

平成 24 年度

長岡技術科学大学大学院

工学研究科 修士論文

水平板を用いた消波機構における単方向波アクチュエータの境界要素法による性能解析

Analysis of directional wave actuator in active water-wave control system using horizontal plates based on boundary element method

長岡技術科学大学大学院

工学研究科機械創造工学専攻

学籍番号 09309083

著者氏名 山本龍彦

指導教員 機械系 小林泰秀准教授

平成 25 年 2 月 7 日

要旨

Abstract

7th , February , 2013

Analysis of directional wave actuator in active water-wave control system using horizontal plates based on boundary element method

No.09309083

YAMAMOTO Tatsuhiko

Department of Mechanical Engineering

Nagaoka University of Technology

Recently, a submerged plate is proposed for breakwater. Any disturbance waves can be blocked, but not perfect blocking. It has the advantage that it can reduce environmental load with the water cycle. The active water wave control technique can be applied to improve the performance of the water-wave control system using a horizontal plate because it can work optimally under various wave situation. At the moment, reflection coefficient has been confirmed in the physical model with active wave control technique with pitching. There is active noise control system with directional actuator here.

When the noise is detected at upstream duct by reference sensor microphone, cancelling sound is generated for only downstream duct by a sound source to suppress the noise detected by an error microphone located at downstream. Putting this control method, it has been proposed the research of the active wave-absorbing with two horizontal plates vibrating for vertical direction. The effect has been experimentally shown, but not analytically.

Complex amplitude of water wave is able to lead from boundary states of water wave. So, boundary element method is used as best of Numerical analysis method. Boundary element method is the method analyzed with only boundary states. At the moment, states of water wave in water tank submerged plate are analyzed by boundary element method and analyzed time response, but not frequency response.

This paper examines the effect of directional actuator for active water-wave control system in term of open-loop system based on numerical analysis by Boundary Element Method compared with experimental results.

1. Comparison between experimental and analytical results

The frequency response of experimental and analytical results are compared between two cases, non-directional actuator and directional actuator with changing the water level so that the following are shown;

The frequency response of experimental and analytical results show similar features in curve shaping between resonance frequencies in gain characteristic;

the phase lag increase as the function of the distance between actuator and sensor increase;

resonance frequencies move to high frequency side as the deeper water-level because of the water wave speed increase with water-level.

2. the effect of directional actuator to non-directional actuator in characteristic open-loop

An additional phase-lag is appeared in feedback pass transfer function, by using directional actuator.

The amount of phase-lag corresponds with twice the distance between control actuator and

the wall on the error sensor side. Although wave could be in the whole frequency range, the similar effect additional phase-lag is achieved by directional around the configured frequency with delay.

目次

第1章 緒言	5
第2章 実験装置	7
2.1 実験装置の構成	7
2.2 周波数応答実験	13
第3章 単方向波アクチュエータが開ループ系に与える効果 (実験)	15
3.1 双方向波と単方向波の比較	15
3.2 パラメータ変更による単方向波アクチュエータの効果	17
第4章 解析モデル	21
第5章 境界要素法による数値解析	24
第6章 単方向波アクチュエータが開ループに与える効果 (解析)	26
6.1 周波数応答における実験結果との比較	26
6.2 パラメータ変更による単方向波アクチュエータの効果	33
6.3 フィードバックパス伝達関数に与える効果	36
6.3.1 単方向波アクチュエータの位置による変化	38
6.3.2 底面からの水平板の高さによる効果	40
第7章 結言	43
参考文献	44
付録A 境界要素法による周波数応答解析のプログラムソース	46

第1章 緒言

波の制御には、造波と消波がある。造波とは、造波機構を用いて任意の波を大きくすることや新たに生成することである。消波とは、消波機構を用いて任意の波を他のエネルギーに変換させることや新たに生成した波で消すことである。

造波機構は、船舶模型の実験水槽、アミューズメント分野など多岐で使用される。文献 [1] では防波堤などの海洋構造物に与える現象を解明する場合に、文献 [2] では船舶や海洋構造物の耐波性能を考慮した構造設計を行う場合に、造波機構が使用されている。これらの造波機構には、主に、ピストンタイプ、フラップタイプと呼ばれる壁面に設置された垂直板が水平方向に駆動する方法が用いられている。他にも、三角柱の斜辺部分を用いて波を発生させるプランジャータイプと呼ばれる造波機構がある。これを水槽の壁面に複数個設置し、水面に任意の文字やマークを造波する技術がアミューズメント施設に用いられている [3]。しかし、実験水槽やアミューズメント施設などで用いられている造波機構には、水平板タイプを用いた機構は使用されていない。造波機構として水平板を用いれば、造波機構を壁面から離れた位置に設置することができ、機構の自由度が向上すると考えられる。

消波機構は、港湾において防波堤として使用されている。防波堤は外洋からの波を抑制するために設置し、堤防のような構造物を海中に設置するタイプ、水平板を海中に設置するタイプ（潜堤と呼ばれる）がある。前者は外洋からの波を堤防で完全に遮ることができる。しかし、防波堤設置による景観上の問題や水の循環を遮ることで環境汚染を発生させる問題がある。後者の水平板タイプは、外洋からの波を完全に遮ることができず、一部の波を透過させる欠点がある。しかし、景観上の問題や水の循環を遮ることはなく、環境負荷を軽減できる利点を持つ。この利点を活かしつつ、水平板の消波性能を改善する方法として、波が多様に变化する状況に応じて水平板が最適な動作を行う消波機構の導入が考えられる。これまでに、水平板がピッチング運動する能動消波機構の物理モデルに対して、水平板に入射する波の反射率（外乱の抑制率）が導出されており、水平板を静止させた場合に比べて反射率が向上することが理論的に示されている [4]。ここでは、水平方向に無限長の水槽を考え、角度を変更できる水平板が水中にあると仮定し、単一周波数における入射波と反射波から波の反射率を計算している。しかし、制御系を構成する方法や実験による検証は行われていない。また、水平板をアクチュエータとして用いる際にピッチング運動に限定する必要はなく、水平板を鉛直方向に振動させることも考えられる。

ここで、水平板が設置される港湾について考える。港湾では入口を狭くすると、港湾内で共振による波が発生しやすくなることが報告されている [5]。これにより、船の積み荷を移動させる際に危険度が増加することや船同士の接触が考えられる。文献 [6] では、ローマに実在するヨットハーバーに対して数値解析を行い、発生する共振の種類と共振周波数を明らかにしている。また、港湾の入口の位置を変更することで共振の受動的な抑制も考えている。しかし、能動的な抑制を行う消波機構の導入は提案されておらず、導入することで性能向上が期待できる。

従来研究として、鉛直方向に振動する水平板を用いた能動消波機構の研究が行われている。文献 [7] では、この基本性能が実験的に示されている。また、性能改善を行うために、制御用ア

クチュエータで生成された上流方向に直接伝播する波が外乱を測定する水位センサ（リファレンスセンサ）で検出される feedback contamination と呼ばれる問題を解決することを挙げている．この問題に対して，文献 [8] では水平板を一つ追加して，水平板二枚を用いて下流方向にのみ波を発生させる方法（単方向波アクチュエータ）を用いている．この方法は，ダクト能動騒音制御の分野で既に知られており，アクチュエータ二つをある距離だけ離して設置し，その距離と音速から求めたむだ時間を用いて単方向波アクチュエータを構成する．またこの効果として，開ループ系において制御用アクチュエータからリファレンスセンサまでの伝達関数（フィードバック伝達関数）の位相遅れが増加すること，閉ループ系において補償器のゲインを低くできることが知られている [9]．ダクト能動騒音制御と能動消波機構は，むだ時間の設定方法が異なる．前者は音速が周波数に依存しないため，全周波数帯域で単方向波を生成できる．後者は波の速度が周波数に依存するため，単方向波アクチュエータとして機能させたい周波数を一つ選び，その時の波の速度とアクチュエータ間距離に対応するむだ時間を一つ設定する．その結果，その周波数付近で単方向波を生成できる．ここでは，三次共振周波数を選び，開ループ系に与える効果と消波性能を実験的に示している．港湾の共振現象に対して，この制御システムを導入することを考える．制御システムの設計には，港湾の周波数応答を求める必要がある．これを実際に測定することは，港湾内の共振を引き起こすことから現実的ではない．そのため，解析的に求める必要がある．

制御対象の周波数応答を解析的に求めている研究として，文献 [4] がある．ここでは理論的に波の反射率を解析で求めている．しかし波の反射が考慮されておらず，考慮した場合への拡張は容易ではない．そのため，解析手法について考える．解析手法として，主に，有限要素法と境界要素法が挙げられる．有限要素法では，解析する領域を三角形要素に分割し，領域全体の解析を行う．文献 [10] では二次元で非線形の非定常波の解析に，文献 [11] では三次元タンクのスロッピング波の解析に有限要素法が使用されている．そして，三次元の複雑な構造物における流体の解析に多く使用されている．境界要素法では，解析する領域の境界を線要素に分割し，境界の解析を行う．文献 [12] では，二次元水槽を用いて水中の障害物における反射率を解析で求めている．そして，境界の状態のみを得たい時に境界要素法が使用され，有限要素法よりも解析時間が短い．本論文では，長方形の水槽に振動する水平板を設置し，水面の状態を解析で求めることを考える．有限要素法と境界要素法のどちらを用いても解析は可能であるが，本論文では，解析時間を短くするために境界要素法を用いる．

以上より本論文では，境界要素法によって単方向波アクチュエータを用いた場合の周波数応答を解析的に求め，これまで実験的に示されている開ループ系に与える効果を解析的に検証することを目的とする．

第2章 実験装置

2.1 実験装置の構成

実験装置の概要を Fig.2.1 ~ 2.3 に、実験装置の構成を Table2.1 に示す。水槽は長さ 1480mm×幅 300mm、高さ 440mm のアクリル製を用いる。アクチュエータの位置調節を容易にするために水槽をアルミフレームで囲んでいる。リニアモータの先に 273mm×100mm、厚さ 3mm、のアクリル板を取り付け、アクチュエータとし、鉛直方向に振動させる。また、Fig.2.1 の左側を上流、右側を下流と呼ぶ。

Fig.2.1 のようにアクチュエータを三つ配置し、Fig.2.1 の左側から外乱用アクチュエータ、制御用アクチュエータ 2、制御用アクチュエータ 1 とする。なお、アクチュエータの振幅を変化させる時は、アクチュエータを駆動させているステップモータへの入力パルス数を変化させる。アクチュエータの振幅は 1 パルスあたり 0.01mm 変化する (0.01mm/パルス)。ただし、アクチュエータが振動する時に平衡位置が変化する可能性がある。そのため、直流分をカットするためにアクチュエータ駆動信号に対して、カットオフ周波数 0.3Hz のハイパスフィルタを適用した。ここで、アクチュエータの駆動周波数がカットオフ周波数に近い場合、1 パルスあたりの振幅が 0.01mm より若干小さくなる。

水位を測定するためにリファレンスセンサ、エラーセンサを設置する。前者は市販品、後者は自作した容量式センサを用いている。リファレンスセンサの概要を Fig.2.4 に、エラーセンサの概要を Fig.2.5 に示す。水槽の水位は Fig.2.2 に示すように $h=181\text{mm}$ とし、底面からのアクリル板の高さを $h_1=145\text{mm}$ とする。 $\frac{h_1}{h}$ は波の透過・反射に影響を与える比率である [13]。本論文では、比率を次の 1~3 の理由により決定する。

1. 波を起こしやすくするため $\frac{h_1}{h}$ の比率を高くする。
2. 波の波長、水位等のパラメータを変化させて波の反射・透過率の変化を調べた研究結果によると、 $\frac{h_1}{h}=0.875$ 以上で波の反射率が急激に上昇する条件となる。
3. アクチュエータでの波の反射率が大きくなると、本論文で考慮する解析モデルと異なる。

以上より、本論文では $\frac{h_1}{h} = \frac{145}{181} = 0.8$ とする。

本実験装置は、港湾内における波の共振現象をフィードバック制御によって抑制することを念頭に置き構成されている。ここで、水槽の左端は一部が外海に開かれた港の口であり、外海から入射する波を外乱用アクチュエータで模擬する。右端の壁は岸壁であり、ここに停泊する船舶などに影響を与えないように港の入口付近に設置された制御用アクチュエータ 1 と 2 が動作し、港湾内の共振を抑制する。本論文では簡単のため、港の口は完全に閉じられているとする。

制御用アクチュエータ1と2の駆動方法として次の二つの場合を考える：

Case A 双方向波アクチュエータ: $v(t)=0$ として、制御用アクチュエータ1のみ駆動する．

Case B 単方向波アクチュエータ:制御用アクチュエータ1から上流側へ直接伝播する進行波を制御用アクチュエータ2が打ち消すように駆動する．

$$v(t) = -u(t - \tau), \quad \tau = \frac{L_d}{C_p(\omega)} \quad (2.1)$$

ただし、 τ は単方向波アクチュエータにおけるむだ時間、 $C_p(\omega)$ は角周波数 ω における波の伝播速度、 L_d は制御用アクチュエータ1、2間の距離である．波の伝播速度は、Eq.2.2の分散関係式[14]を満足するように数値的に与えられる．

$$C_p(\omega) = \frac{g}{\omega} \tanh\left(\frac{\omega h}{C_p(\omega)}\right) \quad (2.2)$$

ここで、 $g=9.8\text{m/s}^2$ (重力加速度)、 $h=181\text{mm}$ (水槽の水位)である．上流へ直接伝播される進行波を完全に相殺するために、むだ時間 τ を設定する必要がある．むだ時間の設定で必要になる波の伝播速度について考えると、音波の場合では音速が一定のため、全周波数帯域で単方向波を生成できる．しかし波の場合では、波の伝播速度がEq.2.2より周波数に依存するため、特定の周波数 $f_p(\omega_p)$ に対して単方向波を生成できる．本論文では、三次共振周波数において単方向波を生成することを考え、 $\tau=L_p/C_p(\omega)=0.356\text{s}$ とする．これより三次共振周波数において、制御用アクチュエータ1からリファレンスセンサまでの位相を遅らせることで、制御性能を改善させることを意図している．

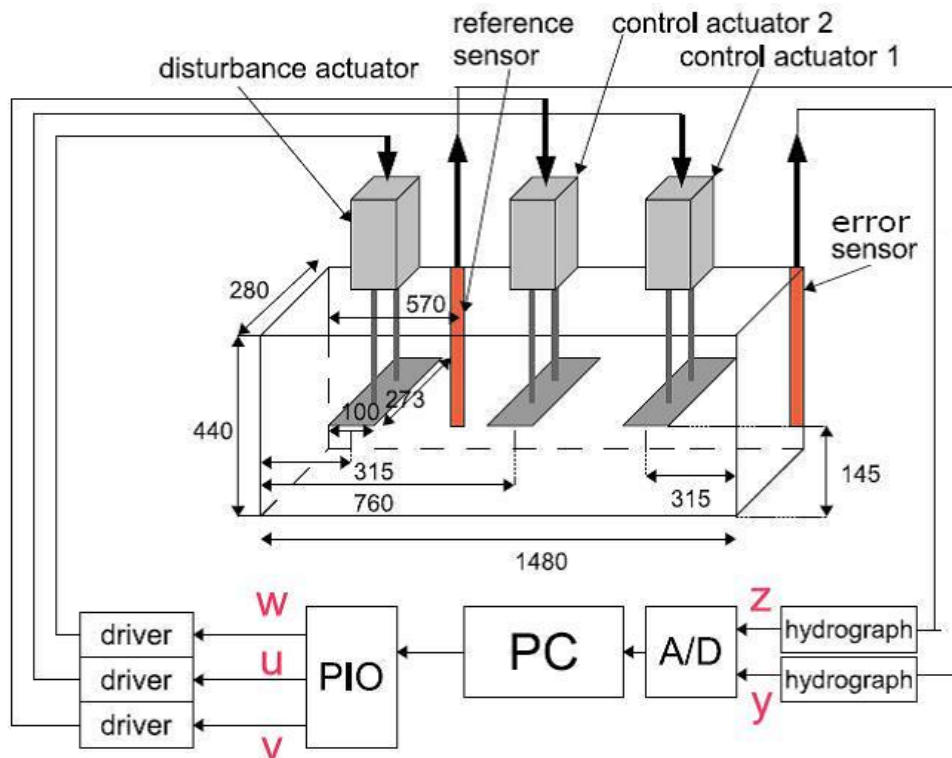


Fig. 2.1: Experimental apparatus

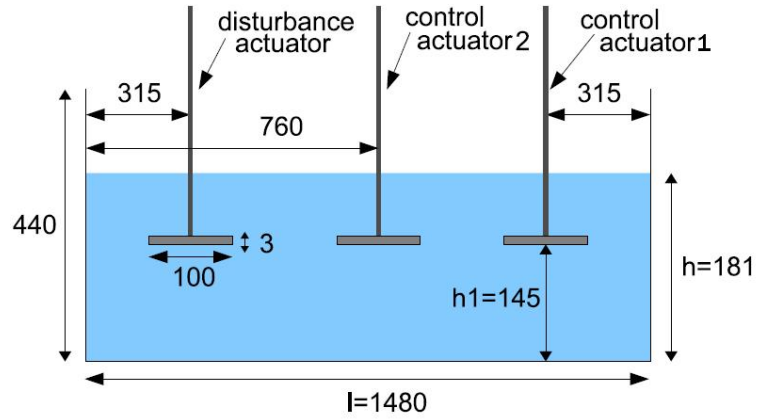


Fig. 2.2: Front figure of experimental apparatus

Table 2.1: Experimental equipments

PC	Dell Dimension 2400 / RTLinux(2.4.22-rt13.2-pre3) Fedora Core1
A/D	Interface PCI-3174 12bit $1\mu\text{s}/\text{ch}$
PIO	Contec PIO-32/32T(PCI) 32bit 200ns
Linear motor	Oriental motor EZC4D005M-A Thrust70N Speed(max)600mm/s
Reference sensor	DENSHI KOGYO CO., LTD CW3-T03 Measurement Range $0 \sim \pm 150\text{mm}$ overall accuracy $\pm 0.5\%/FS$

