

光パルス干渉方式地震計を用いた円筒水槽振動特性の観測

Observation of Vibration Characteristics of a Cylindrical Water Tank by a Phase-shifted Optical Pulse Interference Sensor

白山工業	森下 日出喜	Hideki Morishita	
白山工業	吉田 稔	Minoru Yoshida	
日本原子力研究開発機構	西村 昭彦	Akihiko Nishimura	Member
白山工業	松平 昌之	Masayuki Matsudaira	
白山工業	平山 義治	Yoshiharu Hirayama	
東京パワーテクノロジー	菅野 裕一	Yuichi Sugano	

In order to apply seismic safety management to social infrastructure, we tested the phase-shifted optical pulse interference (POPI) sensor, which enables highly accurate seismic observation even in extreme environments, and observed the vibration characteristics of a cylindrical water tank. The water tank installed at JAEA-NARREC was used as a mockup of the reactor vessel. We also prototyped a special robot to install this seismometer. We have succeeded in analyzing the vibration characteristics of the water tank when the water depth changes. HAKUSAN Co., Ltd. has commercialized the POPI sensor as a highly sensitive seismometer. In the future, we will aim to install the POPI sensor at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of TEPCO in a severe environment with high dose.

Keywords: Phase-shifted Optical Pulse Interference Sensor, Seismic Safety Management, Seismometer, High Dose, Harsh Environment, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Decommissioning

1. はじめに

1995年1月の阪神淡路大震災を契機に我が国の地震観測網の整備が急速に充実した。現在、我が国ではHi-net高感度地震観測網に接続された約1000箇所の地震計が極微細な地震動を捉えている[1]。これらの地震計のデータ解析により地殻の挙動を知ることができる。

地震計の基本はバネ要素を介して取り付けられたサイゾモ振動系の質点位置検出法である。これまで、白山工業は極限環境下でも高精度な地震観測が可能な「光センサ地震観測システム」の理想形を目指し、質点位置検出法を原理から見直しを進めている[2]。このため検出方法としてパルスレーザーを光源とした位相シフト干渉計測法 (Phase-shifted Optical Pulse Interference : POPI) を開発した[3]。POPI地震観測システムはセンサ及びケーブルに電気を必要としないことから、原理的に耐雷、防爆、耐高温、耐腐食性など極限環境に強いことが示唆される。そのため室内検証を行う[4]とともに、活火山での実証試験[5,6]を行っている。なお、これらを通じて、従来のサーボ式微動計を上回る性能が得られている。

一方、2011年3月の東日本大震災により発生した福島第一原子力発電所 (以下1Fと略記) の事故により、炉心熔融となった1Fの廃止措置が喫緊の課題となっている[7]。1Fの1~3号機の廃止措置においては、高線量の放射線への対応や遠隔センシング技術とロボット等を組み合わせ合わせた技術開発が不可欠である[8]。今後、廃止措置が長期化する状況に置いて、高線量下での格納容器や原子炉建屋の腐食現象が懸念される[9]。したがって、原子炉構造体の強度に関する情報を得るため、高線量下で使用できる現場設置型の高性能地震計が有用である。

地震計測を用いた地殻構造の解析手法は確立している。1Fに設置可能な高性能地震計としてPOPI方式の地震計が活用できれば、劣化が進む原子炉格納容器や原子炉建屋の診断に地殻構造解析の手法が適用できる。

本報は、POPI方式の高感度地震計の実用化を目的として、その実施試験として原子炉格納容器、石油貯蔵タンク、化学プラント反応容器などタンク形状の構造体の振動特性の報告である。試験場所として、日本原子力研究開発機構の檜葉遠隔技術開発センター (以下NARRECと略記) を活用し、タンク形状構造体としてNARRECに設置された水中ロボット操作用試験水槽を使用した[10]。また、地震計設置にあたって1F設置のために開発してきた専用ロボットによる設置試験も行った。

2. 試験概要

Fig. 1 に試験水槽の外観を示す。NARREC では、1F 炉内で活動する水中ロボットの操作技術開発を目的に水槽の運用を行っている[10]。水槽は、直径 4.5m、高さ 5.5m の SUS316L 製であり、温水・濁水・塩水などの条件を選んで、5m の水深まで満たすことができる。1 階部分の周囲には警戒テープで枠取りされたアクリル製観測窓が 8ヶ所設けられている。水槽は本体とカバー SUS 板の間には保温のための断熱材が充填されている。

