

[28]全国共同利用研究成果報告

<https://hdl.handle.net/2324/7431320>

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 28, pp.1-, 2025-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



画像解析による船側波形の計測技術の開発

広島大学大学院先進理工系科学研究科
教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

波浪中の浮体や船舶に作用する流体力や動揺の計測技術はある意味完成された技術となっているが、近年の数値流体力学の進展に伴い、その結果を検証するためのより高精度な実験データが必要になって来ている。そこで切望されるデータは、浮体や船舶が造波する波や物体表面の圧力などの局所的な物理量であり、これらを計測・解析する新たな技術の開発が急務となってきている。

こうした背景を受けて実施したこれまでの共同利用研究において、光センシング技術を用いた新しい貼付型の圧力センサーを開発し、世界初の非定常圧力面分布計測に成功している¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。その中で、水面を出入りする圧力センサーについては別途計測される船側波形を用いた処理が必要で、かつその計測精度が重要であることが分かってきた。そこで本研究では、高速度カメラを使用した船側波形を非接触で高精度に計測する新しい計測法を開発することを主目的とした研究を展開する。

また、使用する供試模型として従来船型の RIOS bulk carrier 模型船に加え、近年開発された短波長領域で抵抗増加低減が見られるという船首形状を持つ船型の 2 船型を用いた。船首形状の異なる船舶においても船側波形の計測に従来の画像解析手法が行えるか確認を行うと同時に、各船型における船体運動、抵抗増加、船体表面圧力等の計測も実施した。

2. 研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	教授	代表者・実験解析
中谷 俊介	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士 2 年	実験補助
青木 海人	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士 2 年	実験補助
河野 邑磨	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士 2 年	実験補助
武本 昂大	広島大学工学部 第一類 輸送システムプログラム	学部 4 年	実験補助
春田 海里	広島大学工学部 第一類 輸送システムプログラム	学部 4 年	実験補助
沖 帆志隆	広島大学工学部 第一類 輸送システムプログラム	学部 4 年	実験補助

3. 実験の概要

2024 年度の 9 月に九州大学応用力学研究所の深海機器実験水槽 ($L \times B \times d = 65 \times 5 \times 7 \text{ m}$) にて水槽試験を実施した。本実験で使用した供試模型船は、これまで使用してきた硬質発泡ウレタン製の RIOS bulk carrier 模型船と短波長領域で抵抗増加低減が見られる船首形状を持つ bulk carrier 模型船の 2 隻である。これら 2 船型は排水量は同一であり、喫水線以下は同形状で船首部のフレア部分のみが異なっている。以降は従来の RIOS bulk carrier 模型船を A 船型 (Type A)、短波長領域で抵抗増加低減が見られる船首形状を持つ船型を B 船型 (Type B) と呼称する。実験概要としてはこれら両船型の右舷側の ord. 9.5, ord. 9.75, stem 部分に歪式圧力センサを埋め込み右舷側と左舷側の一部には容量式波高計を設置し運動計測試験、強制動揺試験および波強制力試験を実施し、船側波形および圧力等を計測する。今回の実験では縦切り波形の計測も行っており、船体側面から 100mm 離れた位置に 6 本の容量式波高計を設置し船側波形や圧力の計測と同時に計測を行っている。また、縦切り波形の他に入射波の計測も行っている。

画像解析においては 2 種類の計測法を実施し、ステレオ画像解析を用いた Multifold 法では地上にカメラ 2 台と 6 台のレーザー墨出し器を設置し、断面追尾法においては曳航電車に F.P. から Ord.9.0 までを映したカメラ 2 台と、Ord.8.5 から Ord.7.5 までを映したカメラ 2 台の計 4 台を設置して計測を行った。

また、高速度カメラにて撮影された画像からは水面と模型のデッキに沿って張り付けられた黒色のテープまでのピクセル数が計測され、その後ピクセル数から実際の距離に変換することで船側波形の計測を行う。

3.1. 供試模型

本実験で使用した供試模型を Fig.1 に示す。また、Table.1 に A 船型、B 船型の主要目及び Fig.2 に船首部分の body plan を示す。また、body plan には歪式圧力センサの埋め込み位置も示しており 2 船型どちらにおいても ord. 9.5, ord. 9.75, stem の 3 断面の計 28 個埋め込みを行っている。A 船型 (左側) は白丸、B 船型 (右側) は黒丸で示しており、stem 部分における共通の埋め込み位置に関しては赤丸で示している。



Fig. 1: 供試模型 (上側:A 船型, 下側:B 船型)

Table 1: 供試模型主要目

L_{pp}	(m)	2.40
A_W	(m^2)	0.835
B	(m)	0.400
$x_B (= x_G)$	(m)	0.0510
d	(m)	0.128
KG	(m)	0.115
C_b		0.800
KB	(m)	0.662
∇	(m^3)	0.0983
κ_{yy}/L		0.250

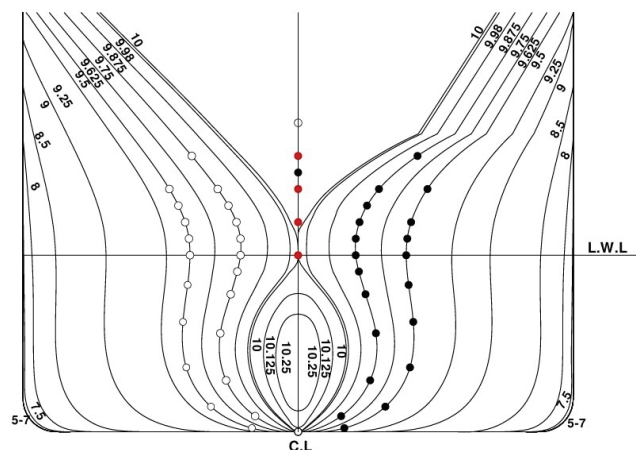


Fig. 2: Body plan と歪式圧力センサの設置位置 (左側:A 船型, 右側:B 船型)

3.2. 容量式波高計

高速度カメラによる船側波形計測の妥当性を評価するために、Fig.3 に示すように模型船の ord.5.0 から stem 部分までの計 22 断面に容量式波高計を設置した。2 船型とも同じ位置に設置しており歪式圧力センサーを埋め込んでいる ord.9.50 と ord.9.75 のみ左舷側に設置している。容量線の設置方法に関しては船体側面に穴の空いた 3D プリンター製の針を刺し、そこに容量線を通しており船体側面から 3mm 程度離れた位置に容量線を設置している。

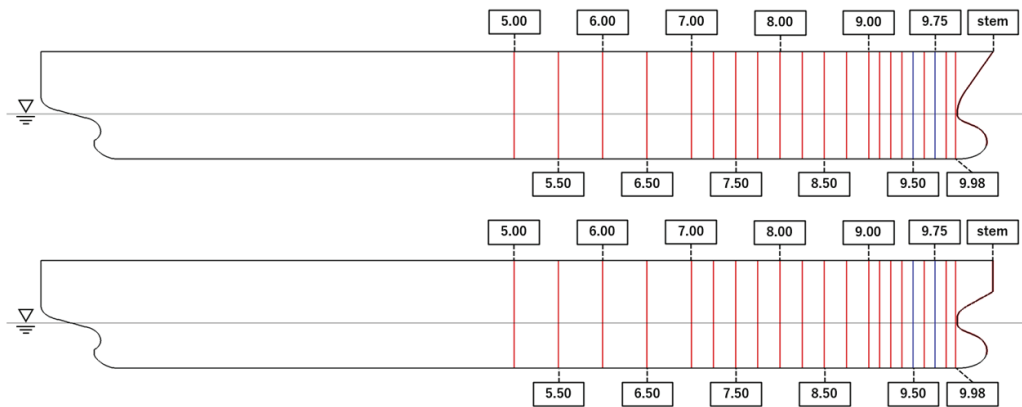


Fig. 3: 容量式波高計設置断面 (上側:A 船型, 下側:B 船型)

3.3. 高速度カメラによる船側波形計測

撮影に使用したカメラはDITECT社製ハイスピードカメラ「HAS-U2(Fig. 4)」である。また、撮影時のカメラのコンディションを、Table. 2に示す。撮影にはDITECT社製撮影ソフト「HAS-Xviewer」を使用し、撮影した映像の解析にはDITECT社製画像解析ソフト「DIPP-MOTIN V/3D」を使用した。

カメラによる船側波形計測の方法としては、模型左舷側のデッキに沿って黒色のテープを張り船体のOrdinate毎に罫書かれた線上において黒色のテープの下部から水面までの長さを撮影された画像から算出する。そして、その長さを喫水線と黒色のテープの下部までの長さから引くことにより船側波形の振幅が算出されるというのが画像解析における船側波形計測の仕組みである。従来は喫水線から黒色のテープまでの距離は実際に定規で測定した値を使用していたが、今回の実験では静水中における喫水線から黒色のテープまでの距離をカメラにて測定しその数値を基準として解析を行った。



Fig. 4: Camera(HAS-U2)

Table 2: Camera condition

No	項目	設定値
1	フレームレート [fps]	100
2	画面サイズ	1600 × 1200
3	シャッタースピード [s]	1/100(OPEN)
4	計測フレーム [f]	800
5	トリガーモード	Start & Positive

3.4. 運動計測試験

運動計測試験で使用した装置、計測システム図をそれぞれFig. 5, Fig. 6に示す。運動計測装置においては模型船に作用する運動 (surge, heave, pitch) 及び前後のロッドに取り付けられたひずみゲージで船体長手方向にかかる抵抗値を計測している。トリガーはカメラ操作ソフトウェアがインストールされたPCと電気系のデータ収録器の両方に配線されており、流体力の計測、高速度カメラおよび容量線による船側波形計測が同時に行えるようになっている。本計測試験では $F_n = U/\sqrt{gL} = 0.18$ で模型船を曳航して実験を行っており、静水中と波浪中それぞれにおいて複数回航走し計測を行っている。

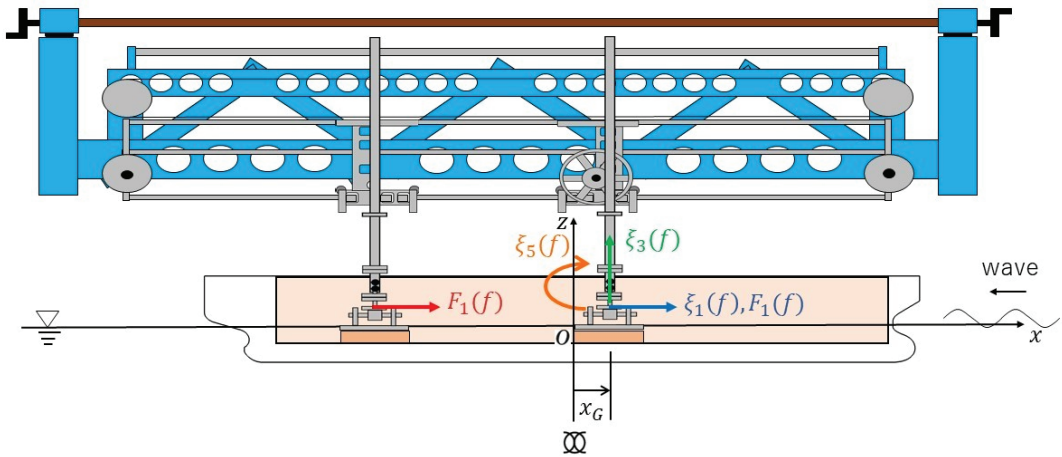


Fig. 5: 運動計測装置概略図

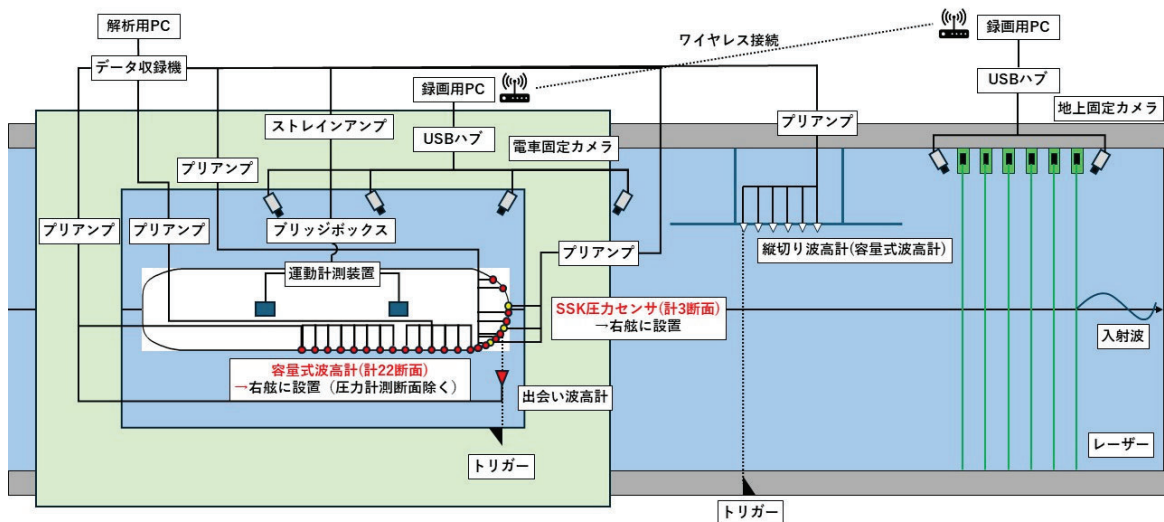


Fig. 6: 運動計測試験における計測システム図

3.5. 強制動揺試験および波強制力試験

強制動揺試験で使用した装置，計測システム図をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す．強制動揺試験では2つのロードセルに検力計を接続し，これらを介して強制動揺装置と模型船を接続している．模型船の fore 側に接続した検力計からは surge, heave, pitch 方向への力を，aft 側に接続した検力計からは surge, heave 方向への力を計測している．トリガー等のシステムは運動計測試験と同様であり，高速度カメラおよび容量線による船側波形計測が同時に行えるようになっている．また，強制動揺試験においても $F_n = U/\sqrt{gL} = 0.18$ で実験を行っており，静水中と波浪中それぞれにおいて複数回航走し計測を行っている．

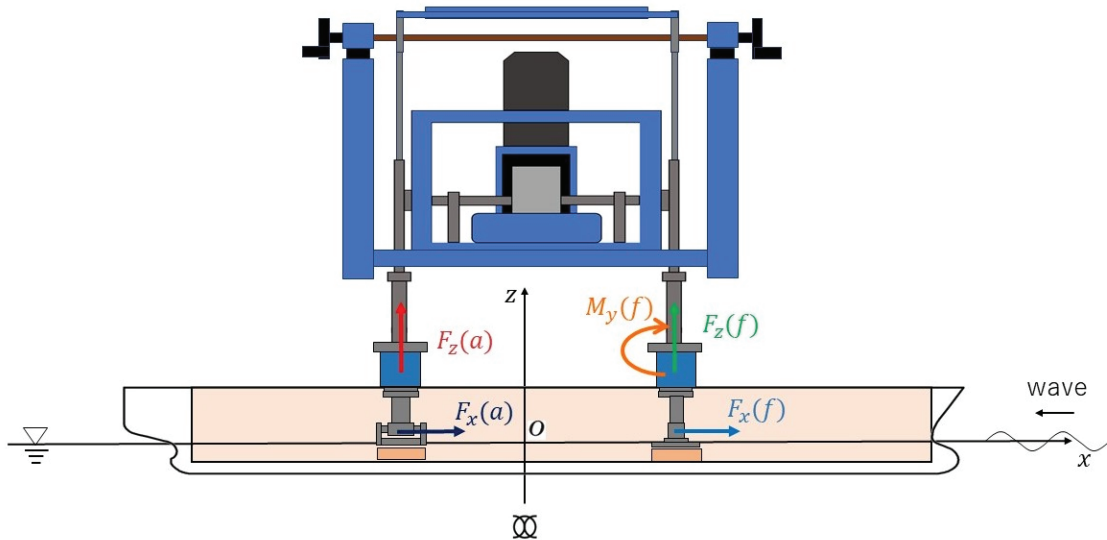


Fig. 7: 強制動揺装置概略図

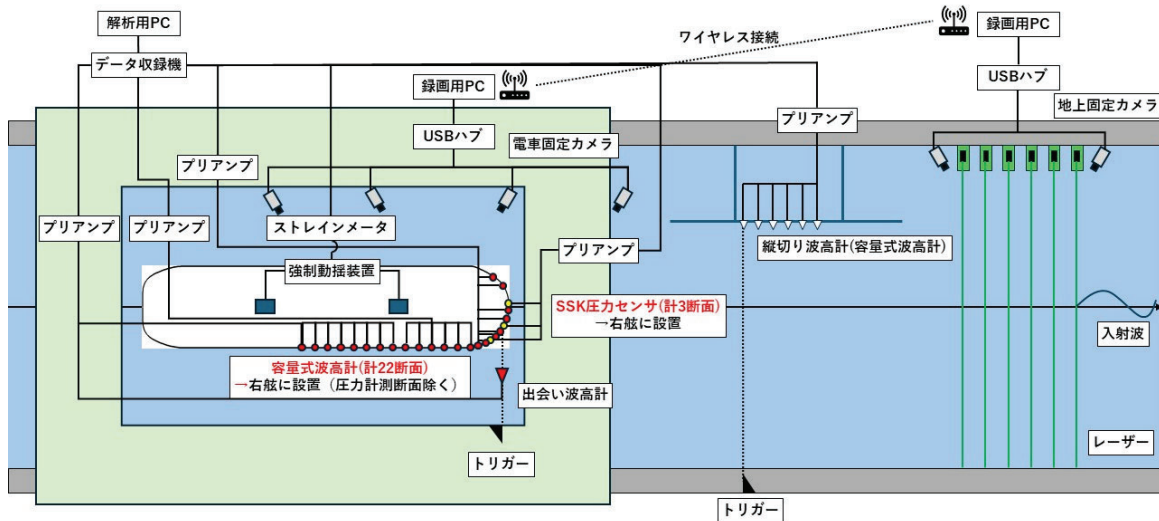


Fig. 8: 強制動揺試験における計測システム図

続いて本実験の計測条件について、Table. 3 に示す。強制動揺の heave, pitch の振幅はそれぞれ 0.01(m), 1.337(degs.) であり、波強制力試験、運動計測試験においては正面向い波で、船体中心軸から左舷方向に $y = 320\text{mm}$ の位置に地上波高計 (縦切り波高計) を設置し地上波の計測を行った。計測回数は運動計測試験においてはそれぞれの条件下で 2 回以上、強制動揺試験、波強制力試験においてはそれぞれの条件下で一回以上計測を行った。

Table 3: 実験条件

計測試験	フルード数	波向き	$\lambda/L (K_e L)$
運動計測試験	$F_n=0.18$	$\beta=180$ degs.	0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,1.15,1.25
強制 heave 試験	$F_n=0.18$	-	0.5(33.72),0.7(21.27),0.9(15.20),1.2(10.44)
強制 pitch 試験	$F_n=0.18$	-	0.5(33.72),0.7(21.27),0.9(15.20),1.2(10.44)
波強制力試験	$F_n=0.18$	$\beta=180$ degs.	0.5,0.7,0.9,1.2

4. 結果と考察

続いて、本研究にて得られた実験結果を以下に示す。

4.1. 船体運動

Fig. 9 に本実験の運動計測試験で得られた2隻の船体運動の結果を示す。また、過去の実験結果としてA船型における2012年、2015年度の結果も示している。Fig. 9の縦軸は左から surge, heave, pitch のそれぞれの運動の無次元値と位相を示しており、横軸は波長船長比 λ/L を示している。Fig. 9 からわかるように、今回の実験結果では船体運動について2隻の模型船の間では大きな差はみられなかった。また surge, heave, pitch のいずれも過去の実験結果と合致していることが確認できる。

4.2. 波浪強制力

Fig. 10 に本実験の波強制力試験で得られた2隻の波浪強制力の結果を示す。また、過去の実験結果としてA船型における2012年の結果を示している。縦軸は左から surge, heave, pitch の方向への波強制力と位相を示している。横軸は波長船長比 λ/L である。こちらも波強制力の結果を確認すると2隻の模型船の間では大きな差はみられず、過去の実験結果とも合致していることが確認できる。

4.3. 付加質量および減衰力係数

Fig. 11, 12 に強制動揺試験で得られた2隻の付加質量および減衰力係数の結果を示す。また、過去の実験結果としてA船型における2012年の結果を示し、数値計算による結果も示している。高周波数域においては2隻の模型船の間では大きな差がなく合致していることが確認でき、低周波数域になるとA35, A53, B53 などにおいて2隻の間に相違が確認できる。

4.4. 船体表面非定常圧力

続いて Fig. 13~16 に強制動揺試験、波強制力試験、運動計測試験にて得られた一次の非定常圧力分布の結果を示す。縦軸は上段が一次の非定常圧力の複素振幅の無次元値、下段が位相を示している。また、横軸は ord.9.5, ord.9.75 においては keel 位置を0度、喫水位置を90度としたときの角度を示しており、stem においては keel 位置を基準としたときのガス長を表している。A船型、B船型の結果はそれぞれ図中青線、赤線でそれぞれ示している。また、ここでは結果の一例として $\lambda/L = 0.7$ における結果を示している。結果を確認すると $\lambda/L = 0.7$ では $\theta = 90$ degs. から最大濡れ面波面にかけてB船型の方が変動圧力振幅が小さいことが確認できる。また、位相に関しては強制 heave 試験においては平水中の波面付近において相違がみられた。

4.5. 波浪中抵抗増加

運動計測試験での歪式ゲージより得られた抵抗増加を Fig. 17 に示す。縦軸は抵抗増加の計測値を無次元化したものであり、横軸は波長船長比 λ/L である。なお、入射波振幅を12mmとして計測した際抵抗増加のばらつきが大きくなったためここでは入射波振幅を20mmとしたときの波浪中抵抗増加の結果を示している。Fig. 17 を見ると短波長域でB船型の方が若干ではあるが抵抗増加が小さくなっていることが分かる。

