

第4章

**「“軍艦島”の鉄筋コンクリート造高層建物群の環境
劣化調査と安全性評価に関する研究」**

実施報告

(平成 21 年度 長崎大学工学部内萌芽研究補助経費)

4.1 平成 21 年度 工学部内萌芽研究補助経費の研究報告

平成 21 年度 工学部内萌芽研究補助経費「“軍艦島”の鉄筋コンクリート造高層建物群の環境劣化調査と安全性評価に関する研究」に採択されセンター職員で協力して実施した。報告書を資料 4-1 に掲載する。

付録資料

ページ

資料 4-1 平成 21 年度 工学部内萌芽研究補助経費の研究報告

4 - 3

平成 21 年度 工学部内萌芽研究補助経費
**“軍艦島”の鉄筋コンクリート造高層建物群の
環境劣化調査と安全性評価に関する研究**

報 告 書

平成 22 年 6 月

工学部インフラ長寿命化センター

平成 21 年度 工学部内萌芽研究補助経費 申請書(計画調書)

ふりがな	まつだ ひろし	所属学科等・職	インフラ長寿命化センター
グループリーダー 氏名	松田 浩	※センターからの応募の 場合はセンター名とセ ンターでの役を記載	
グループリーダー連絡先 (内線番号、e-mail)	Ext. 2590 , matsuda@nagasaki-u.ac.jp		
連絡責任者の氏名、所属、連絡先 等 <small>※代表者に連絡が通じない時の連絡責任者</small>	森田 千尋、インフラ長寿命化センター、2591		
研究課題名	“軍艦島”の鉄筋コンクリート造高層建物群の環境劣化調査と安全性評価に 関する研究		
研究者組織			
<small>※一番上にはリーダーを記入。 ※経費の出納関係で管理係との頻繁な連絡をする方がリーダーの他にいれば、氏名の左上に△印を付 す。 ※欄(行)が足りなければ、詰めるか、同様式(研究者組織のみ)紙面を p. 1-2 として追加し、以降のページ数は変えないこと。 ※参画する技術職員等もここに記す</small>			
氏名	所属学科等	職	研究における役割
松田 浩	インフラ長寿命化センター・構造工学科	センター長、教授	全体の総括
原田 哲夫	インフラ長寿命化センター・構造工学科	副センター長、教授	コンクリート材料試験総括
森田 千尋	インフラ長寿命化センター・構造工学科	部門長、准教授	鉄筋材料試験総括
森山 雅雄	インフラ長寿命化センター・情報システム工学科	准教授	三次元形状計測
勝田 順一	インフラ長寿命化センター・構造工学科	准教授	鉄筋腐食検査
田辺 秀二	インフラ長寿命化センター・材料工学科	教授	セメント化学試験
出水 享	インフラ長寿命化センター	連携研究員	コンクリート材料試験
牧野 高平	インフラ長寿命化センター	連携研究員	コンクリート材料試験
林山 愛弓	インフラ長寿命化センター	連携研究員	コンクリート材料試験
山下 務	技術部	シニアスタッフ	鉄筋材料試験
白濱 敏行	技術部	技術職員	コンクリート材料試験
河野 和芳	技術部	シニアスタッフ	鉄筋腐食調査
永藤 政俊	技術部	技術職員	コンクリート材料試験

1. 調査目的

軍艦島は、図-1.1 に示すように、長崎県南部、長崎半島の西方海上にある小島であり通称端島とも呼ばれている。軍艦島の面積は、 0.06 km^2 で旧高浜村、現在長崎市に属する。日本有数の海底炭田の島として知られ、開坑は明治初年で、鍋島氏を経て、1890年（明治23）三菱の経営に移り、以来発展して年産約25万tfに達した。島の周りは高さ10mのコンクリート壁で固められ、その中に選炭場、接岸施設など諸施設のほか、人口約5,000人を収容する7~9階建てのアパート群が建ち並んで、人口密度5万人/ km^2 を示した。緑なき島といわれ、遠望すると軍艦に似ているので軍艦島と呼ばれた。1974年（昭和49）閉山し、現在は昔の無人島に戻り、写真-1.1 に示すようにアパート群が廃墟として残っている。

長崎市は、2006年6月に「軍艦島保存活用検討委員会」を発足させて、現地調査を実施した。この調査結果を踏まえて、長崎市は、軍艦島の保存に関しては、現状のままとして、自然の風化にまかせ、朽ち果てていく過程をみせる方針に決定した。保存のため莫大な予算が必要であることや、いくら補修・補強しても軍艦島のような過酷な自然条件、人が常住し、維持管理が日々可能な一般の建築物と違い、劣化は当然ながら止まることはないからである。

軍艦島には日本初の鉄筋コンクリート造の高層アパート（大正5年建設）が現存している。セメント・コンクリートの製造史の観点からは、大正から昭和にかけてのセメント製造方法、骨材・鉄筋の品質および種類等が時代ごとに異なり、その時代に応じて鉄筋コンクリート構造の劣化過程に影響を及ぼしていることが推定される。

本研究では、3Dレーザースキャナによる3D計測を実施し、現況図面を作成し、今後の軍艦島の整備・活用に資するための基礎資料を作成するとともに、外観調査、赤外線サーモグラフィ調査、鉄筋探査、コンクリートや鉄筋腐食生成物の分析を行った。



図-1.1 軍艦島位置図



写真-1.1 軍艦島

2. 調査概要

2.1 調査対象

今回、調査対象構造物としては、日本最古のコンクリート造の高層アパートで、大正5年に建設された30号棟、島内最大規模の構造物で、昭和20年に建設された65号棟、島内で一番新しい構造物で昭和45年に建設された71号棟である。図-2.1.1に軍艦島の平面図を示す。



図-2.1.1 軍艦島平面図

(1) 30号棟（グラバーハウス）¹⁾

30号棟は、日本最古のコンクリート造の高層アパートであり、建設当初は、4階建てとして完成し、その後、7階建てに増築されたというが、詳細は分かっていない。鉄筋には、炭鉱の廃材であるワイヤーロープが使用されており、またセメントに混ぜる砂は対岸の砂浜から採取されたものが多く、壁面には今でも無数の貝殻を発見することができる。



大正 5 年 1916～

使用目的：下請業者飯場

構造：RC 造 7F 一部半地下階

戸数：約 133 戸

間取：1 K (6 畳+土間兼台所)

1F 給与支払窓口

SB 落水時計店、その他日常食料品店

4F 松尾工務店食堂、他

写真-2.1.1 30号棟

(2) 65号棟（報国寮）¹⁾

65号棟は、戦中に建設が始まった建物である。昭和33年（1958）年に増築された南側の棟が特に新65号と呼ばれ、それ以外の東側と北側の旧棟部分が9階建て、新棟が10階建てというきわめて不規則な造りをしており、棟内最大規模の構造物である。



写真-2.1.2 65号棟

建設年次：昭和 20 年 1945～

使用目的：鉦員住宅

構造：RC 造 10F （旧棟は、9 階+屋上保育園）地下 1F

戸数：388 戸

間取：2K (6 畳+6 畳+台所 (旧棟)、6 畳+4.5 畳+台所+内便所 (新棟))

1F 消防分室、楠歯科、組合事務所、開閉所、等

BF 米穀倉庫、製氷室、会社理容美容室、LPG 倉庫

(3) 71号棟（体育館）¹⁾

71号棟は、島内の建物としては、最後に建設された構造物である。



昭和45年1970～
使用目的：体育館
構造：RC造1階、
鉄骨造1階
1F 武道場、給食室
BF 体育館

写真-2.1.3 71号棟

2.2 調査内容

調査一覧を表-2.2.1に示す。調査は、長崎市から破壊調査、微破壊調査が禁止されていたため、非破壊試験器を用いて実施した。コンクリート、鉄筋腐食性生物の分析に関しては、長崎市の許可を頂き、明らかにコンクリートや鉄筋腐食性生物の剥離が生じている個所から採取した。そして、大学に持ち帰り分析を行った。

表-2.2.1 調査一覧

調査項目	調査棟
外観調査	30号棟、65号棟
赤外線サーモグラフィ調査	30号棟
鉄筋探査	30号棟
3Dレーザー計測	30号棟、65号棟
蛍光X線分析	30号棟、60号棟、71号棟
鉄筋腐食性生物の微視的観察	30号棟

参考文献

1) オープロジェクト：軍艦島全景、2008.12

3. 1 外観調査結果

30号棟と65号棟の外観調査を行った。いずれの棟でも鉄筋露出コンクリートのひび割れ、剝離、剝落が多数確認できた。30号棟に関しては、いつ崩壊してもおかしくない状態であった。

●30号棟現状



写真-3.1.1 30号棟現状 1



写真-3.1.2 30号棟現状 2



写真-3.1.5 30号棟現状 5



写真-3.1.4 30号棟現状 4



写真-3.1.3 30号棟現状 3



写真-3.1.6 30号棟現状 6

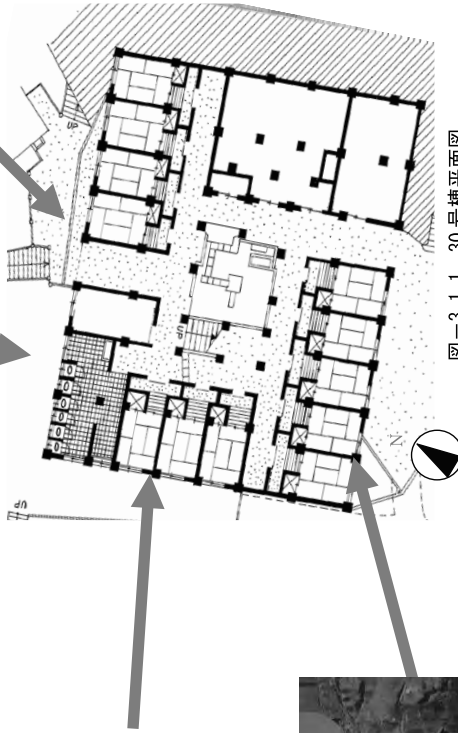


図-3.1.1 30号棟平面図

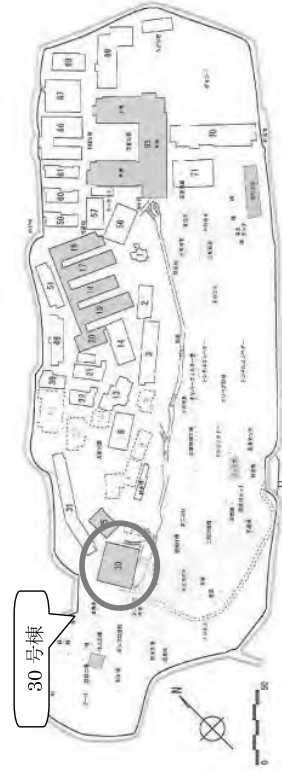


図-3.1.2 軍艦島平面図

●30号棟劣化状態



写真-3.1.7 30号棟劣化1



写真-3.1.8 30号棟劣化2



写真-3.1.9 30号棟劣化3



写真-3.1.10 30号棟劣化4



写真-3.1.11 30号棟劣化5



写真-3.1.12 30号棟劣化6



写真-3.1.13 30号棟劣化7re



写真-3.1.14 30号棟劣化8



写真-3.1.15 30号棟劣化9

● 65号棟劣化状态



写真-3.1.19 65号棟劣化1



写真-3.1.20 65号棟劣化2



写真-3.1.21 65号棟劣化3

● 65号棟现状



写真-3.1.16 65号棟现状1



写真-3.1.17 65号棟现状2



写真-3.1.18 65号棟现状3

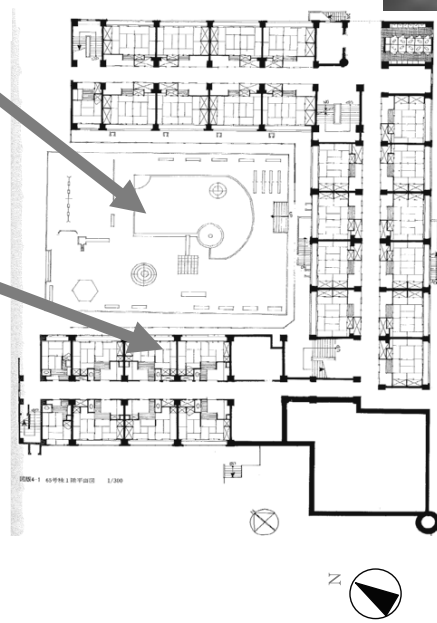


图-3.1.3 65号棟

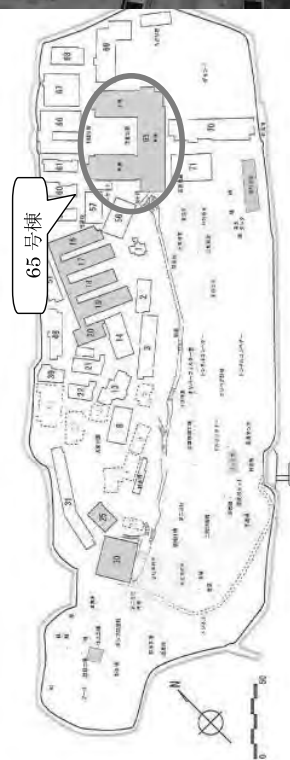


图-3.1.4 軍艦島平面图

3. 2 サーマグラフィー調査

3. 2. 1 概要

コンクリートの剥離や浮きを確認するために、30号棟で赤外線サーモグラフィー調査を行った。赤外線サーモグラフィーとは、物体表面から放射される赤外線を、検出素子を用いて二次元的に走査し、検出された赤外線量を映像として表示する方法である。本測定では、赤外線映像装置を用いて物体の表面温度分布（熱画像）を測定し、熱画像上に現れる表面温度異常部から、内部欠陥の存在を推定する。

赤外線サーモグラフィー法による欠陥検出の原理図を図-3.2.1に示す。同図からわかるように、内部に生じた空隙が断熱層となり、日射や気温変化に起因して生じる表面温度の日変動で、図-3.2.2に示すように欠陥部と健全部とでは表面温度差が生じる時間帯があることを利用して、内部欠陥を検知する手法である。写真-3.2.1と表-3.2.1に使用した赤外線サーモグラフィー装置（NEC Avio Thermo Shot F30）の外観と仕様を示す。

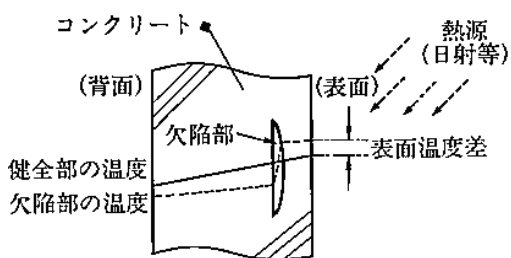


図-3.2.1 欠陥検出の原理図¹⁾

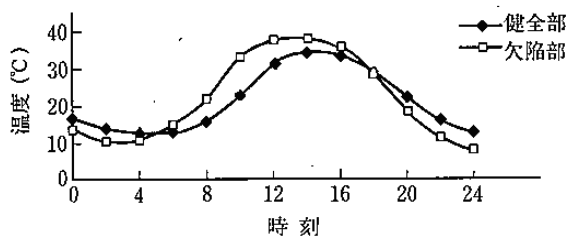


図-3.2.2 表面温度変化モデル¹⁾



写真-3.2.1 赤外線サーモグラフィー
(NECAVio Thermo Shot F30)

表-3.2.1 仕様

測定範囲	-20～ 100℃
最小温度分解能	0.1℃
検出素子	二次元非冷却センサー
測定波長	8～13μm
フレームタイム	1/8.5秒
有効表示画素数	160×120
測定視野角	28°×21°
温度精度	±2℃ or 読み値の±2% のいずれか大きい方

3. 2. 2 調査結果

RC造部材の赤外線画像を図-3.2.3～図-3.2.5に、また、赤外線画像とほぼ同位置の可視画像を写真3.2.2～写真-3.2.4に示す。図-3.2.3と図-3.2.4より赤外線画像から浮きと思われる高温領域が確認できた。調査位置が高所であるため打音検査で浮きを確認することが出来ないが、おそらく鉄筋の腐食膨張によるコンクリートの浮きが生じているものと思われる。また、図-3.2.5からは、ひび割れを赤外線画像から確認できる。赤外線サーモグラフィ装置は、コンクリートの浮きやひび割れの検出に有効であることが確認できる。

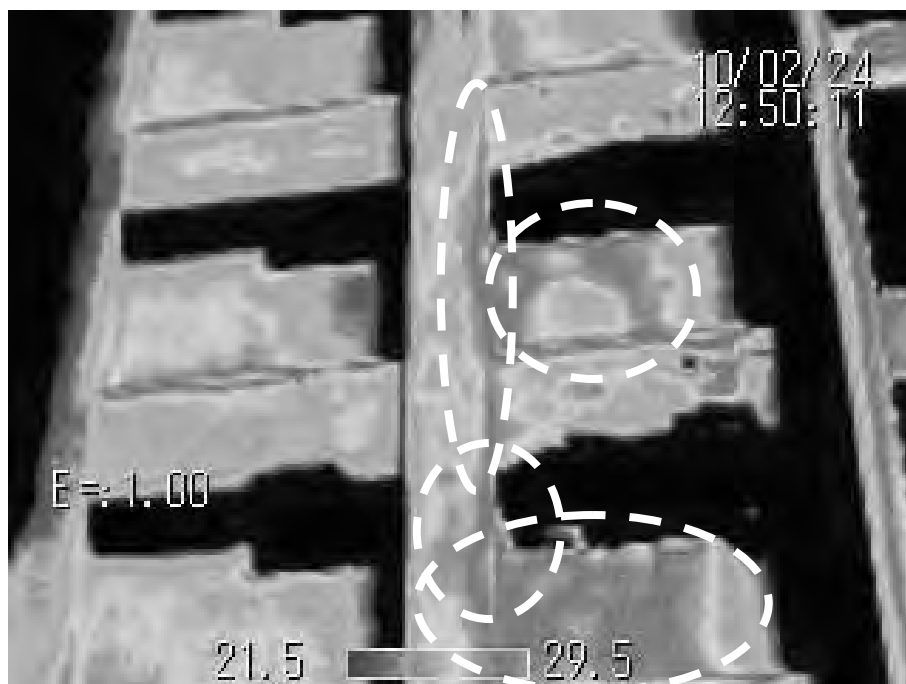


図-3.2.3 赤外線画像



写真-3.2.2 可視画像

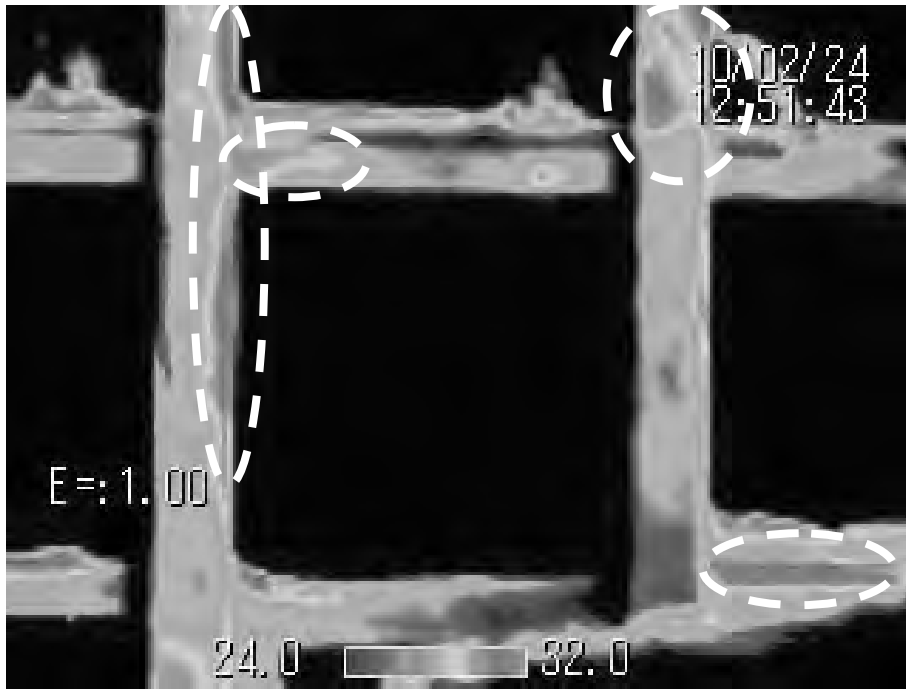


図-3.2.4 赤外線画像



写真-3.2.3 可視画像



図-3.2.5 赤外線画像



写真-3.2.4 可視画像

3. 3 鉄筋探査結果（電磁誘導法）

3. 3. 1 概要

30号棟の柱の帯筋のかぶりやピッチを確認するため鉄筋探査（電磁誘導法）を行った。鉄筋探査は、海水飛沫を直接受け、劣化が激しい西面（調査個所1）と海水の飛沫を直接受けず劣化があまりみられない東面（調査個所2）で行った。探査面は、打音検査で浮きを確認されない健全部で行った。調査個所を図-3.3.1に示す。