Fig. 2 は POPI を用いた地震計のセンサ部分の水槽上部への設置の様子を示す。Fig. 2 左側のイラストに示すように、水槽水面は水槽の淵から満水時には 50cm 下にある。水槽上部は張り出し部分が溶接されており、この張り出し部分にセンサ部分を設置した。センサ部分内部にサイズモ振動系が組み込まれており、光ファイバケーブルにより 1 階に据え付けた制御ユニットに接続した。センサ部分は、Fig. 1 に示す通り、水槽上部では南側 (NO. 1) と東側 (NO. 2) にそれぞれに一ヶ所、1 階の基礎部 (NO. 3) に一ヶ所、計 3 台を設置した。

基礎部のセンサ部分設置については、センサ設置のために専用ロボットを試作して使用した。Fig. 3 に、水槽と試験エリア周辺を見下ろした概略配置とロボットの移動経路を示す。ロボット操作場所 (Robot operation area)

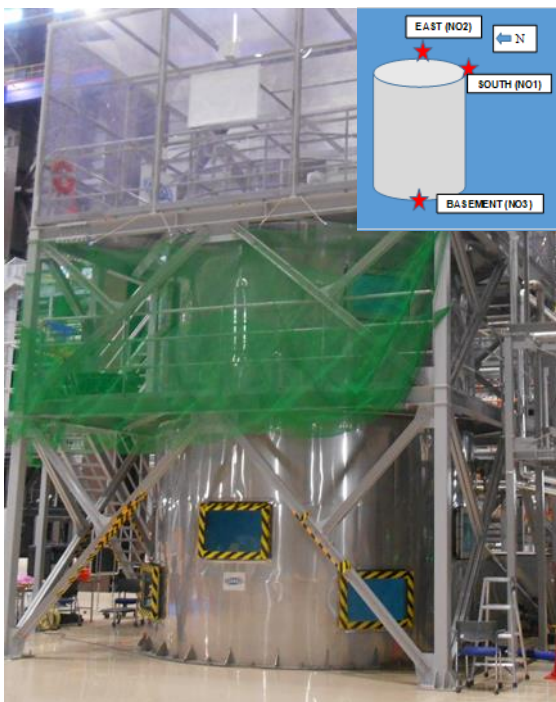


Fig.1 A water tank of the NARREC and optical sensor installation position

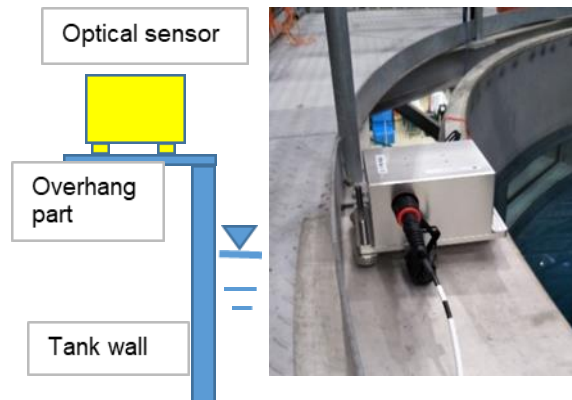


Fig.2 Optical sensor and installation status

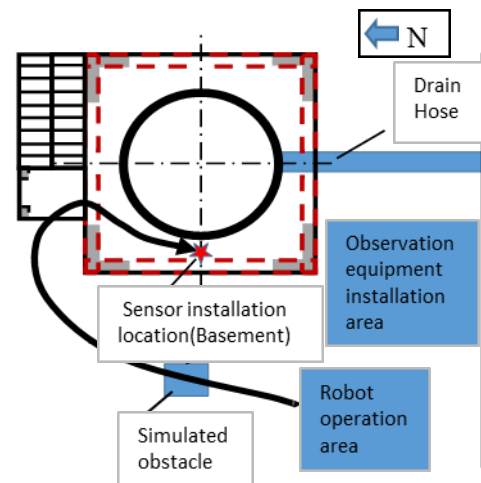


Fig.3 Water tank and test area with optical sensor installation route

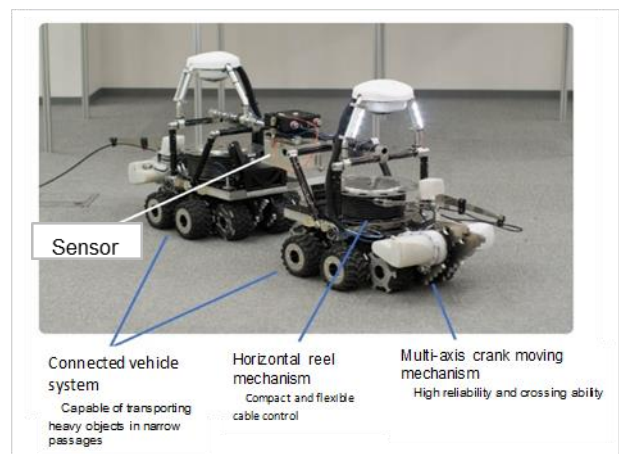


Fig.4 Overall picture of the developed Robot

には、遠隔操作員が待機しており、ここを起点としてロボットはセンサ部分を搭載した状態で水槽の基礎部に向かって出発した。

経路途中には模擬障害物 (Simulated obstacle) のパレットを設けて、これを登坂させた。続いて、水槽に敷設された階段部分に接近し、水槽の支持支柱と階段の支持支柱の間隙を通過して水槽の側面に到達した。Fig. 3 にはロボットの移動した経路を黒実線の矢印➡で示した。センサ部分が水槽近傍に設置される事でここに示した経路に沿って、動力ケーブルが床に敷設される。次に、ロボットは後進して動力ケーブルを収納しながら、光ファイバケーブルを敷設して出発点に戻る。