

東京大学大学院新領域創成科学研究科
海洋技術環境学専攻
2019 年度
修士論文

複数カラム型浮体の渦励起運動予測モデルを用いた
カラム間干渉影響に関する研究

Effect of column interference on vortex induced
motion of multi columns floater

2020 年 2 月 28 日提出

47-186647 豊田 洋介

指導教員

平林紳一郎 准教授

目次

第1章. 序論	7
1.1. 世界のエネルギー事情	7
1.2. 日本のエネルギー事情	8
1.3. 陸上風力発電と洋上風力発電	8
1.4. Vortex Induced Vibration(VIV)と Vortex Induced Motion(VIM)について	8
1.5. 研究背景	9
1.6. 研究目的	9
第2章. VIM 挙動解析プログラム	10
2.1. VIM モデル	10
2.2. VIM 運動方程式	10
2.3. 揚力モデル法	11
2.4. プログラム概要	11
2.5. 振動状態を推定する方法	12
2.6. 流体力関数	12
2.7. 浮体の応答の算出	13
第3章. 強制加振実験	14
3.1. 実験概要	14
3.2. 実験条件	14
3.2.1. 加振条件	14
3.2.2. 一様流流速	15
3.3. 実験設備	16
3.3.1. 実験模型	16
3.3.2. 計測機器	16
3.3.3. 強制加振装置(EAS6X-D060-AZAAD-3,オリエンタルモーター)	18
3.3.4. 全体の構造	19
3.3.5. 実験施設	19
第4章. 強制加振実験の解析手法	21
4.1. 各種データの変換	21
4.1.1. ロードセル電圧データの荷重データへの変換	21
4.1.2. 流れと直交する荷重データの揚力データへの変換	21
4.1.3. 張力計電圧データの変位(位相)データへの変換	22
4.2. 抗力係数, 揚力係数の算出	23
4.3. 減衰係数, 付加質量係数の算出	23
4.4. 減衰係数, 付加質量係数のデータベース作成	24

第5章. 強制加振実験の解析結果.....	26
5.1. 抗力係数の平均値の考察.....	26
5.2. 揚力係数と抗力係数の標準偏差の考察.....	32
5.3. 減衰係数の考察.....	37
5.4. 付加質量係数の考察.....	39
5.5. 流体力関数のデータベース.....	40
5.6. 考察のまとめ.....	42
5.6.1. 抗力係数の平均値.....	42
5.6.2. 揚力係数と抗力係数の標準偏差.....	43
5.6.3. 減衰係数と付加質量係数.....	43
第6章. VIM 挙動解析.....	44
6.1. 静止状態からのシミュレーション.....	44
6.1.1. S/D=3.0 のケース.....	44
6.1.2. S/D=2.0 のケース.....	47
6.2. 強制加振状態からのシミュレーション結果.....	48
6.3. 換算流速を変えた場合のシミュレーション結果.....	49
6.3.1. S/D=3.0 のケース.....	49
6.3.2. S/D=2.0 のケース.....	53
第7章. 結論.....	56
7.1. 強制加振実験.....	56
7.2. VIM 予測シミュレーション.....	56
第8章. 参照文献.....	58
第9章. 謝辞.....	59

Figure 1-1 Changes in energy consumption.[1]	7
Figure 2-1 VIM simulation model.	10
Figure 2-2 Step of VIM simulation.....	11
Figure 2-3 Contour of damping coefficient in previous study [6].	13
Figure 3-1 Oscillation cases of pattern1.....	15
Figure 3-2 Oscillation cases of pattern2.....	15
Figure 3-3 Cylinder.	16
Figure 3-4 Loadcell.	16
Figure 3-5 Anemometer.[8]	17
Figure 3-6 Forced oscillation machine.	18
Figure 3-7 Example of control signal.....	18
Figure 3-8 Overall structure.....	19
Figure 3-9 dial and fluid velocity.....	19
Figure 4-1 Movable part of load cell.....	21
Figure 4-2 How to make displacement data.	22
Figure 4-3 How to make database.	25
Figure 5-1 Wake.	26
Figure 5-2 Mean of drag with amplitude(S/D=2.0 front).	26
Figure 5-3 Amplitude and wake.	27
Figure 5-4 Mean of drag with amplitude(S/D=2.0 rear).	27
Figure 5-5 Mean of drag with frequency(S/D=2.0 front).....	28
Figure 5-6 Frequency and wake.	28
Figure 5-7 Mean of drag S/D($fD/U=0.12$ A/D=0.4 rear).	29
Figure 5-8 Mean of drag with columns space(rear).	29
Figure 5-9 Rear cylinder in wake flow.	30
Figure 5-10 Mean of drag with columns space(front).....	31
Figure 5-11 Mean of drag with amplitude(S/D=1.5 rear).	32
Figure 5-12 Wake of two front columns.	32
Figure 5-13 Disassembly of vortex force.	33
Figure 5-14 Std of lift with amplitude(S/D=2.0).....	34
Figure 5-15 Std of drag with amplitude(S/D=2.0).	34
Figure 5-16 Std of lift with frequency(S/D=2.0).	35
Figure 5-17 Std of drag with frequency(S/D=2.0).	35
Figure 5-18 Std of lift with columns space(front).....	36
Figure 5-19 Wake of forced oscillation.....	36
Figure 5-20 Std of lift with columns space(rear).....	37

Figure 5-21 Damping coefficient($S/D=3.0$).....	37
Figure 5-22 Damping coefficient ($S/D=3.0$ front).....	38
Figure 5-23 Damping coefficient ($S/D=3.0$ rear).....	38
Figure 5-24 Added-mass coefficient ($S/D=3.0$).....	39
Figure 5-25 Added-mass with columns space.	40
Figure 5-26 Contour of damping coefficient($S/D=2.0$).	41
Figure 5-27 Contour of damping coefficient($S/D=3.0$).	41
Figure 5-28 Contour of added-mass coefficient($S/D=2.0$).	42
Figure 5-29 Contour of added-mass coefficient($S/D=3.0$).	42
Figure 6-1 Time series1($S/D=3.0$ $V_r=8$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.0$).	45
Figure 6-2 Time series2($S/D=3.0$ $V_r=8$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.0$).	45
Figure 6-3 Vibrational status on damping($S/D=3$ $V_r=8$ $fD/U=0.0$ $A/D=0.0$).....	46
Figure 6-4 Vibrational status on added mass($S/D=3$ $V_r=8$ $fD/U=0.0$ $A/D=0.0$).	46
Figure 6-5 Time series1($S/D=2.0$ $V_r=8$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.0$).	47
Figure 6-6 Vibrational status on damping($S/D=2$ $V_r=8$ $fD/U=0.0$ $A/D=0.0$).....	47
Figure 6-7 Time series1($S/D=3.0$ $V_r=8$ $fD/U=0.12$ $A/D=0.08$).	48
Figure 6-8 Vibrational status on damping($S/D=3.0$ $V_r=8$ $fD/U=0.12$ $A/D=0.08$).....	48
Figure 6-9 Time series1($S/D=3.0$ $V_r=6$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).	49
Figure 6-10 Time series2($S/D=3.0$ $V_r=6$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).	50
Figure 6-11 Vibrational status on damping($S/D=3$ $V_r=6$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).....	50
Figure 6-12 Time series1($S/D=3.0$ $V_r=9$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).	51
Figure 6-13 Vibrational status on damping($S/D=3$ $V_r=10$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).....	51
Figure 6-14 Vibrational status on damping($S/D=3$ $V_r=13$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).....	52
Figure 6-15 Vibrational status on damping($S/D=2$ $V_r=7$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).....	53
Figure 6-16 Vibrational status on damping($S/D=2$ $V_r=10$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).....	53
Figure 6-17 Vibrational status on damping($S/D=2$ $V_r=12$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).....	54
Figure 6-18 Vibrational status on damping($S/D=2$ $V_r=12$ $fD/U=0.08$ $A/D=0.8$).....	54
Figure 6-19 Velocity and amplitude($S/D=3.0$).....	55

表目次

Table 2-1 Item in equation.....	10
Table 2-2 Variable and coefficient in equation.	10
Table 2-3 Coefficient in definition formula.	12
Table 3-1 Experimental condition.....	14
Table 4-1 Mass to be remove.	22
Table 6-1 Parameter in simulation.....	44
Table 6-2 Parameter in experiment and simulation.....	55

第1章. 序論

1.1. 世界のエネルギー事情

人類は18世紀中ごろに起きた産業革命により、それまで人の手により行われてきた作業を蒸気機関により自動化することに成功し、近代社会を創り上げることに成功した。蒸気機関は石炭をエネルギー源とする。人間社会の近代化により、石炭をはじめとするエネルギーの消費が急激に高まった。20世紀中ごろから、それまで主要エネルギーであった石炭に代わって、使いやすく用途が多様な石油が主要なエネルギー源となった。石炭は工場や輸送機器の原動力として活躍していたが、石油は化学製品や家電製品のエネルギー源としても利用できるため、人間の経済活動の規模をより拡大させることになった。社会全体の生産力は人類の生活基盤を向上させるが、それにより人口も急激に増加することになる。人口増加により社会全体の生産力がさらに高まるため、この動きは急速に加速し、世界のエネルギー消費量も年々増加している。

一方で、化石燃料は燃焼するときにCO₂が発生するため、地球温暖化を促進させる原因になっていると言われている。また、化石燃料は将来的には枯渇するとの懸念もある。以上2点の理由より、化石燃料に頼らない経済活動は人類全員の課題でもあるといえるだろう。再生可能エネルギーは二酸化炭素を排出せず、またエネルギー源が無尽蔵にあるため、これらの問題の解決に寄与するであろう。

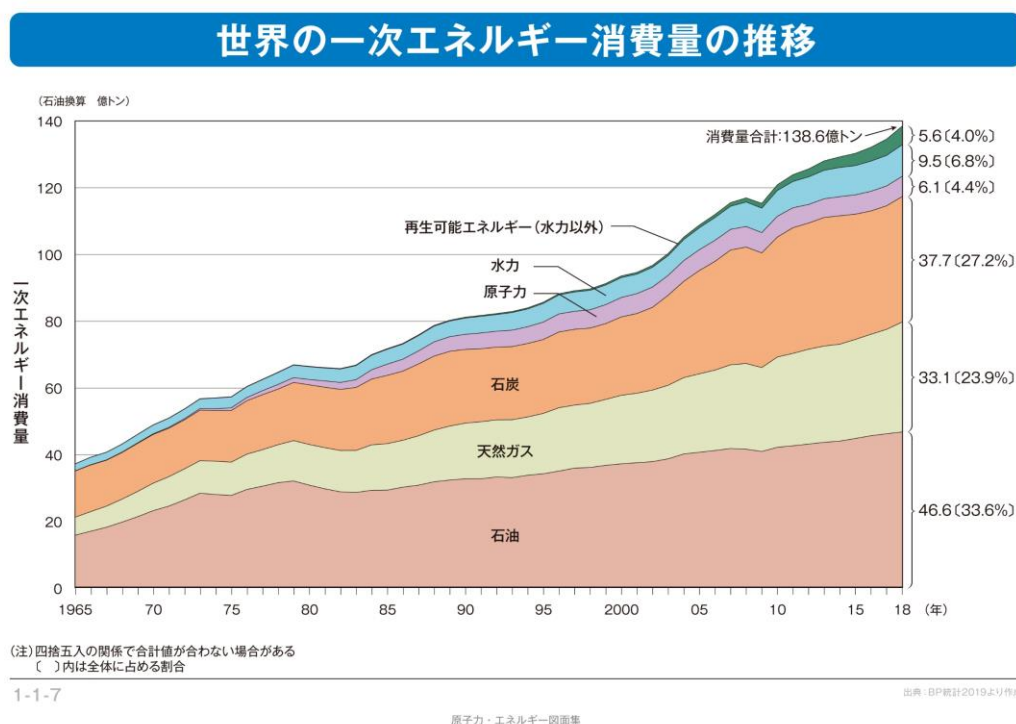


Figure 1-1 Changes in energy consumption.[1]

1.2. 日本のエネルギー事情

日本社会は 1960 年代に高度経済成長を迎え、日本経済は急速に拡大した。日本は当時まで国産の石炭を主要なエネルギー源として利用していたが、その当時から日本社会においても石炭が石油に代替されるようになった。1980 年代には 2 度の石油危機が発生し、石油の大半を輸入に頼っている日本は大打撃を受けた。これを受け日本はエネルギーセキュリティを高める努力をしてきた。しかしながら、2011 年に発生した東日本大震災では福島原子力発電にて事故が発生し、その後国内の原子力発電所は運営停止を余儀なくされた。それにより、石油が日本のエネルギー源のうち占める割合が高まった。こういった背景に加え、世界における地球温暖化抑制、化石燃料の使用量抑制の必要性を考えると、日本も今後は再生可能エネルギーの開発に積極的に取り組んでいく必要がある。

日本は、世界で 7 番目に広い排他的経済水域を保有している。この広大な海域を有効活用した再生可能エネルギーの 1 つに、洋上風力発電が挙げられる。

1.3. 陸上風力発電と洋上風力発電

浮体式洋上風力発電とは、陸上に設置するタイプの一般的な風力発電機を、海の上に浮かべて設置して発電する発電方法である。陸上に設置する風車を陸上風車、そうでないものを洋上風車と呼ぶ。洋上風車はさらに、風車の根元を海底に設置するものと海上に浮かべて設置するものの 2 種類があり、前者を着底式洋上風車、後者を浮体式洋上風車と呼ぶ。陸上風車と比べて洋上風車のメリットは、「陸上と比べて風が強いこと」「人間社会から離れているため騒音公害などの社会的制約が少ないこと」「まだ利用されていない海域がたくさんあること」などが挙げられる一方で、「設置コスト、メンテナンスコストがかかること」「電力の輸送距離が長くなってしまうこと」「海洋環境への影響が少なからずあること」などが挙げられる。

日本の国土は遠浅の海が少なく、海底の深い海域が多い。着底式洋上風車は海底が水深 50m 以内向けのものであるため、日本近海に設置するには向いていない。そこで、日本では浮体式洋上風力発電が推進されている。浮体式洋上風力発電は機体を海底に固定しない(係留索でつなぐだけ)ため、海流や潮流の影響で大きく揺れ動く可能性がある。特に、没水部が複数のカラムから成るセミサブ型機体は、カラム間での干渉により複雑な挙動を示すため、メカニズムの解明、シミュレーションモデルの確立が必要である。

1.4. Vortex Induced Vibration(VIV)と Vortex Induced Motion(VIM)について

流れの中に置かれた物体は、後方にカルマン渦と呼ばれる渦を放出する。カルマン渦が放出されると圧力変動が生じ、その圧力変動によって流れと直交方向に励起される現象を、構造

によって Vortex-Induced Vibration(VIV)もしくは Vortex-Induced Motion(VIM)と呼ぶ。2つの現象は、構造に次のような違いがある。

- ・ アスペクト比…アスペクト比の大きいライザー管やつり橋など細長い形状をした構造物に発生するのが VIV, アスペクト比の小さい海上構造物などに発生するのが VIM と呼ばれる。

また、これに伴い次の2つの特徴にも違いが生じる。

- ・ 復元力…福岡[2]は振動の復元が構造物の弾性によるものを VIV, 係留索によるものを VIM と定義している。VIV は振動する構造そのものに疲労破壊などの危険性が懸念されるが、VIM は係留索など付随物への負担が懸念される。(浮体式洋上風車も、係留索の疲労破壊の危険性、それを抑えるためのメンテナンスコストが課題となっている)
- ・ 自由表面と端部影響…アスペクト比の大きい構造物は近似的に自由表面と端部影響がないものとみなして振動を考えることができる。よって、自由表面と端部の影響がないのが VIV, 影響があるのが VIM といえる。

1.5. 研究背景

浮体の VIM 現象の詳細な把握のために、近年さまざまな研究が行われてきた。Alam[3]は一様流中の2カラムに働く流体力がカラム間距離に大きく影響されることを確認した。Goncalves[4]は4カラムまたは4角柱からなる浮体に様々な流速の一様流を当てて、VIMを発生させ、換算流速とVIMの振幅の関係性を調べた。Gopalkrishan[5]は単一カラムの強制動揺実験により流体力データベースを作成し、VIVのシミュレーションに成功した。手嶋[6]は複数カラム型浮体を加振した際に浮体にかかる流体力をCFDにより求め、VIMのシミュレーションモデルを作成した。椎葉[7]は複数カラムの強制加振実験により流体力データベースを作成し、VIMのシミュレーションモデルを作成した。また、カラム間距離によって浮体にかかる流体力が変化することを確認した。しかし、データベースの範囲がVIMの安定領域を網羅しておらず、VIMの安定領域におけるデータは外挿に頼ってシミュレーションを行っていた。また、2種類のカラム間距離において実験を行ったため、カラム間距離とカラム間干渉影響の分析が十分にできていないといった課題があった。

1.6. 研究目的

本研究では、椎葉[7]で開発されたVIM挙動解析モデルに残った2点の課題に着目し、以下2点の目標を達成することで、複数カラム型浮体のVIM現象の予測を目的とする。

- ・ カラム間距離と流体力の分析
- ・ VIM安定領域を網羅したVIM挙動モデルの作成

第2章. VIM 挙動解析プログラム

2.1. VIM モデル

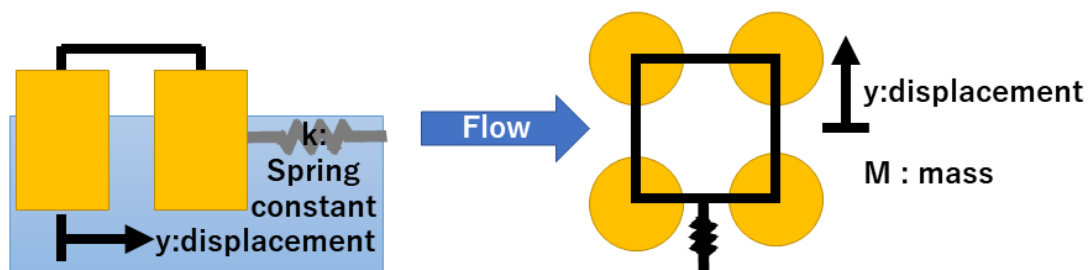


Figure 2-1 VIM simulation model.

Figure2-1 のように、4つのコラムから成り、弾性ばねに固定された浮体が一様流中に置かれた状況を想定する。流れと直交方向の変位を y とし、 y の値を時系列で予測することを、この挙動解析プログラムの機能とする。

2.2. VIM 運動方程式

当研究では、式(1)で表される VIM の運動方程式を数値的に解くことで、複数コラム型浮体の挙動を予測する。

$$M\ddot{y} = -ky - c\dot{y} - MC_a\ddot{y} + F_v \sin \omega_v t \quad (1)$$

式(1)の各項が表す値は Table2-1 の通りである。

Table 2-1 Item in equation.

ky	Mooring force (proportional to displacement)
$c\dot{y}$	Damping force (proportional to speed)
$MC_a\ddot{y}$	Added mass force (proportional to acceleration)
$F_v \sin \omega_v t$	Lift force with different period from displacement (only when the vortex shedding cycle and vibration cycle are different)

また、各変数及び係数が表す値は Table2-2 の通りである。

Table 2-2 Variable and coefficient in equation.

y	Displacement of floater. One of the equation solutions.
\dot{y}	Speed of floater. One of the equation solutions.

\ddot{y}	Acceleration of floater. One of the equation solutions.
M	Mass of floater
k	Elastic coefficient of mooring system
c	Damping coefficient (proportional coefficient of damping force)
C_a	Added mass coefficient (proportional coefficient of added mass force)
F_v	Absolute value off the lift force with different period from displacement
ω_v	Frequency of lift the lift force with different period from displacement
t	time

これらの変数のうち、 c , C_a , F_v は振動状態(振幅と周波数)によって変化する。

2.3. 揚力モデル法

揚力モデル法とは、VIM の挙動予測に用いる、半実験的手法である。運動方程式を構成する係数のうち、振動状態によって変化する係数を実験で求めることで、データベースを用いて運動方程式を数值的に解析する手法である。

2.4. プログラム概要

プログラムの手順を Figure2-2 に示した。

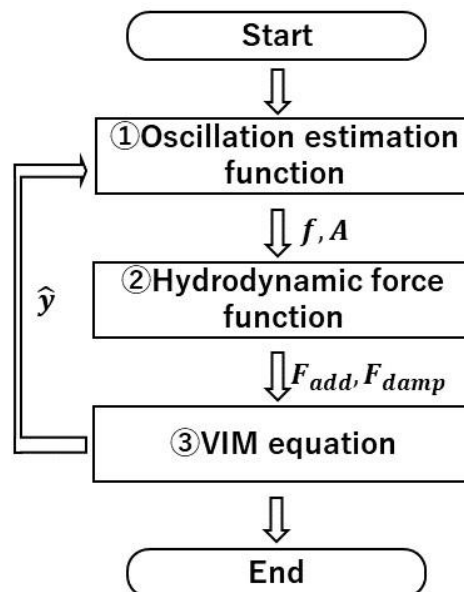


Figure 2-2 Step of VIM simulation.

