

# 3D レーザ・デジタル画像を用いた軍艦島計測と損傷図作成

—3D 点群のレンダリング・ひび割れ描画支援システム—

## The Measurement and Draw damaged plans at Gunkan-Island

by Using 3D laser scanner and Digital Camera

西村 正三<sup>\*, \*\*</sup>・原 健司<sup>\*</sup>・木本 啓介<sup>\*</sup>・松田 浩<sup>\*\*\*</sup>

*Shozo NISHIMURA, Kenji HARA, Keisuke KIMOTO  
and Hiroshi MATSUDA*

**Abstract** :In this paper, we discussed about As build data measured with 3D laser scanner, and the application of it. We measured one of the industrial heritages “Gunkan-Island” which the collapse is advanced. We carried out a rendering of point clouds as a sphere. That picture has the texture information such as pictures to add the shading in the pillars, beams and damaged part. So we can support to make damaged plans by using the rendered pictures. We solved that the width of cracks below resolving power of the photograph taken with the digital camera, has a correlation between the numerical data of features and the distribution width of colors. We created the index which Crack Index is “the numerical data of features and the distribution width of colors” and made a system for assisting in drawing the cracks. We could reduce the cost and term for tracing cracks.

### 1. はじめに

近代化産業遺産は、製鉄所などの工場設備や鉱山、橋、ダム、発電所など産業の発展と社会の近代化を支えた総体を文化遺産として捉える概念である(日本産業遺産研究会, 1998)。これらは規模が大きく、老朽化が進み、調査には危険性が伴うため従来のような手法で建造物の正確な形状記録や変状を計測することは困難であり、先端計測技術である 3D レーザスキャナやデジタル画像などを用いた計測・解析技術による支援が有用としている(西村ほか, 2006)。

本論文では、近代化産業遺産として注目されている端島(以下軍艦島)を例に、3D レーザスキャナとデジタル画像を用いた現場のあるがままの状態を捕捉する AsBuild データ取得と破損・損傷図作成のための新しい手法について提案し検証したものである。

具体には 3D レーザスキャナで取得した点群を球体としてレンダリングすることで柱・梁・損傷部位に陰影が付加され写真とほぼ同レベルのテキスト情報を付与でき破損図作成を支援できることが判った。

デジタルカメラで詳細に撮影した分解能以下のひび割れ幅は、特徴値と分布幅で特定でき、クラックイン

デックス [CI]:「特徴値×分布幅」という指標を設定した。またこの指標はクラック幅と明確な相関があることも判り、これをシステム化した「ひび割れ描画支援システム」によりひび割れトレース作業の大幅な省力化が図れた。

### 2. 3D レーザスキャナ計測の概要

3D レーザスキャナはレーザを計測対象に高密度で照射し、点群情報(座標値と反射強度:  $x, y, z, i$ )を取得する機器である。高密度で計測された点群は、現状を忠実に再現し構造物の補修・補強検討の際に有効とされている(高橋ほか, 2010)。通常数箇所から計測した点群の合成・面化处理を経て立面図などの各主題図の作成が行われる。点群密度を上げれば成果品質の向上は期待できるが、データ容量、処理が増大し AsBuild を確保したデータ容量の低減化策などが課題である。特に現状の図面化作業は点群をもとに CAD トレースすることが主体であり、この省力化を図るため、構造物の輪郭を抽出する一稜線抽出の手法が種々提案されている(北村ほか, 2010, 横山ほか, 2010)が、構造物を解釈して描いた図面レベルにはまだ達していない。また計測密度よりも微細な破断面やひび割れなどは写真判断して描かなければならないなどの課題もある(西村ほか, 2011)。

\* ㈱計測リサーチコンサルタント

\*\* 長崎大学大学院生産科学研究科博士後期課程

\*\*\* 長崎大学大学院工学研究科

### 3. 軍艦島の概要

軍艦島は、長崎県南部、長崎半島の西方海上にある面積 6.3ha の小島である。日本有数の海底炭田の島として知られ、開坑は明治初年、以来発展して石炭の総産出量約 1,570 万 t。島内に選炭場、接岸施設など諸施設のほか、最盛期 5,000 人を超える人口を擁した鉄筋コンクリート住宅が立ち並び、昭和 35 年頃の最盛期の人口密度は、居住区域に限って算定すれば 1,400 人/ha であった。1974 年に閉山し、現在は無人島になり、図 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、軍艦島の保存に関しては、平成 17 年度に「風化の過程をみせるのが望ましい」との軍艦島保存活用技術検討委員会（会長 長崎総合科学大学 宮原和明教授）から提言を受け、現在「保存管理のあり方を端島炭坑等調査検討委員会（会長 岡田保良 国士舘大学教授）で検討中である。一方「軍艦島」は、平成 21 年 1 月、軍艦島を構成資産の 1 つとする「九州・山口の近代化産業遺産群」がユネスコ世界遺産暫定一覧表に記載された。

