

論文

球体発射・回収装置による栈橋下面の打音方法の開発

水野 剣一^{*1}, 谷口 修^{*2}, 酒井 貴洋^{*3}, 武居 直行^{*4}

Development of New Impact Acoustic Method Using System of Launching and Winding Steel Ball for Integrity Test of Jetty Girder

Kenichi MIZUNO^{*1}, Osamu TANIGUCHI^{*2}, Takahiro SAKAI^{*3} and Naoyuki TAKESUE^{*4}

要旨：栈橋上部工コンクリート下面部の点検効率化のため、ステンレス球を空気圧で発射・回収する装置を遠隔操作可能な無人小型ボートに搭載して打音検査を行う方法について検討した。球体発射・回収装置は、直径 2.5cm のステンレス球を発射して打撃し、球体に取り付けたナイロン製の釣糸を電動モータにて回収する方法とした。この方法により、水上において 5m 上方のコンクリート試験体に対する打音検査への適用可能性を見出した。

キーワード：栈橋、非破壊検査、打音、コンクリート、浮き

1. はじめに

高度経済成長期に数多く建設された栈橋は、長きにわたり国民の生活基盤として機能してきた一方で、老朽化が進行しており、効率的・効果的な維持管理が急務となっている。これまで、筆者らは効率的な目視点検手法としてラジコンボートを用いた栈橋上部工コンクリート下面部の点検・診断システム¹⁾を開発し、これまで複数の栈橋に適用してきた。これらの技術は栈橋上で操船者がカメラを搭載したラジコンボートを栈橋下で操船して多数の画像を取得し、その画像から変状を把握する。しかしながら、画像のみでは浮き部の把握が困難であることから、浮きを検知する手法が望まれていた。

栈橋上部工下面で浮きを把握するには、一般的に筏や足場を設けて実施するが、筏や足場による調査では海上で人力による作業が基本であり、海上転落などの危険性を有する。また、潮位等により限られた時間で調査や足場を設置しなければならず、相応の時間とコストも必要である。現在、レーザーによる打音検査方法など遠隔で打音する方法²⁾が種々開発されているが、栈橋下部への進入口が狭隘で機器の大きさに制約を受けることも課題である。また、コンクリート表面の振動を測定する方法では測定位置に対して測定器を静止する必要がある、波の揺れや流れのある船上では困難と考えられる。これらのことから、栈橋上部工コンクリート下面を無人で打音可能な方法は皆無著者らが知る限りないと考えら

れる。

そこで、著者らは空気圧でステンレス球を発射・回収して打音する装置を開発し、遠隔操作可能なボートに搭載する方法を考案した。また、海上で安定した姿勢で打音するためには、ボートの揺れを抑えることが重要であり、加えてボート自体の動揺制御方法も検討した。本論文は開発した球体発射・回収装置での打音の可否、ボートの動揺抑制方法の検証、水上での試験体を用いた打音試験結果について報告するものである。

2. 機器の概要

2.1 球体発射・回収装置

(1) 球体発射・回収装置の概要

球体発射装置は直径 2.5cm のステンレス球を空気圧により発射する装置である。球体の回収のため、直径 0.52mm のナイロン製の釣糸を球体に取り付けて電動モータで巻き取る機構とした。球体発射・回収装置の写真を図-1 に示す。巻取り部は、ガイドを用いて発射と巻取りの両者を両立可能な構造とした。発射時はガイドを図-1 に示すように鉛直上方とし、巻取り時は図-1 の矢印に示すように横方向に倒す構造である。

