

研究内容の紹介 ～ものづくりプラザへの依頼工 作に関連して～

工学部第四類 田中義和

目次

- 鋼材の低サイクル疲労
- GFRPの強度
- 柔軟発電体を用いた環境・振動発電
- 広島大学人力飛行機製作チームHUES
- おわりに

鋼材の低サイクル疲労

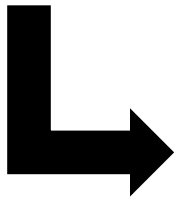
研究背景

船舶は大きな構造物である故に、様々な部分で多大な影響を受けるため設計段階で構造の信頼性を確保しておくことが重要



従来の安全基準では十分検討されていなかった事象により船舶の事故が発生したという事例がある

構造信頼性を高度化するための研究が必要

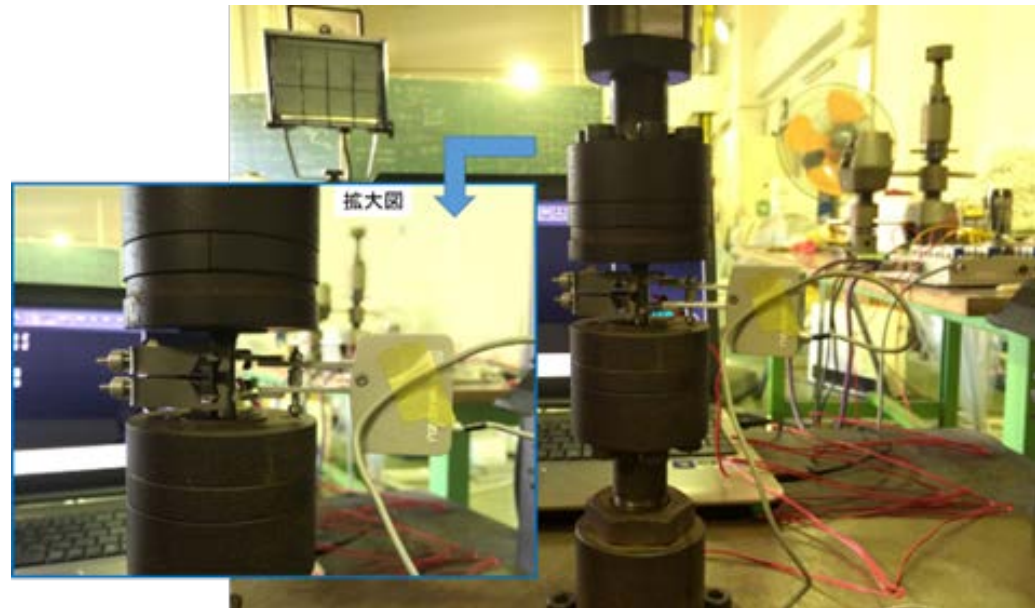


繰り返し負荷による変形の進展および破壊を評価できる方法

研究内容

- 鋼の材料試験を行い、軟鋼の材料特性に整合する複合硬化モデルとパラメータの取得
- 軟鋼の低サイクル疲労試験から疲労強度特性を取得
- 実形状を想定したスティフナ付き平板の低サイクル疲労試験

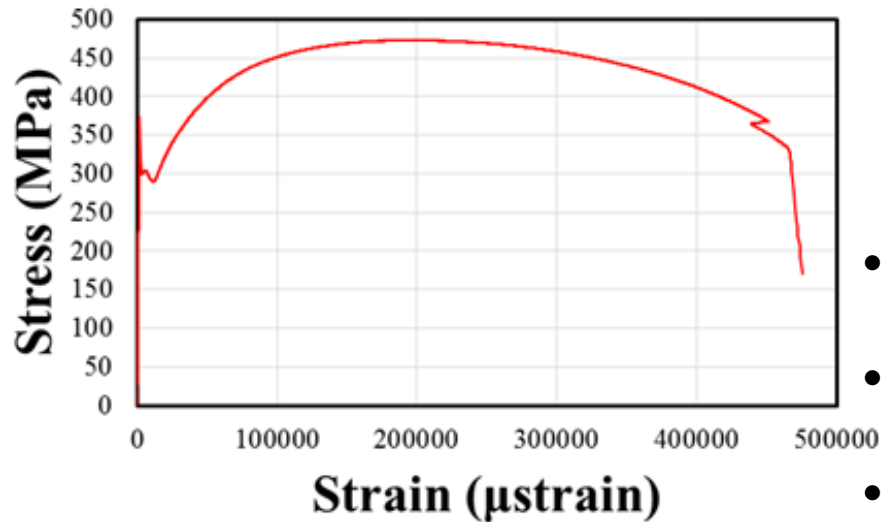
引張り試験・低サイクル試験



左図は試験片, 右図は試験の様子

試験はオートグラフ・伸び計
試験片はSM材の円柱形試験片を用いる

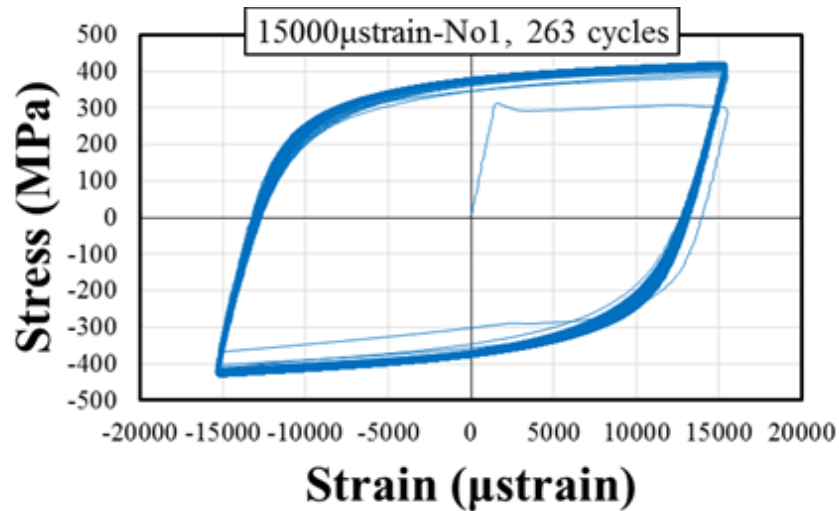
実験結果（引張り試験）



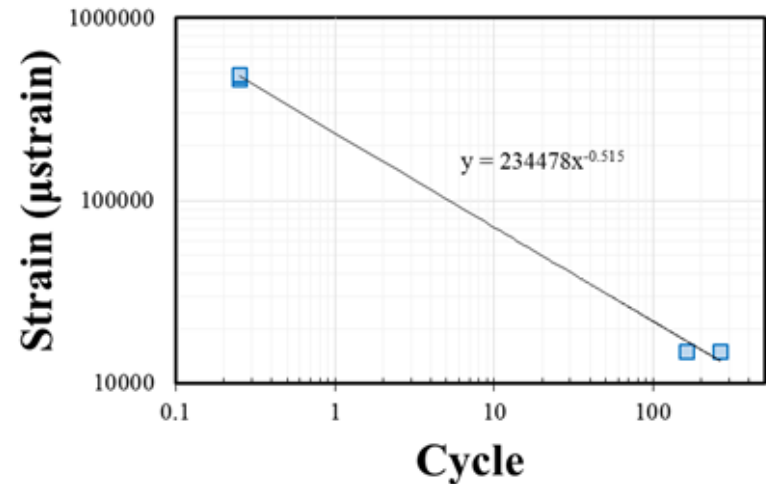
- 上図は引張り試験より得たSS線図の一例である
- 下図は試験結果をまとめた表である
- ヤング率の平均は209.3GPa
降伏応力の平均は366.4GPaであった
- この結果を用いて、
低サイクル試験のひずみ振幅を15000µstとした

	young's modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Breaking elongation (mm)
No1	216.6	373.2	4.86
No2	204.7	365.4	
No3	206.5	360.7	
Mean	209.3	366.4	

実験結果（低サイクル試験）

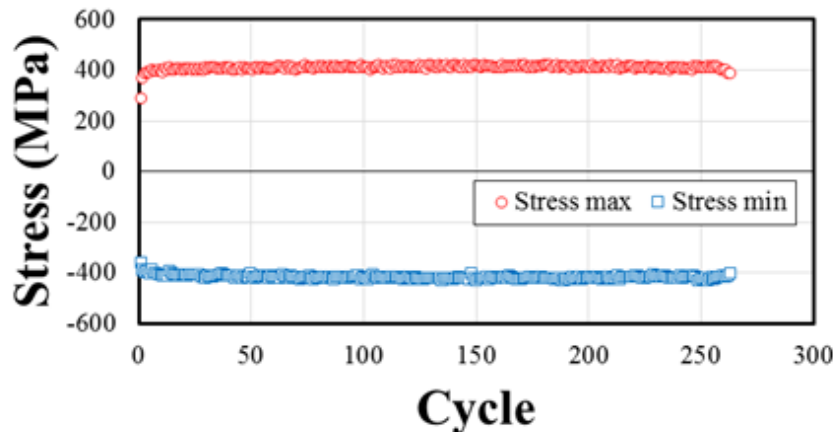


SM材のヒステリーループの計測結果



SM材のひずみ振幅と破断サイクルの関係

Strain amplitude 15000μstrain



SM材のピーク応力の推移

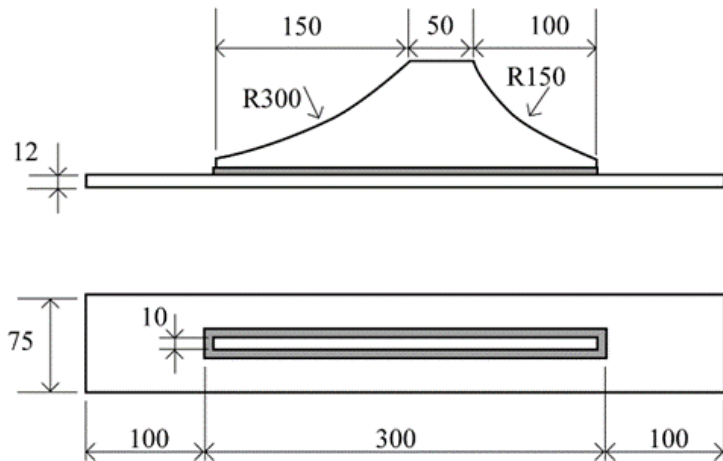
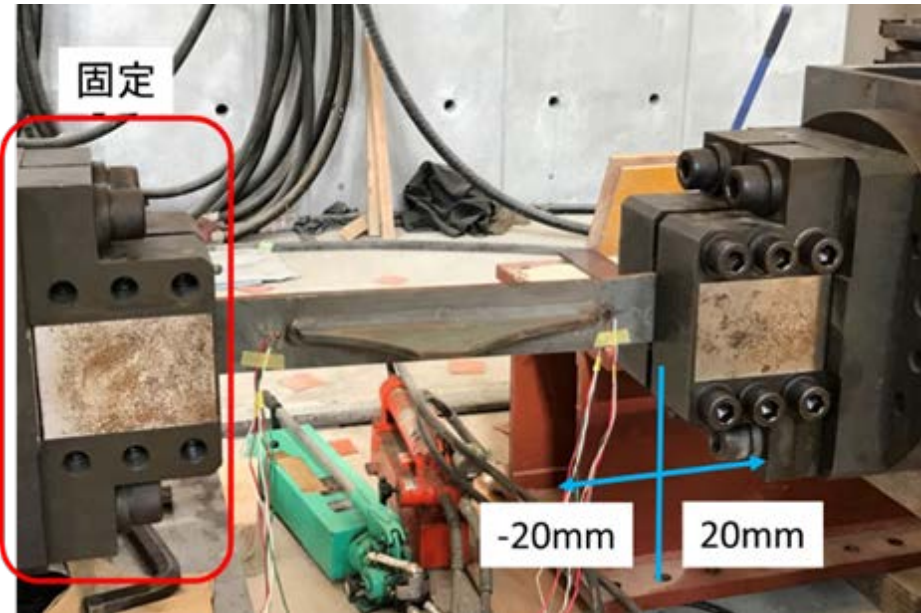
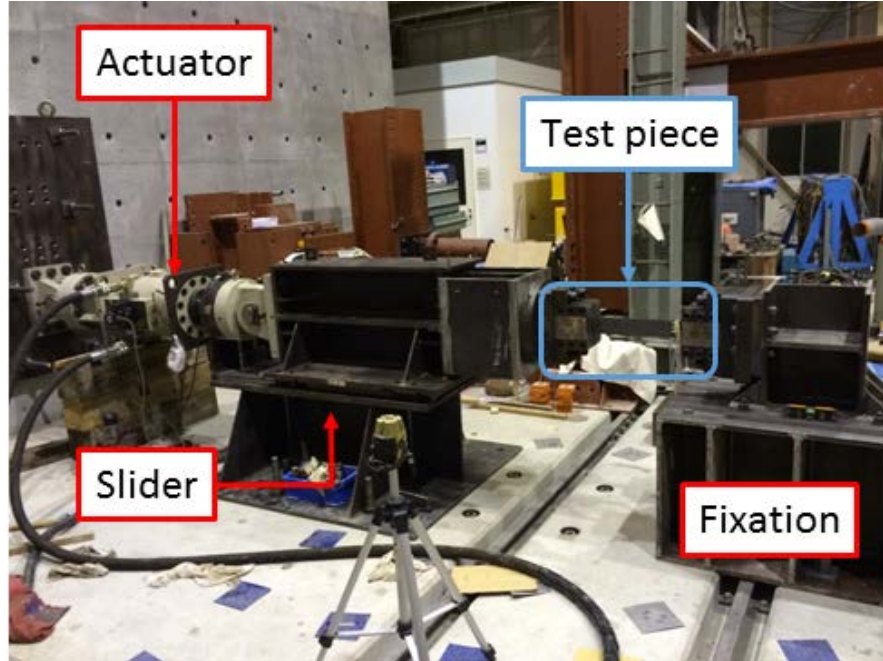
- 低サイクル試験で得られた結果をグラフにまとめた
- SM材のひずみ振幅と破断サイクルの関係に Manson-Coffin 則を適用した結果、以下の式を得た

$$\Delta \varepsilon N_f^{0.515} = 234478$$

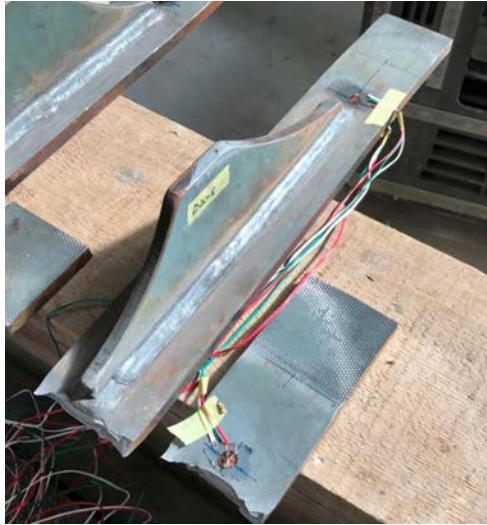
- 材料特性の指数部の0.515は軟鋼の値に近い値

試験構成と試験片

(スティフナ付き平板の低サイクル疲労試験)



実験結果

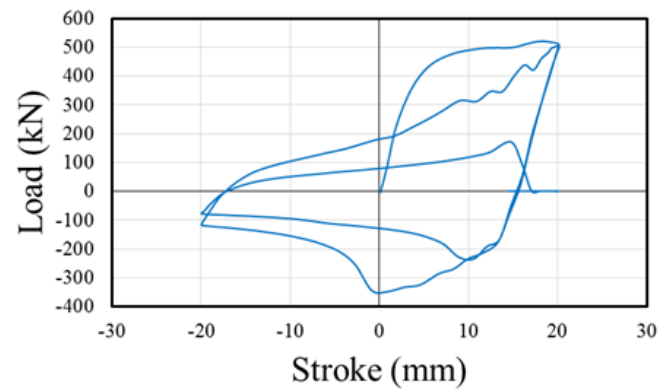


No2の全体図

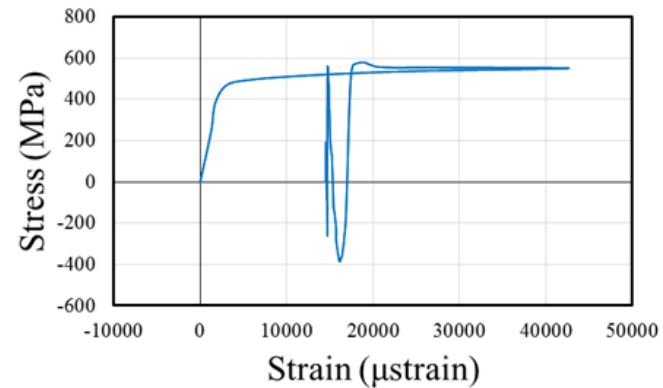


No2のつかみ部

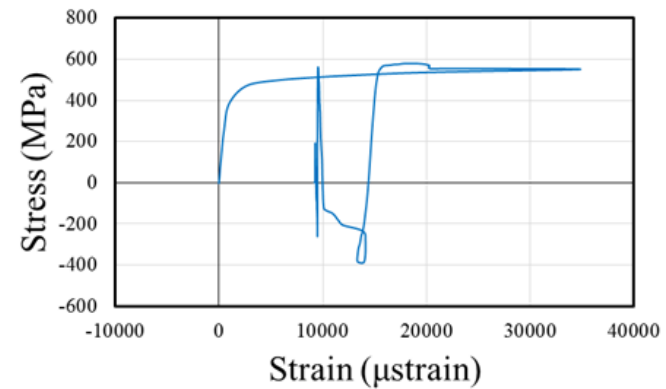
	Cycle
No1	3
No2	3
No3	6



荷重変位曲線 (No2)