電磁誘導法は、コンクリート中の鉄筋探査（位置、かぶり厚さ、鉄筋径）や鉄筋以外の埋設金属の探査を適用対象とし、電磁波レーダ法に比べて鉄筋径の推定が可能であり、コンクリート中に空隙やジャンカ等があっても鉄筋位置の推定が可能である。また、電磁誘導法はかぶりが比較的浅い場所で非常に有効であり、浅ければ浅いほうが分解能も良く確実な探査および測定が可能になる。今回、鉄筋探査器は、日本ヒルティ株式会社製のフェロスキャン PS200（写真-3.3.1）を使用した。



図-3.3.1 軍艦島平面図



写真-3.3.1 鉄筋探査器

3. 3. 2 調査結果

調査結果を図-3.3.2、図-3.3.3 に示す。東面は、鉄筋が 7 本、平均かぶりが 89mm、平均ピッチ 220mm という探査結果を得た。西面では、かぶり 90mm の鉄筋が 1 本という結果を得た。

このことから西面の鉄筋は腐食しており、元の母材がほとんど残っておらず、探査器に反応がなかったものと思われる。西面は、海水飛沫を直接受けて劣化が激しいことから、このような結果を得てもおかしくない。

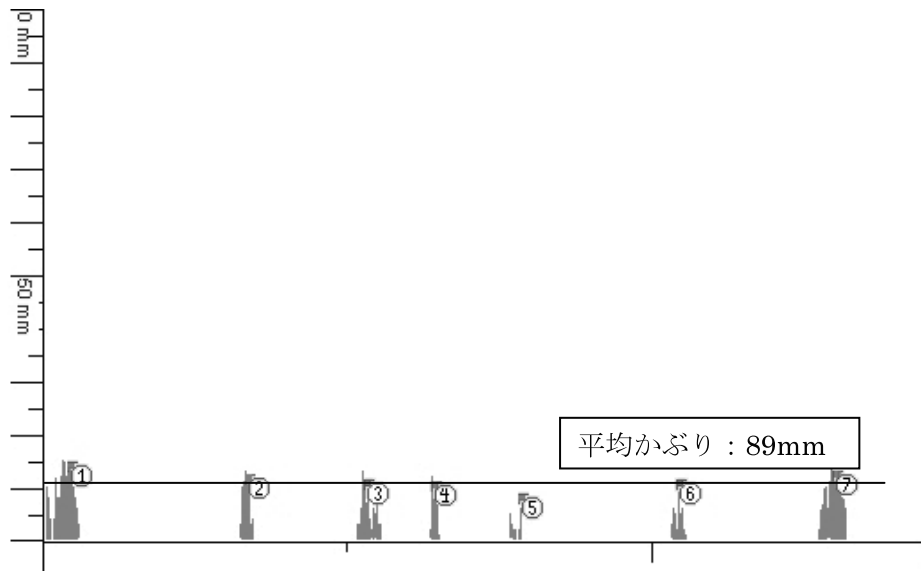


図-3.3.2 東面探査結果

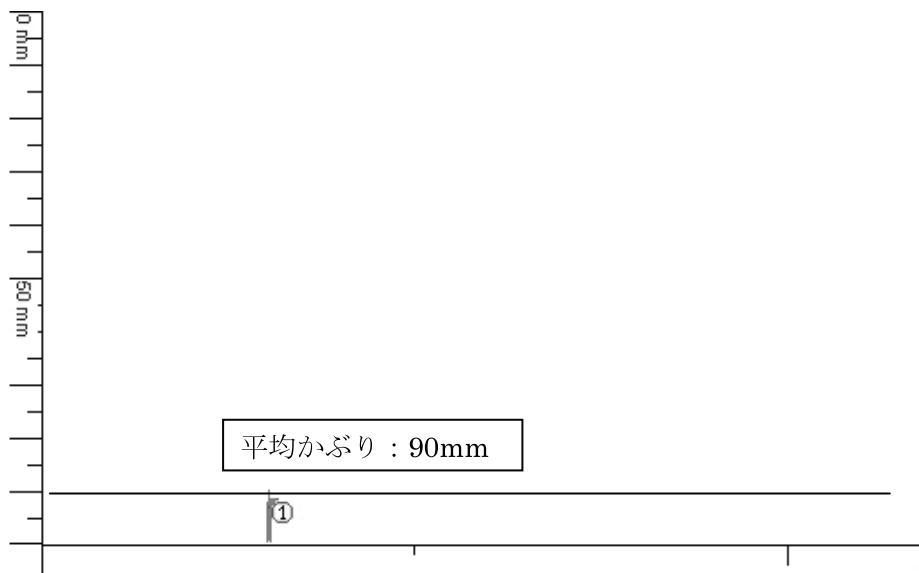


図-3.3.3 西面探査結果

3.4 3Dレーザー計測結果

3.4.1 計測概要

過去の調査²⁾から既に25年以上経過した現在、その後の変状について記録することは価値が有る。本調査では、3Dレーザーによる三次元計測を行い、現状の建物等の状況を記録するとともに、そのデータを活用し、文献²⁾と比較することによりその変状の進行状況を確認したものである。調査は、日本最古のコンクリート造の高層アパートである30号棟と島内最大規模のアパートである65棟を調査対象構造物とした。計測のフローを図-3.5.1に示す。今回、3Dレーザースキャナーは、到達距離が400m前後の中距離型の機器（Riegl VZ-400）を使用した。3Dレーザースキャナーを写真-3.4.1、計測状況写真-3.4.2、写真-3.4.3、仕様を表-3.4.1に示す。

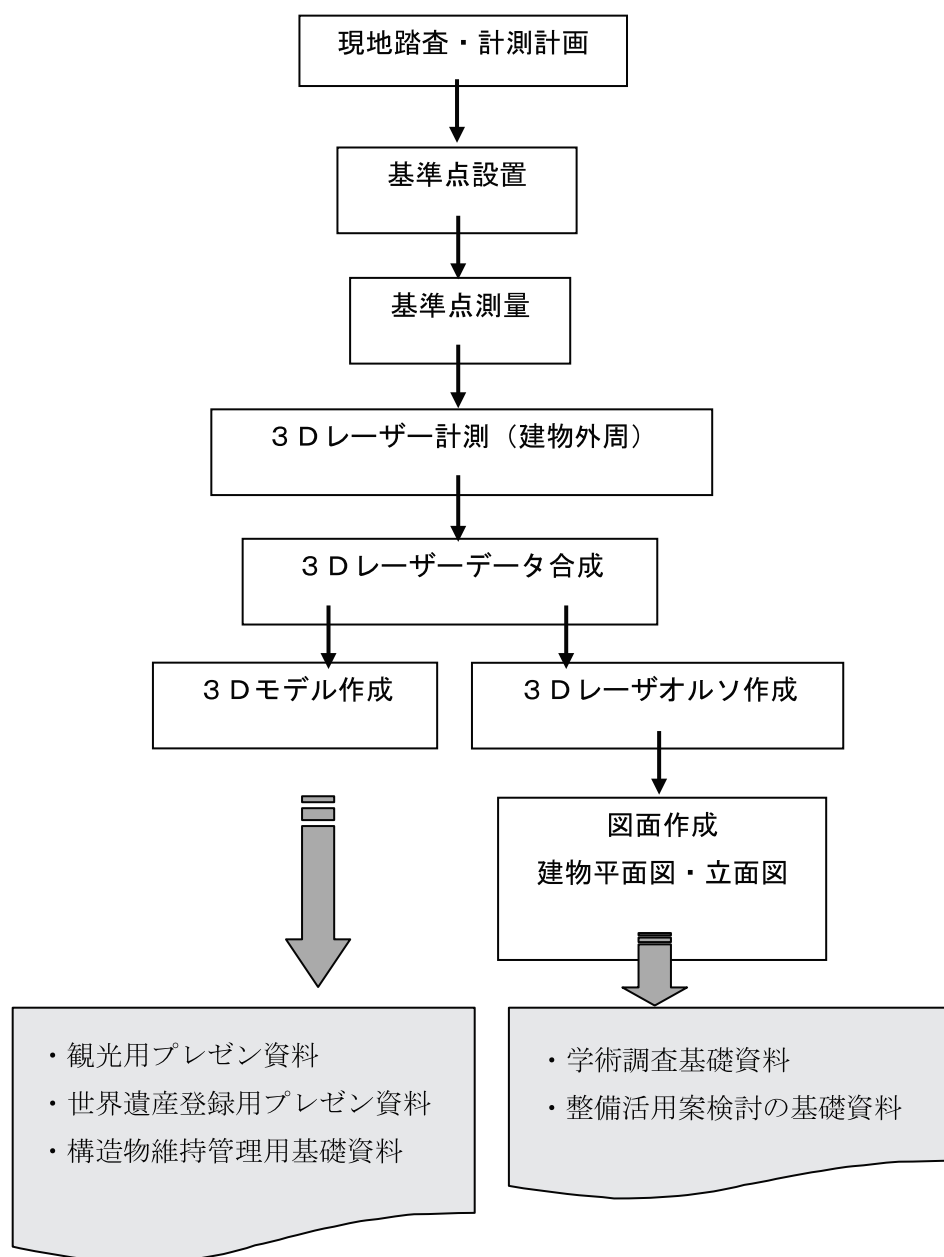


図-3.4.1 計測のフロー



写真-3.4.1 RIEGL VZ-400

表-3.4.1 仕様

	長距離モード	高速モード
有効測定レート	42,000 回/秒	122,000 回/秒
最長測定距離		
自然物ターゲット $\rho \geq 90\%$	600 m	350 m
自然物ターゲット $\rho \geq 20\%$	280 m	160 m
精度	5 mm	5 mm
確度	3 mm	3 mm
最短測定距離	1.5 m	
レーザー波長	近赤外線	
ビーム広がり角レーザー波長	0.3 mrad	
測定方式	Time of flight 方式	



写真-3.4.2 30号棟計測状況



写真-3.4.3 65号棟計測状況

3. 4. 2 計測結果

今回、30号棟（日本最古の鉄筋コンクリート構造物）、65号棟（軍艦島内最大のアパート）を中心に島内の計17箇所から3D計測を実施した結果、以下のことを得た。

- ・ 図-3.4.1より17箇所からの3Dデータを統合させて作成した軍艦島の3Dモデル化は島内の約6割程度を捕捉することができた。
- ・ 図-3.4.2～図-3.4.7より30号棟を忠実にモデル化できた。
- ・ 図-3.4.10～図-3.4.16より65号棟を忠実にモデル化できた。
- ・ 文献²⁾より30号棟と65号棟のCAD図面を作成し、CAD図面と3Dレーザー計測オルソ画像を重ねると、欠損している箇所が確認できた。図-3.4.9や図-3.4.17では、手摺や窓枠や階段等が朽ち果ててなくなっているのが確認できる。

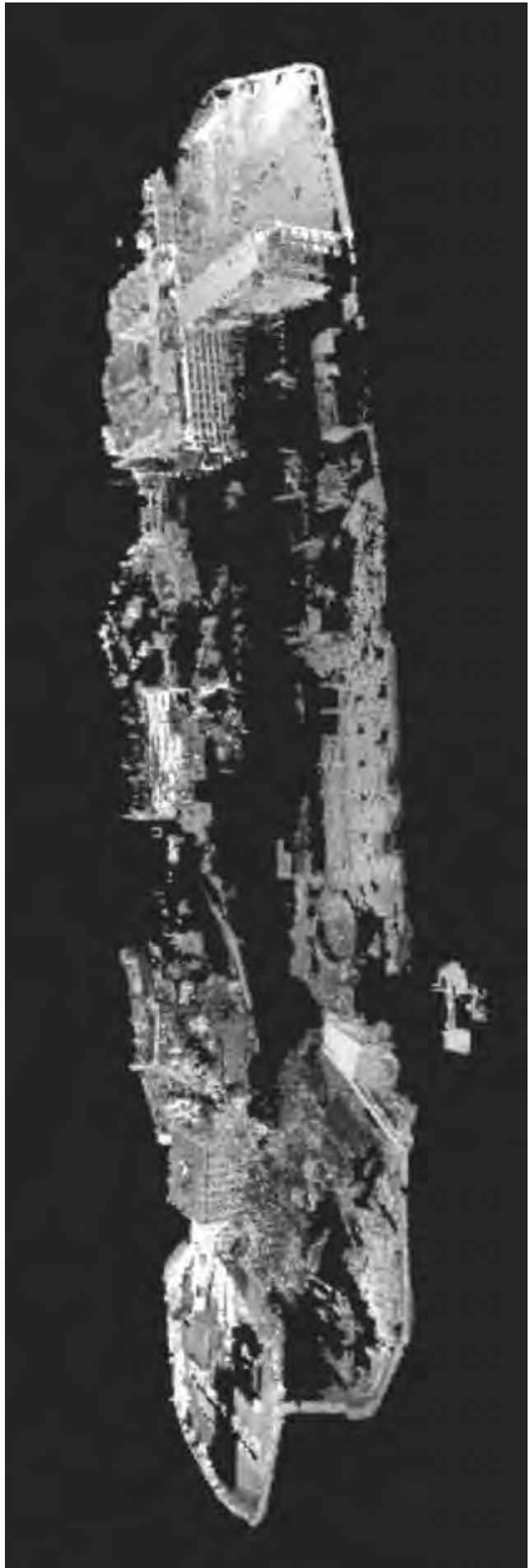
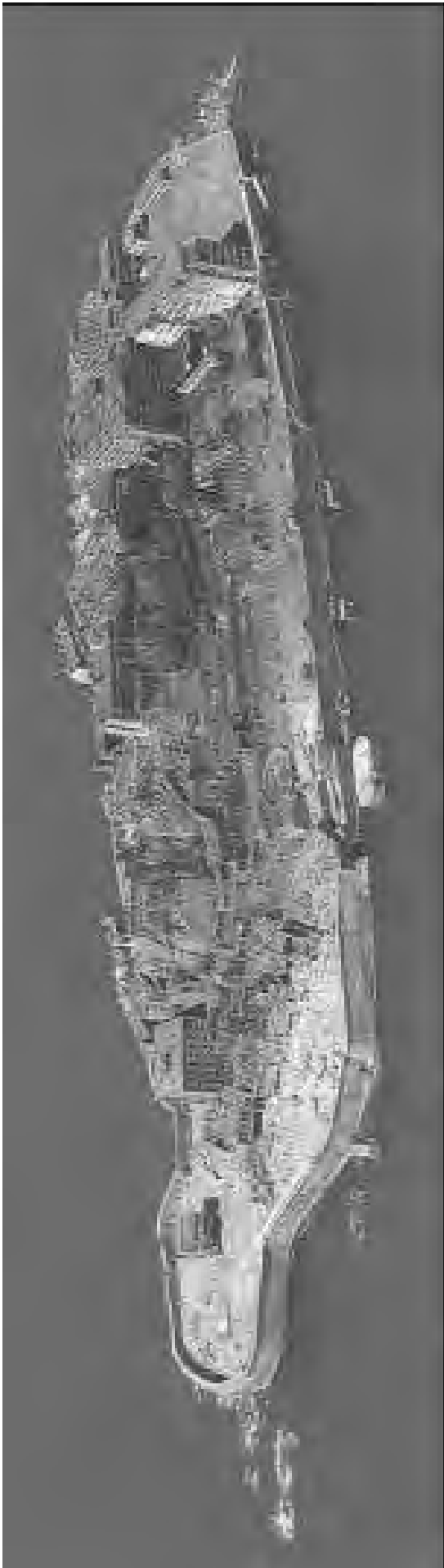
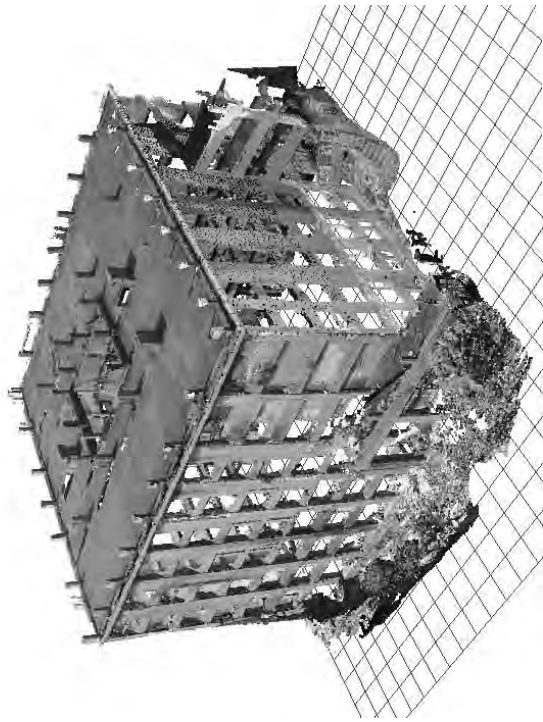
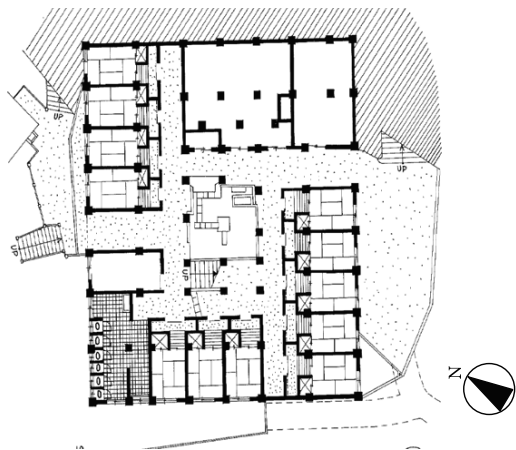
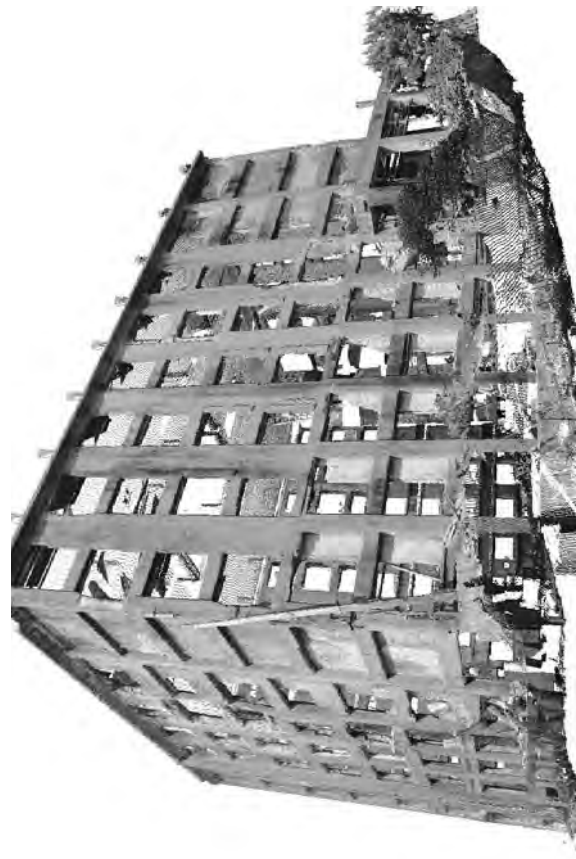