Fig. 18~21 には強制動揺試験、波強制力試験、運動計測試験において船体表面に設置した歪式圧力センサより得られた波浪中抵抗増加分布を示す。こちらも先程の船体表面非定常圧力の結果と同様 $\lambda/L = 0.7$ における結果を示している。抵抗増加の寄与が大きい stem に着目すると、B船型の方が小さいという傾向が見られ特に運動計測試験により得られた結果からは顕著に現れていることが分かる。

4.6. 画像解析による船側波形計測

Fig. 22, Fig. 23 に地上固定カメラにより得られた 2 船型における運動計測試験での船側波形の計測結果を示す。縦軸は計測された波形データであり、上からフーリエ級数展開時の cos 成分, sin 成分, 定常成分である。また、横軸が船体中央を原点とする船体長手方向座標である。ただし、cos 成分, sin 成分は入射波振幅で無次元化されていることに注意する。座標は船首方向を正とし、半船長で無次元化されている。グラフの赤線がカメラの計測結果であり、緑色のプロット点が容量線による計測結果である。また、ここでは結果の一例として $\lambda/L = 1.25$ における結果を示している。A 船型においては船首付近の cos1 次成分, sin1 次成分にて相違が確認されるが、定常成分においては良い合致が見られる。B 船型においても容量式波高計とは比較的合致していることが分かる。ただ A 船型と比較して定常成分の船首付近にて相違が確認されるが、これは B 船型のフレアのナックル部分の影響によるものと考えられる。

続いて、Fig. 24, Fig. 25 に 2 船型において断面追尾法により得られた船側波形の結果を示す。図中赤丸がカメラによる結果を緑色のプロットが容量線による結果である。縦軸および横軸は Fig. 22, Fig. 23 と同じである。

5. おわりに

本研究にて得られた成果を以下に示す。

- (1) 本研究では、画像解析による船側波形計測手法の有効性と課題を検討した。その結果、容量式波高計による計測結果と概ね一致し、画像解析手法の再現性を示した。更に、解析周期の一致により更なる一致度の向上が確認された。しかし、一部の計測結果ではばらつきが生じ、画像解析プロセスにおける誤差、特に波浪条件、照明環境、撮影解像度の影響が示唆された。船型の違いも精度に影響し、Type B のようなナックルラインを持つ船型では、船首付近の波面検出が困難となることが明らかとなった。容量式波高計も真値計測に課題があるため、今後の課題は、高画質カメラや計測回数の増加による精度向上などが挙げられる。
- (2) 船首形状の異なる 2 隻の模型船において船体運動および波浪強制力に大きな差は見られなかったが、流体力係数においては特に低周波数域にて相違が確認された。また船体表面に設置した歪式圧力センサから得られた結果から、抵抗増加低減が見込まれる B 船型において、強制動揺試験、波強制力試験の added pressure 分布の比較を通して特に波強制力試験での試験結果で B 船型の added pressure が小さくなることが確認でき、抵抗増加低減に特に diffraction 問題での船体表面圧力の相違が寄与していることが分かった。加えて、非定常圧力の振幅においては、同調点近傍になるほどより B 船型の方が大きい値となる傾向や、非定常圧力の位相については、B 船型のナックル部分による碎波現象により、平水中の波面付近で A 船型との相違が見られた。

参考文献

- 1) Iwashita, H., Kashiwagi, M.: An Innovative EFD for Studying Ship Seakeeping, Proceedings of the 33rd IWWWFB, 2018
- 2) Kashiwagi, M., Iwashita, H., Waskito, K.T., Hinatsu, M.: Prediction of Wave Loads with Measured Unsteady Pressure Distribution on Ship-Hull Surface, The 35th Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Seoul, Korea, 26-29 April 2020, 査読有
- 3) Kurniawan T. Waskito, Masashi Kashiwagi, Hidetsugu, Iwashita, Munehiko Hinatsu: Prediction of Nonlinear Wave Loads Using Measured Pressure Distribution on Ship Hull, Applied Ocean

- 4) Hidetsugu Iwashita: Innovative Measurement of Unsteady Pressure Distribution on Ship-Hull Surface and Its Use for Hydrodynamic Study on Seakeeping, Invited-Speaker Lecture No.4, The 33rd Symposium on Naval Hydrodynamics, 19-23 October, 2020, 招待講演

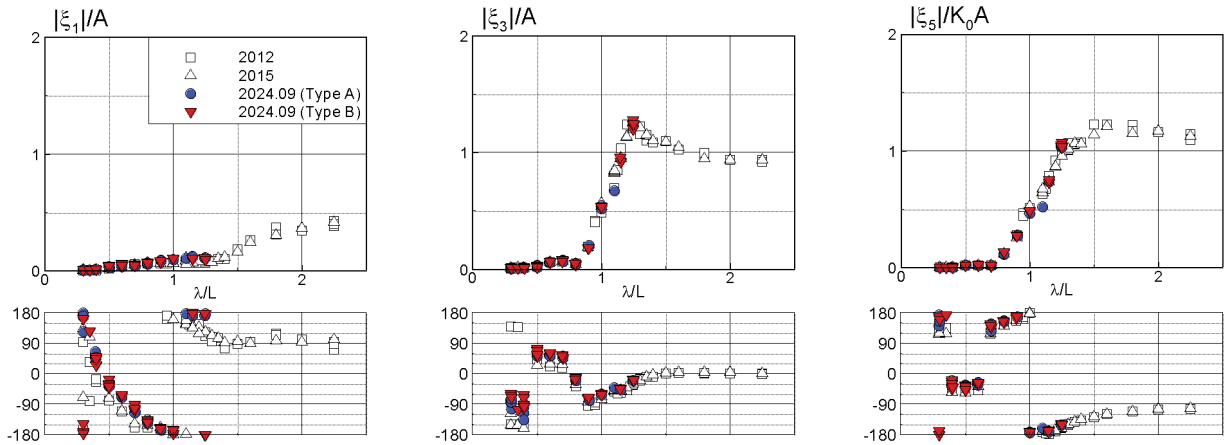


Fig. 9: 船体運動

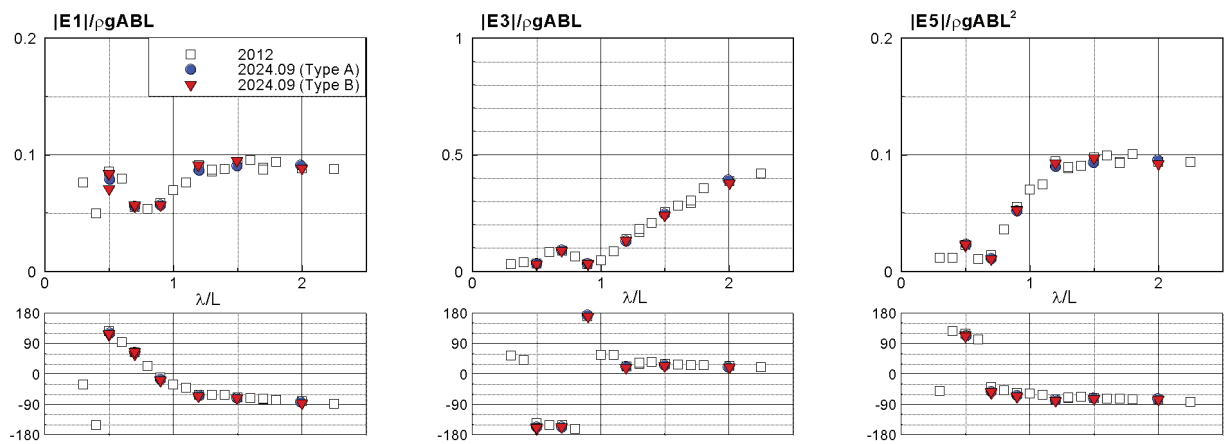


Fig. 10: 波浪強制力

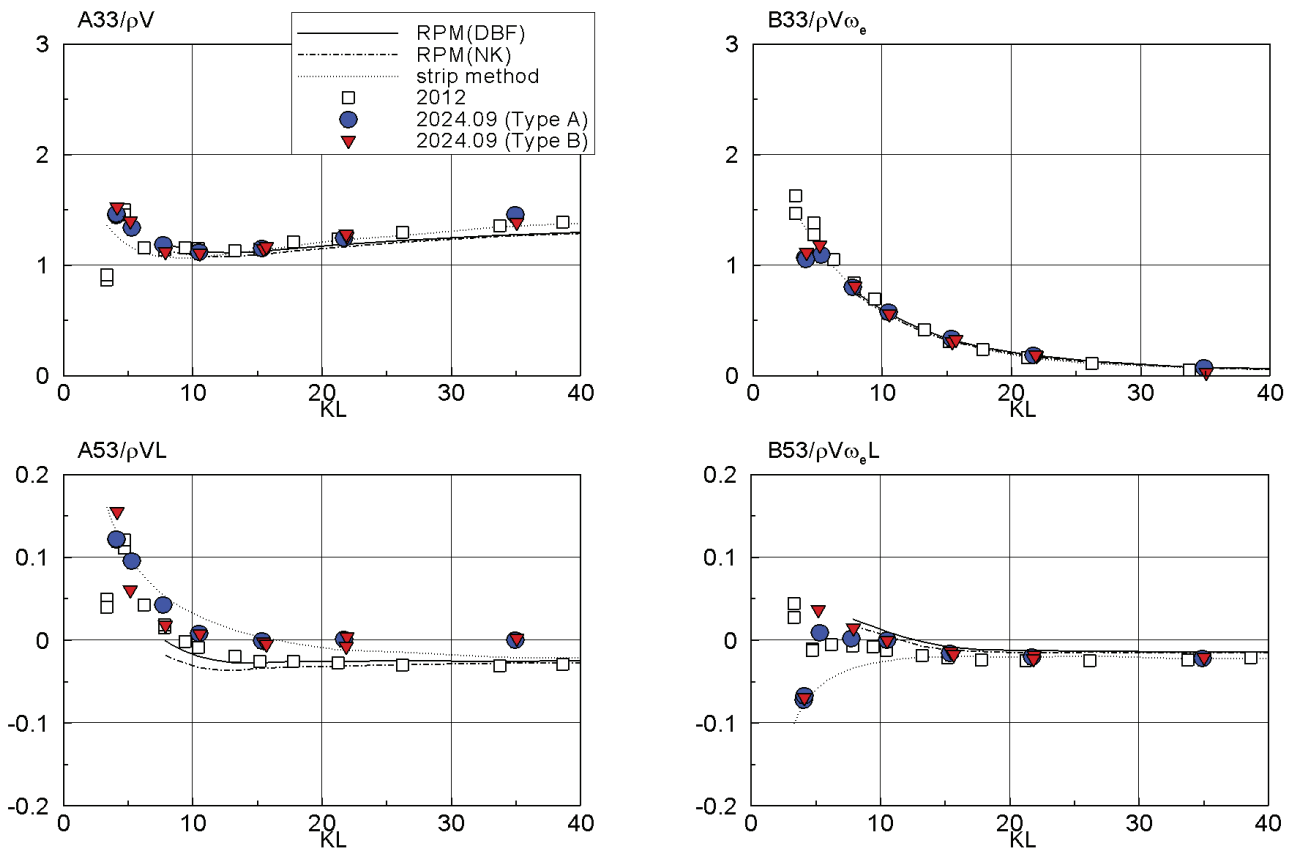


Fig. 11: 強制 heave 試験における付加質量および減衰力係数

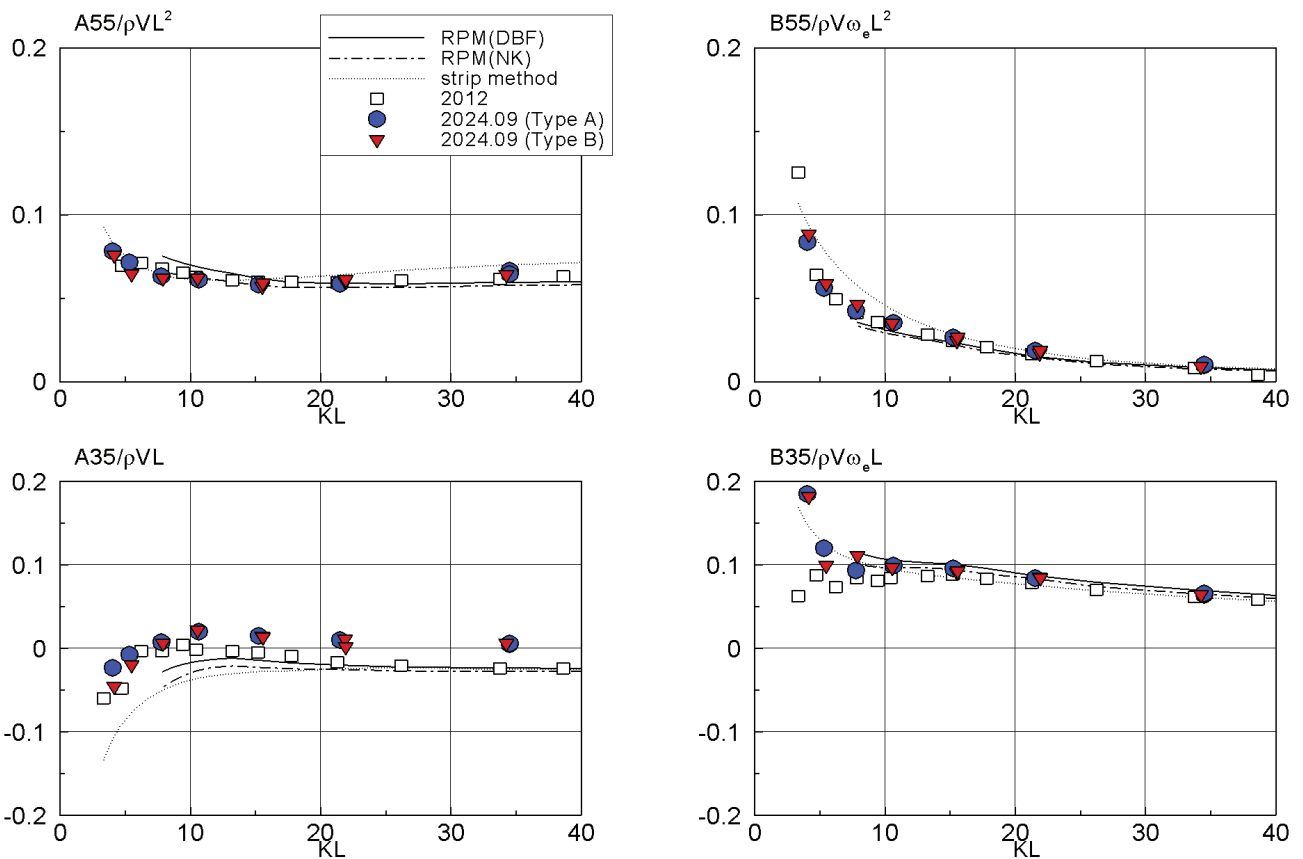


Fig. 12: 強制 pitch 試験における付加質量および減衰力係数

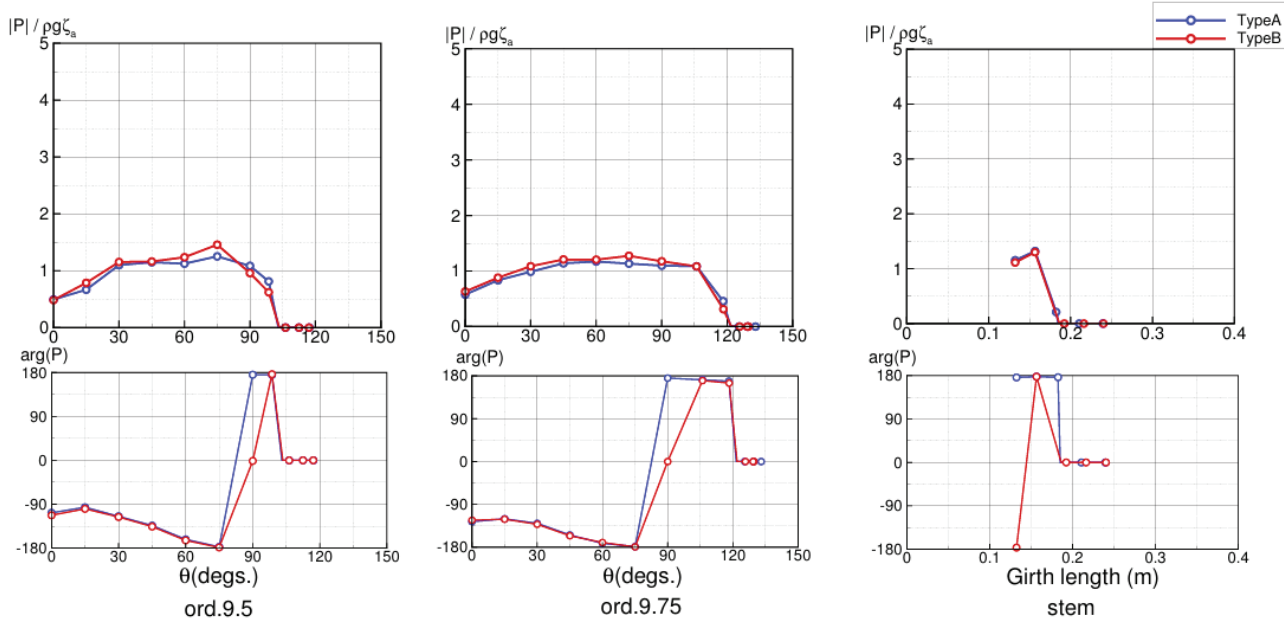


Fig. 13: 強制 heave 試験における船体表面非定常圧力, ($F_n=0.18, K_e/L = 21.27$)

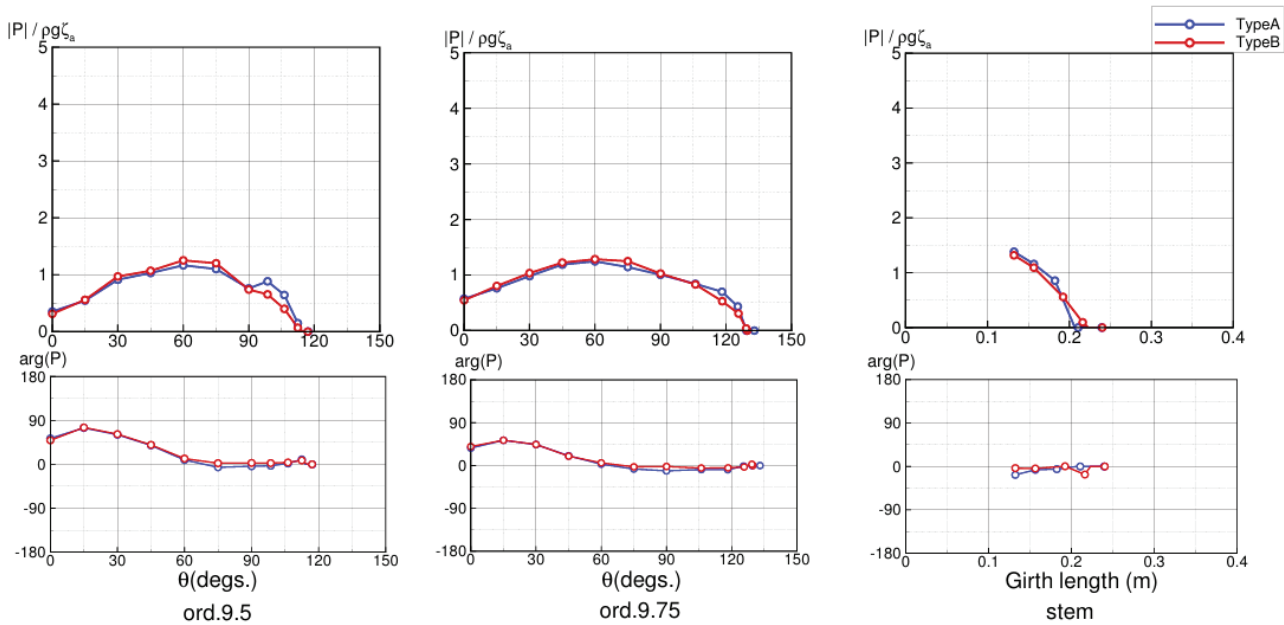


Fig. 14: 強制 pitch 試験における船体表面非定常圧力, ($F_n=0.18, K_e/L = 21.27$)

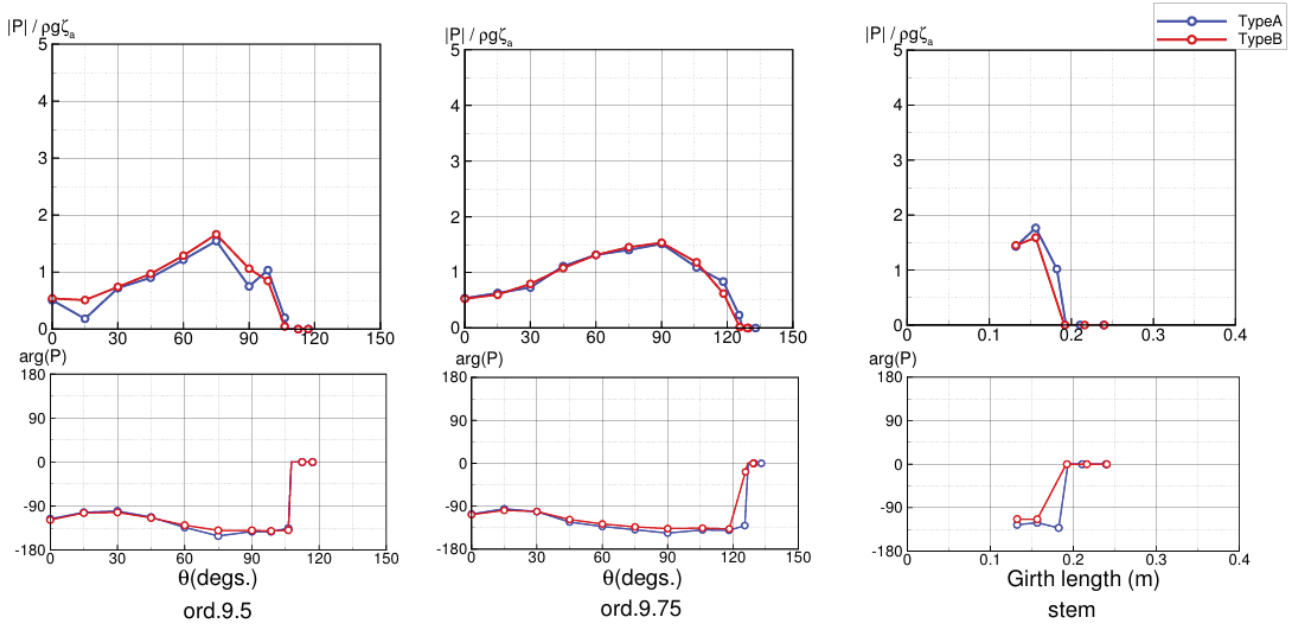


Fig. 15: 波強制力試験における船体表面非定常圧力, ($F_n=0.18$, $\lambda/L = 0.7$, $\beta=180$ (degs.))