計測装置設置場所 (Observation equipment installation area) では、地震計の観測員が待機している。ロボットが敷設した光ファイバケーブルが POPI 計測計に接続されると、地震計システムの動作準備が完了した。これにより、センサ部分に加わる振動を光ファイバケーブルを介して、地震計の観測員の場所まで導くことが出来た。通常、試験水槽の設置された環境には、地面からの微振動や空調機の振動などが存在している。

Fig. 4 に試作したロボットを示す。ロボットは前部ユニットと後部ユニットが連結した対称構造をしている。この構造により障害物の登坂が可能となる。また、前部ユニットには光ファイバケーブルがドラムに巻かれて収納されている。一方、後部ユニットには動力ケーブルがドラムに巻かれて収納されている。前部ユニットと後部ユニットの連結部分には小型の昇降機があり、センサ部分が吊るされ、指定場所への設置を行うことが出来る。

3. POPI 方式の地震観測システムについて

今回実験に使用した POPI 方式の地震観測システムは、センサ自体は単純なバネ-質量-ダンパー系であり、そのセンサの変位を光干渉法により高精度に求めるものである。これは強制振動系であり、センサの固有振動数よりも低い周波数の領域では加速度計となる。特長は、Fig. 5、Fig. 6 に示す通りパルス化した光信号を入力し、計測光を適切に遅延させて干渉させるところにある[3,4]。

本システムでは、センサ部は光ファイバと機械部品のみで構成されるためメンテナンス性に富み、遠距離での電力の供給が不要で、高線量下で厳しい環境条件での原子力施設の観測等で高精度なデータ測定が可能であり、これまで火山観測で試験観測を実施している[5,6]。

4. 薄肉円筒水槽の振動特性

今回実験に使用した水槽は、NARREC の薄肉円筒の水槽であり、やや長周期地震動 (数秒~数十秒) ではスロッシング現象が、短周期地震動 (数秒以下) では水槽と内部水の連成振動 (バルジング振動) が主体的となる[11]。

薄肉円筒の振動モードを Fig. 7 に示すが、半径方向の様な伸縮モード ($n=0$)、剛体移動モード ($n=1$)、波打ちモード ($n=2 \dots$) など、多くの振動モードが考えられ、また水槽内の水の深さにより振動性状も変化する[11]。そこで、水槽単体の固有振動数把握、並びに水槽の水深による影響を把握するため、 $n=1$ の剛体移動の振動モードについて質点系モデルで解析的検討を行う。

