

研究成果6

回転型流体機械における 応力発生メカニズムの検討

仁志和彦

1. 本研究の背景・目的

石油精製・化学、ポリマー製造、無機および有機材料製造等の**化学プラント**においては、高温、高圧の金属タンク内で引火性、腐食性、毒性を有する流体を混合、反応させる操作が汎用される。

不適切な装置設計、メンテナンス、管理は
装置の破損、有毒物の漏洩、火災、爆発等の
基大事故



ポリマー製造プラント



超臨界水による金属ナノ粒子合成装置

研究テーマ

- 金属材料の損傷劣化機構
- ミクロ損傷定量的評価法
- 損傷の非破壊検出法、監視手法



化学プラントにおける特徴
・機械装置と流れの相互作用
・流体による応力発生機構
・応力の大きさ、変動に関する知見

- 疲労強度、クリープ疲労強度を考慮した合理的設計、メンテナンス
- 余寿命予測に基づく管理



本研究の目的

化学プラント内の反応器を想定し、そこで汎用される回転式流体機械として、**回転翼による液体攪拌装置**を対象に、種々の状況において発生する**応力(軸トルク、ラジアル荷重)**の強度や変動状況明らかにし、発生メカニズムを解明する。

さらには、疲労、クリープ疲労強度に基づく**余寿命予測法**について検討する。

平成28、29年度の研究テーマ

- 攪拌翼回転開始時の過大軸トルク
- 新しい攪拌翼(大型特殊翼)における軸トルク、ラジアル荷重
- 非対称攪拌(偏心攪拌)における軸トルク、ラジアル荷重
- 大型特殊翼偏心攪拌におけるラジアル荷重



2. 研究成果の概要

(1) 攪拌翼回転開始時の過大軸トルク

- 攪拌翼の回転開始時には、運転時の数~数十倍の大きなトルクが発生
- 発生メカニズムや攪拌条件との定量的関係は未解明

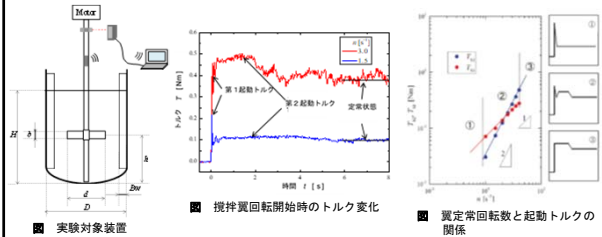
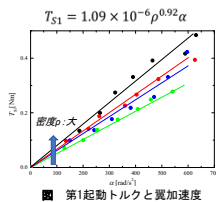


図 実験対象装置

第1起動トルクについて



第2起動トルクについて

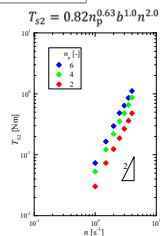


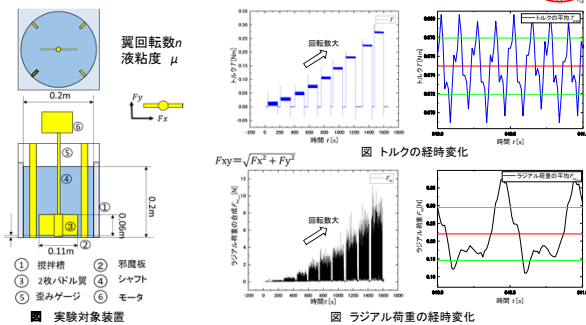
図 第2起動トルク発生時の槽内流動状態

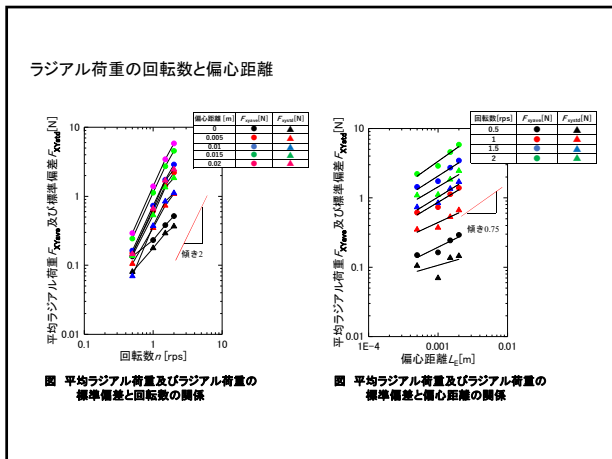
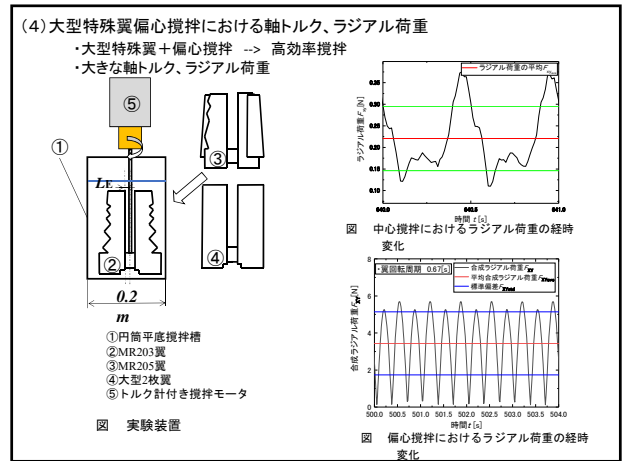
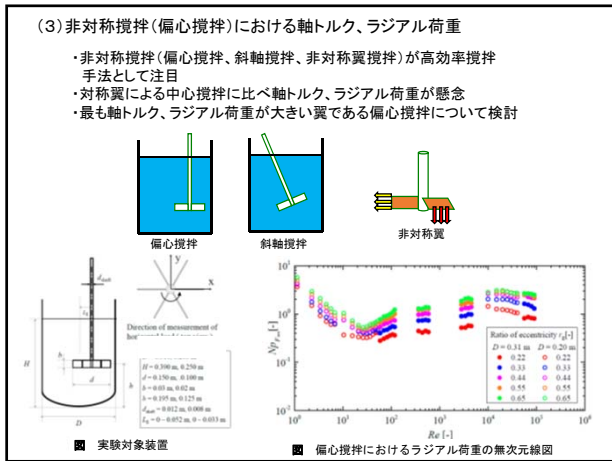
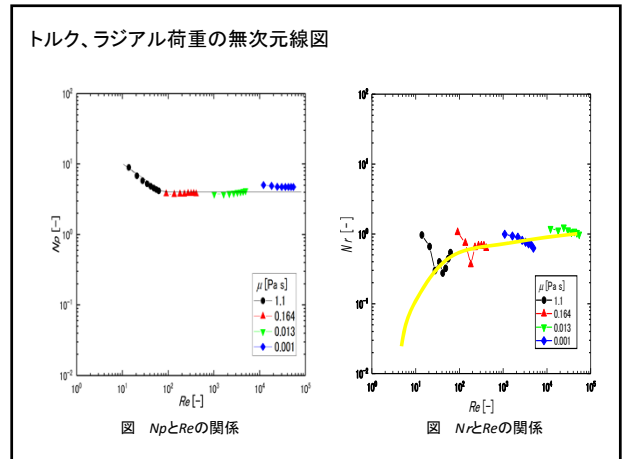
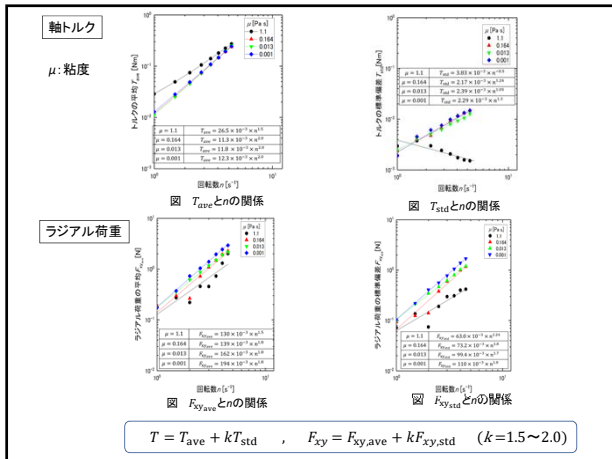
起動トルク発生メカニズム