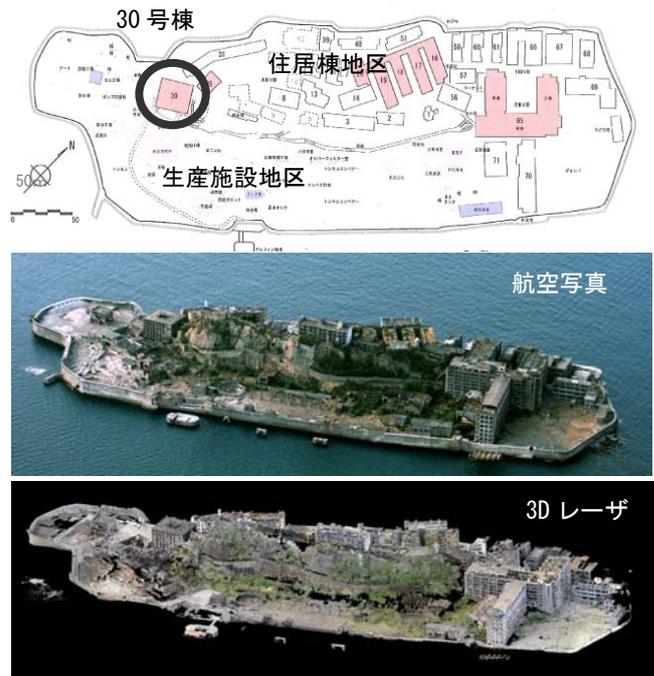


図 1 軍艦島の配置図と概観

#### 3. 1 3D レーザ計測・デジタル画像取得の経緯

軍艦島は劣悪な環境の下、日々劣化が進行しており上記委員会での審議中（3 年間）にも形態が大きく変化することが十分考えられた。筆者らは、平成 21、22 年度「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」の一環で、3D レーザスキャナを用い島内 30 号棟（大正 5 年：日本最古の RC 構造物 7 階建）を中心に軍艦島全域の計測及びそのモデル化を行った。

そこで取得した 3D レーザデータから効率よく現況を把握するための破損図を作成する手法を試行した。これら 3D レーザ計測、デジタル画像情報を用いた構造物の損傷状況記録に向けたフローを図 2 に示す。

なお本論文では、紙面の都合から、点群の球体表示 7→4、ひび割れ幅判読 8→4 の手法について述べる。

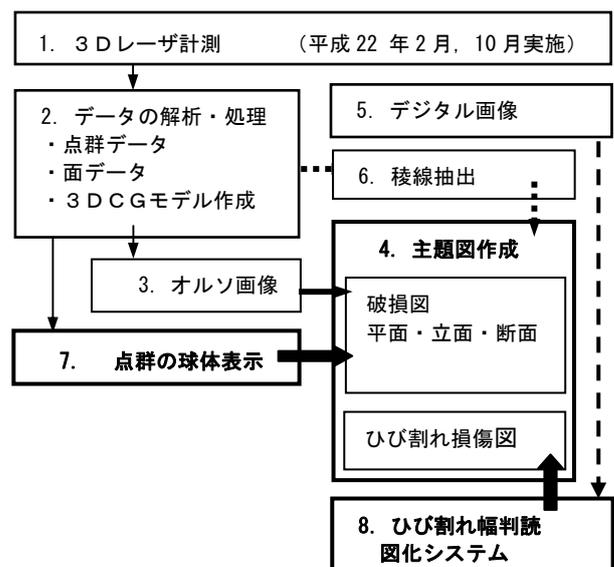


図 2 3D レーザ・デジタル画像を活用した主題図作成

#### 3. 2 3D レーザ計測

平成 22 年 2 月と 10 月に 3D レーザスキャナによる 3D 計測を行った。用いた 3D レーザスキャナは、図 3 に示す Riegl VZ-400 であり計測距離は 350m まで可能であり、上部に搭載した広角カメラで色情報の取得も同時に行った。計測は各壁面の点間隔が 5~10mm 程度になるように計測した。高速・広範囲・高精度に計測することができるため計 25 箇所から計測した各々の 3D レーザデータを統合させ、島内の約 8 割程度の 3 次元化を行うことができた(図 4)。

| Riegl VZ-400 |           |
|--------------|-----------|
| 計測距離         | 350m      |
| 計測精度         | 5mm       |
| 計測範囲         | 100×360°  |
| 測定レート/秒      | 122,000 回 |
| レーザ波長        | 近赤外線      |
| 計測角度         | 0.3m rad  |
| 測定方式         | 波形分析      |

<sup>\*)</sup> 0.3m rad = 30mm width at 100m



図 3 使用した 3D レーザスキャナ計測機器



図4 3Dレーザ計測状況と点群表示(30号棟)

#### 4. 破損図の作成

##### 4.1 破損図作成について

破損図は、歪んだままの構造物の形状・寸法を表現した図面である。そのため構造的不具合から生じた破損を表現・記録するには最良であり(田中, 2000), 今後軍艦島内の建造物を補修・補強検討するには最適な図面形式となる。これまで破損図作成は、直接建造物をメジャー実測や TS 測量を行って作成してきた。しかし 30号棟のように規模が大きく破損が進行した構造物では、従来手法を用いることは、大規模な足場が必要となる以上に危険を伴う。

##### 4.2 従来の3Dレーザ計測を用いた破損図作成

これまで3Dレーザデータから図5に示すような破損し、歪んだ形状をあるがままに表現した破損図を作成するには、図6に示す点群オルソ画像(正射投影)をCADの下敷きにし、それを熟練者が2次元トレースすることで対応していた(以下手法1)。