(2) 発射速度

発射速度は空気圧を変更することで変えることが可能である。発射速度と空気圧の関係を確認するため速度測定を行った。空気圧は空気圧調整弁を調整

*1 五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部 係長

*2 五洋建設（株）九州支店南九州建設事業所 専門所長

*3 五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部 担当部長

*4 東京都立大学 システムデザイン学部機械システム工学科 教授

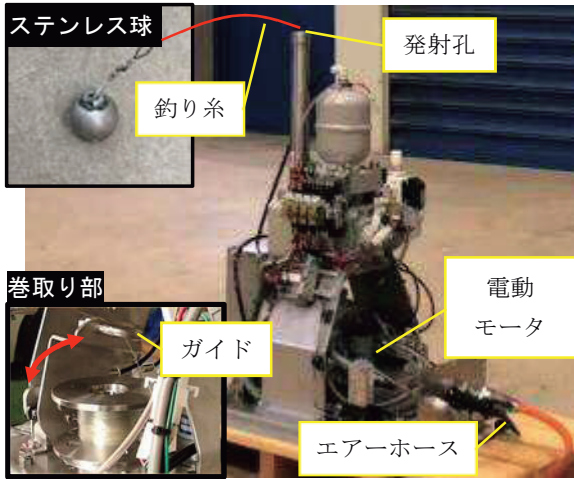


図-1 球体発射・回収装置

表-1 発射速度と空気圧

空気圧	0.075MPa	0.10MPa	0.15MPa
発射速度	9.5m/s	11.5m/s	15.0m/s

して設定し、速度測定は2ヶ所のフォトゲートセンサを通過する時間から物体の通過速度を測定する速度測定器を発射孔に設置して測定した。測定した発射速度と空気圧の関係を表-1に示す。空気抵抗がない場合、5m 上方へ到達させる速度は 9.9m/s であるため、空気圧 0.10MPa 以上であれば球体を 5m 上方に到達させることが可能である。

2.2 収録機器

使用したマイクは周囲の雑音の影響を防ぐために指向性を有するものとし、周波数帯 200Hz~10000Hz の範囲で低減なく測定可能な機器を使用した。収録可能な音の最大値は 126 dB である。サンプリング周波数 44.1kHz とし、PC に wav フォーマットで記録する方式とした。

2.3 使用ボート

球体発射装置を搭載するボートは長さ 1.2m、幅 1.2m、高さ 0.64m である。スラストは4基取り付け前後、左右、旋回を可能とした(図-2参照)。球体発射で空気を使用するため 5L の2個の空気タンクを船体の両舷に搭載し、打音位置の把握のためラインレーザとカメラをボートに搭載した。

10cm と、スラブのかぶり 2.5cm を想定してスチレンボードの設置深さを設定している。試験体に使用したコンクリートは JIS 認定工場のレディーミクストコンクリートの 24-12-20H を使用した。陸上による打音実験は図-4に示す通り、ボートを使用せずに球体発射・回収装置とマイクのみを使用して実施した。コンクリート試験体の側面に4点にアイボルトとチェーンを取付け、クレーンで試験体を吊り上げ、球体発射・回収装置の上方に配置した。試験体の支持条件としては、図-4に示すように試験体を上方から吊り上げているのみとした。マイク位置は発射孔か

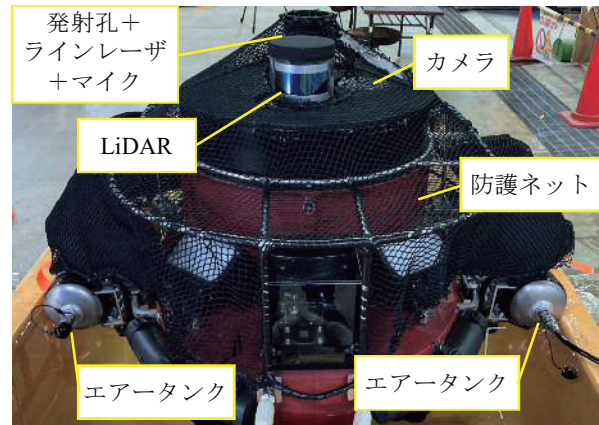
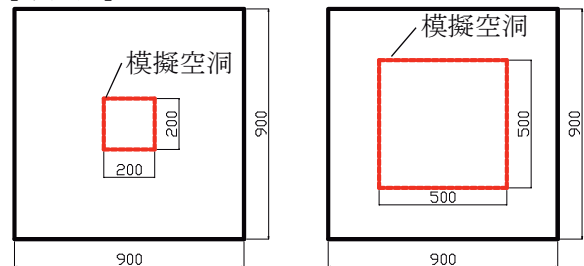
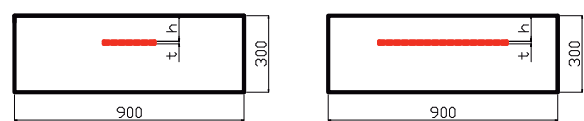


