

牛久大仏を見守る 建築事業部の取り組みについて

The Technology to Watch over the Great Buddha of Ushiku

三浦 敏之

川田工業㈱建築事業部工事部
次長

池谷 研一

川田工業㈱建築事業部設計部
次長

本田 暁洋

川田工業㈱建築事業部設計部
設計一課

牛久大仏は川田工業㈱の設計施工で約7年の月日をかけて完成しました。牛久大仏が竣工して約24年、およそ四半世紀の年月が経ちました。建物でも橋においても未永く使用していくためには、定期的なメンテナンスが必要です。また、地震や雷などの自然災害を受ける可能性があり、建物使用に影響する場合があります。建築事業部では建物維持のための定期点検はもちろん、地震や雷などの自然災害に対して新しいモニタリング技術も取り入れ、牛久大仏を見守り続けています。本特集では、牛久大仏を見守り続けるための建築事業部の取り組みを紹介します。

1. はじめに

牛久大仏は川田工業㈱の設計施工で約7年の月日をかけて1993年に完成しました。仏像の規模は超高層ビルに匹敵し、仏像胎内には展望室が設けられているため、建物としての維持管理が必要となります。また、ビル建物とは異なり、安易に建替えや撤去、さらには、損傷さえして欲しくないと期待されている構造物であります。そこで、建築事業部では牛久大仏の維持管理で特に重要な外装材銅板の定期点検を請負い、その後地震に対する影響を迅速に判断する構造ヘルスマニタリング「牛久大仏見守りシステム」の導入を施主様に提案して開発、運営を開始しました。現在建築事業部が行っている「見守り」は下記の3点です。

- ・外被銅板、下地鉄骨の定期点検
- ・落雷抑制型避雷針の設置
- ・構造ヘルスマニタリングによる地震影響度判定



写真1 牛久大仏

2. 牛久大仏の概要

(1) 計画概要

- ・発注者 : 宗教法人 東京本願寺
(現在は浄土真宗 東本願寺派 本山 東本願寺)
- ・建設地 : 茨城県牛久市
- ・用途 : 寺院
- ・高さ : 120 m
- ・構造形式 : 基壇・蓮台部 鉄骨鉄筋コンクリート造
仏像部 鉄骨造
- ・外装材 : 青銅板 (t=6 mm), 総重量 約1 000 t
- ・工期 : 1988年5月～1993年5月
- ・鉄骨重量 : 約3 000 t
- ・内部施設 : 展示室, 胎内仏奉安室, 展望室
- ・設計 : 川田工業㈱一級建築士事務所
- ・施工 : 川田工業㈱建築事業部

(2) 構造概要

牛久大仏は高さ120mの構造を可能にするため、下部の基壇と蓮台を鉄骨鉄筋コンクリート造、仏像本体を鉄骨造としています(図1)。メインフレームは超高層ビルの鉄骨に用いられる四面ボックス柱、大梁はビルトH、ブレースはH形鋼などで構成され、ブレース付きラーメン構造となっています。外装材(外被)は厚さ6mmの青銅板で、鑄造により作られています。メインフレームと外被銅板との間には、山形鋼をトラス状に組んだ下地鉄骨を配置し(図2)、仏像の形状で特徴となっている両手が大きく突き出た形状や衣に現れる奥深いヒダ、手の形状などを忠実に再現しています。