しかし点群が奥行き方向に輻射し前後関係が明確でないため点密度を高精細にしないと躯体線、破断部分の輪郭線がうまく確認できず、写真なども判断材料として破損図を描くことが強いられた。また点群から面を生成し、それに写真マッピングしたオルソ写真の活用も行なわれてきたが面が正確に生成され

なければ画像が歪むなどの課題もあり、それらの修正に時間を要した。加えて筆者らは提案されている稜線抽出の手法も用いて破損図作成の効率化に活用できないかを検討したが、現状ではシステムで抽出したラインと、技術者が解釈しながら描いた図とは、表現などで違いが生じることを確認している(西村ほか, 2011)。

これら破損図作成における3Dレーザ点群利用における課題に対し、本研究では「3Dレーザの点群を球体表現する手法」を用いることを試行した。

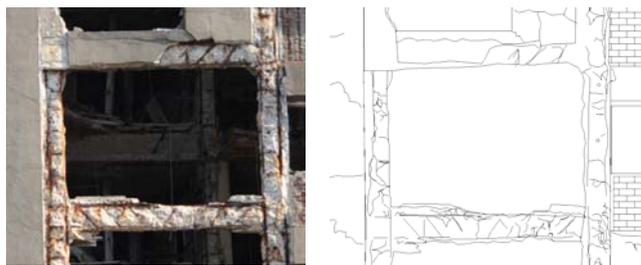


図5 破損図の例(左:写真, 右:破損図)

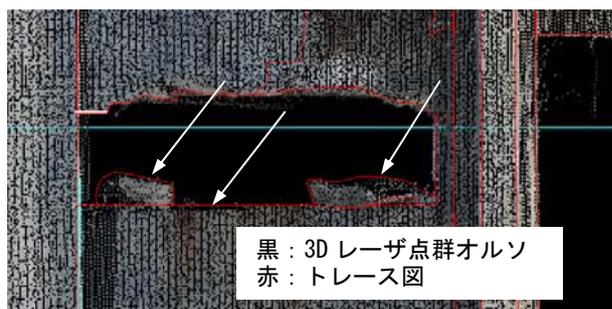


図6 3D点群によるオルソ画像(点間隔:5mm)

点群が輻射し前後関係および輪郭が明確でないため詳細なトレースができない

##### 4.3 点群の球体表現手法

数千万点にも及ぶ3Dレーザ点群をインタラクティブに視点を移動させ描画すれば点群で構成された構造物の形状をより認識しやすくなる。これは人の目のもつ残像効果などによるものである。

例えば空間的に配置された点に適切な大きさを与え、市販のシェーディングソフトで描画すれば、点群は陰面処理されより前後関係が明確となりトレースがしやすくなると考えた。最近では膨大な点群モデルを効率的にインタラクティブにレンダリングするシステムも研究(岡本ほか, 2004年)され、またソフトも市販されている。そこで市販の球体表示ビューワ「Macaron」を使用して各点群を球体としてレンダリングし、一定方向から光を与え球体に陰影を付けることで、構造部材や損傷部位が如何に立体的に表現されるかについて検討した。

図7の①は通常の点群表示であり、破損部位は判読しにくい。対して図7の②、③は点群を球体表示することで陰影が付与され表面の剥離の状況までを確認できる。図8は島西側の生産施設地区に位置する「四坑巻座」をそれぞれの手法で表現し評価したものである。これまで住居棟地区は詳細に図化されているが(阿久井・滋賀, 1984), 生産施設地区は図面化が十分でない。この球体表示手法が今後の図面作成を支援できるものとする。