図-2 使用ボート

【平面図】



【断面図】



単位:mm

(a)模擬空洞口20cm (b)模擬空洞口50cm

図-3 コンクリート試験体の平面図と断面図

表-2 模擬空洞(スチレンボード)のサイズと設置位置

No	サイズ	スチレンボード厚さ t	かぶり厚さ h
1		無し	
2	□20cm	1cm	2.5cm
3	□20cm	1cm	10cm
4	□50cm	1cm	2.5cm
5	□50cm	1cm	10cm

3. 陸上での打音実験

3.1 実験概要

試験体は□90cm×90cm、厚さ 30cm のコンクリート試験体とし、模擬空洞としてスチレンボードをコンクリート内部に設置した。試験体の図面を図-3に示す。試験体はスチレンボードの厚さ、大きさ、設置深さを変えたものをそれぞれ作製した。試験体一覧を表-2に示す。なお、栈橋の梁を想定したかぶり

ら水平に 50cm 離れた位置とした。距離による影響を確認するため機器からの試験体までの距離は 1m, 3m, 5m の 3 パターンとし、空気圧 0.1MPa で固定とした。

3.2 結果と考察

No.1 と No.4 の打音結果を図-5 に示す。なお、図-5 の Y 軸の振幅はマイクが感知できる最大音圧レベル(126dB)を 1.0 とした比である。

(1) 試験体との距離の影響

距離 1m の場合、球体発射音の振動が収まる前に打音が発生しているが、打音部分で再度計測値が大きくなっていることから判別は可能であり、発射から試験体衝突までの時間は約 0.09s 程度であった。

距離 5m の場合、距離 1m に比べて No.1 の打音の最大値は 3 割程度小さくなるものの、空洞がない供試体 (No.1) でも音を計測することは可能であった。発射から試験体衝突までの時間は距離 5m の場合では約 0.57s 程度であった。

(2) 空洞の有無の影響

No.1 と No.4 の比較では、距離 1m の場合では最大値が 1.0 以上のため判断できないが、距離 3m や 5m の場合では、No.4 の方が振幅は大きい。距離 5m で全試験体の最大値を図-6 に示す。No.2 や No.4 のようなかぶりが小さいほど音は大きい傾向であり、空洞の面積が大きいほど音は大きい傾向であった。この傾向は既往の研究³⁾とも合致しており、本データも同様であることを確認した。

(3) 周波数分布

サンプリング周波数 44.1kHz、データ数 4096 個とし、0.093 秒間の打音部分の図-5 の無次元化したデータを FFT 処理して周波数分布を求めた。距離 5m でのフーリエスペクトルの結果を図-7 に示す。各試験体で振幅が最大となる周波数は異なることが分かる。なお、最大振幅が 0~5000Hz で見られたため、図-7 は 0~5000Hz で示している。この周波数の違い