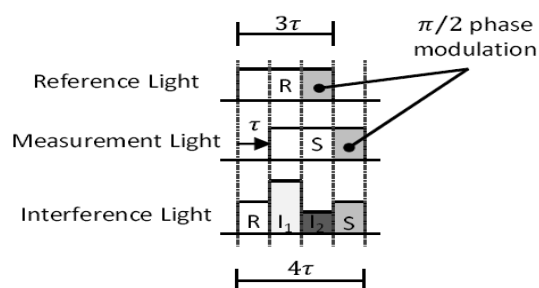


Fig.5 Diagram of the pulse laser interference

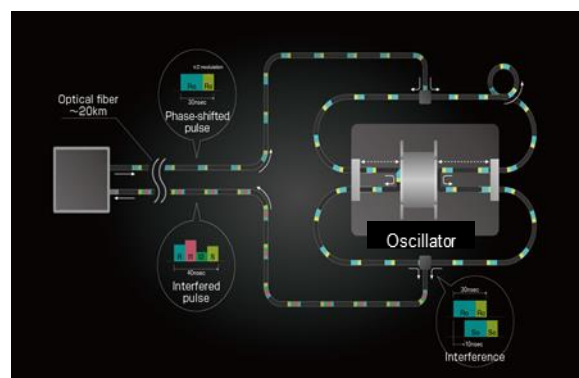


Fig.6 Diagram of the sensing system

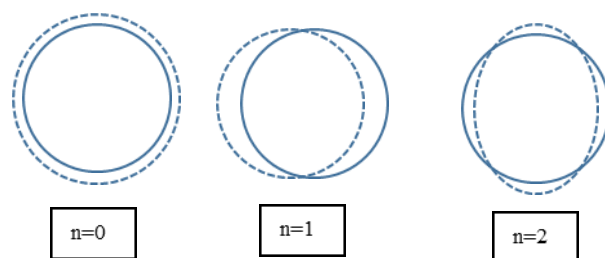


Fig.7 Vibration mode of thin-walled cylinder

4.1 質点系モデルでの固有振動数推定

水と水槽の壁が同時に振動(バルジング振動)する場合の固有振動数について検討した[11,12]。

検討は Fig. 8 に示すように、水槽を2 質点にモデル化し、水槽内に水があるときは、水の重心位置に質点を付加した3 質点でモデル化した。

詳細は以下の通り。

- 水槽のモデルは、タンク最上部にタンク壁重量の1/4、タンク壁中央にタンク壁重量の1/2を質点重量とした。
- 変形は、曲げせん断変形を考慮し、基本の曲げせん断剛性は以下の係数で算出した。

弾性係数 (ヤング率) $E=2100 (t_f/cm^2)$

せん断弾性係数 $G=810(t_f/cm^2)$

- タンクのモデル化での詳細な設定。

タンクの直径 $L : 450 \text{ c m}$

タンク高さ $h_1 : 550 \text{ c m}$

タンクの壁厚 $t : 1 \text{ c m}$

タンクの断面積 $A = \pi L t = 1413 (cm^2)$

タンク比重 γ (ステンレス) : 8

タンク重量 : $mT = A * h_1 * \gamma$

$= 3.14 * 450 * 1 * 550 * 8 = 6,217,200 (g) = 6.2172 (t)$

タンク水の重量 :

$mW = \pi L^2 / 4 * h_2 = 15.89625 * h_2 (g)$

1次固有振動数は、2 質点もしくは3 質点モデルを用いたモード解析によって算出した。Fig. 9 には、基本の曲げせん断剛性での固有振動数を示すとともに、曲げ変形およびせん断変形の影響度合いを確認するため、曲げ・せん断それぞれの変形のみでの固有振動数も並記している。

解析結果によれば、水槽単体の曲げせん断変形の1次固有振動数は、およそ80Hzであり、水槽の水位が上がるほど固有振動数は小さくなり、水深5mでは、24Hzとなった。また、水槽はせん断変形が主体的であり、水位が高くなるほどその度合いは高くなる事が分かる。

水槽は、せん断変形に加え各種変形や変形モードが混在し、複雑な変形性状を示すと考えられるため、変形の重なりの影響を、等価な曲げせん断剛性の低減で集約することとし、その剛性を低減した結果を Fig. 10 に示す。

変形の複合化を曲げせん断変形の剛性低下に集約すると剛性の低下により短振動数側に移行する。また、剛性低下した場合でも、水槽の水位が上がるほど固有振動数は小さくなることに変化はない

これらの解析結果を参考にしながら、水槽の水位を変化させた時の水槽の固有振動数の抽出を検討していく。

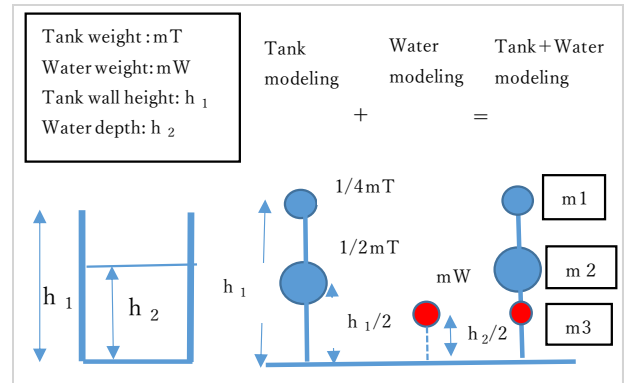


Fig.8 Concept of modeling water tank and internal water

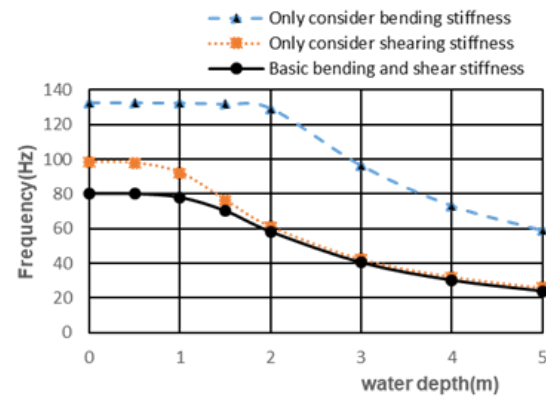


Fig.9 Predominant frequency in bending and shear deformation when water depth changes