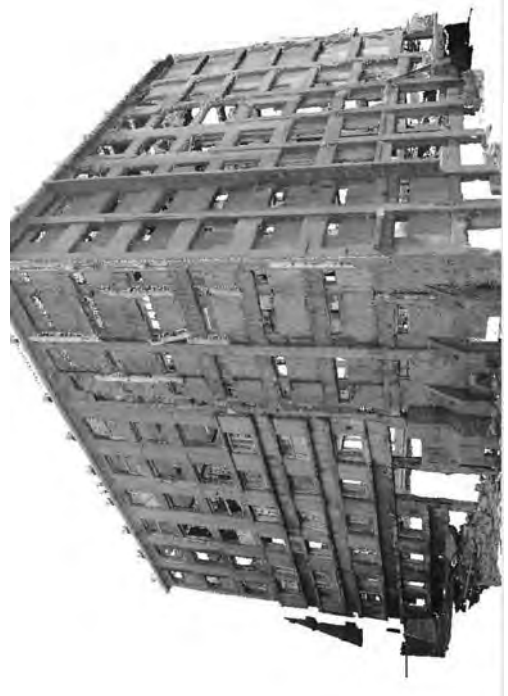
図-3.4.1 軍艦島の全景と3D計測結果(17箇所合成)



北から望む



南東から



北西から

図-3.4.2 30号棟 3D計測結果



南東立面レーザーザオルソ画像

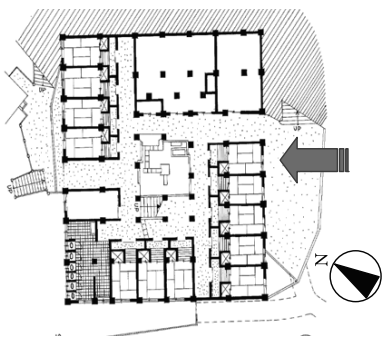
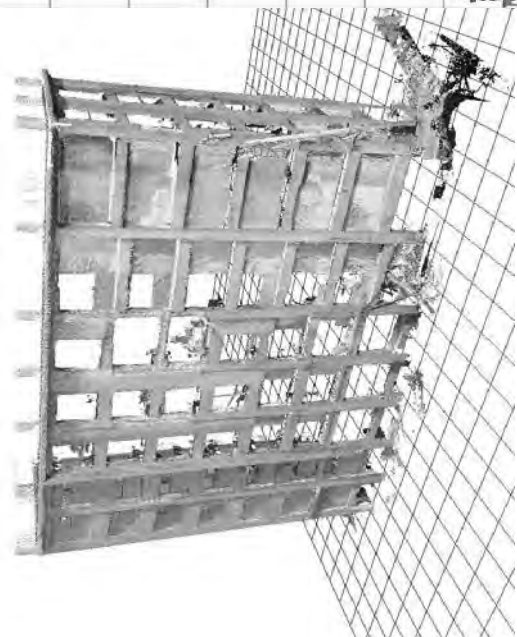
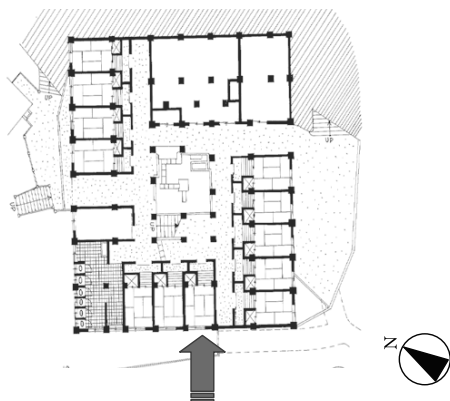
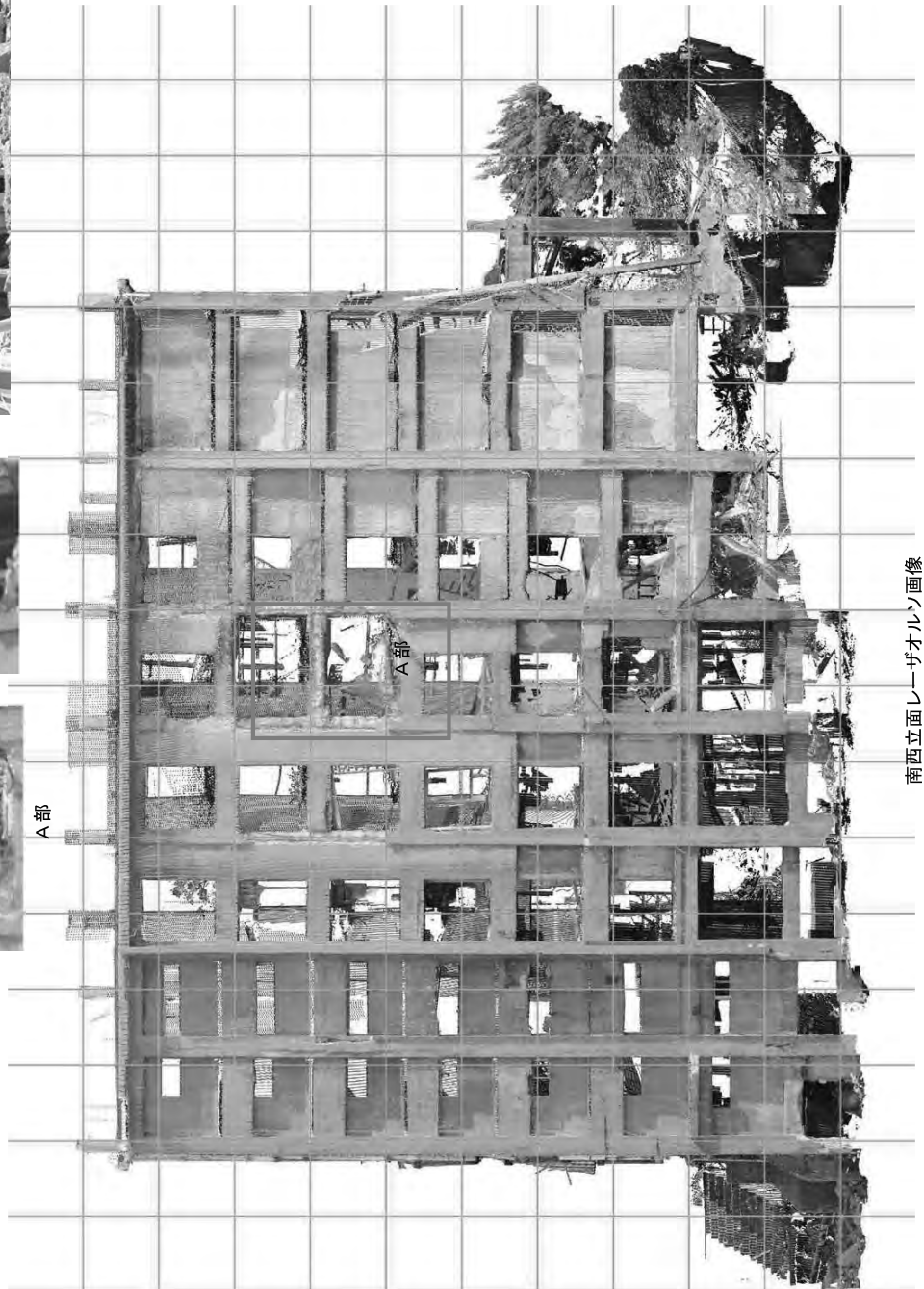
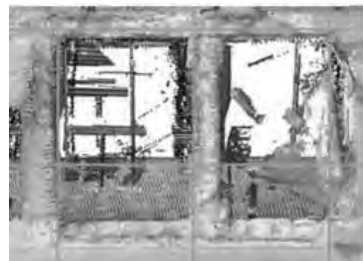
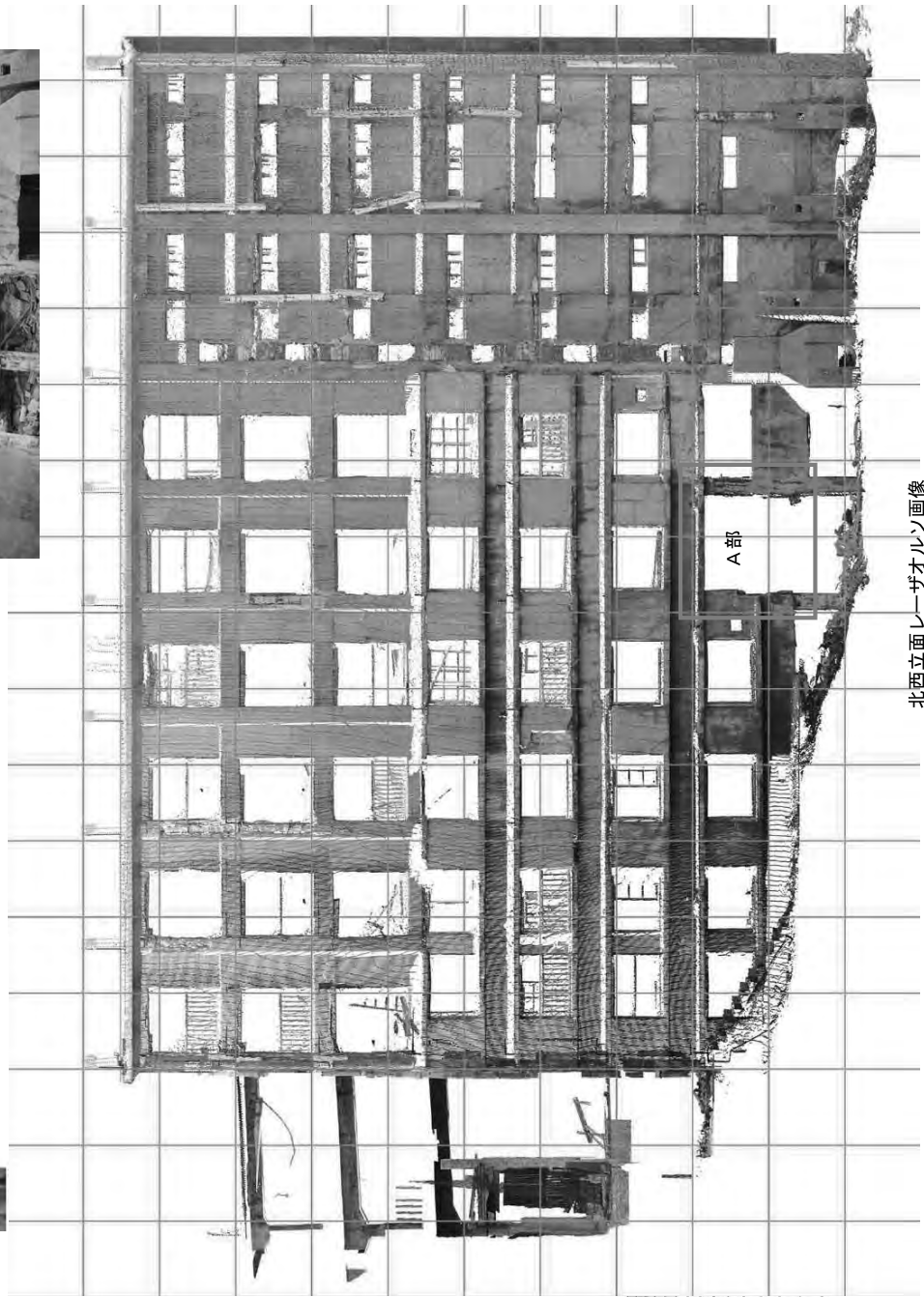
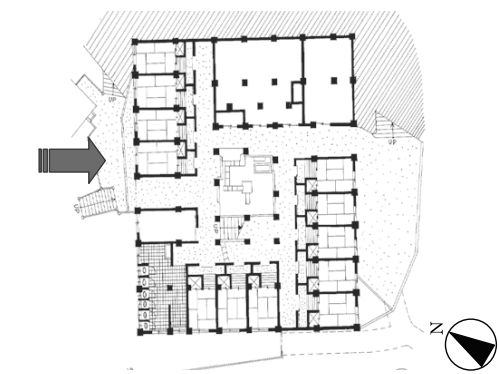


図-3.4.3 30号棟 3D計測結果



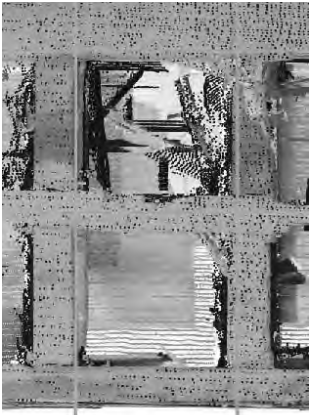
南西立面レーザーガオルソ画像
 図-3.4.4 30号棟3D計測結果



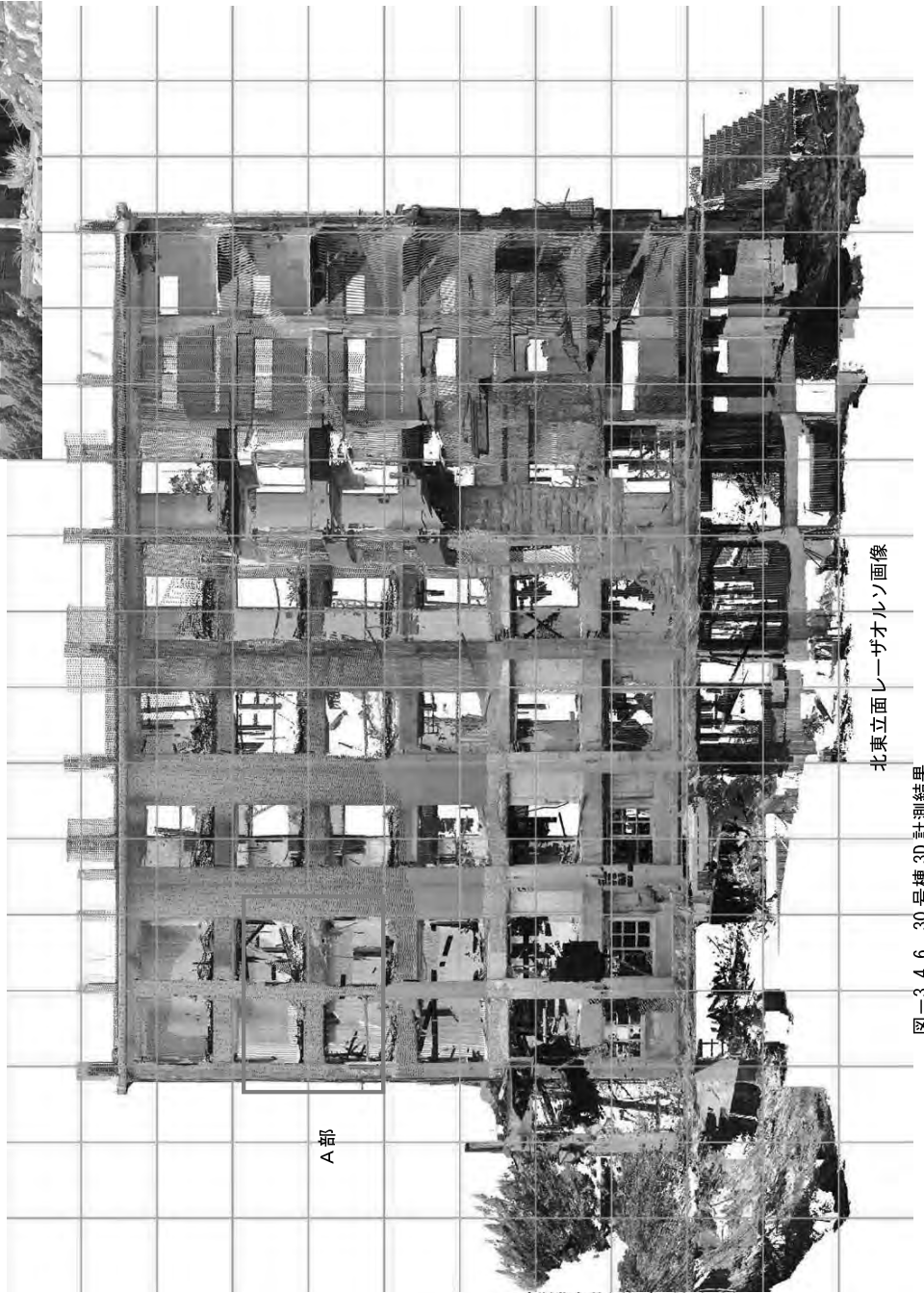
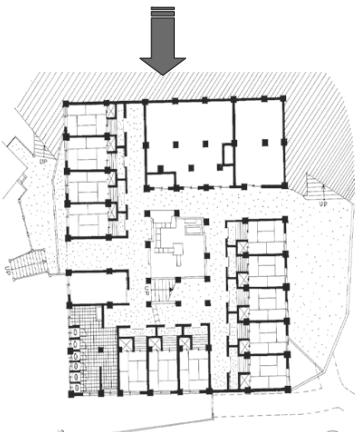
北西立面レーザーザオルノ画像