については次章で FEM を用いて固有値解析で把握することとした。

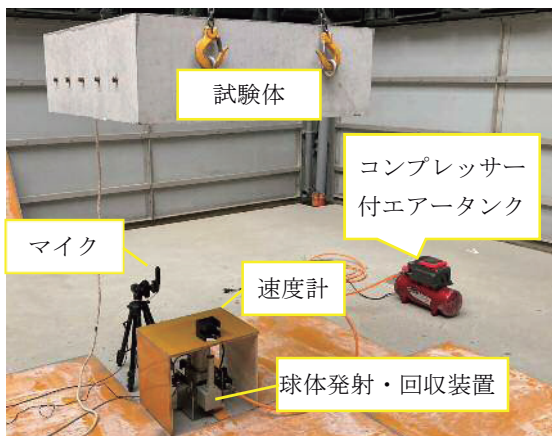


図-4 試験状況

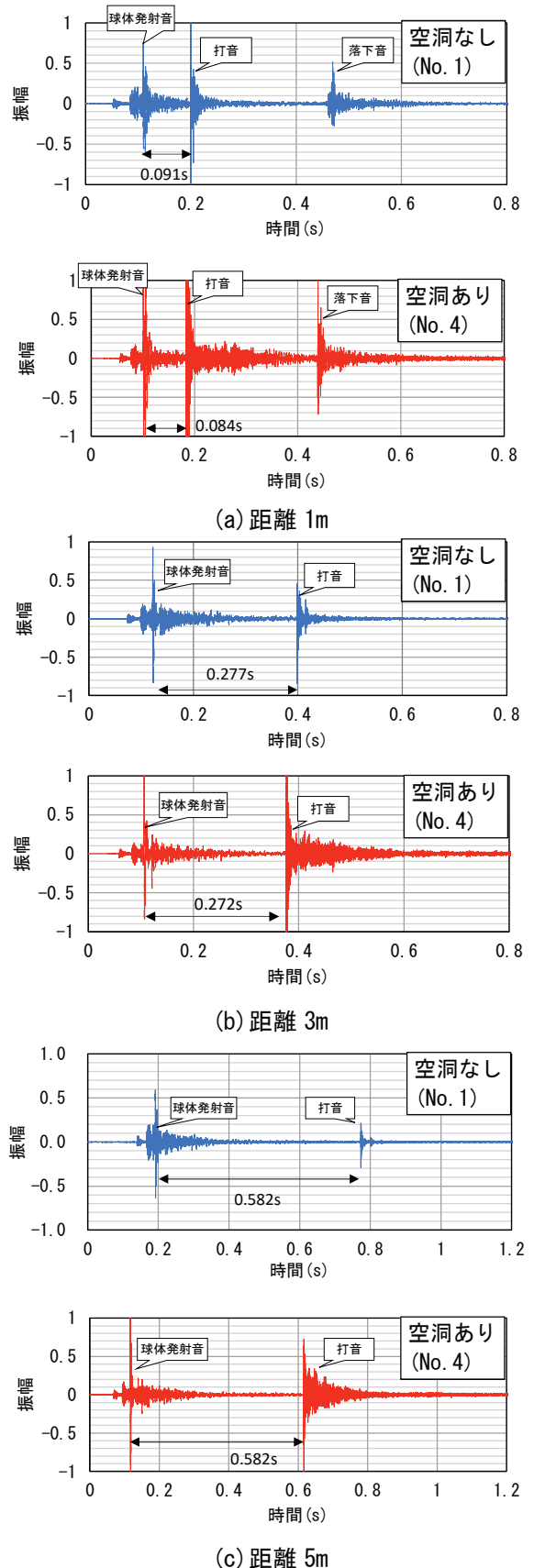


図-5 No. 1 と No. 4 の打音の時刻歴波形

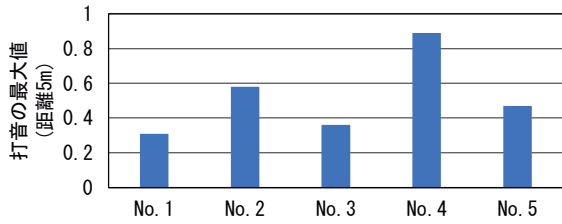


図-6 距離 5m での打音の最大値

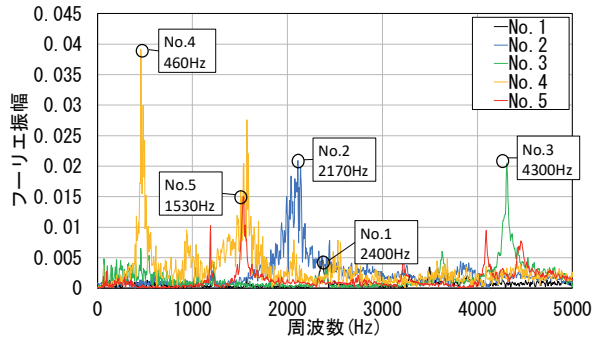


図-7 打音部の周波数分布

4. FEM の固有値解析による検証

4.1 解析概要

既往の文献⁴⁾から模擬空洞のある本試験体の打音の主要因は板のたわみ共振で発生していると考えられる。しかし、図-3の断面図で模擬空洞上部のコンクリートが板のたわみ共振は4点支持ではないため、FEMによる固有値解析によってこの周波数(1次モード)を算定することとした。試験体 No.4で算定した1次モードの振動変位は図-8に示す。試験体の固定条件は図-8に示す通り、4隅の点を変位固定とした。このモードとなる周波数を模擬空洞の大きさとかぶりを変えて周波数の変化を確認した。さらに、その周波数と前章での打音データのフーリエ振幅の最大値に対応する周波数との一致を確認することで本試験のデータが有効であるかを検証した。解析したモデルは試験体と同寸法とし、スチレンボードは空洞として配置した。コンクリートの動弾性係数はφ100mm×200mmの円柱供試体で別途弾性波速度を計測して算定した。使用パラメータを表-3に示す。

4.2 結果と考察