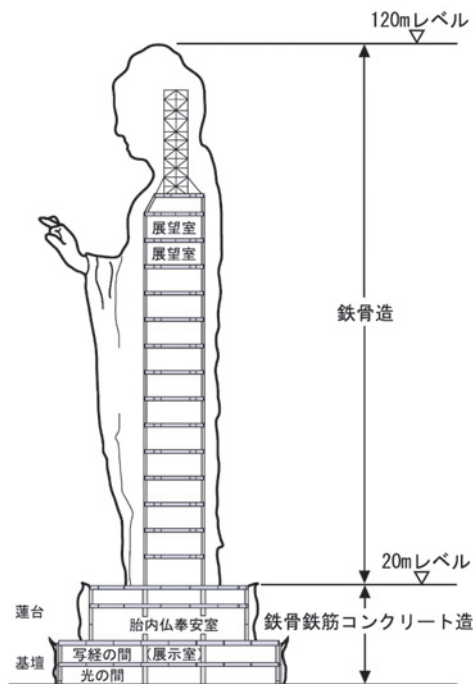


図1 断面図

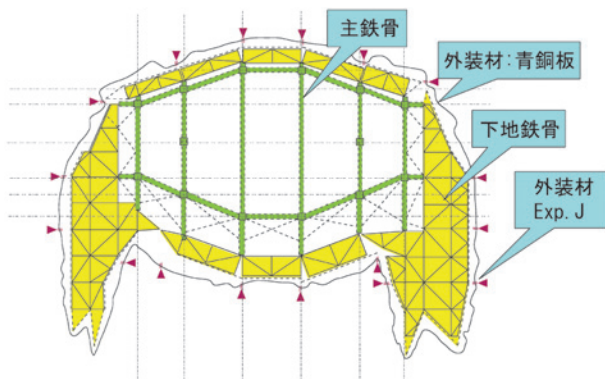


図2 平面図

下地鉄骨はブロック架設を可能にするため、高さ5m、幅約5mに分割されており、下地鉄骨1ブロックに取り付く外被銅板は9枚で、それらは溶接で接合されています。ブロック間の外被銅板の接合部はエキスパンションジョイントとなっており、外被銅板の熱伸縮に対応できる構造となっています。エキスパンションジョイントは仏像内部からのシール施工で処理しています。

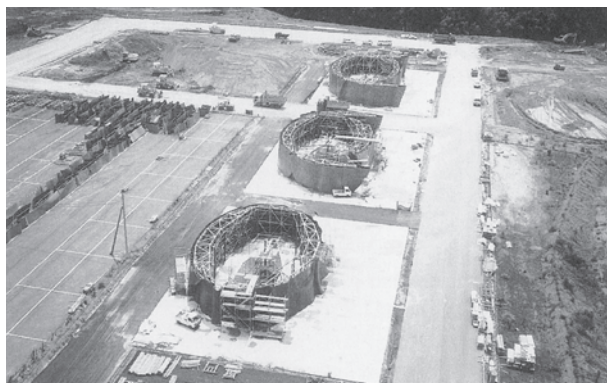


写真2 建設時の仮組状況

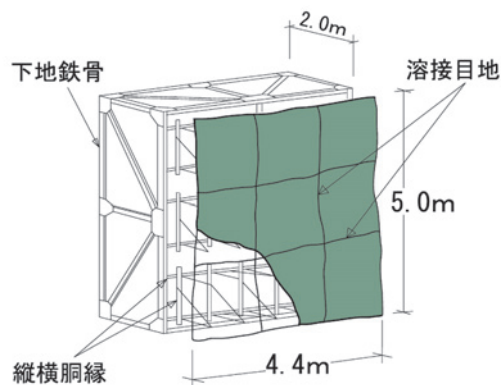


図3 下地鉄骨と外被銅板

3. 外被銅板・下地鉄骨の定期点検

仏像の外被銅板はその複雑な形状から下地鉄骨への取付けには溶接接合が多用されています(図3)。また、下地鉄骨はメンテナンスを考え、溶融亜鉛めっき仕上げとしています。外被銅板の熱による伸縮や、強風による構造体の揺れで各所が頻繁に動き、過酷な条件にさらされることから外被銅板と下地鉄骨は点検時に補修箇所が多く発見される部分です。

(1) 内部点検

内部点検は2011年から開始し、現在は毎年定期的に行われています。点検項目は①銅板の溶接目地、②ブロックエキスパンション部のシール、③銅板固定U型鉄筋、④鉄筋ファスナー、⑤下地鉄骨ボルトです。

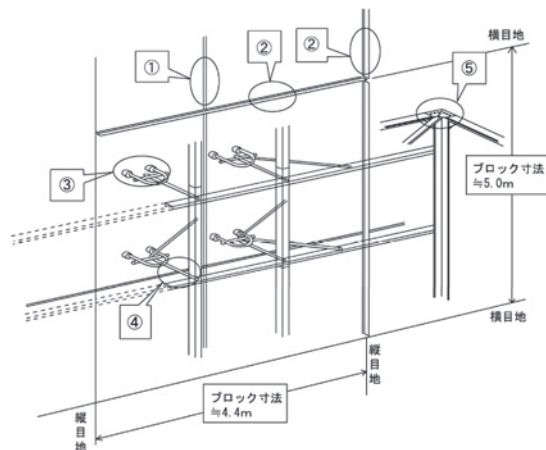


図4 点検項目

仏像の外被は青銅板約6000枚で構成されており、点検に費やす時間も膨大なものになります。よって、仏像表面を4工区に分けて毎年1工区毎、4年で全体を点検できるサイクルを組んでいます(図5)。下地鉄骨には点検歩廊が設置されていますが、衣の垂れ下がったヒダや指先など、ジャングルジムのような仏像内を点検する作業は大変です。この作業は、すべて人間の目で確認しています。

