

[14]全国共同利用研究成果報告

<https://doi.org/10.15017/7170244>

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 14, pp.1-299, 2011-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



平成22年度

新エネルギー力学分野
共同研究成果報告

音響放出による類似歯質/レジン界面の非破壊解析 (2)

Nondestructive Analysis of Simulated Tooth/Resin Interface using Acoustic Emission (2)

Ja-Uk Gu¹, Sang-Jae Yoon¹, Nak-Sam Choi^{2*}, Kazuo Arakawa³

¹ Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

² Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, 1271 Sa3 dong, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do 426-791, Korea. *

Corresponding author: E-mail address: nschoi@hanyang.ac.kr

³Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi 816-8580, Japan

Objectives. The purpose of this study was to characterize the marginal disintegration of the dental restoration by using acoustic emissions (AE) arising during the polymerization shrinkage of composite resin subjected to light exposure.

Methods. Composite restoration was performed on the basis of different dental substrates under the light curing. The contraction stress and the disintegration around the margin of the composite restoration are analyzed by measuring the circumferential strain on the outer surface of the ring type substrate as well as the AE signals. Scanning electron microscopy was also performed on the marginal disintegration site of the specimens.

Results. The large tensile contraction stress arisen at the margin of the composite resin by the stiff steel ring substrate induced a drastic increase in the gap thickness and the gap percentage. The quantity of hit events for the human molar dentin specimen was much less than that for the steel ring specimen, but more than that for the PMMA ring specimen. The increase in the gap size represented the increase in the number of crackings at the margin and thus corresponded to the large number of hit events detected.

Significance. Significant differences of AE characteristics for the marginal disintegration appeared depending on the substrate kinds and the adhesive bonding treatments. Such AE behaviors could be used as a nondestructive evaluation index for the marginal disintegrative fracture of dental restoration.

Research Outcome:

Ja-Uk Gu, Nak-Sam Choi, Kazuo Arakawa, Acoustic emission characterization of the marginal disintegration of dental composite restoration, Composites: part A, (May 1, 2011)

光重合型コンポジットレジンの収縮挙動解析

兵庫県立大学大学院 海津 浩一

1. 目的

歯科治療において、修復材料として光重合型コンポジットレジンは広く用いられている。光重合型コンポジットレジンは、取り扱いが容易であり成形性にも優れており、自然歯に近い色合いを表現できる特徴もある。しかしながら、光重合型コンポジットレジンは光を受けて硬化する際に重合収縮をするため、エナメルとコンポジットレジンの接着界面に引張応力が発生し、この引張応力がき裂や剥離等の欠陥の原因となっている。このような欠陥や剥離の発生を防ぐために、コンポジットレジンの重合収縮時の応力状態を明らかにすることは非常に重要な課題となっている。光重合型コンポジットレジンの収縮に関する研究には、新川らの研究^{(1), (2)}があり、デジタル画像相関法を用いた解析により光重合型コンポジットレジンの収縮時の変位場が明らかにされているが、コンポジットレジンの光により重合収縮する場合の解析手法はまだ確立されておらず、そのため、コンポジットレジんに生じる応力状態は明らかになっていない。

本研究では光重合型コンポジットレジンの重合収縮時の応力状態を明らかにすることを目的として、コンポジットレジンの重合収縮過程をコンポジットレジンの冷却されて収縮・硬化する過程と同等であると近似的に見なして、有限要素法コード Marc を用いた熱弾塑性解析により、その応力状態について検討した。

2. 解析モデル

2.1 有限要素解析モデル 光重合型コンポジットレジンは、470nm 前後の波長の光を受光することによって重合収縮を開始する高分子材料であるが、現時点で受光による収縮過程を解析する手法はまだ確立されていない。そこで、本研究では、コンポジットレジンの受光して収縮・硬化する過程をコンポジットレジンの冷却されて収縮・硬化する過程と同等であると見なして、近似的に熱弾塑性有限要素解析を行うこととした。図1は有限要素計算モデルを示す。本研究で用いた計算モデルは、新川らの実験モデル⁽¹⁾をもとに作製されており、中心部がコンポジットレジ、外周部が歯のエナメル、その間が接着剤から構成されている。要素分割には、8 節点 6 面体要素を用いた。エナメルの要素数は約 6800 で、接着剤の要素数は約 400、コンポジットレジンの要素数は約 3600 である。なお接着層はエナメルの一部を用いて作成してある。

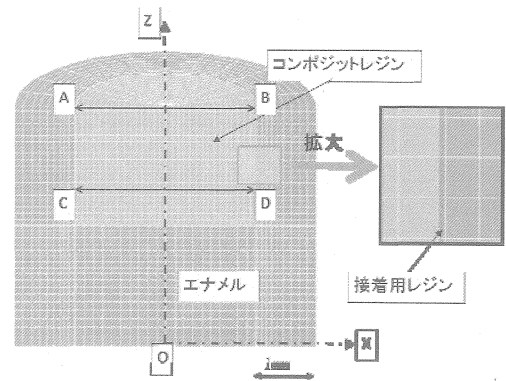


図1 有限要素計算モデル

2.2 有限要素解析の条件

2.2.1 有限要素計算の方法および計算条件 コンポジットレジンの収縮解析は、熱伝導解析と Update Lagrange による大変形弾塑性有限要素法による応力解析を同時に行うことにより行った。表1に有限要素計算に用いたエナメル、接着剤、コンポジットレジンの物性値^{(3), (4)}を示す。

表1 材料物性値

	エナメル	レジ	接着剤
ヤング率(GPa)	84.1	9.00	9.00
降伏強さ(MPa)	364	40.0	40.0
ポアソン比	0.33	0.24	0.25
密度(kg/mm ³)	2.97×10 ⁻⁶	1.60×10 ⁻⁶	1.60×10 ⁻⁶
熱膨張率(1/K)	1.14×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻⁵
熱伝導率(W・K ⁻¹ ・mm ⁻¹)	9.36×10 ⁻⁴	1.37×10 ⁻³	1.37×10 ⁻³
比熱(J・kg ⁻¹ ・K ⁻¹)	1000	1600	1600

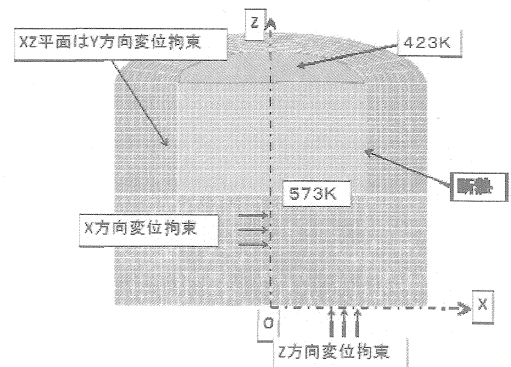


図2 温度条件および境界条件

2. 2. 2 温度の初期条件および境界条件 図2は有限要素計算モデルにおける温度条件および境界条件を示す。エナメルとコンポジットレジン¹⁾の初期温度はともに573Kとした。またエナメルの外側表面の境界条件は断熱とした。

本研究では、コンポジットレジン上面のすべての節点の温度を423Kとすることにより冷却し非定常熱伝導解析を行った。なお、この温度はコンポジットレジン¹⁾の収縮量^{(1),(2)}と熱膨張の関係から決定した。また本研究で用いた計算モデルの場合には、約20秒で温度分布が定常状態になることを確認した。

2. 2. 3 エナメルとコンポジットレジン¹⁾の接着条件 コンポジットレジン¹⁾は、通常、エナメルに接着剤を塗布した後に挿入されている。そのため、接着剤の有無によりコンポジットレジン¹⁾およびエナメル内部の応力状態は異なることが予想される。そこで本研究では、コンポジットレジン¹⁾およびエナメル内部の応力状態に及ぼす接着剤の影響について検討するために、①接着剤を用いた場合を想定して、エナメルと接着剤は常に完全固着とし、コンポジットレジン¹⁾と接着剤の境界条件を固着 (glue 接触) とした解析、②接着剤の接着力が弱い場合を想定して、コンポジットレジン¹⁾と接着剤の接触面における全節点の1/2が固着 (glue 接触) しているとして、接着力を減少させた解析、③接着剤を用いない場合を想定して、コンポジットレジン¹⁾とエナメルの接触面に接着力が無い場合の解析を行った。

3. 計算結果及び考察

図3に新川らの実験によって計測されたコンポジットレジン¹⁾のx方向変位分布と有限要素計算によって得られたx方向変位分布の比較を示す。この図から、コンポジットレジン¹⁾上面のx方向変位は、接着剤との接着界面近傍で最大あるいは最小となり、中心部で零であることがわかる。したがって、コンポジットレジン¹⁾は、受光により中心軸方向に収縮することがわかる。図3(a)より、コンポジットレジン¹⁾と接着剤が部分的に固着している場合は、変位と変位分布はともに実験値とほぼ一致し、完全に固着している場合は、変位は実験値に比べ小さいが、同様な傾向の変位分布を示している。また、図3(b)はコンポジットレジン¹⁾中部(図1に示す計算モデルにおけるCD線上)のx方向変位分布を表している、図3(b)から、完全固着の場合は変位と変位分布はともに実験値と全く異なるが、部分的に固着している場合は変位が少し大きい、同様な傾向の変位分布を示している。接着なしの場合は図3(b)より明らかに実験値と変位分布が異なっている。これらのことから、エナメルとコンポジットレジン¹⁾が部分的に固着している場合にはコンポジットレジン¹⁾の表面および内部のx方向の変位分布が実験値と定性的に一致することが分かる。

図4と図5に接着剤とレジンが完全固着している場合と接着剤とレジンが部分的に固着している場合のコンポジットレジン¹⁾断面の主応力分布をそれぞれ示す。図4より、最大主応力はコンポジットレジン¹⁾下部の外周部ほど高くなっており、特に角部で高い引張応力が生じていることがわかる。したがって、接着剤とコンポジットレジン¹⁾が完全に固着している場合はこの部分から剥離しやすいことが推測される。図5に示すコンポジットレジン¹⁾内部の主応力の値は図4と比較するとかなり低くなっている。ただし、この場合もコンポジットレジン¹⁾下部の角部の接着剤において高い引張応力が生じており、さらにコンポジットレジン¹⁾下部周辺の中心部にも高い応力が生じている。したがって、接着剤は角部から剥離しやすくコンポジットレジン¹⁾下部周辺の中心部には残留応力が残ると推測される。

4. 結言

本研究では光重合型コンポジットレジン¹⁾が収縮する際の応力状態を明らかにすることを目的として、近似的にコンポジットレジン¹⁾の冷却による収縮解析を行い、その応力状態について検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (1)接着剤とコンポジットレジン¹⁾が部分的に固着している場合の計算条件では、コンポジットレジン¹⁾のx方向の変位分布が実験値と手定性的に一致することがわかった。
- (2)接着剤とコンポジットレジン¹⁾が完全あるいは部分的に固着している場合では、コンポジットレジン¹⁾底部の角部に高い引張応力が生じていることがわかった。したがって、この部分で剥離が最も生じやすいと考えられる。
- (3)接着剤とコンポジットレジン¹⁾が部分的に固着している場合では、コンポジットレジン¹⁾下部の中心部に曲げによる残留応力が残ることが考えられる。

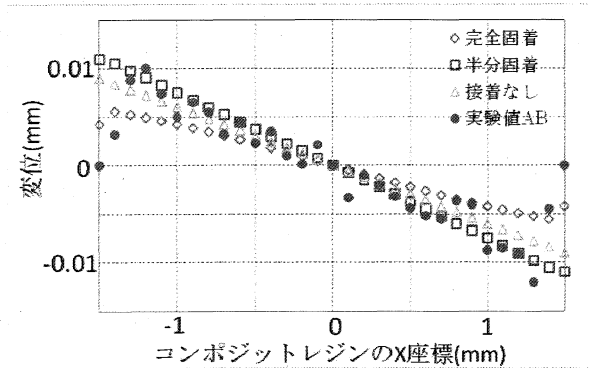
本研究を行うにあたり、卒業研究として協力された宮崎大学学生の山口康弘君に感謝の意を表します。

5. 参考文献

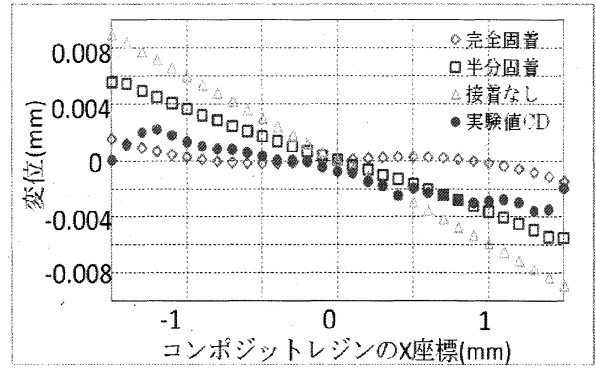
- (1) 古川太一, 新川和夫ら, デジタル画像相関法を用いた光重合型コンポジットレジン¹⁾の収縮変位場評価, 実験力学 Vol.9, 90-95, 2009
- (2) 古川太一, 新川和夫ら, デジタル画像相関法を用いた歯科用補綴材料の収縮変位場評価, 実験力学 Vol.8, 115-120, 2008
- (3) 田上順次, 千田彰ら, 永末書店, 保存修復学 21, 2005, p11
- (4) 日本機械学会編, 伝熱ハンドブック, 1993

6. 研究組織

研究代表者：海津浩一 兵庫県立大学大学院工学研究科教授
 研究協力者：木之下広幸 宮崎大学工学部助教
 河村 隆介 宮崎大学工学部准教授
 新川 和夫 九州大学応用力学研究所教授



(a) 図1中のA-B線上のx方向変位



(b) 図1中のC-D線上のx方向変位

図3 デジタル画像相関法によって得られたコンポジットレジンのx方向変位との比較

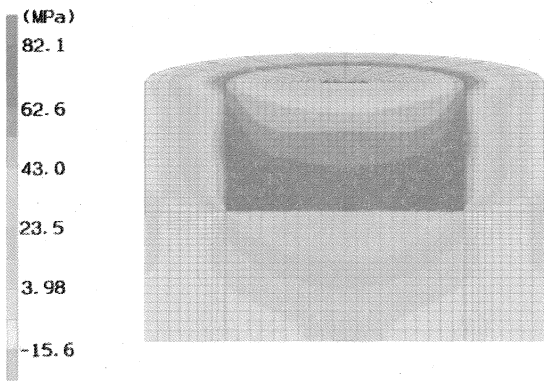


図4 エナメルとコンポジットレジンが完全固着している場合の最大主応力分布

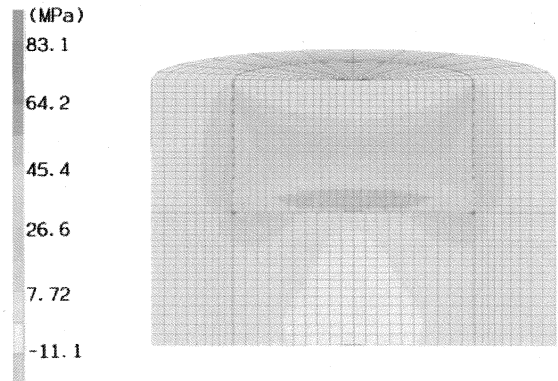


図5 エナメルとコンポジットレジンが部分的に固着している場合の最大主応力分布

カルコパイライト型化合物半導体太陽電池の作製

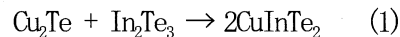
宮崎大学 工学部 電気電子工学科 吉野賢二

1. はじめに

Cu-III-VI₂ 族カルコパイライト型化合物半導体の中でも、CuInTe₂は禁制帯幅1.04 eV を持ち、光吸収係数は10⁵ cm⁻¹ 程度と大きく、容易にP型の伝導型の得られるという特徴をもっており、太陽電池の吸収層として期待されている[1]。CuInTe₂の作製法は、薄膜では蒸着法[2, 3]やPLD (Pulsed Laser Deposition) 法[4]による作製法が報告されている。また、バルク結晶ではブリッジマン法[5]やTHM(Traveling Heater Method)法[6]、CVT(Cheical Vapor Transport)法[1]による作製法が報告されているものの、薄膜、バルク結晶ともにに関する報告例は少ない。そこで、本研究ではホットプレス法によりCuInTe₂バルク結晶の結晶成長を行った。ホットプレス法は低温かつ短時間で結晶成長ができ、真空を必要としないなどの利点がある。これまでにホットプレス法を用いて、AgGaSe₂、AgInS₂、CuInS₂、AgInSe₂バルク結晶を作製・評価してきた [7-10]。

2. 実験方法

粉末二元系材料Cu₂Te (99.9%、高純度化学株式会社)、In₂Te₃ (99.99%、高純度化学株式会社)を用いて、化学量論的組成比になるように混ぜ合わせた。これを原料としてHP法を用いてCuInTe₂バルク結晶を作製した。



また、結晶の評価として、構造特性と結晶化度をX線回折(XRD)法、組成分析を電子プローブマイクロ分析、電気的特性をホール測定により行った。

3. 結果と考察

カーボンダイスの形状より作製した試料は、直径20 mm、厚さは約2 mmの円柱状である。圧力を25MPaとして成長温度を400~700°Cと変化させて作製した。成長時間は1時間である。成長温度400°Cの試料は作製後の研磨において焼結体全体が崩壊していくほど、結晶がもろく、焼結があまり進行していないと思われる。表面の状態については、成長温度400, 500°Cの試料では表面は粗く、光沢が見られなかった。試料の表面、試料を割ったときの試料断面には、加圧焼結の際にできる小さな気孔が肉眼で確認できる程度の大きさで観察された。成長温度600°Cの試料では表面の粗さは改善され、光沢も観察されるようになった。試料内部の気孔は減少し、密になっていた。成長温度650, 700°Cの試料では、試料表面はさらに滑らかになり、光沢も強く観察された。また、成長温度700°Cの試料ではカーボンダイス内で出発原料のIn₂Te₃ (融点667°C)と思われる試料の漏れが観察された。

Fig. 1 に成長温度400~700°Cで作製したサンプルのXRD測定結果を示す。測定結果と一緒にICDDカードも示す。400, 500°Cで作成したサンプルは、CuInTe₂のピークを含んでおらず、Cu₂In₄Te₇のスペクトルが見られた。さらに、400°Cのサンプルには原料であるCu₂Teと一致するスペクトルが観察された。

600~700°CのサンプルでCuInTe₂の単相が得られた。

これらの原因としては、成長温度400°Cで作製したサンプルでは温度が不十分であったため、原料が十分に拡散することなく残ってしまったと思われる。400、500°CのサンプルでCu₂In₄Te₇が得られた原因として、Palatnik等の論文[11]で、Cu₂In₄Te₇はCuInTe₂を昇温させた際CuとInの秩序性が失われることで得られるOVC(Ordered Vacancy Compounds)相であると報告されている。そのような相が今回低い成長温度で得られた原因としては、結晶中での熱の拡散が不十分であったため結晶全体でCuInTe₂を十分に形成することができず、CuとInの秩序が乱れたことによりCu₂In₄Te₇が形成されたと思われる。500°Cで作製したサンプルはCuInTe₂の相を含んでおらず600°Cで作製したサンプルは単相であったことから、500~600°Cの間に異相が減少し、CuInTe₂の成長が促進したと考えられる。

Fig. 2は、CuInTe₂の面方位を基にXRDの測定結果から得られた格子定数をICDDカードと共に載せたものである。成長温度が増加するにしたがい、*a*軸、*c*軸共にCuInTe₂の格子定数の値に近づく傾向を示した。特に600°C付近からICDDカードに近似した値を示した。このことはX線回折の結果同様、成長温度が増加するにしたがい異相が減少し、600°Cから700°CのサンプルでCuInTe₂の単相が得られたことが起因していると思われる。

X線回折の結果からシェラーの式によって求めた粒径は(112)、(204)、(312)面とも全体として成長温度が増加するに伴い増加する傾向を示した。しかし、(112)面の650°Cから700°Cの成長温度の増加では粒径は減少傾向を示した。この原因としてはIn₂Te₃の融点が667°Cであること、Cu₂In₄Te₇への相転移が672°Cであること[11]から、CuInTe₂の成長が減少し、Cu₂In₄Te₇の結晶成長へ相転移し始めたことによると思われる。よってX線回折ではCuInTe₂の(112)とCu₂In₄Te₇の(111)の回折角2θが近似した値であるため、CuInTe₂の成長が減少したと思われる650°Cから700°Cの間で粒径が縮小したと思われる。また、600~650°Cの焼結温度ではCuInTe₂の焼結が促進されたため、温度を増加させることで結晶性が増したことにより粒径が増加したと思われる。

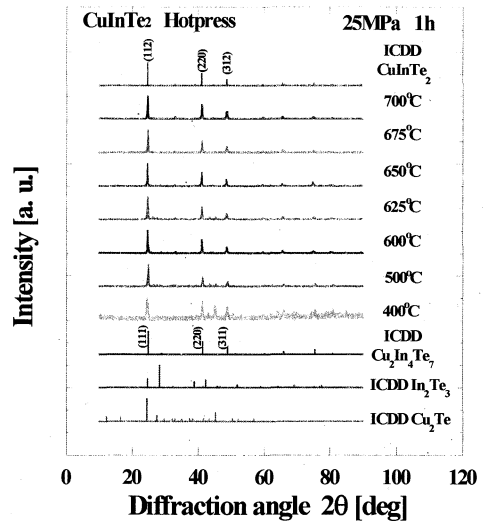


Fig. 1 X線回折パターン

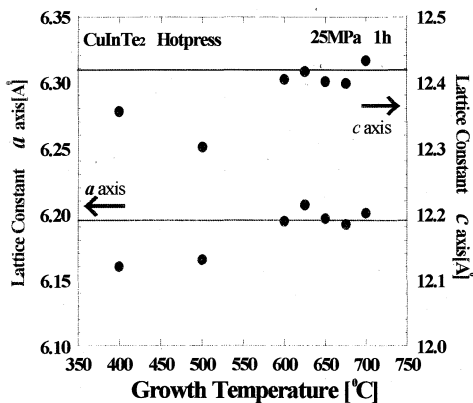


Fig. 2 格子定数

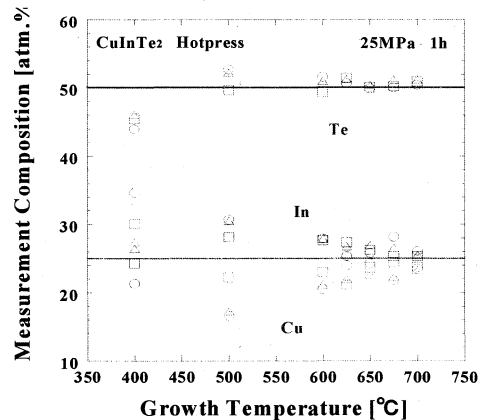


Fig. 3 EPMA 結果

Fig. 3 は作製したサンプルの EPMA の 3 箇所での測定結果を示したものである。400, 500°Cでの測定結果は全ての測定箇所 Cu, In, Te の秩序性が保たれている。650, 700°Cのサンプルの測定では 3 箇所の測定である程度封入量と対応した秩序性が保たれた結果が得られた。また、X線回折の結果から CuInTe_2 の単層が得られたと思われる 600°C以上の成長温度で作製したサンプルで傾向的には Cu-poor In-rich Te-rich の結果が得られた。このことから、点欠陥として Cu 空孔(V_{Cu})、格子間 In(In_i)、格子間 Te(Te_i)、Cu に置換した In(In_{Cu})、Cu に置換した Te(Te_{Cu})などが考えられるが、これらの試料はサーモプローブ測定の結果より P 型であったため、アクセプタ性欠陥として V_{Cu} 、 Te_i がドナー性欠陥より多く含まれたと思われる。また、第一原理計算により Cu-poor の CuInSe_2 、 CuGaSe_2 、 CuAlSe_2 の点欠陥の構成エネルギーを計算するとこれらの化合物では完全結晶よりも V_{Cu} の点欠陥を含んだ方が熱力学的に安定な状態になるため、自然に V_{Cu} は形成されるという報告がある[12, 13]。よって、本研究でもこれらと同様に 600°C以上の成長温度で作成したサンプルでは V_{Cu} が十分に形成されていると思われる。

ホール測定によって求めたキャリア濃度、移動度、抵抗率を Fig. 4 に示す。ホール測定では 400°Cで作製したサンプル以外すべてのサンプルにおいて、金の電極でオーミック特性が得られ、成長温度 500°Cの試料の伝導型は N 型、600~700°Cでの伝導型は P 型となった。

500~600°Cの試料で N 型から P 型に変化した理由としては、X線回折の結果から成長温度の増加により $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Te}_7$ より CuInTe_2 の全体量が上回ったことに原因があると思われる。 $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Te}_7$ は CuInTe_2 に比べ、本来 Cu が入るところに In が入った際に形成されるものだと考えられるので、結晶中でドナー性を示す In_{Cu} が多く形成されたことで N 型が形成され、600°C以上のサンプルでは結晶全体で $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Te}_7$ に比べ CuInTe_2 の割合が増えたため、ドナー性欠陥数が減少しアクセプタ性欠陥数が上回った結果 P 型が得られたと思われる。

キャリア濃度、移動度、抵抗率は、500°Cから 650°Cにおける変化と 650°Cから 700°Cにおける変化に違いが見られる。このことから、温度増加に伴い 650°C付近でドナー性欠陥 In_{Cu} が大幅に減少し、650°C以上ではアクセプタ性の欠陥 V_{Cu} 、 Te_i が増加したと思われる。また Congiu 等の論文[14]によると、室温状態(300K)での CuInTe_2 の移動度は $100 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であり、 $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Te}_7$ の移動度は $0.1 \sim 1 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であるという報告がある。このことから 600°C付近から $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Te}_7$ の成長が徐々に衰退し、 CuInTe_2 の成長が促進されたことが伺える。

ホール測定の結果より最も大きな移動度が得られた 650°Cで結晶成長させたサンプルはキャリア濃度 $2.26 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、移動度 $77.3 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、抵抗率 $3.57 \times 10^3 \text{ } \Omega \text{ cm}$ であった。参考として Prabukanthan 等による論文[1]の CVT 法により作製した CuInTe_2 のバルク単結晶のキャリア濃度、移動度、抵抗率を示すと、キャリア濃度 $2.33 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、移動度 $106 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、抵抗率 $3.00 \times 10^2 \text{ } \Omega \text{ cm}$ であった。参考文献と 650°Cで作製したサンプルを比較してみると、参考文献に比べ今回 650°Cで作製したサンプルのキャリア濃度は高く、移動度は低い。また、抵抗率は低い値をとっている。参考文献に比べ、キャリア濃度が高く、移動度が低くなった原因としては、今回得られたサンプルは多結晶であったため、CVT 法に比べ結晶中に多くの欠陥を含んだことによりキャリアが増加したと考えられる。これによりキャリア濃度が増加し、そのキャリアが散乱機構を示すことで移動度が減少したと思われる。

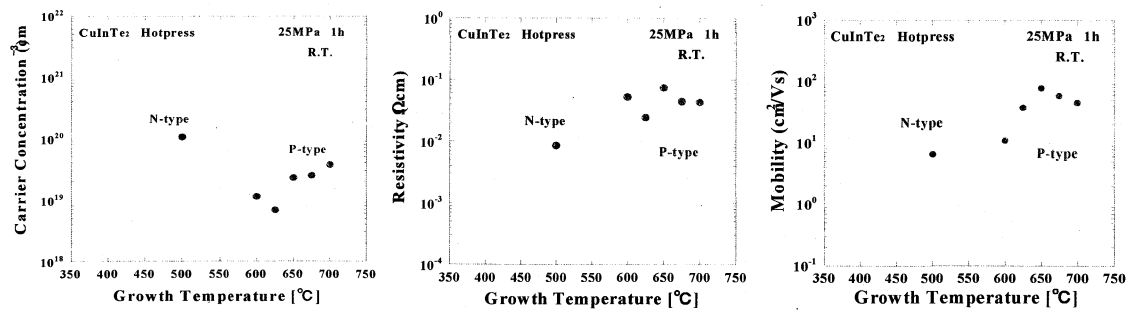


Fig. 4 ホール測定結果

引用文献

- [1] P. Prabukanthan and R. Dhanasekaran, *Mater. Res. Bull.* **43** (2008) 1996.
- [2] V. Nadenau, T. Walter and H. W. Schock, *J. Cryst. Growth* **146** (1999) 251.
- [3] S. Roy, B. Bhattacharjee, S.N. Kundu, S. Chaudhuri and A. K. Pal, *Mater. Chem. and Phys.* **77** (2002) 36
- [4] V. F. Gremenok, I. A. Victorov, I.V. Bodnar, A.E. Hill, R. D. Pilkington, R. D. Tomlinson and M.V. Yakushev, *Mater. Lett.* **35** (1988) 130.
- [5] A. Messous and B. Belhouki, *J. Eng. and Appl. Sci.* **2** (2007) 1403.
- [6] H. Miyake, K. Sugiyama and K. Hiramatsu, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) 54.
- [7] A. Kinoshita, H. Matsuo and K. Yoshino, T. Ikari and K. Kakimoto, *Phys. Stat. Sol. c* **3** (2006) 2093.
- [8] K. Yoshino, H. Komaki, T. Kakeno, Y. Akaki and T. Ikari, *J. Phys. Chem. Solid.* **64** (2003) 1839.
- [9] H. Komaki, K. Yoshino, S. Seto, M. Yoneta, Y. Akaki and T. Ikari, *J. Cryst. Growth* **236** (2002) 253.
- [10] K. Yoshino, A. Kinoshita, Y. Shirahata, M. Oshima, K. Nomoto, T. Yoshitake, S. Ozeki and T. Ikari, *J. Phys.* **100** (2008) 042042.
- [11] L. S. Palatnik and E. I. Rogacheva, *Sov. Phys. Dokl.* **12** (1967) 503.
- [12] S. H. Wei, S. B. Zhang and A. Zunger, *Appl. Phys. Lett.*, **72** (1998) 3199.
- [13] T. Maeda and T. Wada, *J. Phys. Chem. Solids*, **66** (2005) 1924.
- [14] A. Congiu, L. Garbato, P. Manca and S. Serci, *J. Electrochem. Soc.*, **119** (1972) 280.

振動水柱型波力発電装置の波浪中発電特性試験

佐賀大学海洋エネルギー研究センター 永田修一

1. 序論

波エネルギーから電気エネルギーへ変換する波力発電システムとして、数多くの方法が提案されている。なかでも、波エネルギーを空気エネルギーへ変換し、空気エネルギーを電気エネルギーへと変換を行う振動水柱型波力発電装置は大波浪下での安全性も高く、実用化に近い。本研究は振動水柱型波力発電装置の一種である「後ろ曲げダクトブイ」(Backward Bend Duct Buoy: 以後 BBDB)について研究したものである。BBDB の特徴として、浮体と水室内の水柱の共振時に空気圧力が非常に高くなること、装置自体が小型で浅い海でも使用可能である、波浪中で波の入射方向に微速前進することが挙げられる。

平成 21 年度までに九州大学応用力学研究所で実施した実験などで、全長 0.85m の小型 BBDB(Small BBDB:以後 S.B.)での 2 次元実験および 3 次元実験で、2 次元の場合は 70%、3 次元の場合はほぼ 100%の一次変換効率が得られることが明らかになった(Fig.1 参照)。

そこで本研究では、装置寸法を拡大した模型について、装置の大きさによる効率への影響を明らかにすること、および、タービンによる発電を行い BBDB の総合変換効率特性を明らかにすることを目的として研究を行った。

2. 実験方法

本研究で用いた BBDB 供試体は、外形寸法に関して S.B.を長さ比で約 3 倍(全長 2.5m)としたものである(Fig.2 参照)。また、慣性モーメントに関して、S.B.の慣性モーメントを 3⁵ 倍とした標準慣性モーメントモデル(Middle BBDB Standard Inertia model:以後 M.B.S.I.)、および S.B.の慣性モーメントを 3⁵×044 倍した縮減慣性モーメントモデル (Middle BBDB Compressed Inertia model :以後 M.B.C.I.)の2種類である。実験は、九州大学応用力学研究所蔵の深海水槽において、波周期 T=2.0~3.0(sec)の規則波中応答試験を実施し、異なる3種類の発電機負荷抵抗値に関して入射波高、内部波高、内部圧力、浮体運動、発電機出力を計測した。得られた計測値から、一次変換効率特性および総合変換効率特性を求めた。実験装置とその配置を Fig.3 に示す。

3. 実験結果及び考察

Fig.4 に M.B.C.I.および M.B.S.I.の一次変換効率を示す。横軸は入射波の波長 λ を BBDB 模型の長さ L で除した無次元値である。また、S.B.の 2 次元および 3 次元の効率もプロットしている。Fig.4 において、M.B.C.I.の一次変換効率は S.B.の 3 次元一次変換効率と比較して、ピーク値で 40%程度に低下している。しかし、M.B.S.I.の効率は S.B.の 2 次元一次変換効率と同程度、3 次元一次変換効率の 70%程度である。このことから、高い一次変換効率性能を有する BBDB の設計には、長さ比に応じた適切な慣性モーメントとすることが重要であると考えられる。

Fig.5 は M.B.C.I.と M.B.S.I.の総合変換効率である。 $\lambda/L=3.5$ の時、M.B.S.I.で最大 50%の効率を得た。しかしながら、最大効率を発生する波長域は非常に狭いため、今後は高効率の波長域を拡幅する必要があると考えられる。

4. 結論

浮体の大きさを変更に関して、慣性モーメントを長さ比の 5 乗倍とすることで、小型 BBDB と同程度の高い一次変換効率を得られる。タービンを用いて BBDB の総合変換効率特性を求め、最大で 50%の変換効率を得た。

5. 成果報告

永田修一、豊田和隆、今井康貴、瀬戸口俊明、高尾学、池上国広、林 昌奎、胡 長洪;後ろ曲げダクトブイ方波力発電装置の発電特性,第 22 回海洋工学シンポジウム

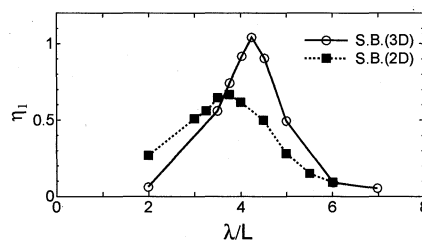


Fig.1: Primary conversion efficiency of Small BBDB(2D,3D)

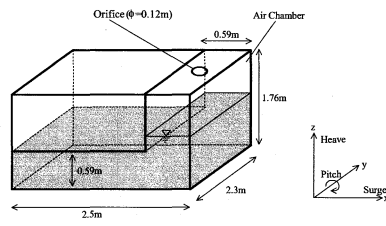


Fig.2: Middle BBDB Model

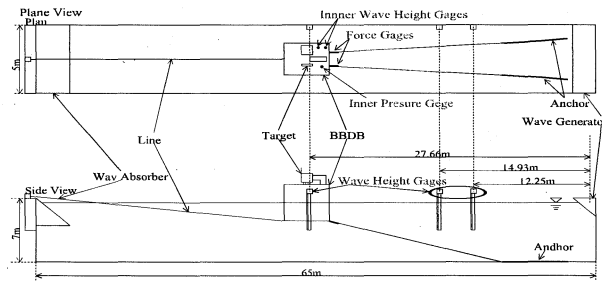


Fig.3: Arrangements of Experimental Equipment

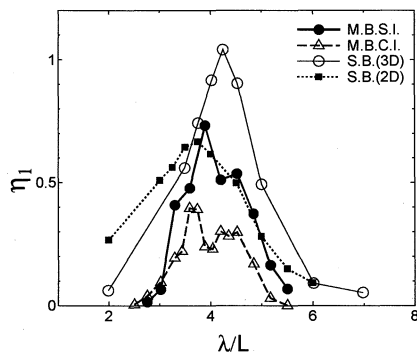


Fig.4: Primary conversion efficiency

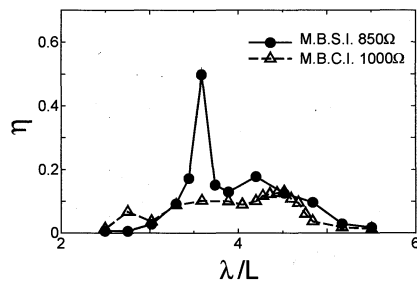


Fig.5: Total conversion efficiency

高効率大量輸送のための特殊航空機に関する研究

広島大学大学院工学研究院
教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

地面効果翼機 WIG(Wing In Ground effect) とは、翼が地表に近づいた際に揚抗比が大きくなる地面効果を利用した特殊航空機で、将来の高速海上輸送機関の候補として期待されている。2002-2005 年度、広島大学と鳥取大学・東京大学間では、特に波浪中での耐航性能向上を目指し、前翼式 WIG を提案して基礎研究を行ってきた。最終的にはラジコン模型による自航試験を行い、地面効果内での安定飛行を確認している。続いて、より実機を想定した新型の前翼式 WIG の自航試験用 RC 模型の設計・製作をし、風洞試験を通して全機空力特性が確認できている。この RC 模型について、昨年度製作したものと比べより大きな揚抗比を得ることを目的とした新型 RC 模型を設計し、製作したところ 20% 向上することが出来た。

本研究では、新たに製作した RC 模型について、巡航時を模擬した風洞試験を行うことにより、全機空力特性を把握するとともに、主翼単独、胴体単独の模型についても風洞試験を実施し、主翼単体と胴体単体でそれぞれの空力特性の確認を行う。また、前翼母翼迎角が全機空力特性に及ぼす影響を確認し、最適な前翼母翼迎角を決定した上で昨年度の機体との空力特性の比較も行う。

2. 研究方法

以下に示す手順により研究を遂行する。

- (1) 地面効果翼機の風洞試験の問題点の一つである境界層の影響を低減するため、供試模型の下に新たに板を設け、数値計算と実測によって境界層厚さを確認する。
- (2) 地球大気動態シミュレーション装置内に、主翼単独模型を設置し、巡航時を模擬した風速 $U=20\text{m/s}$ における風洞試験を行い、主翼単体の空力特性を確認する。
- (3) 同様に、胴体単独模型を設置し、巡航時を模擬した風速 $U=20\text{m/s}$ における風洞試験を行い、胴体単体の空力特性を確認する。
- (4) 同様に全機模型についても実験を行う。前翼母翼迎角を変化させて前翼と主翼の揚力分担比が 1:9 となるような前翼迎角を決定する。
- (5) 先に決定した前翼迎角に合わせた状態で推進器及び前翼に装備されるエレベーターを稼働させてのパワー付き風洞試験を行い、推進器やエレベーターが全機空力特性に及ぼす影響について確認する。
- (5) 一連の研究を総括する。

3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った。

氏名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究院エネルギー・環境部門	教授	代表者
勝田 貴志	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	博士課程3年	実験補助
谷口 弘樹	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
田辺 晃弥	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
澤田 俊紀	広島大学第四類地球環境工学課程	4年	実験補助
池田 浩基	広島大学第四類地球環境工学課程	4年	実験補助
大屋裕二	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

4. 研究結果

4.1 境界層対策

風洞試験における問題点の一つに境界層がある。特に地表付近を飛行するWIGにとっては、実験における境界層の排除は非常に重要である。そこで模型の下に板を設け底上げすることで、風洞噴出し口から発達する境界層を板の前縁から新たに再発達させて、模型付近での境界層の低減を図っている。板の形状については数値計算をベースに検討を重ね、Fig.1のような板を製作し、実験状況下において風速分布を板の前縁 (point-1)、模型設置位置 (point-2)、板の中心 (point-3)、板の後縁 (point-4) の4点で計測した結果、境界層厚さは最も影響を受けるとされる主翼後縁付近の point-3 で境界層厚さは 50mm 程度となり、2009 年度に比べて、25mm 程度厚くなっている。これは、実験時に模型の上流側に設置されていた風車のかく乱体が影響したものであると思われる。したがって、今回の実験においては残念ながら実験結果に境界層による影響が混入してくるものと推測される。

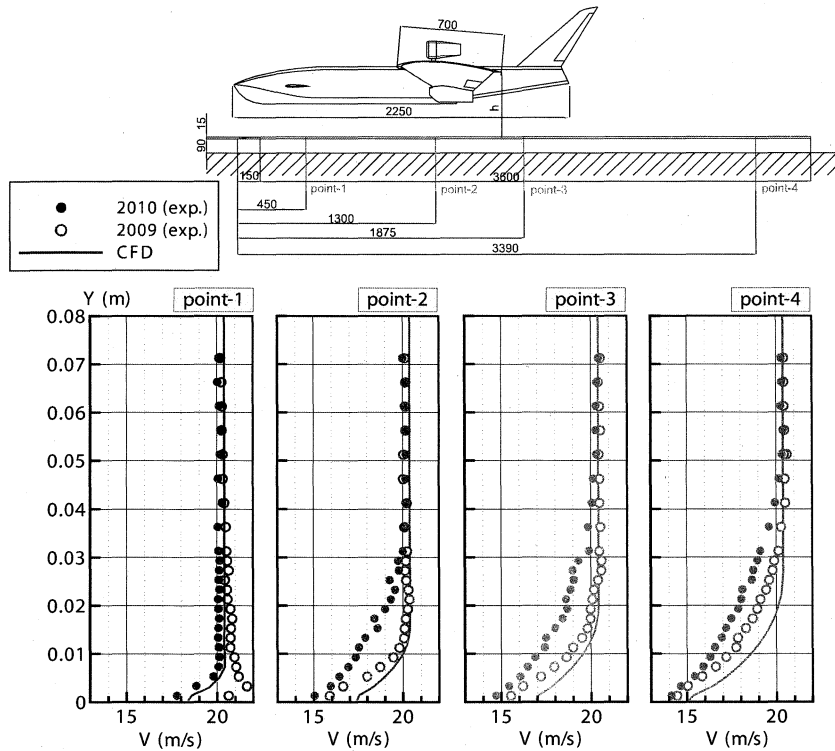


Fig.1 流速分布

4.2 供試模型

本研究で対象とした WIG の全機ラジコン模型 (Fig.2) と主翼単独模型 (Fig.3) を下に示す。このラジコン模型の各翼にはフラップが装備されており、無線で各操舵翼と推進器を稼動することができるようになっている。

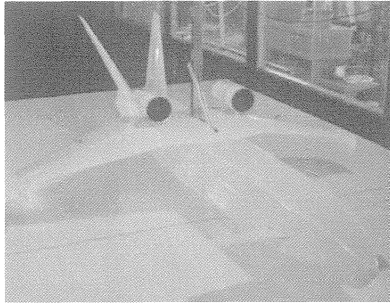


Fig.2 全機ラジコン模型

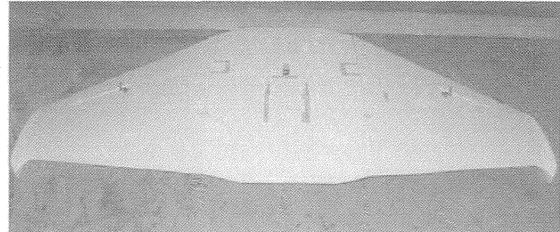


Fig.3 主翼単独模型

4.4 実験条件

Fig.4 に全機模型の実験装置図を示す。主翼単独模型と胴体単独模型についても同様の実験装置に模型を設置して実験を行った。本研究では主翼単体・胴体単体・全機模型の空力特性の把握、そして前翼母翼迎角・推進器・エレベーターによる影響の確認をするため、以下のような実験項目について抗力、揚力、モーメントの計測を行った。風洞風速は実際の巡航時を想定した 20m/s である。

- 主翼単独模型
 - 飛行高度 h/c 、主翼迎角 α を変化させての計測。
- 胴体単独模型
 - 飛行高度 h/c 、機体迎角 α_B を変化させての計測。
- 全機模型
 - (1) 飛行高度 h/c 、機体迎角 α_B を変化させての計測。
 - (2) 前翼母翼迎角 α_f を変化させての計測。
 - (3) 前翼母翼迎角 α_f を 8degs. に固定した状態で、各飛行高度 h/c ・機体迎角 α_B についてエレベーター操舵角 δ_f を変化させての計測。
 - (4) 推進器を稼動させた状態で (1)、(2) と同様の計測。