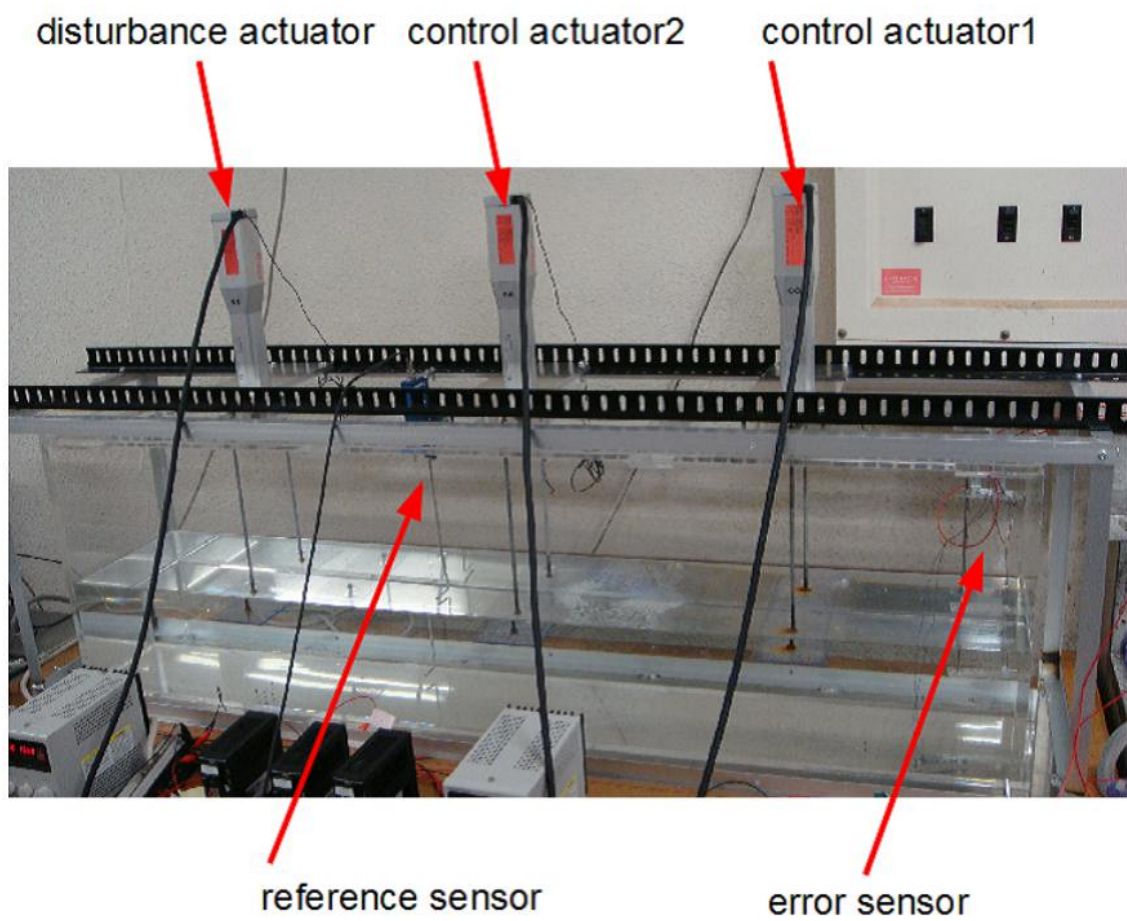


Fig. 2.3: Photograph of experimental apparatus



Fig. 2.4: Photograph of reference sensor

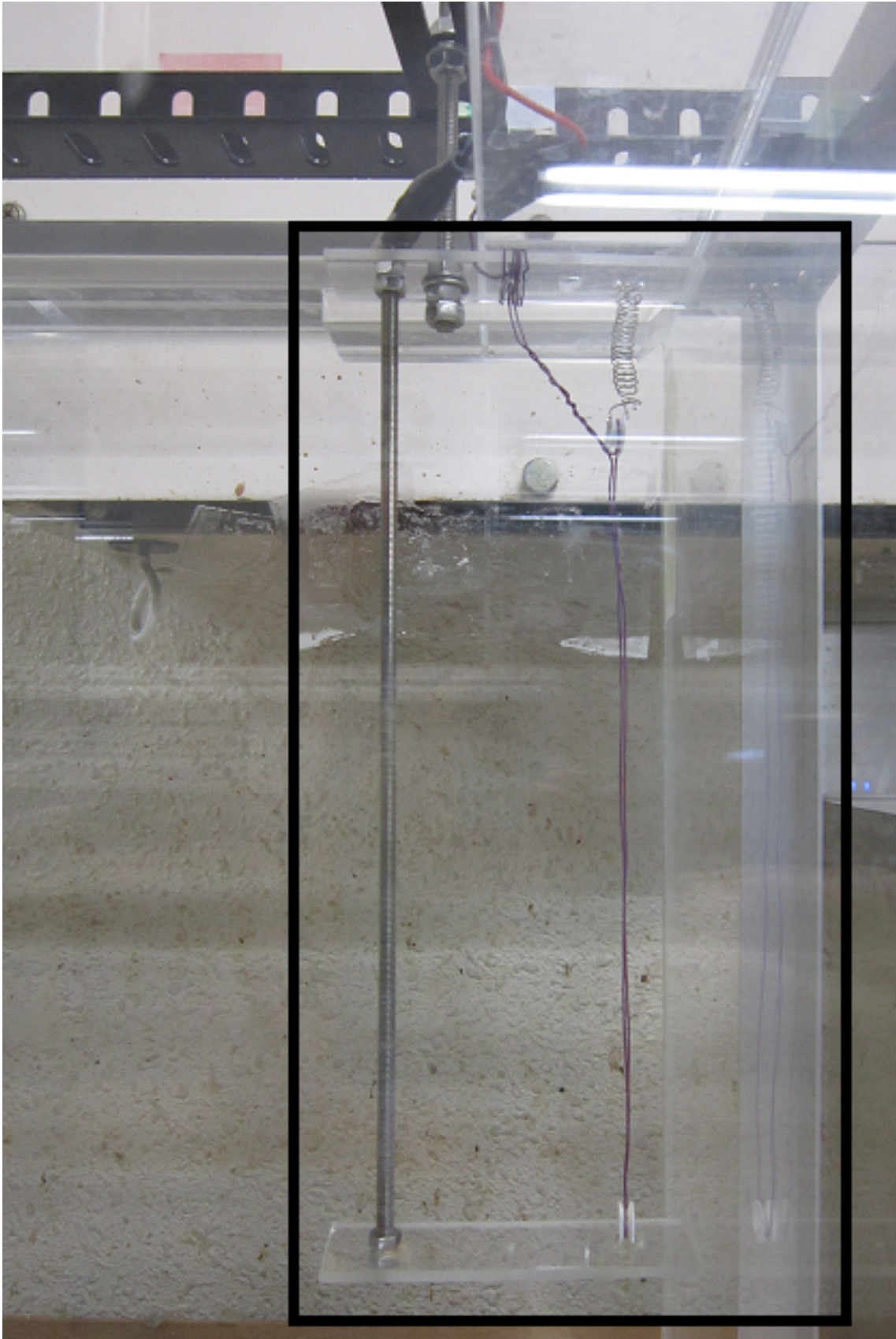


Fig. 2.5: Photograph of error sensor

2.2 周波数応答実験

ここでは、周波数応答を実験で求める手順を説明する。Fig.2.1 に示した外乱アクチュエータの駆動信号 w 、制御アクチュエータ 1, 2 の駆動信号 u, v からエラーセンサの出力 z 、リファレンスセンサの出力 y までのそれぞれの場合における周波数応答を求める。また、制御アクチュエータ 1 と 2 は双方向波アクチュエータ (Case A)、単方向波アクチュエータ (Case B) の二つの条件で駆動する。外乱用アクチュエータの駆動信号 w からエラーセンサの出力 z までの伝達関数を G_{zw} とする。それぞれのアクチュエータを低周波数で駆動させる場合、波が定常状態に落ち着くまでに多少時間を要する。そのため、本実験では低周波数の待ち時間に合わせて、全ての周波数において待ち時間を一律 50s と設定する。周波数応答を求める手順は次の通りである。

1. 周波数 $f=0.5\text{Hz}$ で外乱アクチュエータを 50s 駆動する。外乱アクチュエータの振幅は 10mm に固定し、駆動信号は 1000 パルス入力とする。
2. 実験開始と同時に、サンプリング周期を 1ms として波の振幅 V と位相 deg をエラーセンサ z とリファレンスセンサ y で測定する。波が定常状態に落ち着く 50s 以降のデータ 10s 間を切り取って、その周波数における波の振幅 V と位相 deg を記録する。
3. 周波数 f を増加させる。

1~3 を繰り返す、周波数 f が 5.0Hz に達した時 G_{zw} と G_{yw} の実験は終了となる。これらの手順を G_{zu} と G_{yu} に対して同様に行う。得られた四つの周波数応答関数は、波の振幅 V とアクチュエータへの駆動信号パルスから計算しているために、波の振幅の単位: $V \rightarrow \text{mm}$ とアクチュエータの振幅: $\text{パルス} \rightarrow \text{mm}$ として補正する必要がある。アクチュエータは $0.01[\text{mm}/\text{パルス}]$ である。リファレンスセンサとエラーセンサは、Fig.2.6, 2.7 から使用している水位範囲に限定した近似線の傾きをそれぞれ求め、 $72.443\text{mm}/V$ 、 $121.18\text{mm}/V$ とする。ここで、Fig.2.6 はリファレンスセンサを $-150 \sim 150\text{mm}$ の範囲で、Fig.2.7 はエラーセンサを $0 \sim 175\text{mm}$ の範囲で、それぞれ 25mm ごとに水位を変化させた時の電圧をプロットした図である。

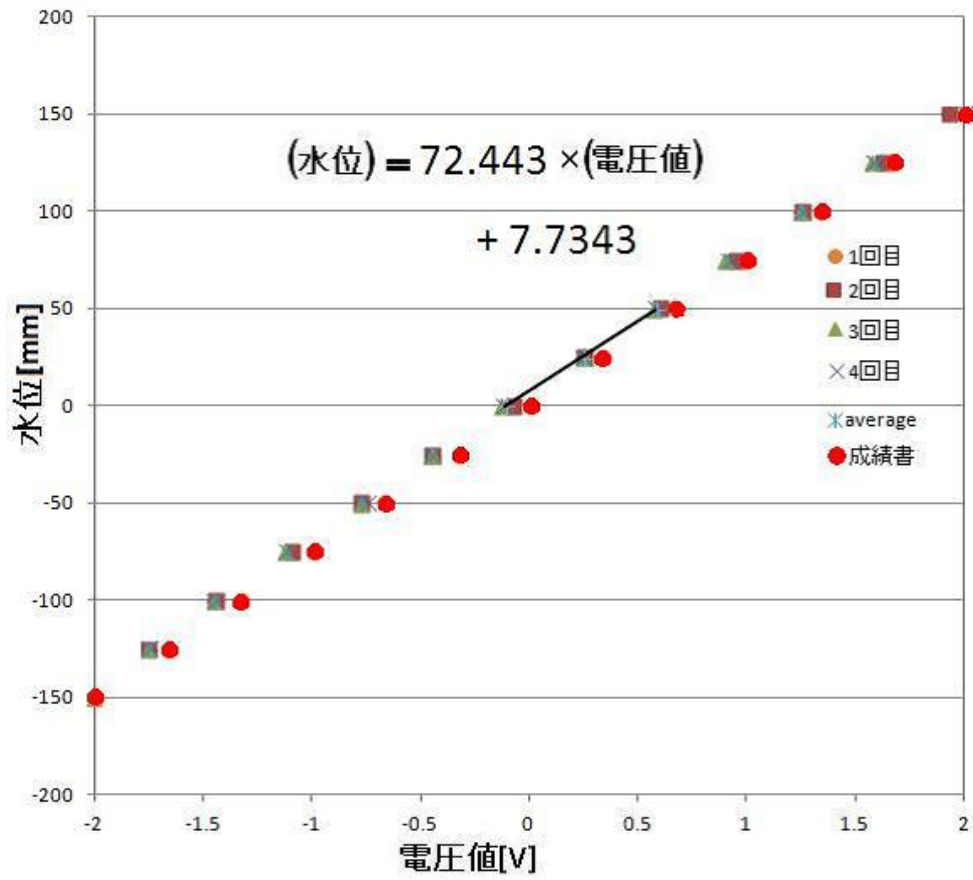


Fig. 2.6: Water level conversion(reference sensor)

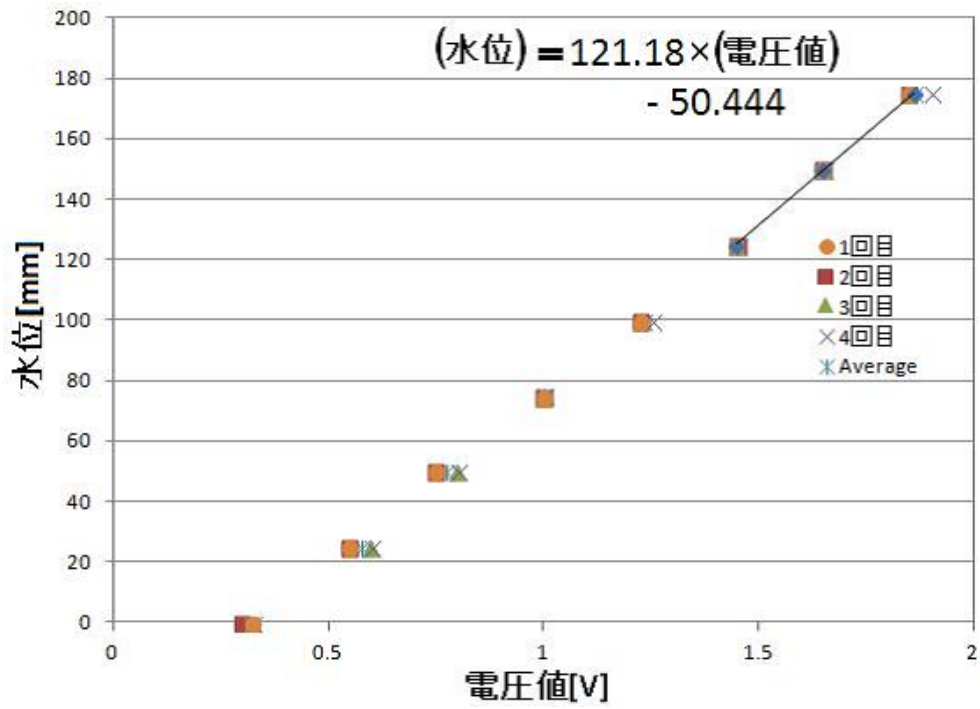


Fig. 2.7: Water level conversion(error sensor)

第3章 単方向波アクチュエータが開ループ系に与える効果(実験)

3.1 双方向波と単方向波の比較

実験による周波数応答結果 [8] を Fig.3.1 ~ 3.4 に示す. 双方向波アクチュエータ (Case A) が青線, 単方向波アクチュエータ (Case B) が赤線, 水色の縦点線が左から二次 ($f_2=0.811\text{Hz}$) と三次 ($f_3=1.12\text{Hz}$) 共振周波数である.

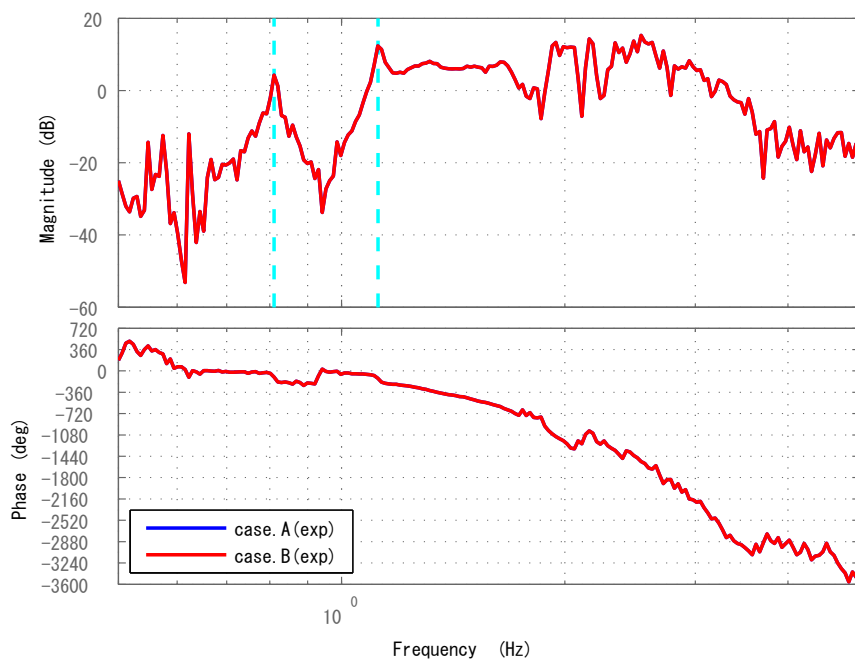


Fig. 3.1: Frequency response of experimental result: G_{zw} [8]

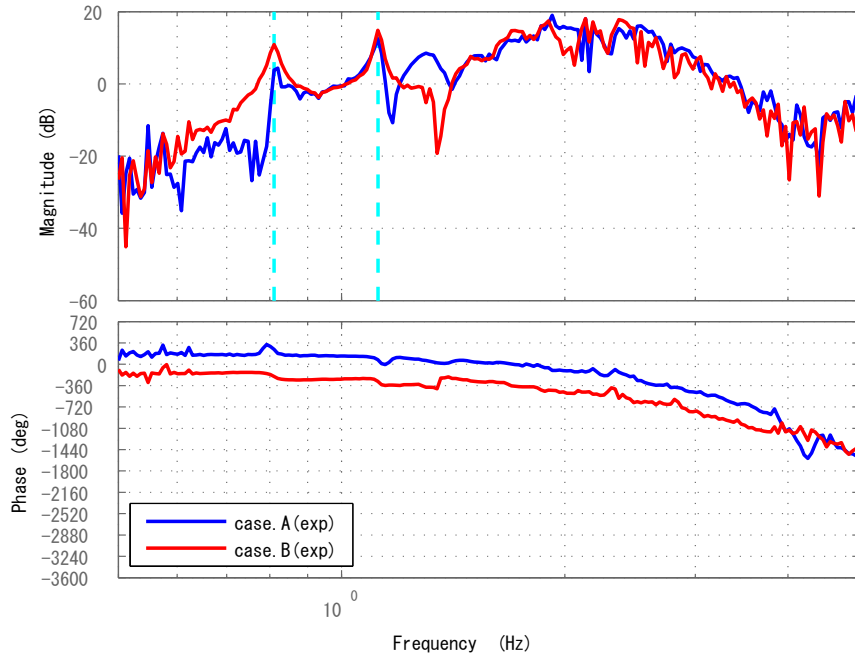


Fig. 3.2: Frequency response of experimental result: G_{zu} [8]

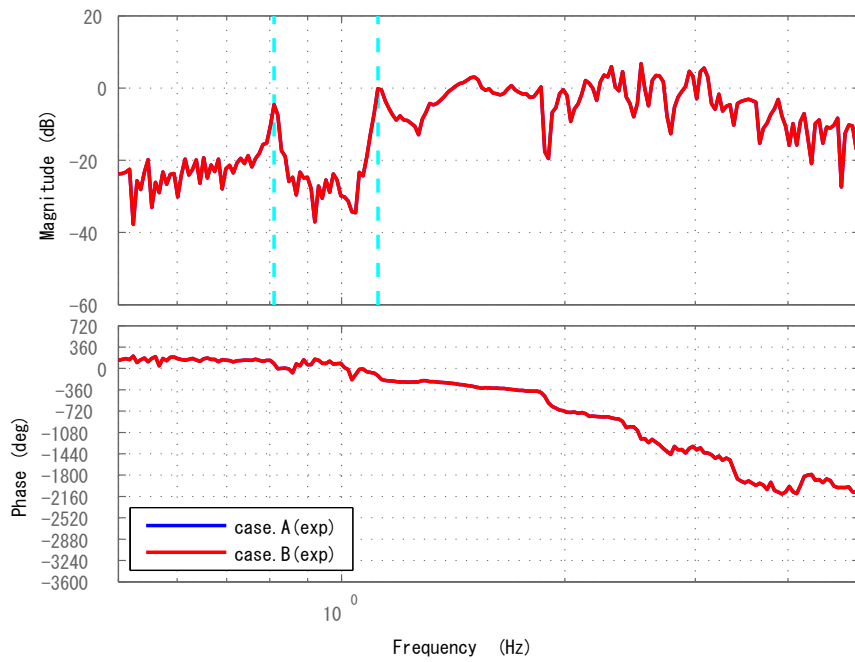


Fig. 3.3: Frequency response of experimental result: G_{yw} [8]

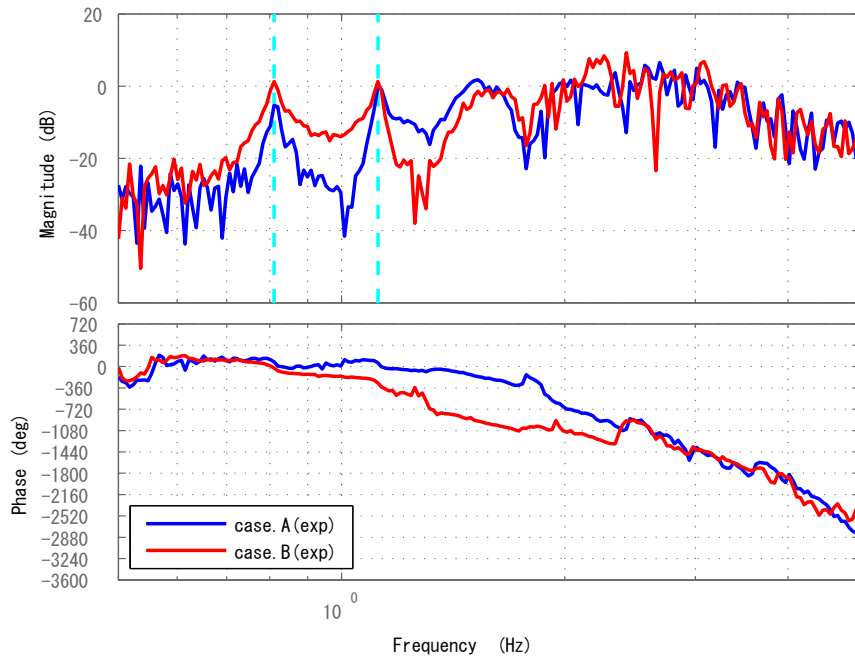


Fig. 3.4: Frequency response of experimental result: G_{yu} [8]

Fig.3.1 と 3.3 は Case A と B で同じ実験を行っているため、重なった結果となっている。Fig.3.1 と 3.3 で、Case A に注目する。外乱アクチュエータからリファレンスセンサ、エラーセンサまでの距離を比較し、距離の長いエラーセンサの方が、リファレンスセンサよりも伝達関数の位相遅れが増加することがわかる。同様に、制御用アクチュエータ1からリファレンスセンサ、エラーセンサまでの距離を比較し、距離の長いリファレンスセンサの方が、エラーセンサよりも伝達関数の位相遅れが増加することがわかる。これより、それぞれのアクチュエータからセンサまでの距離が増加することで、位相遅れも増加することを確認した。

Fig.3.2 と 3.4 より、各周波数応答において Case A と B を比較する。これより Fig.3.2 と 3.4 において、それぞれ二次と三次共振周波数が一致している。また Fig.3.4 の Case A と B より、むだ時間を設定した三次周波数付近で Case B の位相が Case A よりも遅れていることが確認できる。

3.2 パラメータ変更による単方向波アクチュエータの効果

同じ実験水槽を用い、水深：(変更前)181mm→(変更後)323mm とリファレンスセンサの位置：(変更前)570mm→(変更後)643mm を変更した。

文献 [8] の周波数応答結果では、二次と三次共振周波数以外の共振のピークは確認できなかった。そのため、水深を変更することで、この問題の解決を図った。文献 [7] では一次～四次共振周波数まで確認することができる。そこで、文献 [7] の実験装置における三つの比率(水槽の全長、水平板の長さ、水深)を今回の実験装置 (Fig.2.1) に適用した。リファレンスセンサの位置を変更した理由は、四次共振周波数の節を避けるためである。共振周波数の節では共振時に水位の変動が小さいため、正確な測定を行うことができない可能性がある。そのため、この節を

避けてリファレンスセンサを設置する必要がある．共振周波数の節はその共振モードから求められ， n 次共振周波数の節は， $\frac{2L}{n} \times \frac{2k-1}{4}$ ($k=1,2,\dots,n$) で与えられる．今回は四次の共振モードを考えているので， n に4を代入し，節の位置は，185mm，555mm，925mm，1295mmとなる．ここで555mmがリファレンスセンサ設置：570mm(Fig.2.1 参照)に非常に近い．そのため節の位置から離れた場所で，なおかつ制御用アクチュエータ2の位置を考慮して，643mmとした．

ここで水深 h が変化したことにより，波の速度 $C_p(\omega)$ も変化する．Eq.2.2 を用い， $\tau = 0.3276\text{s}$ とした．

この結果を Fig.3.5 ~ 3.8 に示す．ここで，Case A が青線，Case B が赤線，水色の縦点線が左から一次 (0.555Hz)，二次 (0.953Hz)，三次 (1.23Hz)，四次 (1.39Hz)，五次 (1.56Hz) 共振周波数である．