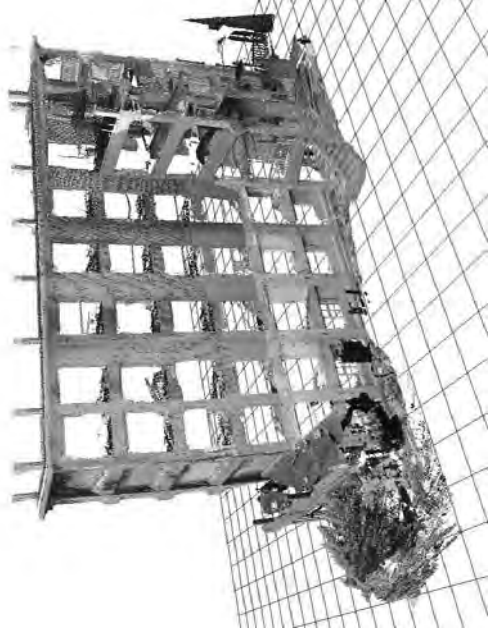
図-3.4.5 30号棟3D計測結果



A部

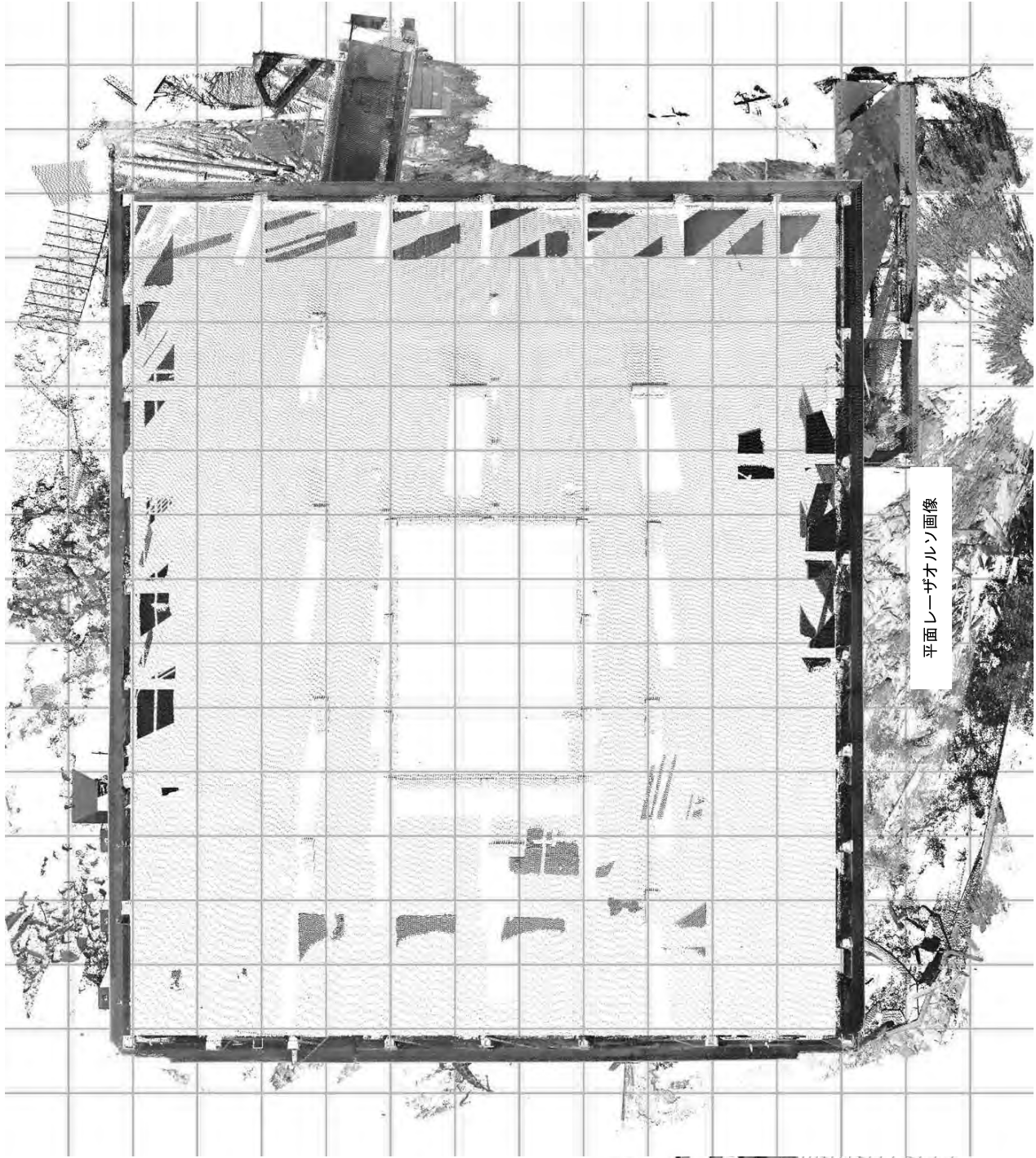


A部



北東立面レーザーガオルソ画像

図-3.4.6 30号棟 3D 計測結果



平面レーザーガオルン画像

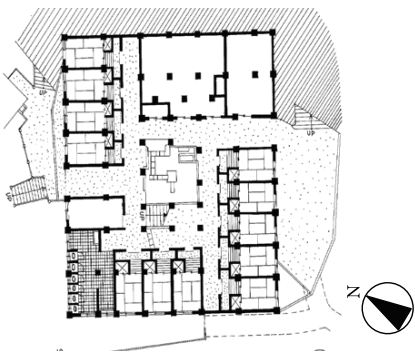
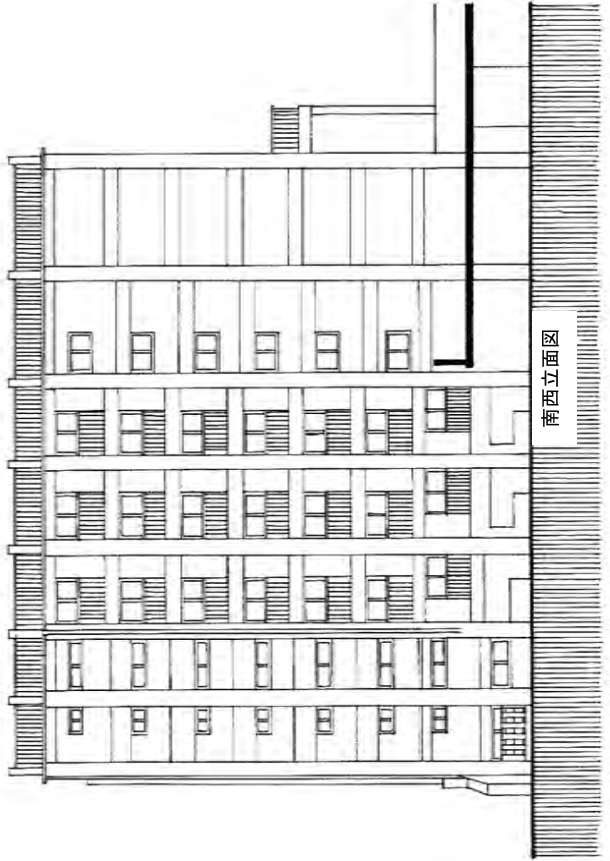
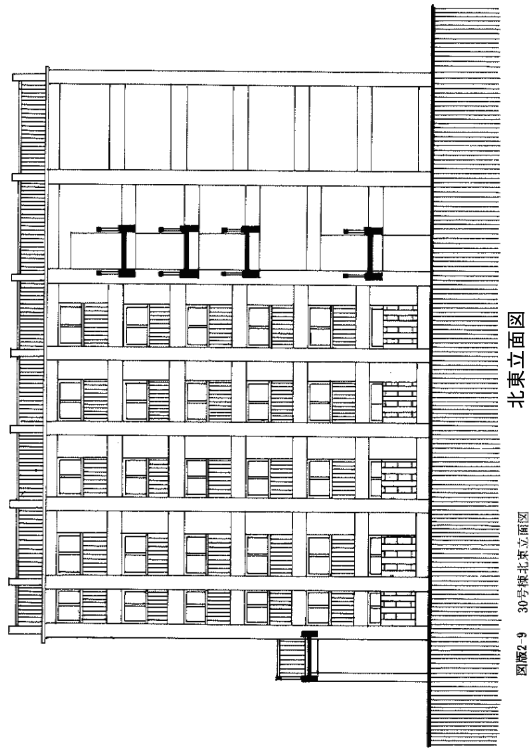
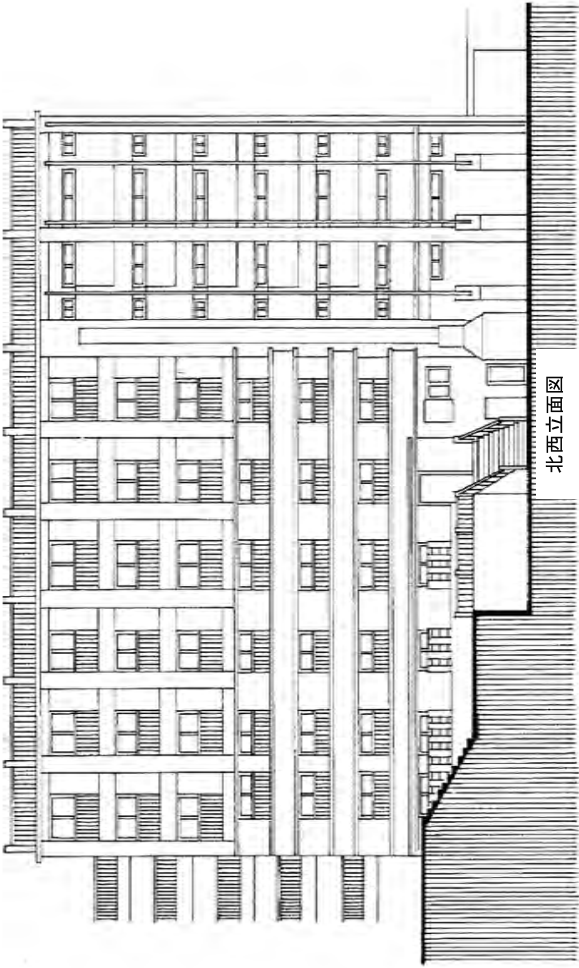
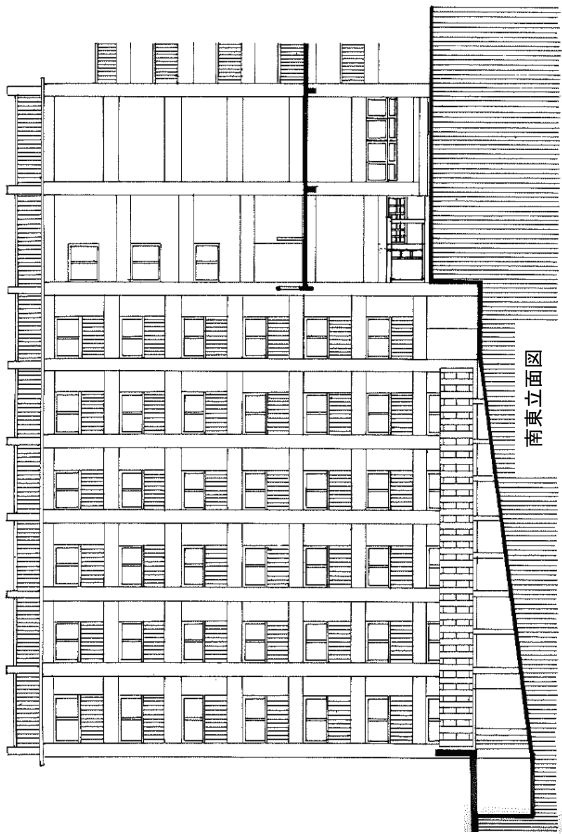


図-3.4.7 30号棟 3D計測結果



图一3.4.8 30号栋既存图(2)

30号棟

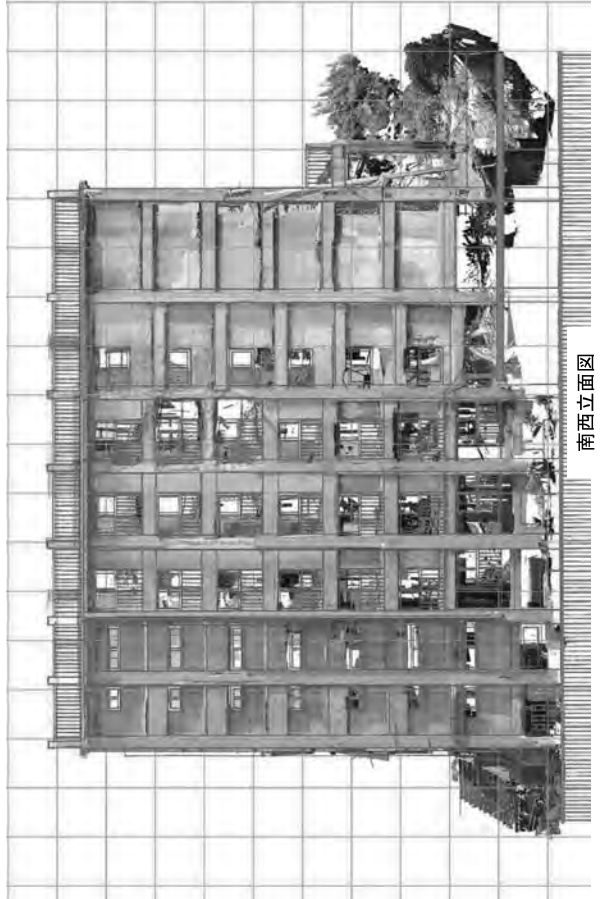
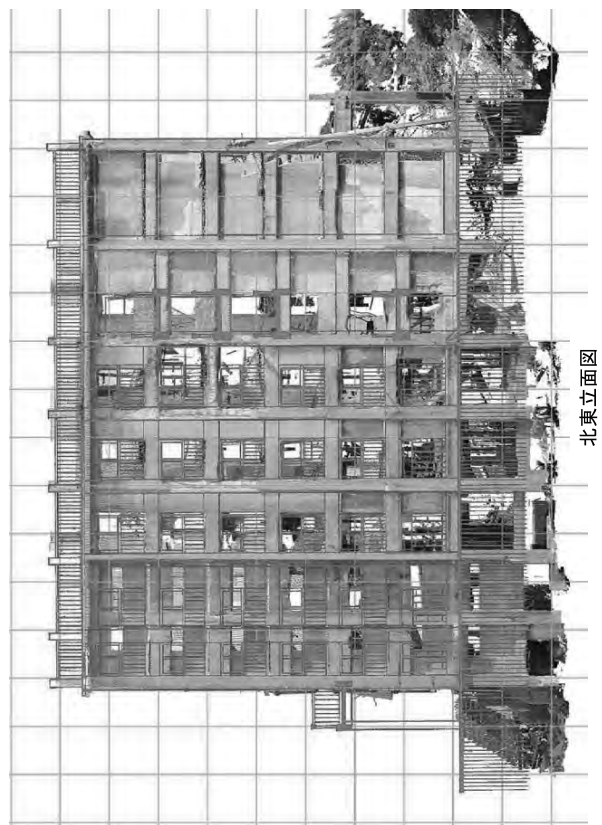
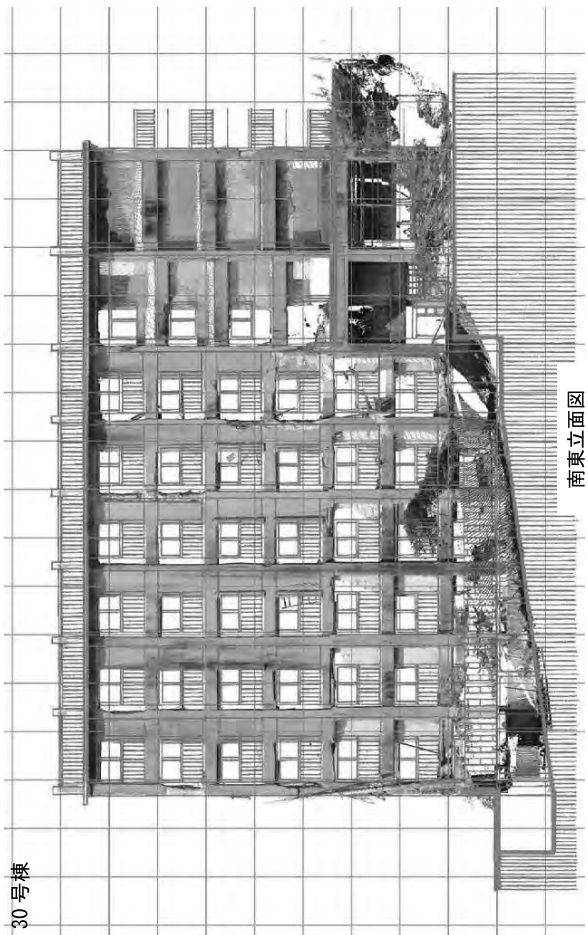


図-3.4.9 30号棟既存図面²⁾と3D計測結果の合成

65号棟

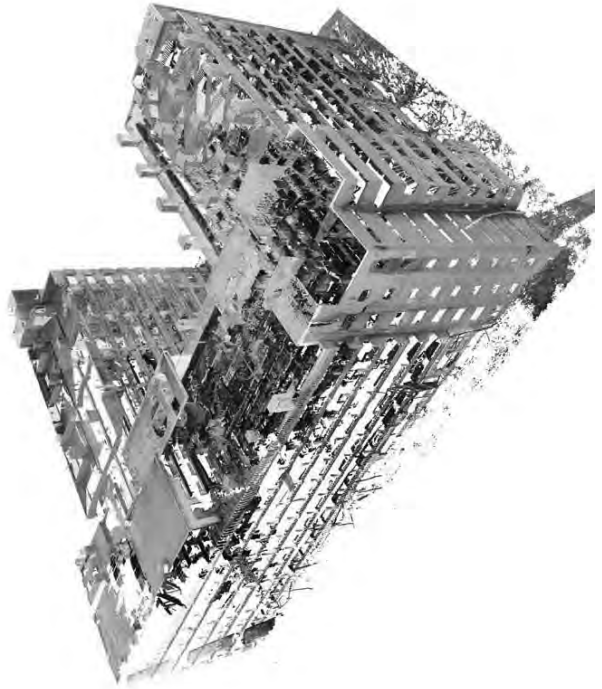
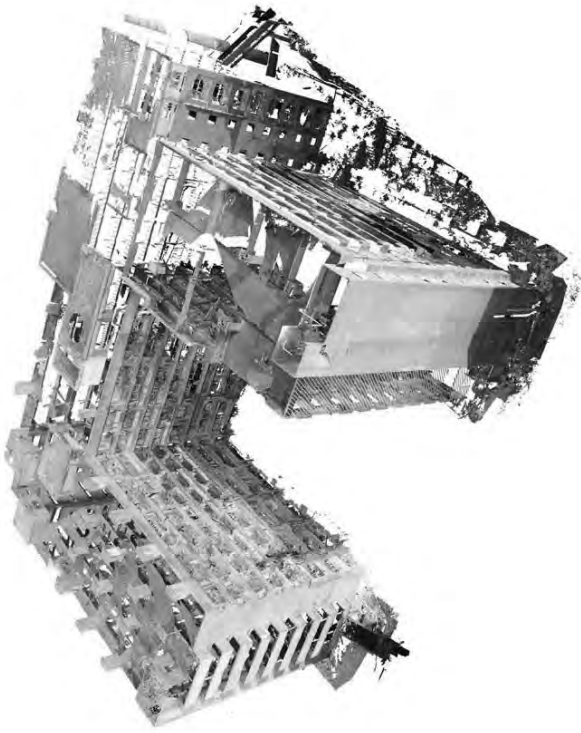
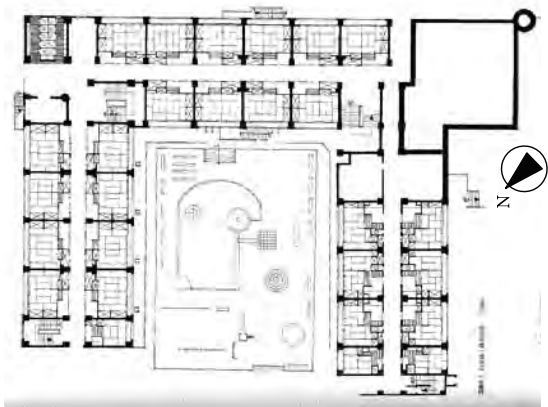
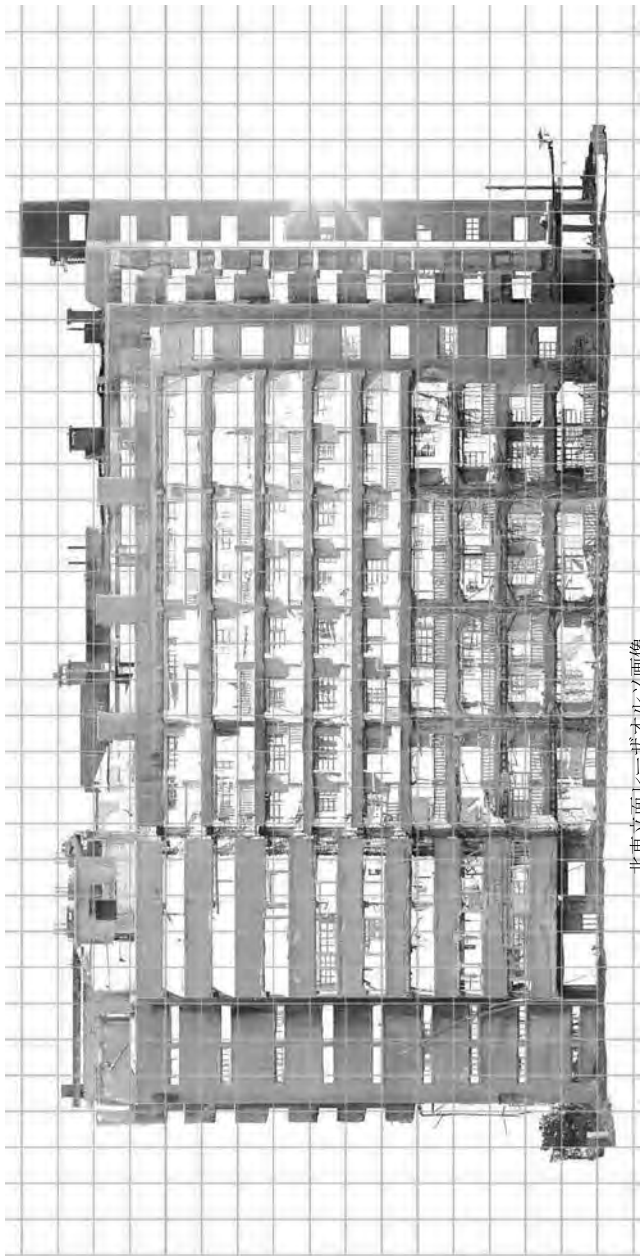