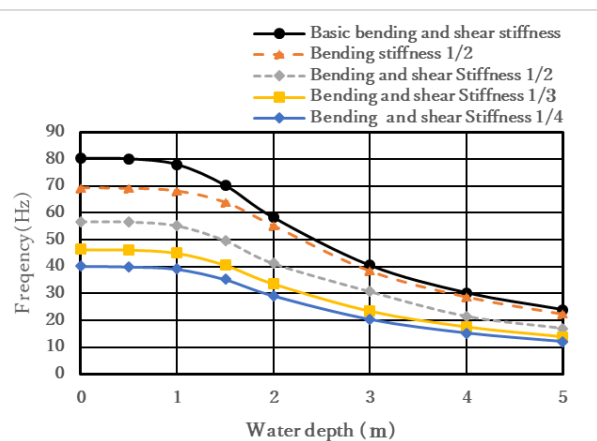


Fig.10 Predominant frequency in bending and shear deformation when water depth changes

4.2 水槽のスロッシング固有周期

水槽のスロッシングについては、各種算定式が提案されている。スロッシング計算例として直径4.5mの水槽の固有周期を以下の式で算出した。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{D}{2g\lambda_{n,1}} \coth\left(\frac{2\lambda_{n,1}H}{D}\right)}$$

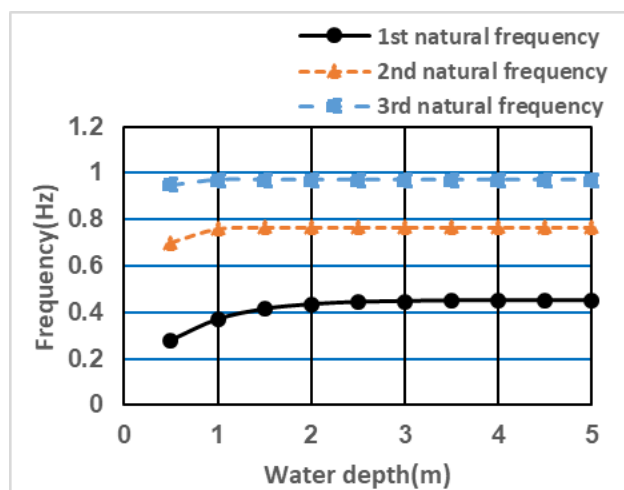


Fig.11 Sloshing frequency due to water depth fluctuation

ここで、 $\lambda_{n,1}$ の1次周期の値は1.84であり、2次周期の値5.33、3次周期の値8.54でも計算した。

Ts: 水面の固有周期

D: 水槽内径(m)

H: 水槽液位(m)

g: 重力加速度(m/s/s) 9.8m/s/s

なお、1次固有周期は $Ts=1.05\sqrt{D}$ (sec)でも略算できる。

結果をFig. 11に示すが、水位が浅くなると振動数は小さくなるが、水位が深い場合はその変化は小さい。

また、微動レベルにおいては、高次のスロッシングが主体的になると考えられる。

5. 観測記録と分析結果

2019年4月17日の10時から18日9時半までが、水槽の水位を変化させた本観測であり、水深を5mから排水しながら1mごと(2m以下は50cmごと)に常時微動記録を観測した。途中に外乱を与えるため水槽壁を打撃したり、水を投入したりしたが、今回は外乱を加えていない常時微動区間の記録について報告する。

また、17日深夜の準備段階で微小地震が観測されたので地震記録と地震直前の微動記録を比較し報告する。

5.1 4月17日2時31分の小地震記録

本試験実施前の2019年4月17日2時31分に宮城県沖を震源とするM3.8の微小地震が発生した。この時の水槽は水深5mで、深夜の振動ノイズが小さい状態で地震を観測した。

この時の上部東(N02)と基礎(N03)の水平方向の地震波形はFig. 12に示す通りであり、基礎部で0.1Gal程度の

地震記録であるが基礎並びにタンク上部とも、地震と思われる波形ははっきり見られる。

上記観測点での地震観測直前の微動区間のフーリエスペクトルと地震主要動部分のフーリエスペクトルをFig. 13に示す。Fig14は、上部東(N02)での基礎版(N03)からの伝達関数を示すが、常時微動区間と地震区間の増幅特性に大きな違いは見られない。