模擬空洞(正方形)の辺長とかぶり厚さを変えて周波数を求めた結果を図-9に示す。空洞が大きいほど低周波数傾向となり、かぶり厚さが大きいほど高周波数傾向であった。図-7のフーリエ振幅が最大値となる周波数を同図に示した結果、解析の周波数と概ね一致していることが明らかとなり、本方法で取得したデータは有用であると判断した。空洞の有無で音の大きさの違いが小さいケースであったかぶり厚さ10cm、□20cm×20cmの空洞でもフーリエスペ

クトルのピーク値の違いから検出できると考えられる。このため、打音したデータを周波数分析することで、かぶり厚さ100mm以下かつ正方形20cm角以上であれば浮きを検出できると考えられる。

5. ボートの動揺抑制方法の検討

5.1 ボートの動揺抑制方法

本ボートには船体の揺れを抑える方法として、船内に設置したIMU(Inertial Measurement Unit)の角速度を基に、前後・左右にスラストで推力を発生させて船体にモーメントを与えることで船体の動揺を抑える制御機能を付与した。紙面の都合上、ピッチ軸のみで説明する。ピッチ軸回りの簡略化した運動方程式は次式となる。

$$I_p \ddot{\theta}_p = -Q_p \dot{\theta}_p - C_p \theta_p - r F_p + M_d \quad (1)$$

ここで、 I_p はボートの慣性モーメント、 θ_p はピッチ角、 $-Q_p \dot{\theta}_p$ は粘性モーメント、 $-C_p \theta_p$ はボートが傾くことによる復元力(モーメント)、 r は重心とスラスト推力のオフセット量、 F_p は前後方向の推力、 M_d は外乱モーメントとする。

