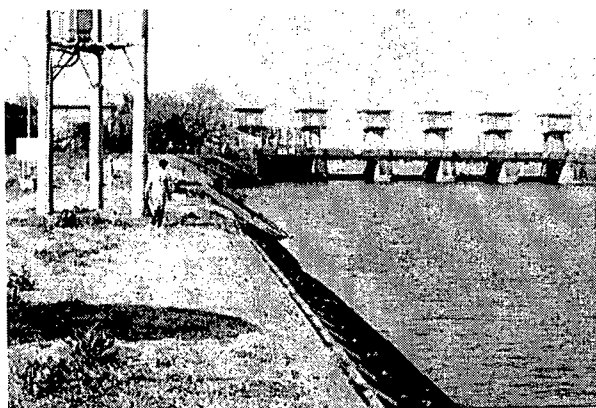


写真-2.1 暴露試験場所状況（上流を向く）

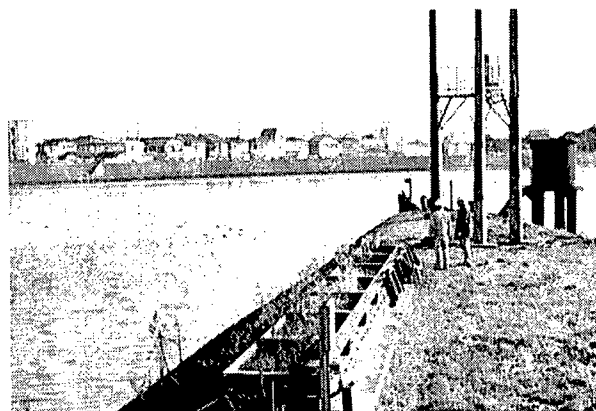


写真-2.2 暴露試験場所（下流を向く）

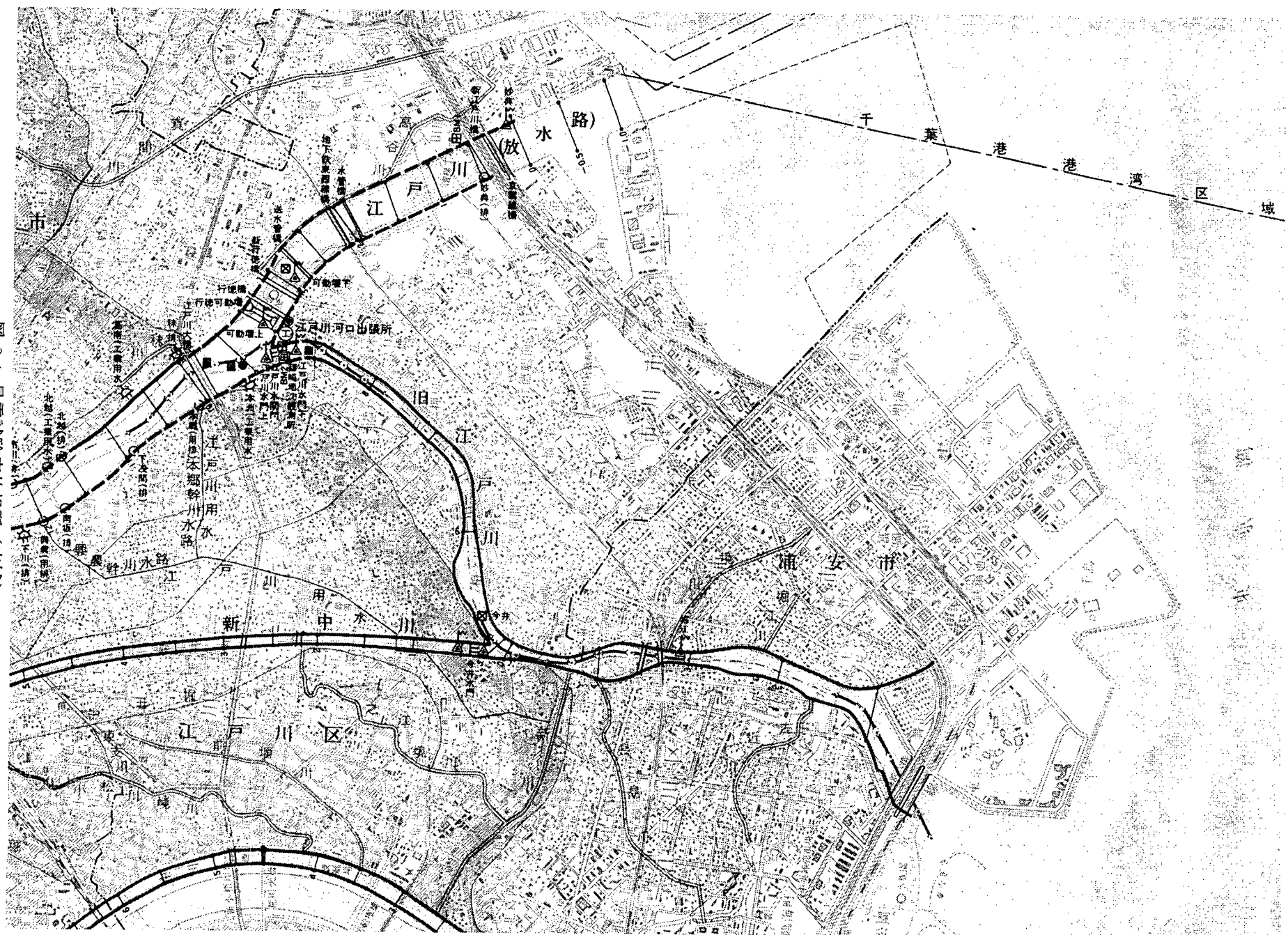


図-2.4 暴露試験実施場所 (広域)

SUS316 と SUS304 それぞれの材質のサブ試験体を設置し、水中部には、メイン試験体と、それぞれの材質のサブ試験体を設置することとする（試験体については後述のとおり）。

2.3 試験体

2.3.1 試験体の設計方針

シェル構造ローラゲートにおいて、腐食発生に影響を与えると推定される特徴として下記の形状や加工等がある。試験体には、これらの特徴を再現することとする。

1. 水密部のすき間構造（すき間部の通気差電池）
2. ローラ及びローラ軸部のすき間構造（すき間部の通気差電池）
3. 戸当り部での水流の澱み（澱みでの溶存酸素や塩化物イオン濃度の変化）
4. ゲートのシェル構造（堆積物内での微生物の繁殖）
5. 製作時の溶接や機械加工による影響（鋭敏化等の状況）
6. ローラ部における複数種類の材料の組み合わせの影響（異種金属接触）

(a) 水密部のすき間構造の再現

ゲート設備の水密部では、すき間腐食が発生する可能性がある。水密方式には、ゴム水密方式と金属水密方式があり、ゴム水密方式の水密ゴムの形状には幾つかの種類がある。本試験では、ゴム水密方式を再現することとした。また、ゴム形状としては、最も形状が単純な平形を再現することとした。

(b) 戸当り部での水流の澱みの再現

ゲート設備において、ゲート端面は戸当りに囲まれており、流速の低下や流水の澱みが生じる。そのため、ゲート設備の他の箇所と比べて、溶存酸素濃度や塩化物イオン濃度等の水質が異なることが予想できる。本試験では、ゲートの水門扉のみに着目しており、戸当りを対象外としているが、ローラ周囲にカバーを設けて流水の澱みを再現することとした。

(c) ゲートのシェル構造の再現

シェル構造ゲートは、その形状が箱形構造のため、内部に堆積した砂礫等による塩化物イオン濃度の濃縮や微生物の活動が腐食発生の要因となる可能性がある。また、飛沫帯では、シェル構造内部の上部に、腐食性ガス (Cl^- 等を含む水蒸気) 等の影響と推察される腐食が発生することがある。本試験では、水中部及び干満帯で行うことから、堆積物の影響に着目して、土砂等が堆積する構造を再現することとした。

(d) 製作時の溶接や機械加工等による影響の再現

ゲート設備には、各種の溶接や機械加工が行われている。溶接時の熱サイクルの影響のように、これらの施工方法が防食性能に影響を与えることが予想できる。そのため、試験体には、ダム・堰施設技術基準(案)を参考に、ゲートメーカーによる施工実態を考慮して、溶接や機械加工等を再現することとした。国内主要ゲートメーカー4社から得られた施工事例調査の結果を表-2.2

表-2.2 ゲート設計製作の事例

		A社	B社	C社	D社
溶接方法	SUS304	溶接方法	炭酸ガスアーク溶接 (半自動溶接)	炭酸ガスアーク溶接 (半自動溶接)	炭酸ガスアーク溶接 (半自動溶接)
		溶接材料	YF308C	YF308C	YF308C
		ワイヤ径	1.2φ, 1.6φ	1.2φ, 1.6φ	1.2φ
		入熱量	30kJ/cm	12.9~22kJ/cm	33kJ/cm以下
		(電流値)	(150~250A)	(150~250A)	(1.2φ: 180~200A) (1.6φ: 220~240A)
		(電圧値)	(25~35V)	(25~31V)	(28~31V)
		(溶接速度)	(20~60cm/min)	(21~36cm/min)	脚長6mmの隅肉で(31~41cm/min)
	SUS316	溶接方法	炭酸ガスアーク溶接 (半自動溶接)	炭酸ガスアーク溶接 (半自動溶接)	炭酸ガスアーク溶接 (半自動溶接)
		溶接材料	YF316C	YF316C	YF316C
		ワイヤ径	1.2φ, 1.6φ	1.2φ, 1.6φ	1.2φ
		入熱量	30kJ/cm	33kJ/cm	33kJ/cm以下
		(電流値)	(150~250A)	(180~250A)	(1.2φ: 180~200A) (1.6φ: 220~240A)
		(電圧値)	(25~35V)	(27~35V)	(28~31V)
		(溶接速度)	(20~60cm/min)	(20~60cm/min)	脚長6mmの隅肉で(33~41cm/min)
酸洗い方法	酸洗いの種類	酸洗い液塗布	酸洗い液塗布	酸洗い液塗布	酸洗い液塗布
	酸の濃度	ふっ酸 3%, 硝酸 15%	ふっ酸 4.5%, 硝酸 13.5%	ふっ酸2.7%, 硝酸17.9%	ふっ酸 1%, 硝酸 5%
	酸洗い時間	数時間	約2時間	夏期: 1~2時間 冬期: 2~4時間	20℃以上: 2~6時間 20℃以下: 4~8時間
切断方法		プラズマ切断または、 レーザ切断	プラズマ切断または、 レーザ切断	プラズマ切断または、 レーザ切断	プラズマ切断または、 レーザ切断

【備考】B社は電解研磨も採用している。酸洗い条件は、一般的なのをしめしている。
(不動態処理とは異なる)

表-2.3 試験体の製作要領

項 目		製作要領	備 考
溶接方法	予熱・後熱の実施	不要	ダム・堰施設技術基準(案)マニュアル 編・接合マニュアルに基づく
	溶接方法	炭酸ガスアーク溶接(半自動)	事例調査の結果に基づく
	溶接材料	(SUS304) YF308C	
		(SUS316) YF316C	
	ワイヤ径	1.2φ, 1.6φ	
	入熱量管理	3.5%以下	
	鋭敏化度		
	入熱量	(SUS304) 33kJ/cm	土木研究所資料第3093号
		(SUS316) 33kJ/cm	SUS304と同様と仮定する
酸洗いの実施		ふっ酸 4.5%, 硝酸 13.5% 2時間	
切断方法		レーザ切断	

に示す。この事例を参考にして、本試験体には、表-2.3 に示す溶接や機械加工を再現することとした。また、実際のゲート設備の施工においては、施工上の制約から、無理な姿勢での溶接作業を強いられる場合がある。そこで、種々の溶接方向や姿勢での溶接施工を再現することとした。

(e) ローラ部における複数種類の材料の組み合わせの影響の再現

ゲート設備の各部は、構造や機能により要求される機械的性質や化学的性質が異なり、各種の材料が用いられる。例えば、ローラ部において、ローラ本体は、高強度の材料が用いられるが、摺動部にはすべり摩擦抵抗の低い無給油軸受等が用いられる。ボルトやねじ、リベット、ろう付け等の材質が構造用部材等と異なる場合もある。異なる材質の材料が互いに電氣的に接触して用いられると、腐食電位の卑な材料がアノードとなって腐食が促進され、異種金属接触腐食を発生する。防食の観点からは、異種金属の適用を避ける方が好ましいが、機械設備や構造物の設計上、種々の金属を組み合わせた利用は避けがたい。また、ゲート設備においては、河川水中に設置されるため、互いの材料が物理的に接触していなくても、迷走電流により電氣的

2.3.2 試験体の設計

図-2.5 メイン試験体の溶接方向と姿勢

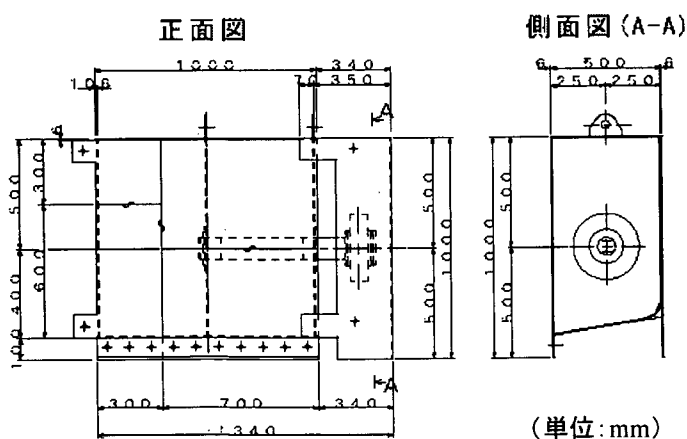


図-2.6 メイン試験体設計図面

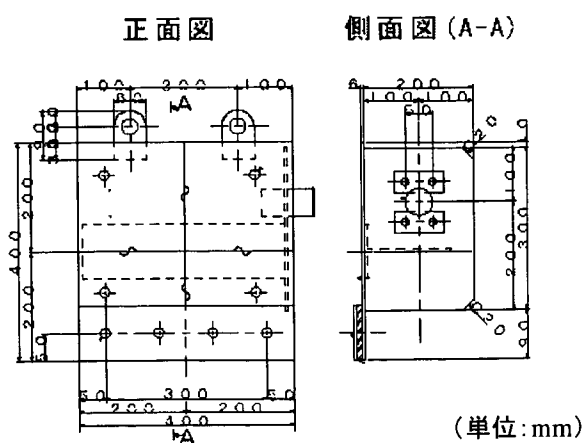


図-2.7 サブ試験体設計図面

2.3.3 試験体製作結果

本試験で製作した試験体の写真を写真-2.3, 2.4 に示す。試験片各部のすみ肉溶接は、使用板厚に合わせて脚長を4mmとしている。メイン試験体、サブ試験体ともに、溶接後に角変形が発生したため、2mm以上の角変形の歪みを線状加熱法にて除去している。各試験体の使用材料を表-2.4 に示す。また、主な材料の組成分析の結果を表-2.5 に示す。C,S は燃焼-赤外線吸収法（LECO Co.製 444LS）を用い、Si,Mn,P,Ni,Cr,Mo は蛍光X線分析法（理学電機（株）製 SYS3080E）を用いて分析している。

表-2.4 試験体の材料

試験体	部 材	材 料
メイン試験体 (SUS316)	扉体, 水密ゴム押え板, キーププレート	SUS316
	六角ボルト・ナット	SUS316
	アイボルト	SUS316
	無給油軸受	高力黄銅
	主ローラ軸	SUS316N
	主ローラ	SUS329J1
	皿ばね	SUS631
	ローラ軸押え板	SUS304
サブ試験体 (SUS316)	水密ゴム	クロロプレンゴム
	扉体, 水密ゴム押え板, キーププレート	SUS316
	六角ボルト・ナット	SUS316
	ローラ軸	SUS316
サブ試験体 (SUS304)	水密ゴム	クロロプレンゴム
	扉体, 水密ゴム押え板, キーププレート	SUS304
	六角ボルト・ナット	SUS304
	ローラ軸	SUS304
	水密ゴム	クロロプレンゴム

表-2.5 主な材料の組成分析

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
JIS規格値(SUS316)		0.08以下	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.030以下	10.00 ~14.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	—
組成分析値	メイン試験体用SUS316鋼板	0.039	0.64	1.22	0.030	0.001	10.5	16.7	2.03	—
	サブ試験体用SUS316鋼板	0.039	0.69	0.98	0.028	0.007	10.1	16.9	2.15	—
JIS規格値(SUS304)		0.08以下	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.030以下	8.00 ~10.50	18.00 ~20.00	—	—
組成分析値	サブ試験体用SUS304鋼板	0.046	0.60	0.97	0.031	0.005	9.17	18.3	0.12	—
JIS規格値(SUS316N)		0.08以下	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.030以下	8.00 ~14.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	0.10 ~0.22
組成分析値	メイン試験体 主ローラ軸用SUS316N棒鋼	0.046	0.60	0.97	0.031	0.005	9.17	18.3	0.12	0.13

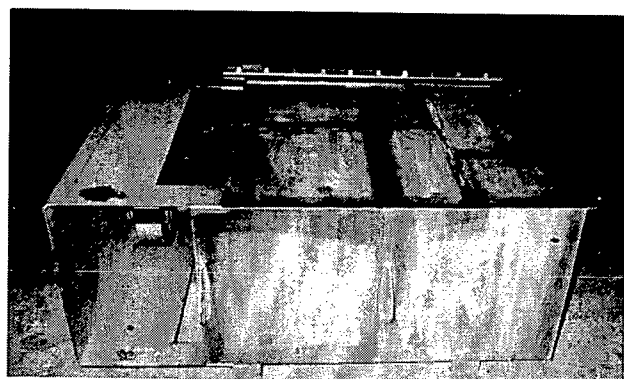


写真-2.3 メイン試験体写真 (SUS316)

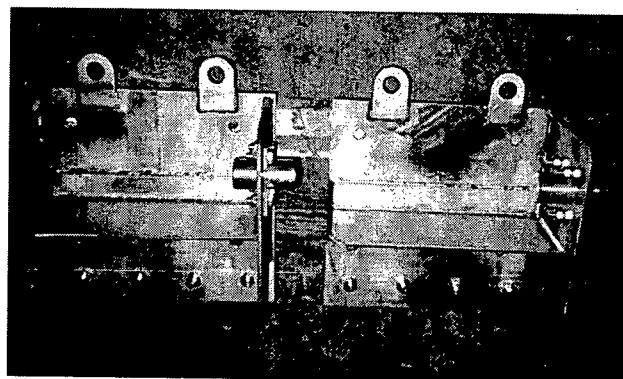


写真-2.4 サブ試験体写真 (SUS316)

2.4 計測項目

2.4.1 水質環境の調査（環境条件その1）

既述のように、本暴露試験場所は、水質の日変化や年変化が著しい場所である。基本的な水質条件として、塩化物イオン濃度と水温の変化を連続計測することとした。その他の水質状況として、pH、伝導率、濁度、溶存酸素を定期的に計測することとした。

2.4.2 微生物相の調査（環境条件その2）

(a) 採取方法

微生物による影響を調査するために、表-2.6 に示す7項目の細菌について計測を行うこととした。試料の採取箇所を図-2.8 に示す。試験体表面の付着物は、ふきとり法により滅菌ガーゼにより採取することとする。但し、滅菌ガーゼは滅菌希釈水をしみ込ませたものではなく、乾燥したものを使用している。水中部に設置された試験体からの付着物採取は、試験体を水中から引き上げた後、速やかに試験体表面から採取することとする。干満帯に設置された試験体からの付着物採取は、干潮時に実施し、試験体表面が外気により乾燥している場合は、河川水（暴露試験場所の河川表層水）を試験体表面の付着物にしみ込ませた後に採取する。河川水は、50ml 滅菌チューブにより採取する。

(b) 培養方法

採取した各試料は、この培養液中にガーゼごと入れたまま、30Hz で2.5 分間超音波処理し、

表-2.6 微生物の種類と特徴

細菌名	pH (微生物繁殖域)	特 徴
一般細菌	—	好気性細菌の総数。水質汚濁の指標
従属栄養細菌	—	高分子化合物を分解するもの (特殊な成長因子を必要とするもの)
好中性硫黄酸化細菌 (N-SOB)	中性域	無機硫黄化合物を酸化し、硫黄イオンを生成する独立栄養細菌。主に、中性育成型
好酸性硫黄酸化細菌 (A-SOB)	酸性域	無機硫黄化合物を酸化し、硫黄イオンを生成する独立栄養細菌。主に、酸性育成型
鉄酸化細菌 (IOB)	2.0～2.5	硫酸酸性下で2価の鉄イオンや硫黄を酸化して、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ を生み出す細菌。ただし、酸性下のため加水分解して硫酸を生ずる。無機物質のみで成長する独立栄養細菌
硫酸塩還元菌 (SRB)	6.5～7.5	硫黄イオンを還元し、硫化水素を生成する。但し、低級脂肪酸などを消費する。
鉄細菌	6～8	中性領域において鉄の2価イオンを3価に酸化することによりエネルギーを得ている独立栄養細菌

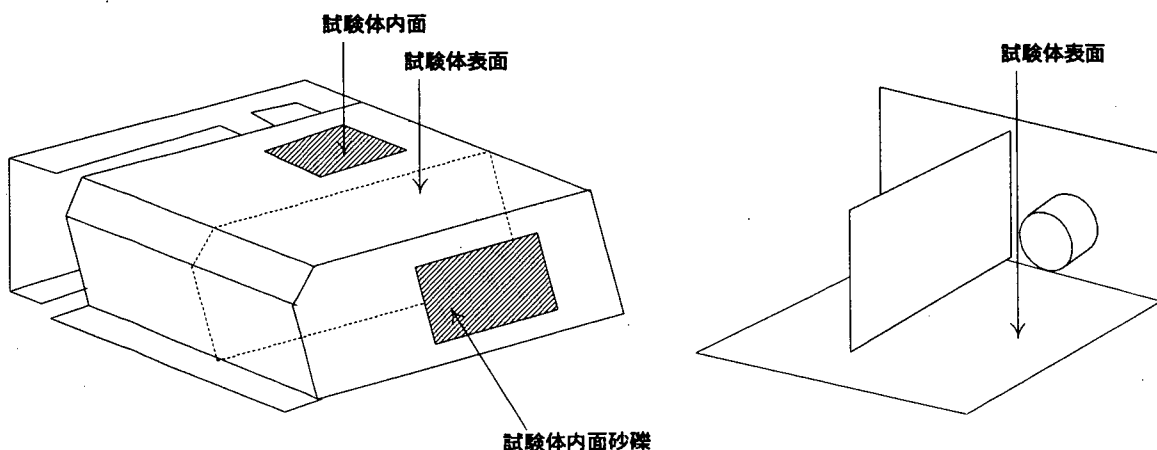


図-2.8 微生物採取箇所

表-2.7 培養方法

細菌名	検査法	使用培地	培養条件		備 考
			温度(℃)	時間(day)	
一般細菌	CFU法	普通	35	7	コロニー計数法
従属栄養細菌	CFU法	ヘンリッチ	25	17	
好中性硫黄酸化細菌	CFU法	Starke	30	17	
好酸性硫黄	CFU法	9K	30	17	
鉄酸化細菌(IOB)	MPN法	FeSO4を含む9K	30	17	最確数法
硫酸塩還元菌(SRB)	CFU法	乳酸を含むSRB用	30	17	
鉄細菌	顕微鏡	八木	30	5	顕微鏡による微生物の直接確認

表-2.8 培地の種類

培地の種類	内 容 (成分等)					
Starkey培地	(NH4)2SO4	0.2g	;	MgSO4 7H2O	0.5g	,
	K2HPO4	5.0g	,	硫黄粉末	10g	,
				FeSO4	0.01g	,
				CaCl2	0.25g	
	※ pH=4に調整					
9K培地	溶液1:	(NH4)2SO4	3.0g	,	KCl	0.1g
		Ca 3)2	0.01g	,	蒸留水	700ml
	溶液2:	FeSO4 7H2O	300ml of a 14.74%(W/V)	,	H2SO4	1.0ml
	※ 溶液1, 2を別々にオートクレープし、冷却後混合					
乳酸を含むSRB用培地	溶液1:	乳酸ナトリウム(70%)	3.5g,	酵母エキス	1.0g	,
		FeSO4 7H2O	0.2g	,	寒天	15.0g
	溶液2:	チオグルコース酸ナトリウム	0.45g,	ろ過海水	990ml	
八木式培地		鉄粉	0.05~1.0g,	ろ過海水	10ml	
	※ CO2ガスにより、pH6とする。					

ガーゼを除去後、3分間静置して上澄液を滅菌水で段階希釈する。これらの各希釈液を培地に混釈法により接種する。培養液は河川水を滅菌処理したものを用いる。また、別途に河川水についても、30Hzで2.5分間超音波処理した後に攪拌処理し、滅菌水で段階希釈する。その後、各試料と同様の処理を行い微生物相を分析する。各細菌別の使用培地と培養条件を表-2.7に示す。各培地は、参考文献を参考に表-2.8の成分に調整したものを用いている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

2.4.3 腐食状況の調査

腐食状況および試験体表面状況の調査は、潜水夫による調査と引き上げ調査により行う。

(a) 試験体表面状況の調査

暴露した試験体表面には藻類や砂礫が付着している。水中部に設置された試験体は、潜水夫による試験体各部の水中写真撮影により表面観察を行う。干満帯に設置された試験体は、写真撮影により表面観察を行う。

(b) 腐食発生状況の中間調査

試験体表面の付着物を除去した後に腐食状況を目視調査等により調査する。必要に応じて試験体各部を分解して調査を行う。試験体表面の発錆や腐食は、その状態を確保したままとして、試験体の腐食状況に与える影響を最小限にとどめ、中間調査後に再浸漬して継続暴露を行うこととする。

(c) 腐食発生状況の最終調査

中間調査と同様に、試験体表面の付着物を除去した後に腐食状況を目視により概観調査を行

う。その後、試験体各部に発生した孔食やすき間腐食については、レーザ顕微鏡により形状、孔食深さを測定する。また、いくつかの代表的な腐食箇所について、断面の金属組織観察を行う。金属組織観察は、腐食各部の断面が現出するように切断を行い、鏡面まで研磨を行った後、各材質別にエッチングを行って実施する。エッチング溶液の種類は、表-2.9 のとおりである。さらに、特徴的な腐食部分について、EDX、XRD による分析を行う。EDX 分析は、Oxford Co. 製 ISIS を用い、XRD 分析は、Philips Co. 製 X'pert-MPD を用いる。

表-2.9 金属組織観察時のエッチング処理

材 質	エッチング方法
オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304, SUS316 ほか)	10%しゅう酸水溶液中で電解エッチング
析出硬化系ステンレス鋼(SUS631 ほか)	ピエラ液(1gピクリン酸+5mL塩酸+100mLエタノール)
オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼(SUS329J1ほか)	10%NaOH水溶液
高力黄銅	10%NH ₃ +3%H ₂ O ₂ 水溶液

(d) 自然電位の計測

腐食発生時期を特定することを目的として、Ag/AgCl(飽和 KCl) 照合電極を用いて、各試験体の自然電位の変化を連続計測する。照合電極は、各試験体毎に、スキンプレーットの中央付近に、試験体と照合電極を約 50mm 程度離して設置している。

2.5 計測方法

2.5.1 調査スケジュール

本暴露試験の調査期間は、1999 年 7 月 23 日から 2000 年 12 月 6 日までである。主な調査時期を表-2.10 に示す。

表-2.10 暴露試験の調査スケジュール（結果）

日 時	暴露経過日数	暴露試験実施状況	調 査 内 容
1999年	7月22日	0日目 試験体設置	水質分析(簡易計測器による)
	7月23日	1日目 連続計測開始	
2000年	1月14日	176日目 試験体表面状況の調査	目視調査(水中部試験体:水中写真撮影、 干満部試験体:写真撮影) 水質分析(簡易計測器による)
	4月19日	272日目 腐食発生状況の中間調査	水中部試験体腐食調査 (写真撮影、腐食生成物のEDX分析、XRD分析) 水質分析、微生物調査
	12月6日	503日目 腐食発生状況の最終調査	水中部試験体及び干満部試験体腐食調査 (写真撮影、腐食生成物のEDX分析、XRD分析)

2.5.2 連続計測

塩化物イオン濃度と水温，試験体各部の自然電位の変化を連続計測している。連続計測の記録は，A/D コンバータ（日本ナショナルインスツルメンツ製 PCI-MIO-16XE-10）とパソコンにより行っている。塩化物イオン濃度センサと水温計は干満帯と水中部それぞれに 1 機，照合電極は各試験体毎に設置し，10 分毎に記録を行っている。

3. 暴露試験結果

3.1 試験体設置状況

試験体の設置状況を写真-3.1, と写真-3.2 に示す。また、試験体の設置位置の概略を図-3.1 に示す。写真は干満帯に設置された試験体である。水中部の試験体も同様に設置されている。

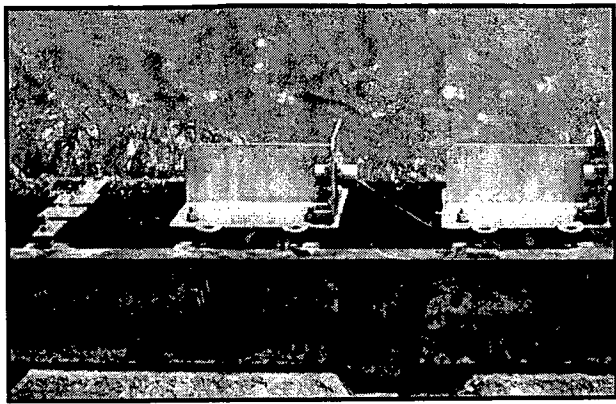


写真-3.1 干満帯試験体設置状況（全体）

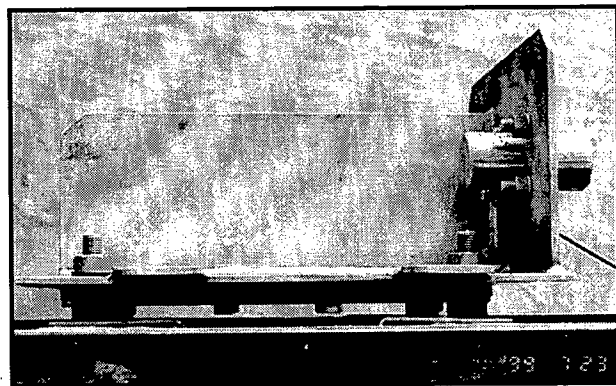
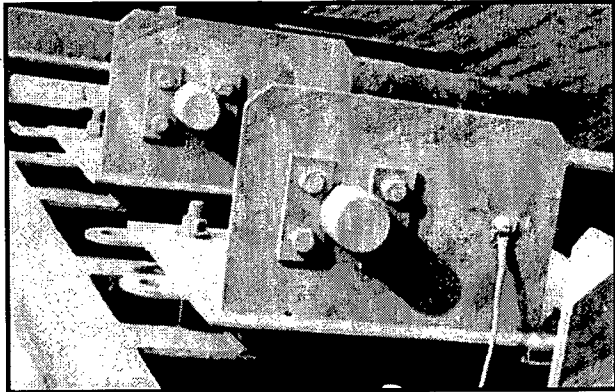


写真-3.2 干満帯試験体設置状況（SUS316）

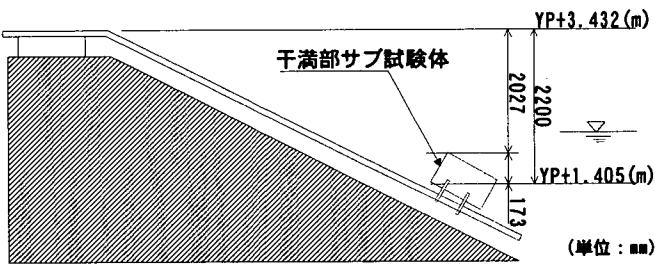


図-3.1 試験体位置図

3.2 水質環境

(a) 暴露試験開始時の計測結果 (1999 年 7 月 22 日)

暴露試験開始時の状況を表-3.1 に示す。水質分析は、簡易水質計測器（堀場製作所製水質チェッカー U-10）により計測した値である。設置前日までの江戸川上流域での降雨により、暴露試験場所上流の江戸川水門が全門放流しており、水質は放流の影響を受けている。

表-3.1 試験体設置時の水質状況

試験体据付日時	1999年7月22日	10:00頃	(水中部メイン試験体(SUS316))			
		11:00頃	(水中部サブ試験体(SUS316,SUS304))			
		14:00頃	(干満部サブ試験体(SUS316,SUS304))			
気 象		天候 :曇り	気温 :30℃	湿度 :68%		
水 質		pH	電気伝導率 (mS/m)	濁度 (NTU)	溶存酸素 (mg/L)	水温 (℃)
水中部試験体近傍	10:30計測(1回目計測)	6.37	17.7	35~50	6.66	22.9
水中部試験体近傍	15:50計測(2回目計測)	7.08	17.7	40~50	7.78	23.6

【備考】気象は国土交通省江戸川河口出張所での9:00の計測値である。
水質は簡易水質計で計測した値である。

(b) 水中写真撮影時の計測結果 (2000 年 1 月 14 日)

試験体表面状況の調査を行った 2000 年 1 月 14 日の水質状況を図-3.2 に示す。水質分析は、暴露試験開始時と同様に簡易水質計測器（堀場製作所製水質チェッカー U-10）により計測した値である。

表-3.2 水中写真撮影時の水質状況 (2000 年 1 月 14 日)

水 質	pH	電気伝導率 (mS/m)	濁度 (NTU)	溶存酸素 (mg/L)	水温 (℃)
水中部試験体近傍 16:15計測	7.18	34.0	—	9.36	7.9
干満部試験体近傍 14:24計測	7.08	50.4	—	9.87	8.1

【備考】水質は簡易水質計で計測した値である。

(c) 中間調査時の計測結果 (2000 年 4 月 19 日)

水中部に設置された試験体の中間引き上げ調査を行った 2000 年 4 月 19 日の水質状況を表-3.3 に示す。水質分析は、簡易水質計測器により分析している。

表-3.3 中間調査時の水質状況 (2000 年 4 月 19 日)

水 質	pH	電気伝導率 (mS/m)	濁度 (NTU)	溶存酸素 (mg/L)	水温 (℃)
河川下層	6.9	117	—	8.6	17

【備考】水質は簡易水質計で計測した値である。

3.3 微生物分析結果

水中部に設置された試験体の中間引き上げ調査を行った 2000 年 4 月 19 日に、試験体表面付着物及び河床の砂礫、河川水を採取して、微生物の培養分析を行った。その結果を表-3.4 に示す。

表-3.4 微生物相分析結果

	メイン試験体(SUS316)		サブ試験体(SUS316)		メイン試験体(SUS316)	河川	河川
	試験体表面	試験体内面	水中部試験体表面	干満部試験体表面	内面泥質	河床泥質	河川水
一般細菌	1.30×10^4	4.66×10^4	6.10×10^4	3.76×10^3	5.68×10^5	3.50×10^5	1.5×10^4
従属栄養細菌	3.37×10^4	2.23×10^5	1.72×10^5	3.79×10^5	2.06×10^6	1.69×10^6	1.47×10^4
好中性硫黄酸化細菌 (N-SOB)	1.35×10^4	2.37×10^4	3.93×10^4	6.65×10^4	5.03×10^5	2.64×10^5	5.64×10^3
好酸性硫黄酸化細菌 (A-SOB)	2.62×10^2	8.56×10^2	1.19×10^3	3.76×10	6.06×10^4	2.06×10^4	6.00×10
鉄酸化細菌 (IOB)	0.00	0.07	0.29	0.04	6.26	2.14	0
硫酸塩還元菌 (SRB)	9.56×10^2	1.94×10^3	5.60×10^3	4.00×10^2	2.31×10^3	1.79×10^3	4.20×10^2
鉄細菌 (IB)	検出	検出	検出	検出	検出	検出	検出

(単位: cell/mm²)

(単位: cell/g)

(単位: cell/ml)

3.4 腐食状況の調査結果

3.4.1 試験体表面状況の調査結果 (2000 年 1 月 14 日)

暴露試験開始から 176 日目の 2000 年 1 月 14 日に、試験体表面状況の調査を行った。水中部に設置された試験体は潜水夫による水中撮影により調査し、干満帯に設置された試験体は干潮時に目視調査した。

(a) 水中部に設置された試験体の表面状況調査結果

水中部に設置された試験体は、図-3.2 に示す各部について水中撮影を行った。その一部を写真-3.3 から写真-3.5 に示す。試験体の全体状況は、表-3.5 に示すとおりである。

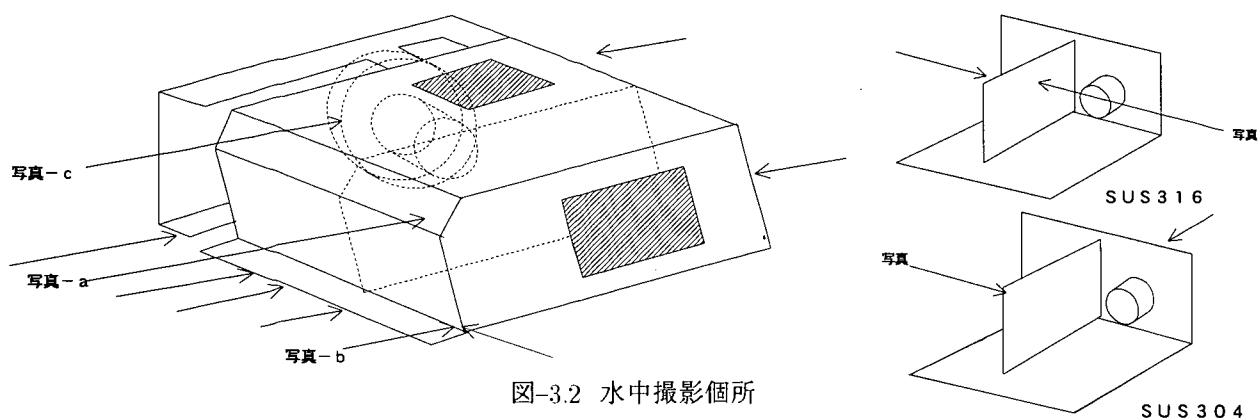


図-3.2 水中撮影箇所

表-3.5 水中部試験体の表面状況調査結果

概要 (176 日暴露後)

水中部試験体表面状況調査結果 暴露開始より176日経過後(1999.7.22~2000.1.14)		
メイン試験体 (SUS316)	試験体表面	藻類、貝類(直径約5mm)が全体的に付着している。
	試験体内面	- 藻類が全体的に付着している。 - 試験体底部の河川下流側に泥質が堆積している。(最大10cm) - ローラ軸に貝類が付着している。
サブ試験体 (SUS316) (SUS304)	試験体 スキプレート側	藻類、貝類(直径約5mm)が全体的に付着している。
	試験体 析側	藻類が付着している。

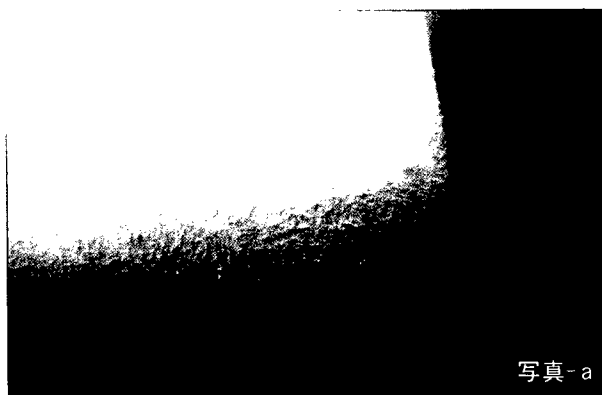


写真-a

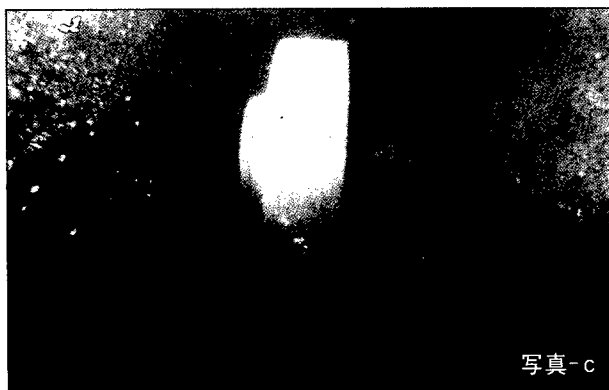


写真-c

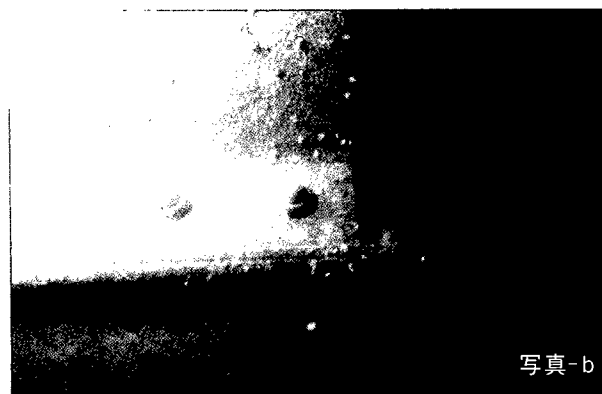


写真-b

写真-3.3 水中部メイン試験体 (SUS316) の表面状況 (176 日暴露後)



写真-3.4 水中部サブ試験体 (SUS316) の
表面状況 (176 日暴露後)



写真-3.5 水中部サブ試験体 (SUS304) の
表面状況 (176 日暴露後)

(b) 干満帯に設置された試験体の表面状況調査結果

干満帯に設置された試験体それぞれについて目視調査を行った。その結果は写真-3.6 と写真-3.7 に示すとおりである。

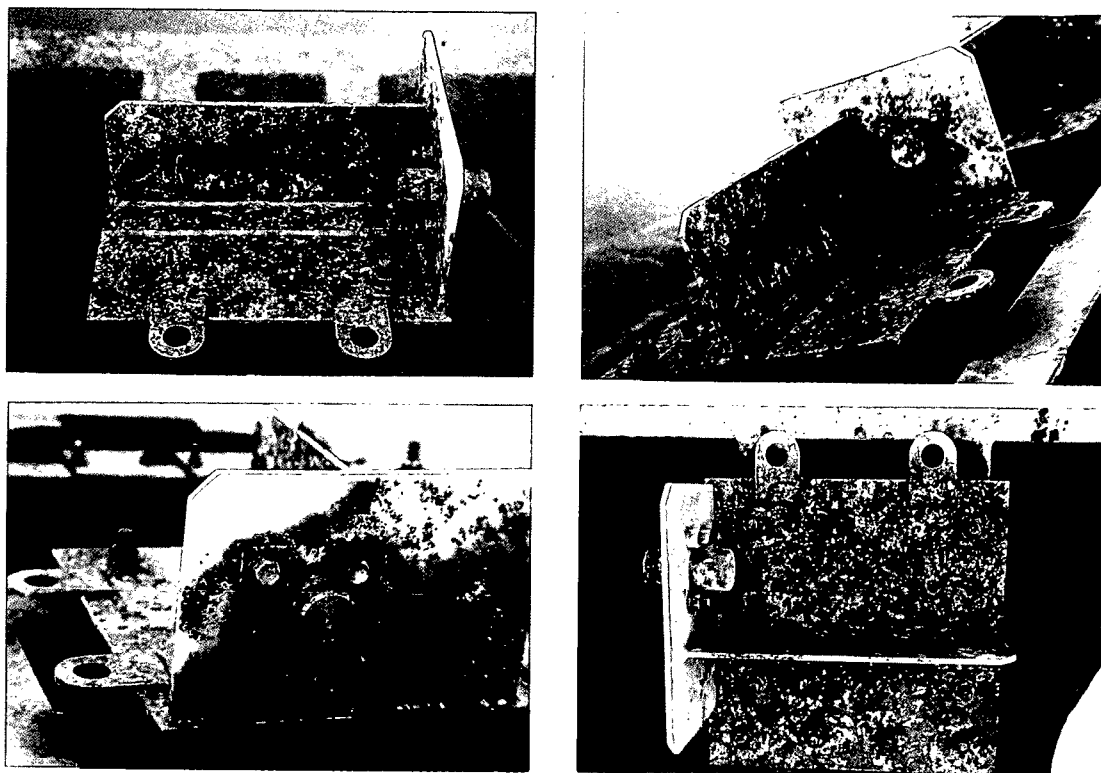


写真-3.6 干満帯サブ試験体 (SUS316) の表面状況 (176 日暴露後)

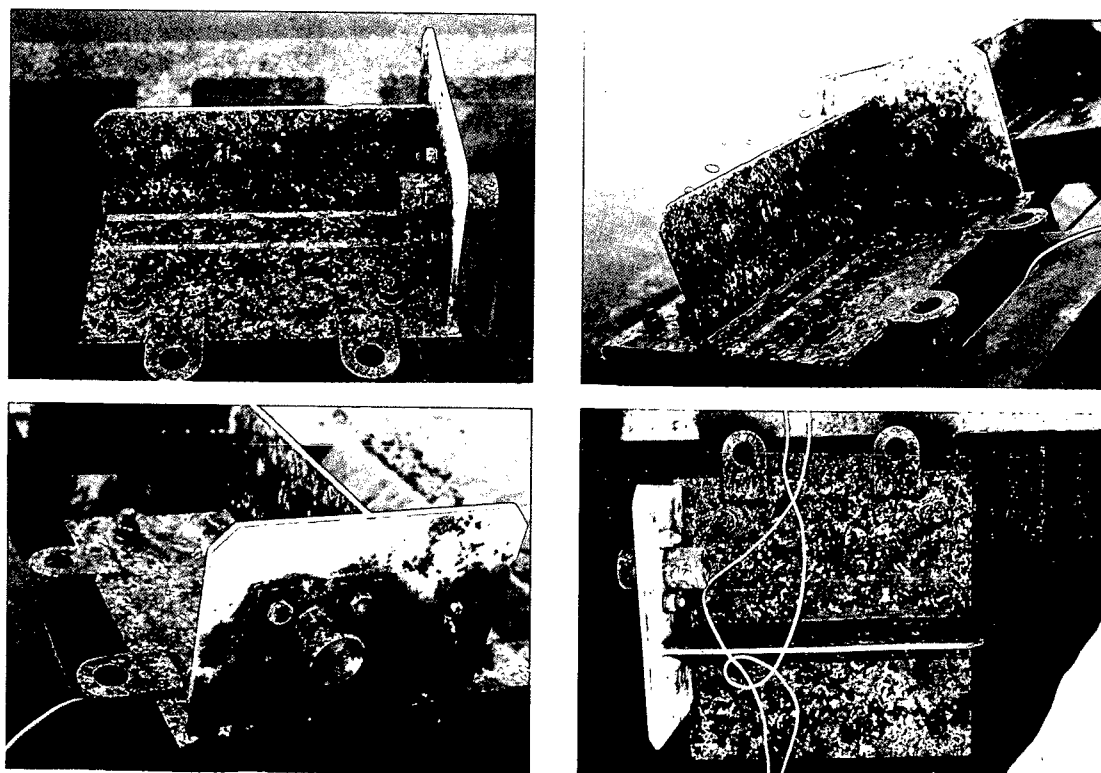


写真-3.7 干満帯サブ試験体 (SUS304) の表面状況 (176 日暴露後)

3.4.2 腐食発生状況の中間調査結果 (2000 年 4 月 19 日)

暴露試験開始から 272 日目の 2000 年 4 月 19 日に、水中部に設置された試験体について中間調査を行った。試験体は、水中から引き上げた後、表面に付着した藻類や貝類、堆積した砂礫を洗浄除去して腐食状況を調査した。なお、干満帯に設置された試験体は、2000 年 1 月 14 日に実施した目視調査と自然電位の連続計測の結果から腐食発生はないと判断して、中間評価を行っていない。

(a) 水中部メイン試験体中間調査結果

水中部メイン試験体の洗浄前の状況を写真-3.8 に、洗浄後の状況を写真-3.9 に示す。貝類は、部分的に貝類を除去して付着箇所を目視調査したがすき間腐食等は観察されなかったため、除去していない。また、腐食調査は、必要に応じて試験体各部を分解して行っている。水中部メイン試験体の調査結果の概要を表-3.6 に示す。また、各部の状況を写真-3.10 から写真-3.13 に示す。全体に発錆が観られるものの、比較的清浄な状態が維持されていた。水密部を分解したがすき間腐食等は観察されなかった。また、ローラ軸取付部のキーププレートを分解するとともに、ローラ軸をわずかに移動させて、縦桁とのすき間部を調査したが、腐食は観察されなかつ

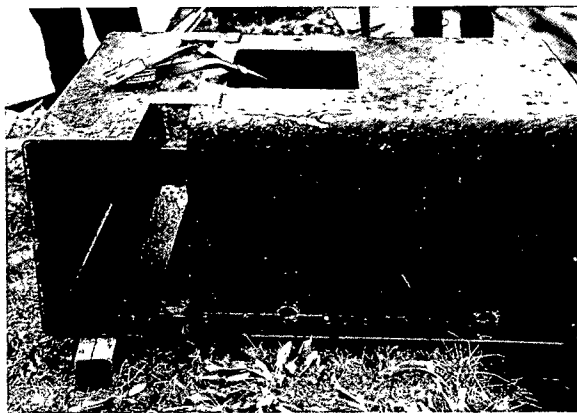


写真-3.8 水中部メイン試験体 (SUS316) 中間調査 引き上げ時の状態 (272 日暴露後)

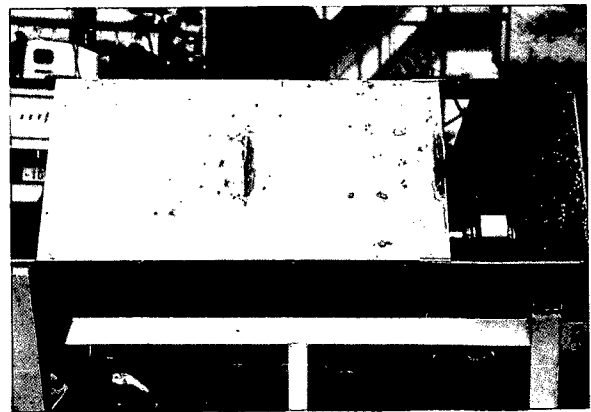
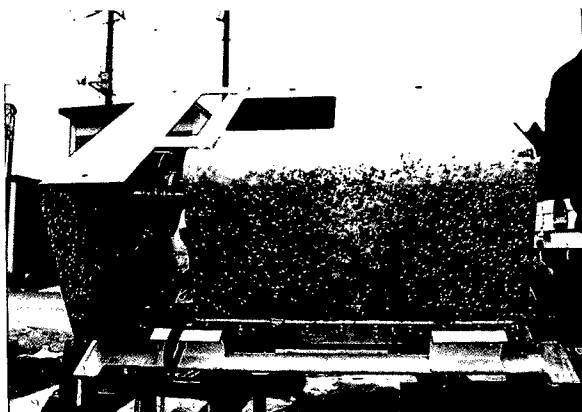


写真-3.9 水中部メイン試験体 (SUS316) 中間調査 洗浄後の状態 (272 日暴露後)

た。シェル構造内部の砂礫堆積箇所において、鋼材に変色*が見られた。また、ローラと皿ばねのすき間部から錆汁状の物質が採取できた。ローラ部の分解が困難なため、詳細な目視調査は実施できなかったが、採取した物質のEDX分析からFeが検出されている。ローラ部に何らかの腐食が発生していると考ええる。EDX分析の結果を図-3.3に示す。

表-3.6 水中部メイン試験体 (SUS316) の中間調査箇所及び調査結果概要

		藻類の付着の有無	貝類の付着の有無	発錆等の有無	すき間腐食の有無	備考
胴体外面 (受圧部、架構部)	スキンプレート	○	○	無し	無し	
	頂板	○	△	無し	無し	
	背面板	○	△	無し	無し	
	端縦桁	○	○	無し	無し	
	底面板	○	○	無し	無し	
胴体内部 (受圧部、架構部)	縦桁(試験体側面開口部)	○	●	無し	無し	
	スキンプレート	○	無し	変質	無し	変質は、砂礫の堆積箇所
	頂板	○	△	発錆	無し	
	背面板	○	△	無し	無し	
	端縦桁	○	△	発錆、変質	無し	変質は、砂礫の堆積箇所
	底面板	○	△	変質	無し	変質は、砂礫の堆積箇所
	縦桁(軸受け部)	○	△	変質	無し	変質は、砂礫の堆積箇所
		○	△	変質	無し	変質は、砂礫の堆積箇所
	縦桁(試験体側面開口部)	○	無し	変質	無し	変質は、砂礫の堆積箇所
		不明	○	発錆、変質	無し	変質は、砂礫の堆積箇所
支承部	ローラ	○	○	無し	○	皿ばねとのすき間部から採取された錆汁状の物質から、すき間腐食と判断した。
	ローラ軸	○	△	無し	無し	
	キーププレート	○	△	無し	無し	
水密部	下部リップ	縦桁側	無し	無し	無し	
		対面	○	無し	無し	
	水密ゴム押さえ板	対面	○	△	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
		水密ゴム側	無し	無し	無し	
		対面	○	無し	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
		水密ゴム側	無し	無し	無し	

※貝類の付着は、●:10個以上/dm²
○:10個以下/dm²
△:数箇程度(対象部位の一部に付着している)

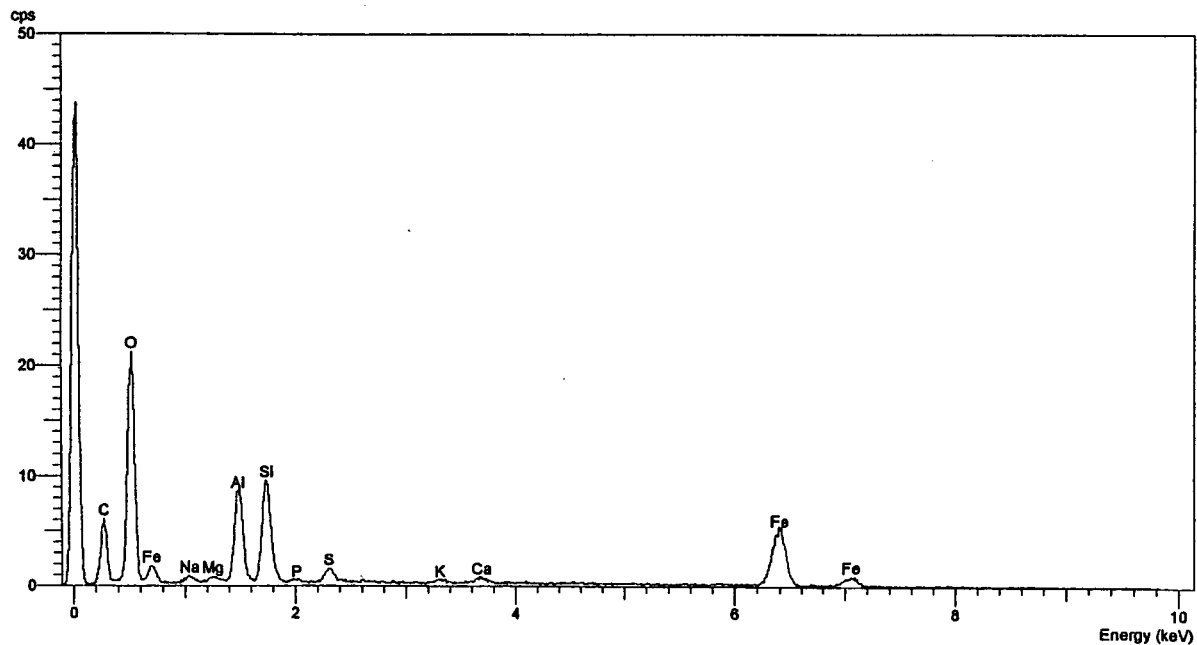


図-3.3 水中部メイン試験体のローラ部すき間の腐食生成物のEDX分析結果

* 一般に変色と発錆の区別は明確ではない。変色（あるいはくもり，tarnishing または staining）とは，表面生成物がある程度厚くなり，肉眼で区別できるようになったものを指す¹¹⁾。金属表面に発生した大きさ 50 μ m 程度の点状の腐食を指す場合もある。ただ，一般に，発錆と呼ばれているものとの区別が明確ではない。本報では，文字通り，金属色に変化が観られるものを変色とよび，金属表面に，褐色の腐食生成物が明らかに存在するものを発錆とよぶ。