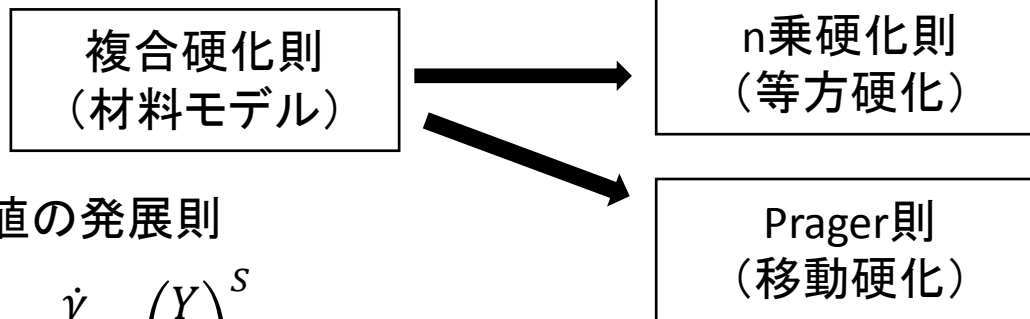
計測点1表の荷重ひずみ曲線 (No2)



計測点1裏の荷重ひずみ曲線 (No2) 9

有限要素解析

updated Lagrange法に基づいた幾何学的非線形と弾塑性を考慮し
27節点ソリッド要素を使用, 完全積分, を踏まえた有限変形弾塑性解析を行った
(弾塑性とは非連成であるが, 損傷値も評価している)



- 損傷値の発展則

$$\dot{D} = \frac{\dot{\gamma}}{1 - D} \left(\frac{Y}{r} \right)^S$$

- 損傷エネルギー解放率

$$Y = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1 - D)} R_v$$

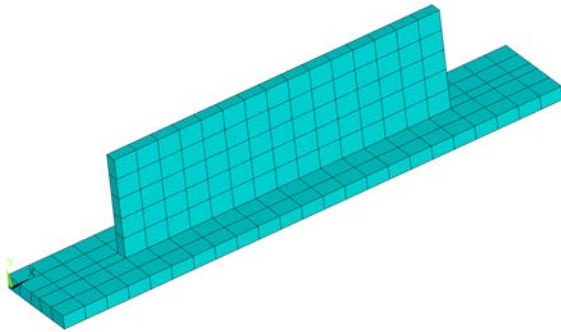
- 応力三軸度関数

$$R_v = \frac{2}{3}(1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left(\frac{p}{\sigma_{eq}} \right)^2$$

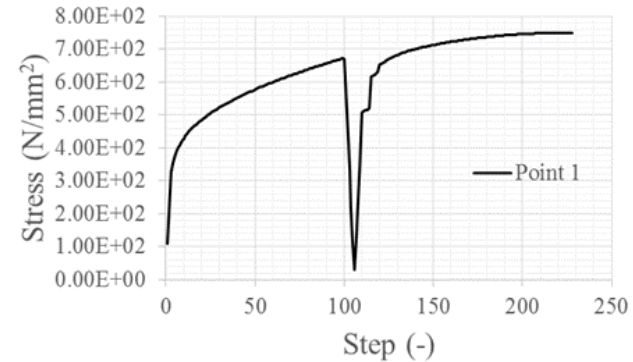
D	材料損傷値
γ	塑性乗数
r, S	損傷発展速度を決める材料定数
σ_{eq}	相当応力
E	ヤング率
ν	ポアソン比
p	静水圧

解析結果

(スティフナ付き平板の低サイクル疲労試験)

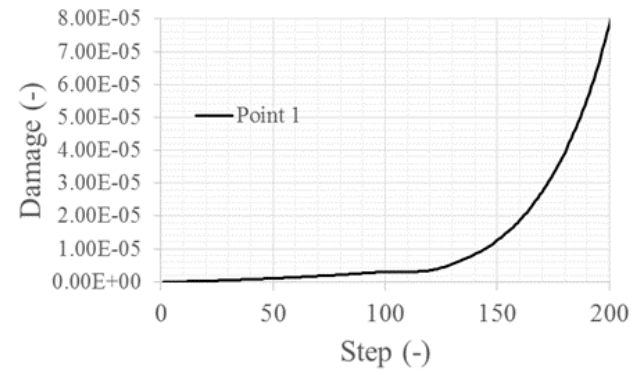


解析モデルの要素分割図



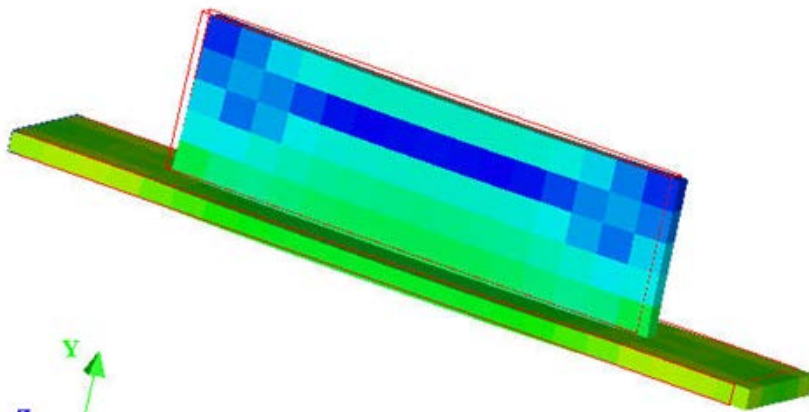
相当応力の履歴(スティフナ付け根部)

境界条件	片側:完全拘束 他方:長手方向に振幅 20mmの強制変位
ヤング率	206GPa
ポアソン比	0.3
等方硬化	H=104e7, n=0.3
移動硬化	K _p =1e9
ダメージ損傷値	S=3, r=3.5e6



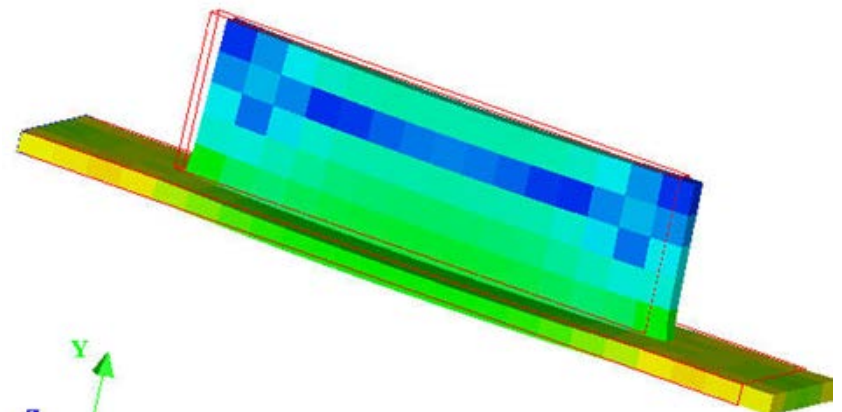
ダメージの履歴(スティフナ付け根部)

相当応力のコンター図



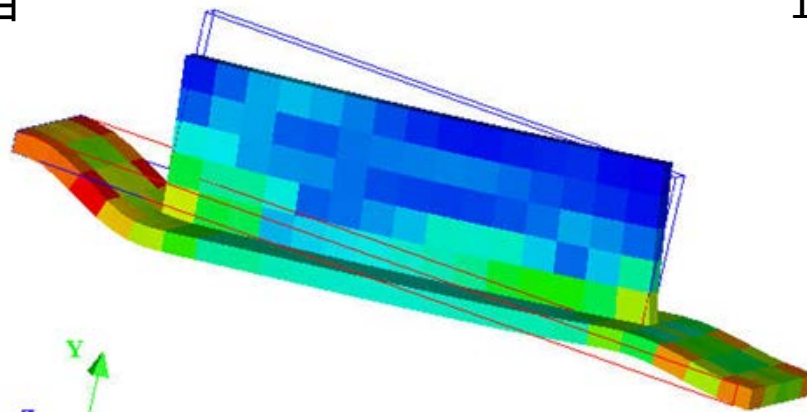
2e+000 2e+002 4e+002 6e+002 7e+002 9e+002

50ステップ目



2e+000 2e+002 4e+002 6e+002 7e+002 9e+002

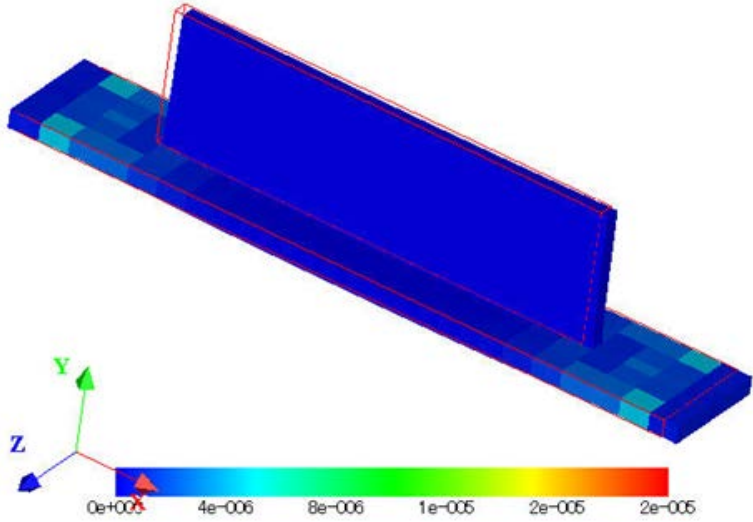
100ステップ目



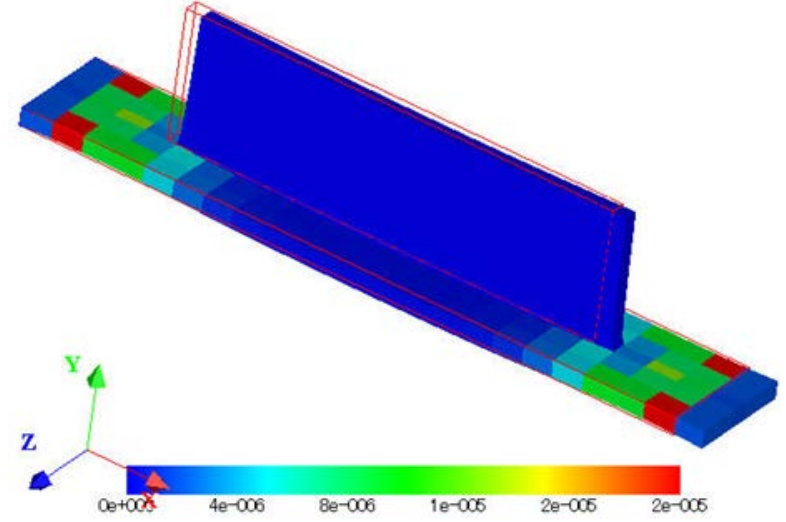
2e+000 2e+002 4e+002 6e+002 7e+002 9e+002

150ステップ目

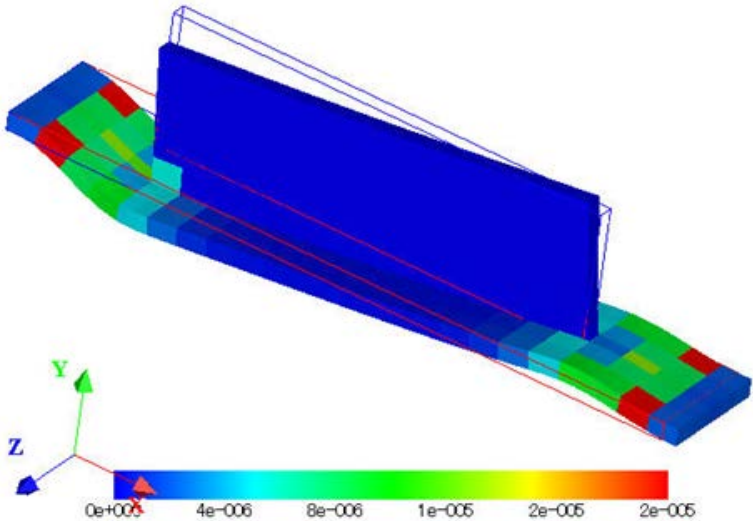
ダメージのコンター図



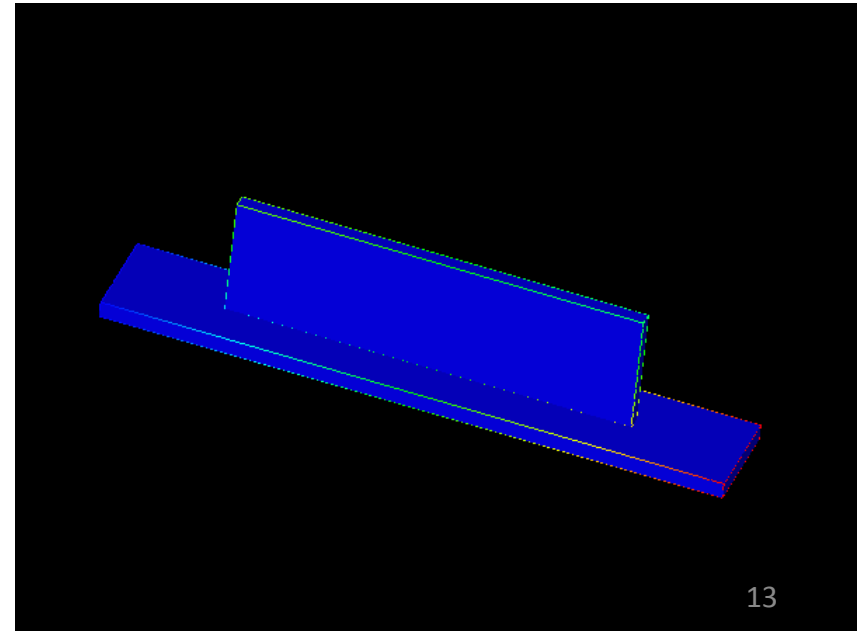
50ステップ目



100ステップ目



150ステップ目



まとめ

- 引張り試験と低サイクル疲労試験を行った
 - 材料特性を得て,Manson-Coffin則を確認した
- 幾何学的非線形でパラメータなどを考慮し解析を行い, 実験値と比較した
 - 同定には不完全であるが,移動硬化によるバウシinger効果は確認できた
- スティフナ付き平板での低サイクル疲労試験を行い,解析結果のコンター図やSS線図で変形および損傷について評価を行った
 - スティフナの根元付近に応力が集中し,変形が起きる事が確認できた

今後の課題

- ◆ 今後は弾塑性に損傷値を連成して解析を行う
- ◆ 実験値にあうように,等方硬化や移動硬化のパラメータを変え同定を行う

GFRPの強度

研究背景・目的

- 比剛性, 比強度の高い繊維強化プラスチックFRP(Fiber Reinforced Plastics)は小型船舶や航空機の構造材料として使用されている。
- 船舶の建造ではハンドレイアップ法でFRPを製造する機会が多いが, プリプレグ型のFRPに比べ, その機械的性質について知られていないことも多い。
- 過去の研究では, ガラスロービングクロスを使用しても思いのほか強度が高いため, 高価なカーボン・ケブラー複合繊維を使用するよりも, 安価なガラス繊維のほうがメリットは大きいということがわかっている。¹⁾

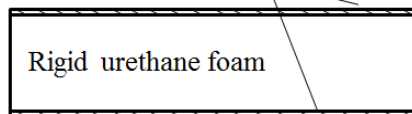


プレジャーボート

硬質ウレタンコアGFRPサンドイッチパネル



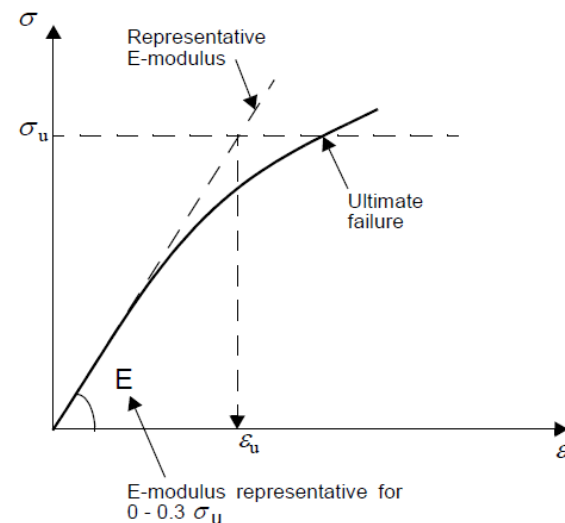
GFRP skin panel



Rigid urethane foam



ハンドレイアップ法



※Hull Structural Design, Fibre Composite and Sandwich Constructions, Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft : DNV