1. 過去の変位履歴から現在の振動状態を推定する。振動状態とは、振幅と周波数を指す。
 2. データベースを参照して、振動状態に応じた流体力を求める。
 3. 求めた流体力を運動方程式に代入して、応答を求める。
- 1~3 を繰り返すことで、VIM の時系列応答を予測する。

2.5. 振動状態を推定する方法

変位履歴から振動状態(振幅と周波数)を推定する際次の振動推定フィルタを用いた。なお、当振動推定フィルタは手嶋[6]によって考案されたものを踏襲した。

$$a_i = \beta \int_{t-NT_i}^t y(\tau) \sin(2\pi f_i \tau) e^{-\alpha(t-\tau)} d\tau \quad (2)$$

$$b_i = \beta \int_{t-NT_i}^t y(\tau) \cos(2\pi f_i \tau) e^{-\alpha(t-\tau)} d\tau \quad (3)$$

$$\alpha = -\ln\left(\frac{X}{100}\right) \frac{f_i}{N} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2\alpha}{1 - e^{-\frac{\alpha N}{f_i}}} \quad (5)$$

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad (6)$$

ここで、 $y(\tau)$ は振動状態を推定する変位履歴を示しており、 $y(\tau)$ に含まれる周波数成分 f_i の振幅を A_i と表す。当シミュレーションではデータベースの範囲が0.000-0.594となっているので、 f_i の範囲は0.00-0.60[Hz]とした。 α は直近の時間を強く評価するための重み付けの係数で、 β は振幅をたたく検出するための係数である。 N は参照する変位履歴の周期数であり、当研究では $N = 3$ とした。

2.6. 流体力関数

浮体にかかる流体力は、振動状態に依存する。ここで、方程式内の c , C_a を次のように無次元化する。

無次元減衰係数

$$C_{damp} = \frac{c}{\frac{1}{2} \rho D L U} \quad (7)$$

無次元付加質量係数

$$C_{add} = \frac{C_a}{\rho \frac{\pi D^2}{4} L} \quad (8)$$

よって、強制加振実験により C_{damp} , C_{add} のデータベースを作成することで、振動状態に応じた減衰力、付加質量力を算出する。

Table 2-3 Coefficient in definition formula.

ρ	Density	$[kg/m^3]$
D	Diameter	$[m]$
L	Draft	$[m]$
U	Fluid velocity	$[m/s]$
y'	Column velocity	$[m/s]$
y''	Column acceleration	$[m/s^2]$

C_{damp} C_{add} はそれぞれ減衰係数、付加質量係数と呼ばれ、減衰力と付加質量力を無次元化したものである。これらの値が分かれば F_{damp} F_{add} の値が算出できる。 C_{damp} C_{add} の値はデータベースから取得する。

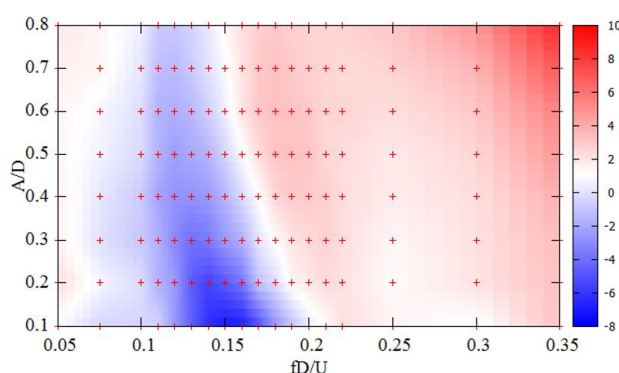


Figure 2-3 Contour of damping coefficient in previous study [6].

Figure2-3 は椎葉 [1]が強制加振実験より作成した、減衰係数のコンター図である。横軸は無次元周波数、縦軸は無次元振幅を表しており、無次元減衰係数の値をカラーマップで示している。このように、データベースを参照して振動状態に応じた無次元減衰係数と無次元付加質量係数を求めることで、減衰力と付加質量力を算出する。

2.7. 浮体の応答の算出

データベースから求めた流体力を(12)で表される運動方程式に代入して、浮体の応答を算出する。方程式の解析には、ルンゲクッタの方法を用いる。ルンゲクッタ法とは数値解析における常微分方程式に対する近似解放の1つで、前進形の積分法と呼ばれる方法の1つである。」

$$M\ddot{y} = -ky - c\dot{y} - MC_a\ddot{y} + F_v \sin \omega_v t \quad (9)$$

第3章. 強制加振実験

3.1. 実験概要

本実験は、複数カラム浮体に一様流を当てながら強制加振を行い、各カラムに作用する力を定量的に評価し、揚力モデル法で使用する流体力関数を作成するために行った。椎葉[7]でも同じ概要の実験を行っており、本実験では実験条件を拡張して行った。

3.2. 実験条件

Table 3-1 Experimental condition.

Symbol	Parameter	Previous study[7]	This study	unit
U	Fluid velocity	0.3	0.21	m/s
D	Diameter	0.25	0.125	m
L/D	Aspect ratio	1.5	1.5	—
A/D	Dimensionless amplitude	0.1-0.8	0.05-1.6	—
fD/U	Dimensionless frequency	0.05-0.35	0.06-0.35	—
Re	Reynolds number	75000	26250	—
Fr	Froude number	0.12	0.12	—

3.2.1. 加振条件

椎葉[7]の実験では実験機器の都合上無次元振幅を 0.1-0.8 に設定して加振を行ったが、VIM の安定領域を網羅できていなかったため、0.1-0.8 の範囲外のデータは外挿によりデータベースを作成した。そこで、本実験では実験機器を変え、無次元振幅を 0.05-1.6 に設定して実験を行った。

また、カラム間距離を $S/D=2.0, 3.0$ に加えて、単カラム、また $S/D=1.5-5.0$ を 0.5 刻みで変えた合計 7 ケース実験した。 $S/D=2.0, 3.0$ のケースを pattern1, それ以外のケースを pattern2 とする。

Figure3-1, 3-2 にて、振動状態をプロットした。振動状態を決定する際、強制加振装置の許容モーメントを考量し、モーメントが一定量に収まる範囲内にて条件を設定した。コンター図のカラーマップはケースごとに強制加振装置にかかるモーメントの、許容モーメントに対する比率を表している。

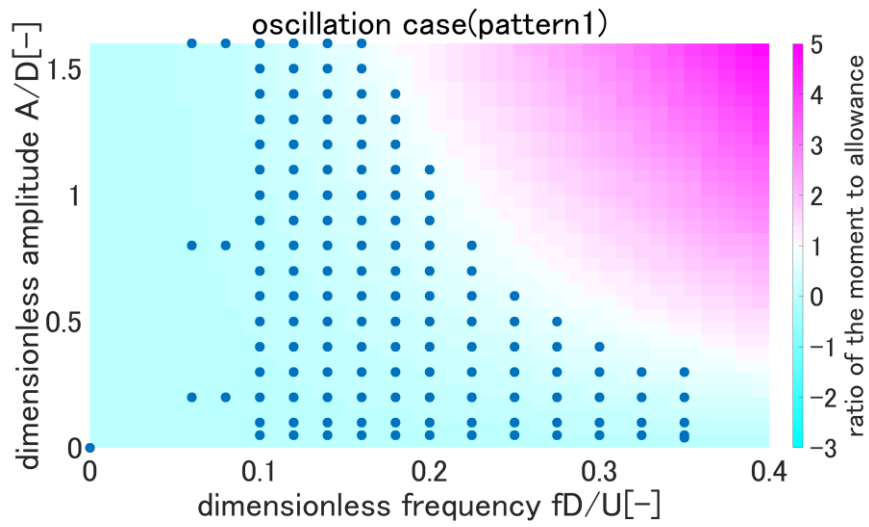


Figure 3-1 Oscillation cases of pattern1.

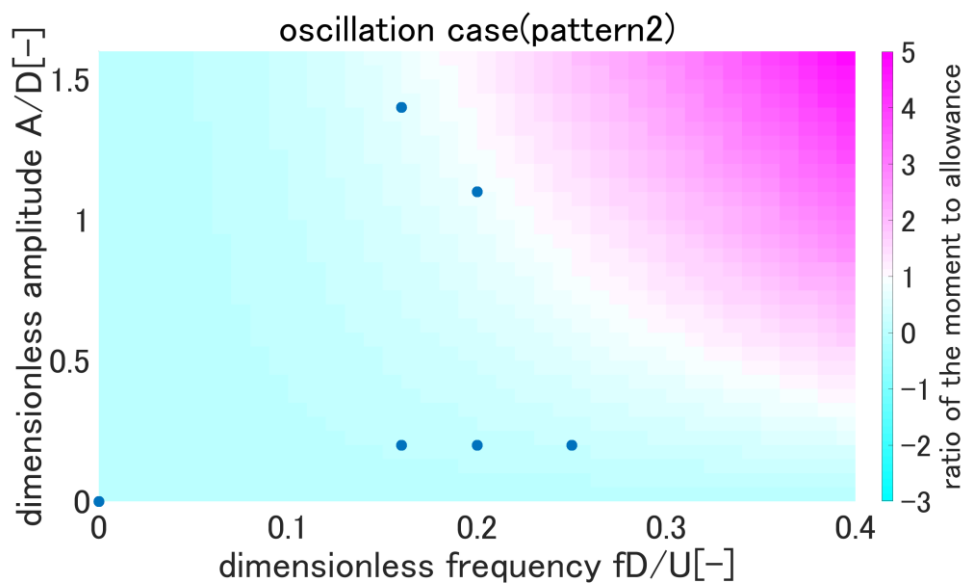


Figure 3-2 Oscillation cases of pattern2.

3.2.2. 一様流流速

カラムと一様流の関係が、[7]と相似になるよう、フルード数(Fr)が等しくなるように一様流を決定した。一方レイノルズ数(Re)は先行研究[7]とは異なる値をとってしまうが、カルマン渦の発生に大きな影響をもたらすことはないとし、フルード数をそろえることを優先した。

3.3. 実験設備

3.3.1. 実験模型

Figure3-3 のカラムを 4 本用意し、その一部を没水させて浮体模型とした。直径は 125mm で、実験ではアスペクト比が 1.5 となるよう、187.5mm が水に浸かるよう模型の位置を調整した。



Figure 3-3 Cylinder.

3.3.2. 計測機器

3.3.2.1. 荷重計(LMC3502-A, 日章電機)



Figure 3-4 Loadcell.

カラムにかかる流体力を測定するために、Figure3-4 の荷重計を用いる。50N のキャリブレーションボックスがついているため、実験直前にキャリブレーションボックスを用いて

荷重と電圧のキャリブレーションを行った。

3.3.2.2. 張力計

変位の位相を算出する用途で用いた。浮体模型にばねをとりつけ、そのばねが生じる張力(弾性力)を測定することで、弾性力から変位データを算出する。

3.3.2.3. 流速計(本体部:SF-2012,検出部:SFT-200-05,東京計測株式会社)

一様流が設定した通りの流速で流れているかを確認する用途で用いた。



Figure 3-5 Anemometer.[8]

3.3.2.4. 増幅器 (DSA-100B,日章電機)

荷重計に生じるひずみを電圧信号に変換する用途で用いた。



Figure 3-6 Amplifier.

3.3.2.5. 信号記録装置(NR600,キーエンス)

増幅器から出力された電圧信号を PC に記録する用途で用いた。



Figure 3-7 Data logger.

3.3.3. 強制加振装置(EAS6X-D060-AZAAD-3,オリエンタルモーター)

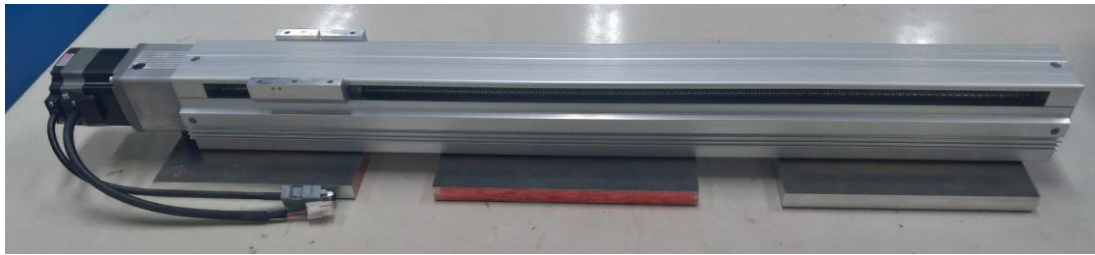


Figure 3-6 Forced oscillation machine.

模型の加振に Figure3-6 の装置を使用した。この装置は運搬物を本来等速直線運動させるための装置であるため、1周期を80分割して目的位置と速度を指定することで、単振動を疑似的に作り出した。例えば Figure3-7 において、(a)に表記されたような等速直線運動を組み合わせることで、(b)のように余弦関数に近い運動を作り出した。

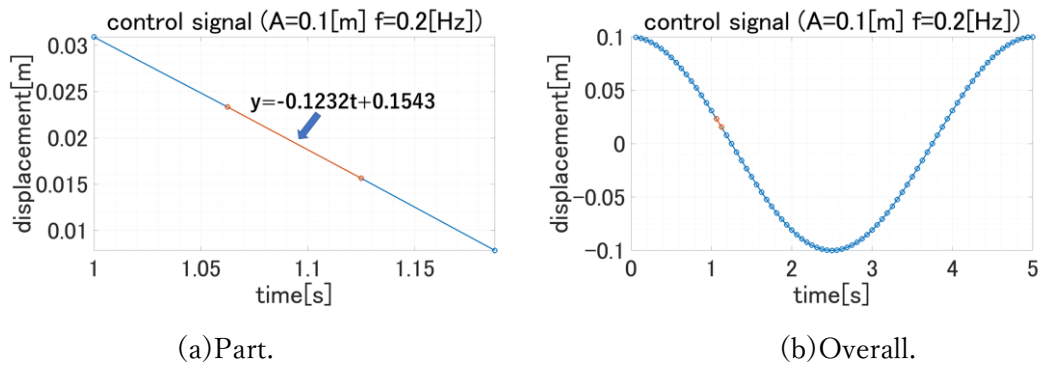


Figure 3-7 Example of control signal.

3.3.4. 全体の構造

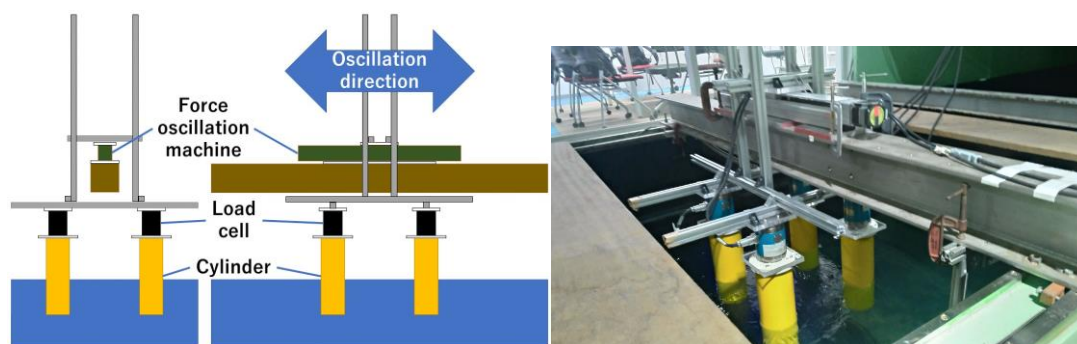


Figure 3-8 Overall structure.

上記の実験器具を、Figure3-8 のよう組み立てて、水槽に設置した。カラムの没水部のアスペクト比が 1.5 になるよう、水槽の水深を 950mm に設定した。

3.3.5. 実験施設

3.3.5.1. 水槽の概要

強制加振実験には次の施設を利用した。

- ・ 場所：東京大学生産技術研究所附属千葉実験所
- ・ 設備：風路付造波回流水槽(回流発生装置)
- ・ 寸法…幅：1800mm, 水深：~1200mm

3.3.5.2. 回流の流速の設定

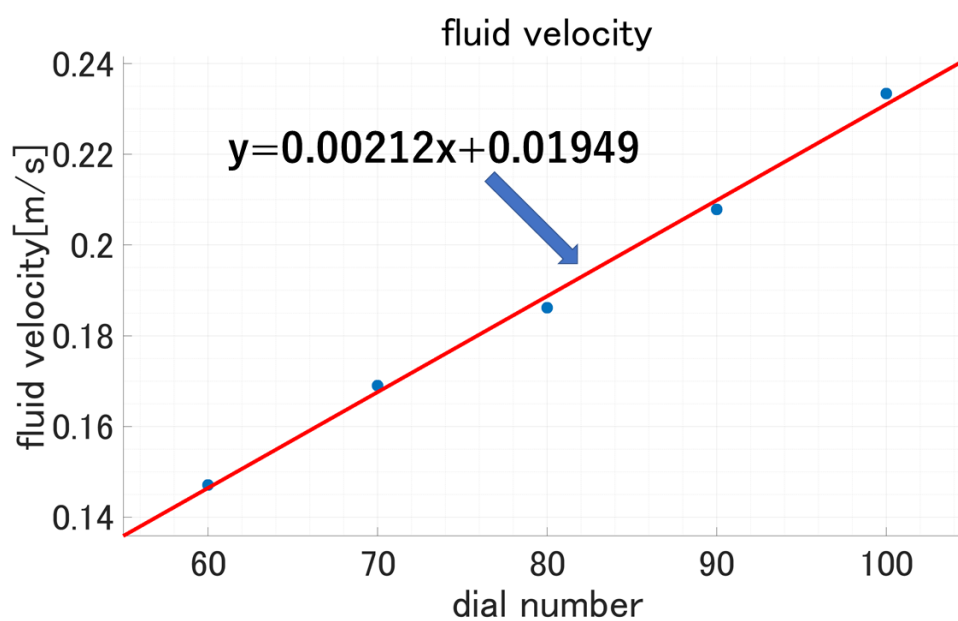


Figure 3-9 dial and fluid velocity.

本実験においては、流速を 0.21[m/s]に設定する。流速はダイヤルを使って設定するため、始めにダイヤルの数を 10 刻みで上げていき、各値の流速を記録した。ダイヤルの値を x 、流速の値を y [m/s]としたとき、

$$y = 0.00212x + 0.01949 \quad (10)$$

と近似できる。この式から y が最も 0.21 に近い値をとる整数 x を求めたところ $x = 91$ となったので、ダイヤルを 91 に設定して一様流を発生させた。

第4章. 強制加振実験の解析手法

4.1. 各種データの変換

4.1.1. ロードセル電圧データの荷重データへの変換

まず、測定前にロードセルのキャリブレーションを行った。ロードセル付属の 50N キャリブレーションボックスを用いることで、負荷が 0N の時と 50N の時それぞれの出力電圧を測定し、ゼロ点と荷重/電圧の係数をケースごとに算出した。

$$F(t) = \{V(t) - \text{zero point}\} \times \text{coefficient} \quad (11)$$

このようにして、各カラムにかかる 2 方向(流れに平行な方向, 直交する方向)の荷重を求めた。

4.1.2. 流れと直交する荷重データの揚力データへの変換

浮体模型の加振中は、流れと直交する荷重データに浮体模型の慣性力が含まれるので、それを取り除く必要がある。慣性力を生じさせる質量は 2 つに分割して計算した。1 つは、カラム、カラムと検力計の間に入れるジョイント、それらをつなぐボルトを合わせた質量 M_1 、もう 1 つはロードセルの可動部の質量 M_2 (Figure 4-1 で表される部分) である。



Figure 4-1 Movable part of load cell.

M_1 は質量計に載せて計測した。 M_2 は可動部のみを検力計から取り出して計測することができないので、次のように算出した。

検力計に重りを付けずに、Y 軸方向を鉛直方向に固定した状態、Y 軸方向を水平方向に固定した状態で歪を測定する。両者の歪の差は可動部の質量の差によるものなので、質量と歪

の係数から可動部の質量を算出した。各カラムの M_1 , M_2 は Table4-1 の通りである。

Table 4-1 Mass to be remove.