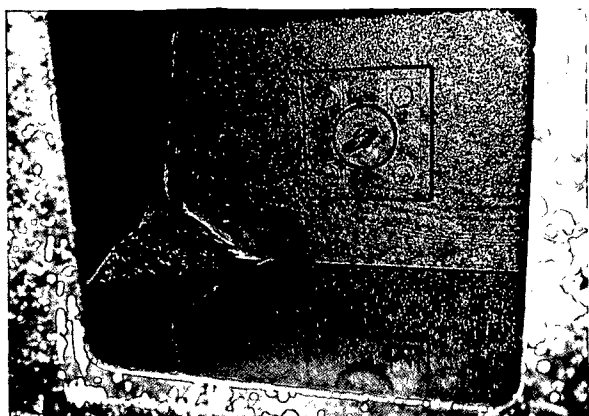


写真-3.10 水中部メイン試験体 (SUS316)
中間調査 シェル構造内部の砂礫
堆積状況 (272 日暴露後)

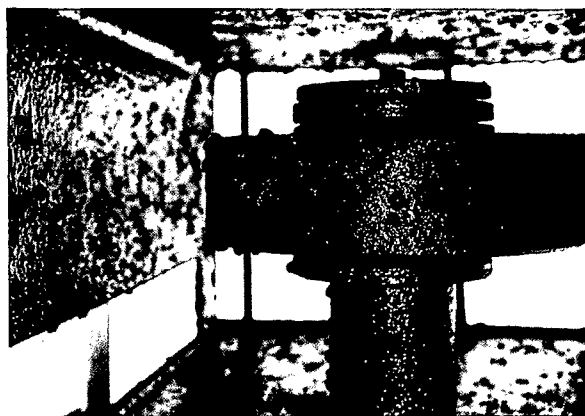


写真-3.12 水中部メイン試験体 (SUS316)
中間調査 ローラ部の引き上げ時
の状況 (272 日暴露後)

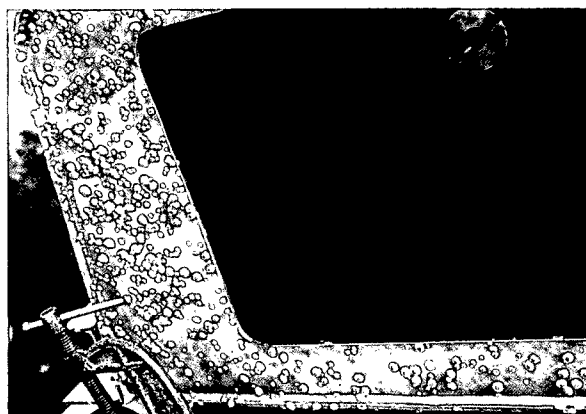


写真-3.11 水中部メイン試験体 (SUS316)
中間調査 シェル構造内部砂礫堆積
箇所の変色 (272 日暴露後)

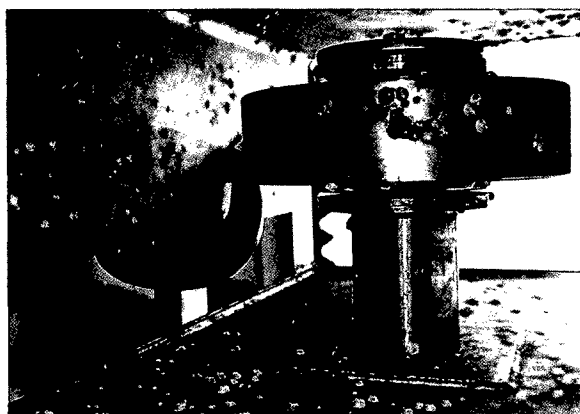


写真-3.13 水中部メイン試験体 (SUS316)
中間調査 ローラ部の腐食状況
(272 日暴露後)

(b) 水中部サブ試験体中間調査結果

水中部サブ試験体についても、メイン試験体と同様に、試験体を洗浄後、各部を分解して目視調査を行った。調査結果の概要を表-3.7に示す。各試験体(SUS316,SUS304)ともに、貝類は、部分的に除去を行ったが、付着箇所につき間腐食等が観察されなかったため、貝類は除去していない。サブ試験体(SU316)は、試験体表面に発錆があり、鋼板の片面溶接部非開先側にすき間腐食が発生していた。一方、サブ試験体(SUS304)は、試験体表面の発錆に加えて、鋼板の片面溶接部非開先側にすき間腐食の著しい箇所があり、錆瘤が観察された。この錆瘤の一部を採取して、EDX分析とXRD分析を行って物質同定を行った。その結果を図-3.4と図-3.5に示す。XRD分析の結果、 Fe_3O_4 、 FeCr_2O_4 (鉄酸化物と鉄クロム酸化物)が同定された。また、水密部のスキンプレート側に著しいすき間腐食が発生していた。すき間腐食の状況を写真-3.18に示す。

表-3.7 水中部サブ試験体の中間調査箇所及び調査結果概要

			藻類の付着 の有無	貝類の付着 の有無	発錆等 の有無	すき間腐食 の有無	備 考
SUS316							
扉体外面 (受圧部、架構部)	スキンプレート		○	●	無し	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
	端縦桁		○	●	無し	無し	
扉体内面 (受圧部、架構部)	スキンプレート	: ローラ側	○	無し	発錆	○	すき間腐食は、片面溶接部非開先側に発生するとともに、錆瘤が発生 すき間腐食は、片面溶接部非開先側に発生するとともに、錆瘤が発生 水密部のボルトとのすき間に発錆が発生
		: 対面	○	△	無し	○	
	端縦桁	: ローラ側	○	●	発錆	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
		: 対面	○	●	無し	無し	
	横桁	: ローラ側	○	無し	発錆	無し	
		: 対面	○	●	無し	無し	
支承部	ローラ軸	: ローラ側	○	●	無し	無し	
		: 対面	○	無し	無し	無し	
	キープレート	: 縦桁側	無し	無し	無し	無し	
		: 対面	○	△	無し	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
水密部	水密ゴム押え板	: 水密ゴム側	無し	無し	無し	無し	
		: 対面	○	●	無し	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
SUS304							
扉体外面 (受圧部、架構部)	スキンプレート		○	●	無し	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
	端縦桁		○	●	無し	無し	
扉体内面 (受圧部、架構部)	スキンプレート	: ローラ側	○	無し	発錆	○	すき間腐食は、片面溶接部非開先側に発生するとともに、錆瘤が発生 すき間腐食は、片面溶接部非開先側に発生するとともに、錆瘤が発生 水密ゴムとの間にすき間腐食が発生 水密部のボルトとのすき間に発錆が発生
		: 対面	○	△	発錆	○	
	端縦桁	: ローラ側	○	●	無し	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
		: 対面	○	●	無し	無し	
	横桁	: ローラ側	無し	△	発錆	無し	
		: 対面	○	●	無し	無し	
支承部	ローラ軸	: ローラ側	○	○	無し	無し	
		: 対面	○	無し	無し	無し	
	キープレート	: 縦桁側	無し	無し	無し	無し	
		: 対面	○	△	無し	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
水密部	水密ゴム押え板	: 水密ゴム側	無し	無し	無し	無し	
		: 対面	○	●	無し	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆

※貝類の付着は、●:10個以上/dm²
○:10個以下/dm²
△:数個程度(対象部位の一部に付着している)

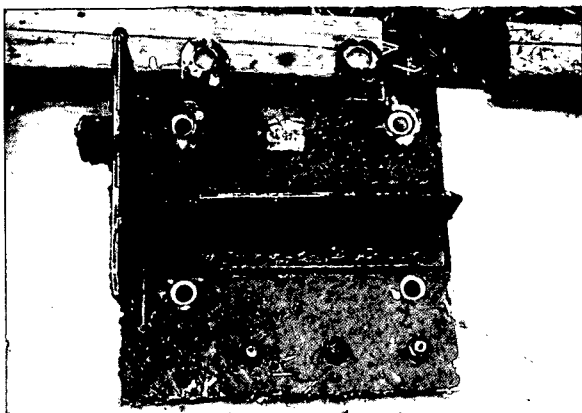


写真-3.14 水中部サブ試験体 (SUS316) 中間
調査引き上げ時の状態
(272 日暴露後)

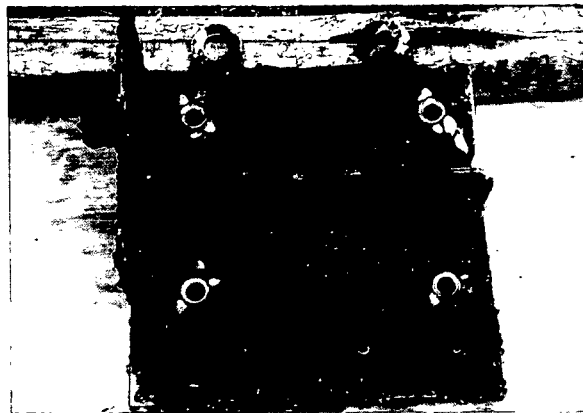


写真-3.16 水中部サブ試験体 (SUS304) 中間
調査引き上げ時の状態
(272 日暴露後)



写真-3.15 水中部サブ試験体 (SUS316) 中間
調査 分解・洗浄後の状態
(272 日暴露後)



写真-3.17 水中部サブ試験体 (SUS304) 中間
調査 分解・洗浄後の状態
(272 日暴露後)

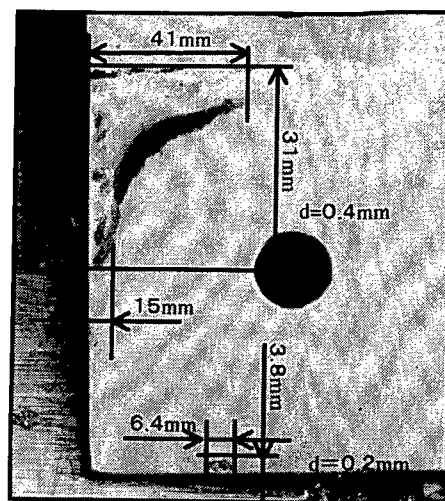
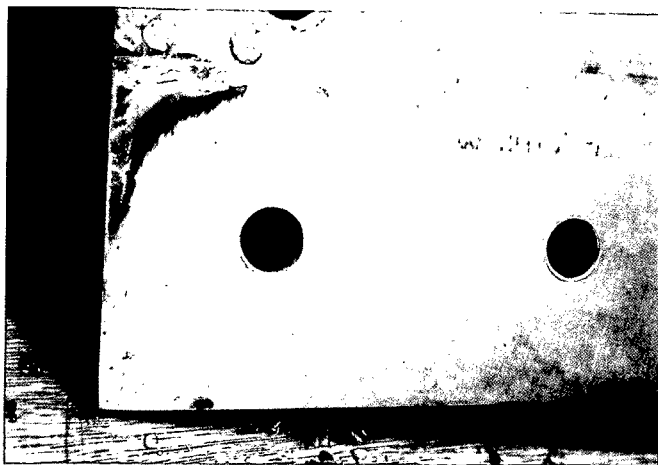


写真-3.18 水中部サブ試験体 (SUS304) の水密部に発生したすき間腐食 (272 日暴露後)

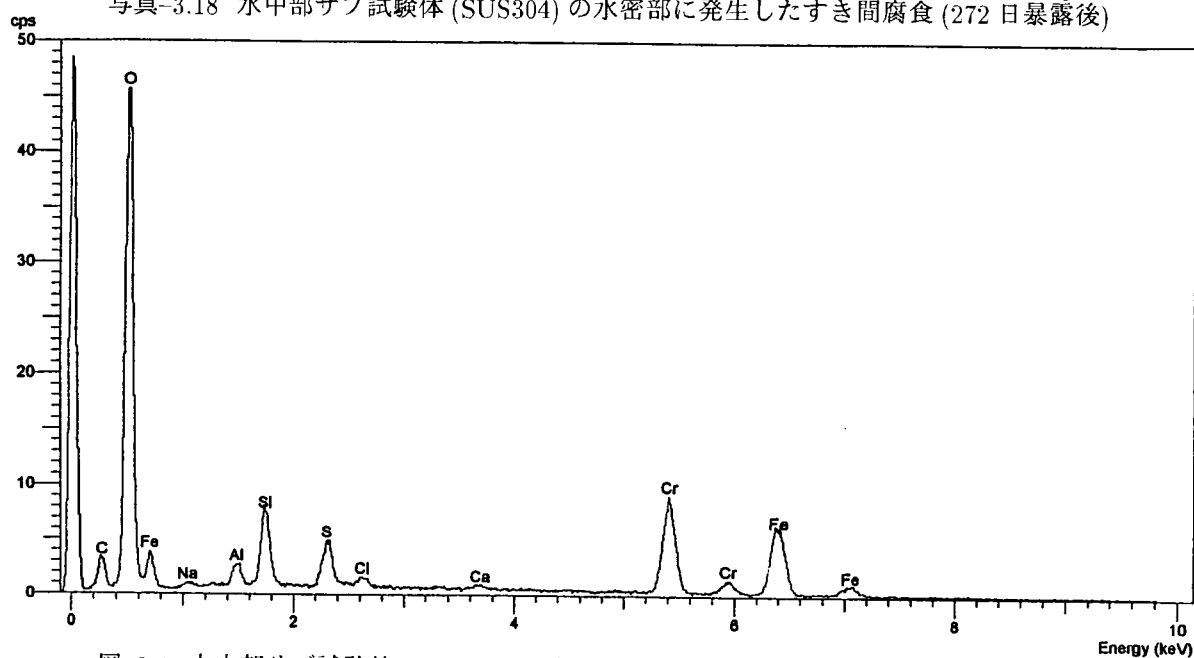


図-3.4 水中部サブ試験体 (SUS304) の溶接部非開先側に発生した錆の EDX 分析結果

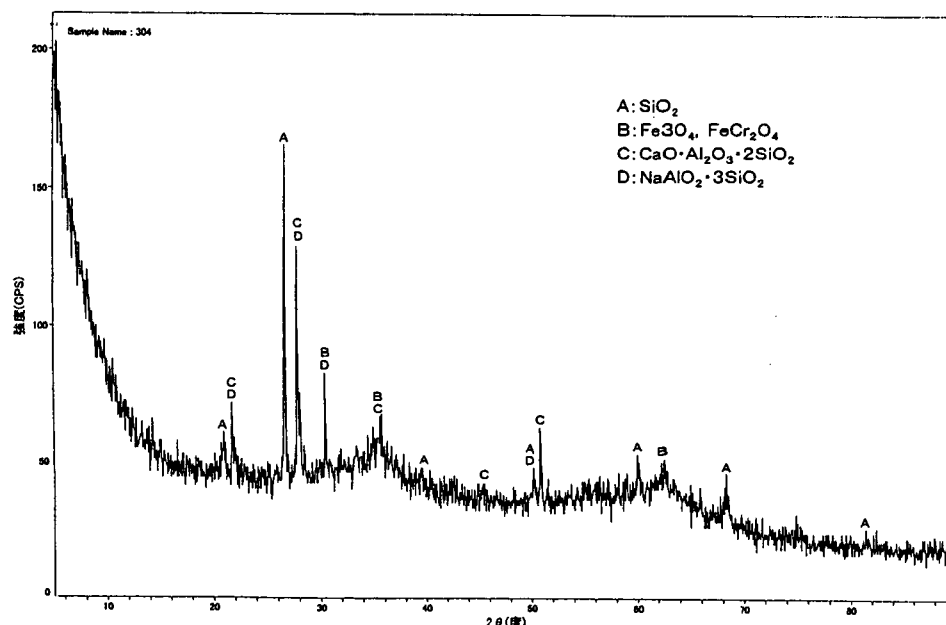


図-3.5 水中部サブ試験体 (SUS304) の溶接部非開先側に発生した錆の XRD 分析結果

3.4.3 腐食発生状況の最終調査結果(2000年12月6日)

暴露試験開始から503日目の2000年12月6日に、全ての試験体について引き上げ調査を行った。腐食状況は、試験体表面に付着した藻類や貝類、堆積した砂礫を洗浄除去して調査した。

(a) 水中部メイン試験体最終調査結果

メイン試験体の洗浄前の状況を写真-3.20に、洗浄後の状況を写真-3.21に示す。中間調査時と比較して藻類や貝類の付着が少なかった。また、シェル構造内部の砂礫の堆積もわずかであった。写真-3.21の状態にて概観調査を行った後に貝類等の付着物をさらに入念に除去して孔食等の詳細な分析を行った。メイン試験体の調査結果概要を表-3.8に示す。試験体全体に発錆が発生するとともに、各部にすき間腐食が発生していた。孔食は観察されなかった。

扉体は、スキンプレーートの溶接部未溶着箇所すき間腐食が発生していた。調査箇所を写真-3.19に、各部の外観観察とマクロ組織観察の結果を写真-3.24から写真-3.31に示す。すき間腐食はすき間間隔の狭いものから順に多くなっている。シェル構造内部の砂礫堆積箇所の鋼材の変色は、中間調査時と比較して殆ど変化がなかった。

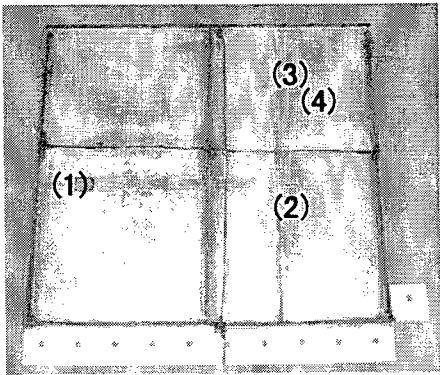


写真-3.19 水中部メイン試験体 (SUS316)
未溶着部調査箇所

表-3.8 水中部メイン試験体 (SUS316) の最終調査箇所及び最終調査結果概要

		藻類の付着の有無	貝類の付着の有無	発錆等の有無	すき間腐食の有無	孔食の有無	備考
扉体外面 (受圧部、架構部)	スキンプレーート	○	○	発錆	無し	無し	発錆は点状に発生
	頂板	○	無し	無し	無し	無し	発錆は点状に発生
	背面板	○	無し	発錆	無し	無し	発錆は点状に発生
	端継桁	○	△	発錆	無し	無し	発錆は点状に発生
	底面板	○	●	発錆	無し	無し	発錆は点状に発生
	縦桁(試験体側面開口部)	○	●	発錆	無し	無し	発錆は点状に発生
扉体内面 (受圧部、架構部)	スキンプレーート	○	△	発錆、変色	○	無し	変色は砂礫の堆積箇所 すき間腐食は溶接の未溶着部
	頂板	○	無し	発錆	無し	無し	発錆は点状に発生
	背面板	○	△	発錆	無し	無し	発錆は点状に発生
	端継桁	○	△	発錆	無し	無し	発錆は点状に発生
	底面板	○	無し	発錆、変色	無し	無し	変色は砂礫の堆積箇所
	縦桁(軸受け部)	○	△	発錆、変色	無し	無し	変色は砂礫の堆積箇所
支承部	ローラ	○	△	脱亜鉛腐食	○	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。 すき間腐食は、皿ばね押え板のボルト部で発生 孔食は、皿ばね押え板(SUS304)で発生 皿ばね(SUS316)にすき間腐食と孔食発生 脱亜鉛腐食は軸受け部(黄銅材)で発生
	ローラ軸	○	△	発錆	無し	○	皿ばねとの接触部で孔食が発生
	キーププレート	無し	無し	無し	無し	無し	変色は砂礫の堆積箇所
	縦桁側	○	無し	発錆、変色	無し	無し	変色は砂礫の堆積箇所
	対面	○	無し	無し	無し	無し	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
	水密ゴム側	無し	△	無し	○	無し	すき間腐食は、ボルトとのすき間、水密ゴムとのすき間に発生した腐食
水密部	下部リップ	○	△	無し	○	無し	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
	水密ゴム押さえ板	○	△	無し	○	無し	すき間腐食は、ボルトとのすき間、水密ゴムとのすき間に発生した腐食

※貝類の
○: 10個以下/dm²
△: 数個程度(対象部位の一部に付着している)

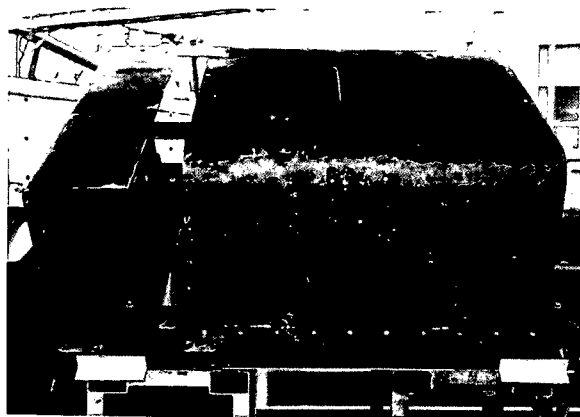


写真-3.20 水中部メイン試験体 (SUS316) 最終調査 引き上げ時の状態 (503 日暴露後)

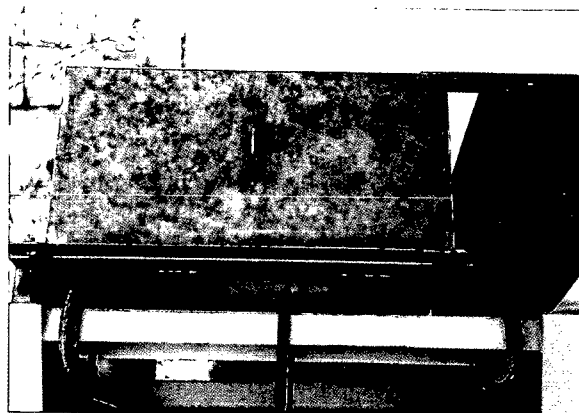


写真-3.21 水中部メイン試験体 (SUS316) 最終調査 洗浄後の状態 (503 日暴露後)

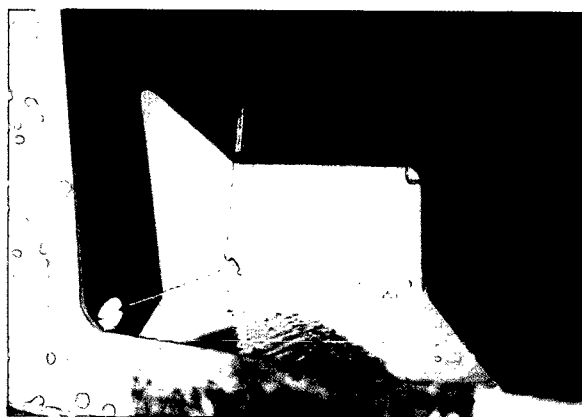


写真-3.22 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 シェル構造内部の砂礫
堆積状況 (503 日暴露後)



写真-3.23 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 シェル構造内部砂礫堆積
箇所の変色 (503 日暴露後)

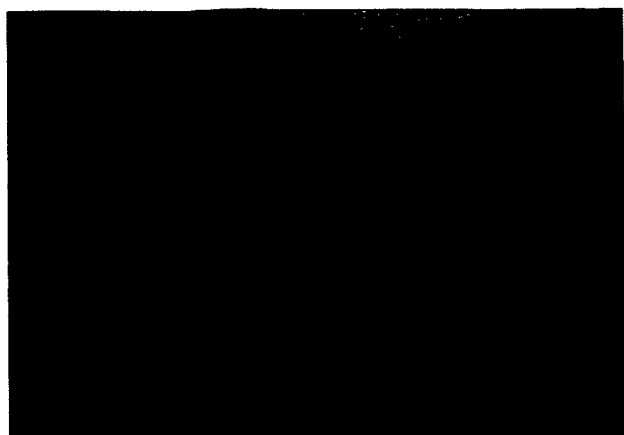


写真-3.24 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 スキンプレート・未溶
着部 (1) のすき間腐食の概観

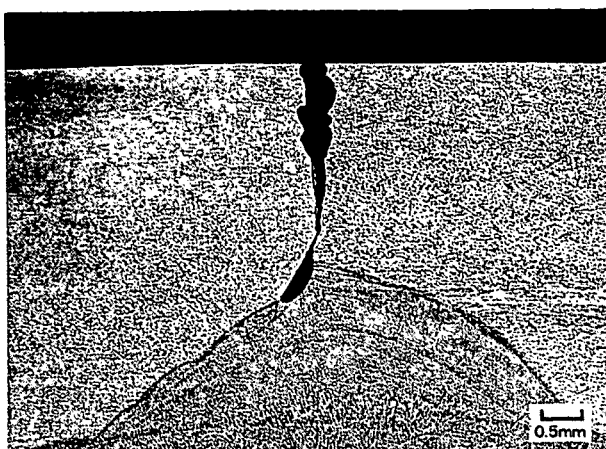


写真-3.25 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 スキンプレート・未溶
着部 (1) の断面金属組織

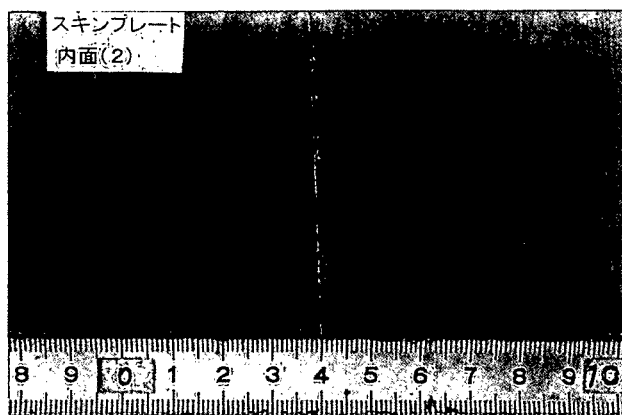


写真-3.26 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 スキンプレート・未溶
着部 (2) のすき間腐食の概観

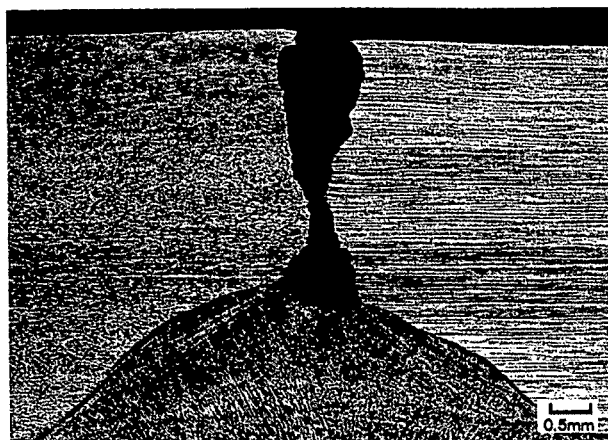


写真-3.27 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 スキンプレート・未溶
着部 (2) の断面金属組織

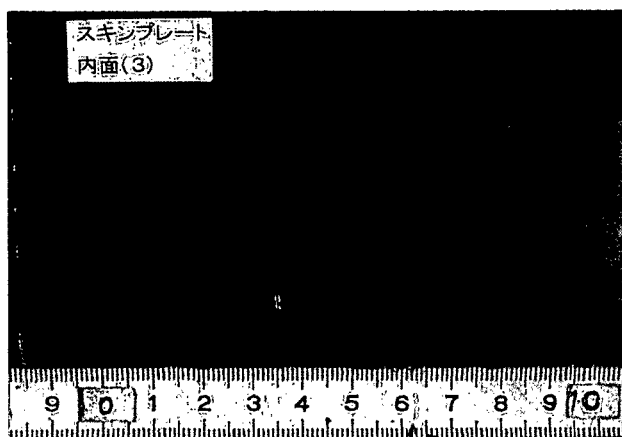


写真-3.28 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 スキンプレート・未溶
着部 (3) のすき間腐食の概観

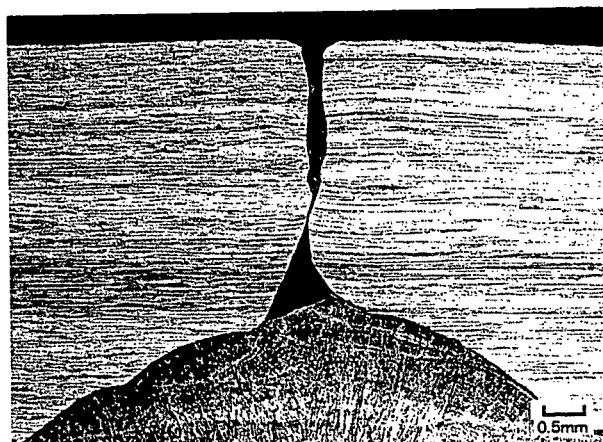


写真-3.29 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 スキンプレート・未溶
着部 (3) の断面金属組織

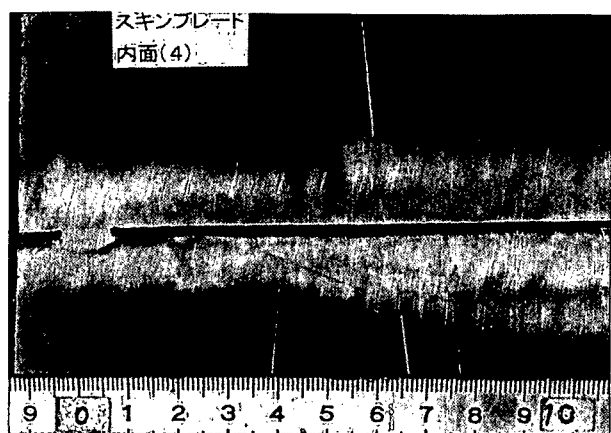


写真-3.30 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 スキンプレート・未溶
着部 (4) のすき間腐食の概観

水密部は、扉体側ではボルトとのすき間部で発錆がみられる程度で比較的清浄な状態であったが、水密ゴム押え板側は、ボルト穴 10 箇所のうち 9 箇所の内面ですき間腐食が発生していた。各すき間腐食箇所の腐食面積と腐食量を 3 次元形状測定装置（ローランド製 PIX-30）を用いて測定した。測定結果を表-3.9 に示す。

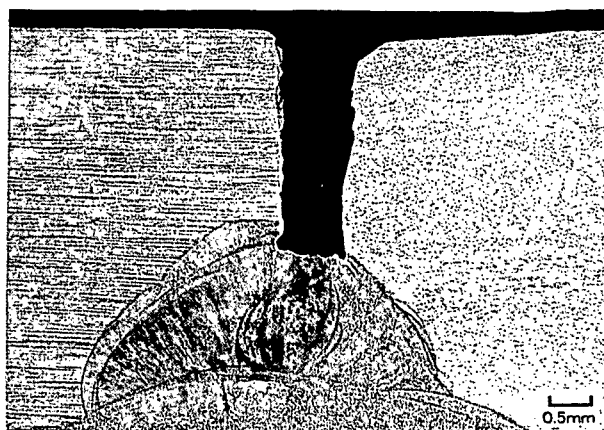


写真-3.31 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 スキンプレート・未溶
着部 (4) の断面金属組織

表-3.9 水中部メイン試験体 (SUS316)

水密部に発生したすき間腐食

試験体	腐食箇所	面積 (mm ²)	体積 (mm ³)	備 考
メイン試験体 (SUS316)	m 1	57	10	
	m 2	34	7	
	m 3	110	12	
	m 4	53	8	
	m 5	37	7	
	m 6	38	7	
	m 7	44	9	
	m 8	35	5	
	m 9	43	7	

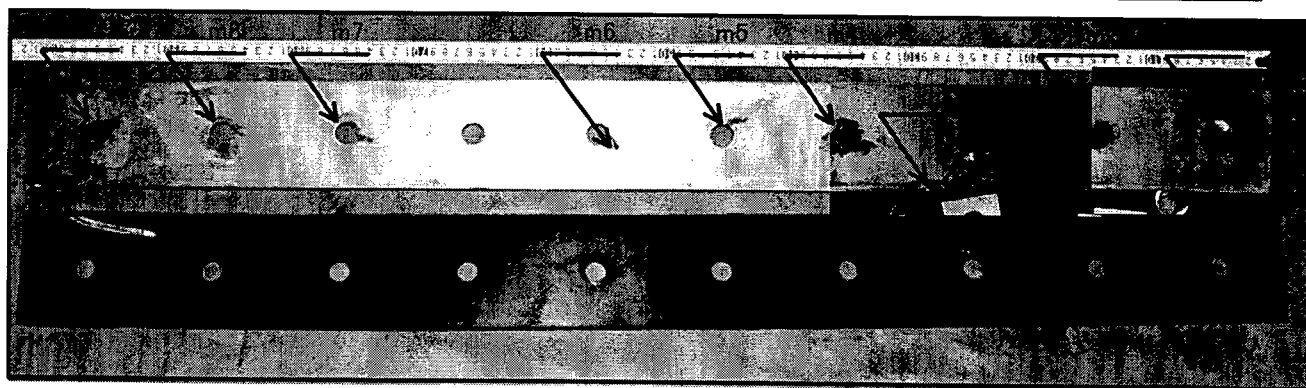


写真-3.32 水中部メイン試験体 (SUS316) 最終調査 水密ゴム押え板内面の腐食箇所

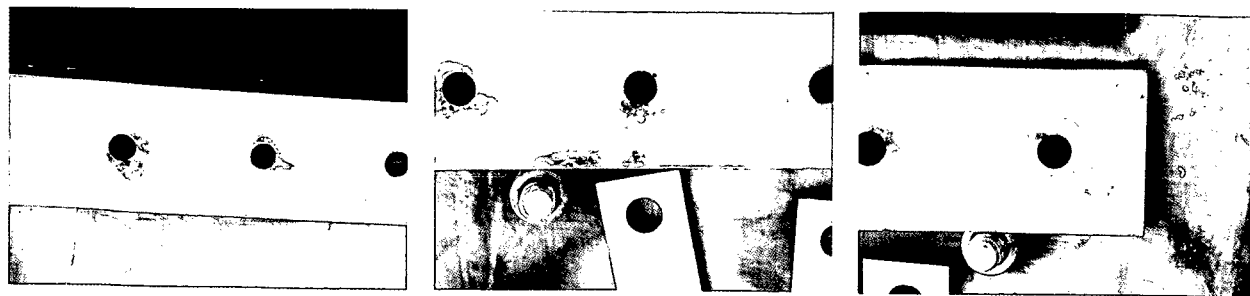


写真-3.33 水中部メイン試験体 (SUS316) 最終調査 水密ゴム押え板内面の腐食例

中間調査時と同様に、ローラ軸取付部のキーププレートを分解するとともに、ローラ軸を移動させて、縦桁とのすき間部を調査した。キーププレートは、ローラ軸とのすき間部に、変色が生じるとともに、ボルトのすき間部でわずかに発錆が生じていた。縦桁とローラ軸とのすき間部には腐食はなかった。中間調査時に錆汁状の物質が採取されたローラ部について詳細な調査を行った。ローラ部の概略図を図-3.8 に示す。ローラ部の引き上げ直後の状態を写真-3.34 に示す。ローラ軸等に多数の腐食生成物と砂礫が付着している。ローラ軸押え板 (SUS304) は、各部に発錆が発生し、ボルト部と端部にすき間腐食が発生していた。皿ばね (SUS631) には孔食が発生していた。孔食は内面より外面にあった。ローラ軸 (SUS316N) についても皿ばねとの接触部で孔食が発生していた。発生した孔食の侵食深さを表-3.10 に示す。侵食深さはレーザー顕微鏡により測定した。一方、ローラ部は、ローラ本体 (SUS329J1) には腐食発生がないが、軸受部のローラ (SUS329J1) と無給油軸受 (高力黄銅) のすき間部で腐食が発生していた。分解後のローラ部の状況を写真-3.35 に示す。ローラ部の各所から採取した腐食生成物 (砂礫等を含む) について組成分析を行うとともに、EDX 分析と XRD 分析を行った。EDX 分析と XRD 分析結果の例として、図-3.8 の⑪から採取した腐食生成物の分析結果を図-3.6 と図-3.7 に示す。

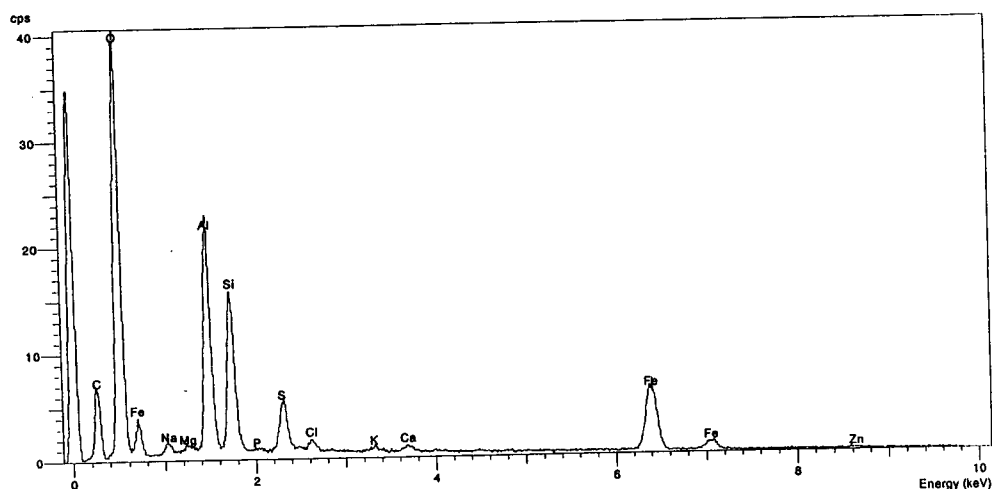


図-3.6 水中部メイン試験体 (SUS316) のローラ部すき間の腐食生成物の EDX 分析結果 (503 日暴露後)

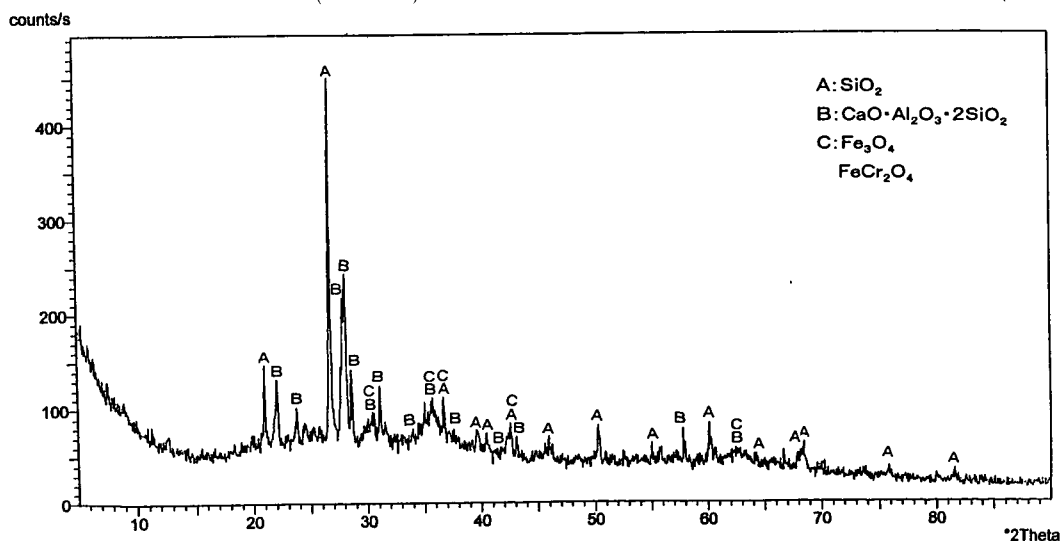


図-3.7 水中部メイン試験体 (SUS316) のローラ部すき間の腐食生成物の XRD 分析結果 (503 日暴露後)

EDX 分析の結果、亜鉛が検出されている。

また、XRD 分析の結果、腐食生成物の主成分は、土砂の成分であるアルミニウム、ケイ素、カルシウム等の酸化物と Fe_3O_4 、 FeCr_2O_4 (鉄酸化物と鉄クロム酸化物) が計測されている。組成分析においても、鉄、亜鉛が多く含まれている。軸受部の EPMA 分析の結果を写真-3.36 に示す。端部で脱亜鉛がみられ、EDX 分析の結果と対応する結果が示されている。

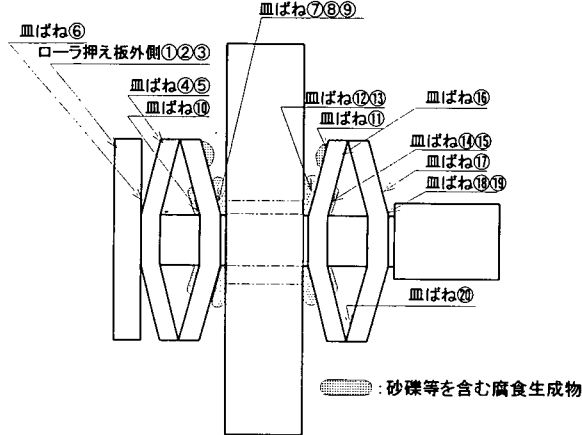


図-3.8 水中部メイン試験体 (SUS316)
ローラ部模式図



写真-3.34 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 ローラ部の引き上げ時
の状況 (503 日暴露後)

表-3.10 ローラ部に発生した孔食の侵食深さ

孔食発生箇所		侵食深さ (単位: μm)
ローラ押え板	①	920
	②	780
	③	880
皿ばね	④	40
	⑤	60
	⑥	40
皿ばね	⑦	270
	⑧	190
	⑨	640
	⑩	280
皿ばね	⑪	500
	⑫	170
	⑬	80
	⑭	240
	⑮	12
	⑯	100
	⑰	450
皿ばね	⑱	380
	⑲	150
	⑳	80

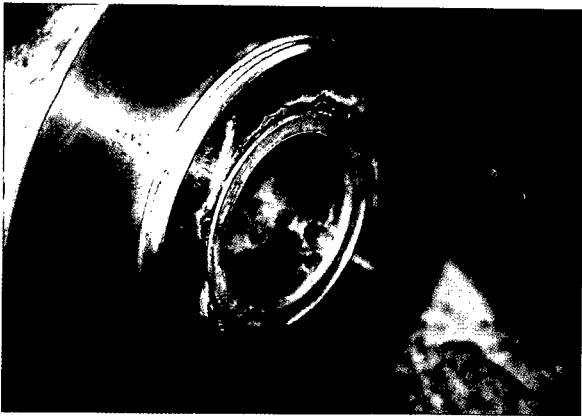
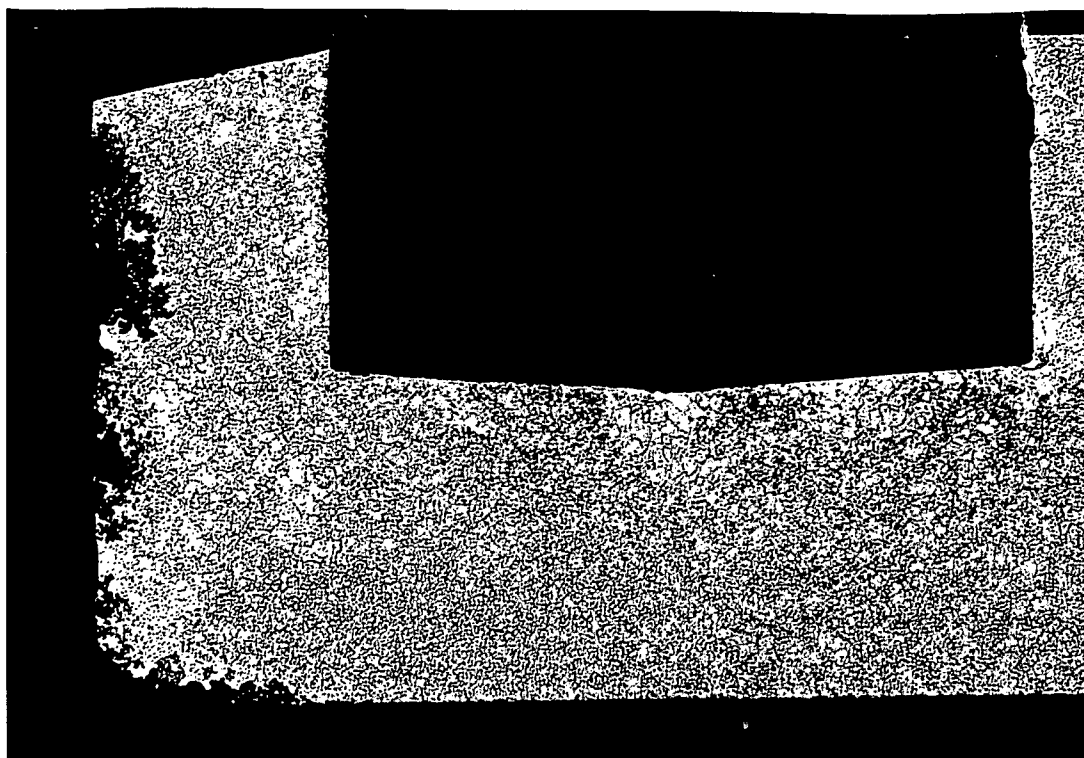


写真-3.35 水中部メイン試験体 (SUS316)
最終調査 ローラ部の腐食状況
(503 日暴露後)

金属組織



EPMA分析

Zn ローラ軸側

Cu



Zn	Lv	Area%	Cu	Lv	Area%
4000	0.0		11040	0.0	
3750	0.0		11100	0.2	
3500	0.0		10360	1.8	
3250	0.0		9620	4.5	
3000	0.0		8880	53.2	
2750	13.6		8140	3.1	
2500	35.8		7400	2.2	
2250	5.2		6660	0.5	
2000	1.6		5920	0.2	
1750	0.7		5180	0.1	
1500	0.5		4440	0.0	
1250	0.4		3700	0.1	
1000	0.5		2960	0.1	
750	1.0		2220	0.1	
500	2.3		1480	0.1	
250	2.9		740	27.9	
0	29.6		0	0.0	
0	0.0		0	0.0	
Average 1741			Average 6047		

No.3
加速電圧 15.0 kV
照射電流 2.993e-07A
時間 (ms) 200.00
点数 300*516
間隔 (um) X:20.00
Y:20.00

最大値 3024
最小値 0
平均値 1741

最大値 11643
最小値 0
平均値 6047

1 mm

ローラ側

写真-3.36 軸受の金属観察とEPMA分析結果

(b) 水中部サブ試験体最終調査結果

水中部サブ試験体について、メイン試験体と同様に、試験体を洗浄した後に各部を分解して調査を行った。調査結果の概要を表-3.11に示す。サブ試験体(SUS316)、サブ試験体(SUS304)ともに、中間調査時と比較して藻類や貝類等の付着物は少なかったが、発錆は一層著しくなっていた。片面溶接部非開先側のすき間腐食は、サブ試験体(SUS316)、サブ試験体(SUS304)ともに中間調査時と比較して顕著な進展はなかった。サブ試験体(SUS304)にあった錆瘤もなくなっていた。一方、サブ試験体(SUS316)、サブ試験体(SUS304)ともに、水密部端部から20mm程度の範囲で鋼材と水密ゴムの間に河川水が浸入しており、その部分にすき間腐食が発生していた。サブ試験体(SUS316)は、水密ゴム押え板の内面にすき間腐食が発生していた。サブ試験体(SUS304)は、水密部のスキンプレート側で、中間調査時に観察されたすき間腐食と別の箇所新たなすき間腐食が発生していた。また、水密ゴム押え板の内面にもすき間腐食が発生していた。各すき間腐食の腐食面積と腐食量を表-3.12に示す。測定は、メイン試験体と同様に3次元計測装置(ローランド製PIX-30)で行った。

サブ試験体(SUS316)については、孔食は観察されなかったが、サブ試験体(SUS304)は、試験体各部の打痕等の加工変質部で孔食が発生していた。打痕と孔食の区別は、断面の検鏡観察等により行っている。但し、打痕深さと孔食深さの区別が非常に困難であるため、孔食深さは評価していない。

表-3.11 水中部サブ試験体の最終調査箇所及び調査結果概要

		藻類の付着 の有無	貝類の付着 の有無	発錆等 の有無	すき間腐食 の有無	孔食の有無	備 考
SUS316							
扉体外面 (受圧部、架構部)	スキンプレート	○	△	無し	無し	無し	
	端縦桁	○	○	無し	○	無し	スキンプレートとの溶接部に腐食発生
扉体内面 (受圧部、架構部)	スキンプレート	○	無し	発錆	○	無し	すき間腐食は、片面溶接部非開先側に発生
	: ローラ側	○	△	発錆	○	無し	すき間腐食は、片面溶接部非開先側に発生
	: 対面	○	○	発錆	無し	無し	
	端縦桁	○	○	発錆	無し	無し	
支承部	: ローラ側	○	○	発錆	無し	無し	
	: 対面	○	○	発錆	無し	無し	
	横桁	○	無し	発錆	無し	無し	
	: ローラ側	○	○	無し	無し	無し	
水密部	ローラ軸	○	○	無し	無し	無し	
	: ローラ側	○	○	無し	無し	無し	
	: 対面	○	△	無し	○	無し	すき間腐食はボルトとのすき間に発生した発錆
	キープレート	無し	無し	無し	○	無し	すき間腐食はボルトとのすき間に発生した発錆
水密部	水密ゴム押え板	無し	無し	無し	○	無し	
	: 水密ゴム側	○	○	無し	○	無し	
	: 対面	○	○	無し	無し	無し	
	下部リップ	無し	無し	無し	無し	無し	
SUS304							
扉体外面 (受圧部、架構部)	スキンプレート	○	△	無し	無し	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。
	端縦桁	無し	無し	○	○	○	すき間腐食は、キープレートとのすき間に発生した発錆
扉体内面 (受圧部、架構部)	スキンプレート	○	無し	発錆	○	○	すき間腐食は、キープレートとのすき間に発生した発錆
	: ローラ側	○	○	発錆	○	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。
	: 対面	○	○	発錆	○	○	すき間腐食は、片面溶接部非開先側に発生
	端縦桁	○	○	発錆	無し	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。
支承部	: ローラ側	○	△	発錆	無し	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。
	: 対面	○	○	発錆	無し	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。
	横桁	○	△	発錆	無し	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。
	: ローラ側	○	○	無し	無し	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。
水密部	ローラ軸	○	○	無し	無し	無し	
	: ローラ側	○	△	無し	無し	無し	
	: 対面	○	△	無し	○	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した発錆
	キープレート	無し	無し	無し	○	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。
水密部	水密ゴム押え板	無し	無し	無し	○	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。
	: 水密ゴム側	○	○	無し	○	○	すき間腐食は、ボルトとのすき間に発生した腐食
	: 対面	○	○	無し	○	○	
	下部リップ	無し	無し	無し	○	○	孔食は、加工時の打痕跡を含んでいる。孔食との区別は不可能。

※貝類の付着は、●:10個以上/dm²
○:10個以下/dm²
△:数個程度(対象部位の一部に付着している)

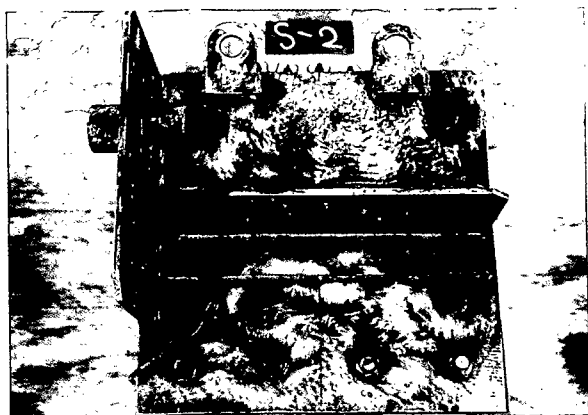


写真-3.37 水中部サブ試験体 (SUS316) 最終
調査引き上げ時の状態 (503 日暴露後)

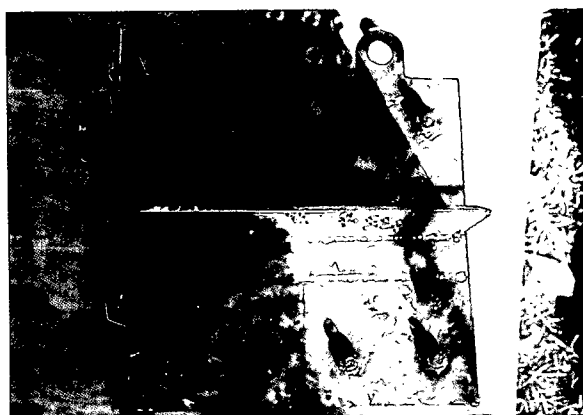


写真-3.39 水中部サブ試験体 (SUS304) 最終
調査引き上げ時の状態 (503 日暴露後)

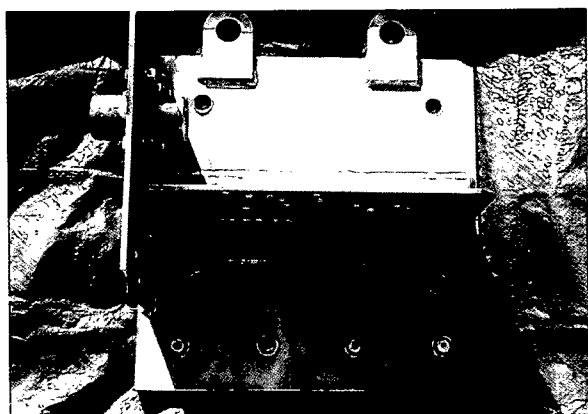


写真-3.38 水中部サブ試験体 (SUS316) 最終
調査 分解・洗浄後の状態
(503 日暴露後)

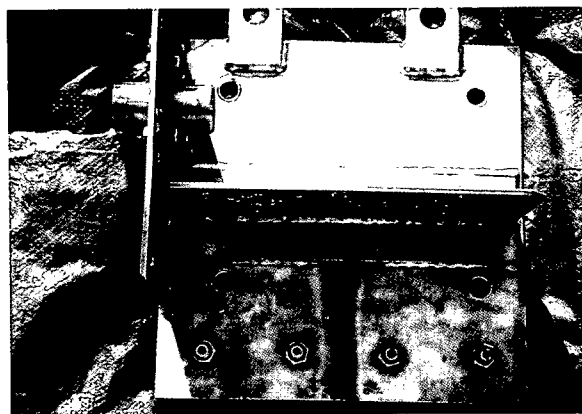


写真-3.40 水中部サブ試験体 (SUS304) 最終
調査 分解・洗浄後の状態
(503 日暴露後)

表-3.12 水中部サブ試験体水密部に発生したすき間腐食の腐食量

試験体	腐食箇所	面積 (mm ²)	体積 (mm ³)	備 考
サブ試験体 (SUS316)	s2 1	24	2	
	s2 2	14	2	
サブ試験体 (SUS304)	s1 1	947	117	
	s1 2	15	3	
	s1 3	18	2	
	s1 4	197	23	
	s1 5	17	2	
	s1 6	25	4	
	s1 7	93	—	写真からのトレースによる計測

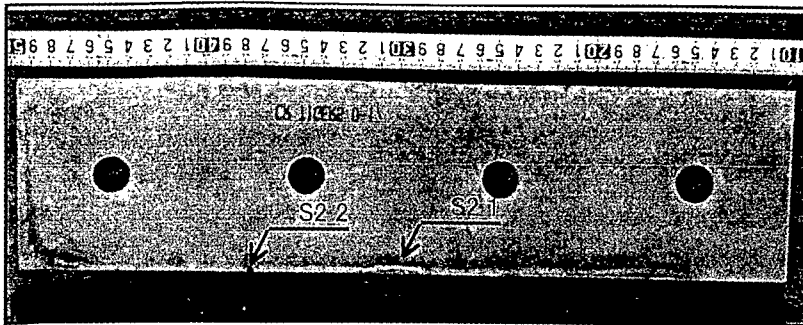


写真-3.41 水中部サブ試験体 (SUS316) 水密部
腐食箇所 (水密ゴム押え板内面)

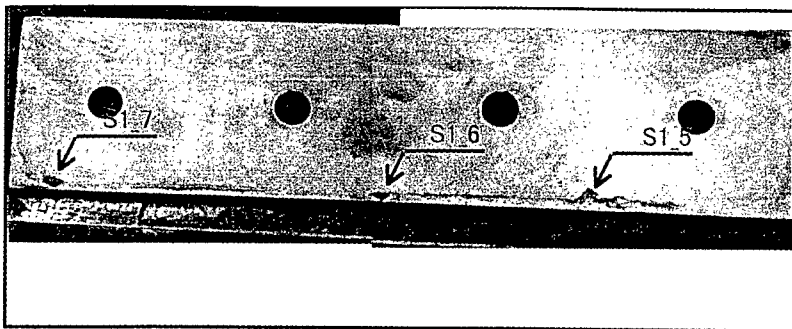


写真-3.42 水中部サブ試験体 (SUS304) 水密部
腐食箇所 (水密ゴム押え板内面)