目的 Triaxial GFRP の各層の強度特性を把握する。

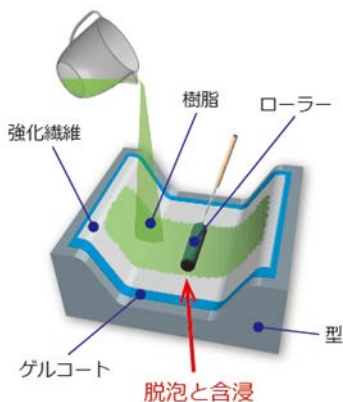
Triaxial GFRPの説明



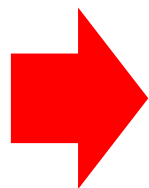
Triaxial繊維



不飽和ポリエステル樹脂



ハンドレイアップ法



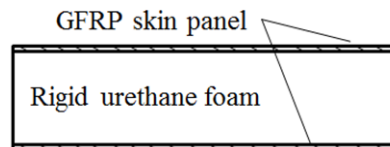
Triaxial GFRP

ハンドレイアップ法を用いて
3層積層で成形



コア材を挟んで
サンドイッチ構造に

Triaxial GFRP
サンドイッチパネル

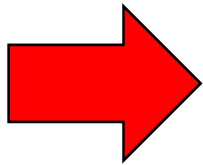


Triaxial GFRPの積層パターン

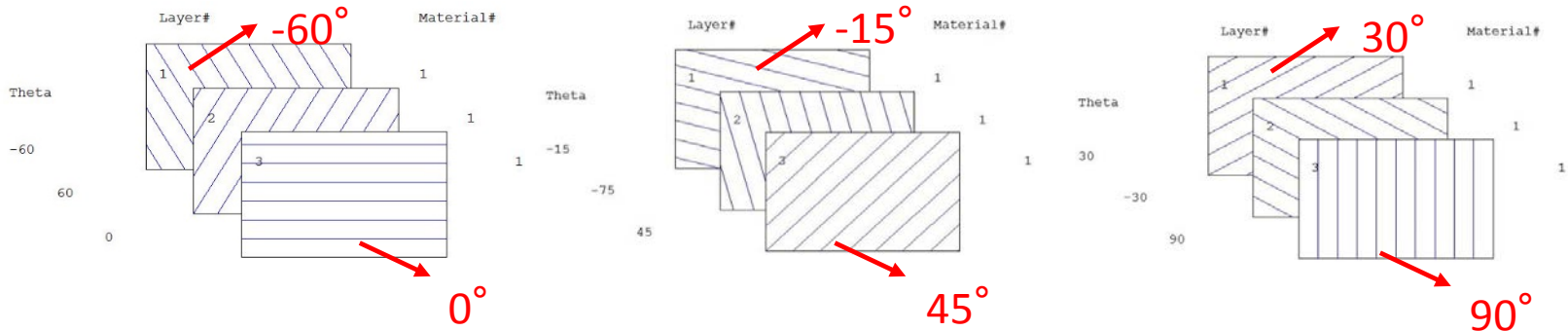
Triaxial GFRP 各層の引張破断試験

<過去の研究>

サンドイッチパネルの表層に位置する繊維層によってその強度が異なる。



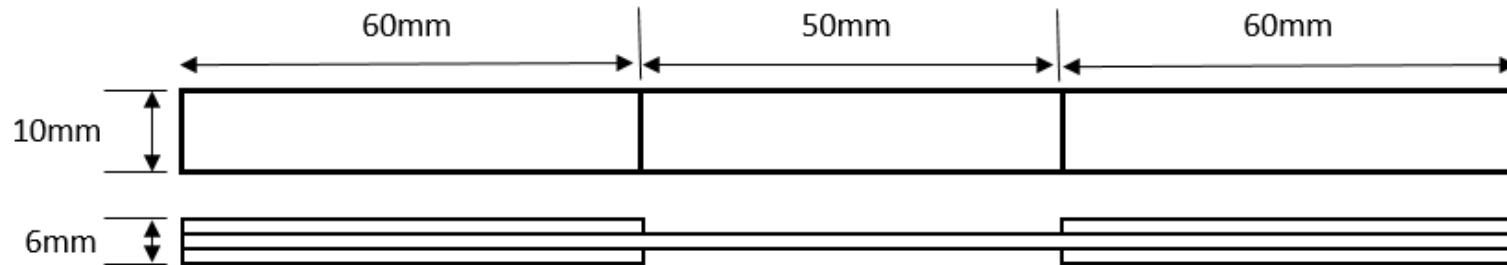
各層の強度の違いを明らかにする



Triaxial GFRPの各層繊維の積層パターン

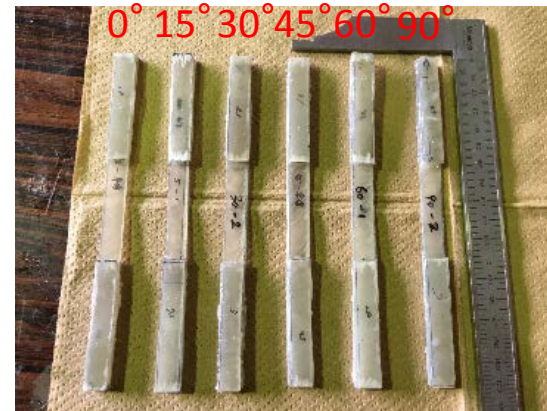
Triaxial GFRP 各層の引張破断試験

試験片



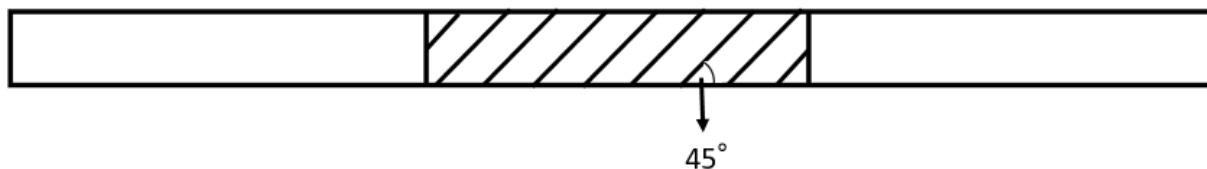
試験片長手方向を基準に、
 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90°
と繊維束を傾けた6種類とした。
評定部の長さは50mm、幅は10mm、
厚さは平均約2mm。

⇒ 各3本ずつ準備する。



試験片

45° 試験片の繊維パターン例

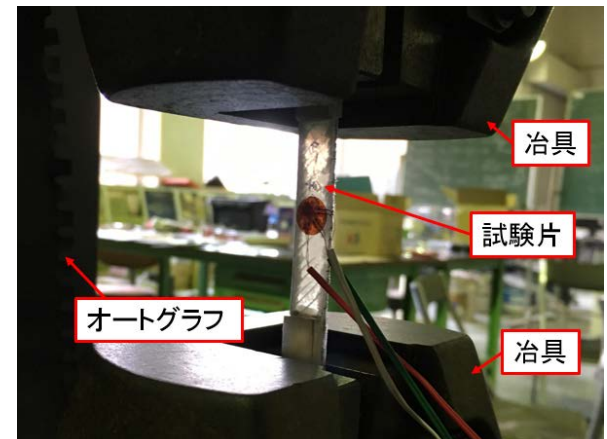


Triaxial GFRP 各層の引張破断試験

試験構成

作成した試験片の上端と下端を冶具ではさみ、一定速度の変位を与える。
試験は50kNオートグラフを用いて行い、変位速度は0.3mm/min。
ひずみは試験片長手方向と幅方向にひずみゲージを張り付けて計測。
荷重はロードセルで計測。

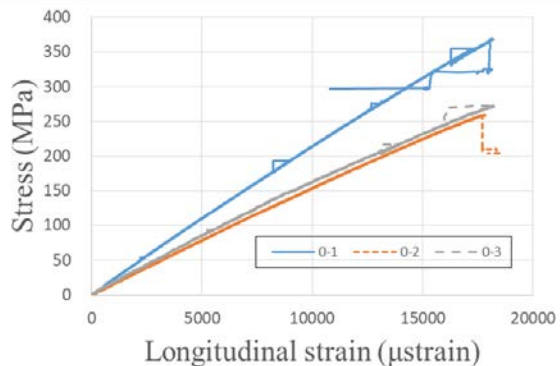
計測したデータから応力-ひずみ線図、ヤング率、破断応力を算出し各GFRPの強度を評価する



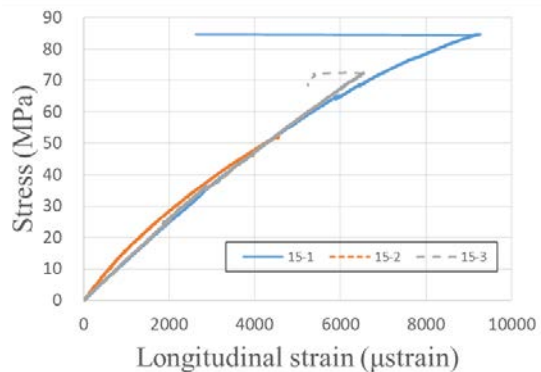
実験構成

Triaxial GFRP 各層の引張破断試験

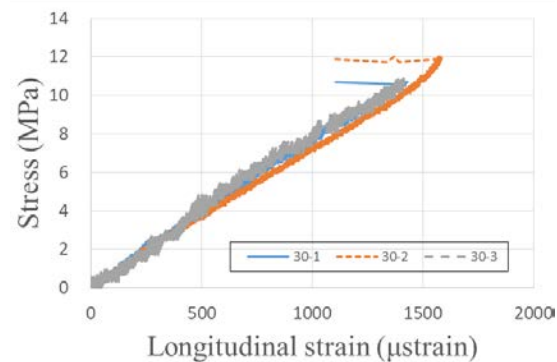
長さ方向



0°

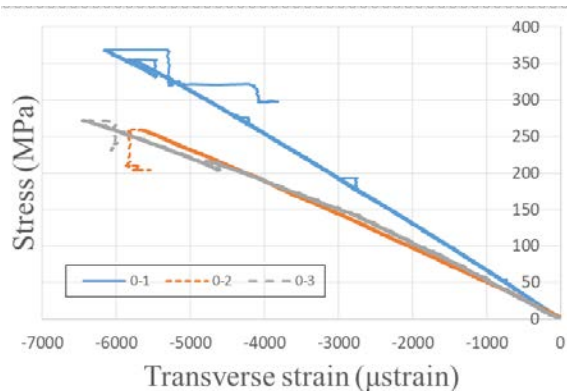


15°

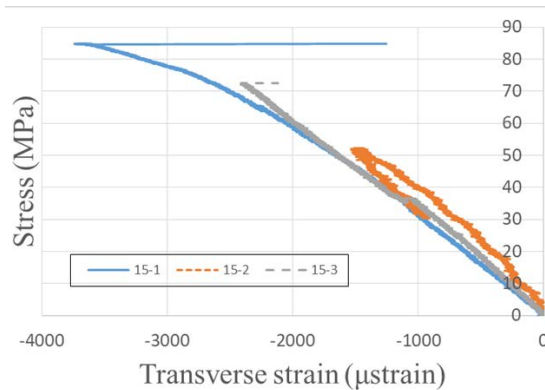


30°

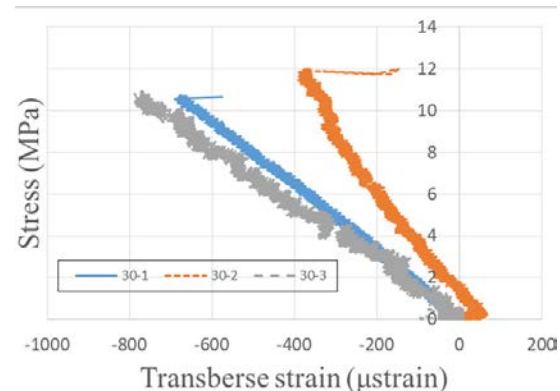
幅方向



0°



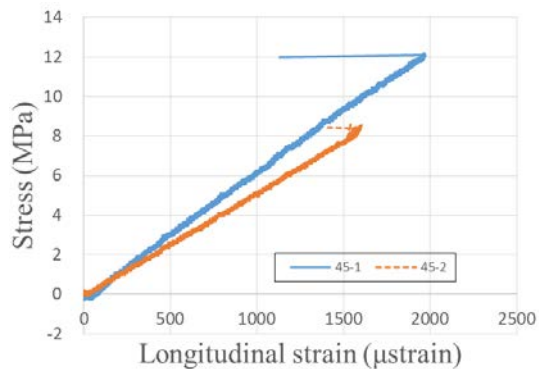
15°



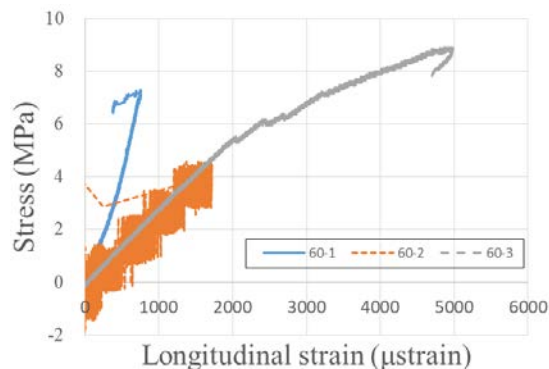
30°

Triaxial GFRP 各層の引張破断試験

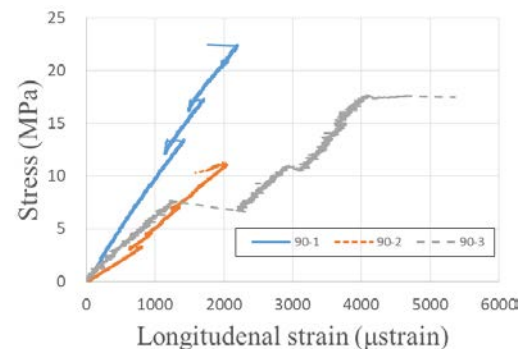
長さ方向



45°

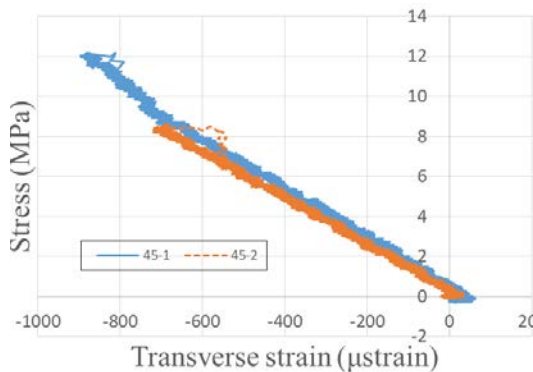


60°

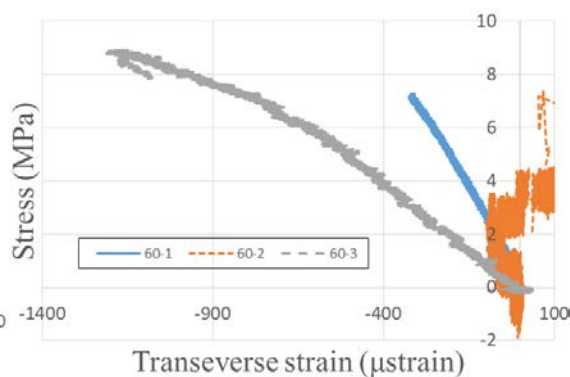


90°

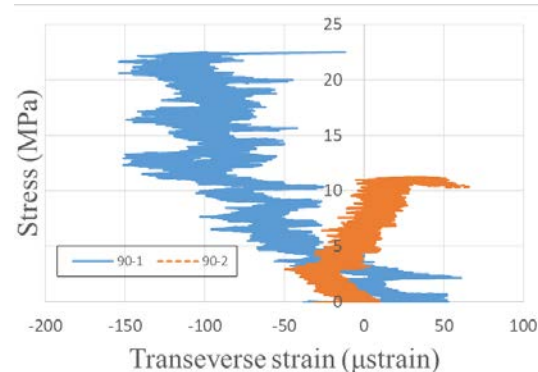
幅方向



45°



60°



90°

Triaxial GFRP 各層の引張破断試験

各試験片のヤング率と破断応力

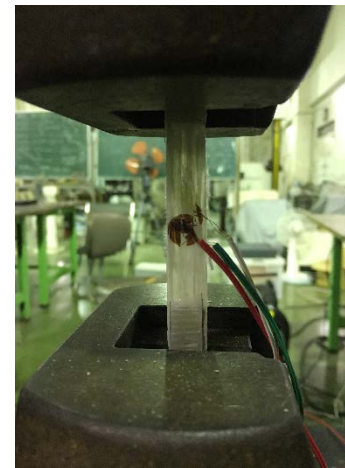
Test piece type	Young's modulus [GPa]	Critical stress [MPa]
0° -No1	22.6	321
0° -No2	15.9	259.4
0° -No3	17.5	272.1
15° -No1	12.8	84.7
15° -No2	14.5	-
15° -No3	12.6	72.5
30° -No1	7.8	10.7
30° -No2	7.2	11.9
30° -No3	8.2	10.9
45° -No1	6.4	12.2
45° -No2	4.9	8.4
60° -No1	7.4	7.3
60° -No2	3.5	7.4
60° -No3	2.9	7.8
90° -No1	9.98	22.5
90° -No2	4.9	10.3
90° -No3	5.8	17.5