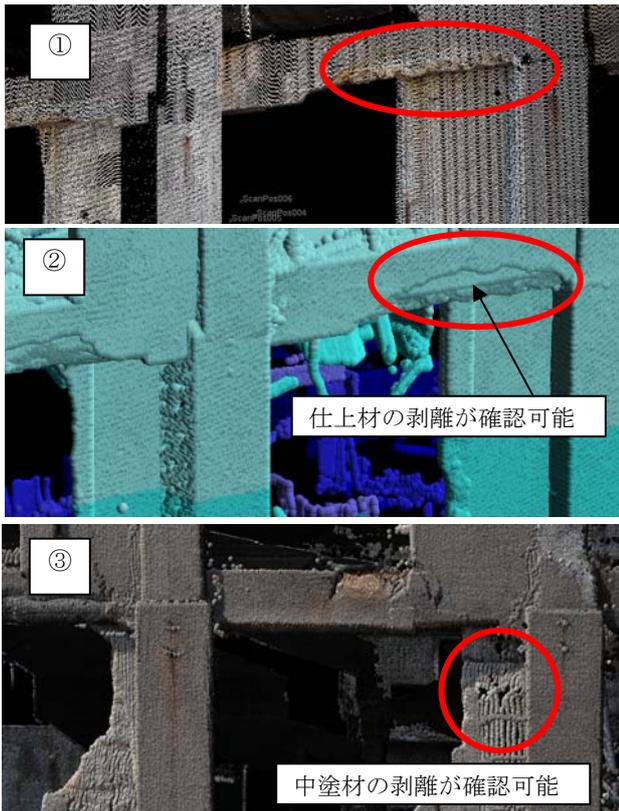


図7 点群の表示手法の違いによる判読レベル  
 ①点群表示 ②, ③球体表示

#### 4. 4 球体表示オルソ図を利用した図面化

球体表示ではテクスチャマッピングと同レベルのカラー・陰影オルソ図が容易に作成でき(図9の①), 破損図を作成した例を図9の②に示す(以下手法2)。

また図10は、図9の赤枠内の窓枠垂れ壁上部にある亀裂(概ね10mm幅)部分の写真と点群を球体表示したものである。写真とほぼ同程度に亀裂が確認でき、破損図作成を支援することはできるが亀裂幅までは正確には読み取れない。このように手法2を用いることで別途撮影した写真を利用しなくても柱・梁が写真と同程度に明確となり、破損図作成までの工程が従来手法1に比べ概ね3~5割程度に低減することができた。

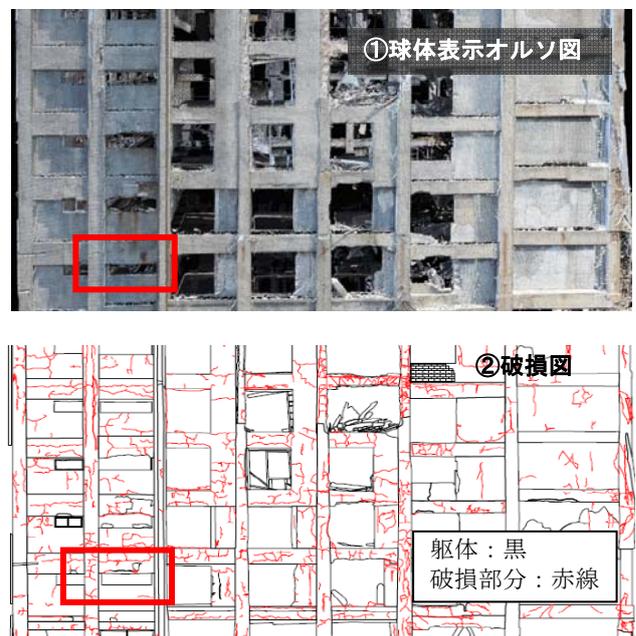


図9 球体表示オルソ図を利用した図面化



図8 生産施設地区に位置する四坑巻座の表示例

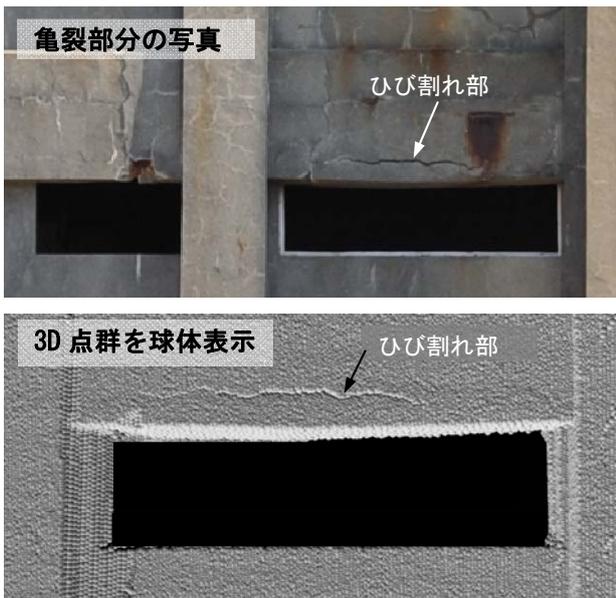


図 10 球体表示によるひび割れ認識程度

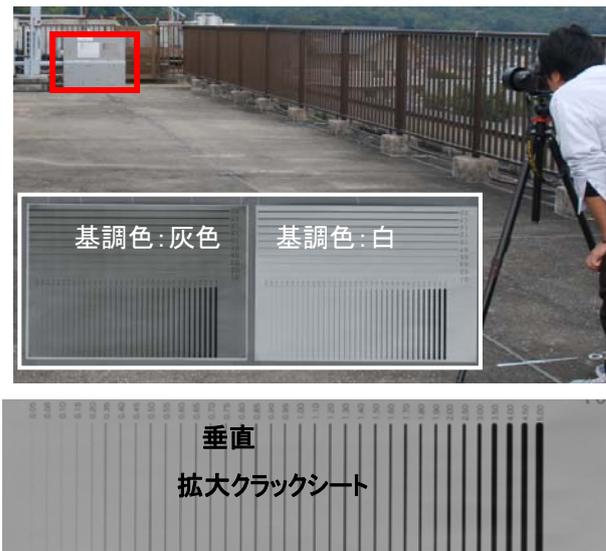


図 12 検証実験の状況

## 5. 損傷図作成 (ひび割れ幅判読図化システム)

高密度に 3D レーザ計測しても亀裂までは正確には読み取れない。亀裂・ひび割れの発生原因究明では、コンクリート表面のひび割れパターンから推定することが基本であり、ひび割れ幅を含め正確に図面に記録することにより適切な維持管理が可能となる。そこで別途撮影したデジタル画像をもとにひび割れ幅判読が可能な図化システムを構築することとした。