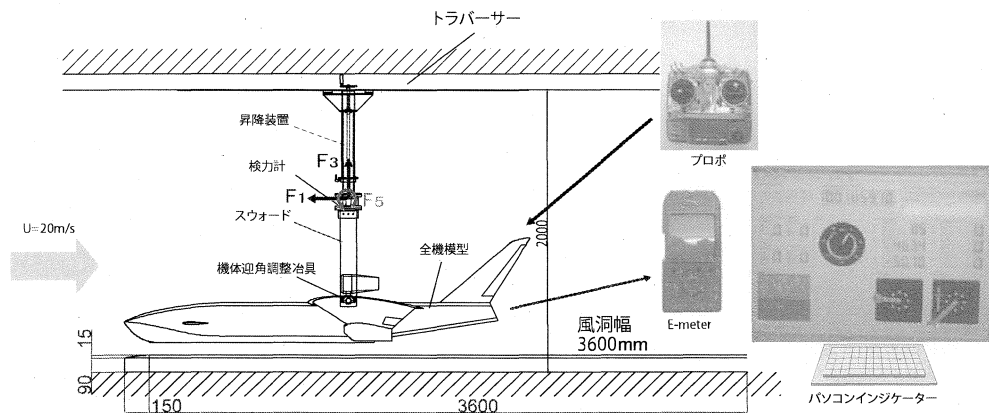


Fig.4 模型実験装置図

4.5 主翼単独模型実験結果

主翼単独模型の結果を Fig.5 に示す。Fig.5 は横軸に飛行高度 h/c 、縦軸に各係数を取り、各主翼迎角ごとの実験結果をプロットで、ポテンシャル理論に基づく数値計算結果を曲線で示している。圧力中心係数 C_p は模型全体に作用する空力モーメントがゼロとなる位置で、主翼単独模型では主翼前縁から後縁までの距離を 1 としたときの主翼前縁からの位置を割合で表している。また、全機模型では前翼前縁から主翼後縁までの距離を 1 として前翼前縁からの位置を表している。

揚力係数の値は実験結果と理論計算結果に差異が見られるが、これは境界層の影響によるものと思われる。今回行った境界層板の実験において、理論計算結果と実験で得られた結果との間に境界層の厚み 20mm 程度の差異が確認できた。このため主翼翼端付近が境界層の内部に含まれていた可能性があり、これが影響して実験値と理論値に違いが出たのではないかと考えられる。また、理論計算における抗力係数は粘性を考慮していないため、2009 年度の実験結果から算出した単位面積あたりの摩擦抗力係数に今回の主翼表面積をかけたものを足し合わせて理論値としている。グラフから理論値と実験値は概ね一致していることが確認できる。また、飛行高度が小さくなるにつれて揚抗比が大きくなっていることより、主翼単独での地面効果を明瞭に確認することができる。

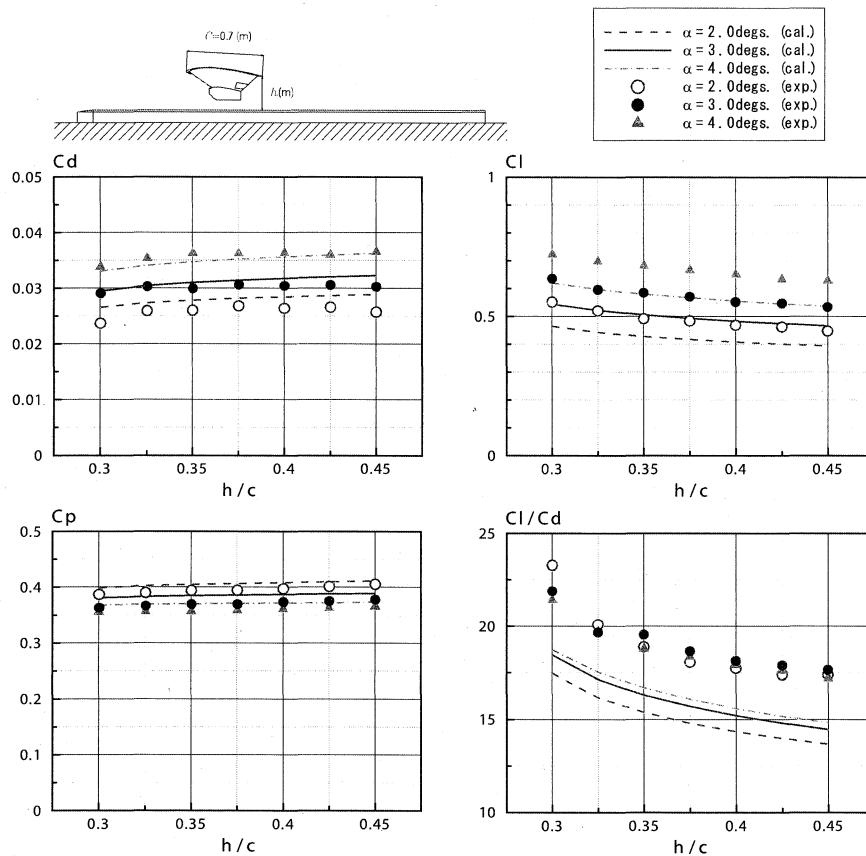
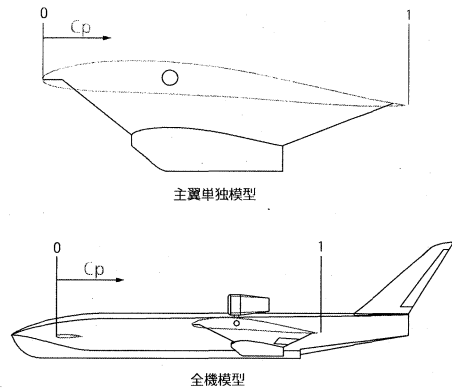


Fig.5 主翼単独空力特性

4.6 圧力中心係数比較

Fig.6は横軸に境界層対策用板から翼端版下面までの高さ h をとり、圧力中心係数を2009年度の主翼単独模型と比較したものである。グラフから飛行高度の変化による圧力中心係数の変化量は昨年度と比べて大きくなっており、今年の機体は h が7.4mmから112.4mmに変化するとき、 C_p は4.2%後方へと移動することがわかる。これはコード長700mmの模型において10.6mmの移動量に相当するものである。これは、主翼翼型をS字翼から通常翼に変更したことが原因と考えられる。

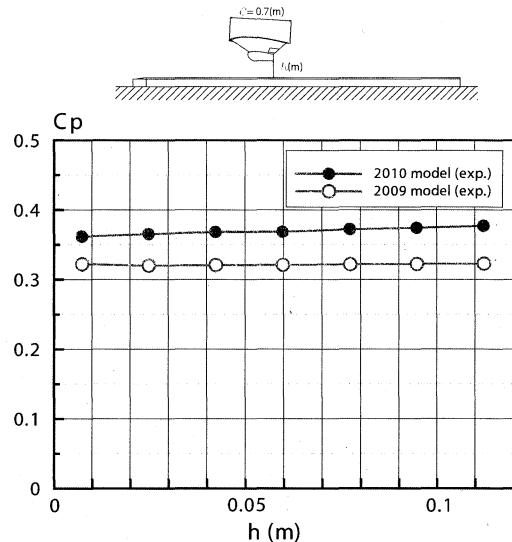


Fig.6 圧力中心係数比較

4.6 全機 RC 模型の実験結果

Fig.7に機体トリム角 $\alpha_B=0\text{deg}$ 、前翼母翼迎角 $\alpha_f=0\text{deg}$ における飛行高度変化による各係数を示す。全機模型においても飛行高度が小さくなるにつれて揚抗比が大きくなっていることより、地面効果を明瞭に確認することができる。圧力中心係数は飛行高度 h/c が0.325から0.475に変化するとき2.1%後方へと移動することがわかる。これは20.8mmの移動量に相当する。飛行高度変化による抗力係数の変化は小さく、抗力係数 C_d は0.37程度を示している。全機が受ける抗力係数の多くは胴体受ける抗力係数によるものと考えられるため、本年度は胴体単独での風洞試験を行った。

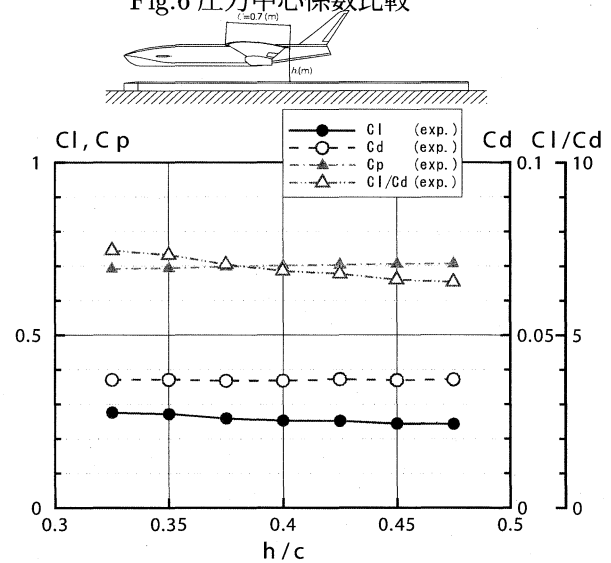


Fig.7 全機 RC 模型空力性能 ($\alpha_f=0\text{deg}$)

4.6 胴体単独模型の実験結果

Fig.8に横軸に飛行高度をとり、揚力 L 、抗力 D を主翼を除いた胴体単独模型と全機体において比較したものを示す。胴体の抗力が全機の抗力の67%と大きな割合を占めていることが分かった。そのため胴体形状を縮小する、流線型にする、垂直尾翼を1枚にする等の設計変更を検討する必要があると思われる。また、揚力の99.9%が主翼から、0.1%を胴体から発生していることが確認できる。

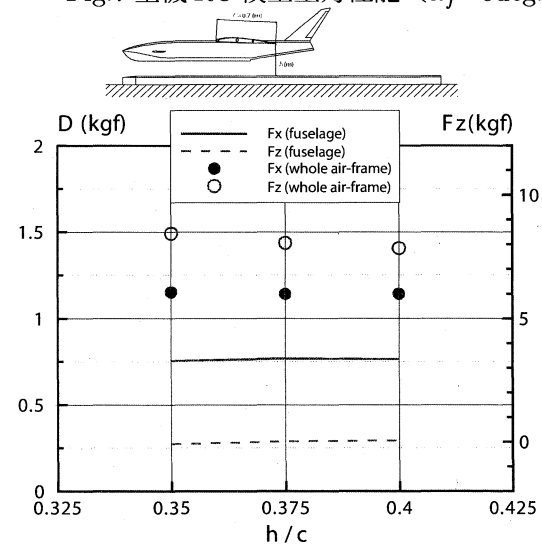


Fig.8 胴体単独空力特性

4.7 前翼母翼迎角が全機空力に及ぼす影響

次に前翼母翼迎角の変化による全機空力への影響を考察する。過去の経験から前翼と主翼の揚力分担比が1:9となる時、機体の縦運動が安定する事が分かっている。つまり、圧力中心まわりのモーメントを考えると、前翼の作用点から主翼の作用点までの距離を9:1に内分する点に圧力中心が位置する時、機体は縦安定を保って自由飛行できる。このときの圧力中心係数を求めると $C_p = 0.63$ となる。

Fig.9 に $h/c=0.375$ 、機体迎角 $\alpha_B=0\text{deg.}$ における前翼母翼迎角 α_f と各係数の関係を示す。迎角をつけることによって揚力が上昇していることが確認できる。圧力中心係数 C_p が0.63となるのは前翼母翼迎角 $\alpha_f=8\text{degs.}$ のときであることが分かる。以降の実験は前翼迎角を8degs.に固定して行う。

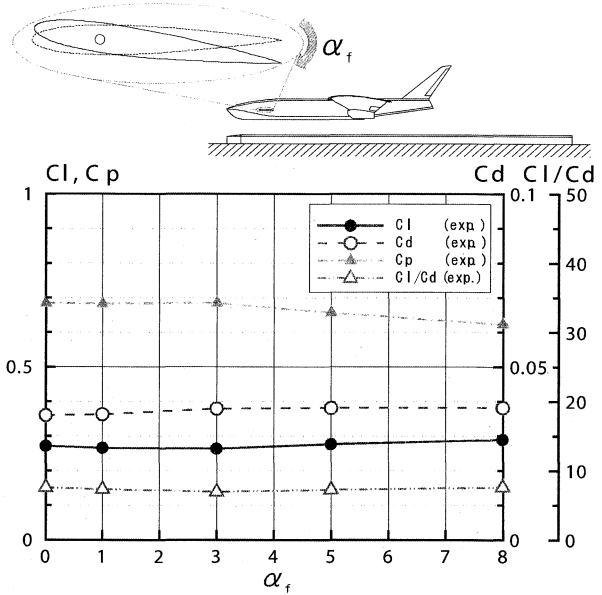


Fig.9 前翼母翼迎角による影響

4.8 全機 RC 模型の空力性能

Fig.10 に全機 RC 模型（機体迎角 $\alpha_B=0\text{deg.}$ 、前翼母翼迎角 $\alpha_f=8\text{degs.}$ 、エレベーター角 $\delta_f=0\text{deg.}$ ）の飛行高度 h/c が変化するときにおける各空力係数の結果を示す。プロットが実験値、曲線が理論計算値を表している。抗力係数 C_d 、圧力中心係数 C_p の実験値は理論計算値と概ね一致しているが、揚力係数 C_l については差が見られる。これは主翼単独模型と同じ主翼を用いているためであると思われる。

Fig.11 に機体迎角 $\alpha_B=0\text{deg.}$ において横軸に境界層対策用板から翼端版下面までの距離 h をとり、各空力係数と揚抗比を2009年度機と比較したものを示す。2009年度機と比べると、2010年度機は揚力係数 C_l は30%程度増加し、抗力係数 C_d は17%程度増加した。これは揚力増加に伴う誘導抗力の増加に起因するものと考えられる。結果、揚抗比は20%程度向上していることを確認した。圧力中心係数の変化量は h が49mmから119mmに変化するとき、2009年度機は0.0063であり、これは9.15mmの移動量に相当する。また2010年度機は0.0055であり、これは7.98mmに相当する。したがって飛行高度の変化による C_p 変化量は2009年度機と2010年度機を比べると同程度であることから、全機体において主翼翼型の変更による影響がないことを確認した。

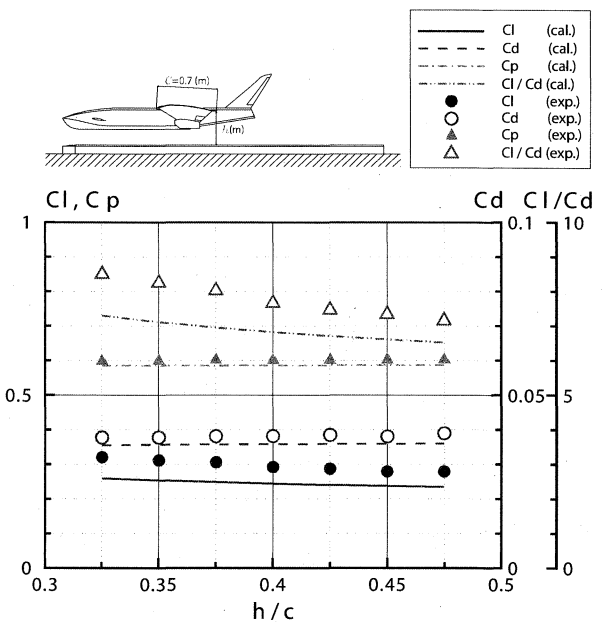


Fig.10 全機空力特性

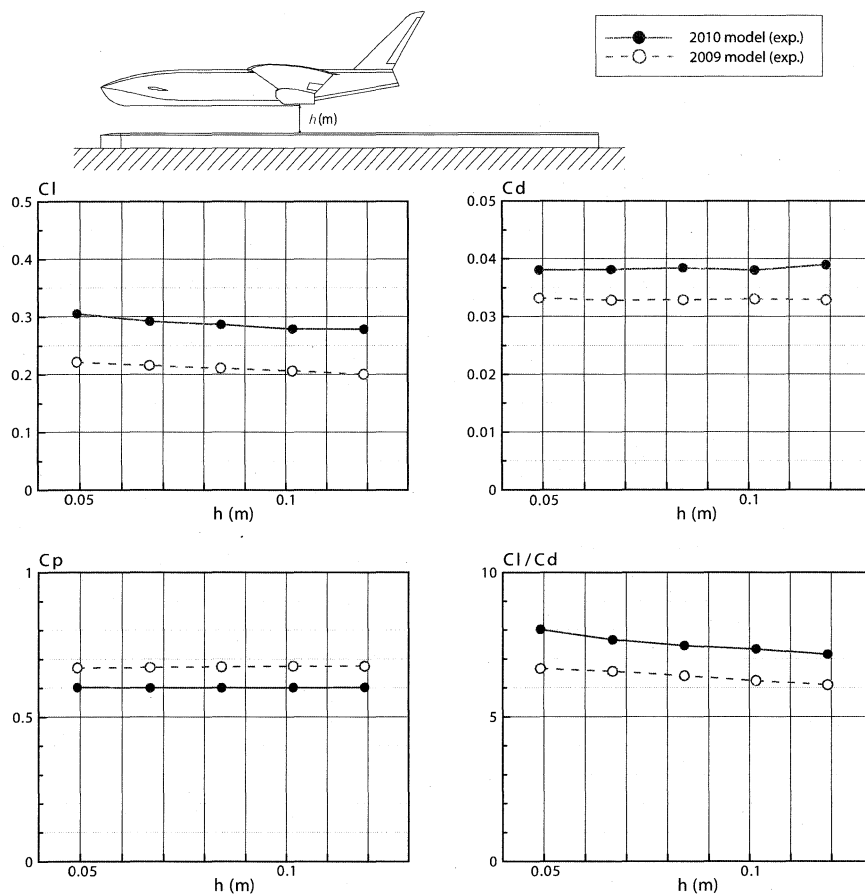


Fig.11 全機空力特性比較

4.9 推進器による影響

次に推進器が全機空力特性に及ぼす影響について考察する。推進器は2009年度と同じものを搭載する。Fig.12は2009年度に行った推進器単独試験による結果であり、各速度 U において横軸に回転数 n をとり、推進器1機が発生する推力 T を示す。巡航時の条件 ($h/c=0.375$ 、 $U=20\text{m/s}$ 、 $\alpha_f=8\text{degs}$ 、 $\delta_f=0\text{deg}$.) における抗力は 1.18kgf であり、抗力をキャンセルする推力を推進器2機で得るためには1機あたり 0.59kgf の推力が必要となる。そこで、巡航速度 $U=20\text{m/s}$ (75km/h) において 0.59kgf の推力を得るため、巡航時の回転数 n を 20000rpm に決定した。

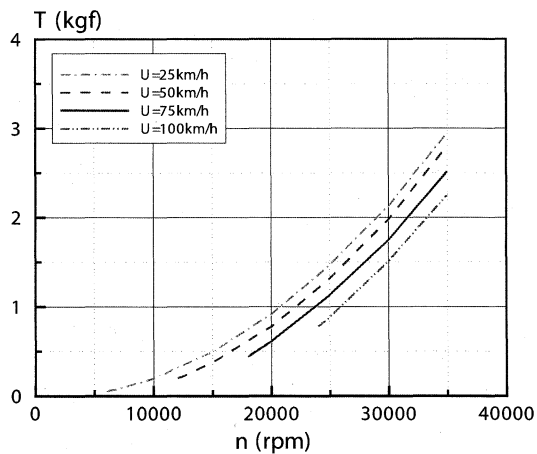


Fig.12 推進器単独性能

Fig.13 は横軸にエレベーター角 δ_f をとり、縦軸に推進器を稼動した場合と稼動していない場合それぞれの揚力係数 C_l と圧力中心係数 C_p を比較したものである。エレベーターを下げると揚力は増加し、機首上げモーメントが働き圧力中心が機体前方へ移動する。エレベーターを上げると揚力は減少し、機首下げモーメントが働き圧力中心が機体後方へ移動する。これらから操舵翼としての特性が確認される。また、推進器の影響によって圧力中心は後方に移動している。その変化量は小さく、推力の調整や操舵翼による制御で機体安定性を保つことができると思われる。揚力係数については推進器を稼動させた場合の方が大きくなっていることが分かる。

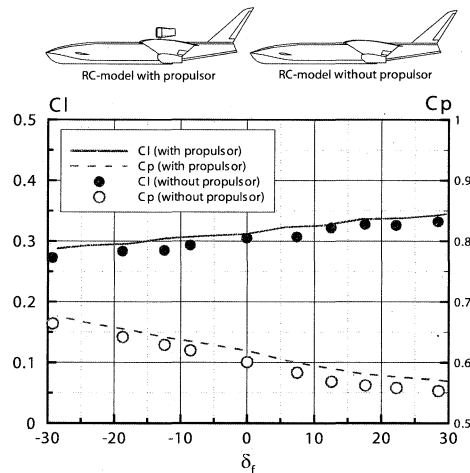


Fig.13 エレベーター操舵による空力特性

4.10 主翼と前翼の揚力分担考察

過去の実験で推進器の高速な噴流が垂直尾翼の外側を流れることで、尾翼の外側に負圧が発生し、下向きの揚力が発生することが経験上分かっている。そこで今回の機体についても推進器の尾翼への影響を確認するため、Fig.14のように推進器を搭載しない場合と推進器を搭載して稼動させる場合について、実験で得られた揚力が各翼の圧力中心からのみ発生していると仮定し、モーメントと力の釣り合い式から各翼が生じる揚力を算出してみた。

計算を行うにあたり、推進器を搭載していない場合は抗力が働いていないことを前提とし、推進器を搭載し稼動させている場合は抗力を打ち消すだけの推力を発生している。また、推進器より上流側にある前翼への推進器による影響はないと仮定した上で、算出された各翼に作用する揚力を Fig.15 に示す。その結果、推進器を搭載し稼動させることで主翼の揚力は約 4.7% 増加し、尾翼には下向きに 0.17kgf の揚力が生じることが分かった。主翼の揚力増加は、主翼上にマウントされた推進器のインレットへの吸気効果によると思われる。尾翼からの下向きの揚力は、推進器の高速噴流が V-tail の横を通り過ぎることにより圧力が低下することによるものである。この尾翼から生じる下向きの揚力による機首上げモーメントが、推進器による機首下げモーメントを低減させているという構造になっており、飛行安定性の観点から V-tail の役割が重要であることがわかる。

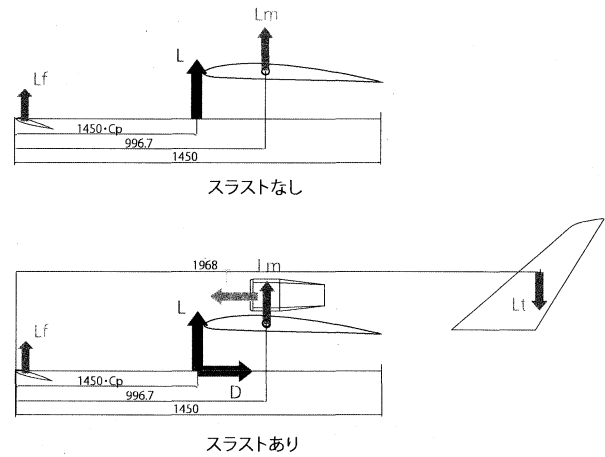


Fig.14 揚力分担

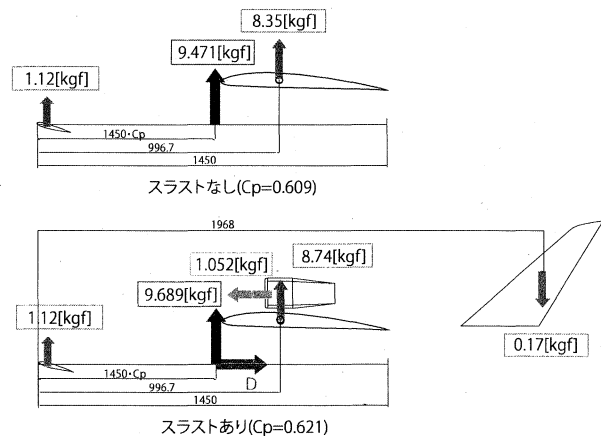


Fig.15 揚力分担結果

5. まとめ

本研究では、2009 年度に製作された新型前翼式地面効果翼機の自航試験用ラジコン模型をベースに、全機空力性能を図り、主翼翼型、主翼マウント位置等の設計を変更し製作した。製作した模型について風洞試験を実施することにより、定常空力特性の把握をするとともに、供試模型に装備されるエレベーターの操舵や推進器の稼動が全機空力特性に及ぼす影響について確認した。本研究の成果を以下に示す。

- (1) 主翼単独模型について空力特性の計測とポテンシャル理論に基づく数値計算を行った。揚力係数の値は実験結果と理論計算結果に差が見られ、境界層の影響によるものと思われる。飛行高度が小さいほど揚力は増大しており、地面効果を確認した。また、揚抗比は巡航高度である $h/c = 0.375$ 付近において、全機模型における設定迎角である 3degs. のときに最大となることを確認した。
- (2) 主翼翼型の変更に伴い主翼単独模型試験において飛行高度による圧力中心の移動がみられたが、全機模型試験においてその影響はないことが分かった。
- (3) 前翼の母翼迎角を 8degs. に設定することで、前翼と主翼の揚力分担比 1 : 9 を達成できることが分かった。
- (4) 全機 RC 模型について空力特性の計測とポテンシャル理論に基づく数値計算を実施した。計測の結果、揚力係数 C_l は 30% 程度増加し、抗力係数 C_d は 17% 程度増加した。これは揚力増加に伴う誘導抗力の増加に起因するものと考えられる。揚抗比としては、20% 程度向上していることを確認した。
- (5) 全機 RC 模型について推進器が空力特性に及ぼす影響を検証した。推進器を搭載し稼動させることで主翼の揚力は約 4.7% 増加し、推進器からの噴流の影響で V-tail が下向きの揚力を発生し、推進器により誘起される機首下げモーメントを低減する効果があることを確認した。

低周速比水平軸型風力タービンの空力特性に関する研究

広島大学大学院工学研究院
教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

地球温暖化対策の一つとして化石燃料に変わる新エネルギーの開発が展開されている。自然エネルギー利用機器もその一つであり、大型、小型風力タービン等多くの研究開発が行われている。本研究では、分散型発電機器として水平軸型風力タービンを取り上げ、特に騒音対策の一つとして考えられる低周速比で最適設計されたローターの空気力学的な特性を風洞試験を通じて明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

まず、風速 10.0m/s, ローター直径 2.0m, 周速比 $\lambda=4.0$ の条件で、ローターブレードの最適設計を行う。最適設計においては、低負荷プロペラ理論として使用されている翼素運動量理論と 3次元境界要素法を用いる。次に得られたローターブレードを CFRP を用いて軽量に製作し、風洞を用いて空力特性について計測を行う。小型風力タービンについては、過去に過回転防止機構を開発していることから、この新ローターについてもその適用を考え、そのために必要となる様々なブレード取り付け角度に対する空力データを取得する。最後に、得られた空力データを基に研究を総括する。

3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った。

氏名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究院エネルギー・環境部門	教授	代表者
勝田 貴志	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	博士課程 3年	実験補助
谷口 弘樹	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士 1年	実験補助
田辺 晃弥	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士 1年	実験補助
大屋裕二	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

4. 研究結果

4.1 実験装置概略

Fig.1 に実験装置の概略図を示す。風洞の吹き出し口には風速計が設置されており、ここで風速 U (m/s) を計測する。また、コントローラーでローターの回転数 n (rps) を制御し、AD 変換ボードを通じて風速 U (m/s), 回転数 n (rps), スラスト T (kgf), トルク Q (kgf·m) を PC にデジタルデータとして得る。発電量 P (W) についてはこれらのデータから算出する。また、Table.1 にブレードの諸元を示す。

Table 1: ブレード諸元

半径	1.03 (m)
重量	1275.0 (g)
重心位置	350 (mm)

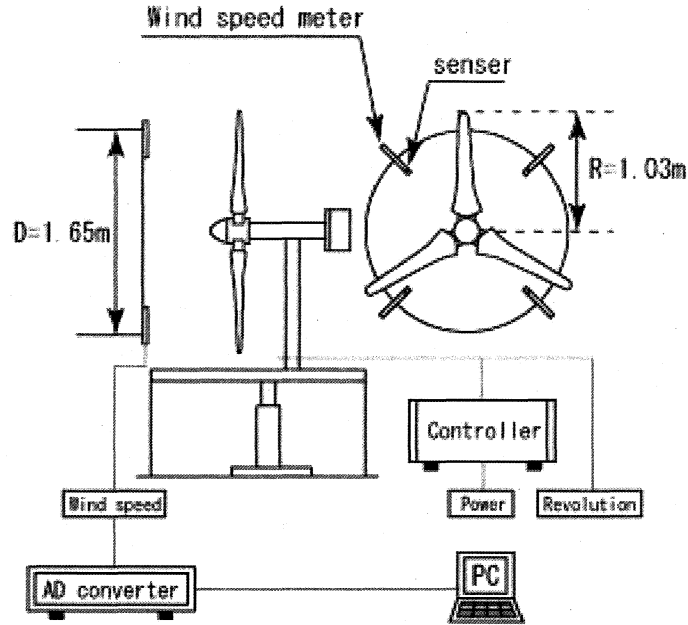


Fig.1: 実験装置概略

4.2 実験項目

主な実験項目は以下の二つである。

- (1) 風速 5.2m/s の条件のもと、ブレードの取付け角度 -15.0~3.0degs. について回転数を変えてスラスト・トルクの計測を行う。取付け角度ごとにパワーカーブを得る。
- (2) 風速 6.2 m/s の条件のもと、ブレードの取付け角度 0.0, 3.0degs. について (1) と同様にスラスト・トルクを計測する。(1) の結果と比較して粘性影響を確認する。

Table.2 に実施した実験の計測条件を示す。(1) は風速 5.2 m/s の条件のもと、ブレードの取り付け角度の違いによる風車性能の影響を確認するための条件であり、(2) は風速 6.2 m/s に変えて、(1) との比較により粘性影響を確認するための条件である。

Table 2: 実験条件

	風速 U (m/s)	取付け角度 (degs.)	回転数 n (rps)
(1)	5.2	3.0	0.0~8.5
		0.0	0.0~8.5
		-3.0	0.0~8.5
		-6.0	0.0~8.5
		-9.0	0.0~8.5
		-10.5	0.0~8.5
		-12.0	0.0~8.5
		-15.0	0.0~7.0
(2)	6.2	0.0	0.0~8.5
		3.0	0.0~8.5

4.3 実験結果

各実験の計測結果のグラフを以下に示す。

Fig.2は風速 $U=5.2\text{m/s}$ における取付け角度の違いによるパワーカーブの比較, Fig.3は風速 $U=5.2\text{m/s}$ における取付け角度の違いによるスラスト係数の比較, Fig.4は風速 U の違いによるパワーカーブの比較, Fig.5は風速 U の違いによるスラスト係数の比較を表す。

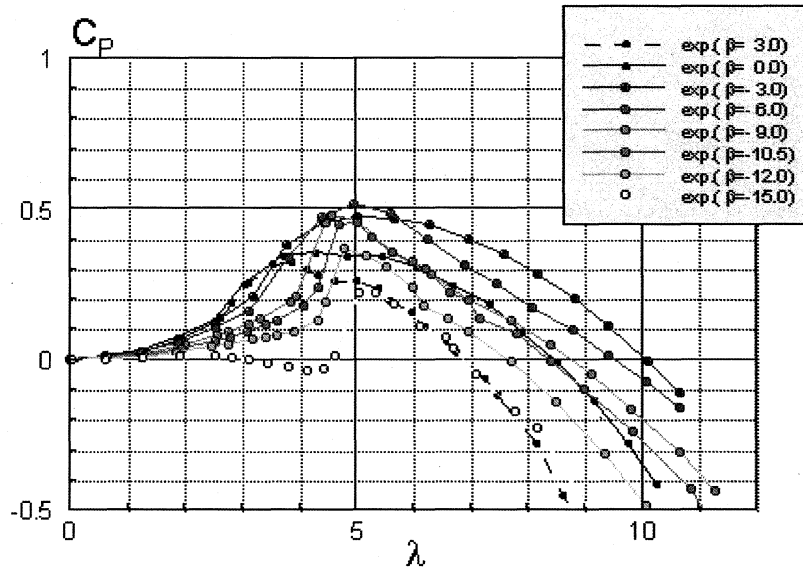


Fig.2: パワーカーブ ($U=5.2\text{m/s}$)

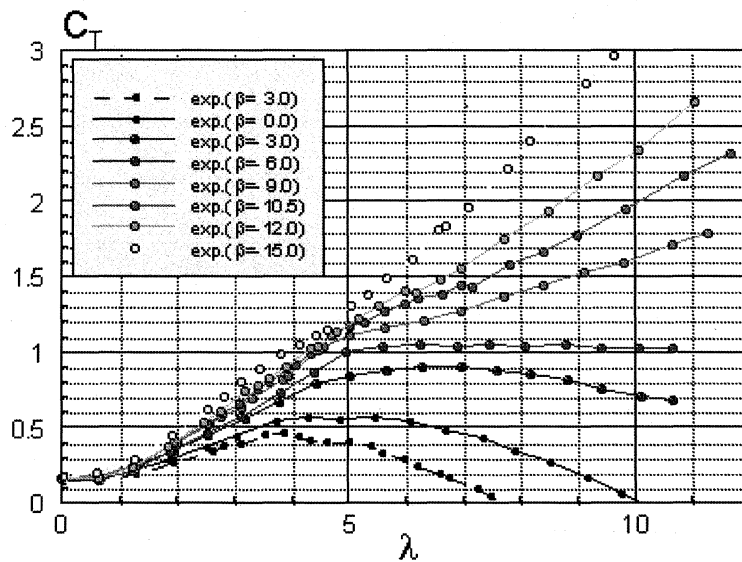


Fig.3: スラスト係数 ($U=5.2\text{m/s}$)

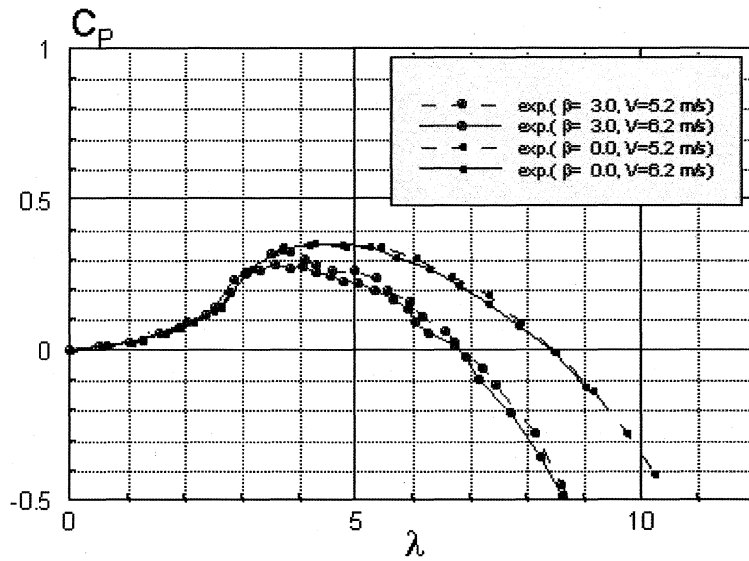


Fig.4: 風速の違いによるパワーカーブの影響

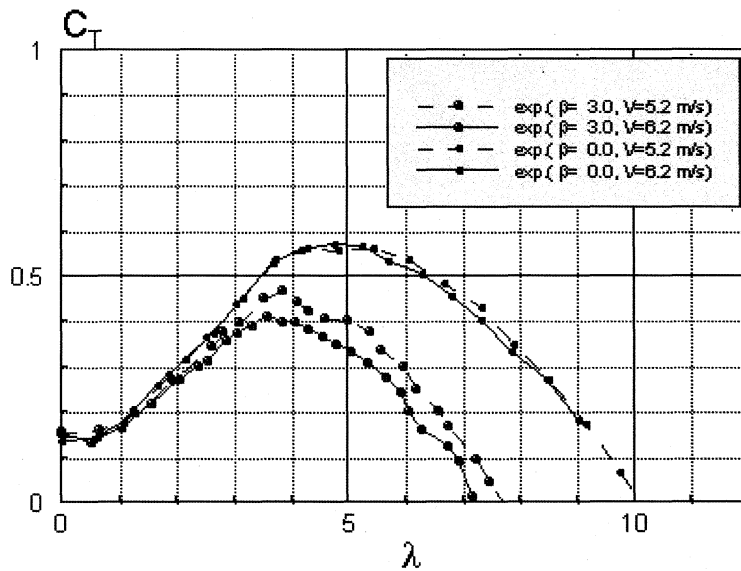


Fig.5: 風速の違いによるスラスト係数の影響

4.4 考察

Fig.2から、ピーク値が一番大きかったのは取付け角 6.0degs. の条件であるが、周速比全体にわたって良好な C_p が得られたのは 3.0degs. の条件であることが分かる。Fig.3から、取付け角を大きくするに従い発生するスラストも大きくなることが分かる。Fig.4から、 C_p に関しては風速の違いによる影響はほとんど見られなかった。一方、Fig.5から、取付け角 0.0degs. の場合は風速の違いによる C_t の影響はほとんど見られなかったが、取付け角 3.0degs. の場合は風速 $U=5.2\text{m/s}$ の方が周速比全体にわたって大きかった。

5. まとめ

今回の実験により、新しく設計したブレードのローター空力特性を得ることができた。この結果をもとに、このブレードに適した弾性複合材の振れ特性の推定し、弾性複合材の振れを考慮したローター空力特性を導出する予定である。

CO₂削減省エネ海上輸送のための新船型開発に関する研究

広島大学大学院工学研究院
教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

世界の物流の99%を担う船舶は、昨今の地球温暖化問題に伴うCO₂低減に対しても大きな責任を負っており、国土交通省の政策下、各所で特に実海域における抵抗低減法の研究開発がおこなわれているところである。実海域とは波浪影響下を意味し、従来船型開発で主眼とされてきた静水中での推進性能ではなく、波浪環境下での推進性能の観点に立った抵抗低減を考えることになり、学術的には波浪中抵抗増加の低減ということになる。

昨年までの研究において、Bluntな船型については船首部に強いフレアーを付けることにより、実海域で重要な波長域で波浪中抵抗増加を10%以上も低減できることが分かっている。これを受けて本研究では、この成果の一般性を確認することを目的として、他船型についてフレアーの異なる船型模型を用いた曳航試験を実施する。実験では、非定常波の計測も行い、波形からも抵抗増加の解析を行って、力の計測により得られた結果を検証することになっている。

2. 研究方法

船首形状を変更した複数の供試模型を用いた曳航試験によって、次の手順により研究を遂行する。

- (1) 2.5m 供試模型を用い、深海機器力学実験水槽において、船体運動計測試験を行い、非線形運動および波浪中抵抗増加を計測する。
- (2) 運動計測試験と同時に波形計測試験を行い、現在得られ難い波浪中航行時の非定常波形を計測する。
- (3) 取得データを解析し、船体運動および波形の非線形性の特性についてまとめるとともに、非定常波の波形解析からも抵抗増加を算出する。
- (4) 力の計測により得られた抵抗増加と波形から得られた抵抗増加の二つの視点から、船首形状の相違による抵抗増加の低減量を比較、検討する。
- (5) 一連の研究を総括し、昨年の結果と比較・考察する。

3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った。

氏名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究院エネルギー・環境部門	教授	代表者
勝田 貴志	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	博士課程3年	実験補助
田辺 晃弥	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士2年	実験補助
谷口 弘樹	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士2年	実験補助
池本 俊史	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	4年	実験補助
胡 長洪	九州大学応用力学研究所	准教授	実験指導

4. 研究結果

4.1 供試模型

昨年度の実験で使用した供試模型はタンカー船型である。船首部形状を変更した計6種類の供試模型を準備した。船首形状としては、船体番号 M09057 をオリジナル船型とし、主にチェーンライン位置とフレアー形状を変更した6種類を準備した。Fig.1 に昨年使用した各船首形状の写真と船型番号、およびチェーンラインとフレアーの特徴を示す。

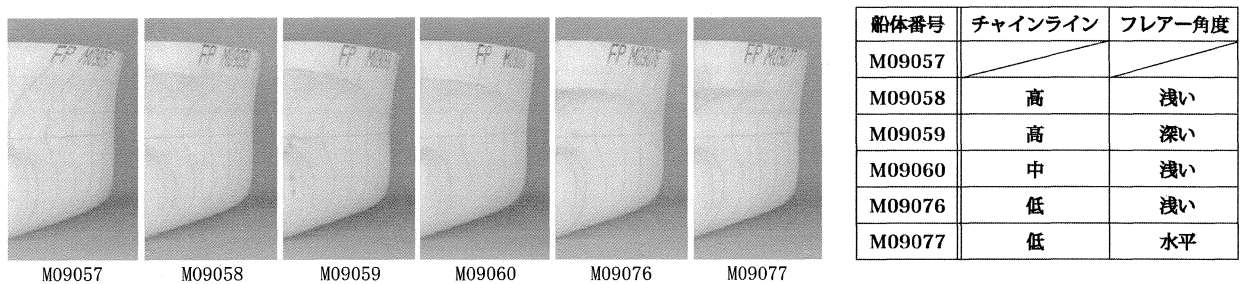


Fig. 1 船首形状の異なる供試模型とそれらの特徴 (昨年度)

これに対し、本実験で使用した供試模型はバルクキャリアー船型である。オリジナル船型となるための船型 1-O(船体番号 M10065) と細めの船型 2-O(船体番号 M10071), そのそれぞれの船首部に強いフレアーを付けた船型 1-F, 船型 2-F(船体番号 M10064・M10070) の計4種類を準備し、水槽試験を行っていく。Fig.2 に本実験で使用した各船首形状の写真と船型番号、および特徴を示す。なお、各船体模型に対して重心位置や環動半径などの実験条件を一致させるため、バラストウエイトの調整を行っている。

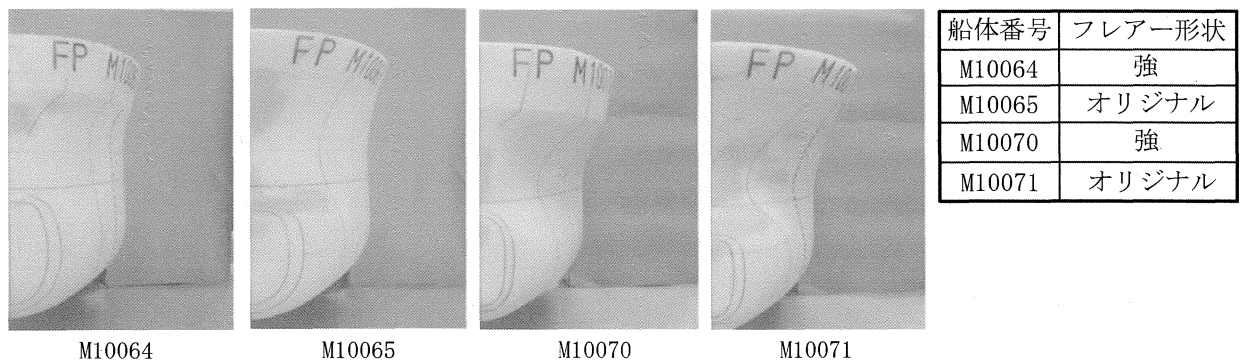


Fig. 2 船首形状の異なる供試模型とそれらの特徴 (本実験)

4.2 試験内容

運動計測

運動計測装置を用いて surge, heave, pitch の運動の計測を行い、前後のロッドに取り付けたひずみゲージにより船体に及ぼす抵抗を求める。位相基準は船体重心位置に入射波頂が来た時を $t = 0$ としている。運動計測試験は、静水中を航行する定常試験と造波機により起こされた入射波中を航行するときの非定常試験について行っている。実験条件は船型 1 でフルード数 $F_n = 0.175$, 船型 2 で $F_n = 0.160$, 非定常

試験における入射波は正面向かい波で $\lambda/L = 0.3 \sim 3.0$ について行った。運動計測試験で用いる模型船体の模式図と主要目を Fig.3 と Fig.4 に示す。

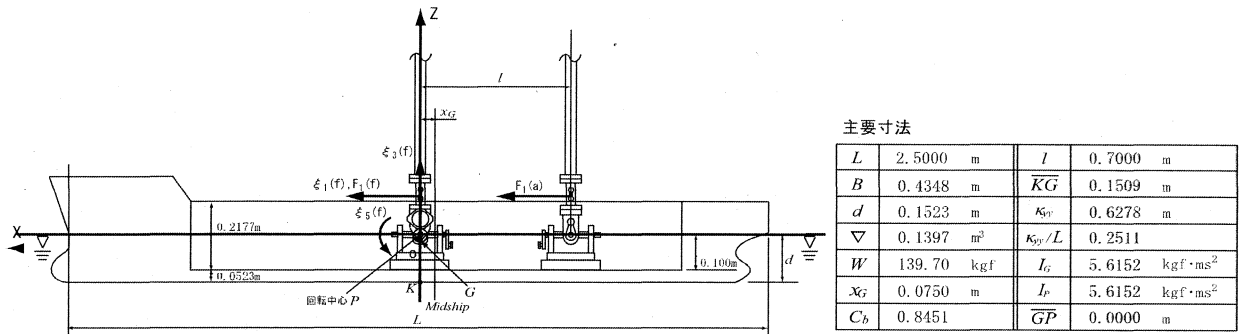


Fig. 3 運動計測試験時の模型セットアップ図および船型 1 主要目

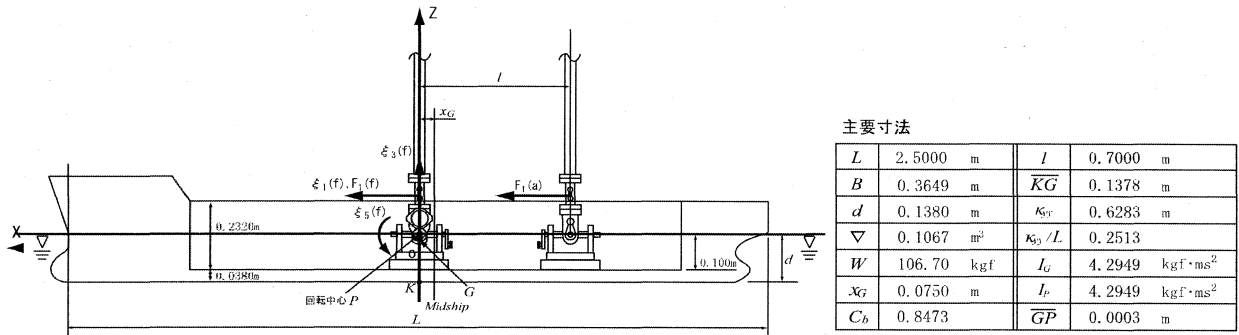


Fig. 4 運動計測試験時の模型セットアップ図および船型 2 主要目

波形解析

Fig.5 に波形解析の模式図, また Fig.6 に容量式波高計を示す。水槽壁面に計 12 個の波高計を船の進行方向に縦並びに設置し, Fig.5 中の trigger の位置に船首が差し込んだ瞬間を計測開始時刻としている。波形計測は定常試験および非定常試験について行った。計 12 個の波高計は同時に calibration が可能であり, 非定常試験における波高計間隔は入射波の λ/L に対応させて、等間隔位相でデータ取得できるように調整している。

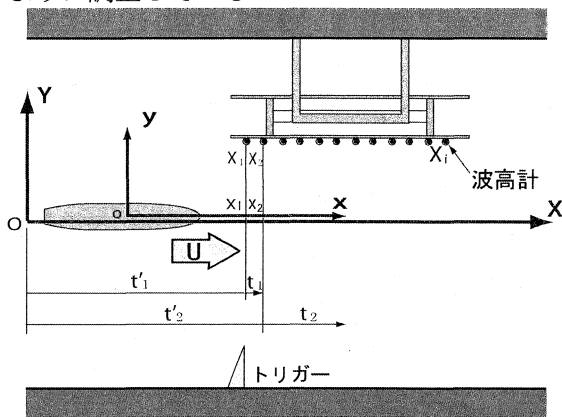


Fig. 5 波形計測装置セットアップ図

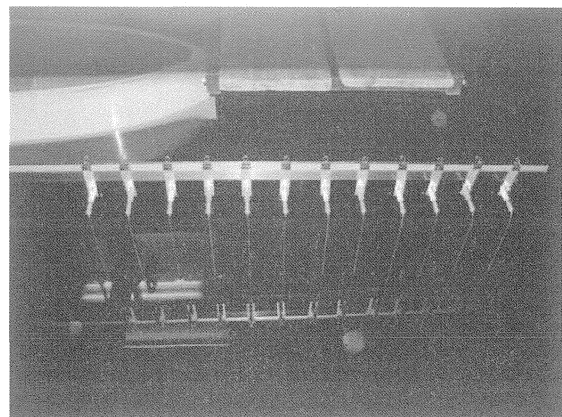


Fig. 6 容量式波高計

4.3 結果・考察

定常問題

水槽試験による定常航走時の各船型における x 方向流体力 (定常抵抗) とオリジナル船型からの増減率を Table.1 に参考までに示す. 本実験のオリジナル船型は最初からフレアー形状がついているためフレアーを強くした船型がどちらも定常抵抗が低い値をとった. しかし, 御覧の様に定常抵抗の差はほぼなく, 微小であるため抵抗増加を考える際には無視する.