图-3.4.10 65号棟3D計測結果



北東立面レーザースキャン画像

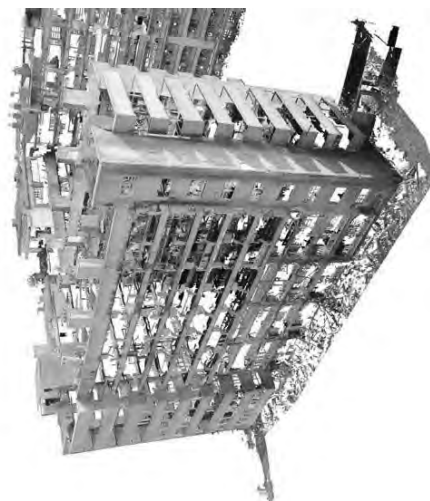
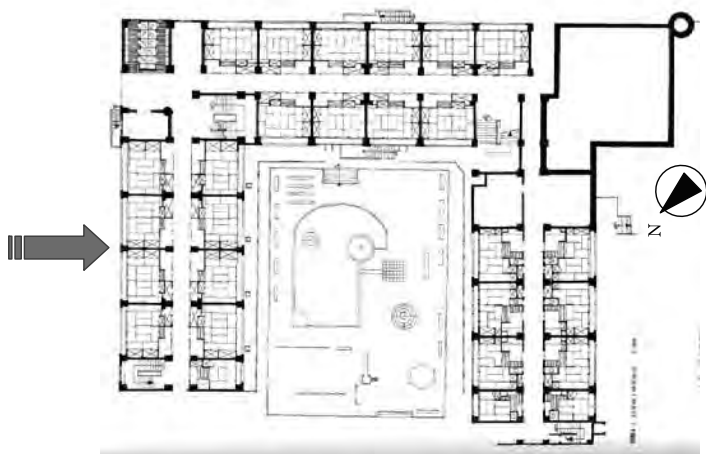
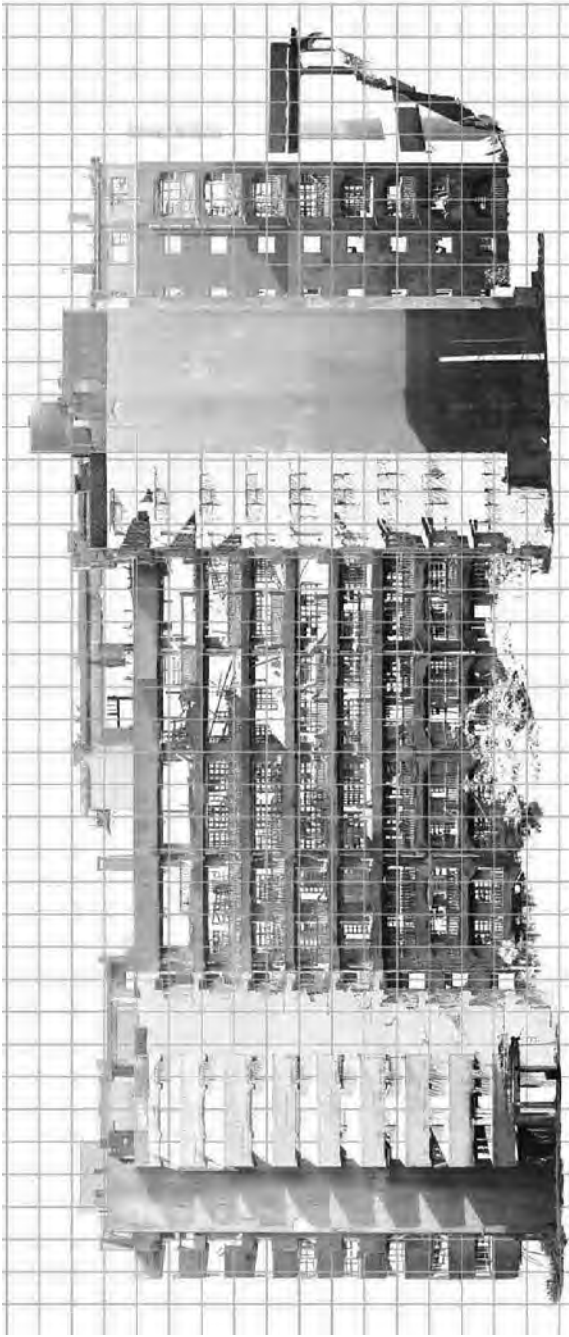


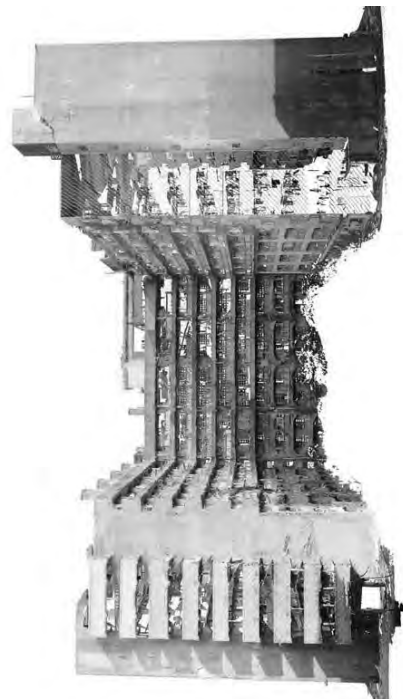
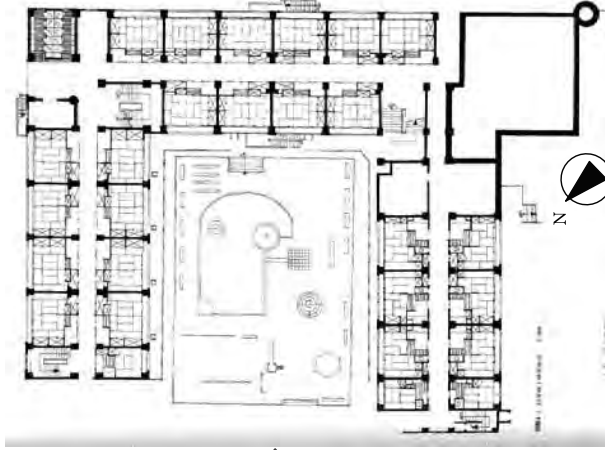
图-3.4.11 65号棟3D計測結果

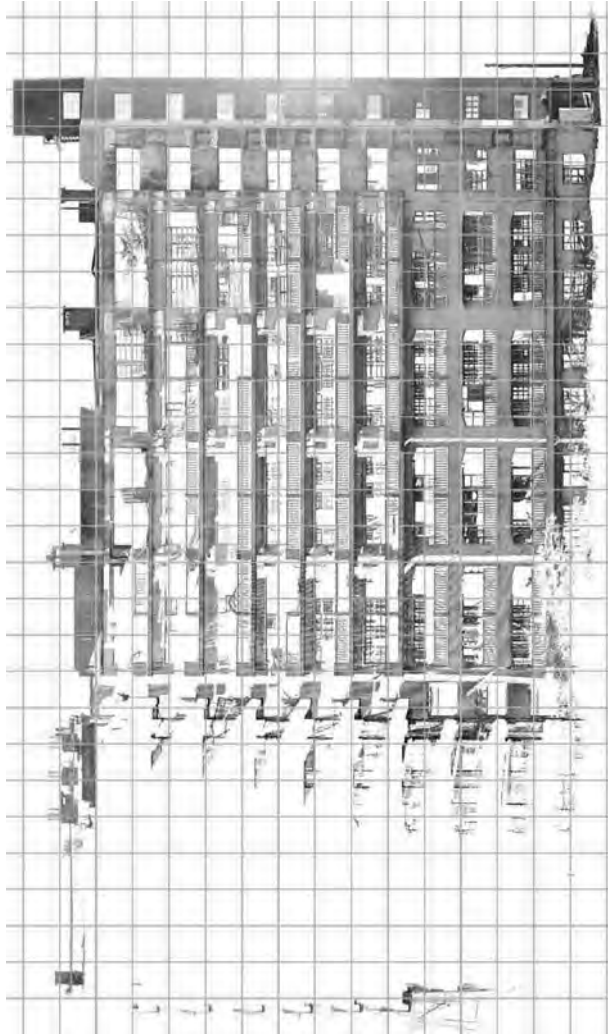


北西立面レーザースキャン画像



図-3.4.12 65号棟3D計測結果





中庭南立面レーザーオルソ画像

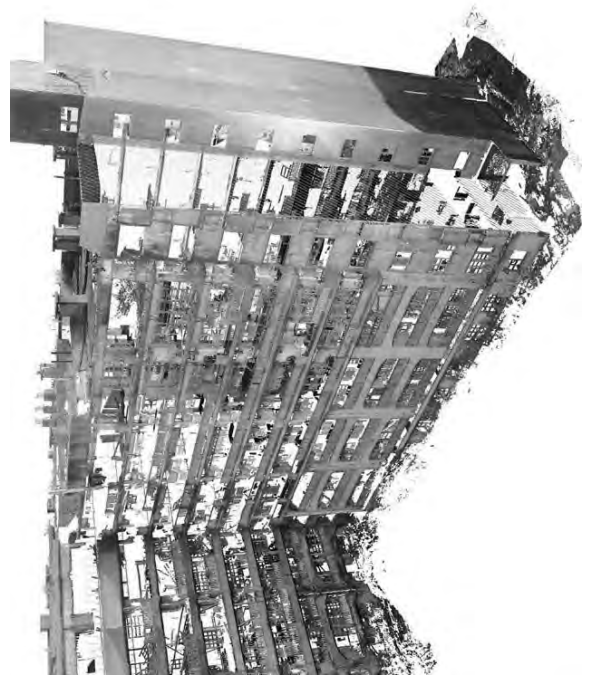
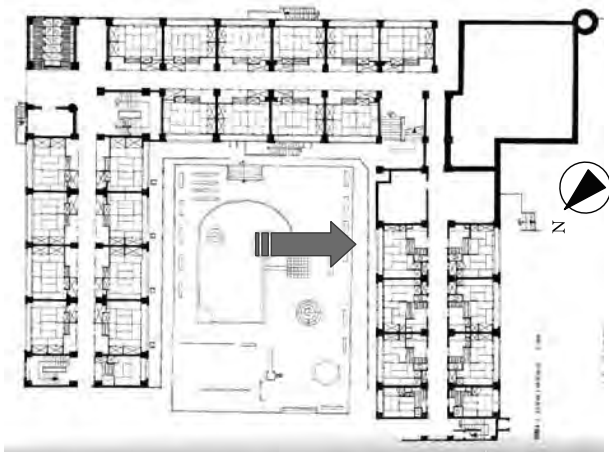
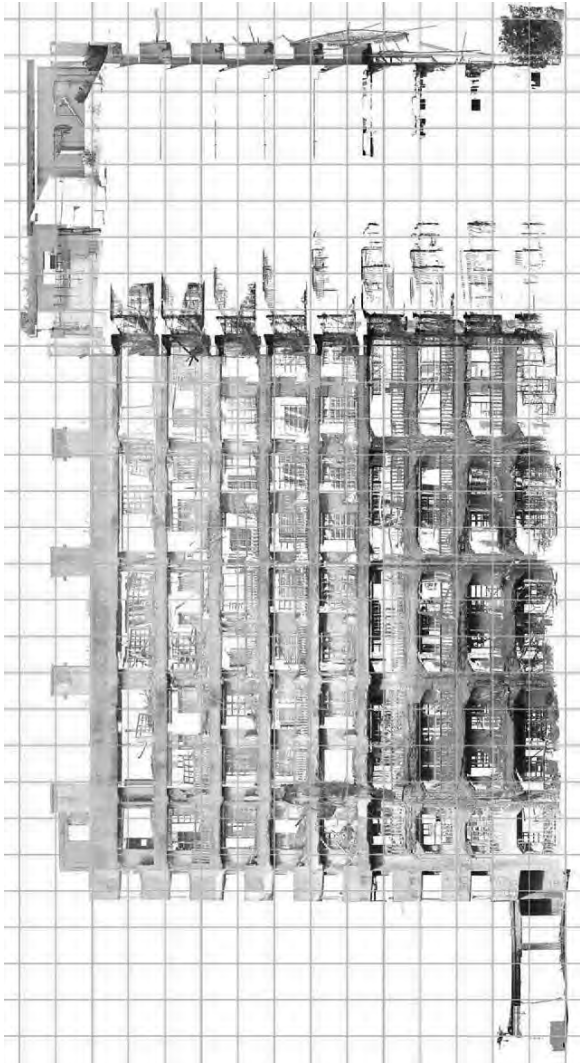


図-3.4.13 65号棟 3D計測結果



中庭北立面レーザーサオスノ画像

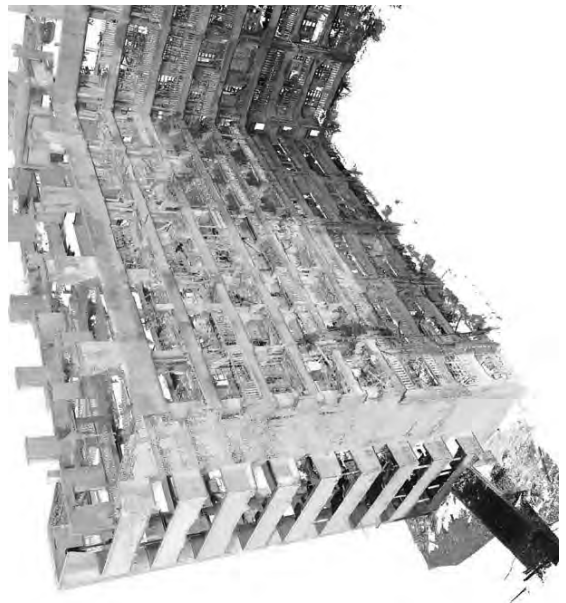
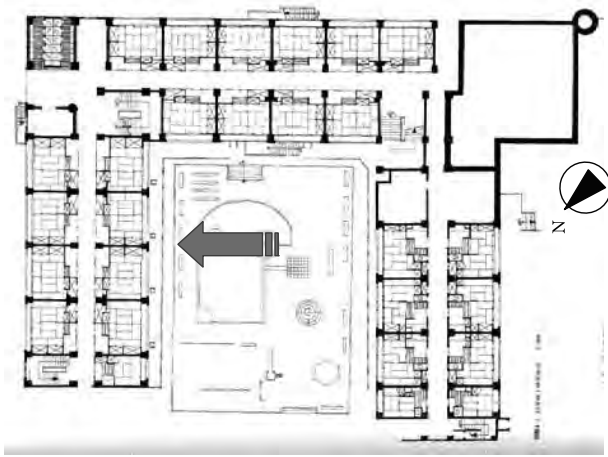
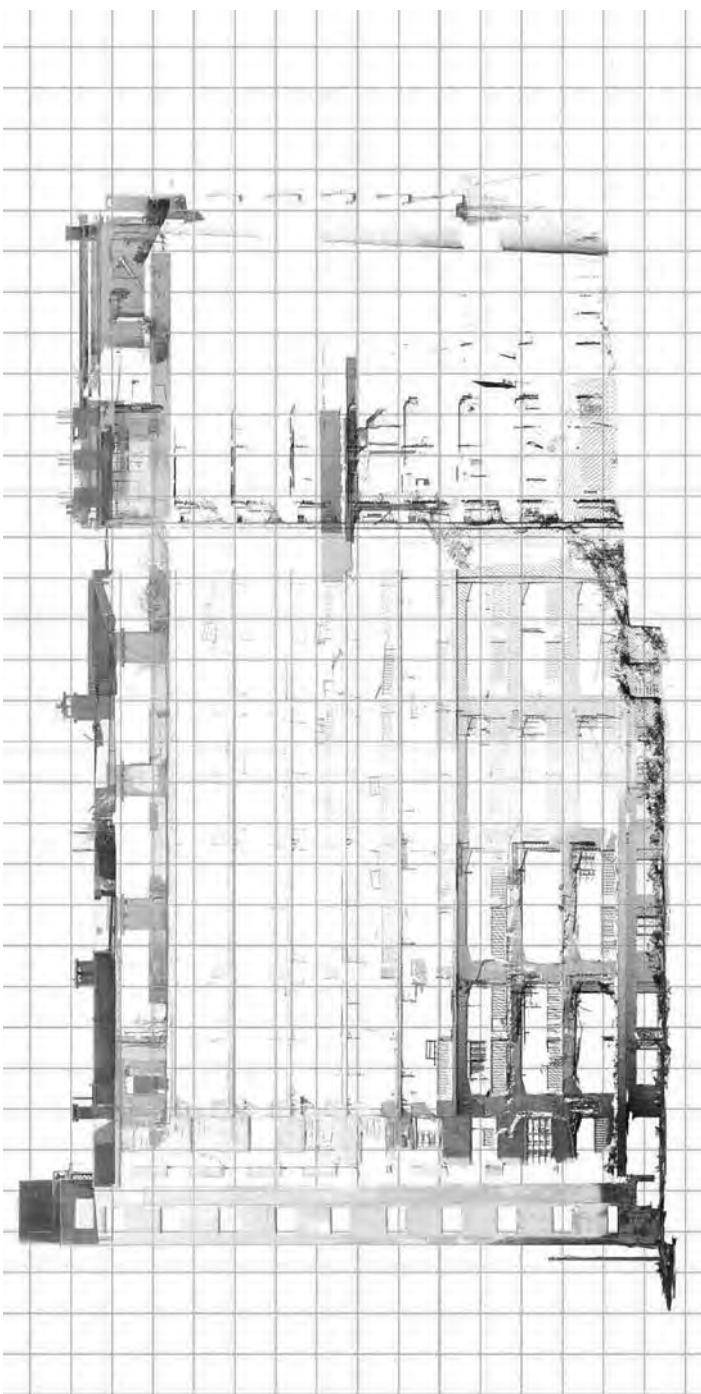