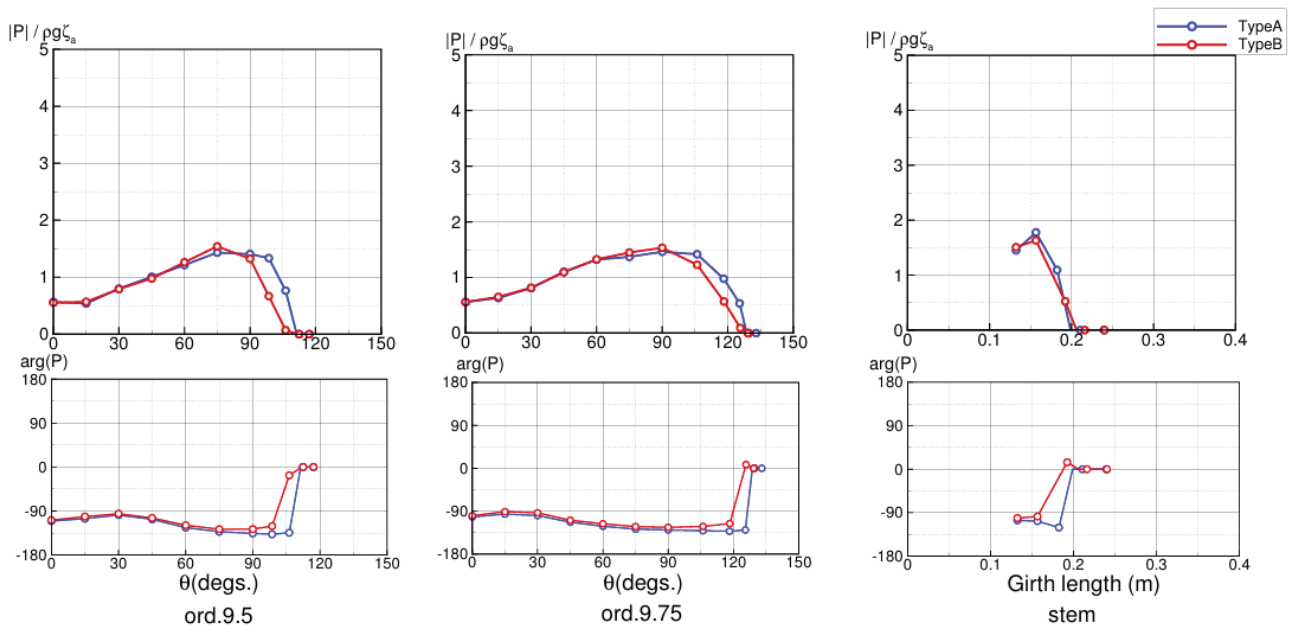


Fig. 16: 運動計測試験における船体表面非定常圧力, ($F_n=0.18$, $\lambda/L = 0.7$, $\beta=180$ (degs.))

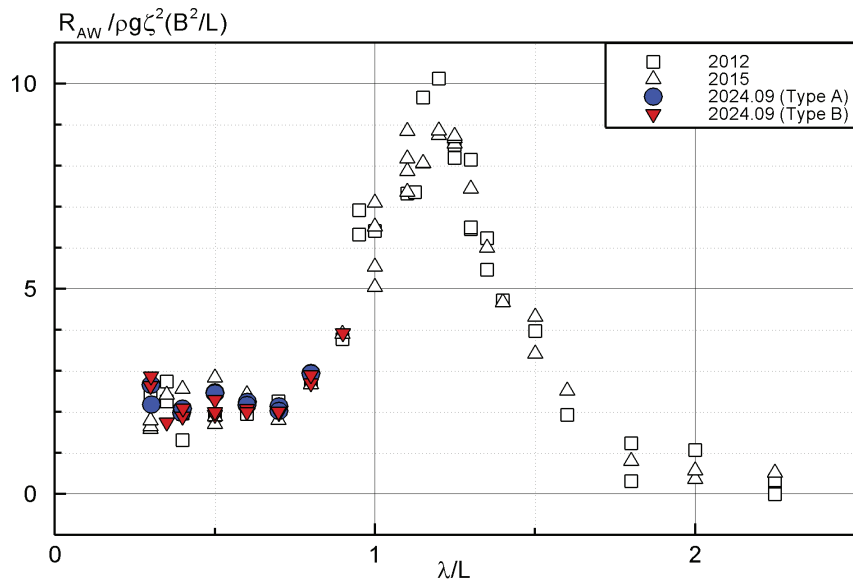


Fig. 17: 波浪中抵抗増加

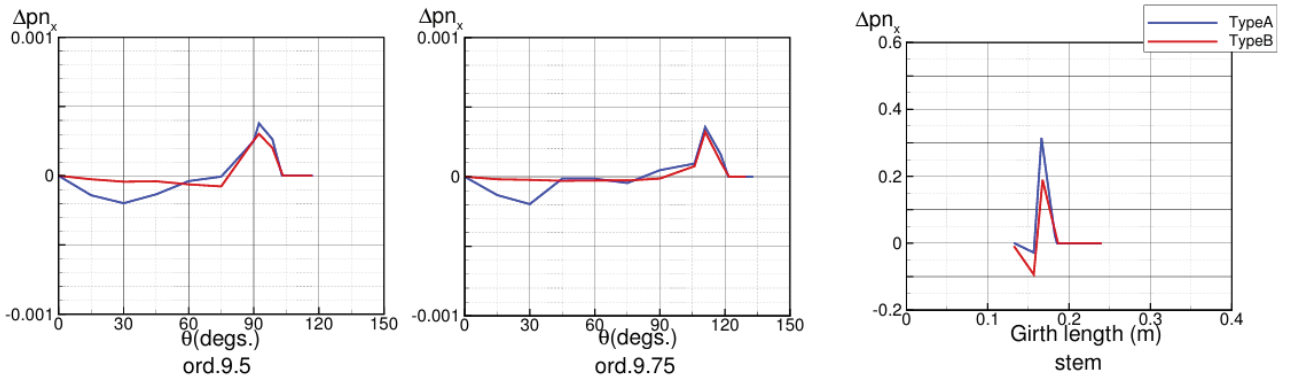


Fig. 18: 強制 heave 試験における波浪中抵抗増加分布, ($F_n=0.18$, $K_e/L = 21.27$)

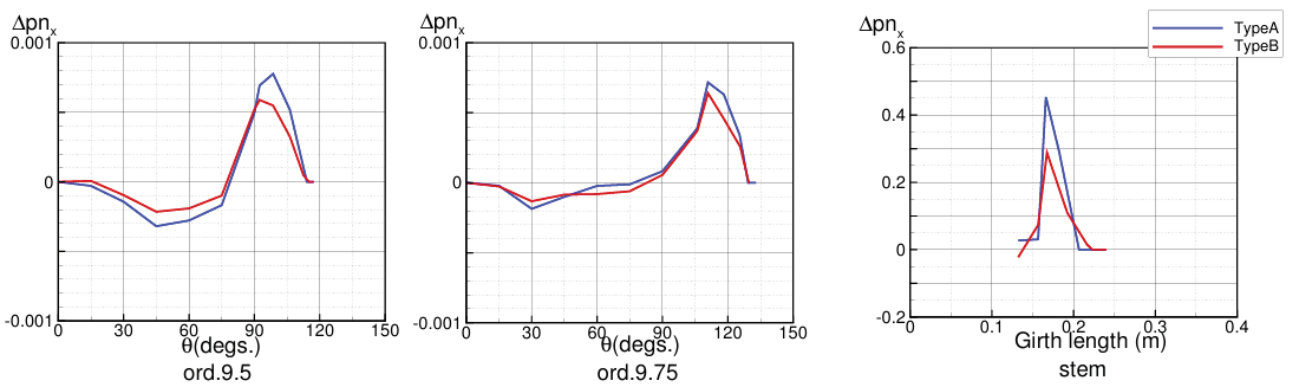


Fig. 19: 強制 pitch 試験における波浪中抵抗増加分布, ($F_n=0.18$, $K_e/L = 21.27$)

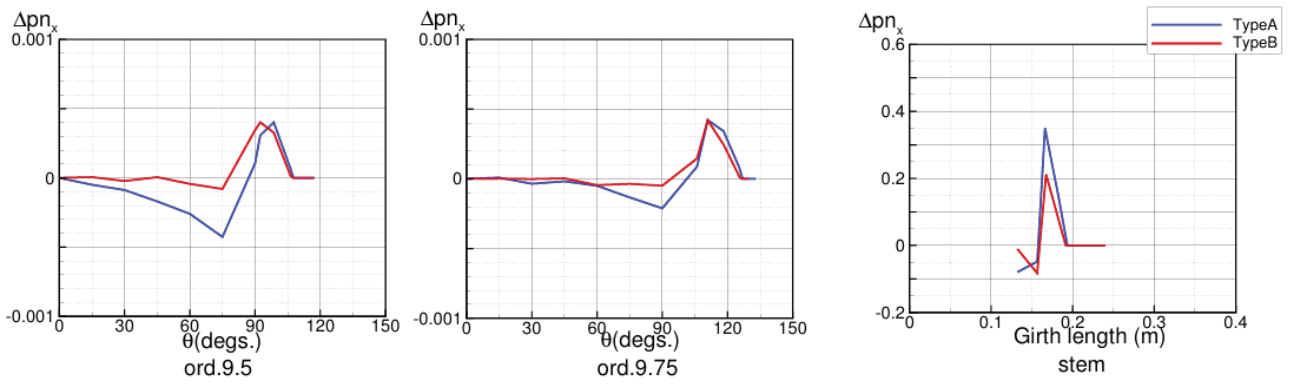


Fig. 20: 波強制力試験における波浪中抵抗増加分布, ($F_n=0.18$, $\lambda/L = 0.7$, $\beta=180$ (degs.))

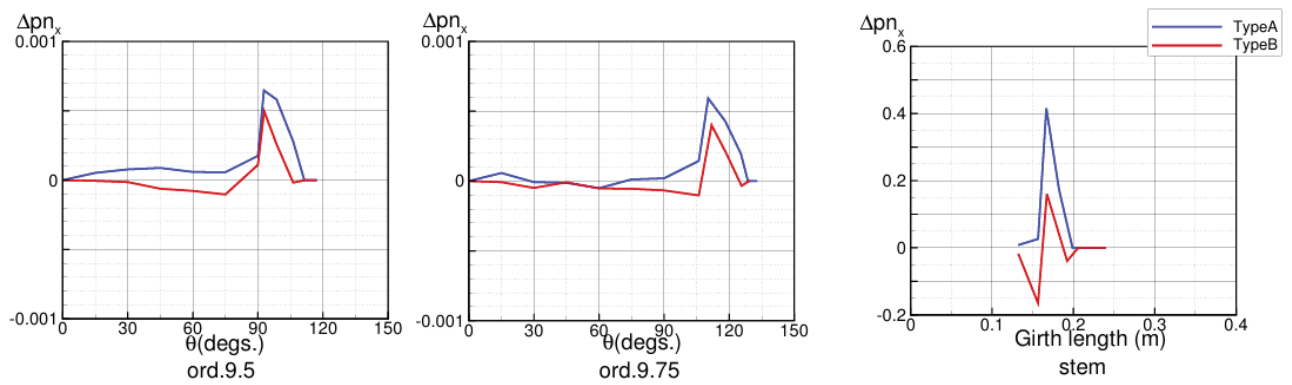


Fig. 21: 運動計測試験における波浪中抵抗増加分布, ($F_n=0.18$, $\lambda/L = 0.7$, $\beta=180$ (degs.))

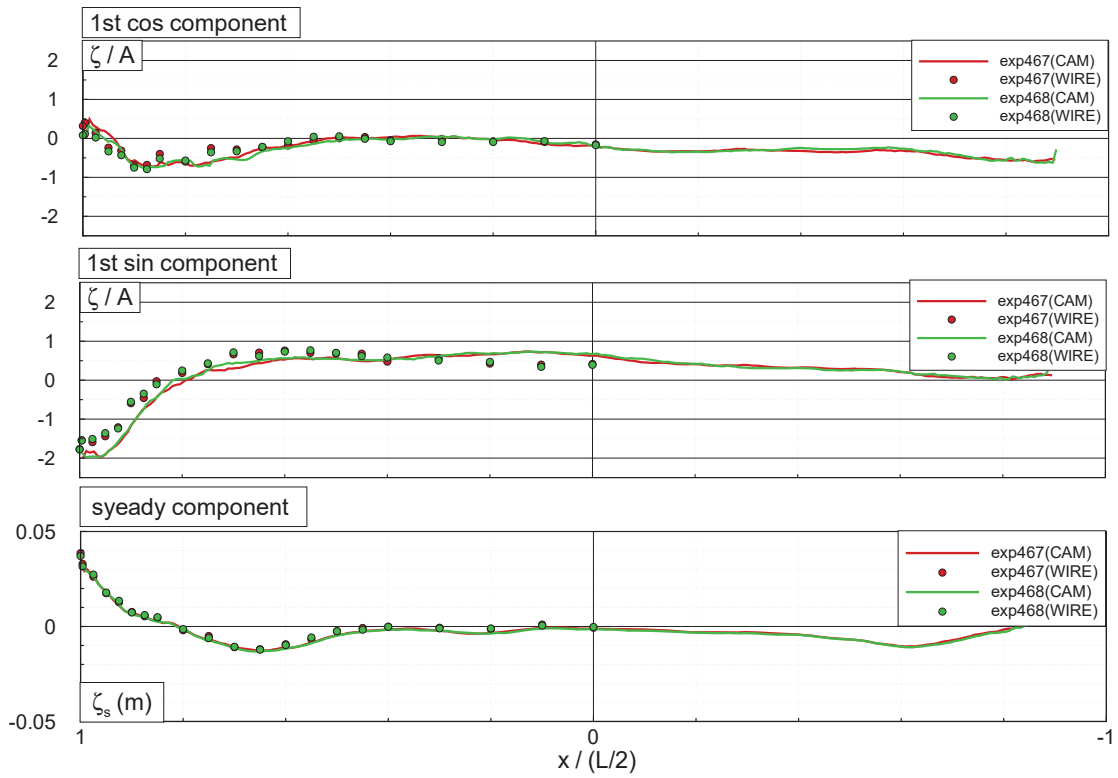


Fig. 22: Steady and Unsteady wave profile of Type A at $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 1.25$, $\beta = 180$ (degs.)

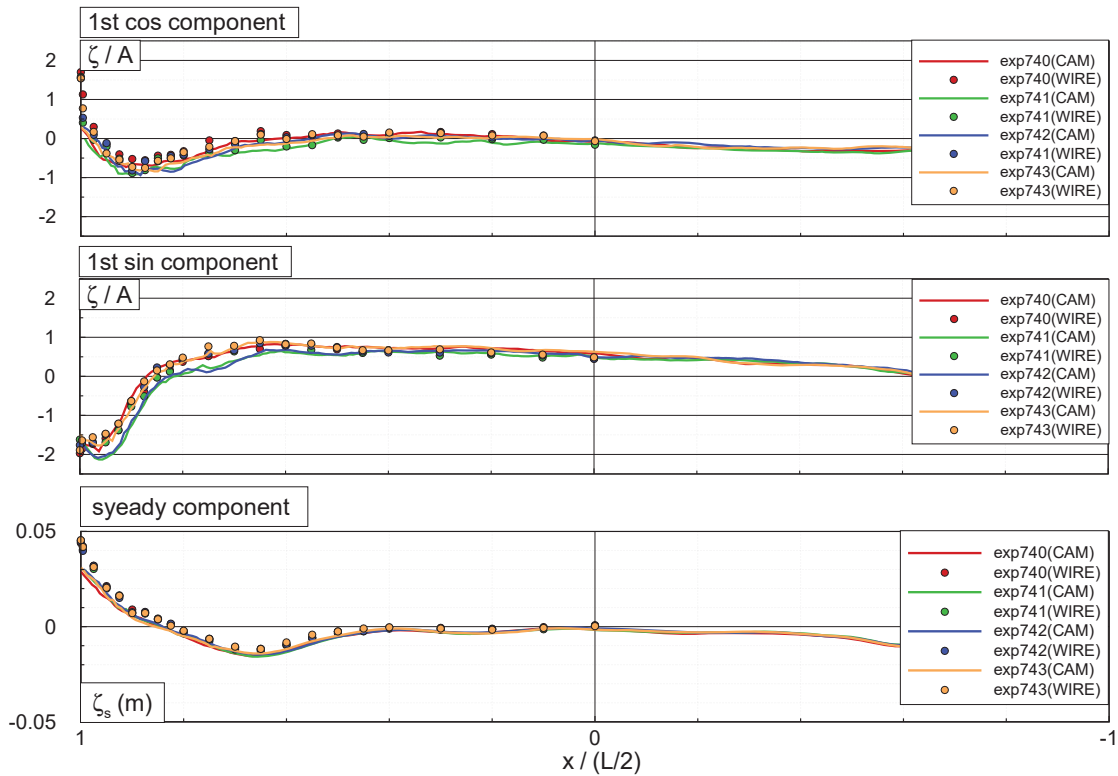


Fig. 23: Steady and Unsteady wave profile of Type B at $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 1.25$, $\beta = 180$ (degs.)

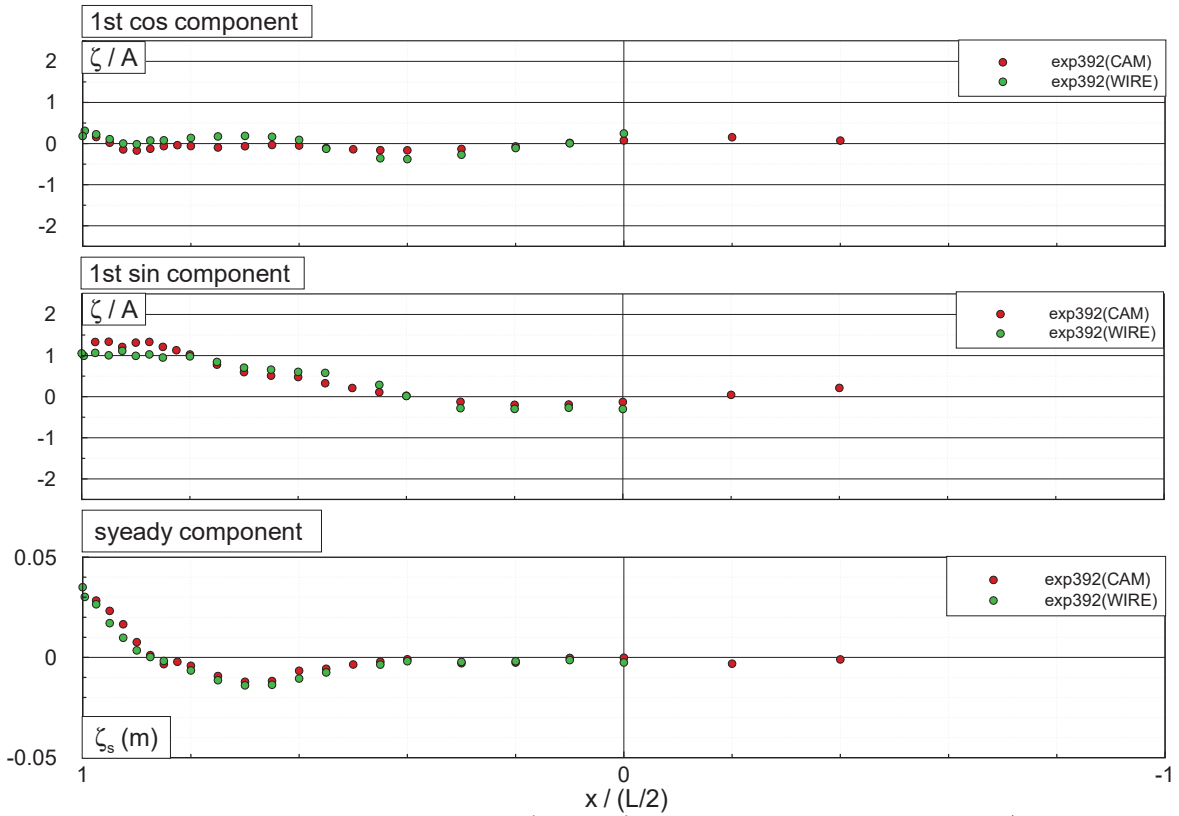


Fig. 24: Steady and Unsteady wave profile(exp392) of Type A at $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 0.5$, $\beta = 180$ (degs.)