Table.1 各模型船における定常抵抗

船首形状番号	定常抵抗	増減率
M10064	0.3191 kgf	-0.02%
M10065	0.3256 kgf	-
M10070	0.2271 kgf	-0.04%
M10071	0.2362 kgf	-

非定常問題

まず Fig.7 に昨年の実験で計測された抵抗増加のグラフを示す. 横軸に λ/L , 縦軸に抵抗増加量を波振幅, 主要船体寸法で無次元化した値を取っている. 右図は左図の $0.3 \leq \lambda/L \leq 1.0$ の範囲を拡大した図である. ここで言う抵抗増加とは, 入射波ありの非定常実験で計測された surge 方向の力と入射波なしの定常実験で計測された surge 方向の力との差を意味している. 全船型で $\lambda/L = 1.3$ 付近において抵抗増加がピークとなることが分かる. また, 短波長域において大きな優劣が見られ, 船首部に強いフレアーを付けることで $0.3 \leq \lambda/L \leq 1.0$ の入射波において全体的に抵抗増加を減らす働きがあることが, 昨年の実験の結果から分かる.

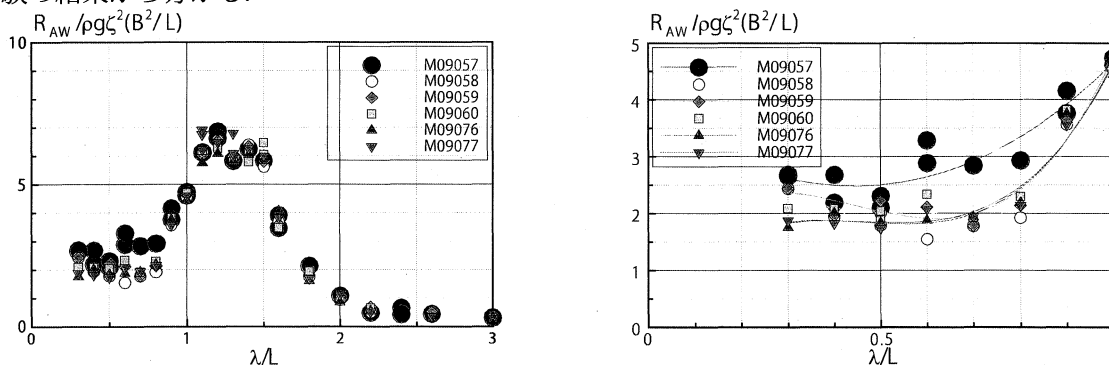


Fig. 7 Added wave resistance for different bow shapes at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

同様に Fig.8 に本実験での検力計から計測された抵抗増加のグラフを示す. 左図が船型 1, 右図が船型 2 の抵抗増加の結果を示している. Fig.8 から昨年と違い, 船首部に強いフレアーを付けることで $1.0 \leq \lambda/L \leq 2.0$ の中長波領域での抵抗増加低減効果が確認できる. 船種を変えたことで船種部に付けた強めのフレアーによる抵抗増加低減効果の影響範囲が変化した.

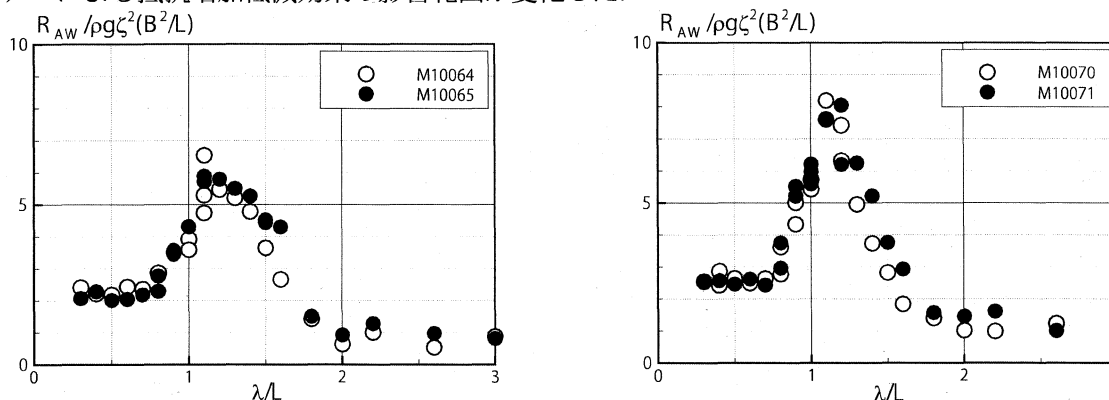


Fig. 8 Added wave resistance for ship-1 at $F_n = 0.175$, $\chi = 180$ degs., $y=418$ mm from C.L and ship-2 at $F_n = 0.160$, $\chi = 180$ degs., $y=284$ mm from C.L

船体運動

Fig.9に昨年の実験での各船型の波浪に対する船体運動とその位相のグラフを示す。左から surge, heave, pitch となっており、全グラフとも横軸には入射波の波長の無次元量である λ/L 、縦軸には運動振幅を入射波振幅で無次元化したもの、波浪に対する船体運動の位相を示している。

heave, pitch 運動においては λ/L が 1.0 を越えた付近に運動の同調点が存在するのに対して surge の運動には同調点は存在しない。これらの運動の結果には、各船型において実験値のバラツキ以上のものは見られない。先のフレア形状の違いによる抵抗増加低減は、運動の違いに因り低減したものではなく、船首領域からの入射波の反射等の低減効果に依存したものであることが推察される。

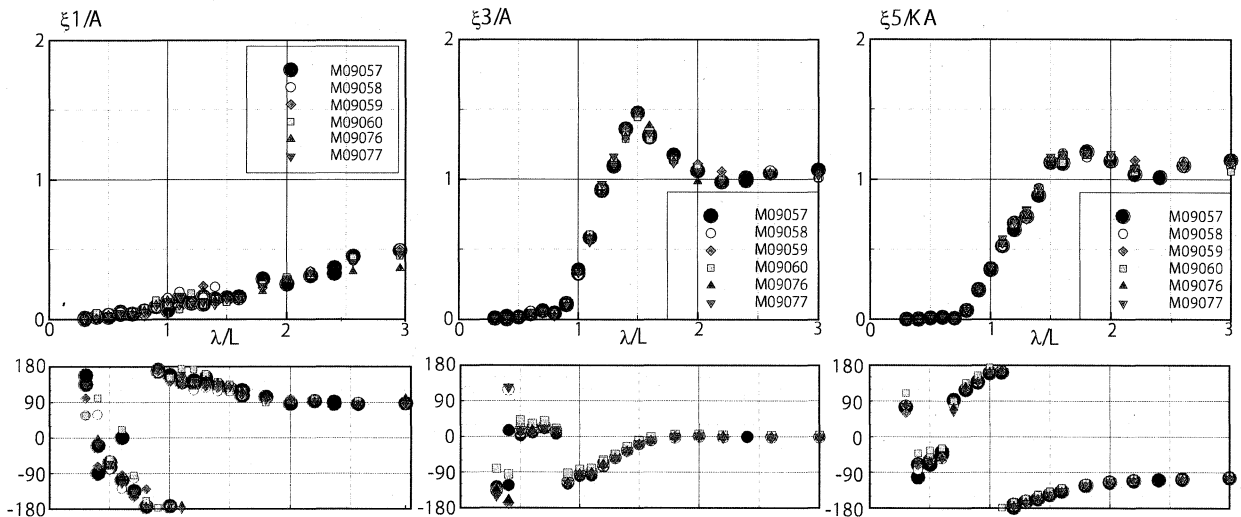


Fig. 9 Ship motions for different bow shapes at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

同様に Fig.10, Fig.11 に本実験での各船型の波浪に対する船体運動振幅とその位相のグラフを示す。heave 方向の運動に注目すると、どちらの船型においても船首部に強いフレアを付けた船型が $1.0 \leq \lambda/L \leq 2.0$ の中長波領域で低い値を示していることが確認できる。

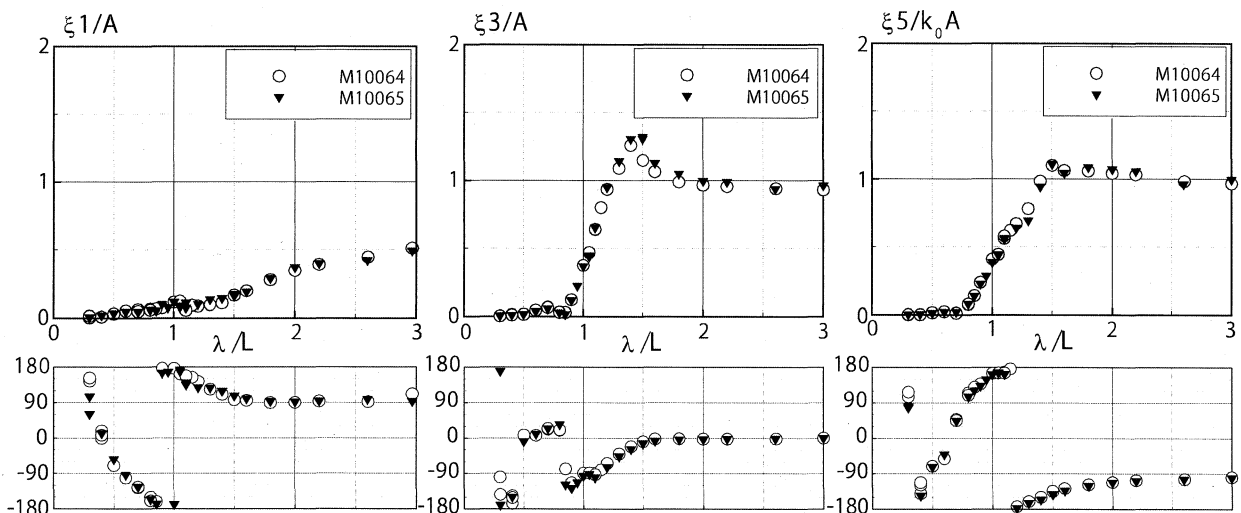


Fig. 10 Ship motions for ship-1 at $F_n = 0.175$, $\chi = 180$ degs., $y=418$ mm from C.L.

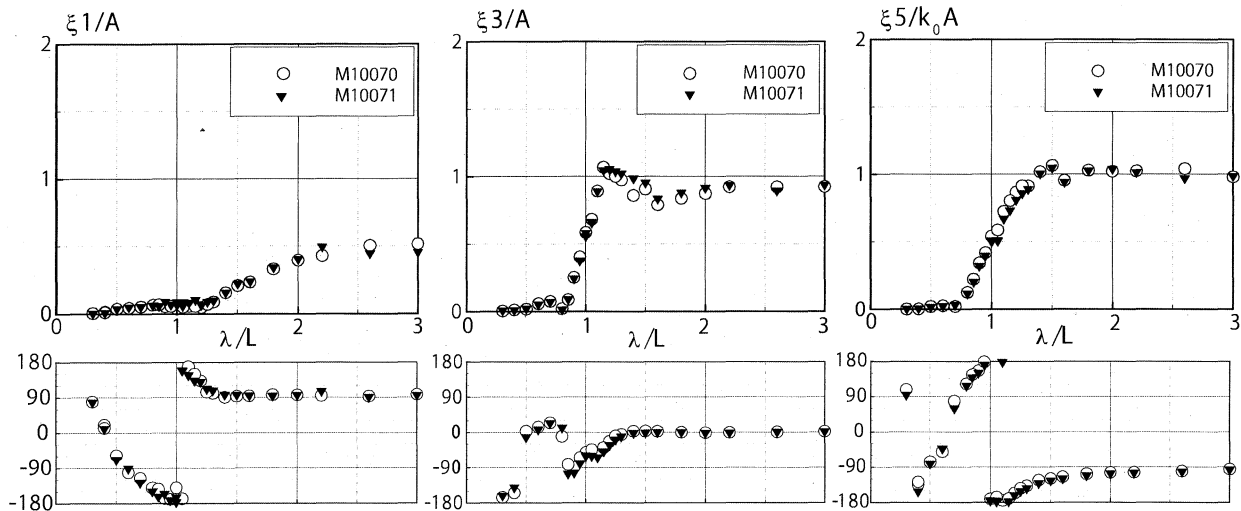


Fig. 11 Ship motions for ship-2 at $F_n = 0.160$, $\chi = 180$ degs., $y=284$ mm from C.L

昨年の結果とは違い、フレア形状の違いにより船体運動に相違が現れており、これが抵抗増加にも影響を与えている一つの要因であることが分かる。

波形解析

力の計測により示された船首形状の相違による抵抗増加低減の事実を波形の観点から検証することができる。抵抗増加は船体が非定常波を造波することにより発生するものであるから、抵抗増加が低い船型であれば造波した非定常波の振幅も小さくなるはずである。

参考までに、Fig.12 にオリジナル船首形状船型に対して計測・解析して得られた非定常波形を示している。この波を波形解析理論を用いて解析することにより、素成波の振幅や位相を表わす Kochin 関数、およびそれに重みを掛けて積分することにより抵抗増加が算出できる。Fig.13 に Kochin 関数の例を示している。

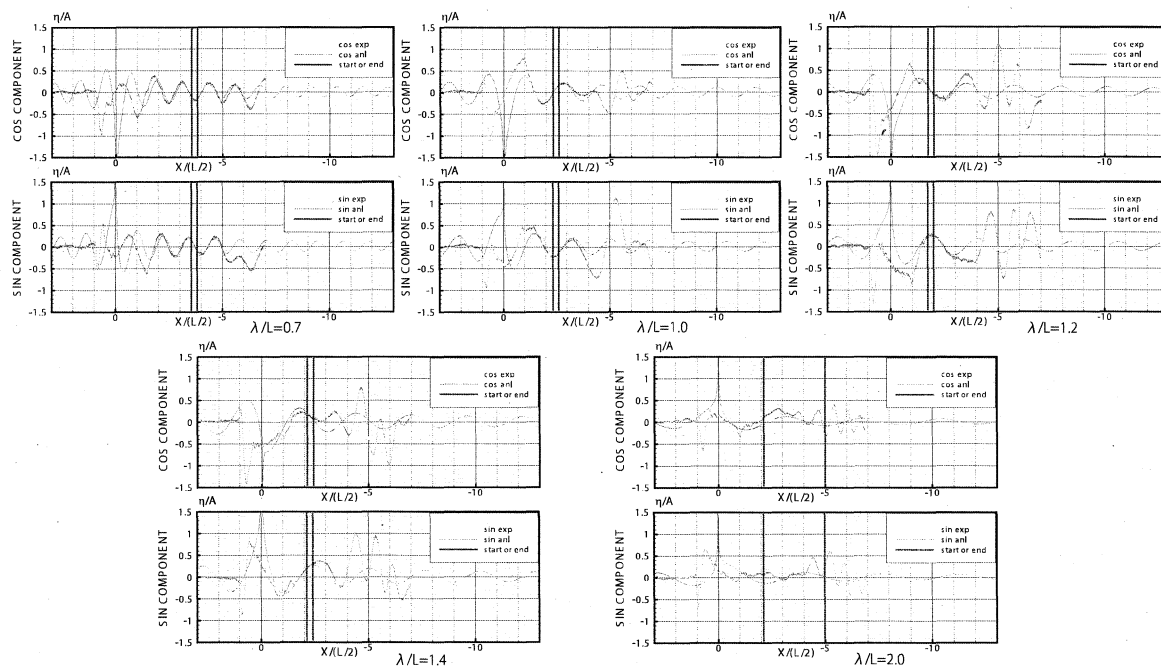


Fig. 12 Unsteady waves for M10065 model at $F_n = 0.175$, $\chi = 180$ degs., $y=418$ mm from C.L

Fig.15, Fig.16 に実験による検力計の結果および Kochin 関数から算出された抵抗増加を示す。力の計測により得られた抵抗増加と波形から算出した抵抗増加とは良好な一致を示している。抵抗増加が最大値を取る近傍で、波形解析による抵抗増加の方が低めになっているのは、船首からの碎波抵抗等に起因する波の非線形な影響であると思われる。波形解析による抵抗増加の結果からも船型 1・2 の双方において、船首部に強い御フレアーを付けた船型がオリジナル船型に比べて短波長領域で低い抵抗増加を示すことが確認された。

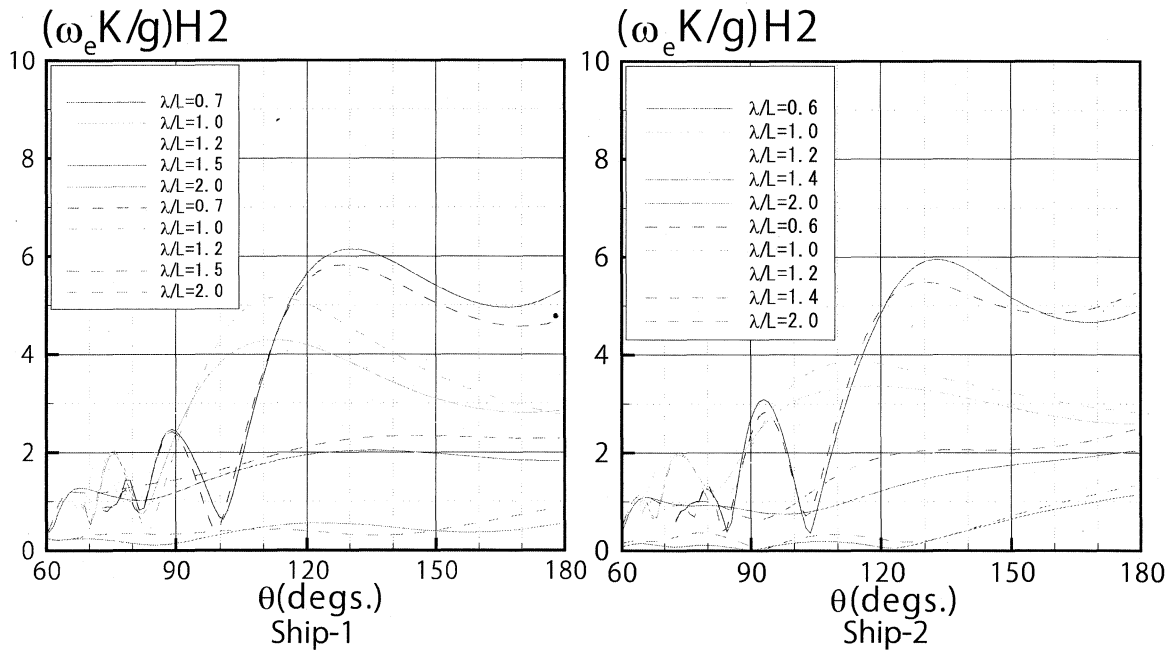


Fig. 14 Kochin functions for ship-1 at $F_n = 0.175$, $\chi = 180$ degs., $y=418$ mm from C.L and ship-2 at $F_n = 0.175$, $\chi = 180$ degs., $y=284$ mm from C.L

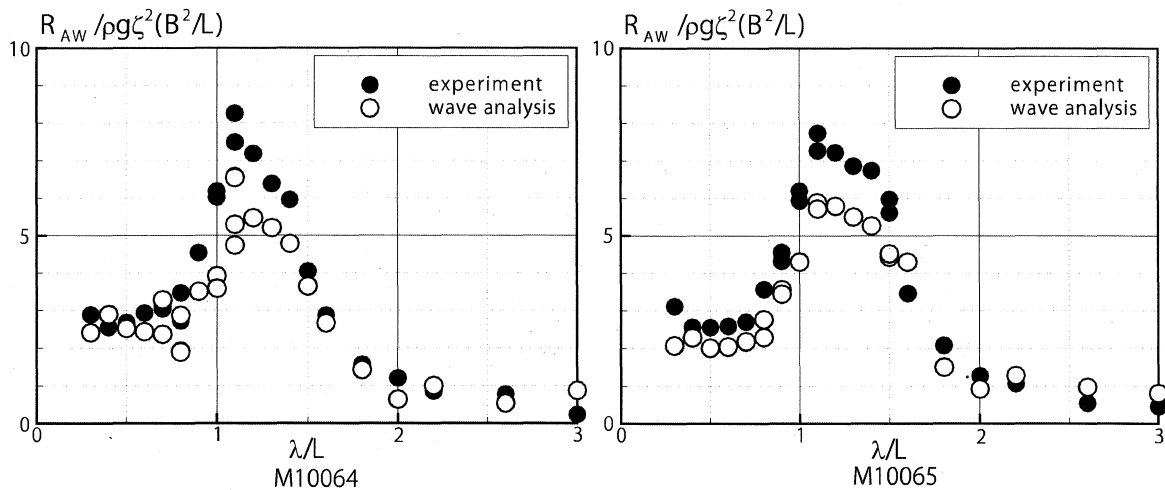


Fig. 15 Comparisons of added wave resistance between measured by load cell and unsteady waves, at $F_n = 0.175$, $\chi = 180$ degs., $y=418$ mm from C.L

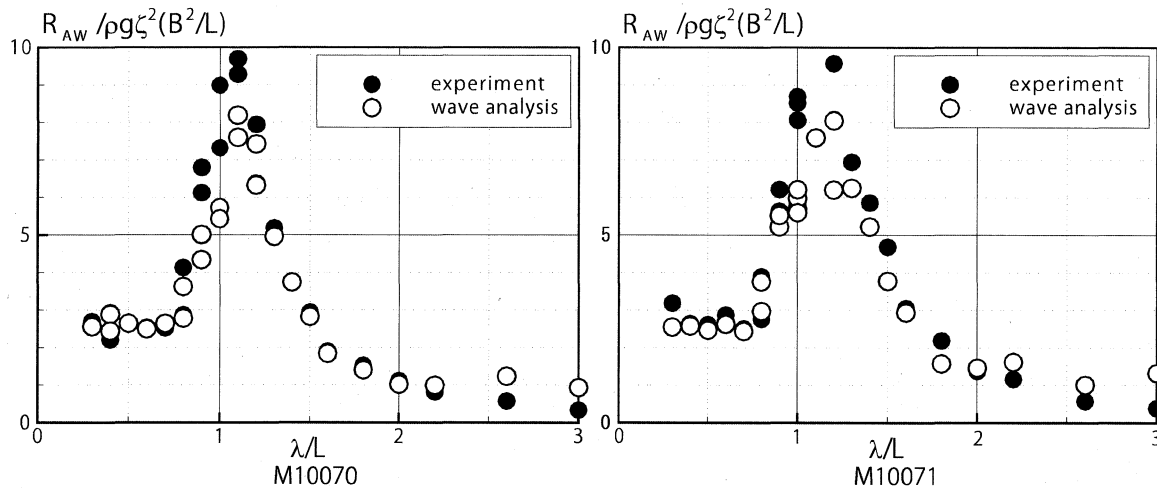


Fig. 16 Comparisons of added wave resistance between measured by load cell and unsteady waves, at $F_n = 0.160$, $\chi = 180$ degs., $y=284\text{mm}$ from C.L

5. まとめ

定常抵抗，波浪中船体運動，抵抗増加を船首部形状を変更した4種類の供試模型で計測比較し，船首部に強いフレアーを付けることによる影響について考察を行った．また同時に波浪中を自由動揺しながら前進する船体模型が隆起する非定常波形を12個の波高計により計測することで波形解析の観点からもアプローチを行った．本研究より得られた結論を示すと次のようになる．

1. 船首部に強いフレアーを付けることで，特に $1.0 < \lambda/L < 2.0$ の中長波領域において抵抗増加が低減されることが船型1，船型2の双方で確認された．
2. 非定常波の計測を行い，波形解析理論を適用することにより船首形状の相違による抵抗増加の低減効果の確認を行った．その結果，非定常波形解析による結果は力の計測により得られた結果と同様の傾向を示し，非定常波形の観点からも上記船型が優秀であると結論付けられた．
3. 船首部に強いフレアーを付けることで，特に $1.0 < \lambda/L < 2.0$ の中長波領域において Heave 方向の船体運動の値の低減が双方の船型で確認され，抵抗増加低減に繋がったと考えられる．
4. Kochin 関数から， $1.0 < \lambda/L < 1.5$ の中長長領域で $90\text{degs.} < \theta < 150\text{degs.}$ の範囲において θ 方向に伝播する素成波の振幅が強いフレアーをつけた船型の方が低い値をとっていることが分かり，強いフレアーを付けることで造波する波が減少し抵抗増加低減に繋がったと考えられる．

浮体式風車の係留システム及び荒天時の挙動に関する高精度解析手法の開発

大阪府立大学大学院・工学研究科 二瓶 泰範

・ 目的

日本の沖合の排他的経済水域を利用した、洋上風力発電利用に関する研究開発は昨今取り上げられる陸上風力発電の様々な問題（風車ブレードが作り出す振動音による人体の影響や山間部に設置する際の森林伐採等々）の観点からも喫緊の課題であると考えられる。沖合は水深が深く、着底式工法には限界があり、浮体式工法により風力発電を実現する必要がある。洋上では安定した風が吹くことが既に報告されているが、設置コスト等を考慮すれば設備利用率を上げる必要があり最適な浮体式・係留システムに関する研究は途上の段階であると言える。また荒天中の突風や波浪衝撃による風車軸系や係留系の破損等、経済性を担保しつつ安全性を考慮した洋上風力発電についての研究についても十分な検討が行われているとは言い難い。

そこで本申請課題研究では洋上風力発電に適した最適な係留方法・浮体式工法について検討を行うとともに、荒天における風荷重や波浪衝撃が係留索や風車タービンに作用する荷重等を解析するツールを開発し、応用力学研究所が所有する水槽を用いて風や波浪という複合環境下での水槽試験を行い、解析ツールの検証を行い洋上風力発電システムの挙動について詳細な研究を行うことを目的とする。

・ 研究の具体的方法

[1] 最適な係留方法・浮体式工法の検討

これまで Spar 型浮体を利用し Taut 係留方法やカタナリー係留方法を採用した検討が先行研究としては成されてきた。本申請研究ではこれに加え、Tension Leg Platform についても十分に検討する。水深、離岸距離等の地理的条件、気象、海象等の、環境条件に対し、排水量・GM・初期テンション等々の主要目を包括的に決定し、発電量予測を始め浮体の波浪中運動応答、索張力、ナセル部の軸受荷重等の評価基準に対して検討を行う。

[2] 高精度シミュレーション解析による現象の解明

シミュレーションは風力発電の稼働状態に応じた解析を行うことを考えている。一つはカットイン状態からカットアウト状態までである。この時、波浪外力は高次要素を用いた境界要素法を、係留索シミュレーションはランブドマス法を用い、これに風荷重を組み合わせるによりシミュレーションを行う。もう一つはカットアウト付近からである。カットアウト時からは波高 7 m 程の波も想定されることから波浪及び風荷重が軸受や係留索や風車ブレードに及ぼす影響は多大であると考えられる。そこでランブドマス法、CIP 法、有限要素法との連成によりこの挙動をシミュレーションする。

[3] 風・波浪共存場における水槽試験

[1]により検討された浮体について実際に模型製作を行い水槽試験において運動計測、索張力、ナセル部の加速度等の計測を行う。近年、5 MW クラスの大型風車タービンの材質は GFRP 等の先端材料が用いられるため一翼がおおよそ 20～30 トン程になっている。1/100 スケールの模型に換算すれば 20～30 グラム程で製作しなくてはならず相似比を合わせた実験は非常に難しい。申請課題では相似比を合わせた翼を実際に製作し風・波浪共存場での水槽試験を行い、[2]において開発された数値シミュレーションの検証を行う。

・ 結果

[1] 最適な係留方法・浮体式工法の検討

曳航並びに設置の際の安定を考慮し検討した TLP 及び風車の主要目を表 1、2 に示す。風車に関しては 5MW の大型水平軸プロペラ風車を想定している。

表 1

項目	単位	値
高さ	m	44
最大直径	m	27.3
排水量	ton	22
GM	m	9.7
喫水	m	34
初期テンション	tonf	1500

表 2

項目	単位	値
発電量	MW	5
ブレード直径	m	120
タワー直径 (最大)	m	6
ブレード重量	ton/a blade	20
タワー重量	ton	130
総重量	ton	450

[2] 高精度シミュレーション解析による現象の解明

本年度は翼素理論検証のためにプロペラ回転数・推力・トルクについて理論計算を行った。計算条件は風速 0m/sec～25m/sec である。尚、風速 25m/sec は風車のカットアウトの条件である。(計算結果等は成果報告 iv を参照されたい)

[3] 風・波浪共存場における水槽試験

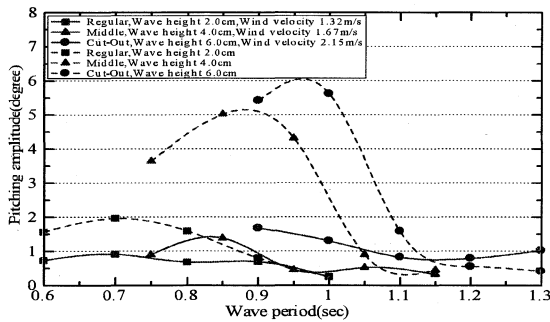


表 1 及び 2 に示される TLP 並びに風車の 1/100 スケール模型を製作し水槽試験を行った。風車ブレードは非常に軽量で製作する必要があるが、質量比を合わせることに成功した。模型試験における計測項目は、定常風車傾斜角、1 次ピッチング振幅、風車基部定常曲げモーメント・振幅、テンション振幅である。左図に実験によって計測された浮体のピッチング運動の一例を示す。風車が回転することにより、大きく浮体動揺が減少していることが確認できた。尚、これらのデー

タは成果報告 i に詳しく示している。

• 成果報告

- i. Aerodynamic Effects on the Motion of Offshore Wind Turbine in Waves, Yasunori Nihei, International Conference on Analyses of Strongly Nonlinear Fluid-Structure Interactions at Kyushu University, Dec. 2010
- ii. Research and Development of TLP Type Offshore Wind Turbines, Yasunori Nihei, Midori Matsuura, International Conference on Analyses of Strongly Nonlinear Fluid-Structure Interactions at Kyushu University, Dec. 2010
- iii. Interaction between Rotary Inertia of Rotating Blades of Offshore Floating Wind Turbine System and Floating Platform Motions, Takashi Tsubogo, Yasunori Nihei, Hideo Fujiwara, Conference proceedings, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, volume 11, pp159-161, Nov. 2010
- iv. Motion characteristics of TLP type offshore wind turbine in waves and wind, Yasunori Nihei and Hiroyuki Fujioka, 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2010

• 研究組織

役割	氏名	所属・身分	滞在延べ日数
研究代表者	二瓶 泰範	公立大学法人大阪府立大学・助教	4 日
研究協力者	村井 基彦	国立大学法人横浜国立大学・准教授	0 日
所内世話人	胡 長洪	国立大学法人九州大学・准教授	

船舶向け波浪エネルギー回収システムの開発

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 橋本博公

研究目的

近年、石油資源の枯渇問題や地球温暖化への関心の高まりを受けて、船舶分野においても省エネや環境負荷の低減が強く求められている。一航海あたり長期間を要する海上輸送では、航行中に何らかの手段でエネルギーを回収することが期待されるが、船舶においては定速航行が航海の大部分を占めるため、自動車分野などで行われている減速時のエネルギー回生などはほとんど見込めない。また、風力や太陽光といった自然エネルギー回収では、発電容量が絶対的に不足する。そこで、航行時に巨大な船体を動揺させる波浪エネルギーに着目し、本来であれば船体運動に与えられた後に造波エネルギーとなって消費される波浪エネルギーの一部を回収するシステムを開発し、その効果・実現性について模型実験などを通じて検証することを目的とする。

波浪エネルギー回収システムの概要

波浪エネルギーによって引き起こされる船体運動としては、縦揺れが最も顕著と考えられるため、この船体運動を介した波浪エネルギー回収システムの構築を目指す。具体的には、空気ダクトを備えた水管を船舶に設置することで、水管内の水は船体と波との相対運動に応じて長手方向に振動することとなる。この水管内にタービンを設置し、振動流を利用してタービンを回すことで波浪エネルギーを回転エネルギーに変換し、更に発電機を回すことで電気エネルギーを得ることが可能となる。タービンには、波浪発電などで用いられているウェルズタービンを採用し、その特徴である振動流中において常に一方方向に回転する自己整流作用を利用することで、船体運動により誘起される振動流から効率良くエネルギーを吸収することができる。

システム設計に関する基礎的検討

本研究は過去に前例のない全く新しい試みであるため、具体的な設計には多くのモデルケースを事前に検討する必要がある。そこで九州大学応用力学研究所の末吉誠助教が開発してきた MPS 法（粒子法）と大阪大学が得意とする波浪中船体運動予測を組み合わせることで、波浪中船体動揺時の複雑な水管内流れを事前に把握し、最適な水管形状や寸法の詳細設計を行うことを計画している。

今年度は詳細設計の前段階として、ウェルズタービンを製作し、安価な塩ビパイプを水管に見立てて強制動揺試験を行うことで、ウェルズタービンの回転特性を検討することとした。

強制動揺試験

直径 100mm のウェルズタービンを塩ビ製 U 字タンク内に設置する際に、シールドの問題を避けるため、今回は回転軸を水平方向ではなく垂直方向に設置した。垂直方向に設置されたウェルズタービンと大阪大学所有の強制動揺装置への取り付け状態の写真を Fig.1 に示す。軸周りに正弦運動を与える強制動揺試験を様々な角周波数と振幅に対して実施し、1:5 の増速ギアを設置した状態での 1 秒あたりの回

回転数を計測した。その結果を Fig.2 に示す。同調付近となる角周波数において回転数が最大となること、振幅が大きくなるほど回転数が増大することが確認された。更なる高回転数を得るためには、主要な出会い波周波数に対して同調振動が発生するタンク形状の設計、適切な増速ギアの設置が必要であろう。

まとめ

ウェルズタービンを設置した塩ビ製U字タンクを用いて、船体運動を模擬した強制動揺試験を実施し、製作したウェルズタービンの回転特性を確認した。今後は、最適なタンク形状の設計に取り組み、模型船に搭載して波浪中を曳航することで、発電量の直接計測を行う予定である。

成果報告

特になし

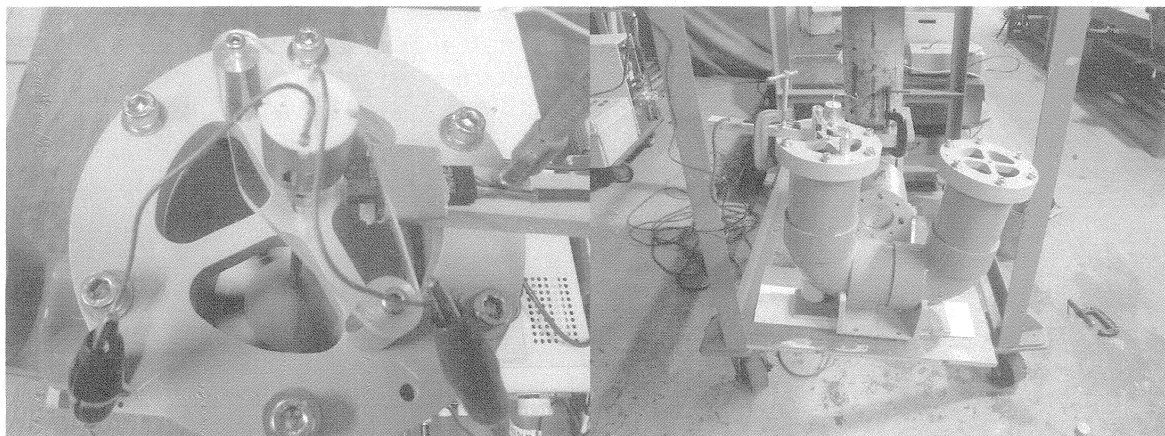


Fig.1 Well's turbine (left) and experimental setup for forced motion test (right)

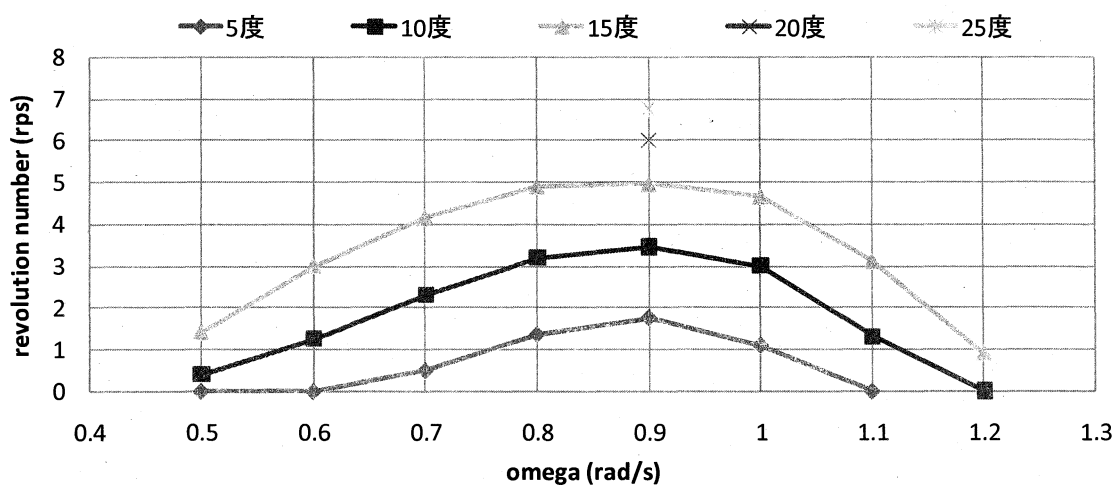


Fig.2 Revolution number measured by forced roll test

風速変動する風況下での風レンズ風車性能に関する実験的研究

大分工業高等専門学校 利光 和彦(研究代表者)

1. 研究目的

大屋裕二先生(共同研究者・所内世話人)を中心として開発された風レンズ風車(通称)は、貴研究所新エネルギー工学部門において独創的な風力発電技術として進展している¹⁾。研究代表者らは、2002年頃から現在まで当該風車周り流れ場のレーザー計測などの実験を通して、風レンズ研究会に参加し当該風車の流れ構造に関する研究を行ってきた。

本研究は、変動成分の多い風況下にある日本、特に市街地に風レンズ風車を適用するための基礎研究として位置づけられる。風レンズを含む風車の変動風下での性能評価に関しては、大屋裕二先生、烏谷隆先生らのご提案による理論評価式およびフィールド実験結果がある。本研究では、より定量的評価が可能な変動風や乱流の影響を簡易に再現できる大分高専のマルチファン風洞を用いて、風レンズ風車性能と変動風との関係を解明することを目的とする。

特に、本研究では正弦的速度変動風と風車性能との関係および烏谷先生²⁾の理論性能予測式と実験値の比較によりその妥当性を検討することを目的とする。

2. 実験

2.1 実験装置 本実験では風レンズ風車のコンパクトタイプとロングタイプを使用する。風レンズ風車の形状を Fig.1 に、本実験で使用した風車性能実験装置を Fig.2 に示す。また、風車の回転を調節するために DC モータ(maxon 社製, RE25・RE40)を使用した。風車翼は半径 $r=0.097\text{m}$ 、慣性モーメント $I=1.52\times 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{m}^2$ である。

2.2 実験条件 実験は、風速が $U=5\text{m/s}$ の一様風、平均風速が $U=5\text{m/s}$ 、振幅が $\pm 1\text{m/s}(\pm 20\%)$ の周期的変動風(周波数 $f=0.033\text{Hz}$, 0.05Hz , 0.083Hz , 0.25Hz)下で行い、DC モータによって風車の回転数を変化させながら、各周速比に対するトルクと回転数を計測する。また、実験には周速比 $\lambda=3.7$, 5.0 の 2 種類の風車翼を使用する。