図-3.4.14 65号棟3D計測結果



南西立面レーザーガオルン画像

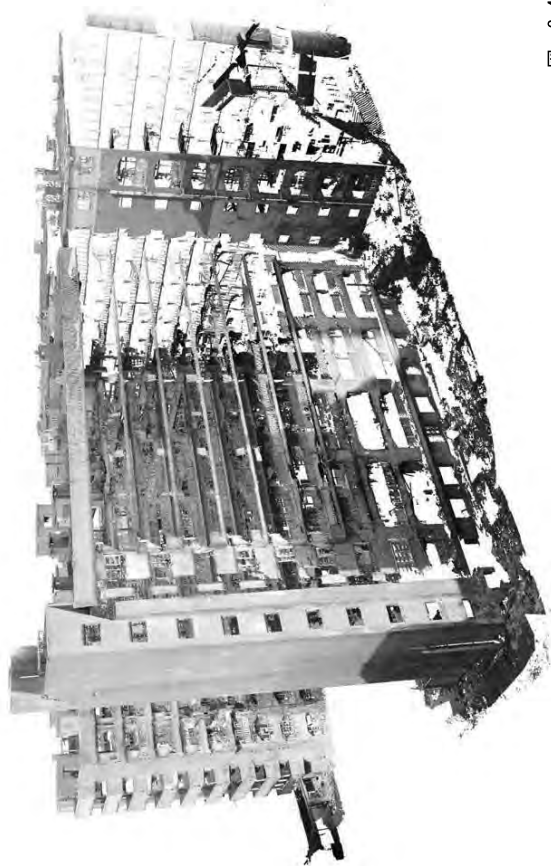
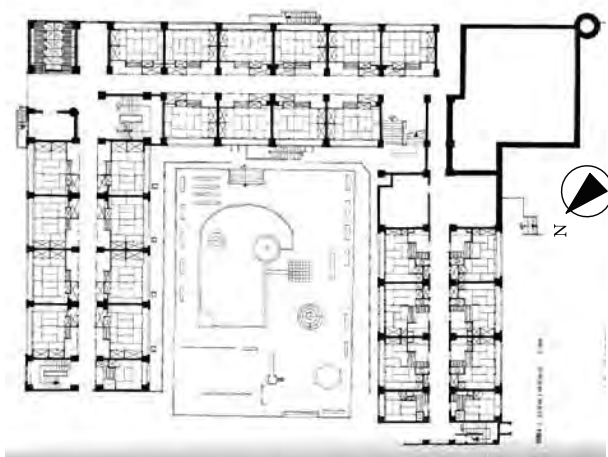
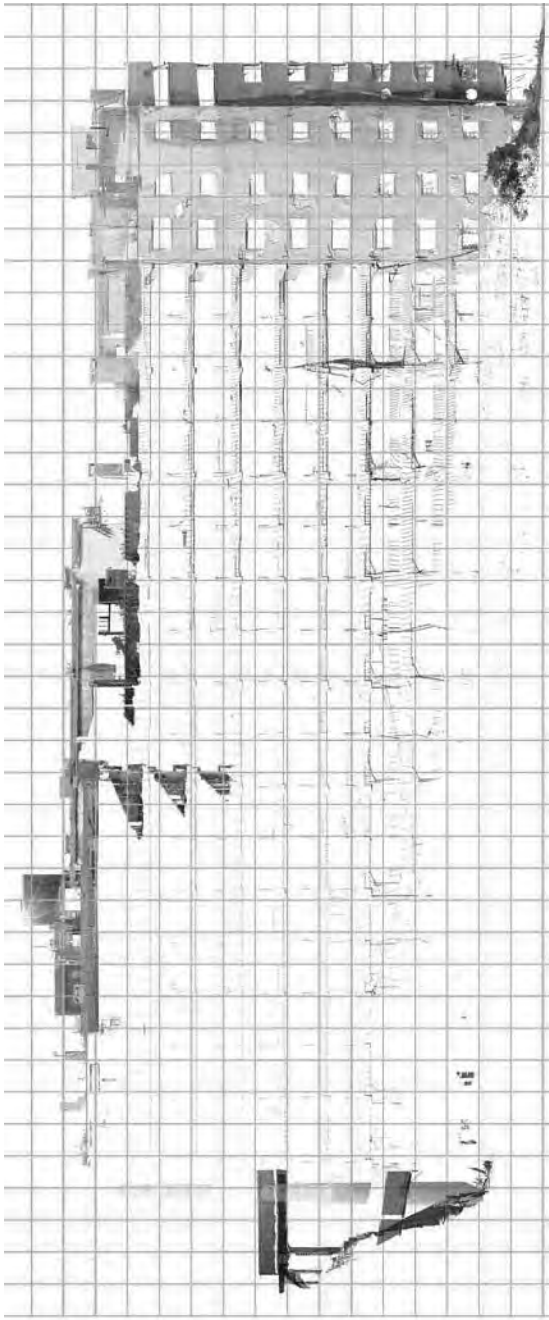


図-3.4.15 65号棟3D計測結果



南東立面レーザーガオルソ画像

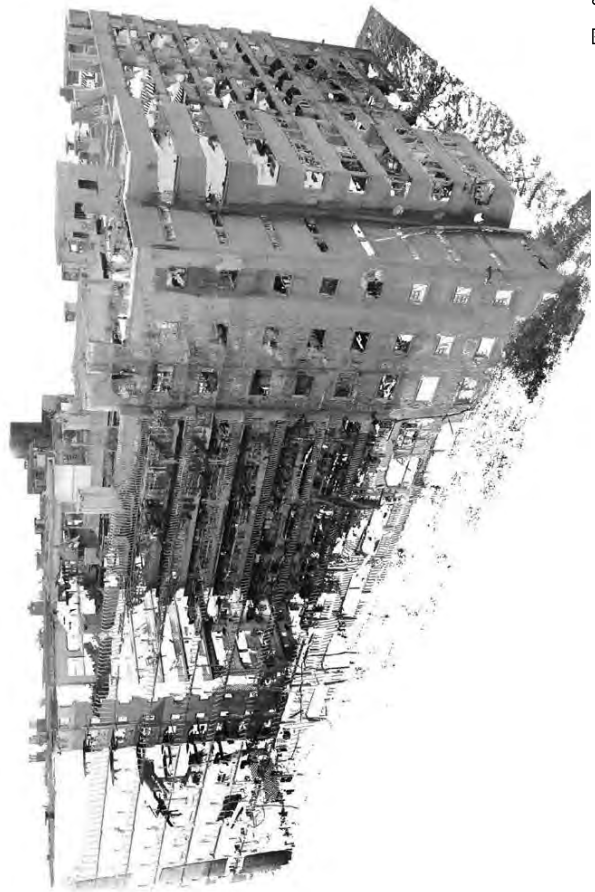
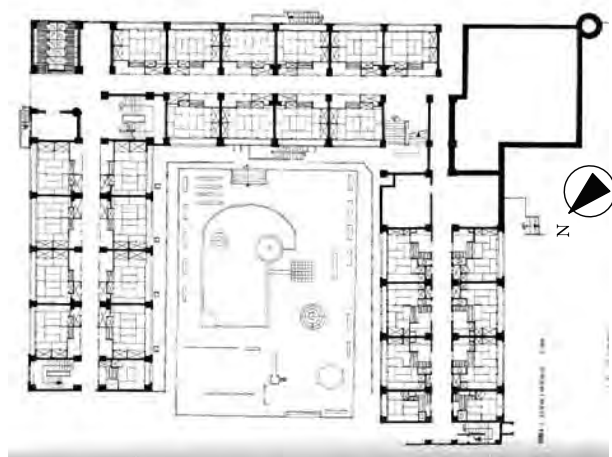


図-3.4.16 65号棟3D計測結果

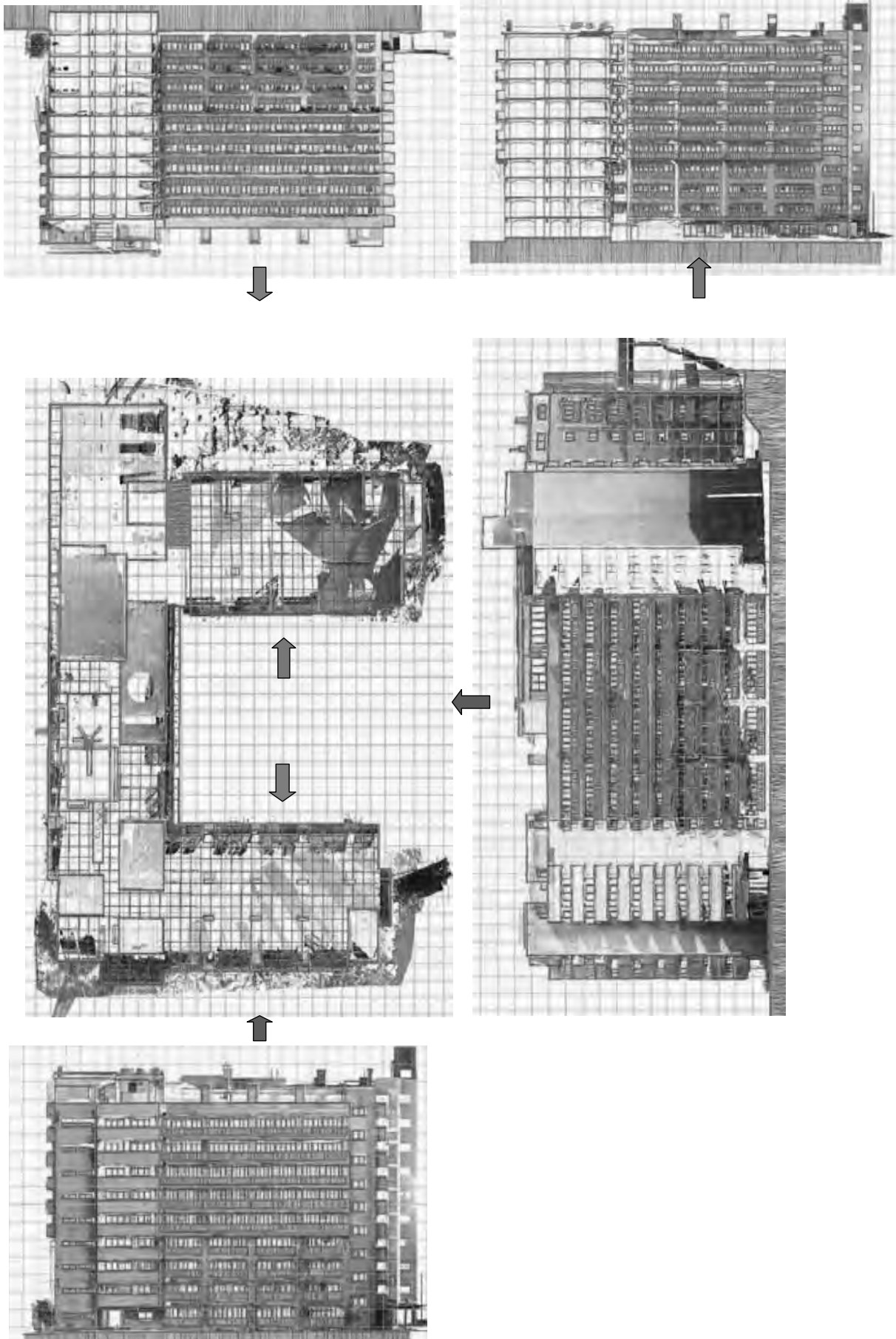


図-3.4.17 65号棟既存図面²⁾と3D計測結果の合成

3. 5 蛍光 X 線分析

3. 5. 1 概要

軍艦島島内の建造物は、大正 5 年～昭和 45 年にかけて建設されており、年代ごとのコンクリートの材料分析を行うことは、島内のセメント・コンクリートの材料的製造史や化学史を把握する上で極めて重要なものである。今回は、長崎市の許可の下、30 号棟（大正 5 年）、65 号棟（昭和 20 年）、71 号棟（昭和 45 年）から落下したと思われる各アパート群付近の地上部に朽ち果てているコンクリート片を採取して、蛍光 X 線分析装置を用いて元素分析を行った。コンクリート片については、長崎市の許可を得て、大学に持ち帰り分析を実施した。

蛍光 X 線分析とは、X 線を試料に照射したとき、試料から発生する蛍光 X 線を検出分光して元素分析を行う方法のことをいう。蛍光 X 線は、試料を構成する元素固有の波長(エネルギー)を持つので、簡単に定性分析ができ、各スペクトルの強度から定量分析ができる。分析における試料は、なるべく骨材がない場所を選定して、ハンマードリルで粉末状にした。今回、分析に用いた装置は、SHIMAZU 製の RAYNY EDX（写真-3.5.1）を使用した。図-3.5.1～3.5.4 に軍艦島、30 号棟、65 号棟、71 号棟の平面図を写真-3.5.3～3.5.7 に採取個所、採取試料を示す。



写真-3.5.1 蛍光 X 線分析装置
SHIMAZU 社製 RAYNY EDX

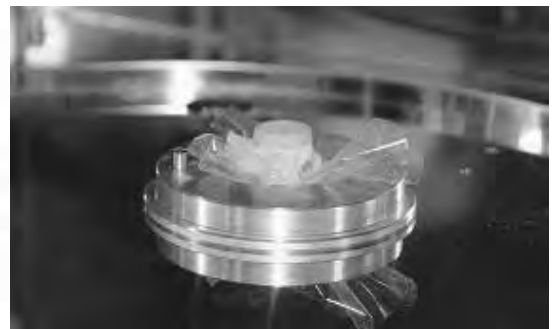


写真-3.5.2 試験片セット状況



図-3.5.1 軍艦島平面図

●30号棟

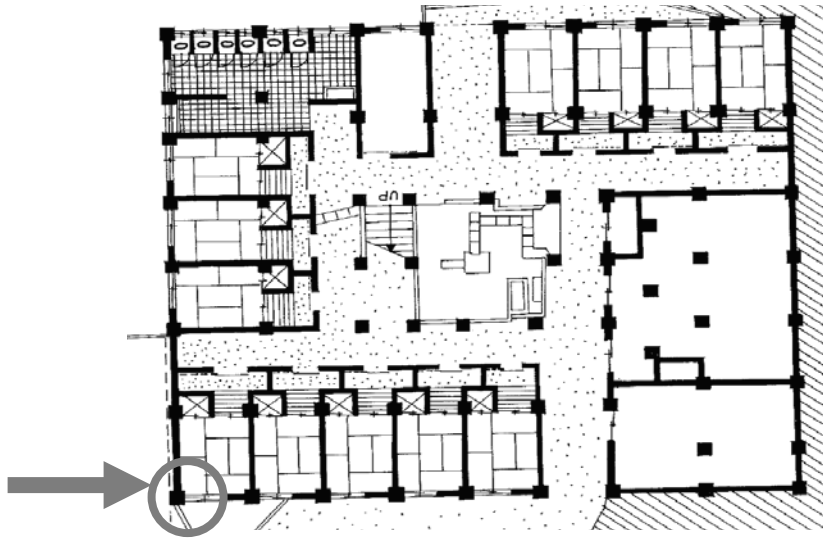


図-3.5.2 30号棟平面図



写真-3.5.3 採取個所



写真-3.5.4 採取試料

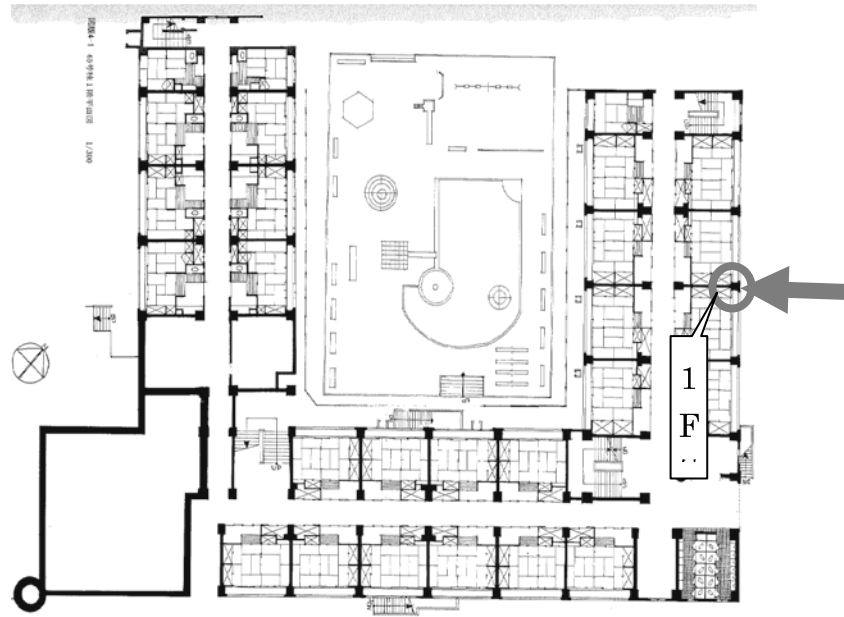


図-3.5.3 65号棟平面図



写真-3.5.5 採取箇所



写真-3.5.6 採取試料

●71号棟

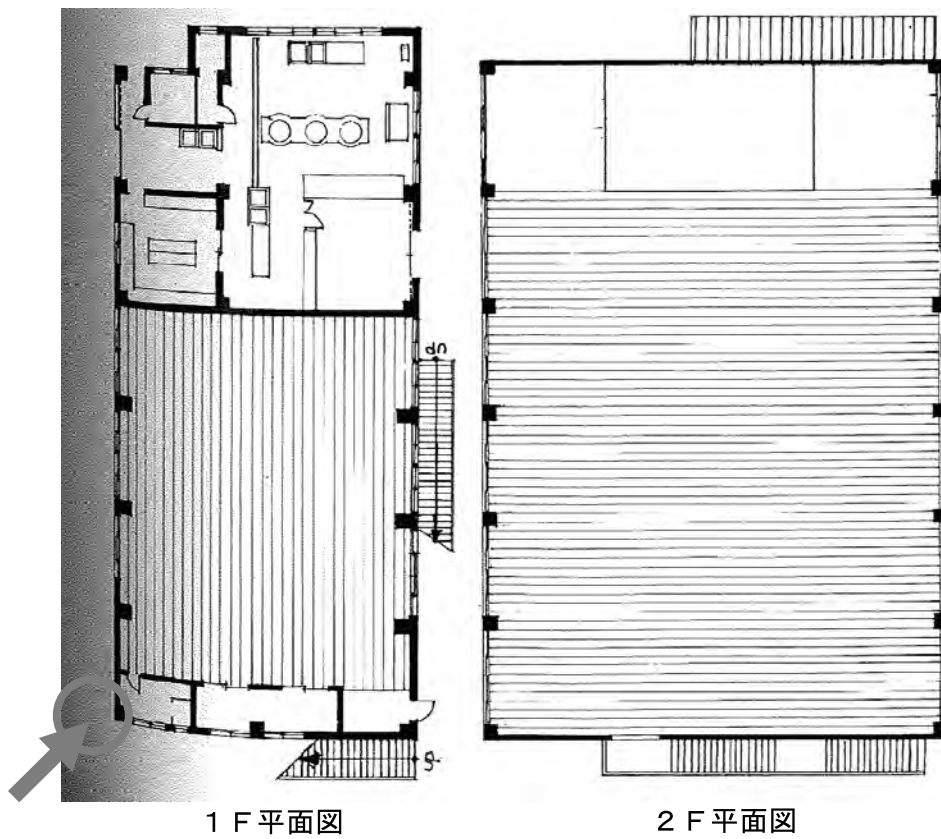


図-3.5.4 71号棟平面図



写真-3.5.7 採取試料

3. 5. 2 分析結果

蛍光 X 線分析結果（図-3.5.5～図-3.5.7）をまとめたものを表-3.5.1 に示す。表から以下のことが確認できた。

- ・ Si、Ca、Al、K がすべての棟で確認できた。
- ・ Na は、30 号棟、71 号棟で確認できたが、65 号棟では確認できなかった。
- ・ Cl は、30 号棟、65 号棟で確認できたが、71 号棟では、確認できなかった。30 号棟と 65 号棟では、大量に Cl が混入している。
- ・ Mg は、30 号棟、65 号棟で確認できたが、71 号棟では確認できなかった。
- ・ Zn は、65 号棟、71 号棟で確認できたが、30 号棟では確認できなかった。
- ・ Sc は、71 号棟のみ確認できた。
- ・ Fe、S、Ti、Mn、Sr、Zr がすべての棟でほぼ同じ含有量で確認されるのは、おそらくコンクリート粉末上にした際に使用したドリル金属粉が混入していることが考えられる。

表-3.5.1 分析結果一覧

号棟	30 号棟 1F 南面東側柱	65 号棟 1F 外側柱	71 号棟 1F 柱
分析結果	Si 46.384%	Si 46.631%	Si 43.606%
	Ca 17.848%	Ca 26.580%	Ca 22.521%
	Al 11.716%	Al 9.343%	Al 12.909%
	Na 8.443%	Cl 7.122%	Na 9.669%
	Fe 5.193%	Fe 5.601%	Fe 5.402%
	Cl 3.606%	K 1.674%	Sc 2.747%
	Mg 2.821%	Mg 1.636%	K 1.831%
	K 2.327%	S 0.606%	S 0.523%
	S 0.621%	Ti 0.527%	Ti 0.471%
	Ti 0.543%	Mn 0.137%	Mn 0.146%
	Mn 0.400%	Sr 0.060%	Zn 0.079%
	Sr 0.059%	Zn 0.048%	Sr 0.059%
	Zr 0.039%	Zr 0.037%	Zr 0.035%