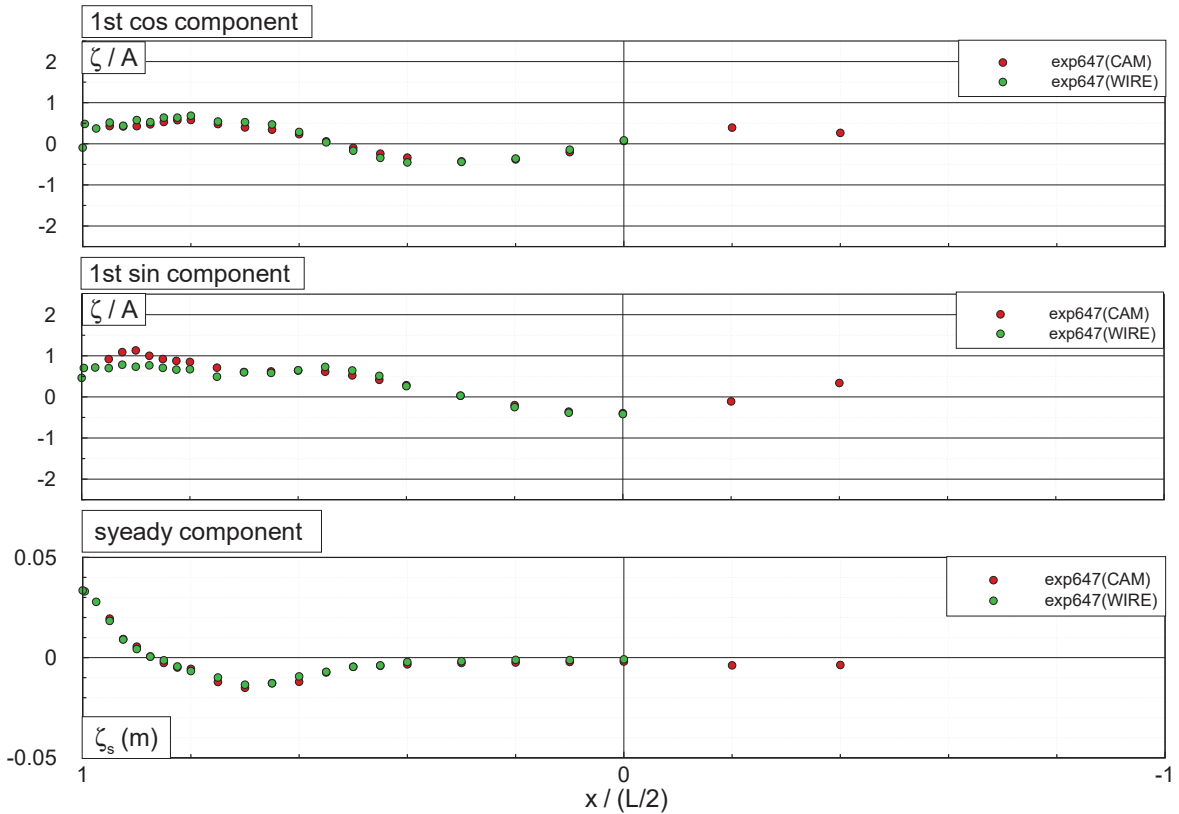


Fig. 25: Steady and Unsteady wave profile(exp647) of Type B at $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 0.5$, $\beta = 180$ (degs.)

電気ウナギを模倣した積層ハイドロゲル電池を用いた機械的エネルギー変換システムの構築

崇城大学工学部機械工学科 中牟田侑昌

【緒言】従来の生体内に埋め込むタイプのバッテリーは生体組織と比較した際、非常に硬いものが多く、生体適合性と力学特性の両立を考慮して設計されたものが少ないように思われる。そのような中、近年、電気ウナギの発電器官を模倣した積層ハイドロゲル電池が開発された¹。優れた柔軟性と起電力が示されており、インプラントやウェアラブル製品等の新たな電源として可能性が示唆されている。しかしながら、ゲル電池の構造と電力特性の関係や力学特性、エネルギー変換機構を担う電池としての機能については明らかにされていない。そこで本研究では、ゲル電池内の NaCl 濃度と電力特性の関係を解明することで電池の高出力化を行い、ゲル電池の力学特性を解明することで積層ハイドロゲル電池を動力源とする機械エネルギー変換システムの構築について検討を行った。

【実験方法】アクリルアミドに NaCl などを混合した 4 種類の溶液を作製し、紫外線硬化剤を添加後、UV 照射によりゲル化させることで電池を構成するゲルを作製した。ゲル化にはアクリル板で作製した型を用いており、各ゲルのサイズは直径約 6 mm、厚さ約 2 mm である。次に、4 種類のゲルを順番に積層させることで積層ハイドロゲル電池を作製した。電力特性の測定においては、従来の小型走行ロボット等で使用されている小型のバッテリーと同等のサイズのゲル電池を作製し、直列回路と並列回路それぞれで最長 30 分間の電力特性を測定した。マルチメーター(HIOKI 社製 DT4282)を接続し、電圧と電流を測定している。また、NaCl の濃度を変更したゲル電池を作製し、NaCl 濃度が異なるゲル電池の電力特性を測定することでゲル電池内の NaCl 濃度が電力特性に及ぼす影響について検討した。そして、ゲル電池を構成するゲルに対して卓上型引張圧縮試験機(島津製作所 EZ-Test EZ-LX)による圧縮試験を実施した。応力ひずみ関係や圧縮弾性率を評価し、小型走行ロボットを用いた走行試験において運用可能な力学特性を有しているか検討を行った。

【結果と考察】ゲル中の NaCl 濃度を変更し、NaCl 濃度が異なるゲル電池の電力特性を比較したところ、濃度の増加とともに電流値及び電圧値の向上が確認された (Fig.1,2)。NaCl の濃度を増加させることで電力特性の向上が期待できると考えられる。ただし、NaCl 濃度向上により、電力特性が急速に低下する結果も確認されており、電解質変更や電池構造改良等が必要と考えられる。そして、各ゲルの力学特性を評価したところ、全てのゲルにおいて先行研究と同等または大幅な数値の向上が確認され、非常に優れた力学特性を示した (Fig.3)。NaCl 濃度の変更は力学特性に影響しないと考えられ、また、耐衝撃性も優れていることから小型走行ロボット等の走行試験においては、優れた力学特性を発揮し、屋外運用も可能であると考えられる。今後は得られた知見をもとに機械エネルギー変換システムを構築する予定である。

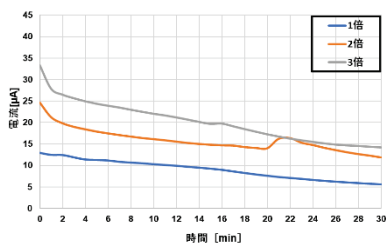


Fig.1 単電回路の電流の変化

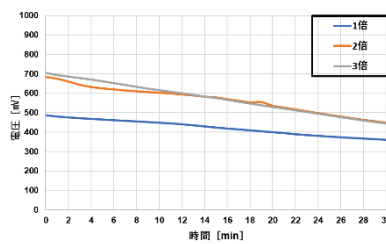


Fig.2 単電回路の電圧の変化

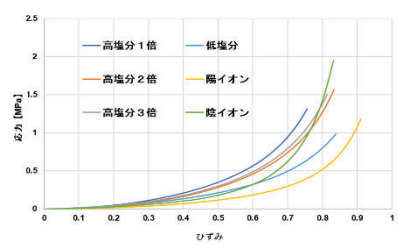


Fig.3 各ゲルの応力ひずみ図

【研究成果報告】本研究成果は 2024 年度に査読付き原著論文として学術誌に掲載されている²。また、国際会議を含む学術会議にて 5 件の発表を行った。

1 Thomas B.H Schroeder et al.: An electric-eel-inspired soft power source from stacked hydrogels, Nature552,214-218(2017).

2 元山斗夏良, 中牟田侑昌, 東藤貢.: 電気ウナギの発電器官を模倣した積層型ハイドロゲル電池の基礎研究. 臨床バイオメカニクス, 45 巻, pp.169-173, 2024.

κ -Ga₂O₃系混晶および超格子構造に関する第一原理計算

三重大学大学院工学研究科 河村貴宏

研究背景・目的

Ga₂O₃は約 5 eV の大きなバンドギャップを持つことから次世代の高周波、高出力デバイス用材料として注目されている。Ga₂O₃には α 、 β 、 γ 、 δ 、 κ の 5 つの構造多形が存在するが、その中でも κ -Ga₂O₃ は唯一強誘電体特性を持つため、他の構造とは異なる用途への応用が期待されている。しかしながら、 κ -Ga₂O₃ は研究の歴史が浅く、結晶成長技術の向上と共にその基本的特性の理解が必要である。そこで本研究では第一原理計算を用いて κ -Ga₂O₃/Al₂O₃ 超格子の電子構造解析を行い、格子歪みと超格子の組成、層厚がバンド構造に与える影響について検討を行った。

計算方法

計算には、第一原理計算プログラム Quantum ESPRESSO を用いた。図 1 にそれぞれ 40 原子で構成される κ -Ga₂O₃ と κ -Al₂O₃ を c 軸方向に積層させた κ -Ga₂O₃/Al₂O₃ 超格子モデルを示す。全方向に周期境界条件を適用することで、c 軸方向に Ga₂O₃ と Al₂O₃ が周期的に積層した超格子構造となる。この κ -Ga₂O₃/Al₂O₃ 超格子が κ -Ga₂O₃ または κ -Al₂O₃ 基板上に成長した際に基板拘束による格子歪みを受けた状態を想定して、ab 面内に 2 軸歪みが加わった状態のバンド構造および状態密度解析を行った。

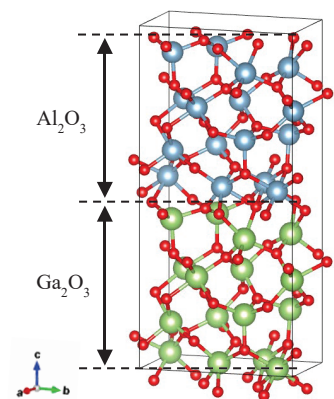


図 1 κ -Ga₂O₃/Al₂O₃ 超格子の計算モデル

結果および考察

第一原理計算により求められたバンドギャップは、一般的に過小評価されることが知られている。本研究では現実的な値を得るために、DFT+U 法による補正を行った。この手法では、経験的に決められた U パラメータを設定する必要があるため、まずは適切なパラメータの検討を行った。 α および κ -Ga₂O₃ と α および κ -Al₂O₃ を対象にして、O-2p 軌道に設定した U パラメータとバンドギャップの関係を図 2 に示す。図中の破線は、Ga₂O₃ と Al₂O₃ のバンドギャップの報告値を示している。このような検討を行った結果、Ga-4s 軌道と O-2p 軌道にそれぞれ 1 eV と 7 eV の U パラメータを設定した時に報告値に近い値が得られたので、以下の計算はこの U パラメータの設定のもとに行った。

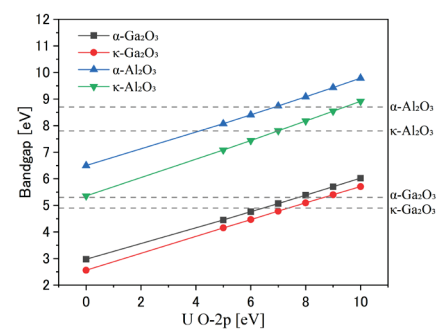


図 2 O-2p 軌道の U パラメータと Ga₂O₃ と Al₂O₃ のバンドギャップの関係

バンド構造に対する超格子の層厚の影響を調べるために、 κ -Ga₂O₃ と κ -Al₂O₃ の単位格子のサイズを基準にして、0.5Ga₂O₃/0.5Al₂O₃、1Ga₂O₃/1Al₂O₃、2Ga₂O₃/2Al₂O₃ の 3 つの超格子モデルを作成した。それらに対して無歪み (ab 面内方向は無歪み、c 軸方向には緩和) の状態で行った局所状態密度解析の結果をもとに、図 3 に示すバンド図 (バンドギャップの空間分布) を作成した。各図の下側は価電子帯、上側は伝導帯を示しており、白色の領域がバンドギャップに相当する。グラフの横軸は c 軸方向の原子座標を示しており、図の左側が κ -Ga₂O₃ 層、右側が κ -Al₂O₃ である。また、図中に Ga₂O₃ 層と Al₂O₃ 層中央に

おけるバンドギャップと、界面における価電子帯と伝導帯のオフセットを記載している。超格子の層厚が増加するにつれて、 Ga_2O_3 層のバンドギャップは減少し、逆に Al_2O_3 層のバンドギャップは増加した。 Ga_2O_3 層および Al_2O_3 層内の格子歪みを調べたところ、超格子の層厚が増加するにつれて、 Ga_2O_3 層は c 軸方向に引張歪みを受け、 Al_2O_3 層は圧縮歪みを受けていることが分かった。この超格子の層厚変化に伴う Ga_2O_3 層と Al_2O_3 層内の格子歪みの傾向の違いが、各層のバンドギャップが逆の変化を示したこの原因だと考えられる。バンドオフセットに関しては、超格子の層厚が増加するにつれて価電子帯および伝導帯オフセットのどちらも増加する傾向がみられた。 Ga_2O_3 層の価電子帯上端、伝導帯下端のエネルギー準位はどちらも Al_2O_3 層の値よりも小さいことから、 $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 超格子はType-II超格子であることが分かった。

以上の $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 超格子の層厚に対するバンド構造の変化は、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 超格子においても同様の傾向がみられており[T. Kawamura et al., J. Cryst. Growth 626, 127477 (2024)]、 α 型と κ 型の構造による大きな違いは見られなかった。

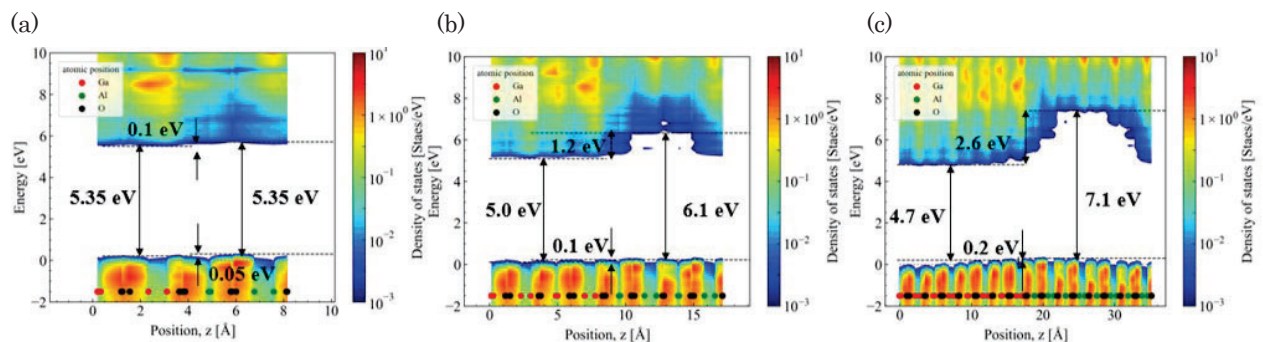


図 3 $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 超格子のバンド図 : (a) $0.5\text{Ga}_2\text{O}_3/0.5\text{Al}_2\text{O}_3$ 、(b) $1\text{Ga}_2\text{O}_3/1\text{Al}_2\text{O}_3$ 、(c) $2\text{Ga}_2\text{O}_3/2\text{Al}_2\text{O}_3$ 。価電子帯上端をエネルギーゼロにしている。

研究成果報告

- 1) T. Nishimura, T. Kawamura, T. Akiyama, and Y. Kangawa, “Electronic Structures of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ Superlattices”, 10th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications, LEDIAp-10.
- 2) T. Yamashita, T. Kawamura, T. Akiyama, and Y. Kangawa, “First-Principles Calculations of Bandgap Control of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ by Uniaxial Strain”, 10th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications, LEDIAp-11.
- 3) T. Nishimura, T. Kawamura, T. Akiyama, and Y. Kangawa, “Band Structure Analysis of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ Superlattices”, 第 43 回電子材料シンポジウム, Th3-10.
- 4) T. Yamashita, T. Kawamura, T. Akiyama, and Y. Kangawa, “Effect of Lattice Strain on Bandgap of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ”, 第 43 回電子材料シンポジウム, Fr1-12.

研究組織

研究代表者 河村貴宏 (三重大学 大学院工学研究科・助教)
 所内世話人 寒川義裕 (九州大学 応用力学研究所・教授)
 研究協力者 秋山 亨 (三重大学 大学院工学研究科・教授)
 研究協力者 西村健志 (三重大学 大学院工学研究科・M2)
 研究協力者 山下拓真 (三重大学 大学院工学研究科・M2)

OTEC 深層水取水管のための自由垂下パイプの自励振動に関する実験

九州大学・大学院工学研究院 宇都宮 智昭

研究目的

海洋温度差発電(OTEC)の深層水取水管(CWP)の設計の根幹に関わる懸念として大流量の内部流による不安定振動があり、この現象を理論的に明らかにする必要がある。これまでの実験では内部流による不安定振動は確認されなかったものの、振動特性が大きく変化することが確認された。特に、内部流がある条件で特定の周波数の加振を与えると加振方向だけでなく直交方向にも顕著な振動が生じる現象が観察され、不安定性との関連が考えられる。本研究ではこの現象に焦点を当てて、その振動特性やメカニズムを明らかとするために水槽実験を実施した。

実験方法

深海機器力学水槽に図1に示す実験装置を構築した。長さ4mのポリカーボネート製パイプを試験体として、強制動揺装置に鉛直に取り付けて静水中の強制変位励振下で1.0-5.5m/sと取水流速を変化させた際の振動を計測する。本年度は新たに試験体の振動形状を計測するために合計8台の水中カメラを用いたモーションキャプチャシステムを構築した。

実験結果・考察

図2(a)に示すように、計測値と理論モデルを比較したところ、両者は十分一致し理論モデルの妥当性を確認できた。一方で、特定の周波数(1次固有周波数の1.1-1.5倍)で生じる図2(b)に示す加振直交方向 X に生じる挙動は理論モデルでは説明できない。図2(b)では前半に X, Y の振動が同期しているが、16周期目で崩壊した後に再度逆位相で同期し直す興味深い挙動が見られる。計測を通してこの直交方向の振動は位相差によって特徴付けられると考えられ、今後非線形の理論構築や実験の不確か性の整理が重要であることが得られた。

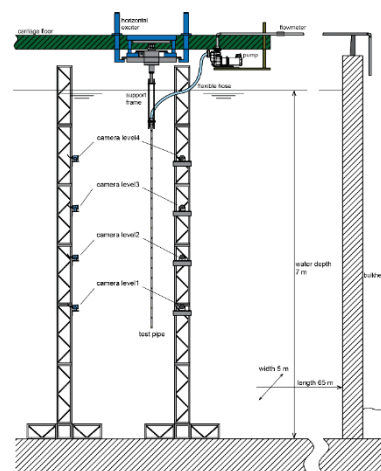


図1 実験装置

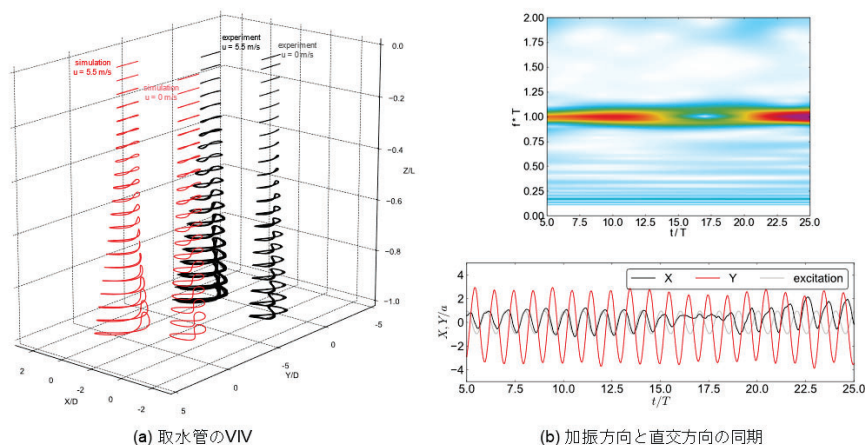


図2 実験結果

研究成果報告

Hisamatsu, R., Riveros-Jerez, C., Utsunomiya, T., 2025. THREE-DIMENSIONAL MODEL OF A HANGING COLD WATER INTAKE PIPE WITH INTERNAL FLOW AND TOP-END EXCITATION. OMAE2025-156557, June 22-27, 2025, Vancouver, Canada (講演予定).