	M1[g]	M2[g]	M1+M2[g]
column A	1,844.9	466.1	2,311.0
column B	1,839.9	465.1	2,305.0
column C	1,842.0	465.1	2,307.1
column D	1,842.0	465.7	2,307.7

以上のように求めた質量から慣性力を計算し、荷重から流体力を計算した。

$$F_{lift}(t) = F(t) - F_{inertial}(t) = F(t) + (M_1 + M_2)\ddot{y} \quad (12)$$

4.1.3. 張力計電圧データの変位(位相)データへの変換

当実験における加振中の変位は振幅と周波数から算出することができるが、加振器のドライバと張力計のデータロガーは同期していないので、データ同士の時刻を合わせる必要がある。よって、ばねの張力という形で変位データをデータロガーに取り込むことで、変位と荷重の時系列データを同期させた。

1周期ごとに張力系の出力の極小値を読み取り、出力が極小値を取る時刻にて変位の位相が0になるよう変位データを作成した。

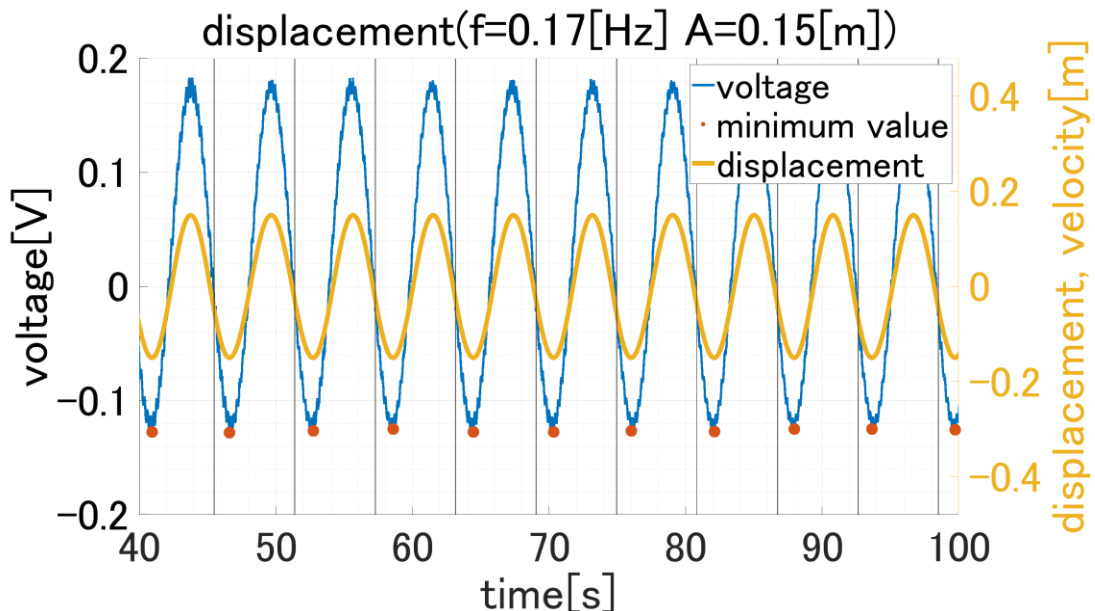


Figure 4-2 How to make displacement data.

4.2. 抗力係数, 揚力係数の算出

カラムに働く流体力のうち、一様流と同じ方向に働く力を抗力、一様流と直交する方向に働く力を揚力と呼ぶ。抗力と揚力を次のように無次元化し、抗力係数と揚力係数を求める。

$$C_D, C_L = \frac{F_x, F_y}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (13)$$

ここで、 ρ : 流体密度、 A : 投影面積、 U : 一様流速度、 F_x : 抗力、 F_y : 揚力である。また、実験データは時系列データとして記録しているので、その時系列データから、抗力係数の平均値、抗力係数の標準偏差、揚力係数の標準偏差を求めた。平均値と標準偏差は次のように算出する。

平均値

$$x_{mean} = \frac{1}{N} (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N) \quad (14)$$

標準偏差

$$x_{std} = \sqrt{\frac{1}{N} ((x_1 - x_{mean})^2 + (x_2 - x_{mean})^2 + (x_3 - x_{mean})^2 + \dots + (x_N - x_{mean})^2)} \quad (15)$$

4.3. 減衰係数, 付加質量係数の算出

各実験ケースについて、計測された揚力のうち速度に比例する成分と加速度に比例する成分を取り出した。これらそれぞれを、減衰力、付加質量力という。成分の求め方は次のとおりである。

信号 $x(t)$ をフーリエ級数で表すと、

$$x(t) = \sum_{k=k_0}^{\infty} (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t) \quad (16)$$

となる。取り出したい周波数を ω_n として $\cos \omega_n t, \sin \omega_n t$ と $x(t)$ との積を求めると、

$$\begin{aligned} x(t) \cos \omega_n t \\ = x_0 \cos \omega_n t \end{aligned}$$

$$+ \sum_{k=k_0}^{\infty} \left[\frac{a_k}{2} \{ \cos(\omega_k + \omega_n)t + \cos(\omega_k - \omega_n)t \} + \frac{b_k}{2} \{ \sin(\omega_k + \omega_n)t + \sin(\omega_k - \omega_n)t \} \right] \quad (17)$$

$$\begin{aligned} x(t) \sin \omega_n t \\ = x_0 \sin \omega_n t \end{aligned}$$

$$+ \sum_{k=k_0}^{\infty} \left[\frac{a_k}{2} \{ \sin(\omega_k + \omega_n)t + \sin(\omega_k - \omega_n)t \} - \frac{b_k}{2} \{ \cos(\omega_k + \omega_n)t - \cos(\omega_k - \omega_n)t \} \right] \quad (18)$$

となる。両辺を時刻 0 から T までで積分し、その値を T で割る。この時、 $k=n$ の時のみ

$\cos(\omega_k - \omega_n)t$ の積分値はTとなり、そのほかの値は全て-1~1の範囲内に収まる。よって、この値をTで割った時、Tが十分に大きければ、

$$\frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cos \omega_\alpha t dt = \frac{a_n}{2} \quad (19)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T x(t) \sin \omega_\alpha t dt = \frac{b_n}{2} \quad (20)$$

よって、変位を

$$y(t) = A \cos \omega t \quad (21)$$

としたとき、速度は

$$y(t) = -A \omega \sin \omega t \quad (22)$$

加速度は

$$y(t) = -A \omega^2 \cos \omega t \quad (23)$$

と表せるので、減衰力は

$$F_{damp} = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin \omega t dt \quad (24)$$

付加質量力は

$$F_{add} = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos \omega t dt \quad (25)$$

となる。

このようにして求めた減衰力と付加質量力を、次のように無次元化して、減衰係数と付加質量係数を求める。

減衰係数

$$C_{damp} = \frac{F_{damp}}{\frac{1}{2} \rho D L U A \omega} \quad (26)$$

付加質量係数

$$C_{add} = \frac{F_{add}}{\rho \frac{\pi D^2}{4} L (A \omega)^2} \quad (27)$$

ここで ρ は流体密度、 D はカラム直径、 L は喫水、 A は加振振幅、 ω は加振周波数を表している。

4.4. 減衰係数、付加質量係数のデータベース作成

減衰係数と付加質量係数の算出は、データベース化することでVIM挙動予測プログラムに組み込むことが目的である。実験から得たデータベースだけではデータ量が足りないので、内挿等によってデータの補間を行う。

Figure 4-3にて、シミュレーションで用いるデータベースの振動条件の一部をプロット

した。

- ・ 紫の点…実験によりデータを取得。
- ・ 黄色の点…内挿によりデータを補間。fD/U=0.06, 0.08 のそれぞれにて、3点の実験値に基づいて内挿を行った。
- ・ 青色の点…値を0に設定。実験装置にかかる負荷の都合上、この領域の振動状態では実験を行えなかったため、流体力のデータは存在しない。VIMのシミュレーションにおいてこの領域の振動状態が現れることはないと考え、紛らわしくないよう0に設定した。
- ・ 赤色の点(振幅が0の点)…同じ周波数で1番近い紫の点と同じ値を設定した。実験を行った最小の無次元振幅が0.05なので、それより小さな振幅にはデータがなかった。VIMの振動状態はこの領域に入る可能性は十分あり値を入れておきたかったので、すぐ近くに位置するデータとして、最も近い紫の点のデータを入れることにした。
- ・ 緑色の点(周波数が0の点)…値を1に設定。静止状態からシミュレーションを行った際、fD/Uが0.00-0.06の範囲必ず通過することになるため、何かしらの値を設定しておく必要があると考え、1に設定した。

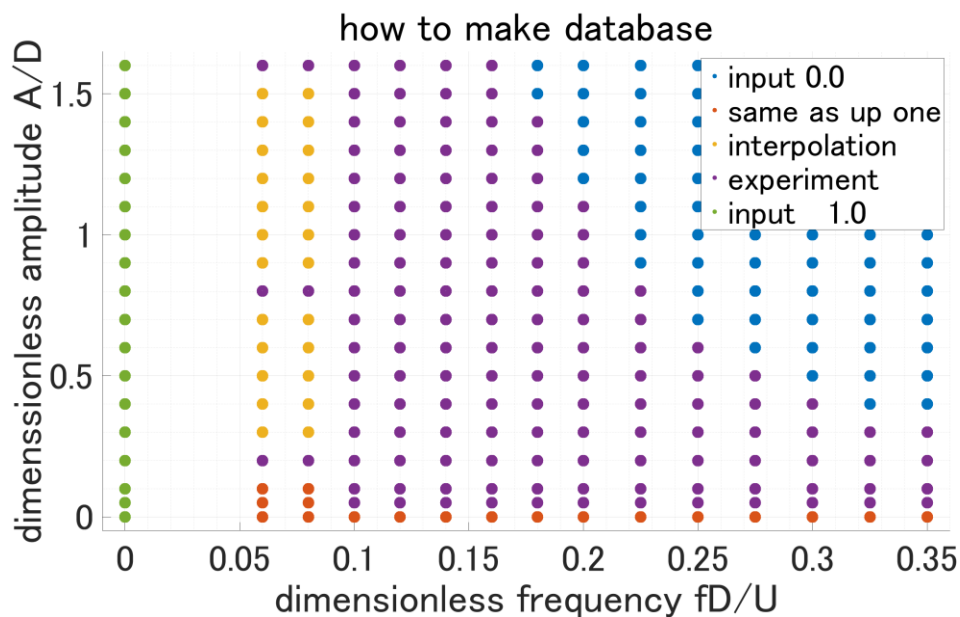


Figure 4-3 How to make database.

第5章. 強制加振実験の解析結果

第4章で示した手法で実験値から各種流体力係数などを算出した。この章では、それらの値が、加振振幅、加振周波数、カラム間距離によってどのように変化するか考察を行っていく。

5.1. 抗力係数の平均値の考察

抗力は主に、Figure 5-1 で表されるようなカラムの下流側に生成される後流域の存在によって発生する。



Figure 5-1 Wake.

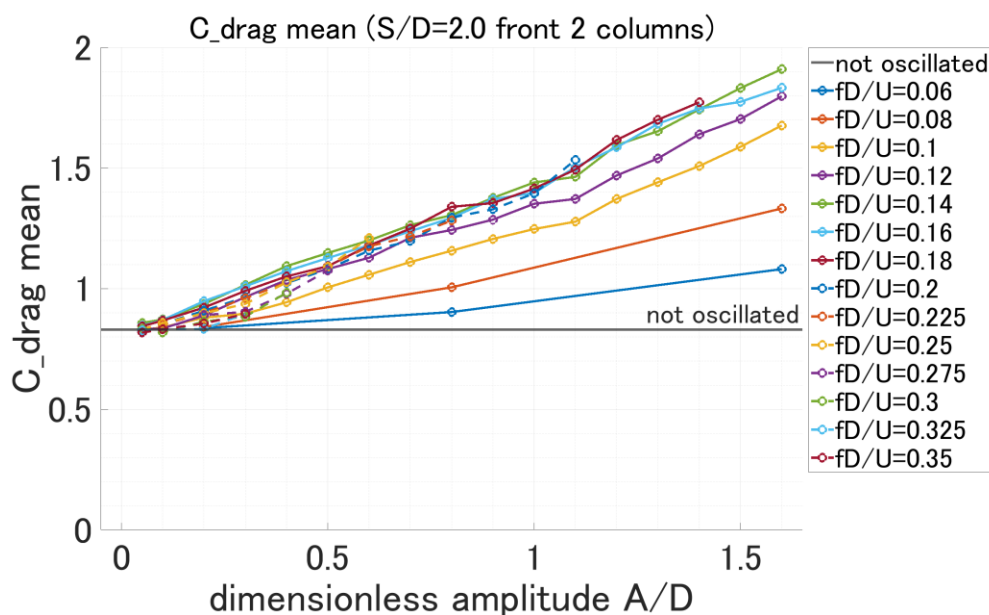


Figure 5-2 Mean of drag with amplitude($S/D=2.0$ front).

Figure 5-2 は、加振振幅と、前方カラムにかかる抗力の平均値の関係を示しており、次のことが分かる。加振振幅と平均抗力は線形の関係にある。この理由として、振幅が大きくなることによって後流領域の範囲が広がるからであると考えられる (Figure 5-3)。後流の幅を W とすると W はおよそ $2A+D$ となる。よって、後流の幅は加振振幅に比例することが分かる

ので、平均抗力が振動振幅と線形の関係になっているのだと考えられる。

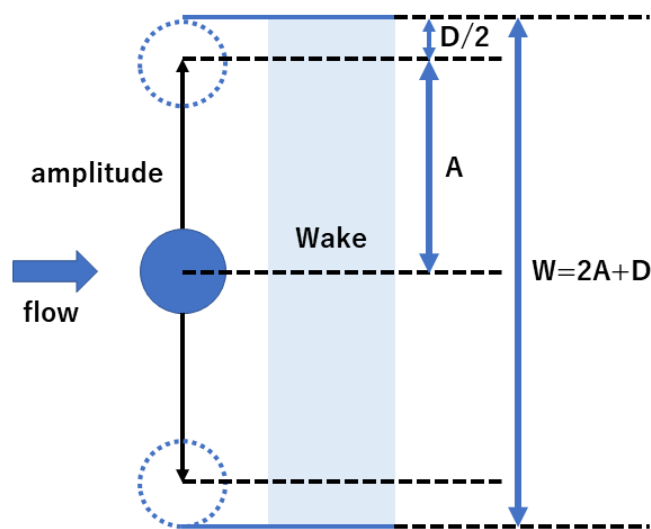


Figure 5-3 Amplitude and wake.

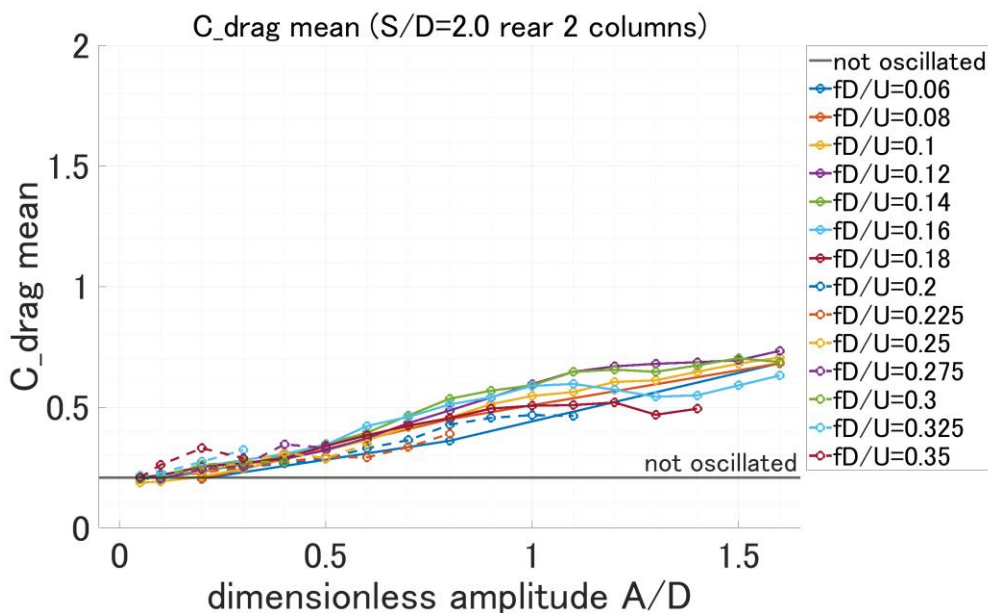


Figure 5-4 Mean of drag with amplitude(S/D=2.0 rear).

Figure5-4 は加振振幅と、後方カラムにかかる抗力の平均値の関係を示しており、前方カラムにかかる抗力平均と同じ傾向がみられる。

一方、前方カラムでは周波数の低いケースの傾きが他のケースに比べ小さい一方、後方カラムではどの周波数も傾きがあまり変わらないように見られる。そこで、加振周波数と抗力平均の関係性を次に示す。

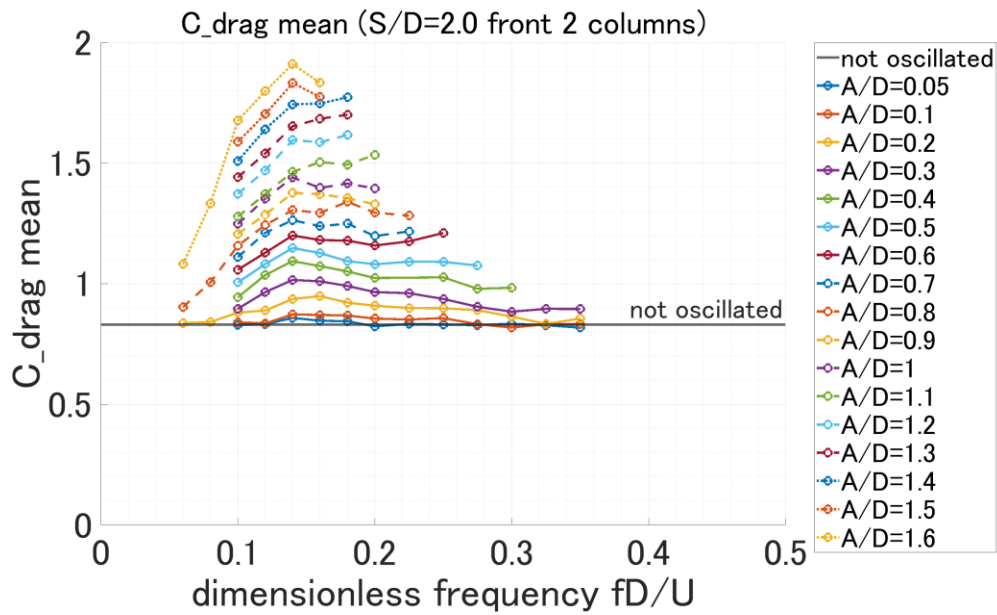


Figure 5-5 Mean of drag with frequency (S/D=2.0 front).

Figure5-5 は、加振周波数と前方カラムにかかる抗力の平均値の関係性を示しており、無次元周波数が 0.14 以下の場合には抗力平均が周波数に依存し、それより大きな周波数で加振すると周波数に依存しない傾向がみられる。これは Figure5-6 に示した通り、加振周波数が高い時は後流の幅が $2(A+D)$ に近くなるのに対し、周波数が小さい時は流れの状態が無加振状態に近くなるので、後流の幅がカラムの幅に近くなるためであると考えられる。

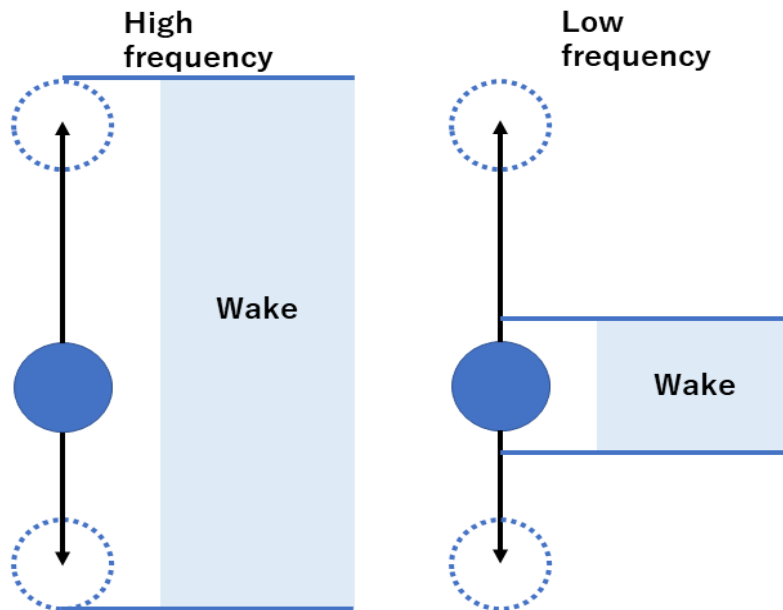


Figure 5-6 Frequency and wake.

次に、カラム間距離と平均抗力の関係性を調べる。

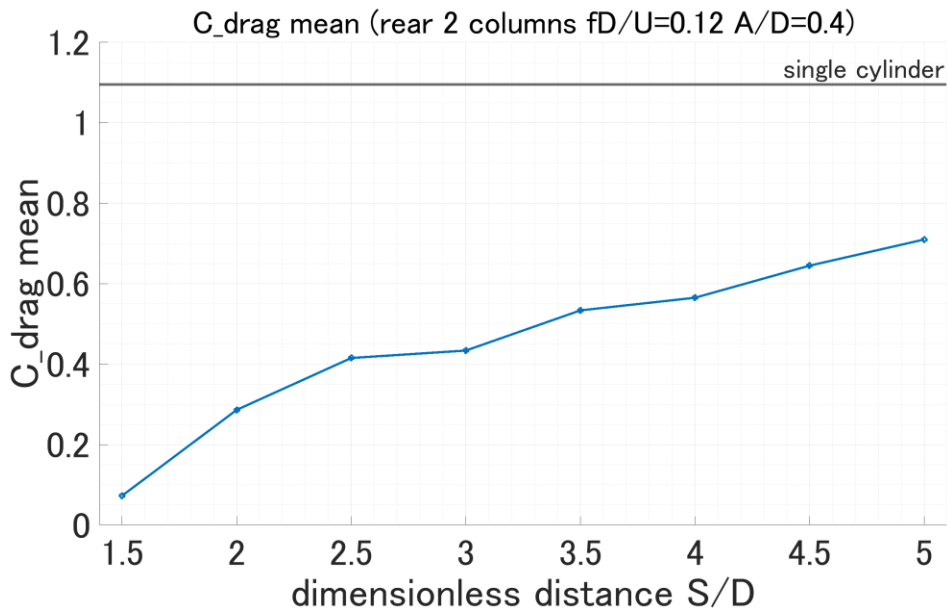


Figure 5-7 Mean of drag S/D($fD/U=0.12$ $A/D=0.4$ rear).