(ひずみが0~2000 μ strainの範囲で線形近似)

各繊維角度の平均ヤング率と平均破断応力

Test piece type	Young's modulus [GPa]	Critical stress[GPa]
0°	18.7	284
15°	13.3	78.6
30°	7.7	11.2
45°	5.7	10.3
60°	4.6	7.5
90°	6.9	16.7

引張破断試験の破断例



0° test piece

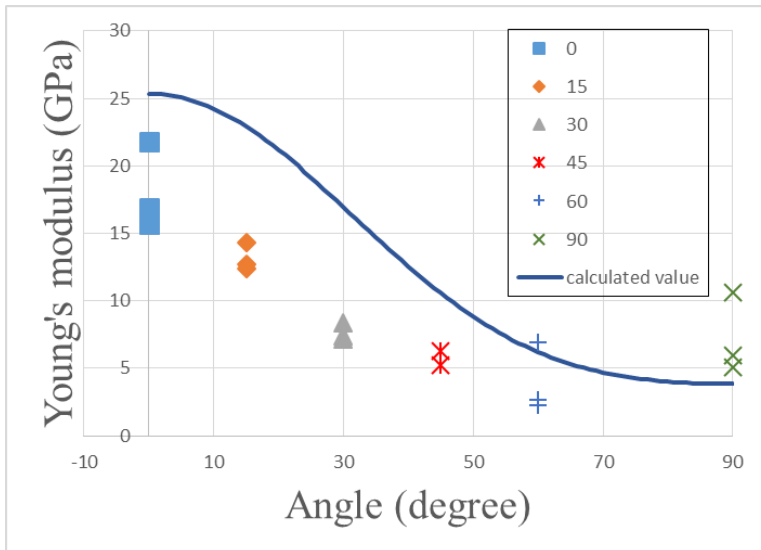


15° test piece

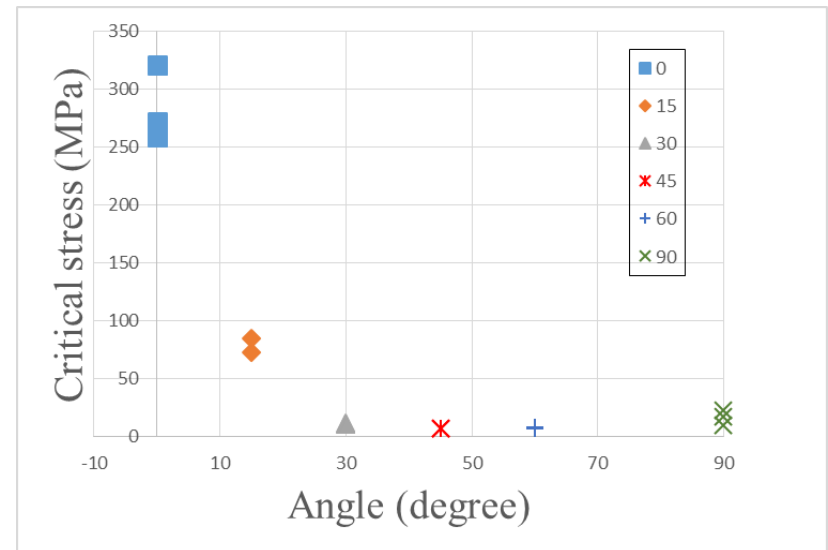
- ・試験片は各繊維角度方向に沿って破断
- ・ヤング率の最も低い60° が最も高い0° に比べて平均ヤング率が約75%低下

Triaxial GFRP 各層の引張破断試験

繊維角度とヤング率の関係



繊維角度と破断応力の関係



- ・繊維角度が傾くにつれ、ヤング率、破断応力が低下する傾向を確認した。
- ・ヤング率は理論値との比較で全体的に試験値が理論値を下回った。また、90° で少し数値が上昇していた。



90° が理論値の傾向とずれた要因
エポキシによる補強

Triaxial GFRP 各層の引張破断試験

一方向性材のヤング率導出方法

植村氏らの経験式

$$C = 0.4V_f - 0.025$$

$$E_x = E_{fL}V_f + E_m(1 - V_f)$$

$$E_y = (1 - C) \frac{E_{fT}E_m}{E_mV_f + E_{fT}(1 - V_f)} + C (E_{fT}V_f + E_m(1 - V_f))$$

$$\nu_{xy} = (1 - C) (\nu_{fLT}V_f + \nu_m(1 - V_f)) + C \frac{\nu_{fL}E_{fT}V_f + \nu_mE_m(1 - V_f)}{E_{fT}V_f + E_m(1 - V_f)}$$

$$G_{xy} = (1 - C) \frac{G_{fLT}G_m}{G_mV_f + G_{fLT}(1 - V_f)} + C (G_{fLT}V_f + G_m(1 - V_f))$$

V_f : 繊維含有率

E_{fL} : 繊維長手方向弾性係数

E_{fT} : 繊維直径方向弾性係数

E_m : 樹脂弾性係数

ν_{fL} : 繊維長手方向ポアソン比

ν_{fT} : 繊維直径方向ポアソン比

ν_m : 樹脂ポアソン比

G_{fLT} : 繊維長手方向せん断係数

G_m : 樹脂せん断弾性係数

参考文献: 複合材料用三次元構造解析支援システムの構築

座古氏らの提案する三次元への拡張式

$$E_z = E_y$$

$$G_{zx} = G_{xy}$$

$$\nu_{zx} = \frac{\nu_{xy}}{E_x} E_z$$

$$\nu_{yz} = \nu_{fT}V_f + \nu_m(1 - V_f)$$

$$G_{yz} = \frac{E_z}{2(1 + \nu_{yz})}$$

計算に使用した繊維と樹脂の物性値

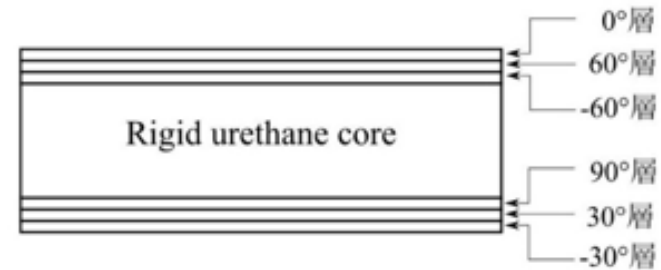
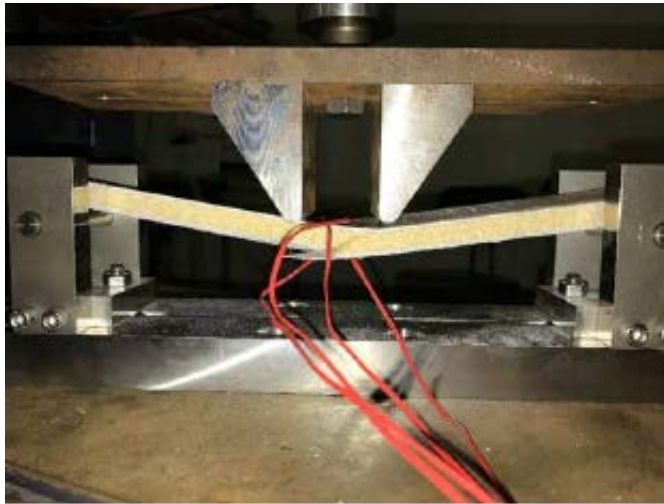
V_f	E_{fL}	E_{fT}	E_m	G_{fLT}	G_m	ν
0.341	73.8GPa	5.17GPa	3.8GPa	28.38GPa	1.46GPa	0.3

※ E_{fL} , E_m は参考文献から引用している。(複合材料の破壊と力学: 藤井太一、座古勝)

E_{fT} は E_{fL} の0.07倍としている(一方向強化CFRP材における繊維方向のヤング率の評価: 足立廣正、長谷川照夫)

G_{fLT} , G_m は $E/2(1 - \nu)$ より算出している。

Triaxial GFRP サンドイッチパネルの解析



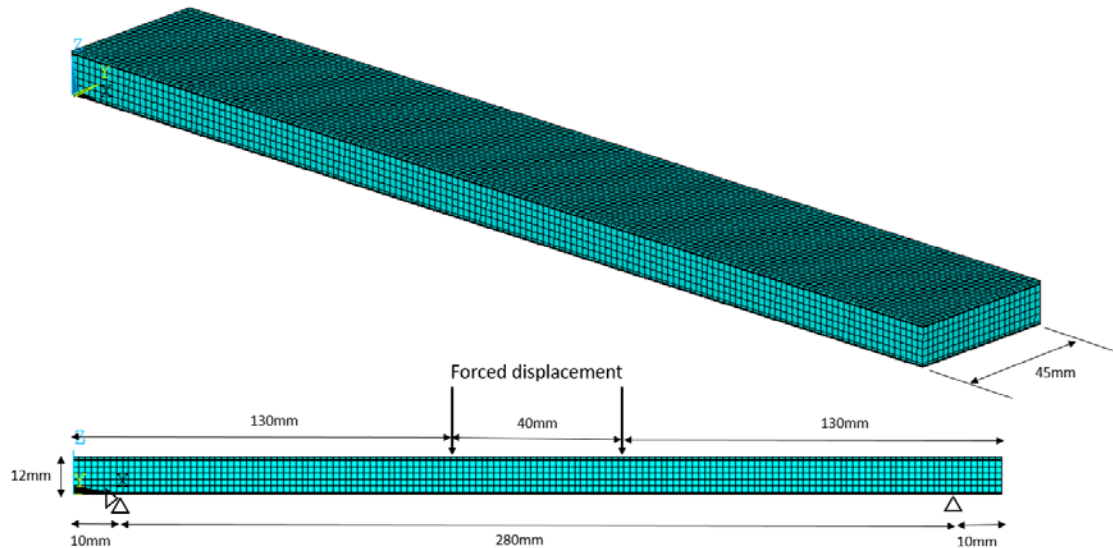
積層パターン

過去の四点曲げ試験の崩壊の様子

過去の研究で、サンドイッチパネルの四点曲げ試験が行われた。その際下部スキンパネルから崩壊が起こっており、今回はこの試験の解析を行い、サンドイッチパネルの崩壊について考察を行う。

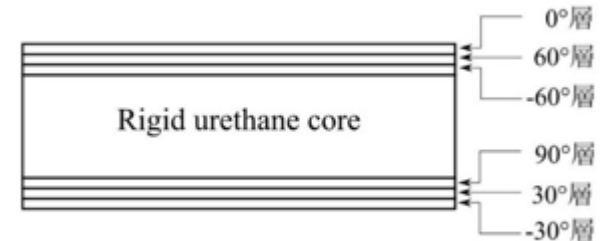
Triaxial GFRP サンドイッチパネルの解析

解析モデルと解析条件



15mmの強制変位を与える

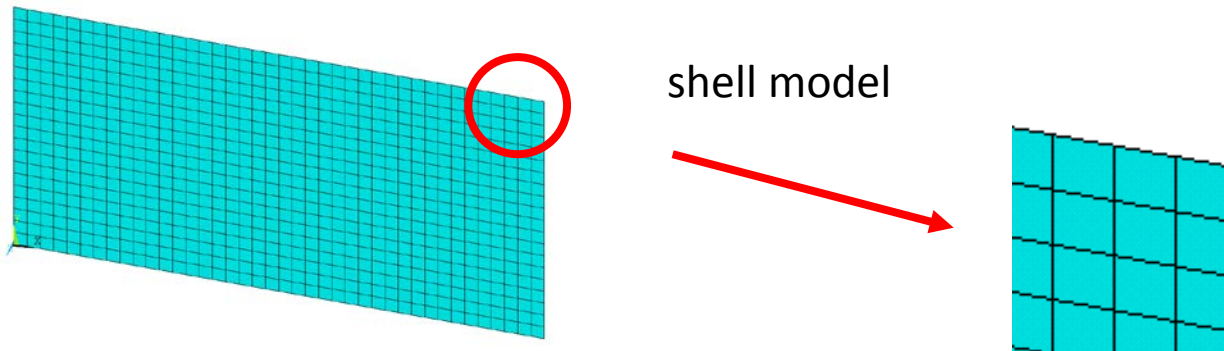
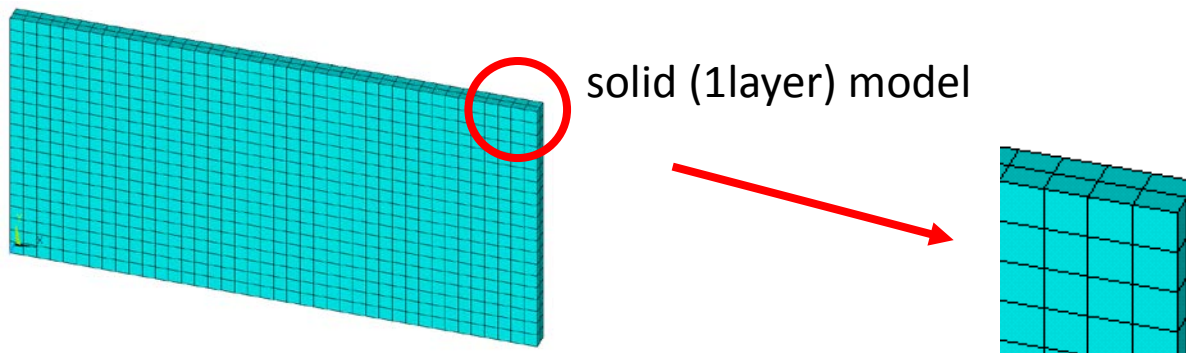
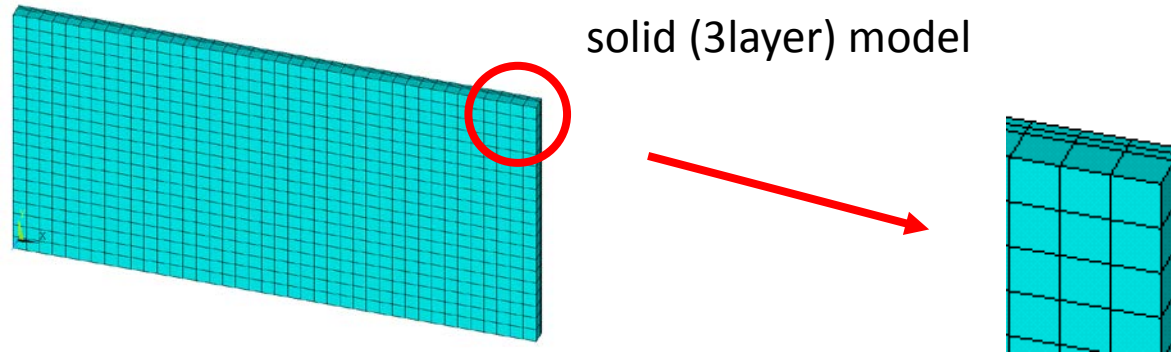
解析モデルの積層パターン



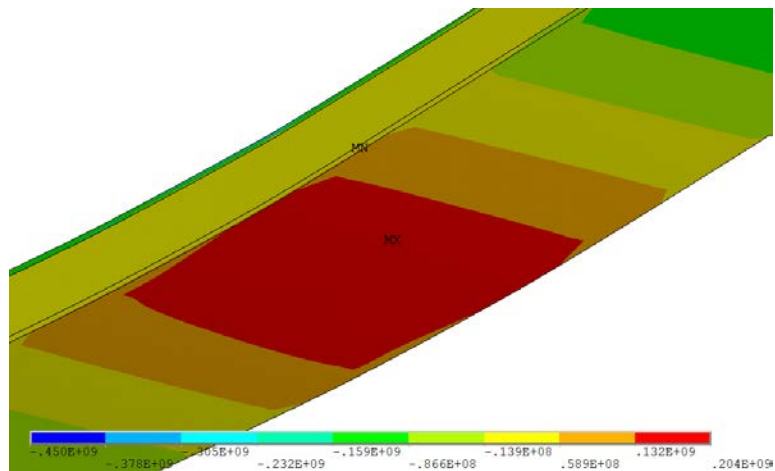
一方向性材料の材料定数

E_x	27670 MPa	ν_{xy}	0.3	G_{xy}	3105 MPa
E_y	4187 MPa	ν_{yz}	0.3	G_{yz}	1610 MPa
E_z	4187 MPa	ν_{xz}	0.045	G_{xz}	3105 MPa