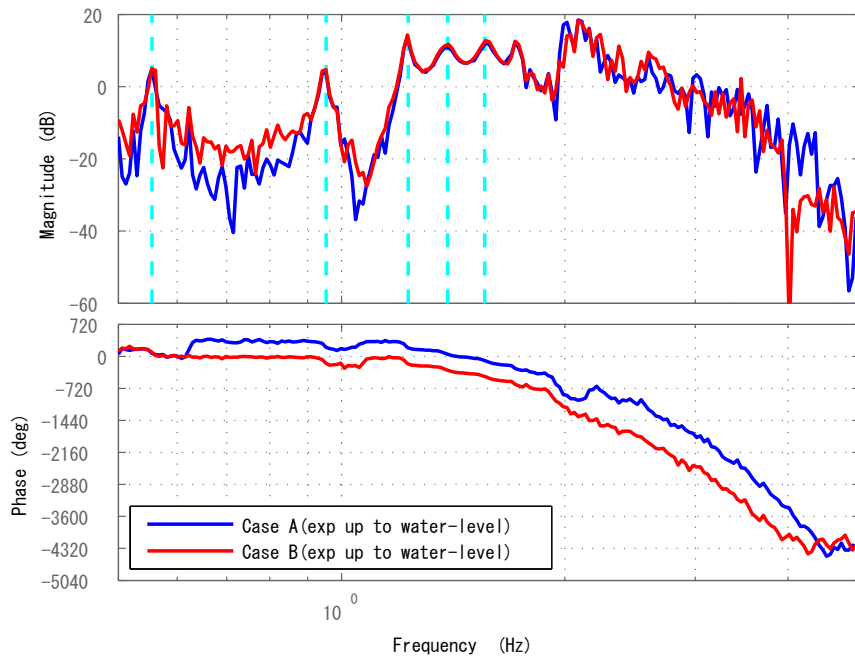


Fig. 3.5: Frequency response of experimental result: $G_{zw}(h=0.323\text{m})$

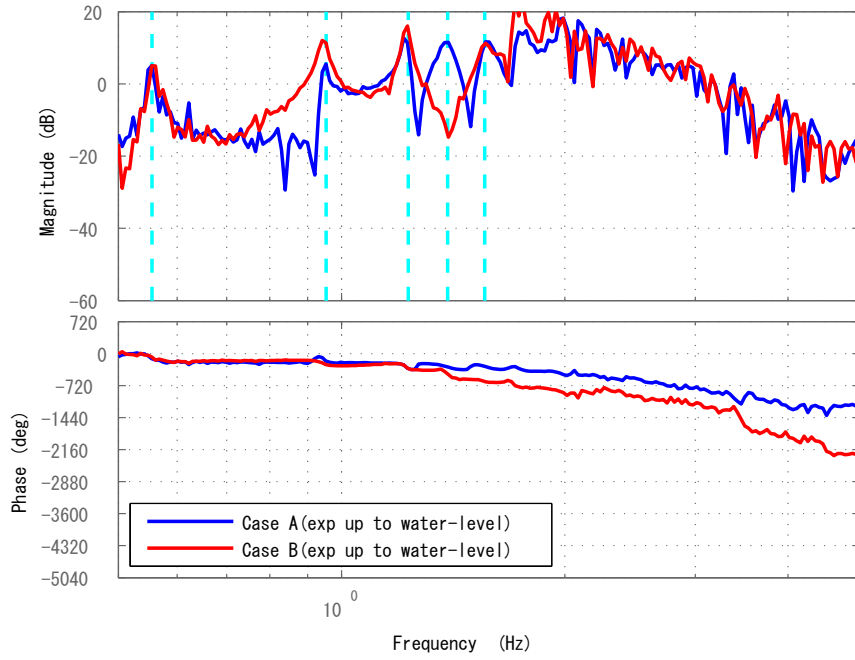


Fig. 3.6: Frequency response of experimental result: $G_{zu}(h=0.323\text{m})$

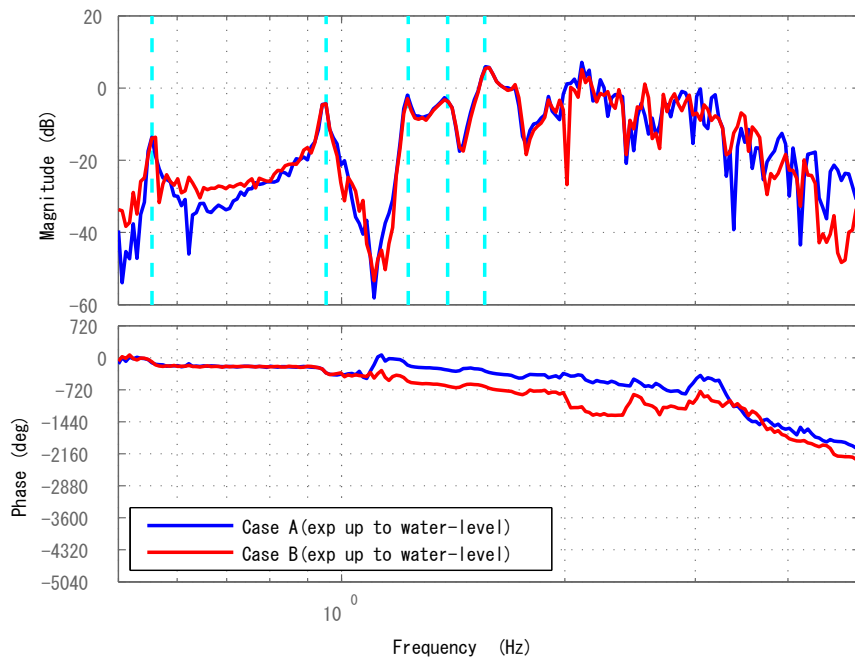


Fig. 3.7: Frequency response of experimental result: $G_{yw}(h=0.323\text{m})$

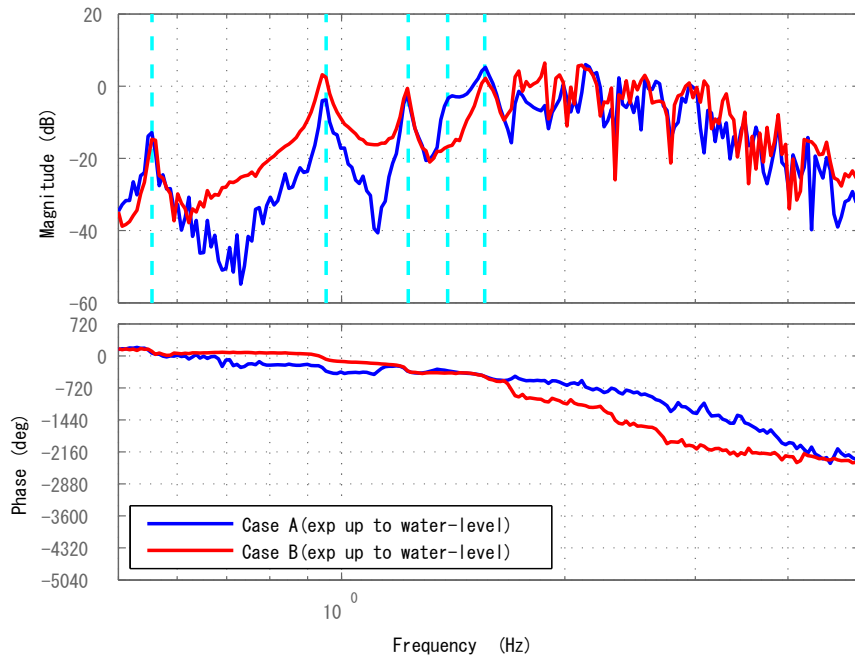


Fig. 3.8: Frequency response of experimental result: $G_{yu}(h=0.323\text{m})$

Fig.3.1～3.4のCase Aでは二次と三次共振の波しか測定できなかったが、Fig.3.5～3.8のCase Aでは一次～五次共振の波を測定することができた。Case Bについても二次と三次共振の波しか測定できなかったが、一次から三次、五次共振の波を測定することができた。

Fig.3.6と3.8のCase Bについて、リファレンスセンサの位置が四次共振の節にあたることを考慮してこの節を避けたが、ゲイン線図では低いゲインとなってしまった。後に示す同条件での解析結果 (Fig.6.12と6.14) では四次共振を確認することができる。そのため、この原因はわかっていない。

Fig.3.8より、Case AとCase Bの位相を比較すると、Case Bの傾きがCase Aよりも大きい。そのため、Case Bの方がCase Aよりも位相が遅れているといえる。

水深を深くした場合、Eq.2.2の h が増加する。これにより波の速度 C_p も増加する。共振周波数 f_p は、 $f_p = \frac{C_p}{\lambda}$ で計算される。この時、 λ は共振時の波長であり、同じ共振モードでは水深の変化によらず同値である。そのため、 C_p の増加によって f_p も増加する。これより水深を深くした場合、共振周波数は高周波側に移動することが考えられる。水深 $h=181\text{mm}$ の場合 (Fig.3.1～3.4)と水深 $h=323\text{mm}$ の場合 (Fig.3.5～3.8)をそれぞれ比較すると、同じ共振モードにおいて、 $h=323\text{mm}$ の共振周波数は $h=181\text{mm}$ の共振周波数よりも高周波側にあることが確認できる。

第4章 解析モデル

Fig.2.1の実験装置から解析モデルを考える．水槽の波の挙動は奥行き方向に一様であると仮定し，奥行き方向の自由度を無視した二次元の水槽における波の挙動を考える．この解析モデルを Fig.4.1 に示す．

水槽の水平方向右向きに x 軸，鉛直方向上向きに z 軸をとり，水槽の左端，水面上に原点をとる． $x=0, L$ の位置に垂直の壁が設置されているとする．水槽は $z = -H$ の位置に平らな底面を持つとする． x 方向の長さ L_p, z 方向の高さ H_p の水平板が三枚，水中に設置されているとし，リニアモータと水平板をつないでいる棒の影響は無視できるとして考慮しない．ただし，水平板の左下端の z 座標が $z = z_p, x$ 座標がそれぞれ $x = x_{p1}, x_{p2}, x_{p3}$ で与えられるとする．また，左側の水平板は鉛直方向に振幅 A ，角周波数 ω の正弦波振動を行うものとし，真ん中と右側の水平板は静止しているとする．

流体運動を非粘性・非圧縮・渦なしと仮定すると，速度ポテンシャル $\Phi(x, z, t)$ が存在し，任意の時刻 t において Eq.4.1 が成り立つ．

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.1)$$

波の波高は十分小さく表面張力が無視できるとすると，自由表面において Eq.4.2 が成り立つ．

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (z = 0) \quad (4.2)$$

ただし， α はエネルギー散逸を考慮するための正の値である．従来研究では $\alpha = 0$ と仮定していたが，仮定した後に数値解析を行うと， $\phi(x, z)$ とその法線方向の傾きが純虚数の範囲で求まる．その結果，周波数応答関数 $G(j\omega)$ の位相が 0 が 180deg の二値のみとなり，実験結果に見られる位相の連続的な変化を考察することができない．また，エネルギー散逸を考慮しない

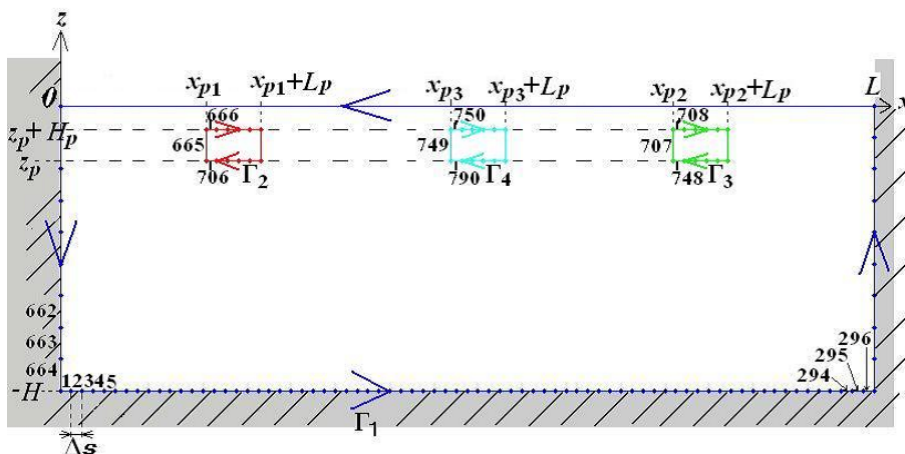


Fig. 4.1: Numerical model for boundary element method

場合，共振周波数におけるピークゲインが過大になる． α を正数とおくことにより，実験結果に近い位相特性を得ることができる．また，共振周波数におけるピークゲインも低くなる．

水槽の底面および壁面では，Eq.4.3 が成り立つ．

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 (z = -H), \quad \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 (x = 0, L) \quad (4.3)$$

真ん中と右側の水平板は静止しているため，その周囲における法線方向速度は0となる．よって，Eq.4.4，4.5 が成り立つ．

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 (x \in [x_{p2}, x_{p2} + L_p], z = z_p, z_p + H_p), \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 (z \in [z_p, z_p + H_p], x = x_{p2}, x_{p2} + L_p)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 (x \in [x_{p3}, x_{p3} + L_p], z = z_p, z_p + H_p), \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 (z \in [z_p, z_p + H_p], x = x_{p3}, x_{p3} + L_p)$$

一方，左側の水平板は前述したように z 方向に振動しており，その z 方向変位 $\Delta z_p(t)$ が

$$\Delta z_p(t) = \text{Re}\{Ae^{j\omega t}\} \quad (4.6)$$

と与えられるとする．このとき，水平板の上下面における速度ポテンシャルの z 方向の微係数は，水平板の速度に一致しなくてはならない．よって，Eq.4.7 が成り立つ．

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{d}{dt} \Delta z_p(t) = \text{Re}\{j\omega A e^{j\omega t}\} (x \in [x_{p1}, x_{p1} + L_p], z = z_p, z_p + H_p) \quad (4.7)$$

ただし，水平板の鉛直方向の振動は，水平板側面における x 方向速度に影響を与えないとし，右側の水平板と同様に仮定する．

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 (z \in [z_p, z_p + H_p], x = x_{p1}, x_{p1} + L_p) \quad (4.8)$$

前章で述べたように，ここではシステムの周波数応答，すなわち水平板をある周波数で振動させた場合の水面の定常的な挙動を導出するため，速度ポテンシャルとして Eq.4.9 を仮定する．また，位置 x における水面の z 方向変位も正弦波振動解として Eq.4.10 を仮定する．

$$\Phi(x, z, t) = \text{Re}\{\phi(x, z)e^{j\omega t}\} \quad (4.9)$$

$$\eta(x, t) = \text{Re}\{Be^{j\omega t}\} \quad (4.10)$$

ただし B は未知の複素数である．このとき水面において次式が成り立つ．

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{d\eta}{dt} \Leftrightarrow \frac{\partial \phi}{\partial z} = j\omega B \Leftrightarrow B = \frac{1}{j\omega} \frac{\partial \phi(x, 0)}{\partial z} \quad (4.11)$$

よって，水平板の z 方向変位から，位置 x における水面の z 方向変位までの周波数応答関数を $G(x, j\omega)$ と定義すると，これは次式で与えられる．

$$G(x, j\omega) := \frac{Be^{j\omega t}}{Ae^{j\omega t}} = \frac{1}{j\omega A} \frac{\partial \phi(x, 0)}{\partial z} \quad (4.12)$$

リファレンスセンサ，エラーセンサの設置位置をそれぞれ $x = x_{ref}$ ， $x = x_{err}$ とすると，外乱用アクチュエータからリファレンスセンサまでの周波数応答関数 $G_{yw}(j\omega)$ ，外乱用アクチュエータからエラーセンサまでの周波数応答関数 $G_{zw}(j\omega)$ は， $G(x, j\omega)$ を用いて Eq.4.13 で与えられる．

$$G_{yw}(j\omega) := G(x_{ref}, j\omega), \quad G_{zw}(j\omega) := G(x_{err}, j\omega) \quad (4.13)$$

また制御用アクチュエータ 1 (Case B の場合は制御用アクチュエータ 2 も含む) が振動している場合は，外乱用アクチュエータが静止した水平板の境界条件，制御用アクチュエータ 1 が駆動した水平板の境界条件となる．この時，制御用アクチュエータからリファレンスセンサまでの周波数応答 $G_{yu}(j\omega)$ ，制御用アクチュエータからエラーセンサまでの周波数応答 $G_{zu}(j\omega)$ も同様に， $G(x, j\omega)$ を用いて Eq.4.14 で与えられる．

$$G_{yu} := G(L - x_{ref}, j\omega), \quad G_{zu} := G(L - x_{err}, j\omega) \quad (4.14)$$

これより，上記四つの周波数応答関数を求めるために， $\frac{\partial \phi}{\partial z}$ を数値的に求めることを考える．Eq.4.9 を Eq.4.1 ~ Eq.4.8 に代入し，時間項 $e^{j\omega t}$ を消去すると，複素関数 $\phi(x, z)$ は次式を満足しなくてはならない．

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.15)$$

$$(-\omega^2 + j\omega\alpha)\phi + g\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (z = 0) \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (z = -H), \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (x = 0, L) \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (x \in [x_{p2}, x_{p2} + L_p], z = z_p, z_p + H_p), \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (z \in [z_p, z_p + H_p], x = x_{p2}, x_{p2} + L_p)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (x \in [x_{p3}, x_{p3} + L_p], z = z_p, z_p + H_p), \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (z \in [z_p, z_p + H_p], x = x_{p3}, x_{p3} + L_p)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = j\omega A \quad (x \in [x_{p1}, x_{p1} + L_p], z = z_p, z_p + H_p) \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (x \in [z_p, z_p + H_p], x = x_{p1}, x_{p1} + L_p) \quad (4.21)$$

Eq.4.9 のように正弦波振動解を仮定したことによって，水面における境界条件 (Eq.4.2) が Eq.4.16 のように時刻 t に依存しなくなるため，時間応答を経由せずに周波数応答を直接求めることができる．

第5章 境界要素法による数値解析

実験装置に合わせて，パラメータを次のようにおく：水槽の全長 $L=1480\text{mm}$ ，水深 $H=180\text{mm}$ ，外乱用アクチュエータの左端 $x_{p1}=265\text{mm}$ ，制御用アクチュエータ1の左端 $x_{p2}=1115\text{mm}$ ，制御用アクチュエータ2の左端 $x_{p3}=710\text{mm}$ ，水平板の x 方向の長さ $L_p=100\text{mm}$ ，水槽底面から水平板までの高さ $z_p=145\text{mm}$ ，水平板の厚さ $H_p=5\text{mm}$ ．境界要素として一定要素（直線要素で，中央に節点を有し，要素内の関数値は一定とする）を用い，その長さはすべての要素共通で $\Delta s=5\text{mm}$ とする．このため水深は Fig.2.1 より，実験装置の 181mm を 180mm に近似する．また，水平板の厚さも実験装置の 3mm から 5mm に近似する．水槽の水平方向の要素分割数を $N_L=\frac{L}{\Delta s}=296$ ，鉛直方向の要素分割数を $N_H=\frac{H}{\Delta s}=36$ ，水平板の水平方向の要素分割数を $N_P=\frac{L_p}{\Delta s}=20$ とする．また， $\alpha=0.1$ とする．

以下では，一定要素を用いて前述の問題を連立一次方程式で近似する手順を示す．この手順は文献 [15] と同一で行ったため，これ以降では結果のみを示す．ラプラス方程式 (Eq.4.1) の解は，境界積分方程式を満足することが知られている．すなわち，積分経路 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ をそれぞれ Fig.4.1 の向きに取ると，境界上の点 $(x, z) \in \Gamma$ において次式が成り立つ．

$$\phi(x, z) = \frac{1}{\pi} \int_{\Gamma} \left\{ \left(\log \frac{1}{r} \right) \frac{\partial \phi(\xi, \eta)}{\partial n} - \phi(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left(\log \frac{1}{r} \right) \right\} ds \quad (5.1)$$

ここで， $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4$ ， $r = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - z)^2}$ とし， $(\xi, \eta) \in \Gamma$ は積分経路上の座標である．長さ Δs の一定要素を用いて境界を分割すると， $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ の要素分割数はそれぞれ $N_1=2 \times (N_L + N_H)=664$ ， $N_2=2 \times N_p + 2=42$ ， $N_3=2 \times N_p + 2=42$ ， $N_4=2 \times N_p + 2=42$ となり，全境界要素数は $N=790$ となる．各要素の節点を境界要素の中間にとり，節点の座標を (x_i, z_i) とすると，Eq.5.1 は Eq.5.2 で近似的に離散化される．

$$\frac{1}{2} \phi_i = \sum_{j=1}^N \{ h'_{ij} \phi_j + g_{ij} \bar{\phi}_j \}, \quad h'_{ij} := -\frac{1}{2\pi} \int_{C_j} \frac{\partial}{\partial n} \left(\log \frac{1}{r_{ij}} \right) ds, \quad g_{ij} := \frac{1}{2\pi} \int_{C_j} \log \frac{1}{r_{ij}} ds \quad (5.2)$$

ただし， ϕ_j は j 番目の一定要素 C_j における ϕ の値， $\bar{\phi}_j$ は j 番目の一定要素 C_j における ϕ の法線方向微係数である． r_{ij} は， i 番目の一定要素 C_i における節点 (x_i, z_i) と， C_j 上の座標 $(\xi, \eta) \in C_j$ 間の距離で， $r_{ij} = \sqrt{(\xi - x_i)^2 + (\eta - z_i)^2}$ である． $i=j$ の場合，係数 h'_{ij} ， g_{ij} は次のように与えられる．

$$h'_{ii} = 0, \quad g_{ii} = \frac{L_i}{2\pi} \left(1 + \log \frac{2}{L_i} \right) \quad (5.3)$$

ただし， L_i は一定要素 C_i の長さである．一方， $i \neq j$ の場合，ガウスの三点積分公式

$$\int_{-1}^1 f(\xi) d\xi \simeq \sum_{k=1}^3 w_k f(\xi_k), \quad w_1 := \frac{5}{9}, \quad w_2 := \frac{8}{9}, \quad w_3 := \frac{5}{9}, \quad \xi_1 := -\sqrt{\frac{3}{5}}, \quad \xi_2 := 0, \quad \xi_3 := \sqrt{\frac{3}{5}} \quad (5.4)$$

を用いると係数 h'_{ij} ， g_{ij} の近似値が次のように与えられる．

$$h'_{ij} = \frac{d_{ij} L_j}{4\pi} \sum_{k=1}^3 \frac{\omega_k}{r_{ik}^2}, \quad g_{ij} = \frac{L_j}{4\pi} \sum_{k=1}^3 \left(\omega_k \log \frac{1}{r_{ik}} \right) \quad (5.5)$$

ここで r_{ik} は, i 番目の節点 (x_i, z_i) と, ガウスの三点積分公式により C_j 上に定められた三点 (x_k, z_k) ($k = 1, 2, 3$) の距離で,

$$r_{ik} := \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (z_k - z_i)^2}, \quad x_k := x_j + \frac{L_j}{2} \cos(\theta_j) \cdot \xi_k, \quad z_k := z_j + \frac{L_j}{2} \sin(\theta_j) \cdot \xi_k \quad (5.6)$$

である. ただし, θ_j は, C_j 要素と x 軸とのなす角である. d_{ij} は, C_j 要素を通る直線に対して, 節点 M_i から下ろした垂線の長さで, $d_{ij} = (x_j - x_i) \sin \theta_j - (z_j - z_i) \cos \theta_j$ である.