上記のことから、地震時の基礎から水槽上部への振動増幅特性については、常時微動記録を使つての推定が可能と考えられる。

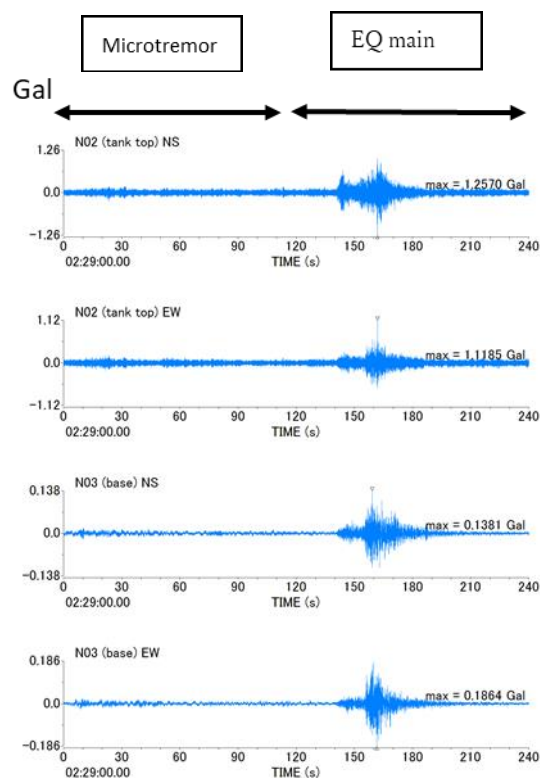


Fig.12 Earthquake waveform at 2:31 on April 17

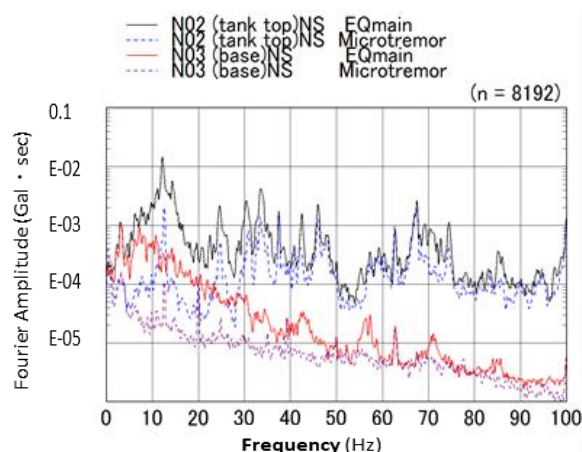


Fig.13 Fourier spectrum before and after E.Q

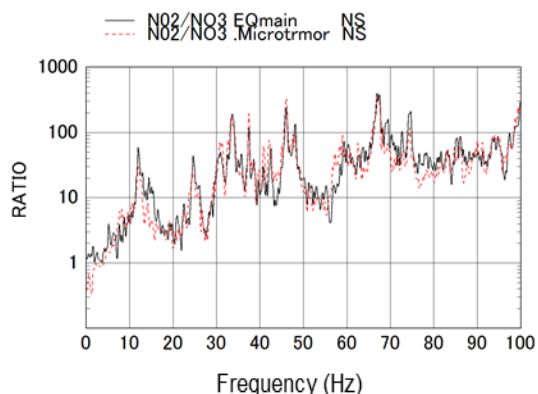


Fig.14 Comparison of transfer function from basement before and after the EQ (NO2 / NO3 NS)

5.2 水深を変化させた微動記録の分析

水槽の水位は約 7 時間かけて低下させており、この間の水槽の振動特性変化を把握するため、基礎(N03)に対する上部南 (N01)・上部東 (N02) のパワースペクトルの比のランニングスペクトルを Fig. 15 に示す。

解析では、水深により卓越する固有振動数が変化すると思われるが、観測記録では、上部南 (N01) では、15Hz、33Hz、56Hz に、上部東 (N02) では、45Hz、67Hz に観測期間で水深によらず同一のピークが見られ、水深変化による固有振動数の変化はほとんど見られない。上部南 (N01) を分子に、上部東 (N02) を分母にした比のランニングスペクトルを Fig. 16 に示す。

全観測区間において、上部南 (N01) で卓越する振動数は山に、上部東 (N02) で卓越する振動数は谷になっており、これらの周期は、タンク上部全体の卓越周期ではなく、その部分の張り出し部の局所的な卓越であると考えられる。

一方、Fig. 15 での基礎 (N03) から上部東 (N02) の増幅 NS 成分について、水深 5 m から 3 m の間で、10Hz から 35Hz の範囲において、スペクトルピークの変化が見られる。

そこで、時間と周波数領域を狭めたランニングスペクトルを Fig. 17 に、水深 5m から 3m での常時微動部区間でのフーリエスペクトルを Fig. 18 に示す。