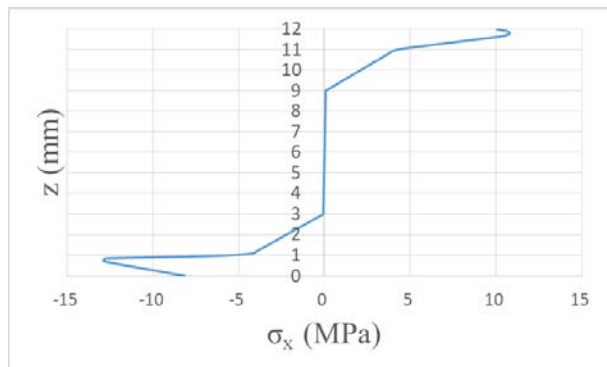
Triaxial GFRP 解析方法の検討



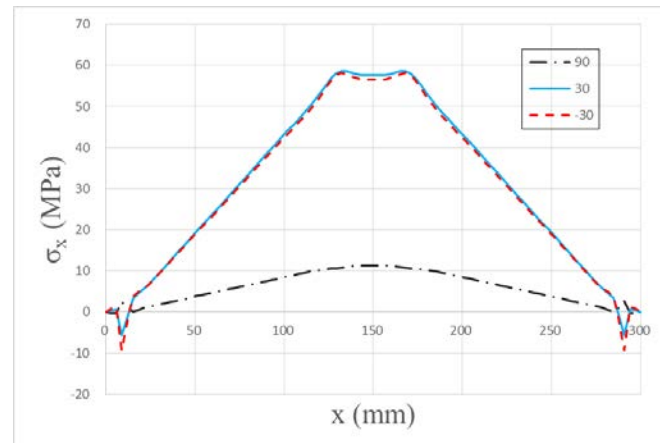
Triaxial GFRP サンドイッチパネルの解析



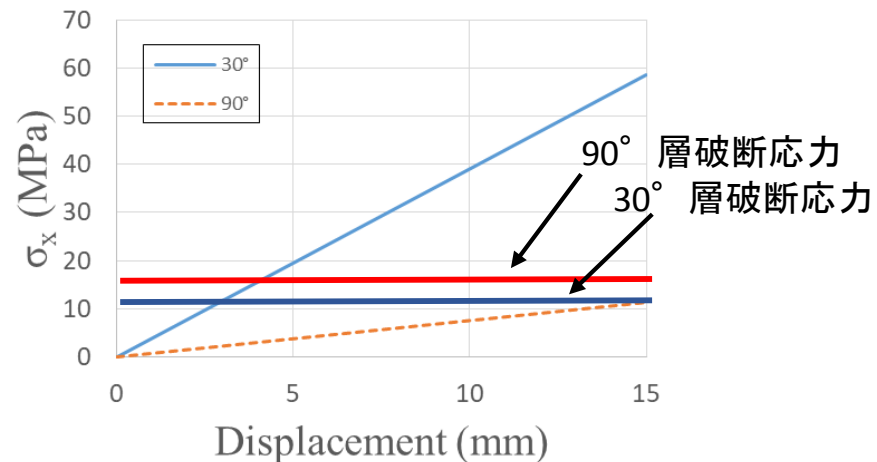
長さ方向の応力



厚さ方向の応力



各繊維角度層ごとの長さ方向の応力



変位と応力の関係

引張破断試験で確認した強度を比較して、破断応力に達した強度の低い層から崩壊する。

まとめ

引張破断試験

引張軸に対してGFRPの繊維束が傾くにつれ、ヤング率、破断応力が低下する傾向を確認できた。

繊維角度によって最大約75%もヤング率が低下することが分かった。

サンドイッチパネルの解析

四点曲げの解析では、中央部板厚方向の応力はほぼ0に近い分布を示し、応力集中は発生しないことが分かった。

引張破断試験で確認した強度を比較して、破断応力に達した強度の低い層から崩壊する。

柔軟発電体を用いた環境・振動発電

圧電フィルムを用いた環境発電・振動発電に関する研究 身の回りのエネルギーと環境発電



http://www.cnx-software.com/wp-content/uploads/2010/11/energy_harvesting_at_home_and_outside.png

環境発電



力学的エネルギーハーベスト



地産地消型



中小規模分散型
(安全・安心)

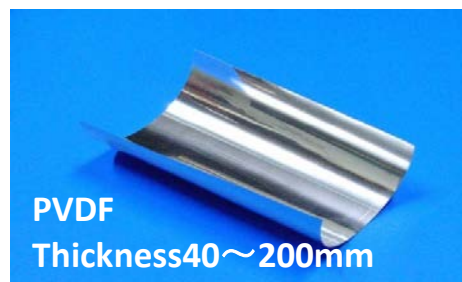
大規模集中型
からの脱却

エネルギーハーベスト＝環境発電
身の回りに散在する様々なエネルギーを電気として
利用すること。

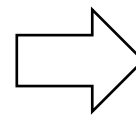
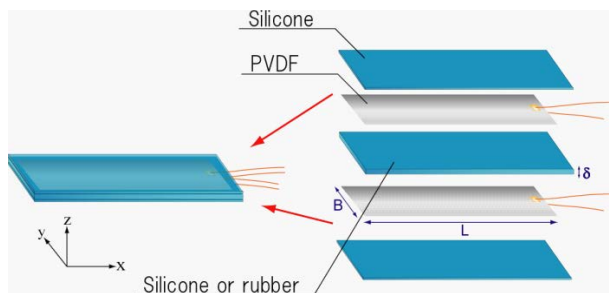
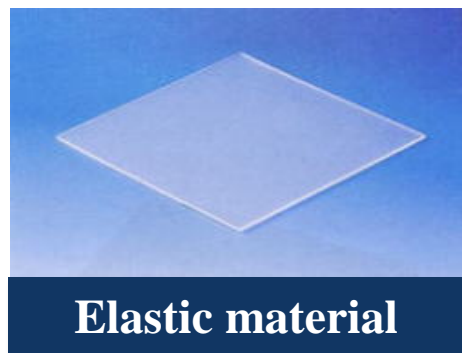
FPED(Flexible piezoelectric device)

□ 柔軟発電体

弾性素材(シリコン, ゴム, 薄膜樹脂など)と圧電素材からなる薄型積層タイプの発電体. 海洋エネルギー, 風エネルギー, 振動エネルギーといった様々な外力が作用すると, 柔軟に変形(引張, せん断, 曲げ)し, 電気エネルギーを生み出す.



Piezoelectric film
PVDF

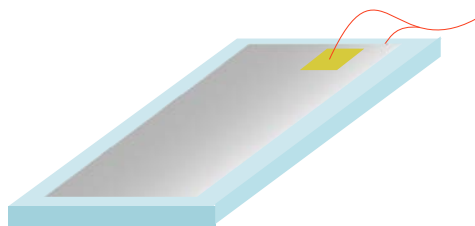


Features

- 軽量, 薄型
- 微小な外力でも変形し発電
- 自由な形状 (カスタマイズ)
- 流体(水, 空気), 振動体など様々なエネルギー源
- 変形速度に比例した発電性能
- 高周波振動で発電が大きい

研究目的

FPEDは固有振動数をアプリケーション先の周波数に合わせることで対応可能

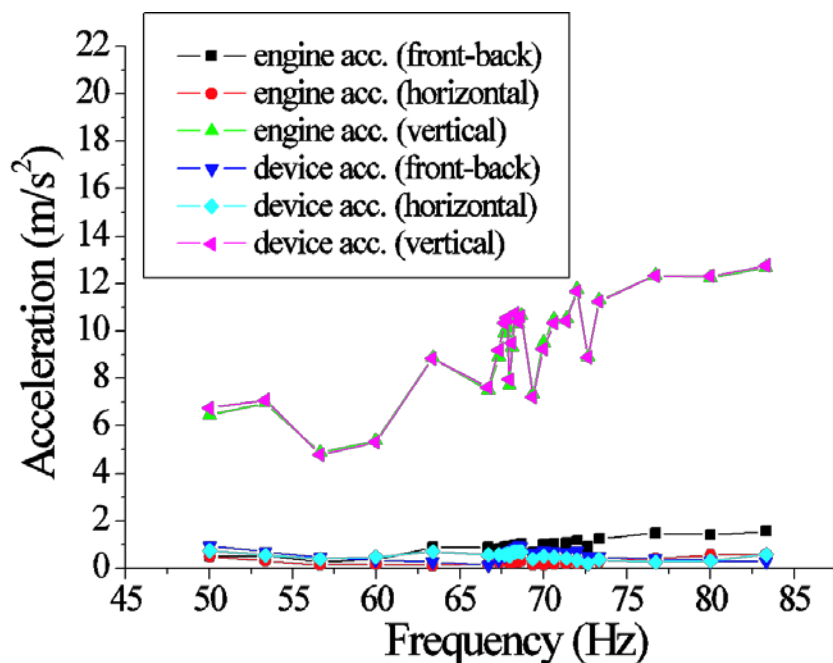


風力発電 : 風の周波数に合わせて設計

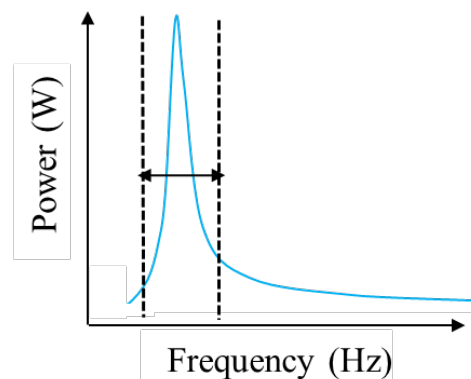
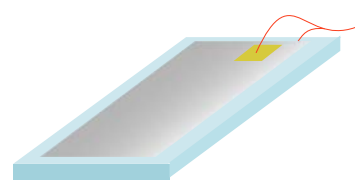
海洋発電 : 波の周波数に合わせて設計

振動発電 : 振動発生源の周波数に合わせて設計

自動車のエンジン振動特性の例



1枚のFPED



問題点

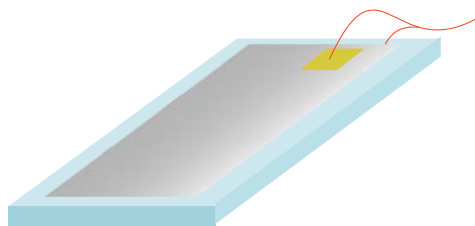
固有振動数のみでしか発電することが出来ない

研究目的

複数のデバイスを連結した機構の
デバイスの設計ツールの作成

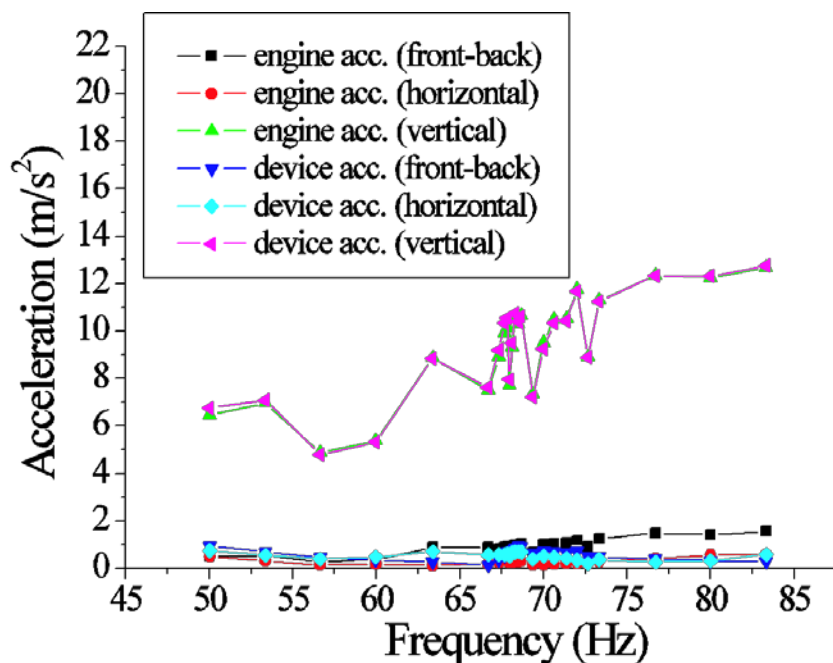
研究目的

FPEDは固有振動数をアプリケーション先の周波数に合わせることによって対応可能

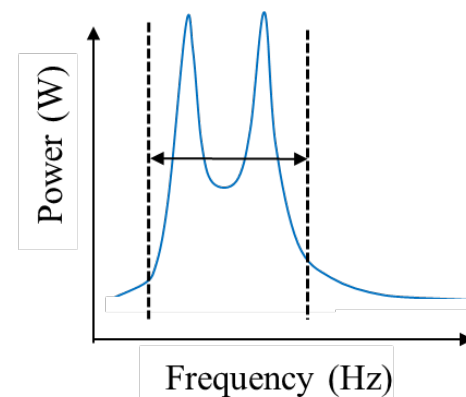
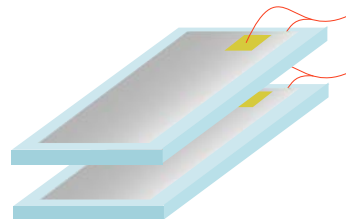


- 風力発電 : 風の周波数に合わせて設計
- 海洋発電 : 波の周波数に合わせて設計
- 振動発電 : 振動発生源の周波数に合わせて設計

自動車のエンジン振動特性の例



複数のFPED



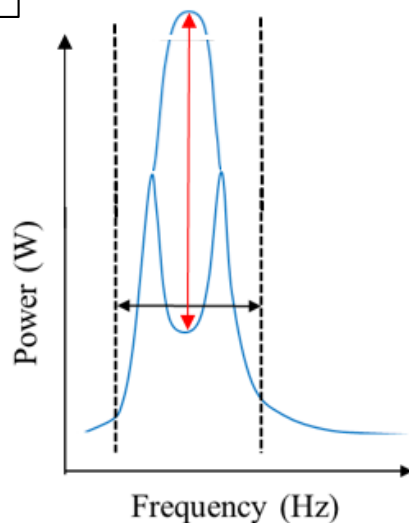
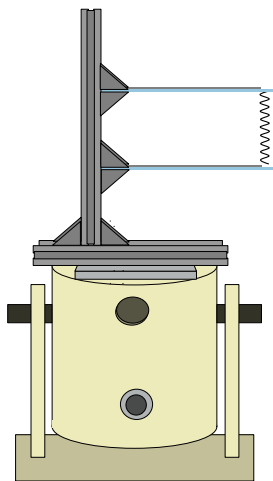
固有振動数を複数持つので発電可能領域を広げ、発電量の増大を見込むことが出来る

研究目的

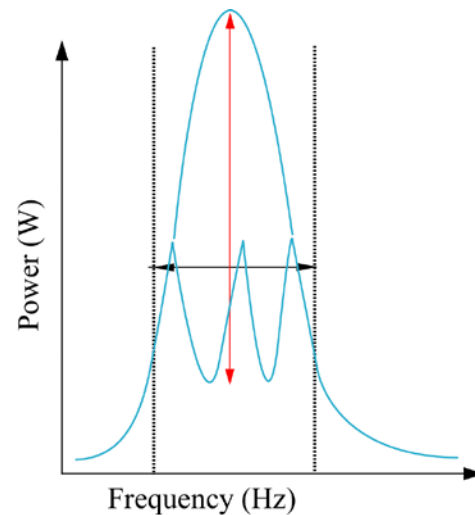
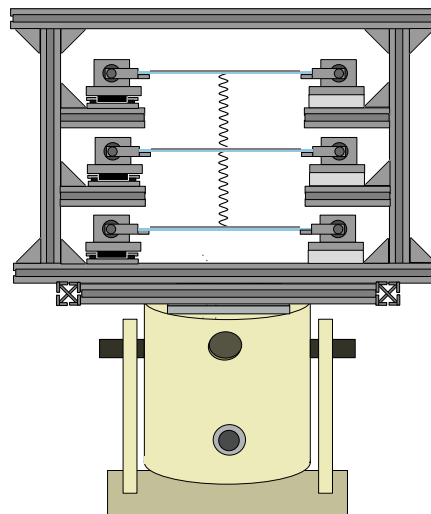
複数のデバイスを連結した機構の
デバイスの設計ツールの作成

研究内容

従来の発電機構



今回の発電機構



今回はアプリケーション先の1つとして

車のエンジン振動に着目

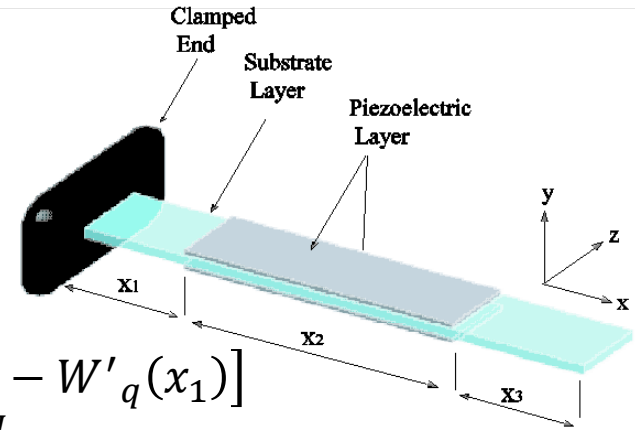
1W程度の発生電力を補うことを目標とする。



エンジンマウント部にFPEDを設置

- スペースの有効利用
- エンジンの振動加速度と同等 (10 m/s^2)