水中ビークルの動力学の高精度推定に関する研究

九州大学大学院工学研究院 山口 悟

1. 緒言

海底探査システムを構築するうえで水中ビークルに求められるのが海底から一定の高度を保ち海底の地形に沿った姿勢で走査を行うことができる能力である。本研究では Fig. 1 に示す、縦方向の機動性を高めた多翼型水中ビークルを対象とし、制御性能を向上させるためモデル予測制御 (MPC: Model Predictive Control) を適用、実装し、その有効性を調査する。

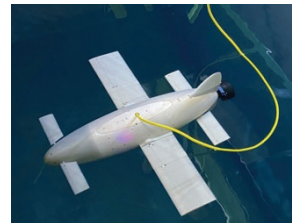


Fig. 1 Multi-Winged Vehicle

2. 水槽試験による運動制御性能の調査

システムモデルを使って逐次的に有限時間まで先の最適化問題を解く制御アルゴリズムであるMPCシステムを多翼型水中ビークルに実装し、その運動制御性能の有効性を水槽試験で調査した。機体ピッチ角と速度にステップ状の目標値を与えた場合の水槽試験結果をFig. 2に示す。ピッチ角には振動見られるが目標値に追従しており定常偏差も少ない。ピッチ角振動の原因としては制御器を設計した際の評価関数の重みづけが適切でなかったことが考えられる。また、機体深度は制御入力周期的に最大値、最小値を繰り返しており適切に制御されていない。これは、MPC制御系の内部モデルに用いたシステム同定モデルが実機の運動を正確に表現できていないためであると考えられる。

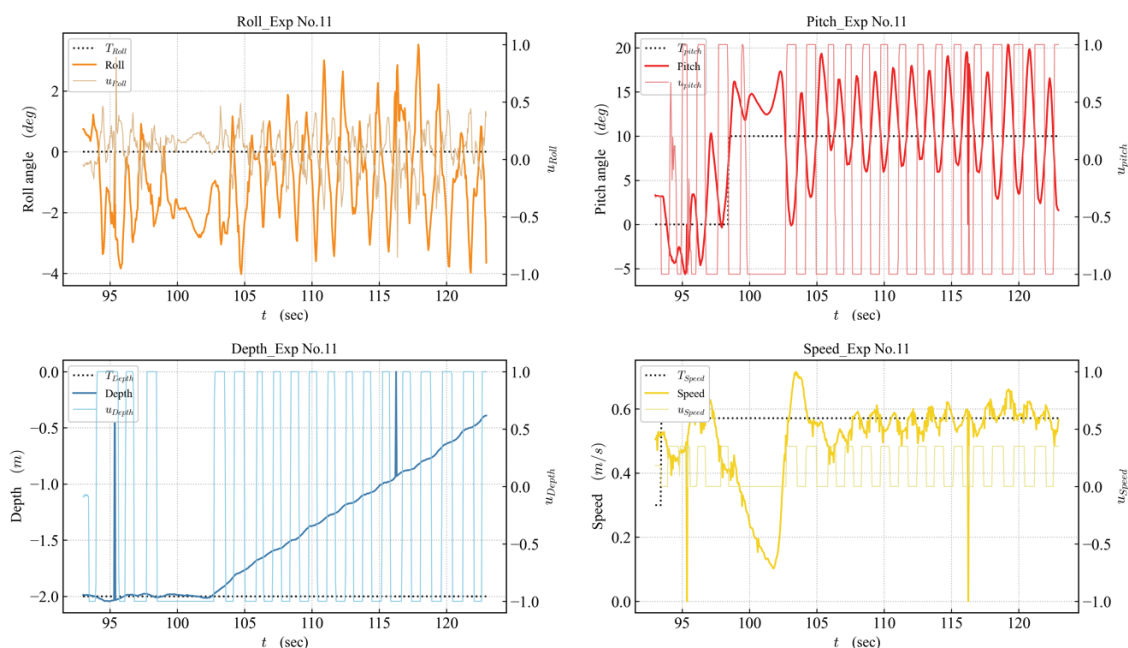


Fig. 2 Step response of the MPC system

3. 結言

多翼型水中ビークルにモデル予測制御系を実装し、その有効性を水槽試験により調査した。その結果、ピッチ角と機体速度の制御について一定の有効性が認められた。一方で、ピッチ角の振動や深度制御性能などに課題が残されており、MPCシステムの水中ビークルの運動制御の適用において運動モデルの同定精度が重要であることが確認された。今後は評価関数の重みの決定方法も含めて更に検討が必要である。

次世代パワーエレクトロニクスシステム用劣化観測技術

九州工業大学 大学院工学研究院 電気電子工学研究系 長谷川 一徳

1. 研究目的

自然エネルギー有効活用にはパワーエレクトロニクス（パワエレ）システムの普及拡大が必要不可欠であるがパワエレシステムの導入数増加とともにその信頼性向上も急務となっている。パワエレシステムを構成するパワー半導体デバイスの故障は、パワエレシステムの中で主な故障原因の一つとなっている。近年、パワー半導体デバイスが複数搭載されたパワーモジュールの信頼性研究が盛んに行われており、パワーデバイスが発生する損失による自己発熱に起因した金属接合劣化が故障要因として明らかになっている。本研究の目的は、パワエレシステムにおけるパワーモジュールの劣化状況を観測する技術の構築である。

2. 研究の具体的方法

パワエレシステムの動作状態におけるパワーモジュールの劣化観測技術として、正弦波 PWM インバータ動作時におけるモニタリングする手法を開発する。変動する出力電流条件下においてモジュールの劣化を観測する。従来、パワーモジュールの劣化評価試験では、実際のパワエレ回路動作ではなく、モジュール内に一定損失を繰り返し発生させた条件で試験が行われてきた。提案手法はインバータ動作を模擬し任意の電流・周波数における実温度・電流波形を用いてパワーモジュールの劣化を抽出できる点に特長がある。

提案手法を用いてパワーモジュールの劣化観測を行い、回路の動作条件（電流・電圧波形）と計測間隔、演算モデルの関係を明らかにすることで劣化検出技術を構築する。

本研究のパワーモジュールの高精度な劣化検出技術はパワエレシステムの設計最適化につながり、高寿命化と信頼性向上に大きく貢献する。

3. $V_{CE(sat)}$ 測定環境の構築

チョップ回路動作時のパワーモジュール内の IGBT チップのオン電圧 $V_{CE(sat)}$ を測定することでその動作温度を算出できるが、オフ時の高電圧に伴うノイズを除去し測定する必要がある。そこで、図 1 に示す小型 IoT プラットフォーム Leafony Basickit2 を採用した。Leafony は A/D 変換回路を内蔵し、USB アイソレータまたは Bluetooth を使用しノイズ伝送が可能であるため、ノイズ耐性に優れている。

4. 正弦波 PWM インバータを用いた $V_{CE(sat)}$ とジャンクション温度測定

図 2 に示す正弦波 PWM インバータを用いてパワーモジュールの $V_{CE(sat)}$ およびジャンクション温度 T_j を測定した。インバータにおいては出力電流が IGBT に流れる区間と、還流ダイオードを流れる区間の二区間存在する。IGBT に流れる区間に $V_{CE(sat)}$ を検出する一方で、還流ダイオード導通区間は電圧が負となるため、 $V_{CE(sat)}$ 検出回路は 0 V を出力するようにした。

5. 測定結果

図3にインバータ出力電流振幅を(a) 80 A, (b) 100 A で動作させたときの $V_{CE(sat)}$ を示す。出力電流が IGBT に導通している期間では $V_{CE(sat)}$ が測定され、その瞬時値はインバータ電流瞬時値に追従して変化している。図4に $V_{CE(sat)}$ のピーク値を用いて温度変換した結果を示す。出力電流の1周期において電流が最大となる点で1点サンプリングし50周期(1秒間), 50点サンプリングし $V_{CE(sat)}$ のピーク値を50点測定している。取得した $V_{CE(sat)}$ と電流値を用いてジャンクション温度 T_j に換算している。

6. まとめ

本研究では、パワーモジュールの劣化状況を観測するため、Leafony を用いた V_{CE} 測定環境の構築と正弦波 PWM 動作時における $V_{CE(sat)}$ とジャンクション温度測定環境を構築した。1200 V 75 A 定格の IGBT モジュールを使用した実験により、PWM インバータ連続動作時に $V_{CE(sat)}$ を測定できることを確認した。また、実験により所得した $V_{CE(sat)}$ から温度プロファイルを算出した。この成果は劣化要因の分離測定試験の基礎データとして活用する。

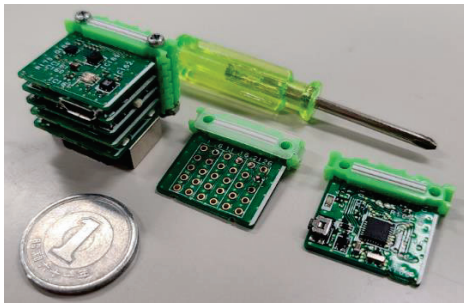


図 1: Leafony BasicKit 2

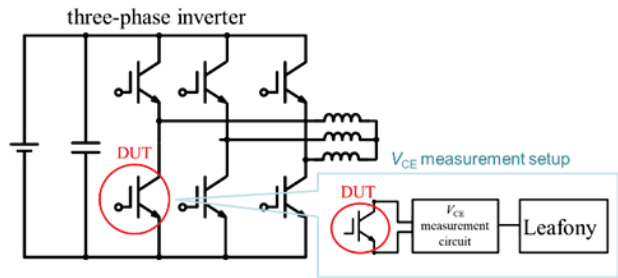


図 2: 正弦波 PWM インバータ試験環境

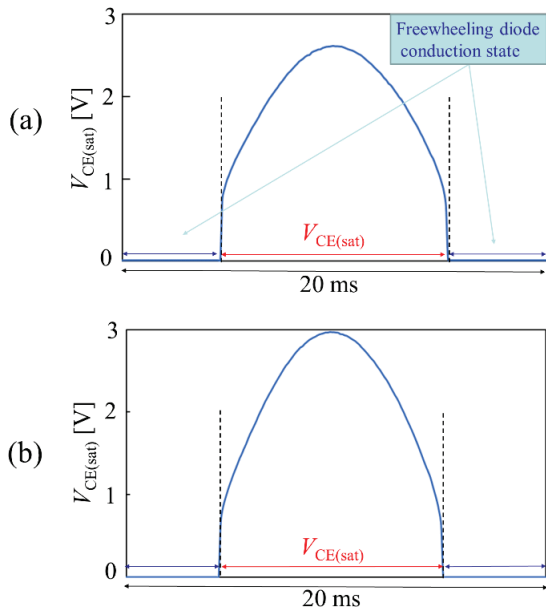


図 3: $V_{CE(sat)}$ 測定結果 (a) 80 A (b) 100 A

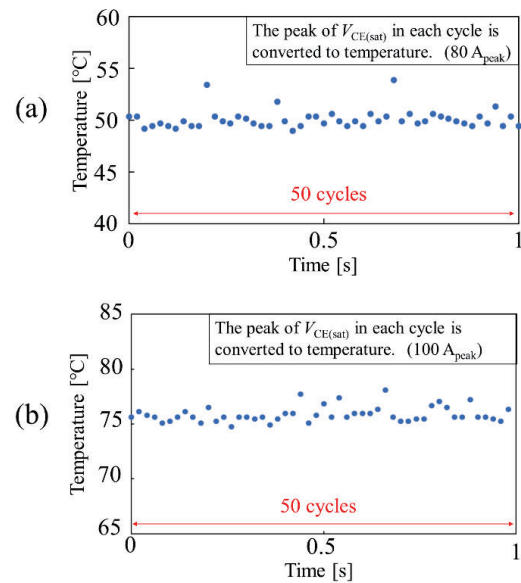


図 4: ジャンクション温度 T_j 測定結果

(a) 80 A (b) 100 A

脊椎の力学的諸問題に対するCT-FEMの応用に関する研究

佐賀大学整形外科 森本忠嗣

1. INTRODUCTION

The purpose of this study is to research the pattern of secondary fracture on fractured spines using CT-FEM. Load simulations on 3 different fractured spine models from patients' CT-images data were conducted. Simultaneously, compressive load simulations on single vertebral bones were also conducted to estimate their strength against load. Based on the analysis and comparison of these results, the feature of secondary fracture and some factors which may effect this process can be found.

2. METHODS

CT-FEM software MECHANICAL FINDER (Research Center of Computational Mechanics, Inc., Tokyo, Japan) was applied to extract models and conduct finite element analysis. Three 7-piece spine models where the fractured vertebrae is the center were created based on the CT-images of three patients with a mean age of 84 years old from Saga University Hospital. Making the fractured vertebra as the center, three spines of 7 pieces were extracted from CT-images data, which means from T9 to L3 in case No.1, from T10 to L4 in case No.2 and from T11 to L5 in case No.3. In each model, a process about the occurring of the secondary caused by a uniformly distributed load on the top of the spine piece was simulated in the finite elements simulation software. Then, compression load simulations were conducted respectively on four vertebrae which are respectively next to the top, bottom and fractured vertebra in each model.

3. RESULTS

In this study, bone fracture was the crack of cortical bones, which can be seen as a clear fracture line or a fracture zone formed by dozens of failed shell elements in the simulation. To judge whether a fracture is formed, definition was given in this simulation that if a group of failed shell elements are distributed continuously on one vertebra and the number is over 100, they can be recognized as a fracture in this vertebra and the first appeared failed shell elements in this group is regarded as the starting point of this fracture, as shown in Figure 1. According to this definition, strong relation between vertebra's strength against compressive load and fracture can be found in the result.

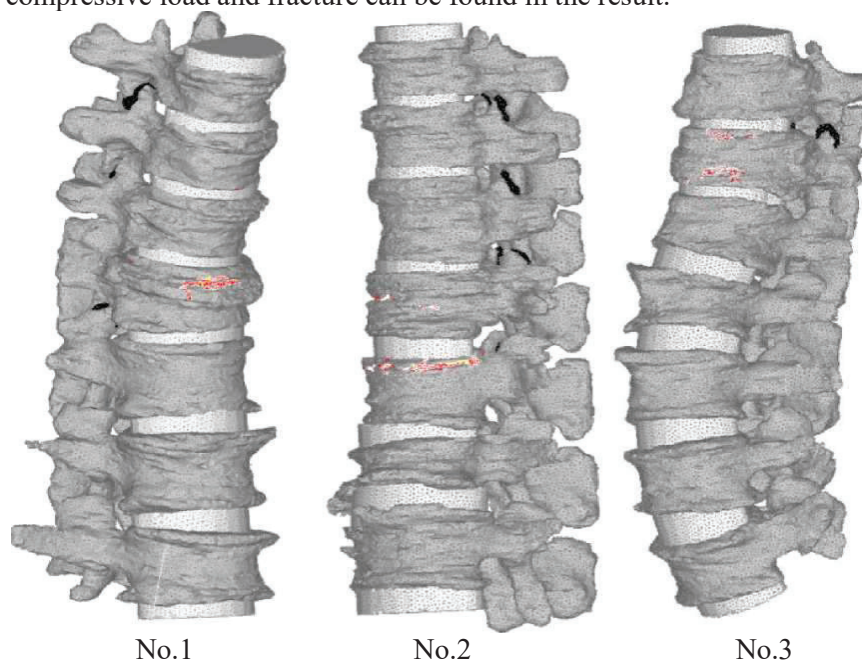


Figure 1 Bone fracture behavior in three different models

人工股関節ステムが大腿骨に及ぼす力学的影響に関する研究

産業医科大学 塚本学

1. Introduction

Total hip arthroplasty (THA) is a common orthopaedics surgery performed as one of the solutions to late-stage hip diseases. Despite that, complications such as implant loosening and periprosthetic fractures after the arthroplasty are known to be the common causes of revision surgery. It is believed that the bone quality and implant designs might have a correlation with those complications. Recently, Todo research group had utilized the CT-based FEA to understand the biomechanical problems in the orthopaedic field. With this advanced computational software, FE model from different bone and implant designs could be developed. Thus, this study aims to investigate the bone damage mechanism developed from the CT image of two different patients with different types of THA implants by using finite element analysis.

2. Methodology

FE bone model was developed from the 61 and 87-year-old patient and denoted with bone X and Y, respectively. Inhomogeneous material properties were introduced in every element that form the FE bone model which was computed from the linear relationship between CT value and BMD. Then, the mechanical properties e.g., young's modulus was assigned to the element by using the established equations, hence enabling the non-linear FE analysis. Next, the THA models of bone X and Y were constructed and three different types of implants were introduced. Those implants were denoted by stem Z, stem K and stem B, where every implant has a different design and geometry. The stem of the implant was assigned according to the properties of titanium alloy while the femoral ball was based on the properties of alumina ceramic. Next, three different loading and boundary conditions were adapted from well-established studies. These conditions are lateral bending (LBC), torsion (TC), and falling (FC). A stepwise increment of load to failure was applied to all models. The analysis was terminated at the load after the complete failure of shell elements.

3. Results and discussion

Fig. 1 shows the internal failure of bone X and Y with stem Z, K and B at LBC. Significant damage elements can be seen in bone Y compared to bone X as resulting of poor bone quality. Major damage at the bone-stem interface of bone Y suggests a higher risk of implant loosening after the arthroplasty. Fig.2 shows the comparison of external failure in LBC. Damage elements at bone X only occurred at one location while two locations were observed at bone Y which also due to the effect of bone quality.

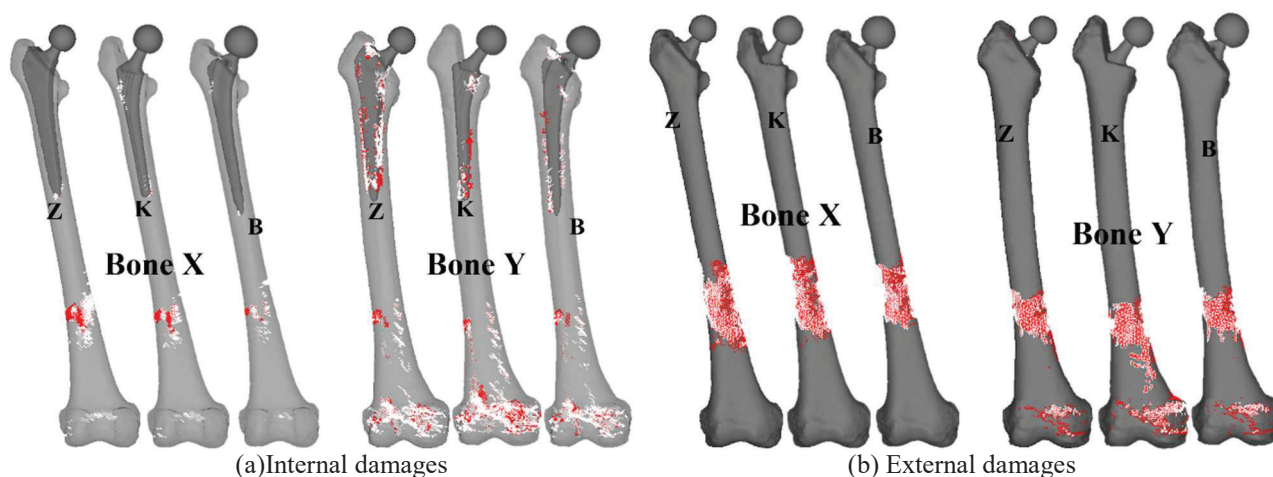


Figure 1 Distribution of microdamages

骨密度分布と微視構造を考慮した骨の力学特性予測理論の構築

千葉大学整形外科 松浦佑介

1. INTRODUCTION

Mathematical relationship between mechanical properties of bone such as Young's modulus, E , and bone mineral density, BMD, has been utilized in CT-image based finite element analysis to construct more realistic computational models. For example, $E - \text{BMD}$ relationship was determined experimentally using empirical formulae by Keyak et al, and has been used worldwide. However, the detailed mechanisms involved in the relationship have not been clarified yet. The principal objective of this study was therefore to develop such relationship using some microstructural and micromechanical models.

2. METHODS

It was firstly assumed that E can be distinguished into two main parts such as E_c of cortical bone and E_t of trabecular bone. Then, E_c and E_t were considered to be expressed as functions of basic Young's modulus, E_s , of bone tissue and porosity, p , where BMD was assumed to be correlated with p mathematically. $E_c - p$ relationship was developed using the theory of poroelasticity which is an extension of elasticity for solid deformation with pores. On the other hand, of $E_t - p$ relationship was constructed using an ideal structural model with a porous unit cell. Micromechanical model proposed by Wanger was also introduced to develop an E_s formula. The model incorporated the platelet-like geometry of basic reinforcing unit, the presence of alternating thin and thick lamellae, and the orientations of the crystal platelets in the lamellae. The thin and thick lamellae were modeled as orthotropic composite layers made up of thin rectangular apatite platelets within collagen matrix, and the classical orthotropic elasticity was used to calculate Young's modulus of the lamellae. The micromechanical model employed a modified rule-of-mixtures to account for the two types of lamellae. Moduli of collagen matrix and apatite platelets were also introduced into the micromodel.

3. RESULTS

For three different types of bone such as normal, osteopenia (OA) and osteoporosis (OP) bones, the theoretical model was applied to find their $E - \text{BMD}$ relationships. E values tended to increase with increasing BMD as expected. It was also found that those theoretical results well coincided with the Keyak's results. Effects of diseases such as OA and OP on the $E - \text{BMD}$ relationship were also clearly introduced using the theoretical model, suggesting that the developed model can be useful in clinical applications. The developed model was also compared with an experimental result of force-stroke curve as shown in Figure 1. It was shown that the theoretical model was well coincided with the experimental.