Figure5-7 は、無次元周波数が 0.12，無次元振幅が 0.4 のとき後方カラムにかかる平均抗力を、カラム間距離との関係性としてあらわしたものである。”single cylinder”と書かれた水平線は、単一カラム時に同じ振動状態で加振した場合の平均抗力を示している。各カラム間距離における平均抗力を、単一カラム時の平均抗力で割って正規化したグラフを、Figure5-8 に示す。

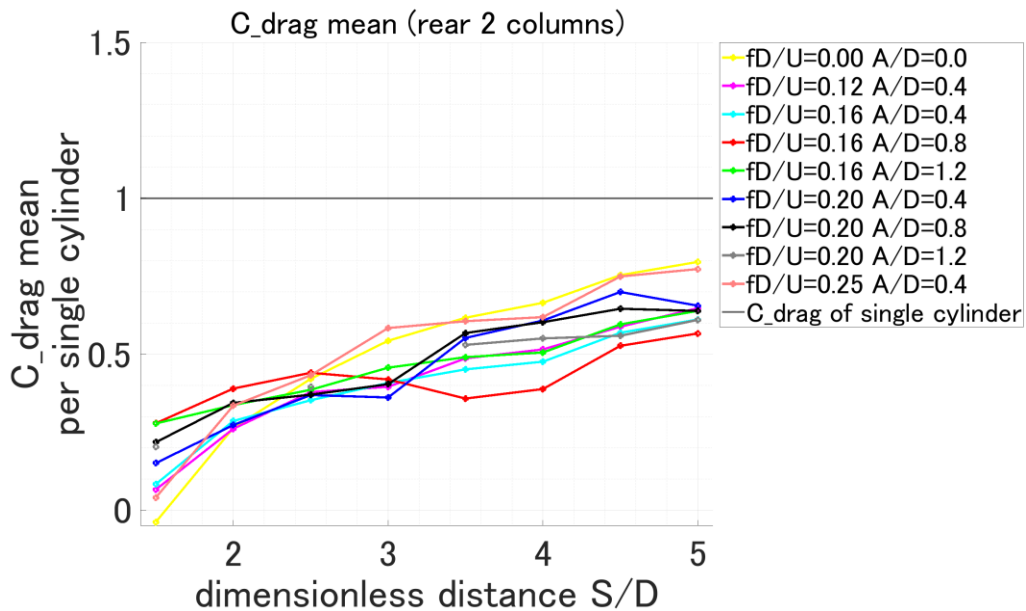


Figure 5-8 Mean of drag with columns space(rear).

Figure5-8 において、後方カラムにかかる平均抗力を正規化した値とカラム間距離の関係

を、振動状態ごとに示した。全てのケースにおいて、単一カラム時の平均抗力より小さな値をとっている。これは、後方カラムが後流域に含まる、すなわち後方カラムにあたる流れの流入速度が下がっているためである。また、カラム間距離が広くなるにつれて平均抗力の値は大きくなり、比率が1に近づいている。これは、前方カラムの後ろにできる後流域における流速が、前方カラムとの距離が広がるにつれて速くなる(単一カラム時の条件と近くなる)ためである。カラム間距離を $S/D=5.0$ よりもさらに広げていくと、いずれ比率が1になると考えられる。

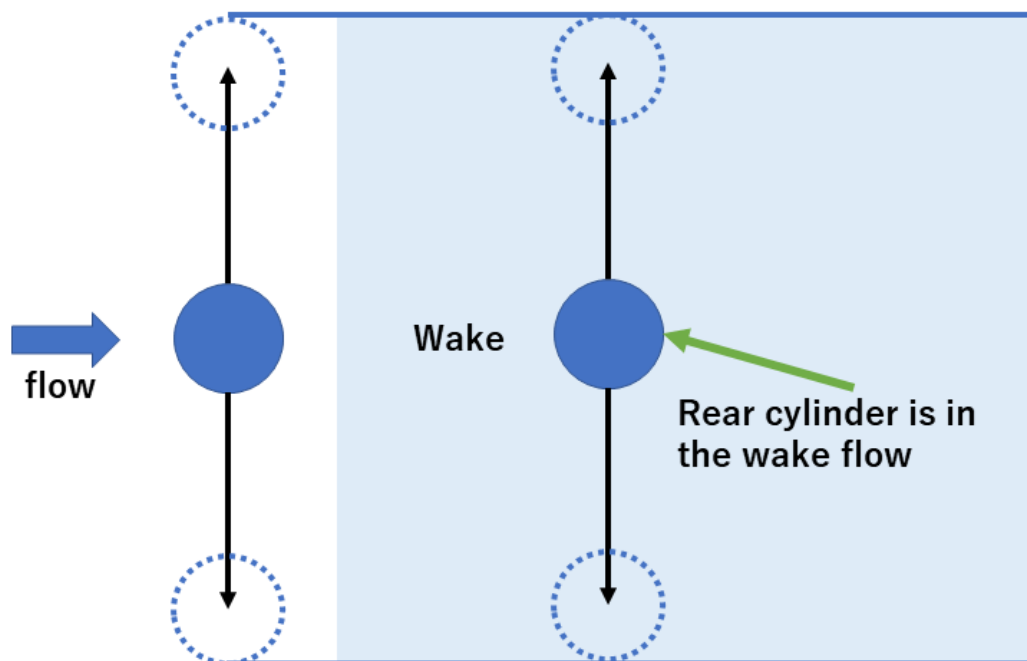


Figure 5-9 Rear cylinder in wake flow.

Figure5-10 は、前方カラムにかかる平均抗力を正規化した値とカラム間距離の関係を、振動状態ごとに示したものである。前方カラムは他のカラムの影響を受けにくいので、単一カラム時と近い値をとっている。しかし、カラム間距離が小さいケースにおいては値にばらつきがある。そこで、Figure5-11 にて $S/D=1.5$ の時前方カラムにかかる平均抗力を、単一カラム時の平均抗力で正規化した値と、加振振幅との関係性を示す。無次元周波数が 0.12, 0.16 のケースを見ると、振幅が増加すると正規化した平均抗力が小さくなっている。これは、2つの前方カラムが作り出す後流域の範囲が重なることにより、前方カラム1つあたりが作り出す後流域の幅が小さくなるためだと考えられる(Figure5-12)。1つのカラムが作り出す後流の幅を W とすると $2W$ はおよそ $2A+S+D$ となるため、これを2で割ると、

$$W = \frac{2A + S + D}{2} = A + \frac{S}{2} + \frac{D}{2} \quad (28)$$

となる。単一カラムが作り出す後流域の幅は $W_{single} = 2A + D$ なので、単一カラム時の後

流域幅に対する 1 カラム当たりの後流域幅の比率は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \frac{W}{W_{single}} &= \frac{A + \frac{S}{2} + \frac{D}{2}}{2A + D} \\
 &= \frac{A + \frac{D}{2}}{2A + D} + \frac{\left(\frac{S}{2}\right)}{(2A + D)} \\
 &= \frac{1}{2} + \frac{\frac{S}{D}}{4\frac{A}{D} + 2}
 \end{aligned} \tag{29}$$

よって、S/D の値が一定の時、無次元加振振幅 A/D を大きくすると、正規化した後流域の幅が小さくなる事が分かる。

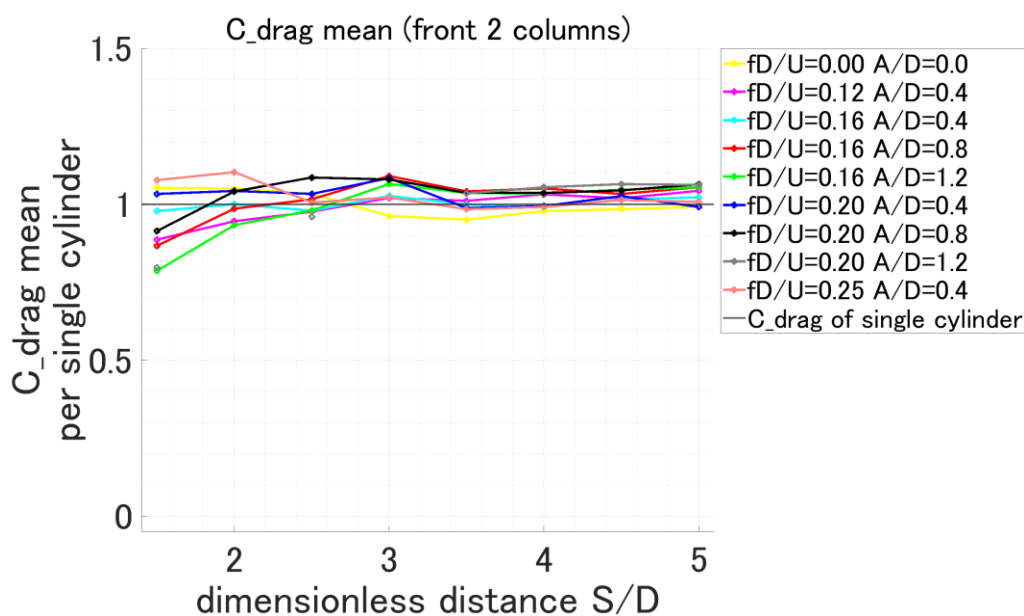


Figure 5-10 Mean of drag with columns space(front).

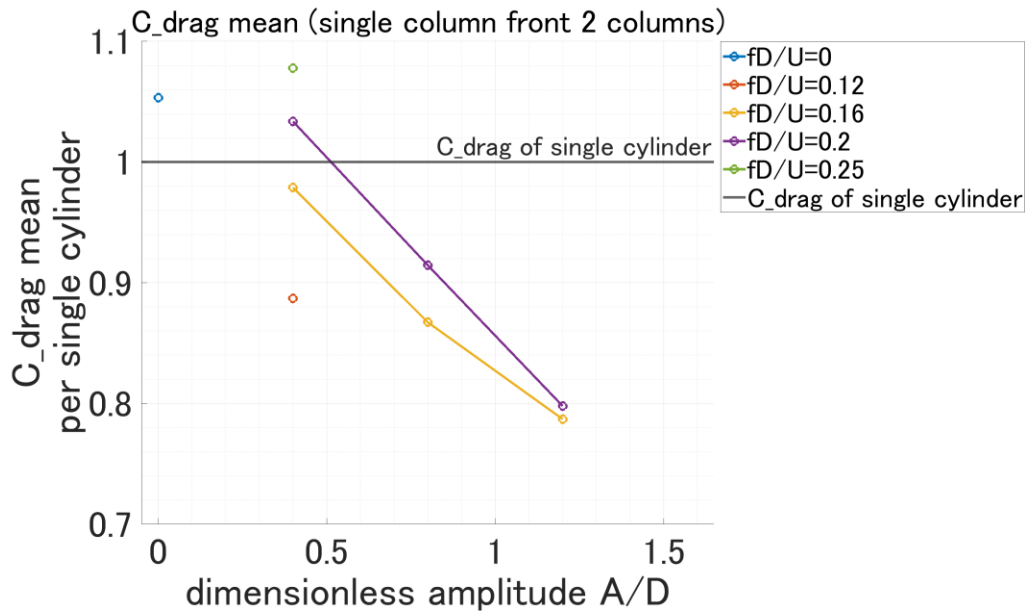


Figure 5-11 Mean of drag with amplitude($S/D=1.5$ rear).

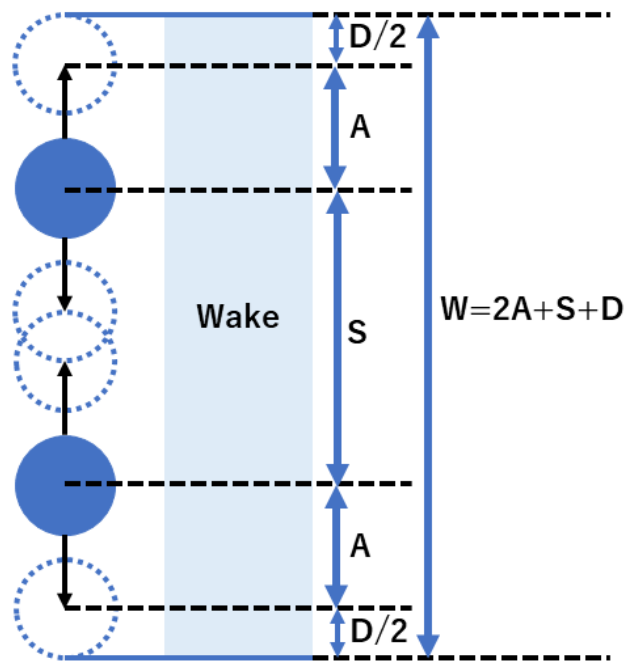


Figure 5-12 Wake of two front columns.

5.2. 揚力係数と抗力係数の標準偏差の考察

抗力係数と揚力係数の変動成分を考察するために、標準偏差を求めた。両者の値が変動する要因は次の通りである。

揚力係数

- ・ カルマン渦放出時によりカラムの両側にて交互に圧力変動が起こるため。
- ・ カラムの進行方向に応じて交互に減衰力が生じるため。

抗力係数

- ・ カルマン渦放出時によりカラムの両側にて交互に圧力変動が起こるため。

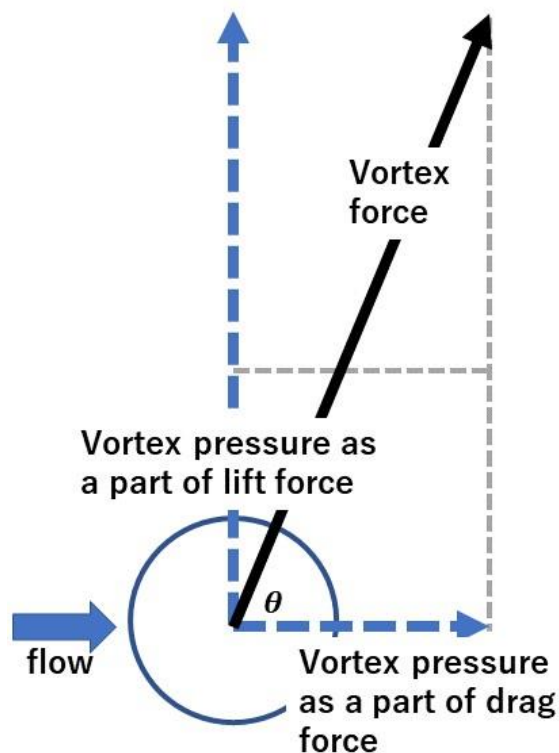


Figure 5-13 Disassembly of vortex force.

Figure5-13 に示した通り、渦の放出角を θ 、渦放出時にかかる圧力を F_v としたとき、そのうち抗力方向にかかる成分を $F_v \cos\theta$ 、揚力方向にかかる成分を $F_v \sin\theta$ と表せる。よって、 θ が一定の時、カルマン渦放出の際にかかる圧力の内、抗力成分揚力成分共に、圧力の絶対値に比例することになる。

Figure5-14,15 にて、加振振幅と、揚力係数、抗力係数の変動成分の関係を表した。どちらも振幅と流体係数が線形の関係に近いことが分かる。また、Fig5-16,17 においては、加振周波数と揚力係数、抗力係数の変動成分の関係を表した。こちらも、線形の関係に近いことが分かる。こちらは、2次関数の関係に近いことが分かる。(25)式より、振動の加速度は振幅の1乗と周波数の2乗に比例する。よって、カルマン渦放出時にかかる流体力の大きさは、振動の加速度に比例すると考えられる。

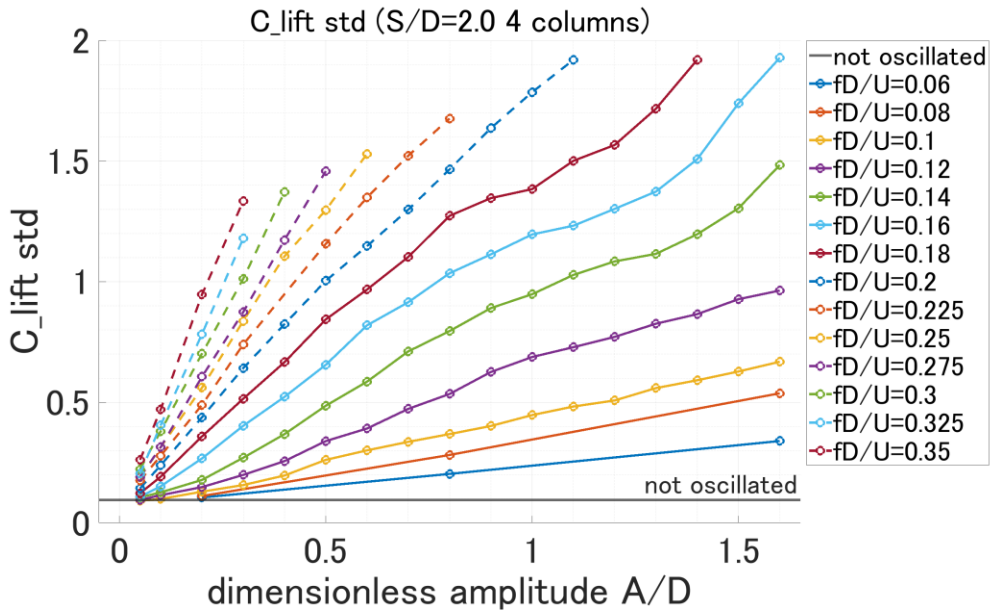


Figure 5-14 Std of lift with amplitude(S/D=2.0).

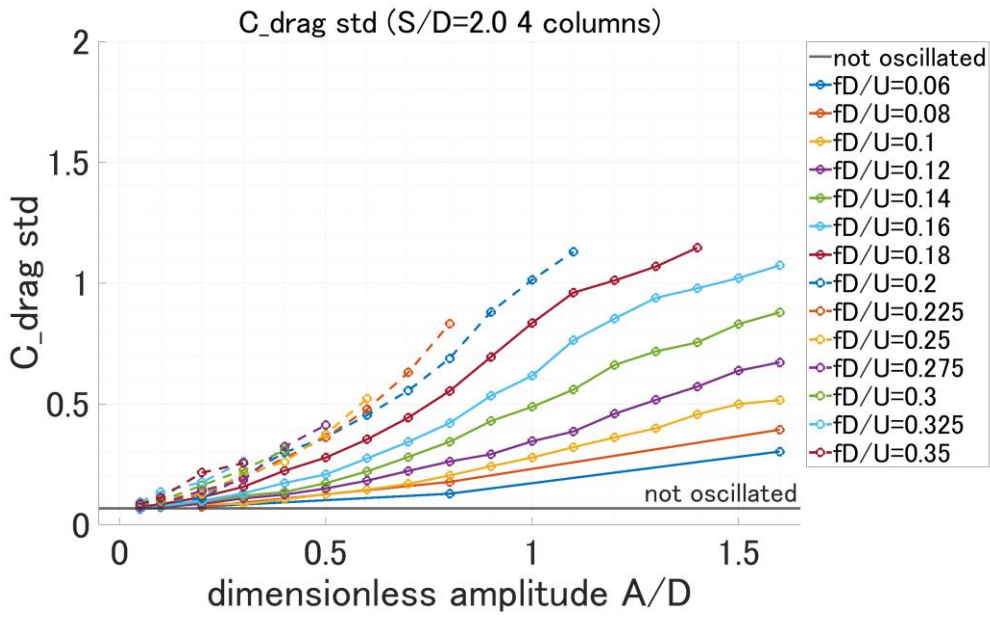


Figure 5-15 Std of drag with amplitude(S/D=2.0).

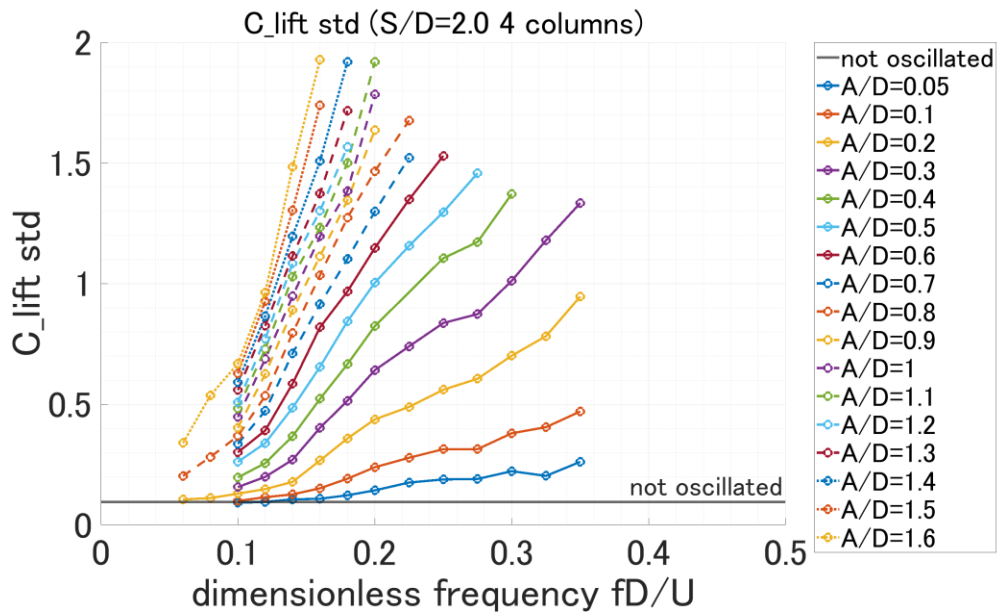


Figure 5-16 Std of lift with frequency(S/D=2.0).