### 5.1 検証概要

通常 RC 造のひびわれ伸展を評価するには 0.2mm 以上のひび割れ捕捉が必要とされる。捕捉には図 11 に示される撮影解像度が必要(コンクリート診断技術, 2010)であるため望遠レンズ (200mm) を装着した一眼レフカメラ (1200 万画素) で距離 20m の位置から 1mm/pix を基準に撮影した画像とその処理からひび割れ図の作成について検証した。撮影対象は基調色が白と灰色 2 種類のクラックシートを撮影した。

検証の状況を図 12 に示す。

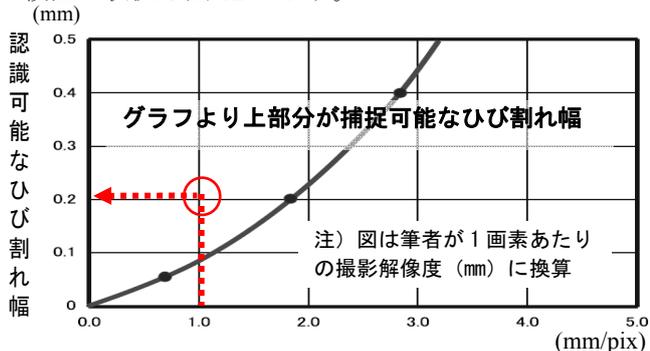


図 11 解像度と認識可能なひび割れ幅の関係

### 5.2 クラックにおけるグレー階調差分値の変化

画像には縦、横のクラックが写しこまれているが、縦、横とも同様の傾向であったため以下では紙面の都合から縦クラックについて説明する。撮影したクラックスケールをグレー階調で表したものを図 13, 14 に示す。拡大した画像に示すように 1 画素内にクラック部分とそれ以外がサブピクセルレベルで取り込まれる。各クラックの幅 (0.1~2.0mm) は、各切断ラインにおける階調変化(グレー階調 0~255)の差となって現れる。図 15, 16 は基調色 (白) (灰色) における各クラックのグレー階調、および特徴量を明確にするために基調レベル変化を除去したものである。(なおサブピクセル処理で議論されるフィッティング処理まではシステムの制約上実施していない。)

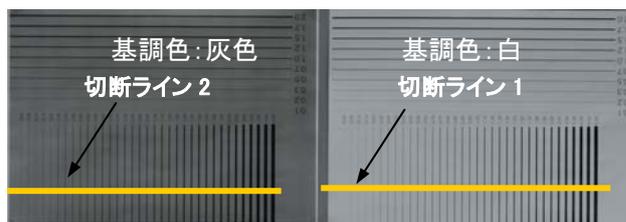


図 13 撮影したクラックスケール

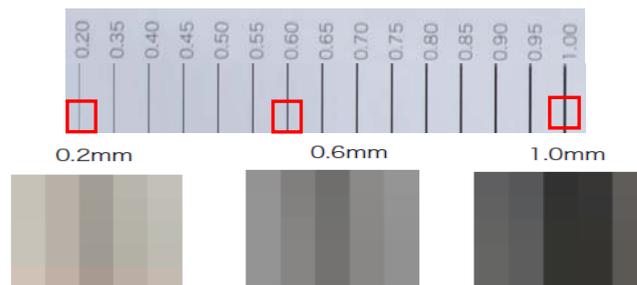


図 14 クラックスケールを撮影した画像の拡大 1ピクセル内で平均化された Gray レベル (0-255)

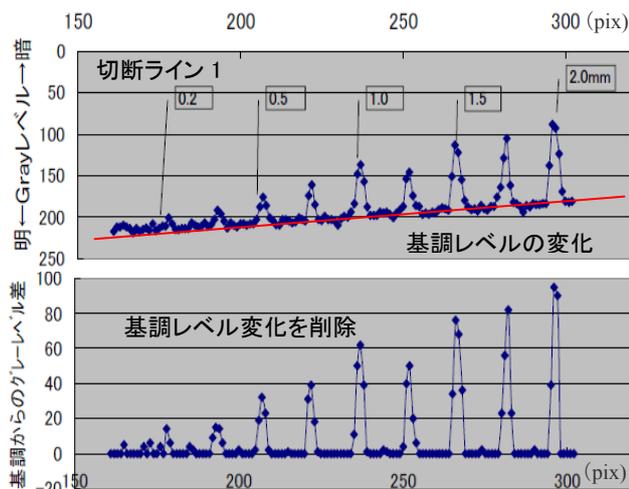


図 15 クラックの濃淡 (基調色 : 白)

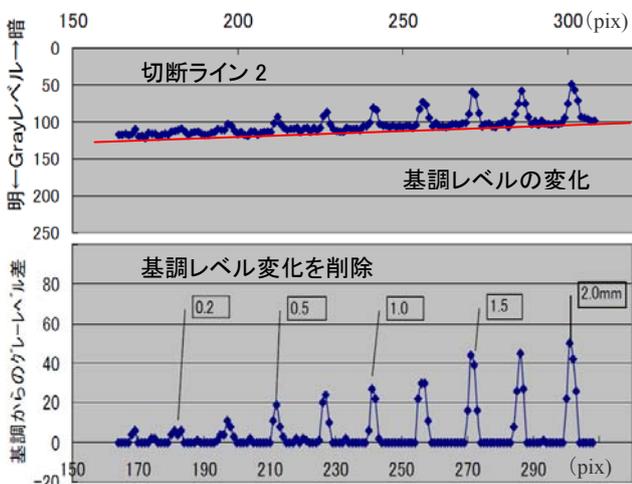


図 16 クラックの濃淡 (基調色 : 灰色)