ボート自体には復元力と粘性が作用するため、静水上では揺れが生じていざれ収まるが、波風等の

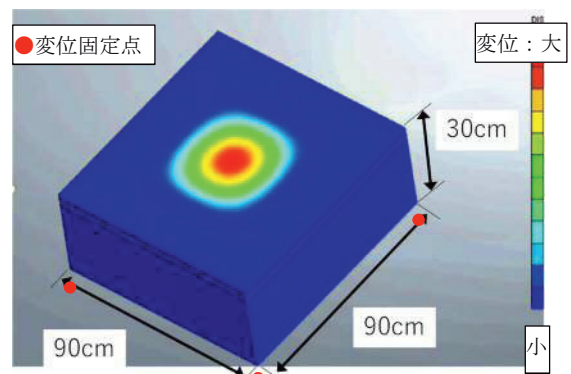


図-8 FEMによる1次モードの振動変位 (No. 4)

表-3 解析パラメータ

項目	値
弾性波速度	3750m/s
動弾性係数	29kN/mm ²
単位体積重量	23kN/m ³
ポアソン比	0.2

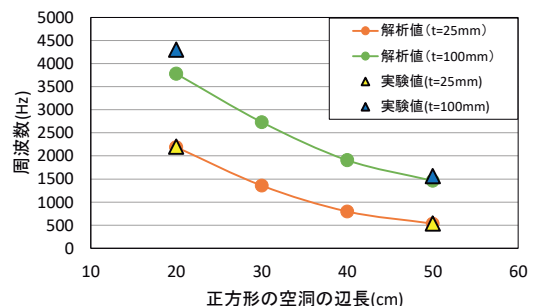


図-9 打音部の周波数分布

外乱がある場合にはなかなか収まらない。そこで、船体の揺れを抑える方法として、船内に設置した IMU の角速度を基に、前後・左右にスラストで推力を発生させて船体の動揺を抑えるフィードバック制御機能を付与した。具体的には下記の式(2)、式(3)となる推力を付加する（実際に追加する際の符号は座標系を考慮して負帰還となるように設定）。

$$F_p = k_p \omega_p \quad (2)$$

$$F_r = k_r \omega_r \quad (3)$$

ここで、 F_p 、 F_r ：前後方向および左右方向への推力 (N)、 ω_p 、 ω_r ：IMU で計測したピッチ角およびロール角の角速度(deg/s)、 k_p 、 k_r ：係数 (N・s/deg)。このとき、運動方程式は

$$I_p \ddot{\theta}_p = -Q_p \dot{\theta}_p - C_p \theta_p - r k_p \dot{\theta}_p + M_d \quad (4)$$

となり ($\omega_p = \dot{\theta}_p$)、もともとの粘性係数 Q_p に $r k_p$ が追加された形になり、これにより揺れがより早く収まる。動揺を抑制するのに十分な係数の値を実験的に決定する。

5.2 試験概要

本手法の動揺抑制効果を検証するため、造波装置を有した水槽で波を一方向に造波させて船体を揺らし、動揺角を測定した。計測方法としては(株)ノビテックのモーションキャプチャーシステムの VENUS3D を使用した。水槽の周りにカメラを 8 台設置し、船体に反射マーカを 5 点設置して変位を計測し、その変位から動揺角を算定した。造波した波高や周期は表-4 に示し、船体のピッチ角、ロール角を計測するために船体の向きを変えて実施した。なお、造波装置の関係で波高 30cm は周期 2s と 3s のみとした。

表-4 造波ケース

No.	波高	周期
H10_1s	10cm	1s
H10_2s	10cm	2s
H10_3s	10cm	3s
H10_4s	10cm	4s
H30_2s	30cm	2s
H30_3s	30cm	3s

5.3 結果と考察

計測された動揺角の一例を図-10 に示す。揺れ始めから 20s 間で計測された最大値の結果を図-11、図-12 に示す。波高 10cm のケースでは、動揺制御無しはロール角とピッチ角ともに周期 1s の動揺角が大きく、周期 4s はロール角で大きい。しかし、動揺制御有のケースでは動揺を低減可能であることが分かった。なお、水上で動揺を与えた際に船の揺れる周期はピッチ 1.1s、ロール 0.85s であり、この影響で船が周期 1s で大きく揺れたと考えられる。係数 k_p 、 k_r