- 第1起動トルク
翼旋回領域の加速運動
- 第2起動トルク
羽根の圧力抗力
+槽内の流れの発達

(2) 新しい攪拌翼(大型特殊翼)における軸トルク、ラジアル荷重

- 高い攪拌性能をもつ各種大型特殊攪拌翼の使用増大
- 翼使用時の流体からの応力に関する知見の不足
- 大型特殊翼に共通する下部大型2枚バドル翼の応力について検討





3. 今後の課題

- 非ニュートン流体攪拌および異相系攪拌における応力
 - 非ニュートン流体を対称としたトルク、ラジアル荷重の検討
 - 起動トルク挙動と非ニュートンレオリロジーの関係
 - 気液攪拌、固液攪拌への展開
- 大型特殊翼非定常攪拌における応力
 - 極めて高性能攪拌であるものの、設計指針がなく実装置への展開が進まない大型翼非定常攪拌(往復動)におけるトルク、ラジアル荷重
- 疲労試験の実施および余寿命予測の検討
 - 大型特殊翼偏心攪拌、大型特殊翼非定常攪拌を対象に疲労試験を実施
 - 運転時の応力解析および余寿命予測法の検討


平成29年度成果報告会

テーマ2: 成果報告(7)

「CFRP積層材の低速衝撃損傷: これまでの実施内容と今後について」

○鈴木 浩治(千葉工大),
齊藤 博嗣(金沢工大), 金原 勲(金沢工大),
(村山 英晶(東大院))

平成 30年 2月 27日

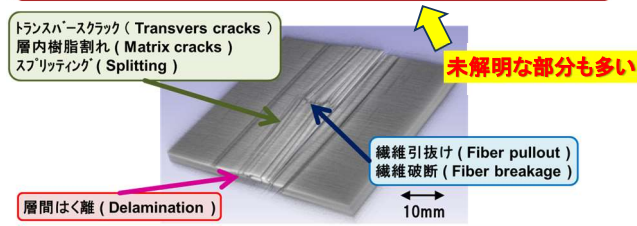


1

CFRP積層材

航空機構造用途高分子複合材料としての実績

面外方向への低速・低エネルギー衝撃 ⇒ 典型的な損傷 (Damage)



X-ray CT of impact-damaged unidirectional CFRP laminate

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

2

CFRP積層材の低速衝撃損傷

過去40~50年間に無数の基礎研究・応用研究および技術開発が蓄積

武田展雄	1986	複合材料の衝撃応答と破壊 (IV)	日本複合材料学会誌	Vol.12, No.2, pp.80-90.
Abrate, S.	1991	Impact on laminated composite materials	Applied Mechanics Reviews	Vol.44, No.4, pp.155-190.
Abrate, S.	1994	Impact on laminated composite materials: Recent advances	Applied Mechanics Reviews	Vol.47, No.11, pp.517-544.
Richardson, M.O.W. and Wisheart, M.J.	1996	Review of low-velocity impact properties of composite materials	Composites Part A	Vol.27, No.12, pp.1123-1131.

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

3

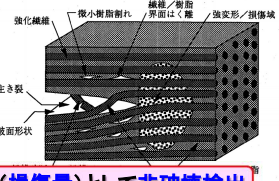
CFRP積層材の低速衝撃損傷

FRP ⇒ 本質的に脆性材料 ← 高靱化が重要な研究課題

多様かつマルチスケールな破壊事象 (Fracture events) の発生・蓄積

非常に複雑な力学現象 & 破壊力学的な取り扱いの必要性

北條正樹, 影山和郎	1997	複合材料の設計と評価の最前線 - 5. 破壊力学とその特性評価		
影山和郎	2005	複合材料のマイクロメカニクス・損傷解析の最新動向 - I: 破壊力学は複合材料強度設計に使えるか		



設計・検査など実務に活用できる形(損傷量)として非破壊検出

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

4

CFRP積層材の低速衝撃損傷

超音波探傷技術の活用 + 研磨切断面の光顕観察(トランスバースクラック観察)

衝撃エネルギーと正の相関を有する **はく離投影面積** を損傷量とする

+ 曲げ剛性の低下も損傷の度合いを定量的に表しえるとして採用

栗山卓, 成澤郁夫, 佐藤淳, 阿部利彦	1990	衝撃を受けたCFRP積層板の超音波映像および残存強度	材料	Vol.39, No.438, pp.247-253.
盛田英夫, 松本浩之	1995	落す試験によるCFRP積層板の耐衝撃損傷性評価	日本機械学会論文集A編	Vol.61, No.581, pp.127-132.
小林昭, 荻原慎二, 船谷聡, 石山和義	1997	平織CFRP積層板の落錐衝撃による微視的損傷	材料	Vol.46, No.5, pp.539-543.
倉敷哲生, 座古勝, 樺田剛名理	2005	CFRP積層材の低エネルギー衝撃損傷評価に関する研究(第1報)	日本機械学会論文集A編	Vol.71, No.704, pp.656-662.