3. 風車性能実験結果

本実験で使用する主要パラメータ周速比 λ 、出力係数 C_w は次式で表される。

$$\lambda = \frac{r\omega}{U}, \quad C_w = \frac{P}{(1/2)\rho AU^3} \quad \dots (1), (2)$$

ここで、 P は風車発電量[W], ρ は空気密度[kg/m³], A は翼車受風面積[m²], U は風車上流での風速[m/s], r は翼車半径[m], ω は翼車回転数[rad/s]である。出力特性と変動風との関係の一例を Fig.3 に示す。

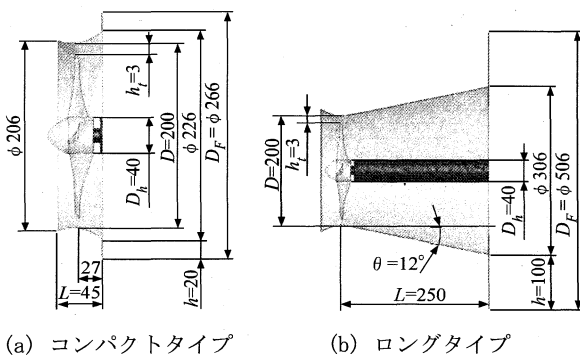


Fig.1 風レンズ風車モデル

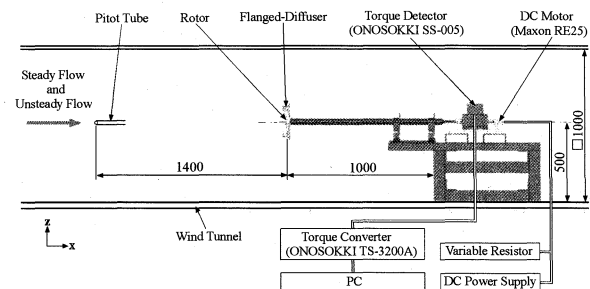


Fig. 2 風車性能実験装置

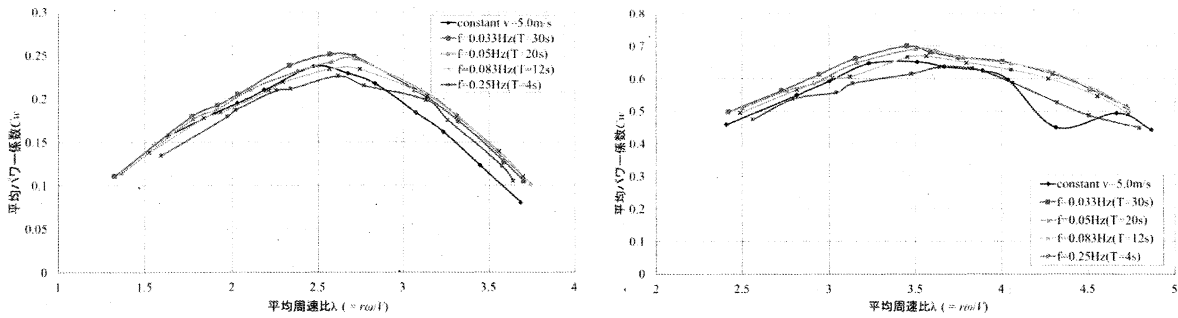


Fig. 3 出力係数と周速比の関係（翼車設計周速比は $\lambda=5.0$ ，左は翼車単体，右はコンパクトタイプ）

4. 数値計算予測との比較

最高効率点での出力係数について，鳥谷先生ら²⁾の提案する理論値と実験値との比較を行うため，理論値 C_{wT} に対する実験値 C_{wE} の出力係数比 η を式(3)で定める． $\eta=1.0$ の場合は理論値と実験値が一致することを示している．

$$\eta = \frac{C_{wE}}{C_{wT}} = \frac{C_{wE}}{C_w^A(1+3\sigma^2)} \quad \dots (3)$$

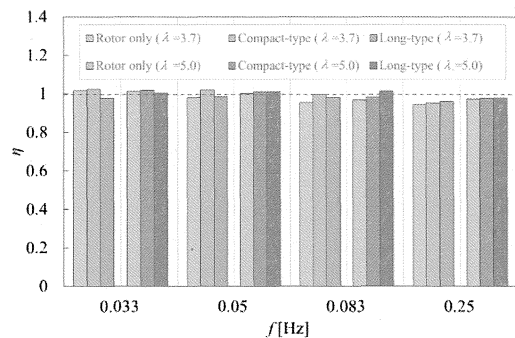


Fig. 4 理論値と実験値の比較

Fig. 4 より η は周波数 $f=0.033, 0.05\text{Hz}$ のように周期が長い場合には理論値と実験値が非常に良く一致する．周波数 $f=0.25\text{Hz}$ のように風速変動周期の短い場合には理論値に対し実験値が小さくなっていることがわかる．

5. 結論

本研究では，プロペラ単体風車，コンパクトタイプ風レンズ風車，ロングタイプ風レンズ風車それぞれに適応した設計による風車翼を製作した．それらの風車翼を用い，周期的変動風下での各実験風車の性能評価を行った．実験の条件は平均風速を $U=5\text{m/s}$ （変動振幅20%）とし，変動風周波数は $f=0.033\text{Hz}, 0.05\text{Hz}, 0.083\text{Hz}, 0.25\text{Hz}$ と変化させた．得られた結果をまとめると以下のとおりである．

【一様風と変動風との性能比較】

一様風の最大出力係数に対する変動風の最大出力係数の増減の観点から以下のことが言える．

- 周波数 $f=0.033\text{Hz}, 0.05\text{Hz}$ と周期の長い変動風では，全ての実験風車において一様風に対して変動風の出力が増加する．特に，一様風に対する変動風の増加量が一番大きいのはコンパクトタイプ風レンズ風車である．
- 風車に風レンズを取り付けると，周期がある程度短い変動風に追従できるようになる．特に，ロングタイプ風レンズ風車は，プロペラ単体やコンパクトタイプに比べ短い周期の変動風にも追従できる．

【理論値と実験値との比較】

最高効率点の理論値と実験値の出力係数比較による観点から以下のことが言える．

- 理論値と実験値の出力係数は，全ての実験風車，実験条件においてほぼ一致する．
- 周波数 $f=0.25\text{Hz}$ のような周期の短い変動風では風車が変動風に追従することができず，理論値に対して実験値の出力係数が若干小さくなる．

成果報告

・利光他：正弦的速度変動風下における風レンズ風車の性能評価，日本機械学会2011年度年次大会（東京工業大学）にて発表予定（2011年9月）

参考文献(1)，(2)は紙面の都合で省略

咬合下における骨／歯科インプラント界面の微視的変形挙動解析

名古屋大学 森田 康之

1. まえがき

歯科インプラント治療後に生じる骨吸収やインプラント破折などの合併症は、力学的要因が大きいと考えられる。そのため、歯科インプラントおよびその周辺骨の変位・ひずみ・応力分布を明らかにすることが重要である。しかし実験の困難性から、有限要素法を用いた数値解析が主流であり、実験的にフィクスチャー周辺の骨に作用する変位・ひずみ・応力分布を求める研究は少数である。またその実験的手法に関しても、単一構造の光弾性材料にフィクスチャーを植立し、光弾性法により応力分布を解析することに限られている。しかし実際の骨は、皮質骨および海綿骨の二層構造を有しており、実験を行う際にもそのような骨モデルを使用することが重要である。

そこで本研究では、骨モデルとして SAWBONES 社製の Laminated Test Block を使用した。この骨モデルは、皮質骨および海綿骨、すなわち歯槽骨の構造を模擬した二層構造となっている。また、この骨モデルの機械的性質は、生体骨と同程度になるよう作製されている。したがって、この骨モデルにフィクスチャーを埋入し、擬似咬合下でのフィクスチャー周辺の変形分布を観察することができれば、これまでの実験的手法に比べより実現に近い力学場を解明することが可能となる。この変形分布の観察手法には、デジタル画像相関法を応用した。デジタル画像相関法は、事象前後の二枚のデジタル画像を取得し、事象前における画像のあるパターンを、事象後における画像から相関値を用いて検出する全視野計測法の一つである。これにより観測領域全体の変位分布を計測することが可能となる。本実験では、骨モデルのフィクスチャー窩に接着剤を充填後、フィクスチャーを埋入し、フィクスチャーと骨モデルのオッセオインテグレーションを模擬した試験片を作製した。その試験片に擬似咬合荷重を付与し、フィクスチャー周辺の骨モデルの変形挙動をデジタルカメラで取得した。得られたデジタル画像をデジタル画像相関法で解析し、変位分布を求めた。その変位分布からひずみ分布を求め、フィクスチャー周辺の骨の変形分布を明らかにした。

2. 実験方法

2. 1. 試験片

歯槽骨の皮質骨および海綿骨の二層構造を模擬した骨モデルには、SAWBONES 社製 Biomechanical Test Material の Laminated Test Block を使用した。材質は、皮質骨がガラス繊維強化エポキシ樹脂、海綿骨がポリウレタンである。この Laminated Test Block の特長は、二層構造のほか、力学的特性が骨とほぼ等しいことである。使用した Laminated Test Block のサイズは $40 \times 40 \times 30 \text{ mm}^3$ 、皮質骨厚さはそれぞれの両端で 2 mm とした。また使用したフィクスチャーは、日本メディカルマテリアル (JMM) 社製 POI EX FINAFIX テーパータイプ (POI 47-14TP-L) である。本フィクスチャーの最大外径は 4.7 mm 、全長 16 mm 、骨への埋入長さは 14 mm である。

フィクスチャーは、Laminated Test Block の上面 $40 \times 40 \text{ mm}^2$ の中央に植立した。フィクスチャー植立時におけるフィクスチャー窩の形成には、JMM が推奨する POI EX Manual に示されたドリル群を使用した。窩洞形成時に生ずる試験片の個体差を小さくするため、万能フライス盤 (日立精機社製 2MF-U) により窩洞形成を行った。ここでオッセオインテグレートッドインプラント試験片の作製には、インプラント窩に接着剤 (住友スリーエム社製 Scotch 強力接着剤 6004N) を充填後、フィクスチャーを植立した。そして即時負荷インプラント試験片の作製には、接着剤を充填せずフィクスチャーを植立した。フィクスチャーの植立は、いずれの試験片においても、タッピングレンチにより手動で行った。フィクスチャーを植立した Laminated Test Block 試験片において、全視野の変位・ひずみ分布計測を行うため、側断面を露出させた。

2. 2. 試験手順

咬合を模擬した圧縮試験は、次の手順で行った。(i) デジタル画像相関法を用い解析を行うため、試験片の観測領域に黒色および白色のスプレー塗料 (大日本塗料製 シリコン変性タイプ超速乾水性スプレー A05032) を噴霧し、ランダムパターンを形成した。(ii) 試験片を小型卓上試験機 (島津製作所製 EZ Test) に設置した。クロスヘッドの変位分解能は 0.01 mm 、ロードセルの荷重感度は 0.005 N である。使用した治具は、上部が球形型、下部が平皿型である。平皿型治具に試験片を設置し、球形型治具でフィクスチャーに荷重を負荷した。(iii) 荷重点はフィクスチャーの上端部とし、予荷重として 4.0 N 付与した。これは、最初に荷重を負荷した際に起こり得る試験片の剛体移動を防止するためである。(iv) そして送り速度 0.50 mm/min で 200 N まで圧縮荷重を加えた。(v) その際のロードセルの荷重およびクロスヘッドの変位を記録するとともに、 -10 N ずつ CCD カメラ (Nikon 製 D80) で画像を取得した。画像サイズは $2600 \times 3900 \text{ pixels}$ 、画素サイズは $4.7 \mu\text{m/pixel}$ である。(vi) 本研究におけるデジタル画像相関法の解析プログラムには、Correlated Solutions 社の Vic-2D を使用した。本プログラムの変位感度は、 0.02 pixels である。

3. 実験結果

擬似咬合下での試験片の変形挙動をデジタル画像相関法により解析した。その結果を図 1 に示す。(a)が u 変位 (x 方向の変位)、(b)が w 変位 (z 方向の変位) であり、荷重 100 N と 200 N のときの変位分布を示す。いずれの変位分布においても、荷重が増加するにともない、変位量が増加することが示されている。

得られた変位分布よりひずみ分布を求めた。その結果を図 2 に示す。(a)が x 方向の垂直ひずみ ε_{xx} 、(b)が z 方向の垂直ひずみ ε_{zz} 、(c)が $x-z$ 面のせん断ひずみ γ_{xz} であり、荷重 100 N と 200 N のときのひずみ分布を示す。変位量と同様にいずれのひずみ分布においても、荷重が増加するにともない、ひずみ集中が生じている領域のひずみ量が増加する結果が得られた。

4. 考察

図 1(a)に示す u 変位分布において、仮に皮質骨/海綿骨の二層構造を有しない単一材料を使用して咬合試験を行った場合を考える。テーパ構造のフィクスチャーを下方向($-z$ 軸方向)に押込んでいくため、最大変位箇所は骨表面部(図 1(a)の破線 A-A)で生じるはずである。しかしながら、二層構造を有した骨モデルでは、皮質骨/海綿骨の界面領域(図 1(a)の破線 B-B)に生じた。これは、皮質骨の剛性が海綿骨に比べて高く、変形しにくかったことによる。すなわちこの結果より、テーパ型の

フィクスチャーを埋入した場合、咬合における x 方向の変位量は、皮質骨/海綿骨の界面周辺の海綿骨で生じやすいことがわかる。

図 1(b)に示す w 変位分布において、先ほどと同様に、皮質骨/海綿骨の二層構造を有しない単一構造材料にフィクスチャーを埋入した場合の咬合試験をおこなう。テーパ構造のフィクスチャーを下方向($-z$ 軸方向)に押込んでいくため、U 字型の変位分布となることが推測される。しかしながら、二層構造を有した骨モデルでは、皮質骨/海綿骨の界面(図 1(b)の破線 B-B)を境界として変位分布が不連続となっていることがわかる。すなわち、図 1 の変位分布の結果は、単一材料を用いる光弾性実験より、二層構造の骨モデルを使用した本実験が実際の現象に対応する力学的挙動を観察することができることを示している。

ひずみ集中は、フィクスチャー近傍の骨モデル領域で観察された。最大集中領域は、 ϵ_{xx} ではフィクスチャーのテーパ近傍(図 2(a)の C 部)、 ϵ_{zz} ではフィクスチャーの下端部(図 2(b)の D 部)、 γ_{xz} ではフィクスチャーのテーパ近傍(図 2(c)の E 部)で、その最大値は $(\epsilon_{xx}, \epsilon_{zz}, \gamma_{xz}) = (-0.3\%, -1.5\%, 0.4\%)$ である。このひずみ集中箇所は、擬似咬合試験であるためフィクスチャーを $-z$ 軸方向に水平に押込むこと、フィクスチャーがテーパタイプであることを考えると推測できることである。また、せん断ひずみ γ_{xz} の集中箇所(図 2(c)の E 部)に関しては、これまでの光弾性法による応力解析とよく一致している。本研究による新たな知見としては、皮質骨/海綿骨界面の海綿骨モデルにおいても、垂直ひずみ ϵ_{xx} , ϵ_{zz} は集中し(図 2(a)の F 部, 図 2(b)の G 部)、せん断ひずみ γ_{xz} は界面に沿って不連続分布となった(図 2(c)の破線 B-B)ことである。これは皮質骨と海綿骨の機械的性質のミスマッチによって生じるひずみ集中であり、実際の歯槽骨においても生じると考えられる。以上をまとめると、光弾性材料のように単一材料を使用し咬合試験を行った場合、皮質骨/海綿骨界面の力学的現象を観察することが困難である。一方、実際の歯槽骨を使用した場合、力学場の可視化の困難性ととも、骨の機械的性質および構造の個体差により定量的な評価をすることができない。したがって、本研究で提案した皮質骨/海綿骨の二層構造を有した骨モデルにフィクスチャーを埋入し、咬合試験を行うことにより、実験的に力学場を定量的に評価することが可能となる。

5. まとめ

骨モデルに歯科インプラントのフィクスチャーを植立し、擬似咬合下でのフィクスチャー/骨モデル界面周辺の力学場を解析した。骨モデルには、実際の歯槽骨の構造および機械的性質にほぼ等しい SAWBONES 社製の Laminated Test Blocks を使用した。フィクスチャーの埋入時にはフィクスチャー窩に接着剤を充填し、フィクスチャーと骨が固着したオッセオインテグレーションを模擬した。そして解析にはデジタル画像相関法を応用し、次の結論を得た。

- (1) 本手法によるひずみ分布の可視化の結果、テーパタイプのフィクスチャーにおいて、擬似咬合下でのひずみ集中箇所は、 ϵ_{xx} および γ_{xz} ではフィクスチャーのテーパ近傍の海綿骨領域、 ϵ_{zz} はフィクスチャー下端部の海綿骨領域で生じた。
- (2) 本手法によるひずみの定量的評価の結果、その最大値は、 $(\epsilon_{xx}, \epsilon_{zz}, \epsilon_{xz}) = (-0.3\%, -1.5\%, 0.4\%)$ であった。
- (3) 既存の実験的手法では困難であった、変位・ひずみ分布の定量的評価を可能とする実験的手法を確立した。すなわち、単一の機械的性質を有する光弾性材料を用いた光弾性実験に比べて、実際の骨構造と機械的性質に近い骨モデルを使用し、かつ全視野計測が可能であるデジタル画像相関法を組み合わせた本手法により、有限要素解析を用いない実験的な見地からフィクスチャー周辺の定性的・定量的な力学場を検証することが可能となった。

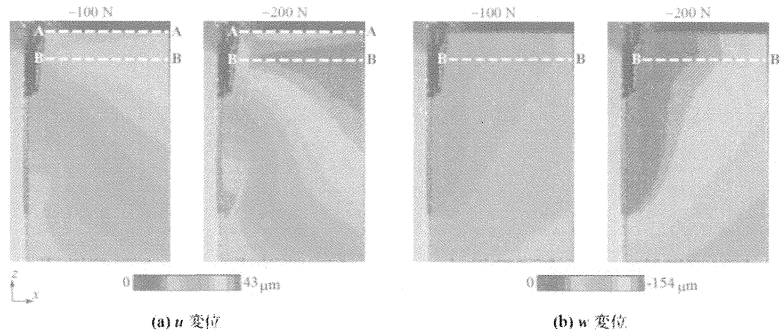


図 1 デジタル画像相関法により得られた変位分布

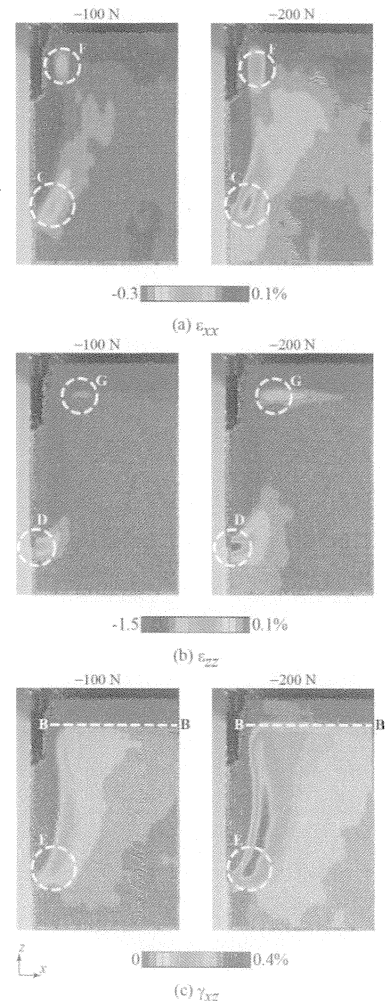


図 2 変位分布より求めたひずみ分布

風レンズ風車に適した風車翼の設計法の開発

Development of a Design Method for Wind Turbine Blade Suitable to Wind-Lens Turbine

九州大学 大学院工学研究院機械工学部門 古川雅人

1. 緒言

風力発電は、地球温暖化の原因となる CO2 を排出しないクリーンで再生可能なエネルギー源の利用として全世界で普及が進んでいる。しかしながら風力発電は十分な風速がないと効率的な発電ができないという問題点をもつ。この問題点を克服するため、翼車まわりに風を局所的に集中させる機能をもつ「風レンズ」(集風体)を装着した「風レンズ風車」が九州大学において独自に開発された。風車翼に関しては、風レンズ風車の簡易理論⁽¹⁾と翼力を考慮した軸対称子午面粘性流れ解析⁽²⁾を用いた準三次元空力設計法が構築され、スパン方向負荷分布を考慮することが可能となっている。

本研究では、準三次元空力設計法により設計された風レンズ風車翼に対し、風洞実験および三次元定常 RANS 解析を実施した。また風洞実験の結果から、準三次元空力設計法を構成する翼力を考慮した軸対称子午面粘性流れ解析および三次元定常 RANS 解析の妥当性を評価した。

2. 翼力を考慮した軸対称子午面粘性流れ解析

翼力を考慮した軸対称子午面粘性流れ解析(以下、子午面流れ解析)では、軸対称かつ粘性流れを仮定するが、軸対称の仮定の下で翼車の作用を考慮するために、翼両面の圧力差に基づく翼力(体積力)を導入した。この翼力を付加した軸対称の Navier-Stokes 方程式を、設計条件として与えられる翼負荷(旋回度)分布のもとに数値的に解き子午面流れを求める。翼力の周方向成分は次式であらわされる。

$$F_{\theta} = \rho \frac{c_m}{r} \frac{\partial}{\partial m} (rc_{\theta}) \quad (1)$$

ここで、 r は半径、 ρ は密度、 c_m および c_{θ} は絶対速度のそれぞれ子午面方向成分および周方向成分、 m は子午面流れに沿った距離である。

3. 数値解析手法

子午面流れ解析および三次元定常 RANS 解析は、Wilcox の $k-\omega$ 乱流モデル⁽³⁾を用いた圧縮性 Reynolds 平均 Navier-Stokes 方程式(RANS)を基礎方程式としている。数値計算手法として、有限体積法による緩和型陰的高解像度風上スキーム⁽⁴⁾を用いた。非粘性流束は Roe の近似 Riemann 解法を用いた MUSCL 形の高次精度 TVD 法により、粘性流束は中心差分的に評価された。線形化されて得られた連立一次方程式は、近似因子化法によらず、Gauss-Seidel 形の点緩和法により解かれた。

4. 実験解析手法

実験に用いた風洞は、九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞である。この風洞は 3.6m 幅×2m 高さ×15m 長さの測定部を有し、最大 30m/sec まで風速を任意に設定することが可能である。大気開放状態を模擬するため、風車設置位置に対して上流側 2m から下流側 4m までの風洞壁を取り外した状態で実験を行った。また実験ではトルク計による軸トルク計測および熱線流速計と静圧管による流速・静圧測定を行った。流速・静圧測定位置は図 1 に示す Turbine Inlet, Turbine Outlet, Diffuser Outlet の 3 段面で行った。

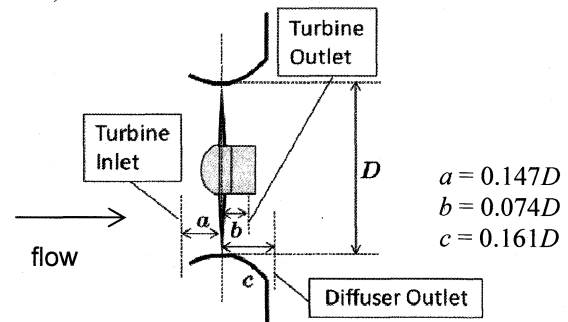


Fig.1 Measurement locations

5. 解析結果

図 2 に本研究で解析を行った風車翼の三次元定常 RANS 解析結果について、その周方向平均流れ場の子午面流れを示す。風レンズ入口の流線に着目すると、流れが翼車のほうへ引き込まれている様子が確認される。すなわち、風レンズによる集風効果が確認される。また風レンズ後方の流線に着目すると、はく離渦が確認される。

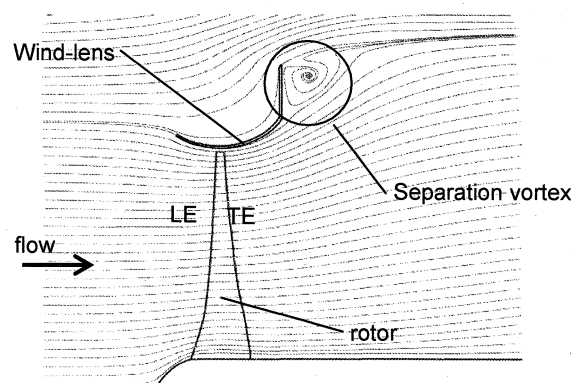


Fig.2 Meridional streamlines

図4に風車後面(図1の Turbine Outlet 部)における流速・静圧分布を示す。図4を見ると、流速および静圧ともにミッドスパン域において実験結果と数値解析結果に差が見受けられる。これは三次元定常 RANS 解析および子午面流れ解析においてスパン方向の負荷勾配により生じる随伴渦の影響を十分に考慮できていないためだと考えられる。本解析対象の風車翼は、ミッドスパンに高い負荷を持つ設計負荷分布を用いて設計された。三次元定常 RANS 解析では計算負荷の観点から翼のスパン中央部における格子を粗くしており、また子午面流れ解析は二次元解析であるため、随伴渦の影響を考慮できていないことが推察される。しかし、実験結果と三次元定常 RANS 解析および子午面流れ解析結果は定性的には十分一致していると言える。

図5にディフューザ後面(図1の Diffuser Outlet 部)における流速・静圧分布を示す。図5の流速分布を見ると、 $r/D > 0.5$ で実験結果と数値解析結果に差が見受けられる。これは図2に示す風レンズ後方のはく離渦の影響で流速が正確に測定できていないためである(本研究で用いた熱線風速計は、逆流域の測定ができない)。また静圧分布についても $r/D > 0.5$ で実験と数値解析結果に差が確認されるが、これも前述のはく離渦の影響である。翼車を通じた流れと風レンズ外部を通じた流れは風レンズ後方でミキシングする。このため図2に示すようなはく離渦が発生し、そのはく離渦により流れ場は非定常性を示す可能性がある。したがって $r/D > 0.5$ で数値解析の精度向上のためには、計算格子数の増加もしくは非定常解析の実施が必要である。しかし $r/D < 0.5$ では流速および静圧とも実験結果と三次元定常 RANS 解析および子午面流れ解析結果は定性的にはよく一致しており、数値解析の妥当性が示唆される。

6. 結言

準三次元空力設計法を用いて設計した風レンズ風車翼に対して実験解析および三次元定常 RANS 解析を実施し、設計された翼車の性能評価および翼車周りの渦流れ場を解析した。また風洞実験の結果から、準三次元空力設計法および三次元定常 RANS 解析の妥当性を確認した。

参考文献

- (1) 井上雅弘, 他, ターボ機械, vol.30, No.8(2002), pp.46-51
- (2) S.Tabata, et al., Memories of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol.67, No.4, December 2007
- (3) Wilcox, D. C., AIAA Journal, Vol. 26, No. 11, pp. 1299-1310, 1988.
- (4) Furukawa, M., et al., Trans. ASME, Journal of Turbo -machinery, Vol. 114, No. 3, pp. 599-606, 1992.

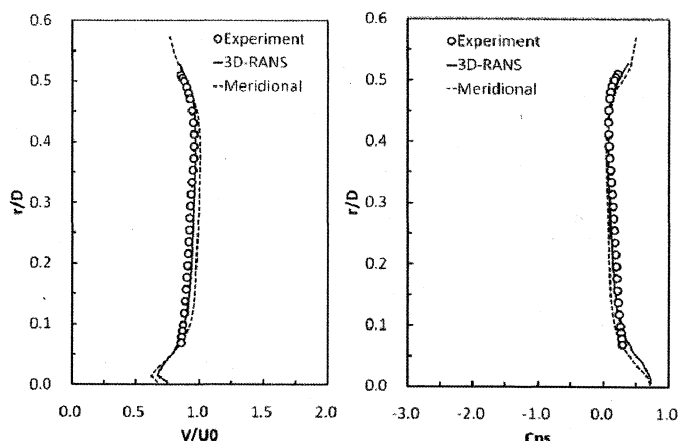


Fig.3 Spanwise distributions of velocity and static pressure at Turbine inlet

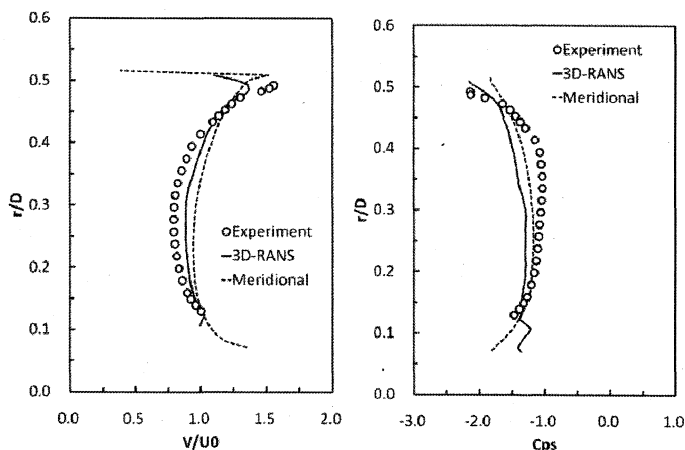


Fig.4 Spanwise distributions of velocity and static pressure at Turbine outlet

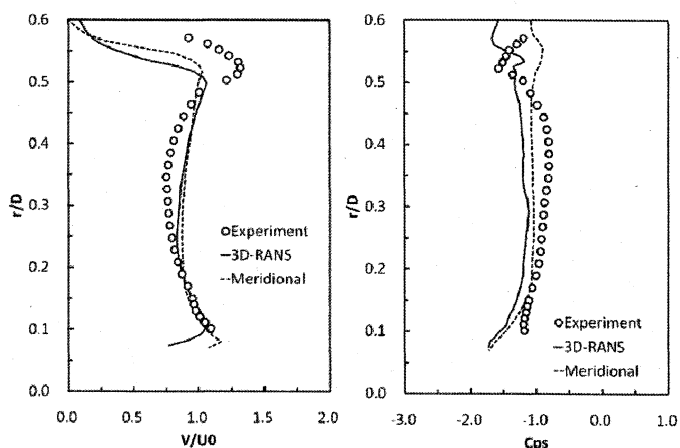


Fig.5 Spanwise distributions of velocity and static pressure at Diffuser outlet

【D27】弱回転サッカーボールの空気密度の違いによる飛翔計算と風洞実験による空気力の測定

07E1011 内田 雅彦 07E1066 安田 晃 07E2014 大畑 雅也
 指導院生 藤村 龍平 指導教員 溝田 武人 教授

1. 緒言

昨年の夏に開催された2010 FIFA World Cup South Africaは、初のアフリカ大陸での開催であった。見所の一つは、世界の一流選手たちが繰り出す「ブレ球」と呼ばれる予測不能のシュートである。昨年までの研究により、タフト法可視化実験や煙法可視化実験でこの魔球の変化のメカニズムは解明されている。¹⁾

2010年の大会ではおよそ1500mの高地でも試合が行われ、選手たちは開催前の合宿から普段と比べボールの軌道が「伸びる」と言っていた。このことから本研究では空気密度の違いに目を向けた。空気密度が海拔0mと海拔1500mではボールの軌道に影響を与えていると思われる。本研究では過去の3分力風洞実験データを用いて空気力から2回積分することで、ボールの飛翔軌道を計算した。空気密度を標高0m, 1500m時の値で計算しボールの飛翔軌道の違いを求めた。

また、「ブレ球」の発生回転数を探るため、ボールを回転させた時の空気力を測定する装置を作製した。他にも様々な変化をする回転方向があるが、まずはローリング回転装置を作成し予備実験を行った。回転軸には回転や回転速度から信号が入るので、そこで出たデータをフーリエ変換しそれを逆フーリエ変換することで、実験データの正確性を図った。実験は風速や回転数を変えての九州大学大型風洞実験施設で実験を行う。

2. 飛翔計算

2.1 空気密度による飛翔計算

まずは、数値積分の正確性の検証を行う。ボールの速度は $U(t)=at+b$ で変化すると仮定し、抗力 C_D 、揚力 C_L 、横力 C_S を一定値とすると、 $F_D(t), F_L(t), F_S(t)$ 及び $x(t), y(t), z(t)$ は以下ようになる。

$$\begin{aligned} m a_x &= F_D = 0.5\rho(at+b)^2 A C_D \\ m a_y &= F_L = 0.5\rho(at+b)^2 A C_L \\ m a_z &= F_S = 0.5\rho(at+b)^2 A C_S \end{aligned}$$

$$x(t) = -\frac{1}{2m} \rho \left(\frac{a^2}{12} t^4 + \frac{ab}{3} t^3 + \frac{b^2}{2} t^2 \right) A C_D + u(0) + x(0)$$

$$y(t) = \frac{1}{2m} \rho \left(\frac{a^2}{12} t^4 + \frac{ab}{3} t^3 + \frac{b^2}{2} t^2 \right) A C_L - \frac{1}{2} g t^2 + v(0)t + y(0)$$

$$z(t) = \frac{1}{2m} \rho \left(\frac{a^2}{12} t^4 + \frac{ab}{3} t^3 + \frac{b^2}{2} t^2 \right) A C_S + w(0)t + z(0)$$

一方、数式の微分計算は

$$m \cdot \frac{d^2 \{x(t), y(t), z(t)\}}{dt^2} = \frac{1}{2} \rho U(t)^2 A \{C_D, C_L, C_S\} \Delta t$$

$$\frac{dx(t), y(t), z(t)}{dt} = \frac{1}{2m} \rho \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n U(t)^2 \{C_D, C_L, C_S\} \Delta t$$

$$x(t), y(t), z(t) = \frac{1}{2m} \rho A \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=0}^i U(t)^2 \{C_D, C_L, C_S\} \Delta t \right) \Delta t$$

$a=4.667, b=26$ (初速度), $C_D=0.18, C_L=C_S=0.1$ とし、Y方向に関する式は重力加速度 g を与えている。この結果、理論計算と数値積分は完全に数値計算はエクセルで正しく行えることが分かった。

3. サッカーボール回転時の空気力の測定

3.1 サッカーボール自動回転装置の開発

サッカーボール自動回転装置を開発にあたって、3分力ロードセルは、5kgまでしか負荷をかける事ができない。モータは、MAXONのギアドモータを使用して弱回転のボールを再現させた。ボールを回転させる為にシャフトにベアリングを通して固定した。全体の総量は1.1kgとなった。Photo.1は、全体図である。また、ボールの回転をローリング回転とし、どのような空気力が測定できるのか確認を行う。

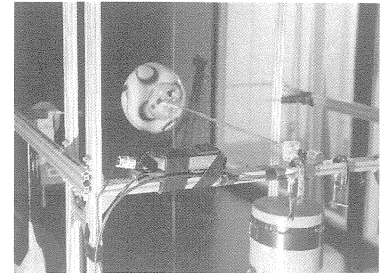


Photo.1 サッカーボール回転装置全体図

3.1.2 風洞装置

九州大学応用力学研究所の風洞実験装置(地球大気動態シミュレーション装置)を共同研究により使用し風洞実験を行った。風洞測定部の寸法は、高さ×幅×長さ=2×3.6×15[m]、乱れ度($\sigma_u = \bar{u}/U \times 100$)は0.5%である。

3.1.3 実験方法

3分力ロードセルを使い、抗力、揚力、横力を測定する。ボール支持部の固有振動数は、[10Hz]であった。はじめにキャリブレーションを行い、0点電圧を測定する。その後ボールを0[rps]で回転させ、流速18~30[m/s](2[m/s]刻み)で計測を行う。同様に、1[rps], 2[rps], 3[rps]と計測していく。回転数の測定には、デジタルタコメーターとオシロスコープを使い、1[rps]のときには1[Hz]のように周波数を測る方法を利用して計測を行う。

3.1.4 空気力の解析方法

まず、測定した結果の抗力、揚力、横力の電圧をExcelを使いフーリエ解析を行い、 A_n, B_n (実数部係数、虚数部係数)を算出する。その後、振幅-周波数のグラフを作成し、各流速の最大振幅の位置を補正。補正後の流速のデータから流速0mを差し引き、逆フーリエ解析を行い空気力の算出を試みた。なお、フーリエ解析に使用したデータのサンプル数は1024である。

4. 計算と実験の結果

4.1 空気密度の違いによる計算

過去のデータを用いて、海拔 0[m]地点での空気密度は気温 22.8℃、1 気圧の時、 $\rho=1.188[\text{kg}/\text{m}^3]$ である。また、同様の条件下で標高 1500[m]の平均的な空気密度は $\rho=1.0215[\text{kg}/\text{m}^3]$ である。ボールの速度は 26[m/s]から減速しているものとする。Fig.1 に理論計算と数値積分の比較したグラフを、Fig.2 に海拔 0[m]地点と標高 1500[m]地点でのサッカーボールの飛翔軌道と比較したグラフを示す。この飛翔時間は 1.5[s]で計算を行った。

この結果、最終地点での速度は 1[m/s]速くなり、高度が高くなった時にはボールの飛距離が約 1[m]伸びることが分かる。

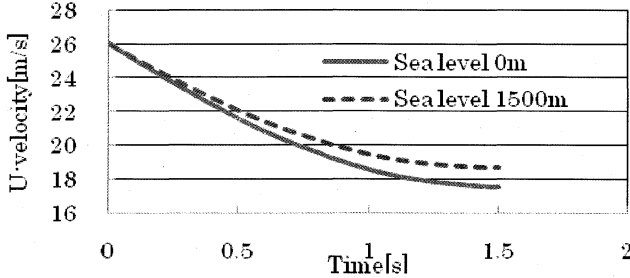


Fig.1 Speed of ball traveling direction

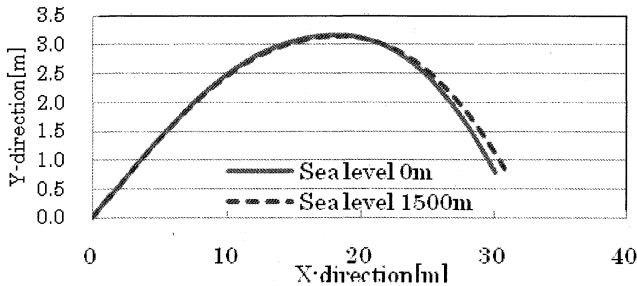


Fig.2 X-Y plain

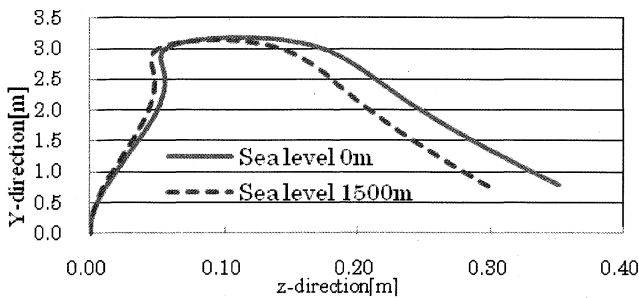


Fig.3 (c) Y-Z plain

3.2 サッカーボール回転時の空気力の測定

今回の空気力の測定は、サッカーボール回転装置の予備実験として行う。

ここで求めた各空気力の係数をグラフ化した結果、s in 波のような波形となった。これは、設置の際、ボールの重心が取れておらず、慣性力が働いたため、回転力を伝えるシャフトが変身しており振動がロードセルに伝わったための二つの原因が考えられる。そこで、流速 0[m/s]で慣性力のみ働いている状態の結果とその他の流速の結果を互いにフーリエ解析しその差を取った後、逆フーリエ解析を行い空気力のみデータを作成した。

Fig. 4 には 0rps と 0.5rps を比較した揚力係数、Fig. 5 には横力係数、Fig. 6 には抗力係数を示す。

この結果、空気力のみの場合と回転させたときの誤差が大きい。そのため、今回の実験ではサッカーボール回転装置自体に改良の余地がある事が分かった。

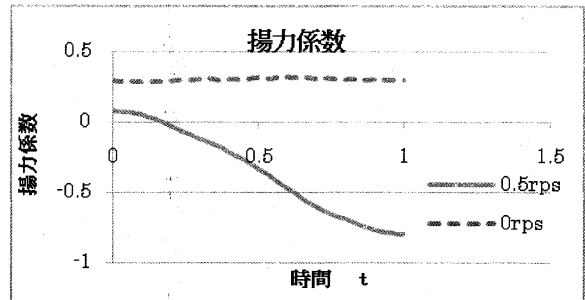


Fig.4 揚力係数の比較

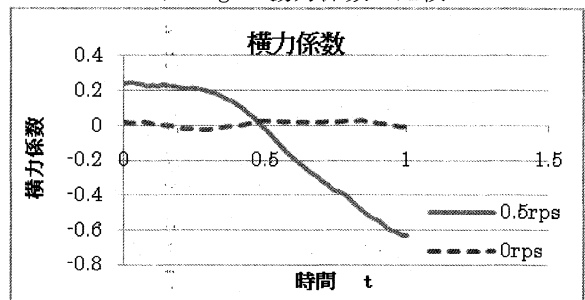


Fig.5 横力係数の比較

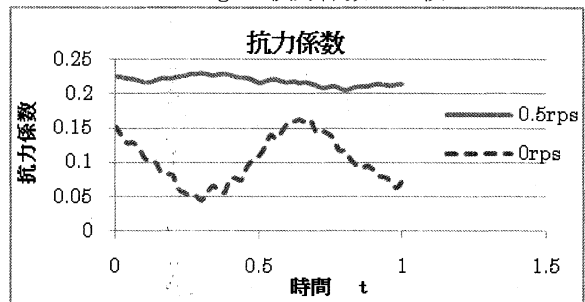


Fig.6 抗力係数の比較

4. まとめ

今回の研究で、以下のようなことが分かった。

1. 空気密度の違いによるサッカーボールの軌道計算では、標高 1500m で蹴った場合に 30m に対して 1m ほど飛距離が伸びることが確認された。
2. サッカーボール回転時の予備実験では、空気力のみの場合と誤差が出たため装置の改良が必要であることが分かった。

5. 今後の課題

1. サッカーボール内部の空気が入る部分に発泡ウレタンを挿入し、外からセットボルトを閉めることにより重心を取りやすくするよう改良を行う。
2. さらに様々な回転の空気力の検証が必要なので、回転角度を自由に定めることのできる機構の検討。

参考文献

- 1) 黒木康平(福岡工大院):2009 年度福岡工業大学工学研究科知能機械工学専攻 修士研究論文:「弱回転サッカーボールの魔球的变化に関する発生メカニズムの空気力学的研究」,(2009)pp.4-94

多孔質バイオセラミックスと骨組織再生の 生体力学的相互作用に関する研究

大阪大学附属病院未来医療センター 名井 陽

1. 緒言

骨腫瘍や嚢胞あるいは人工関節周辺での骨吸収などにより骨組織の欠損が生じた場合に、できるだけ迅速かつ確実に治療するためには、何らかの補填を行って治癒過程を促進させる必要がある。そこで、自家骨、他家骨、あるいは人工骨による骨再生治療が行われているが、最近では、骨親和性、骨伝導性に優れる多孔質材料を応用した骨再生が検討され臨床応用が進んでいる。特に、多孔質構造のバイオセラミックスは、人工骨として現在、臨床応用されている。人工骨には吸収性と非吸収性が存在し、生体に埋入後、骨組織の再生と吸収挙動の影響により力学的特性は変化するが、その詳細は未だ不明な点が多い。そこで、本研究では、非吸収性の多孔質ハイドロキシアパタイト (HA) を用いた骨再生実験結果と数値解析結果を比較検討し、多孔質 HA の力学特性に及ぼす骨再生の影響を定量的に評価することを目的とした。

2. 動物実験

Fig.1 に実験で用いたハイドロキシアパタイト製人工骨の微視構造を示す。空孔径の平均サイズは $150\mu\text{m}$ であり、連通構造となっている。円柱状のハイドロキシアパタイト製人工骨をウサギ大腿骨に埋入した状態でウサギを最長 48 週間飼育し、 μ -CT による構造観察や力学試験を行い骨組織再生の影響を評価した。Fig.2 に 1 週間後と 48 週間後の人工骨内の状態を示す。染色され暗い色を示す部分が骨組織であり、1 週間後では人工骨内には骨組織は侵入していない。しかし、48 週間後には人工骨内は青色で示される骨組織で満たされており、人工骨内への骨組織の侵入が確認できる。

3. 数値解析

3.1 解析モデルの構築

ウサギ大腿骨に多孔質ハイドロキシアパタイト人工骨を最大 48 週埋入し、一定期間ごとに μ -CT による構造観察を行った。その際の μ -CT 画像を用いて、一辺が $500\mu\text{m}$ の立方体形状のモデルを代表要素として作成した。代表要素は人工骨内の任意の 3 か所を抽出し、作成した。Fig.3 に 1 週目の代表要素モデルのメッシュ図、ソリッド図を示す。CT のスライス間隔は $10\mu\text{m}$ である。また、CT 値から求めた密度分布を反映させるために、重量密度の上限をハイドロキシアパタイトの密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ に設定した。解析の境界条件は、上部を完全固定し、下部から鉛直方向 (+Z 方向) に分布荷重 1N を与えることで、圧縮試験を想定した (Fig.4)。数値解析結果から、ひずみエネルギー密度 (SED) と弾性率を評価した。弾性率については、荷重作用面における節点の平均変位を用いて算出し、実験結果と比較検討を行った。

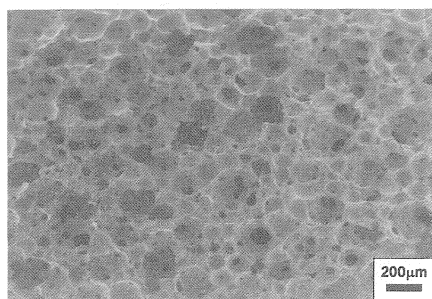
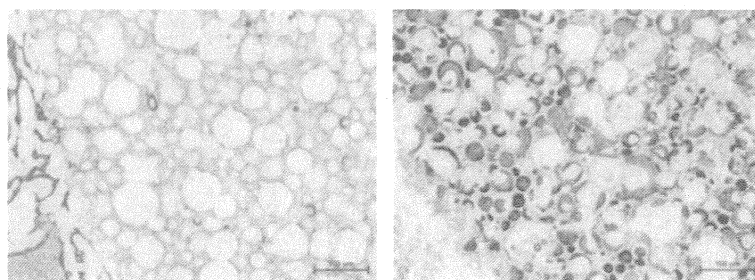


Fig.1 SEM micrograph of porous HA.