モード分離した梁の運動方程式



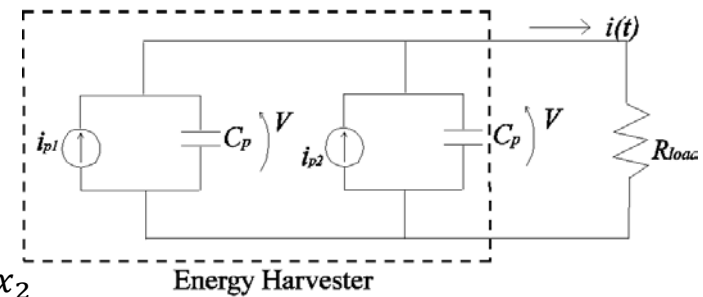
$$\ddot{\eta}_q(t) + 2\gamma_q \omega_q \dot{\eta}_q(t) + \omega_q^2 \eta_q(t) + \epsilon V(t) [W'_q(x_1 + x_2) - W'_q(x_1)] = \ddot{w}_b(t) \int_0^L m(x) W_q(x) dx$$

$$w_{rel}(x, t) = \sum_{q=1}^{\infty} W_q(x) \eta_q(t)$$

γ : 減衰係数 ω_q : q次の固有周波数 w_b : 加振機の振動変位

w_{rel} : 梁の変位 W_q : q次のモード形 η : モード振幅

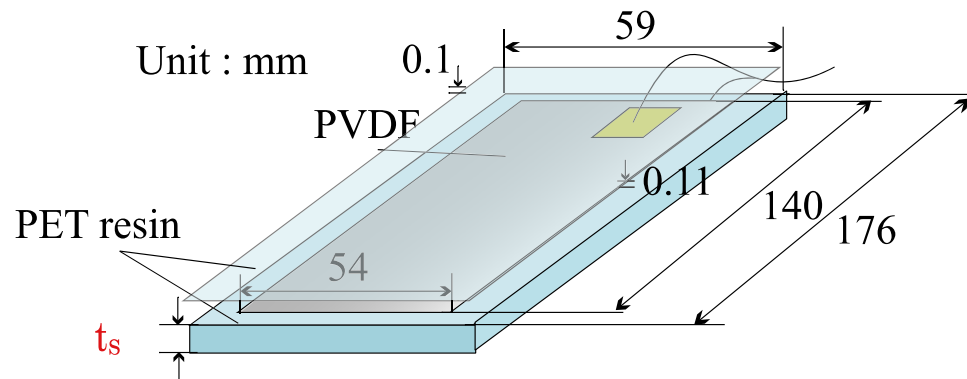
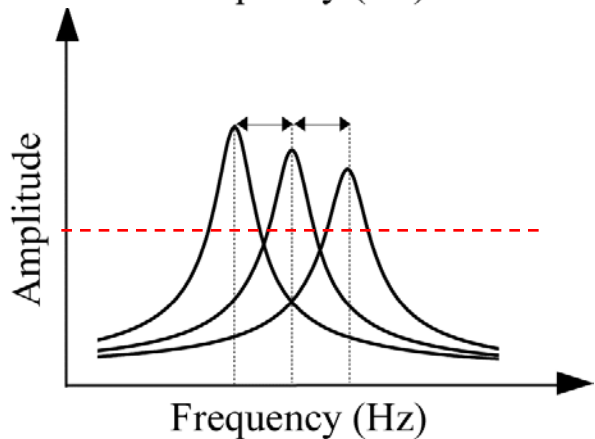
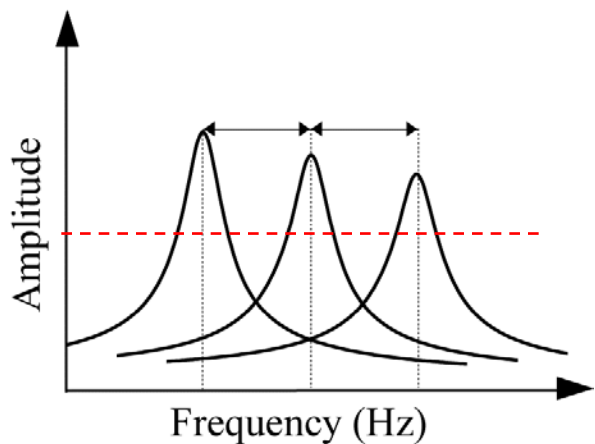
電気回路



$$C_p \frac{\partial V(t)}{\partial t} + \frac{V(t)}{2R_{load}} = \sum_{q=1}^{\infty} -E_p d_{31} t_{pc} b_p \left[\frac{\partial W_q(x)}{\partial x} \right]_{x_1}^{x_1+x_2} \dot{\eta}_q(t)$$

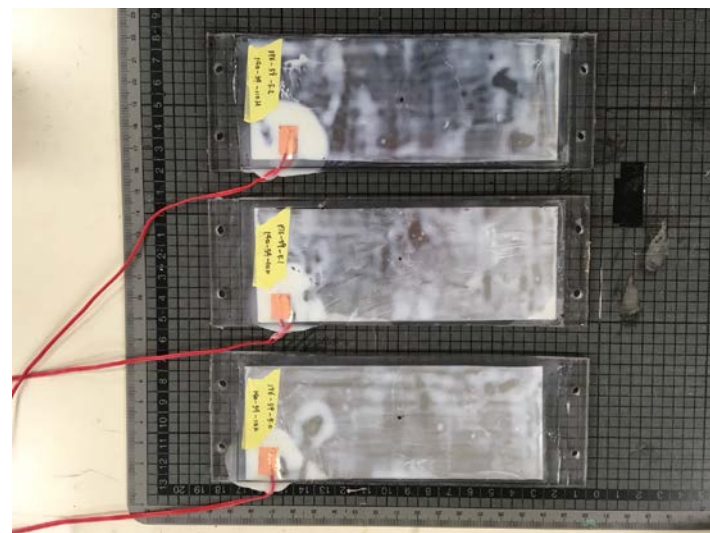
$W_q(x), \omega_q$... 伝達マトリクス法より求める.

製作したFPED

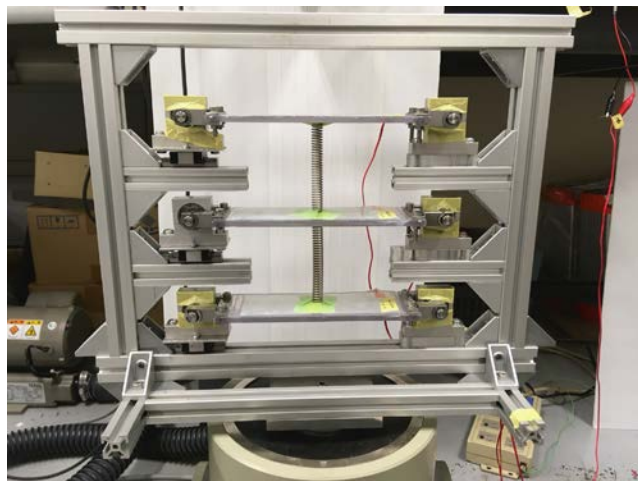
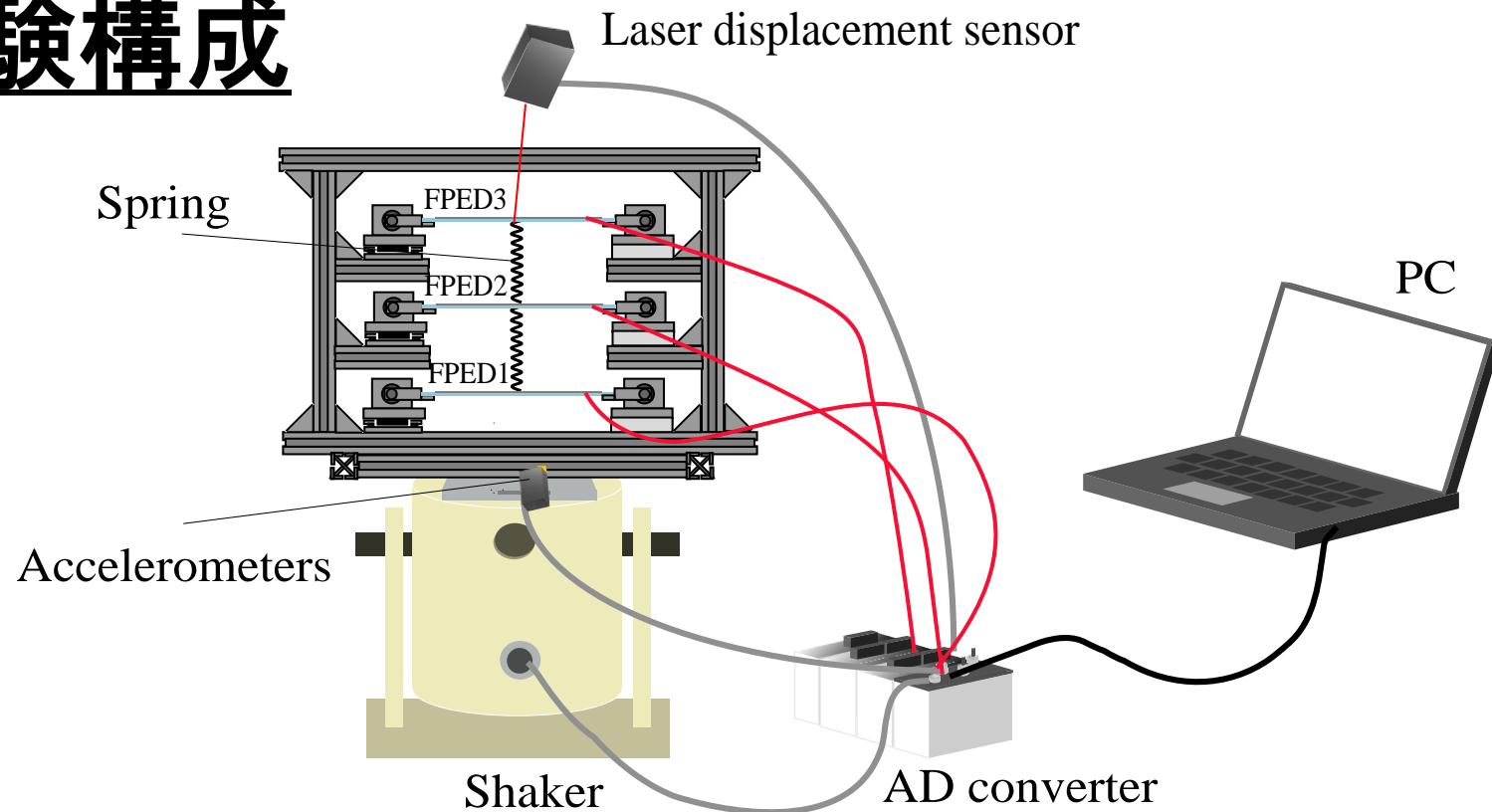


	FPED1	FPED2	FPED3
t_s (mm)	5.15	5.30	5.45
f (Hz)	62.7	64.6	66.6

自動車の定常走行時のエンジン振動数である60 Hz程度になるよう、FPED1～FPED3を直列接続した時、電圧計の抵抗値1 MΩに対して、概ねインピーダンス整合を取れるように設計した。



実験構成



実験パターン

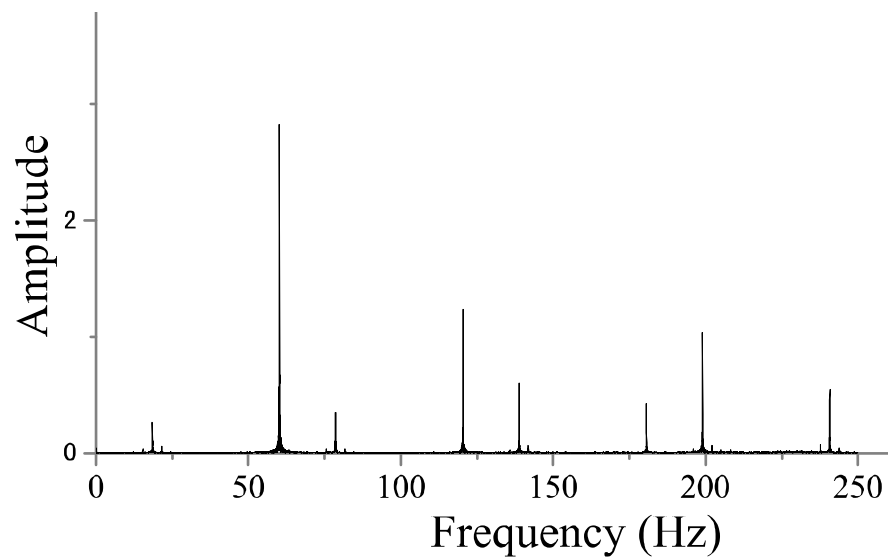
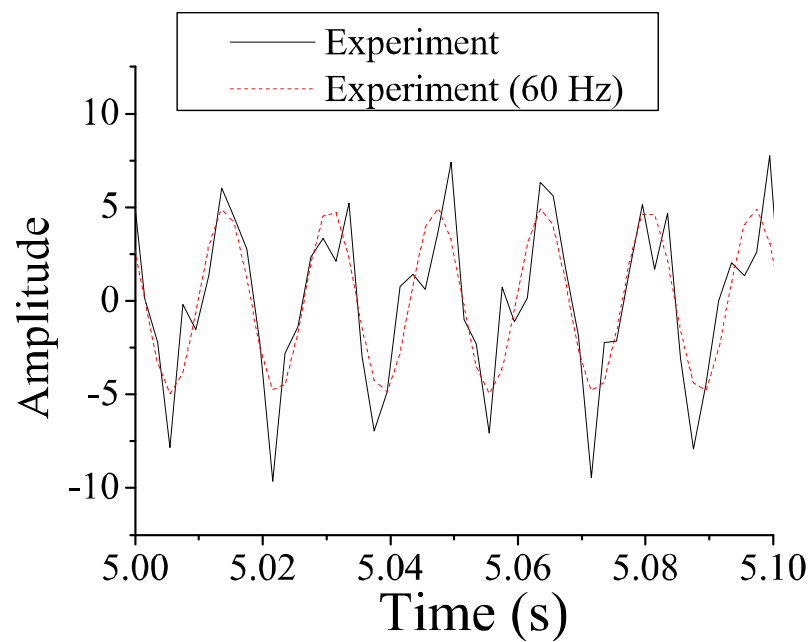
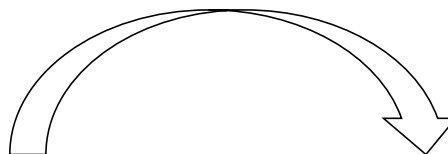
Case1 : FPED3本による実験