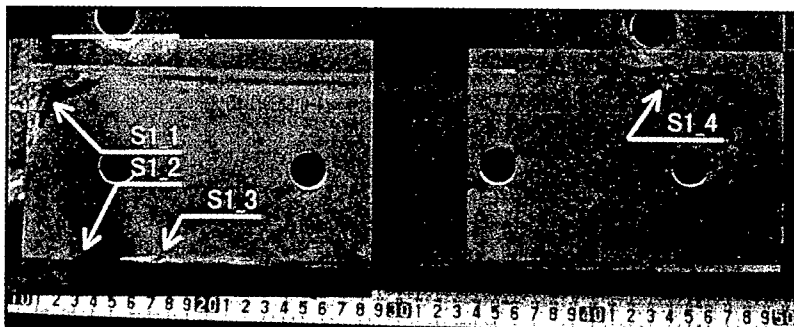


写真-3.43 水中部サブ試験体 (SUS304) 水密部
腐食箇所 (スキンプレート側)

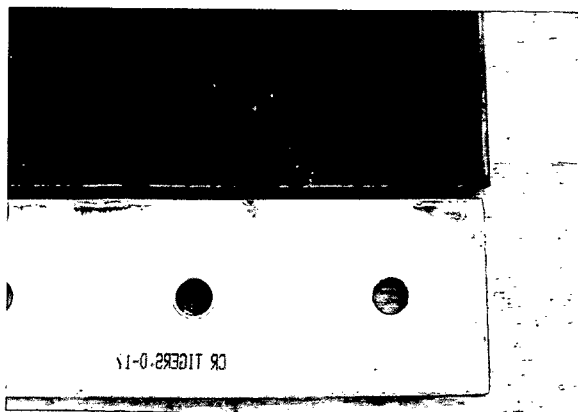


写真-3.44 水中部サブ試験体 (SUS316) に発生
したすき間腐食 (503 日暴露後)

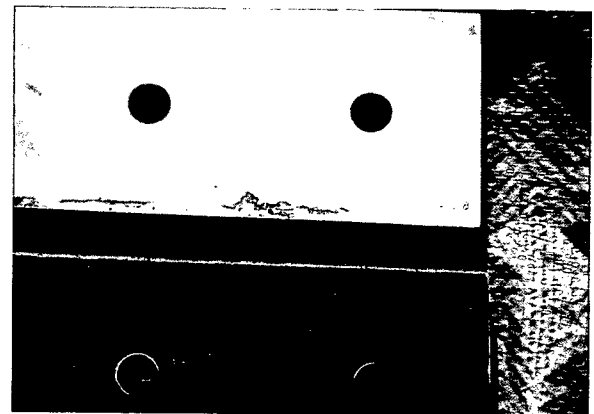


写真-3.45 水中部サブ試験体 (SUS304) に発生
したすき間腐食 (503 日暴露後)

(c) 干満帯サブ試験体最終調査結果

干満帯に設置されたサブ試験体についても、試験体を洗浄した後に各部を分解して調査を行った。干満帯サブ試験体 (SUS316)、干満帯サブ試験体 (SUS304) とともに非常に清浄な状態を確保しており、発錆もなく金属光沢を有していた。腐食は、鋼板の片面溶接部非開先側にわずかにすきま腐食が観察される程度であった。

表-3.13 干満帯サブ試験体の最終調査箇所及び調査結果概要

		藻類の付着 の有無	貝類の付着 の有無	発錆等 の有無	すき間腐食 の有無	孔食の有無	備 考
SUS316							
扉体外面 (受圧部、架構部)	スキンプレート	○	無し	無し	無し	無し	
	端縦桁	○	無し	無し	無し	無し	
扉体内部 (受圧部、架構部)	スキンプレート	○	無し	無し	○	無し	すき間腐食は、片側溶接部非開先側で発生
	: ローラ側	○	無し	無し	○	無し	
	: 対面	○	無し	無し	無し	無し	
	端縦桁	○	無し	無し	無し	無し	
	: ローラ側	○	無し	無し	無し	無し	
	: 対面	○	無し	無し	無し	無し	
支承部	横桁	○	無し	無し	無し	無し	
	: ローラ側	○	無し	無し	無し	無し	
	: 対面	○	無し	無し	無し	無し	
	ギヤプレート	○	無し	無し	無し	無し	
水密部	: 縦桁側	無し	無し	無し	無し	無し	
	: 対面	○	無し	無し	無し	無し	
	水密ゴム押え板	無し	無し	無し	無し	無し	
	: 水密ゴム側	○	無し	無し	無し	無し	
下部リップ	: 対面	○	無し	無し	無し	無し	
	: 水密ゴム側	無し	無し	無し	無し	無し	
SUS304							
扉体外面 (受圧部、架構部)	スキンプレート	○	無し	無し	無し	無し	
	端縦桁	○	無し	無し	無し	無し	
扉体内部 (受圧部、架構部)	スキンプレート	○	無し	無し	○	無し	すき間腐食は、片側溶接部非開先側に発生
	: ローラ側	○	無し	無し	○	無し	すき間腐食は、片側溶接部非開先側に発生
	: 対面	○	無し	無し	○	無し	
	端縦桁	○	無し	無し	無し	無し	
	: ローラ側	○	無し	無し	無し	無し	
	: 対面	○	無し	無し	無し	無し	
支承部	横桁	○	無し	無し	無し	無し	
	: ローラ側	○	無し	無し	無し	無し	
	: 対面	○	無し	無し	無し	無し	
	ギヤプレート	○	無し	無し	無し	無し	
水密部	: 縦桁側	無し	無し	無し	無し	無し	
	: 対面	○	無し	無し	無し	無し	
	水密ゴム押え板	無し	無し	無し	無し	無し	
	: 水密ゴム側	○	無し	無し	無し	無し	
下部リップ	: 対面	○	無し	無し	無し	無し	
	: 水密ゴム側	無し	無し	無し	無し	無し	

※貝類の付着は、●:10個以上/dm²
○:10個以下/dm²
△:数個程度(対象部位の一部に付着している)

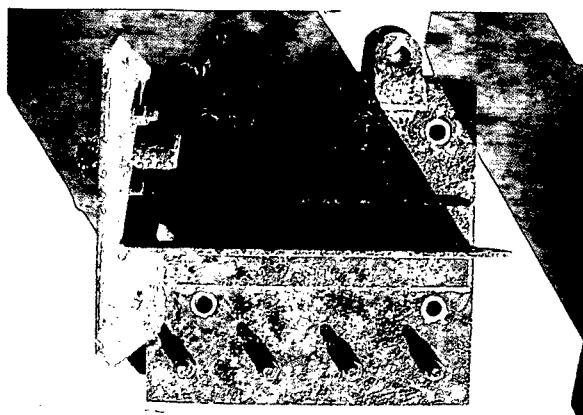


写真-3.46 干満帯サブ試験体 (SUS316) 最終
調査引き上げ時の状態 (503 日暴露後)

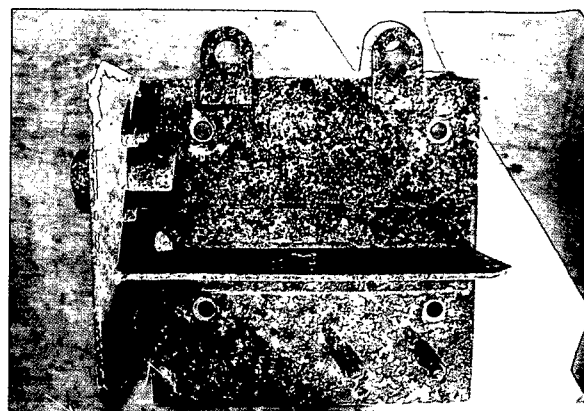


写真-3.48 干満帯サブ試験体 (SUS304) 最終
調査引き上げ時の状態 (503 日暴露後)

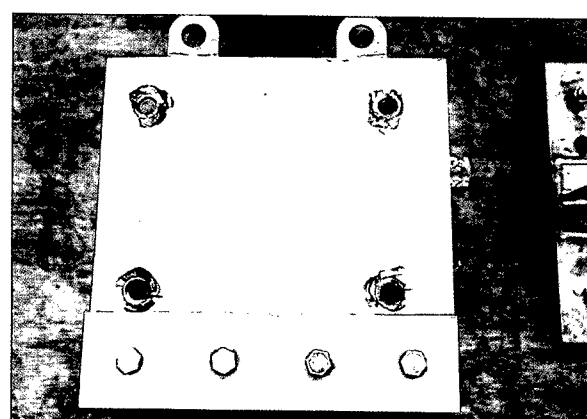
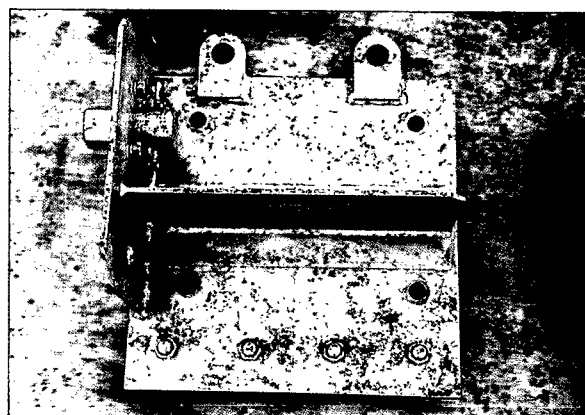


写真-3.47 干満帯サブ試験体 (SUS316) 最終
調査 分解・洗浄後の状態
(503 日暴露後)

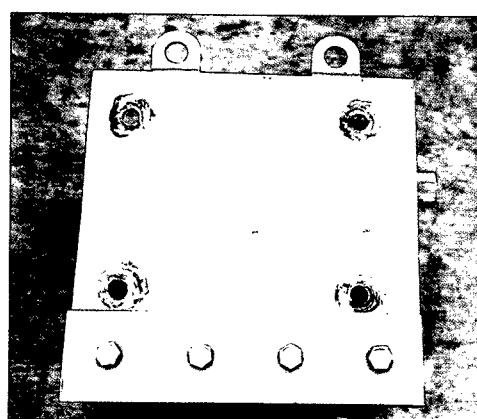
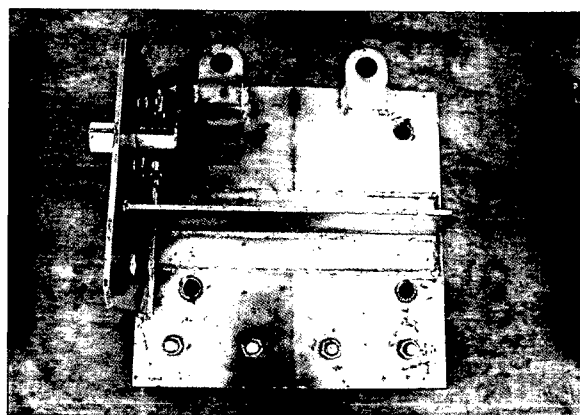


写真-3.49 干満帯サブ試験体 (SUS304) 最終
調査 分解・洗浄後の状態
(503 日暴露後)

3.5 連続計測の結果

暴露試験の試験体腐食電位と塩化物イオン濃度、水温の変化についての連続計測した結果を図-3.9と図-3.12に示す。図-3.9は水中部に設置された試験体について、暴露試験開始(1999年7月22日)翌日から中間調査(2000年4月19日)までの計測結果を示したものであり、図-3.10は、中間調査後の再浸漬開始から最終引き上げ調査(2000年12月6日)までの計測結果を示したものである。同様に、図-3.11は、干満帯に設置された試験体についての暴露試験開始から2000年4月19日までの計測結果を示したものであり、図-3.12は、2000年4月19日から最終引き上げ調査までの計測結果を示したものである。なお、干満帯に設置された試験体の計測結果は、干潮時にセンサが大気中に露出して計測不能となるため、満潮時刻の計測記録を採用してグラフ化したものである。満潮時間は、気象庁東京検潮所(「北緯 $35^{\circ}39'$ 、東経 $139^{\circ}46'$ 」)を検潮地点とする潮位表(東京都建設局河川部)を参考としている。

試験体の設置状況として、各試験体と試験体設置架台との絶縁状況を、試験体の表面状況の調査時(2000年1月14日)と、腐食発生状況の最終調査時(2000年12月6日)に調査した。その結果、2000年1月14日時点で、水中部メイン試験体(SUS316)と水中部サブ試験体(SUS316)について設置架台との間で絶縁不良であったため、腐食発生状況の中間調査時(2000年4月19日)に試験体の設置方法の改修作業を行い絶縁を確保した。2000年12月6日時点では絶縁不良はなかった。また、当初の予想と比べて、試験場所の塩化物イオン濃度が低い値を示したため、中間引き上げ時に照合電極の位置を修正し、試験体と照合電極の間の距離を10mm程度として、当初設置時(50mm程度)より近づけた。

塩化物イオン濃度の日変動の状況を検討するため、水位変動と水中部に設置された試験体に関する連続計測結果との比較結果を参考資料に示す。水位変動は、試験場所近傍での観測結果(国土交通省江戸川工事事務所)を用いている。

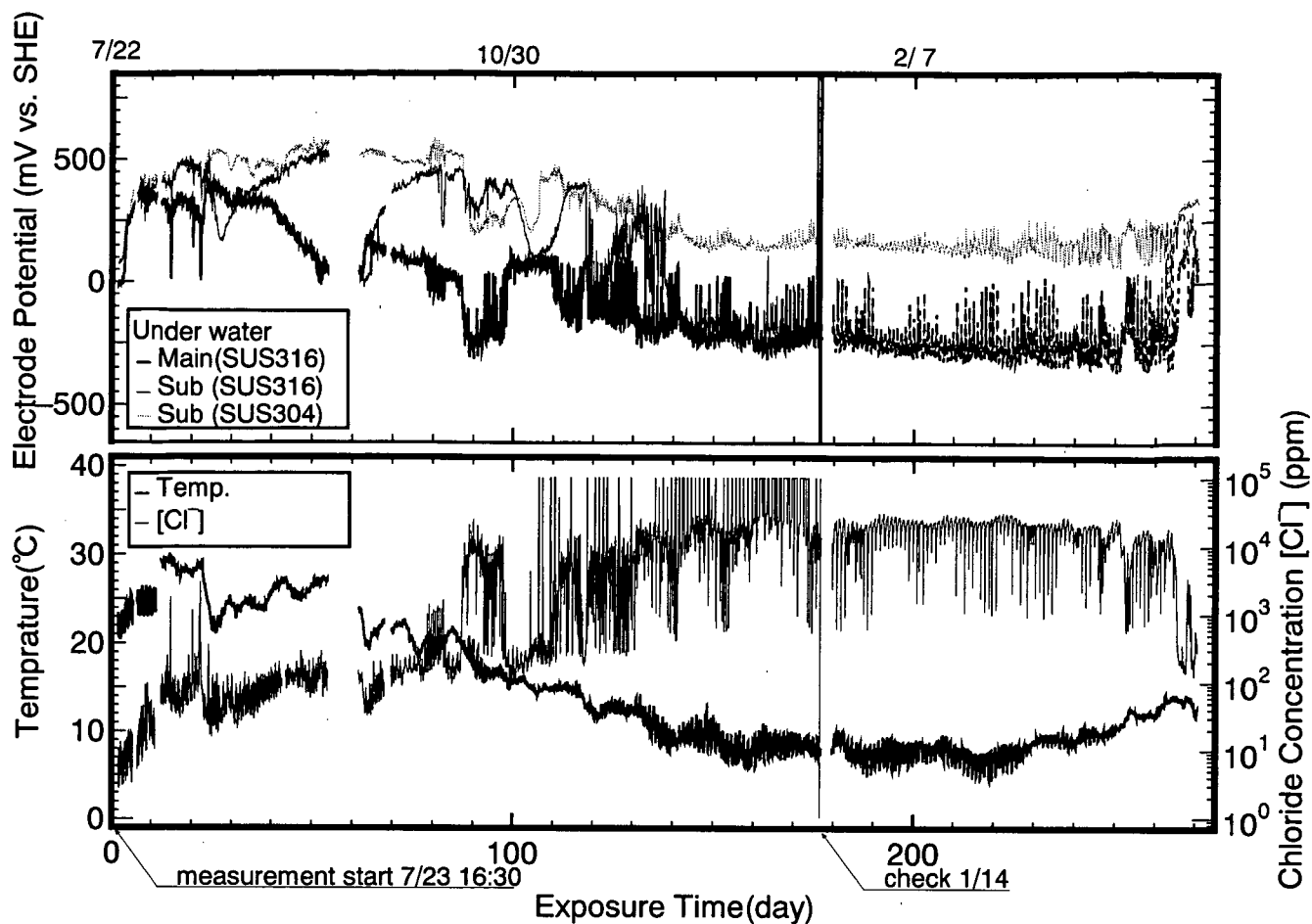


図-3.9 水中部試験体連続計測結果（暴露試験開始から2000年4月20日まで）

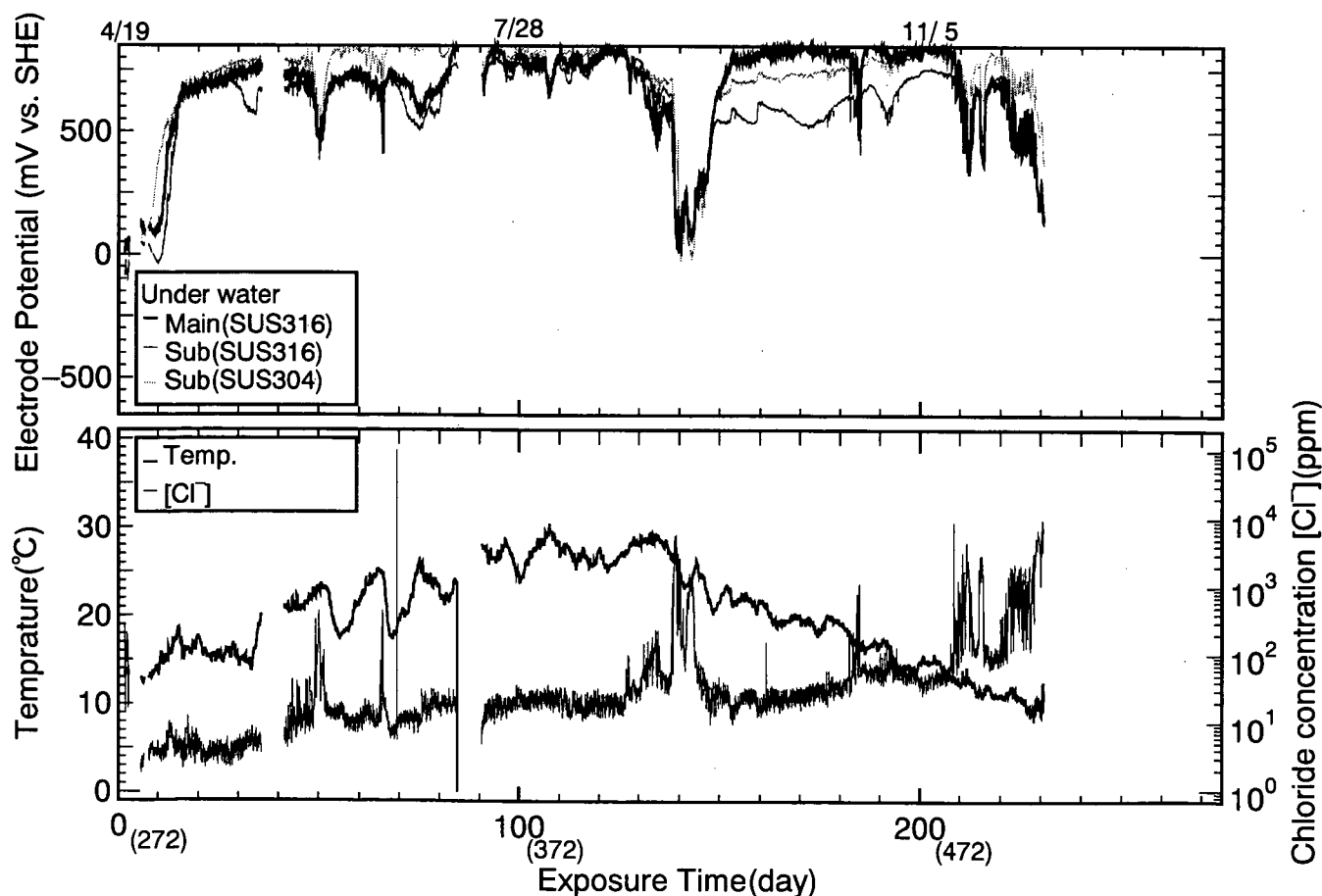


図-3.10 水中部試験体連続計測結果（2000年4月20日から最終引き上げ調査まで）

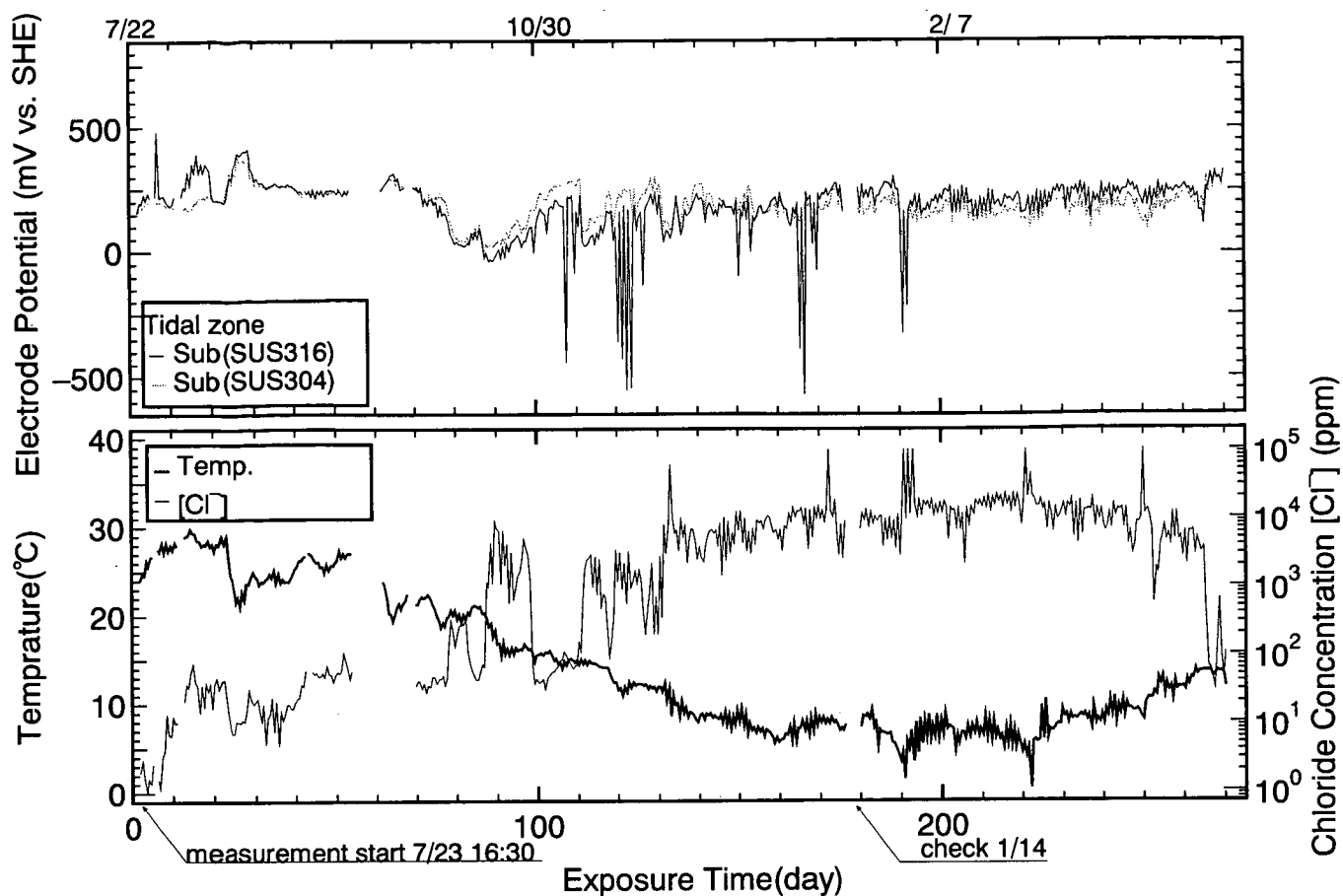


図-3.11 干満帯試験体連続計測結果（暴露試験開始から2000年4月20日まで）

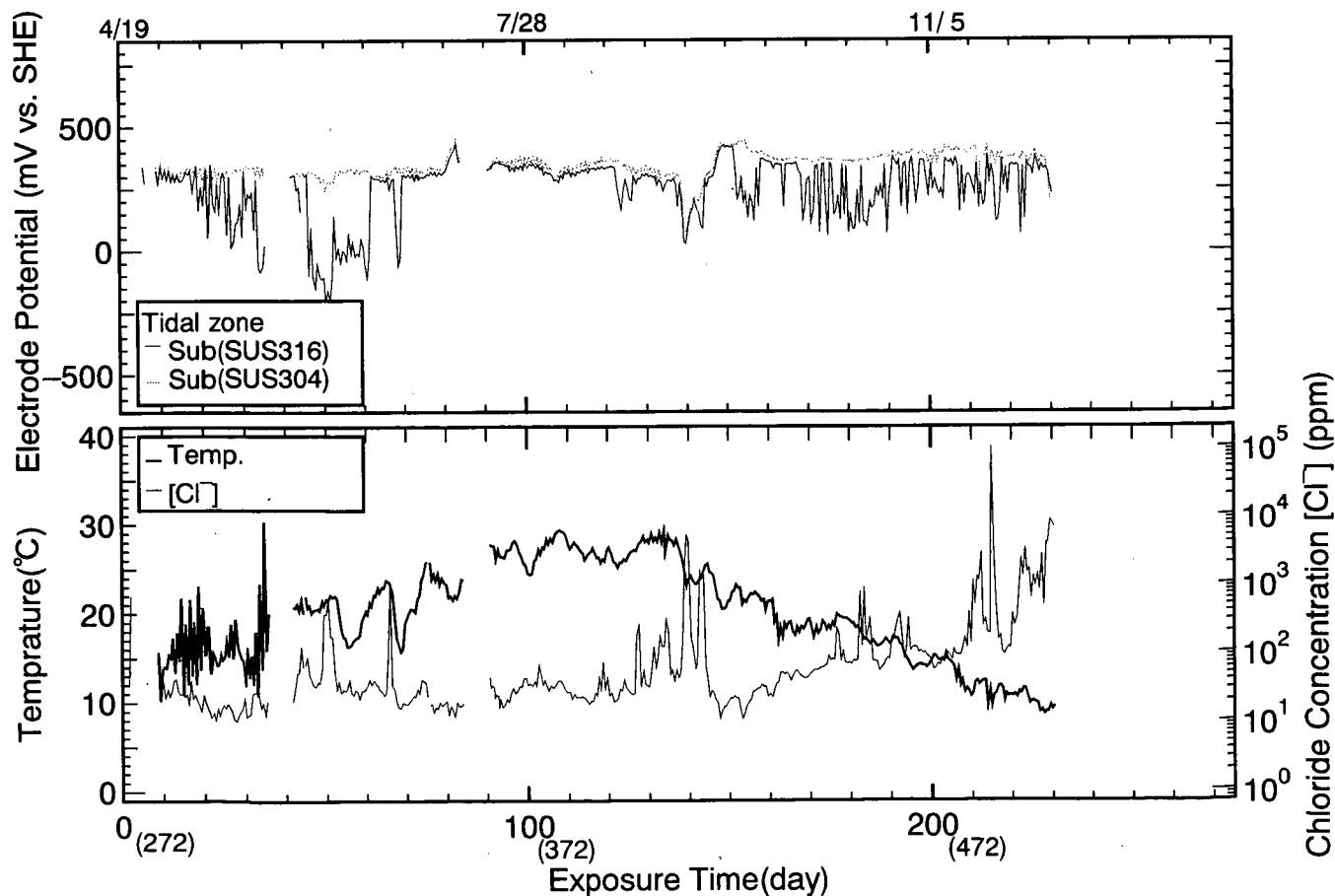


図-3.12 干満帯試験体連続計測結果（2000年4月20日から最終引き上げ調査まで）

4. 暴露試験結果の評価

4.1 暴露試験環境の評価

4.1.1 腐食発生に関係する水質環境の特定

本試験条件は、試験開始時の予想よりも、水質の日変化や年間変化が著しかった。11月から3月において、塩化物イオン濃度は潮位変化に比例して変化しつつ、 $10^3 \sim 10^4$ ppm 程度の高濃度を示している。一方、江戸川の出水期（6月から10月末）を含む4月から10月にかけて、塩化物イオン濃度は、 10^2 ppm 以下の非常に低い値となっており、潮位変化との相関も明確ではない。

4.1.2 微生物の繁殖状況

(a) 干満帯における微生物の繁殖

表-3.4 に示したように、干満帯サブ試験体の表面から採取した付着物から各種の微生物が検出されている。しかし、好酸性硫黄酸化細菌、硫酸塩還元菌のように水中部サブ試験体や水中部メイン試験体と比較して低い値を示す細菌が多い。また、試験体表面の状況も、砂礫等だけで藻類等の付着はほとんどない。このことから、干満帯サブ試験体から検出された微生物は、河川水および砂礫に含まれていた微生物による影響が大きく、試験体表面における微生物の繁殖はほとんどないと推察する。自然海水中の鋼材表面に形成された生物皮膜中の微生物は、乾燥に弱い、6時間程度の乾燥時間では皮膜中まで完全に乾燥することがなく、微生物の壊死はないとされている¹²⁾。しかし、本試験においては、暴露開始時から試験体が乾湿繰り返し状態に曝されていたため、微生物が繁殖しなかったものと考えられる。また、一般に微生物の付着の形態は、最初に有機物の膜が表面に形成された後、微生物（バクテリア）が付着・増殖してバクテリア皮膜が形成され、次いで藻類等の微細生物が付着するといわれている。本試験では、藻類等の微細生物が付着しているものの、水中部と比較して付着量はわずかである。目視により、その状況の変化が年間を通して少ないことを確認している。藻類と微生物の間には、互いに「共生」等の相互関係があり、微生物単体では電位の貴化はわずかであり、他の微細生物の共存が必要であるとの報告もある¹³⁾。万一、夏期等（本試験での微生物調査時期と異なる時期）に微生物が繁殖していても、環境条件として、腐食発生に与える影響は低いと推察する。

(b) 水中部における微生物の繁殖

表-3.4 に示したように、水中部の試験体において各種の微生物が検出されており、この時の水温は 17°C となっている。暴露試験開始（1999年7月22日）から2000年4月19日までの水中部および干満帯のサブ試験体（SUS304）の自然電位の変化を比較すると、1999年12月5日以降、両者はほぼ等しくなる。この時の水温は約 10°C 以下である。このことから、本試験場所では、水温 10°C 以下で微生物の活動が低下し、微生物の活動により貴化していた自然電位が低下したものと推察する。

また、河川水と河床砂礫の微生物分析から、鉄酸化細菌は砂礫中にのみ存在しており、試験

体表面からもわずかししか検出されず、メイン試験体の内面や堆積した砂礫中から多く検出されている。このことから、短冊試験片を用いた暴露試験（後述）では、鉄酸化細菌による微生物腐食の影響が低く評価されることになっていることが予想できる。

4.2 腐食発生時期

試験体の自然電位は、微生物の付着によって貴化しており、長期的には水温の季節変化に従って変化する。また、自然電位は、塩化物イオン濃度の日変化や年変化に伴って変動している。一般的に、ステンレス鋼の自然電位は、塩化物イオン濃度によって殆ど影響されないと考えられている。しかし、照合電極を用いる自然電位の計測方法は、測定対象と照合電極間の環境抵抗によって影響を受ける。塩化物イオン濃度の低い環境（環境抵抗が高い環境）で、測定値は、実際の自然電位よりわずかに高くなる。本試験結果において、自然電位と塩化物イオン濃度の変化に相関性が見られるのは、計測誤差に由来する見かけ上の現象であると推察する。

以上のことを考慮しつつ、自然電位の計測結果を評価することで、腐食発生時期の特定することを図った。

4.2.1 暴露試験開始から中間調査まで

(a) 水中部メイン試験体 (SUS316)

既述のように、水中部メイン試験体 (SUS316) と水中部サブ試験体 (SUS316) は、1999 年 1 月 14 日の調査で、試験体と試験体設置架台との絶縁不良が判明している。絶縁不良の状態では、照合電極が試験体設置架台（材質 SS400）の自然電位の影響を受けているため、図-3.9 に示した自然電位の連続計測結果から、有効な計測結果の範囲を特定しなければならない。

水中部メイン試験体の自然電位は、図-4.1 に示すように、暴露開始 40 日後から 50 日後にかけて、塩化物イオン濃度に対する値が低下しており、それ以降、塩化物イオン濃度の上昇と自然電位の低下に高い相関性がみられる。自然電位は、図-3.9 においても暴露開始 40 日後ごろから低下する傾向を示している。このことから、水中部メイン試験体の絶縁は暴露開始 40 日後ごろから絶縁不良となり、照合電極の計測値は、試験体設置架台の影響を受けていると推察する。

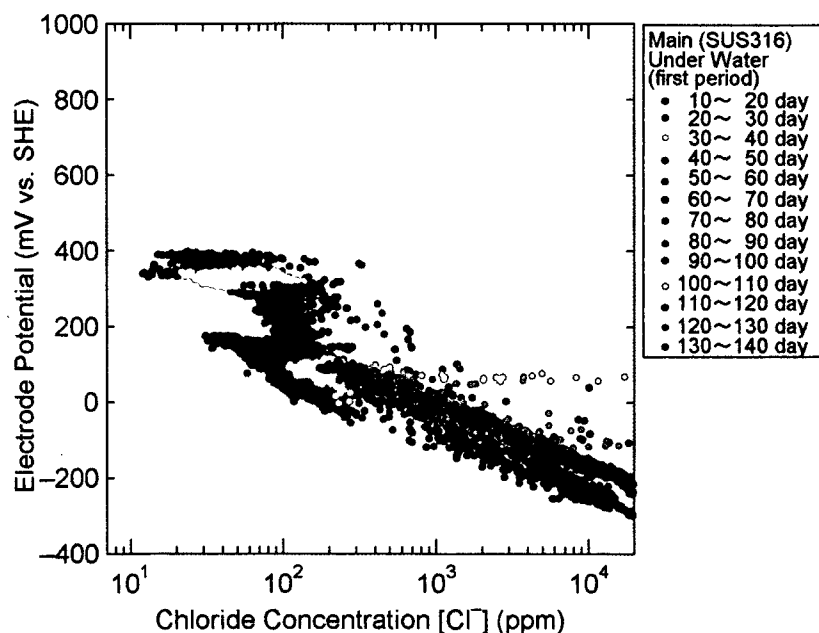


図-4.1 塩化物イオン濃度と自然電位の変化
(水中部メイン試験体(SUS316))
暴露試験開始から中間調査まで

(b) 水中部サブ試験体 (SUS316)

水中部メイン試験体 (SUS316) と同様に、水中部サブ試験体 (SUS316) の自然電位は、暴露開始 120 日後から塩化物イオン濃度との相関性が失われており、図-3.9 においても自然電位の計測値が激しく変動している。このことから、水中部サブ試験体 (SUS316) と試験体設置架台との絶縁は、暴露開始 120 日後ごろから不良となったと推察する。水中部サブ試験体 (SUS316) の自然電位の連続計測結果については、暴露開始 120 日経過後までについて、腐食発生時期を検討する。図-3.9 において、水中部サブ試験体 (SUS316) は自然電位の急激な卑化が幾度かみられる。これに対して、図-4.2 において、暴露開始 20 日後から 30 日後と 60 日後から 70 日後、100 日後から 110 日後の期間において、同一塩化物イオン濃度で、自然電位が低下する結果が示されている。この自然電位の低下は、

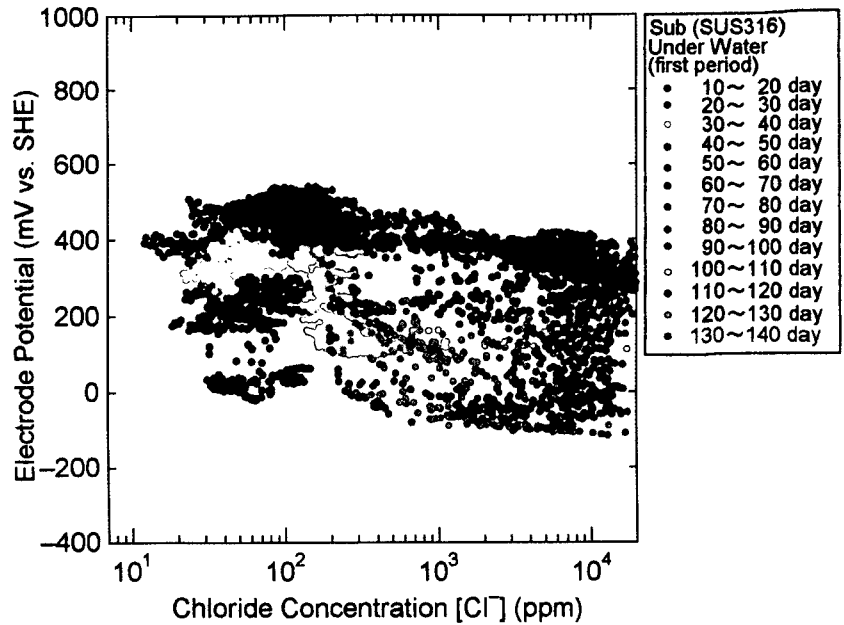


図-4.2 塩化物イオン濃度と自然電位の変化
(水中部サブ試験体(SUS316))
暴露試験開始から中間調査まで

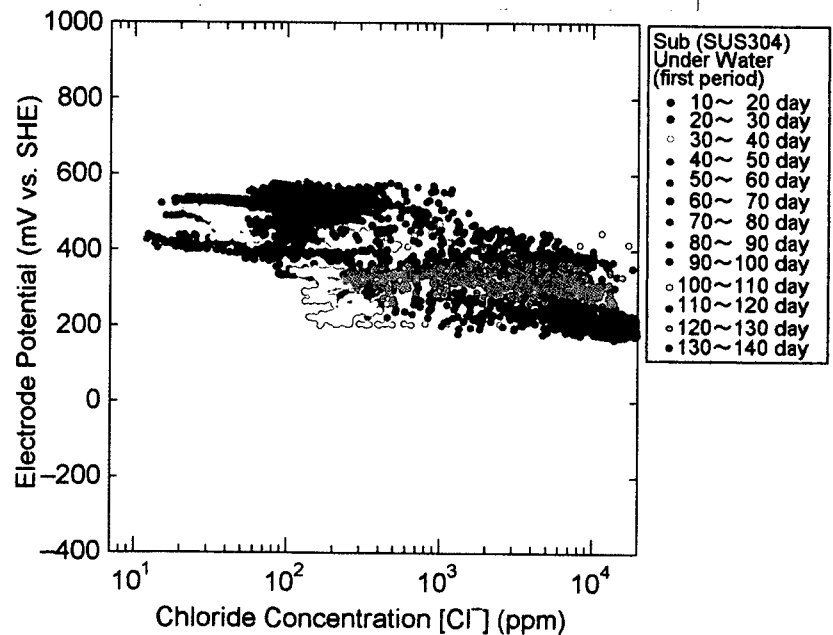


図-4.3 塩化物イオン濃度と自然電位の変化
(水中部サブ試験体(SUS304))
暴露試験開始から中間調査まで

何らかの腐食（または、不働態皮膜の破壊）が発生したためであると推察する。既述したサブ試験体 (SUS316) に発生した腐食は、この3つの時期のいずれかに発生したものと推察する。

(c) 水中部サブ試験体 (SUS304)

図-4.3 に示すように、水中部サブ試験体 (SUS304) の自然電位には、季節変化による水温の低下に伴い、微生物による自然電位の貴化の影響が低くなる傾向が現れている。図-3.9 にお

いて、水中部サブ試験体 (SUS304) の自然電位は、激しく変動している。これに対して、図-4.3 においては、暴露開始 100 日後から 110 日後において、同一塩化物イオン濃度で、自然電位が低下する傾向が示されている。このことから、腐食発生による自然電位の卑化と推定できるものは、暴露開始 100 日後から 110 日後にみられる変化であるといえる。この時期に、水密部のすき間腐食が発生したものと推察する。

4.2.2 中間調査から最終調査まで

中間調査 (1999 年 4 月 14 日) 以降、塩化物イオン濃度は著しく低くなっている。そのため、試験体と照合電極間の環境抵抗が大きく、照合電極が試験体の腐食発生を捉えていない可能性が高い。暴露開始 480 日経過後以降、塩化物イオン濃度が上がっているが、自然電位の変化の傾向が不明確であるため評価を行っていない。

水中部メイン試験体 (SUS316)、水中部サブ試験体 (SUS316, SUS304) の全て、暴露開始 372 日経過後から 382 日経過後にかけて、同一塩化物イオン濃度で自然電位が低下する結果が示されている。この時期に、何らかの腐食が発生した可能性がある。しかし、照合電極は、スキンプレート部のほぼ中央付近に設置されており、サブ試験体 (SUS16, SUS304) に発生した腐食は、その位置から離れている。もっとも近傍の腐食は

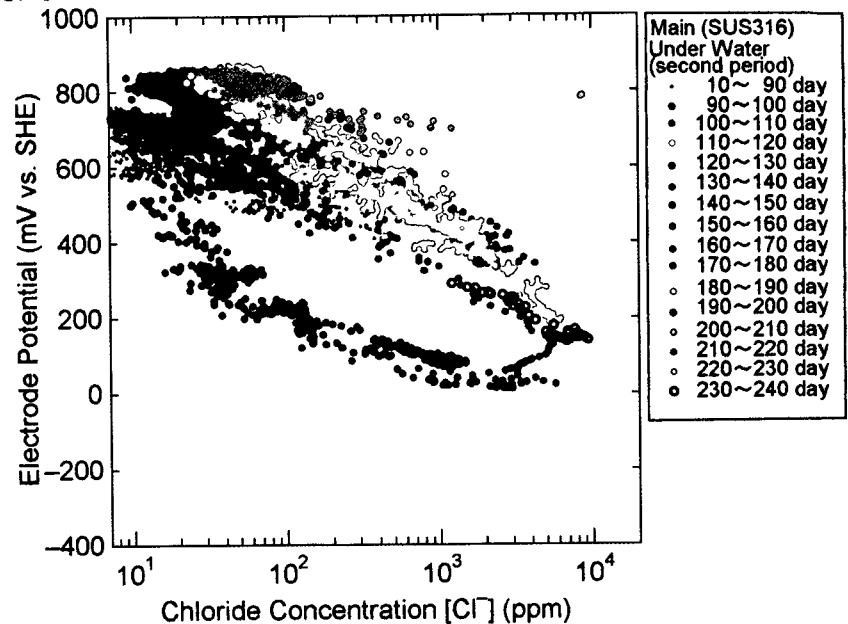


図-4.4 塩化物イオン濃度と自然電位の変化
(水中部メイン試験体(SUS316))
中間調査から最終調査まで

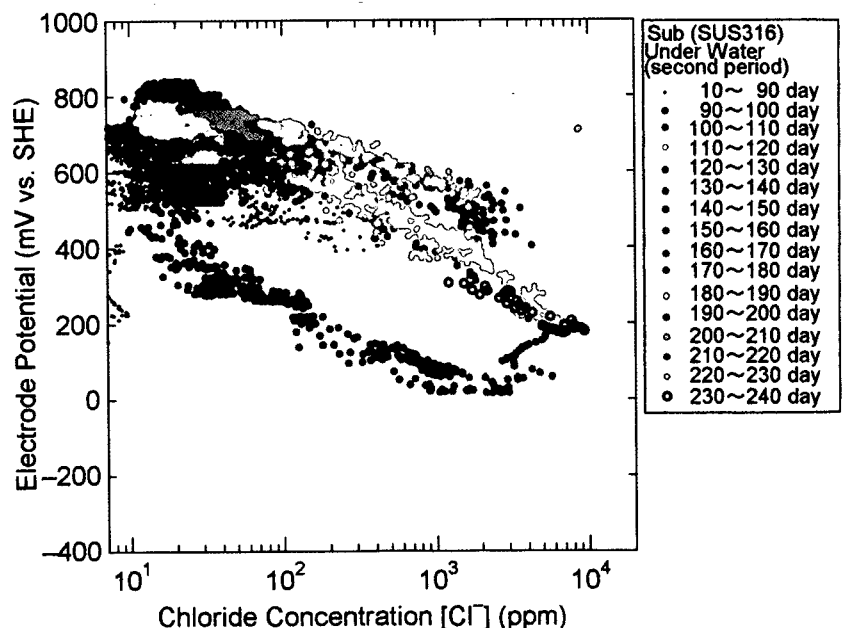


図-4.5 塩化物イオン濃度と自然電位の変化
(水中部サブ試験体(SUS316))
中間調査から最終調査まで

水密部のすき間腐食であるが、塩化物イオン濃度が数10ppm程度と低いため、この腐食発生を捉えている可能性は低いと推察する。以上のことから、中間調査以降の腐食発生時期の特定については、保留した。

4.3 腐食発生の評価

一般に、材料の防食性能は、SUS316の方がSUS304より高いが、本試験においても、同様の結果を示している。但し、後述のように、SUS304、SUS316試験体ともに、材料の防食性能評価と

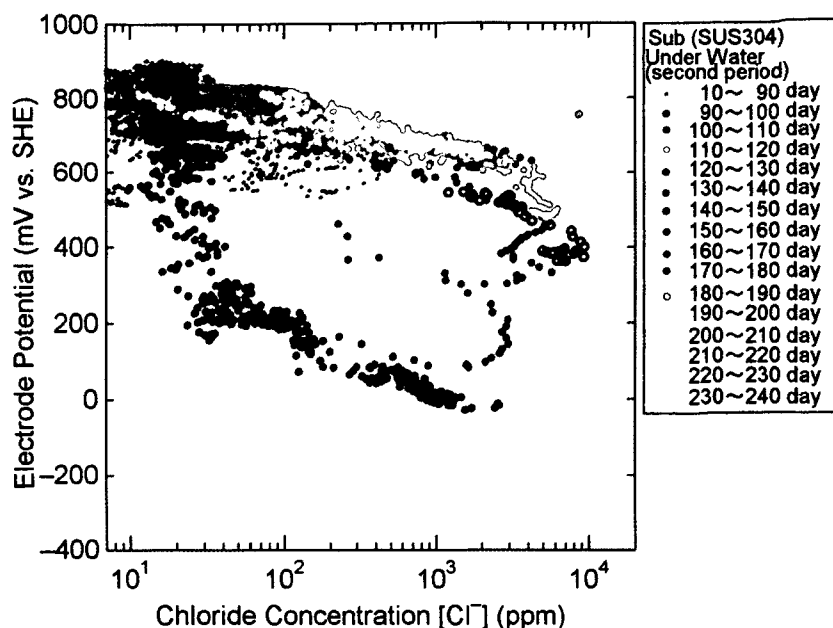


図-4.6 塩化物イオン濃度と自然電位の変化
(水中部サブ試験体(SUS304))
中間調査から最終調査まで

比較して、低い防食性能を示している。また、一般に、すき間腐食臨界電位が孔食臨界電位より低いため、実際の構造物においてはすき間腐食が問題となることが多い。本試験においても、すき間腐食が優先的に発生している。孔食は水中部サブ試験体 (SUS304) で発生しているのみである。以降、試験体に発生した各種の腐食についてその腐食形態別に評価する。

4.3.1 孔食の発生

本試験体は大型のものであるため、孔食の特定が非常に困難である欠点があるが、分析を行った範囲において、孔食は、干満帯の試験体にはなかった。また、水中部メイン試験体 (SUS316) と水中部サブ試験体 (SUS316) においても、ローラ軸等の一部分を除いて、孔食は発生していない。水中部サブ試験体 (SUS304) においては、打痕跡等の加工変質部を起点として孔食が発生している。本試験場所では、ゲートの主要材料としてSUS316を適用することで、十分な耐孔食性を確保できると推察する。しかし、18Cr-8Ni系ステンレス鋼は、金属組織学的に不安定であるため、切削加工等によって加工変質層が生じると耐食性が低下することがあるといわれている¹⁶⁾¹⁷⁾。本暴露試験においても、水中部サブ試験体 (SUS304) が、打痕跡等を起点とした孔食を発生している。これらのことから、SUS316を用いる場合においても、施工時等に十分な品質管理、慎重な施工管理を行うべきであると考ええる。

4.3.2 片面溶接部非開先側に発生したすき間腐食

水中部メイン試験体 (SUS316) は、最終調査時にスキンプレートの未溶着部にすき間腐食が発生している。水中部メイン試験体 (SUS316) は、中間調査時にすき間腐食を特定できていないが、既にすき間腐食が発生していた可能性がある。一方、水中部サブ試験体 (SUS316) は、最

終調査時に片面溶接部非開先側ですき間腐食が発生している。このすき間腐食は、中間調査時においても観察されており、外観上の顕著な変化はないが、試験体内部で進展していた可能性がある。また、すき間腐食の外観は、水中部メイン試験体 (SUS316) と類似している。

腐食発生速度は、カソード面積による影響を受けるため、試験片や構造物の大きさによりすき間腐食の発生進展状況が異なる¹⁸⁾。本試験と同一箇所で行った短冊試験片 (100mm × 100mm × 4.7mm) を用いた暴露試験では、1年程度の暴露では腐食が発生しておらず、本試験結果と大きく異なっている²⁾。しかし、本試験結果では、水中部メイン試験体 (SUS316) と水中部サブ試験体 (SUS316) の腐食発生状況が類似している。片面溶接部の近傍に他の腐食が発生していない場合、すき間箇所 (溶接線の裏面) の近傍がカソードとなり、かつ、サブ試験体においてもカソード面積が十分に大きいため、試験体の大きさに関係なくすき間腐食が発生進展しているのではないかと推察する。水中部サブ試験体 (SUS304) は、水中部サブ試験体 (SUS316) より顕著にすき間腐食が発生している。サブ試験体 (SUS304) とサブ試験体 (SUS316) のすき間腐食には、試験体の大きさ等による影響が少なく、材料の防食性能に依存していると推察する。

片面溶接部非開先側のすき間腐食は、干満帯に設置された試験体においても発生しており、非常に発生しやすい腐食形態であるといえる。「ダム・堰施設技術基準 (案) 接合マニュアル」において、ゲート設備の溶接は、突合せ溶接では完全溶込み溶接を用いて裏はつり、裏溶接を行うことを原則としている。また、T 溶接に用いるすみ肉溶接、部分溶込みグループ溶接においても、継手の板の両側に配置することを原則としている。また、本試験により観察されたすき間腐食がさらに進展するか否かは不明である。しかし、裏返すならば、片面溶接となる箇所は、溶接が困難な箇所や不可能な箇所、点検等が困難な箇所であることが予想できる。そのため、万一すき間腐食が進展した場合、その状況の点検が困難であり、ゲートの機能に重大な影響を与える可能性がある。片面溶接部のすき間腐食進展傾向の明確な評価が得られるまでは、「ダム・堰施設技術基準 (案) 接合マニュアル」の原則をさらに進め、溶接方法等を十分に検討するべきである。

4.3.3 水密部に発生したすき間腐食

各試験体の水密部は、最終調査時にすき間腐食が発生している。水密部は、中間調査時に分解調査を行っているため、腐食発生条件は、中間調査時に初期状態に戻っている。中間調査後の再組立時に水密ゴムの変形等もなかったことから、再組立の精度等による影響も少ないと考える。すき間腐食が河川水の浸入した箇所に発生していることから、暴露による水密ゴムの劣化等により河川水が浸入して、すき間腐食が発生したと推察する。すき間腐食発生までの時間は、水密ゴムの劣化等に伴う河川水の浸入開始時期を特定することが重要であると考えが、本実験では河川水の浸入時期が不明なため、暴露開始時から経過時間をすき間腐食発生までの時間と評価することとする。

4.3.4 ローラ部に発生した腐食

水中部メイン試験体のローラ部には幾つかの腐食が発生している。顕著な腐食として、軸受部 (SUS329J1) と無給油軸受 (高力黄銅) のすき間部で発生した脱亜鉛腐食がある。軸受部の EPMA 分析、腐食生成物の EDX 分析の結果から、脱亜鉛腐食の発生が示されている。脱亜鉛腐食は、亜鉛 20 % 以上を含む黄銅に発生しやすい腐食であり、塩化物イオン濃度が高く、溶存酸素の少ないすき間部や水の澱み部で発生しやすいといわれている¹⁹⁾。本試験場所は塩化物イオン濃度が低い。軸受部近傍の澱み部で、塩化物イオン濃度が濃縮された可能性もあるが、詳細は不明である。むしろ、高力黄銅と SUS329J1 の異種金属接触により、SUS329J1 が補助カソードとして作用し、亜鉛が選択的に溶出して脱亜鉛腐食となったと推察する。

ローラ軸 (SUS316) や皿ばね (SUS631) に孔食が発生しているが、試験体の他の箇所での孔食発生がないことから、これらの孔食は、軸受部の脱亜鉛腐食により発生した腐食生成物を起点としたものでないかと推察する。

ローラ部は、機能上の目的から種々の材料が組み合わせて用いられており、異種金属接触腐食等の発生は避けがたい。元来、ローラ部は、メンテナンスが困難であり、防食性能の向上が最も望まれる箇所である。今後、電気防食の適用等を含めた対処方法の検討が必要である。

4.4 既存の報告との比較

4.4.1 局部腐食臨界電位と腐食発生の可能性

ステンレス鋼等の耐食性材料の腐食発生については、臨界電位概念により議論されることが多い。局部腐食としてのすき間腐食や孔食には、それぞれに局部腐食臨界電位 V_c が存在し、これよりも貴な電位域では局部腐食発生の可能性がある。臨界電位概念による評価は、熱力学的平衡論であるため、腐食速度の評価は不可能であるが、腐食発生の可能性の有無を評価することができる。

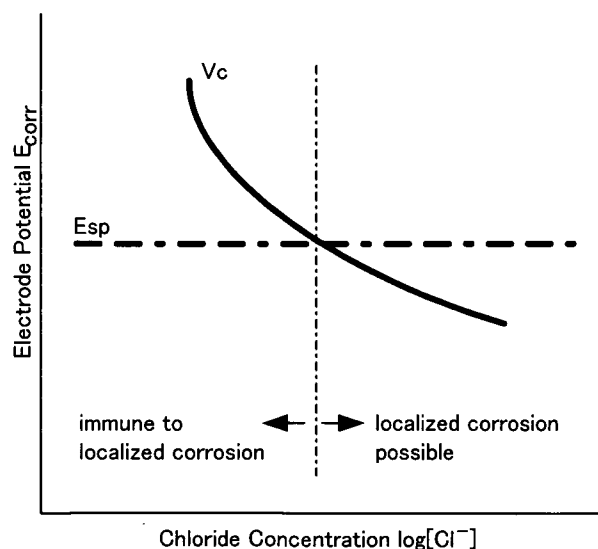


図-4.7 定常電位 E_{sp} と局部腐食臨界電位 V_c の比較による
可使用条件の評価 (概念図)

水中部サブ試験体 (SUS304) の自然電位について、すき間腐食臨界電位との比較を行った。図-4.8 と図-4.9 は、それぞれ、図-4.3 と図-4.6 について、すき間腐食再不動態化電位 $E_{r,crev}$ の測定結果を比較したものである¹⁴⁾。すき間腐食再不動態化電位 $E_{r,crev}$ はすき間腐食臨界電位 $V_{c,crev}$ と一致することが知られている¹⁵⁾。

暴露試験開始初期の水温は20℃程度であることから、試験体の自然電位は、20℃におけるSUS304のすき間腐食再不動態化電位 $E_{r,crev}$ と比較する。すき間腐食再不動態化電位 $E_{r,crev}$ と比較して、試験体の自然電位は、暴露開始初期は卑な値を示している。しかし、80日暴露後あたりから貴になっている。これは、先の検討における水密部のすき間腐食発生時期の予測結果（暴露開始100日後から110日後）と一致する。また、中間調査後から最終調査までの期間において、自然電位は、すき間腐食再不動態化電位 $E_{r,crev}$ よりも常に貴な値となっており、すき間腐食発生の条件が満たされていたことを示している。このことは、中間調査意向に、水密部においてすき間腐食発生箇所が増えていることと一致する。