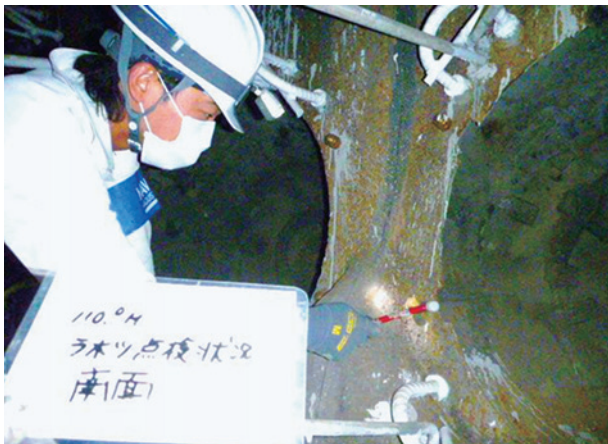


写真3 点検状況

2016年の点検と同じ工区での前回4年前の不具合記録をまとめてみると、不具合箇所数が増えており、特にエキスパンションジョイント部シールの不具合が増加していることがわかっています。

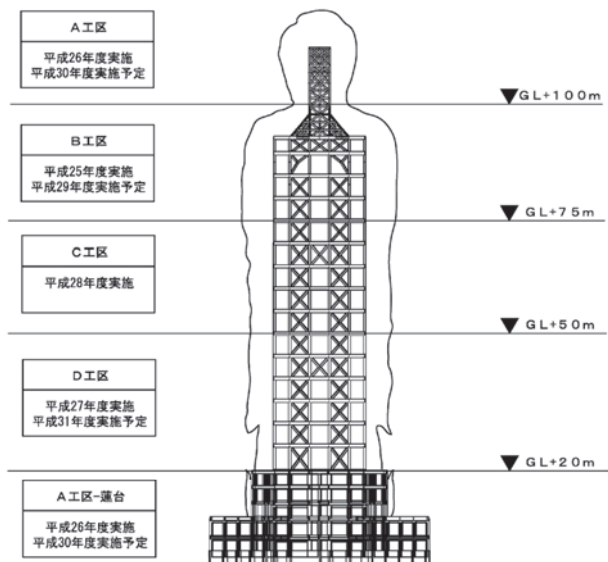


図5 工区分け

(2) 外観点検

仏像の外被は青銅板ですので、十分な耐久性を確保していると考えられます。しかし、実際に外被を外から点検する手段は仏像の巨大さから簡単ではありません。外部に出る窓も無く、メンテナンス用ゴンドラを吊り下げる設備もありません。地上から望遠を使用した点検方法では、形状が複雑であるため点検できない死角部分があります。そこで、近年飛行性能が向上しているドローンを使用してカメラによる外観点検を2015年4月に行いました。ドローンに搭載したカメラはデジタル一眼カメラで、約2430万画素の高画質カメラです。撮影はGPSを使用し、平面的に12分割した位置で縦方向にドローンを移動させて行いました(図6)。点検には9000枚