$u = [\phi_1 \phi_2 \cdots \phi_N]^T$, $q = [\bar{\phi}_1 \bar{\phi}_2 \cdots \bar{\phi}_N]^T$ とおくと, Eq.5.2 は次のように書ける.

$$\Pi u = \Theta q \quad (5.7)$$

ただし, $\Pi = \frac{1}{2}I - \Pi'$ で, Π' , Θ はそれぞれ (i, j) 要素が h'_{ij} , g_{ij} で与えられる正方行列である. ベクトル q は Eq.5.8 で与えられる.

$$q^T = [0_{(N_L+N_H) \times 1}^T \quad q_s^T \quad 0_{N_H \times 1}^T \quad | \quad 0 \quad j\omega A1_{N_P \times 1}^T \quad 0 \quad -j\omega A1_{N_P \times 1}^T \quad | \quad 0_{2(1+N_P) \times 1}^T \quad | \quad 0_{2(1+N_P) \times 1}^T]^T \quad (5.8)$$

縦線で分けられた四つの部分から, 水槽の周囲, 外乱用アクチュエータ, 制御用アクチュエータ 1, 2 の境界条件に対応する $0_{n \times 1}$, $1_{n \times 1}$ はそれぞれ, n 行 1 列で要素がすべて 0 または 1 のベクトルである. q_s は水面の節点における法線方向微係数 $\frac{\partial \phi(x, 0)}{\partial z}$ で, 求めるべき未知ベクトルである. Eq.4.16 より, q_s は u の成分を用いて Eq.5.9 で与えられる.

$$q_s = \frac{\omega^2}{g} u(N_L + N_H + 1 : N_L + N_H + N_L, 1) \quad (5.9)$$

ただし, $u(n : m, 1)$ ($n < m$) は, 列ベクトル u のうち第 n 行から第 m 行までを取りだしたベクトルを表す. Eq.5.7 において, u の成分を左辺に移項すると次式を得る.

$$\left(\Pi - \frac{\omega^2}{g} \Theta(:, N_L + N_H + 1 : N_L + N_H + N_L) \right) u = \Theta(:, 2(N_L + N_H) + 1 : 2(N_L + N_H) + 2(1 + N_P)) \begin{bmatrix} 0 \\ j\omega A1_{N_P \times 1} \\ 0 \\ -j\omega A1_{N_P \times 1} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

ただし, $\Theta(:, n : m)$ ($n < m$) は, 行列 Θ のうち第 n 列から第 m 列までを取りだした行列を表す. Eq.5.10 に左から, Eq.5.10 左辺の括弧内の行列の逆行列をかければ, u が求まり, 次いで Eq.5.9 により q_s が求まる.

第6章 単方向波アクチュエータが開ループに与える効果(解析)

6.1 周波数応答における実験結果との比較

初めに，文献 [8] の実験による周波数応答と解析による周波数応答を比較する．その後，水深を変化させた場合 ($h=323\text{mm}$) を考え，その実験と解析の周波数応答結果を比較する．

文献 [8] の条件で，解析による周波数応答結果を Fig.6.1 ~ 6.4 に示す．双方向波アクチュエータ (Case A) は青線，単方向波アクチュエータ (Case B) は赤線，水色の縦点線は左から二次 (8.11Hz) と三次 (1.12Hz) の共振周波数である．

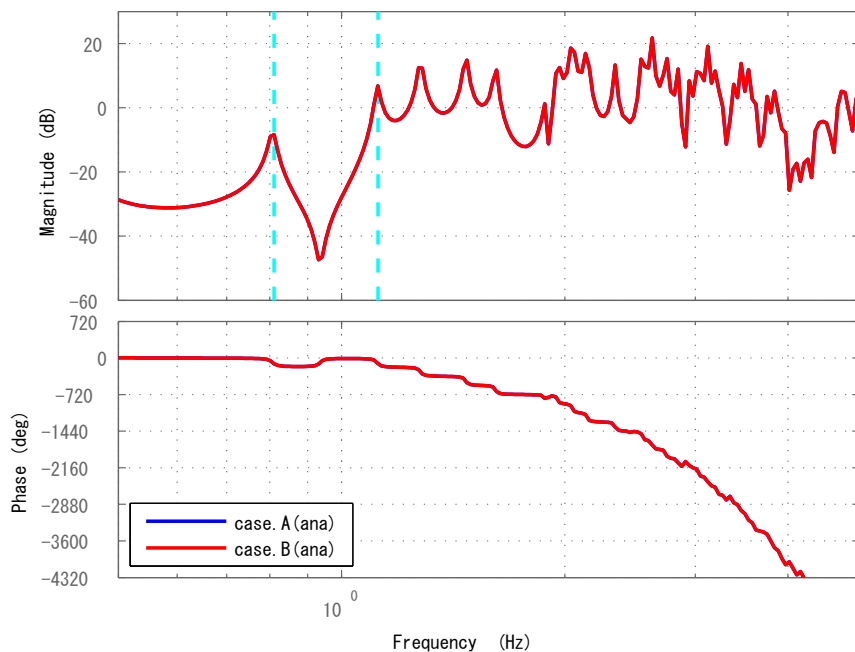


Fig. 6.1: Frequency response of analytical result: G_{zw}

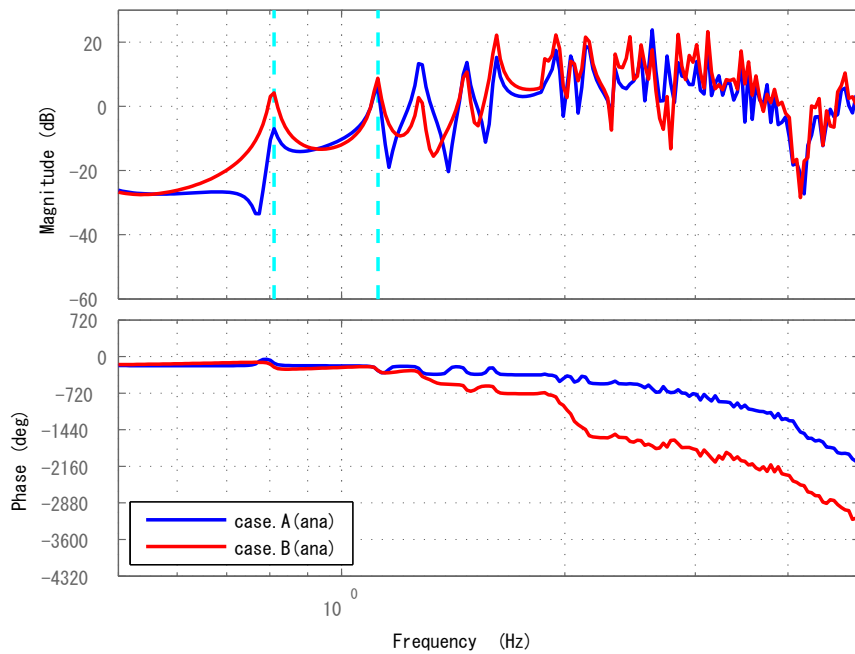


Fig. 6.2: Frequency response of analytical result: G_{zu}

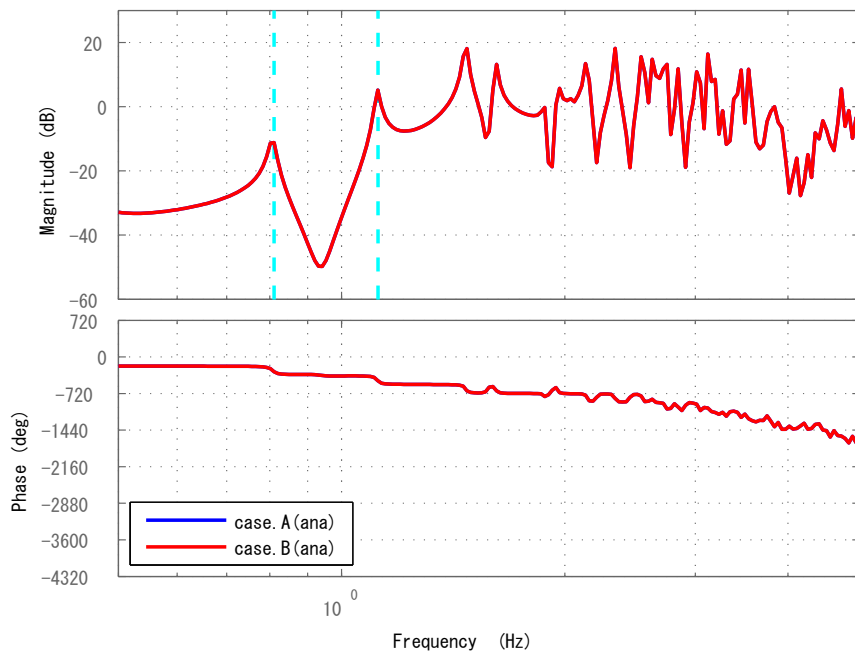


Fig. 6.3: Frequency response of analytical result: G_{yw}

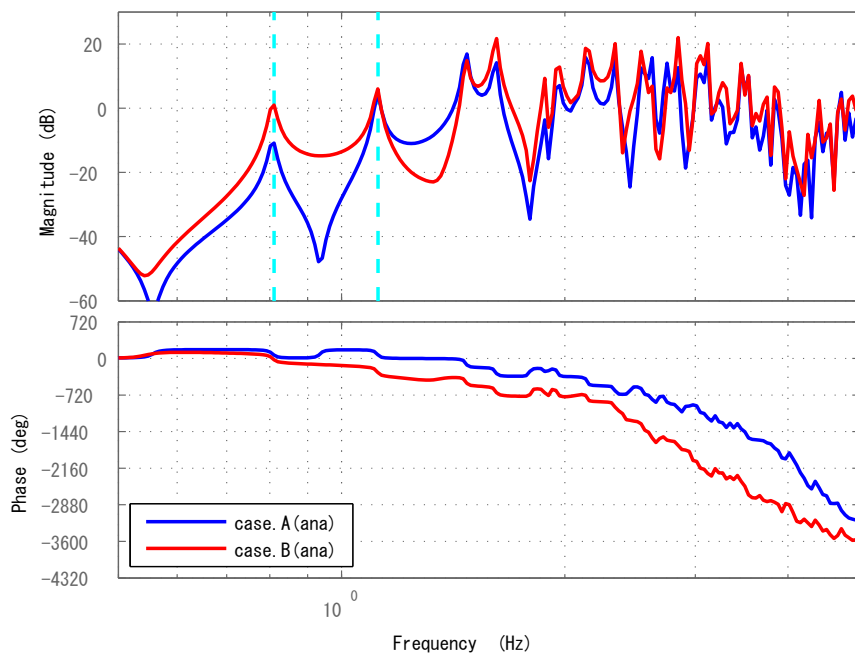


Fig. 6.4: Frequency response of analytical result: G_{yu}

Fig.6.1 と 6.3 は同一の解析を行っているため、重なった結果となっている。Fig.6.1 と 6.3 で、Case A に注目する。外乱アクチュエータからリファレンスセンサ、エラーセンサまでの距離を比較し、距離の長いエラーセンサの方が、リファレンスセンサよりも伝達関数の位相遅れが増加することがわかる。同様に Fig.6.2 と 6.4 の Case A に注目すると、制御用アクチュエータ 1 からリファレンスセンサ、エラーセンサまでの距離を比較し、距離の長いリファレンスセンサの方が、エラーセンサよりも伝達関数の位相遅れが増加することがわかる。これより、それぞれのアクチュエータからセンサまでの距離が増加することで、位相遅れも増加することを確認した。

Fig.6.2 と 6.4 より、各周波数応答について Case A と Case B を比較する。これより、Fig.6.2 と 6.4 において、それぞれ二次と三次共振周波数が一致している。また、Fig.6.4 の Case A と B より、むだ時間を設定した三次共振周波数付近で Case B の位相が Case A よりも遅れていることが確認できる。

以上の結果は実験結果 (Fig.3.1 ~ 3.4) で示されていることであり、解析結果からも同様の結果を示すことができた。

ここで Fig.6.1 ~ 6.4 の共振周波数における波の波形が、共振モードと一致しているのか確認を行う。制御用アクチュエータ 1 と 2 に注目し、Fig.6.2 と 6.4 の二次と三次共振周波数における Case A の場合を Fig.6.5 と Fig.6.7 に示す。しかし水平板の振幅が小さいため、波面をそれぞれ拡大した図を Fig.6.6 と Fig.6.8 に示す。ここで、図の真ん中と右端の太い黒線は、リファレンスセンサとエラーセンサを表している。また $z=0.18\text{m}$ での点線は、静常時の波の高さである。

Fig.6.6 と Fig.6.8 において、それぞれの共振モードを考える。二次の共振モードは、共振の腹が水槽の両端と真ん中に存在する。Fig.6.6 を確認すると、水槽の両端、真ん中、制御用アクチュエータ 1 の位置でピークが確認できる。制御用アクチュエータ 1 の位置で波が高くなるの

は水平板の影響と考えると、これは二次共振モードと見なすことができる。同様に三次の共振モードは、共振の腹が水槽の両端、水槽の左端から右方向に全長の $1/3$, $2/3$ の位置、計四つ存在する。Fig.6.8 を確認すると、水槽の両端を含む四つと水平板の影響による一つ、計五つのピークが確認できる。これも三次共振モードと考えることができる。これより、解析結果の二次と三次共振周波数の水面が二次と三次の共振モードを示していることを確認した。

次に、Fig.6.1 と 6.2 では三次共振周波数のすぐ右側にピークがある。しかし、このピークは Fig.6.3 と 6.4 では確認できない。そのため、このピーク時の波の波形を確認する。この結果を Fig.6.9、拡大した結果を Fig.6.10 に示す。

Fig.6.10 において、三次共振の次に表れることから四次共振と予測して考える。四次の共振モードは、共振の腹が水槽の両端、真ん中、水槽の左端から右方向に全長の $1/4$, $3/4$ の位置、計五つ存在する。Fig.6.10 を確認すると、水槽の両端、真ん中、水槽の左端から右方向に全長の $1/4$, $3/4$ の位置、計五つでピークが確認できる。これより、四次共振モードと考えることができる。ここで、リファレンスセンサ (Fig.6.10 の真ん中の太い黒線) の位置が、共振の節に位置していることがわかる。

以上より、周波数応答だけでなくある周波数における波の波形を示すことができた。また、周波数応答では示されない共振モードについても、波の波形を確認することで共振モードを判別することが可能である。

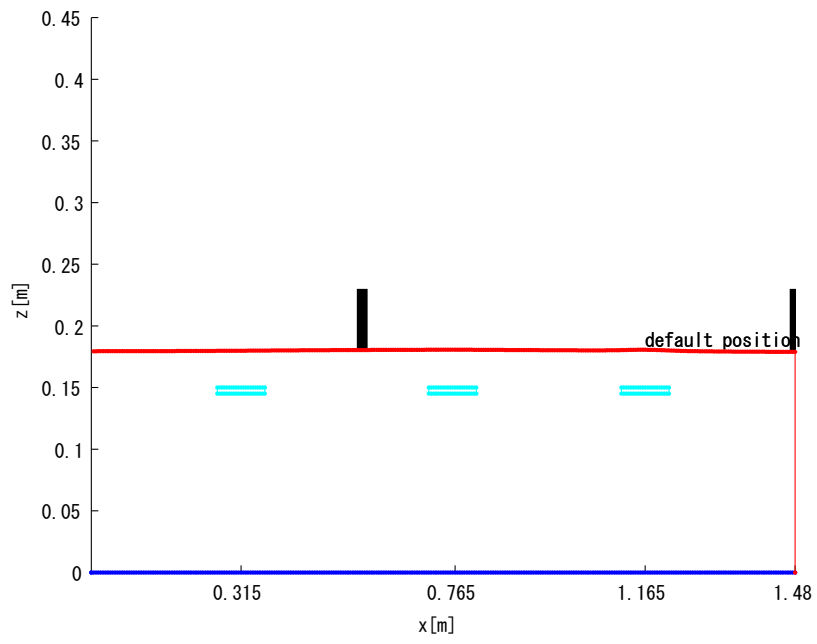


Fig. 6.5: Second resonant mode of wave surface

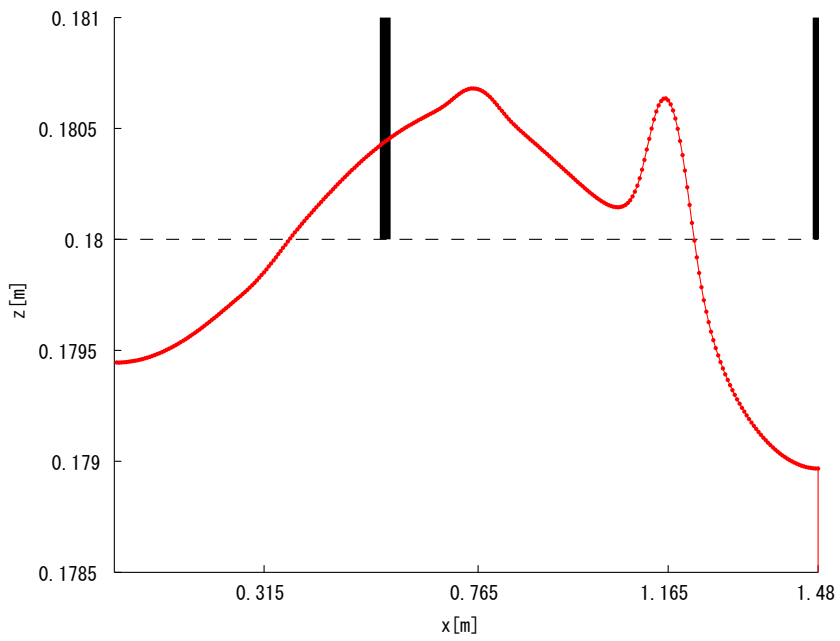


Fig. 6.6: Second resonant mode of wave surface(closeup)

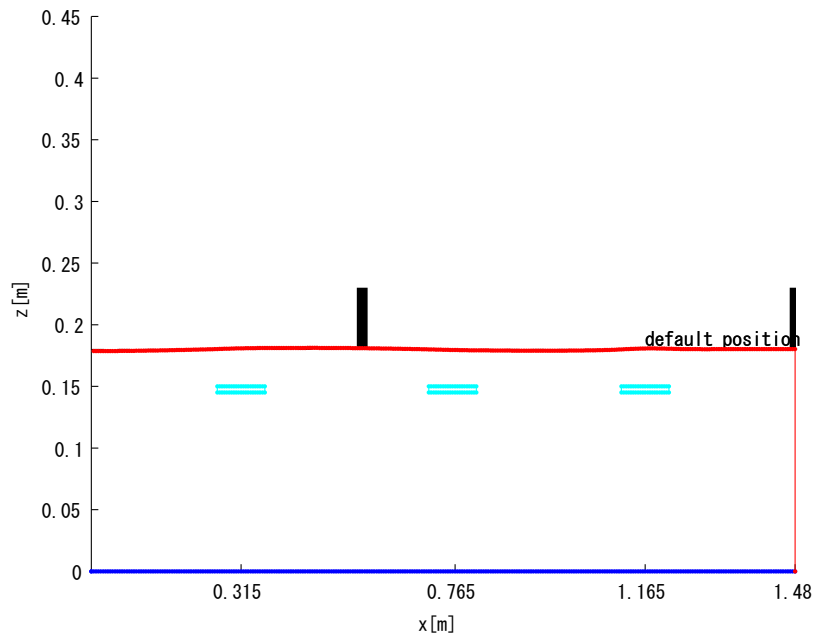


Fig. 6.7: Third resonant mode of wave surface

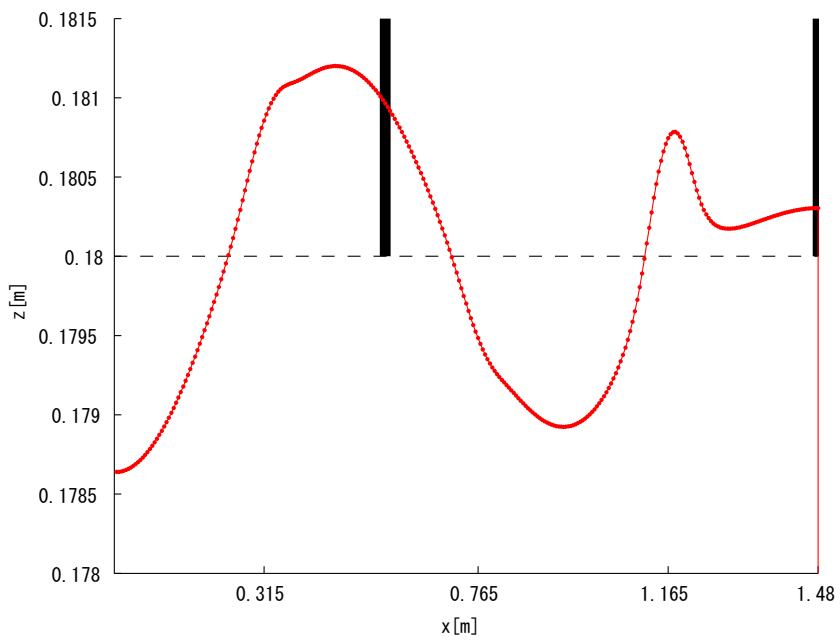


Fig. 6.8: Third resonant mode of wave surface(closeup)