の大きさによる影響を比較した場合、図-11 に示す通り、波高 10cm では係数による違いは少なかったが、図-12 の波高 30cm の場合では係数 k_p 、 k_r を 1.0 より 2.0 とした方がより動揺角を低減できることが分かった。

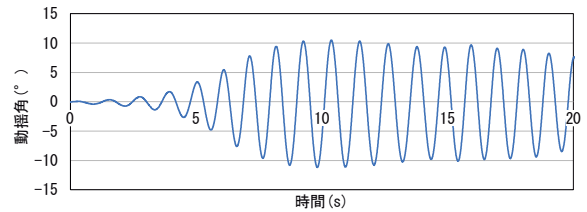
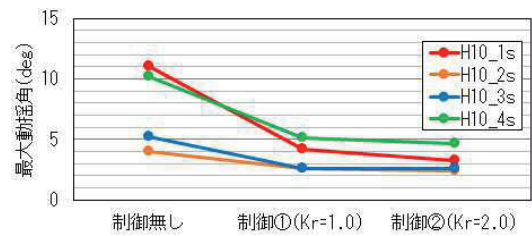
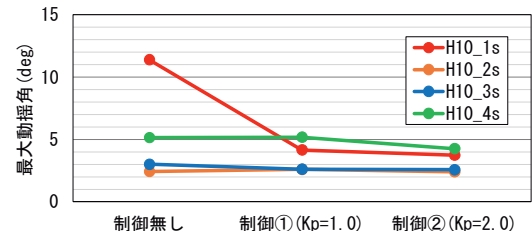


図-10 計測した動揺角の一例 (H10_1)

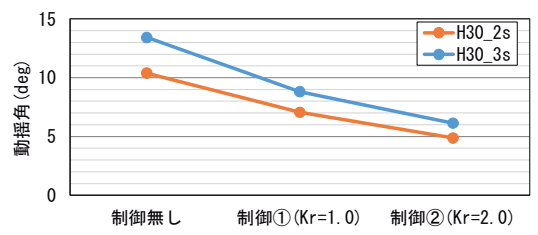


(a) ピッチ角

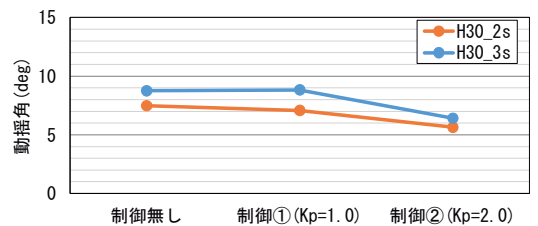


(b) ロール角

図-11 波高 10cm 時の動揺角の最大値



(a) ピッチ角



(b) ロール角

図-12 波高 30cm 時の動揺角の最大値

6. 水上での打音実験

6.1 実験概要

水上の対象位置を球体で正確に打音を行うためには、船体の誘導位置と目的位置を合致させ船体位置を一定に保持させることが必要である。そのため、本実験ではボートを自動制御で位置保持して実施することとした。自動制御の方法は著者らの既往研究の方法⁵⁾を使用した。位置データを取得する方法としては、LiDAR(Light Detection And Ranging)によるSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)パッケージである LIO-SAM⁶⁾により取得した。LiDAR は Velodyne Lidar 社製の VLP-16 を使用し、データ取得の測定スピードは 1 周を 10Hz とした。SLAM を使用する主な理由として、栈橋下や屋内環境では GNSS(Global Navigation Satellite System)が使用困難なためである。