(a) one week (b) 48 weeks
Fig.2 Bone ingrowth behavior in porous HA specimen.

3.2 解析結果

ひずみエネルギー密度分布を Fig.5 に示す。埋入期間経過に伴い、人工骨内部での骨組織形成によって SED の局所的集中箇所が減少した。Fig.6 に実験結果と解析結果から算出した弾性率のグラフを示す。双方ともに埋入後 24 週まで増加し、48 週で減少する同様の傾向を示した。この傾向は実験結果より得られた圧縮強度の結果と類似していることから、圧縮弾性率と圧縮強度の間に相関関係があることが示唆される。そこで、数値解析で得られた圧縮弾性率から圧縮強度の予測を試みた。代表要素の圧縮ひずみが、ある臨界値 ϵ_c に達したときに破壊すると仮定する。このとき、要素の変形は人工骨のみに依存すると仮定する。また、線形弾

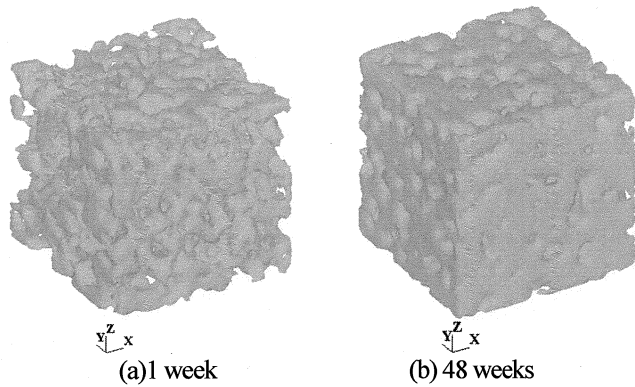


Fig.3 Representative computational models.

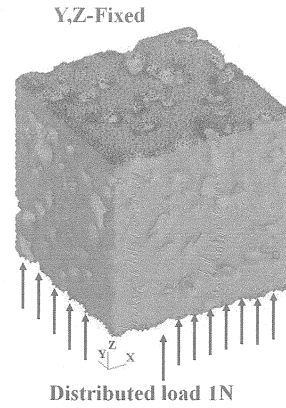


Fig.4 Boundary conditions.

性を仮定すると、圧縮強度 σ_c と ε_c の関係は

$$\sigma_c = E\varepsilon_c \quad (1)$$

となる。ここで、 E は圧縮弾性率である。 ε_c は一定であるので、(1)式を1週間後の圧縮強度 σ_{c1w} で規格化すると

$$\sigma_c / \sigma_{c1w} = E / E_{1w} \quad (2)$$

ここで、 E_{1w} は1週間後の弾性率である。この(2)式を用いて1週目の強度で各週の強度を規格化した結果と数値解析結果を Fig.7 に示す。解析結果をそのまま適用した場合、Fig.7 に示すように過小評価となり実験結果との間に大きな差が生じている。この差の主因として μ -CT の解像度の影響が考えられ、実際の空孔サイズよりも数値解析モデルの空孔は小さくなるため過大評価となる傾向にある。そこで、本研究では人工骨の気孔率に着目して、次式のような補正を試みた。

$$(\sigma_c)_{cor} = \alpha(\sigma_c)_{sim} = (P_{model}/P_{true})(\sigma_c)_{sim} \quad (3)$$

ここで、 α は補正係数、 P_{model} と P_{true} は数値モデルと実際の気孔率である。 P_{true} は、SEM 画像を二値化処理し、材料と空孔の比で算出した結果、約 70.5%であった。数値解析モデルについては、各モデルの任意断面における空孔を除いた面積を各軸方向に 6 個ずつ計 18 断面について求めた値をもとに算出した結果、約 42.99%であった。 σ_{c1w} を(3)式を用いて補正した結果を Fig.7 に示す。気孔率で補正した曲線は実験結果とよい一致を示していることがわかる。

4. 結 言

非吸収性多孔質 HA による骨再生では、24 週まで力学特性は増加し、その後減少する傾向にあることがわかった。圧縮強度は、ひずみを破壊クライテリオンとすることで、弾性率から予測可能であることが示唆された。また、気孔率に基づく補正が有効であることが示された。

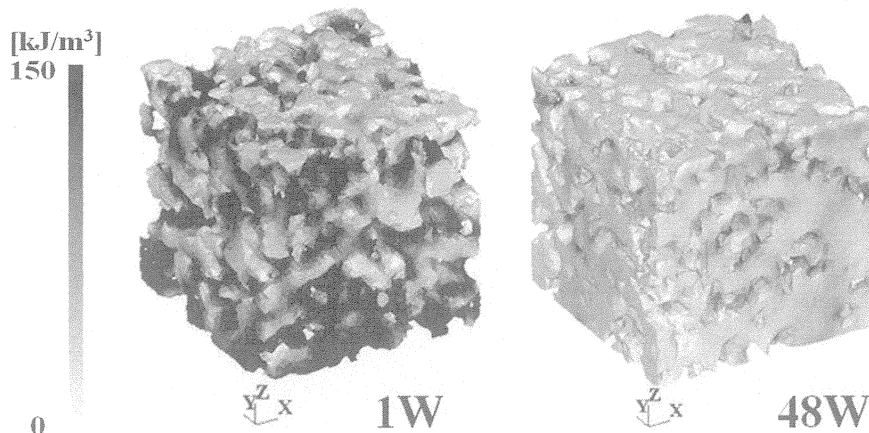


Fig.5 Distribution of strain energy density.

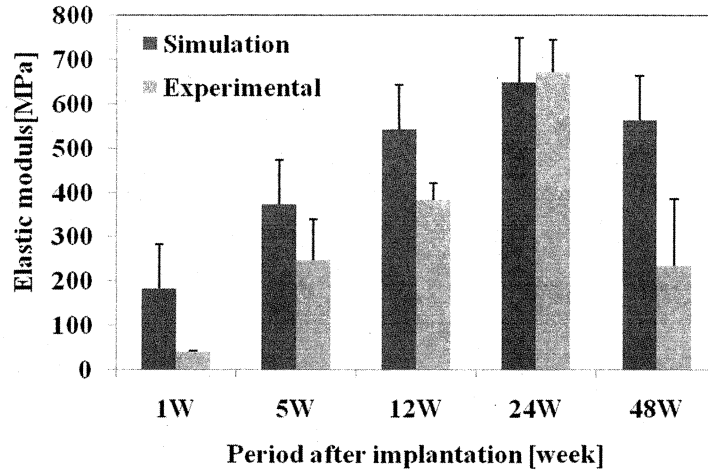


Fig.6 Comparison of compressive modulus.

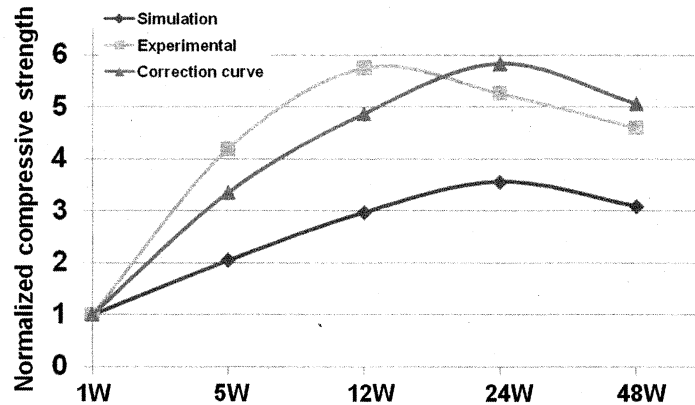


Fig.7 Prediction of compressive strength.

成果報告

- 1) L.M. Ren, M. Todo, T. Arahira and A. Myoui, Biomechanical interaction between porous bioactive ceramics and regenerated bone tissue, Proceedings of The 2nd International Conference on Nanomechanics & Nanocomposites, 2010, pp.258-261.
- 2) 荒平高章, 東藤貢, 名井陽, 骨組織形成による多孔質バイオセラミックスの力学特性変化に関する研究, 日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス, 長岡技術科学大学, 2010/10-9-11.
- 3) 荒平高章, 東藤貢, 名井陽, 多孔質バイオセラミックスによる骨再生のバイオメカニクスの検討, 第 32 回日本バイオマテリアル学会大会, 広島, 2010/11/29-30
- 4) 荒平高章, 東藤貢, 名井陽, 多孔質バイオセラミックスの力学特性に及ぼす骨組織再生の影響, 第 37 回日本臨床バイオメカニクス学会, 京都, 2010/11/1-2
- 5) 東藤 貢, 荒平 高章, 名井 陽, 多孔質バイオセラミックスによる骨再生のバイオメカニクスの検討, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会, 北見, 2010/9/23-25

研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
名井 陽	大阪大学未来医療センター	准教授	研究代表者, 臨床的考察
任 麗梅	応用力学研究所	研究員	数値解析
荒平 高章	総合理工学府	D1	数値解析
東藤 貢	応用力学研究所	准教授	所内世話人, 生体力学解析

下肢屈曲動作に基づく人工膝関節の安全性評価

愛媛大学大学院医学研究科 三浦裕正

1. 緒言

現在、高齢化に伴い高度な膝関節障害を持つ患者が増加しており、これに対する有効な治療法である人工膝関節全置換術(TKA)の重要性がますます高まっている。ただし、TKAの問題点として、超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)製の脛骨インサートの経年性摩耗や破損、また膝の屈曲角度の制限などが挙げられており、これらを改善するために、インサートの性能向上に関する研究が多く行われている。インサートの性能向上を実現するためには、生体膝内部におけるインサートの力学状態を明らかにすることが重要であり、このうち膝屈曲時の関節挙動については、膝シミュレータによる実験的研究が行われている。膝シミュレータは膝関節を機械的に模したものであり、膝の屈曲挙動や単純な関節間荷重を計測する有効な方法として広く用いられている。しかし、膝シミュレータによる実験では、詳細な応力状態について得ることができない。そこで、有限要素法(FEM)を用いた数値解析と併用し膝の受動的運動を再現することで、膝の屈曲状態と脛骨インサートの応力状態の関係性を明らかにすることができ、人工膝関節の開発において有意な指標を得ることができると考えられる。

我々の研究グループは、これまでバーチャルにモデル化した膝シミュレータを開発し、FEMによる人工膝関節の応力解析に適用することを目標として研究を進めてきており、大腿四頭筋およびハムストリングを考慮した膝シミュレータモデルの開発に成功し人工関節解析に応用してきている。本研究では、ハムストリングの筋力がシミュレータの屈曲挙動に及ぼす影響について調べたので報告する。

2. 解析モデル

2-1 膝シミュレータ

本研究で作成した膝シミュレータモデルを Fig. 1 に示す。モデルの作成には SolidWorks を使用した。機械構造体部は、実際のシミュレータを参考に構築し、骨および膝蓋腱は、右足膝関節の CT 画像と MRI 画像を用いて作成した。ここに人工膝関節モデルを置換することで、TKA 後の膝を再現した。使用した人工膝関節は Stryker 社製の NRG (Size3, Thickness8) である。筋肉は大腿四頭筋 (QF) と、ハムストリングとして大腿二頭筋 (BF)、半腱様筋 (ST)、半膜様筋 (SM) を考慮した。QF は大腿骨との接触を考慮して円柱ソリッドモデル、ハムストリングは計算コストを考慮してトラスモデルでそれぞれ構築した。

次に、作成したソリッドモデルから、FEMAP を用いて有限要素モデルを 4 節点 4 面体要素およびトラス要素で構築した。総節点数は 136,459、総要素数は 590,213 である。このモデルを元に、汎用動的有限要素コードである LS-DYNA で有限要素解析を行った。

2-2 力学モデルの設定

機械構造体部、骨、大腿骨・脛骨コンポーネントについては剛体と仮定した。脛骨インサートについては弾塑性体とし、実験より得られた応力-ひずみ関係を 3 直線近似したものを採用した。膝蓋腱および QF については弾性体を仮定し (膝蓋腱: $E=60\text{MPa}$ 、QF: $E=120\text{MPa}$ 、 $\nu=0.3$)、側副靭帯についてはせん断弾性係数 G が次式で示される Maxwell 粘弾性モデルを採用した。

$$G(t) = G_{\infty} + (G_0 - G_{\infty})e^{-\beta t} \quad (1)$$

また、ハムストリングは、弾性体 ($E=90\text{MPa}$ 、 $\nu=0.3$) 要素と能動的収縮力要素からなる Hill 筋肉モデルで定義した。Hill 筋肉モデルの収縮力 F_{Hill} は最大収縮力 F_{max} と能動化レベル α の積で示される。

$$F_{\text{Hill}} = \alpha \cdot F_{\text{max}} \quad (2)$$

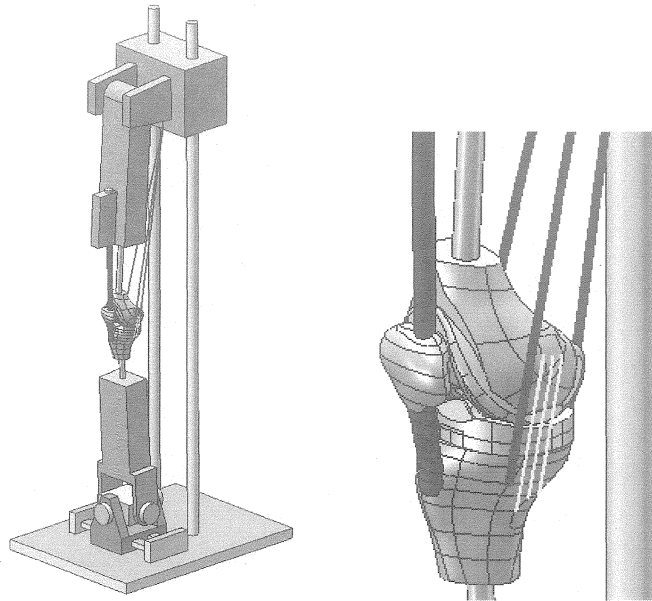


Fig.1 Knee simulator model.

2-3 境界条件

本解析では床面を完全に固定し、体重負荷 F_1 (シミュレータ上部、垂直下方向) および筋力 F_{QF} 、 F_{BF} 、 F_{ST} 、 F_{SM} (筋軸方向) を付加した。筋力については、 F_{QF} は筋上端に引張荷重を加え、 F_{BF} 、 F_{ST} 、 F_{SM} は Hill 筋肉モデルの能動化レベルを調整することで、それぞれ再現した。各値は、 $F_1=300\text{N}$ 、 $F_{QF}=200\text{N}$ 、 $F_{BF}=100\text{N}$ 、 $F_{ST}=100\text{N}$ 、 $F_{SM}=0\text{N}$ とした。各値は $F_1=300\text{N}$ を基準に試行錯誤的に決定した。

3. ハムストリングと屈曲挙動の関係性

上記の条件で解析を行ったところ、内旋を含む屈曲角度 125 度までの屈曲動作を得ることが出来た。次に、ハムストリングが屈曲動作に及ぼす影響を調べるために、筋力を調整して解析を行った。具体的には、(a)ハムストリングを除去した場合(no hamstring)、基準とする条件として (b) $F_{BF}=100\text{N}$ 、 $F_{ST}=100\text{N}$ 、 $F_{SM}=0\text{N}$ の場合、(c)基準値から F_{BF} のみを 40N まで下げていった場合、(d)基準値から F_{ST} のみを 40N まで下げていった場合、また (e)基準値から F_{BF} と F_{ST} の両方を 40N まで下げていった場合の、5 つのケースについて解析を行い屈曲に伴う回旋挙動と応力状態の推移を確認した。なお、その他のパラメータについては上述の条件と同様とした。

4. 解析結果および考察

屈曲に伴う膝の回旋角度の変化を Fig.2 に示す。ここでは正の方向を内旋方向と定義している。解析では (a)のみが最大 11 度となる大きな外旋挙動を示し、(b)～(e)は内旋挙動を示した。(b)～(e)について、(b)(c)は最大内旋角度 17 度程度となる同様の傾向を示した。一方、(d)は、最大内旋角度は (b)(c)と同様の値を示したが、屈曲角度 100～120 度での内旋角度の増大が、(b)(c)にくらべゆるやかなものになった。(e)では、屈曲域全体で内旋角度が小さくなり、最大内旋角度も 9 度と小さくなった。

(a)のみが外旋挙動を示した理由としては、このモデルだけがハムストリングを除去したモデルであり、ハムストリングによる拘束が働かなかつたためであると考えられる。実際の膝では屈曲に伴い内旋の傾向を示すことが臨床例として報告されており、したがって解析する上では、ハムストリングによる拘束を働かせることが前提として必要であることが確認される。

次にハムストリング筋力の影響について考察する。まず (b)～(d)をみると、BF の筋力を下げても回旋に差

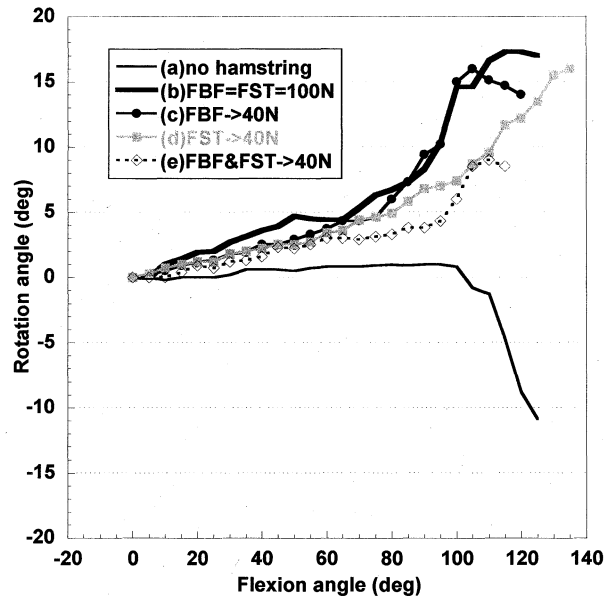


Fig.2 Knee rotation of movement.

異がみられなかったのに対し、STの筋力を下げると高屈曲位での挙動に違いがみられたことから、高屈曲位での回旋挙動にはST筋力の影響が大きいことがうかがえる。また、(e)で最大内旋角度が減少したが、これはハムストリングの最大筋力が減少し、拘束力が弱くなったためと考えられる。このことから、回旋角度にはハムストリングの最大筋力が影響することが示唆される。

屈曲角度 120 度での脛骨インサート表面でのミーゼス相当応力分布図を Fig. 3 に示す。どの条件においても、condylar 面と post 面で応力集中が生じており、特に post と大腿骨コンポーネント cam との接触により生じた応力集中が高いことがわかる。また、各条件での分布状態を比較すると、応力集中の度合いや分布域に差異が見られるが、このことはハムストリング筋力の変化、またそれに伴う回旋挙動の変化が、応力分布に影響していることを示している。

以上の結果より、膝シミュレータモデルによる人工膝関節の屈曲解析において、回旋挙動にはハムストリングの影響が大きく、高屈曲位での回旋挙動にはSTの筋力が、回旋角度にはハムストリングの最大筋力が、それぞれ影響することが示唆された。また回旋挙動の変化が、応力分布に影響することが認められた。今後さらに他のパラメータの影響についても明らかにすることで、より詳細で正確な解析制御につなげられると考えられる。

5. 結 言

本研究では、膝シミュレータモデルを構築し、有限要素法による人工膝関節の屈曲解析を行った。その結果、次の結果が得られた。

- 1) 体重負荷と筋力を考慮した解析を行い、内旋を伴う最大屈曲角度125度までの屈曲動作を得た。
- 2) ハムストリング筋力と屈曲挙動の関係性を調査したところ、高屈曲位での回旋挙動にはSTの筋力が、回旋角度にはハムストリングの最大筋力が、それぞれ影響することが示唆された。

今後は、本シミュレータを用いた解析手法を確立していくとともに、異なる人工膝関節を装着した場合の応力解析を行い比較検討していく予定である。

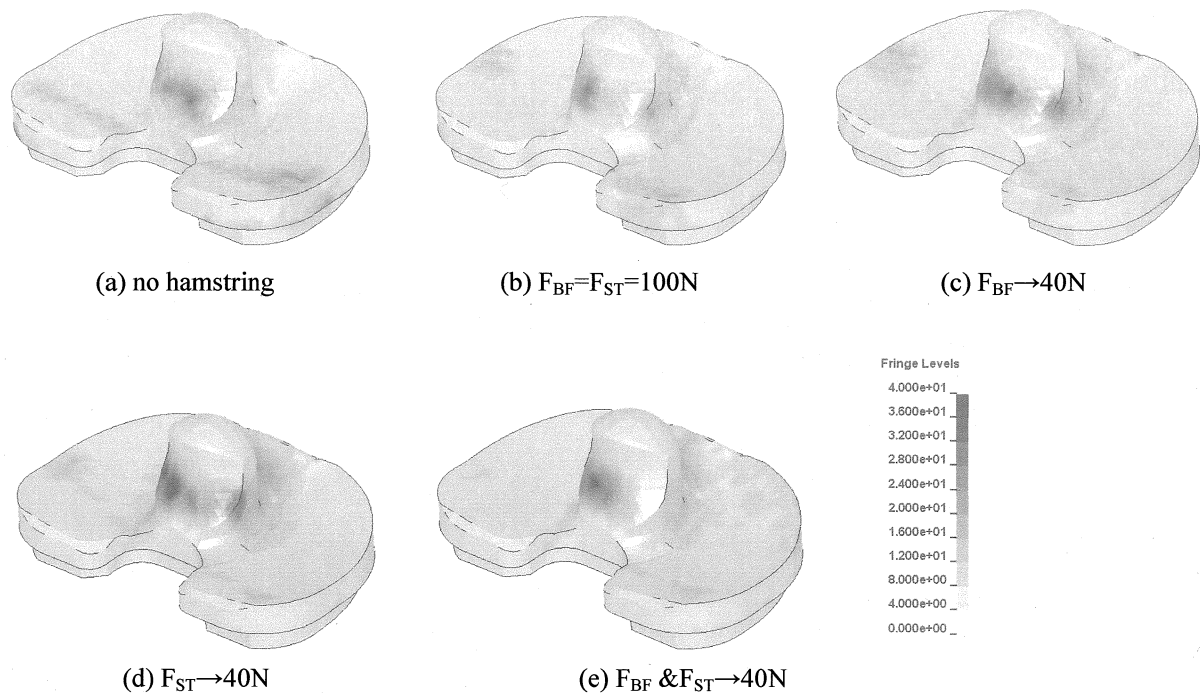


Fig.3 Knee simulator model. The unit of the fringe level is MPa.

成果報告

- 1) 大野充孝, 東藤貢, 日垣秀彦, 三浦裕正, 長嶺隆二, バーチャル膝シミュレータの屈曲動作に及ぼす筋肉モデルの影響, 第37回日本臨床バイオメカニクス学会, 京都, 2010年11月1日~2日
- 2) 大野 充孝, 東藤 貢, 日垣 秀彦, 三浦 裕正, バーチャルシミュレータによる人工関節置換膝の深屈曲解析, 日本機械学会第23回計算力学講演会, 北見, 2010年9月23日~25日
- 3) 東藤貢, 大野充孝, 日垣秀彦, 三浦裕正, 長嶺隆二, バーチャル・膝シミュレータを用いた屈曲動作解析における回旋の制御, 第41回日本人工関節学会, 東京, 2011年2月25日~26日

研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
三浦裕正	愛媛大学医学研究科	教授	研究代表者, 臨床的考察
日垣秀彦	九州産業大学工学部	教授	動作解析
東藤 貢	応用力学研究所	准教授	所内世話人, 生体力学解析

次世代人工股関節と生体股関節の力学的相互作用に関する研究

九州大学大学院医学研究院 中島 康晴

1. 緒言

近年、高齢化に伴い変形性股関節症患者数が増加している。この病気の末期状態に対しては、人工股関節置換術（THA）が通常施され、痛みが取り除かれると共に関節機能は大幅に回復する。しかし THA を施すことで、剛性が高い金属コンポーネントと骨が直接接触し、力学的な伝達が行われるために、通常の骨では起こり得ないような現象が生じることが知られている。たとえば、大腿骨ステム周辺の皮質骨に応力が十分に伝わらずに力学刺激が減少し、骨が吸収されてしまうストレス・シールド現象が報告されている。骨吸収が生じるとステムの緩みが生じ、人工関節は不安定な状態となるため、再置換が必要となる。このとき、骨吸収の状態が著しいと骨の再生や再健が必要となり、手術は厳しいものとなる。

そこで本研究では、変形性股関節症を患った股関節に THA を施した場合に、臼蓋や大腿骨の応力状態がどのように変化するかを、骨密度分布を考慮した 3 次元実構造モデルの数値解析を通して明らかにすることを目的とした。さらに、構成材料とステム形状が異なる 2 種類の人工股関節を置換したモデルを比較検討することで、骨の応力状態に及ぼす材質とステム形状の影響を明らかにすることを目的とした。

2. モデル構築と解析方法

末期変形性股関節症患者の患側と健側股関節の CT 画像から 3D 股関節モデルを作成した。モデル作成は Mechanical Finder（RCCM 社）を用いて行った。骨部は CT 画像上で比較的判別し易いため、画像から外形を抽出したが、低密度の軟骨部は画像上で判別しづらいため、臨床医の解剖学的判断に基づき、軟骨が完全に保存されている健側のみ軟骨モデルを構築した。骨密度分布は CT 画像の Hounsfield 値から推測し、さらに骨密度をヤング率に変換してヤング率分布状態を求めた。軟骨部についてはヤング率一定と定義した。

患側に 2 種類の人工股関節を置換することで THA モデルを作成した。使用した人工股関節を Fig.1 に示す。Type A は、摺動部が超高分子量ポリエチレン製ライナーとアルミナ骨頭で構成されており、Type B はライナーと骨頭共にアルミナ製である。臼蓋側のカップとステムは両人工股関節ともにチタン合金製である。各材料に対して標準的なヤング率とポアソン比を設定した。

Fig.1 に境界条件を示す。拘束条件としては、大腿骨下部を完全拘束、仙骨部 x 方向を拘束し、荷重条件としては、各患者の体重の約 3 倍である 1800N を骨盤上部全体に作用するように設定した。なおすべてのモデルに対して同様の境界条件で解析を行った。

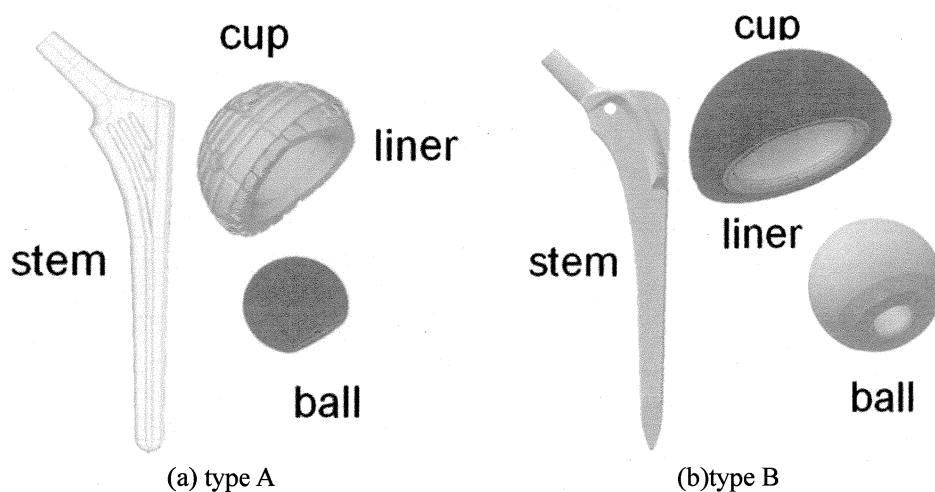


Fig.1 Artificial hip joint models.

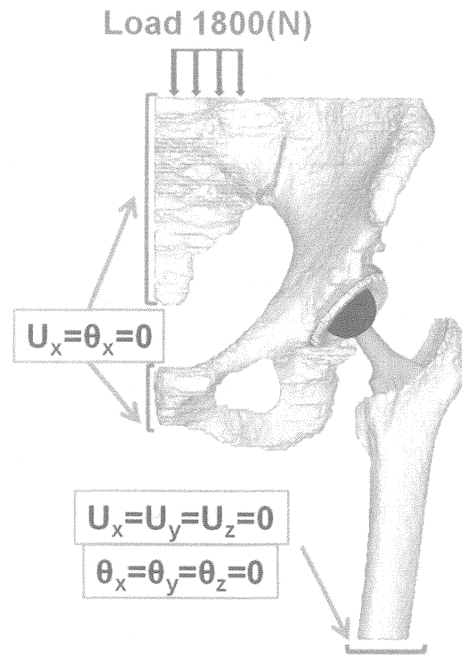


Fig.2 Boundary conditions.

3. 結果と考察

3.1 臼蓋の力学状態に及ぼす THA の影響

Fig.3 に、患側モデルの臼蓋と type A 置換モデルの臼蓋のひずみエネルギー密度 (SED) 分布状態を示す。SED は骨吸収の指標として広く利用されており、本研究においても SED を用いて骨の力学場を議論することにする。図で暗い色程高い SED 値を示しており、患側の臼蓋では、特に寛骨臼縁近傍で高い SED 集中が観察できる。一方、THA 後の臼蓋では SED は大きく低減しており、力学状態が均一化していることがわかる。Type B でも同様に SED の均一化が観察された。Fig.4 に寛骨臼縁に沿って SED を計測した結果を示す。患側では局所的な SED 集中が確認でき、健側においても変動はあるものの SED は患側より低い値となっている。患側に人工股関節を置換する事で SED はなだらかな分布へと変化し、局所的な集中や変動は改善されていることが確認できる。しかし、健側と比較すると置換後の SED は大幅に低減しており、このことは力学刺激の減少を示し、将来的な骨吸収の可能性を示唆している。

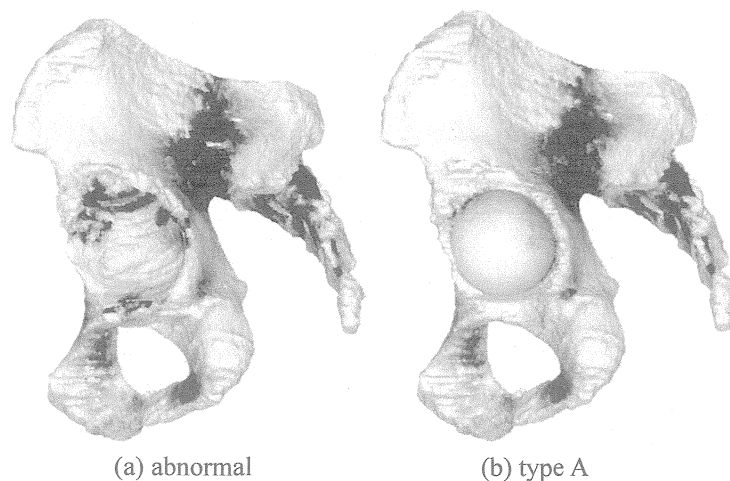


Fig.3 SED distribution on acetabulum.

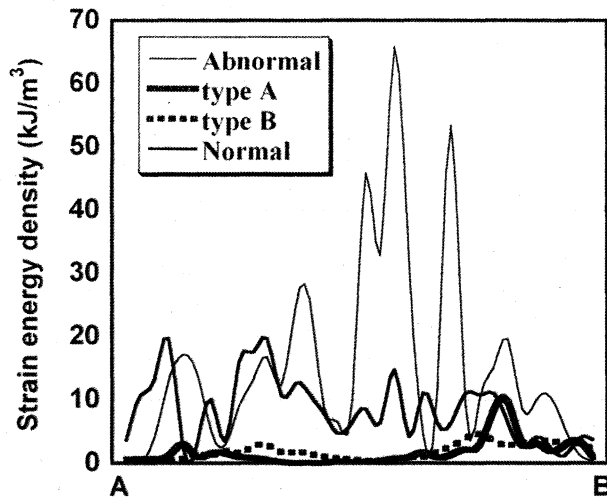


Fig.4 SED distribution on acetabulum.

3.2 大腿骨の力学状態に及ぼす THA の影響

Fig.5 に大腿骨断面での相当応力分布を示す。暗い部分が応力値が高いことを示しており、ステムの挿入により特に小転子側の皮質骨で応力が低減していることがわかる。Fig.6 に小転子側の皮質骨における SED 分布状態を調べた結果を示す。計測は上部 A から下部 B に向けて行われた。患側は A 部側で大きな SED を示すが、これは患側の骨頸部が細くなっているために曲げ変形が大きくなったためと考えられる。また、健側に比較して2つの THA モデルは SED の低下を示しており、ストレス・シールド現象が再現されている (SED の低下は相当応力の低下に対応している)。また、type B の方が type A より高い応力を示している。大転子側での SED 分布状態を Fig.7 に示す。小転子側と異なり、健側が全体に渡って高い SED 値を示しており、患側は上部 (A 側) は高いものの下方 (B 側) では SED は減少し、type A とほぼ同じレベルとなっている。人工関節置換後を比較すると、type B の方が AB 間のほぼ中央部で SED が増加しており、健側をも超える値となっていることは興味深い。

type A の摺動面はポリエチレン対アルミナで構成されており、一方、type B はアルミナ対アルミナとなっている。セラミックスのみの摺動面は、対摩耗性という点では優位であり、骨溶解等が懸念されるポリエチレン特有の摩耗粉の問題は存在しない。しかし、アルミナは脆性的であるため、突然の破壊が懸念される。また、最近では squeaking も問題となっている。本解析結果は、type B の方が type A より高い SED 値を示しており、ストレス・シールドという観点からは、有利であると考えられるが、今回の結果は単純な立位を想定しているため、他の動作状態での力学状態についても検討する必要がある。

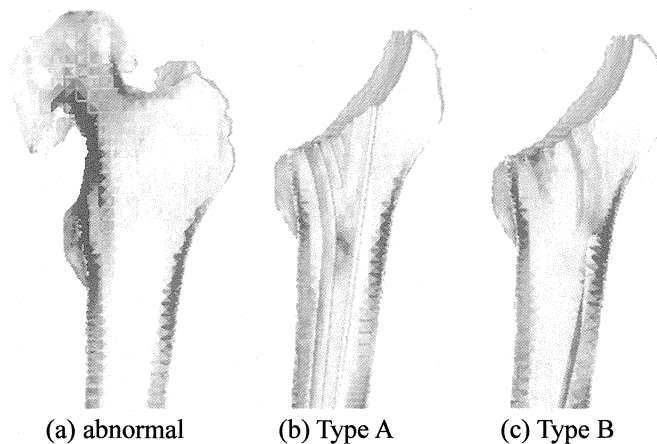


Fig.5 Equivalent stress distribution on the cross-section of femur.

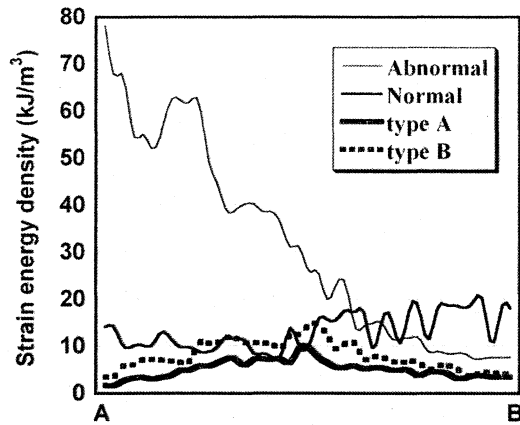


Fig.6 SED distribution along lesser trochanter side.

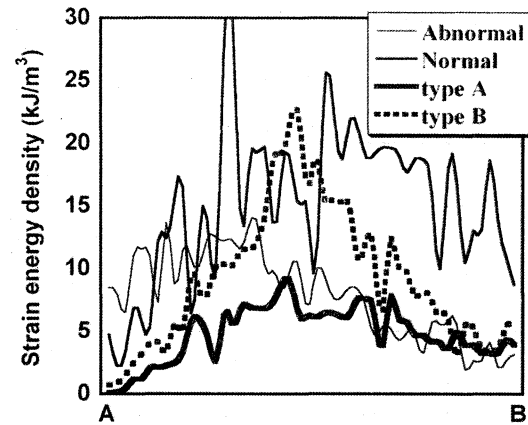


Fig.7 SED distribution along greater trochanter side.