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

5

CFRP積層材の低速衝撃損傷

衝撃後残留圧縮強度: CAI(Compression after impact)特性評価

規格化 SACMA R.M. 3R-94 (1994) / JIS K7089 (1996) 既定の積層構成・試験片サイズ

超音波探傷(C-scope/B-scope) + 研磨切断面の光顕観察(トランスバースクラック観察)

衝撃後の試験片に対して既定の治具による圧縮試験を実施し残留強度を評価

石川隆司, 松嶋正道, 林洋一	2000	従来型CF/エポキシ積層材の衝撃後残留圧縮強度(CAI)試験時の力学的挙動	日本複合材料学会誌	Vol.26, No.4, pp.141-151.
石川隆司, 林洋一, 松嶋正道	1994	CF/PEEK材とCF/エポキシ材を用いた補強平板構造の衝撃後残留圧縮強度	日本航空宇宙学会誌	Vol.42, No.484, pp.319-328.
荻原慎二, 小林昭, 田中知樹	1997	CFRP積層板の落錐衝撃による微視的損傷と残留圧縮強度	日本機械学会論文集A編	Vol.63, No.811, pp.1505-1510.

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギ・航空運輸機の安全性向上に資する高強度マルチスケール損傷評価体系的構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマニスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・斉藤・金原・村山)

CFRP積層材の低速衝撃損傷

CAI試験の普及 → 新規材料スクリーニング用途 CFRP積層材耐性評価研究

島井隆治郎, 美島弘二, 田中 人	1997	繊維強化樹脂基複合材料の衝撃・圧縮破壊特性と水浸透効果	日本機械学会論文集A編	Vol.63, No.610, pp.1199-1204.
加藤久弥, 下河利行, 上田享, 濱口康正, 小林大祐	2008	炭素繊維/高弾性ポリアミド樹脂複合材料MIROK/PE110の衝撃後圧縮(CAI)強度特性について	日本複合材料学会誌	Vol.31, No.1, pp.21-30.
Saito, H. and Kimpara I.	2006	Evaluation of impact damage mechanism of multi-axial stitched CFRP laminate	Composites Part A	Vol.37, No.12, pp.2228-2238.
青木雄一, 山田健, 石川龍司, 遠藤一	2006	CFRP積層材の衝撃後残留圧縮強度特性に及ぼす吸水・環境温度の影響	日本複合材料学会誌	Vol.32, No.4, pp.163-170.
横間智弘, 青木雄一, 小笠原俊夫	2007	薄層を有する高弾性CFRP積層材の面外衝撃挙動挙動及びCAI特性	日本航空宇宙学会誌	Vol.55, No.643, pp.388-395.
星光, 中野啓介, 岩根豊, 石川龍司, 矢島浩	2007	CFRPスクープ接着継手の衝撃後強度特性	日本複合材料学会誌	Vol.33, No.3, pp.104-118.
金崎真人, 内城千龍, 田中基樹, 斎藤博樹, 西川雅章, 北條正樹, 金原 康	2016	CF/PA6積層材における熱履歴を利用した衝撃損傷修復と圧縮強度の回復	日本複合材料学会誌	Vol.41, No.1, pp.33-44.

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギ・航空運輸機の安全性向上に資する高強度マルチスケール損傷評価体系的構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマニスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・斉藤・金原・村山)

CFRP積層材の低速衝撃損傷

数値シミュレーションから複雑な本力学破壊現象の解明を目指す

低速衝撃を受ける積層材中にはトランスバースクラックを伴った多重層間はく離が発生・進展

末益博志, 小俣孝司, 岡島理, 特利夫	1995	多重層間で割れたクロスプライ積層材の圧縮挙動と繊維クラックの不安定開裂に関する有無要素解析	日本航空宇宙学会誌	Vol.43, No.500, pp.519-519.
岡島理, 末益博志	2000	複合材料積層材中の多重層間剥離伝播挙動の非線形有無要素解析	日本複合材料学会誌	Vol.28, No.6, pp.219-228.
倉敷智生, 唐古勲, 植野勇, 特利夫	2005	CFRP積層材の低エネルギー衝撃挙動評価に関する研究(第2報)	日本機械学会論文集A編	Vol.71, No.704, pp.663-669.
前嶋 浩, 胡東, 原栄一, 橋本久雄	2008	低速衝撃荷重下におけるCFRP積層材の非線形挙動予測	日本航空宇宙学会誌	Vol.56, No.652, pp.220-227.
吉村彰彰, 仲尾知晃, 武内龍雄	2008	層間方向の結合によるCFRP積層材の面外衝撃挙動抑制効果	日本複合材料学会誌	Vol.34, No.5, pp.182-188.
市来誠, 末益博志, 青木雄一	2012	衝撃損傷を有するCFRP積層材の圧縮挙動と破壊進展に関する考察	日本複合材料学会誌	Vol.38, No.6, pp.254-261.
市来誠, 末益博志	2015	二重らせん構造を有する複合材料積層材の圧縮荷重下における衝撃損傷進展メカニズム	日本機械学会論文集	Vol.81, No.826, DOI:10.1299/tranjsme.14-00380.

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギ・航空運輸機の安全性向上に資する高強度マルチスケール損傷評価体系的構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマニスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・斉藤・金原・村山)

産業用X線CT (Computed Tomography) 装置の普及

CFRP：管電圧低め・管電流多め

3D顕微鏡としての利用：拡大率 = SID/SOD

CT本'ルームデータ'の直接利用：
 (A)マテリアルベース解析
 欠陥/ボイド検出・繊維配向解析
 ボxel FEM数値解析

CT本'ルームデータ'から形状抽出：
 (B)形状ベース解析
 座標計測・形状比較
 CAD/CAE/CAT
 リバーエンジニアリング
 3Dプリンタ出力(⇒CAM)

角度View毎 X線投影像列 → CT再構成 Feldkamp法 → CTスライス画像(pixel)スタック → CT本'ルーム(boxel)データ → 各点(各boxel)での減弱μとCT値(gray値)

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギ・航空運輸機の安全性向上に資する高強度マルチスケール損傷評価体系的構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマニスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・斉藤・金原・村山)