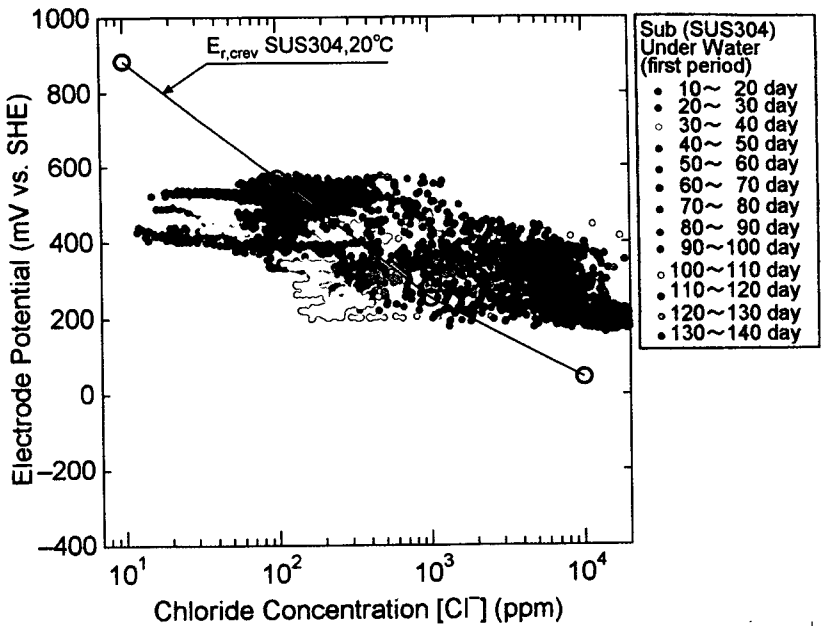


図-4.8 水中部サブ試験体(SUS304)の自然電位とすき間腐食臨界電位(暴露試験開始から中間調査まで)

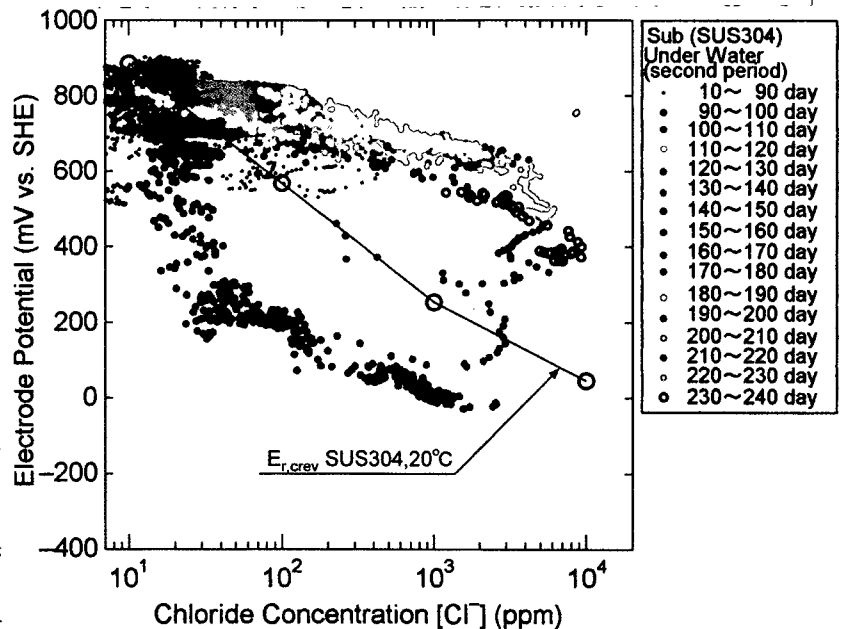


図-4.9 水中部サブ試験体(SUS304)の自然電位とすき間腐食臨界電位(中間調査から最終調査まで)

4.4.2 短冊試験片の暴露に基づく耐食性評価との比較

本試験と同一場所において、短冊試験片(100mm × 100mm × 4.7mm)を用いた暴露試験が行われている。短冊試験片の材質はSUS304とSUS316Lの母材である。本試験においても、比較のために同一形状の短冊試験片を暴露している。但し、材質はSUS304とSUS316である。これらの暴露結果を表-4.1と図-4.10に示す。両試験共に短冊試験片の固定部（樹脂ネジで固定）ですき間腐食が発生している。今回の試験結果では、腐食体積を適当な形状に近似して重量減を計算している。SUS304、SUS316のそれぞれの基本質量は、7.93kg/mm²、7.98kg/mm²（JIS G 4310）としている。両試験は、腐食傾向が類似しており、ほぼ同一の環境で行われたといえる。

表-4.1 短冊試験片（100mm × 100mm × 4.7mm）による暴露試験結果

			10ヶ月経過	35.5ヶ月経過	36ヶ月経過	90ヶ月経過	17ヶ月経過(503日経過)	
			重量減(g)	重量減(g)	重量減(g)	重量減(g)	重量減(g)	腐食体積(mm ³)
水中部	SUS304	母材試験	0.136	0.009	0.076	0.340	0.0684	3mm×10mm ×0.16mm+(6mm× 2mm)/2×0.08mm +(2mm× 3mm)/2×0.05mm+ 4mm×10mm ×0.08mm
	SUS316 (SUS316L)	母材試験	0.005	0.013	0.213	0.025	0.0060	1mm× 5mm ×0.10mm +(1mm× 1mm)× π ×0.08mm
干満部	SUS304	母材試験	0	0.008	0.016	0	0	
	SUS316 (SUS316L)	母材試験	0	0.015	0.183	0.17	0	

既存の短冊試験片では、10ヶ月間の暴露では、固定部とのすき間にわずかなすき間腐食が発生しているのみであり、5年間の暴露でも殆ど腐食していない。ゲート設備の特徴を考慮した試験体では、503日間の暴露で水密部にすき間腐食が発生しており、短冊試験片による試験結果と相違が著しい。構造物や材料の大きさによる腐食発生・進展傾向の相違については、これまでに、自然海水を貯えたステンレス鋼製水槽を対象とした比較研究がなされており、水槽の表面積と腐食速度に線形性があることが示されている¹⁸⁾⁷⁾。これらの相違は、カソード面積の相違によるものである。金属の腐食電位 E_{corr} では、電気的中性条件により次式の関係が成り立つ。

$$i_A \cdot S_A = i_C \cdot S_C$$

但し i_A : アノード電流密度

i_C : カソード電流密度

S_A : アノード面積

S_C : カソード面積

大規模構造物は、小規模構造物に比較してア

ノード面積に対するカソード面積の比が大きくなり、金属電位 E_{corr} が比較的貴な値を維持した状態で、アノード電流が流れ続けるため、腐食が著しく進展することになる。本暴露環境における河川水中の電気伝導率が低いことから、短冊試験片については試験片表面全体を、ゲート設備の特徴を考慮した試験体の水密部ゴム押え板については、水密版の面積（片面）をカソード面積と仮定して、カソード面積と腐食量の関係を比較した結果を図-4.11に示す。カソード面積の増加により腐食量が線形的に増加する傾向が示されている。実際のゲート設備においては、腐食がさらに著しい可能性を示している。また、図-4.10にあるように、経年に伴う腐食進展も著しい可能性がある。この予測は、カソード面積の仮定等を含めて非常に概略的な比較でしかない。実際には、複数の腐食発生進展による相互の影響等、多くの要因による腐食進展が抑制

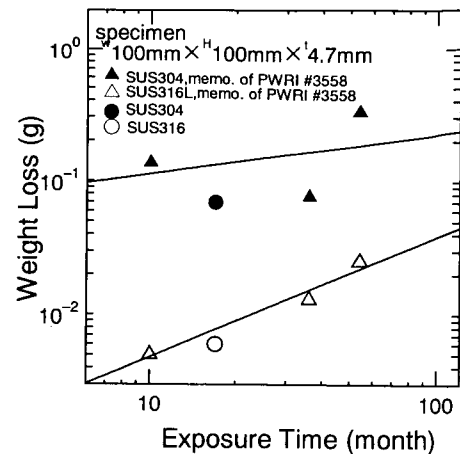


図-4.10 短冊試験片の暴露試験におけるすき間

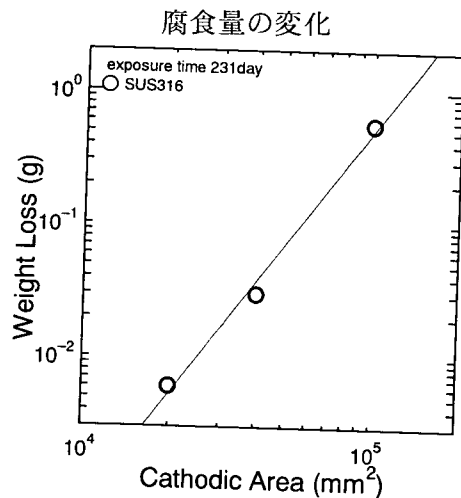


図-4.11 カソード面積と局部腐食量の関係

(231日暴露)

されるため、このような極端な腐食進展はないと考えている。しかし、その一方で、この結果は、ゲート設備における腐食問題の重要性を示し、かつ、実際のゲート設備の腐食が、材料の防食性能試験結果と大きく異なる傾向を端的に示しているといえる。今後、本研究で実施したゲート設備の特徴を考慮した暴露試験結果のデータを蓄積し、既存の短冊試験片による防食性能試験結果をゲート設備の防食設計に効率的に反映する方法を検討する必要がある。

5. まとめ

本研究において、ゲート設備の防食設計手法の確立を目的として、ゲート設備の設置環境や形状・加工等の設備の特徴を考慮した暴露試験のケーススタディを行うとともに、ゲート設備の防食性能評価を適切に行うための暴露試験方法の検討を行った。ゲート設備の防食性能評価を適切に行うためには、腐食・防食問題に関する既知の知見を有効に活用しつつ、各設備設計毎に、適切な暴露試験により、必要な情報を補うことにより防食設計を実施する必要がある。暴露試験方法と防食設計概念のフレームワークについては、ケーススタディの結果に基づいて現在検討中である。本報においては、ケーススタディとして実施したステンレス鋼製シェル構造ローラゲートを対象とした暴露試験の結果について報告した。その結果について、ゲート設備の腐食発生箇所の予測と、材料の防食性能評価を有効に活用した腐食量評価の2つの観点から以下にまとめる。

1) 腐食発生箇所と腐食状況

本試験は、塩化物イオン濃度が $10\sim 10^4\text{ppm}$ 程度まで変化する汽水域で実施した。また、シェル構造ローラゲートの特徴を考慮しつつ、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304、SUS316のそれぞれを主要材料とした試験体を用いた。その結果、下の示す箇所で腐食が発生していた。

1. 打痕等の加工変質部を起点とする孔食
2. 片面溶接部非開先側におけるすき間腐食
3. 水密部におけるすき間腐食の発生
4. ローラ部における異種金属接触による脱亜鉛腐食

本試験では、暴露期間が503日間の短期間であったが、SUS304を用いた試験体において、打痕等加工変質部を起点とした孔食が発生していた。SUS316を用いた試験体において孔食の発生はなかった。腐食・防食研究の分野において、オーステナイト系ステンレス鋼は、海水域では防食性能が不十分であるという意見がある。しかし、汽水域では比較的良好な防食性能が確保できると考えられている。材料の防食性能評価とコスト評価に基づく適用実績も多い。本試験結果から、本試験箇所（汽水域）でオーステナイト系ステンレス鋼を適用する場合、若干、材料コストが高価となるが、SUS304ではなくSUS316を用いる方が適切であると考えられる結果が示された。但し、孔食が打痕等の加工変質部を起点として発生していることから、SUS316を用いる場合においても、施工時等に十分な品質管理、慎重な施工管理が必要であると考ええる。

本試験では、溶接部の片面溶接部非開先側ですき間腐食が発生していた。このすき間腐食が進展するか否かは不明である。しかし、片面溶接となる箇所として、溶接が困難な箇所や不可能な箇所、点検等が困難な箇所が予想される。「ダム・堰施設技術基準(案) 接合マニュアル」では、両面溶接が原則とされているが、現段階では、この原則をさらに進め、溶接方法等を十分に検討する必要があると考える。すくなくとも、河川水に曝される箇所では、片面溶接を避

け、構造物の形状を両面溶接可能な形状に変更する等の対応をする必要がある。

本試験では、水密部に著しいすき間腐食の発生があった。水密部は、構造強度上の重要度が低い箇所であるが、水密性に重要な役割を持つ箇所である。ゲート設備の要求性能として、河川水の完全水密を要求する場合、十分な検討が必要である。

本試験では、ローラ部の無給油軸受部で異種金属接触により、亜鉛が選択的に溶出する脱亜鉛腐食が発生していた。ローラ部は、機能上の目的から多くの種類の材料が組み合わせて用いられている。ローラ部の摺動性には、すべり摩擦抵抗の低い無給油軸受等が用いられる。しかし、これらはローラ本体と材質が異なるため、異種金属接触腐食を発生する可能性が高い。元来、ローラ部は、メンテナンスが困難であり、防食性能の向上が最も望まれる箇所の1つである。現段階での対応として、局所的な電気防食実施等を行いつつ、今後、何らか抜本的対応方法の研究を行う必要がある。

2) 材料の防食性能評価のゲート設備の防食性能評価への適用

鋼材や構造物の腐食発生・進展傾向は、その大きさによって相違があることが知られている。これまでに、自然海水を貯えたステンレス鋼製水槽について検討がなされ、水槽の表面積と腐食速度に線形性があることが示されている。これらの相違は、カソード面積の相違により、小規模構造物より大規模構造物の方が、腐食電位が比較的貴な状態を維持したままでアノード電流が流れ続けるためである。本研究では、既報の短冊試験片を用いた材料の防食性能評価と異なり、非常に短期間で腐食が発生している。このことから、大規模構造物であるゲート設備においては、材料の高い防食性能が要求されることがわかる。供用期間を考慮した上で、ゲート設備の材料は完全なメンテナンスフリーを求めるのではなく、材料の防食性能に関する知見と本試験結果に基づき、現在の材料開発の技術的背景と材料コストを考慮したLCC最適な材料の選定を行うことが適切であると考ええる。

おわりに

本研究において、ゲート設備の設置環境や形状・加工等の設備の特徴を考慮した暴露試験のケーススタディを行った。本試験は、河川用ゲート設備の特徴を考慮した暴露試験の初めての試みであり、いくつかの課題点が明らかになっている。今後、これらの課題点を整理して、適切な暴露試験方法を取りまとめつつ、腐食・防食問題に関する既知の知見も有効に活用しながら、適切な暴露試験により必要な情報を補う防食設計方法を提案する予定である。また、本試験では、腐食発生に着目しており、経時変化による腐食進展についての検討を行っていない。今後、長期間の試験により、腐食進展についての検討を行う予定である。

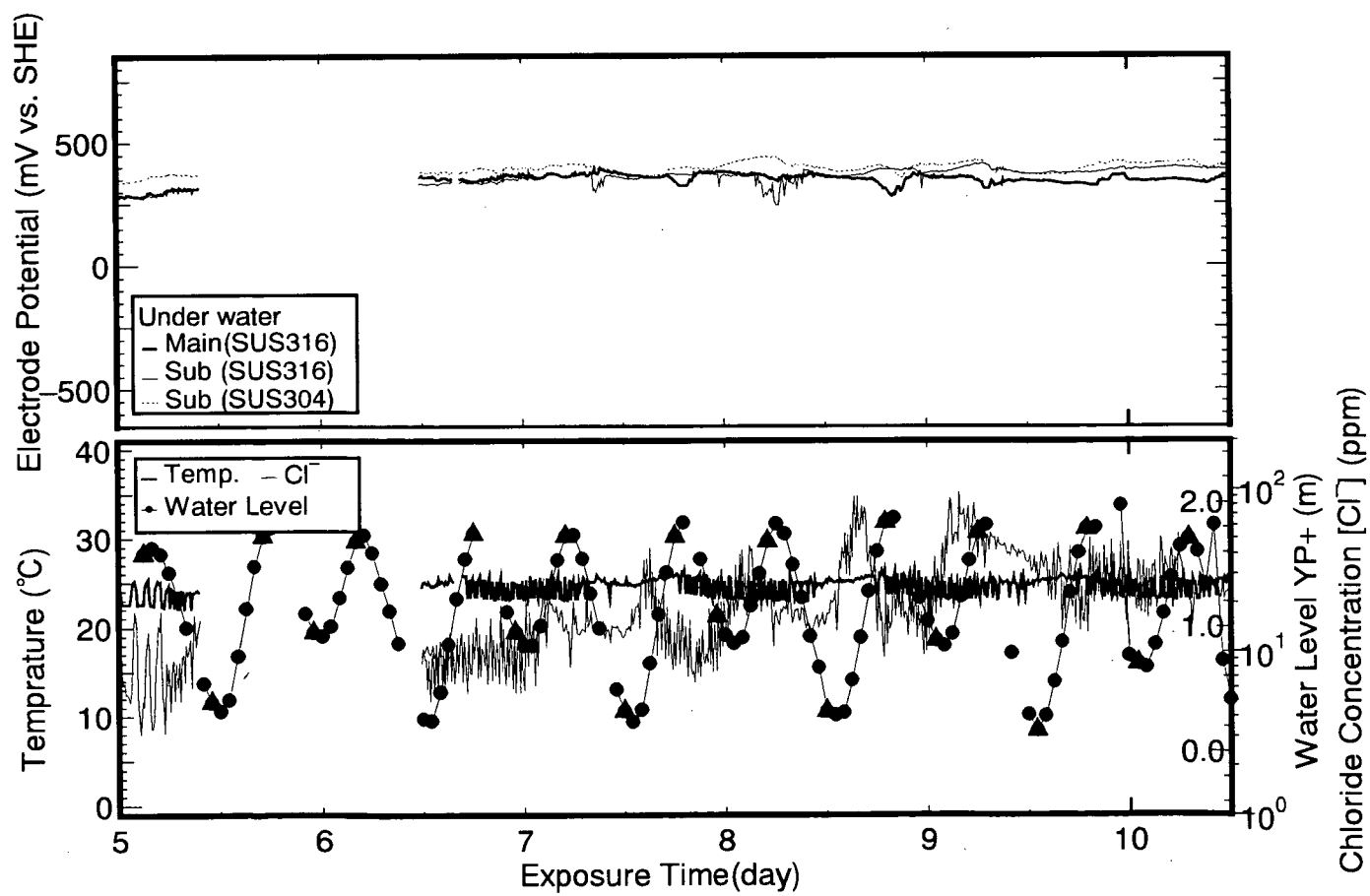
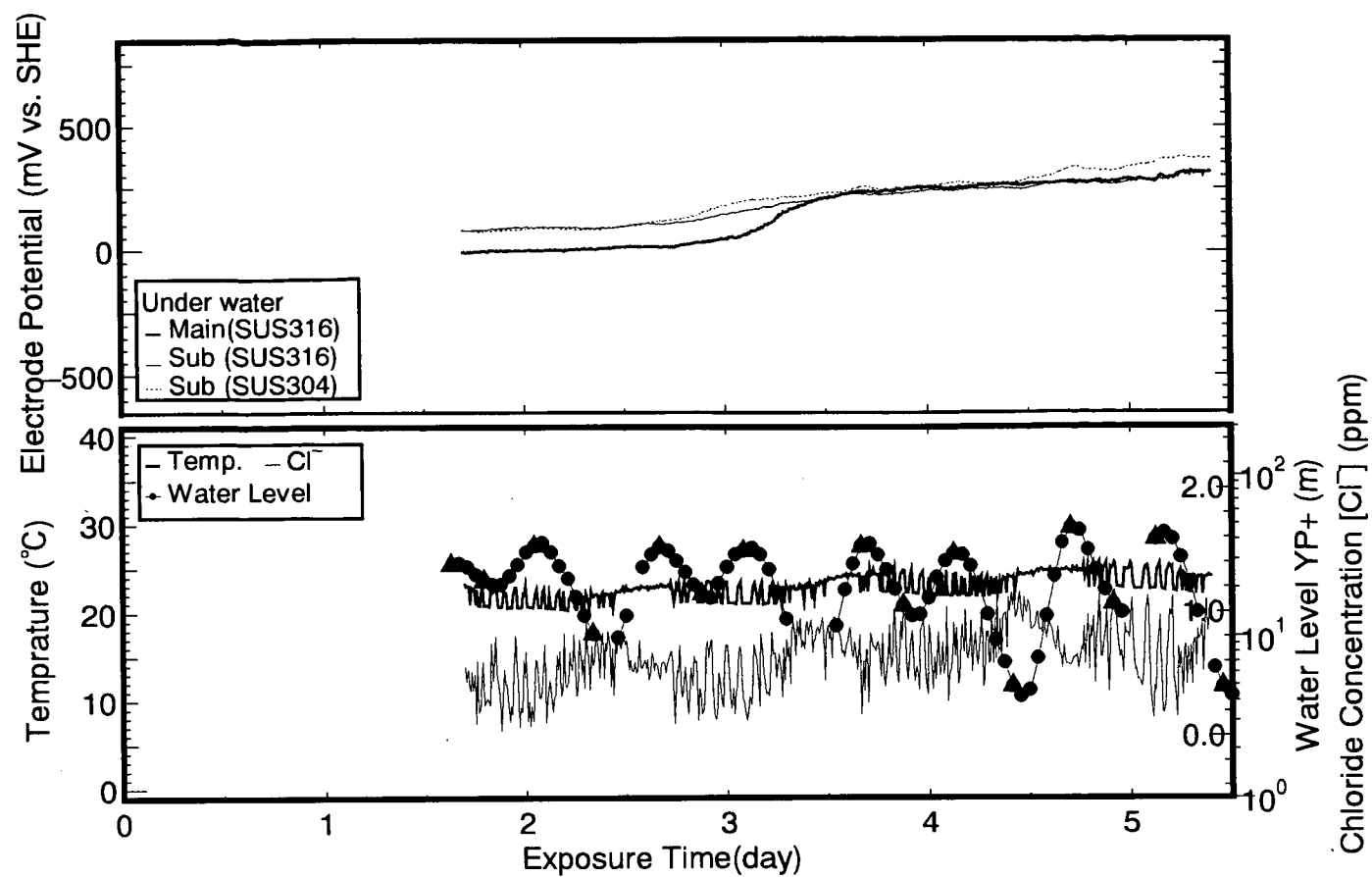
本研究を行うにあたり、辻川茂男教授（東京大学大学院工学系研究科）より、貴重なご指導・ご意見を賜った。厚く御礼申し上げます。また、本試験を実施するにあたり、国土交通省関東地方整備局江戸川工事事務所機械課、江戸川河口出張所のご協力を頂いた。関係各位に謝意を表します。

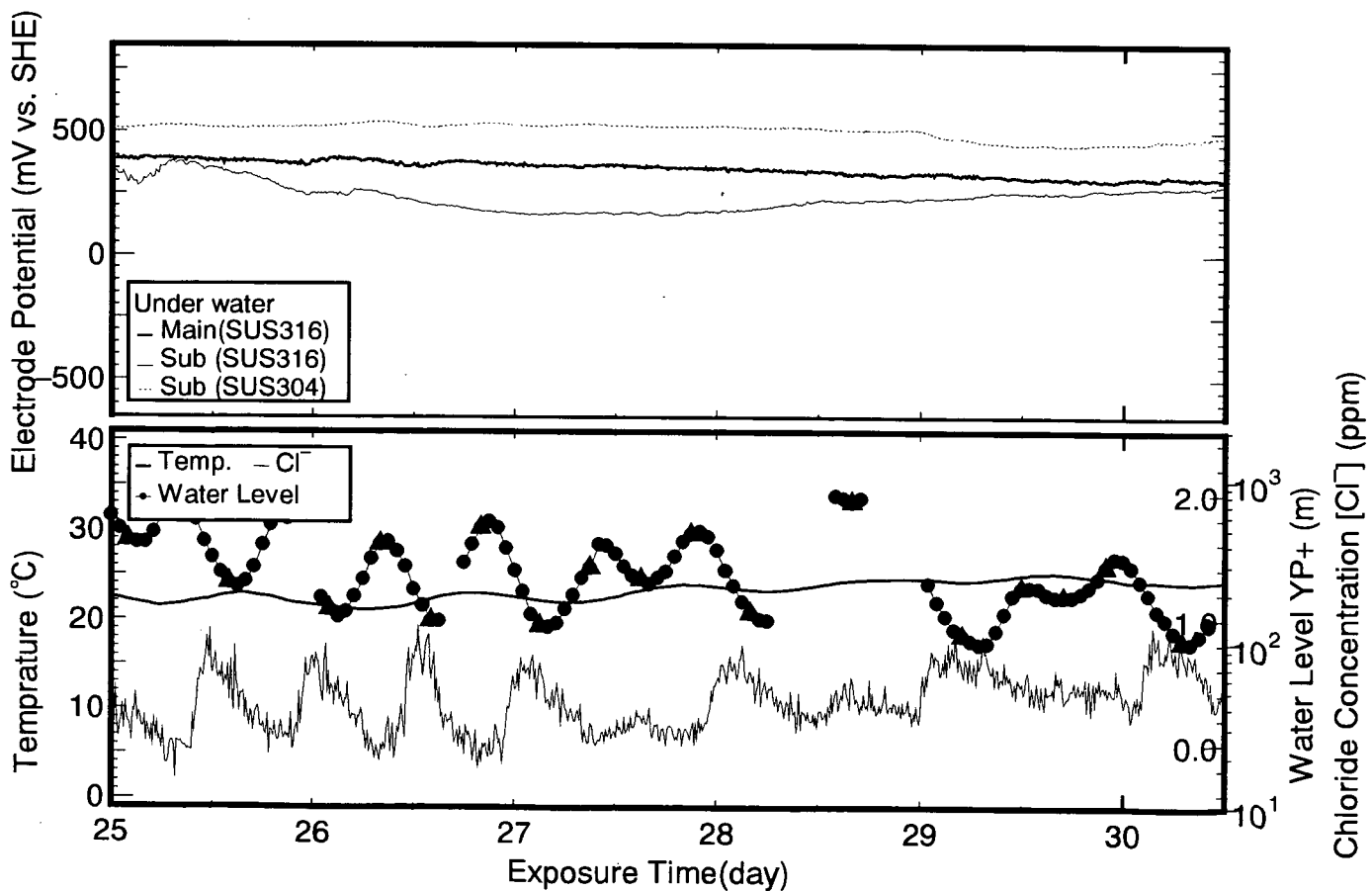
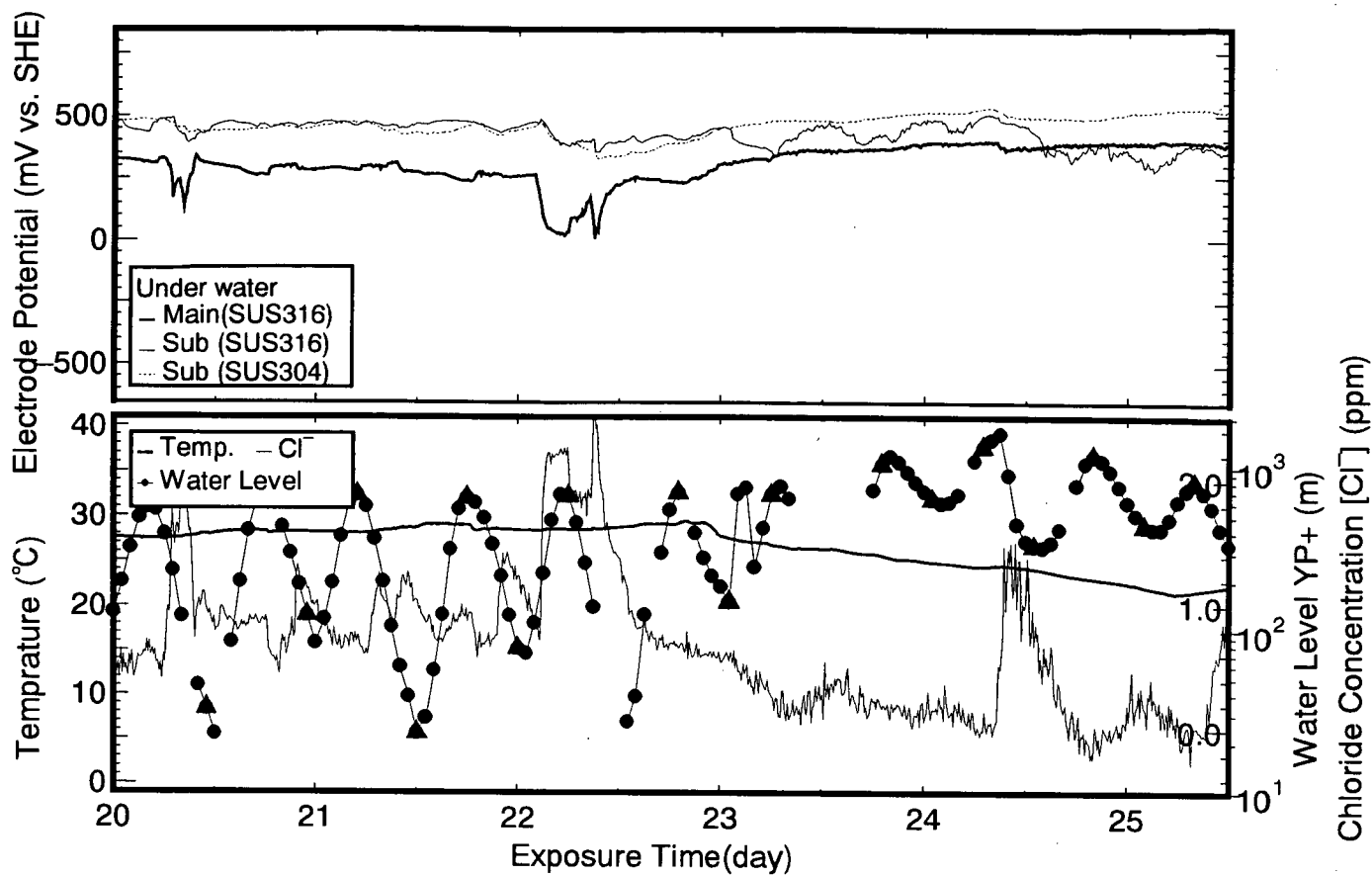
<参考文献>

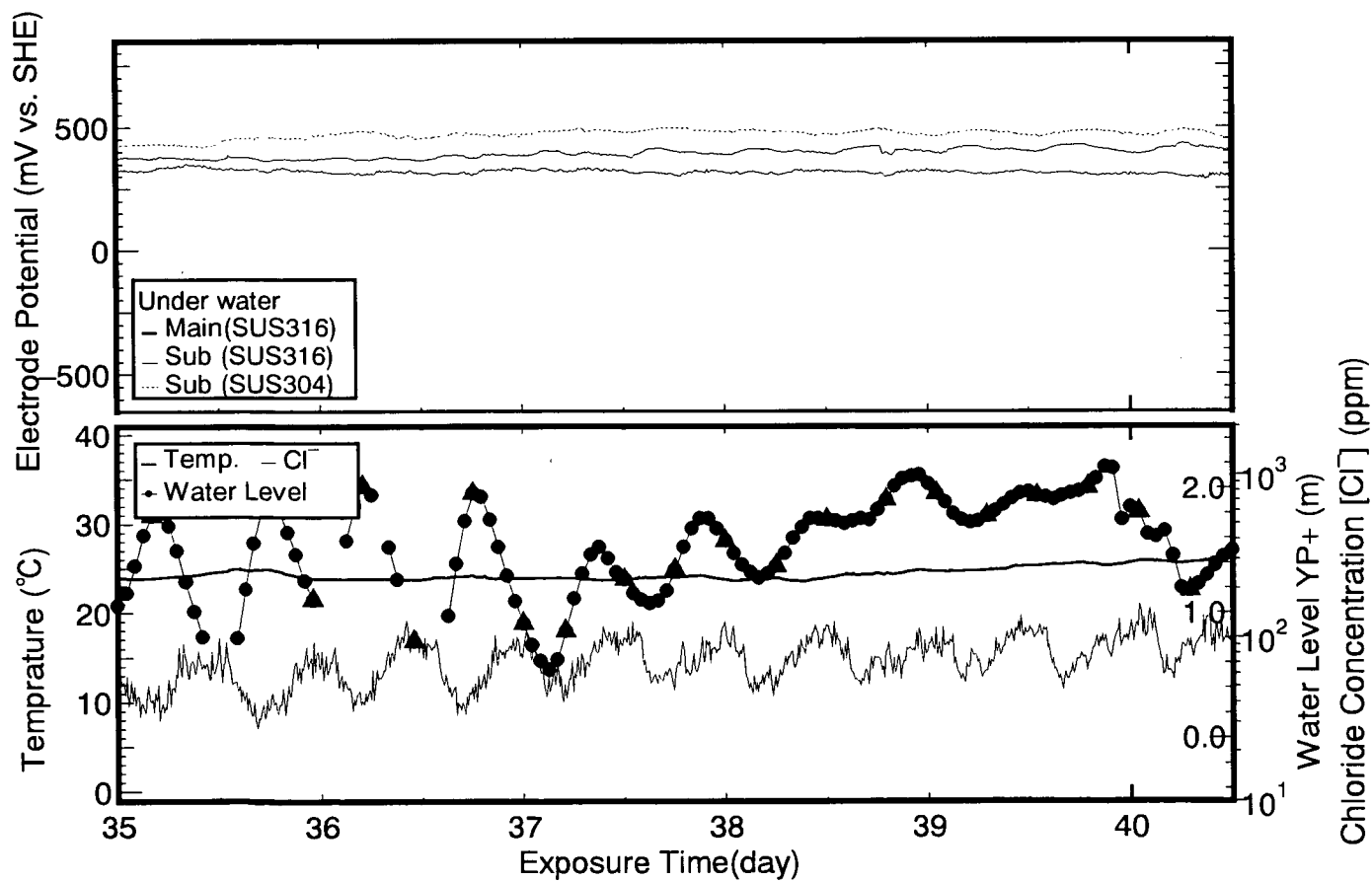
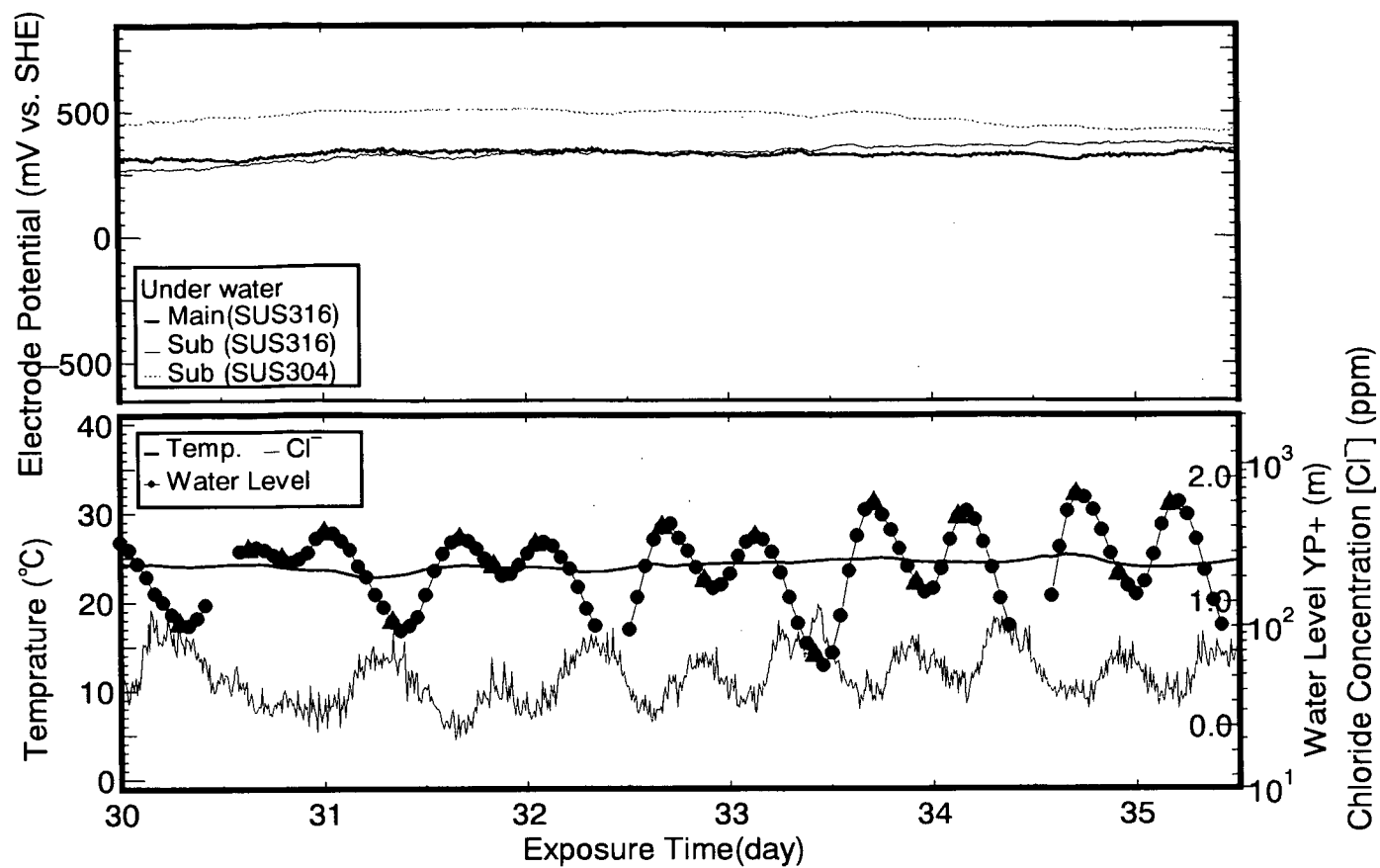
- (1) 腐食防食協会編:材料環境学入門, 丸善,1993.
- (2) 例えば, ダム・施設における鋼構造物の防食に関する調査報告書(その1)-ステンレス鋼材の適用性に関する試験-, 土木研究所資料第3558号,1998.
- (3) ダム・堰施設技術基準委員会編:ダム・堰施設技術基準(案)(基準解説編・マニュアル編),1999.
- (4) 例えば, 河川・ダム施設防食ガイドライン(案)-ステンレス材料編-, 土木研究所資料第3686号,2000.
- (5) ダム・堰・水門等防食性能試験マニュアル(案), 土木研究所資料第3620号,1999.
- (6) 河川用ゲート設備の腐食特性に関する実態調査, 土木研究所資料第3554号,1998.
- (7) 例えば, 中山・明石:ステンレス鋼、およびTiの中性塩化物環境系における局部腐食進展性評価,pp333-336, 第47回材料と環境討論会,2000.
- (8) 平成8年度金属の微生物腐食の検出・防止技術の調査研究報告書(微生物腐食の調査・研究方法のマニュアル), 財団法人金属系材料開発研究センター,1997.
- (9) 新編土壤微生物研究会編:土壤微生物実験法,pp.379-397, 養賢堂,1992.
- (10) 八木:鉄バクテリアとその試験,2-1,pp.28-32, 水処理技術,1961.
- (11) 伊藤:改訂 腐食科学と防食技術, コロナ社,1996.
- (12) 鷺頭・升田:自然海水中において生物皮膜が及ぼすSUS316Lの腐食への影響,pp.11-12, 材料と環境 2000,2000.
- (13) 石原・辻川:自然海水中ステンレス鋼の自然電位貴化におよぼすバクテリアの影響,pp520-527,48-8, 材料と環境 [Zairyo-to-Kankyo(Corros.Eng.)],1999.
- (14) 福田・明石:SUS304鋼の腐食すきま再不動態化電位におよぼすCl⁻濃度、温度および測定法の影響,pp.263-266, 腐食防食'95,1995.
- (15) 辻川・久松:すきま腐食における再不動態化電位について,pp.37-40,29, 防食技術,1980.
- (16) 尾崎・石川:Q & A,pp.289-290,40, 材料と環境 [Zairyo-to-Kankyo(Corros.Eng.)],1991.
- (17) 尾崎・石川:Q & A,pp.783-784,40, 材料と環境 [Zairyo-to-Kankyo(Corros.Eng.)],1991.
- (18) Akashi et.al.:Crevice Corrosion of Stainless Steels due to Marine Fouling,24,pp.31-33,Boushoku gijutsu,1975.
- (19) 能登谷:黄銅の脱亜鉛腐食,pp121-123,33, 防食技術,1984.
- (20) 田中・江原・村松:ステンレス鋼を用いた河川用ゲート設備の防食性能試験の検討,pp.245-248, 材料と環境 2000,2000.
- (21) 田中・江原・村松:河川用ゲート設備の防食性能評価のための暴露試験体の提案,6,pp.105-106, 土木学会第55回年次学術講演会,2000.
- (22) 田中ほか9名:河川用ゲート設備の防食性能に関する実験検討,pp.171-172, 第47回材料と環境討論会,2000.
- (23) 田中ほか9名:河川用ゲート設備の防食性能に関する実験検討(第2報),pp.333-334, 第48回材料と環境討論会,2001.

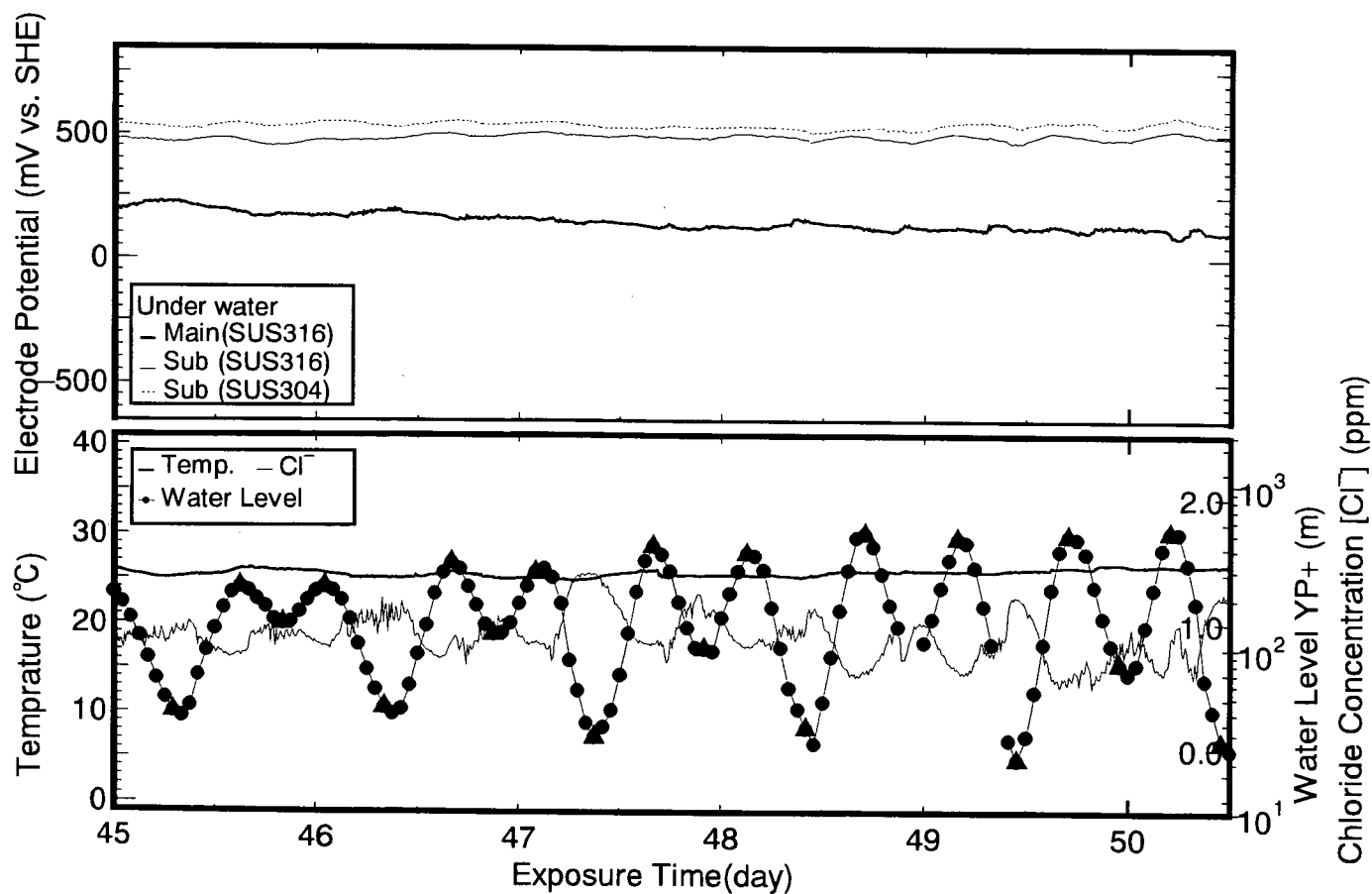
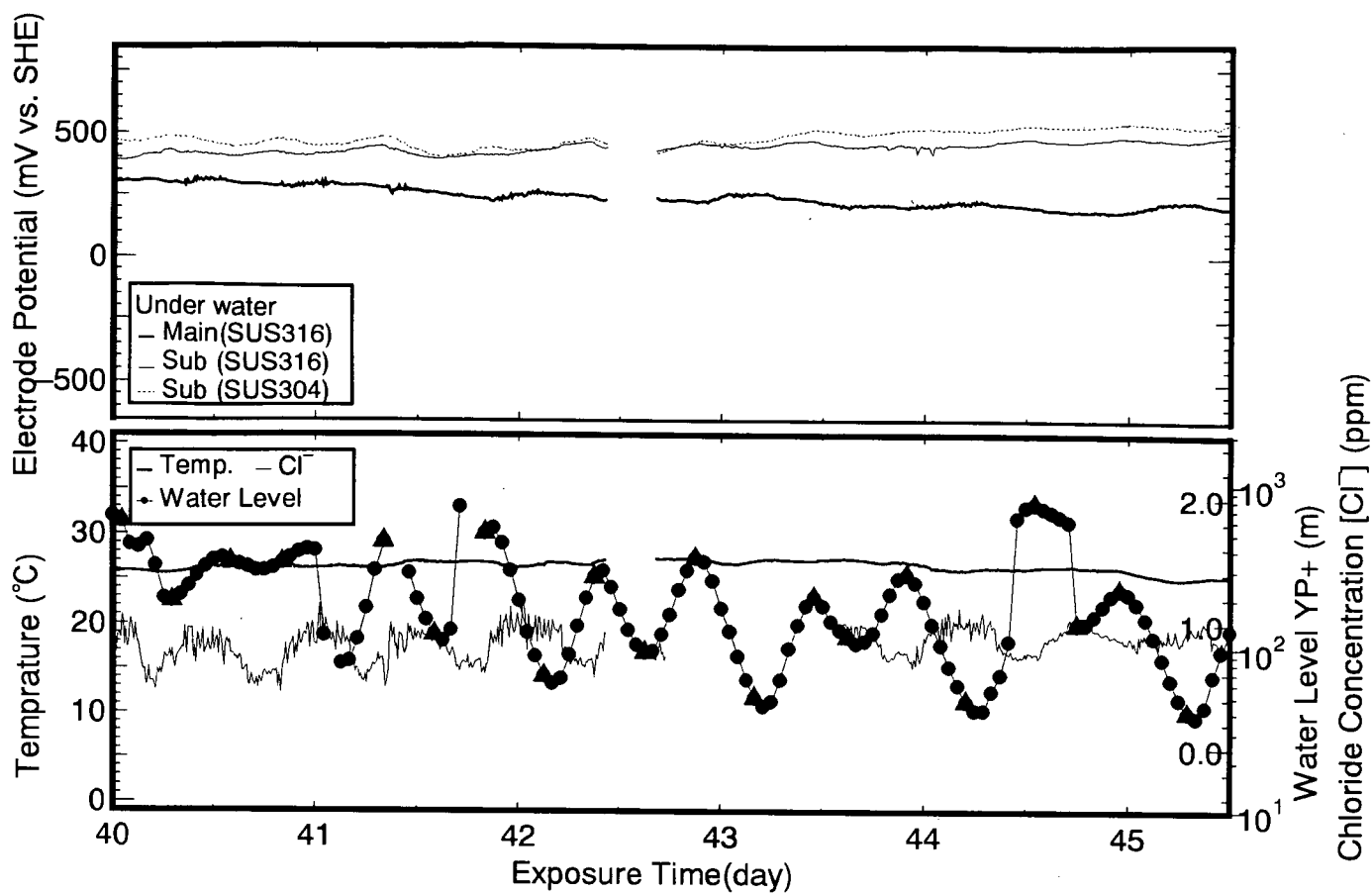
参 考 資 料

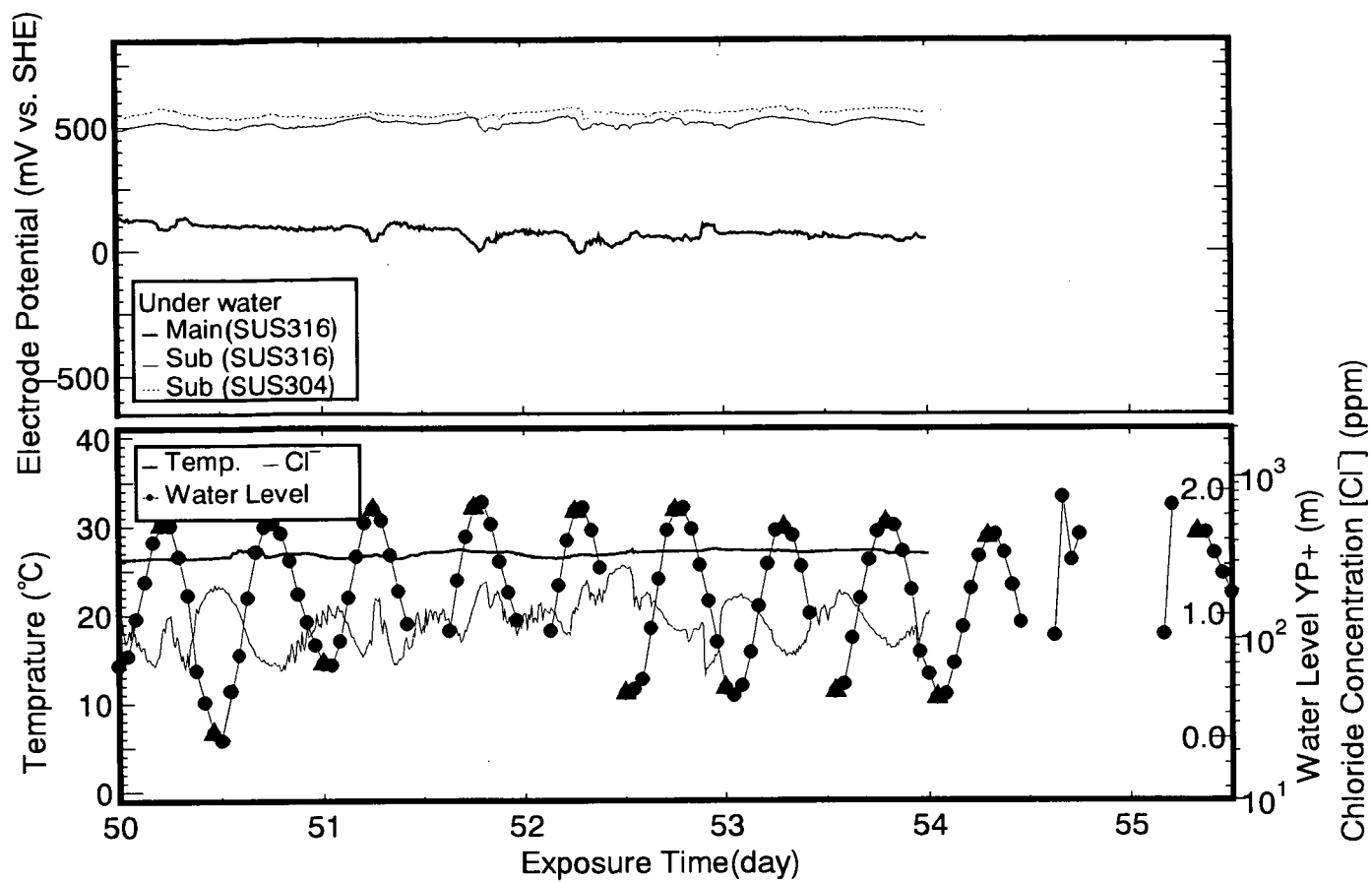
- (1) 水中部試験体の自然電位及び水質環境（塩化物イオン濃度、水温、水位変動）の計測結果
- (2) 試験体組立図および詳細

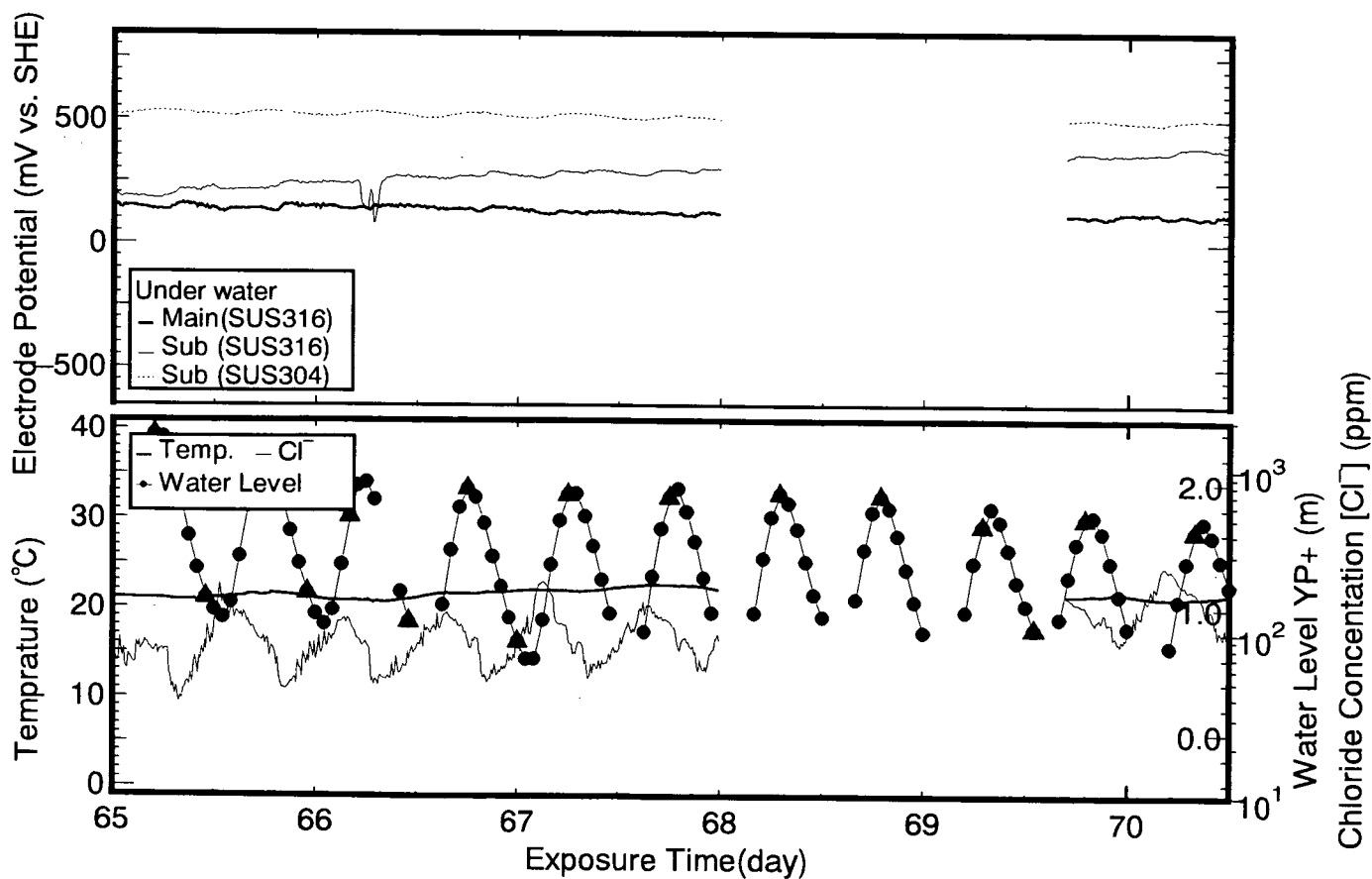
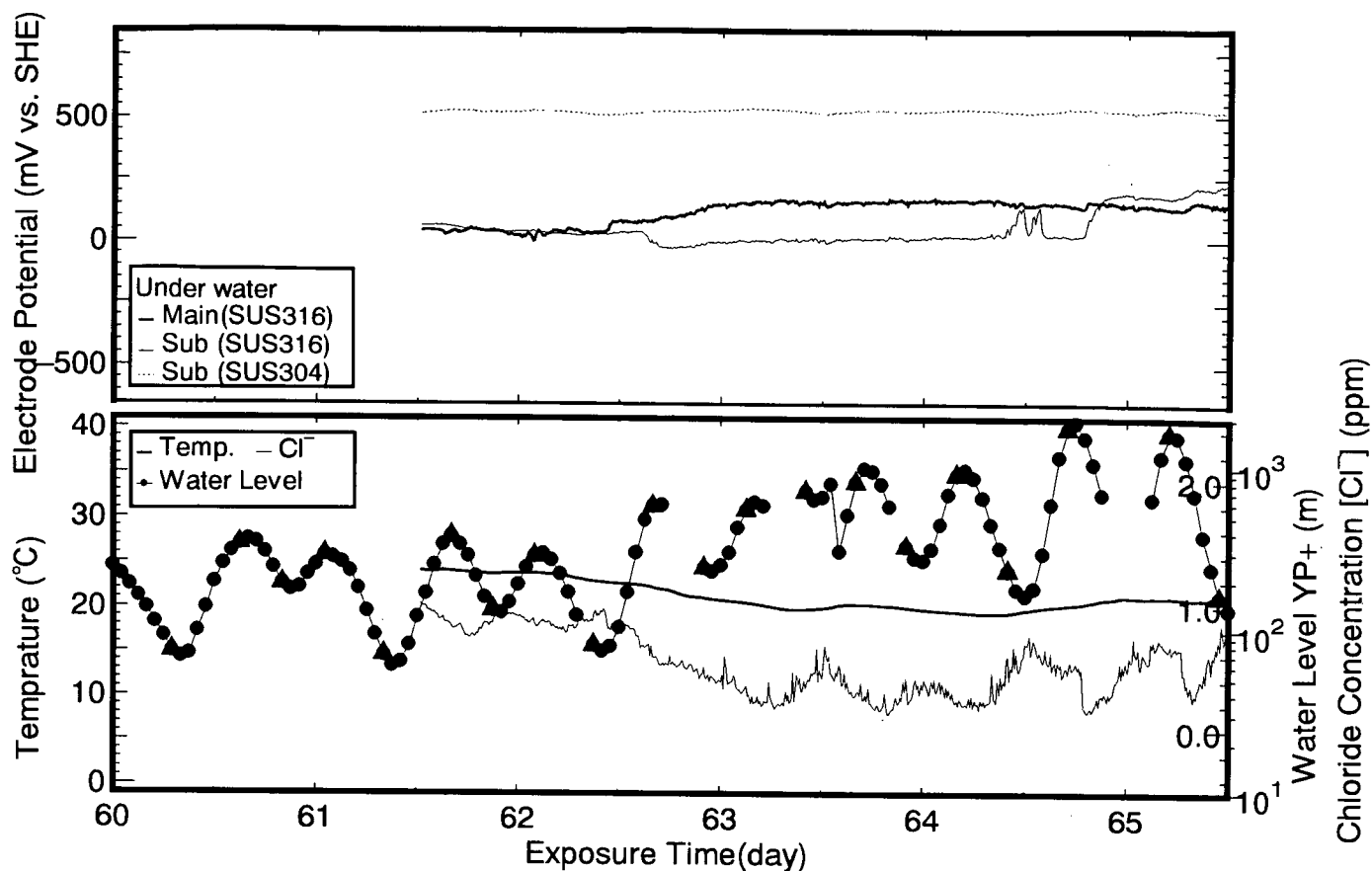