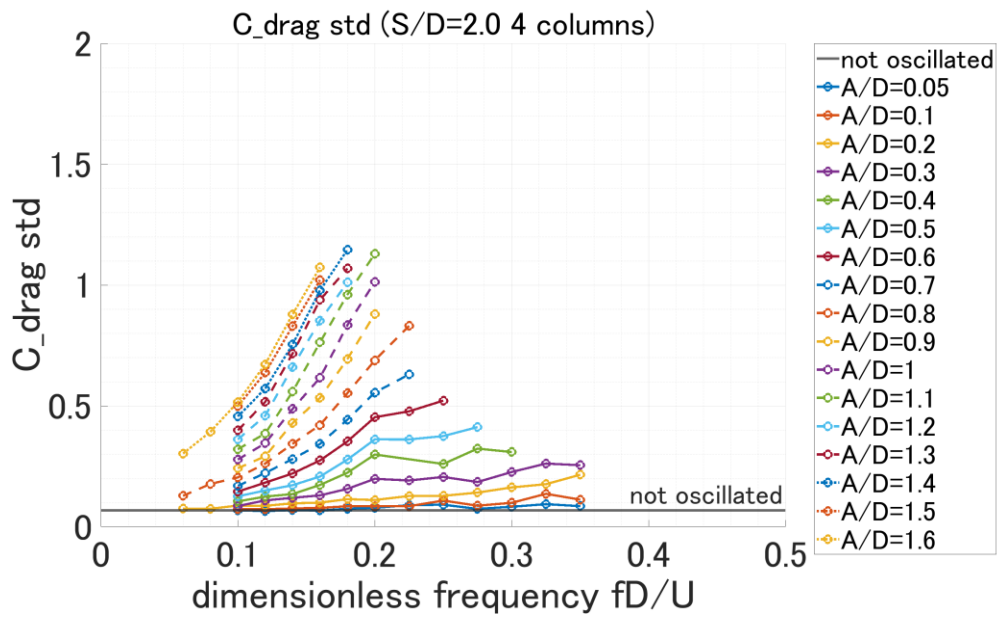


Figure 5-17 Std of drag with frequency(S/D=2.0).

次に、カラム間距離と揚力変動の関係性を調べる。各カラム間距離における前方カラムの揚力変動を、単一カラム時の揚力変動で割って正規化したグラフを、Figure5-18 に示す。無次元周波数が 0.12、無次元振幅が 0.4 のケースは他の振動状態と大きく離れた値をとっている部分があるが、原因は分からなかった。S/D が 3 以上の時は単一カラムにおける揚力変動と近い値を示していることが分かるが、S/D が 2.5 以下の時は、振動状態によっては単一

カラムにおける揚力変動より小さな値をとることがある。これは、カラムが加振により一方方向に動く際、加振方向に後流域が発生するため、加振方向において後方にあるカラムが、もう一方のカラムの後流域に入るためであると考えられる。また、この後流域は一時的に発生してはすぐに消滅するものなので、カラム間距離が短い場合にのみ影響を及ぼしている。

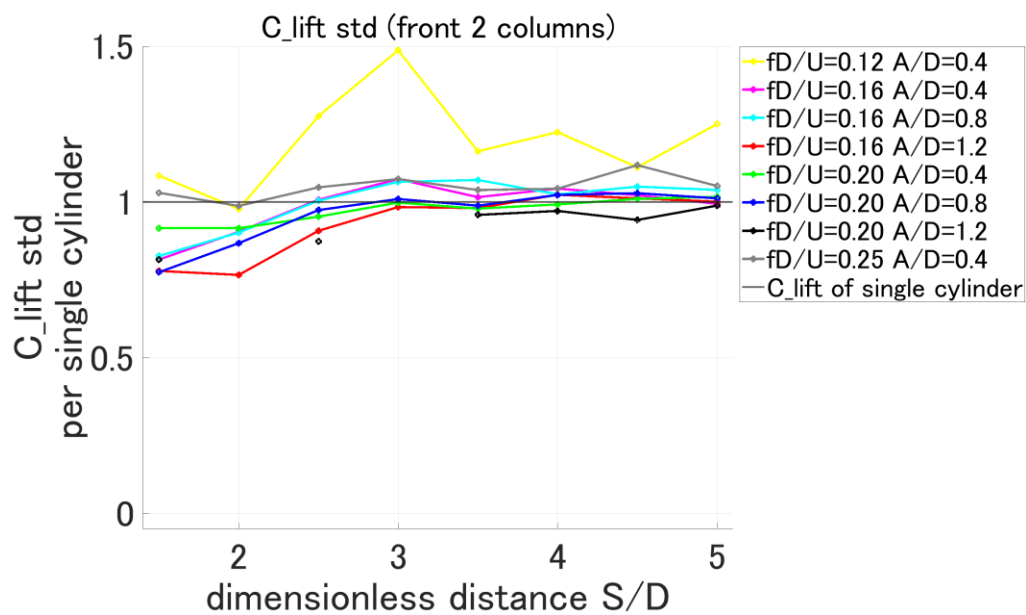


Figure 5-18 Std of lift with columns space(front).

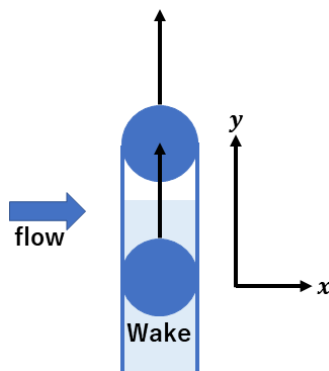


Figure 5-19 Wake of forced oscillation.

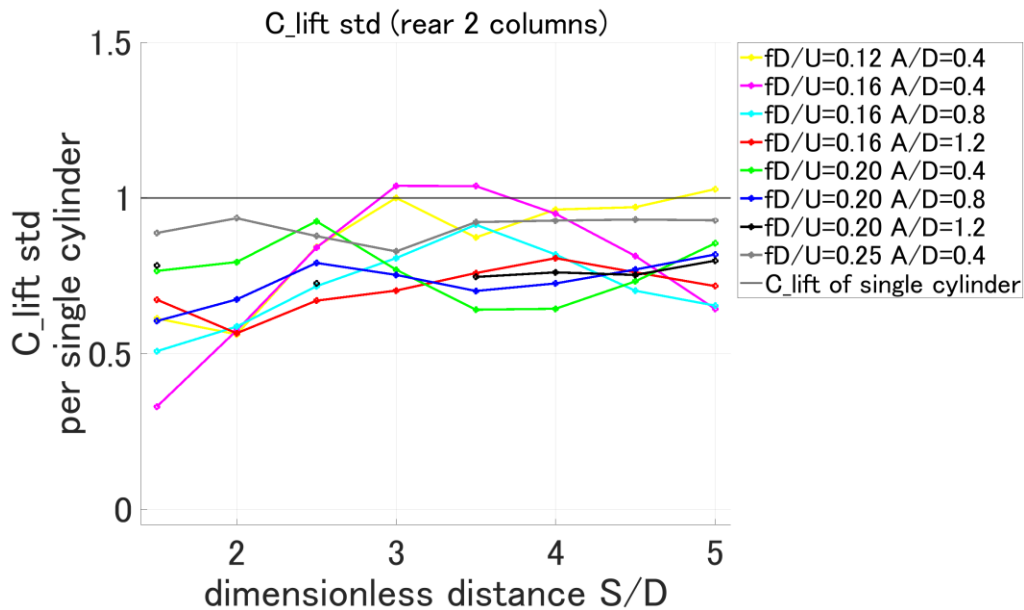


Figure 5-20 Std of lift with columns space(rear).

Figure5-20 には、後方カラムにかかる正規化した揚力係数とカラム間距離の関係性を示した。カラム間距離との関係性は見られないが、前方カラムにかかる揚力変動と比べ値が全体的に小さいことが分かる。これは、後流域に含まれているためカラムにあたる一様流の流速が低く、カルマン渦放出時の圧力が前方カラムに比べ低いためであると考えられる。

5.3. 減衰係数の考察

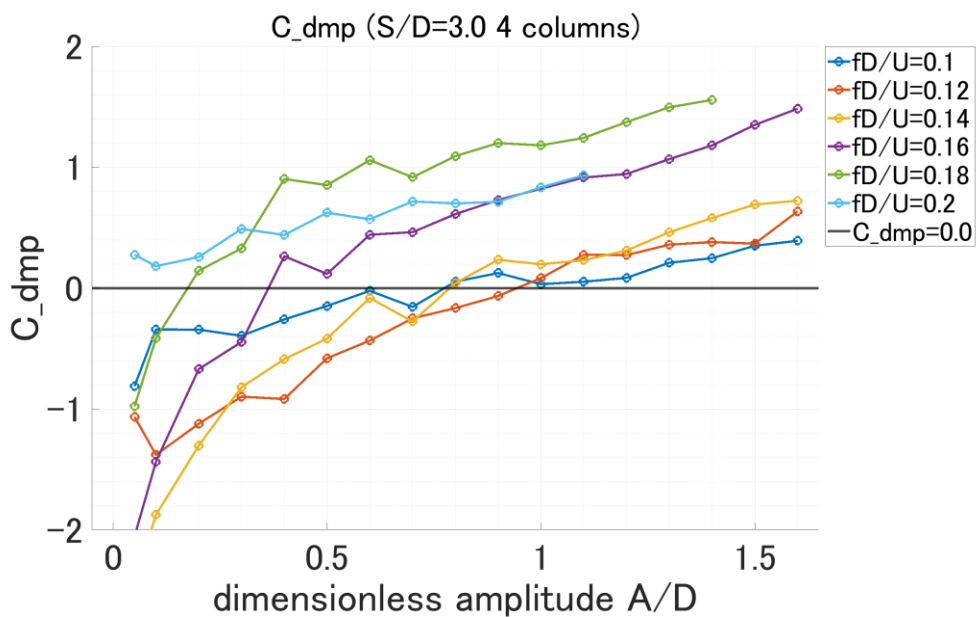


Figure 5-21 Damping coefficient(S/D=3.0).

Figure5-21 は、加振振幅と、4 カラム全体にかかる減衰係数の関係を表している。全ての周波数において、振幅が増加すると減衰係数も増加する傾向がある。また、減衰係数が負の値をとっている部分もあり、この振動領域では振幅を発達させる力が働くことになる。よって、ある周波数において振幅の小さい領域では負の減衰力により振動が発達し、減衰係数の値が0を取るときに振動が安定すると予測される。

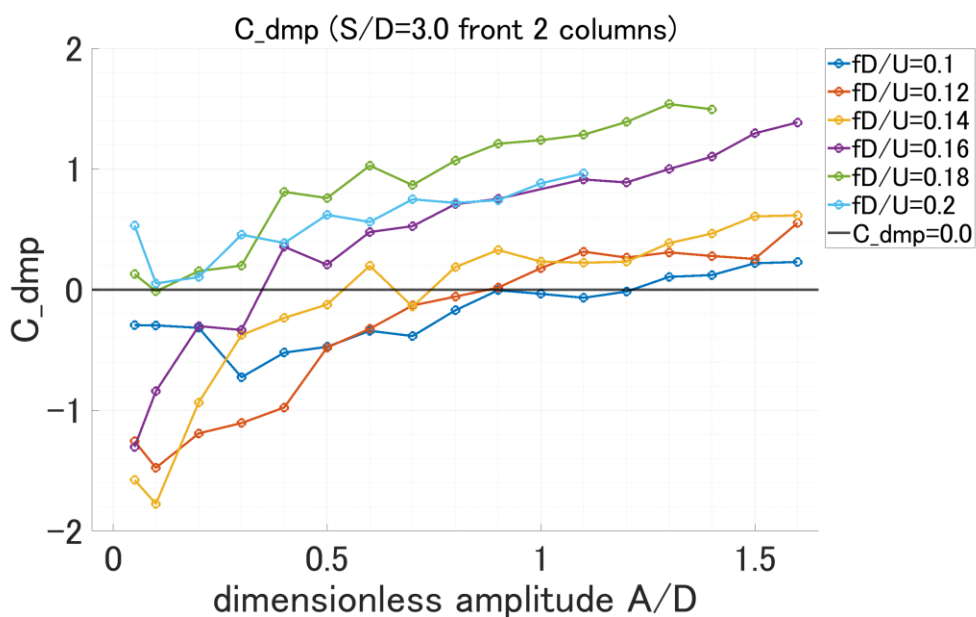


Figure 5-22 Damping coefficient (S/D=3.0 front).

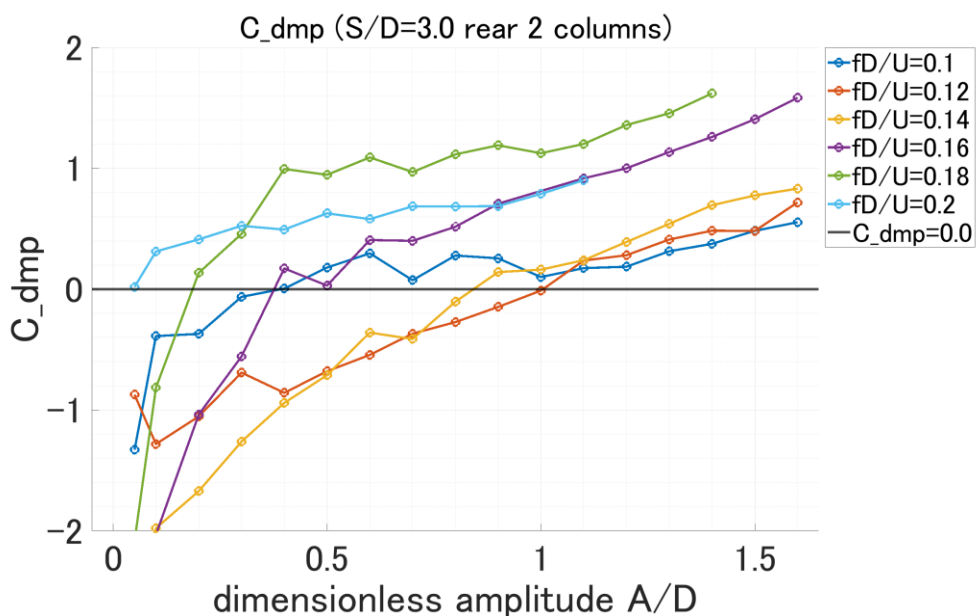


Figure 5-23 Damping coefficient (S/D=3.0 rear).

Figure5-22, 23 ではそれぞれ、前方カラムと後方カラムにかかる減衰係数を表している。

振幅の小さい部分では減衰係数が前方カラムと後方カラムとで大きく異なるため、ヨー方向の力が働くと考えられる。先行研究[1]で作成されたデータベースでは減衰係数が0になる振動状態を網羅しきれなかったが、当研究では減衰係数が0となる振動状態を網羅することができた。

5.4. 付加質量係数の考察

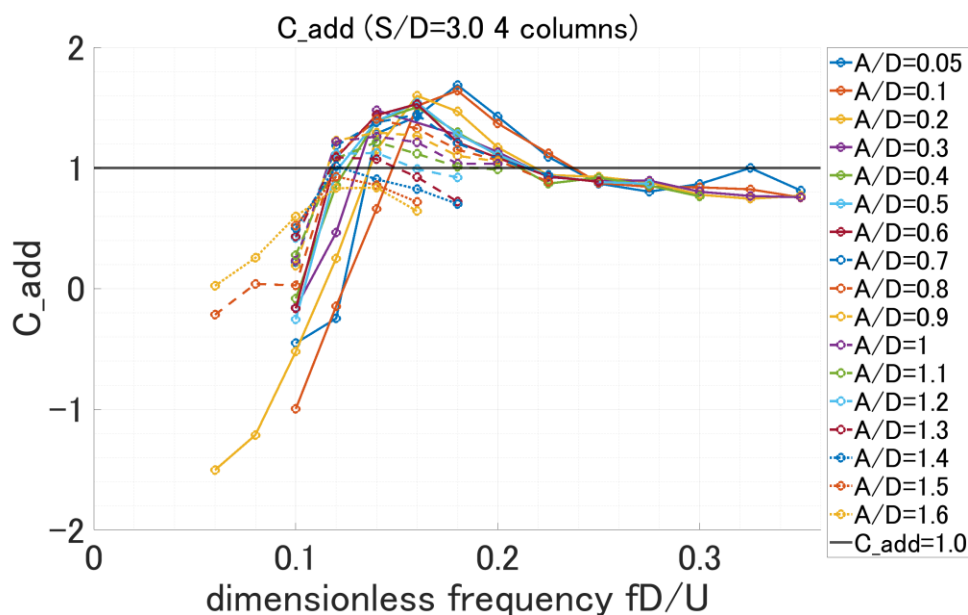


Figure 5-24 Added-mass coefficient (S/D=3.0).

Figure5-24 は、加振周波数と、4カラム全体にかかる付加質量係数の関係を表している。一部の振幅において、低周波数の振動において付加質量係数が負の値をとっており、この振動領域では周波数を増加させる力が働くことになる。また、無次元周波数が0.12を超えると全ての振幅において付加質量力が正の値をとるようになるので、これより周波数の高い領域では、付加質量力が周波数を下げる働きをもつようになる。また、周波数を大きくするにつれて、付加質量係数が1に近い値をとるようになることが分かる。

Figure5-25 は、各カラム間距離における浮体全体にかかる付加質量係数を、単一カラム時の付加質量係数で割って正規化したグラフである。全体的に、単一カラム時の付加質量係数を下回っており、カラム間距離を大きくすると単一カラム時の付加質量係数に近づく傾向がある。

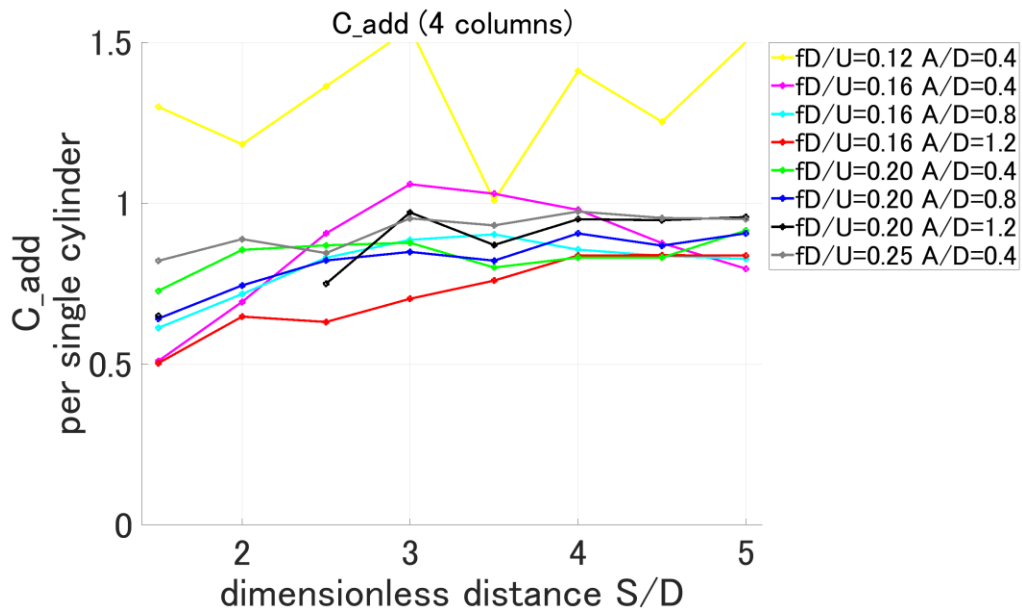


Figure 5-25 Added-mass with columns space.