X線CTの複合材研究への活用の現状

複合材料内部の破壊・損傷・欠陥・ボイドの切断面観察・非破壊検査
 複合材料内部の繊維配向観察・繊維配向モデル化

松浦博樹, 藤井正司	1998	産業用X線CTスキャナ	日本複合材料学会誌	Vol.12, No.1, pp.2-7.	初期の解説記事
石川龍司, 杉本直, 青木雄一, 岩根豊	2005	マイクロCTの宇宙・航空用先端複合材研究への応用	非破壊検査	Vol.154, No.5, pp.233-237.	C/Oの破壊進展観察、結合強化CFRPの層間破壊挙動観察 (A)マテリアルベース解析
吉村彰彰, 藤谷亮平, 小俣孝, 小笠原俊夫	2014	X線CT画像を用いたCFRP積層材の繊維方向測定	日本複合材料学会誌	Vol.40, No.4, pp.146-152.	CT画像に画像相関法を用い繊維方向を算出 (A)マテリアルベース解析
佐木, 鈴木, 吉田, 新井, 福島, 藤井厚彦, 川田宏之	2017	層間高弾性化厚肉CFRP積層材の面外方向衝撃挙動特性評価及びX線CTによる繊維配向	日本複合材料学会誌 JCOMB	20-09	CFRP中のボイドやクラックの観察 (A)マテリアルベース解析
高橋拓也, 坂野啓輔, 上田政人, 吉村彰彰, 中山真広	2017	X線コンピュータ断層撮影を用いた一方炭素繊維強化プラスチックの三次元有無要素モデル構築と圧縮シミュレーション	日本複合材料学会誌 JCOMB	2B-05	CFRP中の実配向繊維をFEMモデル化 (A)マテリアルベース解析、一部(B)形状ベース解析

(A)マテリアルベース解析タイプの研究が大半を占める。CTの可能性の一部を利用しているのみ。

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギ・航空運輸機の安全性向上に資する高強度マルチスケール損傷評価体系的構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマニスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・斉藤・金原・村山)

X線CT装置のさらなる高性能化と可能性

X線発生焦点径の微小化⇒高分解能化 検出器の高感度化・高解像度化

幾何測定精度の保証されたX線CT装置のための規格化

Dimensional X線CT装置(DXCT)の座標測定器:CMMとしての実用化

(B)形状ベース解析の信頼性の向上と応用範囲の拡大

ケナフ繊維CT直接FEM解析

位相最適化コア層 3Dプリンタ成形CTをマッピングキューブ法にてSLT変換後に3DプリンタCADと形状比較

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギ・航空運輸機の安全性向上に資する高強度マルチスケール損傷評価体系的構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマニスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・斉藤・金原・村山)

本研究の位置づけ

CFRP積層材の低速衝撃損傷問題を取り扱う

X線CTを破壊事象観察((A)マテリアルベース解析)として活用

X線CTを損傷量定量化ツールとして活用 特に(B)形状ベース解析の利用方法の検討

標準となった超音波探傷・研磨断面光顕観察の補助ツールとして

数値シミュレーション研究との連携を模索

構造ヘルスマニタリング(SHM)研究との連携を模索

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高精度マルチスケール損傷評価体系の構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマルチスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマonitoringへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・青藤・金原・村山)

12

これまでの実施内容

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

これまでの実施内容

供試体(基本&柔軟シート)の寸法・積層構成

供試体寸法: 150×150 [mm²], 厚さ: 約 2~2.3 [mm]
 8層対称積層(擬似等方), 粘弾性ダンピングシート(PIEZON, 0.3mm)

[0/45/90/-45]_s QIS [0/45/90/-45][D][-45/90/45/0] QIS+D

CFRP積層板 制振/耐衝撃CFRP積層板

落錘衝撃試験

支持台 (SS400, t = 50mm, 中央にφ76.2mmの円孔)

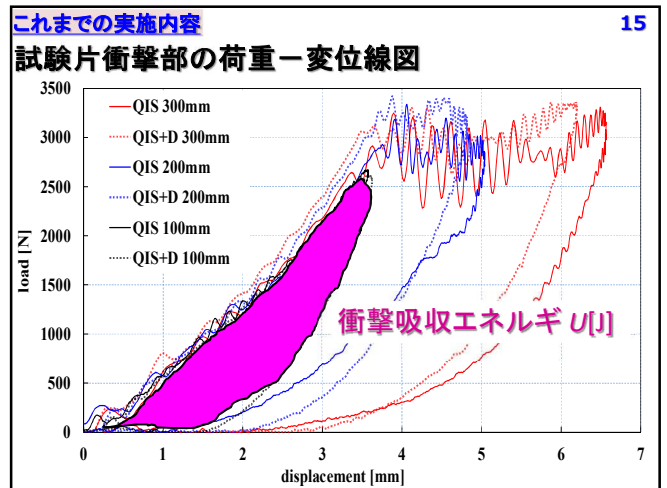
試験片

落下高さ

- $h_0 = 100 \text{ mm}$ (4.26J, 1.40m/s)
- $h_0 = 200 \text{ mm}$ (8.53J, 1.98m/s)
- $h_0 = 300 \text{ mm}$ (12.8J, 2.43m/s)

- ロードセル(秤量20kN)
- 動はずみアンプ サンプリグ速度: 10μs
- ストライカ(ASTM D3763) SNC631(ニッケルクロム鋼) 先端部直径: 12.7mm 打撃部総質量: 4.346kg
- ハイスピード動画トラッキング印 ⇒ ストライカ位置・速度の時刻歴