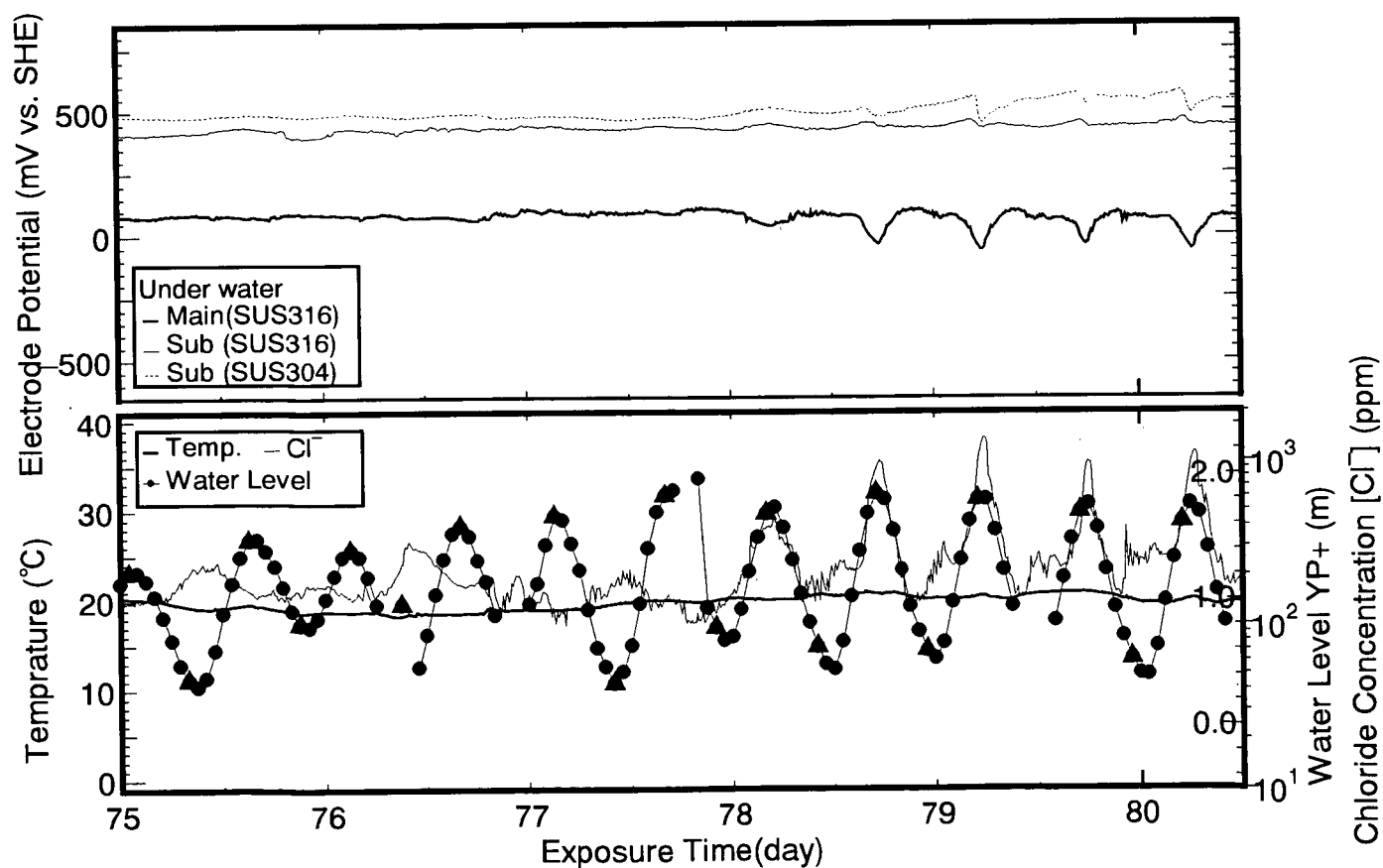
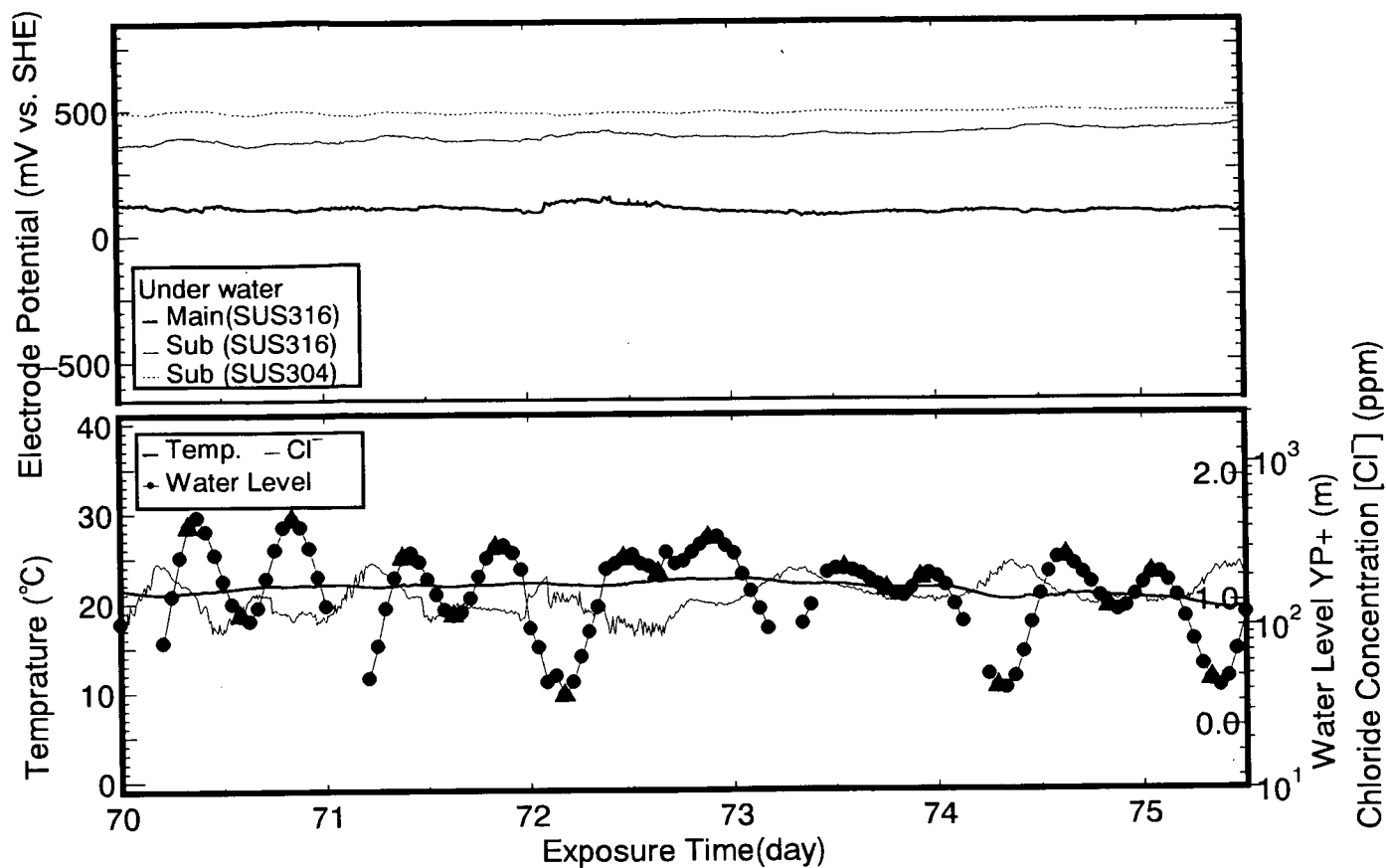


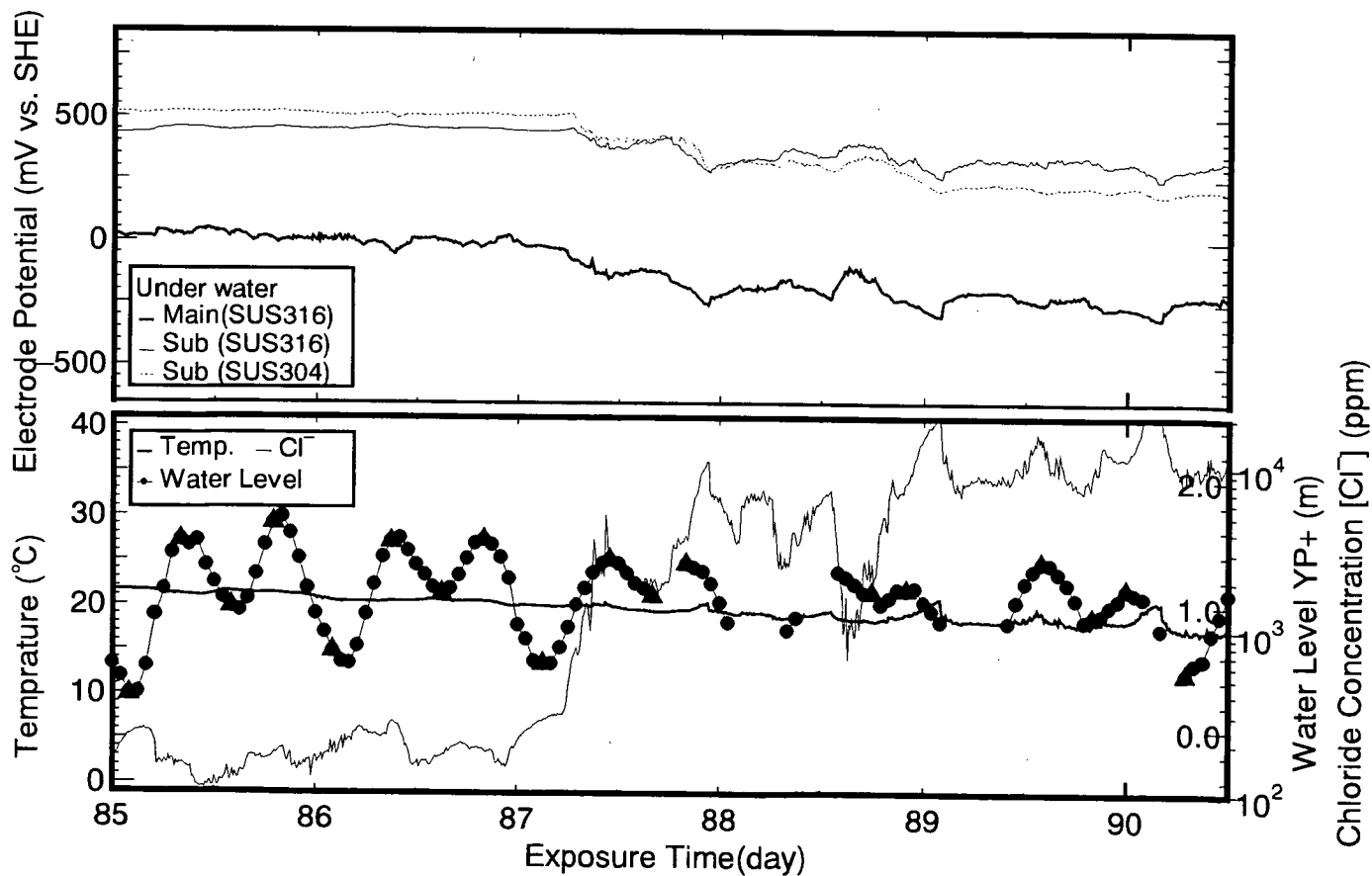
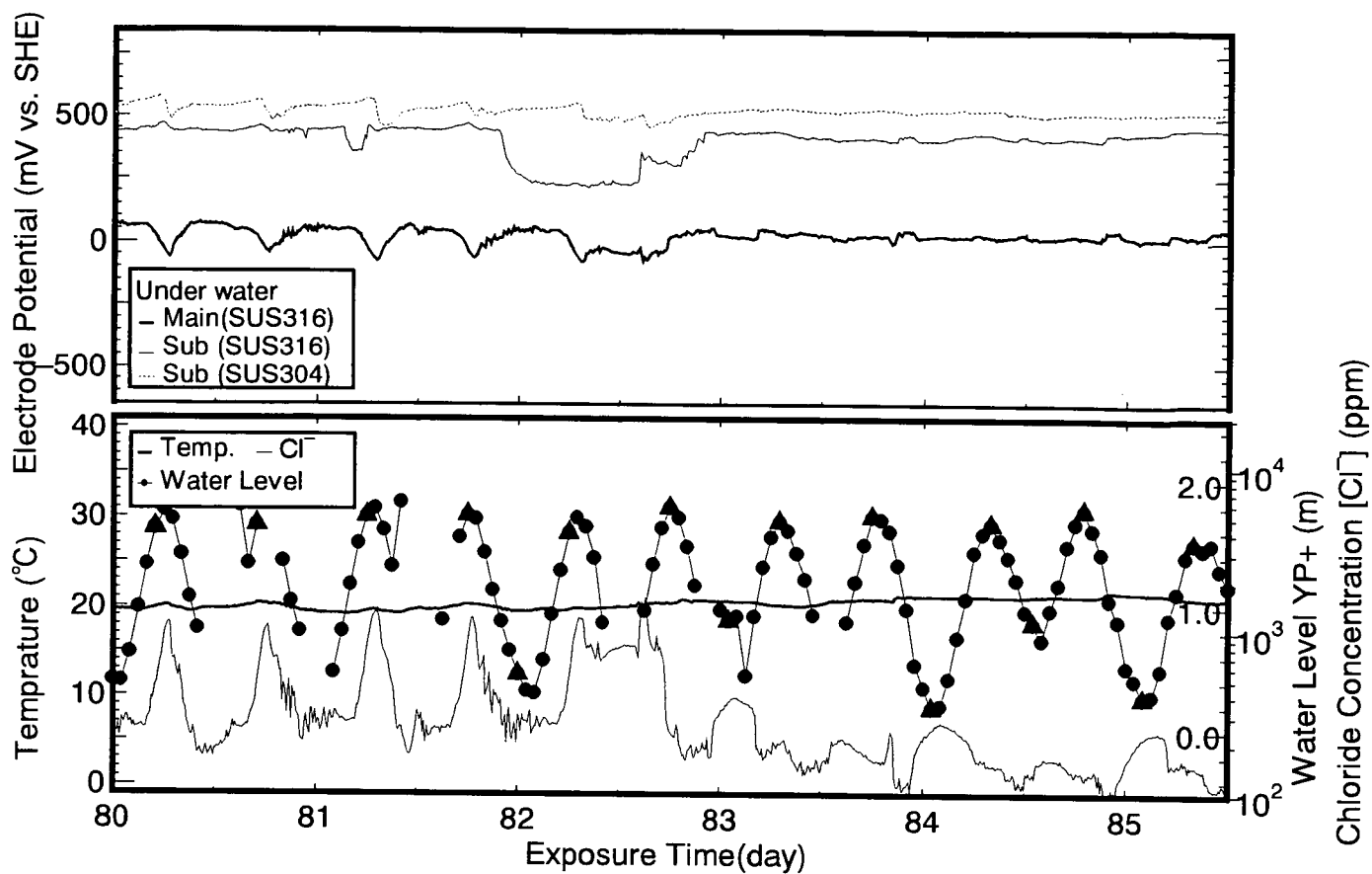


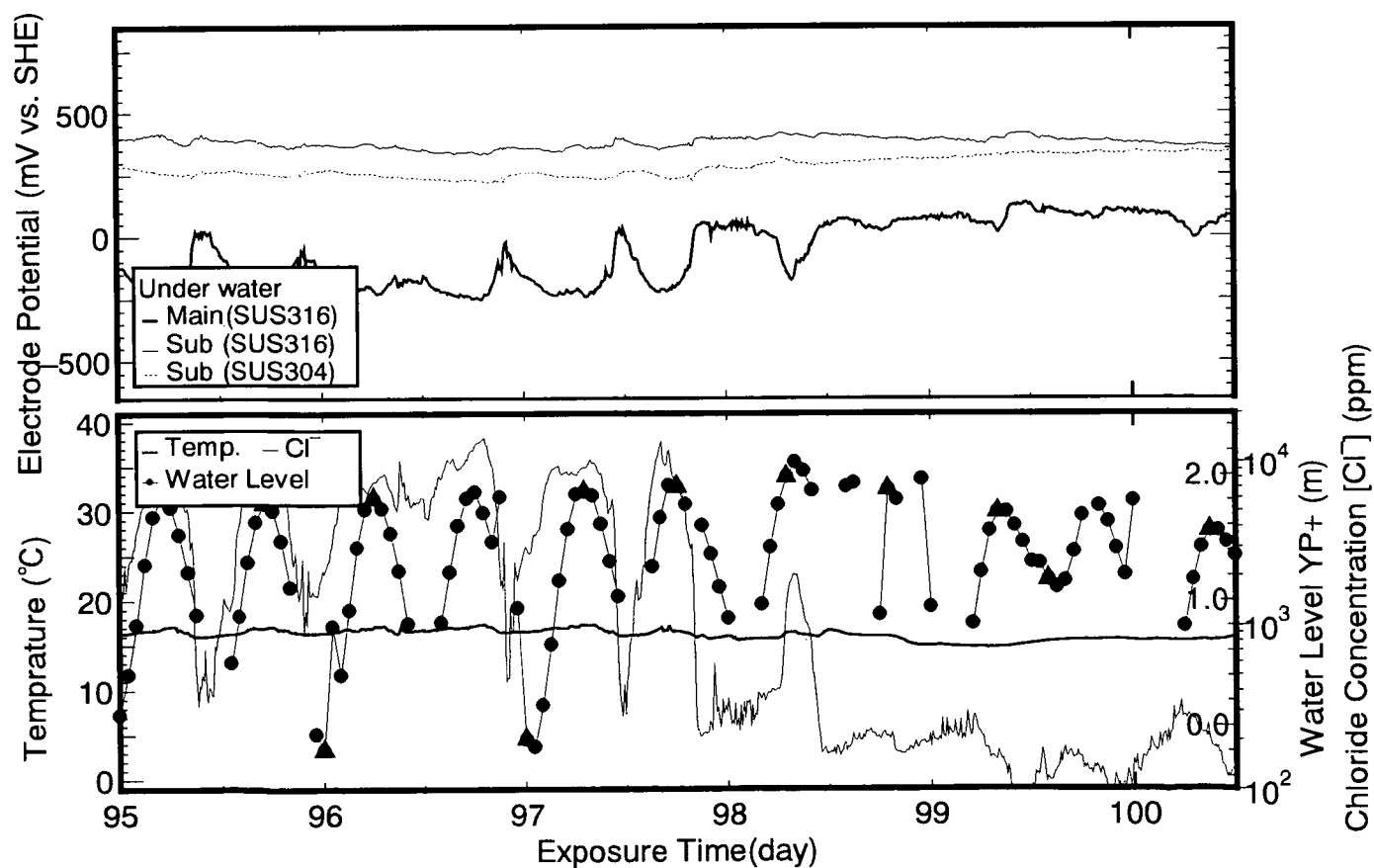
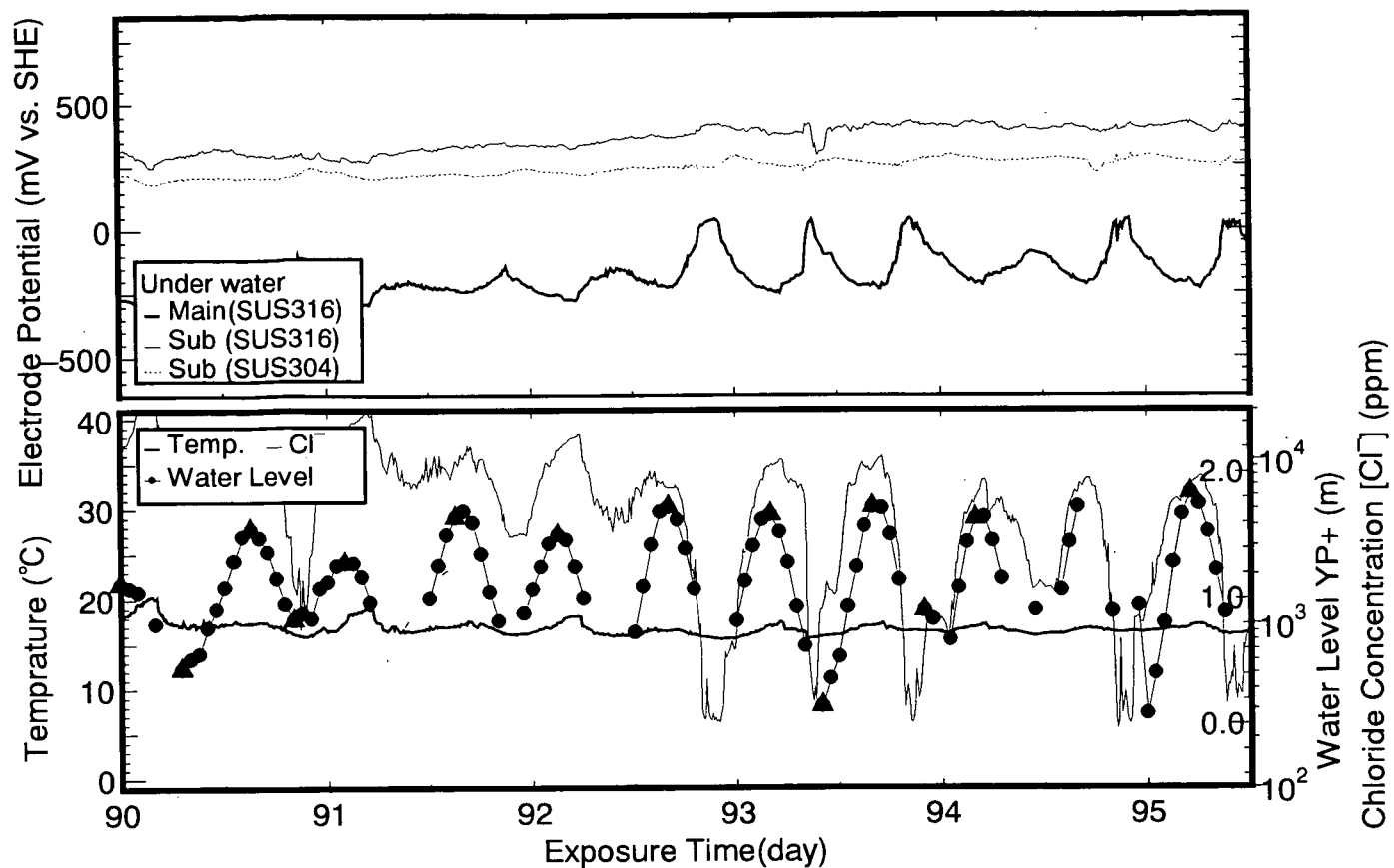


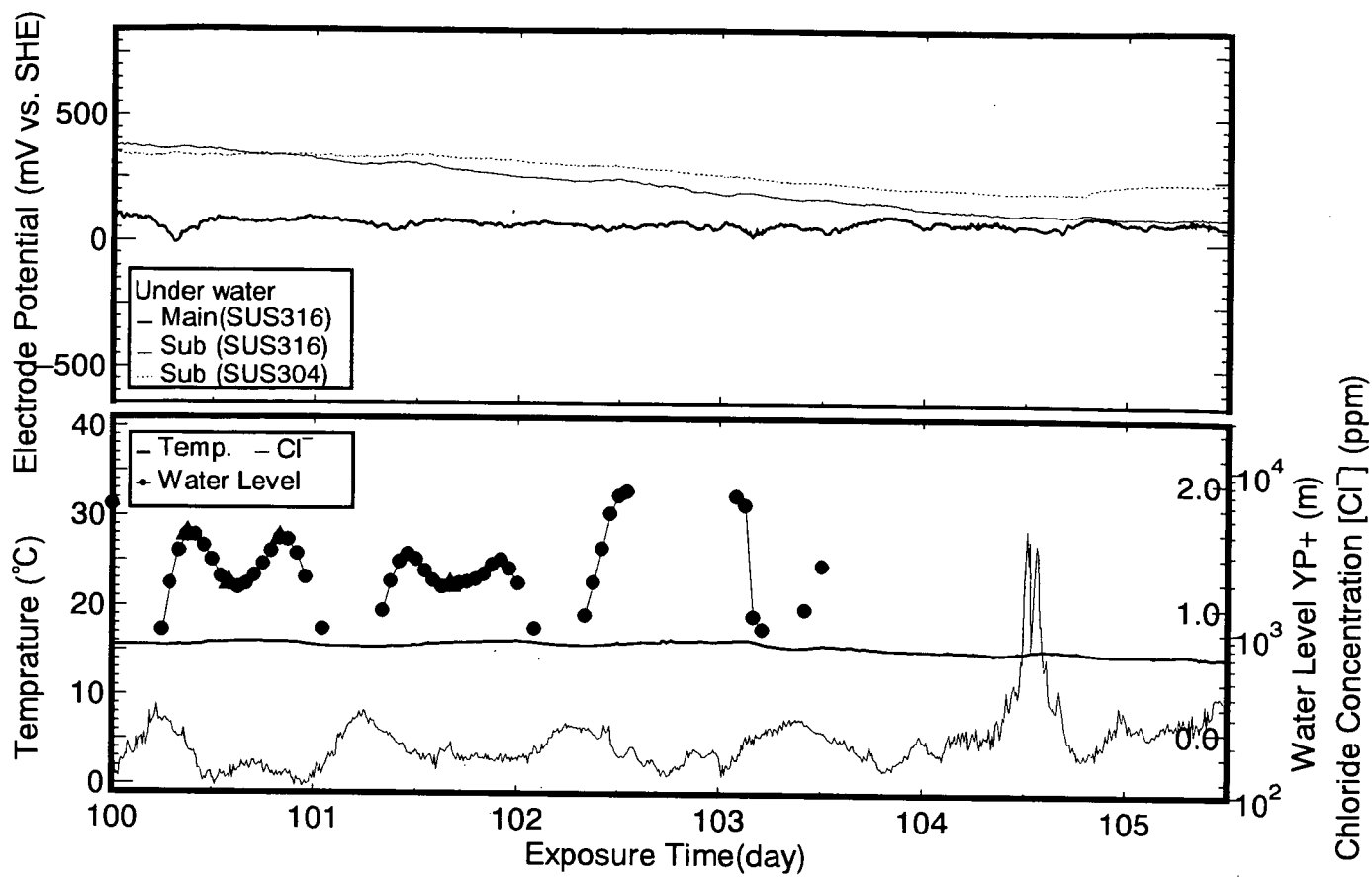


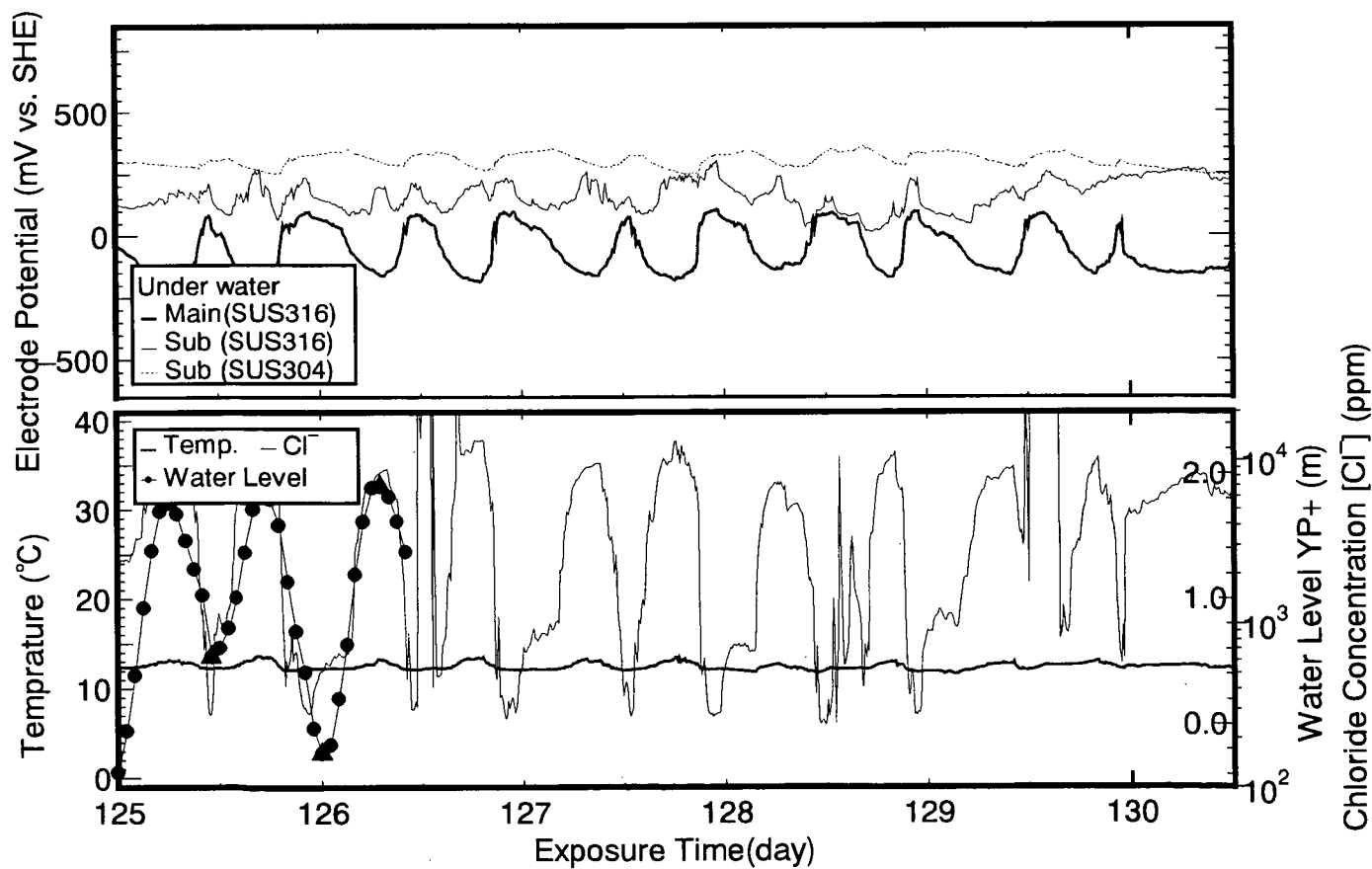
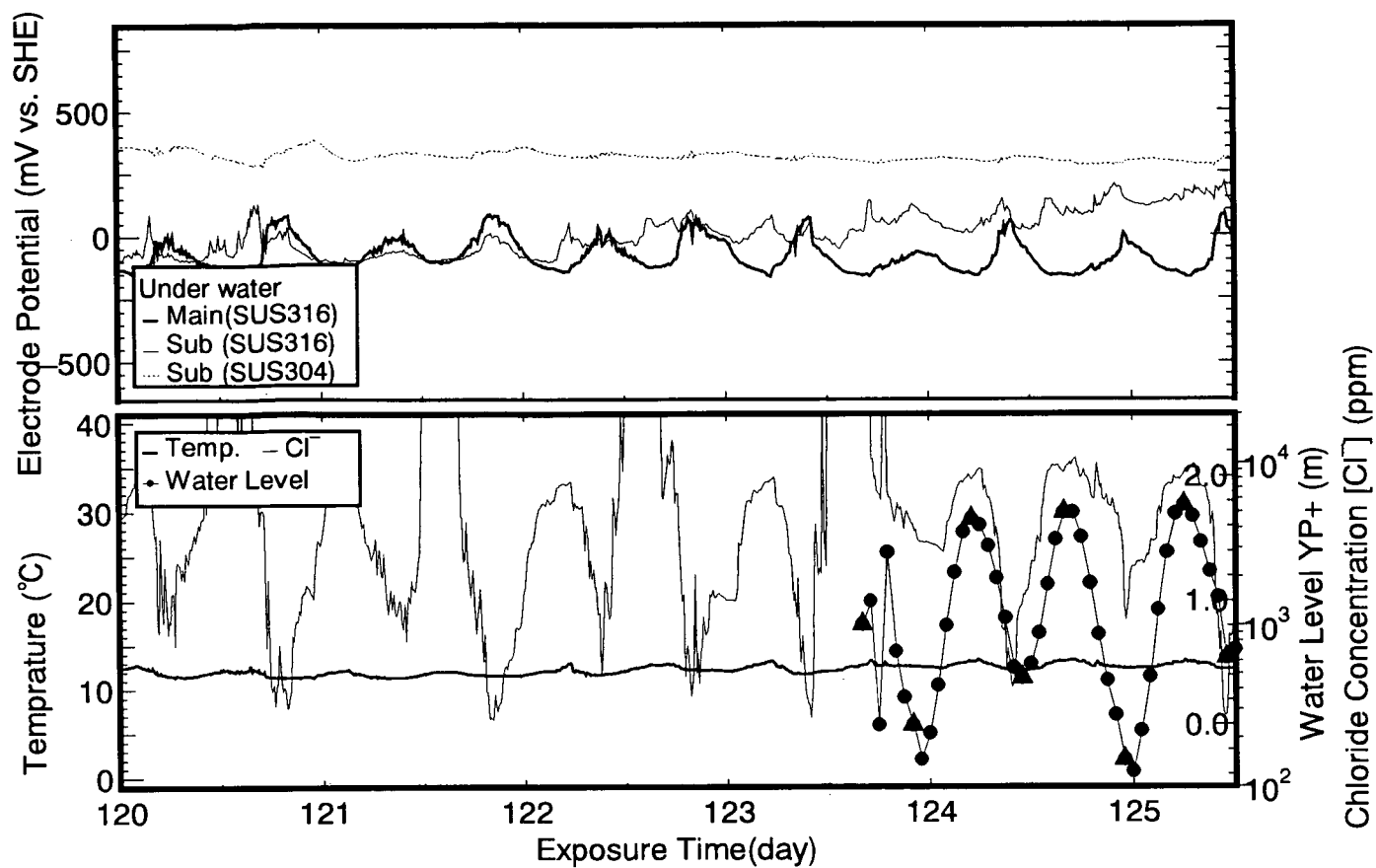


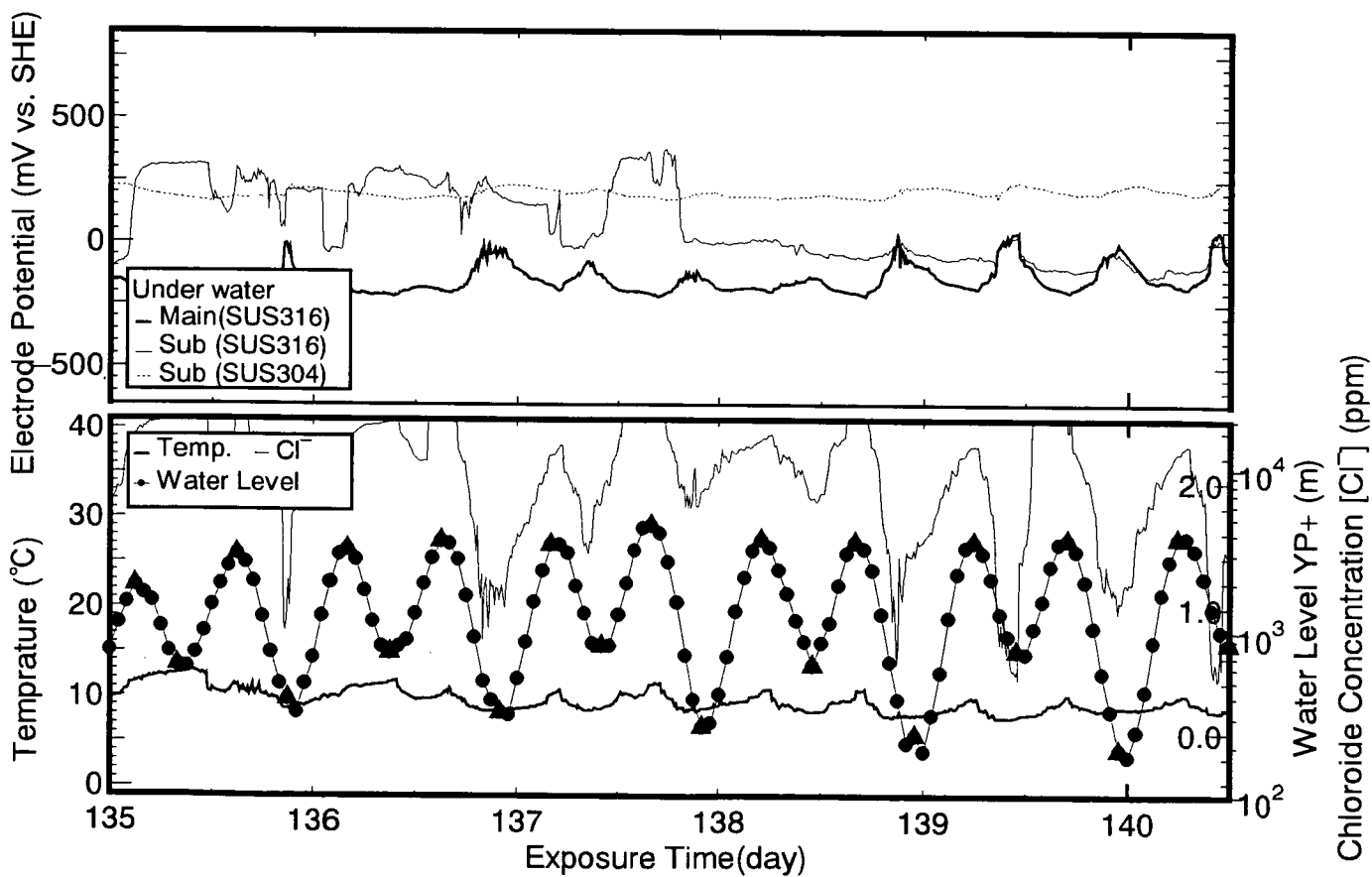
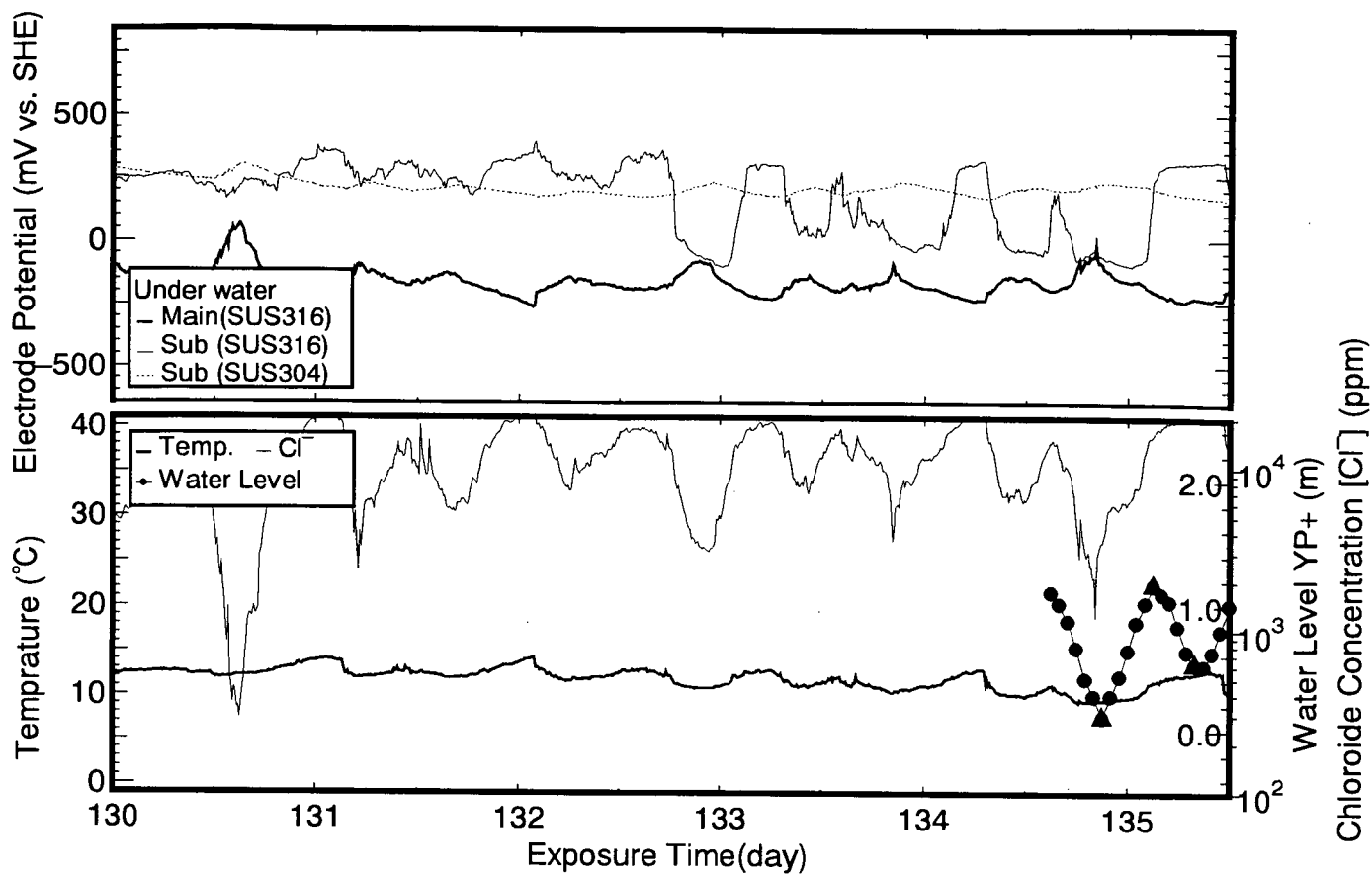


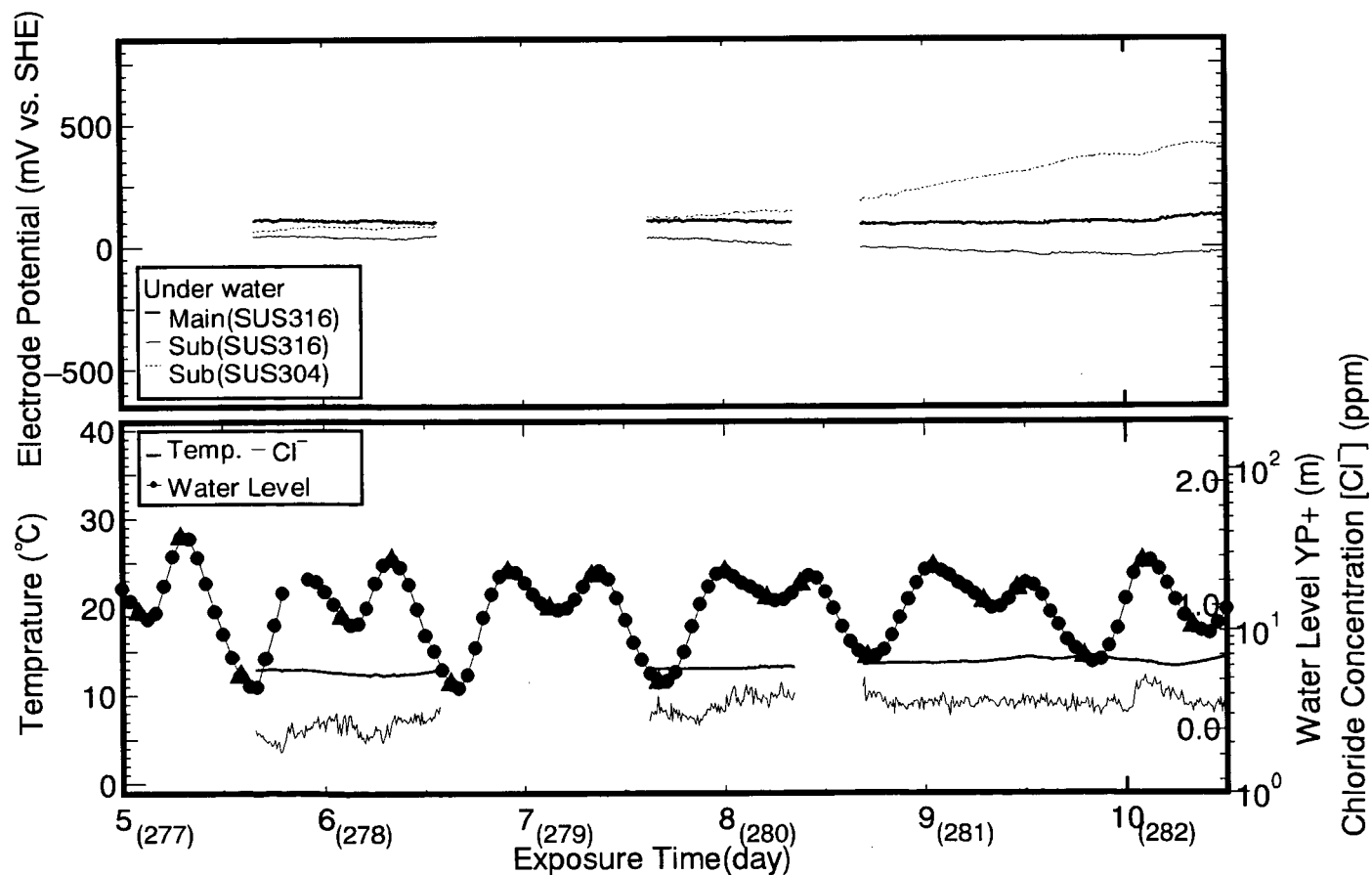
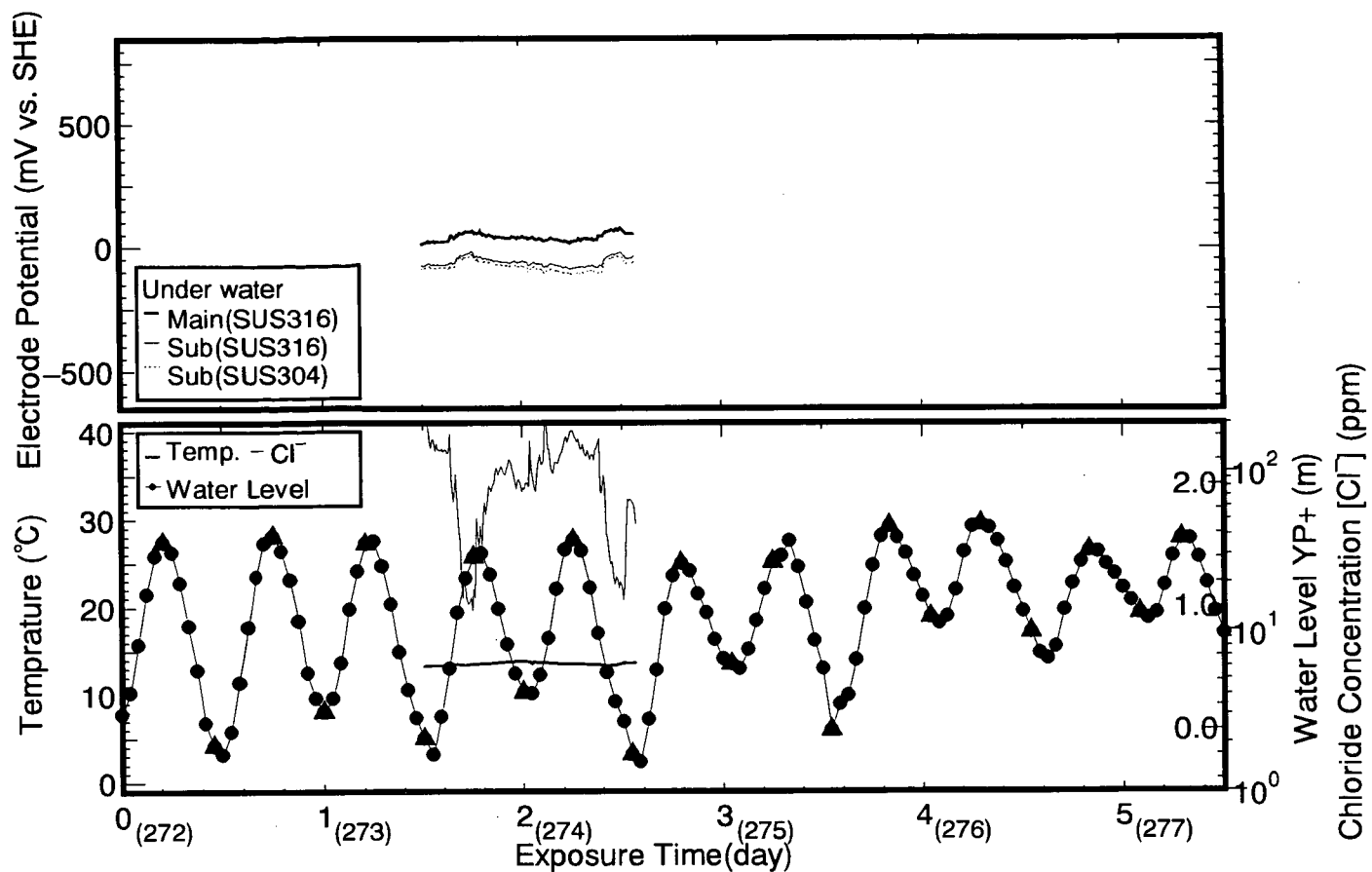


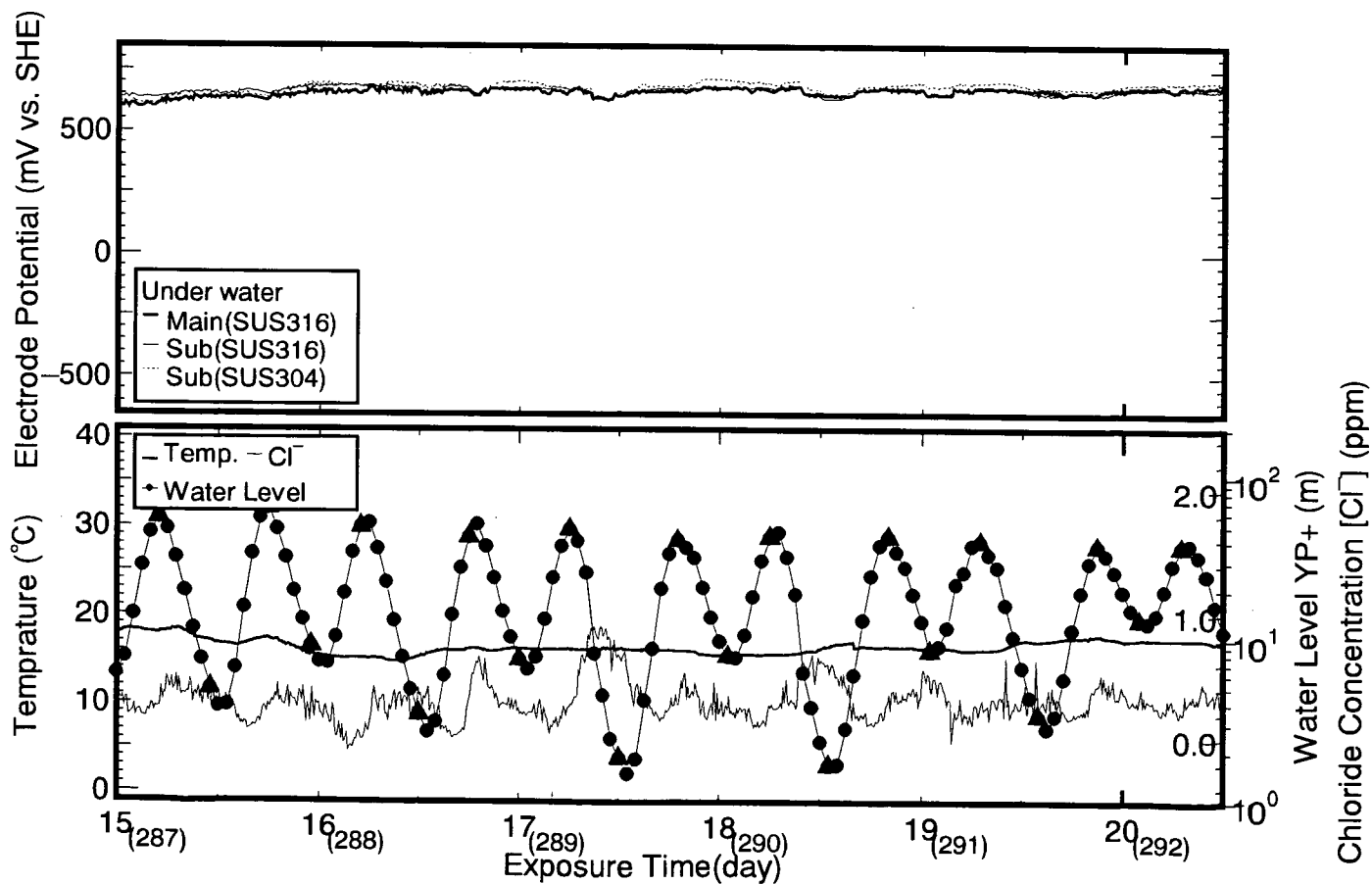
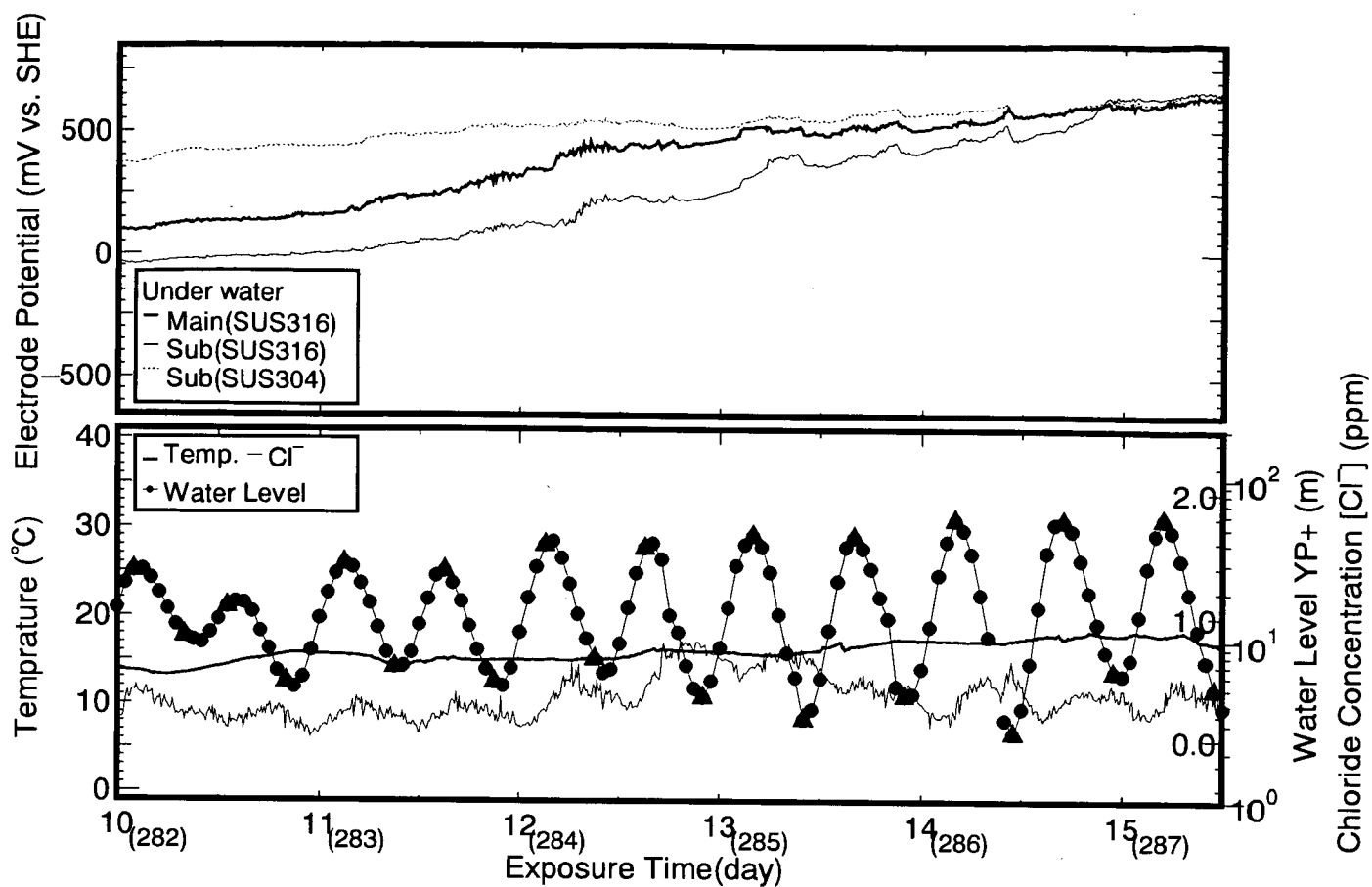