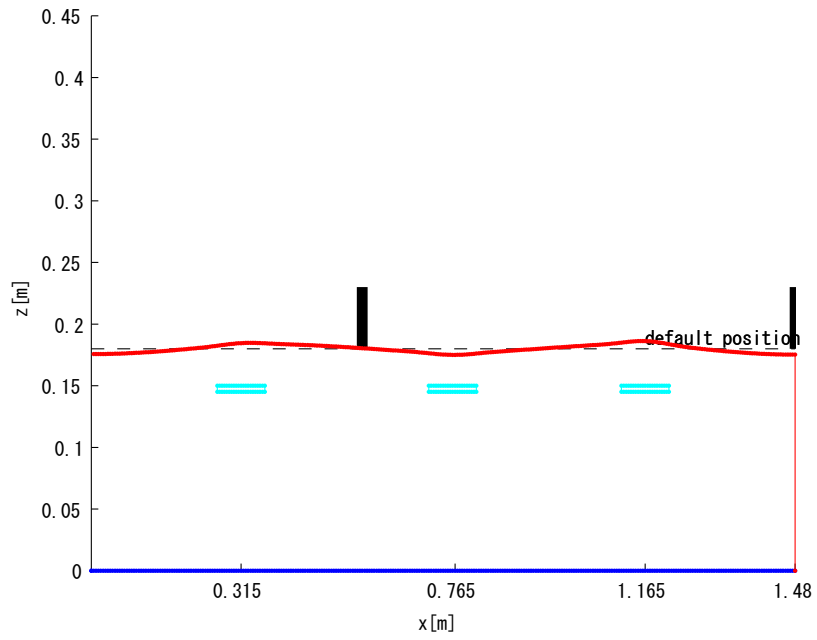


Fig. 6.9: Peak mode of wave surface

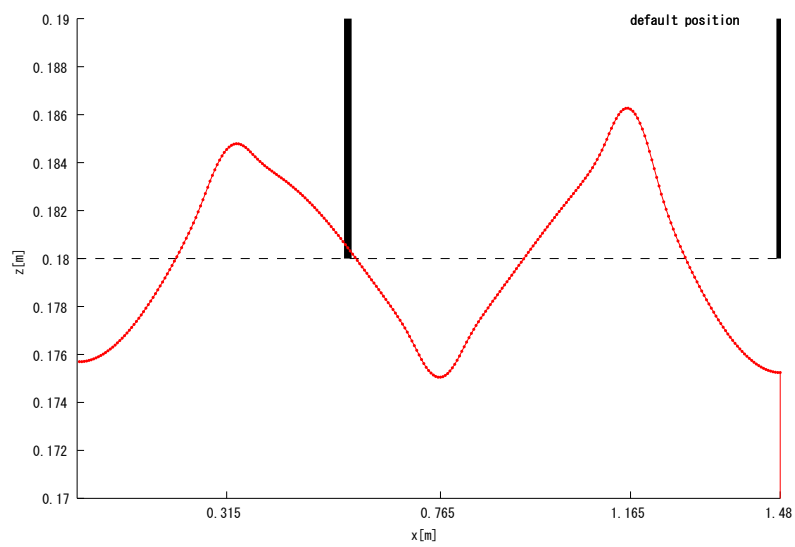


Fig. 6.10: Peak mode of wave surface(closeup)

6.2 パラメータ変更による単方向波アクチュエータの効果

水深:(変更前)181mm→(変更後)323mm とリファレンスセンサの位置:(変更前)570mm→(変更後)643mm を変更して解析を行った．この結果を Fig.6.11～6.14 に示し，実験結果との比較を行った．この時，Case A と B は前項と共通で，青色と赤色である．水色の縦線も前項と共通であり，一次～五次共振周波数である．また，むだ時間も前項と同じで 0.3276s である．

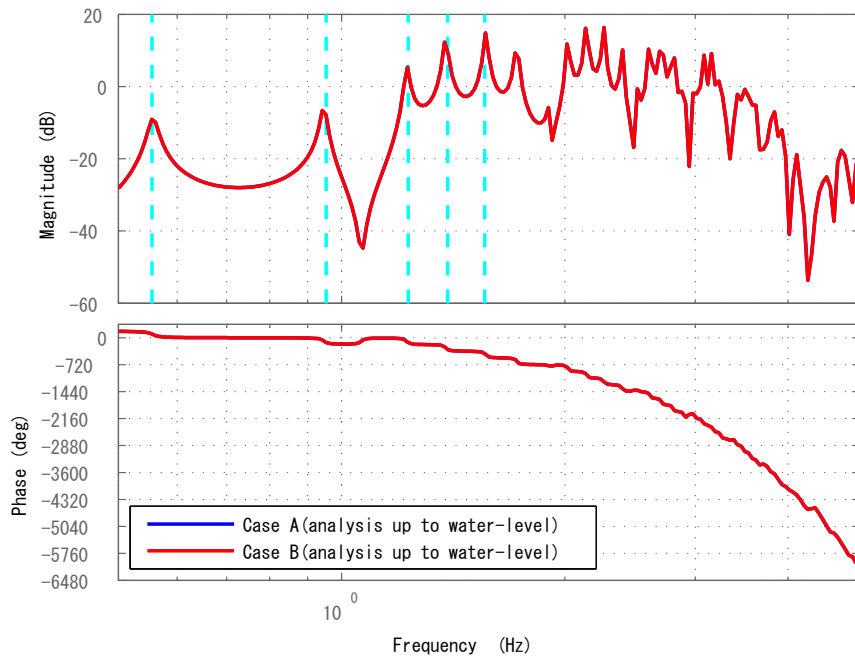


Fig. 6.11: Frequency response of analytical result: $G_{zw}(h=0.323\text{m})$

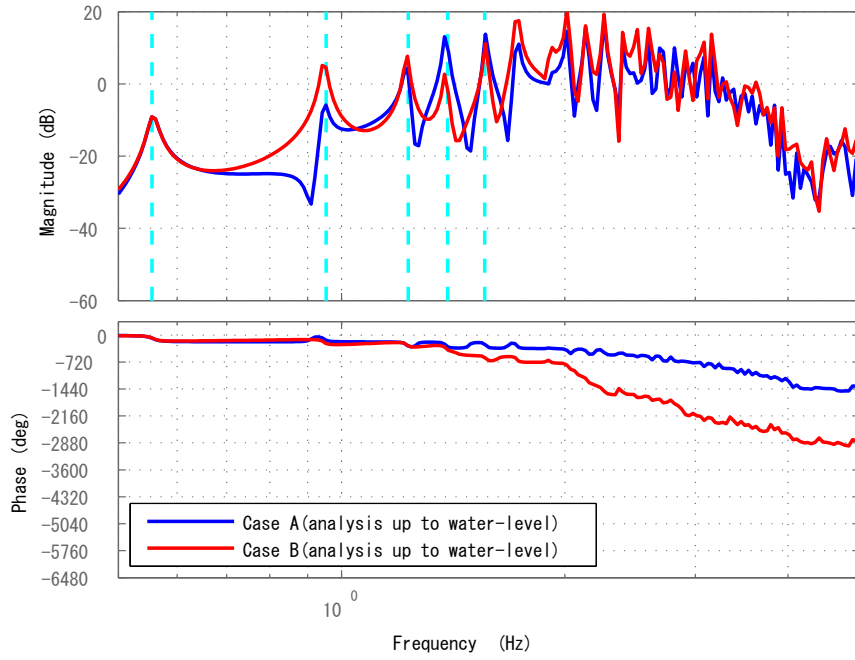


Fig. 6.12: Frequency response of analytical result: $G_{zu}(h=0.323\text{m})$

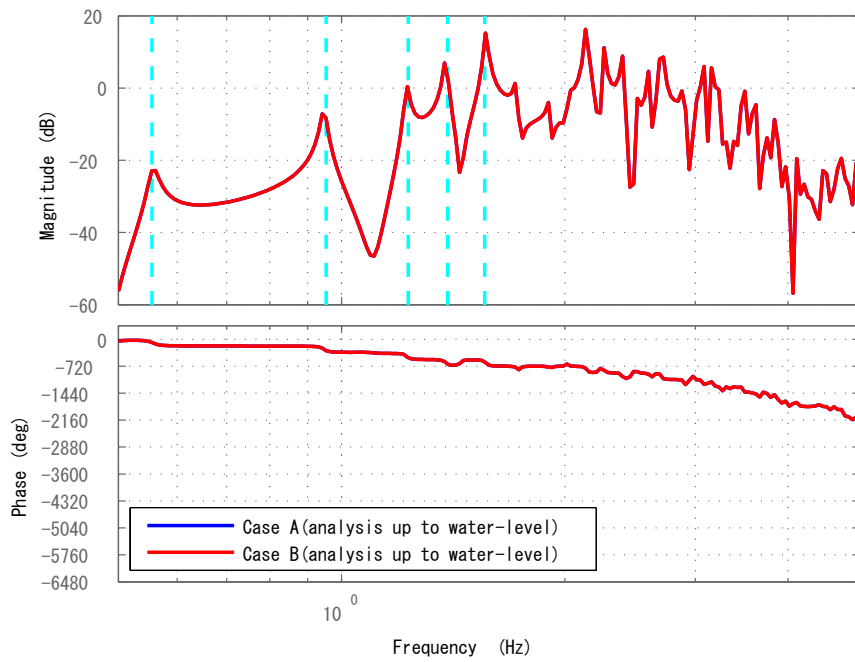


Fig. 6.13: Frequency response of analytical result: $G_{yw}(h=0.323\text{m})$

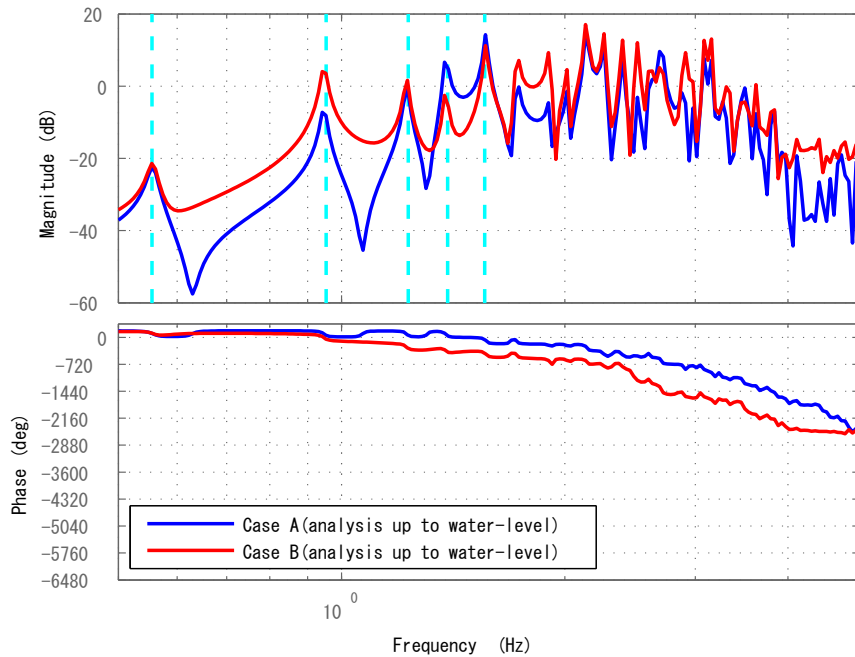


Fig. 6.14: Frequency response of analytical result: $G_{yu}(h=0.323)$

Fig.6.11 ~ 6.14 の Case A では一次 ~ 五次共振の波を測定することができた。また Case B についても同様に、一次 ~ 五次共振の波を測定することができた。

Fig.6.14 より、1.0Hz 以降で Case B の位相が Case A よりも遅れていることがわかる。

水深による影響を調べるために Fig.6.1 ~ 6.4 と Fig.6.11 ~ 6.14 を比較すると、水深を深くしたことで共振周波数が高周波数側に移動したことがわかる。これは先ほど述べた、 h が増加したことから考えることができる。

以上の結果は実験結果 (Fig.3.5 ~ 3.8) で示されていることであり、解析結果からも同様の結果を示すことができた。これより、両者の整合性を確認することができた。

6.3 フィードバックパス伝達関数に与える効果

位相遅れ量の根拠を議論するために、新たに Case C と Case A2 を用いて、最も効果の表れるフィードバックパス伝達関数 G_{yu} を考える。

Case C 仮想的単方向波アクチュエータ：次式を満足するように $u(t)$ から $v(t)$ を生成し、制御用アクチュエータ 1 が上流へ直接伝播する進行波を制御用アクチュエータ 2 が完全に相殺するように駆動する。

$$v(j\omega) = -\Theta(j\omega)u(j\omega), \quad \Theta(j\omega) = e^{-jkL_d} \quad (6.1)$$

ただし、 k は波数であり、次式で定義される。また、 $C(\omega)$ は Eq.2.2 により数値的に求める。

$$k = \frac{\omega}{C(\omega)} \quad (6.2)$$

この場合、信号 $v(t)$ と $u(t)$ の間には Case B のような単純なむだ時間の関係は成り立たず、 $u(t)$ から $v(t)$ を構成するために e^{jkL_d} の周波数応答を近似する高次システムが必要になる。そのため、Case C のアクチュエータを実装することは現実的ではない。しかし、周波数応答における位相遅れの効果を議論することはできる。

Case A2 むだ時間を考慮した双方向波アクチュエータ：制御用アクチュエータ 1 からエラーセンサ側の壁までの距離の二倍をむだ時間 (e^{jkl}) として加えた双方向波アクチュエータ。ここで l は、制御用アクチュエータ 1 とエラーセンサ側の壁までの距離の二倍とし、 $l=315 \times 2=630\text{mm}$ とする。

この Case C と A2 を用いて開ループ系に与える影響を考える。Case A, A2, C の周波数応答解析結果を Fig.6.15 の青線、青鎖線、緑線にそれぞれ示す。また、水色の縦点線は二次 (0.811Hz) と三次 (1.12Hz) 共振周波数である。

Fig.6.15 から、Case A2 と C を比較する。位相線図に注目すると、約 4.0Hz まで Case C は Case A2 と同様の位相特性を示している。ここで Case A2 は、波が制御用アクチュエータ 1 とエラーセンサ側の壁を往復した後、リファレンスセンサに検出されることを考えている。これより、Case C において、制御用アクチュエータ 1 から直接上流側へ伝播する波は無く、下流へ伝播した波がエラーセンサ側の壁で反射した後、リファレンスセンサに検出されることを意味している。

次に Case B が単方向波アクチュエータとして使用できる範囲を確認するために、Case A, B, C を比較する。この三つの結果を Fig.6.16 に示す。また、縦の点線は二次 (0.811Hz) と三次 (1.12Hz) の共振周波数である。

Fig.6.16 から、Case B と C を比較する。位相線図に注目すると約 2.0Hz までの帯域において、Case B は Case C と同様の位相特性を示している。これは、この範囲において、Case B が単方向波アクチュエータとして使用できることを示している。またこれ以上の帯域において、Case B では直接上流側へ伝播する進行波を相殺できなくなった結果、Case C に対して位相が進んだと考えられる。

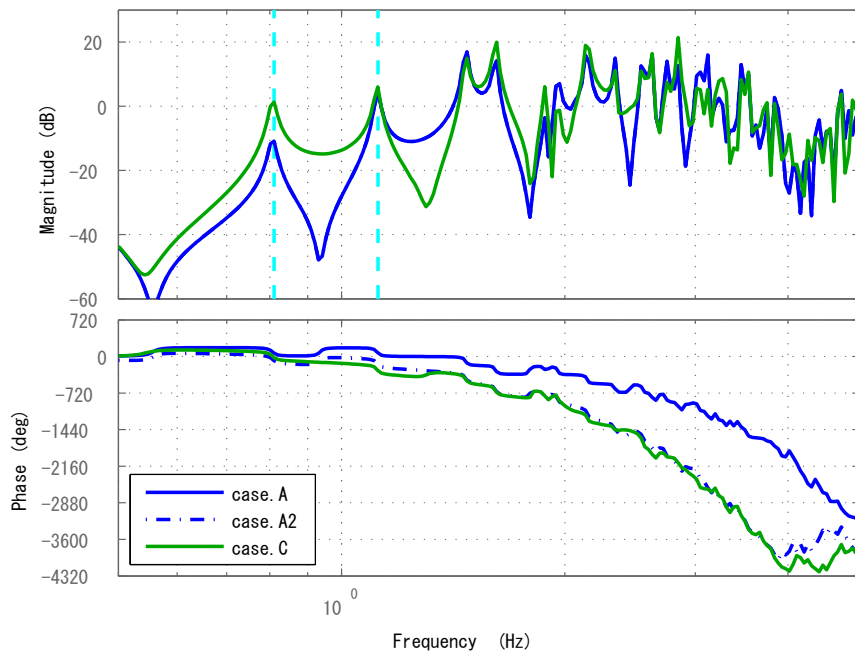


Fig. 6.15: Frequency response from u to y (Case A and C)

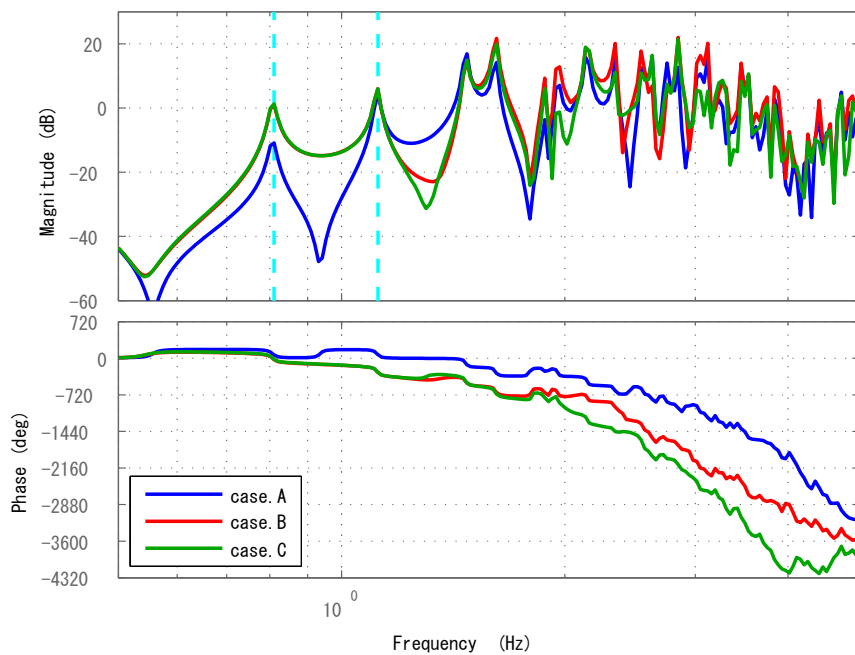


Fig. 6.16: Frequency response from u to y (Case B and C)

6.3.1 単方向波アクチュエータの位置による変化

次に，単方向波アクチュエータの位置を変更した場合でも同様の結果が得られるのか確認した．先ほどの単方向波アクチュエータの位置を base とし，これよりも左側にした場合を long ，右側にした場合を short として解析を行った．制御用アクチュエータ 1 と 2 の位置を table6.1 に示す．この時，制御用アクチュエータ 1 と 2 の距離は全て共通とした．この二つの結果を Fig.6.17 と 6.18 に示す．

Fig.6.17 の位相線図より，約 4.0Hz 付近まで Case B と C がほぼ重なっていることがわかる．これより，この範囲では単方向波として使用できることがわかる．Fig.6.18 の位相線図では，Case A, B, C が 2.0Hz の手前までほぼ重なっている．この結果は従来の結果と異なることから，周波数の分割数を八倍にし，再度解析を行った．この結果を Fig.6.19 に示す．

Fig.6.19 より，約 2.0Hz 付近まで Case B と C が重なっていることがわかる．これより，この範囲では単方向波として使用できることがわかる．また，Case A に対する Case B の位相遅れに注目すると，Fig.6.19 は，Fig.6.16 と 6.17 よりも位相遅れが小さい．これは table6.1 より，short では，制御用アクチュエータ 1 とエラーセンサ側の壁との距離の二倍の値が小さいため，Case A に対する Case B の位相遅れも小さかったと考えられる．

Table 6.1: Compare of control actuator's positions

	制御用アクチュエータ 1 の位置 [mm]	制御用アクチュエータ 2 の位置 [mm]	制御用アクチュエータ 1 とエラーセンサ側の 壁との距離の二倍 [mm]
base	1165	760	630
long	1115	710	730
short	1365	960	230