成果報告

- 1) 北村英輔, 東藤貢, 表面置換型人工関節が骨内応力場に及ぼす影響, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 名古屋, 2010 年 9 月 5 日~8 日
- 2) 北村英輔, 東藤貢, 中島康晴, 岩本幸英, 有限要素法による表面置換型人工関節置換股の応力解析, 第 37 回日本臨床バイオメカニクス学会, 京都, 2010 年 11 月 1 日~2 日
- 3) 北村 英輔, 東藤 貢, 中島 康晴, 岩本 幸英, 表面置換型と全置換型人工股関節が股関節の応力状態に及ぼす影響, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会, 北見, 2010 年 9 月 23 日~25 日
- 4) 東藤貢, 北村 英輔, 中島 康晴, 岩本 幸英, 表面置換型人工関節が股関節の力学状態に及ぼす影響, 第 41 回日本人人工関節学会, 東京, 2011 年 2 月 25 日~26 日

研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
中島康晴	九州大学医学研究院	講師	研究代表者, 臨床的考察
岩本幸英	九州大学医学研究院	教授	臨床的考察
北村英輔	総合理工学府	M2	数値解析
東藤 貢	応用力学研究所	准教授	所内世話人, 生体力学解析

洋上風力発電用六角形浮体の波浪中動揺に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 経塚雄策

1. 緒 言

九州大学の太田俊昭名誉教授を会長とする SCF 研究会は、平成 18 年 10 月に発会し、引っ張りのみならず圧縮・曲げに対しても高強度な炭素繊維複合材料(Super Carbon Fiber)を用いた「六角形浮体による大規模洋上空間利用構想」に関する研究を行ってきた。本構想の最終的な目標は大規模な浮遊式海上都市の創出であるが、目下のところは浮体式洋上風力発電の実現を目指しており、いくつかの分科会において研究開発を行っている。六角形浮体は、要素浮体が多数連結された場合に創出される広大な甲板面積が大きな特色であり、外洋における風力発電においても電力の利用法は多様に考えることが出来る。洋上における多目的な利用を可能ならしむことが、本六角形浮体の大きなメリットであると我々は考えている。

本研究はこの SCF 研究会における活動の一環として、浮体技術に関する基礎的な研究を行ってきた。これまでに、ポンツーン型の六角形浮体とトラス構造を用いたセミサブ型の六角形浮体(いずれも直径 1.2m)の 2 種類の模型を用いて実験した。ポンツーン型に関しては、波浪中動揺実験による実験値が、線形ポテンシャル理論に基づく計算値によく一致することも確かめたが、セミサブ型は形状が多数の小口径カラム部材から構成されているので、線形ポテンシャル理論による計算値のみでは不十分と思われた。そこで、平成 22 年度は Photo 1 および Fig.1 のように模型の直径を 2.4m と大きくして実験を行い、小口径カラム部材についてはモリソン式による粘性流体力を加えることにより、セミサブ型浮体の流体力を推定した。また、係留浮体の波浪中動揺性能についても実験と計算を行い、比較検討した。

2. 数値解析

2.1 ポテンシャル理論

浮体を剛体と仮定すると、浮体の運動は 6 自由度の運動モードで表すことができる。添え字 $j=1\sim 6$ はそれぞれ前後揺、左右揺、上下揺、横揺、縦揺、船首揺に対応する。 ξ_1, ξ_2, ξ_3 は長さの次元を持ち、 ξ_4, ξ_5, ξ_6 は回転角の次元を持つ。時間 t に関する微分をドットで表すことにすると、波浪中の浮体構造物の運動は、

$$\sum_{j=1}^6 \{ (M_{ij} + m_{ij}) \ddot{\xi}_j + N_{ij} \dot{\xi}_j + C_{ij} \xi_j \} = E_j \quad (1)$$

ここで、 M_{ij} は浮体の質量(モーメント)係数、 m_{ij} は付加質量(モーメント)係数であり N_{ij} はラディエイション力による求められる造波減衰係数である。 C_{ij} は復元力係数であり、 E_j は波浪強制力である

線形仮定のもとでこれらの流体力を精度よく推定する方法として発達してきたのがポテンシャル理論による算定法である。流体の非粘性・非圧縮・渦無し、を仮定し、

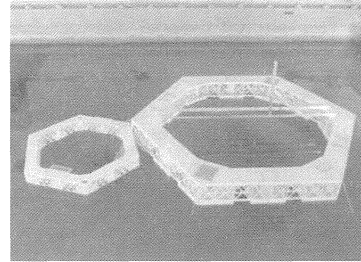


Photo 1 Large(D=2.4m) and small(D=1.2m) Models in the tank

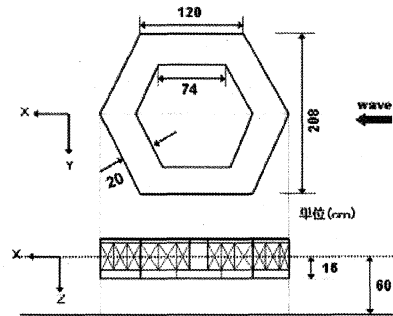


Fig.1 Size of the large model

Table 1 Principal particulars of the model

Diameter (m)	2.4
Draft (m)	0.16
Displace. Vol. (kg)	74.61
Water area (m ²)	0.09958

速度ポテンシャル ϕ が存在するものとすれば、 ϕ は連続条件、自由表面条件、底面条件、無限遠方条件と浮体の物体表面条件を満たすように決定される。 ϕ が求まると流体の変動圧力が算定され、物体表面にわたって積分することにより付加質量係数、造波減衰係数と波浪強制力が算定される。

2.2 モリソン式による粘性抗力の算定

本研究ではセミサブ型模型のトラス構造部分の骨材円柱にかかる波力の算定に(2)のようなモリソン式を用いた。

$$F = C_d \cdot \frac{1}{2} \rho D \int_{-h}^{\eta} |u| \cdot |u| dz + C_m \cdot \frac{1}{4} \rho \pi D^2 \int_{-h}^{\eta} \dot{u} dz \quad (2)$$

ただし、 z は円柱と静止水面の交点を原点にとり鉛直上方を正とする座標軸である。また、 ρ は流体密度、 u は波粒子の加速度、 D は円柱の直径、 η は波面、 h は円柱の水深としている。絶対値は流れ方向と力の方向を合わせ

るために必要である。このように流体の力を加速度と速度の二乗に比例する力に分け、その強さを抗力係数 C_d と質量係数 C_m の2つの流体力係数で表す。 C_d と C_m は実験的に定め、それに基づく波力の推定を行う必要がある。本研究では、予備実験として円柱波力計測実験を行い、波力の妥当性を検討した後に、小寺山ら[1981]⁽¹⁾にある鉛直円柱の流体力係数を使用した。

(2) 式で求められた抗力を、ポテンシャル理論の流体力成分である(1)式の右辺に加えることで浮体全体にかかる波浪強制力を求めると同時に、単位入射波振幅に対する動揺量を求めた。

3. 水槽実験

3.1 実験概要

Photo 1 は 1.2m と 2.4m のセミサブ式の模型の写真である。上部が甲板(デッキ)、下部は浮力体、そしてその間は波浪強制力を受けにくいようにカラムと細い円柱部材からなるトラス構造となっている。Table 1 に 2.4m 模型の主要目を示す。実験は、長さ×幅×深さ=12.0×6.0×0.60 (m) の浅海造波水槽中で行われた。

3.2 波浪強制力計測実験

実験は、波高 5.0cm の規則波を用い、周波数は 0.5~2.0(Hz)とした。最大容量が 100N の簡易 2 分力計を 2 つ設置し、Fig.1 のように浮体の対称性から、Surging Force(前後揺方向)および Heaving Force(上下揺方向)の 2 方向のみ計測した。

3.3 波浪中動揺実験

実験は波高 5.0cm の規則波を用い、周波数は 0.5~2.0(Hz)とした。浮体の係留は、水中重量が 162g/m のチェーンを用いて行った。長さ 1.5m のチェーンを六角形の各頂点から展張してアンカーに結び付けた。

波浪中での浮体の動揺計測には 3 次元画像解析装置 HALCON を用いた。Photo 2 に示すようなプレートにあらかじめ模型に設置しておき、Photo 3 に示すカメラで 1/10Hz で 30 秒間撮影した。プレートの点の変位を画像から読み取ることにより、Surge(前後揺)、Heave(上下揺)、Pitch(縦揺れ)の浮体動揺を求めた。

4. 数値解析及び実験結果・考察

数値解析については、モリソン式による抗力を考慮したものと通常のグリーン関数のみで計算したもの、また無限水深グリーン関数プログラムを用いたものと、有限水深グリーン関数プログラムを用いたものの計 4 パターンで計算し、実験結果と比較した。なお、グラフ中の h は水深を示している。

4.1 波浪強制力

Fig. 2, 3 に波浪強制力の数値解析結果と実験結果を無次元値を示す。ここで、波浪強制力は次式によって無次元化した。

$$\frac{E_j}{\rho g A_w \zeta_a} \quad (j = 1, 3) \quad (3)$$

ただし、 A_w (m^2)は模型の水線面積、 ζ_a (m)は入射波振幅である。グラフの横軸は角速度 ω (1/s) と模型の直径 L (m)重力加速度 g (m/s^2)で表わした無次元数である。

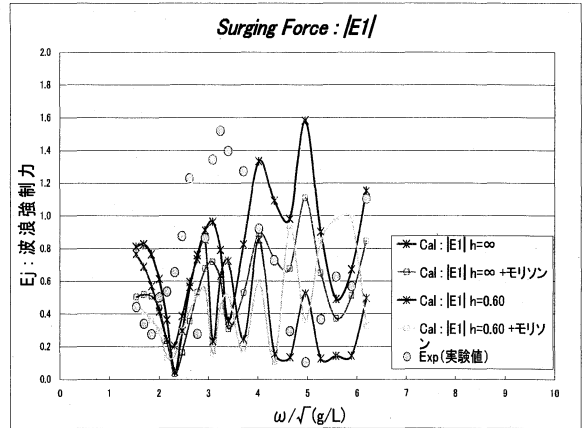


Fig. 2 Surging excitation response in waves

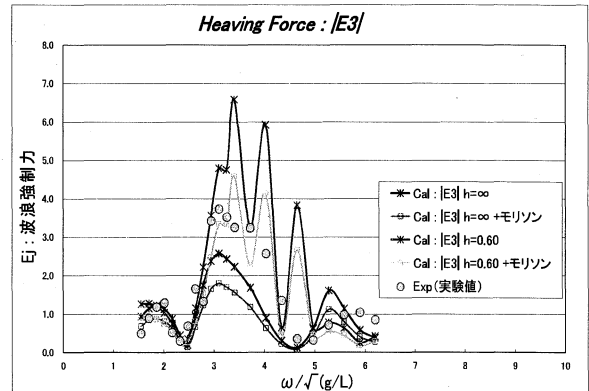


Fig. 3 Heaving excitation response in waves

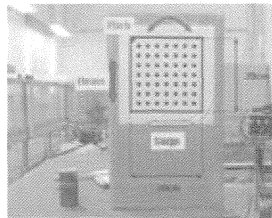


Photo 2 Target markers



Photo 3 Camera for motion capture in experiments

Fig. 2, 3 より、Heaving Force に関しては実験による特性が比較的良好に再現出来ているが、Surging Force には実験値と計算値に差異がみられた。これは、模型の大きさに対して水槽の反射波の影響や、中抜き六角形浮体構造の内側のプールと呼ばれるところでトラス構造を含めて生じる複雑な位相干渉を、正確に再現出来なかったためと考えられる。また解析値より波浪強制力はモリソン項による抗力の影響を受けることが確認できた。

4.2 波浪中動揺

Fig. 4, 5, 6 に浮体の各運動応答 X_j を入射波高 ζ_a で無次元化した値を示す。ただし Pitch は波数 k を用いた最大波傾斜で無次元化している。グラフの横軸は角速度 ω (1/s) と模型の直径 L (m)重力加速度 g (m/s^2)で表わした無次元数である。

Fig. 4, 5, 6 より無限水深プログラムによる解析値は実験による特性を比較的良好に再現出来ている。特に Heave と Pitch に関してはかなり良い一致を示している。Surge

に関しては、ばね定数や GM の計測の精度や反射波が影響していると考えられる。有限水深プログラムによる解析値には実験値よりも過大に評価した応答のピークがあるが、これについては明確にすることが出来なかった。また今回の供試模型では、モリソン項は運動応答にはほとんど影響していないことが分かる。

5. 玄界灘における実証実験計画

本研究の原案では、我が国の排他的経済水域 (EEZ) を有効に活用するために外洋での設置を想定しており、浮体直径も 600m と巨大なものであるが、実用化のためには小スケールの浮体にしる実海域実験によって実現性を検証しておくことが必要である。そこで、SCF 研究会のメンバーを中心にして、玄界灘に直径 60m 規模の浮体を浮かべ数年間の実証実験を行うことを計画している。実験海域としては、Fig. 7 の福津市沖約 2km を想定している。そこは、1974 年から 2008 年まで九州大学応用力学研究所の海洋観測タワーが設置されていた場所である。従って、30 年を越える長期の波浪、海上風などの観測データが残されており、事前の環境調査は完璧であると言ってよい。

Fig. 8 は、1993 年から 2003 年までの年間最大波高 (m) とその時の波周期 (s) の比較したものである。この期間の最大波高は約 5m、その時の波周期は約 7 秒であることが分かる。最大波高については、浮体の安全性に直結するのでもっと長期間の観測値を調査する予定である。

次に、海上風については風力発電量の見積のために 2001 年の月ごとの平均風速を Table 2 に示す。これを見ると 12 月および 1 月の平均風が大きく、冬季に強い風が吹くことが分かる。Fig. 9 は、2001 年の風向ごとの平均風速を示した。これを見ると西および北北東からの風が強いことが分かる。この場所は東に陸があるので、西からの風が強いのは当然と思われるが、北北東からの風が強いのは明らかに冬の季節風のためと思われる。以上のようにこの場所における波浪と海上風のデータについては申し分ないと思われるが、この海域から遠くない NOWPHAS の玄界灘に詳細なデータがあるので、それも参考にして設計波を決定する予定である。

なお、この海域は、宗像漁協に属する福津支所が漁業権を有しているが、津屋崎支所の海域とも隣接している。応力研の観測タワーが 30 年以上も存在していた実績もあり、実施が本決まりとなれば漁協からの支援も確約されている。

6. 結 言

無限水深プログラムは波浪強制力、波浪中動揺の実験による特性を良好に再現出来ていたが、有限水深プログラムについては、今後さらに精度の向上に取り組む必要がある。今回の供試模型では、解析値においてモリソン項を考慮すると波浪強制力には抗力による影響が確認されたが、運動応答に関しては抗力の影響はさほど見られなかった。今後は、洋上風力発電時の問題として、海上

風を考慮した場合の浮体運動と風車に加わる荷重など、設置予定海域の水深 16m における最適な係留システム、複数の六角形浮体を連結した場合の問題、荒天時の浮体および風車の安全性などについて検討していかなければならない。

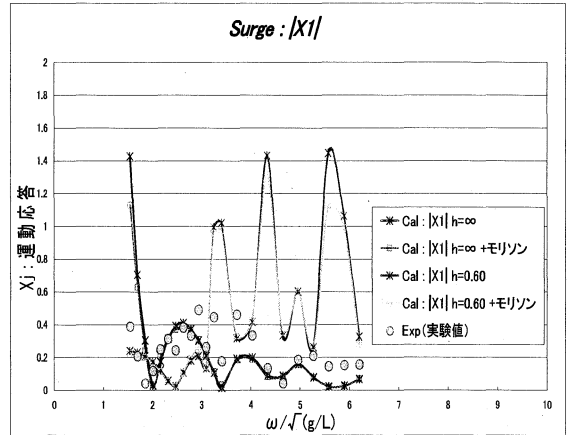


Fig. 4 Surging amplitude response in waves

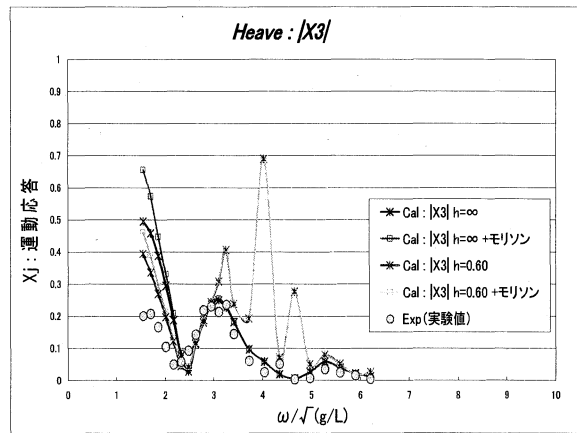


Fig. 5 Heaving amplitude response

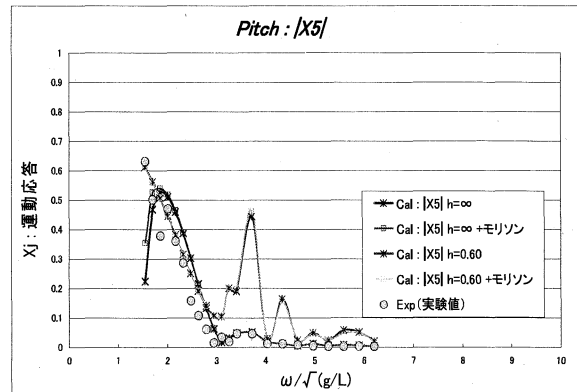


Fig. 6 Pitching amplitude response

参考文献

- 1) 小寺山亘, 松本憲洋, 田代照正: 甲板昇降式海洋掘削台の脚に加わる流体力について、西部造船会第 62 回例会、1981.5
- 2) 対馬海峡定時海洋観測資料集、九州大学応用力学研究所、東アジア海洋大気環境センター、DVD、2008.
- 3) NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網)、

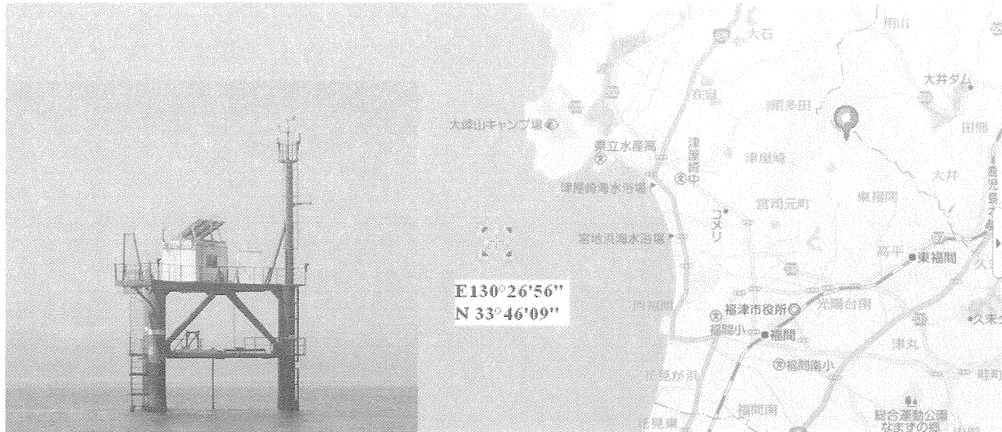


Fig.7 Map of the feasibility experimental site and the photo of the observation tower existed until 2008

Table 2 Monthly mean wind speed in 2001, unit(m/s)

Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
6.4	4.8	5.1	4.3	3.8	4.6	2.9	4.0	4.9	4.7	4.5	5.6

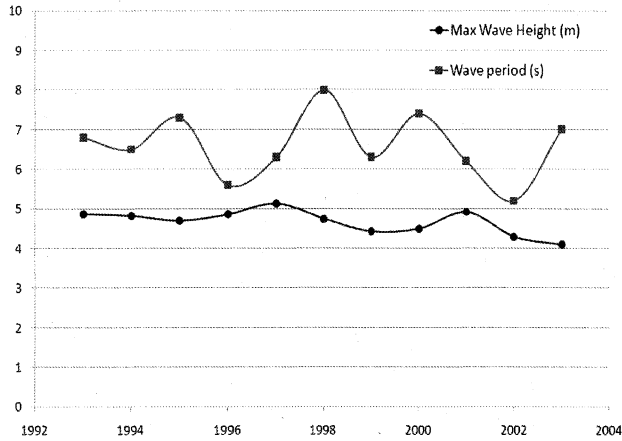


Fig.8 Maximum wave height data in Genkai-Nada

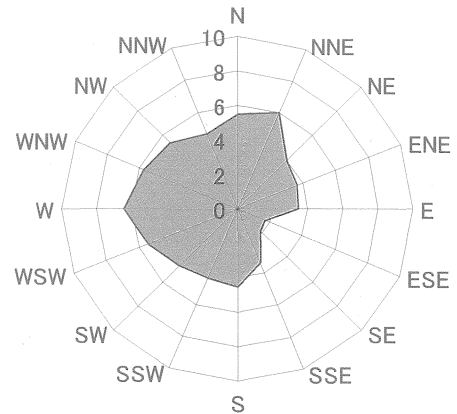


Fig.9 Distribution of mean wind speed(m/s) in 2001

研究組織

研究代表者	経塚雄策
研究協力者	長澤和也、山近 健
所内世話人	大屋裕二

風レンズ技術を応用した潮流発電用水車の開発

九州大学大学院総合理工学研究院 経塚雄策

Key Words: tidal current power generation, turbine, diffuser, Wind-lens technology, Blade Element Momentum Method

1. INTRODUCTION

Renewable energy resources are receiving more and more attention these days, driven by issues including the limitation of fossil fuels and global warming mainly caused by the emission of CO₂. Energy can be attained from tidal currents driven by the tides, the power capacity of which is estimated to exceed 450 GW¹⁾ around the world. However, utilization of the tidal current power is still at the early stage because of the low energy density in comparison with other renewable energies.

The tidal current power is proportional to the flow velocity cubed, which means a big increase of power captured can be produced if merely increasing the incoming flow velocity slightly. Prof. Ohya's Wind-lens technology²⁾ for wind power generation is applied to our study at present stage, which has been validated to be able to accelerate the flow velocity effectively by the brimmed diffuser. Wind turbine technology can be used in our study because the tidal current turbine works on the same principle as the wind turbine, by converting the kinetic energy of moving fluid to the rotational energy of the turbine rotor, then to the electrical energy.

But for the tidal current turbine, there are some potential problems not happening to the wind turbine, which need to be pointed out such as cavitation, organism attaching and sealing not much considered at our initial stage of study. An important point we should notice is buoyancy can be used to balance the gravity of the turbine and diffuser to make them float in the sea, which implies that some support devices needn't to be fixed and therefore construction cost can be cut down.

In this paper, experiment results for the bare turbine are compared with that for the turbine with diffuser by Wind-lens technology. The Blade Element Momentum(BEM) method is used to calculate the theoretical values of torque and output power for both of the turbines, which then are compared with the experiment values to check the validity of prediction of the BEM method.

2. MODEL EXPERIMENTS

2.1 Description of devices and experiments

Models of the turbine and brimmed diffuser are shown in Fig.1 and Fig.2. The turbine designed by Prof. Furukawa³⁾ is a three-bladed rotor with a diameter of 300mm, the hub diameter of which is 41.7mm accounting for 14%. The blade starts at the hub and ends in the tip, chord length and pitch angle distributions of which are shown in Fig.3. For the diffuser, the throat diameter is 308.6mm (The throat is the narrowest part of the diffuser, section of which is at the same plane with the

rotor.) and the maximum diameter is 412.8mm. Fig.4 shows the profile of the brimmed diffuser, in which the vertical axis represents the rotor plane and origin is at the position of the rotor center.

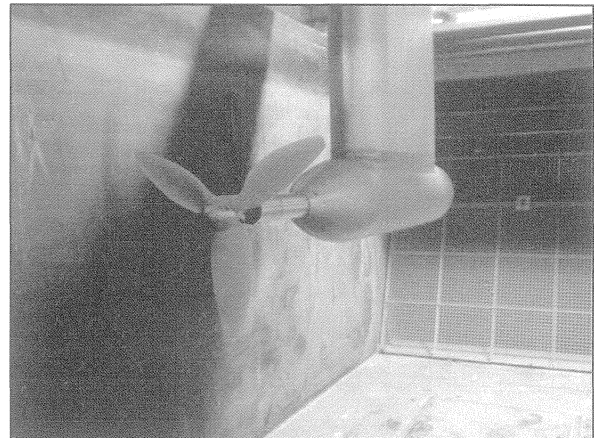


Fig.1 Experimental setup for the bare turbine in the CWC.

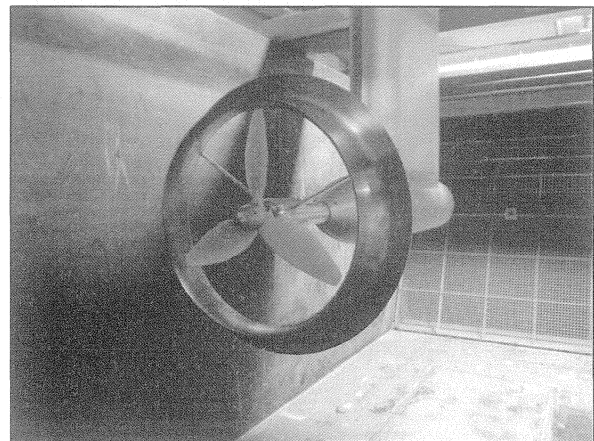


Fig.2 Experimental setup for the turbine with diffuser in the CWC.

The experiments were carried out in the circulation water channel(CWC) for the bare turbine and the turbine with diffuser respectively, in which torques of the turbine were measured by the dynamometer in the uniform and steady incoming flow with a velocity of 1.0m/s. And Reynolds number equals 3.0×10^5 .

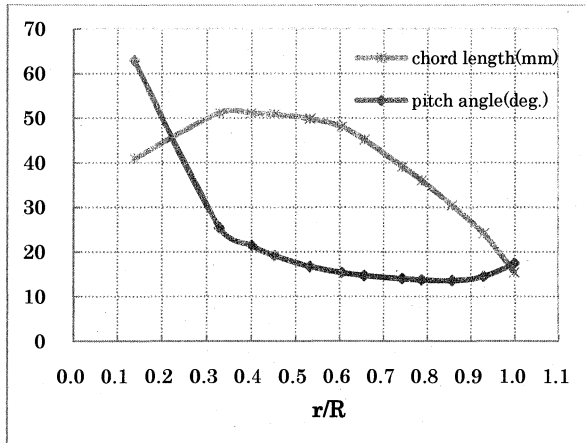


Fig.3 Chord length and pitch angle distributions of the blade.

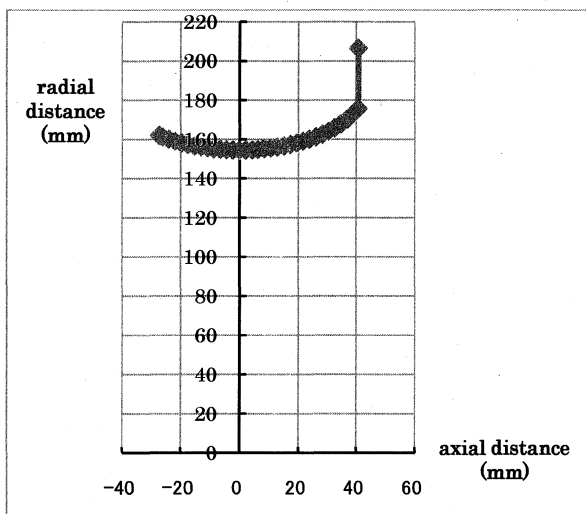


Fig.4 Profile of the brimmed diffuser.

2.2 Analysis of experiment results

Some formulas used are as follows.

Angular velocity

$$\omega = 2\pi \frac{N}{60} \quad (1)$$

where N is the rotational speed and the unit of it is revolutions per minute (rpm).

Tip speed ratio

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_0} \quad (2)$$

where R is the radius of the rotor and U_0 is the incoming flow velocity.

We measured torques Q and rotational speeds N of the turbine during the experiments. According to (1) and (2), we can get

$$\lambda = \frac{2\pi R}{60 U_0} N \quad (3)$$

λ was increased gradually from 1.0 to 4.0 by adjusting rotational speeds. At the same time the corresponding torques were measured by the dynamometer. In order to get non-dimensional parameters, we calculated the torque coefficient C_q and the power coefficient C_p .

$$C_q = \frac{Q}{0.5\rho R A U_0^2} \quad (4)$$

where A is the swept area of the rotor, ρ is the density of the water.

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho A U_0^3} = C_q \times \lambda \quad (5)$$

where P is the output power of the turbine.

The results for the bare turbine and the turbine with diffuser are shown in Fig.5. The horizontal axis represents the tip speed ratio λ . The maximum C_q of the turbine with diffuser is about twice that of the bare turbine. Furthermore, the maximum C_p reaches about 2.5 times. So improvements of C_q and C_p are apparent by attaching the brimmed diffuser which is able to improve the flow velocity inside it and thus the efficiency of the turbine.

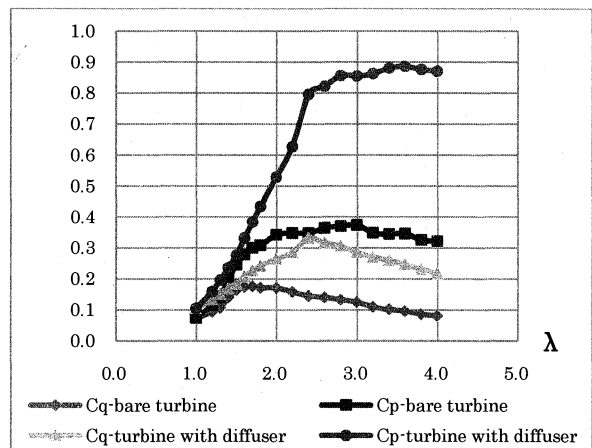


Fig.5 Comparison of torque coefficients and power coefficients.

3. THEORETICAL CALCULATION

3.1 BEM method⁴⁾

The Blade Element Momentum (BEM) method from Glauert⁵⁾ combines the momentum theory with the blade element theory. In the momentum theory the actual geometry of the rotor-the number of blades, the twist and chord distribution, and the hydrofoils used- is not considered which is treated as a permeable disc. But in the BEM method it is taken into account that the local event taking place at the actual blades.

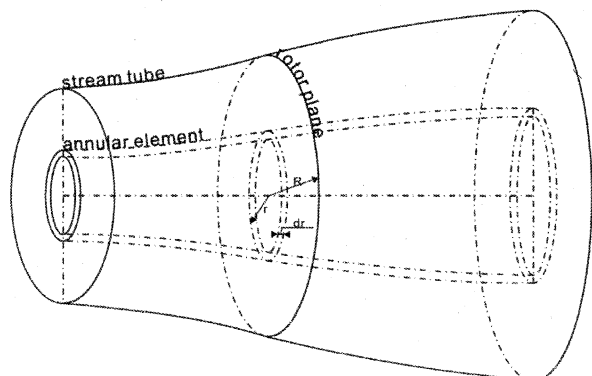


Fig.6 Schematic of stream tube and annular element.

The stream tube applied in the momentum theory is discretized into M annular elements, as shown in Fig.6. There are two assumptions for the annular elements. One is no radial

dependency and the other is the force from the blades on the flow is constant. It is assumed that the hydrodynamic force acting on the blade element can be estimated as the force on a suitable hydrofoil of the same cross-section and that the force on the whole blade can be derived by adding the contributions of all the elements along the blade. The lift and drag coefficients of each blade element are known as functions of the angle of attack. As far as relational functions for each hydrofoil are got, by the BEM method the force acting on one blade element and thus the force acting on the whole blade can be derived. After getting all the hydrodynamic forces, torque and output power can be derived easily.

3.2 Hydrofoil of blade sections

The hydrofoil distribution of the blade in the spanwise direction is shown in Fig.7. The hydrofoil at the root(0%span) is T41, 33%span M-F073, 75%span M-F072 and in the tip(100%span) M-F071. M-F07 series hydrofoils are developed by AIST(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), which are of properties of high lift and mild stall. T41 hydrofoil is modified from Goettingen570, thickness to chord ratio of which is 0.41. Hydrofoils of other sections are derived by interpolation.

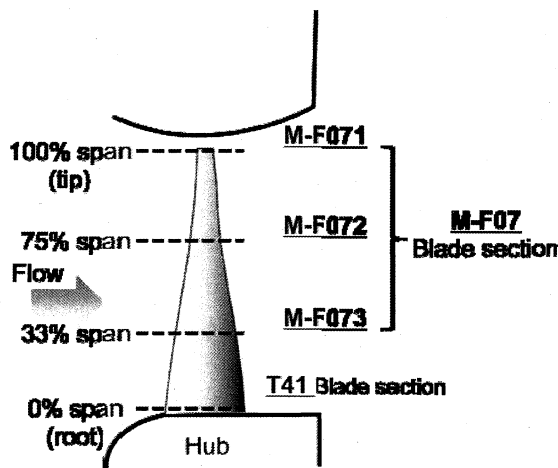


Fig.7 Blade section design.

Relationship between the angle of attack α and the lift and drag coefficients C_l and C_d for M-F07 series can be accessed at the website of AIST <http://riodb.ibase.aist.go.jp/db060/> on condition that Reynolds number equals 3.0×10^5 , as shown in Fig.8 in which the horizontal axis is the angle of attack, the unit of it is degree. Relational curves of three hydrofoils are not enough for our calculation by the BEM method considering the precision. So five sections are made between 33% span and 75%span locating at 40%span, 45%span, 53%span, 60%span and 65%span and three between 75%span and 100%span locating at 80%span, 85%span and 93%span. Relationship $C_l(\alpha)$ and $C_d(\alpha)$ are derived by interpolation.

We can see from Fig.8 that some oscillations take place in two separate small intervals for each curve, which is bad for interpolation. Because the whole trend of each curve almost meets the quadratic curve, curves of oscillation parts are fitted by the local quadratic curves. Fig.9 shows the smoothed curves. In the interpolation calculation, fitted data are used instead of the actual data in order to get good interpolation results.

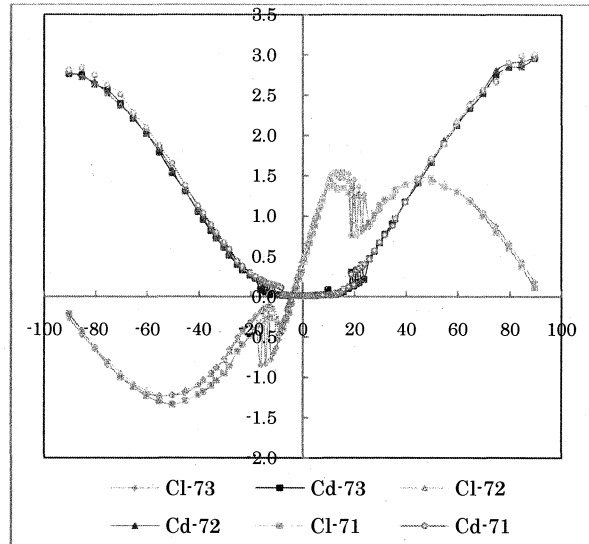


Fig.8 Relationship between the angle of attack and the lift and drag coefficients for M-F07 series.

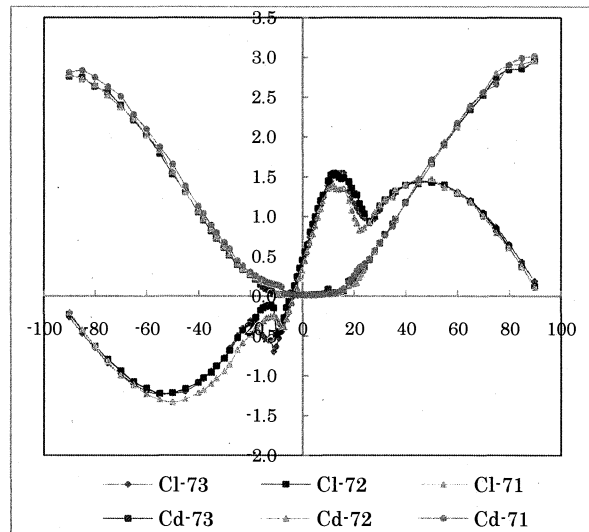


Fig.9 Smoothed curve.

3.3 Calculation results for the bare turbine

Fortran program is made based on the BEM method to calculate the torque and power coefficients C_q and C_p of the bare turbine for different tip speed ratios. Because of the vortex system in the wake the tip loss is generated, which the BEM method doesn't consider. In order to get good results it is necessary to apply one correction called Prandtl's tip loss factor to our calculation.

With relationships $C_l(\alpha)$ and $C_d(\alpha)$ for total eleven sections the torque and power coefficients are derived, as shown in Fig.10. In Fig.10, the horizontal axis is tip speed ratio. It is very clear that calculation results are a little smaller than experiment results when λ is less than 2.0. But results of calculation and experiment fit very well especially for C_q when λ is greater than 2.0. On condition that the incoming flow velocity is about 1.0 m/s the turbine usually operates between $\lambda=2.0$ and $\lambda=3.0$. That indicates the BEM method can predict and estimate operating parameters of the actual turbine very well.

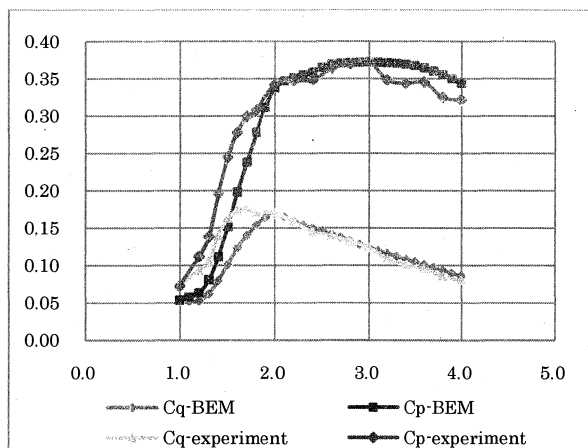


Fig.10 C_q and C_p of the bare turbine.

3.4 Calculation results for the turbine with diffuser

Due to the diffuser vortices are restrained in the tip of the blade so the tip loss isn't considered in this case. The flow field around the turbine is changed because of the diffuser, which means the flow velocity distribution in the radial direction at the rotor plane inside the diffuser should be derived before using the BEM method.

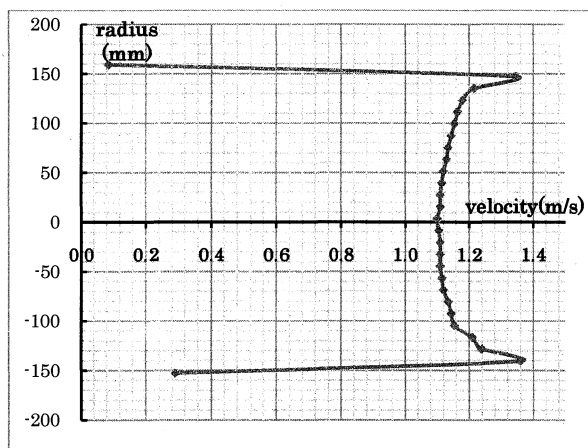


Fig.11 Flow velocity distribution inside the diffuser.

Fig.11 shows the flow velocity distribution got by the CFD (Computational Fluid Dynamics) method-SCREW/TETRA for Windows from CRADLE Co. Ltd. on condition that there is no turbine inside the diffuser. The horizontal axis represents the flow velocity, the vertical axis the radial position and the origin the center position of the turbine hub. The mean value of the flow velocity is 1.2m/s more or less. After getting the flow velocity distribution the torque and power coefficients can be derived easily using the similar calculation method as the bare turbine. From Fig.11 it is noticed that the distribution is not symmetric due to error of the CFD method. For all the eleven sections the local wind velocity is got by interpolation based on the velocity distribution. In order to improve the precision of calculation we adopt the mean value of two interpolations as the local flow velocity at the blade element along the span.

Fig.12 gives us the calculation results of C_q and C_p . It is very clear that differences between calculation and experiment results are big. Calculation results are about 3/4 experiment

results for both C_q and C_p but the whole trends of curves are quite similar.

The velocity distribution derived from the CFD method cannot reflect the real situation. The velocity distributions with and without turbine inside the diffuser are very different because the interaction between the turbine and the diffuser is strong. If we want to get the correct flow velocity distribution we have to consider the interaction.

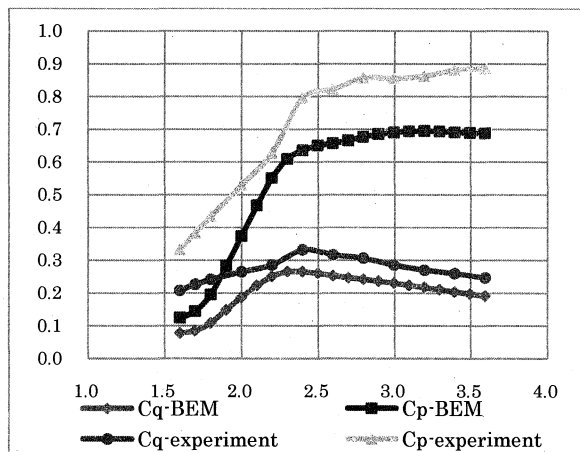


Fig.12 C_q and C_p of the turbine with diffuser.

4. CONCLUSIONS

Model experiments were carried out for the bare turbine and the turbine with the brimmed diffuser in the CWC. Experiment results show the torque and output power of the turbine are improved by attaching the brimmed diffuser. The BEM method is used to predict and estimate C_p and C_q of the turbines, which works very well for the bare turbine, but fails to work for the turbine with diffuser by adopting the flow velocity distribution inside the diffuser got by the CFD method. It is necessary to consider the strong interaction between the turbine and the diffuser for the case of the turbine with diffuser. Next step is to get the correct flow velocity distribution at the rotor plate inside the diffuser to improve the calculation precision of the BEM method. Then we move the focus forward to design the blade contour by the BEM method to get better performance.

REFERENCES

- 1) The ocean energy report, ABS Energy Research, 2009.
- 2) Y. Ohya and T. Karasudani: A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens Technology, Energies, Vol3, 2010, pp.634-649.
- 3) Masato Furukawa: Development of a design method for wind turbine blade suitable to wind-lens turbine, Report of Collaboration Studies in 2009, 21AO-27, The Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University.
- 4) M. O. L. Hansen: Aerodynamics of wind turbines, Earthscan, 2008.
- 5) H. Glauert: Airplane propeller, in W.F. Durand(ed) Aerodynamic Theory, Vol4, Springer, 1935.

研究代表者	経塚雄策
研究協力者	孫 慧慧、上野正樹、磯亀竜也
所内世話人	胡 長洪

第3回九大グラフェン研究会
「エピタキシャルグラフェンの形成と物性」

平成23年2月4日(金) 13:00~17:35

於 九州大学応用力学研究所 W601室

(主催: 応用力学研究所 共同研究集会)

1. 13:00~13:05

はじめに 九州大工 田中 悟

2. 13:05~13:35 (30分)

早稲田大 大島忠平

「Ni上のグラフェン成長のLEEMによるその場観察」

3. 13:35~13:55 (20分)

福岡大工 鈴木 孝将

「SiC(0001)表面上の金-Graphene膜のSTM観察」

4. 13:55~14:25 (30分)

東北大学電通研 末光 眞希

「Si基板上エピタキシャル・グラフェンの面方位依存性と構造制御」

5. 14:25~14:45 (20分)

九州大総理工 吾郷 浩樹

「エピタキシャル金属薄膜上での単層グラフェンの大気圧CVD成長」

6. 14:45~15:15 (30分)

NTT基礎研 日比野 浩樹

「SiC上に成長したエピタキシャルグラフェンの構造と電気伝導特性」

休憩 15:15-15:45

7. 15:45~16:15 (30分)

北大量子集積センター 陽 完治

「エピタキシャルグラフェンの量子輸送特性と剥離グラフェンのpn接合における電子輸送特性」

8. 16:15~16:35 (20分)

九州大工 田中 悟

「SiCナノ表面上のグラフェンナノ構造の形成」

9. 16:35~16:55 (20分)

東京大学物性研 小森 文夫

「微傾斜SiC上グラフェンの電子状態測定」

10. 16:55-17:15 (20分)

福井大学工 橋本 明弘

「カーボンMBE法による転写エピタキシャルグラフェンの欠陥補修」

11. 17:15~17:35 (20分)

九大応力研 井上 仁人, 寒川 義裕

「微傾斜SiC(0001)面におけるグラフェン核形成機構の傾斜方向依存性」

第3回九大グラフェン研究会 「エピタキシャルグラフェンの形成と物性」

平成23年2月4日(金) 13:00~17:35

於 九州大学応用力学研究所 W601室

上述の日時、場所において共同研究集会を開催した。研究集会の報告内容は以下の通りである。

■早稲田大 大島忠平

「Ni上のグラフェン成長のLEEMによるその場観察」

不純物として溶け込んだ炭素原子が熔融金属表面に析出し、結晶性の良いキッシュェグラファイトが成長する。Ni(111)金属表面でも同じ炭素析出現象によってグラフェン膜が成長する。この様子をLEEMによって“その場”観測した。

1) 1200Kで炭素を溶け込ませたのち、1125Kに冷却すると表面上に単原子層の厚さのグラフェン膜が、基板表面の構造によらずに、均一にエピタキシャル成長した。膜の形状は熱平衡形状のように、グラフェンの原子構造を反映し、60, 120度で交差する線状である。

2) 単原子層グラフェンの成長とともに、各メインが接触し、シングルドメインになるが、このとき粒界はできず、皺も発生しない。

3) 温度を更に下げ1050Kにすると、ゆっくりと第2層が界面に成長し、更に第3層もゆっくりと界面に成長し始める。第2層の粒形(膜形)は針状(デンドライト)であり、第3層の粒形(膜形)は第1層と同じ、60, 120度の交角の熱平衡に近い。これらの成長モデルを講演で議論したい。

■福岡大工 鈴木 孝将

「SiC(0001)表面上の金-Graphene膜のSTM観察」

SiC(0001)表面に単層グラフェン膜をエピタキシャル成長させると、下地の影響でグラフェン膜は通常n型になる。しかし、グラフェン膜にビスマスや金等の金属原子を吸着させると、電荷ドーピングによりフェルミエネルギーの位置をある程度動かすことができる。そこで、我々は、この金属吸着グラフェン膜の表面構造を調べるために、金を吸着させたグラフェン膜を作製してそのSTM観察を行った。その結果、複数の複雑な表面構造が形成されることがわかった。また、その過程でゼロ層グラフェン膜が形成されたSiC表面に金を吸着させて800°C程度に加熱すると、ゼロ層グラフェン膜が下地から切り離されて単層グラフェン膜になることがわかった。これは、ゼロ層グラフェン膜の下に金が潜りSi-C結合を切ってSi-Au結合が形成されるためである。また、この金-単層グラフェン膜は、下地の影響が抑えられてp型になることがわかった。

参考文献: I. Gierz, et. al., PRB 81 (2010) 235408.