試験片衝撃部の荷重-荷重点変位線図



損傷量としての ΔS [mm²] の定義

損傷前試験片表面積 S_1 [mm²]
 損傷後試験片表面積 S_2 [mm²]
損傷表面積 ΔS [mm²]
 $\Delta S = S_1 - S_2$

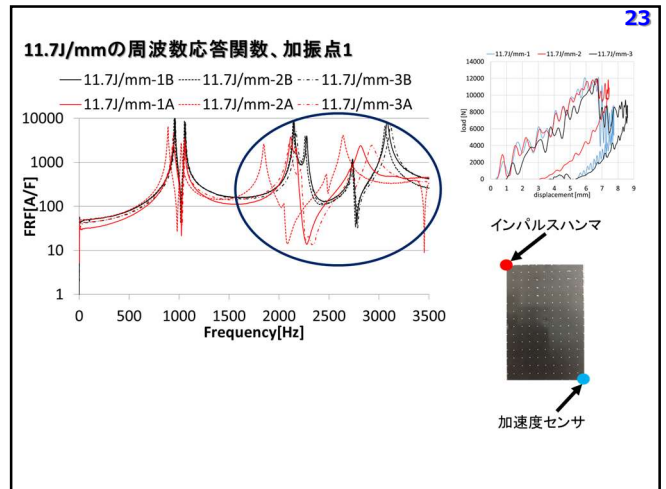
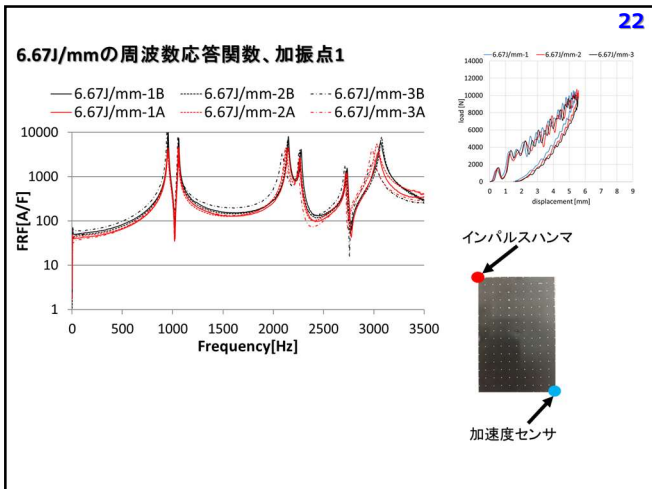
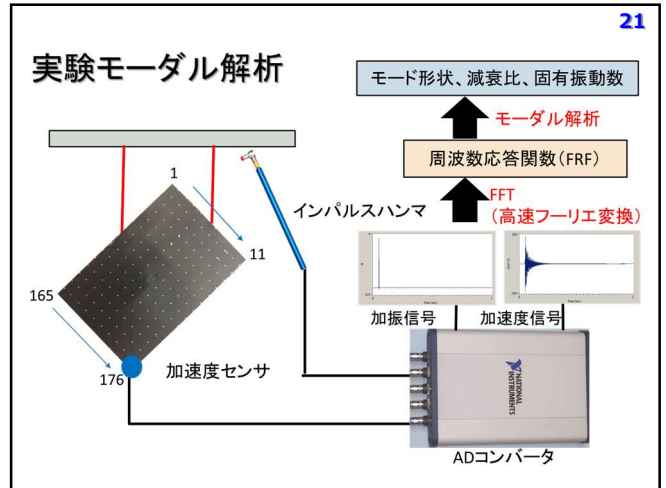
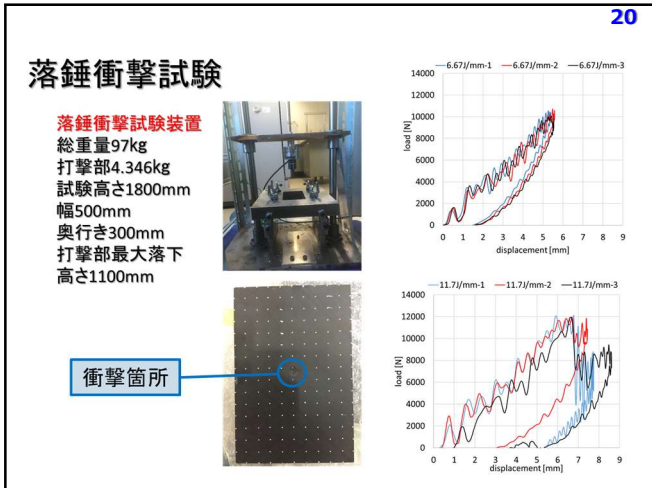
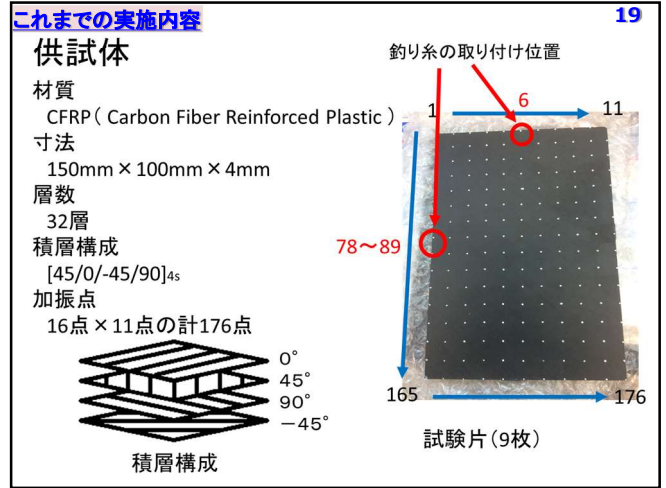
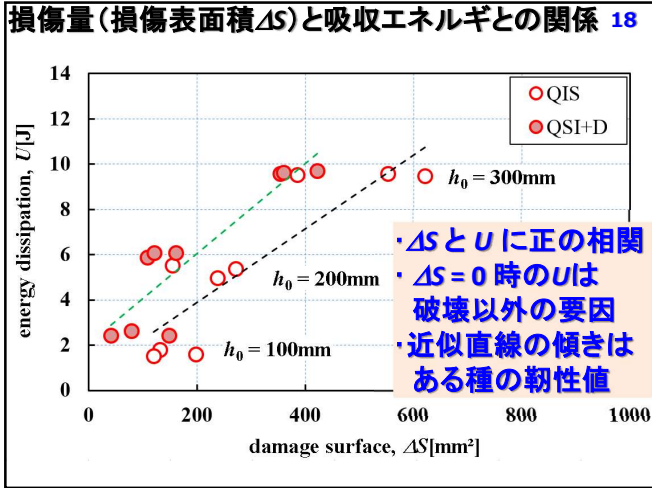
CT撮像(1回目) ⇒ S_1 [mm²]
 CT撮像(2回目) ⇒ S_2 [mm²]
 ΔS [mm²]

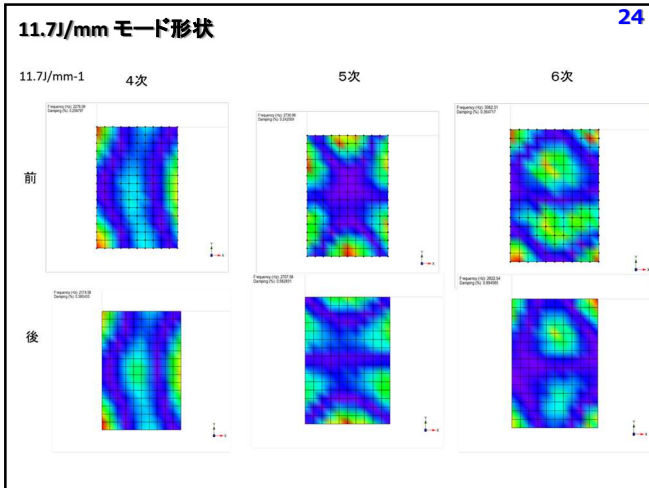
表面積増加量 ΔS と衝撃吸収エネルギー U [J] に何か関係がないだろうか。

X線CT撮像とその画像解析

損傷量(損傷表面積 ΔS) 評価

QIS 100mm / $U = 1.80\text{J}$	QIS 200mm / $U = 4.97\text{J}$	QIS 300mm / $U = 9.50\text{J}$
$\Delta S = 132\text{mm}^2$	$\Delta S = 238\text{mm}^2$	$\Delta S = 621\text{mm}^2$
QIS+D 100mm / $U = 2.42\text{J}$	QIS+D 200mm / $U = 5.86\text{J}$	QIS+D 300mm / $U = 9.56\text{J}$
$\Delta S = 79\text{mm}^2$	$\Delta S = 109\text{mm}^2$	$\Delta S = 354\text{mm}^2$