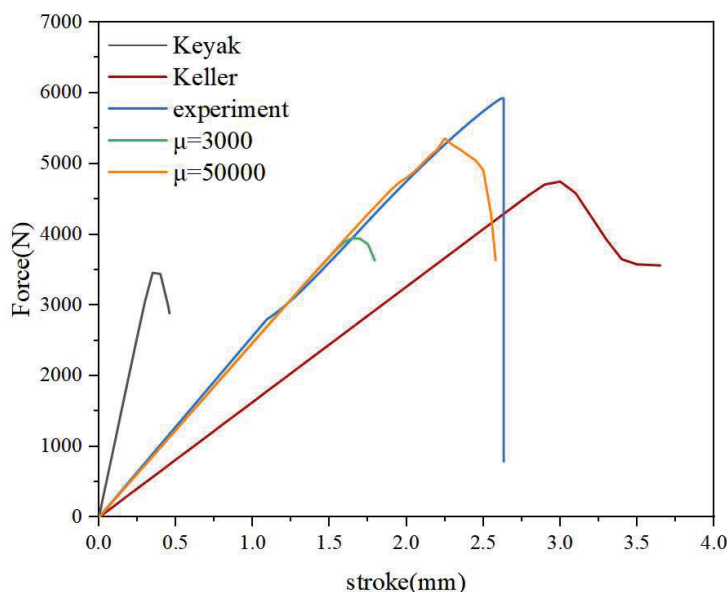


Figure 1 Comparison of force-stroke curves

CT-FEM を用いた変形性膝関節症に対する脛骨骨切り術の応力解析

大分大学整形外科 松田昌悟

1. 緒言

内側開大式高位脛骨骨切り術 (OWHTO) と内側開大式粗面下脛骨骨切り術 (OWDTO) の Transverse cut において、脛骨関節面に平行に骨切りする場合と脛骨骨軸に垂直に骨切りする場合、どちらが脛骨、プレートに対して力学的に適しているか、有限要素法を用いて解析することである。

2. 解析方法

使用した CT データは、64 歳女性で K-L grade 2 の内側型変形性膝関節症、Hip-Knee-Anke 角は 2 度内反で脛骨後方傾斜角 6 度の症例で解析した。プレート、スクリューの CAD データはアスピシヤス社のものを使用し、メカニカルファインダーを用いて有限要素解析を行った。OWHTO、OWDTO いずれも Transverse cut は脛骨関節面から 35mm の位置に設定し、外側皮質は 5mm 残し、10mm の幅で開大した。脛骨粗面は 15mm の厚みを持たせた。OWHTO と OWDTO それぞれ脛骨関節面に平行に骨切りしたモデルと、脛骨骨軸に垂直に骨切りしたモデルを作成した。さらにそれぞれ人工骨ありなしのモデルを作成し、計 8 モデルで解析した。境界条件はプレート、スクリュー間とスクリュー、骨間は固着させた。骨材料ヤング率はケヤックの式で換算し、メッシュサイズは全材料 2mm で作成した。プレート、スクリュー、人工骨のヤング率、ポアソン比などは過去の報告を参考に設定した。荷重条件として足関節を固定させ、両脚立位を想定し、脛骨関節面に垂直方向に 600N を荷重させた。

3. 結果と考察

図 1 にプレートに発生した応力分布を示す。OWHTO モデルと OWDTO モデルのいずれも骨軸に対して垂直に骨切りしたモデルの方が、脛骨ヒンジ部とプレート中央部分にかかる応力集中が少なかった。同様に脛骨の損傷要素数についても、骨軸に対して垂直に骨切りしたモデルの方が少なかった。transverse cut の矢状面角度は、骨軸に対して垂直に骨切りした方が適切であることが示唆された。

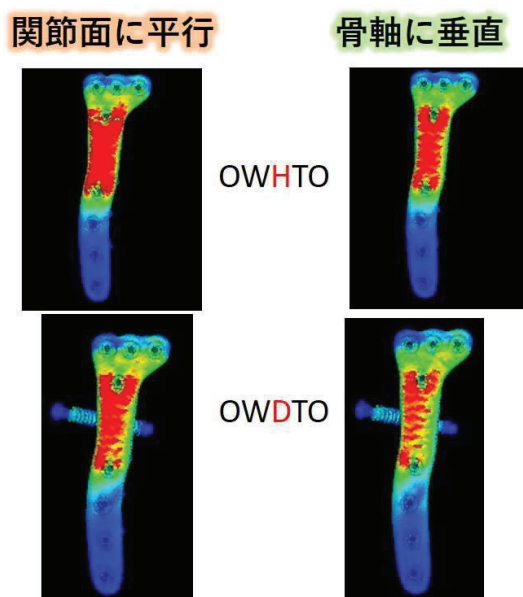


図 1 プレートに発生した応力分布状態

3次元有限要素法を用いた脆弱性骨盤骨折の検討

大分大学整形外科 川岸正周

1. 目的

骨盤骨折(FFP)は、交通事故や墜落外傷等の大きな外力が加わったときに生じることが知られているが、高齢者においては、転倒等の比較的軽微な外力の作用によっても生じる。FFPは高齢者のADLを急激に低下させ、長期臥床による合併症を生じ健康寿命に大きく関与することから、この骨折の発生メカニズムの理解と治療法の確立は本邦において急務と考えられる。FFPの発生メカニズムの解明は発生の予防に応用させることができ、各種固定方法の力学的な評価を行うことによって、より詳細かつ具体的に固定方法を評価することができる。本研究では、FEMを用いてFFPの発生メカニズムの解明を試みた。

2. 解析方法

本院で入院加療を受けた骨粗鬆症を有する外傷症例の骨盤CT画像データを用いた。得られたCT画像をMECHANICAL FINDER ver12に取り込む。ソフト上で骨盤モデルを作成し、骨はkeyakの式を使用してCT値から換算された物性値を設定し不均質性を再現、他の恥骨結合などの軟部組織は先行文献(Zhao Y, 2012, Injury)を参考に物性値を設定し粗鬆骨の骨盤モデルを作成した。作成したモデルに腸骨稜・坐骨結節・寛骨臼に合計14パターンの荷重条件を与えた。作成したモデルにFFP分類に順じた骨折線を加えてFFPモデルを作る。固定用インプラントを挿入して各種固定法の有用性の検討を行う。FFP分類のTypeIIc及びTypeIIIcに対する前方固定の有用性に関して解明し骨折は骨盤モデルに板状の弾性体を挿入することで再現した。IIc及びIIIcはIIcを1mm厚、IIIcを3mm厚の骨折線を挿入することで再現した。固定法はTS screwとしてφ6.5mmのCCSをS1領域とS2領域に挿入した。前方固定は恥骨上枝内に逆行性恥骨スクリューとして挿入した。前方固定を行ったモデルと行っていないモデルを作成し両側の股関節に立位荷重を想定して荷重をかけた際のモデルの安定性を応力分布と破壊要素数で評価した。

3. 結果

H型骨折などの典型的な骨折パターンの再現に成功した。骨盤全体の応力分布として4つのモデルそれぞれの、0～3MPaの応力分布コンター図を比較すると、骨折線1mm群と3mm群では大きく変わりなかったが、恥骨スクリューあり群となし群を比較すると、あり群では健側の閉鎖孔周辺と仙腸関節にも応力が分散されており、前方固定をおこなったモデルは健常側にも応力分散されており破壊要素数も少なかった。骨盤全体の破壊ソリッド数の4パターンの比較を行うと、1mm群よりも3mm群の方が破壊ソリッド数は多く、1mm 3mmそれぞれでは前方固定をした方が破壊ソリッド数は少なかった。スクリューのコンター図を比較すると、1mmでは前方固定ありなしでTSの応力分布及び破壊ソリッドに大きな違いはなかったが、骨折線3mmでは恥骨スクリューなしモデルは恥骨スクリューありモデルより骨折部周辺の破壊ソリッド及び応力集中が骨折部周辺におこっていた。

4. 考察

骨折発生のメカニズムの解明に関して今後はより詳細に解析することでカットオフを明らかにし、さらに症例を男性5例、女性5例に増やして一般化の妥当性も検討する。骨盤骨折の有限要素解析の報告では、APC IIの骨盤骨折モデルの解析報告で前方固定の有用性が示唆されていた。本研究はFFPの有限要素解析であるが、非脆弱性骨折の解析と同様に前方固定の有用性が示唆される結果が得られた。恥骨スクリューが挿入されたことにより前方成分・健側への荷重分散が行われている可能性が示唆された。また、有限要素法以外のバイオメカニカルな報告でキャダバー研究があり、前方固定に追加による骨盤の固定性の改善が示唆された上で、不安定性の高い斜骨折で前方固定を必要とする可能性が高いことが示されていた。

腫瘍を有する脛骨の力学的解析法の検討

兵庫県立がんセンター 藤本卓也

1. 緒言

良性骨腫瘍の切除では、術後の骨の構造変化による力学的強度の低下のため、術後骨折を生じる危険性を念頭においた手術計画が必要である。術前の画像データを用いて、術後の骨強度の低下が予測できれば有用であるが、そのような手法は未だ確立されていない。そこで、良性骨腫瘍の手術の際に、切除部位のCT画像データを用いて術前と術後の数値モデルを作成し、有限要素法(FEM)を用いた骨強度低下の評価(CT-FEM)の有用性を検証した。

2. 方法

症例は、骨線維性異形成に罹患した20歳代の女性。画像検査では、右脛骨近位部前面の骨皮質内に長径5cm×幅3cmとその遠位に長径3cm×幅1cm大の腫瘍を認めた。CT画像データから骨の輪郭を抽出した3次元脛骨モデルを用いて、腫瘍切除部の形状が異なるモデル(直方体と楕円体)を作成した。そして、CT値から換算された要素単位での骨密度から力学特性値を評価した。境界条件として、垂直荷重とねじり荷重の2種類を用いた。また、損傷要素数が臨界値に達した時の荷重値を骨強度として定義した。

3. 結果と考察

術前と術後2年間の強度変化を図1に示す。術前の検討にて、近位部の腫瘍を直方体状に切除した場合は、角の部分での過度の応力集中により、垂直荷重条件では術前の92%、ねじり荷重条件では12%まで強度が大きく低下し、一方、楕円体形状の場合は応力集中の軽減のため、それぞれ、97%および23%に低下することが判明した。そこで、脛骨近位側の腫瘍を楕円形、遠位側の腫瘍を長方形に切除を行い、術後は、PTB装具装着下に捻じる動作を制限し、術後4か月で全荷重を行った。術後1年の解析では、垂直負荷の強度は術前の約60%まで回復した。骨腫瘍切除術は、切除方法・後療法など術者の経験をもとに主観的に行われることが多いが、この度の術前のCT-FEMによる検討により腫瘍切除の方法と術後の後療法が示めされ、術前のCT-FEMによる客観的な力学的評価は有用であると考えられた。今後のさらなる検討が必要である。

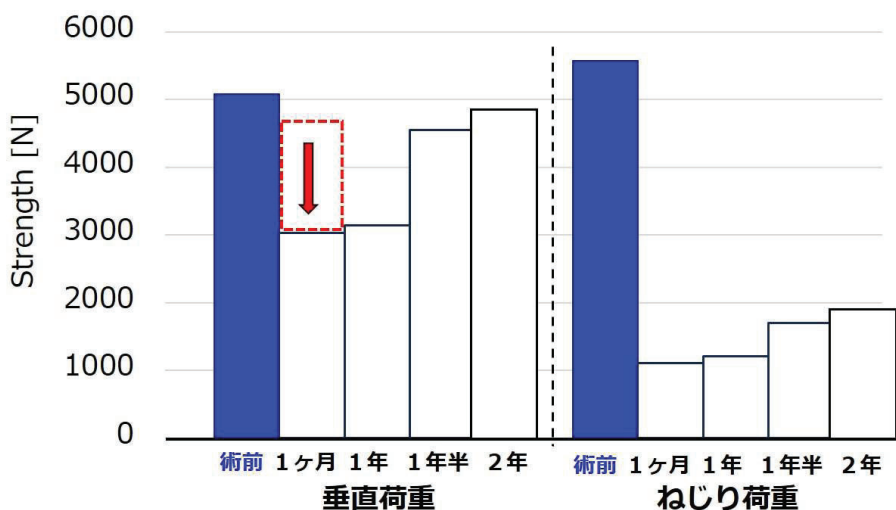


図1 術前と術後2年間の強度変化

2024CR-ME-13 データサイエンスに基づく医療工学研究

九州情報大学 荒平 高章

【緒言】 近年の再生医療分野では、「細胞」・「足場材」・「成長因子」で人工的に組織を作製する組織工学に基づいた研究が多く展開され、特に「足場材」に関しては、実際の生体組織を脱細胞化させ、目的とする生体組織の構造を得る脱細胞化組織が注目されている[1]。我々はこのような実際の組織の骨格を足場材に用いるというコンセプトに基づき、野菜の骨格を用いた足場材について検討し、前年度の本共同利用研究にて報告している。この報告の中で3種類の野菜を採用し、圧縮弾性率、細胞数、ALP活性による評価および比較を実施した。その結果、3種類の野菜の中で有意に圧縮弾性率の高かったゴボウであったが、細胞増殖能については気孔径が Ciardelli らの報告[2]にある 100 μm 程度という最適値よりも大きいため十分な効果が得られていない。

そこで本研究では、ゴボウに着目し、気孔径が大きな点を解消するために、コラーゲン層を骨格内に導入した複合系足場材を作製し細胞増殖能の改善を試みた。

【方法】 ゴボウをポンチで直径 10mm にカットした。カットした試料を 0.5wt% のドデシル硫酸ナトリウムに 18 時間浸漬させた。18 時間経過後、試料を取り出し、PBS とペニシリン 1% を混合させた溶液に 37°C で 6 時間浸漬させた[3]。得られた試料を I 型コラーゲン溶液に浸漬させ、凍結乾燥後、化学架橋、ブロッッキング処理をし、再度凍結乾燥したものを複合系足場材試料とした。得られた試料について、構造観察、細胞培養実験（細胞数）を実施した。

【結果と考察】 構造観察結果よりゴボウのみの場合は、大小ランダムな気孔が観察され、コラーゲン層を導入すると、ゴボウの気孔内外で多孔質構造が観察された。細胞培養実験より、コラーゲン層の導入によって、細胞数は有意に高い値を示した。

【結言】 本研究によって、ゴボウを骨格とした足場材にコラーゲン層、コラーゲン/B-TCP 層を導入することによって、コラーゲンによる多孔質構造が形成され、細胞増殖能を向上させることを明らかにした。

【参考文献】 (1) Hsieh, D. J., Srinivasan, P. et al., (2021). Protocols for the preparation and characterization of decellularized tissue and organ scaffolds for tissue engineering. *BioTechniques*, 70(2), 107-115.

(2) Ciardelli, G., Gentile, P. et al., (2010). Enzymatically crosslinked porous composite matrices for bone tissue regeneration. *J Biomed Mater Res 92A* : 137-151.

(3) Jennifer Lee, Hyerin Jung, Narea Park ,Sung-Hwan Park & Ji Hyeon Ju , “Induced Osteogenesis in Plants Decellularized Scaffolds”, *SCIENTIFIC REPORTS* ,1-10,2019 .

【論文発表】 三枝明日葉, 荒平高章, 東藤貢(2024), 植物組織を骨格とした3次元足場材の作製と評価, 臨床バイオメカニクス, 45, pp. 178-181.

風洞実験による沿岸近傍の洋上ウィンドファームと大気境界層間の相互作用の評価

近畿大学 工学部機械工学科 Goit Jay Prakash

1. 目的

洋上風力発電の多くは水深の浅い沿岸から数十メートルから数十キロ沖合に開発されるため、風車の発電電力量及び風車にかかる荷重に沿岸域の地形が及ぼす影響が重要になる。そこで、Goit & Önder (JRSE 2022)はラージエディシミュレーション(LES)を用いて大気境界層が陸から海へ遷移する課程で形成される内部境界層内の乱流場が洋上ウィンドファーム内のエネルギー輸送及び後流回復に寄与する研究成果を報告した。本研究では、数値計算結果の検証を行うために、風洞実験を用いて沿岸域の境界層流れを模擬し、形成される内部境界層が洋上ウィンドファームへ及ぼす影響について評価する。

2. 実験方法

使用された模型風車はロータ直径 $D=0.25\text{m}$ およびハブ高さ $y_h=0.267\text{m}$ であり、周速比 $\lambda=4$ でパワー係数(C_p)が最大となるように設計されている。実験は、流入風速を $U_0=5\text{m/s}$ とした。風速計測にはKANOMAX社製のCTAユニットと熱線流速計用プローブ(0248-T5)を使用した。風速計測において、サンプリング周波数は5 kHz、計測時間は30秒とした。実験は九州大学応用力学研究所にある地球大気動態シミュレーション装置(境界層風洞)を用いて実施された。測定部入り口から流れ方向に3mの範囲に1辺 $P=45\text{mm}$ の木片ブロックが千鳥配置(流れ方向およびスパン方向に $3P(=135\text{mm})$ の間隔)された。ウィンドファームを構成する12基模型風車は、設置された木片ブロックの最下流位置から1.5m下流の海上を模擬する滑面平板上に配置された(図1参照)。模型風車は整列配置され、風車間隔は流れ方向に7D、スパン方向に4Dとした。

3. 実験結果及び考察

図2にウィンドファーム内の模型風車ハブ高さ位置および模型風車全高高さ位置で計測された平均風速の流れ方向変化を示す。ハブ高さ位置において、 $0\text{m} < x \leq 3.8\text{m}$ の範囲において、平均風速は流入風速の5m/sから2m/sまで低下する。その後、 $x \geq 4\text{m}$ の範囲では平均風速4.2m/sまで回復し、ほぼ一定となる。全高高さ位置では、 $0 < x \leq 3\text{m}$ の範囲で平均風速は流入風速5m/sから緩やかに減少し、 $3\text{m} < x < 4\text{m}$ の範囲で平均風速4.1m/sから約2.0m/sへ急減少する。 $x \geq 4\text{m}$ では、平均風速は急増加・急減少している。各高さ位置での平均風速が流れ方向に急激加速や減速する原因としては、ウィンドファームに流入する境界層が風車全高を越える厚さまで発達していないためと考えられる。乱流強度(図に示していない)は高さ位置によらず1%ぐらいから15%程度まで増加する傾向である。

図3に本実験で計測した模型風車の行ごとの発電出力量と数値計算結果の結果を示す。1行目($x \cong 1.5\text{m}$)から2行目($x \cong 3.2\text{m}$)にかけて発電出力は大きく(約40~60%)低下する。2行目から3行目($x \cong 5\text{m}$)にかけてわずかに上昇して3行目以降において各行の発電出力量はほぼ一定となる。数値計算による発電出力量は本実験結果よりも高いが、両者とも同様な傾向を示す。

尚、風車無しの場合の境界層及び内部境界層(IBL)の発達についても評価した。内部境界層は平均風速と乱流強度分布の両方から算出したが、平均風速分布から求めた内部境界層の約1.5倍の厚さとなっている。

本研究の計測として、今後地形の影響を詳細に評価するため、上流側のブロック有無の場合の流れ場及び発電出力量を比較する。風車間隔と風車配置を変えたときに境界層とファーム内乱流場間の相互作用について考察をする。



図1 風洞実験の様子

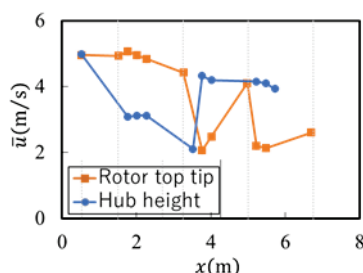


図2. ウィンドファーム内風速の発達.

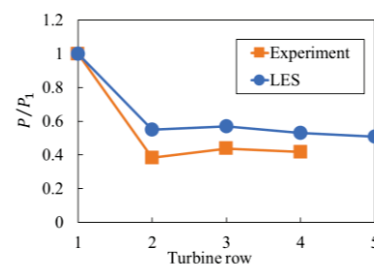


図3. ウィンドファーム下流行毎の発電出力量.

4. 研究成果報告

■ 安本 勇輝, ゴイト ジェイ プラカス, 亀田 孝嗣, 内田 孝紀, 松島 啓二 "風洞実験による沿岸近傍の洋上ウィンドファームの評価", 日本機械学会 中国四国 学生会 第55回学生員卒業研究発表講演会, 徳島, 2025.