ランニングスペクトルを見ると水深 5m で 12Hz のピークは、水深 4m で 15Hz に、水深 3m でピーク 17Hz に移行していることが分かる。また、水深 5m で 25Hz のピークは水深 4m でピーク 31Hz に変化している。フーリエスペクトルでもこれらのピークが見られ、ランニングスペクトルと合わせて見ることで、これらのピークが水深の変化に合わせて連続的に変化していることが分かる。

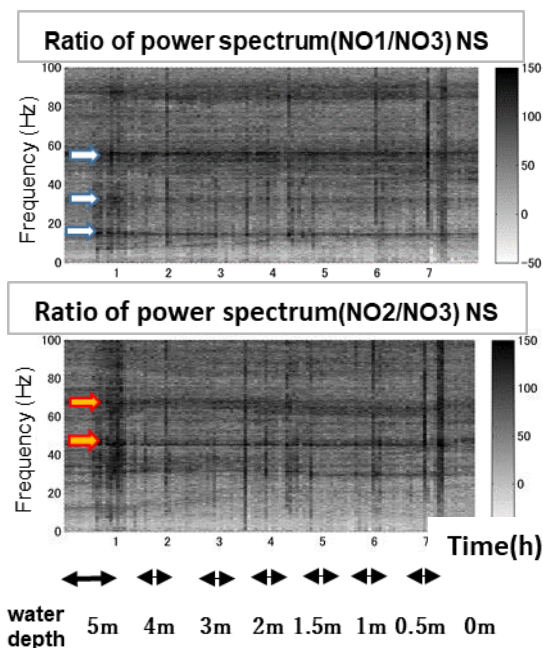


Fig.15 Running spectrum of spectrum ratio from basement

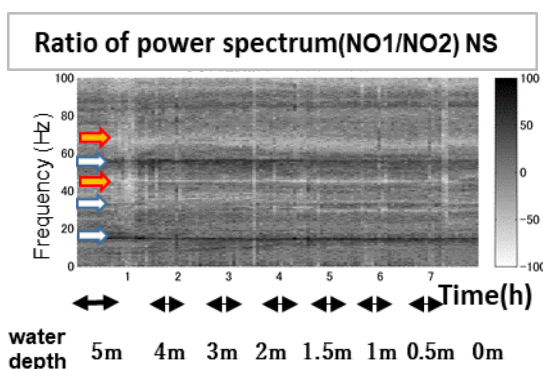


Fig.16 Running spectrum of spectrum ratio from the east upper point to the south upper part

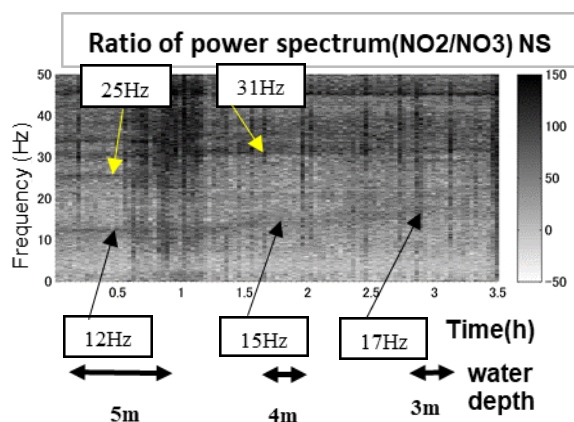


Fig.17 Running spectrum of spectrum ratio from basement (water level 5m~3m, 0~50Hz)

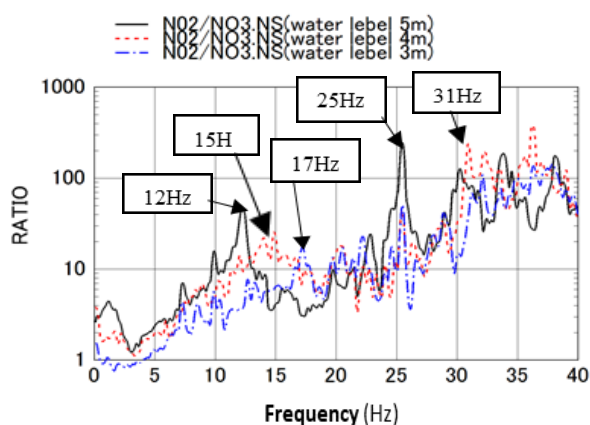


Fig.18 Amplification characteristics from basement due to water level change from 5 m to 3m (NO2/ NO3)

今回の実験では、局所的な振動の大きな場所での観測となり、水深の変化による水槽の振動特性の変化の把握が難しかったが、このような状況でもランニングスペクトルによる検討が有効であることが分かった。

今後の観測においては、観測点として局所的な振動が小さな場所を選択した上で、連続的に常時微動観測を行い、ランニングスペクトル等での振動特性の変化を把握することにより、各種情報を得ることが可能と思われる。