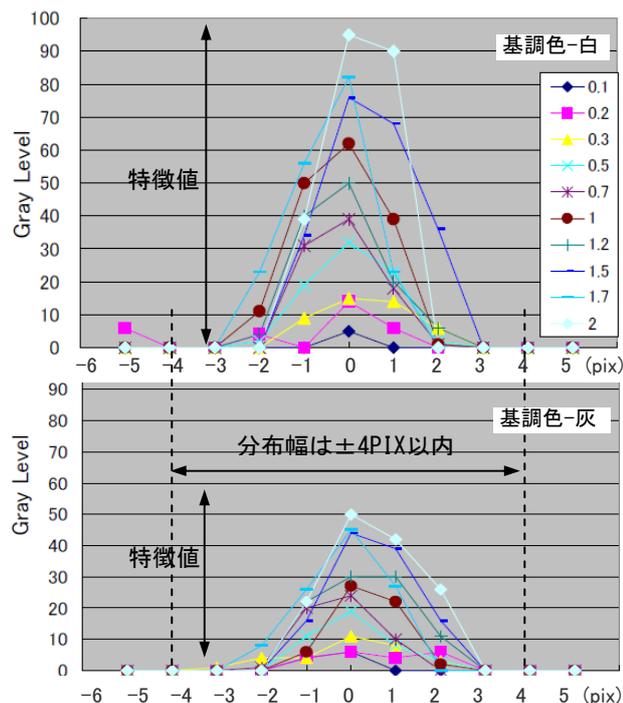


図 17 クラック近傍の濃淡分布幅 (分布図)

### 5.3 クラック幅と特徴量

クラック近傍の濃淡分布 (図 17) から各クラック幅は、その特徴である特徴値及び分布幅の違いとして現れ、クラック幅が大きいと特徴値と分布幅が大きくなる。また基調色の違いは、灰色の場合は特徴値は小さくなるが分布幅の差異は少ない。このことは「明るい壁面の場合、約 1/10 の解像度まで認識可能 (コンクリート診断技術,2000)」と呼応する。上記の結果を元に、クラック近傍の濃淡分布を模式化した (図 18)。

またピーク値から概ね±4ピクセルで周辺の基調レベルに落ちつくことから、特徴値及び分布幅を用いたひび割れ幅算出について検討した。

なお特徴値は下式で与える。

$$D(i) = (GRAY(i) - ((GRAY(i-4) + GRAY(i+4)) / 2))$$

ここで D(i) : 特徴値

GRAY(i) : 各クラックピーク値の Gray レベル

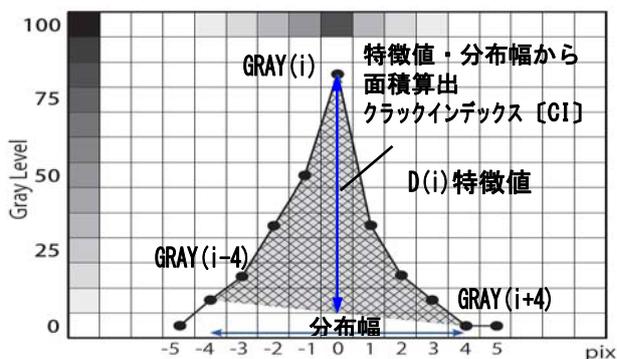


図 18 特徴値の計算手法

### 5.4 クラック幅とクラックインデックス

各クラックの「特徴値×分布幅」としてクラックインデックス (以下 [CI]) という指標を考えた。[CI] は、分解能以下のクラックが CCD に取り込まれた際に各クラックが有する面積といった概念であり、クラック幅が大きいと [CI] 値も大きくなる。各 [CI] とクラック幅との関係を図 19 に示す。[CI] はクラック幅と明瞭な相関を持つことがわかる。そこで撮影された分解能以下のクラック毎に [CI] を求めることでクラック幅を定量的に算定可能となる。