の写真撮影を行い、写真画像は通常のスナップ写真の他に画像処理ソフトにより3Dモデル化し、PC上にて自由に閲覧が可能としました(図7)。

点検では外観に大きな不具合は発見されなかったことから、今後の点検を4年毎に行うことを施主に提案しています。



写真4 ドローンによる撮影計画



写真5 カメラを搭載したドローン



写真6 撮影中のドローン



写真7 撮影した写真

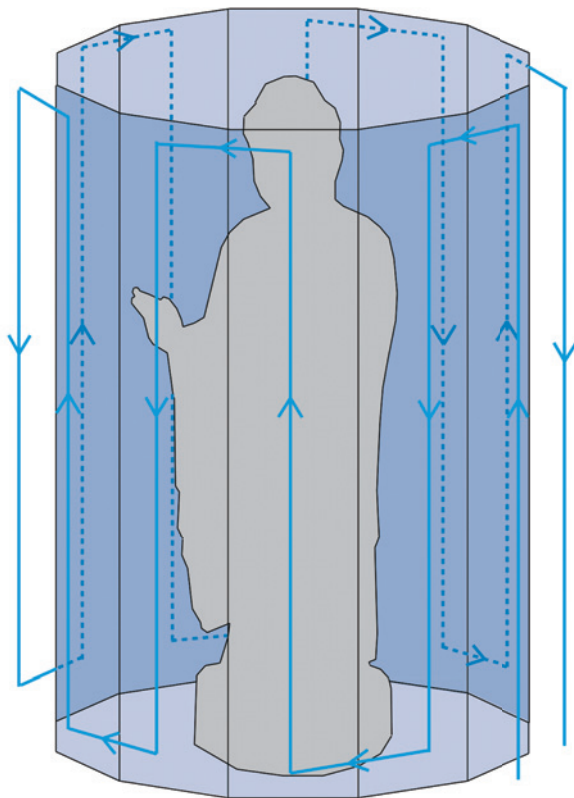


図6 ドローンによる撮影方法

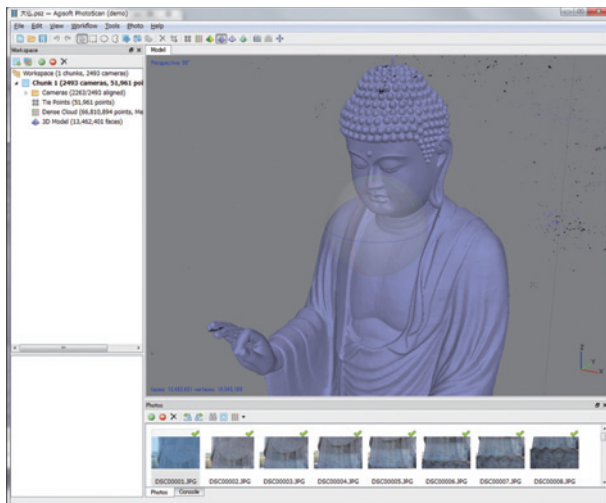


図7 牛久大仏の3Dモデル

4. 落雷抑制型避雷針の設置

(1) 仏像の落雷被害

仏像完成時には避雷針を設置していませんでした。仏像の外被は青銅板で電気を通すことから、落雷があると雷電流は外被銅板から本体鉄骨を伝わり地盤に接地するので避雷針は必要ないと判断されていたためです。しかし、仏像胎内には展望室などの部屋があり、内部ではパソコン、エレベーター、セキュリティーシステムなど、電子機器が使われています。これらは大電流に弱い電気システムですので、仏像の鉄骨躯体に大きな電流が流れると、これらの電子機器に支障が生じます。

(2) 落雷抑制型避雷針の設置

そこで、弱電設備を雷電流から守るため落雷抑制型避雷針を設置しました(写真8)。落雷抑制型避雷針とは通常の避雷針(誘導針)とは異なり、落雷自体を抑制する本当の意味での避雷針です。

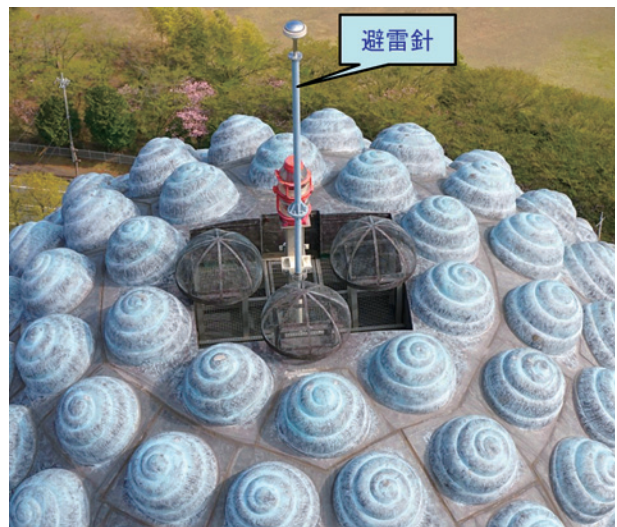


写真8 落雷抑制型避雷針

(3) 落雷抑制型避雷針の原理¹⁾

今までの避雷針への落雷メカニズムは、まず通常マイナス電荷を帯びている地表面や避雷針に、マイナス電荷を底部に貯めている雷雲が接近すると、雷雲のマイナスに誘起されて雲の直下はプラスに帯電し、避雷針からはプラス電荷が上空のマイナス電荷に向かって放電します。雲のマイナス電荷は地面のプラス電荷に向かって放電します。その多くが空中で消失してしまいますが、この二つの放電が結びつくとき電荷が通りやすくなった放電路にさらに大きな電荷が流れます。これが落雷の原理です(図8)。