5. 研究組織

研究代表者: Goit Jay Prakash (近畿大), 所内世話人: 内田 孝紀, 共同研究者: 亀田 孝嗣 (近畿大), 研究協力者: 安本 勇輝 (近畿大)

離島間輸送を実現に向けた空陸両用車の実現性の検討

沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科 森澤征一郎

1. 研究目的

日本国内の離島に住む人々にとって、空路は重要な交通手段となっている。しかし、人口減少に伴う利用者の減少が進むことで地方空港の利用率が低下し赤字路線となり、路線の縮小や廃止が進みつつある。そのため、新たな代替できる移動が必要な状態となっている。

本研究の目的は、離島間の新たな移動手段の実現を目指し、既存の地方空港を用いた空陸両用車による離島間移動の実現性を検討することである。この実現に向けて機体のサイジング、および機体形状に関する主翼平面の検討を行った。

2. 検討対象と評価方法

検討対象は、過去にバージニア工科大学とラフバラー大学の学生グループが共同で検討した空陸両用車「Pegasus」である。本研究では、この形状のモデリングを行い、機体の離陸性能・巡航性能・着陸性能に関わる飛行性能を満たすサイジングを実施する。そして、その結果よりより求めるとともに、流体計算による空力性能の評価を行う。

3. 実施状況と今後

図1にサイジングによって得られた翼面荷重 W/S 、パワー荷重 P/S の関係を示す。その結果、図8より離陸性能・巡航性能・着陸性能、そしてエンジン性能の全てを満たす領域が存在し、サイジングによる機体の成立性を示すことができた。このサイジング結果をもとに、機体形状を決定するため主翼平面に関する検討を行った。図2に主翼のアスペクト比(AR)を変更した際の揚抗比に関する結果を示す。その結果、 $AR=8$ が最も良く、図3のような機体形状を得た。

今後は、本研究で得た機体形状を風洞実験による空力計測を行う。そして、本結果で得た機体形状に関する妥当性を示す。

5. 研究成果報告

森澤征一郎, 兼久勇斗, "離島間を移動できる空陸用両車の実現可能性の検討と評価," 2C10, 第62回飛行機シンポジウム, 福井, 2024年10月15日~17日。

6. 研究組織

沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科 森澤 征一郎
(研究代表者)

九州大学応用力学研究所 内田孝紀 (所内世話人)

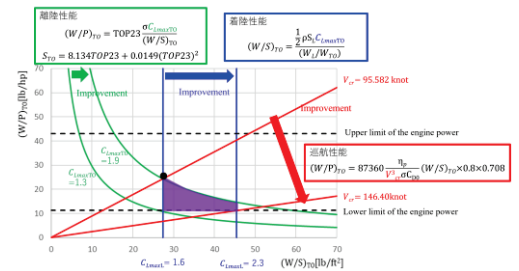


図1 飛行性能に基づくサイジング結果

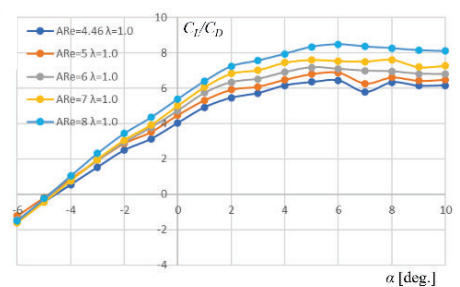


図2 機体の平面形状に関する空力性能

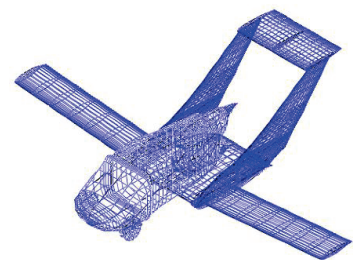


図3 サイジング結果より決定した機体形状

歯科矯正用アンカースクリューにおける患者別3次元不均質性骨モデルを用いた
有限要素解析の臨床診断への応用

九州大学大学院歯学研究院歯学部門口腔保健推進学 高橋一郎

【研究の背景】

矯正歯科治療は、マルチブラケット装置という口腔内に装着する矯正装置により発生する矯正力を歯に伝達し、歯を動かすことによって不正咬合を改善するための治療である。この治療では、それぞれの歯に加わる力を適切に制御することが治療の成否に直結し、動かすべきではない歯を適切に動かさないように制御することが重要である。この動かしたくない歯を動かさないという概念を「固定」という。「固定」を適切にコントロールするのは大変困難であり、この能力を身につけることが矯正歯科医として最も重要なことの一つでもあるが、それを劇的に改善したのが歯科矯正用アンカースクリュー（以下、スクリュー(図1)）である。近年、スクリューの出現により、治療期間の短縮や抜歯および外科矯正の機会の減少など、矯正歯科治療は重要な進歩を遂げつつある。スクリューは患者の協力を必要とせず絶対的な固定を実現できるなど多くの利点があり、現代矯正歯科治療の主役の一つであるといっても過言ではない。一方で、治療期間中のスクリューの脱落と再植立は骨の治癒期間を待つことが必要となり治療期間の延長、あるいは治療アウトカム達成率の低下の要因となる。スクリューの脱落率は13.4%-20.1%との報告があり、脱落因子として患者自身の歯周組織の性質・植立方法・スクリュー形状など様々な因子が挙げられてはいるが、スクリューの脱落を予測することは未だ困難であるというのが現状である。



図1

骨や歯などの生体硬組織は、場所により組成や密度が異なる不均質性材料であり、生体内部に存在するため、その形状や力学的特性を直接的に求めることは不可能である。その一方で、CT やMRI などの医療画像情報に基づいて生体の力学モデルを構築し力学解析を行うイメージ連成バイオメカニクスの技術が発達し、有限要素法（FEM）を用いて患者の骨強度を解析する方法の必要性は高まってきている。この個別別モデルを使ったシミュレーションシステムの構築は急務である。これまでもこうした研究は行われてきたが、三次元有限要素法を用いたスクリュー成否要因に関する過去の研究の多くは、個体の特異性や骨の不均質性を考慮しておらず、個々の状況を詳細に反映していない。当講座では先行研究として、上顎骨に植立されたスクリューに対して骨の不均質性を反映した FEM 解析を行い脱落予測因子としての機械的パラメータを示してきた。しかし、皮質骨が上顎骨より厚いとされる下顎骨の脱落予測因子は未だ特定されていない。皮質骨の厚みや骨密度など性質の異なる上下顎骨において、共通して臨床診断に応用できるスクリューの脱落因子を検索する為、われ

われは個々の患者の骨の不均質性やスクリユーの植立位置、および隣在歯の位置を反映した現実に近いモデルを作成し有限要素解析を行い、スクリユーの脱落に関連する機械的パラメータおよび臨床的リスク因子の解析を行った。

【目的】

本研究では下顎骨に植立したスクリユーに対する矯正力負荷が歯槽骨に与える力学的影響を、骨の不均質性を反映したモデルを用いて三次元有限要素法により解析し、植立の成否に関連する機械的パラメータおよび臨床的リスク因子を特定することを目的とした。

【資料および方法】

マルチブラケット装置を用いた矯正治療の対象となった症例のうち、抜歯が必要と診断され 24 症例において犬歯遠心移動時の固定原として下顎第二小臼歯、第一大臼歯間に植立された計 32 本（成功 26 本、脱落 6 本）のスクリユーを解析の対象とした。植立前 CT データより骨、第二小臼歯、第一大臼歯、歯根膜のモデルを作成した。マイクロ CT データより作成した直径 1.4mm、長さ 6mm のスクリユーのモデルを、植立後 CT データより作成したモデル上で重ね合わせ、骨モデルに植立した。三次元有限要素解析ソフトウェア (Mechanical Finder) を用いて 2N の荷重を近心方向に加えた。スクリユー表面からの距離によって骨を 4 つの領域：領域 1 (0.0~0.5 mm)、領域 2 (0.5~1.0 mm)、領域 3 (1.0~1.5 mm)、領域 4 (その他の骨) に分割し、応力とひずみに関連する 20 の機械的パラメータのピーク値を求め、ロジスティック回帰分析によってスクリユー成否に関与する機械的パラメータの検索を行った。さらに、CT 画像データおよび有限要素モデルより骨密度・皮質骨の厚み・スクリユーと隣接歯根との距離・スクリユー植立角度などのデータを取得し、回帰分析を行うことで下顎骨に植立されたスクリユーの成否に最も関連する機械的パラメータに関与する臨床的リスク要因の検索を行った。

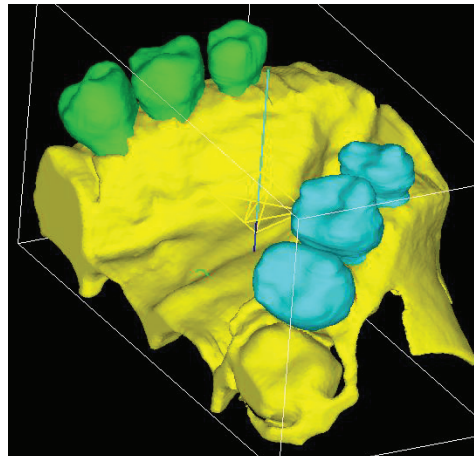
【結果および考察】

下顎骨に植立されたスクリユー成否の評価基準として、機械的パラメータは最小主ひずみであり、歯槽骨内のスクリユー周囲の領域ではスクリユーから 0.5~1.0 mm の領域の最小主ひずみが適切な基準であると推察された ($R^2 = 0.8033$)。上下顎骨共に領域 2 の主ひずみにおいて成功群と脱落群の間に差があると考えられた。予測式によると、領域 2 の最小主ひずみが $-474 \mu\text{strain}$ の場合、スクリユーが脱落する可能性は 5%であった。一方、スクリユーが脱落する可能性は領域 2 の最小主ひずみが $-663 \mu\text{strain}$ で 50%、 $-852 \mu\text{strain}$ で 95%と予測された。スクリユー表面から 0.5~1.0 mm の範囲の骨の主ひずみの増大が、上下顎骨ともにスクリユーの脱落に最も関連しており、下顎骨では上顎骨よりも小さな主ひずみでスクリユーの脱落が起こることが明らかとなった。このことから、スクリユーの脱落には主応力や相当応力よりも主ひずみが重要な役割を果たしていることが示された。

次に、臨床的因子がスクリューの周囲の骨の主ひずみに与える影響を検討した。患者の骨密度、スクリューと隣接歯根との距離、スクリューの垂直的植立角度が上下顎骨ともに主ひずみに有意に関連していることが示された。スクリュー植立前に CT 撮影を行い骨密度が低い部位への植立を避け、スクリュー植立の際には粘膜の炎症および隣接歯根との近接を避けるために付着歯肉から歯根側へスクリューを傾斜させて植立することでスクリューの成功率向上に寄与できる可能性が示唆された。

【今後の展望】

スクリューは近年顎整形力への応用も期待されているが、矯正力と比較し負荷の大きな顎整形力に対するスクリューおよび骨の耐性についてのエビデンスの不足が歯科矯正用アンカースクリューのガイドラインにおいても指摘されている。このような問題に対して、今後はブタの下顎骨にスクリューを植立し荷重を増大させていく動物実験と有限要素解析を用いたブタおよびヒトにおけるスクリューへの荷重増大シミュレート解析を行っていく。まず、ブタの下顎骨を CT スキャンして作成したモデルの有限要素解析を行うことで骨の状態と脱落との関連を検討し、次に、ブタの下顎骨に実際にスクリューを植立し、スクリューが脱落するまで荷重を増加させていく実験とを実施し、患者固有の耐荷重量を推察することができるモデルを策定することをめざして研究を展開することとした。また、荷重をかけた時の歪みの分布などについても調査を行っていく。加えて、上顎骨の口蓋に植立したスクリューに対する矯正力負荷が歯槽骨に与える力学的影響を骨の不均質性を反映したモデルを用いた 3次元有限要素法により解析し、植立の成否に関連する機械的パラメータおよび臨床的リスク因子を特定することを目的として、継続的に研究を実施する。口蓋骨正中においては歯根との近接リスクがないため、骨密度等の骨の性質がスクリュー成否により重要になると考えられる。また、口蓋正中には縫合があるため、スクリューと縫合との位置関係によるスクリュー成否の差があるのかについても検討していく予定である。



こうした研究成果をとりまとめ、スクリューの脱落を予防するための診断基準を策定し、矯正歯科臨床の安全性の向上に寄与することを目的として研究を進めていく。本研究を進めていくことで、最終的には、患者毎にスクリュー植立前に最適な植立部位や荷重量、スクリューサイズなどを特定できるシミュレーションシステムの確立を目指したいと考えている。

極低レイノルズ数翼の革新的空力特性向上の為の基礎研究

同志社大学 理工学部 平田 勝哉
同志社大学 理工学部 若林 叡広
同志社大学 理工学部 池尻 翔太
九州大学 応用力学研究所 内田 孝紀
九州大学 応用力学研究所 高田 青

1. 目的

低レイノルズ数領域における翼の空力特性の把握は、無人航空機 UAV や超小型航空機 MAV の開発、昆虫・鳥・種子の飛行システムの解明、小型風力や水力発電機の開発などにおいて重要である。しかし、その様な低 Re 領域での翼の空力特性についての理解は、層流-乱流遷移などと関係した複雑かつ無視できない Re 効果のため、未だ充分ではない。本研究では、翼まわりの流れの 3 次元構造について、水槽を用いた可視化実験を行い、得られた画像に PIV 計測を施し、そのデータを解析することで、3 次元渦構造を可視化し、 Re により分類する。

2. 実験方法

実験の概略図を図 1 に示す。実験装置は、水槽とモデル、曳航式台車、照明装置、撮影装置で構成されている。モデルまわりの流れの可視化には、流体に混ぜたトレーサー粒子を用いた。トレーサー粒子には、流体として用いた水に比重に近いナイロンパウダーを用いた。実験時は、光源・モデル・カメラは全て台車に設置しており、共に一定速度で移動させた。光源からの光をスリットによりシート状にして、シート面における粒子の動きを撮影した。撮影面は、主流方向に直角な面とした。

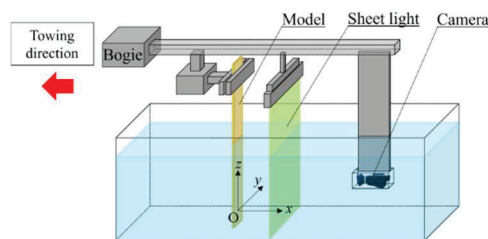


Fig. 1 Experimental apparatus.

3. 結果と考察

図 2 に、水槽実験において、 $Re = 130 - 250$ で、迎角 $\alpha = 90\text{deg}$ の平板翼後流に生成された 3 次元渦構造を示す。撮影面は、翼背面から 2 翼弦長下流であり、(a) は主流方向渦度を主流直角かつスパン直角方向に平均したもので、(b) は主流方向渦度の等値面である。縦軸はスパン方向座標、横軸は時間であり、*は無次元化されていることを表す。図 2 から、あるスパン方向座標を見ると、 $Re = 130$ では、渦の正負が規則的に入れ替わる箇所、 $Re = 140 - 180$ では入れ替わる箇所と

入れ替わらない時間が長い箇所の両方, $Re \geq 190$ では, 入れ替わらない時間が長い箇所を確認できる. $Re = 130$ と $Re \geq 190$ の特徴は Williamson, 1996¹⁾が示した円柱後流の3次元構造である Mode A と Mode B の特徴に似ている. よって, $Re = 130 - 190$ にかけて, Mode A に似た構造から, Mode B に似た構造へ変化したものであると考える.

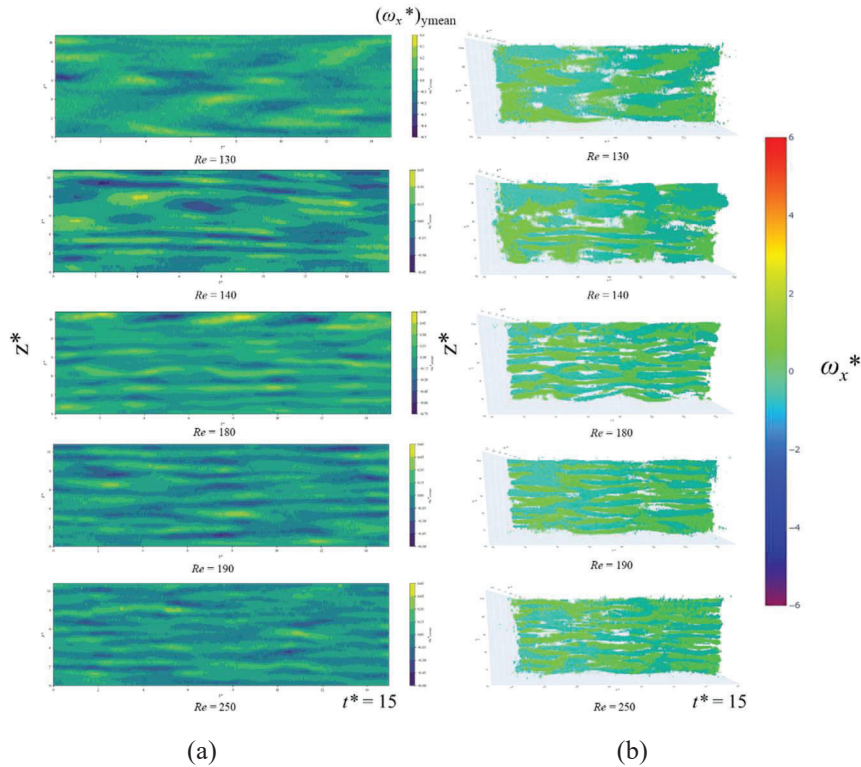


Fig. 2 Visualization of three-dimensional vortices structure.

4. まとめ

水槽実験を行い, 迎角 $\alpha = 90\text{deg.}$ の平板翼後流を解析した結果, $Re = 130 - 190$ にかけて, Mode A に似た構造から Mode B に似た構造への変化を確認した. 今後, $Re = 140 - 180$ での流れの三次元構造を, 水槽実験と数値計算の両面から詳細に調べる予定である.

参考文献

- (1) C. H. K. Williamson, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake", *Annu. Rev Fluid. Mech.* Vol.28 (1996), pp.477-529

謝辞

本研究は, 九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです.

セミサブ型浮体式洋上風車のCFDを用いた動揺解析の検証

九州大学・大学院工学研究院 久松 稜弥

研究目的

浮体式洋上風力発電の浮体式基礎構造物の設計の信頼性向上と効率化のために、流体力評価モデルと流体力係数の推定手法の追求は不可欠である。本研究では矩形断面部材を有するセミサブ型浮体を対象として、(1)矩形断面部材に対する流体力モデルの構築、(2)水槽実験による流体力係数の取得とその影響要因の調査、(3)CFDを用いたシミュレーション手法の構築と水槽実験による検証を目的とした研究を実施した。

水槽実験・考察

水平矩形柱部材の断面流体力係数とその影響要因を調査するために、図1に示す VoltturnUS-S セミサブ型浮体 lower hull の 1/62.5 縮尺模型を製作して曳航試験および規則波試験を実施した。流体力の計測には3分力計(日章電気製：容量 50kgf)を使用した。規則波試験では $KC < 2$ の範囲であっても抗力、慣性力係数が顕著に変化することを確認した。また、部材の pitch による影響を調査したところ、部材断面の長辺・短辺のそれぞれの投影方向の流体力成分への影響は僅かであった。このことから、規則波中ではこれらの方向ごとに Morison 式を適用する流体力評価が適当であると本研究では考えた。

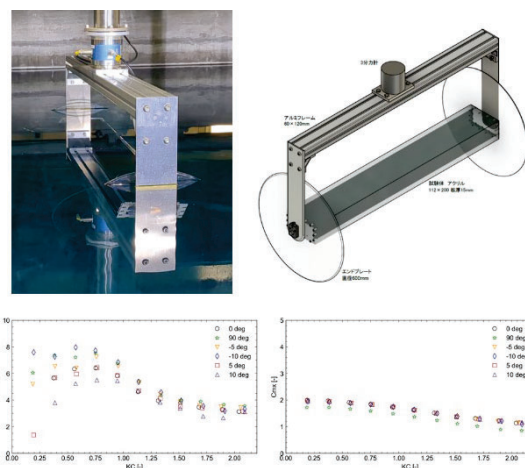


図1 水槽実験の概要

数値解析

矩形断面部材の長辺・短辺の投影方向に対する修正 Morison 式を有限振幅解析が可能なように定式化し、マルチボディダイナミクスソルバー MBDyn に実装することでセミサブ型浮体の動揺解析モデルを構築した(図2a)。また、OpenFOAM および拡張ライブラリ waves2Foam を用いて重合格子法、URANS による CFD 解析モデルを構築した(図2b)。CFD 解析モデルについては事前に矩形、円筒浮体の実験データと比較して動揺解析の妥当性を確認している。これらの解析モデルを用いてそれぞれ VoltturnUS-S セミサブ型浮体を対象に周期 10s、波高 8m の規則波での動揺シミュレーションを行った。その結果、両者でよく一致する振幅が得られることを確認した。

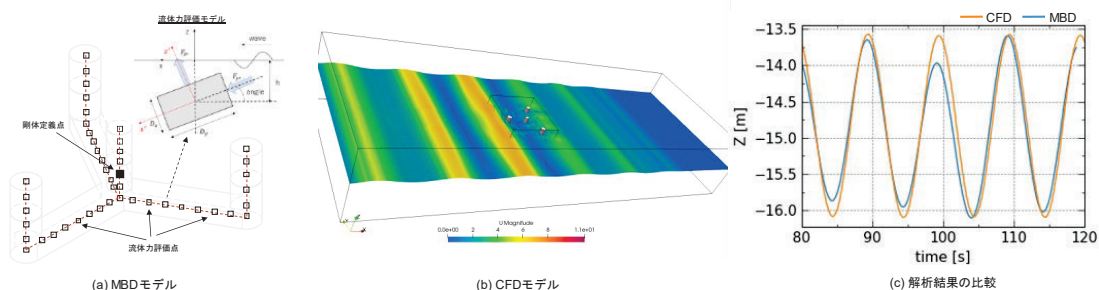


図2 数値解析モデル

研究成果報告

山田寛人：MBDyn を用いた矩形部材に対する流体力評価式の検討，2024 年度九州大学修士論文，2025。
六車 凌：OpenFOAM を用いた浮体動揺解析，2024 年度九州大学修士論文，2025。

洋上風力発電が沿岸空港の低層風況に及ぼす副次的効用についての検討

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 牧緑

1. 背景と目的

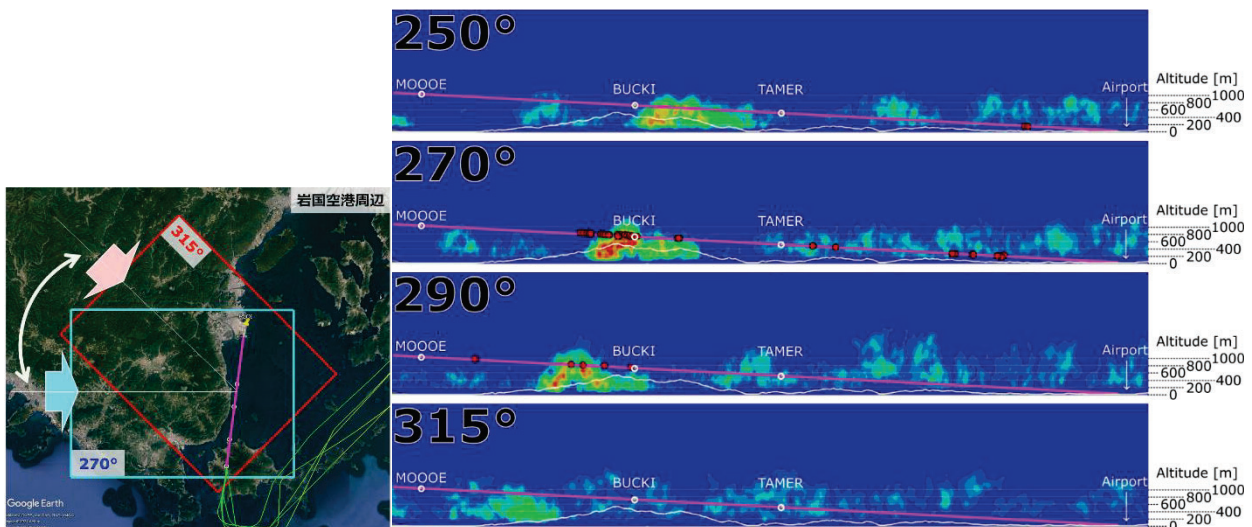
全国各地の沿岸空港で、低層乱気流に起因するインシデント情報が報告されている。運航各社は過去のフライトデータの統計的整理により独自のエアポートガイドを作成し、経験則の伝承とリスク低減に努めてきた。しかし、規程の範囲を越えた揺れや姿勢偏差が、どのような風条件の下で、どのようなメカニズムにより生じたのか、詳細は知られていなかった。力学的に地形性乱気流のメカニズムを解明できれば、滑走路や代替経路の選択、乗務員の状況認識能力向上により、潜在リスクの封じ込めが可能となる。