6. まとめと今後の展望

開発した POPI 方式の地震観測システムを使用し、日本原子力研究開発機構 NARREC に設置された試験水槽を用いて実証試験を行った。また、センサ部設置については、1 F のために試作した専用ロボットによる設置試験も行った。

薄肉円筒水槽の振動モデルによる解析では、各種の振動モードが複雑に関連し、相互相関スペクトルの解析が必要であることが判った。質点モデルによる解析により、水槽本体と内部水が一体となるバルジング振動が生じ、水槽の水深が深くなるほど固有振動数は低くなることが分かった。常時観測記録のスペクトル比のランニングスペクトルで表示することで、水槽上部のセンサ設置場所の構造により生じる局所振動や水深変化による全体振動特性の変化を把握できることが分かった。

また、観測期間中の深夜に震度 1 以下の微小地震も観測された。地震時の記録と地震前の常時微動観測記録を比較すると、基礎から上部構造への振動が増幅しつつ伝搬する様子は常時微動による観測結果と類似している。

今後は、長期化する福島第一原子力発電所の廃止処置計画の中において、原子炉建屋の状況を踏まえた上での地震計設置のための専用ロボット改良に注力する。地震計については本試験をはじめとする試観測により開発完了とし、製品として提供していくこととした。なお、ロボット開発が十分な成果が得られるまでは、被曝管理の下で作業員による地震計設置の検討を行う予定である。

謝辞

ロボットの開発では、東京工業大学名誉教授の広瀬茂男様に御指導・ご協力をいただいた。

檜葉遠隔技術開発センター (NARREC) の利用は日本原子力研究開発機構の施設共用制度を活用した。

また、本研究は、共同研究「ロボットを使用した光ファイバセンサの極限環境への実装技術の開発」の一部です。

関係者のご協力に深謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Okada, et al.:Recent progress of seismic observation networks in Japan —Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net—, *Earth Planets Space*, 56, xv–xxviii, 2004.
- [2] 機械工学辞典[JSME Mechanical Engineering Dictionary] 1997 年発行、機械力学・計測制御、編集委員会主査 渡部康一、2018 年度版は電子書籍に移行
<https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/>
- [3] M. Yoshida, Y. Hirayama, A. Takahara : ”Real-time displacement measurement system using phase-shifted optical pulse interferometry: Application to a seismic observation system” , *Japanese Journal of Applied Physics* 55, 022701 (2016)
- [4] 大江優作、平山義治、吉田稔：“光干渉法を利用した振動センサの原理検証と応用可能性”、計測自動制御学会論文集 Vol. 54, N01, (2018)
- [5] 平山義治、筒井智樹、池田敏晴：“位相シフト光パルス干渉法振動観測システムによる火山観測の試み”、月刊地球 /Vol. 40, NO. 3, (2018)
- [6] T. Tsutsui, Y. Hirayama, T. Ikeda : “Feasibility Study on a Multi-Channeled Seismometer System with Phase-Shifted Optical Interferometry for Volcanological Observations“ *Journal of Disaster Research* Vol.14 No.4, 2019
- [7] 関修：“国際廃炉研究開発機構 (IRID) における福島原子力発電所の廃炉に向けた研究開発の概要 検査・測定技術を中心に” , 2020. 5. pp. 31–36.

<https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2020/08/P2003-04.pdf> (2020/12/21)

- [8] 野田 幸矢, 広瀬 茂男, 上田 紘司, 中野 寿身, 堀米 篤史, 遠藤 玄 : ”原子力災害ロボットHELIOS Xの開発 (機構の設計と基本動作実験) ”, 機械学会論文, 2016, 82巻, 837号, 15-00494.
- [9] 西村昭彦, 山田知典 : ”高放射線下・複合環境での遠隔計技術の課題” , 極限環境センシング技術シンポジウム, 2019.02.20, 東工大蔵前会館, http://www.first.iir.titech.ac.jp/news/2018/detail_522.html (2020/12/09)
- [10] 伊藤倫太郎 : ”檜葉遠隔技術開発センターの取り組み”、令和2年度福島研究開発部門成果報告会講演資料、令和2年12月5日、富岡町文化交流センターまなびの森、P. 90-98. 発行 日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門
- [11] 稲崎一郎, 大谷龍一 : ”機械工学ハンドブック”、朝倉書店、東京、P110 ~113、10.4流体貯槽の地震応答解析 (2011)
- [12] 柴田明德 : ”最新耐震構造解析” 最新建築学シリーズ第2章 多自由度系の線形応答 森北出版 (1988)
(2020年9月16日受理、2021年1月8日採択)