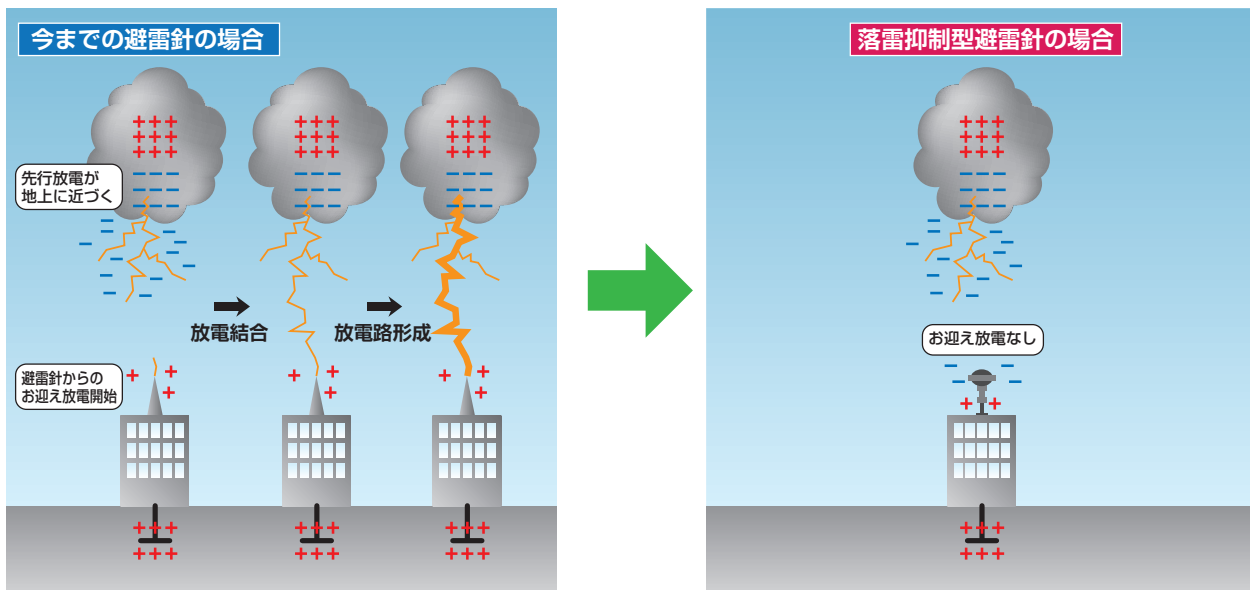


図8 落雷抑制型避雷針の原理²⁾

今回設置した落雷抑制型避雷針は、半球状の電極を上下に配置し、その間を円筒形の絶縁体を用いて固定したものです(図9)。これにより避雷針の先端(上部)がマイナス電荷になる構造になっており、雲のマイナス電荷と結びつきにくいいため落雷の発生を防ぐ仕組みです。

落雷抑制型避雷針を設置してから2016年9月までの落雷による被害は、水平方向から下部電極に向けて放電が発生した1回のみとなっています。



図9 落雷抑制型避雷針

5. 構造ヘルスマニタリング

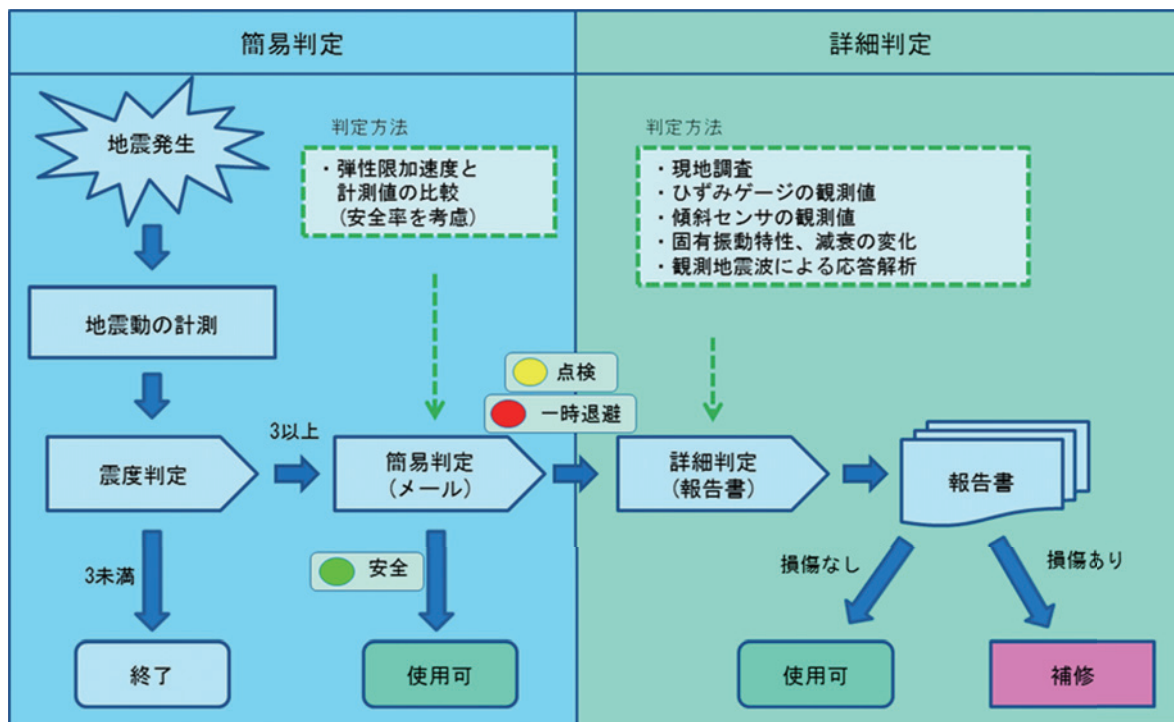


図10 牛久大仏における構造ヘルスマニタリング

(1) 構造ヘルスマモニタリングの概要

構造ヘルスマモニタリングは、地震や風による建造物の揺れを、建物に設置した観測機器によりリアルタイムで計測し、安全性や被災度を判定する技術です。建築事業部ではこのシステムを開発し、牛久大仏に組み込んで2016年4月から運用を始めました。