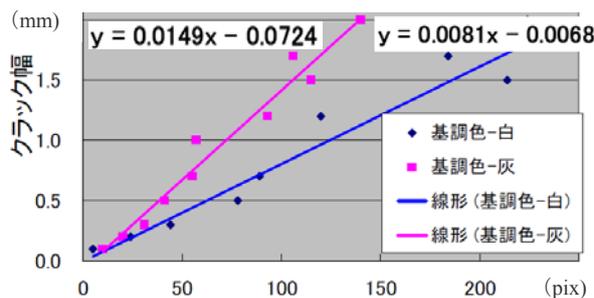


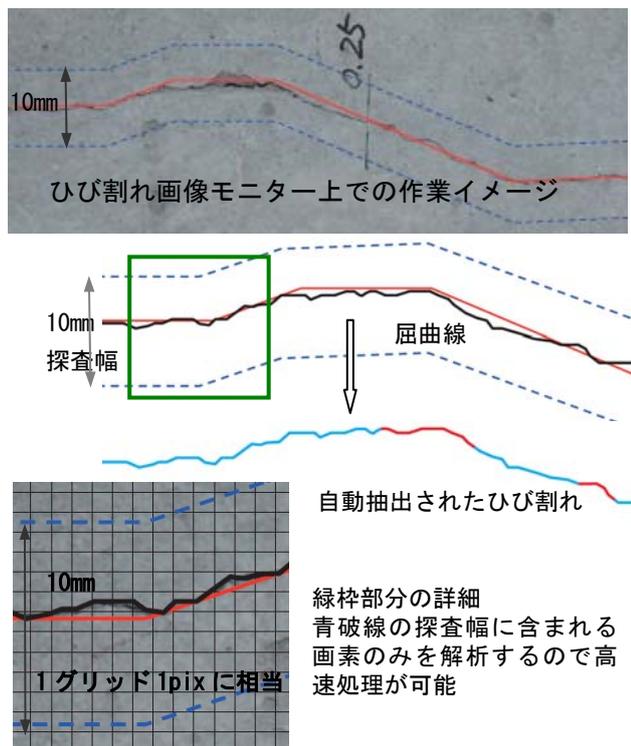
図 19 [CI] とひび割れ幅の相関

### 5.5 ひび割れ描画支援システム

撮影された画像を基に、人力で各ひび割れ幅毎にそれを正確に CAD 化しレイヤ分類することは煩雑で人手と時間を要する。そこでこれまでもウェーブレット変換や木構造状フィルタを用いたコンクリートのひび割れ抽出手法が種々提案されている（武田ほか，2006. 西川ほか，2008）。

しかし肉眼で確認できる全てまでは抽出できていないのが現状である。そこで先述した 5.4 の結果をもとに、技術者の解釈も組み込んだ半自動でひび割れ抽出・描画が可能な「ひび割れ描画支援システム」を構築した。当該システムは、先ず画像に写っているひび割れの大凡のあたりをつけるためマウスで屈曲点を選択する。次にこの選択結線された屈曲線を基準にひび割れが包含されるように探索幅（例えば 10mm）を与える。その後は各画素に含まれる濃淡レベルから自動でピーク位置と [CI] が算出され、それに応じたひび割れ幅が自動で解析され各幅に応じたひび割れが CAD として描画・出力される（図 20）。

また遊離石灰などの範囲も指定でき構造物の評価判定までを可能なものとした。



黒は、撮影されたひび割れ  
 赤は、ひび割れの概略をマウスで選択し結線した線  
 青破線は、赤線をもとに探索幅を規定した線

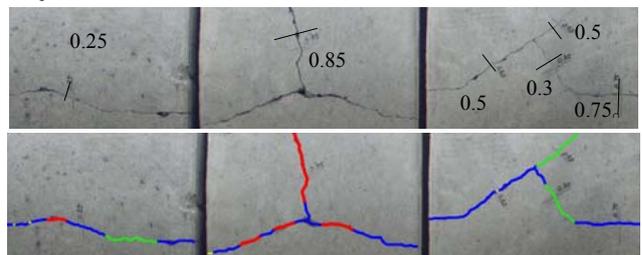
図 20 ひび割れ描画支援のイメージ

### 5.6 現地（軍艦島 30 号棟）での検証

「予めクラックスケールでひび割れ幅を計ったコンクリートパネルを用いて検証した。検証結果の一部を図 21 に示すが、85%は判定結果と合致する結果を得た。

その結果を元に軍艦島 30 号棟壁面のひび割れが顕著な箇所で壁面全体を詳細に撮影した（図 22）。

図 23 は、画像からひび割れ幅を判定し、先に作成した破損図にひび割れ損傷を重畳表示した例を示す。このシステムを用いることで、これまで市販されている機器（例えば KUMONOS）を用いることなく遠隔から詳細に撮影した画像で正確にひび割れ幅までを算出でき「ひび割れ損傷図作成の省力化」が図れた。



| 凡例 |             | No | 実測   | 判定 |
|----|-------------|----|------|----|
| 黄色 | 0.2mm未満     | ①  | 0.25 | ×  |
| 緑  | 0.2~0.5mm未満 | ②  | 0.85 | OK |
| 青  | 0.5~1.0mm   | ③  | 0.5  | OK |
| 赤  | 1.0mm以上     | ④  | 0.5  | OK |
|    |             | ⑤  | 0.3  | OK |
|    |             | ⑥  | 0.75 | OK |