Case2 : FPED3本をばねで連結した実験

- 支持条件 両端ピン支持
- 加速度 5 m/s^2 に固定
- 外部抵抗 $1 \text{ M}\Omega$
- ばね 750 N/m , 7.8 g

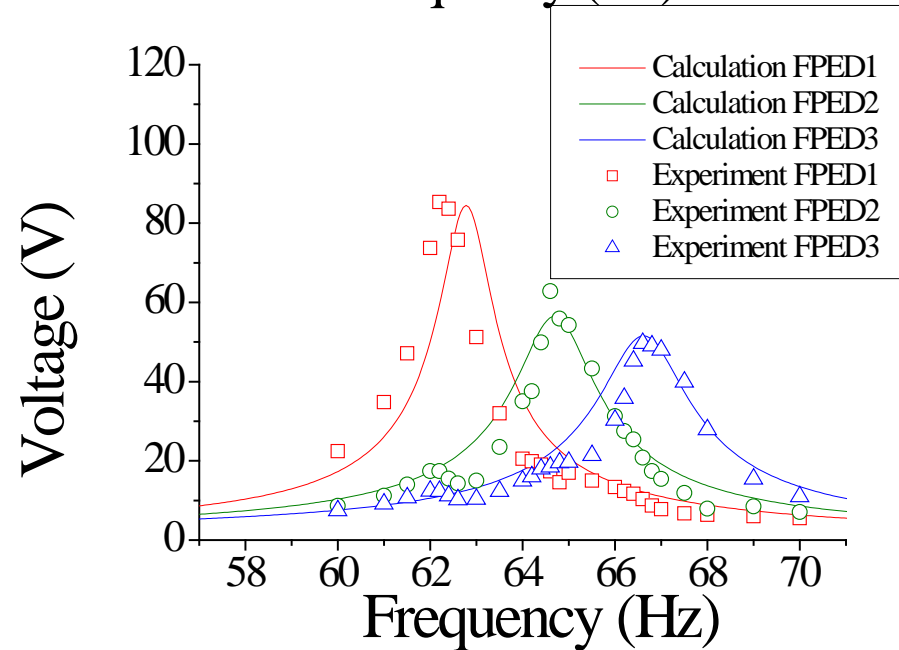
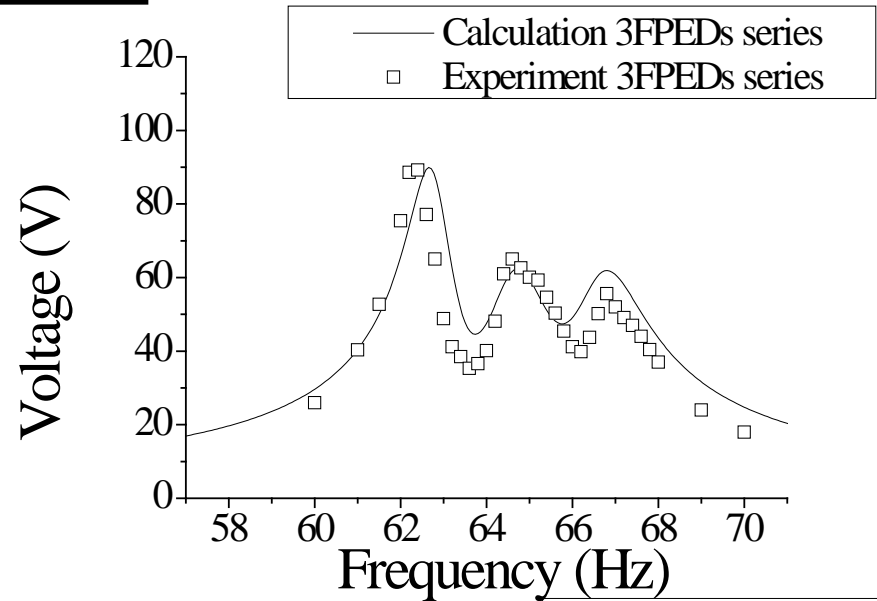
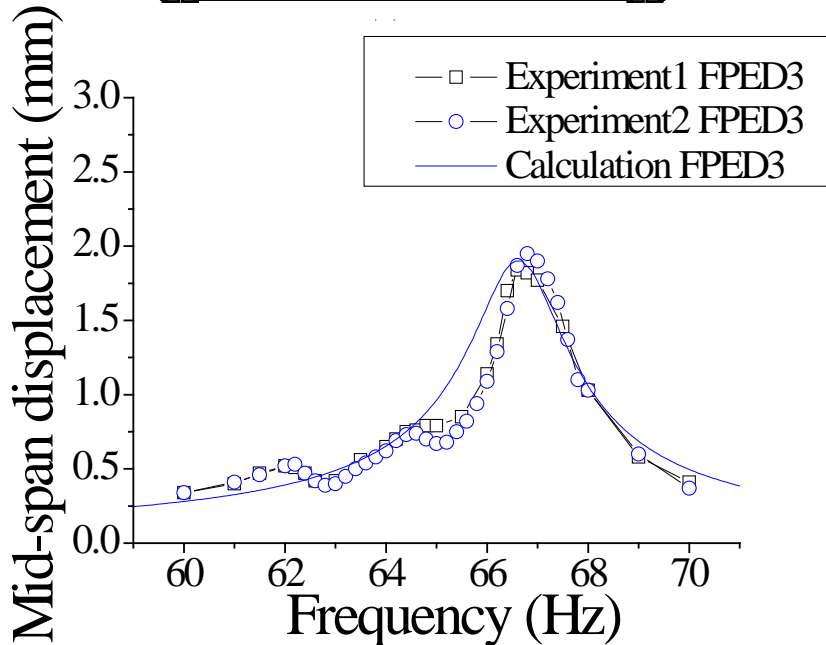
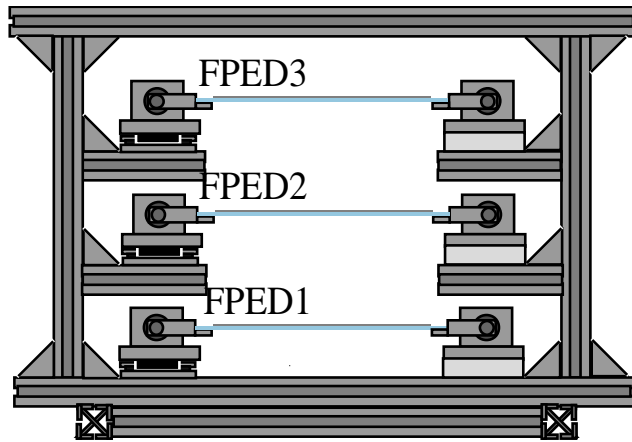
共振曲線の描き方について

FFT処理



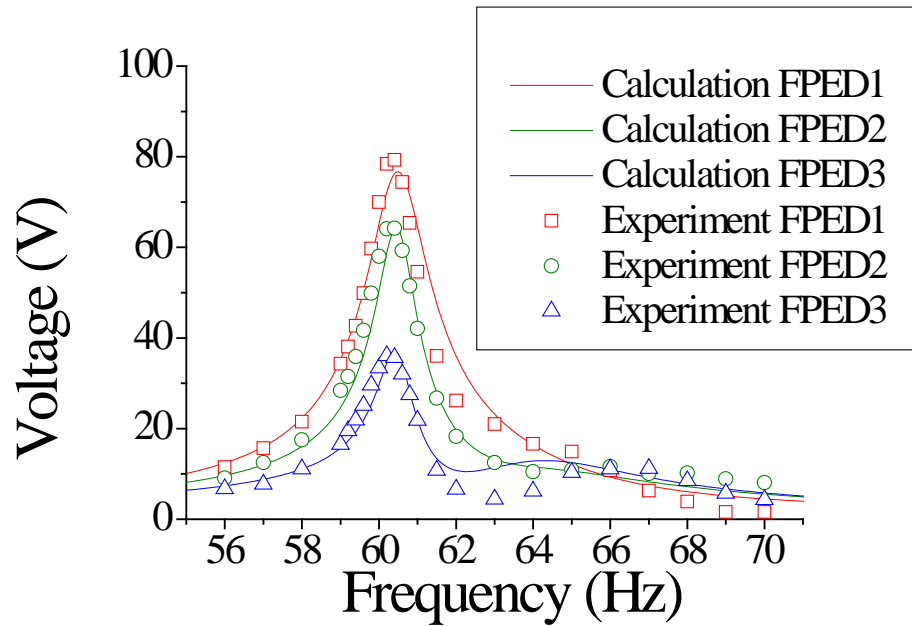
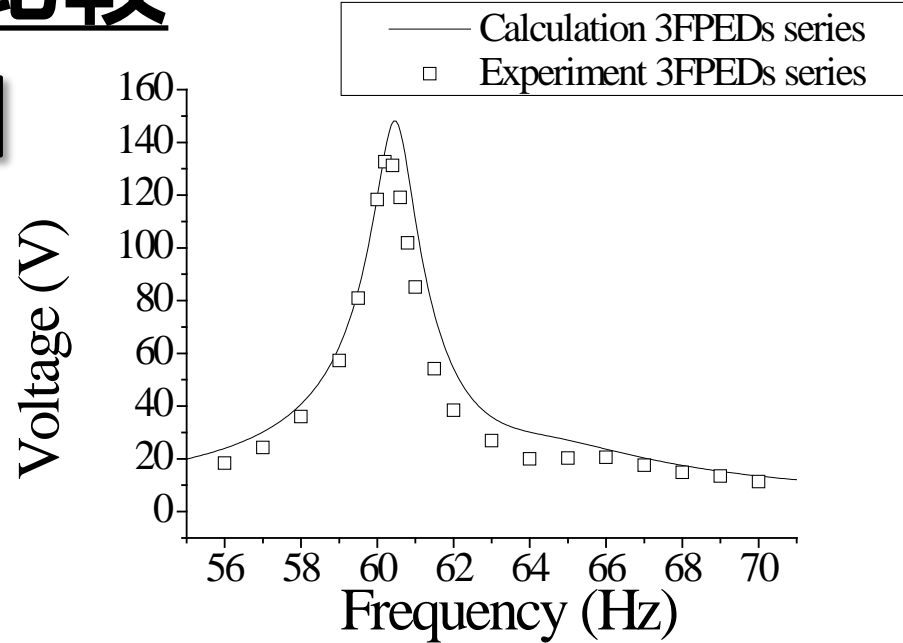
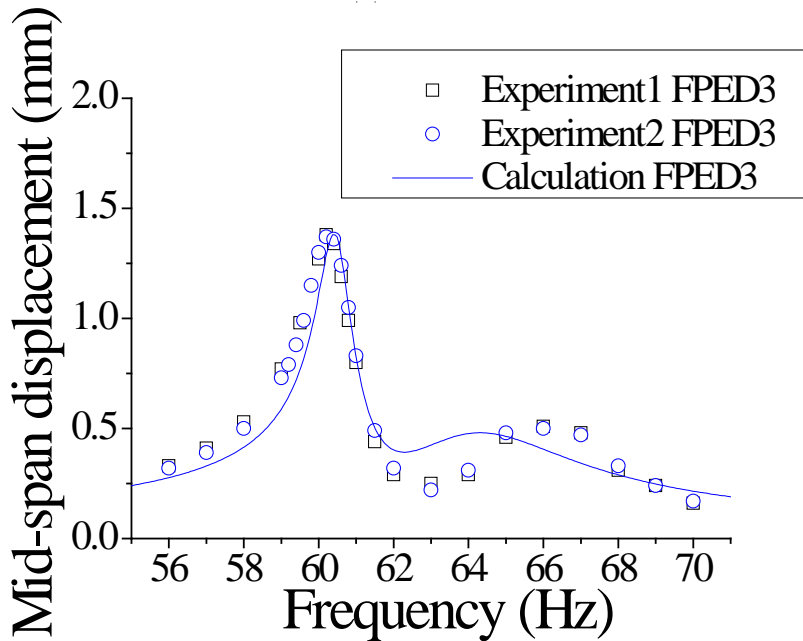
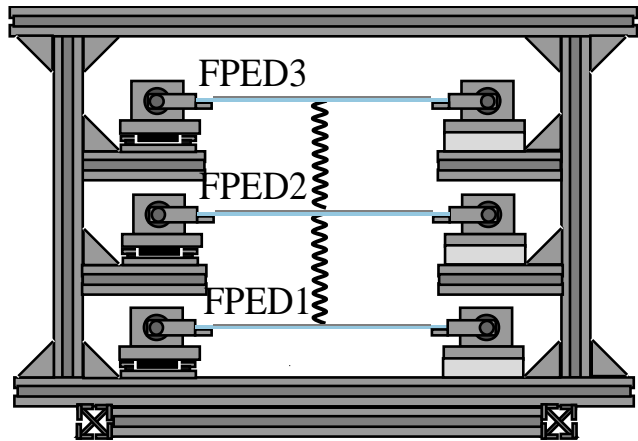
実験値と理論値の比較

Case1 : FPED3本による実験



実験値と理論値の比較

Case2 : FPED3本をばねで連結した実験



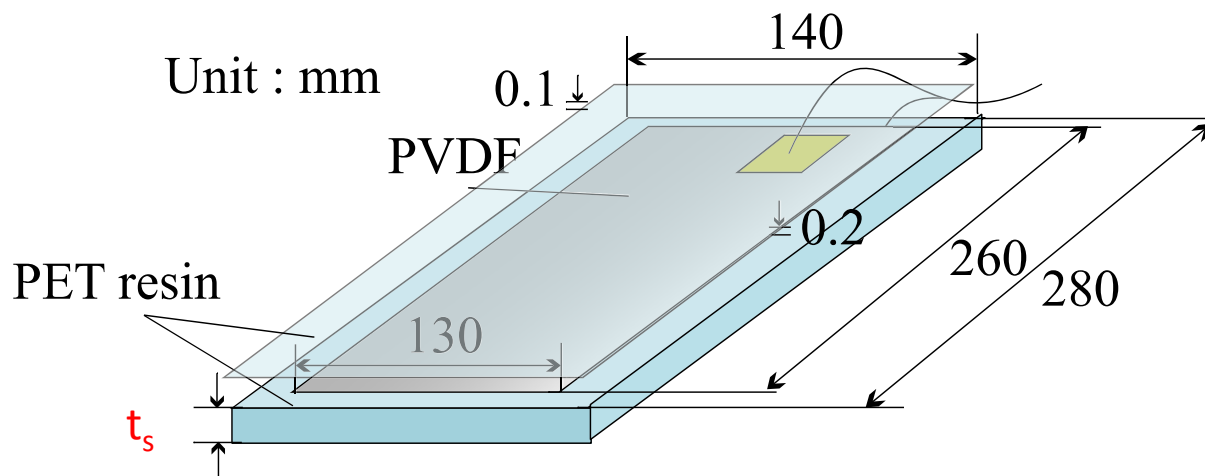
理論解析によるFPEDモデル

理論解析条件

- 振動加速度 : 10 m/s^2
- 外部抵抗値 : $10^2 \sim 10^8 \Omega$
- 減衰比 : 0.013
- FPEDの本数 : 10

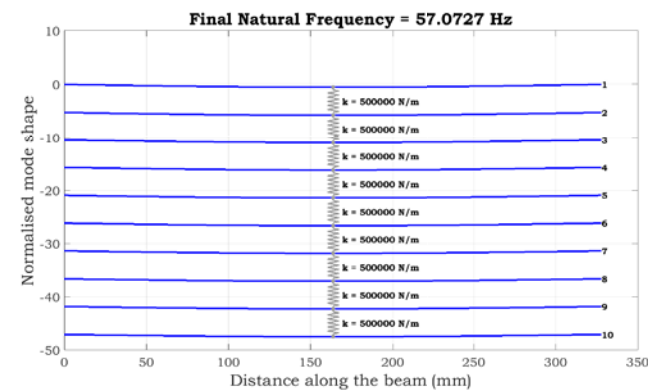
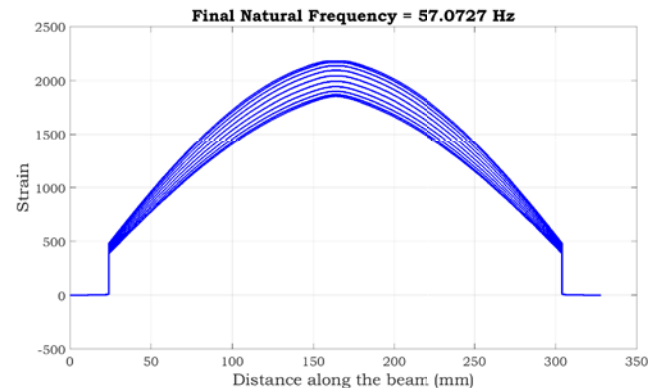
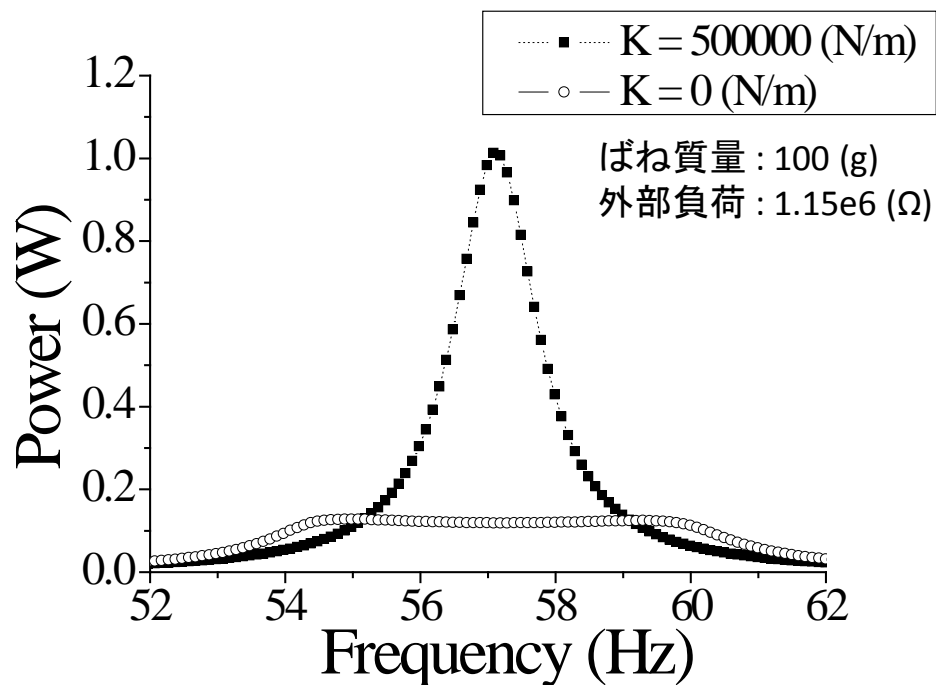
理論解析による検討項目

- ばね定数
- ばねの質量



	FPED1	FPED2	FPED3	...	FPED10
t_s (mm)	10	10.1	10.2	...	10.9
f	61.4	62.0	62.6	...	66.7

発電量の試算



- ✓ 共振点の最大値のみではあるが、インピーダンスマッチングを行うことで1 Wの発生電力を確認.
- ✓ 物理的にエンジンマウント部に現在の形状のFPEDを10本設置することは不可能であるが、積層構造にすることで1本あたりの発電量が増加し、FPEDの本数を減らせる可能性がある.
- ✓ ジグの設計を改良する必要がある.