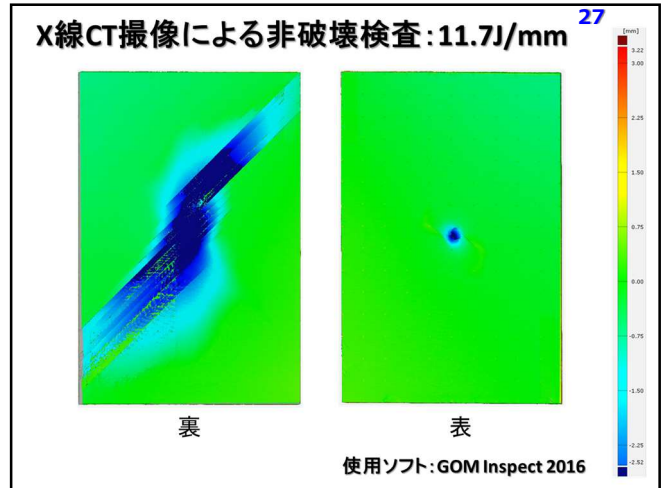
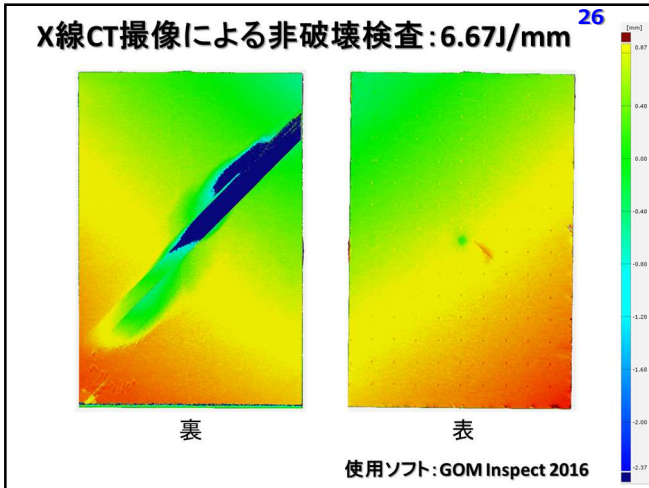




X線CT撮像およびCT画像解析

- マイクロフォーカスX線CT装置によるCT撮像条件
 - 画像解像度: 30 μ m/pixel / 1024pixel \times 1024pixel
 - スライスピッチ(x,y,z方向): ピュー数: 1024
 - アベリッジ数: 8
 - X線管出力: 90kV-90 μ A
 - Feldcamp法による画像再構成後, 16bit-DICOMデータ出力
- GOM Inspect 2016によるCT画像解析
 - グレースケール値に閾値を設け, 供試体部として2値化抽出
 - STL形式のポリゴンデータに変換
 - 予損傷前後のCT撮像データを重ね合わせ, 寸法偏差を数値化

カールツァイス METROTOM800
90 μ m/pixel



エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高強度マルチスケール損傷評価体系的構築
テーマ2: 高分子基複合材料のマルチスケール損傷評価手法の構築とその構造ヘルスマニタリングへの応用
【CFRP積層材の気速衝撃損傷: これまでの実施内容と今後のについて】(○鈴木・斉藤・金原・村山)

今後について

- X線CT撮像と超音波探傷との連携
- トランスバースクラックに着目した実施項目
- 層間はく離に着目した実施項目
- 数値シミュレーション および 構造ヘルスマニタリングとの連携

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高強度マルチスケール損傷評価体系的構築
テーマ2: 高分子基複合材料のマルチスケール損傷評価手法の構築とその構造ヘルスマニタリングへの応用
【CFRP積層材の気速衝撃損傷: これまでの実施内容と今後のについて】(○鈴木・斉藤・金原・村山)

今後について

トランスバースクラックに着目した実施項目

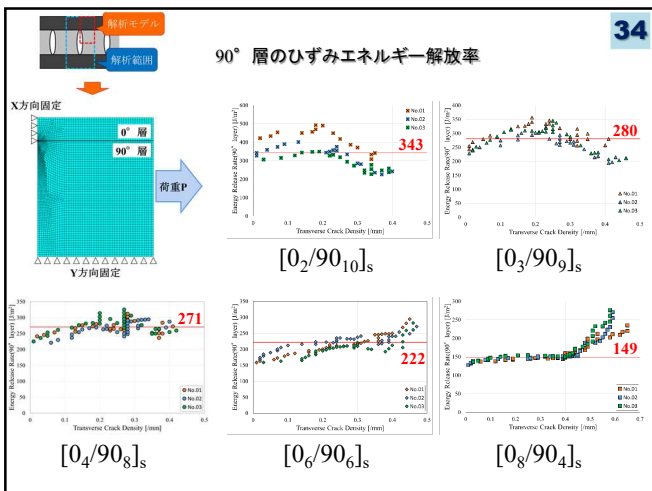
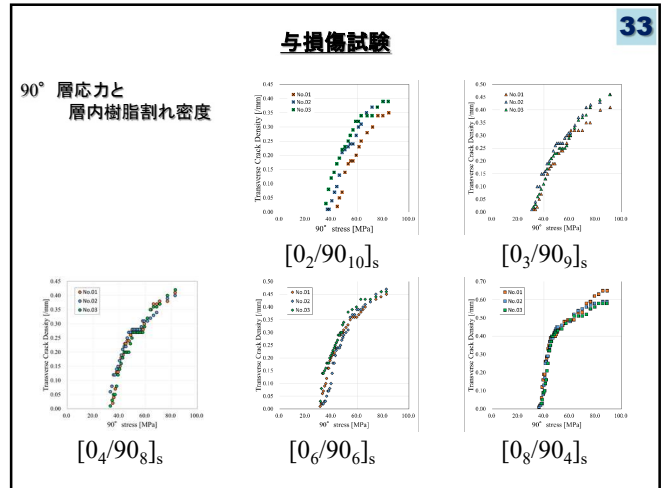
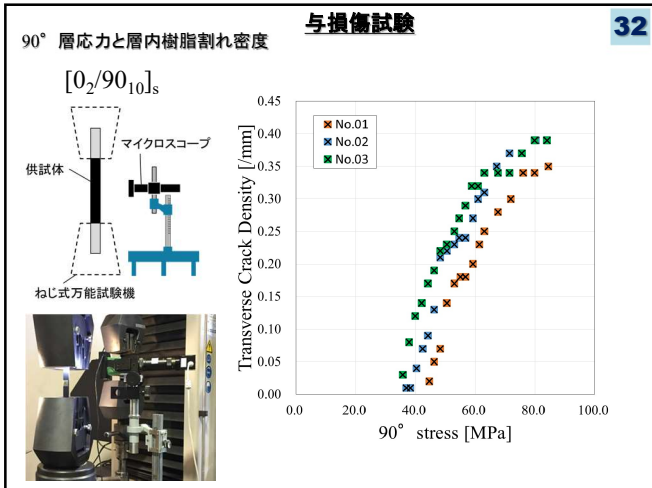
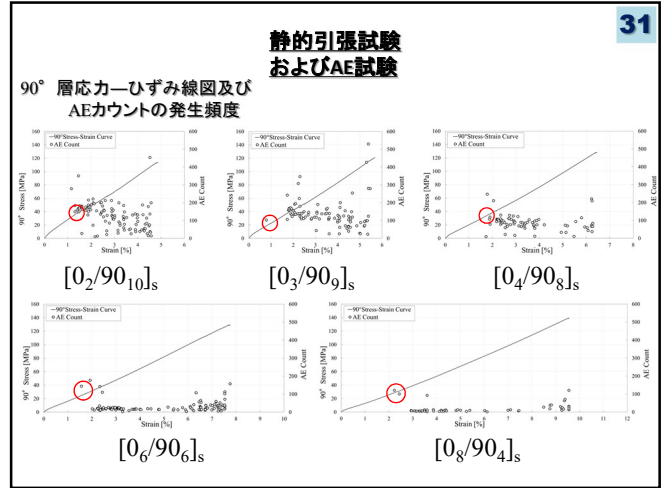
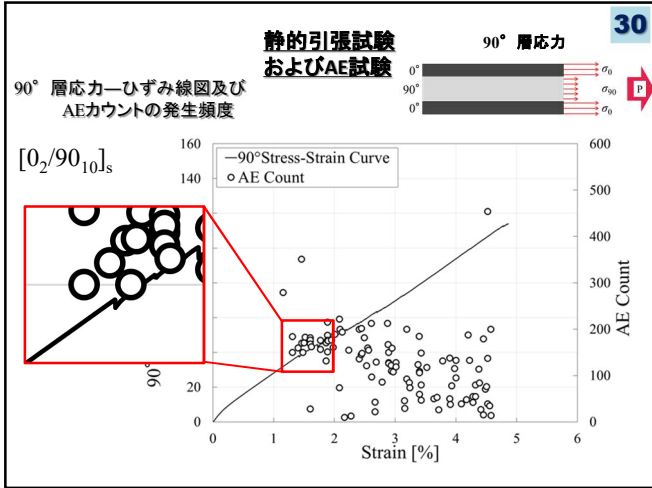
直交対称積層材(24ply)