図 21 コンクリートパネルを用いた検証

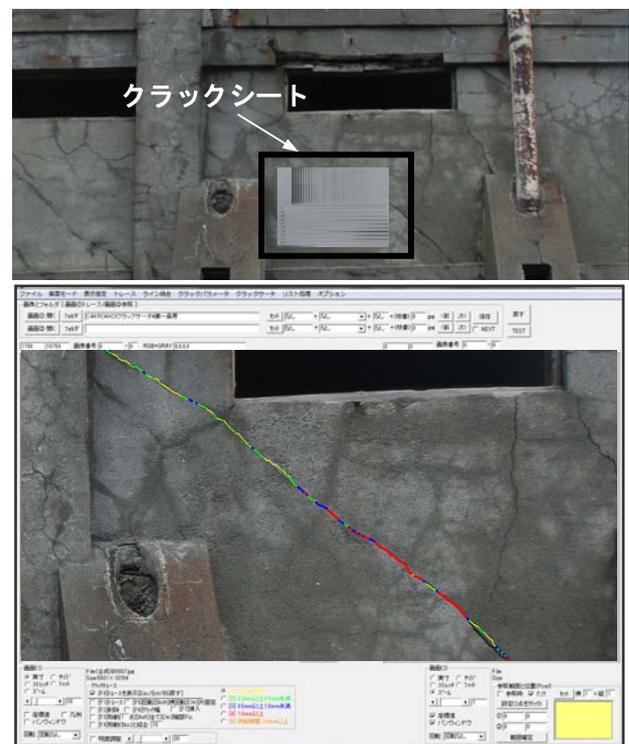


図 22 30 号棟壁面での検証状況とシステム画面



図 23 ひび割れ幅毎にレイヤー分類した  
ひび割れ損傷図 (例)

## 6. まとめ

大規模で劣化の進んだ不整形な構造物に対し、形状をあるがままに取得できる 3D レーザ計測は有効であることがわかった。一方 3D レーザ計測の点群表示手法の違いによる判読レベルを確認した。3D レーザ点群の「球体表示手法」は写真とほぼ同程度の鮮明さで任意の箇所からの構造物を把握でき、不整形な形状を恣意的になることなく簡易かつ正確に破損図作成までを支援できることがわかった。

加えて壁面のテクスチャ情報 (素材・仕上げなど) も容易に記録できオリジナル記録としても活用可能と考える。

またデジタルカメラで詳細に撮影した分解能以下のひび割れにおいて、ひび割れ幅は、特徴値 (Gray 差分) と分布幅で特定されることから、クラックインデックス [CI]: 「特徴値×分布幅」という指標を設定した。

この [CI] は実際のひび割れ幅と明瞭な相関を持つこともわかった。

撮影された各ひび割れ毎に [CI] を求めることでひび割れ幅の算定が可能となり、正確なひび割れ損傷図を作成することができる。

今後は種々の環境下の構造物—特に下地となるコンクリート壁面の劣化度 (色彩ほか) による差異についても検証してよりロバストなシステムへと改良していきたい。

3D レーザ計測やデジタル画像を用いた光学的な計測は、非接触で 3 次元形状、詳細画像取得が行えるという利点から、今後もその利活用は色々と展開されるものと思われる。

また両者の技術を組み合わせることで、より高度な保守点検調査・解析を行うことができる。

建設分野における簡単・高精度な測量・計測に関するニーズは潜在的に多いと考えられ、この分野での光学的な計測手法の応用展開を今後とも進めて行く所存である。

## 謝 辞

軍艦島上陸に当たっては、長崎市企画財政部世界遺産推進室の方々に便宜を図っていただきました。

3D レーザ計測ではリーグルジャパン(株)の松田重雄様、佐々木公一様に協力いただきました。

点群の球体表示については、ビジュアルツール(株)の球体表示ビューワ「Macaron」を使用させていただきました。

紙面を借りて深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 阿久井喜孝・滋賀秀実, 1984. 軍艦島実測調査資料集, 東京電機大学出版局.
- 日本産業遺産研究会, 1998. 文化庁歴史的建造物調査研究会, 建物の見方・しらべ方—近代産業遺産.
- 高速 3D グラフィックス, 1999. ピアソン・エデュケーション.
- コンクリート診断技術, 2010. (財)日本コンクリート工学協会.
- 田中泉, 2000. 三次元レーザスキャナによる破損図の作成, 建築雑誌, Vol. 115, no1462.
- 西村正三ほか, 2006. 三次元情報解析技術等の応用による文化財建造物保存・修理の高度支援システムの開発, JST.
- 西村正三ほか, 2007. 皇居東御苑内本丸中之門石垣—3D モデル配置システム, 土木学会第 62 回年次学術講演会 概要集 (CD-ROM) Vol. 62, pp469-470.
- 北村和男ほか, 2010. 実環境での測定を考慮したレーザスキャナからの点群データを用いたブレイクライン抽出, 第 16 回画像センシングシンポジウム, IS1-08.
- 横山大ほか, 2010. 平坦性評価に基づく点群データからの城壁のブレイクライン抽出と三次元 CAD データの自動作成, 日本写真測量学会学会誌「写真測量とリモートセンシング」Vol. 49 No.4, 241-250.
- 西村正三ほか, 2011. 3D レーザスキャナを用いた軍艦島の計測とモニタリング, 日本実験力学学会 Vol. 11, No. 3, 11 巻 3 号「光学的手法の発展と産業分野への応用」.
- 武田 均, 堀口賢一, 小山 哲, 丸屋 剛, 2006. ウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No.1, pp 1895-1900.
- 西川・吉田・杉山・斉藤・藤野, 2008. 木構造状フィルタを用いたコンクリートのクラック抽出のためのロバストな画像処理システム, 土木学会論文集.
- 岡本泰英ほか, 2004. Sequential Point Clusters を用いた大規模モデルに対する効率的なポイントベースレンダリングシステム, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」