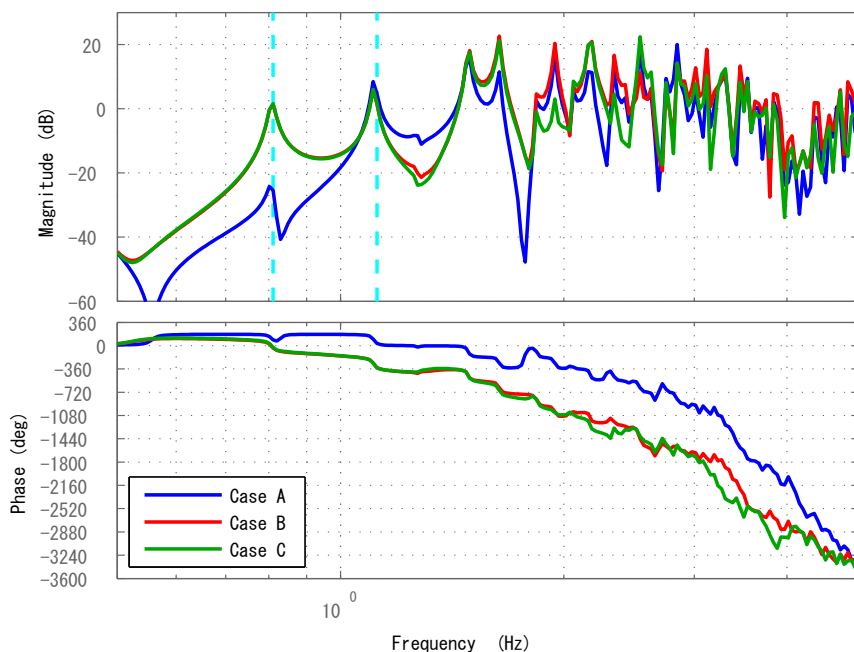


Fig. 6.17: Frequency response from u to $y(\text{long})$

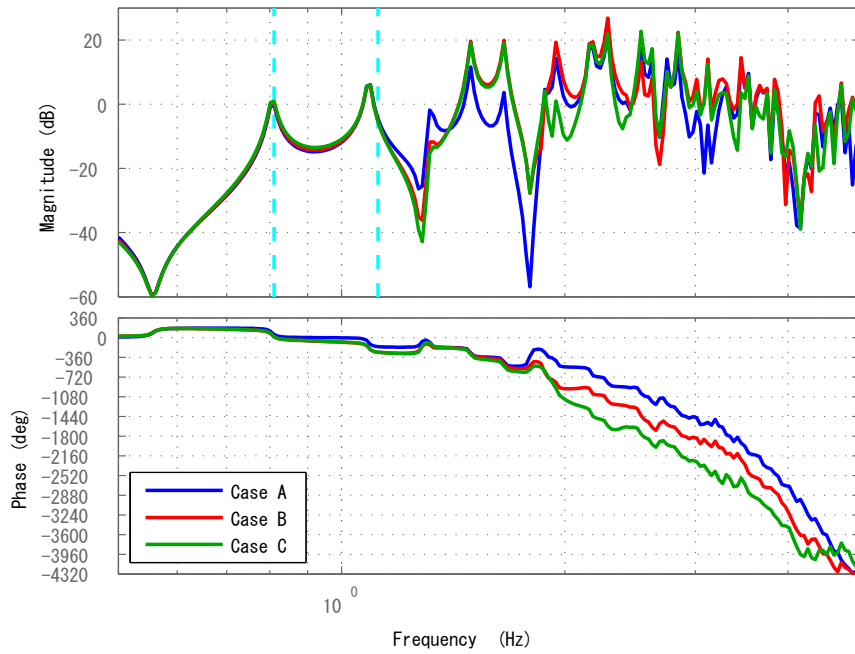


Fig. 6.18: Frequency response from u to $y(\text{short})$

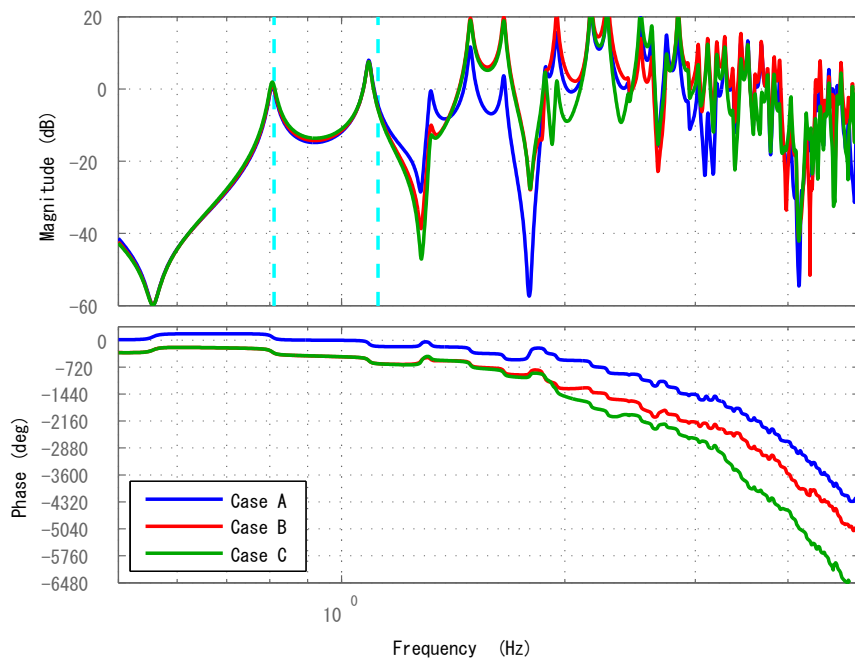


Fig. 6.19: Frequency response from u to $y(\text{short-fine})$

6.3.2 底面からの水平板の高さによる効果

次に底面からの水平板の高さ h_1 による影響について考える．水槽の水位 $h=323\text{mm}$ より， $\frac{h_1}{h}=0.9, 0.8, 0.5, 0.3$ となるように h_1 を設定する．水槽の水位が $h=181\text{mm}$ の時， $\frac{h_1}{h}$ の割合が近い時に水平板の位置が近くなる可能性がある．そのため $h=323\text{mm}$ として， $\frac{h_1}{h}$ の割合による影響が上記よりも顕著に表れると考えた．これより， $\frac{h_1}{h}=0.9$ の時 $h_1=290\text{mm}$ ， $\frac{h_1}{h}=0.8$ の時 $h_1=260\text{mm}$ ， $\frac{h_1}{h}=0.5$ の時 $h_1=160\text{mm}$ ， $\frac{h_1}{h}=0.3$ の時 $h_1=95\text{mm}$ ，とし，結果を赤線，青線，緑線，黒線とし，Fig.6.20～6.23 に示す．ここで水色の縦線も前項と共通で，一次～五次共振周波数である．また，Fig.6.20～6.23 で得られた $\frac{h_1}{h}=0.9, 0.8, 0.5, 0.3$ における一次 (0.555Hz)，二次 (0.953Hz)，三次 (1.23Hz)，四次 (1.39Hz)，五次 (1.56Hz) 共振周波数のゲインを Table.6.2 に示す．

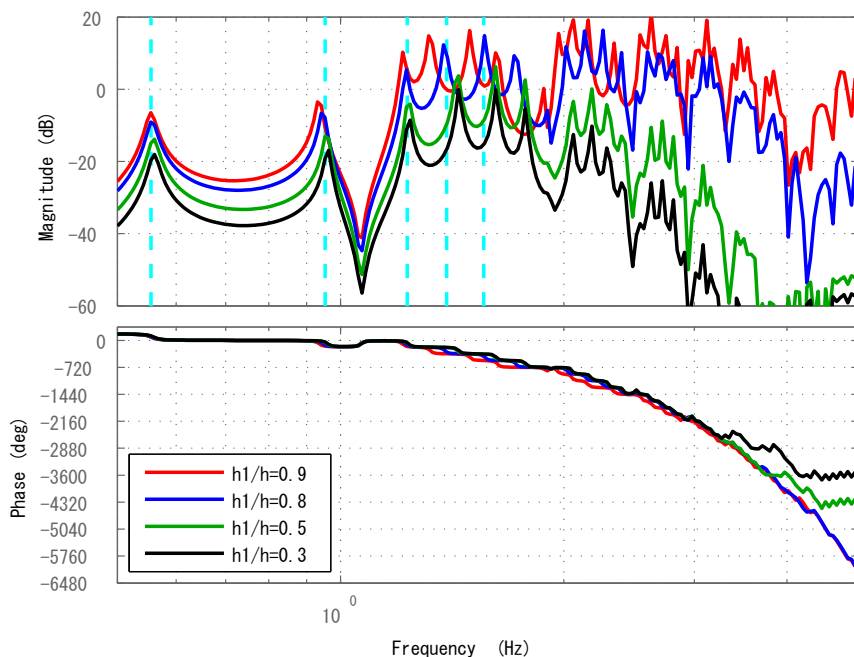


Fig. 6.20: Frequency response of analytical result with comparing plate level: G_{zw}

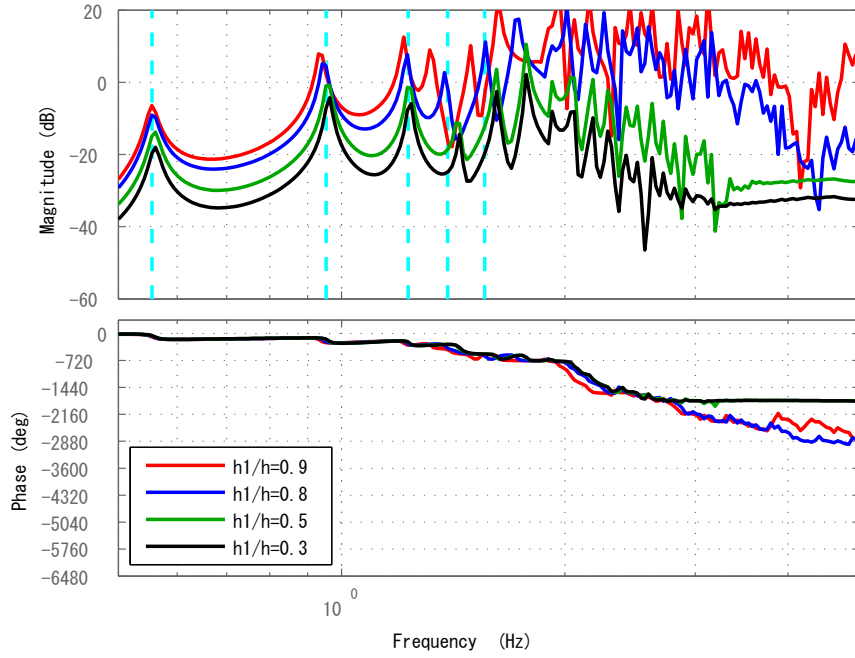


Fig. 6.21: Frequency response of analytical result with comparing plate level: G_{zu}

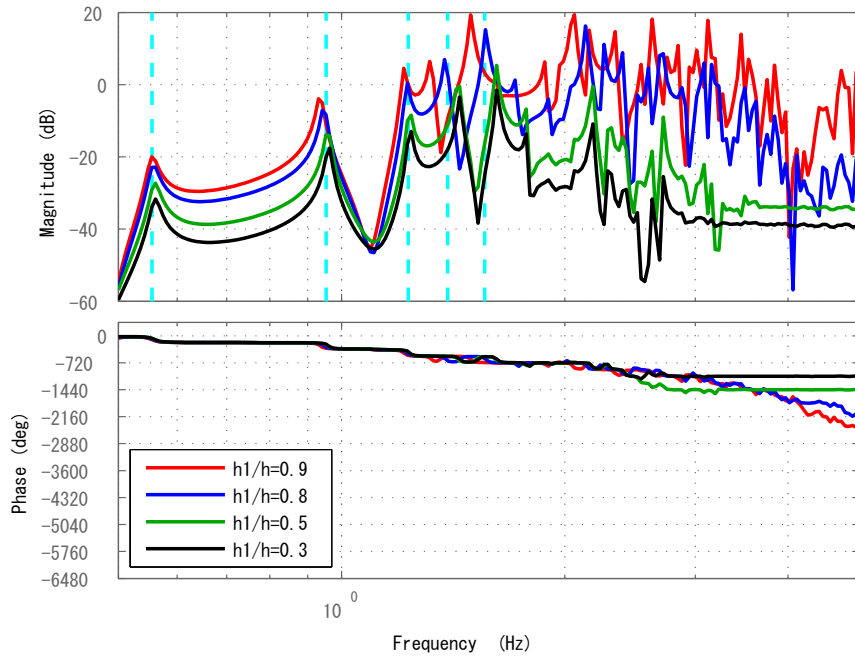


Fig. 6.22: Frequency response of analytical result with comparing plate level: G_{yw}

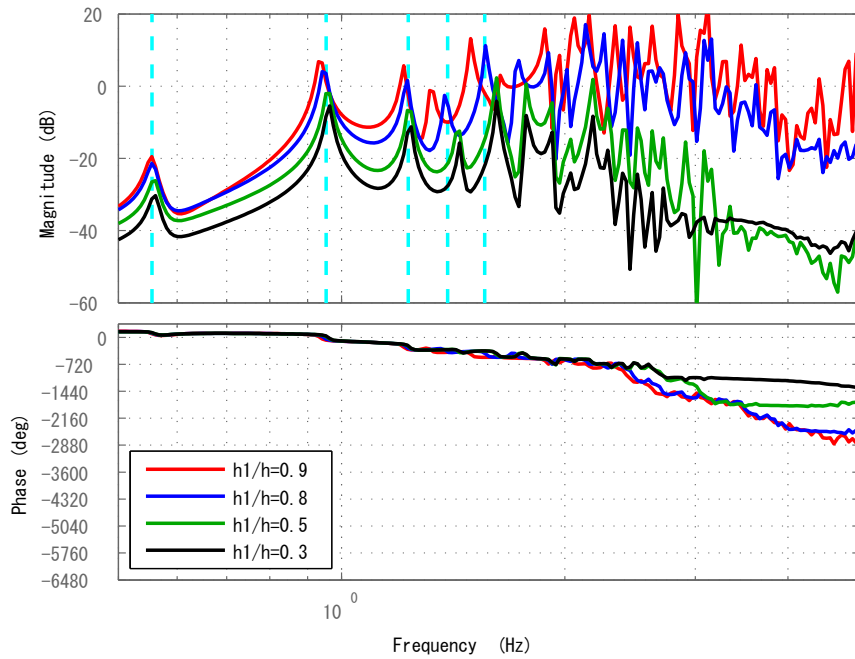


Fig. 6.23: Frequency response of analytical result with comparing plate level: G_{yu}

Table 6.2: Compare of resonance frequency Gzw

h_1/h	h_1 [mm]	ゲイン [dB]				
		1次	2次	3次	4次	5次
0.9	290	-19.5	6.78	5.83	-1.2	13.2
0.8	260	-21.4	4.03	1.62	-2.57	11.2
0.5	160	-26.2	-2.01	-6.74	-12.5	2.32
0.3	95	-30.3	-5.48	-11.2	-15.7	-4.16

Fig.6.20 ~ 6.23 と Table6.2 より, h_1/h の値が増加するごとにゲインも増加していることがわかる。これより, h_1/h の割合を高くした方がより高いゲインが得られることがわかる。ここで, 水底近くと水面近くで水平板をそれぞれ振動させた時を考える。この時, 波高が高くなる方は, 水面近くで水平板を振動させた時である。これより, この結果は予測通りの結果となった。

第7章 結言

鉛直方向に振動する水平板を用いた消波機構に対して，境界要素法を用いて周波数応答解析を行った．そして単方向波アクチュエータが開ループ系に与える効果を検討した結果，以下の知見を得た．

1. 調和振動を仮定して，複素指数関数 $e^{j\omega t}$ を用いて速度ポテンシャルを表した．この複素振幅に関するラプラス方程式を境界要素法により数値的に求めた．単方向波を用いた場合の周波数応答は，二つの制御用アクチュエータを個々に動作させた場合の周波数応答に，むだ時間型要素の周波数応答を重ね合わせることで求めた．周波数応答の実験結果と数値解析結果の比較を，以下の二つの場合で行った．

- ・ 双方向/単方向波のアクチュエータの場合
- ・ 水深を変えた場合

その結果として，

- ・ 共振周波数の位置
- ・ 共振周波数付近のゲイン特性
- ・ アクチュエータとセンサ間の距離に応じて位相が大きく遅れる

以上の点において，両者の特性はおおむね一致した．特に，水深の増加により，両者共に共振周波数が高周波側に移動している点は，波の速度が水深とともに増加することにより説明できる．

2. 単方向波アクチュエータが開ループ系に与える効果を示すために，仮想的な単方向波アクチュエータを用いて解析を行った．このアクチュエータは，全周波数帯域において一方向にのみ波を発生させることが可能である．この解析結果として，双方向波アクチュエータに比べてフィードバックパス伝達関数の位相遅れが増加し，その増加分は制御アクチュエータ1からエラーセンサ側の壁までの距離の二倍に相当することを示した．
3. 単方向波アクチュエータを用いる場合には，全周波数帯域において一方向にのみ波を発生させることはできない．しかし，むだ時間を設定した周波数（一方向のみ波を発生させる周波数）付近では，仮想的な単方向波アクチュエータと同様の効果が得られることを示した．

以上より，消波機構において単方向波アクチュエータが開ループに与える効果を解析的に示した．

参考文献

- [1] 稲垣聡. ”水を揺らす-造波装置を用いた水理実験-”, 日本機械学会誌, Vol.112, No.1090,2009年9月, p32-33
- [2] 野原勉. ”波の計測と制御-太平洋の波を造る-”, 計測と制御, 第37巻, 第5号, 1998年5月号, p341-348
- [3] 奥山悦郎. ”分割型吸収式造波機を用いて水面に波で文字を描く技術”, 三井造船技報, No.188, 2006-6, p15-20
- [4] T. L. Yip.; Allen T. Chwang. et al. ”Water wave control by a pitching plate”, Journal of engineering mechanics/August, 1997, p800-807. <http://www.hindawi.com/journals/aav/2010/730813.html>
- [5] 椎貝博美, ”流体力学ノート9. 紙風船と港と寺田寅彦”, ながれ, Vol.13, No.6(1994), pp.479-482
- [6] Giorgio Bellotti, ”Transient response of harbours to long waves under resonance conditions”, Coastal Engineering, 54(2007), pp.680-693
- [7] 廣田貴士, 小林泰秀. ”垂直振動板を用いた消波機構のロバスト制御”. 日本機械学会北陸信越支部講演論文集, 2010.3.10, 704
- [8] 吉岡成幸, 小林泰秀, ”鉛直方向に振動する水平板を用いた消波機構における単方向波アクチュエータの制御性能”, 日本機械学会北陸信越支部講演論文集, 2011.3.5, 711
- [9] Yasuhide Kobayashi, Hisaya Fujioka, Naoki Jinbo, ”A Control Source Structure of Single Loudspeaker and Rear Sound Interference for Inexpensive Active Noise Control”, Advances in Acoustic and Vibration, Vol.2010, 2010
- [10] G. X. Wu, R. Eatock Taylor, ”Finite element analysis of two-dimensional non-linear transient water waves”, Applied Ocean Research, 16, 1994. p363-372
- [11] G. X. Wu, Q.W.Ma. et. al, ”Numerical simulation of sloshing waves in a 3D tank based on a finite element method”, Applied Ocean Research, 20, 1998. p337-355
- [12] R.-S. Shin, C. -r. Chou and J. Z. ”Numerical Estimations of Wave Reflection Coefficients for Irregular Waves Over Submerged Obstacles”, proc. of the 50th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul,Korea 2005, pp.40-47
- [13] S. Neelamani.; M. S. Reddy. ”Wave transmission and reflection characteristics of a rigid surface and submerged horizontal plate”, Ocean Engng, Vol.19, No.4, 1992, p327-341

- [14] 酒井哲郎, 海洋工学入門, 森北出版, 初版, 133pp.
- [15] 戸川隼人, 下関正義, パソコンによる境界要素法入門, サイエンス社, 1983,
- [16] G.D.Crapper. "6 Further solutions for small waves". Introduction to water wave. Ellis Horwood ltd, 1984, p154-173.
- [17] 西久保智昭, 小林泰秀, "片持ち梁のフィードフォワード外乱抑制制御系における指向性アクチュエータの効果", 第 54 回自動制御連合講演論文集, 2011

付 録 A 境界要素法による周波数応答解析のプログラムソース

境界要素法を用いた周波数応答解析を行う時に使用するプログラムである。

BEM.c

```
\verbatiminput{BEM.c}
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 境界要素法による水槽の周波数応答の計算 %
% 「パソコンによる境界要素法入門」参照 %
% %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%。
%
% 周波数応答を求めるため、速度ポテンシャル を  $\phi(x,z)e^{j\omega t}$  とお
% いて、  $\phi(x,z)$  を求める。(境界値問題を解く)
% 水中に設置した水平板の上下の勾配に速度成分を複素数として与える
% 外乱用アクチュエータと制御用アクチュエータが左右対象に配置されて
% いるので、制御用アクチュエータを加振したときの周波数応答は、外乱
% 用アクチュエータを加振したときの周波数応答を流用して求める。
% 制御用アクチュエータ 2 を追加した時を考える
%

clear all;
close all;
format short g           % 5桁の固定小数または浮動小数の最良表示
beta = 0.1;              % 減衰率(論文中では  $\beta$  に該当)の設定
tau = 0.356;             % むだ時間の設定 [s]
ver_tau = 2.0*(1.48-1.165); % 単方向波検証用のむだ時間分の距離 [m]
gra = 9.8;               % 重力加速度 [m/s^2]

load data/spk1_yoshioka_open.dat; %入力:外乱用アクチュエータ(左端)の駆動信号
load data/spk2_yoshioka_open.dat; %入力:制御用アクチュエータ(左端)の駆動信号
load data/spk1_yoshioka_close.dat; %入力:外乱用アクチュエータ(左端)の駆動信号
load data/spk2_yoshioka_close.dat; %入力:制御用アクチュエータ(左端)の駆動信号
```

```

f1 = 0.5; % グラフの最低周波数
fh = 5.0; % グラフの最高周波数

[tmp, index] = sort(spki1_yoshioka_open(:,1));
tmp = spki1_yoshioka_open(:,1);
spki1_yoshioka_open(:,1) = tmp(index); % 1 列目: 周波数
tmp = spki1_yoshioka_open(:,2);
spki1_yoshioka_open(:,2) = tmp(index); % 2 列目: ゲイン (エラーマイクが出力)
tmp = spki1_yoshioka_open(:,3);
spki1_yoshioka_open(:,3) = tmp(index); % 3 列目: 位相 (エラーマイクが出力)
tmp = spki1_yoshioka_open(:,4);
spki1_yoshioka_open(:,4) = tmp(index); % 4 列目: ゲイン (リファレンスマイクが出力)
tmp = spki1_yoshioka_open(:,5);
spki1_yoshioka_open(:,5) = tmp(index); % 5 列目: 位相 (リファレンスマイクが出力)

[tmp, index] = sort(spki2_yoshioka_open(:,1));
tmp = spki2_yoshioka_open(:,1);
spki2_yoshioka_open(:,1) = tmp(index); % 1 列目: 周波数
tmp = spki2_yoshioka_open(:,2);
spki2_yoshioka_open(:,2) = tmp(index); % 2 列目: ゲイン (エラーマイクが出力)
tmp = spki2_yoshioka_open(:,3);
spki2_yoshioka_open(:,3) = tmp(index); % 3 列目: 位相 (エラーマイクが出力)
tmp = spki2_yoshioka_open(:,4);
spki2_yoshioka_open(:,4) = tmp(index); % 4 列目: ゲイン (リファレンスマイクが出力)
tmp = spki2_yoshioka_open(:,5);
spki2_yoshioka_open(:,5) = tmp(index); % 5 列目: 位相 (リファレンスマイクが出力)

[tmp2, index2] = sort(spki1_yoshioka_close(:,1));
tmp2 = spki1_yoshioka_close(:,1);
spki1_yoshioka_close(:,1) = tmp2(index2); % 1 列目: 周波数
tmp2 = spki1_yoshioka_close(:,2);
spki1_yoshioka_close(:,2) = tmp2(index2); % 2 列目: ゲイン (エラーマイクが出力)
tmp2 = spki1_yoshioka_close(:,3);
spki1_yoshioka_close(:,3) = tmp2(index2); % 3 列目: 位相 (エラーマイクが出力)
tmp2 = spki1_yoshioka_close(:,4);
spki1_yoshioka_close(:,4) = tmp2(index2); % 4 列目: ゲイン (リファレンスマイクが出力)
tmp2 = spki1_yoshioka_close(:,5);
spki1_yoshioka_close(:,5) = tmp2(index2); % 5 列目: 位相 (リファレンスマイクが出力)