仏像に各種計測装置を設置し、地震による加速度が、設定した閾値を超えた際は、通報先として登録されたメールアドレスに簡易判定結果と地震概要を送信します。計測した加速度から地震による損傷の有無を推定することで、仏像内の展望室などの継続利用が可能か判断します。加速度が閾値を超えた場合は、詳細判定を実施して、損傷の有無を確定します。

(2) 計測機器の選定及び設置

仏像胎内には図11に示す位置に加速度センサ、傾斜センサ、ひずみゲージを設置しました。

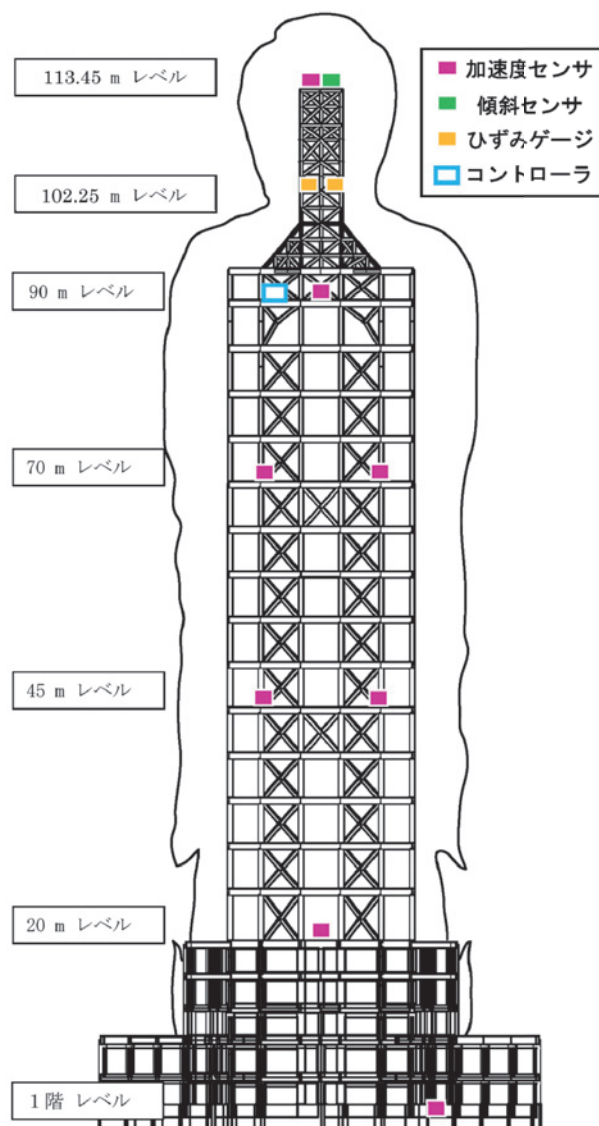


図11 計測機器の設置状況（断面）

牛久大仏は、巨大な建造物であるため、発現する振動は極めてゆっくりとした現象となります。この挙動を捉えるためには、従来のサーボ型やひずみ型の加速度センサでは精度不足であり、このような要請から、水晶振動子を利用した1 μ Gの分解能をもつ非常に精度の高い3軸加速度センサを採用しています（写真9）。計測方向は水平2方向（X方向：仏像左右方向、Y方向：仏像前後方向）及び鉛直方向（Z方向）としています。

高い精度のセンサを採用することで、地震時の加速度計測に加えて、常時微動による振動の計測も可能となります。常時微動計測と解析により、仏像の固有周期や振動モードなど、構造特性を分析することが可能です。

加速度計の設置位置は仏像の形状から判断できる振動特性を考慮して設置しました。仏像の形状は胴体の肩から首にかけて細くなり、頭部では再び断面が大きくなるので、地震による水平力に対しては頭部が大きく振られます。よって、加速度センサは高さ方向の振動特性を把握できるように、地上1階レベル、足元となる20 mレベルに設置し、胴体部分は足元から断面が変化する肩までを3分割した45 mレベル、70 mレベル、90 mレベル、最頂部となる113.45 mレベルに設置しました。45 m、70 mレベルは図12に示すように躯体中央となる位置に構造部材が存在しないため、躯体の対角となる柱近傍位置に設置して、剛心位置の加速度を推定します。