5.5. 流体力関数のデータベース

5.4 のグラフで示したものを含め、強制加振実験から得られたデータに補足を行い、減衰係数と付加質量係数のデータベースを作成した。Fig5-26-29 に、カラーコンターで表したデータベースを表示する。Fig5-26,27 はそれぞれ $S/D=2.0$, 3.0 の時の減衰係数を表している。青い領域は負の減衰力が働くので振動が発達し、赤い領域との境界周辺で振動が安定すると考えられる。Fig5-26, 27 双方にて、安定すると考えられる領域を網羅できていることが確認できる。

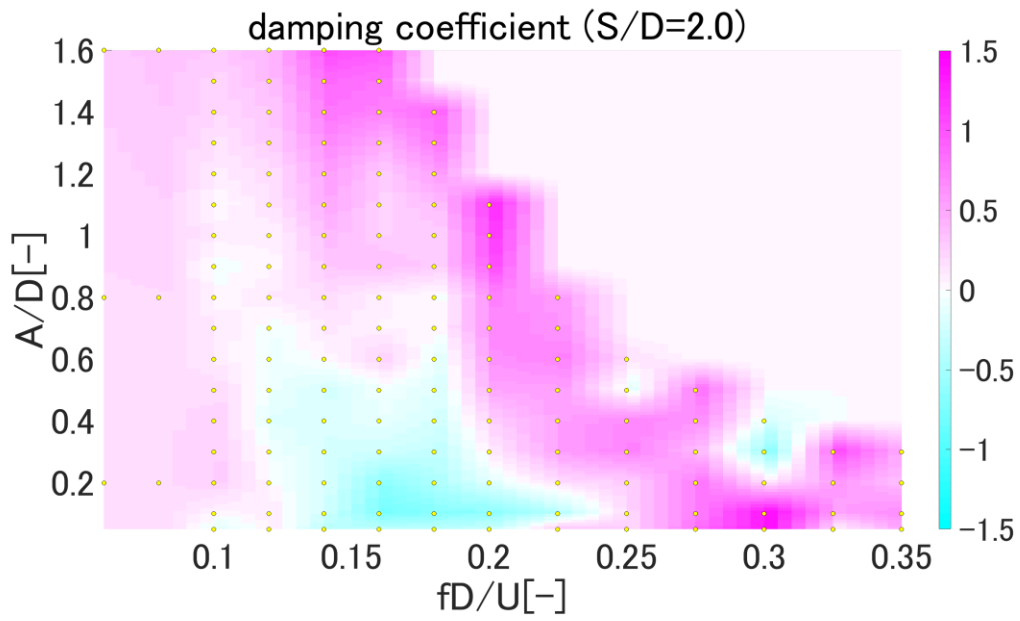


Figure 5-26 Contour of damping coefficient(S/D=2.0).

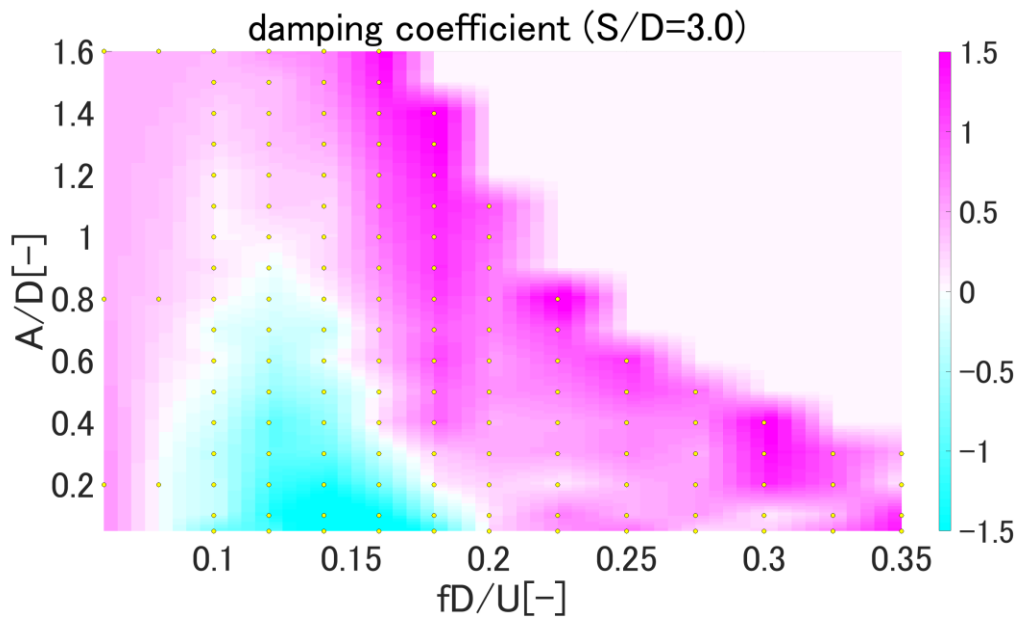


Figure 5-27 Contour of damping coefficient(S/D=3.0).

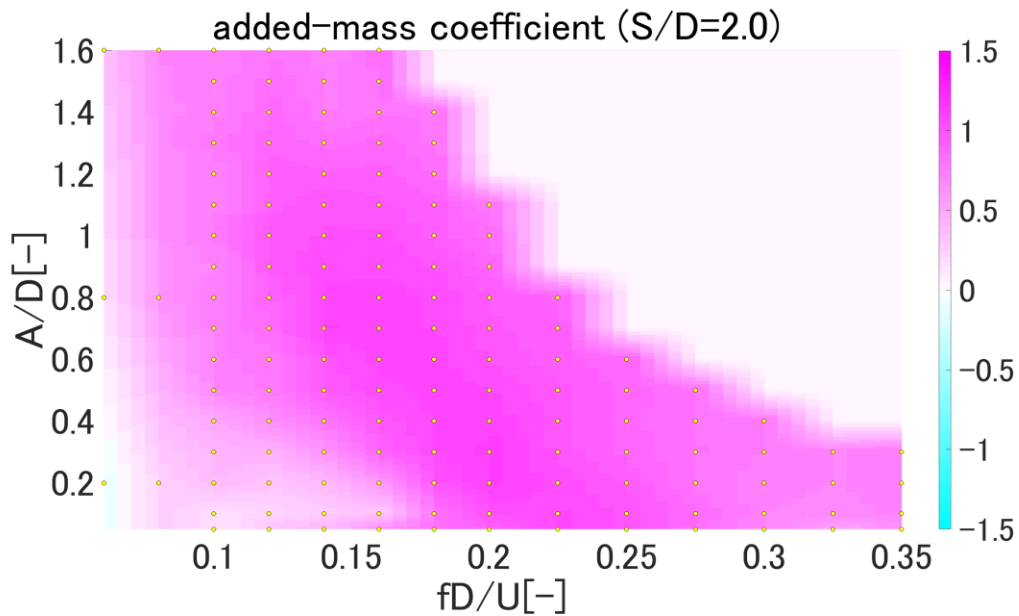


Figure 5-28 Contour of added-mass coefficient(S/D=2.0).

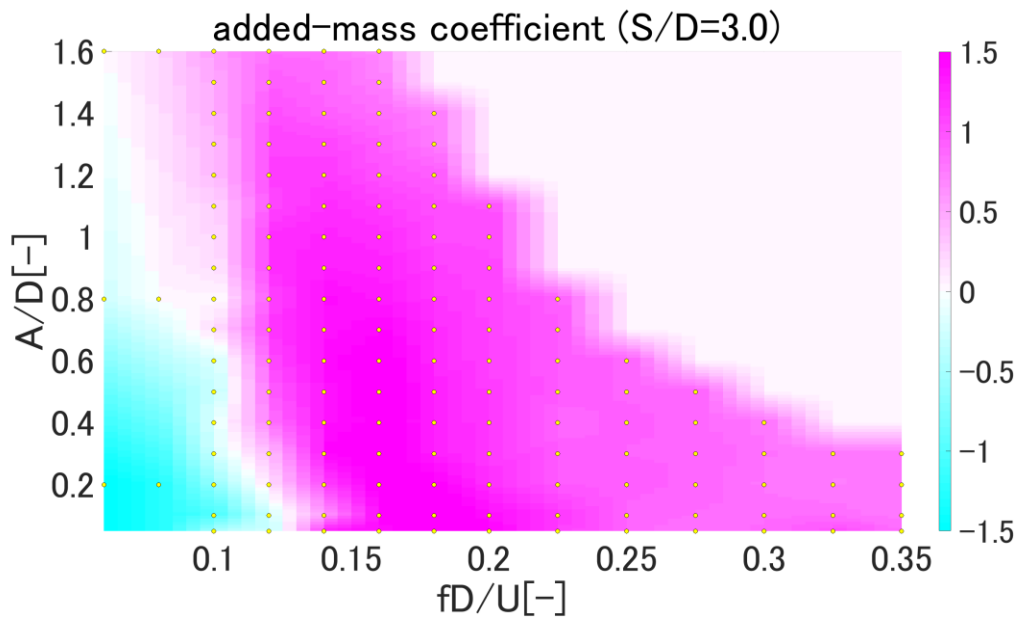


Figure 5-29 Contour of added-mass coefficient(S/D=3.0).

5.6. 考察のまとめ

5.6.1. 抗力係数の平均値

- ・ 前方、後方カラムともに、抗力平均は加振振幅と線形の関係がある。これは、加振振幅と後流域の幅が線形の関係にあるからと考えられる。

- ・ 加振周波数の低い領域では、抗力平均は周波数に依存する。高周波数振動時は後流域の幅が一定であるのに対し、低周波数振動時は無加振時に近い状態になるため、加振振幅が一定であっても加振周波数によって後流域の幅が変化するからであると考えられる。
- ・ 後方カラムにかかる抗力平均は単一カラムにかかる抗力平均より小さな値をとるが、カラム間距離を離すにつれて単一カラム時の抗力平均と近い値をとるようになる。後方カラムは前方カラムの後流域の中に収まるため単一カラムに比べ一様流の流入速度が小さくなるが、前方カラムからの距離を長くとると、後流域の流速が一様流の速度に向けて回復するからであると考えられる。
- ・ 前方カラムにかかる抗力平均は、カラム間距離が 2.5 以上の時は単一カラムにかかる抗力平均と近い値をとる。しかし、距離が 2.0 以下の場合は振動状態によってわずかに異なる値をとる。これは、カラム間距離が近いことによって 2 つの前方カラムの後流域が重複することが原因であると考えられる。

5.6.2. 揚力係数と抗力係数の標準偏差

- ・ 揚力変動と抗力変動共に、加振振幅の 1 乗及び加振周波数の 2 乗と比例に近い関係となる。これは、カルマン渦放出時の圧力変動の大きさが、加振加速度に比例しているからであると考えられる。
- ・ 前方カラムにかかる揚力変動はカラム間距離が 3.0 以上の時は単一カラムにかかる揚力変動と近い値をとる。しかし、距離が 2.5 以下の場合は振動状態によってわずかに異なる値をとる。これは、カラム間距離が近いことによって、振動方向に向かって後ろ側にあるカラムが、前側にあるカラムの後流域に入ってしまうからであると考えられる。

5.6.3. 減衰係数と付加質量係数

- ・ 減衰係数は一部の周波数において、低振幅にて負の値を取り、振幅を大きくしていくとある振幅にて 0 をとる。減衰係数が 0 となる振動状態で VIM が安定するので、VIM の挙動解析をする上で十分な流体力データを取得できたと考えられる。
- ・ 付加質量係数は一部の振幅において、低振幅にて負の値を取り、周波数を大きくしていくとある振幅にて 0 をとる。負の付加質量係数は、振動の周波数を増加させる働きをもつ。

第6章. VIM 挙動解析

強制加振実験から作成したデータベースに基づいて、VIM の挙動解析を行った。実験ごとに次のパラメータを変えて行った。

Table 6-1 Parameter in simulation.

S/D	Column space
V_r	Reduced Velocity
fD/U	Dimensionless frequency
A/D	Dimensionless amplitude

換算流速(Reduced velocity)は、式(33)の通り定義され、流速を浮体の直径と浮体の固有振動数で無次元化したものである。

$$V_r = \frac{U}{Df_n} \quad (30)$$

換算流速の逆数を取ると、

$$\frac{1}{V_r} = \frac{f_n D}{U} \quad (31)$$

となり、浮体の固有振動数を無次元化した値となる。プログラム中では U を 0.21m/s に固定しているので、 V_r を変化させるためにはばね定数を調整している(固有振動数 f_n を変化させるため)。

また、 f_n は次のように求める。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m(1+\alpha)}} \quad (32)$$

α の値は振動状態によって変化するが、ここでは $\alpha = 1$ として計算を行った。

また、ケースによっては強制加振状態からシミュレーションを開始した。その場合における強制加振の無次元周波数、無次元振幅も変化させながらシミュレーションをおこなった。

6.1. 静止状態からのシミュレーション

6.1.1. $S/D=3.0$ のケース

Figure6-1 は、VIM シミュレーション結果の時系列データを表しており、上から変位、周波数、振幅を表している。解析条件は、カラム間距離が半径の 3 倍、換算流速は 8.0 である。無次元固有周波数は換算流速の逆数をとるので、0.125 である。シミュレーション前の強制加振は行っていないので、強制加振の無次元周波数、無次元振幅は 0 と表記している。

シミュレーション開始直後に周波数が大きく上がっている。これは、浮体の振動と独立して発生するカルマン渦揚力の影響である。最終的に振動は、固有周波数よりもほぼ同じ値で

安定していることが分かる。

Figure6-2 は変位、減衰係数、付加質量係数を示している。

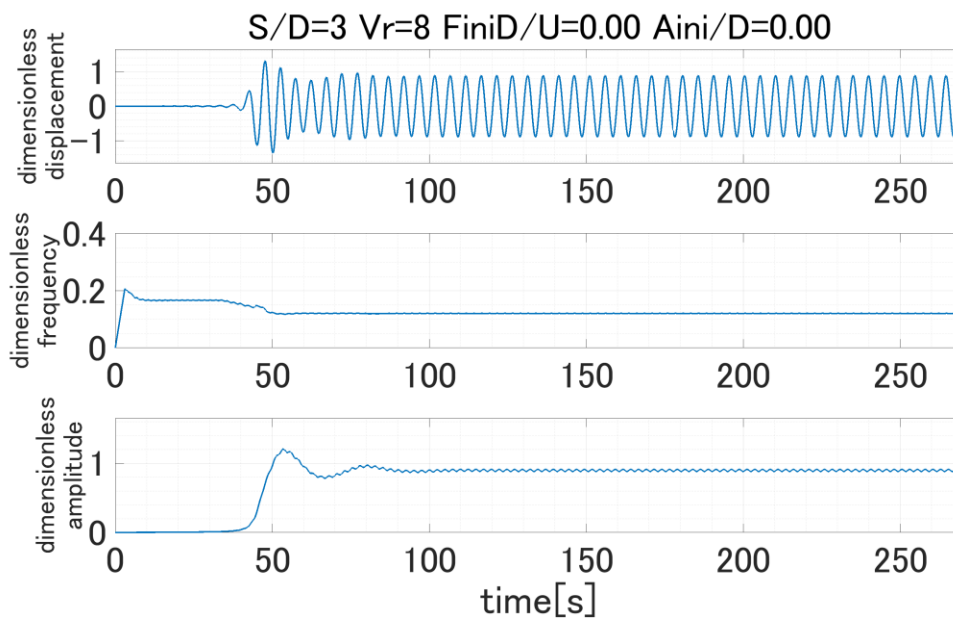


Figure 6-1 Time series1(S/D=3.0 Vr=8 fD/U=0.00 A/D=0.0).

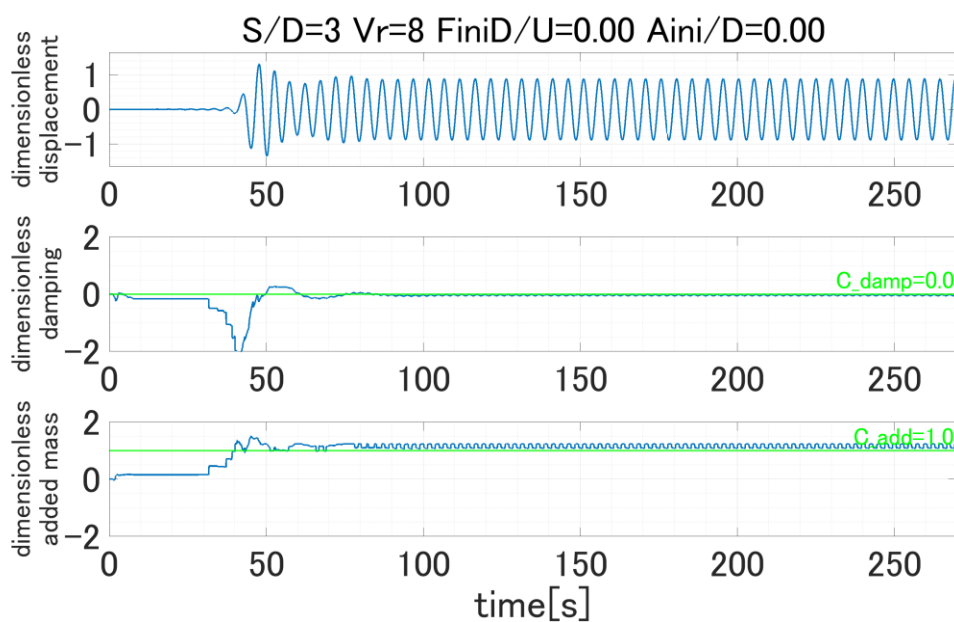


Figure 6-2 Time series2(S/D=3.0 Vr=8 fD/U=0.00 A/D=0.0).

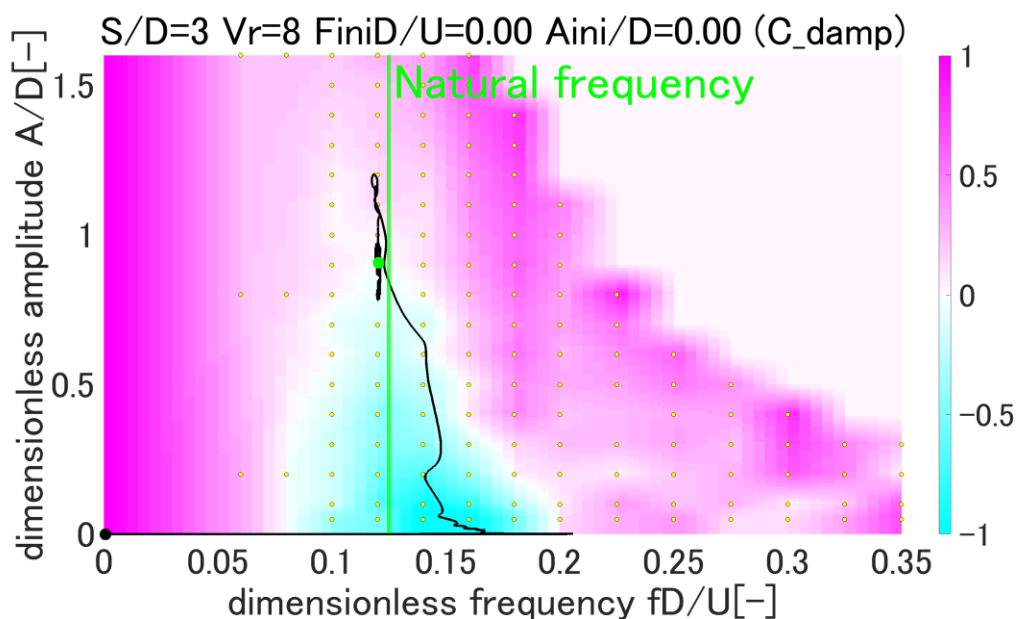


Figure 6-3 Vibrational status on damping($S/D=3$ $Vr=8$ $fD/U=0.0$ $A/D=0.0$)

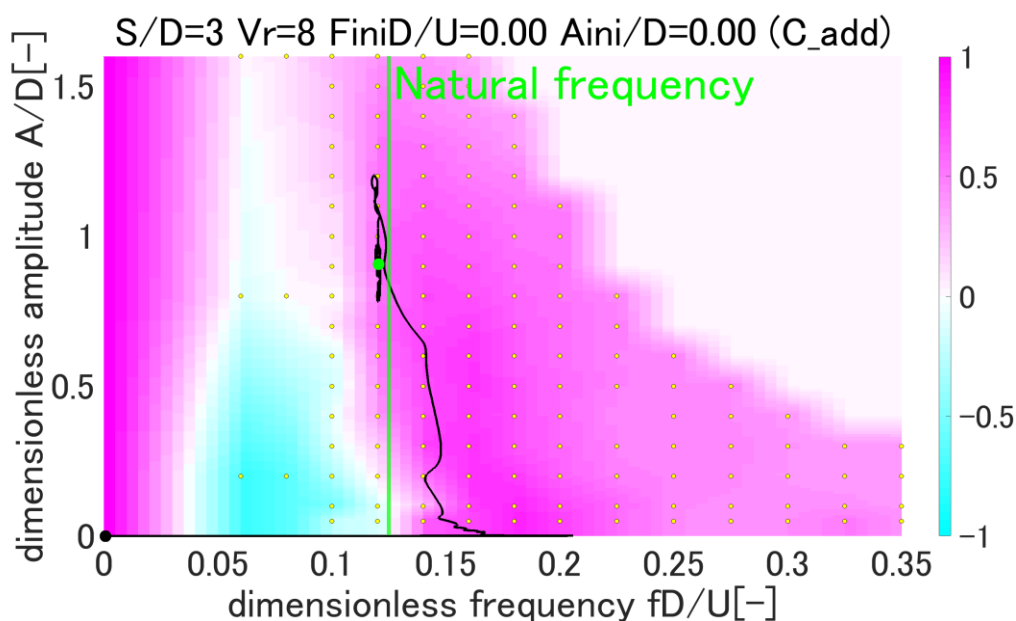


Figure 6-4 Vibrational status on added mass($S/D=3$ $Vr=8$ $fD/U=0.0$ $A/D=0.0$).