```



```

[tmp2, index2] = sort(sp2_yoshioka_close(:,1));
tmp2 = sp2_yoshioka_close(:,1);
sp2_yoshioka_close(:,1) = tmp2(index2); % 1 列目: 周波数
tmp2 = sp2_yoshioka_close(:,2);
sp2_yoshioka_close(:,2) = tmp2(index2); % 2 列目: ゲイン (エラーマイクが出力)
tmp2 = sp2_yoshioka_close(:,3);
sp2_yoshioka_close(:,3) = tmp2(index2); % 3 列目: 位相 (エラーマイクが出力)
tmp2 = sp2_yoshioka_close(:,4);
sp2_yoshioka_close(:,4) = tmp2(index2); % 4 列目: ゲイン (リファレンスマイクが出力)
tmp2 = sp2_yoshioka_close(:,5);
sp2_yoshioka_close(:,5) = tmp2(index2); % 5 列目: 位相 (リファレンスマイクが出力)

f = sp1_yoshioka_open(:,1); % 周波数は, sp1_yoshioka_open で代表する .
w = 2*pi*f;
n = size(sp1_yoshioka_open,1); % 周波数応答のデータ数

f2 = sp1_yoshioka_close(:,1); % 周波数は, sp1_yoshioka_close で代表する .
w2 = 2*pi*f2;
n2 = size(sp1_yoshioka_close,1); % 周波数応答のデータ数

f0 = f;
% f0 = logspace(-0.3,1,260*8)'; % 周波数応答実験よりも細かく周波数を発生させる場合
% f0 = logspace(-1,1,400*8)'; % 周波数応答実験よりも細かく周波数を発生させる場合
% f0 = logspace(-1,2,600*8)'; % 周波数応答実験よりも細かく周波数を発生させる場合
w0 = 2*pi*f0;
n0 = size(w0,1); % 周波数応答のデータ数

Zch_pm = 1.0*121.18 /0.01; % アクチュエータ エラー:(電圧/パルス) 変換 (メートル/メートル)
Ych_pm = 1.0*72.443 /0.01; % アクチュエータ リファレンス:(電圧/パルス) 変換 (メートル/メートル)
Gzw_jw = sp1_yoshioka_open(:,2).*exp(i*pi/180.0*sp1_yoshioka_open(:,3))*Zch_pm; % 乱 エラー
Gyw_jw = sp1_yoshioka_open(:,4).*exp(i*pi/180.0*sp1_yoshioka_open(:,5))*Ych_pm; % 乱 リファレンス
Gzu_jw = sp2_yoshioka_open(:,2).*exp(i*pi/180.0*sp2_yoshioka_open(:,3))*Zch_pm; % 御 エラー
Gyu_jw = sp2_yoshioka_open(:,4).*exp(i*pi/180.0*sp2_yoshioka_open(:,5))*Ych_pm; % 御 リファレンス

```

```

Gzw_jw2 = spk1_yoshioka_close(:,2).*exp(i*pi/180.0*spk1_yoshioka_close(:,3))*Zch_pm;
乱 エラー
Gyw_jw2 = spk1_yoshioka_close(:,4).*exp(i*pi/180.0*spk1_yoshioka_close(:,5))*Ych_pm;
乱 リファレンス
Gzu_jw2 = spk2_yoshioka_close(:,2).*exp(i*pi/180.0*spk2_yoshioka_close(:,3))*Zch_pm;
御 エラー
Gyu_jw2 = spk2_yoshioka_close(:,4).*exp(i*pi/180.0*spk2_yoshioka_close(:,5))*Ych_pm;
御 リファレンス

```

```
% 周波数応答実験結果 1 の格納 %
```

```

for k = 1:n
    resp(1,1,k) = Gzw_jw(k);
    resp(1,2,k) = Gzu_jw(k);
    resp(2,1,k) = Gyw_jw(k);
    resp(2,2,k) = Gyu_jw(k);
end
%G_Hz = frd(resp, w, 'Units', 'Hz');
G_g1 = frd(resp, w);

```

```
% 周波数応答実験結果 2 の格納 %
```

```

for k2 = 1:n2
    resp2(1,1,k2) = Gzw_jw2(k2);
    resp2(1,2,k2) = Gzu_jw2(k2);
    resp2(2,1,k2) = Gyw_jw2(k2);
    resp2(2,2,k2) = Gyu_jw2(k2);
end
%G_Hz = frd(resp, w, 'Units', 'Hz');
G_g2 = frd(resp2, w2);

```

```
% Gyu のゲインを相対的に大きく見せかけるためにスケーリングをかける（近似精度が上がるように）
```

```

r = 0.2;
tmp = G_g1;
tmp(1,1) = tmp(1,1) * r^2;
tmp(1,2) = tmp(1,2) * r;
tmp(2,1) = tmp(2,1) * r;

```

```
% Gyu のゲインを相対的に大きく見せかけるためにスケーリングをかける（近似精度が上がるように）
```



```

NE1 = 2*(M+N); % 水槽周辺の境界要素の数
NE2 = 2*M_wd+2; % 水平板（外乱アクチュエータ）の境界要素の数
NE3 = 2*M_wd+2; % 水平板（制御アクチュエータ1）の境界要素の数
NE4 = 2*M_wd+2; % 水平板（制御アクチュエータ2）の境界要素の数
NE = NE1 + NE2 + NE3 + NE4; % 全要素の数
%NE = NE1 + NE2 ;%+ NE3;
NP = NE; % 節点数（節点 = 要素の中心の点）
X = zeros(NP); % 端点の座標
Y = zeros(NP); % 端点の座標
XM = zeros(NE); % 節点の座標
YM = zeros(NE); % 節点の座標
G = zeros(NP, NP);
H = zeros(NP, NP);
CC = zeros(NE);
SS = zeros(NE);
EL = zeros(NE);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%% 接点の読み込み %%%%%%%%%
%%% 水槽

```

```

l = 1;
for k=1:M % 底
    X(l) = DS*(k-1);
    Y(l) = 0;
    l = l + 1;
end
for k=1:N % 右端の壁
    X(l) = DS*M;
    Y(l) = DS*(k-1);
    l = l + 1;
end
for k=1:M % 水面
    X(l) = DS*(M-k+1);
    Y(l) = H_w;
    l = l + 1;
end
for k=1:N % 左端の壁（ピストン）
    X(l) = 0;
    Y(l) = DS*(N-k+1);
    l = l + 1;
end

```

```

%%% 水平板（外乱アクチュエータ）
% 左端の厚み分
X(1) = x_p1;
Y(1) = H_p;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 上面
    X(1) = x_p1 + DS*(k-1);
    Y(1) = H_p + DS;
    l = l + 1;
end
% 右端の厚み分
X(1) = x_p1 + W_p;
Y(1) = H_p + DS;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 下面
    X(1) = x_p1 + DS*(M_wd-k+1);
    Y(1) = H_p;
    l = l + 1;
end

%%% 水平板（制御アクチュエータ1）
% 左端の厚み分
X(1) = x_p2;
Y(1) = H_p;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 上面
    X(1) = x_p2 + DS*(k-1);
    Y(1) = H_p + DS;
    l = l + 1;
end
% 右端の厚み分
X(1) = x_p2 + W_p;
Y(1) = H_p + DS;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 下面
    X(1) = x_p2 + DS*(M_wd-k+1);
    Y(1) = H_p;
    l = l + 1;
end

```

```

%%% 水平板 (制御アクチュエータ2)
% 左端の厚み分
X(1) = x_p3;
Y(1) = H_p;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 上面
    X(1) = x_p3 + DS*(k-1);
    Y(1) = H_p + DS;
    l = l + 1;
end
% 右端の厚み分
X(1) = x_p3 + W_p;
Y(1) = H_p + DS;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 下面
    X(1) = x_p3 + DS*(M_wd-k+1);
    Y(1) = H_p;
    l = l + 1;
end

figure(6)
hold on;
plot(X(1:NE1), Y(1:NE1), 'b.-', ...
      X(NE1+1:NE1+NE2), Y(NE1+1:NE1+NE2), 'r.-', ...
      X(NE1+NE2+1:NE1+NE2+NE3), Y(NE1+NE2+1:NE1+NE2+NE3), 'g.-', ...
      X(NE1+NE2+NE3+1:NE1+NE2+NE3+NE4), Y(NE1+NE2+NE3+1:NE1+NE2+NE3+NE4), 'c.-'); % 節
点の位置を確認
xlabel('x[m]');
xlim([0.0,1.48]);
ylabel('z[m]');
ylim([0.0,0.45]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% 準備 %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
T(1) = -sqrt(3./5.);
T(2) = 0;
T(3) = sqrt(3./5.);

```

```

W(1) = 5./9.;
W(2) = 8./9.;
W(3) = 5./9.;

for k=1:NE1 % 水槽周囲の境界要素
    IE = k; JE = k+1; % 要素番号
    if k == NE1
        JE = 1;
    end
    XM(k) = (X(IE) + X(JE)) / 2.;
    YM(k) = (Y(IE) + Y(JE)) / 2.;
    DX = X(JE) - X(IE);
    DY = Y(JE) - Y(IE);
    EL(k) = sqrt(DX*DX + DY*DY);
    CC(k) = DX/EL(k);
    SS(k) = DY/EL(k);
end

for k=NE1+1:NE1+NE2 % 水平板（外乱アクチュエータ）周囲の境界要素
    IE = k; JE = k+1; % 要素番号
    if k == NE1+NE2
        JE = NE1+1;
    end
    XM(k) = (X(IE) + X(JE)) / 2.;
    YM(k) = (Y(IE) + Y(JE)) / 2.;
    DX = X(JE) - X(IE);
    DY = Y(JE) - Y(IE);
    EL(k) = sqrt(DX*DX + DY*DY);
    CC(k) = DX/EL(k);
    SS(k) = DY/EL(k);
end

for k=NE1+NE2+1:NE1+NE2+NE3 % 水平板（制御アクチュエータ1）周囲の境界要素
    IE = k; JE = k+1; % 要素番号
    if k == NE1+NE2+NE3
        JE = NE1+NE2+1;
    end
    XM(k) = (X(IE) + X(JE)) / 2.;
    YM(k) = (Y(IE) + Y(JE)) / 2.;
    DX = X(JE) - X(IE);
    DY = Y(JE) - Y(IE);

```

```

EL(k) = sqrt(DX*DX + DY*DY);
CC(k) = DX/EL(k);
SS(k) = DY/EL(k);
end

for k=NE1+NE2+NE3+1:NE1+NE2+NE3+NE4 % 水平板 (制御アクチュエータ 2) 周囲の境界要素
    IE = k; JE = k+1; % 要素番号
    if k == NE1+NE2+NE3+NE4
        JE = NE1+NE2+NE3+1;
    end
    XM(k) = (X(IE) + X(JE)) / 2.;
    YM(k) = (Y(IE) + Y(JE)) / 2.;
    DX = X(JE) - X(IE);
    DY = Y(JE) - Y(IE);
    EL(k) = sqrt(DX*DX + DY*DY);
    CC(k) = DX/EL(k);
    SS(k) = DY/EL(k);
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%アクチュエータ (3種類) の繰り返し動作を考慮 (start)%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% G, H の設定 %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%DIJ_error_hist = 0; % di_j 確認用。結局、k のループ中で毎回計算する必要はないことが
わかった。

```

```

for i=1:NP
    for j=1:NP
        HL = EL(j)/2.; % 第 j 要素の長さの半分
        DIJ = SS(j)*(XM(j) - XM(i)) - CC(j)*(YM(j) - YM(i)); % DIJ は k のループの外
        % DIJ_tmp = SS(j)*(XM(j) - XM(i)) - CC(j)*(YM(j) - YM(i));
        with i=j
            %% Gii, Hii %%%%
            G(i,i) = HL*(log(1./HL) + 1) / pi;
            H(i, i) = 1./2.;
        else
            %% Gij, Hij %%%%

```



```

GIJ = 0;
HIJ = 0;
for k=1:3
    XK = XM(j) + HL*T(k)*CC(j);
    YK = YM(j) + HL*T(k)*SS(j);
    XIJ = XK - XM(i);
    YIJ = YK - YM(i);
    RR = XIJ * XIJ + YIJ * YIJ;
    R = sqrt(RR);
    GIJ = GIJ + W(k) * log(1./R);
    HIJ = HIJ - W(k) * DIJ / RR;
    % dij 確認用
    %     DIJ(k) = SS(j)*XIJ - CC(j)*YIJ;
    %     HIJ = HIJ - W(k) * DIJ_tmp/RR;
    %     HIJ = HIJ - W(k) * DIJ(k)/RR;
    %     HIJ = HIJ - W(k) * (SS(j)*XIJ - CC(j)*YIJ)/RR; % dij を毎回計算
    するのは無駄
end
% dij 確認用
%     DIJ(4) = DIJ_tmp;
%     if(max(DIJ) - min(DIJ) > DIJ_error_hist)
%         DIJ_error_hist = max(DIJ) - min(DIJ); % 結局 0 だった。
%     end
G(i,j) = GIJ * HL / (2*pi);
H(i,j) = HIJ * HL / (2*pi);
end
end
end

Gzw1_jw = [];
Gyw1_jw = [];
Gzu1_jw = [];
Gyu1_jw = [];

for aqua1 = 1:2 % アクチュエータの数だけループを回す

    for count = 1:n

        count;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% 水面においては、関数値 us も勾配 qs も未知数だが、両者には
% qs = w*w/G * us の関係があるので、qs を消去する
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

gamma = (w(count)^2 - 1i*w(count)*beta) / GR; % 周波数応答を細かくしたい場合
は、w0 を使用する
K_hat1 = [H(:,1:M+N), ...
          H(:,M+N+1:M+N+M)-gamma*G(:,M+N+1:M+N+M), ...
          H(:,M+N+M+1:M+N+M+N+6*M_wd+6)];
% H(:,M+N+M+1:M+N+M+N+2*M_wd+2)];

if aqua1 == 1
    Q_tmp1 = [ones(N,1)*0; ... % 左端の壁(元、ピストン)
             [0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*1i*w(count)*A; ... % 水平板(外
乱アクチュエータ)
             [0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板(制御アクチュエー
タ1)
             [0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*0]; % 水平板(制御アクチュエー
タ2)
end
if aqua1 == 2
    %{
    %% 波の速度:C_pを求めるために、波の分散方程式を2分法で計算する %%
    A1 = 0.1; % 検索範囲(min)
    A2 = 2.0; % 検索範囲(max)
    EPS = 0.005; % 収束誤差

    %初期値の設定
    a1 = A1; % 検索初期値(min)
    a2 = A2; % 検索初期値(max)
    cen = 0.0; % (min)&(max)の中間値
    y = -1.0;

    %2分法の実行
    while(abs(y) >= EPS)
        cen = (a1 + a2) / 2.0;
        y = tanh(w(count)*H_w/cen) - w(count)*cen/GR;
        if(y < 0.00)
            a2 = cen;
        end
    end
end

```

```

        if(y > 0.00)
            a1 = cen;
        end

    end

    C_p = cen;
    %% 2分法終了 . ここから周波数のむだ時間を考慮した計算を行う %%
    %}
    %delay = -exp(-1i*w(count)*tau_t);
    %ver_delay = exp(-1i*w(count)/wave_v*ver_tau); % むだ時間 (制御アク 壁) を
考慮した場合

    Q_tmp1 = [ones(N,1)*0; %... % 左端の壁 (元、ピストン)
              [0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板 (外乱アクチュエー
タ)
              [0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*1i*w(count)*B; ... % 水平板 (制
御アクチュエータ 1 )
              [0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*0]; % 水平板 (制御アクチュエー
タ 2 )
    end
    f_hat1 = G(:,M+N+M+1:M+N+M+N+6*M_wd+6) * Q_tmp1;
    %f_hat1 = G(:,M+N+M+1:M+N+M+N+2*M_wd+2) * Q_tmp1;

    U_hat1 = K_hat1\f_hat1;
    Q_hat1 = [zeros(M+N,1); gamma*U_hat1(M+N+1:M+N+M); Q_tmp1];

    %%%% 周波数応答の格納
    if aqual == 1
        Gzw1_jw = [Gzw1_jw; Q_hat1(M+N+M-j_err+1)/(1i*w(count)*A)];
        Gyw1_jw = [Gyw1_jw; Q_hat1(M+N+M-j_ref+1)/(1i*w(count)*A)];
        U_hat_new1= U_hat1 / ((1i*w(count))^2)*GR; % 波面を確認するために、各
点の要素を計算
        %}
        if count == 71 % 3次共振周波数 f(71)==1.1194
            U_hat_res30 = [Q_hat1(1:M+N)/gamma; U_hat1(M+N+1:M+N+M) / (1i*w0(count)) +
                [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板 (外
乱アクチュエータ)
                [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];%; ... % 水平板
(制御アクチュエータ 1 )

```

```

                                %[0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];    % 水平板(制
御アクチュエータ 2 ) % 3次共振周波数の時、各点の要素
    end
    if count == 82 % FREE f(82)==1.2706
        U_hat_res35 = [Q_hat1(1:M+N)/gamma; U_hat1(M+N+1:M+N+M) / (1i*w0(count)) + F
                                [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板(外
乱アクチュエータ)
                                [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];%; ... % 水平板
(制御アクチュエータ 1 )
                                %[0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];    % 水平板(制
御アクチュエータ 2 ) % 4次共振周波数の時、各点の要素
    end

    if count == 90 % 4次共振周波数 f(90)==1.3932
        U_hat_res40 = [Q_hat1(1:M+N)/gamma; U_hat1(M+N+1:M+N+M) / (1i*w0(count)) + F
                                [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板(外
乱アクチュエータ)
                                [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];%; ... % 水平板
(制御アクチュエータ 1 )
                                %[0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];    % 水平板(制
御アクチュエータ 2 ) % 4次共振周波数の時、各点の要素
    end

    if count == 95 % FREE f(95)==1.4757
        U_hat_res45 = [Q_hat1(1:M+N)/gamma; U_hat1(M+N+1:M+N+M) / (1i*w0(count)) + F
                                [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板(外
乱アクチュエータ)
                                [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];%; ... % 水平板
(制御アクチュエータ 1 )
                                %[0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];    % 水平板(制
御アクチュエータ 2 ) % FREE時、各点の要素
    end

    if count ==101 % FREE f(101)==1.5812
        U_hat_res50 = [Q_hat1(1:M+N)/gamma; U_hat1(M+N+1:M+N+M) / (1i*w0(count)) + F
                                [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板(外
乱アクチュエータ)
                                [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];%; ... % 水平板
(制御アクチュエータ 1 )
                                %[0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];    % 水平板(制
御アクチュエータ 2 ) % FREE時、各点の要素
    end
    end
end

```

```

if aqua1 == 2
    Gzu1_jw      = [Gzu1_jw; Q_hat1(M+N+M-j_errr+1)/(1i*w(count)*B)];
    Gyu1_jw      = [Gyu1_jw; Q_hat1(M+N+M-j_ref+1)/(1i*w(count)*B)];
    U_hat_new2= U_hat1 / (1i*w(count));      % 波面を確認するために、各点の要
素を計算
end

if 0 % デバッグ用。内点の計算をする場合、1 にする。
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% 内点の計算 %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for row = 1:N
    Y0 = (row - 0.5)*DS;
    for col = 1:M
        X0 = (col - 0.5)*DS;
        U0 = 0;
        for j=1:NE
            HL = EL(j)/2.;
            for k=1:3
                XK = XM(j) + HL*CC(j)*T(k);
                YK = YM(j) + HL*SS(j)*T(k);
                DX = XK - X0;
                DY = YK - Y0;
                RR = DX*DX + DY*DY;
                R = sqrt(RR);
                U0 = U0 + HL*W(k)*Q_hat(j)*log(1./R)/(2*pi);
                U0 = U0 + HL*W(k)*U_hat(j)*(DX*SS(j) - DY*CC(j))/(2*pi*RR);
            end
        end
        phi_bem_hat(row,col) = U0;
    end
end

figure(2);
surf(x_bem, z_bem, imag(phi_bem_hat));
xlabel('x');
ylabel('z');
view([220,50]);