2. 研究の方法

エアラインより調査依頼のあった、山口県岩国飛行場進入経路上のシビア乱気流について、そのメカニズムを解明すべく、RIAM-COMPACTによる風況LES計算と精度検証用現地4か所でのライダー観測を実施した。

3. 解析事例

下図は、西からの流入風向を変化させたときの乱気流発生場所と乱気流強度の計算結果である。シビア乱気流については、フライトデータおよび現地ライダー観測（RHI観測および上下風時間高密度観測）の結果と計算が良く一致していることが確認された。ただし、モデルート以下の乱気流については、周辺大気の状態により、乱気流見える化の精度が低下する可能性に注意が必要である。



左図：計算領域 右図：流入風向を変化させた場合の乱気流発生位置と強度
(右図の左上数字は流入風向、マゼンダ直線は飛行経路、背景に山岳地形が示されている)

4. 今後の展望

2年間の活動を通じて、実地形LES計算が空港低層風況の解析に有効であることを示すことができた。

本共同研究と関連した内田教授らとの連携により、強風の影響で欠航率の高い稚内空港の運航効率を、風力発電を活用して解決する研究提案を行い、外部資金の獲得に成功した(令和6年度交通運輸技術開発推進制度「風力発電設備の風速低減効果を活用した空港微気象制御システムの実現性に関する調査とシミュレーション評価」)。今後は、当該研究を進めることで九州大学応用力学研究所との連携を継続していく予定である。

高温動作パワーモジュールの接合損傷予測

近畿大学理工学部 宍戸信之

目的

パワーデバイスは電力有効利用のためのキーデバイスである。特に、次世代高耐圧パワーデバイスは高温下での動作が要求されるため、異種材接合部であるデバイス電極実装部での熱疲労による破壊、それに伴う熱抵抗の劣化が深刻な問題となる。本研究では、パワーモジュール内部におけるパワーデバイス直下の接合部におけるボイドが、熱抵抗の劣化や疲労寿命にどのように寄与するのかを数値シミュレーションを併用して検討した。

解析方法

図 1 に示す 3 次元構造モデルを作成し熱伝導-構造連成解析を実施した。接合部損傷モデルの一例を図 2 に示す。半導体チップにおけるジュール発熱を仮定し、実際のパワーデバイスの状態パラメータである半導体チップの平均温度をいずれのボイド状態も同じとなるよう発熱量を設定した。図 2 は左から順に接合部の損傷がない状態、中央部にボイドが発生した状態、端部にボイドが発生した状態を再現した。

解析結果および考察

動作時の温度分布の一例を図 2 でコンターとして示す。完全に接合した状態では半導体チップ上の温度はほぼ一様であるが、ボイドが存在する場合、熱伝導パスが失われたためにボイド直上で非常に高温となることがわかる。図 3 にはその際のクリープひずみの履歴を示しているが、損傷の駆動力として考えられるひずみ振幅の大きさは、中央にボイドがある場合が最も小さく、これは他に比べて損傷の進行速度が緩やかになることを示している。実際に熱抵抗が初期値から 20% 上昇するまでのパワーサイクル繰り返し数を寿命とした場合の実測結果を図 4 に示しているが、ボイドの比率や形状ではなく、ひずみ量で寿命を整理する Coffine-Manson 則に従うことが明らかとなった。

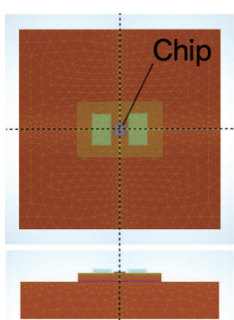


Fig.1 3D model

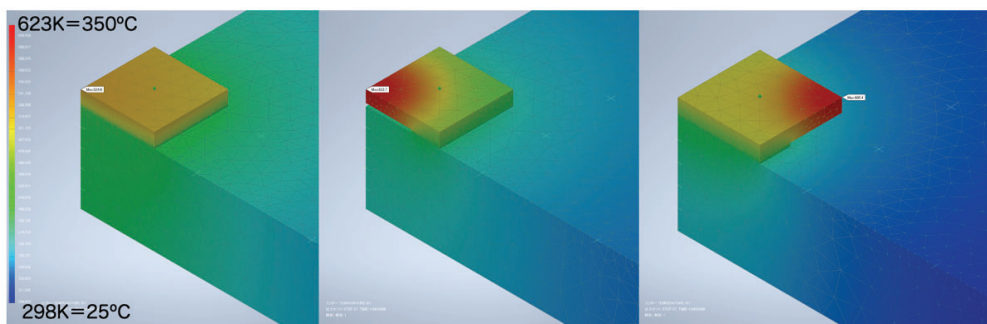


Fig.2 1/4 model of DUT with different void shapes(Left: Ref., Center:A, Right: B)

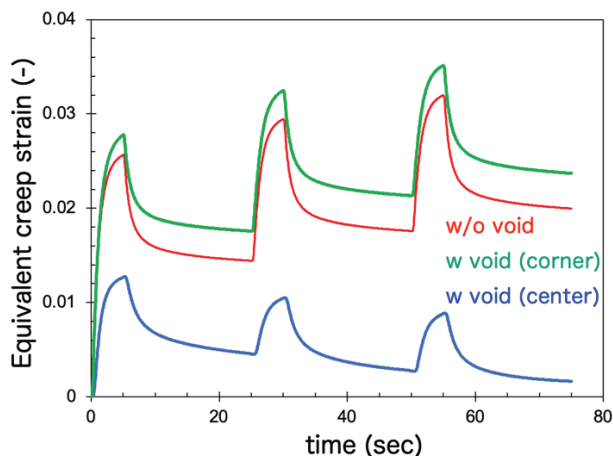


Fig.3 Strain histories during power cycles.

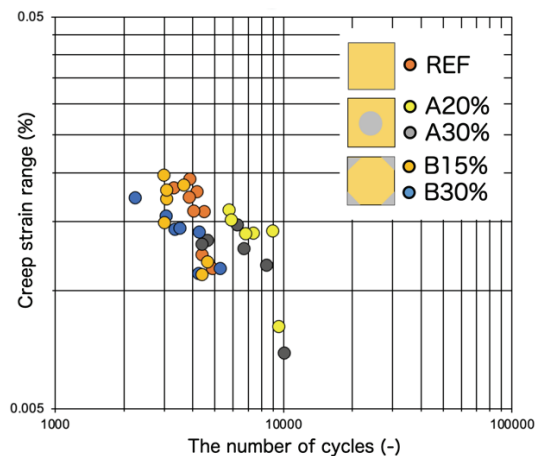


Fig.4 Relationship between lifetime and strain.

高ソリディティを有する抗力型垂直軸風車の性能予測に関する研究

弘前大学・地域戦略研究所 久保田 健

目的

抗力型の風車は低周速で回転する際に高いトルク係数を示すため始動性は良く、揚力型では対応できない低風速からでもエネルギー生成を可能とすることから、抗力型としての性能向上は未利用な低速風を資源化する研究と認識される。CFD 計算 (RANS: SSTk- ω) に際し、3次元CFDでは風洞実験値とおよそ一致する結果が得られるのに対し、時間コストの安価な2次元CFDでは実験値と大きく乖離する。揚力型風車に対する2次元CFDでは実験値とおよそ整合する結果となることを踏まえれば、抗力型風車の特徴である高ソリディティ、すなわち閉塞効果の3次元性に起因していると考えられる。本研究では、高ソリディティを有する抗力型垂直軸風車の性能予測を2次元CFD結果から推測する手法の開発を目指し、今回、CFD計算の参照用実験データを収集した。

方法

風洞実験は、地球大気動態シミュレーション実験棟において実施した。供試風車は図1の内挿図に示すように直線8枚翼の垂直軸型であって外直径は300mm、上下天板の径は310mm (厚さ2mm) である。軸方向のスパン長は従前の値 (300mm) を基準に50~450mmの5条件とした。なお、風車や支持架台を含めた風洞閉塞率は最大でも2%未満である。計測にはロータリーエンコーダ付きトルクメータ UTMII-1.0NmR (ユニパルス社製) を、周速比制御には直流式ヒステリシスブレーキ HB10 (小倉クラッチ社製) を用いた。測定は風速7m/sで固定、周速比0.05刻みで実施し (いずれも公称値)、データは1000C/secで30sec保存した生値から整数周分を切り出して整理した。

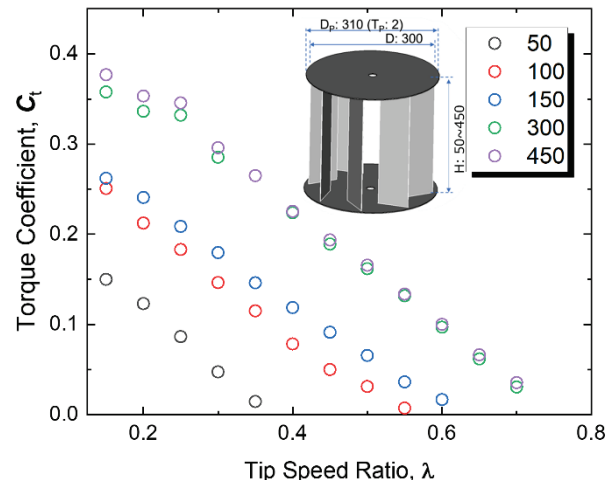


図1 スパン長を変えた際の直線8枚翼の抗力型風車におけるトルク係数 C_t の周速比依存性。
(内挿図は実験に供した風車の外観イメージ)。

結果と考察

図1はスパン長を直径比で0.167~1.5とした風車におけるトルク係数の周速比依存性である。基準のスパン長300mmから短くなるに連れ回転トルクが消失する臨界周速比は小さくなる様相を示し、性能ラインは低下方向へと遷移している。スパン長に対してトルク係数や臨界周速比、パワー係数には単純な線形的相関はみられないものの、並行して実施している3次元CFD計算においても同様の傾向が得られており、今後は実験とCFD結果の可視化を組み合わせる解析を進める。また、スパン長450mmのトルク係数曲線は基準とそれとほぼ同値であった。実証実験機の製作に重要な知見であるため、風車性能に影響を及ぼすアスペクト比の観点でも調査を進める。

研究成果報告

発表論文：5件 (うち1件は修士学位論文、詳細は別紙参照)

研究体制

研究代表者：久保田 健 (弘前大学地域戦略研究所・教授)

所内世話人：内田 孝紀 (九州大学応用力学研究所・教授)

研究協力者：岡崎 衆介 (弘前大学理工学研究科・博士前期2年)、加藤 隆一 (同・博士前期1年)、

芳賀 巧己 (弘前大学地域共創科学研究科・修士1年)、工藤 遼磨 (弘前大学理工学部・4年)

光ファイバー圧力センサーを用いた流速・波浪計の開発研究

長崎大学海洋未来イノベーション機構 経塚雄策

● 研究目的

海洋の利用拡大は、21世紀の地球環境問題への対策として重要である。そのためには、まず海洋の情報の取得が必要であり、衛星を利用した広域の観測と海面ブイや海中ロボットなどによる海中データが求められている。長崎大学では、現在、潮流発電装置付きの海面ブイ（スマートブイ）の開発を行っており、将来的には多数のスマートブイを用いて海面における情報を面的に計測し、水産や海洋環境保全の目的で活用することなどを計画している。その時に、海洋の物理情報として重要なのが、流れと波浪である。本研究は、近年、発展してきた光ファイバー圧力センサーを用いて海の流れと波浪を計測しようとするもので、主には海面ブイに取り付けて使用することを目的とした計測器の開発研究である。

● 実験方法および平水中の実験結果

図1のように、正方断面(5x5)、L=1070mmのステンレスロッドの水面下に光ファイバー圧力センサーを4枚、水面上に歪ゲージを4枚貼り付けた流速計を用いて実験を行った。流向は流速計を取付けた回転台の角度を、-30°から90°までの範囲を10°毎に回転して行った。実験流速は、 $U=0.1\sim 1.0\text{m/s}$ の範囲を0.1m/s毎に変化させた。図2は歪ゲージから求められた流向の計測結果を示したものである。これから、流向は低速時においても非常に良い精度で求められることが分かる。この流向角度に対する圧力センサーの計測値から圧力係数($C_p=P/(\rho/2*U^2)$)を求め、プロットすると図3を得た。ここで、圧力センサーは4つあるが4つの最大値を上流側の値として採用した。図3において、 $U=0.6, 0.7, 0.8\text{m/s}$ の実験結果のみを用いたのは、これらの計測が安定していたためであり、精度の良い近似式を求めるためである。

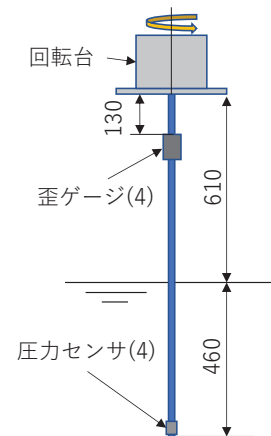


図1 圧力センサー式流速計

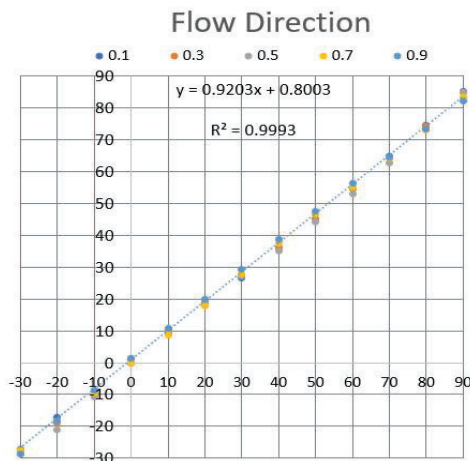


図2 歪センサーから求められる流向

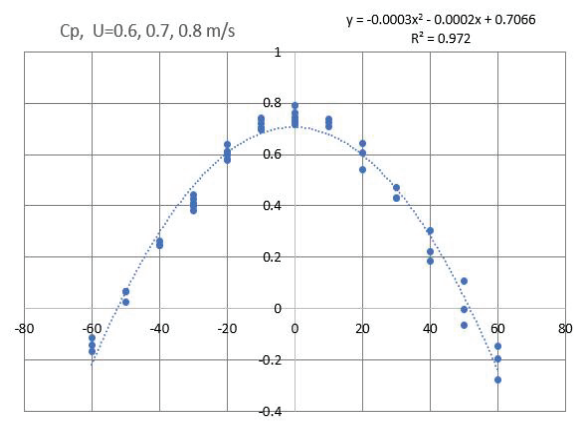


図3 C_p 近似式 ($U=0.6, 0.7, 0.8\text{m/s}$)

流速を求める手順としては歪ゲージの計測値から流向角度が求められるので、図3の近似式を用いて $\theta=0^\circ$ における C_p を求め、これと圧力の最大値($P=\rho gh$)から

$$U = \sqrt{2gh/C_p(0)} \quad (1)$$

として求めた。図4は、今回の全実験結果を流向角度ごとに(流速)と(近似式による推定値)の2乗誤差を求めたものであるが、 40° および 50° については誤差がやや大きくなった。

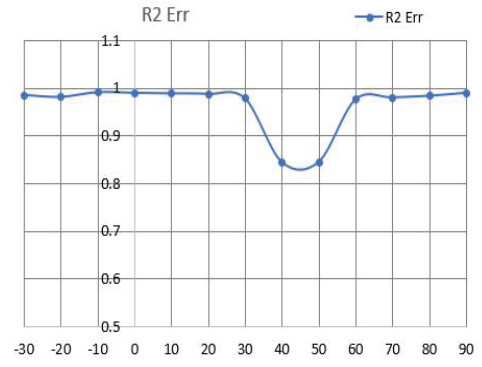


図4 流向と計測誤差

● 波浪中の実験結果

波浪中の実験は、水槽中に規則波($H_w=0.04$ m, $T_w=0.7, 1.0, 1.3$ s)を発生させて、その中で曳引車を $U=0, \pm 0.5, \pm 1.0$ m/sで走らせて圧力を計測した。流向は $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ とした。図5は、圧力センサーの波形を例として示したものであるが、この圧力波形には電気的と思われる数ヘルツの信号が乗っている。この例は、 $U=0.5$ m/sで波浪の伝搬方向とは逆方向に進行している場合であり、P01の波形だけがプラス側にシフトしている。また、波周期($T_w=1.3$ s)よりも出会い波周期が短くなっている。波浪中のデータ解析法については、無意味な雑音を除くためクリティカルなデジタルフィルターを用いて解析する方法も試みたが、最終的にFFT(100Hz, $N=2^{12}$)を用いたスペクトル解析を行った。

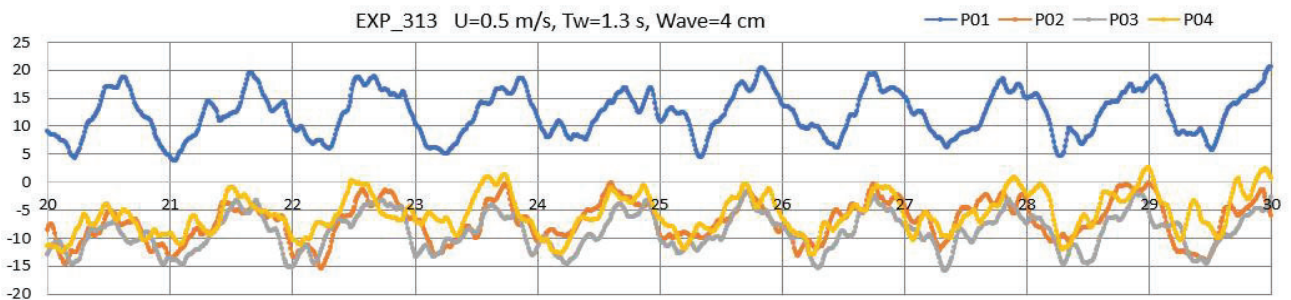


図5 圧力センサー計測波形(EXP_313, $U=0.5$ m/s, $T_w=1.3$ s, $H_w=0.04$ m)

● 考察

図6は、今回行った規則波実験の中で実海域の条件に最も近いと思われる $T_w=1.3$ s, $U=\pm 0.5$ m/sのスペクトルの結果を比較した。規則波なので結果は線スペクトルとなっているが、波と潮流が重なる場合には出会い波周期(T_e)は理論的に次式のように変化する。

$$\omega_e = \omega \pm \frac{\omega^2}{g} U \cos \chi \quad (2)$$

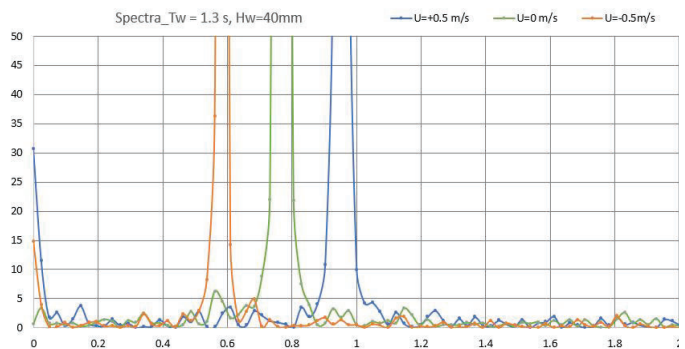


図6 圧力のスペクトル($T_w=1.3$ s; $U=0, \pm 0.5$ m/s)

図6は、流れの影響によって波浪の出会い周期が変化することを明確に示している。

実海域では、通常、波周期は3s以上で、潮流は2m/s以下なので(2)による修正は必要ではないかも知れないが特殊な状況ではこの修正が重要となる場合も考えられる。その点、潮流と波浪の同時計測が可能な本システムには優位性があると思われる。

● 今後の開発について

今回の実験結果によって、ロッドに張り付けた歪ゲージと光ファイバー圧力センサーによる流速・波高計の精度と今後の改良点が明らかとなった。流速計については、断面が正方形の4面に圧力センサーを貼り付けて計測を行ったが、流向が45°方向の流速の精度がやや悪かった。この改良法としては、単純に8角形断面にして圧力センサーを8枚にすれば良いと思われるが、圧力センサーの大きさと8角形ロッドの1辺の長さの関係を考慮する必要がある。波高計としては、今回は波高4cmの規則波であることが分かっていたので、計測値に没水深度の修正をしないで使ったが、厳密にはその修正をする必要がある。さらに、本流速・波浪計は、実海域での使用を目的としているためデータ処理および解析のためには装置内蔵のワンチップマイコンが必須であり、それらの開発も並行して行う必要がある。

● 研究組織

氏名	所属	職名・級号俸等 (院生は学年)	役割・ 担当分野
経塚雄策	長崎大学	特定教授	研究代表者・実験解析
若原正人	(株) シミウス	技術主幹	実験・圧力センサー
胡 長洪	九州大学	教授	所内世話人
合計	3名		