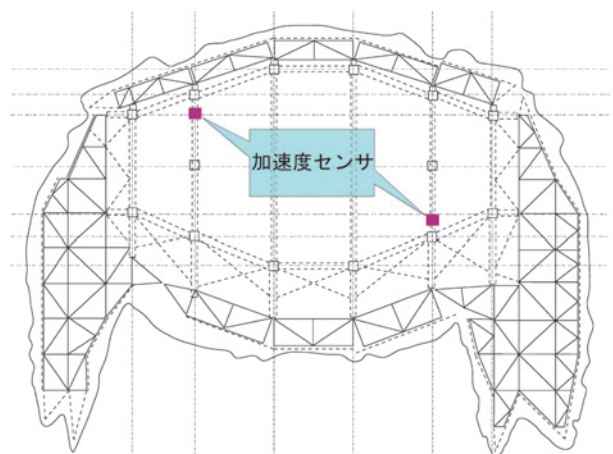


図12 計測機器の設置状況（平面）

傾斜センサは地震発生前後での仏像頭部の傾斜を計測するために、頭頂部113.45 mレベルに設置しました。部材の損傷により生じるわずかな傾斜も計測できるよう、1万分の1°の違いを計測できるセンサを採用しています。

ひずみゲージは地震時において最も負荷が大きくなると想定される仏像首部の鉄骨のひずみを計測するため、102.25 mレベルに設置しました。

計測機器の設置にあたって、仏像内の温度環境が製品の動作温度範囲であるか確認する必要がありました。比較的気温が高い8月の2週間をかけて仏像内部の温度を測定し、動作範囲である事を確認しました。各計測機の性能情報は表1に示します。

表1 計測機器のスペック

	■ 加速度センサ	■ 傾斜センサ
型名	M-A550-AC	M-A550-TC
センサ	3軸 (X, Y, Z) 加速度センサ	3軸 (X, Y, Z) 傾斜センサ
分解能	1 μ G	0.0001deg
ダイナミックレンジ	$\pm 5G$ (精度保証範囲 $\pm 1G$)	$\pm 60deg$ (精度保証範囲 $\pm 45deg$)
サイズ	52 \times 52 \times 26mm, 81g	52 \times 52 \times 26mm, 81g
動作温度範囲	-20 \sim +70 $^{\circ}$ C	-20 \sim +70 $^{\circ}$ C

	■ ひずみゲージ
型名	YEFLA-5
センサ	単軸
室温におけるひずみ限界	10 \sim 15%
室温における疲労限界	5 \times 10 ⁵
サイズ	ゲージ 5.0 \times 2.0mm ベース 12.0 \times 4.0mm
動作温度範囲	-20 \sim +80 $^{\circ}$ C

加速度センサ、傾斜センサは金属板にボルト接合後、45 m レベル以上はマグネットにより鉄骨躯体に取り付け、1階レベル、20 m レベルはコンクリートスラブへ接着剤を用いて固定しています。



写真9 加速度センサ

(3) 計測機器の接続とデータ保存

加速度センサと傾斜センサはCAN (Controller Area Network) ケーブルでコントローラボックスに繋ぎ、ひずみゲージはリード線でボックスに繋いでいます。計測データはルーターを介してNAS (Network Attached

Storage = ネットワーク上に接続できる HDD) にCSV形式で保存します。データのサンプリングレートは、地震波の時間刻み 0.01 秒を得るため 100 Hz となっています。

保存されるファイル構成は年月、日にち、時間でフォルダが作成され、1分単位でCSVファイルが作成されます。

NASのデータ保存は約1年分の容量を持ち、空き容量がなくなると古いデータから随時上書きされる仕組みとなっています。

保存されたデータはインターネット回線を使用してNASに接続することで、いつでも取り出しが可能です。

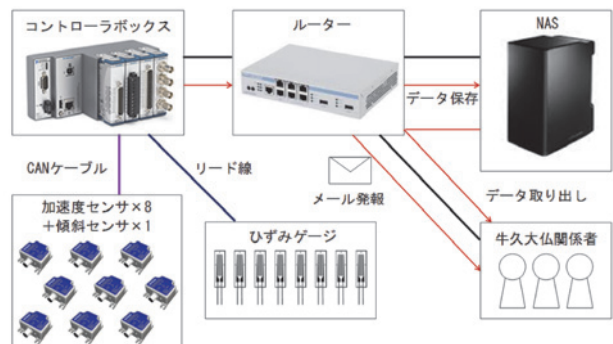
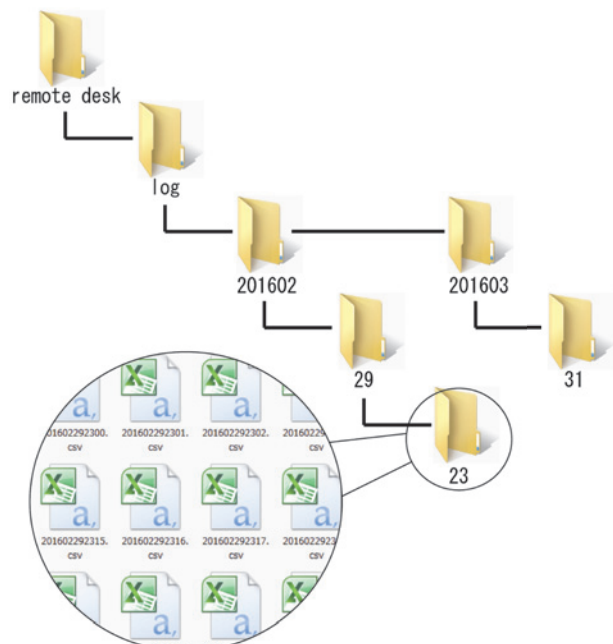