Figure6-3 は、周波数と振幅の移り変わりを、減衰係数のコンター図の上に重ねて表している。コンター図の青い部分は減衰係数が負の値をとっている部分である。この領域では振動が発達し、減衰係数が 0 になる部分(コンター図上では白くなっている部分)にて振動が安定していることが分かる。

また、先行研究[5]では減衰係数が負の値をとる領域を網羅しきれていなかったため VIM が安定して発生する振動状態の流体力は外挿を用いていたが。しかし、当研究にて作成した

データベースは、VIM が安定して発生する領域を網羅できていることが確認できた。

Figure6-4 は、周波数と振幅の移り変わりを、付加質量係数のコンター図の上に重ねて表している。

6.1.2. S/D=2.0 のケース

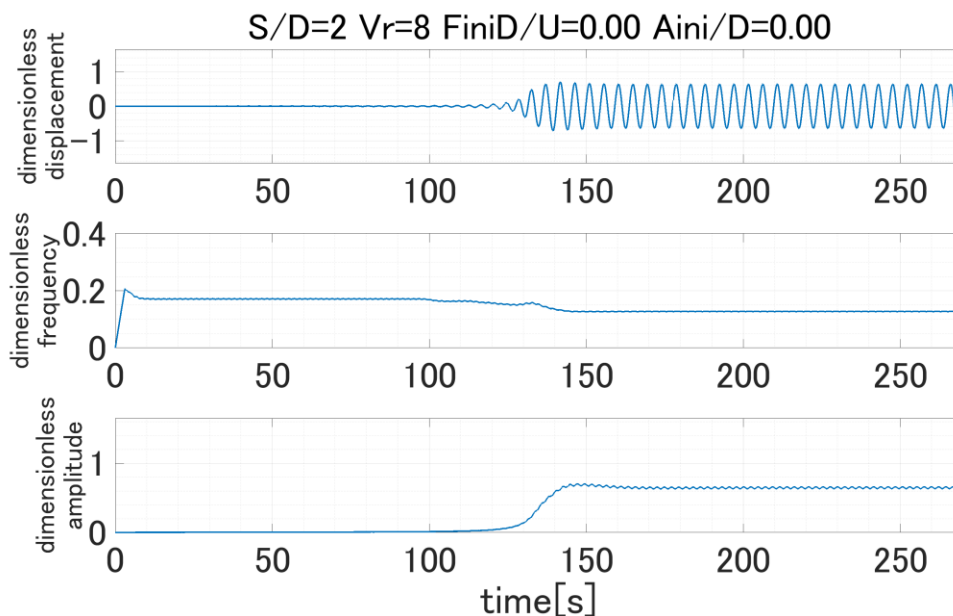


Figure 6-5 Time series1(S/D=2.0 Vr=8 fD/U=0.00 A/D=0.0).

Figure6-5 は、カラム間距離が半径の 2 倍の時のシミュレーション結果を表している。カラム間距離が 3 倍の時と同様、減衰係数が 0 となる部分で振動が安定していることが分かる。

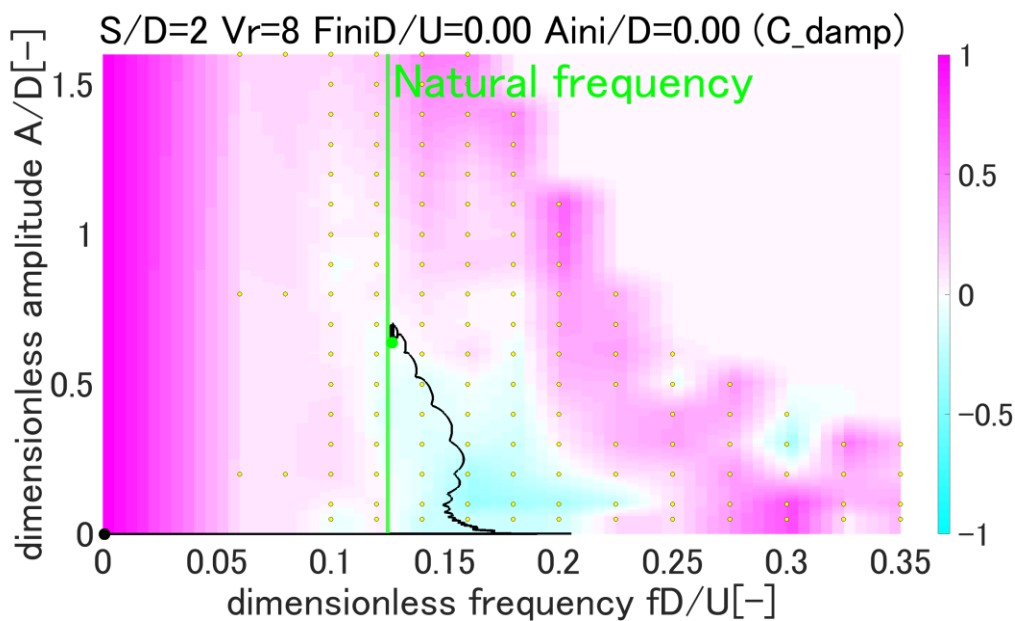


Figure 6-6 Vibrational status on damping(S/D=2 Vr=8 fD/U=0.0 A/D=0.0).

Figure6-6 は、振動状態の移り変わりを減衰係数のコンター図の上で表している。 $S/D=3.0$ の時と同じく、減衰係数が負の値をとるとき振動が発達して、減衰係数が 0 になる部分で振動が安定することが分かる。

6.2. 強制加振状態からのシミュレーション結果

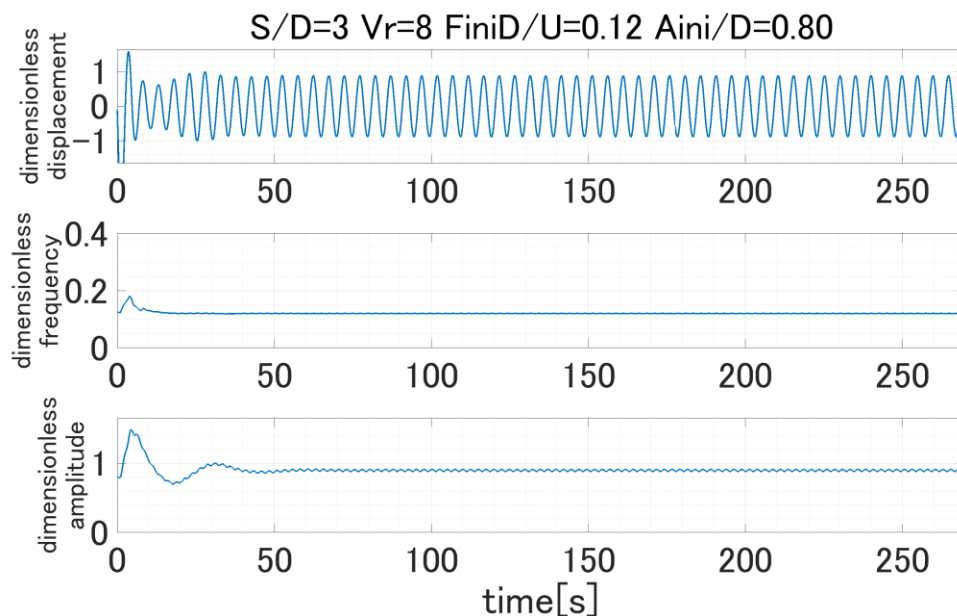


Figure 6-7 Time series1($S/D=3.0$ $V_r=8$ $fD/U=0.12$ $A/D=0.08$).

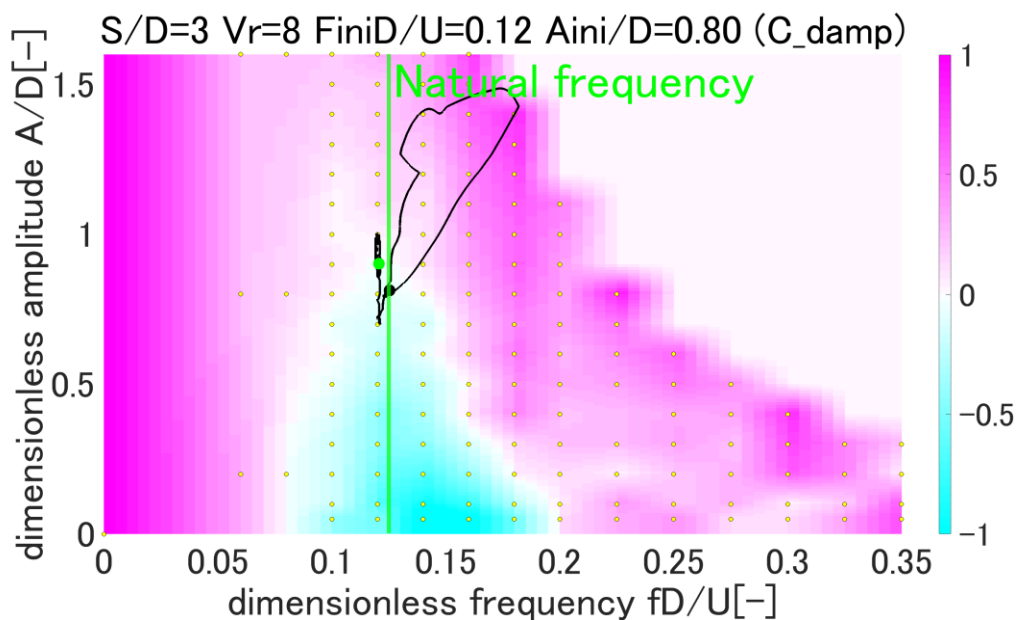


Figure 6-8 Vibrational status on damping($S/D=3.0$ $V_r=8$ $fD/U=0.12$ $A/D=0.08$).

Figure6-7 は $S/D=3.0$ の浮体を $fD/U=0.12$ $A/D=0.08$ の条件で加振してからシミュレーションを行ったときの、変位、周波数、振幅を示している。Figure6-8 は、無次元周波数と

無次元振幅の変遷を表している。振幅を 0 とせずわずかに値を持たせたのは、振幅を 0 に設定してしまうと加振状態でなくなってしまうからである。安定時の振動状態は、初期状態を静止状態から始めるか加振状態から始めるかによらずほぼ同じ値をとることが分かった。

6.3. 換算流速を変えた場合のシミュレーション結果

ここでは、シミュレーション前の加振は行わず、換算流速を変えてシミュレーションをおこなった。

6.3.1. $S/D=3.0$ のケース

6.3.1.1. $V_r=6$

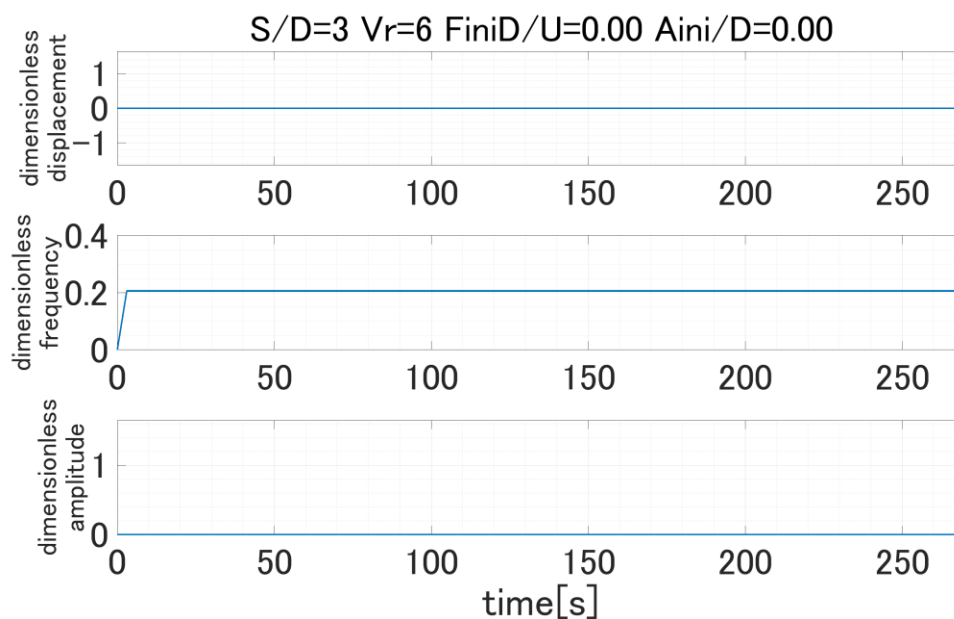


Figure 6-9 Time series1($S/D=3.0$ $V_r=6$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).

Figure6-9 は換算流速が 6 の時の変位、周波数、振幅の時系列データを表している。変位と振幅が非常に小さな値をとっており、一定の周波数で減衰振動をしていることがわかる。

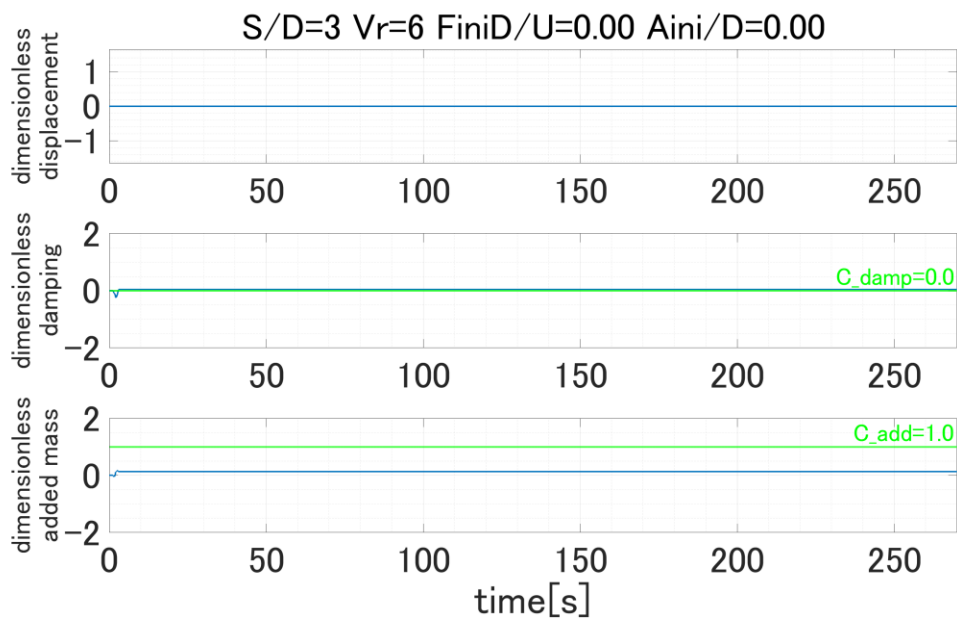


Figure 6-10 Time series2(S/D=3.0 Vr=6 fD/U=0.00 A/D=0.00).

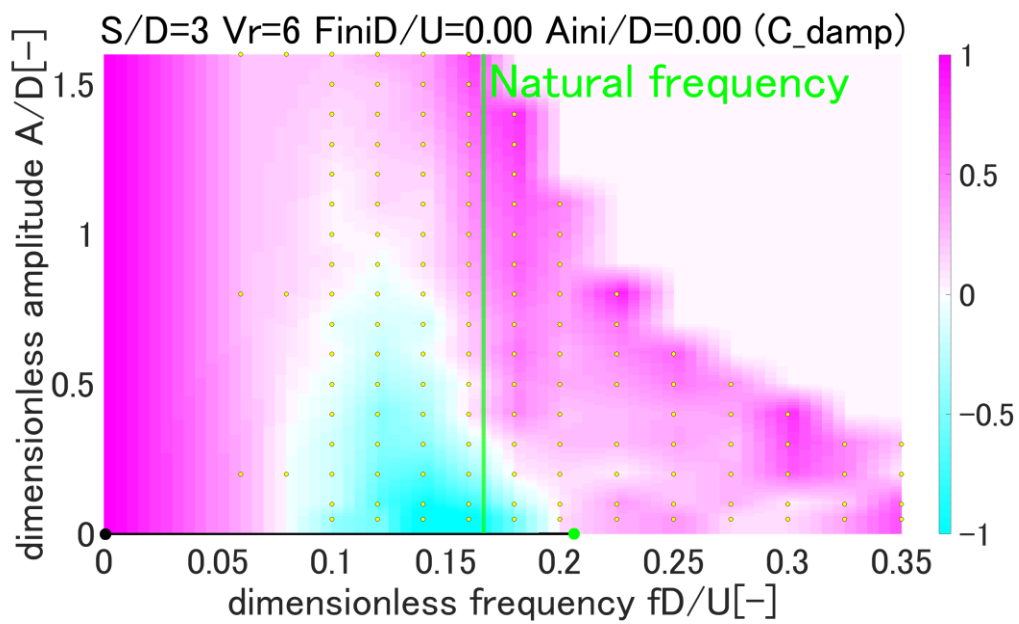


Figure 6-11 Vibrational status on damping(S/D=3 Vr=6 fD/U=0.00 A/D=0.00).

6.3.1.2. Vr=8

6.1.1 で示した通りである。

6.3.1.3. $V_r=9, 10, 13$

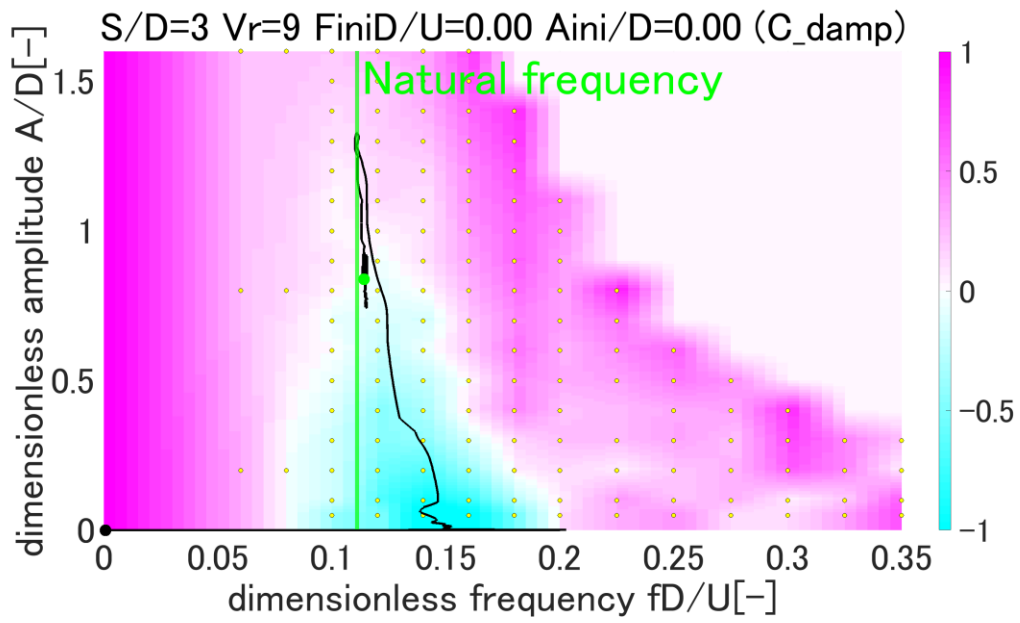


Figure 6-12 Time series1(S/D=3.0 $V_r=9$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).

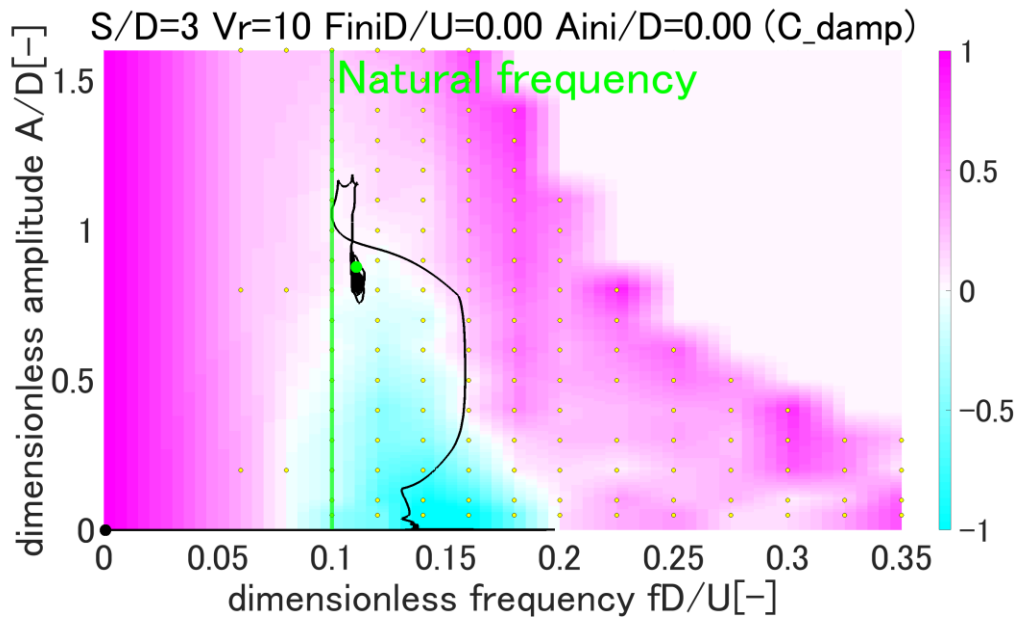


Figure 6-13 Vibrational status on damping(S/D=3 $V_r=10$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).