■東北大学電通研 末光 眞希, 吹留博一

「Si 基板上エピタキシャル・グラフェンの面方位依存性と構造制御」

Si 基板上に 3C-SiC 単結晶薄膜をエピ成長させ、その表面を熱改質でグラフェン化させることにより、Si 基板上にエピタキシャル・グラフェンを形成することができる。グラフェン・オン・シリコン (GOS) と名付けたこの方法は、CVD 製膜と熱処理という、半導体プロセスになじみの深いプロセス技術だけを使って Si 基板上にグラフェンを形成できる、すぐれて工業的な手法である。不思議なことに GOS は、グラフェンと対称性の近い 3C-SiC(111) 面だけでなく、グラフェンとまったく対称性の異なる 3C-SiC(100) や 3C-SiC(110) 面上にも形成可能である。さらにこうした面方位の違いは、グラフェン/SiC 界面構造、およびグラフェン積層構造に影響することが最近の研究の結果から、わかってきた。これらの面方位依存性は表面の終端化学構造・対称性に起因し、六方晶 SiC 表面上のエピグラフェンの場合とは異なることが明かとなりつつある。

■九州大総理工 吾郷 浩樹

「エピタキシャル金属薄膜上での単層グラフェンの大気圧 CVD 成長」

表面科学の分野で研究されてきたグラフェンが、HOPG から剥離した単層膜の研究をきっかけとして、ユニークな物性と応用の可能性をもつ材料として大きな注目を集めている。最近では、遷移金属を触媒とする CVD 法が、コスト、大面積化、加工性といった点で期待を集めている。最初の Ni 薄膜を用いた報告では多層グラフェンの生成が避けられず層数を均一に制御して合成することは困難とされていたが、炭素溶解度の低い Cu を触媒とすることで均一な単層グラフェンを合成できるとの報告がなされて以来、世界中で Cu が広く利用されるようになってきた。しかし、これまでの CVD 研究は全て多結晶の金属膜が用いられており、この多結晶性を反映して、生成するグラフェンが向きの異なる多数のドメインからなるという問題があった。

そこで我々は、サファイアや MgO 単結晶基板上に Co や Cu をエピタキシャルに堆積させることで結晶性の高い金属膜を作製し、大気圧 CVD によって高品質なグラフェンを合成することを試みてきた。その結果、SiO₂ 上の多結晶 Co 膜では不均一な厚さのグラフェン膜が得られるのに対し、サファイア上の Co 結晶膜では単層グラフェンが均一に合成できることを見出した。さらに、LEED 測定から、六員環の向きも制御できていることも確認できた。本研究は、触媒金属の結晶性を制御することによって、従来困難とされていた Co などの遷移金属上でも CVD 法によって単層グラフェンを均一に、かつ方位を制御して大面積に作ることを示すものであり、今後のエレクトロニクス等への応用が強く期待されるものである。当日は、ポリスチレンやアモルファス炭素などの炭素源を用いた結果についても紹介する予定である。

■NTT 基礎研 日比野 浩樹

「SiC 上に成長したエピタキシャルグラフェンの構造と電気伝導特性」

SiC 基板の熱分解によってグラフェンをエピタキシャル成長する手法を用いて、グラフェンのエレクトロニクス応用に欠かせない単結晶基板を創製することを目指している。これまで、低エネルギー電子顕微鏡によるグラフェン層数評価に基づき、超高真空中でのグラフェン成長過程の解明を進め、数 μm の領域で層数の均一な 2 層グラフェンを成長することに成功した。また、文献に倣い、Ar ガス雰囲気での加熱により、均一性の高い 1 層グラフェンも成長した。これら高均一グラフェンを用いて、トップゲートを有するホール素子を作製し、1 層と 2 層グラフェンそれぞれの電気伝導特性を測定、比較した。1 層グラフェンに対し、量子ホール効果を観測するとともに、2 層グラフェンがバンドギャップを持つことを検証した。

■北大量子集積センター 陽 完治

「エピタキシャルグラフェンの量子輸送特性と剥離グラフェンの pn 接合における電子輸送特性」

固体上の高品質なエピタキシャルグラフェンが相次いで発表されている。これまで 4H-SiC のシリコン面上に作製したグラフェンの特性評価をおこない、量子輸送特性も観測してきた。単なる移動度の比較は、界面の不純物の影響を強く受けるため、あまり結晶そのものの評価や比較検討するにはあまり適しているとはいえない。極低温、低磁場における弱局在による（負の）磁気抵抗の振る舞いから得られる輸送パラメータを Cu 上のエピタキシャルグラフェンの報告などと比較してみたい。

グラフェン特有のディラックフェルミオンを特長づける、クライントンエリングを含めて pn 接合におけるディラックフェルミオンの振る舞いを調べる実験を試みている。これらの実験を効果的におこなうために比較的簡単に高い移動度が得られる剥離グラフェンでの検討結果を報告する。

■九州大工 田中 悟

「SiC ナノ表面上のグラフェンナノ構造の形成」

傾斜 SiC 表面に現れる周期的ナノファセット構造をテンプレートとしたエピタキシャルグラフェンナノ構造の作製を試みている。SiC 表面熱分解によるグラフェンの形成は、非常に異方性の強い層状モード (layer-by-layer) で進行する。従って、周期的な SiC ナノ表面のモフォロジーを反映した 1 層の周期的リップル構造 (周期曲面) や 2 層目の核がファセット端に沿って異方的に成長することによる 1 層目に埋め込まれたナノリボン構造を形成することが可能である。それぞれの形成機構および形成後のナノ構造の特徴を説明し、物性 (主に偏光ラマン) の結果からリップル構造、エッジ状態を考察する。

■東京大学物性研 小森 文夫

「微傾斜 SiC 上グラフェンの電子状態測定」

我々は、微傾斜したSiC(0001)基板Si面上の単層グラフェンの π 電子状態を角度分解光電子分光で測定し、そのスペクトルの異方性の起源を調べている。この基板上では、単層グラフェンは基板ステップを越えてつながっている。したがって、ステップ垂直方向に伝播するグラフェン π 電子は、基板テラス幅の10–30nmごとに曲率のある部分を通過することになる。

8度オフ基板上的単層グラフェンでは、ふたつのK点付近のディラックコーンにおいて、どちらもオフ方向の群速度が遅くなっている。これは、ステップ部分がグラフェンポテンシャルに周期的な変調をかけた効果と考えられるが、理論の予想とは異方性が反対になっている。一方、4度オフ基板上では、ディラックコーンには顕著な異方性が観測されなかった。また、どちらの試料でもK点の方向に依存した線幅の増加が観察され、これはステップ部分の電子散乱時間の増大が起源と考えられる。

■福井大学工, *九大院工 橋本 明弘, 下辻 康広, 石田 高章, 梶原 隆司*, 田中 悟*

「カーボン MBE 法による転写エピタキシャルグラフェンの欠陥補修」

Si 昇華法によるエピタキシャルグラフェンの形成は、他のグラフェン形成法と比べると層数制御可能な大面積グラフェンを得ることが可能であることから注目されている。一方、SiC 基板上的エピタキシャルグラフェンの任意基板への大面積転写プロセスは、デバイス応用の観点から重要であると考えられる。我々は、SiC 基板上エピタキシャルグラフェンにTiを蒸着させて引き剥がし、得られたグラフェン/TiテープをSiO₂/Si基板へ加圧転写することにより大面積グラフェン/SiO₂/Si構造を形成している。グラフェンのデバイス化には結晶性の良いグラフェンが求められるが、上述の方法によってSiO₂上へ転写されたグラフェンには加圧転写プロセスにおいて形成された欠陥が存在し、ラマンスペクトルに欠陥起源のDバンド及びD*バンドがかなりの強度で出現する。そこで、我々は、欠陥を有するSiO₂上の転写エピタキシャルグラフェンに対してカーボン MBE 法による欠陥修復の可能性について検討している。本報告では、カーボン MBE 法により欠陥由来のDバンド及びD*バンドをGバンドに比べてかなり小さく出来ることを示す。このことは、カーボン MBE により転写グラフェンの欠陥が修復されている可能性を強く示唆している。

■九大応力研 井上 仁人, 寒川 義裕, 柿本 浩一

「微傾斜 SiC(0001)面におけるグラフェン核形成機構の傾斜方向依存性」

微傾斜 SiC(0001)面上の周期ナノファセット構造の熱分解による均一グラフェンの異方成長に着目し、その成長機構を理論的アプローチから検討している。最近、SiC(0001)面上の均一グラフェン成長に対して0層グラフェンの重要性が示された。そこで本研究では、0層グラフェンの核形成過程をTight-binding計算によって探査し、SiC(0001)面の傾斜方向

と核形成機構との関連性を検討した。本発表では、傾斜方向が $[11\bar{2}0]$ または $[1\bar{1}00]$ である場合の結果を示す。

計算結果から、熱分解はステップ端で進行することがわかった。傾斜方向 $[11\bar{2}0]$ の場合、熱分解により解放されたC原子は後退するステップの麓で安定化し、核形成することが示唆された。一方、傾斜方向 $[1\bar{1}00]$ の場合、熱分解過程においてステップは直線性を保つ。直線状ステップはC原子に対する拡散障壁となるため、C原子はステップの麓で安定化せずステップに沿いに異方拡散する。このとき0層グラフェンの核はステップに沿って異方成長すると考えられる。

	企業／大学	所属	氏名
1		旭化成	荒木 徹
2	企業	旭化成	木村伸一
3		NTT	日比野浩樹
4		早稲田理工	大島忠平
5		九大総理工	柄原浩
6		東大物性研	小森文夫
7		福岡大	鈴木孝将
8		九大総理工	江口智史
9		九大総理工	水田典章
10		九大工	上原直也
11		九大総理工	金岡朋美
12		九大総理工	近藤一彩
13		東北大通研	末光真希
14		九大工	スレイ チェンダー
15		九大先導研	吾郷浩樹
16		九大総理工	二宮勇
17		九大総理工	小野田譲
18		九大総合新領域	小川友以
19	大学	九大工	石山裕朱
20		九大総理工	水野清義
21		九大総理工	木下哲博
22		九大工	加藤喜峰
23		九大最先端有機光	中川哲也
24		九大応研	川野潤
25		北大	陽完治
26		九大先導研	胡宝山
27		九大先導研	田中伊豆美
28		九大工	梶原隆司
29		九大工	萩原好人
30		九大工	森下幸紘
31		九大工	屋山巴
32		九大工	乾史憲
33		九大工	井上仁人
34		九大応研	寒川義裕

(研究集会)

強非線形流体・構造連成解析

研究代表者
大阪大学大学院工学研究科教授
柏木 正

1. 目的

強非線形流れに関する研究は、数値流体力学分野での各種の高精度計算手法の開発によって近年急速に発展してきた。しかしこれまでの研究は、複雑な流れの解析に重点が置かれ、どちらかと言うと、研究の興味は新しい計算スキームの開発、計算精度の検証や改良、複雑流体现象そのものの科学・物理的理解などであった。

現在ではそれらの研究成果を受けて、津波による構造物の破壊、荒天波浪中での浮体への波浪衝撃やスラミングによる強非線形流体・構造連成問題など、浮体や構造物の安全性・防災を意識した実際問題への応用が期待されている。それに関連した研究をしているいろいろな分野の研究者が一堂に会し、研究成果の発表、研究情報の交換を行うことが目的である。また、国内だけでなく海外からの参加者も加え、強非線形問題、流体構造連成などをキーワードとする研究の国際的情報発信源としての役割を果たすことも重要な目的となっている。

2. 研究集会の開催日時、場所

開催日時：平成22年12月21日（火）13:00～18:00

12月22日（水）9:00～12:00

開催場所：九州大学応用力学研究所西館6階多目的交流室（W601号室）

3. 講演プログラムと概要

講演プログラムは末尾に示しているのですが、ここでは講演の順番に従ってその概要、並びに全体的な雰囲気、参加者からの感想などについて述べておく。なお、目的にも書いたように、この研究集会は既に国際研究集会として認知されており、今回も講演、討論はすべて英語で行われたことを申し添えておく。

Springing Analysis on 10,000 TEU containership

Jung-Hyun Kim, Byong-Chul Kang, Yonghwan Kim (Seoul National University)

This paper considers the ship springing analysis by using WISH-FLEX which has been developed at Seoul National University for the analysis of hydroelasticity of hull girder loads in waves. WISH-FLEX is based on a hybrid BEM-FEM method to couple the boundary value problems of two distinct domains: fluid and structure. To solve the hydrodynamic field, a three-dimensional Rankine panel method is applied, while the structural responses and loads are obtained by applying Vlasov beam theory. A strong-coupling scheme is used for solving fluid-structure interaction by an iteration scheme. This study focuses particularly on the difference of computational results for different modeling of hydrodynamics and structure. Even though the same computer code is applied, the computational results can be dependent on user and/or the modeling of computational parameters such as grids, beam modeling, and the modeling of external forces. The ship model in this study is a 10,000 TEU containership which has been experimented at MOERI/KORDI as the WILS II project. The computed motion RAOs and the time-histories of load signal are compared with experimental data, and the agreement and discrepancy are thoroughly described. This kind of observation may help us to understand the uncertainty level of numerical analysis in ship springing analysis.

A System for Loads and Load Effects of Ships Subjected to External and Internal Fluid Actions in Waves

Kosuke Seki, Kazuhiro Iijima and Masahiko Fujikubo (Osaka University)

Liquid cargo pressure may be estimated more rigorously by taking the internal liquid fluctuations into account for the motion and load analysis within the context of linear potential theory. To this end, coupling analysis between ship and liquid cargo is performed. Firstly, the liquid cargo model is implemented into the motion and load analysis system which has been developed by ourselves. After showing the validation results, the analysis system is applied to an actual VLCC which has large cargo tanks. Structural response of the VLCC considering the internal fluctuations is discussed.

Nonlinear Evolution of Rogue Waves on Currents: Numerical Simulation Based on the NLS Equation

Hanhong Hu and Ning Ma (Shanghai Jiao Tong University)

Nonlinear instability and evolution of deep-water rogue waves on following and opposing currents was described by numerical simulation for laboratory investigation. The generation of rogue waves in the numerical tank modeling the deepwater basin with a double-side multi-segmented wave-maker in Shanghai Jiao Tong University (SJTU) by means of wave focusing technique is given. Here a spatial domain model of fourth order nonlinear Schrödinger (NLS) equation was established for describing deep-water wave trains in the moving coordinate system. The transient water wave (TWW) was set as the initial condition of the NLS equation. The steady current was added to see the effect of wave-current interaction on the energy concentration of gravity waves. The influence of current as well as other terms in the NLSC equations on wave height, inclination, particle velocity and acceleration are shown. Meanwhile, the focusing time/space of TWW influenced by the current field is investigated, which is of course a very important factor in experimental research when we generate rogue waves in the laboratory.

Development of Partitioned FSI Analysis Method

Kangping Liao, Changhong Hu (Kyushu University)

In this presentation, recent progress on numerical simulation of an elastic body impacting and penetrating a free surface is reported. The FEM (Finite Element Method) is used for solving nonlinear structural deformation and the FDM (Finite Difference Method) method based on CIP (Constraint Interpolation Profile) and THINC (Tangent of Hyperbolic for Interface Capturing) scheme is applied for calculating the violent free surface flow. The FDM and FEM are coupled by a block Gauss-Seidel procedure. Several numerical results are presented by using the proposed method.

Motion Analysis by Using a CIP-Based Numerical Method

K.K. Yang, Y. Kim (Seoul National University)

This presentation is about the current state of our development of CIP method for prediction of ship motion. In solving the sloshing problem with violent free-surface motion, the CIP-based method provides reasonable results with experiment. Especially, combination of the THINC and WLIC method gives closer pressure signal than the original THINC method as a free-surface capturing scheme. In the two-dimensional rectangular shape cylinder case, the CIP-based method gives reasonable added mass, damping coefficients and exciting force results compared with experiment. In order to consider a three-dimensional complex body in a Cartesian grid system, a level-set based algorithm for calculating the color function of solid phase is successfully implemented and tested for KVLCC2 and series 60 hull forms.

Effects of Varying Bathymetry on Floating Body Motion

T.Y. Kim, K.H. Kim, Y. Kim (Seoul National University)

This study aims the investigation of depth effects in the motion response of floating structures. To this end, a Rankine panel method adopting higher-order B-spline basis function is applied in time domain. The topology of sea bottom is assumed to be either constant or varied. Taking the advantage of the Rankine panel method, any bottom topology near floating structures can be considered by distributing the solution panels on the bottom surface. The numerical analysis includes the radiation, diffraction problems and floating motion responses for typical hull forms, e. g. LNG carrier and barge. The result is compared with other numerical solution for validation purpose. The motion RAOs are observed for different water depth and varying bottom topology.

Aerodynamic Effects on the Motion of Offshore Wind Turbine in Waves

Yasunori Nihei (Osaka Prefecture University)

In this presentation, some recent research results are presented on the design of a new Tension Leg Platform (TLP) type offshore wind turbine. Similarity condition for experiment, motion characteristics of the floating body, dynamics of tower and mooring lines, and other electricity generation issues are discussed.

Wave Elevation around a 3D Floating Breakwater

Faisal Mahmuddin, Masashi Kashiwagi (Osaka University)

In order to predict the performance of a floating breakwater, the wave elevation around it needs to be measured. The present study employs a well known numerical technique which is called the direct constant panel method to obtain the velocity potentials which then are used to calculate the wave elevation around a 3D model. The results from this method are validated using a method called higher order boundary element method (HOBEM) which utilizes quadratic 9-node panel to represent the surface elements. The HOBEM has been proven to be able to compute accurately and effectively the hydrodynamic properties of a floating object. Moreover, in both methods, a series of numerical accuracy confirmation using energy conservation and Haskind-Newman relation is also performed in to confirm the results. The wave elevation is measured in several different locations and the final performance is taken as average from measurement in these locations. The obtained results from 3D model are also compared with its corresponding 2D computation results to observe the 3D wave effect.

Introduction of Recent Underwater Vehicle Development in China

Bin Fu (Shanghai Jiao Tong University)

The recent underwater vehicle development is mainly focused on the R&D of 4500m ROV and Deep Towing System for deep sea environment observatory. 4500m ROV is going to be a heavy-duty operating system with maximum power of 130hp and 200kg payload applied in Class 4 ocean condition. And the Deep Towing System is able to works at 4000m depth underwater with 4 knot maximum towing speed. Beside the engineering projects, we have done researches on long cable dynamic models for 4500m ROV and Deep Towing System. We established discrete 2-dimension cable models to simulate the real armed cable's shape when it is moving underwater. Also we have studied the passive heave compensation system to verify the solution to remove the resonance problem in the passive compensators.

Sloshing Model Tests for LNG Carrier

K.H. Kim, S.Y. Kim, Y. Kim (Seoul National University)

This paper considers the comparative study on the model-scale sloshing tests. There are two primary scopes of this comparative study: comparison of sloshing pressure measured in 1/50-scale model tests at SNU with the data measured at other facility in the same scale, and the data measured at a smaller scaled model. For the comparative study, 1/50-scale and 1/70-scale model tanks are excited with same irregular motions and the pressure is measured at the same locations during the simulations. The statistical quantities of 1/50-scale model test are compared with those of other facility and 1/70-scale model test. The differences on the statistical results are observed and discussed.

Research and Development of TLP Type Offshore Wind Turbines

Yasunori Nihei, Midori Matsuura (Osaka Prefecture University)

In this research, we will show a new approach to design a Tension Leg Platform (TLP) type offshore wind turbine. Generally, TLPs are used in deepwater oil and gas development fields due to their favorable motion characteristics. In this field, they have high set up costs. An upper structure of 5MW wind turbine, however, is only 450tons at its total weight, which is much lighter than that of oil and gas platforms. Therefore the displacement and water plane area of the platform might be smaller. As a result, wave forces could decrease and it could lead initial tensions to be lower. This idea that leads to low set up costs will be discussed and also principal particulars of two types of TLP prototypes will be proposed in the present work. A tank test using 1/100 scale models was conducted under combined wind and wave conditions in this work. We measured not only motion characteristics, tensions on tendons, but also rotation speed of the

turbine blades. We will be introduced result of tank test in this paper.

Experimental Observation on Green-water Impact and Slamming

Sunbum Kim, Tomohiko Isshiki, Masashi Kashiwagi (Osaka University)

It is of great importance to develop a method which can compute strongly nonlinear phenomena such as green-water impact and slamming with high accuracy and less computation time. Recently, a numerical method realizing this purpose has been developed at RIAM, Kyushu University, and its computer code is named RIAM-CMEN (Computation Method for Extremely Nonlinear hydrodynamics). In order to validate this method and to understand existing problems to be studied further, firstly the experiments using a modified Wigley model with wider breadth were conducted at the towing tank of Osaka University, measuring the time series of the pressure at six different positions on the fore deck and vertical wall and at two different Froude numbers. Characteristics in measured results according to the difference in the forward speed and measurement point were clearly observed. Physical explanation for those characteristics was made. Secondly, a numerical computation method using RIAM-CMEN was introduced and a near-future plan conducting a comparison between experiments and numerical computations was explained.

Calculation of Impact Load and Structural Response in Water-Elastic Body Impact Utilizing General-Purpose FE Software

Masakazu Nakashima (Kyushu University)

As conventional load method for evaluation of bow flare slamming load, the equation for equivalent static pressure by Nbfd (New Bow Flare Damage) has used. But recently, container ships have become larger and faster, and bow flare slamming impact load has increased. And Nbfd gives lower pressure than actual one in some condition, because Nbfd has not considered the recent damaged ships' cases. Moreover, the magnitude of impact pressure is affected by structural rigidity. So, it's demanded to be constructed an assessment technology of bow flare slamming impact load considering Fluid-Structure Interaction. In this study, we have investigated calculation of impact load and structural response in water-elastic body impact utilizing LS-DYNA.

Hydro-Elastoplasticity Approach for Dynamic Collapse Behavior of Hull Girder in Waves

Yasuyuki Goto (Osaka University)

A new approach to predicting the dynamic collapse behavior of ship's hull girder in waves is proposed. The purpose of this work is to evaluate the consequence of the collapse, which should draw more attentions with the recent increase of interests in a risk-based design as the consequence, or to what extent the ship collapses, needs to be clarified in the risk evaluation. Experimental validation work is also reported.

Application of the MPS Method for Ships' Dynamic Stability Problems

Tomohiro Sugimoto, Hirotda Hashimoto (Osaka University), Makoto Sueyoshi (Kyushu University)

Our research is about the dynamic coupling between floating body and fluid has become serious issue, e.g. sloshing of LNG carriers, flooding of damaged ships, capsizing due to green water etc, and we applied the MPS (Moving Particle Semi-implicit) method to solve such dynamic stability problems. Two problems have been studied recently. The first problem is the coupling between ship rolling and tank liquid. The authors developed a hybrid numerical simulation method for dynamic coupled motions of ship and tank liquid by combining the MPS method for solving a liquid motion and a time-domain simulation of ship motions. A forced roll test for a water tank was conducted and compared with MPS computation. The second problem is the coupling between ship motions and floodwater under damaged condition. The authors try to develop a combined method in which ship hydrodynamic forces acting on intact parts are calculated by ordinary strip theory and those on damaged parts are solved by the MPS method. Since the MPS method is a particle method and fully Lagrangian meshless scheme, it could be applied to violent flow of floodwater.

Comparison of Numerical Simulation and Experiment for Floating Fish Cage Systems

Motoki Misaka, Makoto Sueyoshi (Kyushu University)

New progresses are reported in this presentation on the development of the numerical code for prediction of the

performance of fish culturing system. The numerical method is based on a popular lumped mass method and multi-solid body computation with 6-degree of freedom. It can compute complicated interaction among fish cages and mooring systems consisted from synthetic cable and rigid buoys under current and wave conditions. Some recently obtained validation computation results against a newly performed experiment were reported and discussed.

Numerical Simulation of Liquid-Gas Two-Phase Flow Driven by a Rotating Body

Naruhiko Tan (Tokyo Institute of Technology)

Numerical simulation of two-phase flow driven by a rotating body was conducted. Rotating object was modeled by a rotating cylindrical coordinate system and conservative level set method was used for gas-liquid interface tracking. Free surface profile was visualized in photo-realistic way using VTK library and POV-Ray. In addition, teeth angle and height were taken as parameters to study the effect of rotating object on frictional moment. Increase in teeth height led to increase in frictional moment while frictional moment became flat as teeth angle increase. Validation will be conducted by comparing with an experiment which is planned in near future.

4. おわりに

多くの分野で関連の深い「強非線形流体・構造連成解析」を取り上げ、種々の研究テーマや解析手法に関して知見を深め、情報交換をするためにこの研究集会を国際研究集会として企画した。今回の講演会でも「流体・構造連成」を共通のキーワードとしていくつかの分野における最新の研究成果を聞くことができ、学際的な研究の発展が強く実感できた。今回も外国からの研究者が参加していたため、すべての講演・議論を英語で行った。韓国・中国・日本からの参加者の交流もこの研究集会の重要な目的になっており、この研究集会がすでに有意義な国際研究集会として認知されていることを確信した。

この研究集会は、特にアジア域の若い研究者(大学院生も含む)にとって大変良い刺激になっていることは事実であり、数値計算が若い人によって行われていることを考えれば、優秀な人材育成のためにも、この研究集会を継続して行うべきだと考えている。

プログラム

期 日： 2010 (平成 22) 年 12 月 21 日 (火), 22 日 (水)
場 所： 九州大学応用力学研究所西館 6 階 W 6 0 1 号室

12月21日 (火)

- 13:00~13:10 Opening Address
Masashi Kashiwagi (Osaka University)
- 13:10~13:40 Springing Analysis on 10,000TEU Containership
J.H. Kim, B.C. Kang, Y. Kim (Seoul National University))
- 13:40~14:10 A System for Loads and Load Effects of Ships Subjected to External and Internal Fluid Actions in Waves
Kosuke Seki, Kazuhiro Iijima and Masahiko Fujikubo (Osaka University)
- 14:10~14:40 Nonlinear Evolution of Rogue Waves on Currents: Numerical Simulation Based on the NLS Equation
Hanhong Hu and Ning Ma (Shanghai Jiaotong University)

14:40~15:10 Development of Partitioned FSI Analysis Method
Kangping Liao, Changhong Hu (Kyushu University)

(休 憩)

15:30~16:00 Motion Analysis by Using a CIP-Based Numerical Method
K.K. Yang, Y. Kim (Seoul National University)

16:00~16:30 Effects of Varying Bathymetry on Floating Body Motion
T.Y. Kim, K.H. Kim, Y. Kim (Seoul National University)

16:30~17:00 Aerodynamic Effects on the Motion of Offshore Wind Turbine in Waves
Yasunori Nihei (Osaka Prefecture University)

17:00~17:30 Wave Elevation around a 3D Floating Breakwater
Faisal Mahmuddin, Masashi Kashiwagi (Osaka University)

17:30~18:00 Introduction of Recent Underwater Vehicle Development in China
Bin Fu (Shanghai Jiao Tong University)

(懇 親 会)

1 2 月 2 2 日 (水)

9:00~ 9:20 Sloshing Model Tests for LNG Carrier

K.H. Kim, S.Y. Kim, Y. Kim (Seoul National University)

9:20~9:40 Research and Development of TLP Type Offshore Wind Turbines
Yasunori Nihei, Midori Matsuura (Osaka Prefecture University)

9:40~10:00 Experimental Observation on Green-water Impact and Slamming
Sunbum Kim, Tomohiko Isshiki, Masashi Kashiwagi (Osaka University)

10:00~10:20 Calculation of Impact Load and Structural Response in Water-Elastic Body Impact Utilizing
General-Purpose FE Software
Masakazu Nakashima (Kyushu University)

(休 憩)

10:30~10:50 Hydro-Elastoplasticity Approach for Dynamic Collapse Behavior of Hull Girder in Waves
Yasuyuki Goto (Osaka University)

10:50~11:10 Application of the MPS Method for Ships' Dynamic Stability Problems
Tomohiro Sugimoto (Osaka University)

11:10~11:30 Comparison of Numerical Simulation and Experiment for Floating Fish Cage Systems
Motoki Misaka, Makoto Sueyoshi (Kyushu University)

11:30~11:50 Numerical Simulation of Liquid-Gas Two-Phase Flow Driven by a Rotating Body
Naruhiko Tan (Tokyo Institute of Technology)

11:50~12:00 Closing Address
Changhong Hu (RIAM, Kyushu University)

(研究集会)

力学適応能、自己組織化能を有する

バイオマテリアル-生体インターフェースの創製

研究代表者
 東北大学歯学研究科
 佐々木啓一

1. 研究集会の目的

平成19年度から平成23年度までの5年間の事業計画期間とした特別教育研究経費・大学間連携研究「生体-バイオマテリアル高機能インターフェース科学推進事業」が平成19年4月より開始されました。事業実施主体は東北大学大学院歯学研究科、東北大学金属材料研究所、九州大学応用力学研究所の3組織です。その概要は、生体-バイオマテリアル「インターフェース」における材料、生物学、力学の研究の連携を図り、高機能化インターフェース創製に関する新たな研究領域を開拓し、喪失した口腔及び生体の精緻な機能の新規創製治療技術開発に資すると謳われています。応用力学研究所では、生体工学グループを組む破壊力学分野および複合連続体力学分野がこの生体力学適応能に関する研究を行います。

本共同利用研究集会は平成22年9月6日に、名古屋工業大学で開催の日本機械学会秋季講演会の特別セッションとして開催しました。上記事業に関する基礎的な問題についての研究発表を行い国内のバイオメカニクス研究者の参加も得ることができました。報告内容の概要を以下に示します。詳細は、九州大学応用力学研究所平成22年度の本共同利用研究集会前刷集をご覧ください。

2. 講演概要

- (1) 熱酸化プロセスを利用したチタン上へのアナターゼ皮膜形成と骨適合性評価
 ○成島尚之(東北大), 上田恭介, 岡住拓朗

The oxide phase on Ti, TiO_2 , is known to affect their properties. Anatase has been suggested to have excellent bone forming ability as compared to rutile. The anatase layer formation on Ti and its alloys by thermal oxidation could be the low-cost and simple surface treatment for improving their bone compatibility. We developed the two-step thermal oxidation process for the anatase layer formation on CP Ti. At the first-step, CP Ti is heat-treated in an Ar-CO atmosphere. At the second-step, the specimens were oxidized in air, and anatase-rich layer was obtained in the case of that oxycarbide (TiC_xO_y) single phase was formed at the first-step. The immersion tests in simulated body fluid showed that the anatase-rich layer improved the bone compatibility of CP Ti. The bonding

strength between the anatase-rich layer and CP Ti was higher than 90 MPa.

(2) Apatite formation in Hanks' solution on Ca₂SiO₄ films prepared by MOCVD*

○ Nath Shekhar(Tohoku Univ.), Tu Rong, Goto Takashi

Although calcium phosphate and calcium titanates have been commonly studied as biomaterials, calcium silicates are possible alternatives. In the Ca-Si-O system, there are three main crystalline phases, namely, CaSiO₃, Ca₂SiO₄ and Ca₃SiO₅. *In vivo* and *in vitro* bone regeneration ability of Ca-Si-O films was indicated to be better than that of β-Ca₃(PO₄)₂. Since sintered bodies of calcium silicates do not have sufficient mechanical strength for application to artificial bones or dental implants, calcium silicates can be coated on biomaterials such as ZrO₂, Al₂O₃ and Ti-based alloys.

In the present study, Ca₂SiO₄ film in a single phase was prepared by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) and the apatite formation ability was evaluated by an *in vitro* immersion test in a simulated body fluid.

(3) 高圧捻りによるβ型Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr の微細組織の変化および機械的特性*

○Hakan Yilmazer(東北大), 新家光雄, 赤堀俊和,
仲井正昭, 堤 晴美, 戸高義一(豊橋技科大)
名井 陽 (大阪大学大学院医学系研究科)

A new biomedical β- type titanium alloy, Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ) has been developed by the authors. Severe plastic deformation (SPD) is a well-proved technique for forming submicron- or nano-sized grain structures in metallic materials. The effect of high-pressure torsion (HPT) processing on the microstructure and the mechanical properties of TNTZ was systematically investigated in this study. TNTZ subjected to HPT processing (TNTZ_{HPT}) shows the nano-sized grains with high-angle grain boundary, which are non-uniform with high dislocation density because of severe deformation. As a result, TNTZ_{HPT} shows a high hardness of around 300 HV and a great tensile strength of around 1050 MPa.

(4) リン酸オクタカルシウム(OCP)の溶解性と細胞吸収性

○鈴木 治(東北大院), 穴田貴久

Synthetic octacalcium phosphate (OCP) exhibits biodegradable characteristics if implanted in various bone defects. OCP tends to convert to hydroxyapatite (HA) both *in vitro* at physiologic pH and in the implanted sites. This conversion is accompanied by calcium ion consumption from and phosphate ion release into the surrounding solution. When OCP is incubated in culture medium, this tendency is more distinct as the dose of OCP increased. The equilibrium is attained to approach to the saturation with respect to

OCP but slightly to higher degree of supersaturation beyond OCP. The growth of mouse bone marrow stromal ST-2 cells on OCP crystals is inhibited in the initial stage of incubation while osteoblastic differentiation is facilitated at the later stage more than that by HA crystals. The slight advancement of OCP hydrolysis into HA inhibits the appearance of osteoclastic cells around the OCP-implant in rat tibia bone marrow spaces. The results suggests that the characteristics of OCP which tend to convert to HA is a factor that stimulates not only osteoblastic cellular activity but also osteoclastic cellular response induced by OCP crystals.

(5) 骨再建デバイス用金属系バイオマテリアルの力学的生体機能化

○新家光雄

骨再建用材料には金属材料が多く用いられるが、骨に類似の力学的生体機能性を付与することが強く望まれている。特に、骨および骨再建用デバイス間のストレスシールドを防ぐために骨再建用金属材料の弾性率を生体骨のそれに類似とすることが急務である。同時に、骨再建用金属材料の生体活性セラミックス修飾による生物学的生体機能化の付与も必須であり、その場合の生体活性セラミックス修飾層の力学的安定性も重要である。ここでは、生体骨類似弾性率骨再建用金属材料の開発とそれに生体活性セラミックス修飾した場合の生体活性セラミックス修飾層の安定性を含めた力学機能性に関して述べる。

(6) 表面置換型人工関節が骨内応力場に及ぼす影響*

○北村英輔(九大), 東藤 貢

Biomechanical analysis of a hip joint with resurface type prosthesis was performed to characterize the stress conditions on the surfaces and interiors of the bones. Three different types of cementing were considered in the analysis in order to assess the effects of cementing on the stress state in the femoral head. The finite element analysis clearly exhibited the existence of stress shielding due to the difference of elastic modulus between the hard head component and the softer bone tissue. It was also found that the cementing affects the stress states in the femoral head and a partial cementing with gap region tends to increase the stress level.

(7) 有限要素法を用いた歯科インプラント義歯の顎骨内応力解析*

○重光竜二(東北大), 松本哲哉, 石川太郎,
山川優樹, 池田清宏, 佐々木啓一

This study aimed to clarify the mechanical stress distribution in the mandibular bone with implants supporting an overdenture using the finite element analysis (FEA) based on the morphological data and 3-dimensional(3-D) load measured in a subject. A couple of

3-D FEA models were created based on data from a 62-year-old edentulous woman, who had installed four implants in her mandible and wore an overdenture, using FEA software (Patran). One model furnished four implants aligned as in the patient. In the other model, each implant was aligned along the direction of the measured load vector in maximum clenching in the patient. The result shows that the stress distribution was affected by the number of implants and the magnitude and the direction of occlusal load. In addition, changing the implants' alignment to the load direction reduced the von Mises stress to the result from the model as the patient.

(8) 加工熱処理によるTi-29Nb-13Ta-4.6Zr合金製ロッドの疲労特性の改善*

○仲井正昭(東北大), 新家光雄, 赤堀俊和, 堤 晴美,
成田健吾(東北大/昭和医科), 織部一弥(昭和医科)

A biomedical β -type titanium alloy, Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ) (mass%), which is composed of non-toxic and allergy-free elements and exhibits low Young's modulus similar to that of cortical bone, has been developed by the authors. According to our previous reports, the mechanical properties including fatigue property of TNTZ can be improved significantly by thermomechanical treatments. On the other hand, fatigue property is one of the most important properties when TNTZ is practically employed as a material of metallic rod for spinal fixation. Therefore, in order to improve the fatigue property of TNTZ, the thermomechanical treatment was optimized for this application in this study.

(9) 生体用2元系Ti-x合金のマイクロ組織と機械的特性*

○趙 幸鋒(東北大), 新家光雄, 仲井正昭, 赤堀俊和, 堤 晴美

The ω phase significantly influences mechanical properties of titanium alloys. It has been reported that the ω phase can be introduced by deformation at room temperature in several β -type titanium alloys. In this study, in order to exploit a new Ti alloy with changeable Young's modulus for biomedical applications, the effects of deformation-induced phases on the mechanical properties of Ti-x binary alloys were investigated. The alloys researched in this study exhibit low Young's moduli after solution treatment. Further, the Young's moduli of them increase by cold rolling.

(10) Fine PET による骨代謝イメージング*

横山政宣(東北大院), ○山本未央, 船木善仁,
菊池洋平, 山崎浩道, 石井慶造, 佐々木啓一

This study aimed to examine the influence of early loading on dynamic changes of bone metabolism around dental implants by using a Fine PET. Two titanium implants

were inserted in the right tibiae of Wistar rats. 1 day after insertion, closed coil springs with 4.0 N were applied to the implants. The rats with $^{18}\text{F}^-$ (5mCi/rat) intravenously-injected were scanned by PET scanner at 4, 7, 14, 28 days after load application. Round ROIs were set around the distal implant (right tibia) and at the intact side (left tibia). Longitudinal dynamic changes in bone metabolism were evaluated by examination of the accumulation count of $^{18}\text{F}^-$ at each ROI. The results shows that early loading to the implant initially enhanced the bone metabolism around the implant, however, metabolic activity returned to pre-loading level with time despite a static force being applied to the implants.

(1 1) AFMによる細胞剛性同定に関する検討*

○矢野文彬(九大), 伊藤康德, 高雄善裕,
汪文学, 松原監壮, Chen Zhao Xiao

Elastic modulus of cell is supposed to be an important parameter to monitor the activity of cell and the local variation of stiffness within cell may have some relation to the dynamics and force transfer of cell. Thus, it is desirable to obtain the local distribution of stiffness. An atomic force microscope(AFM) is used to measure the local mechanical properties of the cell and the experimental data obtained by the force curve mode are analyzed with a Hertz model. However, several theoretical assumptions that the Hertz model based on do not realized in the force curve experiment on the cell. The objective of our study is to improve the Hertz model to obtain the elastic modulus of the cells. Relevant problems are also discussed in the present report.

(1 2) コラーゲン系scaffold による再生骨の力学特性*

○三宅慶彦(九大), 荒平高章(九大院), 東藤 貢(九大)

In this study, effects of cell seeding and mechanical stimulus on the multiplication behavior and compressive mechanical property of collagen-based scaffolds were examined. Osteoblast-like cells, MC3T3-E1, were seeded in two different types of collagen scaffold, namely, PET fiber/collagen and honeycomb structured collagen up to 30 days and compression tests were performed after 14 and 30 days. The honeycomb collagen exhibited higher modulus than the PET/collagen and the modulus tends to increase due to cell seeding. Compressive mechanical stimulus was also added to the seeding systems of the honeycomb collagen with cells and such stimulus effectively increased the cell number and resulted in dramatic increase of compressive modulus.

(1 3) 歯科インプラント周辺骨の変形挙動計測*

○森田康之(名大), 東藤 貢(九大), 松下恭之

This study examined the deformation distribution around dental implants in cortical/cancellous bone experimentally using sawbone bone models. Dental implants were placed in the bone models and the displacement distribution was measured using a digital image correlation method, and the strain distribution was evaluated under a compressive load that simulated an occlusion force. Then, we compared the strain distributions around the mandibular bone model between an osseointegrated implant and immediate-loaded implant.

3. まとめ

高機能バイオマテリアル-生体インターフェースの創製に関する第5回目の研究集会であり、3研究機関から合計13件の講演発表があり、異分野間の活発な討論が行われた。参加者の内訳は3機関からは九大7名（内院生3名）、東北大12名、一般から30名程、合計50名程であった。平成23年度は年度後半に、連携研究の5年間を総括する形での開催を予定している。

共同利用研究集会(22ME-S4)報告書

新エネルギーへの複合材料の応用及び評価

研究代表者
九州大学応用力学研究所
汪 文学

目 的

新エネルギーへの複合材料の応用及び評価、特に風力発電を代表とする自然エネルギーへの複合材料の応用及び評価についての研究を進展させることが本研究集会の目的である。

近年、化石燃料の枯渇や地球の環境変化により、再生可能な自然エネルギーを利用する社会的な要請が全世界に高まっている。中でも、風力や太陽エネルギーの利用に関する研究が盛んになっており、特に、風力発電の発展が目覚ましい。風力発電の分野では、直径120メートルの風車のようにエネルギー効率を求めて風車の大型化が求められている。また、陸地の様々な制限により、洋上発電も大きな潜在的可能性を示し始めている。このような状況において、従来使用されてきた鉄鋼材料の比強度や比剛性及び耐食性は限界に達しており、比強度や比剛性及び耐食性に優れた複合材料が構造材料として大きな可能性を示している。一方では、複合材料の高コスト及び非均一性と異方性、あるいは流体と構造の連成問題がもたらす構造設計の複雑性により、自然エネルギーへの複合材料の応用を実現するためには、多くの課題が解決されなければならない。このような流体、構造、材料工学を含めた複雑な課題を解決するためには、数多くの研究者の共同研究が成功の鍵となる。

研究代表者はこれまで低コストの複合材料の作製方法や力学特性について研究を進めてきた。世話人の汪准教授は複合材料の創製と力学特性の評価について研究を進めてきた。それらの研究を踏まえ、本研究集会を通じて国内外の研究者との共同研究を進め、自然エネルギーへの複合材料の応用及び評価に関する研究を前進させていきたい。

研究集会の日時・場所

日時：平成23年1月6日(木)～7日(金)

場所：九州大学応用力学研究所西棟 W601号室

プログラム

【1月6日(木)】

司会 汪 文学 (九州大学)

14:00-14:05

挨拶

高雄 善裕(九州大学)

14:05-14:30

JAXA研究開発本部 複合材料グループの活動概要

○永尾 陽典 (宇宙航空研究開発機構(JAXA) 研究開発本部 複合材グループグループ長)

14:30-14:55

時間-温度換算則を基盤としたCFRPの耐久性評価のための加速試験方法

○中田 政之、宮野 靖 (金沢工業大学)

14:55-15:20

CFRPパッチにより接着修理したCFRP積層板の破壊

○中村 俊一郎 (九大院、第一工業大学)、
松原 監壯、高雄 善裕、汪 文学 (九州大学)

15:20-15:45

CFRPピン継手の統計的性質の評価

○中山 真広(九大院)、宇田 暢秀、小野 幸生、平川 裕一、永安 忠 (九州大学)

15:45-16:00 休憩

司会 宇田 暢秀(九州大学)

16:00-16:25 三軸織物複合材料の疲労特性について
○小杉幸寛(東大院)、青木隆平(東京大学)、
渡邊秋人(サカセ・アドテック株式会社)

16:25-16:45 フォームコアサンドイッチ梁におけるき裂偏向に関する解析
○横関智弘(東京大学)

16:45-17:15 炭素繊維SMCの引張および曲げ強度に対する破壊力学的モデル
○黄木 景二(愛媛大学)

【1月7日(金)】

司会 黄木 景二(愛媛大学)

09:30-09:55 Effects of slit angle of unidirectional arrayed chopped strands (UACS) on the thermal residual stress in UACS/Al laminate
○Jia Xue(九大院), 汪 文学, 高雄 善裕, 松原 監壮(九大)

09:55-10:20 連続体損傷力学とCohesive zoneモデルを組み合わせたCFRP積層板の損傷進展解析
○吉村 彰記(JAXA/ARD)、岡部 朋永(東北大)、小笠原 俊夫(JAXA/ARD)

10:20-10:55 炭化リグノセルロジックス複合材料(CLCC)の開発と新エネルギー分野への応用
梶原俊作(早大院)、荒尾与史彦(早大)、高岡和千代(三菱製紙)、北島昌夫(早大)、
○川田宏之(早大)

10:55-11:20 ナノファイバーを界面に用いた植物由来UPとケナフ繊維からなるFRPの引張り特性
○滝田裕一(日大院)、邊 吾一、坂田憲泰(日本大学)

11:20-11:45 射出成形法による炭素繊維織物材/フェノール複合材料の開発と引張特性評価
○藤崎博万(日大院)、邊 吾一、坂田 憲泰(日本大学)

11:45-12:10 FEM解析によるCFRP製グリッド補強容器の内圧特性評価
○坂田 憲泰, 邊 吾一(日本大学)、黒岩夏樹、榊田明宏
(日産自動車株式会社総合研究所 EVシステム研究所)

12:10-13:10 昼食

司会 邊 吾一(日本大学)

13:10-13:35 CFRP構造の実時間衝撃荷重同定
○小林 洸貴(東北大院)、跡部 哲士、福永 久雄(東北大)

13:35-14:00 柔軟体衝突を受ける複合材積層板の損傷解析
○駒形大輔(東北大院)、岡部朋永(東北大)、吉村 彰記、小笠原 俊夫(JAXA/ARD)

14:00-14:25 熱硬化性樹脂の硬化反応特性に関する研究
○猪瀬啓介(東北大院)、岡部朋永(東北大)、平野啓之(東レ)

- 14:25-14:50 エレクトロスピニング法によるナノファイバーを用いたナノコンポジットの特性
○山下義裕 (滋賀県立大学)
- 14:50-15:15 低圧含浸法により作製したCF/AI複合材料の熱伝導特性評価
○李 文熙(広島大院)、崔 龍範、松木 一弘、杉尾 健次郎、佐々木 元 (広島大)
- 15:15-15:40 ケナフ長繊維の引張特性に及ぼすアルカリ処理効果
○新田 悠二 (山口大院)、合田 公一、野田 淳二 (山口大)、Woo Il Lee(ソウル大)
- 15:40-15:45 閉会の挨拶
汪 文学(九州大学)

講演概要

JAXA研究開発本部 複合材料グループの活動概要

宇宙航空研究開発機構(JAXA) 研究開発本部 複合材グループ グループ長 永尾陽典

JAXAは、日本の航空宇宙に関する研究と開発を行っているが、研究開発本部は基盤技術に関する研究を担当する部門である。その中で、複合材料グループは飛躍的に適用例が増加している複合材料に関し、学術面と実用面の両方についての研究開発を進めている。具体的には複合材料の破壊や損傷進展に関する研究や、高速衝突に関する解析法提案などの基礎的な研究から、大型実大構造の開発・静的試験、疲労試験などの実用的な研究を行っている。昨今では国産旅客機MRJの型式証明に関する支援も行い、産業界への直接支援も実施中である。ここでは、JAXA複合材グループの研究内容と今後の計画などについて概要を示す。

時間-温度換算則を基盤としたCFRPの耐久性評価のための加速試験方法

金沢工業大学材料システム研究所 中田政之

CFRPは航空機や船舶、車両等、過酷な環境の下で高い信頼性が要求される機械構造物に使用されつつある。CFRPを安全安心に使用するためには、その長期耐久性を正確に予測する技術が必要である。本講演では、マトリックス樹脂の粘弾性挙動に成立する時間-温度換算則を基盤としたCFRPの長期耐久性評価のための加速試験について説明する。まず、樹脂の粘弾性と時間-温度換算則について概説し、加速試験方法の理論的な背景を説明する。そして、加速試験方法の詳細と実際の適用例を説明する。

CFRPパッチにより接着修理したCFRP積層板の破壊

中村 俊一郎 (九大院、第一工業大学)、松原 監壯、高雄 善裕、汪 文学 (九州大学)

長方形孔をもつCFRP積層板を同じ層構成のCFRPパッチにより接着修理した。この接着修理構造に破壊が生ずるまで引張荷重を加えた。この構造の破壊後の状況を観察し、供試体に貼付したひずみゲージのひずみ値の変化を観察し、さらに破損部分を切断して破損部詳細を観察した。観察結果から接着修理構造の破壊のストーリーを解析した。破壊のストーリーは、まず接着部および端面の接着層の破壊が起こり、パッチの補強効果が減少し、積層板応力集中部が破損強度に達することにより、構造の破断に至ったと考えられる。

CFRPピン継手の統計的性質の評価

中山 真広(九大院)、宇田 暢秀、小野 幸生、平川 裕一、永安 忠 (九州大学)

炭素繊維強化プラスチックに代表される先進複合材料は、従来の材料に比して軽量かつ高強度であり、現在様々な産業分野でその適用が進められている。一方で、複合材料はその特性にばらつきが大きいために、構造設計はかなりの安全側で行われている。今後、複合材料をより効率的に使用するにはその統計的性質の評価が必要である。

本研究ではCFRPピン継手強度に注目した。継手の形状や材料特性を設計変数とし、有限要素法による継手の強度解析とモンテカルロシミュレーションとを応答曲面法を介して結びつけ、継手強度の統計的性質の設計変数への依存性を調べた。

三軸織物複合材料の疲労特性について

小杉幸寛（東大院）、青木隆平（東京大学）、渡邊秋人（サカセ・アドテック株式会社）

三軸織物複合材料(以下三軸織物と称す)とは、繊維束を面内で0度・60度・120度の三方向に配置し樹脂で固めて作成する。三軸織物は、(1)面内及び曲げ弾性率の等方性(2)高柔軟性といった特性を有しており、柔軟宇宙構造物の一次構造材への適用が期待されている。三軸織物に関する先行研究では三軸織物のヤング率といった弾性特性を調べているものがほとんどで、破壊特性に関する研究は世界的に見ても皆無である。しかし、三軸織物を一次構造材料として長期間使用する場合、その疲労破壊特性を明らかにすることは必須である。そこで、本発表では三軸織物の疲労特性を実験的に評価した結果を報告する。

フォームコアサンドイッチ梁におけるき裂偏向に関する解析

横関智弘（東京大学）

近年、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）／フォームコア（発泡コア）を用いた軽量サンドイッチ構造を、航空機構造や新エネルギー分野の主構造に対して適用することが検討されてきている。損傷許容性を考慮したサンドイッチ構造を設計するためには、主要損傷モードである、表皮／コア間ディボンディングなどに対する破壊力学的評価を行う必要がある。フォームコアサンドイッチ構造のき裂進展に関する知見を得ることが重要である。本研究では、サンドイッチ梁内に進展するき裂の偏向及び安定的進展位置を予測するための簡易解析手法を示す。また、予測したき裂偏向角度や安定的き裂進展位置についての妥当性を実験データ等により検証する。

炭素繊維SMCの引張および曲げ強度に対する破壊力学的モデル

黄木 景二(愛媛大学)

自動車用部材としての使用が期待されているシートモールディングコンパウンド（SMC）材の破壊や強度に関するモデリングはほとんど提案されていない。これはSMCが複雑な破壊挙動を示し、強度予測が困難であるからと考えられる。SMCでは、ストランド界面が低応力で破壊するため、それが初期損傷となって層間はく離やスプリッティングによって破壊しており、最近開発された不連続繊維強化積層板（UACS）と類似の破壊モードを示す。本講演では、UACSで用いられている積層板の層間はく離に対する破壊力学モデルをSMCに適用し、強度予測を試みた。まず、引張試験および3点曲げ試験を行い、強度を測定した。特に、曲げ強度については温度効果も調べた。次に、破壊力学に基づく簡易強度予測式を導出した。第三に、理論値を実験値と比較し、強度予測式の有効性を検証した。

Effects of slit angle of unidirectional arrayed chopped strands (UACS) on the thermal residual stress in UACS/Al laminate

Jia Xue (九大院), 汪 文学, 高雄 善裕, 松原 監壮(九大)

A lot of researches about UACS have been conducted recently, but few reports have been

published openly about the fiber metal laminate made with UACS. This paper focus on the analysis of thermal residual stress in CFRP/Al (CARALL) fabricated with UACS, which is made by cutting parallel slits on unidirectional carbon fiber prepreg. Six cases are prepared with different slit angle θ , which is the angle between slit and fiber direction, including 5.7° , 11.3° , 16.7° , 31° , 45° and 90° . The distance between neighboring slits in fiber direction is 25mm in all cases. Four pieces of prepreg ($150 \times 150 \times 0.2$ mm) with alternate slit angle $[\theta/-\theta/\theta/-\theta]$ are stacked together in the same fiber direction with two aluminum layers ($150 \times 150 \times 0.5$ mm) on each side, and then fabricated using curing cycle recommended by the manufacturer of carbon fiber prepreg. Tensile tests are performed to measure the tensile strength and yielding strain, which can be used to calculate the thermal residuals stress using “yielding point shift” method. Experiment results show that small slit angel lead to large tensile strength as expected, but thermal residual stress is not consistent with slit angles. Among all the cases, specimen with slit angle of 11.3° is the most impressive one with relatively high tensile strength and largest reduction of thermal residual stress of 36.5% compared with CARALL fabricated using traditional CFRP.