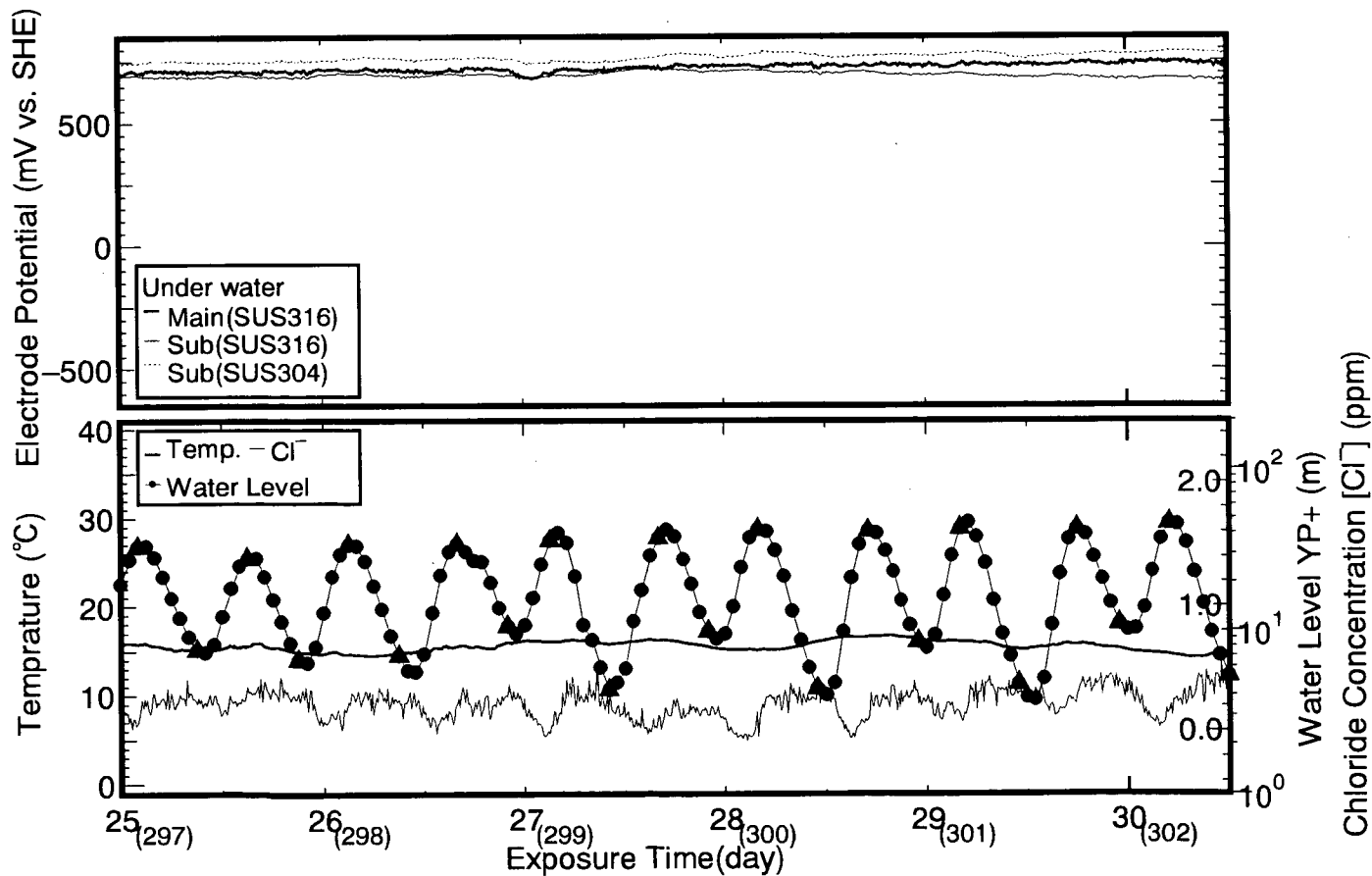
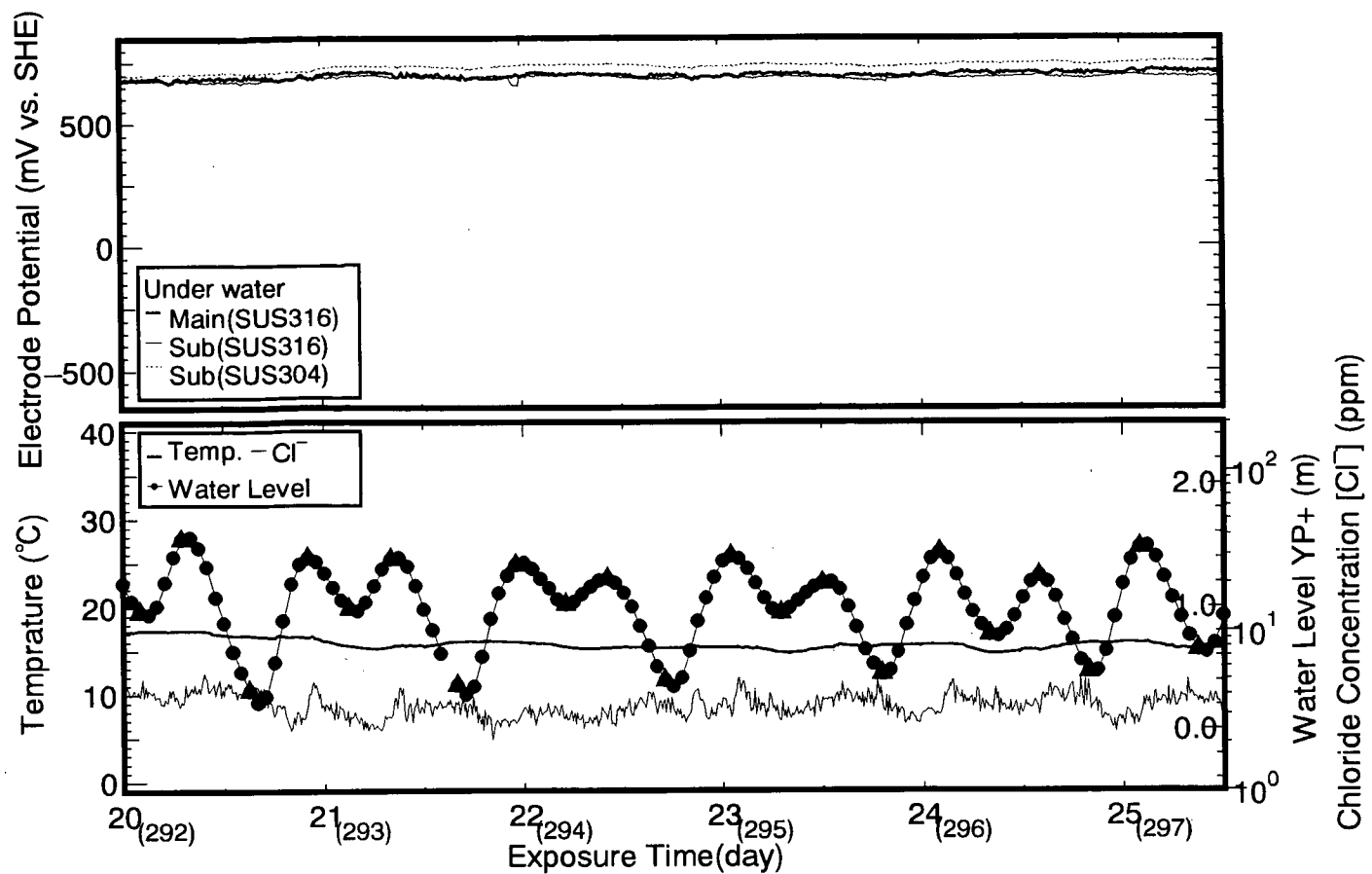


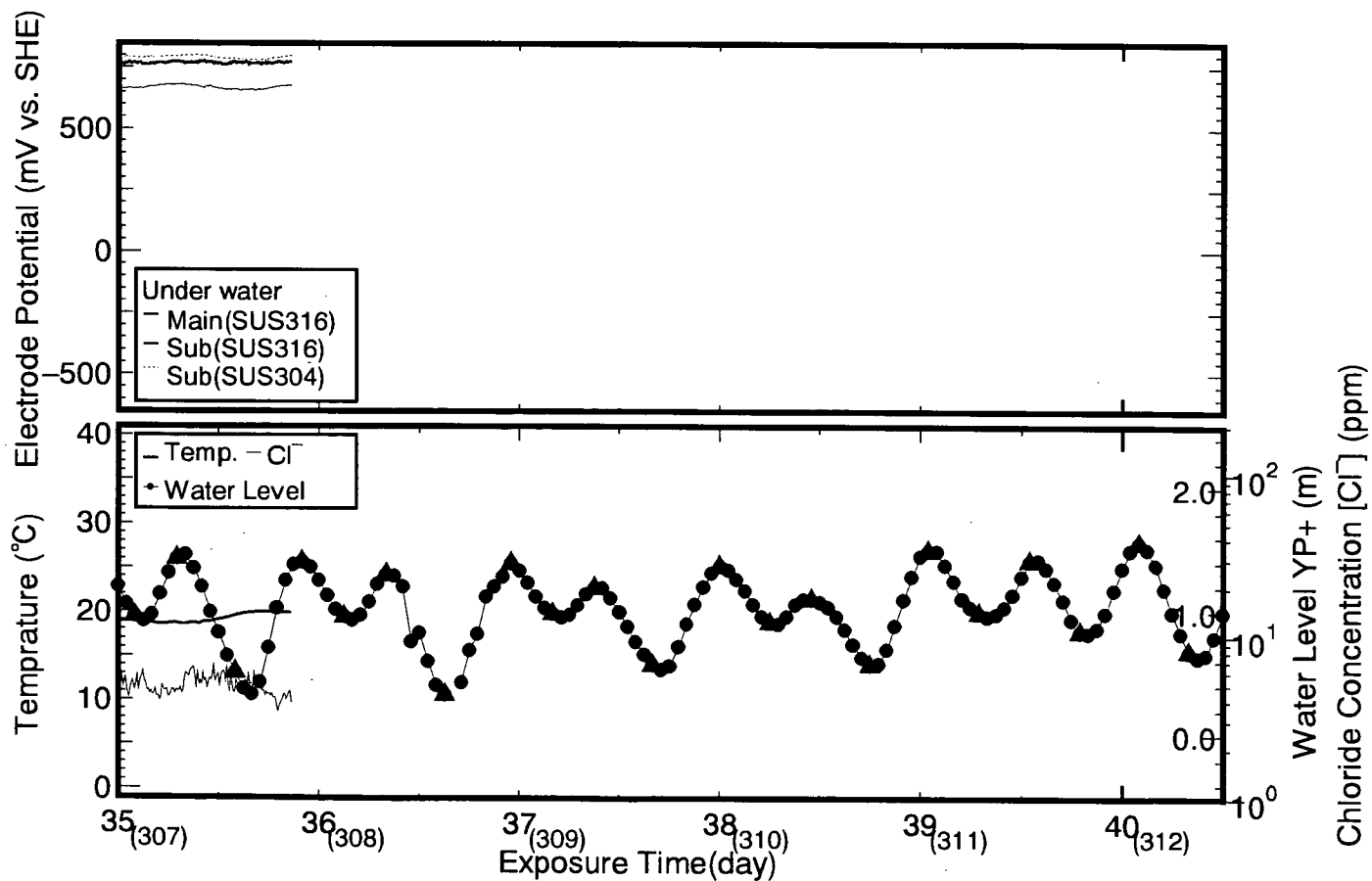
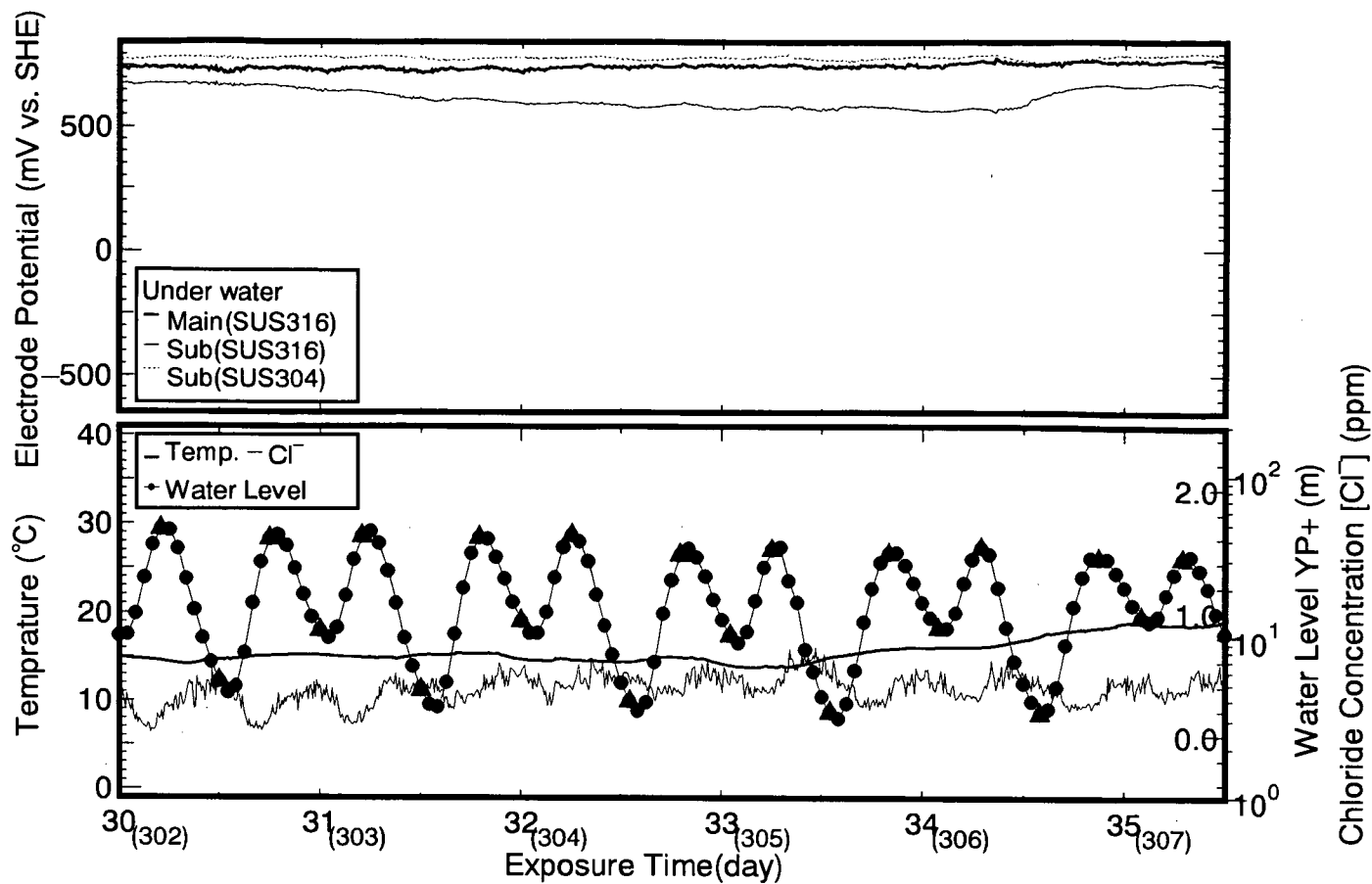


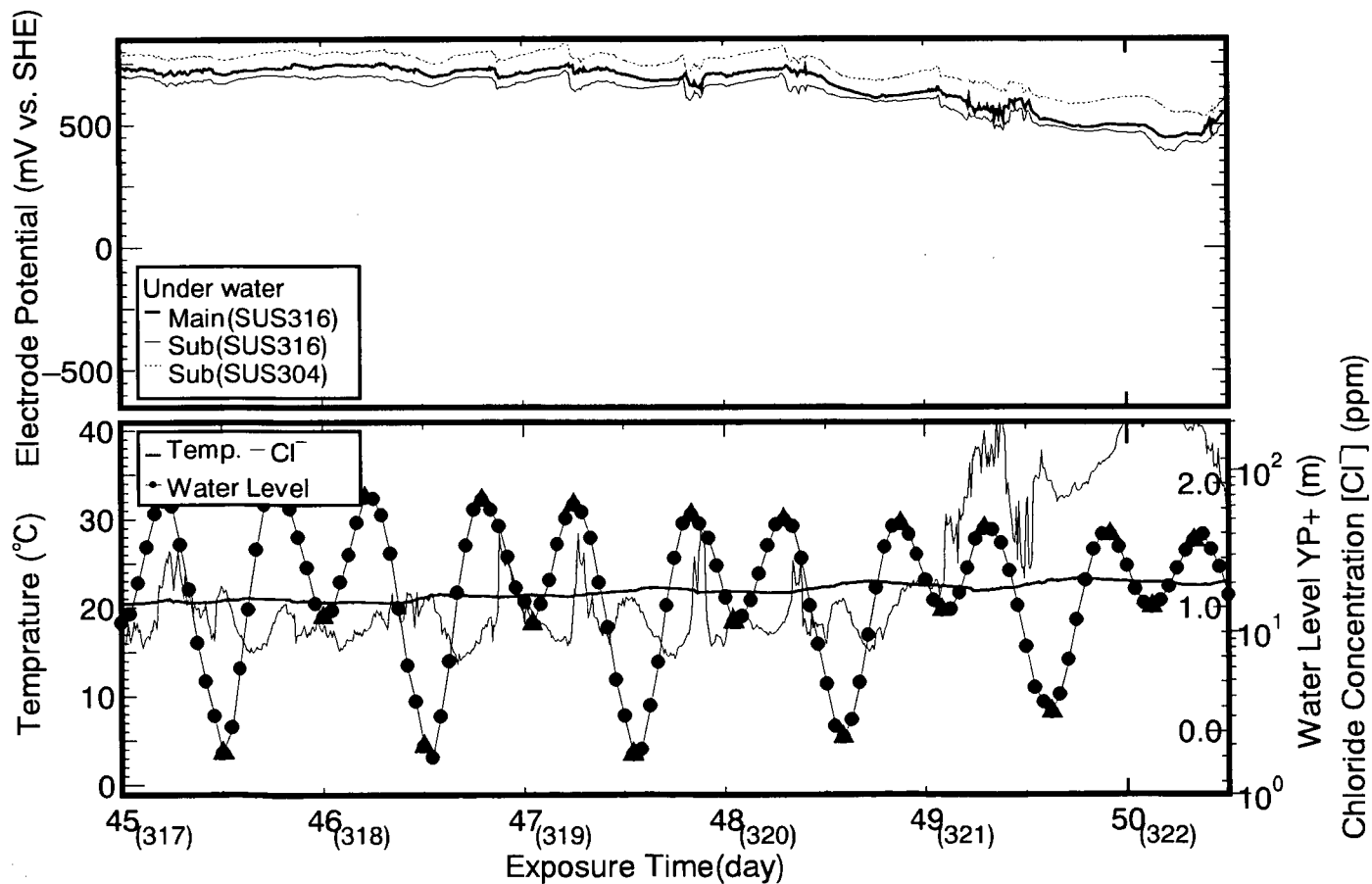
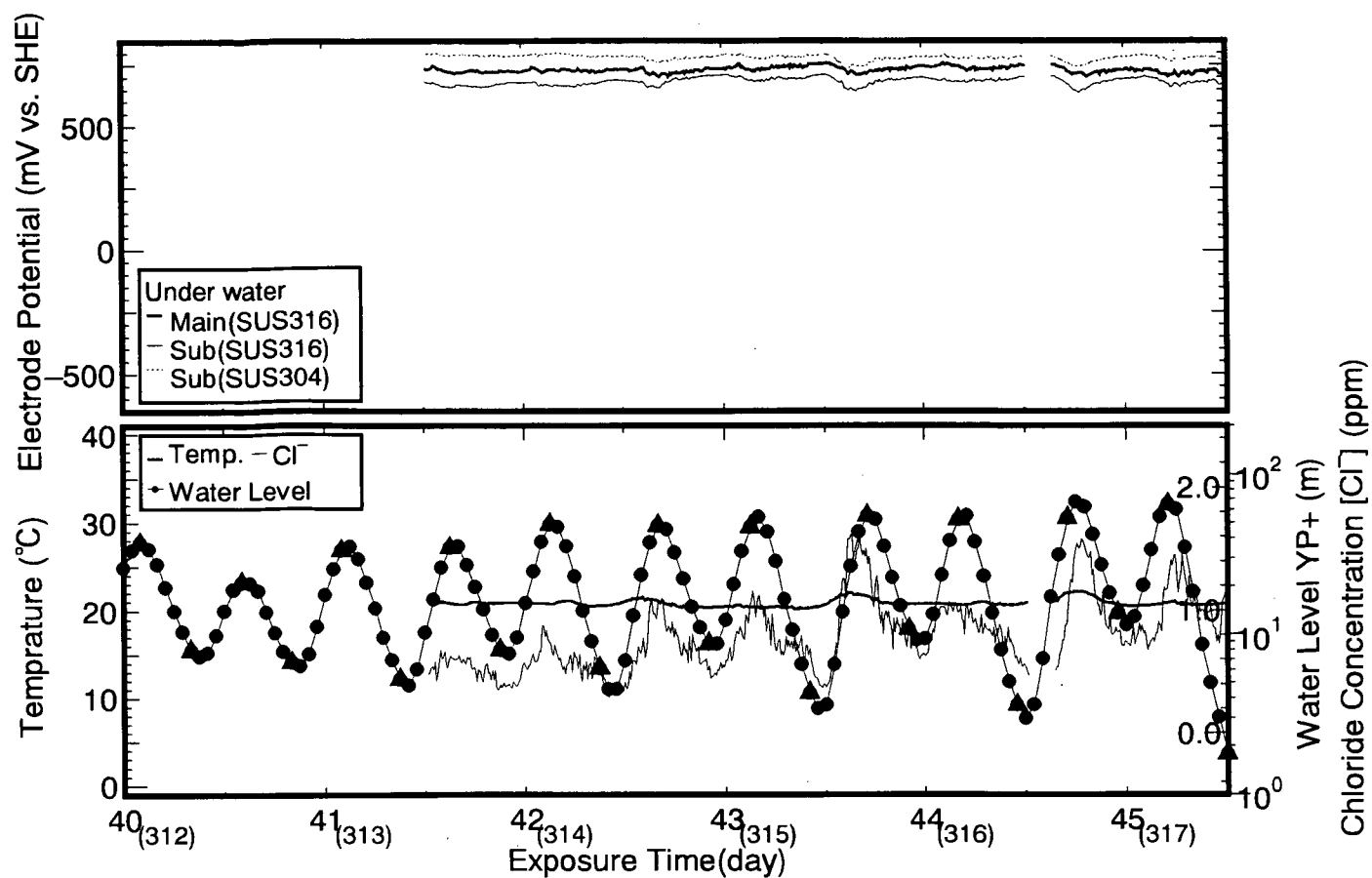


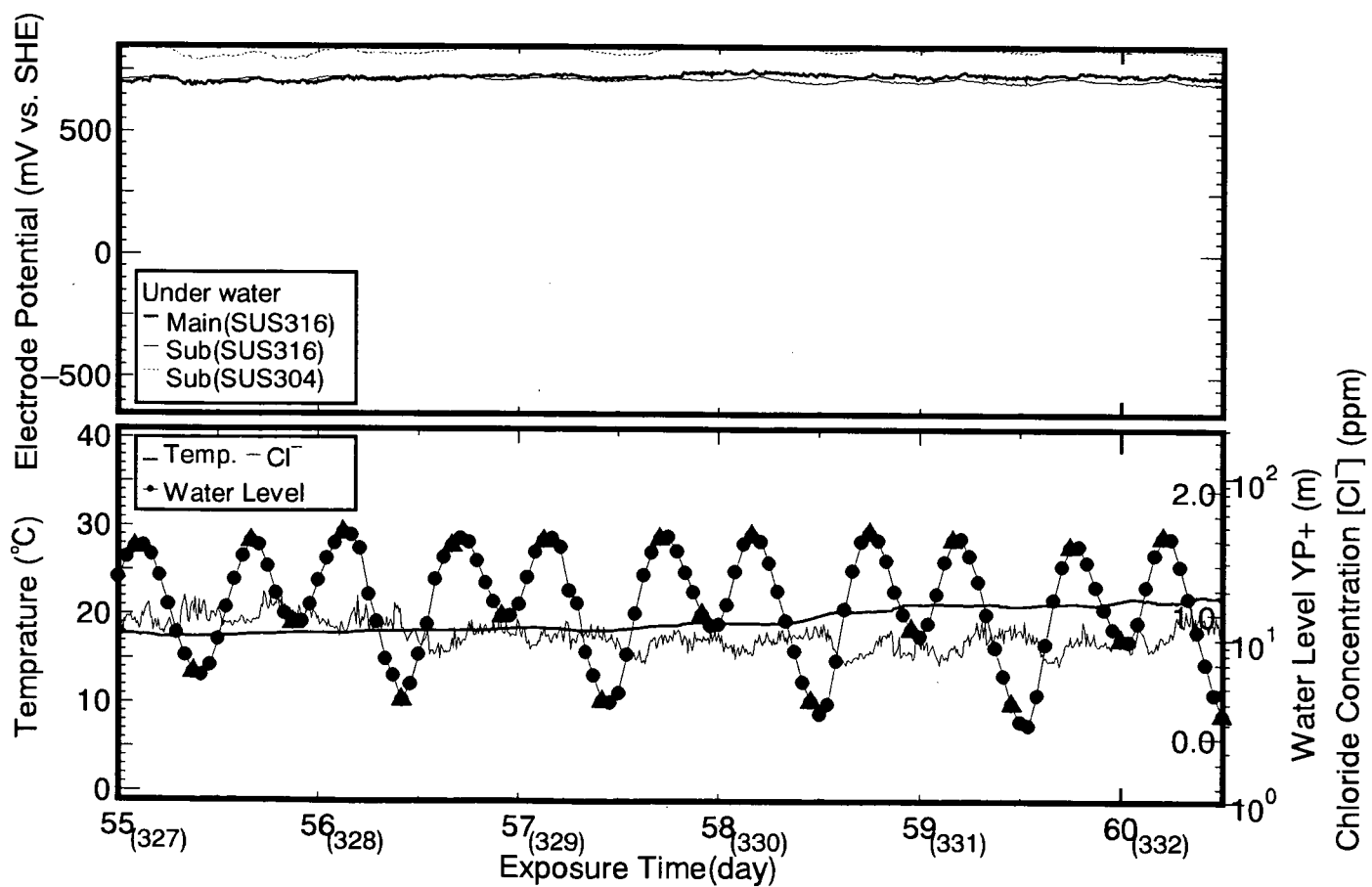
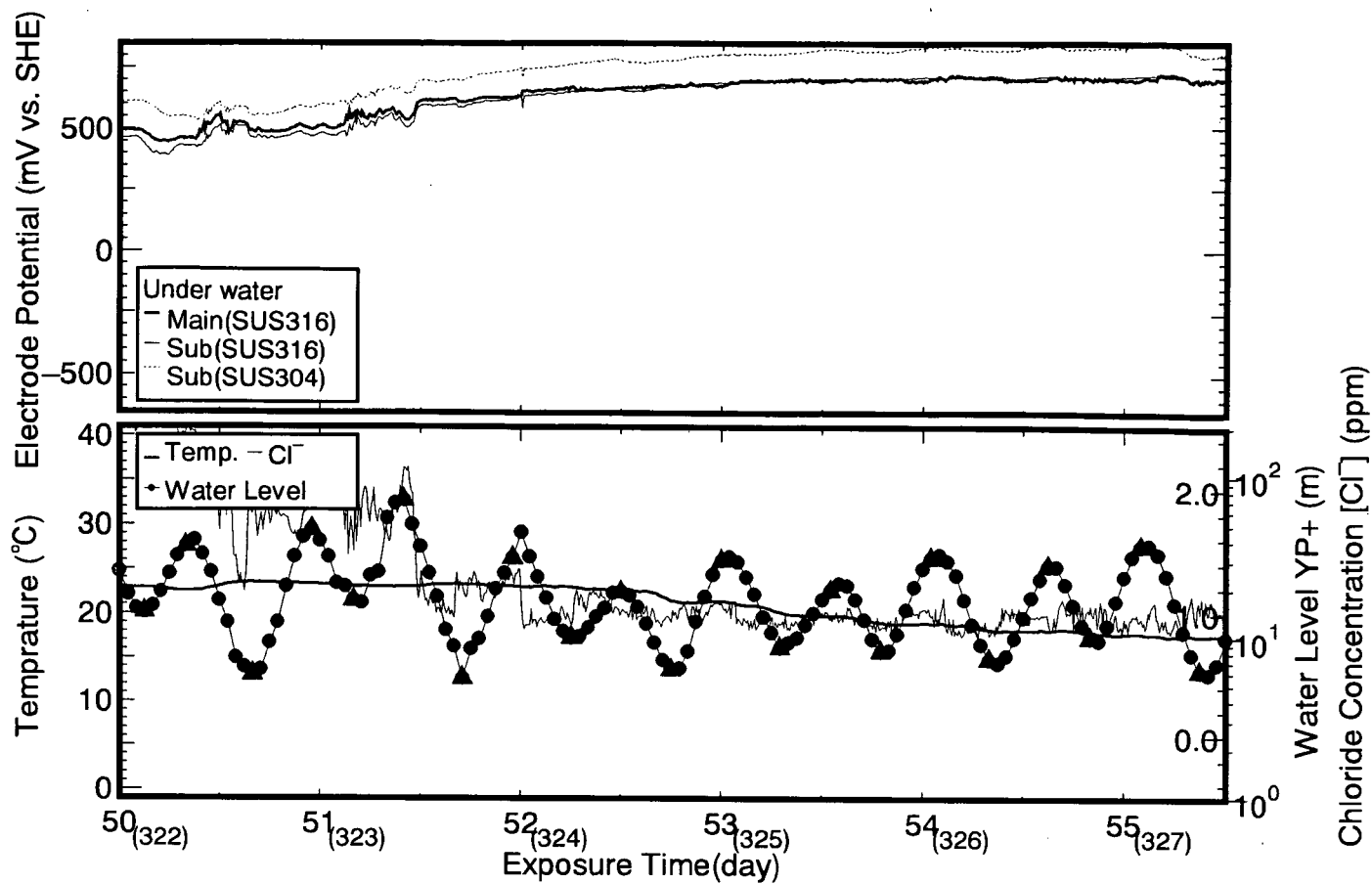


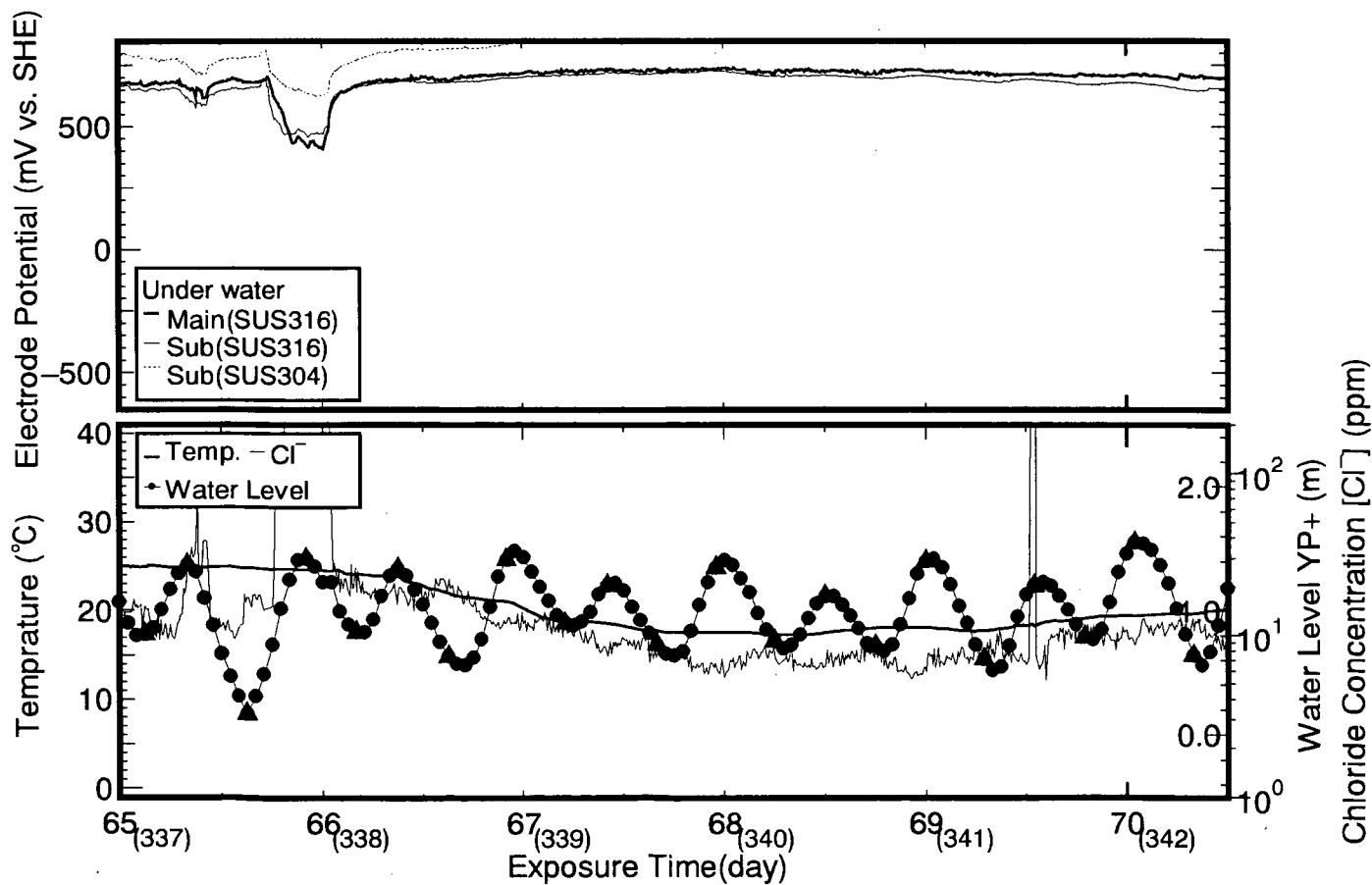
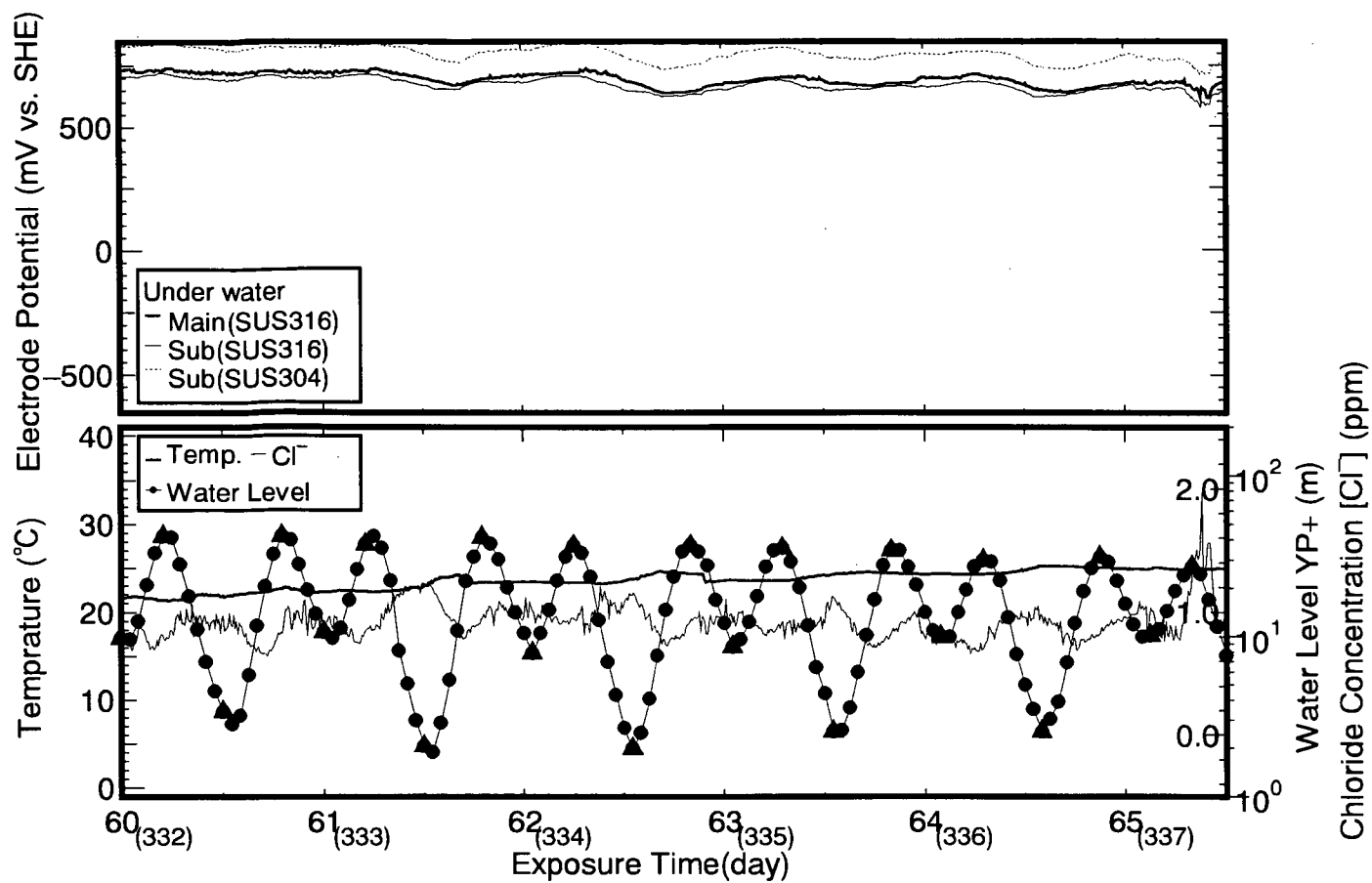


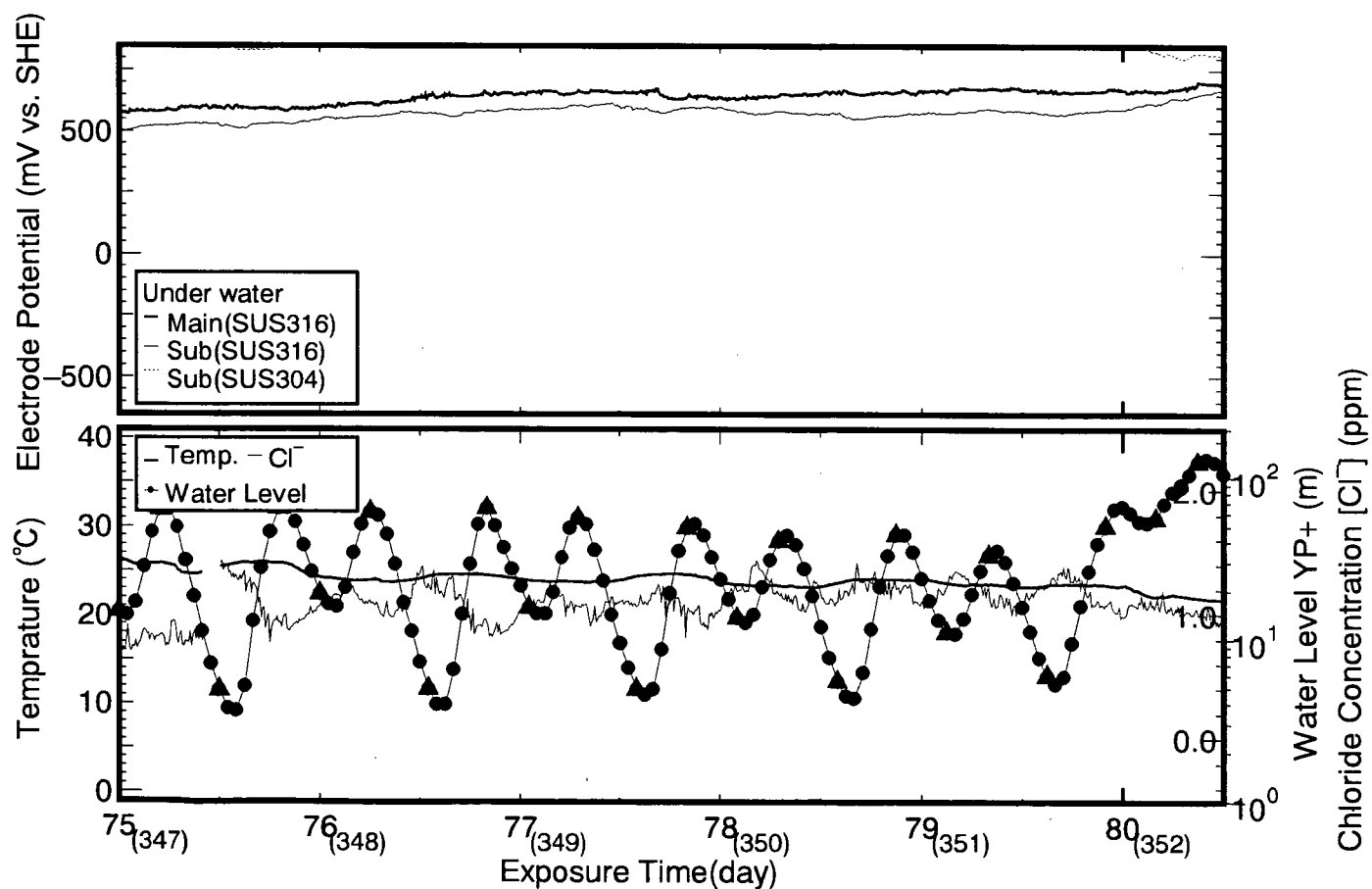
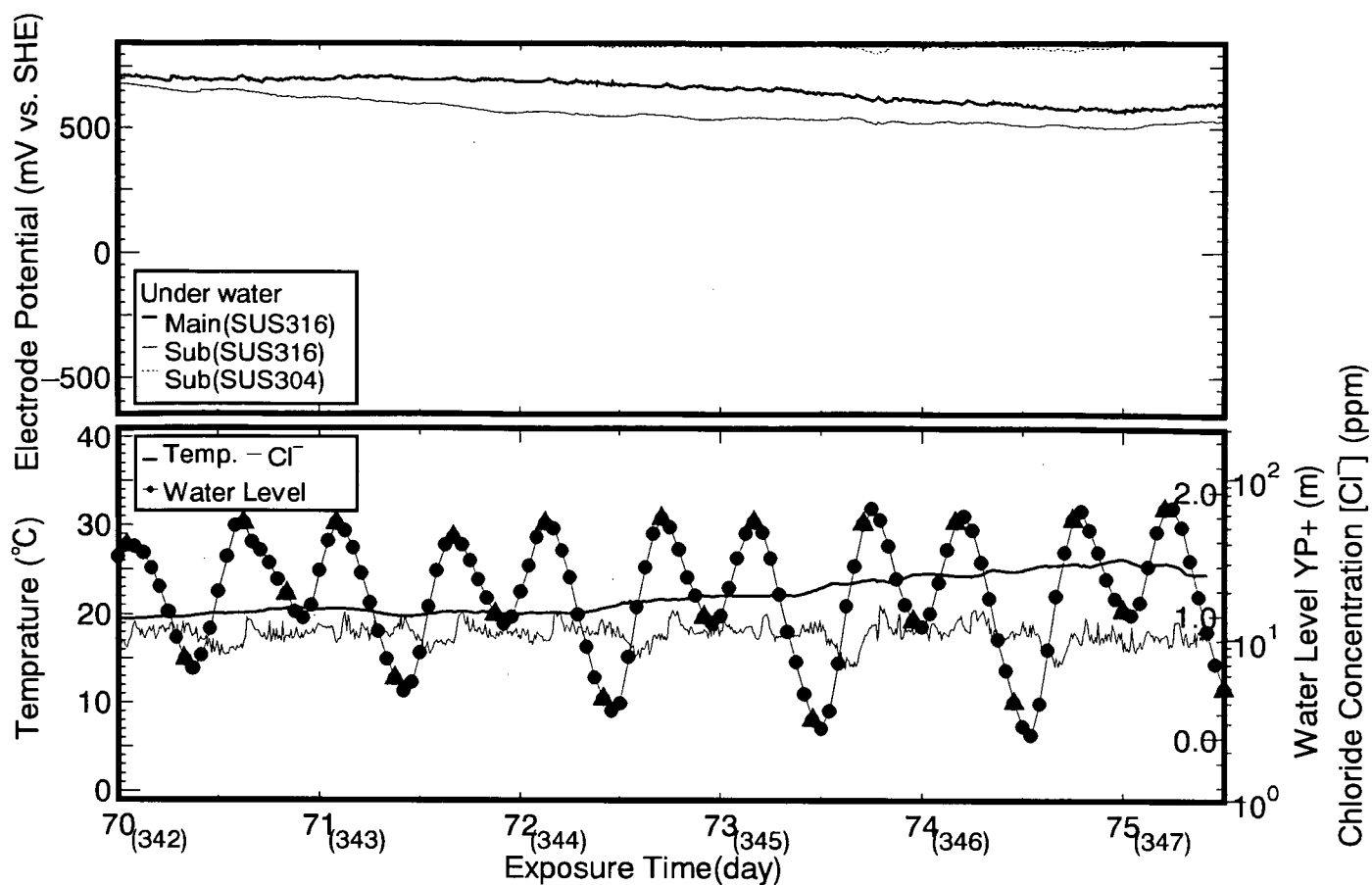


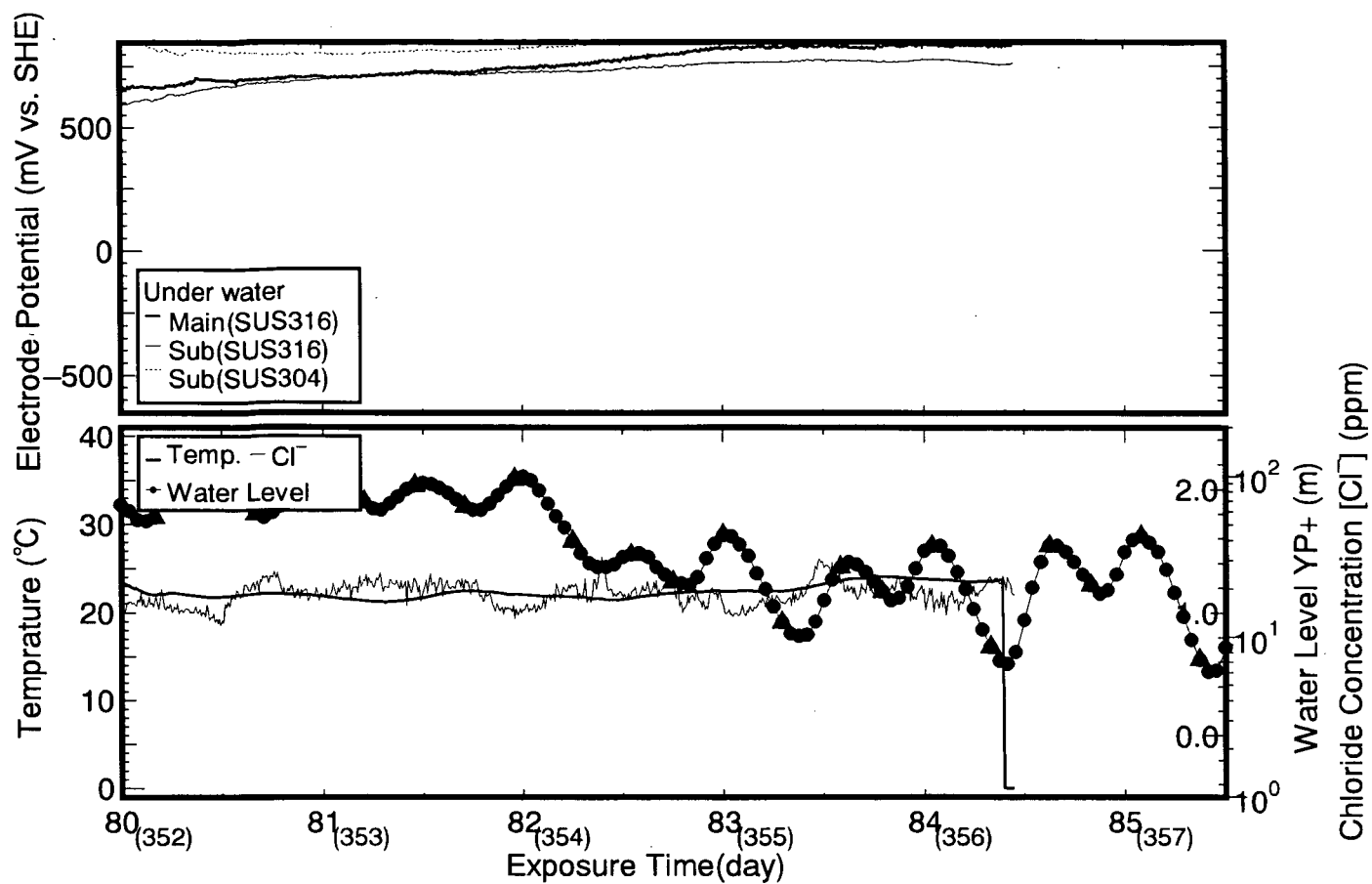


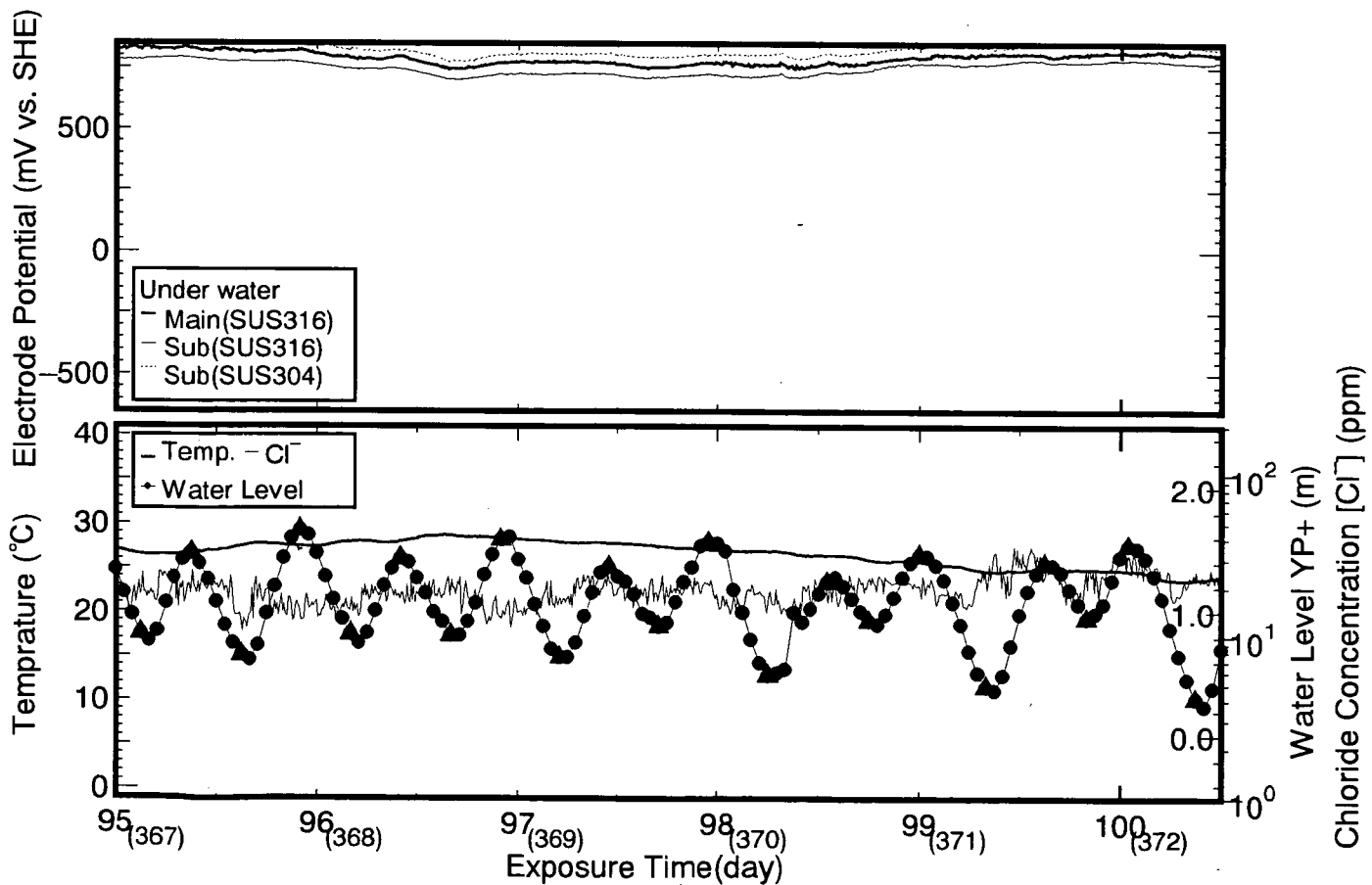
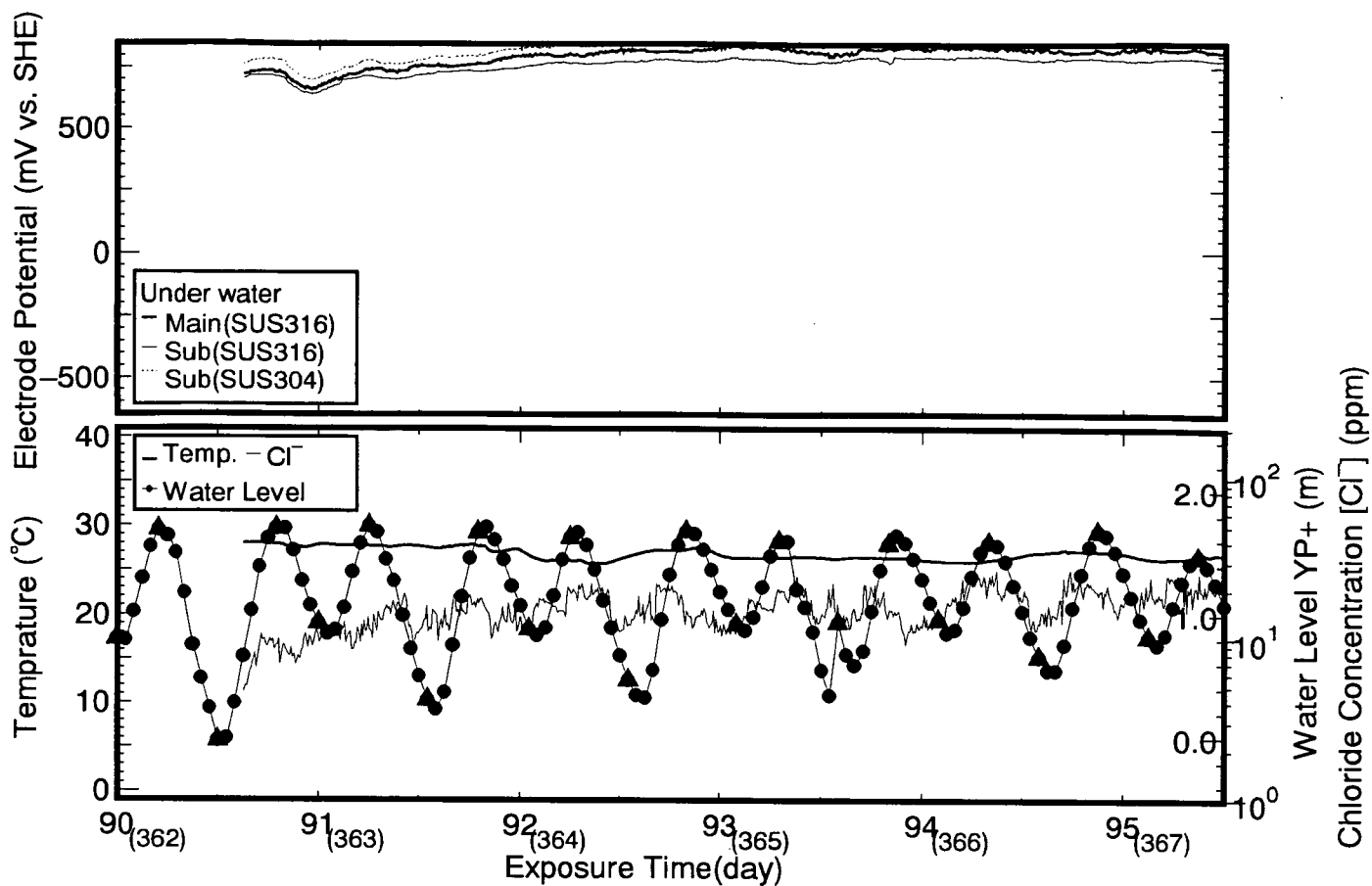