6.2 実験結果と考察

発射孔から上方 5m の位置に試験体を設置して打音した実験状況を図-13 に示し、ボートに搭載している打撃位置を確認するカメラ映像を図-14 に示す。図-14 のカメラ映像から打音位置とレーザーの中心点から約 5cm のずれが確認された。この原因としては、試験体をクレーンで吊ったことで試験体が揺れていたこと、およびボートを定点保持させるため、スラストを水上で制御しているが、少なくとも±10cm 程度の移動は発生しているためこれも影響していると考えられる。今後、波のある環境で試験を行う予定である。

7. まとめ

水上で打音する方法として、空気圧で直径 2.5cm のステンレス球を発射・回収して打音する装置を開発し、遠隔操作可能なボートに搭載して点検する方法を検討した結果、下記の点が明らかとなった。

- (1)圧縮空気を利用して上方 5m の位置を打撃し、打撃位置から 5m 離れた位置のマイクで音を集録することが可能であった。
- (2)空洞がある場合は空洞がない場合に比べて、収録した音は大きい傾向であった。またかぶり厚さが小さく空洞の面積が大きいほど、音の大きさは大きくなる傾向であった。
- (3) 打音したデータを周波数分析することで、かぶり厚さ 10cm 以下、正方形 20cm 角以上であれば浮きを検知できると考えられた。
- (4)船体は前後・左右方向の移動する推力と IMU の角速度を用いることで動揺を抑えることが可能なことが分かった。
- (5)スラストによって定点保持しながら球体発射・回収装置を用いることで、水上で上方 5m の位置の打音が可能なことが分かった。

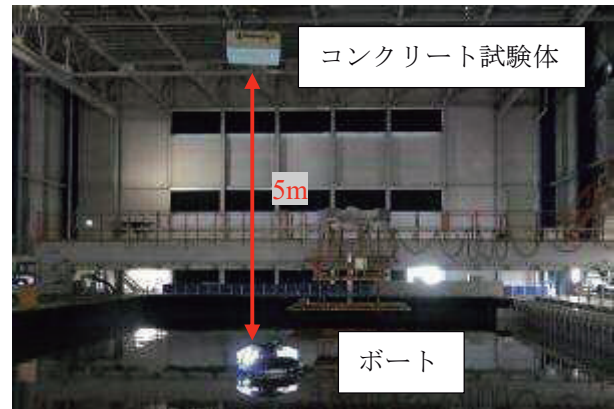


図-13 水上での実験状況

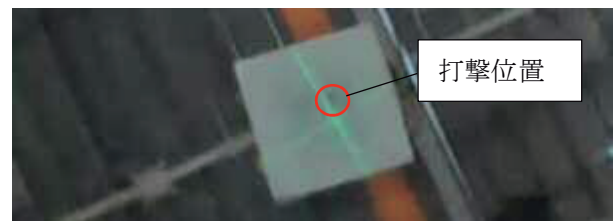


図-14 打撃位置確認用のカメラ映像

謝辞

装置とボート製作に協力して頂きました共和技研(株)、海洋電子(株)に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 水野剣一 ほか：ラジコンボートを用いた栈橋下面部の点検・診断システムの開発，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.73，No.2，pp.I_432-437，2017
- 2) 株式会社フォトンラボ：レーザー打音検査装置，国土交通省，点検支援技術性能カタログ（案）非破壊検査技術（トンネル：TN020003-V0121），pp.2-283 - 2-287，2020。
- 3) 鎌田敏郎 ほか：コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用，土木学会論文集 No.704，V-55，pp.65-79，2002.5
- 4) 社団法人日本非破壊検査協会：コンクリート構造の弾性波による試験方法 第 3 部打音法，pp15(解 10) -16(解 11)，2009
- 5) 木森啓太，武居直行，水野剣一，谷口修：港湾施設点検を目的とした全方向水上ビークルの自律航行，日本機械学会 Robomech2022,2A1-C07，2022。
- 6) Tixiao Shan, et al.: LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping, IEEE/RSJ IROS, pp.5135-5142, 2020