連続体損傷力学とCohesive zoneモデルを組み合わせたCFRP積層板の損傷進展解析

吉村 彰記 (JAXA/ARD)、岡部 朋永 (東北大)、小笠原 俊夫 (JAXA/ARD)

本研究では、CFRP積層板の高速衝撃荷重下の損傷挙動を、連続体損傷力学とCohesive zoneモデルを組み合わせた有限要素法によってモデル化する方法を提案する。実験により、高速衝撃荷重下においては、CFRP積層板内には層内の樹脂き裂、繊維の引張・せん断破壊、および層間はく離といった損傷が発生・進展することが明らかになっている。本研究では、連続体損傷力学を用いて層内のき裂を、また、応力基準を用いて繊維破壊を、Cohesive zoneモデルを用いて層間はく離をモデル化した。解析による損傷予測を実験による損傷・貫通挙動と比較した結果、両者はよく一致した。これにより、本損傷予測方法の妥当性が示された。

炭化リグノセルロジックス複合材料(GLCC)の開発と新エネルギー分野への応用

梶原俊作(早大院)、荒尾与史彦(早大)、高岡和千代(三菱製紙)、北島昌夫(早大)、川田宏之(早大)

本研究で扱う木炭と樹脂の新しい混練法による複合成形材料は、これまでにない構造を有しており、今後の幅広い分野での実用化が期待されている。そこで本研究では、木炭と樹脂の混合比を変化させた材料を作製し、混合比が与える材料特性の影響を調査した。今回は、機械的性質に焦点を当て、3点曲げ試験を行い、曲げ強さ、曲げ弾性率を算出した。また、試験後の破断面観察により破壊形態の相違を調査し、強度の発現機構について検討を行った。この結果から、配合比が曲げ強さ、曲げ弾性率へ大きく影響を与え、また破壊形態も配合比により違いが見られた。

ナノファイバーを界面に用いた植物由来UPとケナフ繊維からなるFRPの引張り特性

滝田裕一 (日大院)、邊 吾一、坂田憲泰 (日本大学)

これまで、ケナフ織物と不飽和ポリエステルFRPでは界面接着性が悪いという結果が出ている。ナノファイバーには、超比表面積効果や超分子配列効果があり、この効果を利用することでFRPの界面接着性を向上させることができると考えられる。著者らは、過去の研究でケナフ織物/不飽和ポリエステルFRPにポリ乳酸・ポリアミド6・ポリエーテルサルフォンの3種類のナノファイバーを塗布することで、界面接着性が向上することを確認している。そこで、本研究では母材を植物由来の不飽和ポリエステルに変更し、その引張り特性について報告する。

射出成形法による炭素繊維織物材/フェノール複合材料の開発と引張特性評価

藤崎博万(日大院), 邊 吾一, 坂田 憲泰(日本大学)

フェノールFRPは、従来から耐熱性, 耐火性, 低発煙性という優れた特性から船や列車, 飛行機の構造部材で使用する複合材料として最適であると言われてきた。その成形の際に気泡が残り, 緻密な母材が得られないが, 著者らはフェノール長繊維GFRPの成形に成功した。本報告では同じく射出成形技術を用いて, フェノール樹脂の特徴を活かし, マトリックスの緻密化を実現させて, 長繊維を用いて十分な構造強度を有するフェノールCFRPを成形し, その引張特性を求めた結果について報告する。

FEM解析によるCFRP製グリッド補強容器の内圧特性評価

○坂田 憲泰, 邊 吾一(日本大学), 黒岩夏樹, 榊田明宏

(日産自動車株式会社総合研究所 EVシステム研究所)

近年, 走行時にCO₂排出量をゼロにすることができる燃料電池自動車が注目されている。燃料電池自動車では, 1回の水素充填での走行距離をガソリン車並みにするために, 水素の貯蔵圧力を35MPaから70MPaに高圧化させる取り組みが行われている。著者らは過去の研究で, CFRP製圧力容器の胴部に胴部外径より小さい径に記憶させた形状記憶合金を巻き圧力容器の破裂圧力を向上させる事に成功した。しかし, 形状記憶合金は高価な材料のため, 実用化に向けてはコストの問題を解決させる必要がある。そこで, 本研究ではアイソグリッドを含めたCFRP製グリッドで補強した圧力容器の内圧特性をFEM解析で評価した結果について報告する。

CFRP構造の実時間衝撃荷重同定

小林 洸貴(東北大院), 跡部 哲士, 福永 久雄(東北大)

航空機翼構造や風車ブレードのようなCFRP構造への異物衝突について, センサ応答より衝撃荷重位置および衝撃荷重履歴を実時間で同定する手法を報告する。センサ応答としては, CFRP構造に貼付あるいは埋込んだ圧電素子による電圧計測値, あるいはマイクロフォンによる音圧計測値を用いる。

柔軟体衝突を受ける複合材積層板の損傷解析

駒形大輔(東北大院), 岡部朋永(東北大), 吉村 彰記, 小笠原 俊夫(JAXA/ARD)

航空機の燃費向上, 騒音低減といった性能向上の観点から, 複合材料製ファンブレードの適用に期待がかけられている。航空機用ファンブレードの適用においては, バードストライク時のファンブレードの健全性評価が非常に重要であり, その破壊特性を定量的に把握しておく必要がある。

そこで本研究では, バードストライクを含む柔軟体の衝突問題に対して, 全ての解析対象をSPH法にてモデル化し, 検討を行った。特に, 衝突速度を段階的に変化させた際の複合材料ファンブレードにおける破壊モード変化を議論した。この際に, より現実的な破壊及び損傷進行を再現すべく, 粒子間の分離を考慮した新たな破壊モデルの提案を行った。

熱硬化性樹脂の硬化反応特性に関する研究

猪瀬啓介(東北大・院), 岡部朋永(東北大), 平野啓之(東レ)

エポキシ樹脂をマトリックス樹脂とする炭素繊維強化プラスチックは, 比強度・比剛性に優れ, 燃費向上が求められる自動車部材へ適用する動きがある。この場合, 大量生産, 安定品質を実現するため, 成形時において熱硬化性樹脂の硬化特性を定量的に評価することが重要である。

そこで, 本研究では, エポキシ樹脂を対象とし, 硬化過程の数値シミュレーションを提案する。この手法は, 分子軌道法と分子動力学を組み合わせ, 活性化エネルギー, 生成熱, 分子の分極の効果を考慮し硬化反応を再現するものである。妥当性を検証するため, 3種の硬化剤を用い, 硬化する際の硬化開始温度を解析し, 実験との比較を行った。

エレクトロスピンニング法によるナノファイバーを用いたナノコンポジットの特性 山下義裕（滋賀県立大学）

エレクトロスピンニング法により、アラミド、ポリイミド、ナイロンのナノファイバーを作製した。これを用いてマトリックスにエポキシ樹脂ならびに熱可塑性エラストマーによるナノコンポジットを作製してその力学特性、粘弾性を評価した。それぞれのナノファイバーの結晶化度、結晶構造は汎用の繊維と比較して補強のメカニズムを明らかにした。

低圧含浸法により作製したCF/Al複合材料の熱伝導特性評価

○李 文熙(広島大院)、崔 龍範、松木 一弘、杉尾 健次郎、佐々木 元 (広島大)

Thermal conductivity of unidirectional CF/Al composites fabricated by low pressure infiltration process was estimated. The matrix material (Al-35wt%Cu) in CF/Al composites has low thermal conductivity such as $71.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ in accordance with the generation of intermetallic phases such as CuAl_2 . The thermal conductivity of CF/Al composites with 30 vol% of CFs is about $273 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, which is corresponding to 94% of the theoretical thermal conductivity by rule of mixture. The thermal conductivity of CF/Al composites decreased with increasing temperature. The formation of Al_4C_3 in CF/Al composites also degraded the thermal conductivity of CF/Al composites.

ケナフ長繊維の引張特性に及ぼすアルカリ処理効果

新田 悠二（山口大院）、合田 公一、野田 淳二（山口大）、Woo Il Lee（ソウル大）

環境問題が地球規模で問われる現在、焼却してもCO₂が増加しないバイオマスを用いた材料開発研究が急速に進められている。ケナフ繊維を強化材、ポリ乳酸をマトリックスとするグリーンコンポジット（Green composites）は自動車の内装材や携帯電話等にすでに使用されており、天然繊維を使った複合材料のうち有望な材料の一つである。しかしながら、ケナフ繊維複合材料の実用例は射出成形品が多く、その最も基本形態である長繊維強化材の機械的性質に関して十分な報告がなされていないのが現状である。また、天然繊維と樹脂の間で界面特性を改善するために、天然繊維に化学処理を施すことがあるが、アルカリ処理はその最も典型的な処理方法の一つである。この処理で、天然繊維が高濃度アルカリ溶液によってマーセル化された場合、天然繊維の機械的性質も変化する。川原らはケナフ繊維をNaOH水溶液の濃度を1~7%の範囲で変え、処理後のケナフ繊維の機械的特性を報告している(1)。また、坂本らの研究において、ケナフ単繊維にアルカリ処理を施し単繊維引張試験を行っている(2)。その結果、未処理の単繊維に濃度5 wt%で処理を施した単繊維は引張強度は向上するが、破断ひずみはほとんど変化せず、また、濃度が15 wt%で処理した単繊維は靱性が大きく改善されるが、ヤング率は大幅に低下する。一方、アルカリ処理を行ったケナフ繊維で強化した複合材料は高い曲げ強さと曲げ弾性率を示す(3)。これらのことから、比較的濃度の低いアルカリ処理を施したケナフ単繊維は強度の向上が見られることが明らかになっているが、高濃度で処理してマーセル化されたケナフ繊維の機械的特性については十分に解明されていない。そこで、本研究ではマーセル化効果を含めたケナフ繊維の引張特性に及ぼすアルカリ処理効果について調査した。

おわりに

2日間の研究集会において、多くの大学から多数の研究者が参加され、上述のすばらしい研究発表を行われた。研究交流会にも多くの研究者が出席され、盛んに交流を行われた。基本的に当初企画した集会が実現された。

研究組織

宇田 暢秀	九州大学工学研究院	研究協力者
小野 幸生	九州大学工学研究院	研究協力者
高雄 善裕	九州大学応用力学研究所	研究協力者
新川 和夫	九州大学応用力学研究所	研究協力者
黄木 景二	愛媛大学工学研究科	研究協力者
岡部 朋永	東北大学工学研究科	研究協力者
胡 寧	東北大学工学研究科	研究協力者
倪 慶清	信州大学繊維学部	研究協力者
朱 世傑	福岡工業大学工学部	研究協力者
北條 正樹	京都大学工学研究科	研究協力者
末益 博志	上智大学理工学部	研究協力者
武田 展雄	東京大学工学研究科	研究協力者
汪 文学	九州大学応用力学研究所	所内世話人・代表者

参加者名簿

No.	名前	所属機関	職業	備考
1	青木 隆平	東京大学	教授	
2	小杉 幸寛	東京大学(院)	教授	
3	黄木 景二	愛媛大学	教授	
4	横関 智弘	東京大学	准教授	
5	駒形 大輔	東北大学(院)	大学院生	
6	岡部 朋永	東北大学	准教授	
7	猪瀬 啓介	東北大学(院)	大学院生	
8	山下 義裕	滋賀県立大学	大学院生	
9	中村 俊一郎	第一工業大	教授	
10	邊 吾一	日本大学	教授	
11	滝田 裕一	日本大学(院)	大学院生	
12	藤崎 博万	日本大学(院)	大学院生	
13	坂田 憲泰	日本大学	准教授	
14	福永 久雄	東北大学	教授	
15	小林 洸貴	東北大学(院)	大学院生	
16	吉村 彰記	JAXA/ARD	教授	
17	永尾 陽典	JAXA 研究開発本部	教授	
18	川田 宏之	早稲田大学	教授	
19	合田 公一	山口大学	教授	
20	野田 淳二	山口大学	准教授	
21	梶原 俊作	早稲田大学(院)	大学院生	
22	新田 悠二	山口大学(院)	大学院生	
23	中田 政之	金沢工業大学	教授	
24	佐々木 元	広島大学	教授	
25	李文熙	広島大学(院)	大学院生	
26	宇田 暢秀	九州大学	教授	
27	小野 幸生	九州大学	助教	
28	中山 真広	九州大学(院)	大学院生	
29	高雄 善裕	九州大学	教授	
30	松原 監壮	九州大学	技術職員	
31	汪 文学	九州大学	准教授	代表者
32	陳 兆祥	九州大学	学術研究員	
33	高祖 京介	九州大学(院)	大学院生	
34	薛 佳	九州大学(院)	大学院生	
35	李 航	九州大学(院)	大学院生	
36	泉 達郎	九州大学(院)	大学院生	
37	矢野 文彬	九州大学(院)	大学院生	
38	陳 瑩	九州大学(院)	大学院生	
39	宋 昌錫	九州大学(院)	大学院生	
40	趙 峻楓	九州大学(院)	大学院生	
41	田中 将也	九州大学(院)	大学院生	
42	橋本 憩大	九州大学(院)	大学院生	

CT 画像を利用したバイオメカニクス・シミュレーション法の開発 と臨床問題への応用

横浜市立大学医学部 稲葉 裕

1. 序言

近年、コンピュータとシミュレーション技術の発展により、CT や MRI 等の医療用生体画像を利用して、実 3 次元構造を模擬した生体の数値モデルを作成し、有限要素法を用いて生体力学的解析を行うことが可能となってきた。しかし、境界条件をいかに生体内の条件に適合させて設定するか、あるいは、得られた応力状態等の解析結果をいかに医学的考察に反映させるか等の問題が残されている。これらの問題を解決するためには、計算力学や生体力学を専門とする工学者と、臨床において骨を扱う整形外科医や歯科医が共同して研究を進める必要がある。一方、国産の骨解析ソフトウェアである Mechanical Finder (株) 計算力学研究センター) は、骨モデル作成からインプラント等を挿入したモデルへの発展、および応力解析までの一連の作業を 1 パッケージで行うことができる簡便なソフトウェアであり、最近では、整形外科、歯科および工学の各分野で着実にユーザが広がっている。

そこで、整形外科、歯科、工学の各分野において Mechanical Finder のユーザである者が一堂に会し、研究紹介と議論を通して親交を深め、最終的にはシミュレーション技術を骨関係の臨床問題へ応用することを目的として、本研究集会を企画し開催する運びとなった。

今回、第 1 回研究集会を開催でき、異なる分野から多くの方にご参加頂いたことは感銘深いことである。研究集会開催にご協力いただいた諸先生方、ならびに遠方よりご参加いただいた各先生方に心より深謝申し上げます。

2. プログラム

日時：2010 年 8 月 28 日 (土)

会場：東京都品川区戸越 1-7-1 戸越NIビル
株式会社 計算力学研究センター 会議室

- 13:30-13:40 開会の辞 東藤 貢 (九州大学)
- 13:40-14:00 講演 1 「Mechanical Finder を用いた骨の力学モデリングの有効性と問題点について」
坂本二郎 (金沢大学理工研究域)
- 14:00-14:20 講演 2 「大腿骨近位形状モデリングと転倒骨折予測解析」
山本創太 (芝浦工業大学工学部), 田中英一 (名古屋大学工学研究科)
- 14:20-14:40 講演 3 「人工股関節全置換術後における臼蓋側の応力解析」
池 裕之 (横浜市立大学整形外科), 稲葉 裕, 小林直実
平田康英, 齋藤知行
- 15:00-15:20 講演 4 「人工関節置換術が股関節に及ぼす力学的影響について」
東藤 貢 (九州大学応用力学研究所), 北村英輔
中島康晴 (九州大学整形外科), 藤井政徳, 佐藤太志, 岩本幸英
- 15:20-15:40 休憩
- 15:40-16:00 講演 5 「膝蓋骨形状は膝蓋骨非置換 TKA の PF 接触応力に影響する -3 次元有限要素法による解析と臨床との比較-」
高橋 敦 (東北大学整形外科), 佐野博高, 千葉大介, 八田卓久
- 16:00-16:20 講演 6 「生体内測定荷重による歯科インプラントの顎骨内応力解析」
松本哲哉 (東北大学歯学研究科), 重光竜二,
石井 優 (東北大学工学研究科), 石川太郎, 山川優樹, 池田清宏
佐々木啓一 (東北大学歯学研究科)
- 16:20-16:40 講演 7 「無歯上顎骨の歯科インプラント治療に関する生体力学的検討」
荒平高章 (九州大学総合理工学府)

東藤 貢 (九州大学応用力学研究所)
松下恭之 (九州大学歯学研究院), 古谷野潔
16:40-17:00 講演 8 「人工骨の力学特性に及ぼす骨組織再生の影響」
東藤 貢 (九州大学応用力学研究所), Ren Limei
荒平高章 (九州大学総合理工学府),
名井 陽 (大阪大学未来医療センター)

17:00-17:10 閉会の辞 稲葉 裕 (横浜市立大学)

3. 講演の概要

(1) 講演 1

機械工業の分野においてはこの10年間で、3次元CADやCAEの技術が急速に進歩し、実際の設計開発において信頼性が高く使いやすい商用ソフトウェアも数多く開発され普及している。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てきた。この技術をCAE と組み合わせることで、生体の力学解析を実現するソフトウェアが幾つか開発されている。最も早くから開発され普及しているものとしては、Materialise 社製のMimics が挙げられる。これは医療断層画像からCAD モデルや有限要素モデルを作成するソフトウェアで、力学解析には既存の有限要素解析ソフトウェアを使うことを前提にしている。既存の解析ソフトウェアの使用を前提とした同様のものとしては、この他にSimpleware社製のScanIP がある。両者とも汎用のCAE にデータを渡しての解析を前提としているため、骨の強度解析に限らず血管内の流れの解析等、広い応用が可能である。しかし、CAE ソフトが別途必要であるため、それを持たないユーザーにとっては費用の面だけでなく、ソフトの使い方もあわせて修得する必要があり、負担は少なくない。これに対して、MechanicalFinder (株) 計算力学研究センター) は、スキャン画像の入力から力学解析とその結果表示までを1パッケージで行うことができる骨強度評価のための専門ソフトウェアである。汎用のCAE ソフトと比較すると解析機能は限定されているが、一連の解析作業を1つのソフトで行うことができるため使い方の習得も比較的容易であり、骨の強度評価だけが目的のユーザーにとってはより望ましいソフトウェアと言える。本講演では、Mechanical Finderについて、著者の研究グループにおける応用例の幾つかを紹介し、このソフトウェアの特徴について述べる。

(2) 講演 2

大腿骨頸部骨折は、高齢人口の増加に伴い、発生数が増加しており、この骨折の予防診断の重要性が増している。現在、その診断法としては骨密度を測定する手法が一般的である。しかし、近位大腿骨の強度は、その形状、骨量の分布および荷重条件に依存する。したがって、個体別大腿骨モデルによる3次元有限要素解析は、より高精度な骨折予測診断ツールとなる可能性がある。そこで著者らは、これまで医用CT画像に基づき簡便かつ高精度に近位大腿骨形状を再現できる個体別有限要素モデルの作成手法の基礎的検討を行ってきた。本報では、モデリング手法の簡便化及び、要素数とモデルの精度の関係について検討した。

(3) 講演 3

人工股関節全置換術(THA)後において、股関節周囲の力学的環境は大きく変化するとされる。今回、我々は有限要素法を用いてTHA施行後におけるカップ周囲の応力、および応力とカップ設置位置との関連を検討したので報告する。

(4) 講演 4

超高齢社会が到来した我が国では、年々、股関節や膝に変形性関節症を発症した患者数が急激に増大している。変形性関節症が進行した股関節に対しては、最終的な治療法として、大腿骨頭を大きく取り除き人工関節を挿入する人工股関節全置換術(THA)が施される。一方、変形もそれほど進んでいない比較的初期の段階で、骨頭の温存が可能な場合に対して、最近、骨頭の表面部のみを人工物で置き換える表面置換型人工股関節(RS)の使用が検討されている。表面置換型は全置換型と異なり、骨頭の大部分を残存させる骨温存型であり、骨頭表面に置換したヘッド部と臼蓋側のカップで摺動面を形成するために可動域を大きく取ることができる利点を有している。表面置換型と全置換型は、ともに骨組織よりも高い剛性を有するチタン合金やコバルト・クロム合金製の金属コンポーネントが骨と直接接するために、骨内応力が低下するストレス・シールドの発生が懸念される。ストレス・

シールディングによる骨吸収は人工関節のルーズニングの原因にもなるため、臨床の場合においても重要な問題のひとつとなっている。全置換型で用いられる金属はチタン合金であるが、表面置換型では、よりヤング率が高いコバルト・クロム合金を使用するため、ストレス・シールディングもより厳しいことが予想される。そこで本研究では、臼蓋形成不全を発症した患者と末期の変形性股関節症患者の股関節CT画像より数値股関節モデルを構築し、それぞれ表面置換型と全置換型人工股関節に置換したモデルへと発展させ、ストレス・シールディング現象について定量的に評価することを目的とした。

(5) 講演 5

膝蓋骨非置換人工膝関節全置換術 (TKA) において、膝蓋大腿関節 (PF) 接触圧は術後 anterior knee pain の原因となるといわれている¹⁾。膝蓋骨の形状は個人差が大きい、膝蓋骨形状が PF 接触圧に影響するかどうかは不明である。本研究の目的は膝蓋骨形状が PF 接触圧に与える影響を、臨床調査と有限要素解析を用いて明らかにすることである。

(6) 講演 6

歯および周囲歯槽骨の欠損に対する補綴歯科治療では、人工の補綴装置を介してメカニカルストレスが顎骨に伝達し、その際の荷重配分をいかに良好に保つかが最大の課題である。補綴歯科治療に関わるメカニカルストレスを解明するうえで、義歯、インプラント等の補綴装置に加わる機能圧は各種センサーを用いることにより生体内での実測が可能であるが、顎骨内の荷重伝達および応力動態の解明にはin Silico解析、すなわちコンピューターを用いたシミュレーションが必要である。一方、補綴装置により顎骨内へ伝達された機能圧が骨に及ぼす影響については、PET (positron emission tomography) や骨シンチグラフィといった核医学的分子イメージング手法を用いることにより、骨代謝という側面から把握することが可能である。そこで本研究では、ラット脛骨へ埋入したインプラント体に持続的荷重を付加したモデルにおいて、micro CT画像から構築したFEAによるインプラント周囲骨における応力分布の分析と、東北大学で開発された世界初の1mm以下の空間分解能を持つFine PET装置によるインプラント周囲骨の骨代謝の定量的評価を比較検討することにより、機能圧が骨代謝に与える影響を考察する手法の確立を目的とした。

(7) 講演 7

近年、歯科学の発展に伴い高度なインプラント治療が確立されつつある。しかし、下顎骨と構造が異なる上顎骨に対するインプラント治療は現在も様々な問題を抱えており、特に上顎洞の存在がインプラント埋入をより困難にさせている。臨床現場において、下顎骨の場合に比べ、上顎骨へのインプラント治療の場合は、インプラントの本数を少なくすることが求められるが、それは、臨床医の経験などに基づくものであり、生体力学的裏付けがないのが現状である。これらを支持するような結果を計算力学的手法で得ることができれば、インプラント治療を理論的に支持することができるであろう。そこで本研究では、2名の上顎無歯顎患者のCTデータをもとに3次元モデルを構築し、それぞれの患者に対して同じ本数のインプラントを埋入し力学的観点から比較検討した。さらに、力学的安全性の点で問題がある女性患者に対しては、修正案を提案し、力学的安全性の向上を確認した。

(8) 講演 8

骨腫瘍や嚢胞あるいは人工関節周辺での骨吸収などにより、骨組織の大規模な欠損が生じた場合、自然な治癒はもはや不可能であり、確実に骨組織を再生させるためには、何らかの補填を行って治癒過程を援助する必要がある。骨補填材としては、自家骨や他家骨に加え、最近では人工骨が用いられている。自家骨移植は患者自身の骨を用いるため、拒絶反応がなくもっとも有効な手法であるが、骨採取のための別の手術が必要となり、患者への負担が懸念されている。他家骨移植は、感染症や生体適合性の問題がある。そこで最近では、骨親和性、骨伝導性に優れた多孔質セラミックス材料を応用した骨再生が検討され臨床応用が進んでいる(1)(2)。バイオセラミックスには、吸収性と非吸収性が存在し、生体に埋入後、骨組織の再生と吸収挙動の影響により力学的特性は変化するが、その詳細は未だ不明な点が多い。そこで、本研究では、非吸収性の多孔質ハイドロキシアパタイト (HA) を用いた骨再生実験結果と数値解析結果を比較検討し、多孔質HAの力学特性に及ぼす骨再生の影響を定量的に評価することを目的とした。

4. あとがき

本研究集会は、「シミュレーション」と「硬組織」をキーワードとして、医学 (特に整形外科)、歯

学, 工学において関係する研究者を一堂に会し, 将来的な医歯工連携を目指して開催したものである。当初の予想に反して, 整形外科を中心とした医学, 歯学, 工学および関連する医療機器メーカーから多くの方にご参加頂き, 各講演とも活発な議論を展開して頂いた。次年度も引き続き第 2 回研究集会を開催する予定であり, 本研究集会が, この分野の発展に貴重な役割を果たしたことを信じて止まない。

研究集会 22ME-S5 参加者一覧

No.	大学名	学部名	氏名
10001	茨城県立医療大学	保健医療学部 放射線技術学科	森 浩一
10002	茨城県立医療大学	保健医療学部	小原 哲
10003	埼玉医科大学	整形外科	宮島 剛
10004	鹿児島大学大学院医歯学類	口腔顎顔面補綴学分野	丸山 浩美
10005	昭和大学	歯学部歯科補綴学教室	山口 菊江
10006	昭和大学	歯学部歯科補綴学教室	樋口 大輔
10007	昭和大学	歯学部歯科補綴学教室	石浦 雄一
10008	北海道医療大学	クラウンブリッジ・インプラント補綴学分野	坂本 太郎
10009	北海道医療大学	クラウンブリッジ・インプラント補綴学分野	仲井 太心
10010	横浜市立大学	医学部 口腔外科学教室	廣田 誠
10011	昭和大学	歯学部歯科補綴学教室	金石 あずさ
10012	横浜市立大学	大学院医学研究科 顎顔面口腔機能制御	玉井 直人
10013	横浜市立大学附属病院	口腔外科	藤野 真樹
10014	横浜市立大学附属病院	歯科・口腔外科	岩井 俊憲
10015	日本メディカルマテリアル株	設計開発部	込宮 隆行
10016	日本メディカルマテリアル株	設計開発部インプラント設計開発1課	木南 公博
10017	横浜市立大学	整形外科	池 裕之
10018	日本メディカルマテリアル株	インプラント設計開発1課	岡田 崇洋
10019	鳥取大学	医学部整形外科	土海 敏幸
10020	筑波大学大学院	人間総合科学研究科スポーツ医学専攻	村上 憲治
10021	九州大学応用力学研究所	新エネルギー力学部門 エネルギー変換工	東藤 貢
10022	金沢大学	理工研究域	坂本 二郎
10023	芝浦工業大学	工学部	山本 創太
10024	横浜市立大学	整形外科	稲葉 裕
10025	横浜市立大学	整形外科	小林 直実
10026	横浜市立大学	整形外科	平田 康英
10027	横浜市立大学	整形外科	齋藤 知行
10028	九州大学	整形外科	中島 康晴
10029	東北大学	整形外科	高橋 敦
10030	東北大学	整形外科	佐野 博高
10031	東北大学	整形外科	千葉 大介
10032	東北大学	整形外科	八田 卓久
10033	東北大学	歯学研究科	松本 哲哉
10034	東北大学	工学研究科	重光 竜二
10035	東北大学	工学研究科	石井 優(百瀬)
10036	東北大学	歯学研究科	佐々木 啓一
10037	九州大学	総合理工学府	荒平 高章
10038	コバレントマテリアル	術グループ	吉田 加代子
10039	コバレントマテリアル	術グループ	辛 平(Ping Xin)

		合計	39名
--	--	----	-----

人工関節のバイオメカニクスとバイオマテリアル

佐賀大学医学部 馬渡正明

1. 序言

約40年前、英国のCharnleyが低摩耗の人工股関節を開発して以来、人工関節医療は発展を遂げてきた。疾病や外傷などにより股関節や膝関節の機能が失われ、歩行や移動に困難を来たした人々に対して、我が国では年間10万件以上の人工股関節置換術が行われている。人工関節の意義は破壊されその機能を失った関節を人工物で再建させることにある。求められる機能とは無痛性、支持性、可動性と耐久性であろう。さらに安全で正確な手術が求められることは言うまでもない。

佐賀大学医学部附属病院の人工関節置換術の実施実績は2005年には750件を数え、大学病院としては突出しており、この分野では我が国の中心的センターとなっている。この実績に支えられ、佐賀大学医学部・理工学部と九州大学応用力学研究所を中心に、より高性能で和式の生活に対応した人工関節と周辺機器とそれらの評価法を開発すべく、2003年より「プロジェクト：人工関節」を立ち上げ、すでに2件の実用化と4件の特許申請を行ってきた。2005年1月より佐賀大学医学部内にJMM（日本メディカルマテリアル）の支援により、全国初の寄附講座「人工関節学」が設置され、人工関節研究のさらなる推進と研究成果の実用化、企業化が期待されている。

現在、我々が取り組んでいる最初のテーマは「和式生活に対応した人工関節の開発」である。このテーマを実現するためには医学、工学、看護学、社会福祉学、心理学、教育学などの学際的な叡智を結集し、さらには産学官一体となった取り組みが不可欠であると考えている。

今回、昨年に引き続き本研究集会を開催できたことは感銘深いことである。研究集会開催にご協力いただいたプロジェクト関係の諸先生方、ならびに遠方よりご参加いただいた各先生方に心より深謝申し上げます。

2. プログラム

開催日時：9月18日（土）13：30～17：40

会場：九州風雲堂販売（株）会議室（福岡市博多区上牟田1-11-31）

開会の辞 13:30-13:40 東藤 貢（九州大学応用力学研究所）

講演1 13:40-14:00 「抗菌性人工関節の開発-研究の現状と今後の方向性」
野田岩男（JMM）

講演2 14:00-14:20 「銀含有ハイドロキシアパタイトによる抗菌生体材料の開発
-ISO変法試験における銀HA溶射被膜の経時的抗菌性変化-」
安藤嘉基（JMM）

講演3 14:20-14:40 「人工関節置換術後感染症の現況と治療」
河野俊介（佐賀大整形外科）

講演4 14:40-15:00 「股関節周りの筋力を考慮した人工股関節脱臼に関する研究」
木口量夫（佐賀大工学部）

休憩 15:00-15:10

講演5 15:10-15:30 「アジア・アラブ人のための人工股・膝関節の実用化とその適用評価」
廣川俊二（佐賀大医学部）

講演6 15:30-15:45 「完全屈曲型人工膝関節の受動運動型膝シミュレータを用いた
力学評価-シミュレータについて-」
高野恭寿（JMM）

講演7 15:45-16:00 「完全屈曲型人工膝関節の受動運動型膝シミュレータを用いた
力学評価-切断膝実験について-」
井手衆哉（佐賀大整形外科）

講演8 16:00-16:20 「CFKの有限要素解析」
萩原世也（佐賀大工学部）

休憩 16:20-16:30

特別セッション「CFK新デザイン」

(1) 16:30-16:45 「新デザイン検討の経緯とそのコンセプトについて」

橋田 昌彦 (JMM)

(2) 16:45-17:00 「CFK 新デザインの深屈曲時応力解析」

東藤 貢 (九大応力研)

(3) 17:00-17:20 総合討論

佐賀大学学長挨拶 17:20-17:30 佛淵孝夫

閉会の辞 17:30-17:40 馬渡正明 (佐賀大学整形外科)

3. 講演の概要

(1) 講演 1

我々は、佐賀大学—日本メディカルマテリアル株式会社の共同研究として、2005年6月より、銀イオンの抗菌作用を利用した「抗菌性人工関節の開発に関する研究」を行ってきた。今回、この5年間の研究の歩みを振り返り、今後の研究の方向性について考察した。

現在、佐賀大学医学部では、本研究の最終段階となる骨内での抗菌実験が、ラットの脛骨感染モデルを使用して行われている。本実験は骨内感染モデルを確立する研究から行う必要がある、難易度の高い研究であるが、本実験から骨内での抗菌採用が証明されれば、銀HA溶射被膜の臨床応用のステージが、ようやく見えてくるものと考えられる。解決すべき課題はまだ多いが、抗菌性人工関節の実現に向けて、全力で研究・開発に取り組んでいきたいと考える。

(2) 講演 2

人工関節等の生体材料を用いた整形外科手術における感染は、周術期のみならず長期的にも大きな問題である。近年、インプラント表面に抗菌コーティングを行うことによって、インプラント自体に感染予防機能を付与しようとする研究が各国で行われている。我々も、優れた抗菌性能を有する銀に着目し、溶射法を用いて、銀含有ハイドロキシアパタイト溶射被膜を開発している。これら抗菌生体材料の抗菌性能は、まず *in vitro* そして *in vivo* にて評価されるが、*in vitro* 抗菌性評価方法は研究者によって異なり統一された方法は見当たらない。我々は、抗菌性評価に用いる培地により、無機抗菌剤ならびに抗菌薬の効果が変動することを報告している。今回、その結果に基づき試験方法をより生体内に近い条件に修正した ISO 変法抗菌試験を用いて、銀HA溶射被膜の *E. coli*, *S. aureus* に対する抗菌性を経時的に評価したので報告する。

(3) 講演 3

人工股関節全置換術は股関節機能の再建、疼痛の改善の得られる優れた術式で、比較的長期の安定した成績も報告されている。しかし、術後感染を合併すると長期の加療および複数回の手術を要し、*implant* 温存が不能な場合もある。今回、佐賀大学整形外科における初回THA術後感染発生数を調査し、治療法・予後を報告する。

(4) 講演 4

人工股関節置換術は、変形性股関節症や関節リウマチなどによる痛みや運動機能障害を改善する最も効果的な治療法のひとつであるが、インプラントの摩耗や破損、緩み、脱臼などの解決すべき問題が残されている。THA患者の術前計画や術後の生活指導、人工股関節の設計・開発を行う上でこのような問題と日常生活動作との力学的関係を明らかにすることが重要である。このようなことから、人工股関節の性能を評価することが可能な股関節シミュレータの開発が行われた。本研究では、このシミュレータを用い、股関節まわりの筋力を考慮したうえで人工股関節の脱臼について考察する。

(5) 講演 5

本講演では、アジア・アラブ人のための人工股・膝関節の実用化とその適用評価に関する研究について、その概要を説明する。研究の全体構想は、可動域を大幅に拡大し、座式生活に対応できるアジア・アラブの人々のための人工膝・股関節を実用化するとともに、その適用評価を実施することである。具体的な目的としては、人工膝関節の臨床応用に関する厚生労働省の認可を取得すること、人工股関節の脱臼防止策を徹底すること、人工関節患者の座式での QOL に関する大規模調査・評価を実施すること等が挙げられる。

(6) 講演 6, 7

屈曲150度までの膝屈曲動作において、大腿四頭筋およびハムストリングスの筋力が、3体の切断膝に取り付けた後方安定型人工膝関節の動きと関節反力に及ぼす影響を調べた。その評価のために、臨

床医が行う受動運動を模擬する受動運動型膝関節シミュレータを用いた結果について紹介する。

(7) 講演 8

人工膝関節を構成する部品のひとつに膝関節コンポーネントとの摺動・緩衝の役割を果たす超高分子量子ポリエチレン製インサートがある。インサートは大腿骨コンポーネントとの摺動面が特殊な形状をしており、接触応力により生じる損傷や破損が懸念される。従って、人工膝関節の最適設計を行うためには、インサート表面およびその近傍にどのような応力が生じているかを知ることが重要である。本研究では、人工膝関節の3次元有限要素モデルを作成し、有限要素法を用いてインサートに生じる影響について解析を行うことを目的とする。

(8) 特別セッション講演 1

CFKは屈曲180度完全屈曲までコンポーネントが屈曲を制限しないという Offset Theory をコンセプトに研究が進められてきた。これまでは、深屈曲の臨床成績を持つ Bi-surface 型人工膝関節を改良する形で様々なデータが採取され、Offset Theory の有効性について検証されてきた。現在、Bi-surface 型をベースにして完全屈曲を達成するコンポーネントを設計した場合、課題として以下の2点が考えられる。(1) 大腿骨 ball 部のボリュームが大きくなり、膝後方の組織と干渉する。これにより伸展制限、神経、血管を圧迫するリスクが残存する。(2) 脛骨トレイの遠位側に socket 格納部分が突出する。結果として、追加骨切が必要となり、コンポーネントを設置する際に難しい手技を実施する必要がある。臨床投入するにあたっては、過去の Offset Theory における有効性の検証結果を生かしながら、これらのリスクについて、さらに低減する必要があると考え、新デザイン検討を行うに至った。

(9) 特別セッション講演 2

これまでは、Bi-surface 型人工膝関節を改良する形で検討されてきた CFK モデルであるが、今回新たに Ball-socket 構造とは異なる新デザインが提案された。そこで、我々の研究グループでは、新モデルの CAD データを基に有限要素モデルを構築し、深屈曲動作を仮定した動作状態で動的応力解析を行い、得られた結果を、旧 CFK モデルや汎用の PS 型人工膝関節モデルの解析結果と比較検討を行った。

4. あとがき

本研究集会は、2005年に応用力学研究所共同研究会としては初めての医学と工学の両分野にまたがる学際的研究集会としてスタートし、当初は、主に力学的解析を中心した研究会であった。2007年度よりタイトルに「バイオマテリアル」を加え、抗菌材料を中心とした人工関節に関連するバイオマテリアルに関する研究発表をお願いした。高齢化社会を迎えた我が国において特に重要なテーマの一つである「人工関節」を課題とし、医学と工学の両分野から最先端の研究者による9件の講演があった。参加者も講演者を含め大学、病院、企業より約40名ほどの参加者があり、各講演とも活発な議論を展開して頂いた。本研究集会在、この分野の発展に貴重な役割を果たしたことを信じて止まない。

研究集会 22ME-S6 参加者リスト

No.	氏名	所属
1	佛淵孝夫	佐賀大学, 学長
2	馬渡正明	佐賀大学整形外科
3	宮本比呂志	佐賀大学医学部
4	嶋崎貴文	佐賀大学整形外科
5	米倉豊	佐賀大学整形外科
6	安藤嘉基	佐賀大学医学部
7	河野俊介	佐賀大学整形外科
8	井手衆哉	佐賀大学整形外科
9	北島将	佐賀大学整形外科
10	園畑素樹	佐賀大学整形外科
11	木口量夫	佐賀大学工学部
12	林喜章	佐賀大学工学部
13	堀江徹	佐賀大学工学部
14	廣川俊二	佐賀大医学部
15	萩原世也	佐賀大学工学部
16	東藤貢	九大応研
17	大野充孝	九大総理工
18	城田明典	九大総理工
19	上野勝	JMM
20	小林恒之	JMM
21	野田岩男	JMM
22	高野恭寿	JMM
23	橋田昌彦	JMM

他にJMMから5名
九州風雲堂から5名

合計 33名