積層構成

- [0₂/90₁₀]_s [0₆/90₆]_s
- [0₃/90₉]_s [0₈/90₄]_s
- [0₄/90₈]_s

実際の供試体

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室



エネルギー・航空運輸機関の安全性向上に資する高強度マルチスケール複合材料体系の構築

テーマ2：高分子基複合材料のマルチスケール損傷評価手法の構築とその高速ヘルモニタリングへの応用

【CFRP積層材の気速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について】(〇鈴木・斉藤・金原・村山)

今後について **トランスバースクラックに着目した実施項目**

[0₂/90₁₀]_s 負荷荷重20.0[kN](き裂密度0.40[mm])

[0₈/90₄]_s 負荷荷重70.1[kN](き裂密度0.59[mm])

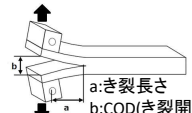
私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館0階会議室

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高精度マルチスケール損傷評価体系的構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマシネス評価評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・斉藤・金原・村山)

36

今後について 層間は離れに着目した実施項目

$[0^\circ_{12}/0^\circ_{12}]$ を用いたDCB試験

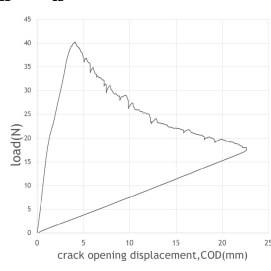


a:き裂長さ
b:COD(き裂開口変位)

G_{IR} :き裂進展過程のモードI層間破壊靭性値(KI/m²)

$$G_{IR} = \frac{3}{2(2H)} * \left(\frac{P_R}{B}\right)^2 * \frac{(B\lambda)^{\frac{2}{3}}}{\alpha_1}$$

2H:板厚(mm)
B:試験片幅(mm)



Load(N)

crack opening displacement, COD(mm)

荷重-き裂開口変位(COD)

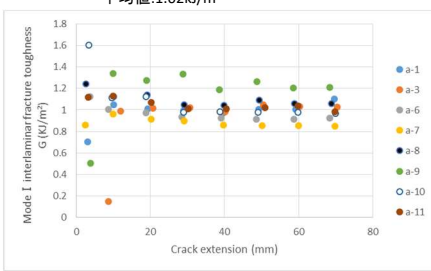
私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高精度マルチスケール損傷評価体系的構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマシネス評価評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・斉藤・金原・村山)

37

今後について 層間は離れに着目した実施項目

平均値:1.02kJ/m²



Mode I interlaminar fracture toughness G (KJ/m²)

Crack extension (mm)

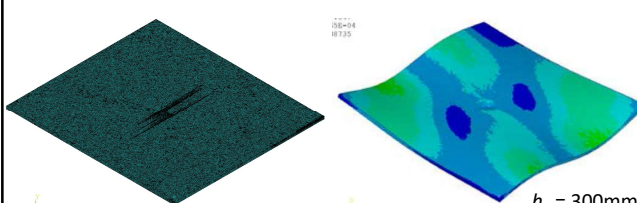
モードI層間破壊靭性値-き裂進展距離

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高精度マルチスケール損傷評価体系的構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマシネス評価評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・斉藤・金原・村山)

38

今後について 数値シミュレーション および 構造ヘルスマニタリングとの連携



要素サイズ:0.1mmオーダー
要素総数: 200000~300000

$h_0 = 300\text{mm}$
8次モード
(1742Hz)

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高精度マルチスケール損傷評価体系的構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマシネス評価評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「CFRP積層材の低速衝撃損傷：これまでの実施内容と今後について」(○鈴木・斉藤・金原・村山)

39

まとめ

- CFRP積層材の低速衝撃損傷問題についてまとめた。
- X線CT装置の説明とその可能性について述べた。
- これまでの実施内容について報告した。
- 今後の実施予定内容について説明した。

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

平成29年度成果報告会


テーマ2: 成果報告(8)

「連続CF/PA6熱可塑複合材の3Dプリンタ成形と機械的特性評価」

○鈴木 浩治(千葉工大)

謝辞: 原祥太郎准教授(千葉工大)・野村靖一教授(UTA)