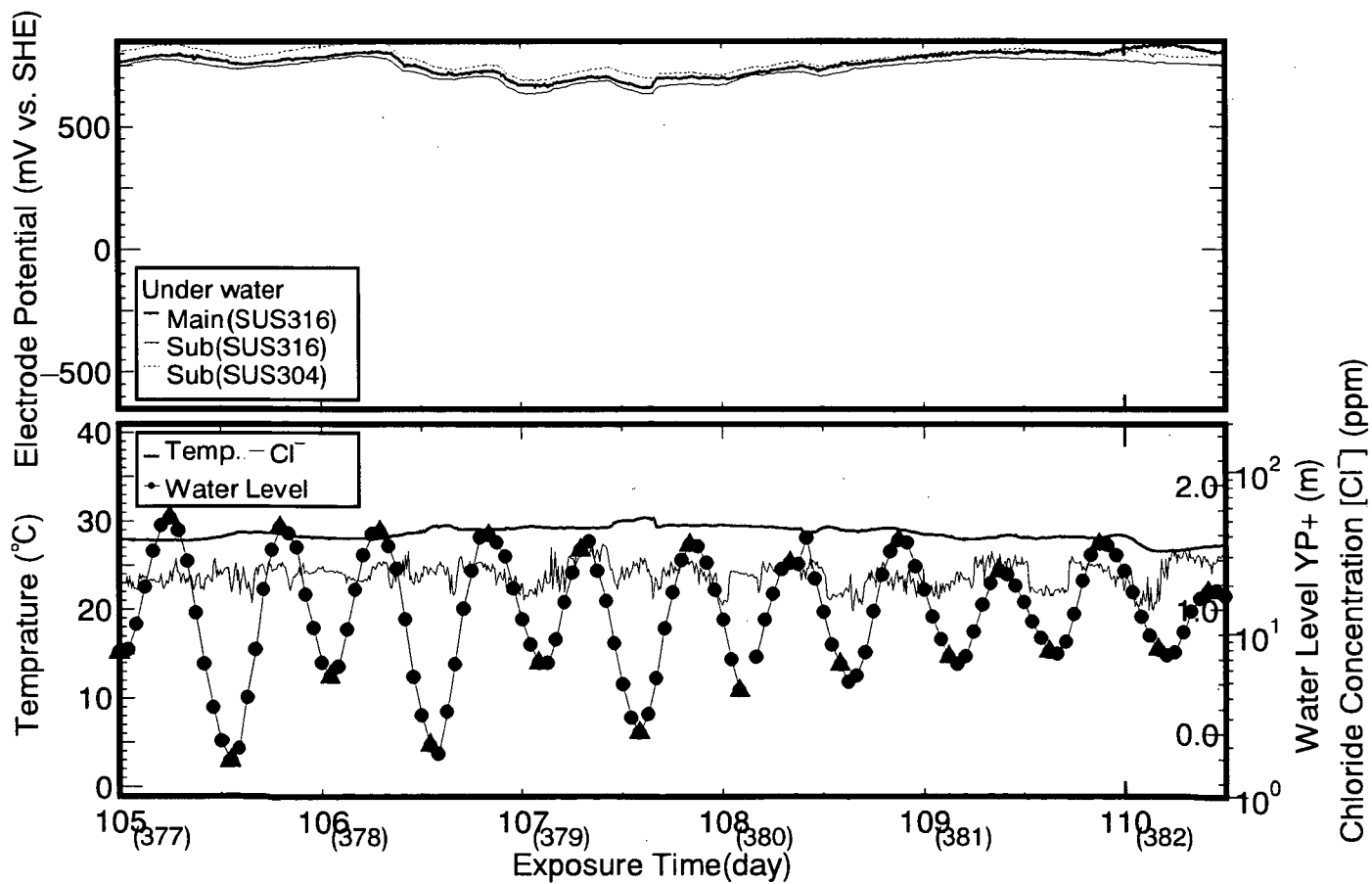
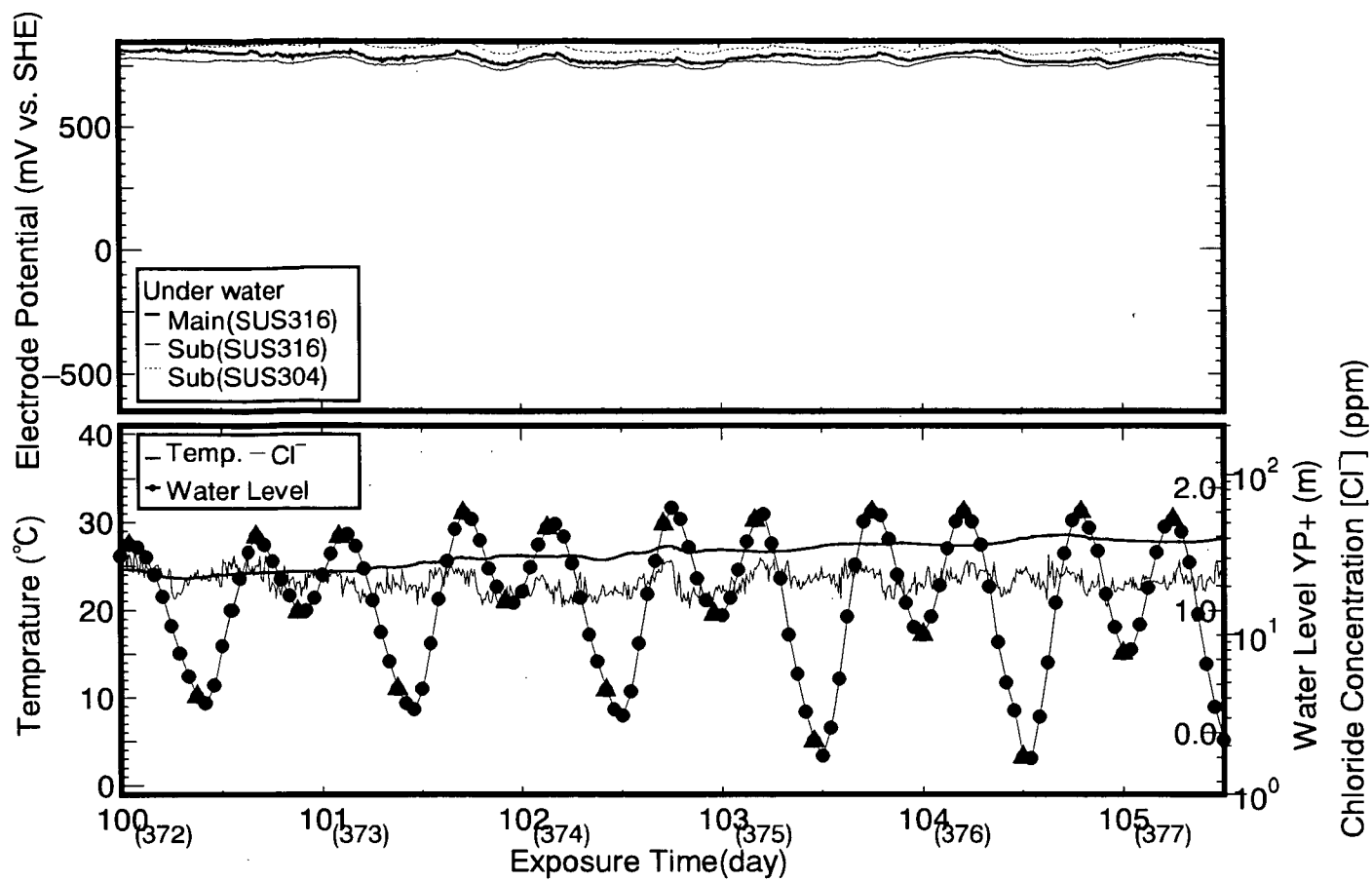


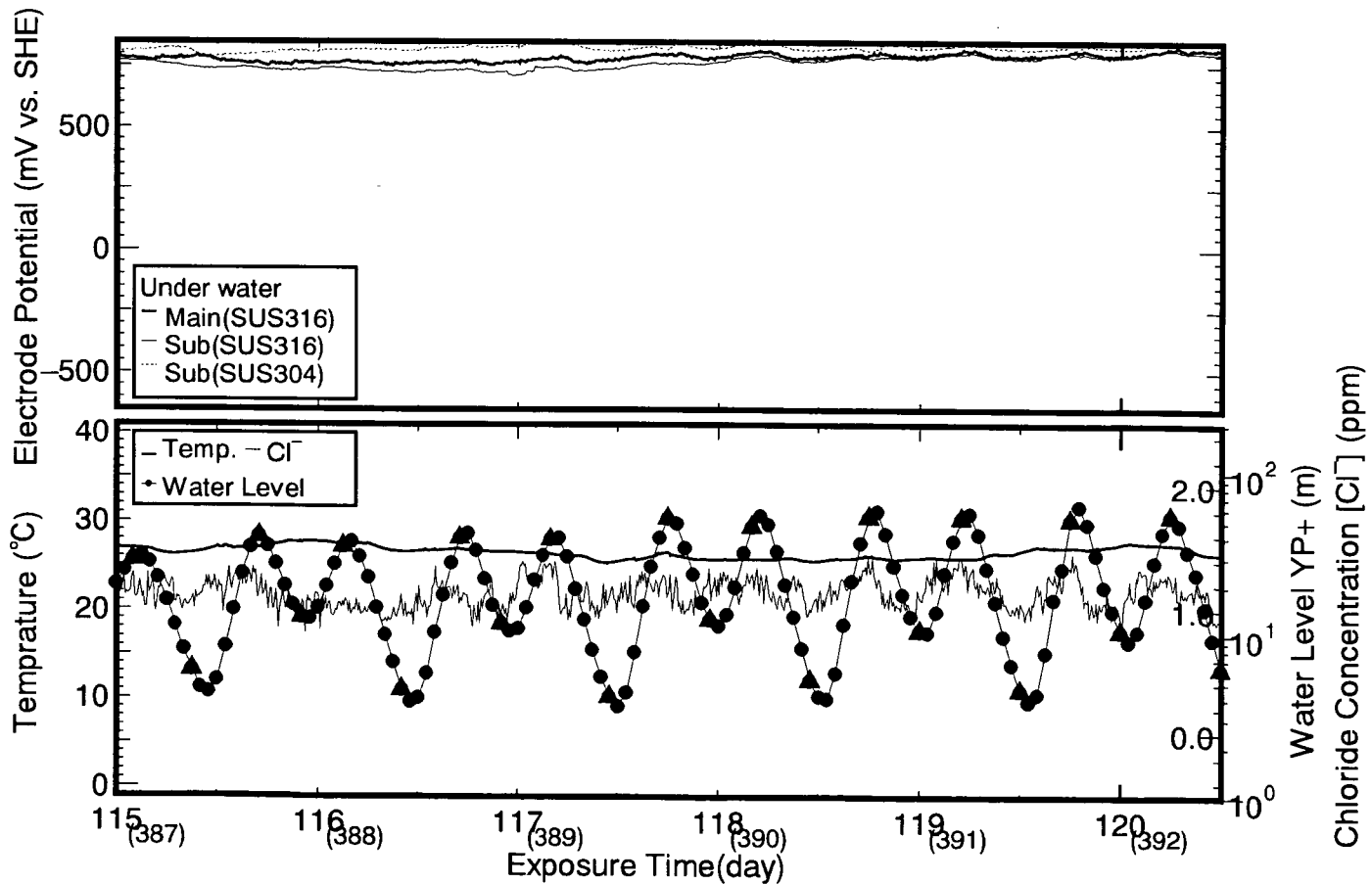
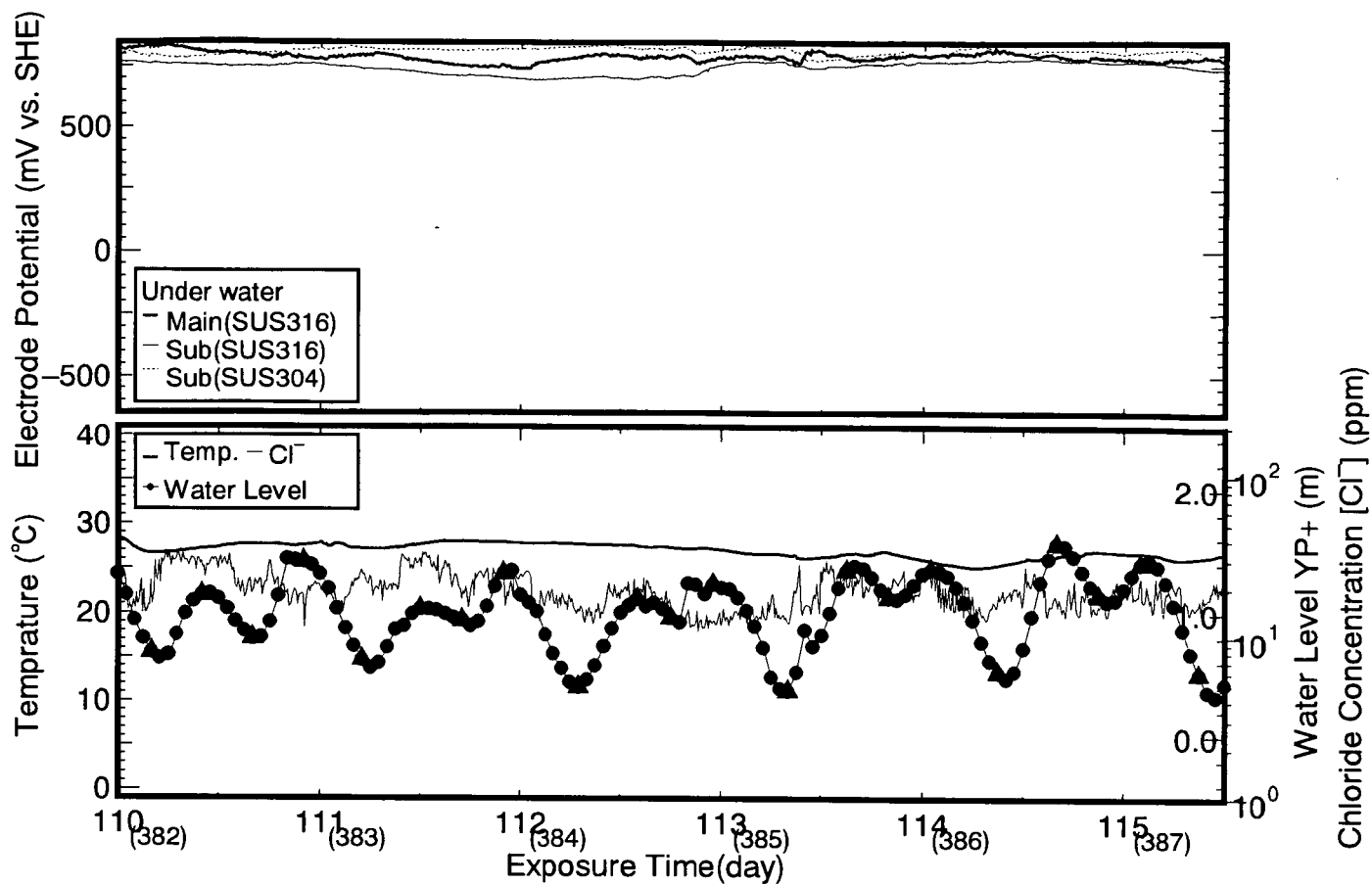


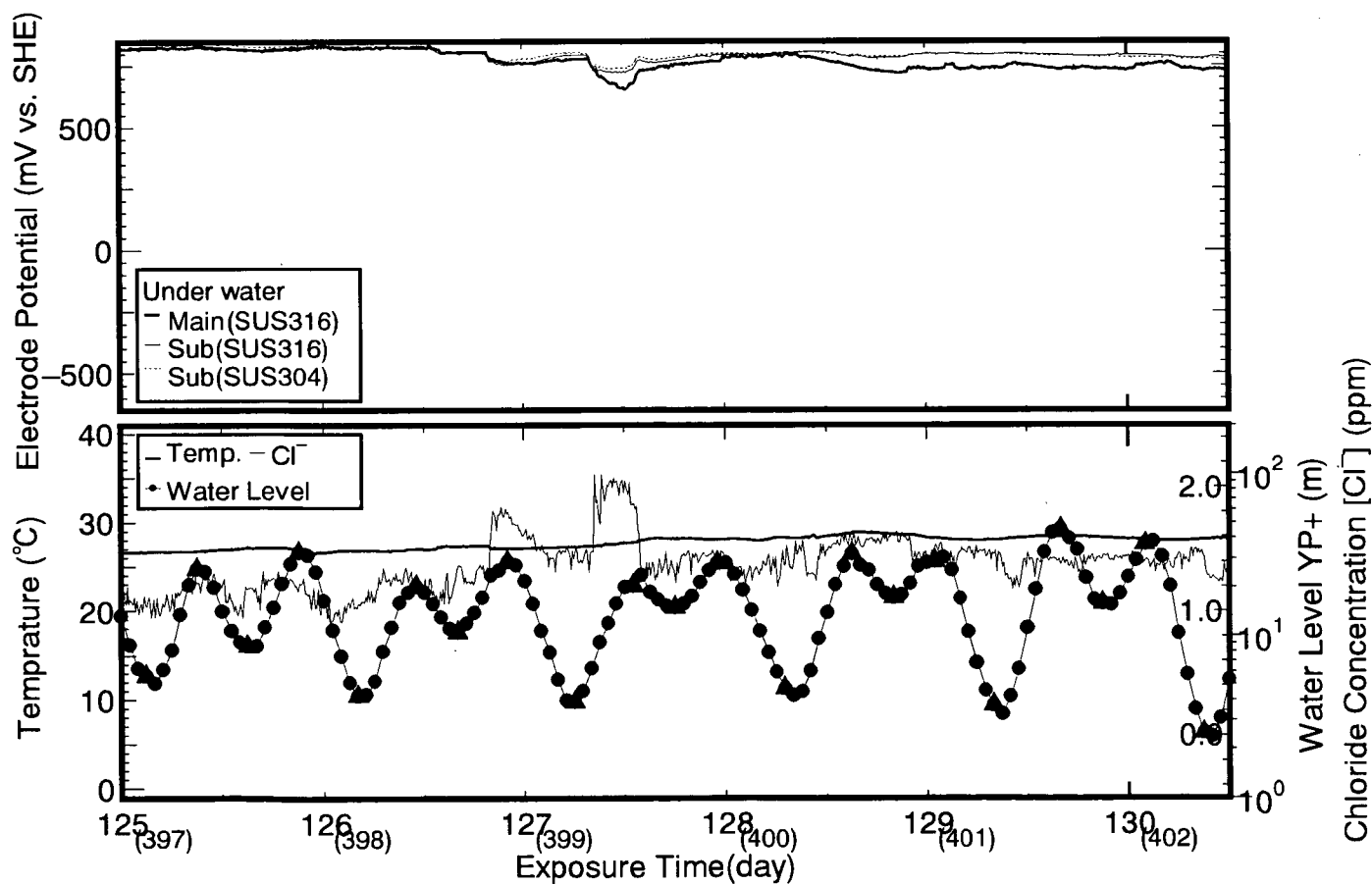
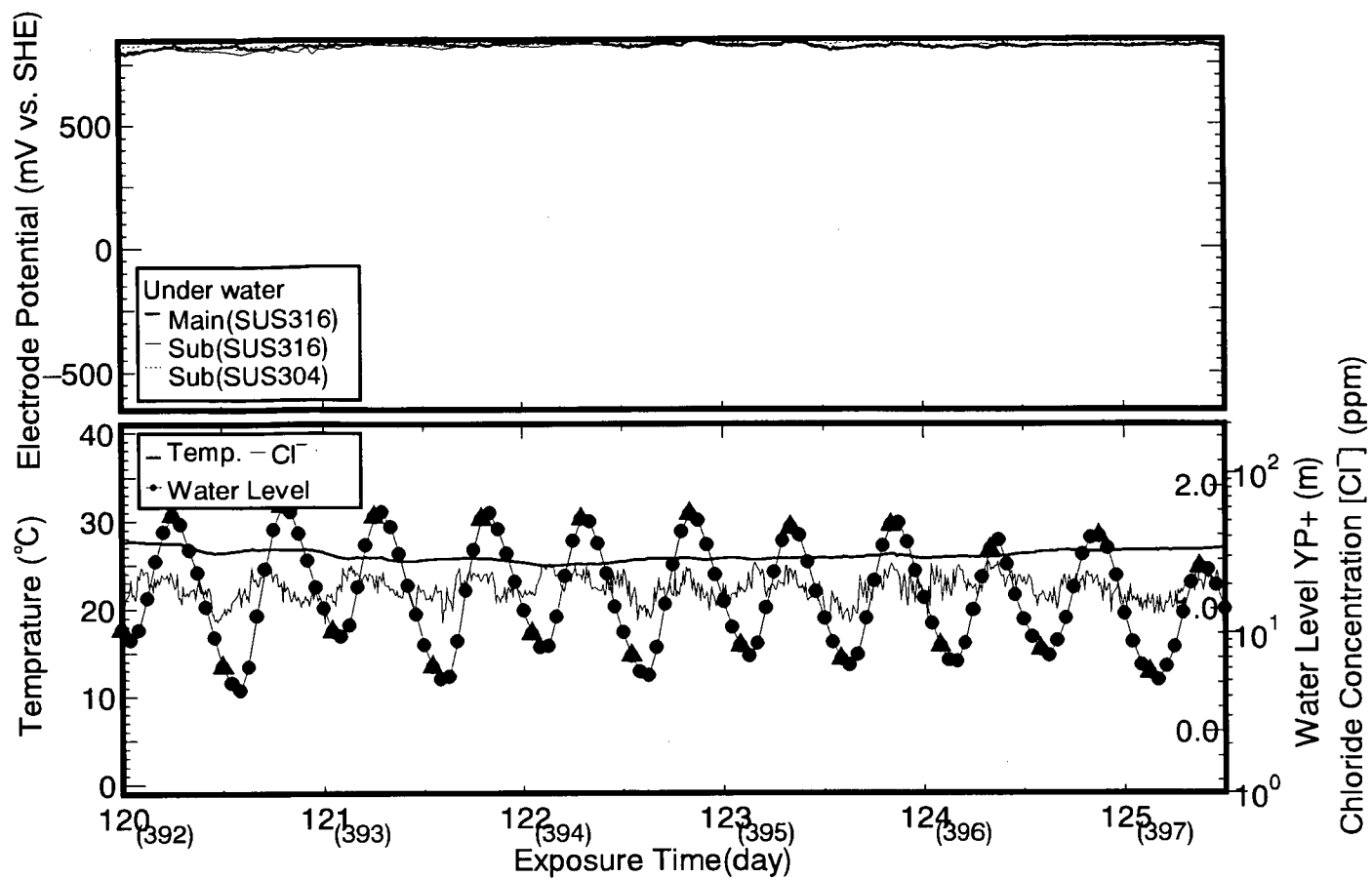


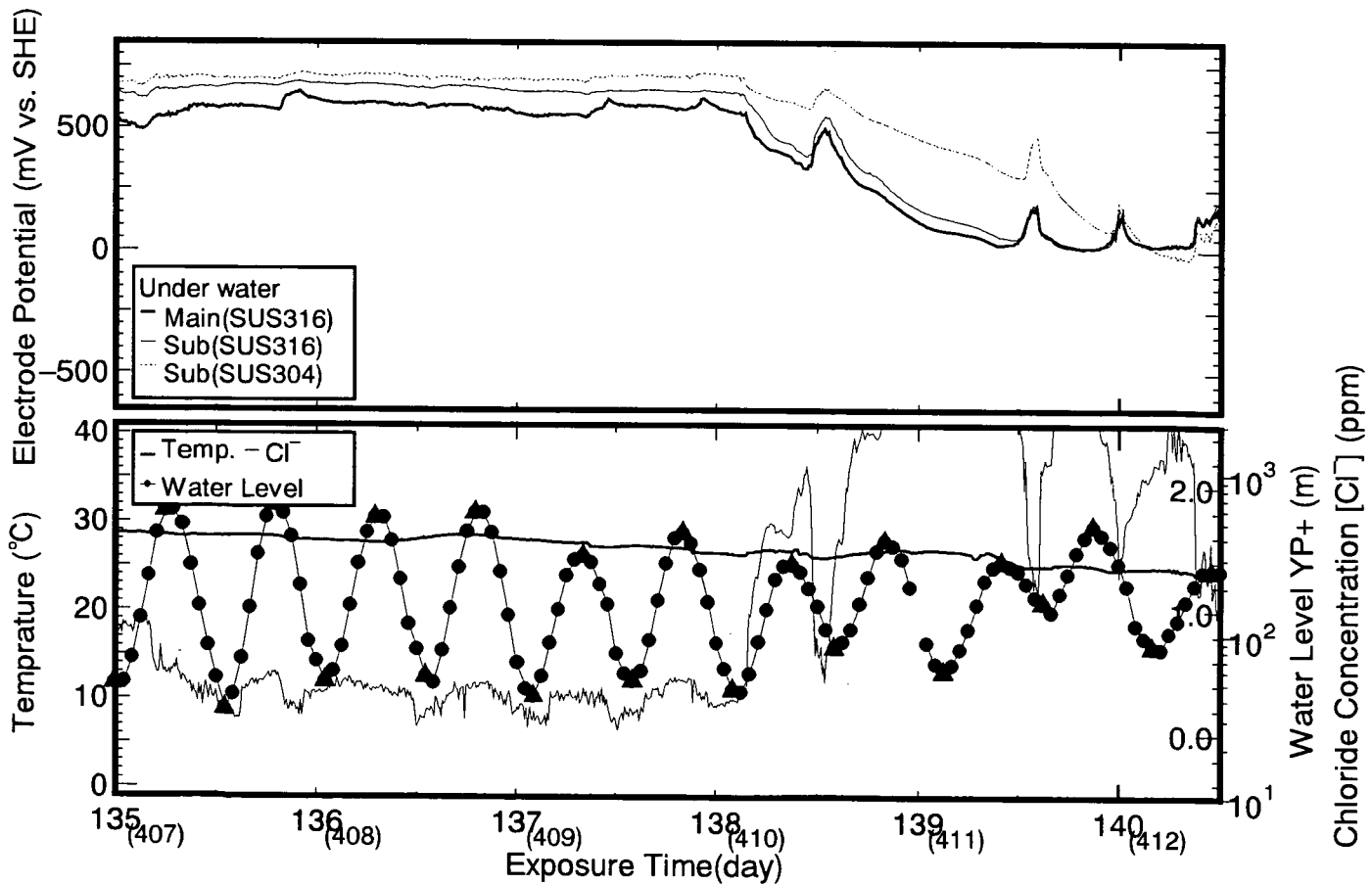
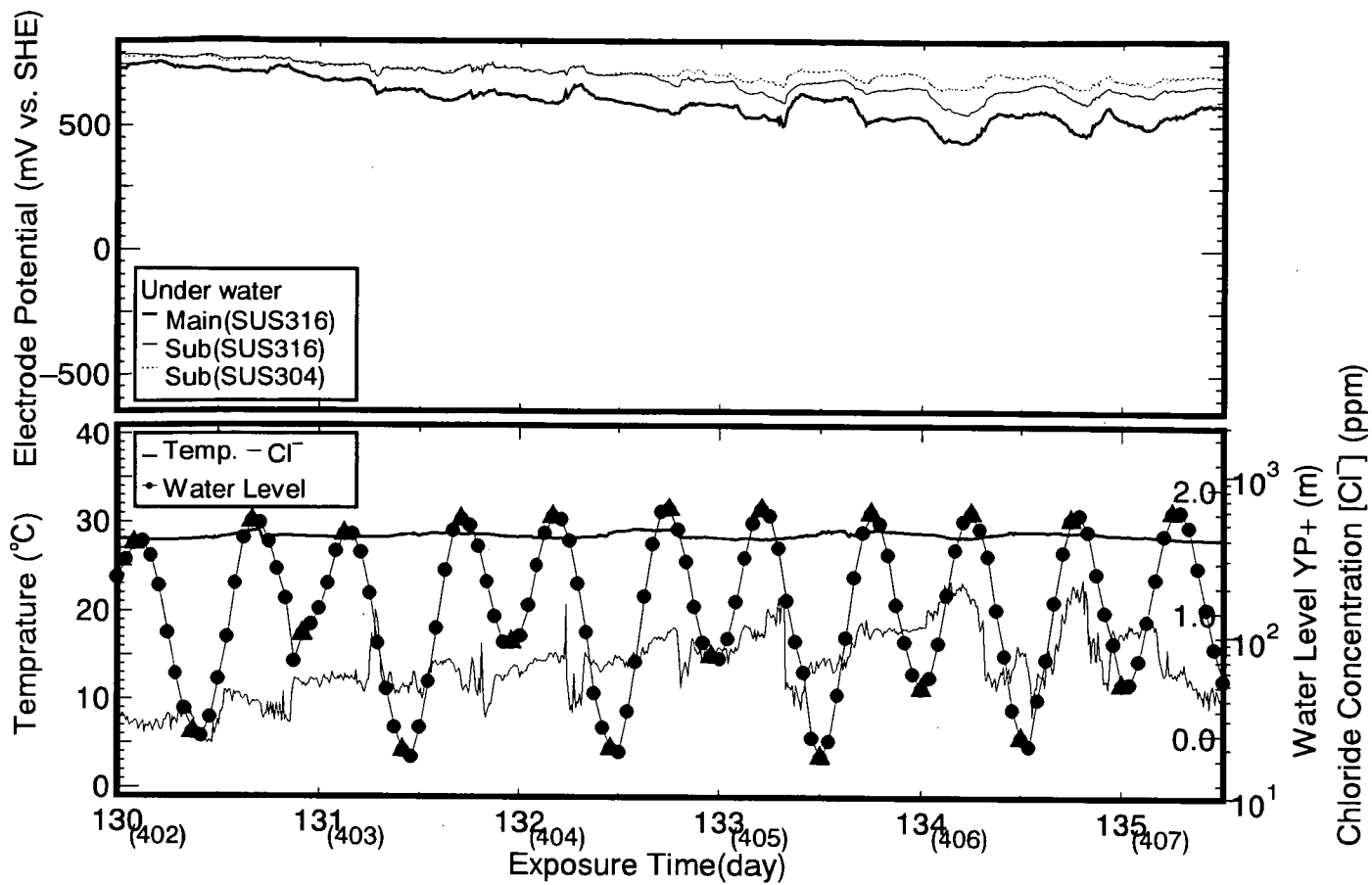


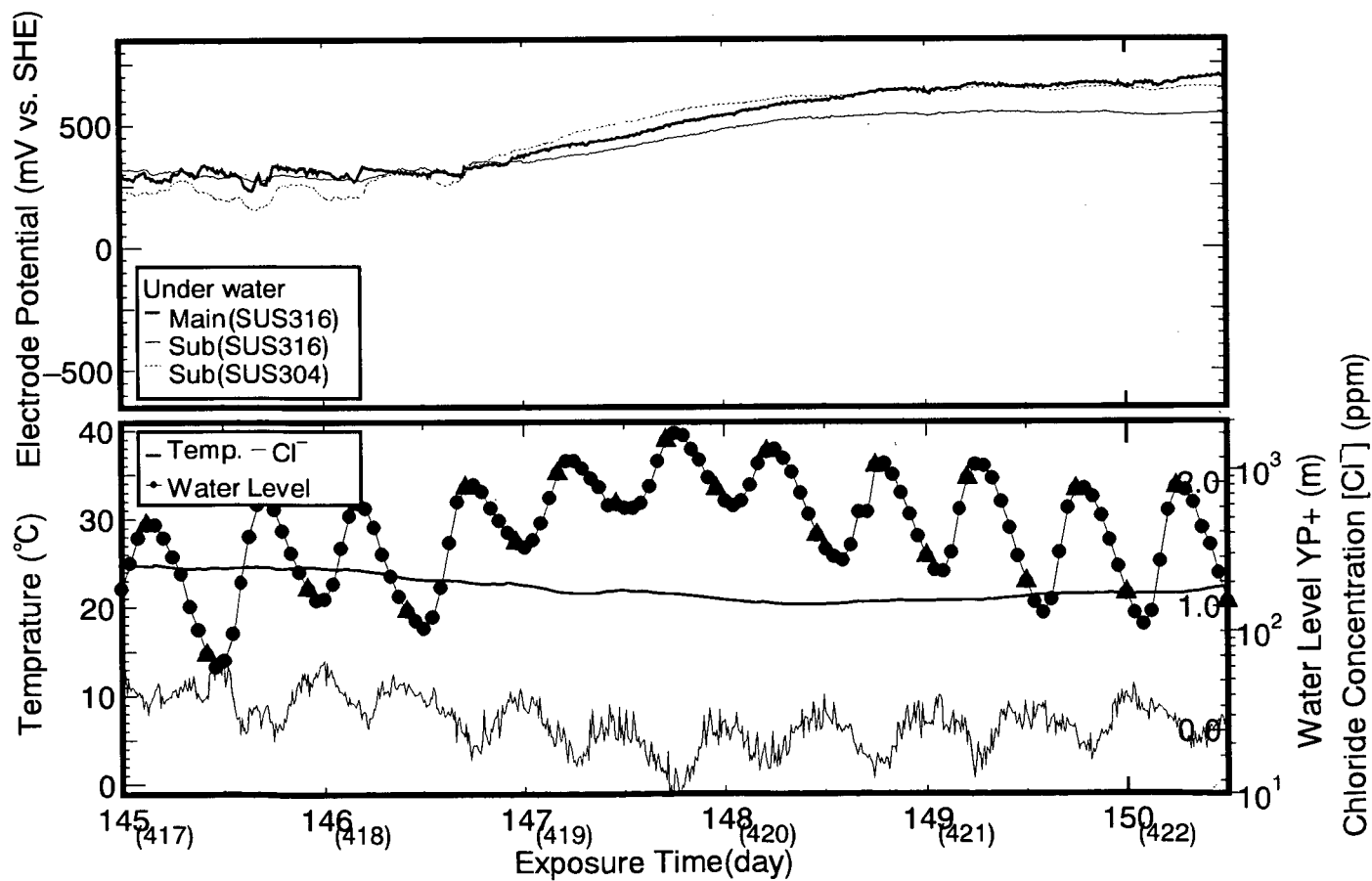
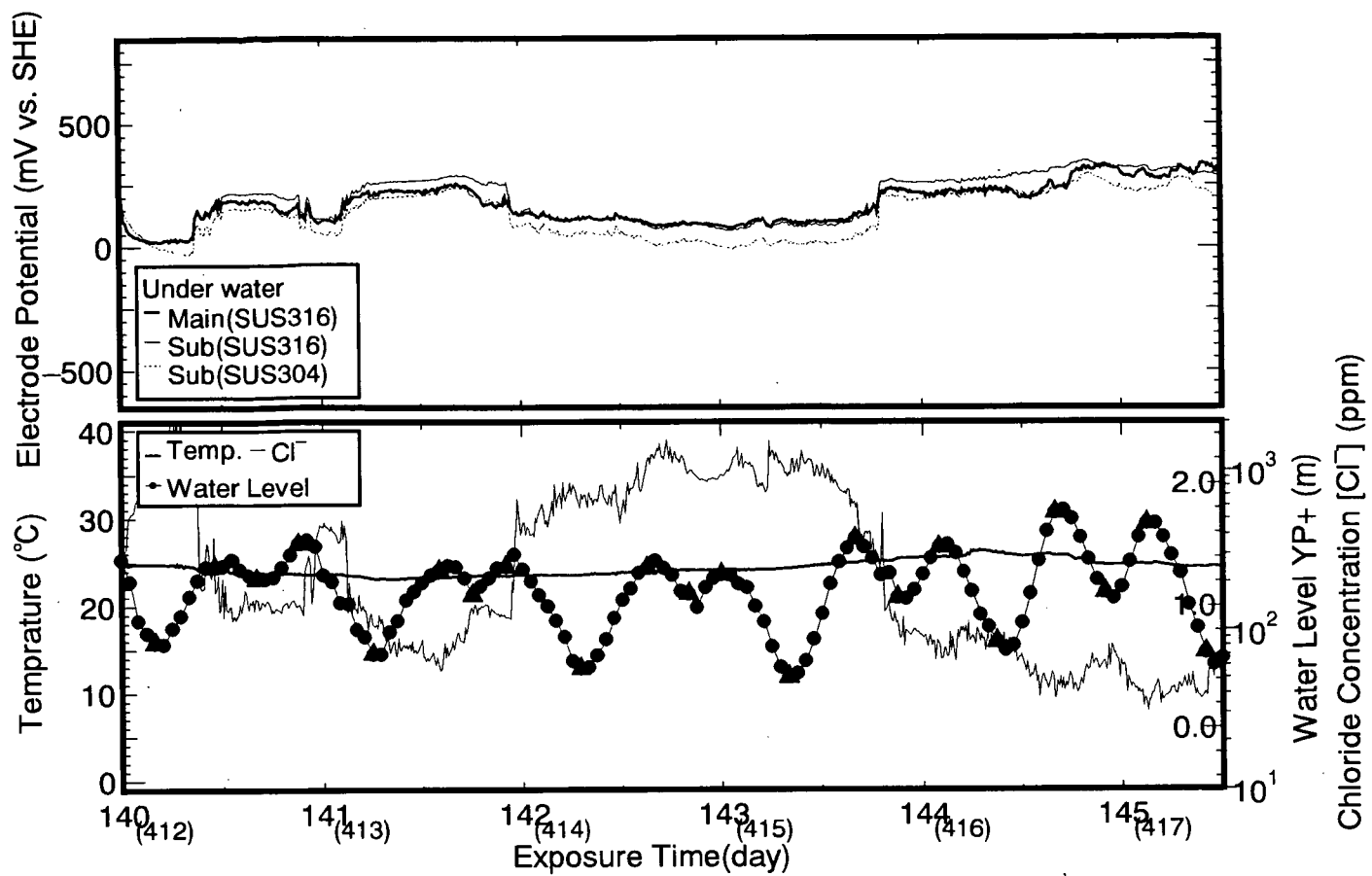


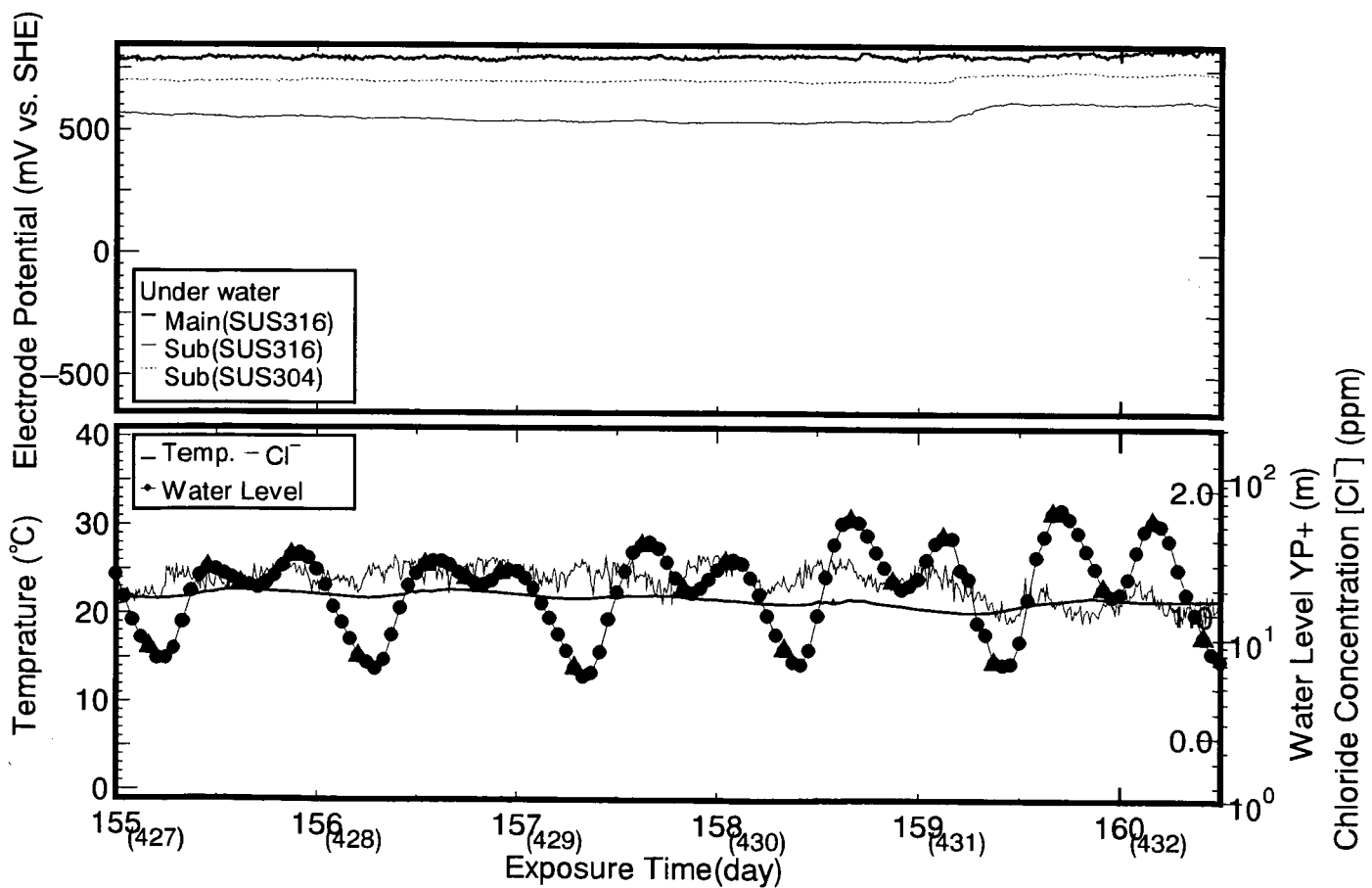
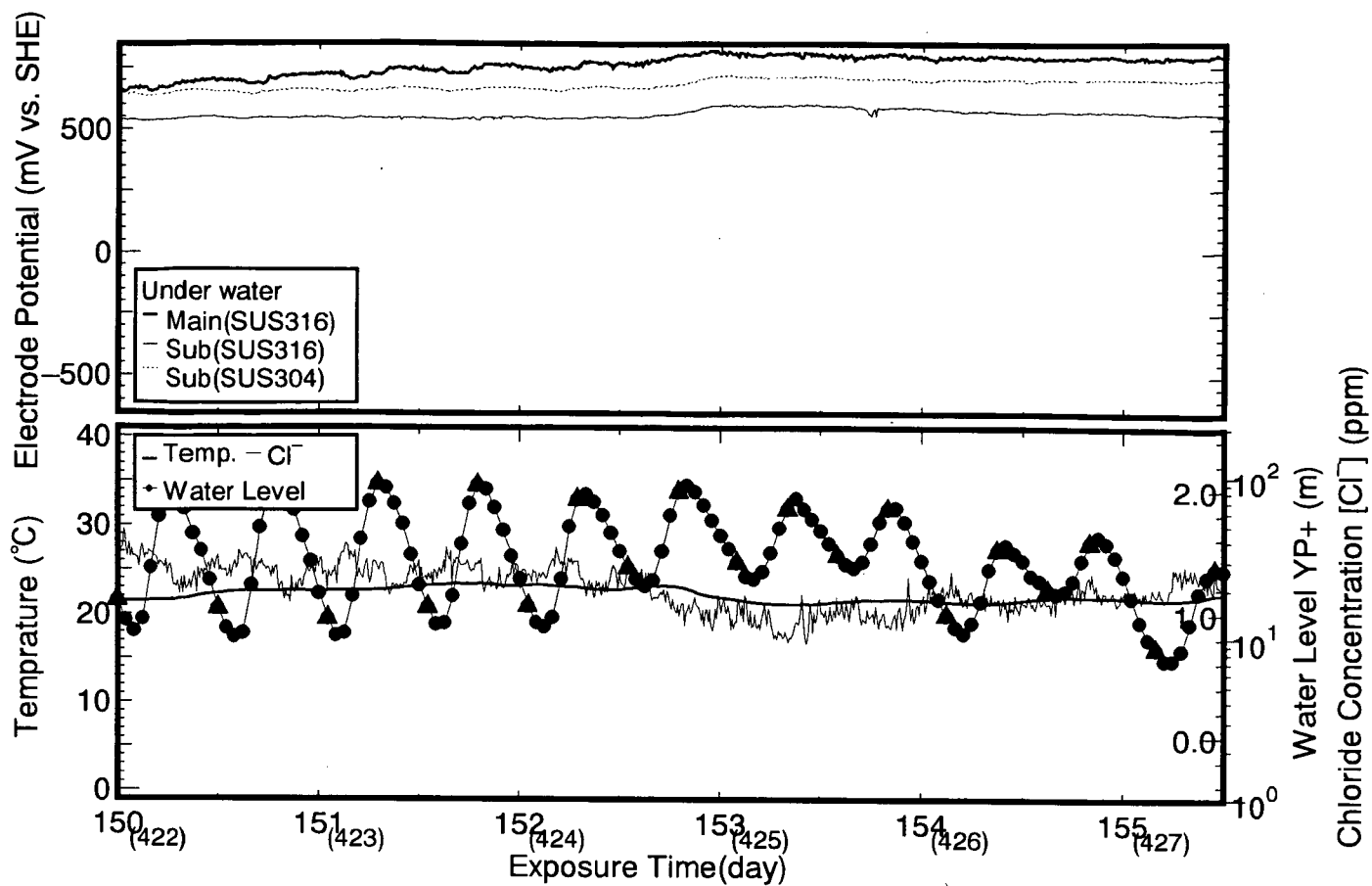


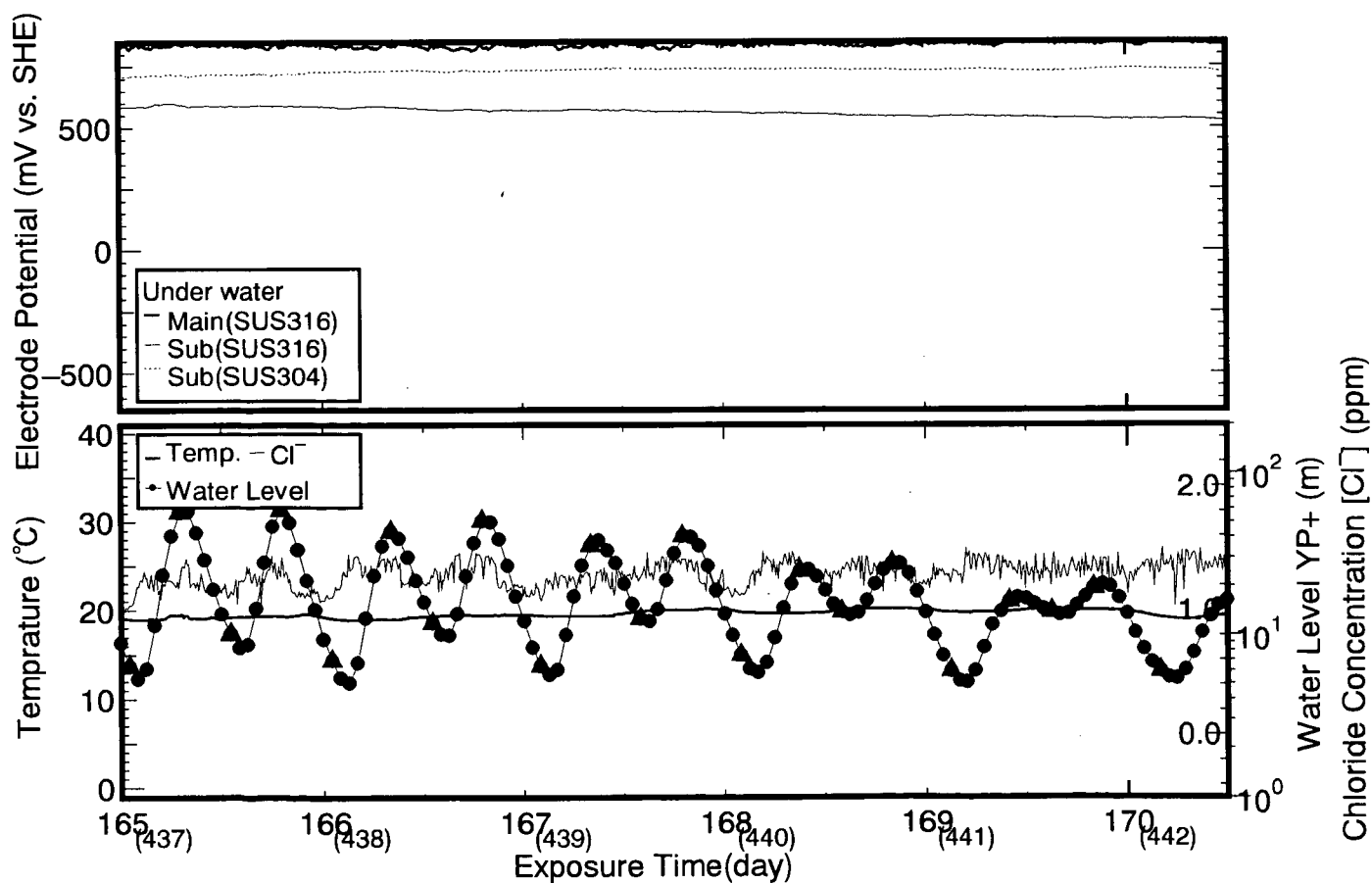
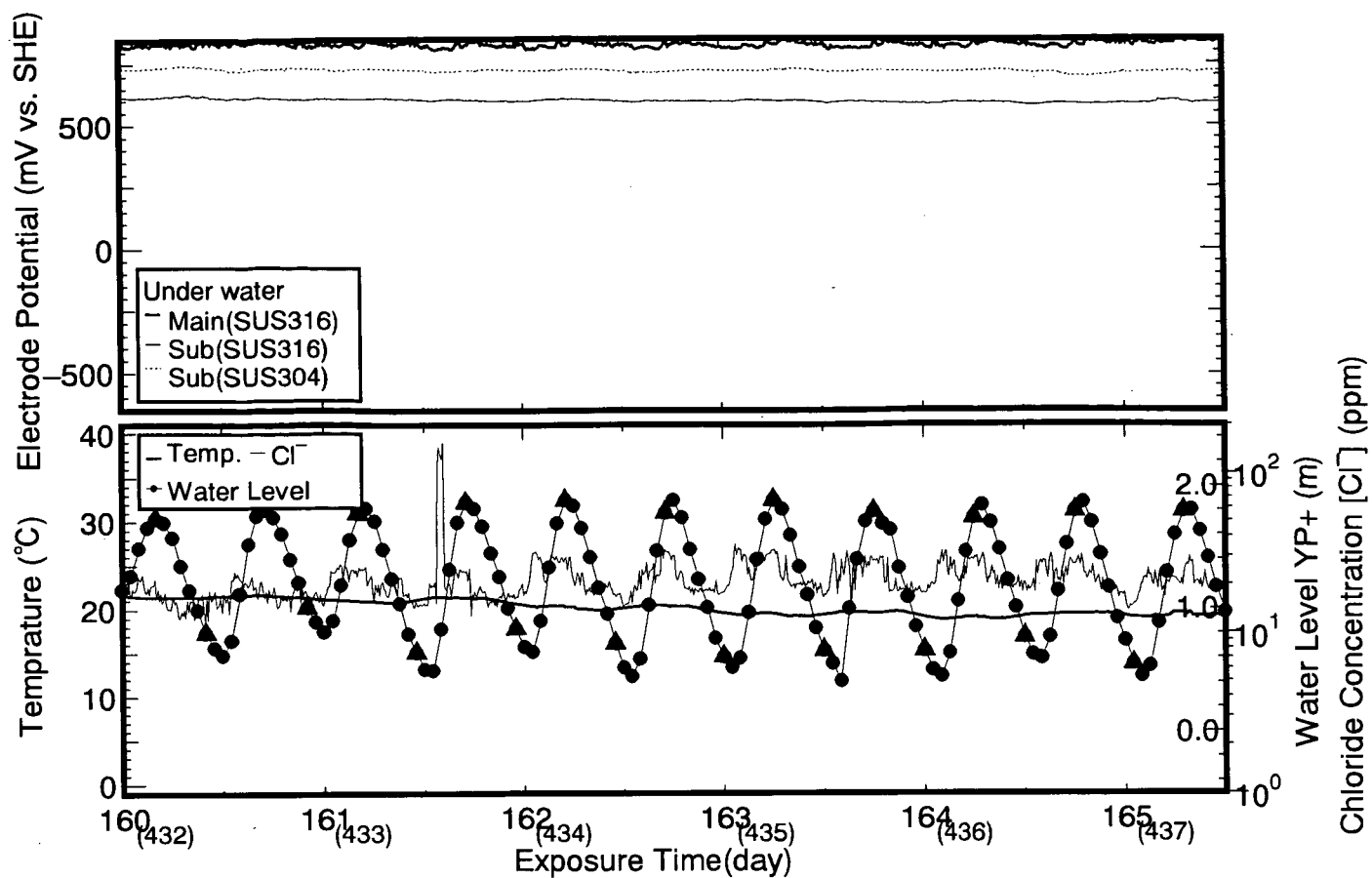