広島大学人力飛行機製作チームHUES

広島大学人力飛行機製作チーム △HUES



- ・ 広島大学の人力飛行機の製作チーム
- ・ 人力飛行機的设计・製作を行っている

広島大学人力飛行機製作チーム △HUES

設計



製作

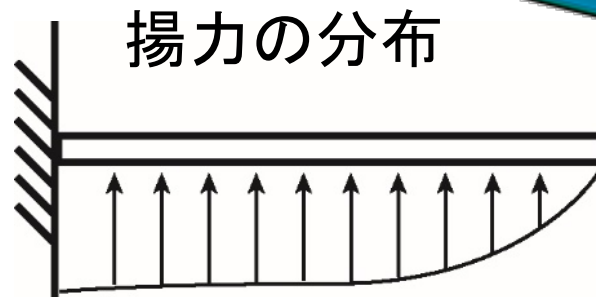
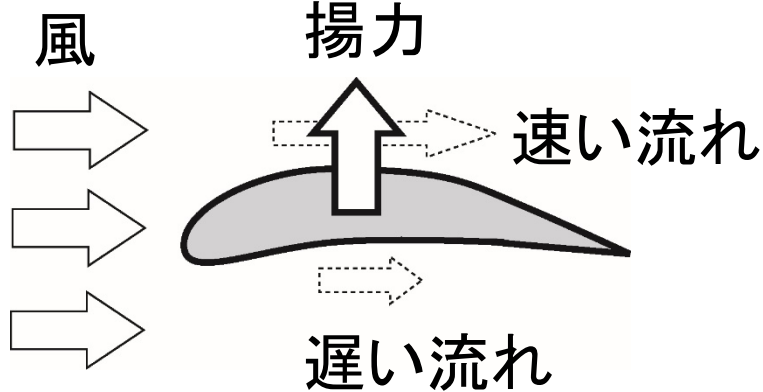
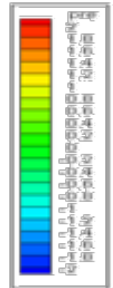
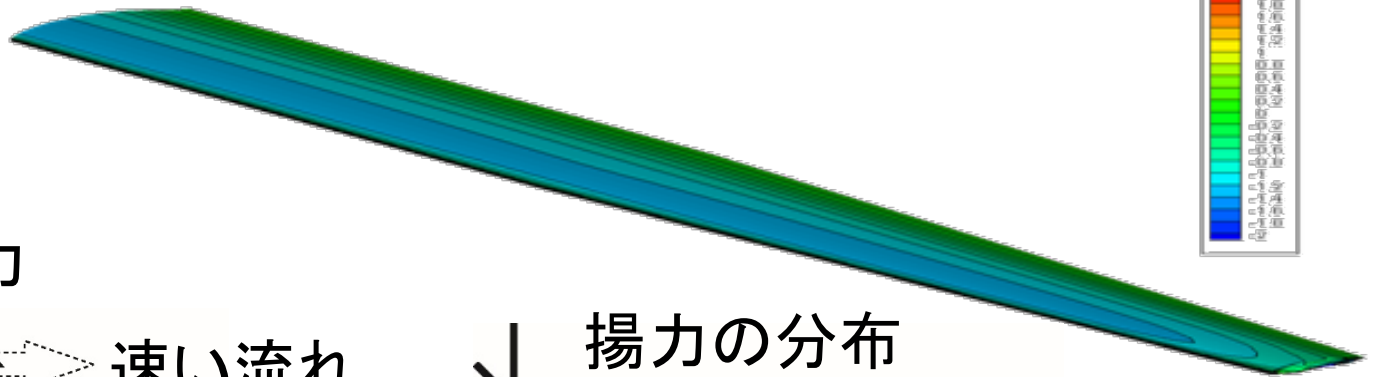
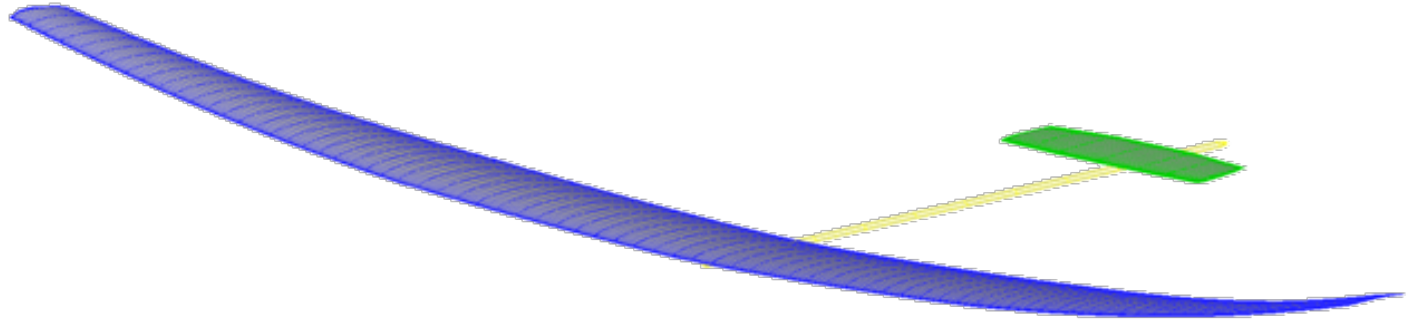


性能評価



広島大学人力飛行機製作チーム △HUES

空力設計



空力解析から得られた揚力分布から、翼(はり)のたわみ・強度を材料力学の知識を用いて評価

広島大学人力飛行機製作チーム HUES

プリプレグの例

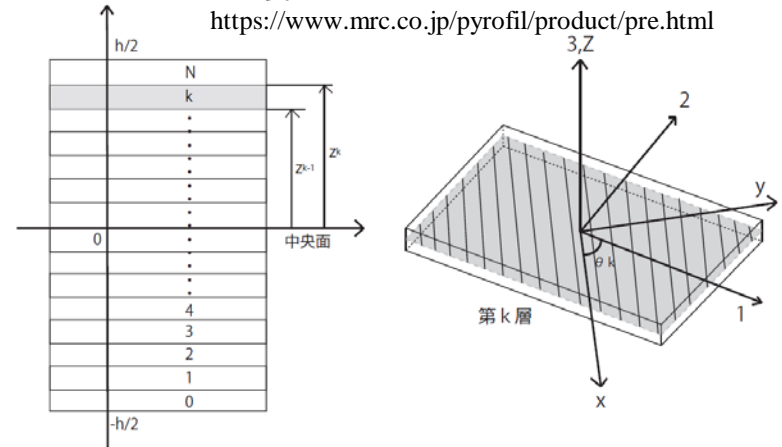


・主翼主桁① $\phi 110 \times \phi 112.96 \times \phi 113.5$ (帯40L研磨) $\times 2100L$ (4200=2100+2100)

材料: 預かり材料 CF40t (東レ P9052F-15 (RC33%, $t=0.1346\text{mm}$))

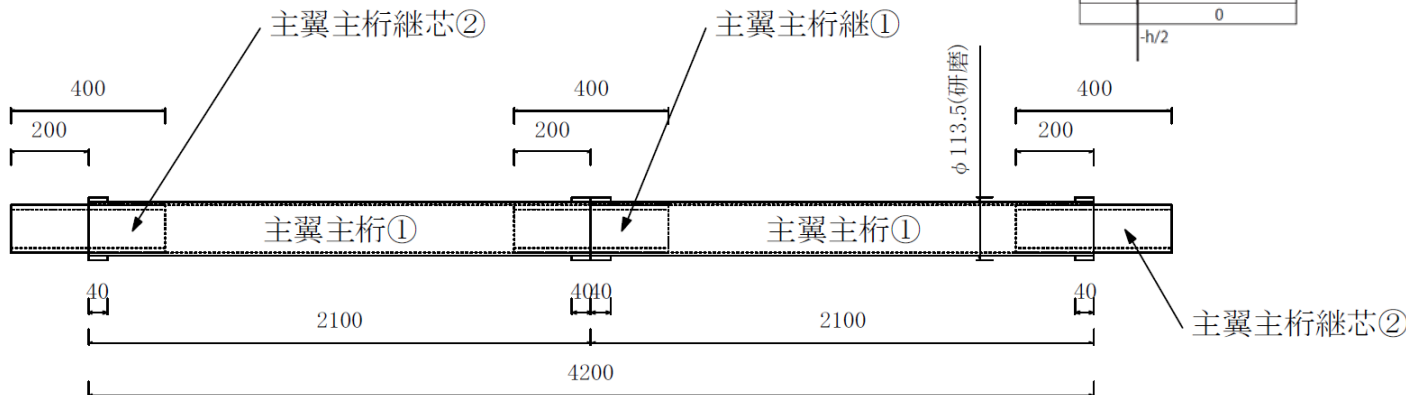
※三菱レイヨン

<https://www.mrc.co.jp/pyrofil/product/pre.html>



No.	使用p/p	繊維角度	内径	ply数	1ply厚	肉厚	外径
1	P9052F-15	± 45	110.00	2.0	0.1346	0.27	110.54
2	P9052F-15	0	110.54	7.0	0.1346	0.94	112.42
3	P9052F-15	± 45	112.42	2.0	0.1346	0.27	112.96
4	GFRP黒	帯40L \times 2	112.96	2.0	0.26	0.52	114.00
5	旋盤研磨		114.00	-1.0	0.25	-0.25	113.50

合計肉厚 1.75



広島大学人力飛行機製作チームHUES

翼



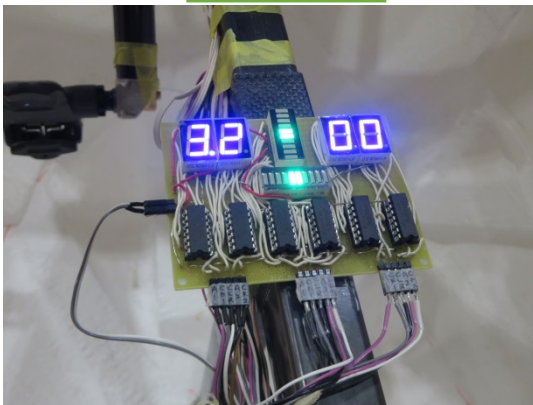
部品製作



フェアリング



電装



フレーム



プロペラ



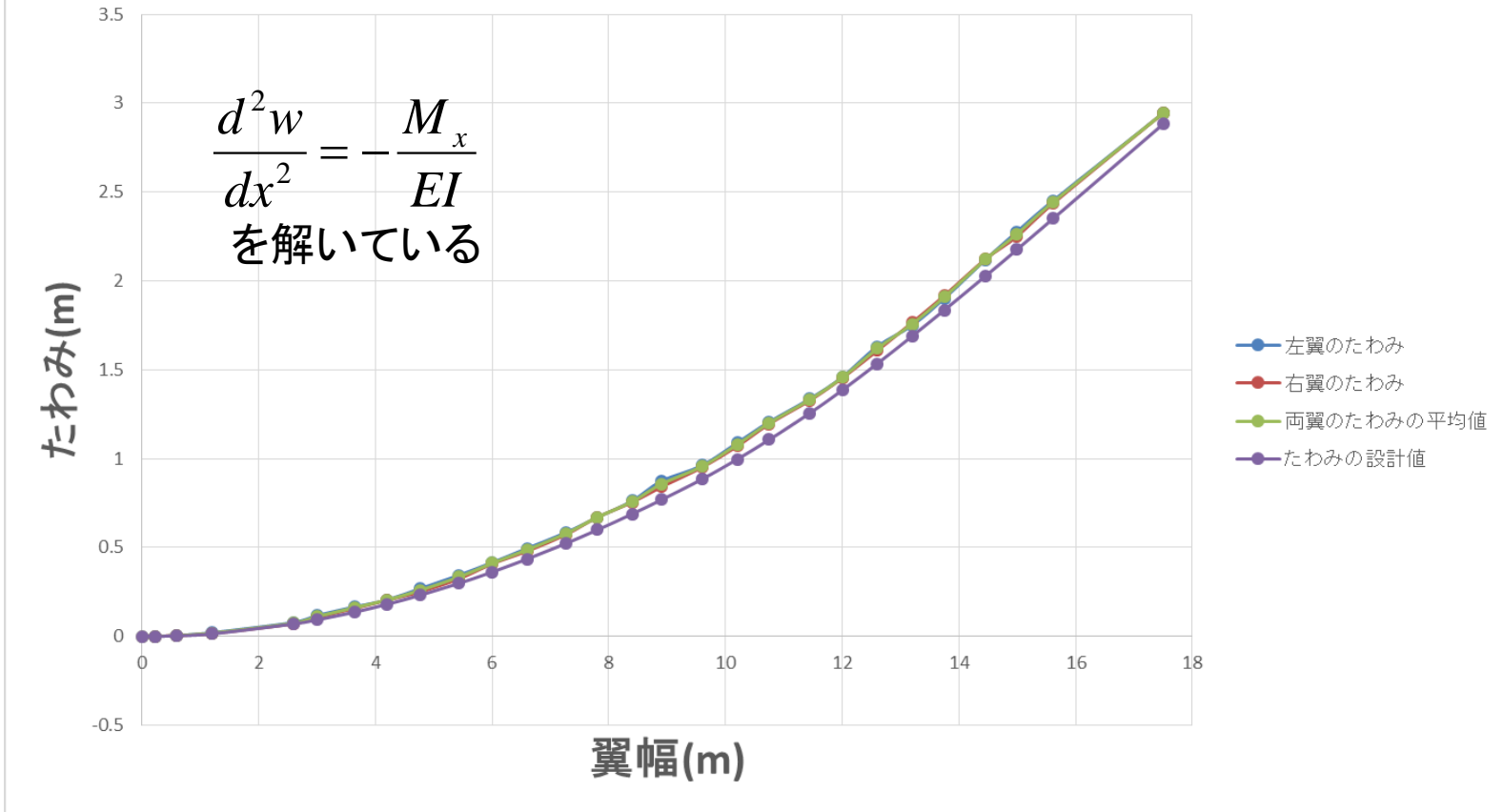
広島大学人力飛行機製作チーム △HUES



ペットボトルで揚力を再現。主翼主桁のたわみを計測。

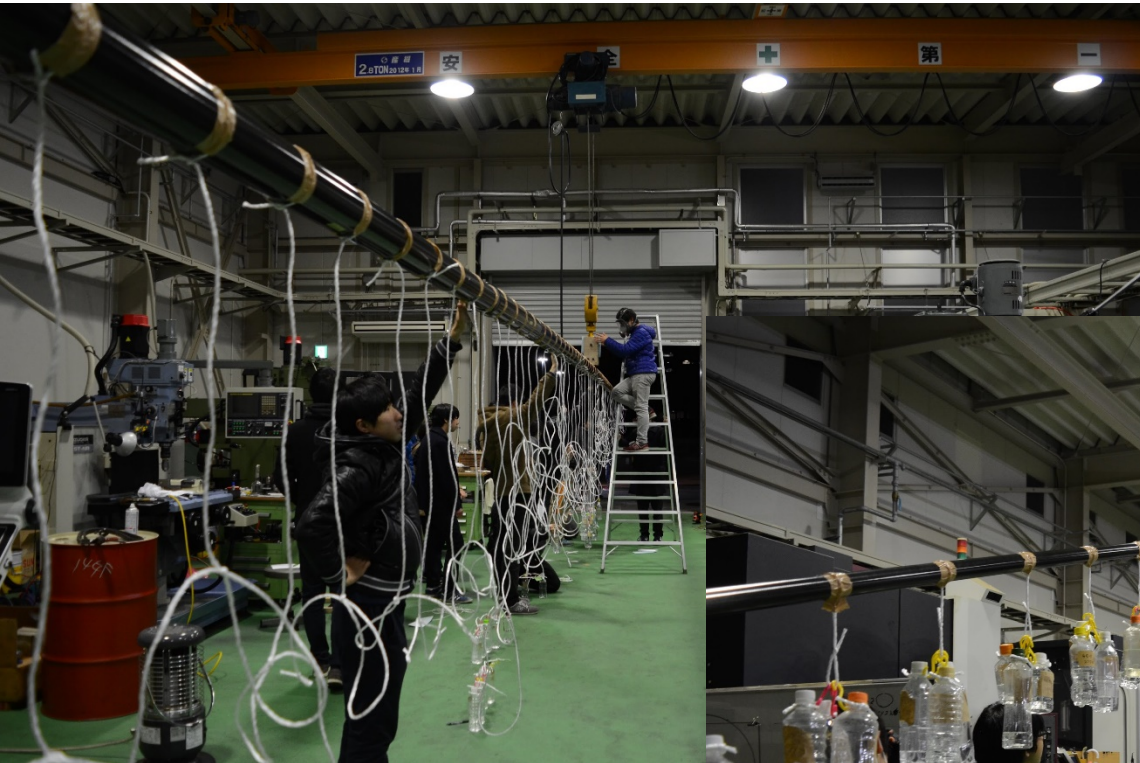
広島大学人力飛行機製作チーム △HUES

設計揚力×1.0の時のたわみの記録



設計したとおりに、翼が変形していることを確認。

広島大学人力飛行機製作チーム △HUES



平成29年2月28日、29日

おわりに

ものづくりプラザへの依頼工作に関連して、以下の研究内容の紹介を行った。

- 鋼材の低サイクル疲労
- GFRPの強度
- 柔軟発電体を用いた環境・振動発電
- 広島大学人力飛行機製作チームHUES

今後とも、ご協力のほど、どうぞよろしくお願ひ申し上げます。