定量分析結果

分析対象	分析結果	(標準偏差)	処理-計算	分析線	強度(cps/uA)
==== 【第 1層】 =====< Layer1 >=====					
	5,000-um		()	固定	
C10H804	100.000 %		()	固定	
==== 【第 2層】 =====< Base >=====					
Si	46.384 %	(0.153)	定量-FP	SiKa	3.454
Ca	17.848 %	(0.063)	定量-FP	CaKa	3.175
Al	11.716 %	(0.147)	定量-FP	AlKa	0.345
Na	8.443 %	(0.091)	定量-FP	NaKa	0.012
Fe	5.193 %	(0.031)	定量-FP	FeKa	12.391
Cl	3.606 %	(0.112)	定量-FP	ClKa	0.882
Mg	2.821 %	(0.228)	定量-FP	MgKa	0.024
K	2.327 %	(0.037)	定量-FP	K Ka	0.306
S	0.621 %	(0.019)	定量-FP	S Ka	0.109
Ti	0.543 %	(0.029)	定量-FP	TiKa	0.409
Mn	0.400 %	(0.016)	定量-FP	MnKa	0.706
Sr	0.059 %	(0.003)	定量-FP	SrKa	0.812
Zr	0.039 %	(0.003)	定量-FP	ZrKa	0.650

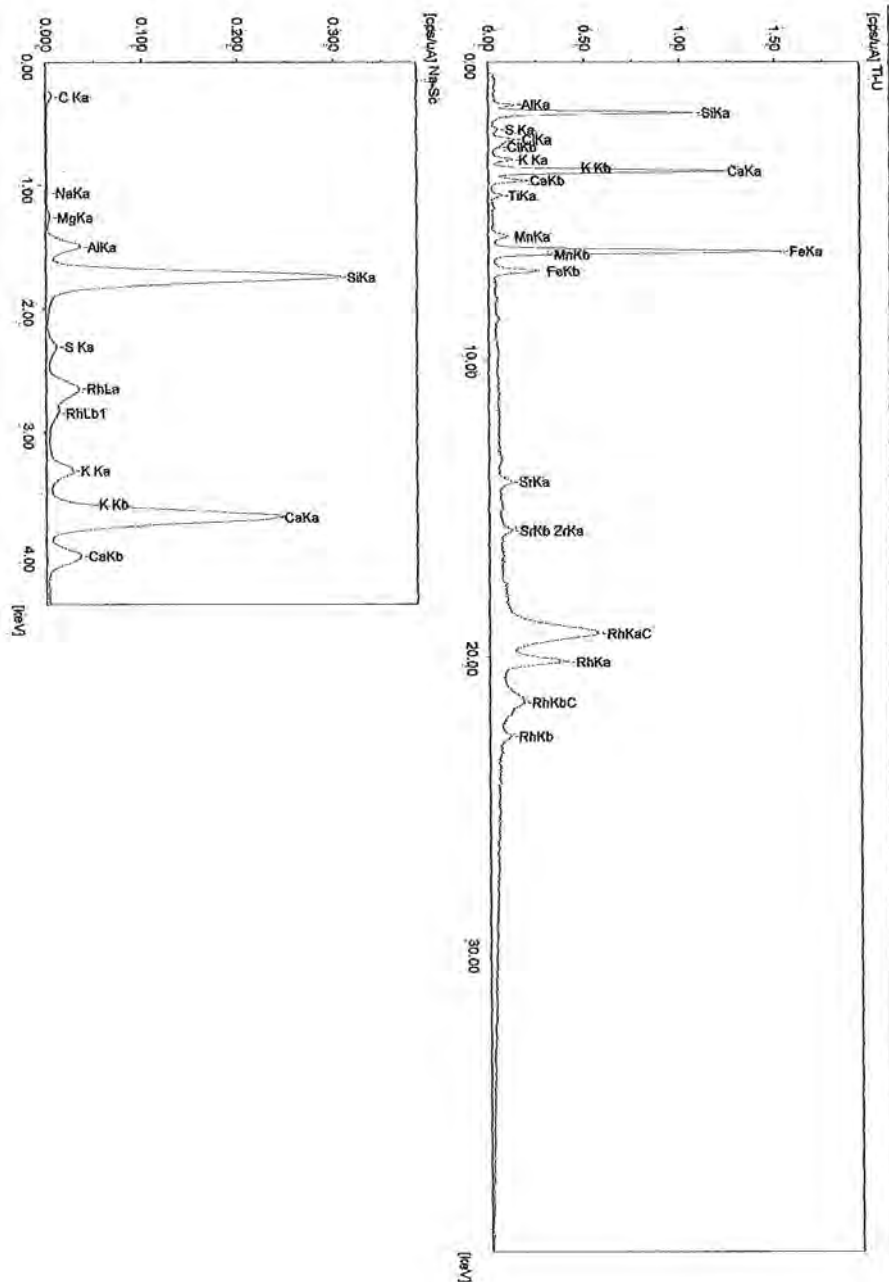


図-3.5.5 30号棟分析結果

定量分析結果

分析対象	分析結果	(標準偏差)	処理=計算	分析線	強度(cps/uA)
==== 【第1層】 =====< Layer1 >=====					
	5.000 um			() 固定	
C10(804)	100.000 %			() 固定	
==== 【第2層】 =====< Base >=====					
Si	46.631 %	(0.160)	定量-FP	SiKa	3.863
Ca	26.580 %	(0.086)	定量-FP	CaKa	4.491
Al	9.343 %	(0.140)	定量-FP	AlKa	0.305
Cl	7.122 %	(0.103)	定量-FP	ClKa	1.787
Fe	5.601 %	(0.034)	定量-FP	FeKa	11.446
K	1.674 %	(0.040)	定量-FP	K Ka	0.213
Mg	1.636 %	(0.213)	定量-FP	MgKa	0.016
S	0.606 %	(0.022)	定量-FP	S Ka	0.111
Ti	0.527 %	(0.029)	定量-FP	TiKa	0.339
Mn	0.137 %	(0.014)	定量-FP	MnKa	0.207
Sr	0.060 %	(0.003)	定量-FP	SrKa	0.702
Zn	0.048 %	(0.007)	定量-FP	ZnKa	0.106
Zr	0.037 %	(0.003)	定量-FP	ZrKa	-0.526

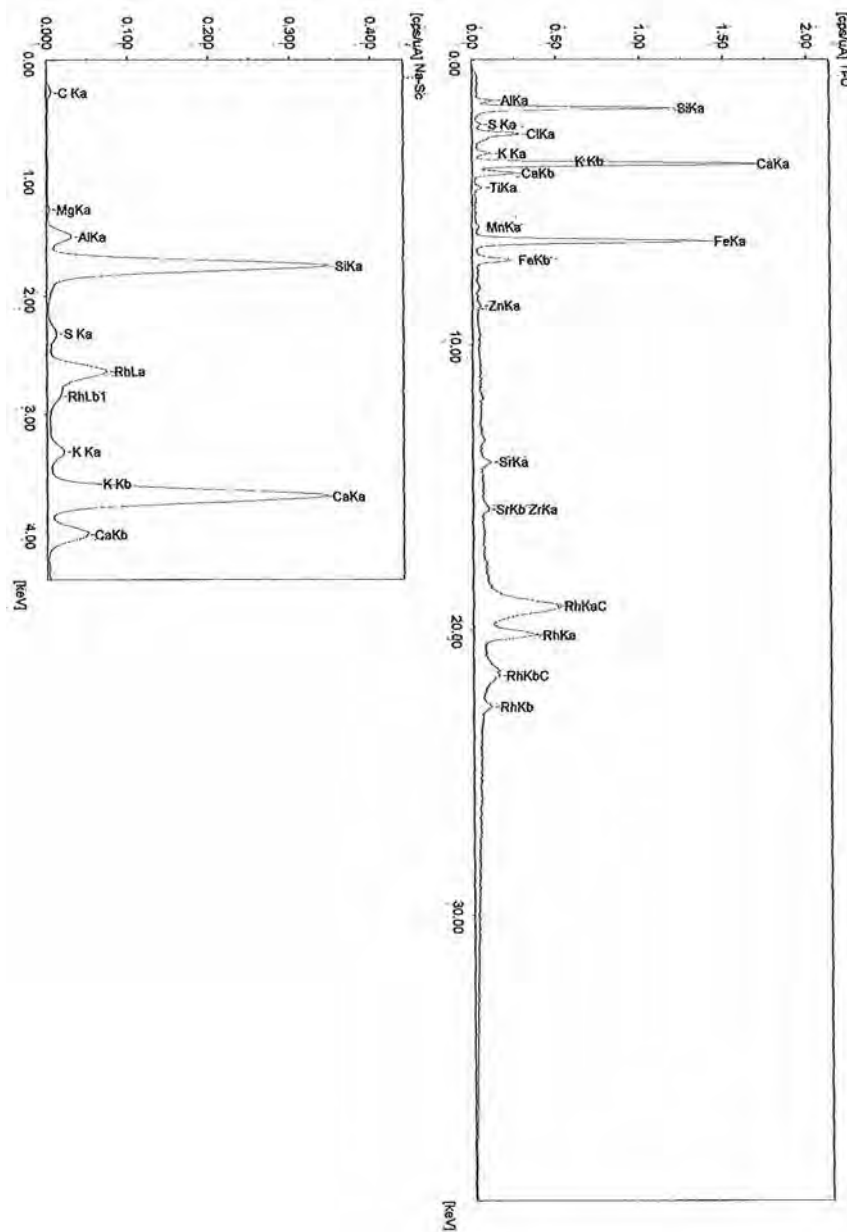


図-3.5.6 65号棟分析結果

定量分析結果

分析対象	分析結果	(標準偏差)	処理-計算	分析線	強度(cps/uA)
==== 【第1層】 =====<	Layer1				
	5.000 um		(——)	固定	
C10H8O4	100.000 %		(——)	固定	
==== 【第2層】 =====<	Base				
Si	43.606 %	(0.151)	定量-FP	SiKa	3.423
Ca	22.521 %	(0.069)	定量-FP	CaKa	4.519
Al	12.909 %	(0.153)	定量-FP	AlKa	0.406
Na	9.669 %	(0.990)	定量-FP	NaKa	0.013
Fe	5.402 %	(0.031)	定量-FP	FeKa	12.764
Sc	2.747 %	(0.027)	定量-FP	ScKa	0.632
K	1.831 %	(0.034)	定量-FP	K Ka	0.277
S	0.523 %	(0.017)	定量-FP	S Ka	0.100
Ti	0.471 %	(0.027)	定量-FP	TiKa	0.349
Mn	0.146 %	(0.013)	定量-FP	MnKa	0.256
Zn	0.079 %	(0.007)	定量-FP	ZnKa	0.372
Sr	0.069 %	(0.003)	定量-FP	SrKa	0.930
Zr	0.035 %	(0.003)	定量-FP	ZrKa	0.580

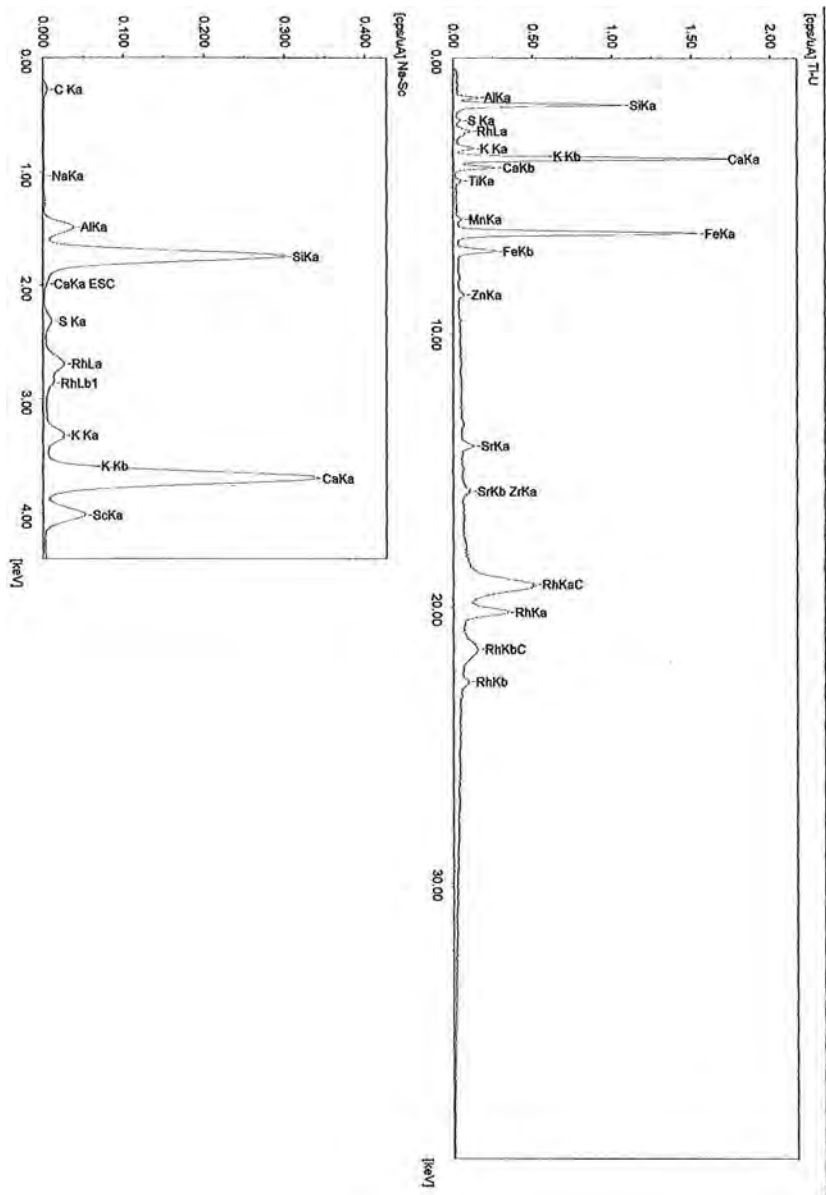


図-3.5.7 71号棟分析結果

3. 6 腐食生成物の微視的観察

3. 6. 1 概要

コンクリート構造物の耐久性に関する重要な問題の一つに鋼材腐食の問題が挙げられる。近年、耐久性設計や維持管理に関する関心が高まっており、鋼材の腐食についても、腐食の開始とその進行を精度良く予測することは重要な課題の一つである。

鋼材の腐食が開始する発錆限界塩化物イオン量や腐食速度に関しては、これまで多くの知見が蓄積されているものの、解決すべき課題も残されている。その中の一つに鋼材の腐食と環境条件の関係の定量的評価が挙げられる。鋼材の腐食に影響を及ぼす環境条件としては、干満帯、飛沫帯等での塩化物イオンの供給の差異や温度、湿度等の様々な要因が挙げられているが、それぞれの要因の影響度は定量的に評価されていないのが現状である。

一方、腐食した鋼材の腐食生成物は、層状の構造を呈することが多い。本検討では、この層状構造に着目した。すなわち、腐食生成物の層構造の違いが、腐食進行の相違を表しているものと考え、腐食生成物の層構造の観察より腐食環境の評価を試みた。

3. 6. 2 試料概要

軍艦島内の建造物(30号棟)の計8部材より試料を採取し、環境条件の違いを評価するため同一面の東側と西側の部材、すなわち南面東側柱および南面西側梁より採取した試料について観察を行った。なお、1つの部材に対し、2つの観察試料を作製した。写真-3.6.1および写真-3.6.2に東側梁および西側梁より採取した試料の外観を示す。いずれの試料も外観では、層状構造を呈していることが確認された。



写真-3.6.1 東側柱より採取した試料の外観

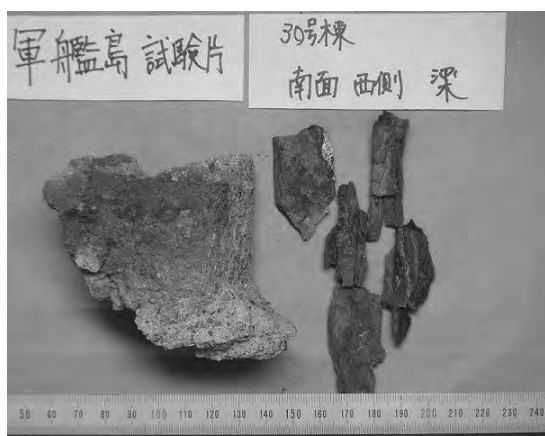
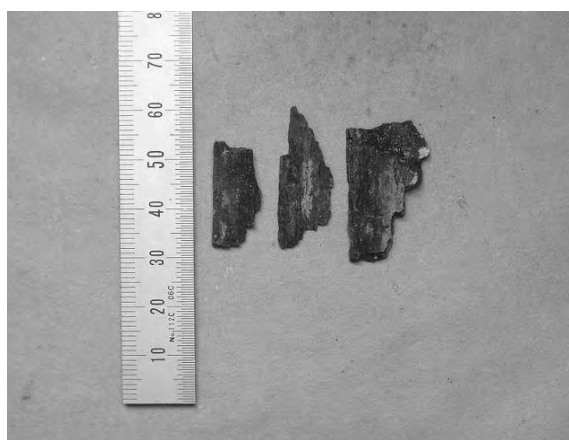


写真-3.6.2 西側柱より採取した試料の外観

3. 6. 3 試験方法

(1) 観察試料の作製

観察試料作製の作業フローを図-3.6.1に示す。試料の作製は、まず、試料の切断より行うが、この際、切断による試料の破損を防ぐため、エポキシ樹脂を表面に含浸した後、精密カッターで切断を行った。

試料の切断後は断面の研磨を行った後に、観察面に対し樹脂の含浸を行った。なお、蛍光顕微鏡による観察を行うことから、エポキシ樹脂に対し、粉末状の蛍光塗料を加えた蛍光樹脂を含浸した。また、樹脂の含浸は真空含浸により行った。具体的には、写真-3.6.3に示すように、真空デシケータ内の容器に試料を入れ、樹脂の注入用のチューブを固定した後、デシケータ内を真空状態とし、チューブより樹脂の注入を行った。

樹脂の硬化後に、観察面の精研磨および琢磨を行ったものを観察試料とした。

(2) 観察方法

本研究では、観察手法として、蛍光顕微鏡観察および走査型電子顕微鏡(SEM)観察の2つの手法を用いた。蛍光顕微鏡観察は、主にマクロな層間隔を把握することを目的としており、SEM観察によってミクロな構造を把握することを目的としている。蛍光顕微鏡観察での、観察倍率は15倍とした。SEM観察は、25倍~1000倍の倍率の範囲で観察を行った。なお、SEM観察に際して、導電のためAu-Pt蒸着を行った。

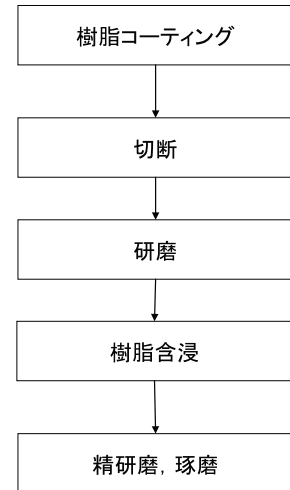


図-3.6.1 試料作製のフロー

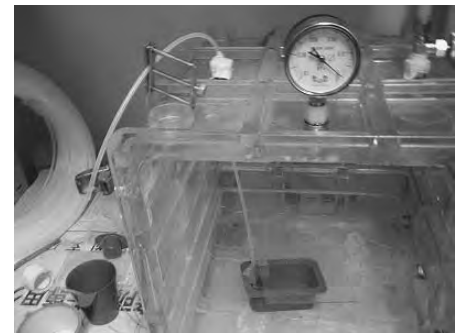


写真-3.6.3 樹脂含浸装置

3. 6. 4 観察結果

(1) 蛍光顕微鏡観察結果

図-3.6.2 および図-3.6.3 に、東側柱および西側柱の蛍光像を示す。図より、大きな空隙やひび割れには樹脂が含浸されているが、外観上見られた層構造は明確には確認できなかった。また、コンクリートと腐食生成物の界面においても、蛍光樹脂は含浸されておらず、比較的密実であることが分かった。