図13 システム概要



例) 2016年2月29日23時台の1分ごとのデータ

図14 保存ファイル要領

(4) 震度計算と簡易判定メール

簡易判定メールは、1階レベルに設置した加速度センサの計測値で、気象庁の算出方法で計算した計測震度が2.5以上（震度3以上）となった場合に予め登録設定した関係者に対し、送信されます。震度計算はコントローラ内で行っており、震度を算出するための演算は0.1秒ごとに行い、5秒間の加速度データを使用してほぼリアルタイムに、しかも連続的に震度を算出できるものとしています。

2016年5月16日21時23分に茨城県南部を震源とするマグニチュード5.6の地震が発生しました。気象庁発表の牛久市中央の震度は4。牛久大仏1階に設置した加速度センサから算出した計測震度は4.1でした。簡易判定メールが配信され、結果は「安全」となりました。

簡易判定メールの内容は、地震を観測した日時、1階レベルにおける加速度から計算した震度、安全・点検・一時退避の3段階で行う簡易判定、さらに加速度、傾斜センサ及びひずみゲージの最大最小値となっています。



写真 10 簡易判定メール

判定結果を直感的に判断できるように、結果のレベルを信号機の青「安全」、黄「点検」、赤「一時退避」で表現しています。

「安全」 ● 「点検」 ● 「一時退避」 ●

(5) 閾値の設定

地震発生直後に仏像の健全性を評価するため、弾性限度加速度を基準として閾値を設定しました。観測加速度が弾性限度加速度を超えた場合に「一時退避」、弾性限度加速度の8割以上を「点検」、8割未満を「安全」としています。

(6) 詳細判定

簡易判定で「点検」または「一時退避」の結果となった場合は詳細判定を行います。詳細判定では、「現地調

査」「ひずみゲージの観測値」「傾斜センサの観測値」「固有周期の変化」「観測加速度と応答加速度」などの項目で健全性を評価し判定を行います。

現地調査では躯体と外被銅板、下地鉄骨の損傷具合を目視により点検します。ひずみゲージからは首部鉄骨のひずみから残留変形の有無を推定します。傾斜センサからは地震発生前後での仏像の傾斜を計測し、部材の塑性化に伴う残留変位の有無を確認します。固有周期の変化は地震により躯体が損傷した場合、剛性変化によって起こる固有周期の変化を確認します。さらに振動解析モデルに1階レベルで観測された加速度を使用して応答解析を行い、損傷を予測します。

(7) 報告書の作成

詳細判定による報告書の項目は下記の通りです。

- I. 発生地震概要
- II. 判定結果概要
- III. 計測概要
- IV. 判定結果詳細
 1. 加速度センサ
 - a. 震度判定
 - b. 観測波形と変位履歴
 - c. 閾値に対する観測加速度と応答加速度分布
 - d. 最大相対変位
 - e. 常時微動の解析による、地震前後での卓越固有周期の変化の確認
 2. ひずみゲージ
 3. 傾斜計
 4. 考察

6. あとがき

年間を通して多くの参拝客が訪れ、観光スポットの象徴となる牛久大仏は今後も健全な姿を維持して頂きたいと考えます。

運用を開始した構造ヘルスマモニタリングでは、開発にあたり振動解析技術の知識を必要としました。今後、詳細については機会をみて報告する予定です。また、システム自体は地震に対する被害を低減するシステムにはなり得ません。今後の目標としては仏像に新しい技術を組み込むことで、地震や風の揺れ低減対策を提供できれば良いと思います。

参考文献

- 1) 松本敏男：雷と避雷針について、電気計算8月号、pp.32-37, 2016.8.
- 2) ㈱落雷抑制システムズ 資料集「落雷抑制の原理」
<http://www.rakurai-yokusei.jp/files/index.html>