```



```

%          % チューエータを加振したときの結果を制御用ア
%          % クチューエータの場合に流用
% j_ref_cont = round(x_ref_cont/DS);
M = round(L/DS);          % 水槽の水平方向の分割数
N = round(H_w/DS);       % 水槽の垂直方向の分割数
M_wd = round(W_p/DS);    % 水平板の水平方向の分割数
x = 0:L/(M):L;           % 水平方向の座標
z = 0:H_w/(N):H_w;       % 垂直方向の座標
x_bem = ((1:M) - 0.5)*DS;
z_bem = ((1:N) - 0.5)*DS; % 垂直方向の座標

NE1 = 2*(M+N); % 水槽周辺の境界要素の数
NE2 = 2*M_wd+2; % 水平板（外乱アクチューエータ）の境界要素の数
NE3 = 2*M_wd+2; % 水平板（制御アクチューエータ1）の境界要素の数
NE4 = 2*M_wd+2; % 水平板（制御アクチューエータ2）の境界要素の数
NE = NE1 + NE2 + NE3 + NE4; % 全要素の数
%NE = NE1 + NE2 ;%+ NE3;
NP = NE; % 節点数（節点 = 要素の中心の点）
X = zeros(NP); % 端点の座標
Y = zeros(NP); % 端点の座標
XM = zeros(NE); % 節点の座標
YM = zeros(NE); % 節点の座標
G = zeros(NP, NP);
H = zeros(NP, NP);
CC = zeros(NE);
SS = zeros(NE);
EL = zeros(NE);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%% 接点の読み込み %%%%%%%%%
%%% 水槽
l = 1;
for k=1:M % 底
    X(l) = DS*(k-1);
    Y(l) = 0;
    l = l + 1;
end
for k=1:N % 右端の壁
    X(l) = DS*M;
    Y(l) = DS*(k-1);
    l = l + 1;
end

```

```

for k=1:M % 水面
    X(1) = DS*(M-k+1);
    Y(1) = H_w;
    l = l + 1;
end
for k=1:N % 左端の壁 (ピストン)
    X(1) = 0;
    Y(1) = DS*(N-k+1);
    l = l + 1;
end

%%% 水平板 (外乱アクチュエータ)
% 左端の厚み分
X(1) = x_p1;
Y(1) = H_p;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 上面
    X(1) = x_p1 + DS*(k-1);
    Y(1) = H_p + DS;
    l = l + 1;
end
% 右端の厚み分
X(1) = x_p1 + W_p;
Y(1) = H_p + DS;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 下面
    X(1) = x_p1 + DS*(M_wd-k+1);
    Y(1) = H_p;
    l = l + 1;
end

%%% 水平板 (制御アクチュエータ 1)
% 左端の厚み分
X(1) = x_p2;
Y(1) = H_p;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 上面
    X(1) = x_p2 + DS*(k-1);
    Y(1) = H_p + DS;
    l = l + 1;

```



```

end
% 右端の厚み分
X(1) = x_p2 + W_p;
Y(1) = H_p + DS;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 下面
    X(1) = x_p2 + DS*(M_wd-k+1);
    Y(1) = H_p;
    l = l + 1;
end

```

%% 水平板 (制御アクチュエータ 2)

```

% 左端の厚み分
X(1) = x_p3;
Y(1) = H_p;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 上面
    X(1) = x_p3 + DS*(k-1);
    Y(1) = H_p + DS;
    l = l + 1;
end
% 右端の厚み分
X(1) = x_p3 + W_p;
Y(1) = H_p + DS;
l = l + 1;
for k=1:M_wd % 下面
    X(1) = x_p3 + DS*(M_wd-k+1);
    Y(1) = H_p;
    l = l + 1;
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%% 準備 %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
T(1) = -sqrt(3./5.);
T(2) = 0;
T(3) = sqrt(3./5.);
W(1) = 5./9.;
W(2) = 8./9.;
W(3) = 5./9.;

```

```

for k=1:NE1 % 水槽周囲の境界要素
    IE = k; JE = k+1; % 要素番号
    if k == NE1
        JE = 1;
    end
    XM(k) = (X(IE) + X(JE)) / 2.;
    YM(k) = (Y(IE) + Y(JE)) / 2.;
    DX = X(JE) - X(IE);
    DY = Y(JE) - Y(IE);
    EL(k) = sqrt(DX*DX + DY*DY);
    CC(k) = DX/EL(k);
    SS(k) = DY/EL(k);
end

for k=NE1+1:NE1+NE2 % 水平板（外乱アクチュエータ）周囲の境界要素
    IE = k; JE = k+1; % 要素番号
    if k == NE1+NE2
        JE = NE1+1;
    end
    XM(k) = (X(IE) + X(JE)) / 2.;
    YM(k) = (Y(IE) + Y(JE)) / 2.;
    DX = X(JE) - X(IE);
    DY = Y(JE) - Y(IE);
    EL(k) = sqrt(DX*DX + DY*DY);
    CC(k) = DX/EL(k);
    SS(k) = DY/EL(k);
end

for k=NE1+NE2+1:NE1+NE2+NE3 % 水平板（制御アクチュエータ1）周囲の境界要素
    IE = k; JE = k+1; % 要素番号
    if k == NE1+NE2+NE3
        JE = NE1+NE2+1;
    end
    XM(k) = (X(IE) + X(JE)) / 2.;
    YM(k) = (Y(IE) + Y(JE)) / 2.;
    DX = X(JE) - X(IE);
    DY = Y(JE) - Y(IE);
    EL(k) = sqrt(DX*DX + DY*DY);
    CC(k) = DX/EL(k);
    SS(k) = DY/EL(k);
end

```

```

for k=NE1+NE2+NE3+1:NE1+NE2+NE3+NE4 % 水平板 (制御アクチュエータ 2) 周囲の境界要素
    IE = k; JE = k+1; % 要素番号
    if k == NE1+NE2+NE3+NE4
        JE = NE1+NE2+NE3+1;
    end
    XM(k) = (X(IE) + X(JE)) / 2.;
    YM(k) = (Y(IE) + Y(JE)) / 2.;
    DX = X(JE) - X(IE);
    DY = Y(JE) - Y(IE);
    EL(k) = sqrt(DX*DX + DY*DY);
    CC(k) = DX/EL(k);
    SS(k) = DY/EL(k);
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%アクチュエータ ( 3 種類 ) の繰り返し動作を考慮 (start)%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% G, H の設定 %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%DIJ_error_hist = 0; % dij 確認用。結局、k のループ中で毎回計算する必要はないことが
わかった。

```

```

for i=1:NP
    for j=1:NP
        HL = EL(j)/2.; % 第 j 要素の長さの半分
        DIJ = SS(j)*(XM(j) - XM(i)) - CC(j)*(YM(j) - YM(i)); % DIJ は k のループの外
        で一度計算すれば OK
        %    DIJ_tmp = SS(j)*(XM(j) - XM(i)) - CC(j)*(YM(j) - YM(i));
    if i==j
        %% Gii, Hii %%%%
        G(i,i) = HL*(log(1./HL) + 1) / pi;
        H(i, i) = 1./2.;
    else
        %% Gij, Hij %%%%
        GIJ = 0;
        HIJ = 0;
        for k=1:3
            XK = XM(j) + HL*T(k)*CC(j);

```

```

YK = YM(j) + HL*T(k)*SS(j);
XIJ = XK - XM(i);
YIJ = YK - YM(i);
RR = XIJ * XIJ + YIJ * YIJ;
R = sqrt(RR);
GIJ = GIJ + W(k) * log(1./R);
HIJ = HIJ - W(k) * DIJ / RR;
% dij 確認用
%     DIJ(k) = SS(j)*XIJ - CC(j)*YIJ;
%     HIJ = HIJ - W(k) * DIJ_tmp/RR;
%     HIJ = HIJ - W(k) * DIJ(k)/RR;
%     HIJ = HIJ - W(k) * (SS(j)*XIJ - CC(j)*YIJ)/RR; % dij を毎回計算
するのは無駄
end
% dij 確認用
%     DIJ(4) = DIJ_tmp;
%     if(max(DIJ) - min(DIJ) > DIJ_error_hist)
%         DIJ_error_hist = max(DIJ) - min(DIJ); % 結局 0 だった。
%     end
G(i,j) = GIJ * HL / (2*pi);
H(i,j) = HIJ * HL / (2*pi);
end
end
end

Gzw2_jw = [];
Gyw2_jw = [];
Gzu2_jw = [];
Gyu2_jw = [];

for aqua2 = 1:2 % アクチュエータの数だけループを回す

    for count = 1:n

        count;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% 水面においては、関数値 us も勾配 qs も未知数だが、両者には
% qs = w*w/G * us の関係があるので、qs を消去する
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

    gamma = (w(count)^2 - 1i*w(count)*beta) / GR; % 周波数応答を細かくしたい場合は、w0 を使用する
    K_hat2 = [H(:,1:M+N), ...
              H(:,M+N+1:M+N+M)-gamma*G(:,M+N+1:M+N+M), ...
              H(:,M+N+M+1:M+N+M+N+6*M_wd+6)];
    % H(:,M+N+M+1:M+N+M+N+2*M_wd+2)];

    if aqua2 == 1
        Q_tmp2 = [ones(N,1)*0; ... % 左端の壁(元、ピストン)
                  0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*1i*w(count)*A; ... % 水平板(外乱アクチュエータ)
                  0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板(制御アクチュエータ1)
                  0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*0; % 水平板(制御アクチュエータ2)
    end
    if aqua2 == 2
        %{
        %% 波の速度:C_pを求めるために、波の分散方程式を2分法で計算する %%
        A1 = 0.1; % 検索範囲 (min)
        A2 = 2.0; % 検索範囲 (max)
        EPS = 0.005; % 収束誤差

        %初期値の設定
        a1 = A1; % 検索初期値 (min)
        a2 = A2; % 検索初期値 (max)
        cen= 0.0; % (min)&(max) の中間値
        y = -1.0;

        %2分法の実行
        while(abs(y) >= EPS)
            cen = (a1 + a2) /2.0;
            y = tanh(w(count)*H_w/cen) - w(count)*cen/GR;
            if(y < 0.00)
                a2 = cen;
            end
            if(y > 0.00)
                a1 = cen;
            end
        end

    end
end

```

```

C_p = cen;
%%% 2分法終了 . ここから周波数のむだ時間を考慮した計算を行う %%%
%}
delay = -exp(-1i*w(count)*tau);
Q_tmp2 = [ones(N,1)*0; %... % 左端の壁 (元、ピストン)
          [0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板 (外乱アクチュエータ)
          [0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*1i*w(count)*B; ... % 水平板 (制御アクチュエータ1)
          [0; ones(M_wd,1); 0; -ones(M_wd,1)]*delay*1i*w(count)*B]; % 水平板 (制御アクチュエータ2)
end
f_hat2 = G(:,M+N+M+1:M+N+M+N+6*M_wd+6) * Q_tmp2;
%f_hat2 = G(:,M+N+M+1:M+N+M+N+2*M_wd+2) * Q_tmp2;

U_hat2 = K_hat2\f_hat2;
Q_hat2 = [zeros(M+N,1); gamma*U_hat2(M+N+1:M+N+M); Q_tmp2];

%%%%% 周波数応答の格納
if aqua2 == 1
    Gzw2_jw = [Gzw2_jw; Q_hat2(M+N+M-j_err+1)/(1i*w(count)*A)];
    Gyw2_jw = [Gyw2_jw; Q_hat2(M+N+M-j_ref+1)/(1i*w(count)*A)];
    U_hat_new2= U_hat2 / ((1i*w0(count))^2)*GR; % 波面を確認するために、
各点の要素を計算
    %{
    if count == 71 % 3次共振周波数 f(71)==1.1194
        U_hat_res30 = [Q_hat1(1:M+N)/gamma; U_hat1(M+N+1:M+N+M) / (1i*w0(count)) +
                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板 (外乱アクチュエータ)
                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];%; ... % 水平板 (制御アクチュエータ1)
                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0]; % 水平板 (制御アクチュエータ2) % 3次共振周波数の時、各点の要素
    end
    if count == 82 % FREE f(82)==1.2706
        U_hat_res35 = [Q_hat1(1:M+N)/gamma; U_hat1(M+N+1:M+N+M) / (1i*w0(count)) +
                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板 (外乱アクチュエータ)
                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];%; ... % 水平板 (制御アクチュエータ1)

```

```

                                %[0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];    % 水平板(制
御アクチュエータ 2 ) % 4次共振周波数の時、各点の要素
                                end

                                if count == 90 % 4次共振周波数 f(90)==1.3932
                                    U_hat_res40 = [Q_hat1(1:M+N)/gamma; U_hat1(M+N+1:M+N+M) / (1i*w0(count)) +
                                                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板(外
乱アクチュエータ)
                                                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];%; ... % 水平板
(制御アクチュエータ 1 )
                                    %[0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];    % 水平板(制
御アクチュエータ 2 ) % 4次共振周波数の時、各点の要素
                                end
                                if count == 95 % FREE f(95)==1.4757
                                    U_hat_res45 = [Q_hat1(1:M+N)/gamma; U_hat1(M+N+1:M+N+M) / (1i*w0(count)) +
                                                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板(外
乱アクチュエータ)
                                                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];%; ... % 水平板
(制御アクチュエータ 1 )
                                    %[0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];    % 水平板(制
御アクチュエータ 2 ) % FREE時、各点の要素
                                end
                                if count ==101 % FREE f(101)==1.5812
                                    U_hat_res50 = [Q_hat1(1:M+N)/gamma; U_hat1(M+N+1:M+N+M) / (1i*w0(count)) +
                                                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0; ... % 水平板(外
乱アクチュエータ)
                                                    [0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];%; ... % 水平板
(制御アクチュエータ 1 )
                                    %[0; ones(M_wd,1); 0 ; -ones(M_wd,1)]*0];    % 水平板(制
御アクチュエータ 2 ) % FREE時、各点の要素
                                end
                                %}
                                end
                                if aqua2 == 2
                                    Gzu2_jw      = [Gzu2_jw; Q_hat2(M+N+M-j_err+1)/(1i*w(count)*B)];
                                    Gyu2_jw      = [Gyu2_jw; Q_hat2(M+N+M-j_ref+1)/(1i*w(count)*B)];
                                end
                                end

```

if 0 % デバッグ用。内点の計算をする場合、1 にする。

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%% 内点の計算 %%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%

for row = 1:N
    Y0 = (row - 0.5)*DS;
    for col = 1:M
        X0 = (col - 0.5)*DS;
        U0 = 0;
        for j=1:NE
            HL = EL(j)/2.;
            for k=1:3
                XK = XM(j) + HL*CC(j)*T(k);
                YK = YM(j) + HL*SS(j)*T(k);
                DX = XK - X0;
                DY = YK - Y0;
                RR = DX*DX + DY*DY;
                R = sqrt(RR);
                U0 = U0 + HL*W(k)*Q_hat(j)*log(1./R)/(2*pi);
                U0 = U0 + HL*W(k)*U_hat(j)*(DX*SS(j) - DY*CC(j))/(2*pi*RR);
            end
        end
        phi_bem_hat(row,col) = U0;
    end
end

figure(2);
surf(x_bem, z_bem, imag(phi_bem_hat));
xlabel('x');
ylabel('z');
view([220,50]);

end

end

end %aqua2 の繰り返し終了

for k4 = 1:n
    resp5(1,1,k4) = Gzw2_jw(k4);
    resp5(1,2,k4) = Gzu2_jw(k4);
    resp5(2,1,k4) = Gyw2_jw(k4);

```



```

set(gca, 'XTick', [0.315, 0.76, 1.165, 1.48]);
%set(gca, 'XTick', [0.315, 0.76, 1.165, 1.48], 'YTick', [0, 0.18]);
ylabel('z[m]');
%ylim([0.0, 0.45]);

%}

% Gzw
figure(1);
hold on;
plot([0.440; 0.440], [-80; 40], 'c--');
%text([0.440; 0.440], [-70; -70], '1st resonance');
plot([0.830; 0.830], [-80; 40], 'c--');
%text([0.826; 0.826], [-70; -70], '\leftarrow 2nd resonance[0.826]', 'FontSize', 8);
plot([1.14; 1.14], [-80; 40], 'c--');
%text([1.14; 1.14], [-50; -50], '\leftarrow 3rd[1.14]', 'FontSize', 8);
%plot([1.39; 1.39], [-80; 40], 'c--');
%text([1.39; 1.39], [-30; -30], '\leftarrow 4th[1.39]', 'FontSize', 8);
%plot([1.56; 1.56], [-80; 40], 'c--');
%text([1.59; 1.59], [-50; -50], '\leftarrow 5th[1.59]', 'FontSize', 8);
%plot([1.71; 1.71], [-80; 40], 'c--');
%text([1.71; 1.71], [-50; -50], '\leftarrow 5th[1.59]', 'FontSize', 8);
bode(G2_g(1,1), 'b-', G1_g(1,1), 'r-');
legend('case.2', 'case.pra', 'Location', 'SouthWest');
% bode(G_g1(1,1), 'm.', G_g2(1,1), 'b.', G1_g(1,1), 'g-');
% legend('exp:yoshioka.', 'exp:120528.', 'plate2', 'Location', 'SouthWest');
xlim([0.5, 5]);
grid on;
title('');
axis([0.5, 5, -4320, 720]); % phase
h = get(1);
axis(h.Children(4), [0.5, 5, -60, 30]); % gain
set(findobj('type', 'line'), 'linewidth', 1.5);
set(findobj('type', 'line'), 'markersize', 8)
%print -depsc data/Gzw.eps

% Gzu

```

```

figure(2);
hold on;
plot([0.440;0.440],[-80;40], 'c--');
%text([0.440;0.440],[-70;-70], '1st resonance');
plot([0.830;0.830],[-80;40], 'c--');
%text([0.826;0.826],[-70;-70], '\leftarrow2nd resonance[0.826]', 'FontSize', 8);
plot([1.14;1.14],[-80;40], 'c--');
%text([1.14;1.14],[-50;-50], '\leftarrow3rd[1.14]', 'FontSize', 8);
%plot([1.39;1.39],[-80;40], 'c--');
%text([1.39;1.39],[-30;-30], '\leftarrow4th[1.39]', 'FontSize', 8);
%plot([1.56;1.56],[-80;40], 'c--');
%text([1.59;1.59],[-50;-50], '\leftarrow5th[1.59]', 'FontSize', 8);
%plot([1.71;1.71],[-80;40], 'c--');
%text([1.71;1.71],[-50;-50], '\leftarrow5th[1.59]', 'FontSize', 8);
bode(G2_g(1,2), 'b-', G1_g(1,2), 'r-');
legend('case.2', 'case.pra', 'Location', 'SouthWest');
% bode(G_g1(1,2), 'm.', G_g2(1,2), 'b.', G1_g(1,2), 'g-');
% legend('exp:yoshioka.', 'exp:120528.', 'plate2', 'Location', 'SouthWest');
xlim([0.5,5]);
grid on;
title('');
axis([0.5, 5, -4320, 720]); % phase
h = get(2);
axis(h.Children(4), [0.5, 5, -60, 30]); % gain
set(findobj('type', 'line'), 'linewidth', 1.5);
set(findobj('type', 'line'), 'markersize', 8)
%print -depsc data/Gzu.eps

% Gyw
figure(3);
hold on;
plot([0.440;0.440],[-80;40], 'c--');
%text([0.440;0.440],[-70;-70], '1st resonance');
plot([0.830;0.830],[-80;40], 'c--');
%text([0.826;0.826],[-70;-70], '\leftarrow2nd resonance[0.826]', 'FontSize', 8);
plot([1.14;1.14],[-80;40], 'c--');
%text([1.14;1.14],[-50;-50], '\leftarrow3rd[1.14]', 'FontSize', 8);
%plot([1.39;1.39],[-80;40], 'c--');
%text([1.39;1.39],[-30;-30], '\leftarrow4th[1.39]', 'FontSize', 8);
%plot([1.56;1.56],[-80;40], 'c--');
%text([1.59;1.59],[-50;-50], '\leftarrow5th[1.59]', 'FontSize', 8);

```

```

%plot([1.71;1.71],[-80;40], 'c--');
%text([1.71;1.71],[-50;-50], '\leftarrow5th[1.59] ', 'FontSize', 8);
bode(G2_g(2,1),'b-', G1_g(2,1), 'r-');
legend('case.2', 'case.pra', 'Location', 'SouthWest');
% bode(G_g1(2,1),'m.',G_g2(2,1), 'b.', G1_g(2,1), 'g-');
% legend('exp:yoshioka.', 'exp:120528.', 'plate2', 'Location', 'SouthWest');
xlim([0.5,5]);
grid on;
title('');
axis([0.5, 5, -4320, 720]); % phase
h = get(3);
axis(h.Children(4),[0.5, 5, -60, 30]); % gain
set(findobj('type','line'),'linewidth',1.5);
set(findobj('type','line'),'markersize',8)
%print -depsc data/Gyw.eps

% Gyu
figure(4);
hold on;
plot([0.440;0.440],[-80;40], 'c--');
%text([0.440;0.440],[-70;-70], '1st resonance');
plot([0.830;0.830],[-80;40], 'c--');
%text([0.826;0.826],[-70;-70], '\leftarrow2nd resonance[0.826]', 'FontSize', 8);
plot([1.14;1.14],[-80;40], 'c--');
%text([1.14;1.14],[-50;-50], '\leftarrow3rd[1.14] ', 'FontSize', 8);
%plot([1.39;1.39],[-80;40], 'c--');
%text([1.39;1.39],[-30;-30], '\leftarrow4th[1.39] ', 'FontSize', 8);
%plot([1.56;1.56],[-80;40], 'c--');
%text([1.59;1.59],[-50;-50], '\leftarrow5th[1.59] ', 'FontSize', 8);
%plot([1.71;1.71],[-80;40], 'c--');
%text([1.71;1.71],[-50;-50], '\leftarrow5th[1.59] ', 'FontSize', 8);
bode(G2_g(2,2),'b-', G1_g(2,2), 'r-');
legend('case.2', 'case.pra', 'Location', 'SouthWest');
% bode(G_g1(2,2),'m.',G_g2(2,2), 'b.', G1_g(2,2), 'g-');
% legend('exp:yoshioka.', 'exp:120528.', 'plate2', 'Location', 'SouthWest');
xlim([0.5,5]);
grid on;
title('');
axis([0.5, 5, -4320, 720]); % phase
h = get(4);

```

```
axis(h.Children(4),[0.5, 5, -60, 30]); % gain
set(findobj('type','line'),'linewidth',1.5);
set(findobj('type','line'),'markersize',8)
%print -depsc data/Gyu.eps
```

```
save data/nominal_BEM6_directional_y.mat G_g1 w
```

```
*****
```