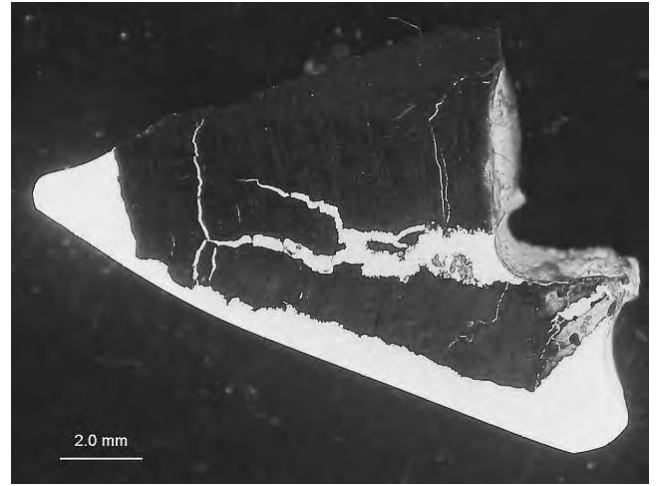
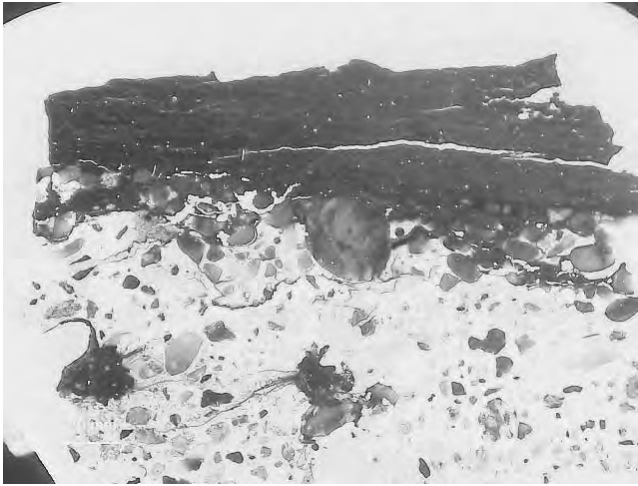


図-3.6.2 蛍光像(東側柱、左:No. 1、右:No. 2)



図-3.6.3 蛍光像(西側梁、左:No. 1、右:No. 2)

(2) SEM 観察結果

図-3.4.4 および図-3.4.5 に東側柱 No.1 の二次電子像を示す。S また、図-3.6.6 に東側柱 No.2 の二次電子像を示す。

図より、観察倍率 100 倍において、50~100 μm 程度の厚さの層が形成されていることが分かる。既往の検討³⁾において、数十 μm の層は、数 μm の層が重なって形成されていることが観察されることを報告している。今回の試料においても、観察倍率を 500 倍とすると、No.1 の試料では、数 μm 厚の層が観察されたが(図-3.6.4 右)、No.2 では、確認できなかった。

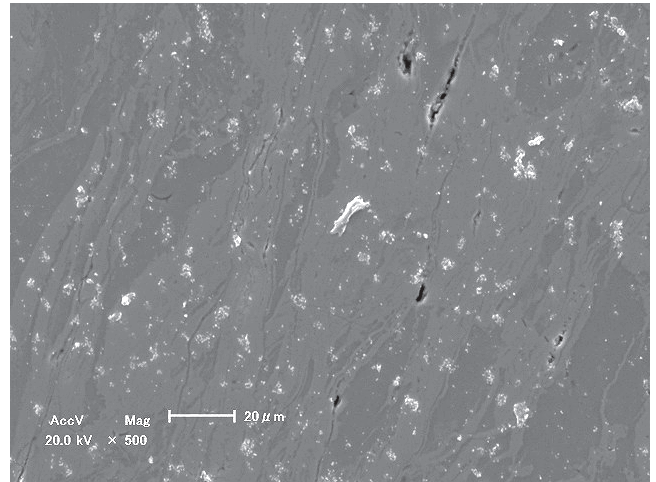
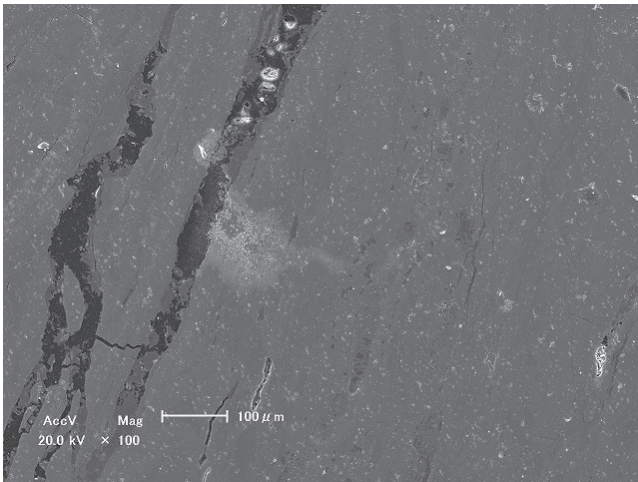


図-3.6.4 二次電子像(東側柱 No. 1)
腐食生成物、左:100 倍 右: 500 倍

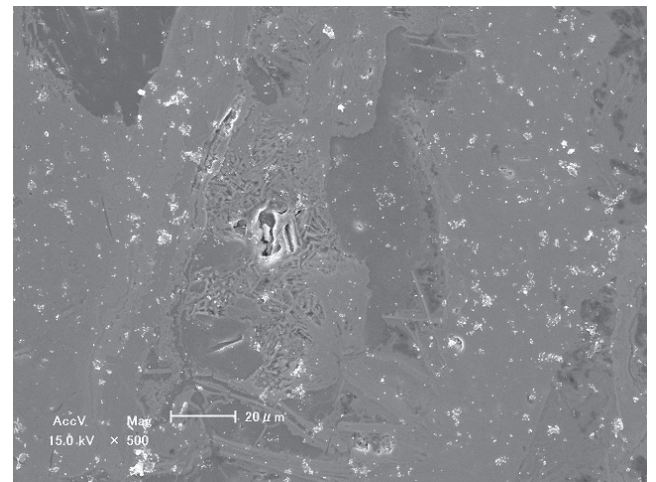
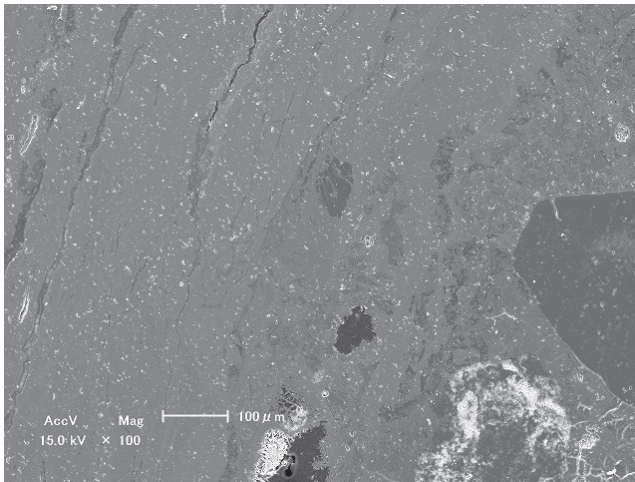


図-3.6.5 二次電子像(東側柱 No. 1)
コンクリートと腐食生成物の界面、左:100 倍 右 500 倍

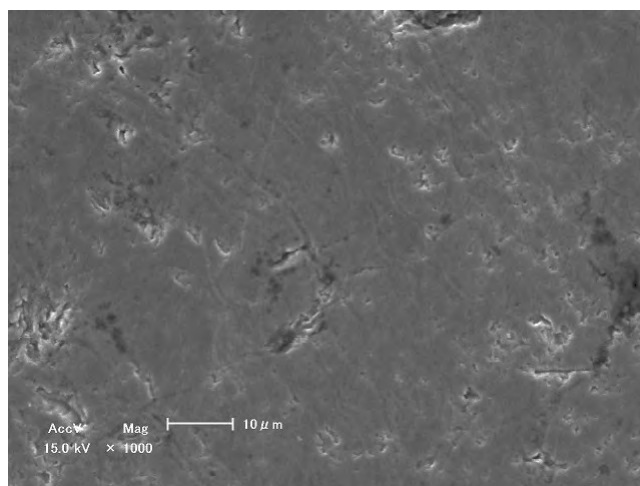
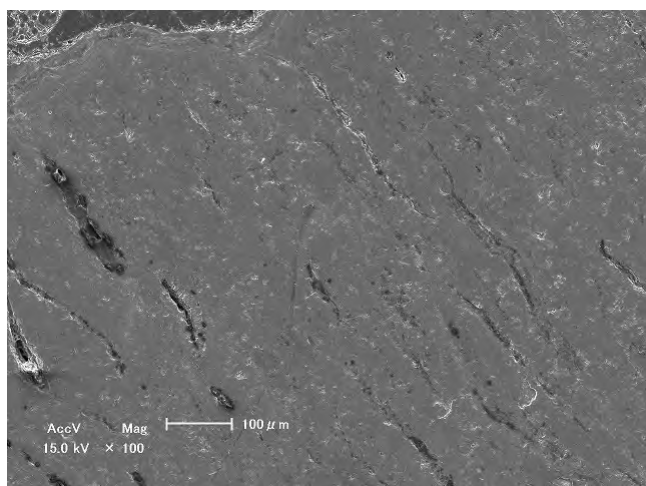


図-3.6.6 二次電子像(東側柱 No. 2)
腐食生成物、左:100倍 右:1000倍

図-3.6.7、図-3.6.8に西側梁 No.1 の二次電子像を、図-3.6.9 および図-3.6.10 に西側梁 No.2 の二次電子像を示す。西側梁においては、東側と比べてより明確な層構造が形成されていることが分かった。特に、No.2 の試料において、数十 μm の厚さの層の形成がはっきりと観察でき、さらに観察倍率を 1000 倍とした場合においても、数 μm の層が観察可能であった。

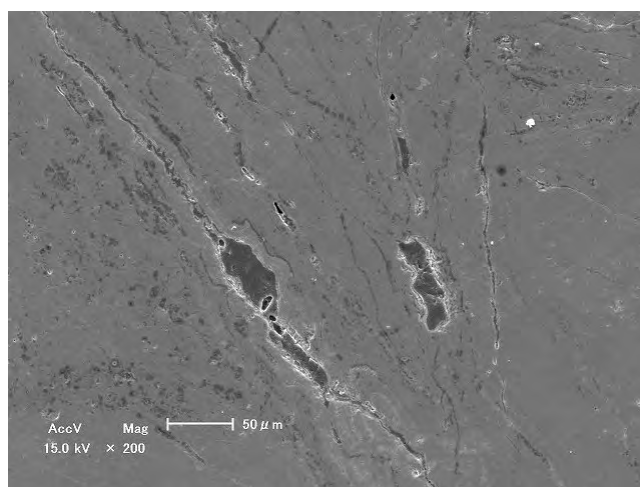
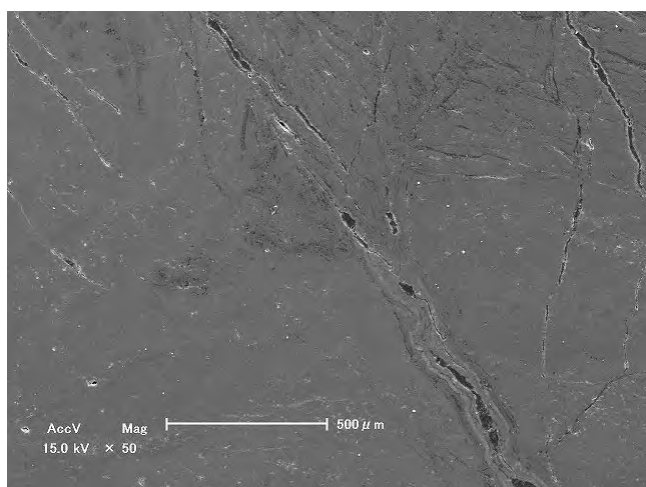


図-3.6.7 二次電子像(西側梁 No. 1)
腐食生成物、左:50倍 右:200倍

以上より、層の形成は、西側の方が東側に比べ、顕著に認められた。層の形成は、腐食反応が停滞し、再度開始する際に形成されると仮定すると、西側の方が東側に比べ、腐食反応の速度の変動が大きいことが予想される。一方、東側では、比較的一定の速度で腐食反応が進行していたのではないかと推察される。

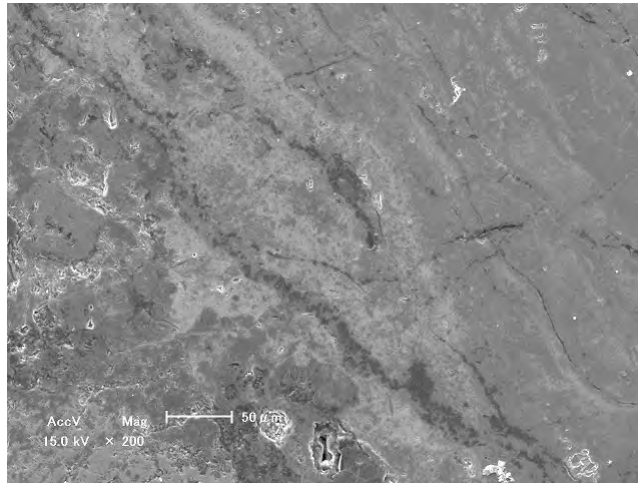


図-3.6.8 二次電子像(西側梁 No. 1)
コンクリートと腐食生成物の界面、200倍

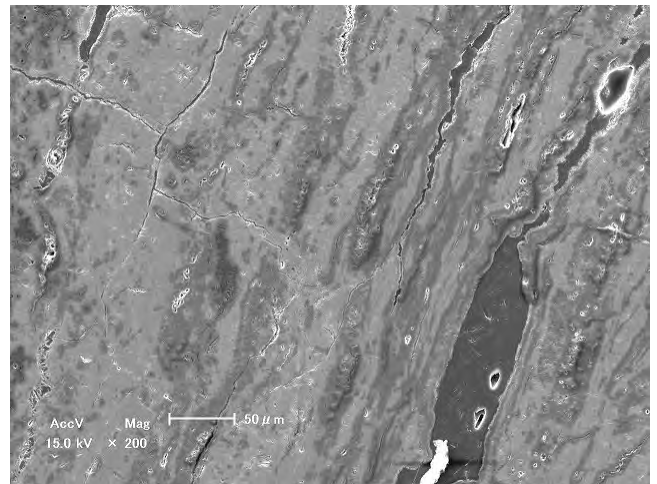
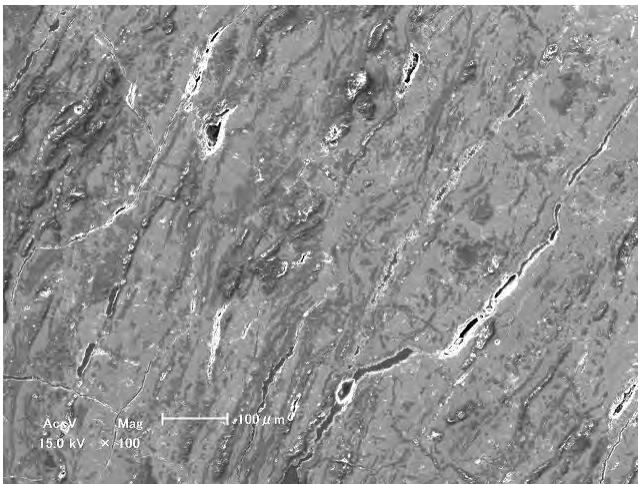


図-3.6.9 二次電子像(西側梁 No. 2)
腐食生成物、左:100倍 右:200倍

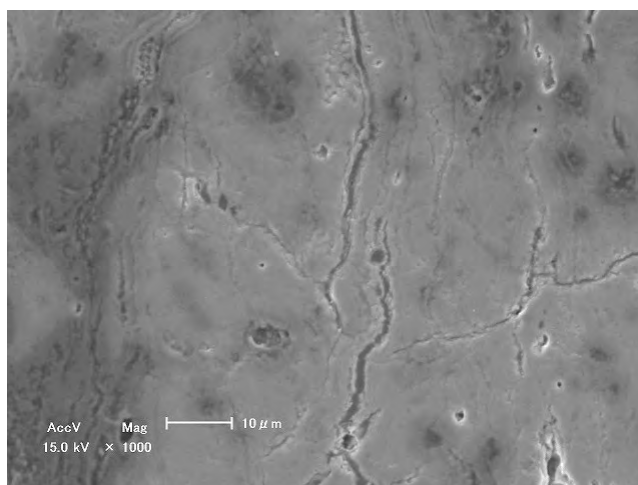


図-3.9.10 二次電子像(西側梁 No. 2)
腐食生成物、1000倍

3. 6. 5 まとめ

本調査では、同一建造物内の2つの部材より採取した腐食生成物の観察を行った。その結果、西側の梁の方が、東側柱に比べ、明確な層構造を呈していることが確認された。このことから、西側の方が腐食の反応速度の変動が大きいことが推察された。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断士技術09【基礎編】、2009
- 2) 東京電機大学出版局：軍艦島実測調査資料集、1984年
- 3) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338委員会)委員会報告書、pp.453-456、2009

4. 考察

今回の調査で以下のことが確認できた。

◆外観調査

30号棟と65号棟の外観調査を行った結果、いずれの棟でも鉄筋露出コンクリートのひび割れ、剥離、剥落が多数確認できた。30号棟に関しては、いつ崩壊してもおかしくない状態であった。

◆サーモグラフィー調査

30号棟のコンクリートの剥離や浮きを確認するために、赤外線サーモグラフィー調査を行った結果、赤外線画像から浮きと疑われる個所やひび割れを確認できた。

◆鉄筋探査

30号棟の柱の帯筋のかぶりやピッチを確認するため鉄筋探査（電磁誘導法）を行った結果、東面は、鉄筋が7本、平均かぶりが89mm、平均ピッチ220mmという探査結果を得た。西面では、かぶり90mmの鉄筋が1本という結果を得た。

◆3Dレーザー計測

30号棟、65号棟を中心に島内の計17箇所から3D計測を実施した結果、以下のことが確認できた。

- ・17箇所からの3Dデータを統合させて作成した軍艦島の3Dモデル化は島内の約6割程度を捕捉することができた。
- ・30号棟や65号棟を忠実にモデル化できた。
- ・既存の図面と3Dレーザー計測オルソ画像を重ねると、欠損している個所が確認できた。

◆蛍光X線分析

30号棟、65号棟、75号棟のコンクリート片で蛍光X線分析結果、Clは、30号棟、65号棟で確認できたが、71号棟では、確認できなかった。30号棟と65号棟では、大量にClが混入している。

◆鉄筋腐食生成物の微視的観察

30号棟から採取した鉄筋腐食生成物の層構造の観察を行った結果、西側の梁の方が、東側柱に比べ、明確な層構造を呈していることが確認された。このことから、西側の方が腐食の反応速度の変動が大きいことが推察された。

5. 今後に向けて

今後は、以下について研究を進めていく。

- ・ コア採取による材料分析

長崎市の許可を頂き、コンクリートコア採取を行い、建設年代ごとに、セメント成分を分析するとともに、コンクリートの劣化状態を評価する。

- ・ 鉄筋コンクリート造高層建物の地震応答解析とその評価

3Dデジタルデータをもとに3DFEメッシュを作成し、水平保有耐力および地震応答解析を実施する。この解析技術は、インフラ長寿命化センターおよび構造工学科で現有しており、解析可能である。

- ・ 軍艦島全域の3D計測

軍艦島全域の3D計測及びそのモデル化を目指す。そして、ネットやテレビ上で軍艦島をバーチャル観光できるようなシステムの構築を視野にいれている。

- ・ 模型制作

計測した3Dデータを利用して、3Dプリンターにより軍艦島の模型の制作を予定している。