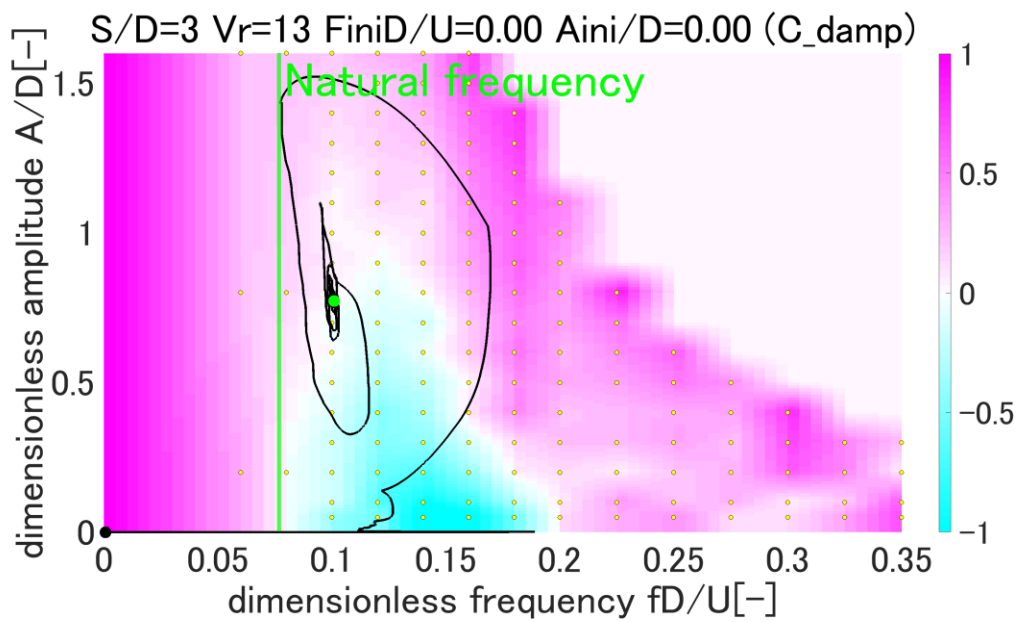


Figure 6-14 Vibrational status on damping($S/D=3$ $V_r=13$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).

Figure6-12-14にて、 $V_r=9, 10, 13$ の時の振動状態の様子を減衰係数のコンター図上で表した。どのケースも、低振幅のまま周波数が増加し、負減衰の領域に入ってから振幅が上昇している。

6.3.2. S/D=2.0 のケース

6.3.2.1. $V_r=7,10,12$

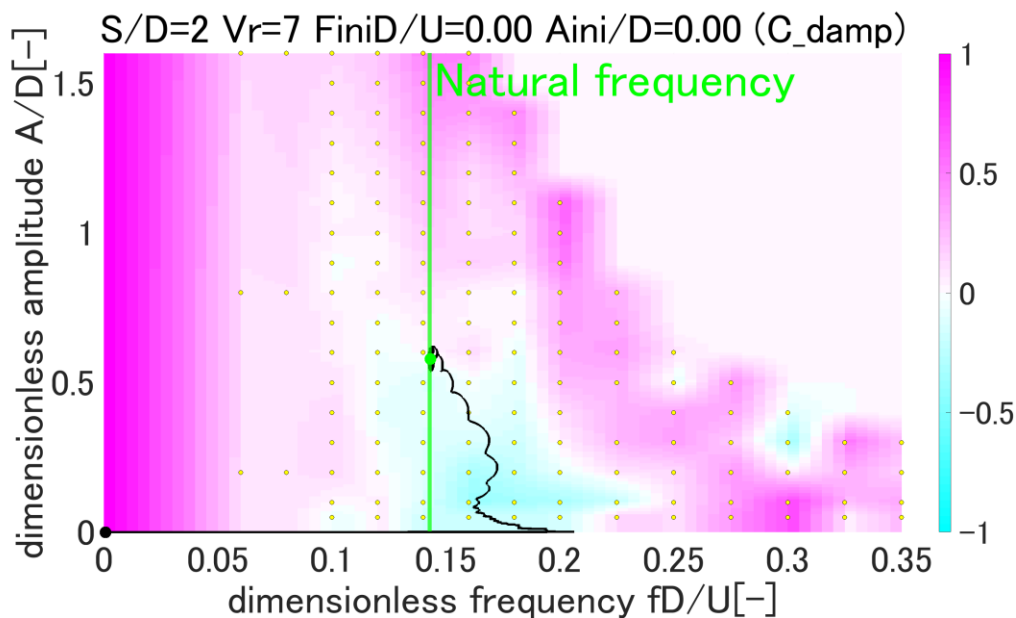


Figure 6-15 Vibrational status on damping($S/D=2$ $V_r=7$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).

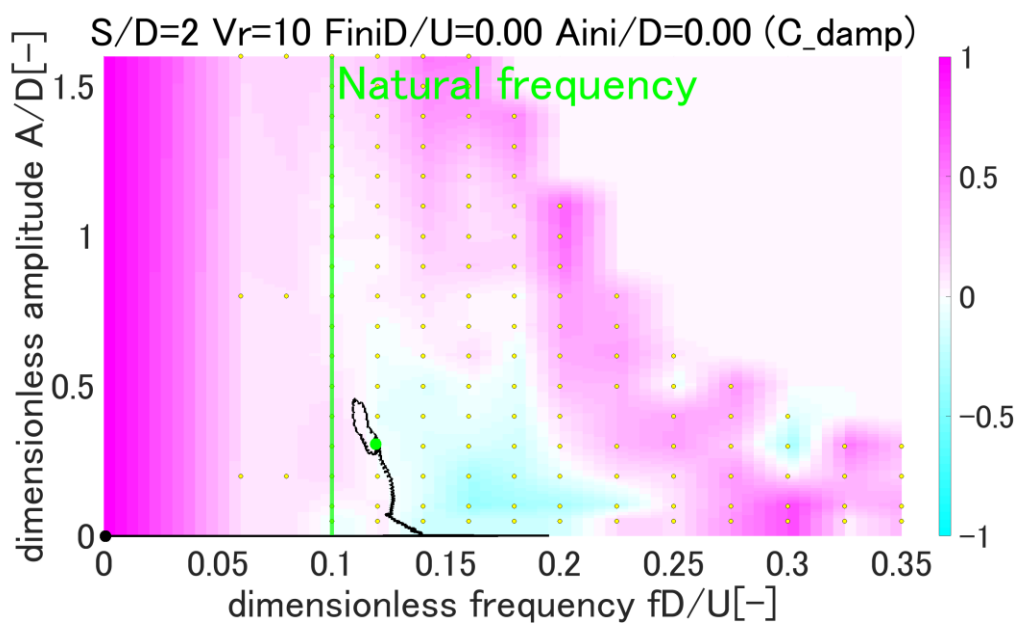


Figure 6-16 Vibrational status on damping($S/D=2$ $V_r=10$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).

Figure 6-15-17にて、 $S/D=2.0$ 、換算流速がそれぞれ7,10,12のときの振動状態の変遷を示した。 $S/D=3.0$ の時と同様、換算流速によってVIMが安定して発生する振動状態が変化することを確認できた。

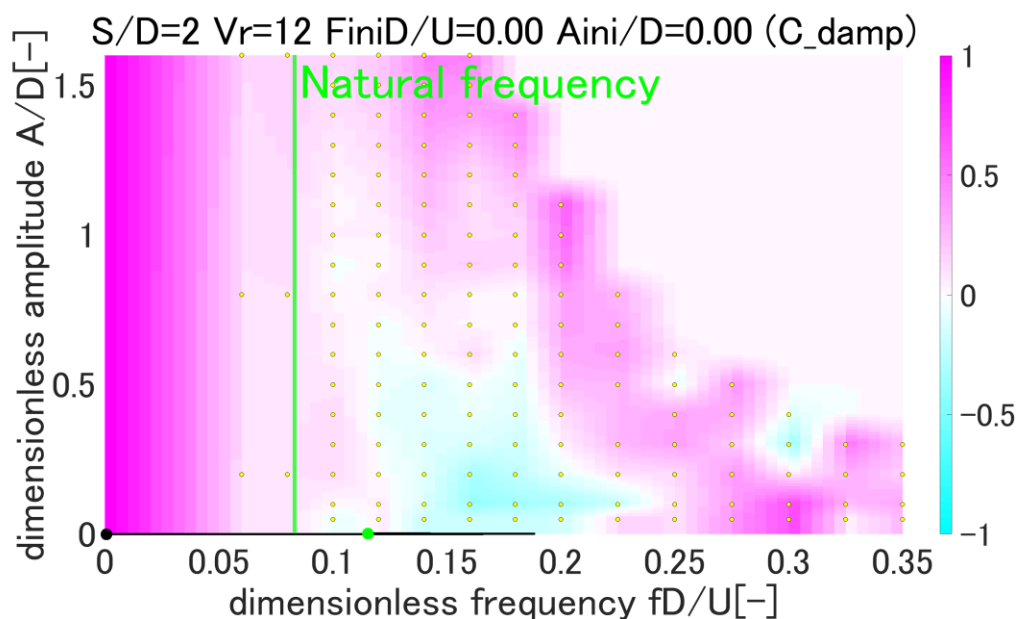


Figure 6-17 Vibrational status on damping($S/D=2$ $V_r=12$ $fD/U=0.00$ $A/D=0.00$).

Figure6-17にて、 $V_r=12$ のケースを示した。次にFigure6-18にて、同じ換算流速で、初期条件を変えてシミュレーションを行ってみた。

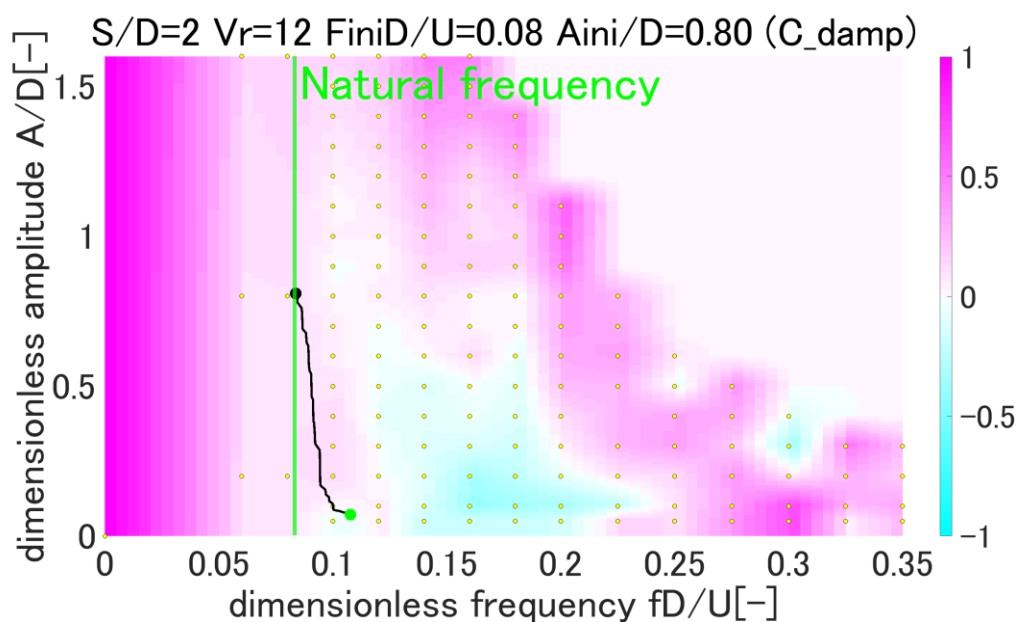


Figure 6-18 Vibrational status on damping($S/D=2$ $V_r=12$ $fD/U=0.08$ $A/D=0.8$).

無次元周波数を 0.13, 無次元振幅を 0.4 に設定してみたところ、Fig6-17 とは違う振動状態に収束した。

同じ換算流速においても、初期値によって振動が発生する場合としない場合があることが分かった。

Figure6-19 に、換算流速と無次元振幅の関係性をまとめた。無次元状態を算出する際に行ったシミュレーションは、無次元初期周波数を構造の固有周波数に設定し、無次元初期振幅を 0.8 に設定した。また、S/D=3.0 の時の参考データとして、Goncalves[4]が行った VIM 自由振動実験のデータと比較した。各々のパラメータは Table6-2 に示した。

Table 6-2 Parameter in experiment and simulation.

Symbol	parameter	Goncalves[4]	simulation	unit
U	Velocity	0.3	0.21	m/s
D	Diameter	0.25	0.125	m
L/D	Aspect ratio	1.5	1.5	—
Re	Reynolds number	10,000-110,000	26250	—
Fr	Froude number	0.023-0.253	0.12	—

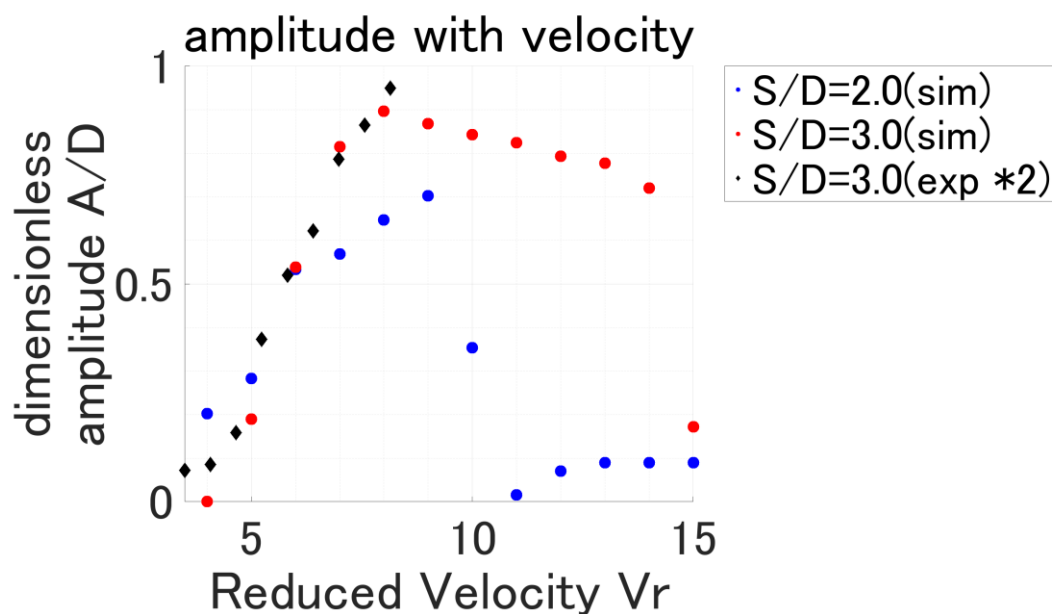


Figure 6-19 Velocity and amplitude(S/D=3.0).

S/D=3.0 のケースにおいて、シミュレーション値が実験値と近い値をとることが確認できた。

第7章. 結論

7.1. 強制加振実験

回流水槽を用いて複数カラム型浮体に一様流を当てながら加振する実験を行い、各カラムにかかる流体力を計測した。加振振幅を十分にとることで、VIM が安定して発生する振動状態を網羅することができた。また、1部の振動状態については8種類のカラム間距離にて実験を行い、流体力とカラム間距離の関係性を調べた。結果、以下のような傾向がみられた。

- ・ 抗力平均は加振振幅と線形の関係にあり、低周波数領域にてのみ加振周波数にも依存することを確認した。これは、振動状態によって後流域の幅が変わるからであると考えられる。
- ・ 後方カラムにかかる抗力平均は単一カラムより小さな値をとるが、カラム間距離を離すにつれて単一カラムにかかる抗力平均と近い値をとるようになることを確認した。これは、後方カラムが後流域に隠れるが、距離を離すにつれて後流域の流速が一様流の流速に近づくからであると考えられる。
- ・ 前方カラムにかかる抗力平均は、カラム間距離が近い時のみ単一カラムにかかる抗力平均より小さな値をとることを確認した。これは、2本の前方カラムの各々が作る後流域の範囲が一部被るからであると考えられる。
- ・ 揚力変動と抗力変動は加振振幅と比例し、加振周波数の2乗と比例するように見える。これは、両流体力変動ともカルマン渦放出時に生じる圧力変動によるものであり、この変動圧力は加振加速度に比例するからであると考えられる。
- ・ 後方カラムにかかる付加質量係数は単一カラムより小さな値をとるが、カラム間距離を離すにつれて単一カラムにかかる付加質量係数と近い値をとるようになることを確認した。

7.2. VIM 予測シミュレーション

強制加振実験から得られた流体力データベースに基づいて、VIM の予測シミュレーションを行った。

- ・ 実験から得られたデータベースの範囲内で VIM の安定領域における振動を再現することができた。
- ・ 減衰係数が0となる振動領域で安定することを再確認した。
- ・ 付加質量係数が1より大きい時固有周波数より小さな周波数で振動が安定し、付加質量係数が1より小さい時固有周波数より大きな周波数で振動が安定することを確認した。
- ・ 換算流速を変えると、減衰係数と負荷質量係数に応じた振幅と周波数で振動が安定することを確認した。
- ・ 換算流速によっては VIM が発生しないケースを確認した。この換算流速においてはシ

ミュレーション開始時に強制的に加振を行うと VIM が発生するケースもあることを確認した。

- S/D=3.0 のシミュレーション結果について、VIM の自由振動実験の結果と比較したところ、実験値に近い値をとっていることが確認できた。

第8章. 参考文献

- [1] 電気事業連合会, 22 1 2020. Available:
<https://www.fepc.or.jp/enterprise/jigyuu/world/index.html>.
- [2] 福岡玄貴, “VIM 運動における自由表面及び端部の影響に関する実験的研究,” 東京大学修士論文, 2015.
- [3] Alam, et al “Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number,” *Journal of Wind*, 2003.
- [4] Gonçalves, Hannes, et al “FIM - flow-induced motions of four-column platforms,” 2018.
- [5] R. Gopalkrishan, “Vortex-Induced Forces on Oscillating Bluff Cylinders,” D.Sc. Thesis, Department of Ocean Engineering, MIT, Cambridge, USA., 1993.
- [6] 手島智博, “流体構造数値解析による曳航パイプの VIV に関する研究,” 東京大学修士論文, 2005.
- [7] 椎葉星哉, “複数カラム型浮体の渦励起運動予測モデル開発に関する研究,” 東京大学修士論文, 2018.
- [8] “東京計測株式会社,” 21 1 2020.
Available: <http://www.tokyokeisoku.co.jp/seihin/seihin01/sf2012.htm>.

第9章. 謝辞

本研究を進めるにあたり、平林紳一郎准教授には丁寧にご指導いただき、心より感謝しております。私が研究において至らない点がありながらも、親身になって解決策を考えてくださり、とても助かりました。修論執筆の最後の最後までご迷惑をおかけいたしました。私が最後まで修士論文を書き上げることができたのは平林先生のご支援のおかげだと思っております。心より感謝申し上げます。

鈴木研究室の鈴木先生、芳村先生、宝谷さんは合同ゼミにて適切なアドバイスをくださり、私の研究をより意義のあるものにしてくださいました。Gonçalvesさんは実験に必要な機材を貸して下さったり、論文のデータをくださったりと、非常に助かりました。

夏の強制加振曳航実験の際は、船形試験水槽で技術職員をしていらっしゃる加藤さんに大変お世話になりました。工作の仕方や実験器具の使い方を何も知らない私に一から教えてくださり、大変勉強になりました。

秋の強制加振実験の際は、生産技術研究所水槽で技術職員をしていらっしゃる吉田さんに大変お世話になりました。私の研究計画や実験の準備の手順などについて、私の理解が甘い部分も丁寧に教えてくださり、自らの行いを見直すきっかけとなりました。また、私の実験の進捗を見て延長を提案して下さりと、とても助けられました。

副査の尾崎先生は副査面談の際に的確なアドバイスをくださり、自分の研究について新たな視点から考え直すきっかけとなりました。

平林先生の秘書をしていらっしゃる石渡さんは週 3 日院生室で業務をなされていました。同級生がおらず寂しい思いをしている私に毎日話しかけて下さったのはとても嬉しかったです。

本研究室の後輩である北野君は、普段から研究室の雑務を引き受けてくれ、また秋の実験では毎日朝早くから手伝ってくれ、とても助かりました。僕が実験を無事完遂できたのは北野君のおかげといっても過言ではありません。

もう一人の後輩である松下君は、積極的に勉強や研究に取り組み、さらには南極の観測にまで出向く行動力を発揮し、僕は色々なことを見習わせてもらいました。

また、鈴木研究室 M2 の坂井君、塩原君、福井君には、忙しい時期にはるばる本郷から実験手伝いに来てもらったことに加え、就活や人間関係、その他色々なことについて相談にのってもらい、とても心の支えになりました。

唯一の研究室同期であった李君とは、M2 として一緒に過ごせた時間は短かったけど物凄く楽しかったです。

私がお世話になった方はこのページにはまだまだ書ききれませんが、私がお世話になった全ての皆様に心より感謝申し上げます。ありがとうございました。