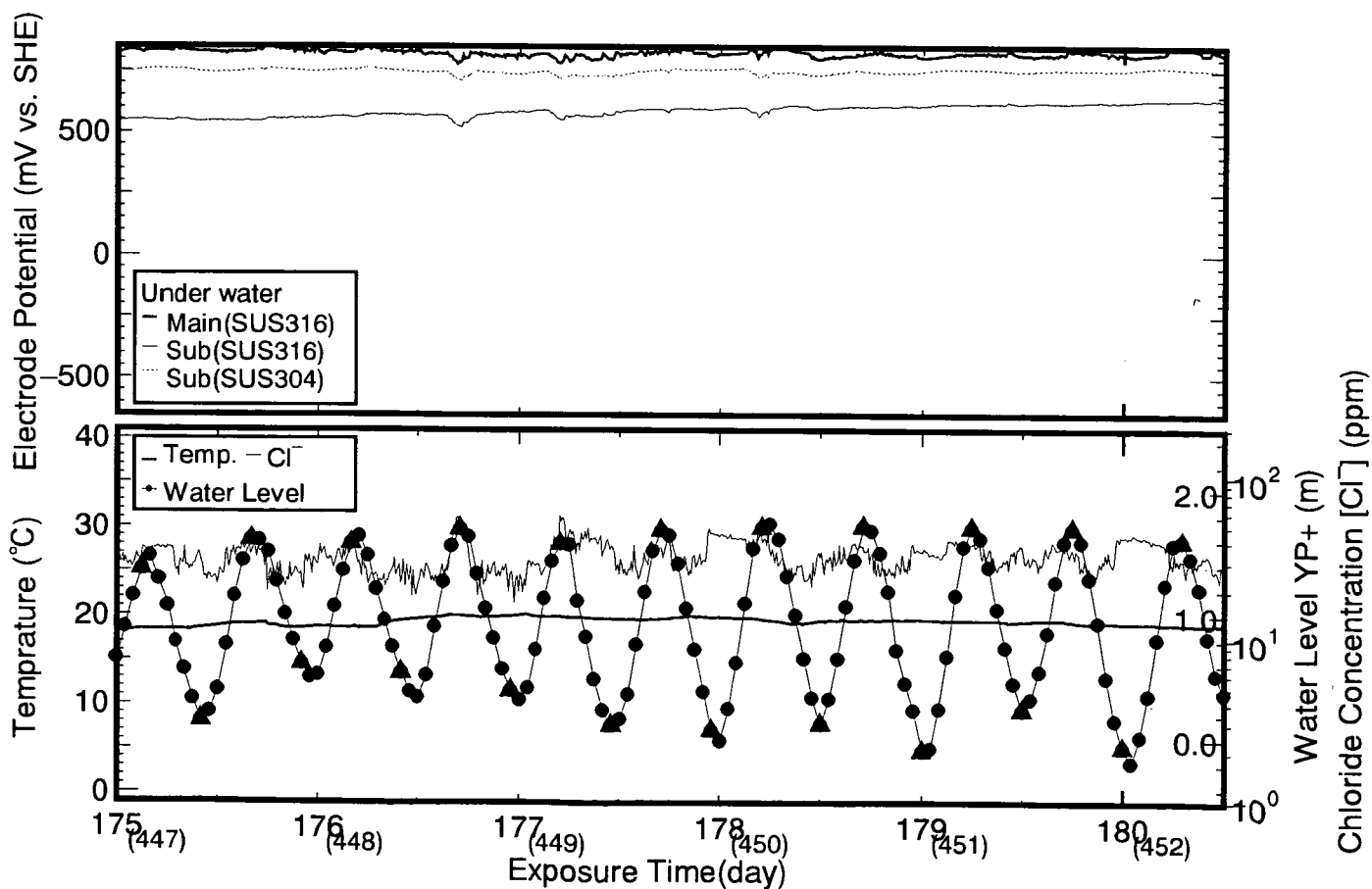
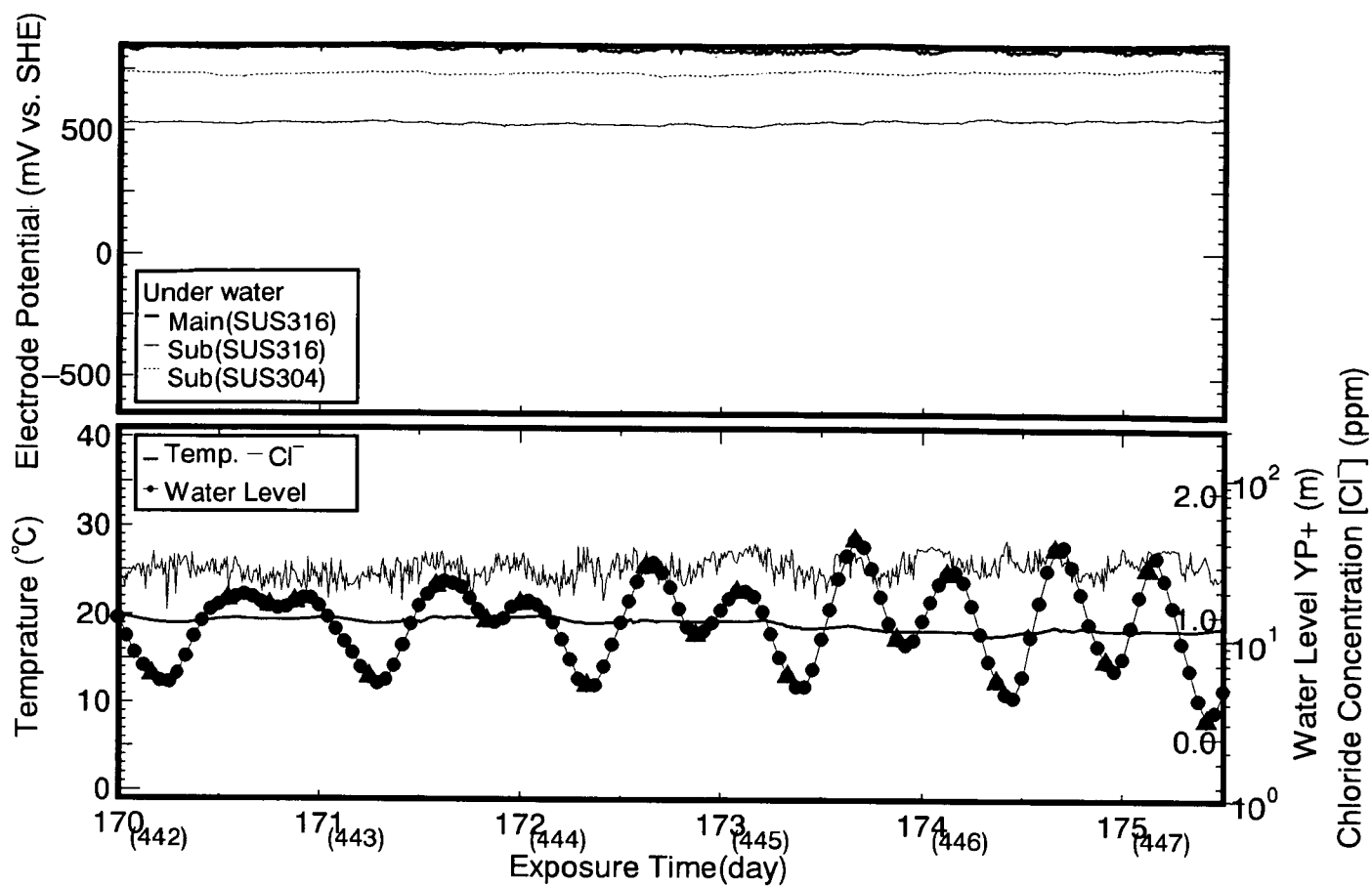


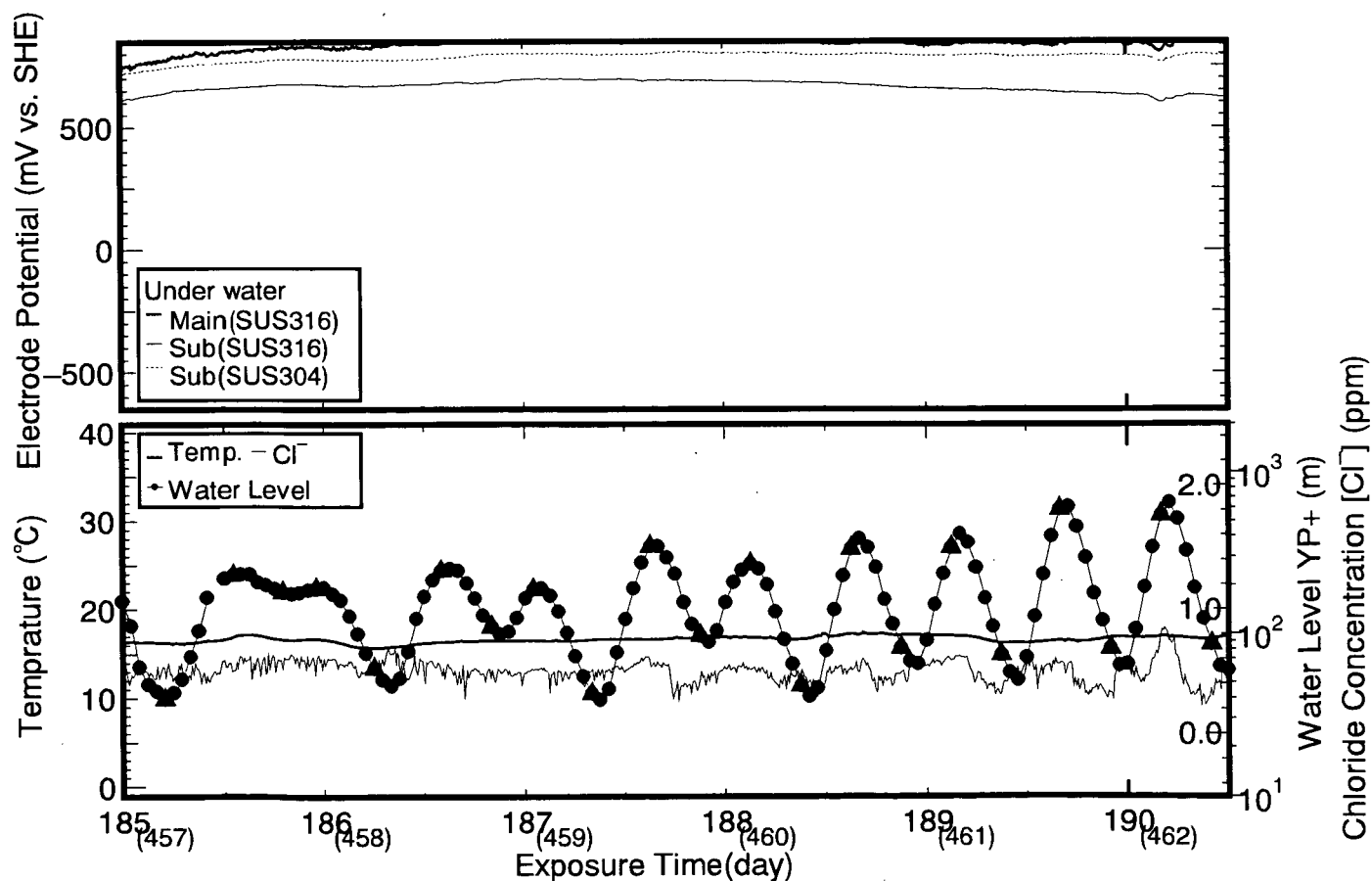
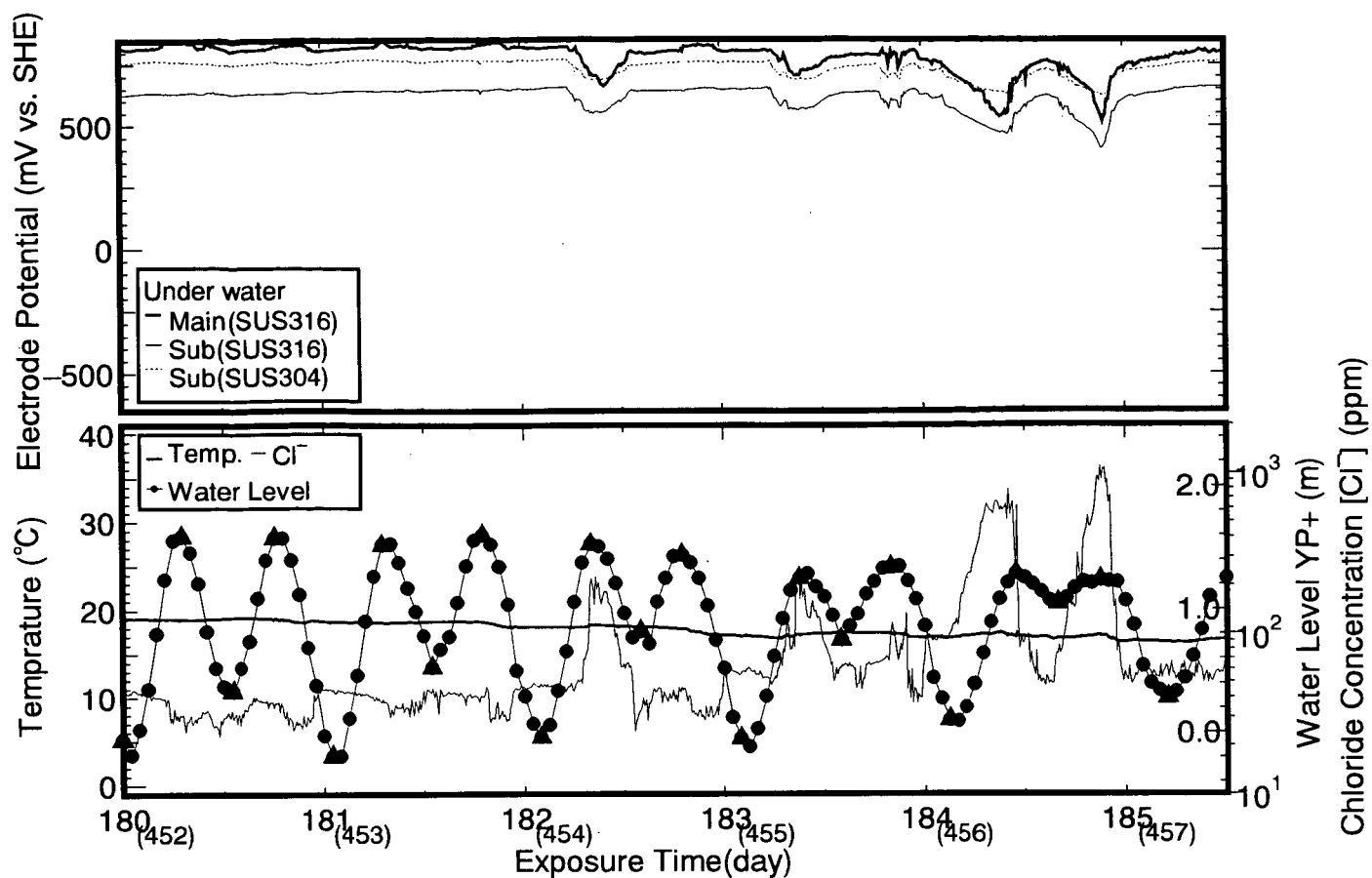


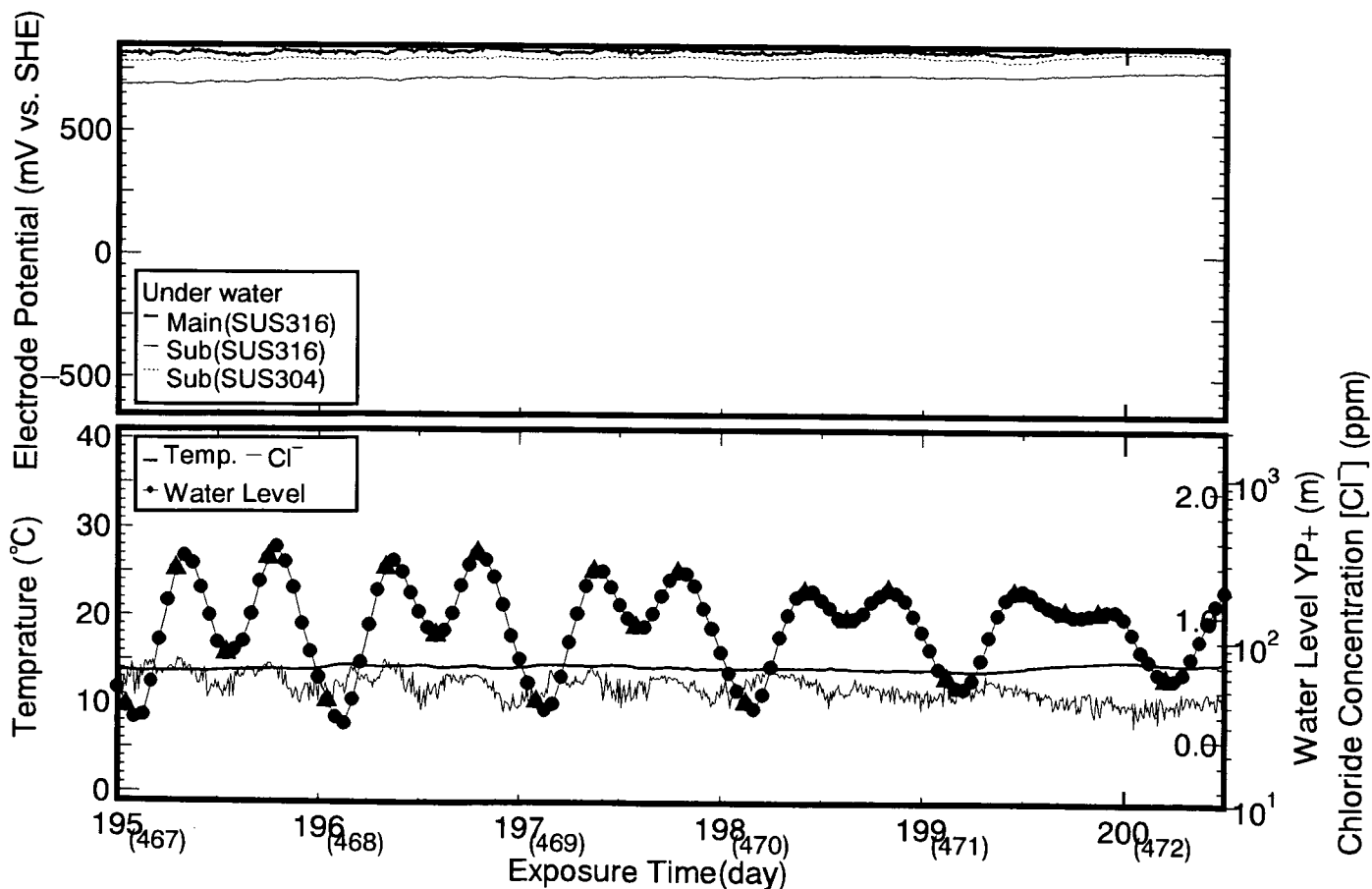
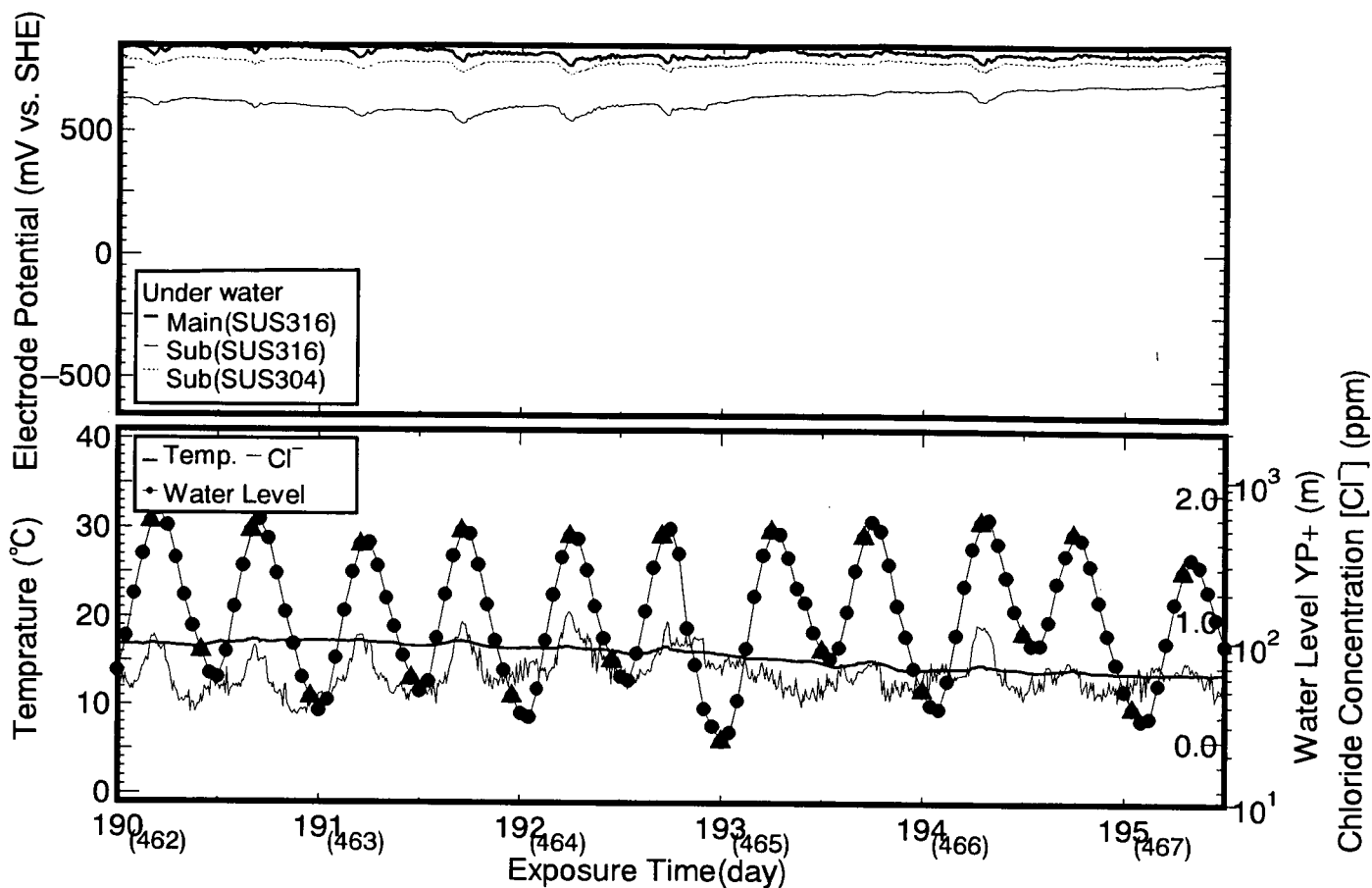


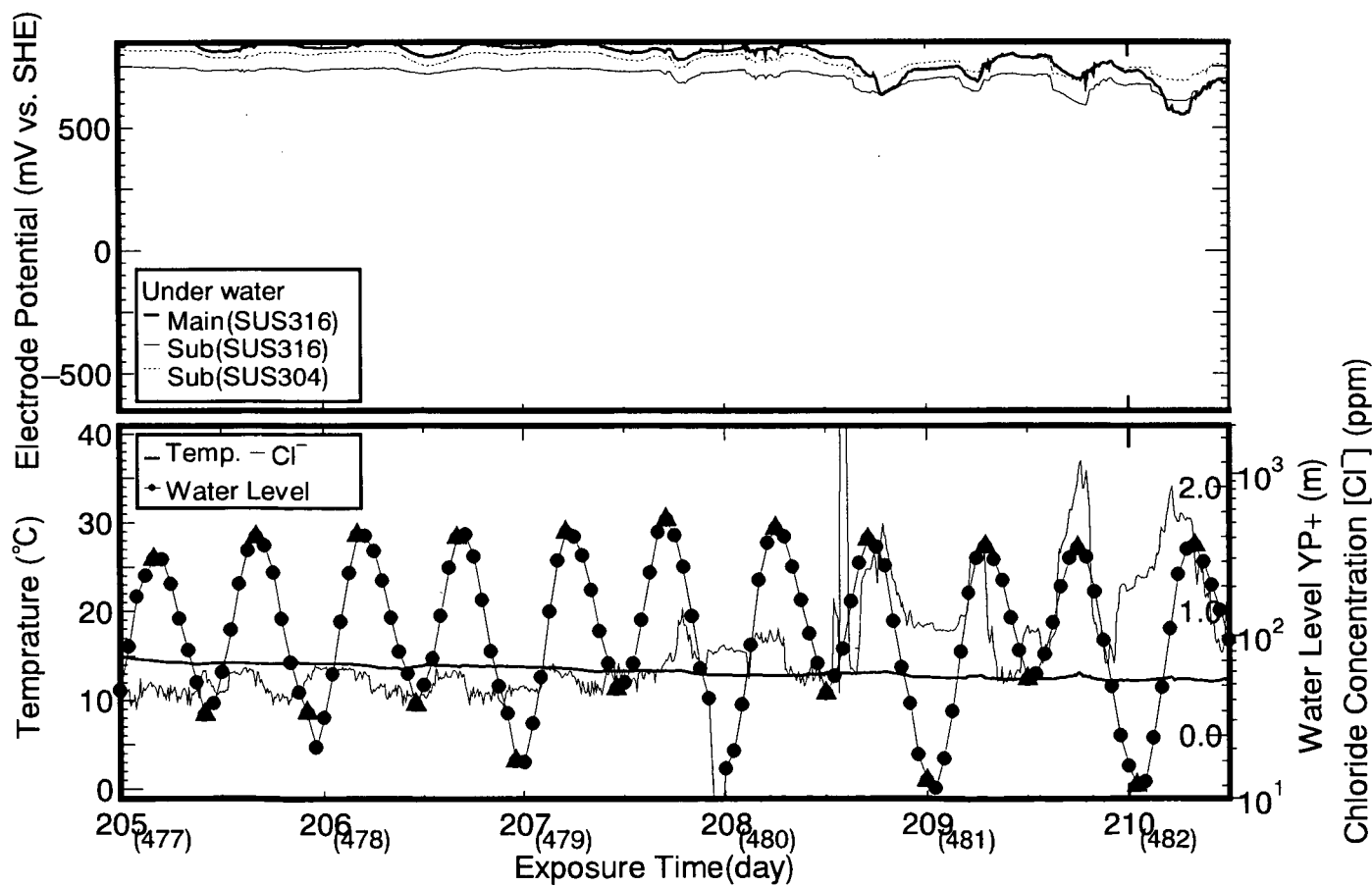
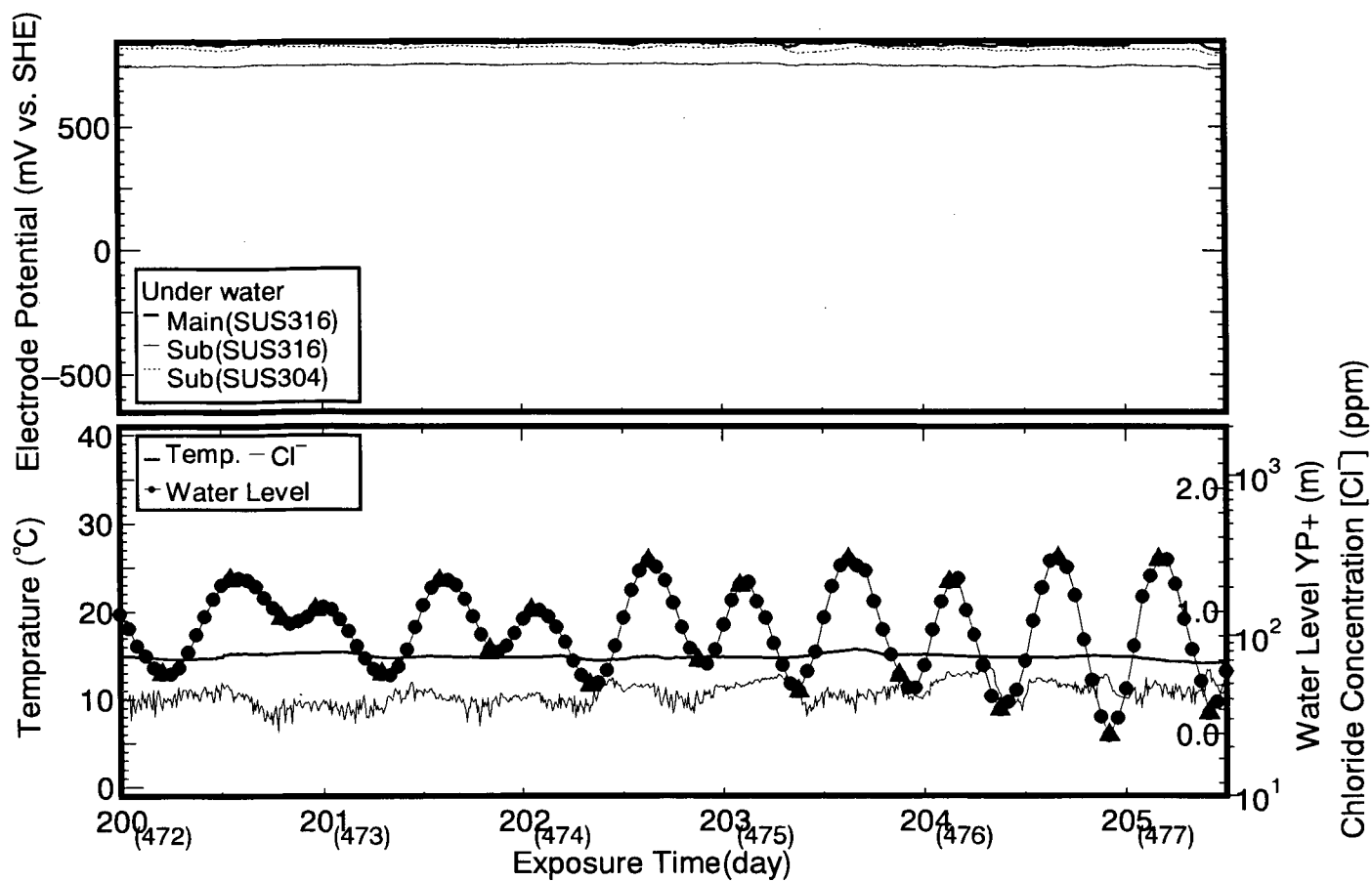


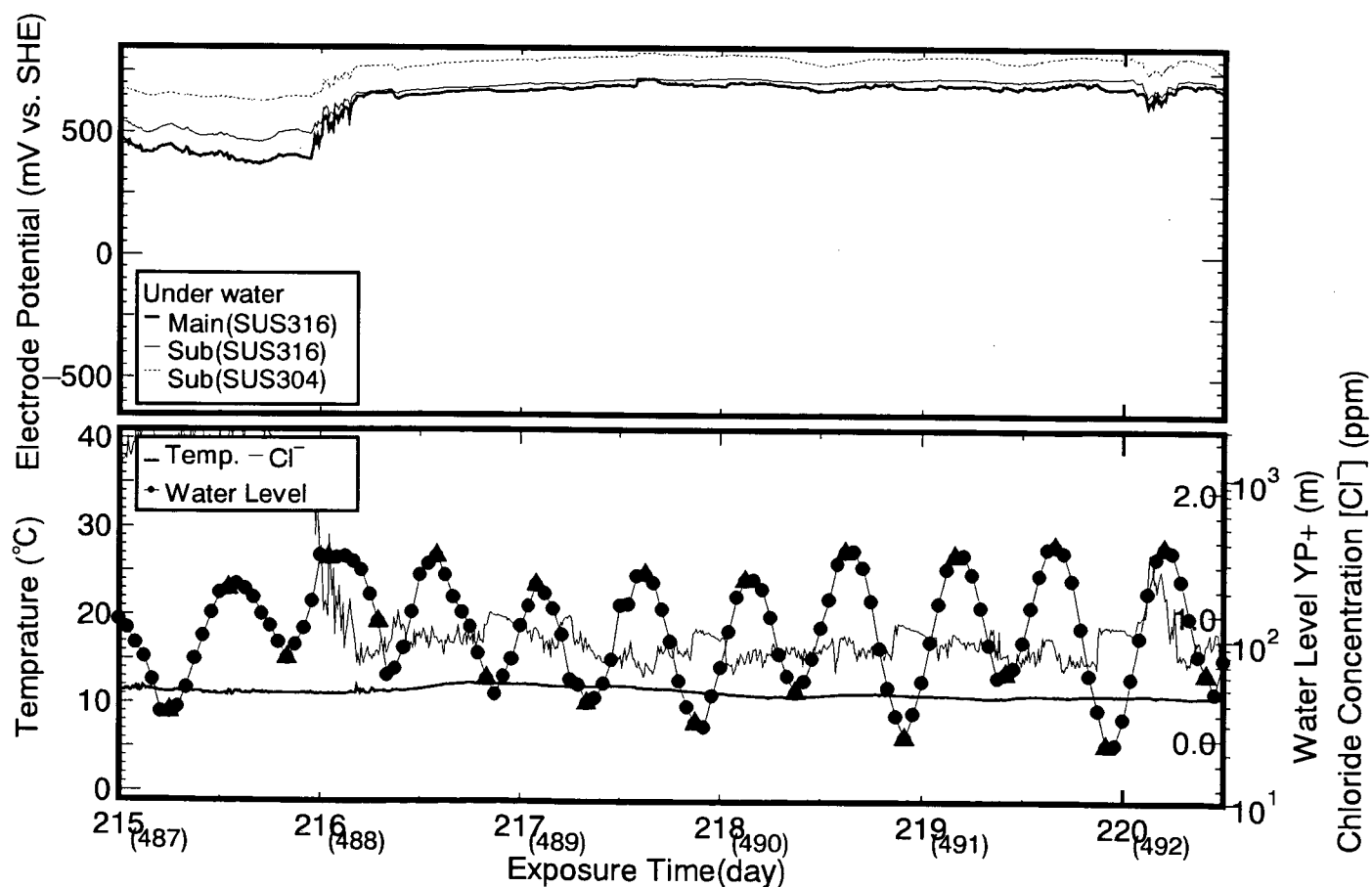
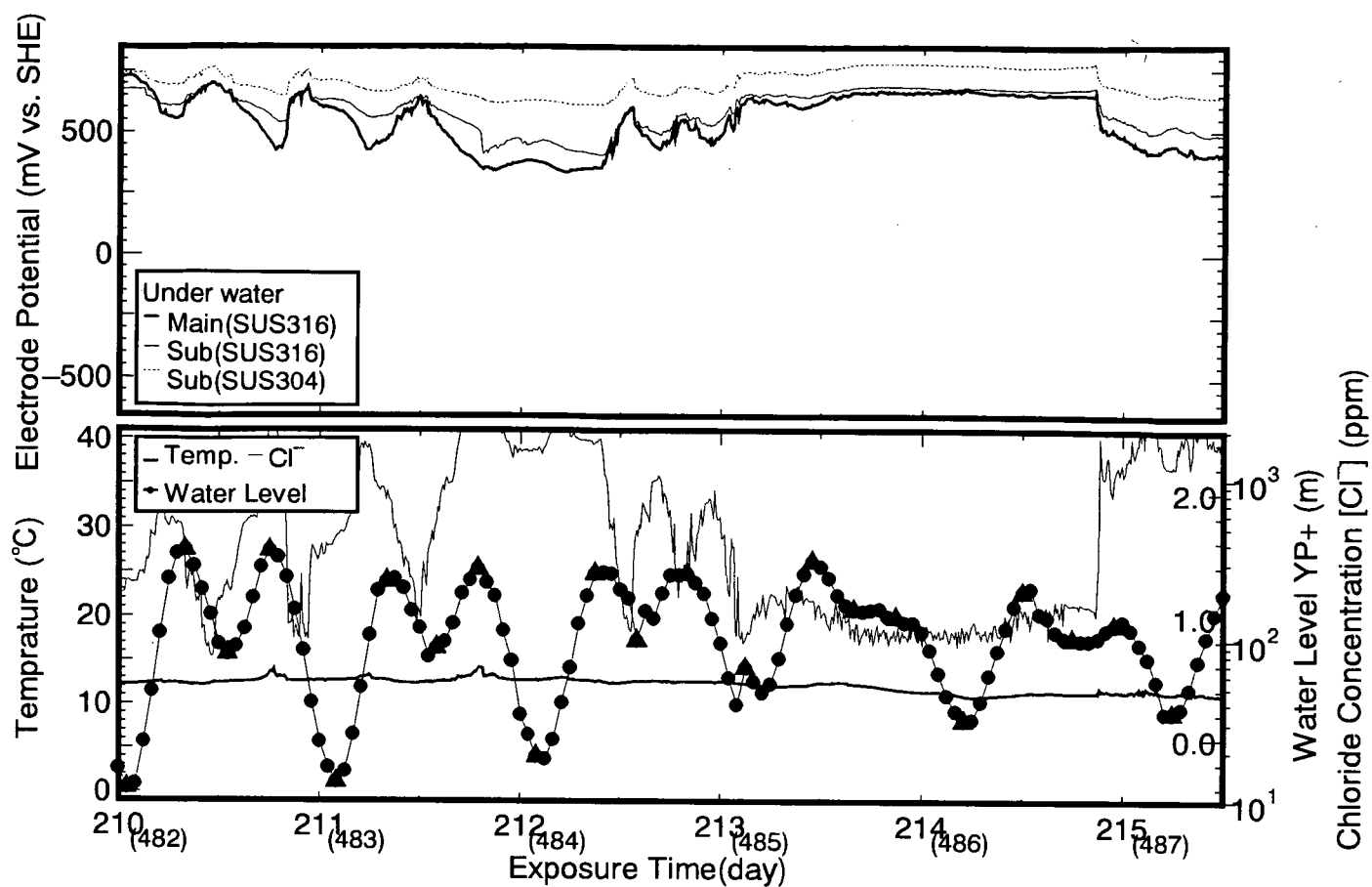


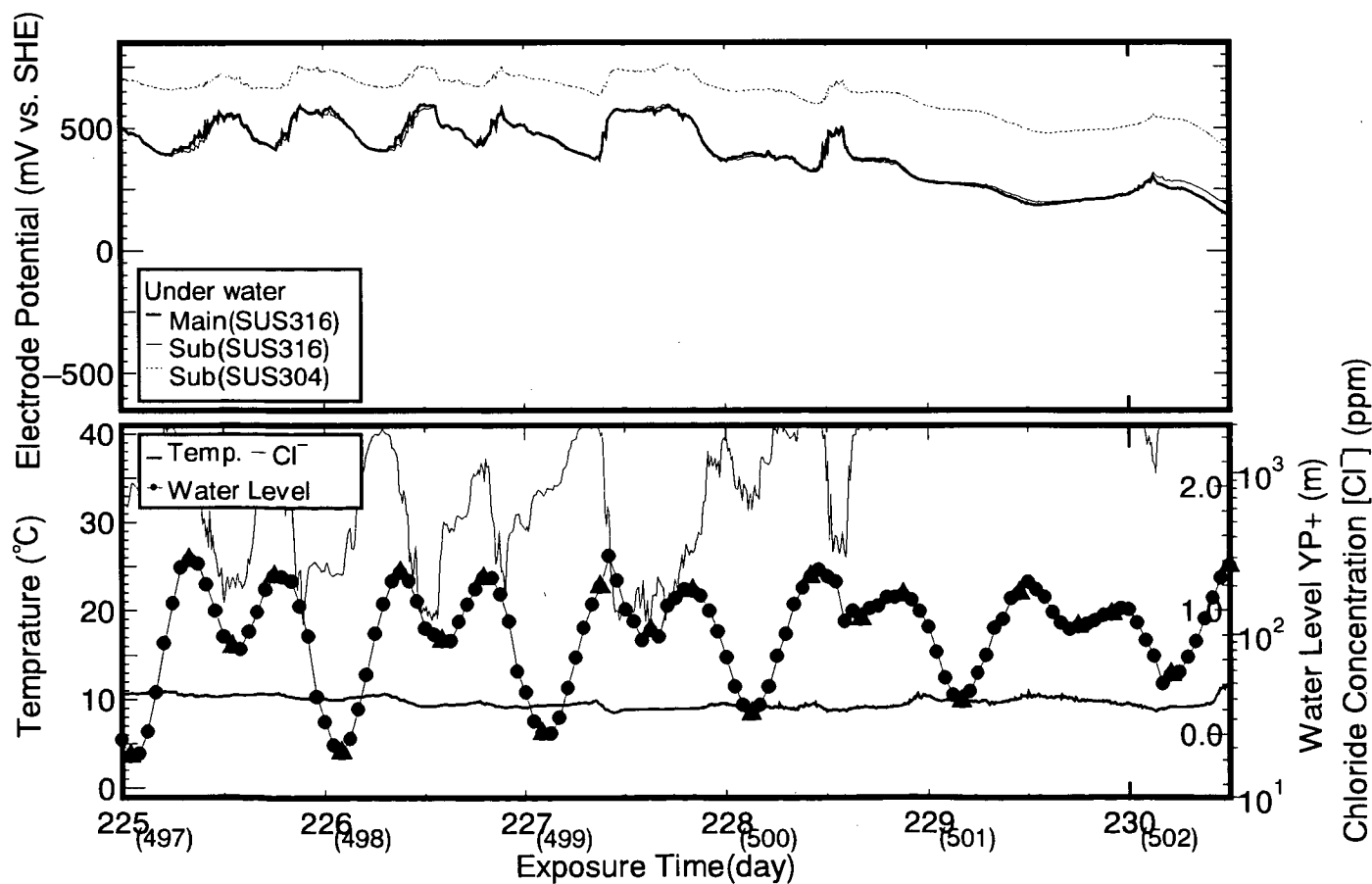
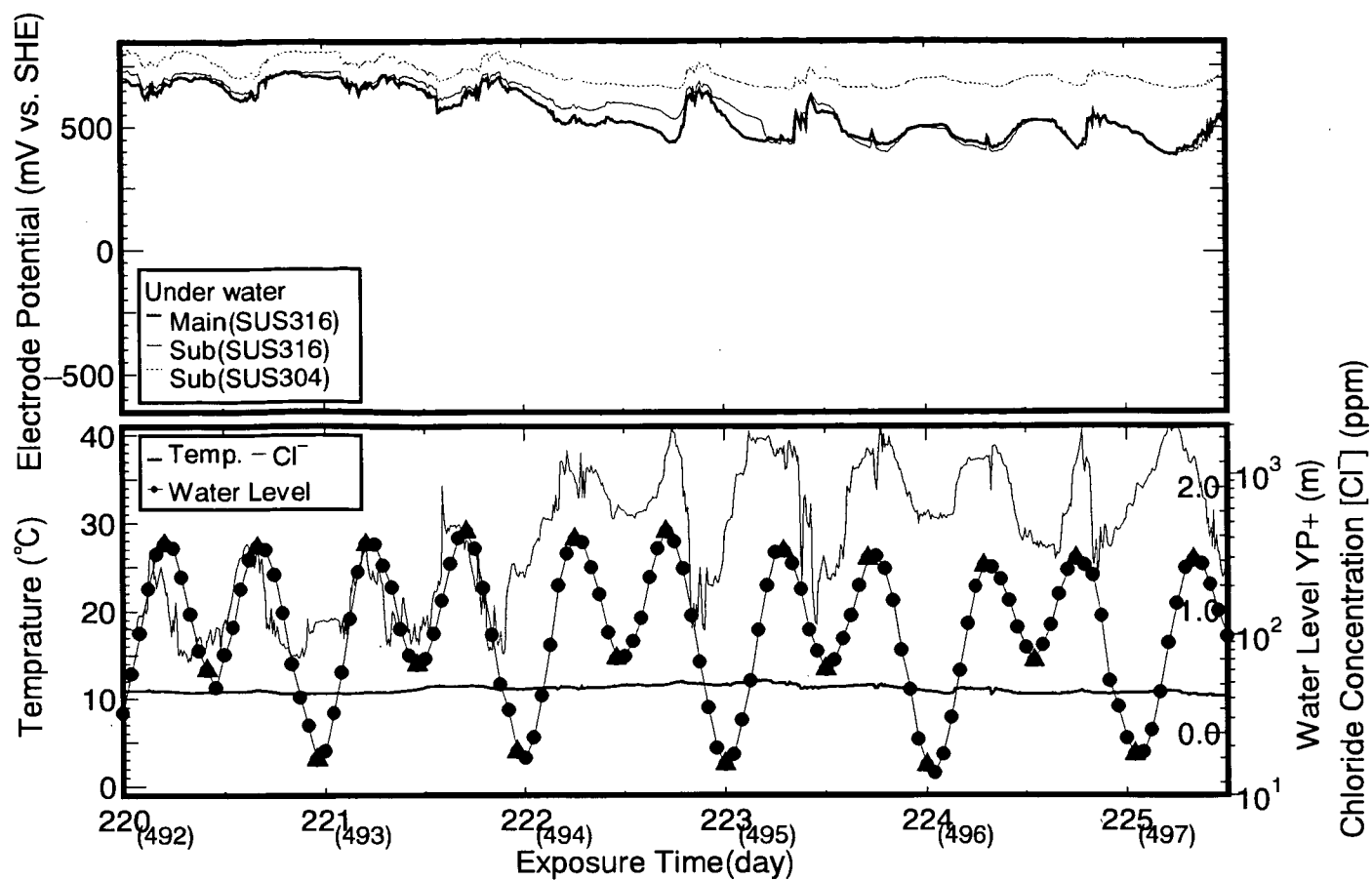


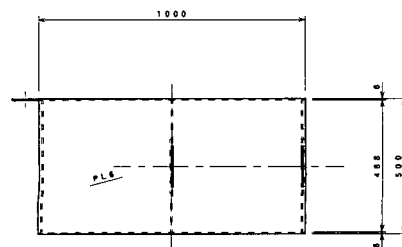
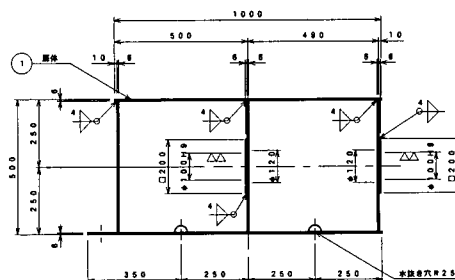
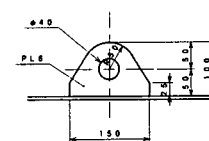
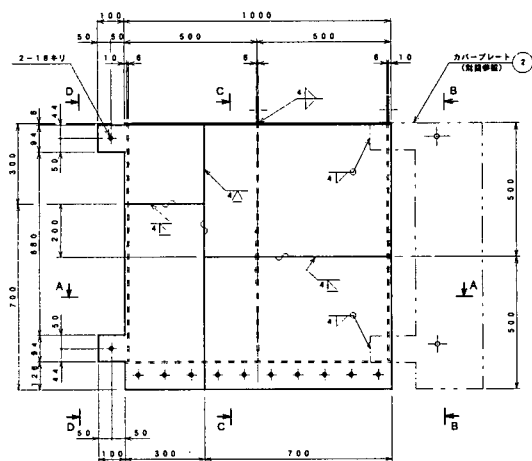
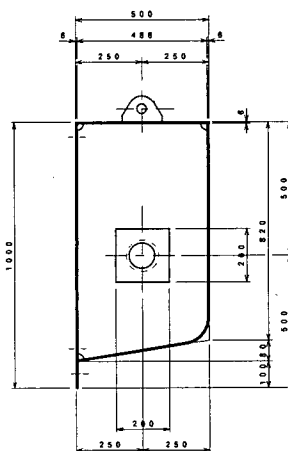
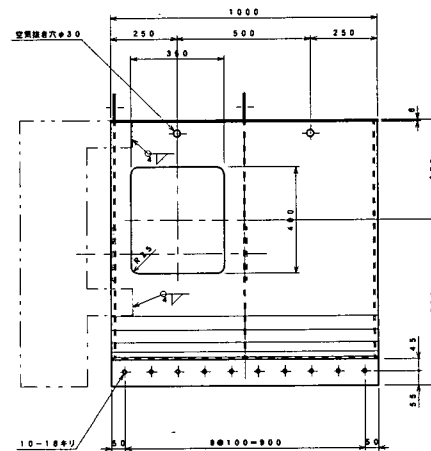
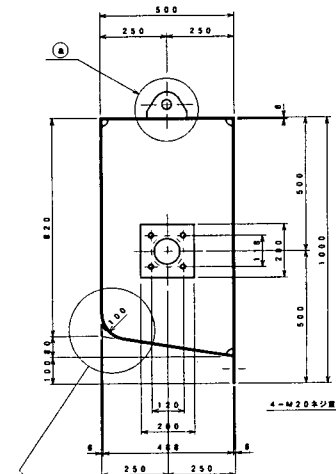
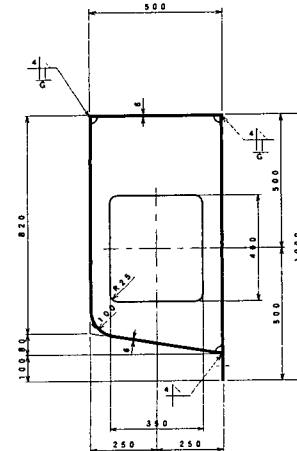






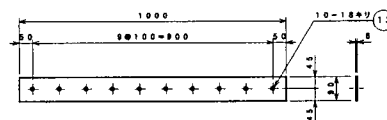




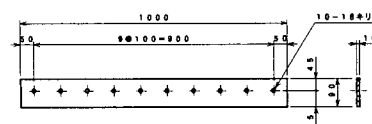
平面図 $S=1/10$ A-A 視面 $S=1/10$ ① 部詳細 $S=1/5$ 正面図 $S=1/10$ B-B 視面 $S=1/10$ 背面図 $S=1/10$ C-C 視面 $S=1/10$ D-D 視面 $S=1/10$ 

- 注記
1. メイン試験体の材質は特記以外はSU316とし、製作時は1層とする。
 2. 本図にない詳細は、メイン試験体詳細 (2/2) を参照のこと。
 3. 増設なきスナップはφ25、スニップはC15とする。
 4. 部材間の接合は溶接構造でも可とする。

溶接構造でも可

⑪ 水密ゴム押え $S=1/5$ ⑫ 水密ゴム $S=1/5$

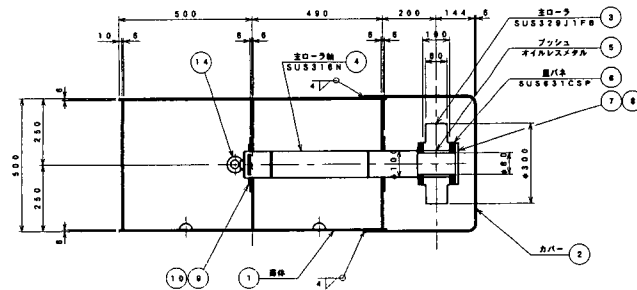
(ネオプレン)



水密ゴム仕様	
品名	下板及び側板
材質	ネオプレン
引張強度	1.80kg/cm ²
弾性率	Hs55° 25° 以上
伸び率	350%以上

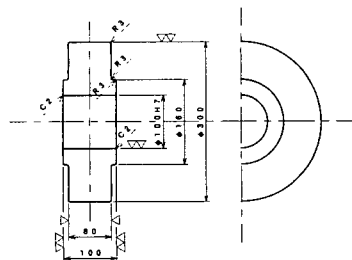
品名	材質	数量	単位	備考
1.3	六角ボルトナット	SUS316	10	M16×30L×3個
1.2	水密ゴム	ネオプレン	1	
1.1	水密ゴム押え	SUS316	1	
1	部材	SUS316	1	

主ローラ組立図 S=1/10



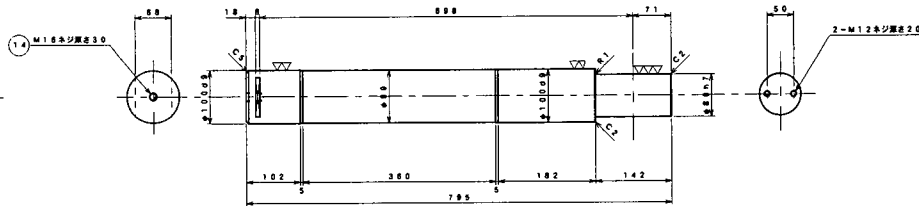
主ローラ S=1/5

(SUS329J1FB)



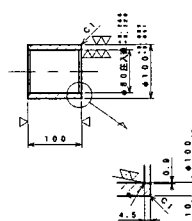
主ローラ軸 S=1/5

(SUS316N)

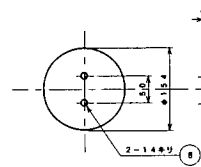


プッシュ S=1/5

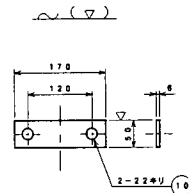
(オイルレスメタル)



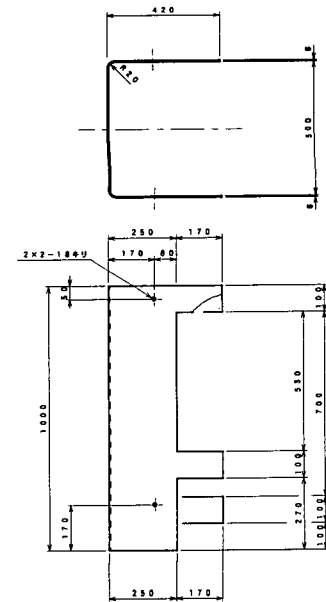
エンドプレート S=1/5



キープレート S=1/5



カバープレート S=1/10



- 注記
1. メイン試験体の材質は特記以外はSUS316とし、製作数は1個とする。
 2. 本図に示す部材は、メイン試験体詳細 (1/2) を参照のこと。
 3. 部材位置スラップはR25、スリッパはC15とする。

図号	品名	材質	数量	備考	製法	備考
14	アイボルト	SUS316	1	M16		
10	六角ボルト	SUS316	4	M12×25L×255 500個		
9	キープレート	SUS316	2			
8	六角ボルト	SUS316	2	M12×25L×255 500個		
7	エンドプレート	SUS316	1			
6	脂バネ	SUS316	4	0.8×0.8 (標準品)		
5	プッシュ	オイルレスメタル	1	0.8×0.8×1.0 (標準品)		
4	主ローラ軸	SUS316N	1			
3	主ローラ	SUS329J1FB	1			
2	カバープレート	SUS316	1			

[illegible]

Technical drawing of a mechanical part showing front and top views with dimensions:

- Front View (Left):** A rectangular part with a total width of 100 and a total height of 50. A central slot is 49 wide and 8 high. The distance from the left edge to the start of the slot is 43. A dimension line labeled 'C2' is shown at the bottom left.
- Top View (Right):** A circular part with a diameter of 34, indicated by a dimension line above the circle.

80
50
20
2-144リ

Figure 7 is a technical drawing of a rectangular plate with a grid of holes. The plate has overall dimensions of 400 units in width and 200 units in height. The grid consists of 4 rows and 5 columns of holes. The holes are arranged in a 3x4 grid of 12 circles, with an additional circle at the bottom center. The holes have a diameter of 40 units. The grid is defined by center-to-center distances: 200 units between columns and 100 units between rows. The plate has a thickness of 10 units. The drawing includes various dimension lines, section lines (A-A, B-B), and a title block at the bottom left indicating '4-18*1' and '(単位:mm)'.

Technical drawing of a rectangular panel assembly. The overall width is 200 and the overall height is 200. The panel has a central circular feature with four small circles around it. Dimensions include 100 for the top width, 50 for the top inner width, 100 for the right height, 74 for the right inner height, and 200 for the bottom height. Callouts include: ① 鋼板 (Steel plate), ② 鋼 (Steel), ③ プレート (Plate), ④ 4-1.4φリ (4-1.4φ), ⑤ 鋼板と鋼板 (Steel plate and steel plate), ⑥ プレッシング (Pressing), ⑦ 鋼板と鋼板 (Steel plate and steel plate).

品名	単位	数量	材料	価格	原価	備考
7	六角ボルトナット	0.00310	4			M10×30 4本×4
8	六角ボルトナット	0.00310	4			M10×35 4本×4
5	水管ゴム	0.00770	1			
4	水管ゴム押え	0.00310	1			
3	カープシート	0.00310	2			
2	箱	0.00310	1			
1	箱体	0.00310	1			
7	六角ボルトナット	0.00310	4			M10×30 4本×4
8	六角ボルトナット	0.00310	4			M10×35 4本×4
5	水管ゴム	0.00770	1			
4	水管ゴム押え	0.00310	1			
3	カープシート	0.00310	2			
2	箱	0.00310	1			
1	箱体	0.00310	1			

Technical drawing of a rectangular plate. The overall width is 400. The distance from the left edge to the first hole center is 50. The distance between the first and second hole centers is 300, calculated as $3 \times 100 = 300$. The distance from the third hole center to the right edge is 50. The plate has a thickness of 8. The distance from the top edge to the hole center line is 50. The distance from the bottom edge to the hole center line is 100. A detail view (7) shows a hole with a diameter of $4-18 \pm 0.1$.

Technical drawing of a rectangular plate. The main drawing shows a plate with a total width of 400 and a total height of 100. The height is divided into three sections: 50 at the top, 50 in the middle, and 100 at the bottom. The width is divided into three sections: 50 on the left, 300 in the middle, and 50 on the right. There are four circular holes, each with a diameter of 10, spaced evenly along the horizontal centerline. A detail view on the right shows a cross-section of the plate with a thickness of 10. A label '4-10φキリ' points to one of the holes.

水 密 ゴ ム 仕 様	
項 目	下部及び側部
材 質	ネオプレン
引 張 強 度	120 kg/cm ²
断 面	H±5.5% ±5% 以上
伸 び 率	350%以上

暴露試験体

サブ試験体組立及び詳細