平成 30年 2月 27日



テーマ2における研究の進め方

【供試体】

① 熱硬化CFRP積層材 (A) 熱可塑CFRTP

連続繊維「アラガ」オートクレーブ成形 MARRFORGED The Mark Two High-strength 3D Printer

【CT撮像(未損傷材)】

マクロCT撮像(供試体全体) ミクロCT撮像(積層材)

【衝撃試験・破壊靱性試験】

② 衝撃衝撃試験・CT撮像 (B) 各種強度試験・CT撮像

【CT撮像(損傷材)・イメージベースFEM解析】

③ 衝撃損傷FEM解析 (C) ミカスケール解析

【損傷同定・構造ヘルスマonitoring・スマート構造化の基礎検討】

④ 衝撃損傷同定試験の一例 ⑤ 圧電フィルムによるセンサ・準アクティブ制御 ⑥ 損傷許容設計手法の提案


(D) 光ファイバーセンシング: 新技術の開発-長瀬教授

(E) 損傷同定・構造HMなど: 新技術の開発-秋田准教授

高分子基複合材料

背景 - 繊維強化プラスチック(FRP)

多様化・高度化するCFRP成形加工技術
高強度化・軽量化, 革新的成形加工技術
⇒ CFRPの大衆化, 低コスト大量生産



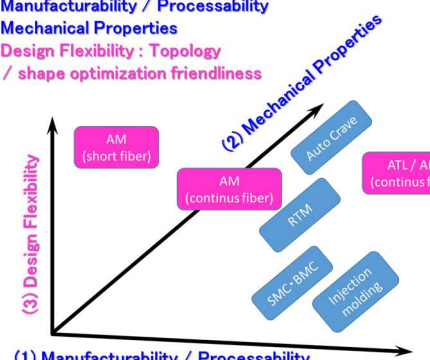
優 - 成形性(サイクルタイム, 複雑形状, コスト)

出典: 平成21年度 中小企業支援調査 - 炭素繊維複合材料の加工技術に関する実態調査 - 調査報告書(株式会社三菱化学テクノロジー)

Background

The 3 Important Axes on Fiber Reinforced Composite Manufacturing

- (1) Manufacturability / Processability
- (2) Mechanical Properties
- (3) Design Flexibility: Topology / shape optimization friendliness




(1) Manufacturability / Processability

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高強度マルチスケール複合材料体系の構築
テーマ2: 高分子基複合材料のマニファスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマonitoringへの応用
「連続CF/PA6熱可塑複合材の3Dプリンタ成形と機械的特性評価」(○鈴木)

本日の報告内容

- MarkTwo3DプリンタとCF/PA6I6T複合体フィラメントについて
- 3Dプリンタ成形体の機械的特性評価試験結果
- 今後実施予定の試験項目について
- 構造ヘルスマonitoringとの連携にむけて

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室




エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高強度マルチスケール複合材料体系の構築
テーマ2: 高分子基複合材料のマニファスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマonitoringへの応用
「連続CF/PA6熱可塑複合材の3Dプリンタ成形と機械的特性評価」(○鈴木)

本日の報告内容

- MarkTwo3DプリンタとCF/PA6I6T複合体フィラメントについて

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室



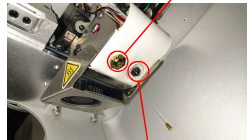
成形装置および成形条件

6



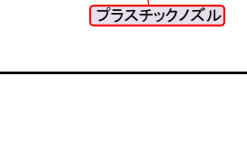
連続CFRP FDM付加製造装置
Mark Two(Markforged社)

成形条件
プラスチックノズル
ナイロン(100%)
ノズル温度: 275°C



ファイバーノズル

ファイバーノズル
CF/PA6IPA6T複合体
(Vf = 30%)
ノズル温度: 252°C



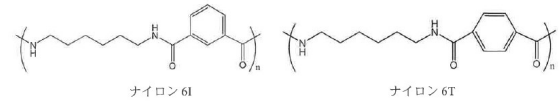
プラスチックノズル

積層ピッチ
0.125mm

CF/ナイロン複合体の成分組成

7

試料名	推定組成	成分比 (wt%)
①CF/ナイロン	炭素繊維	42
	ナイロン 6I	40
	ナイロン 6T	18



CFの母材はアモルファスナイロン(PA6I(70%)-PA6T(30%)共重合体)

樹脂単体の方はナイロン6(PA6(100%))

CF/PA6IPA6T複合体 繊維含有率測定

8

電気炉(畑電機製作所)
燃焼温度 870°C
燃焼時間 10分



燃焼後の試験片

繊維含有率の算出方法

$$w_f = \frac{W - W_1 + W_2}{W} \times 100$$

w_f 繊維含有率(%)
 W 試験片の重量(g)
 W_1 るつぽを含む試験片の質量(g)
 W_2 燃焼後のるつぽを含む試験片の重量(g)

繊維体積含有率の算出方法

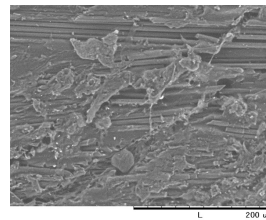
$$V_f = \frac{W_f \times \rho_c}{\rho_f}$$

w_f 繊維含有率(%)
 ρ_c 試験片の密度(g/cm³)

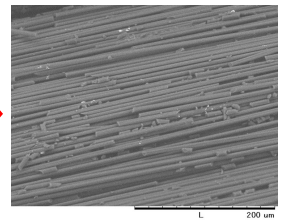
繊維含有率測定結果

9

燃焼前



燃焼後



繊維含有率 $W_f = 42.8\%$
繊維体積含有率 $V_f = 29.7\%$

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高強度マルチスケール複合材料体系の構築
テーマ2: 高分子基複合材料のマルチスケール損傷評価手法の開発とその高度ヘルスマテリアクへの応用
[繊維CF/PAG熱可塑性材料の3Dプリンタ成形と機械的特性評価] (〇絵本)

10

本日の報告内容

3Dプリンタ成形体の機械的特性評価試験結果

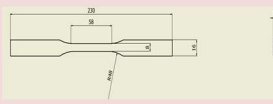


私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館0階会議室

①引張試験片・②アイゾット衝撃試験片

11

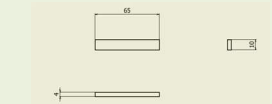
引張試験片
JIS K 7164を改良



寸法

	JIS K 7164	改良型
長さ	140[mm]	230[mm]
中央部の長さ	48[mm]	58[mm]
幅	16[mm]	16[mm]
中央部の幅	8[mm]	8[mm]
高さ	3[mm]	3[mm]

アイゾット衝撃試験片
JIS K 7062



寸法

	JIS K 7062
長さ	65[mm]
幅	10[mm]
高さ	4[mm]

12 試験片の成形

ナイロン CFRP

研磨

引張試験片 衝撃試験片

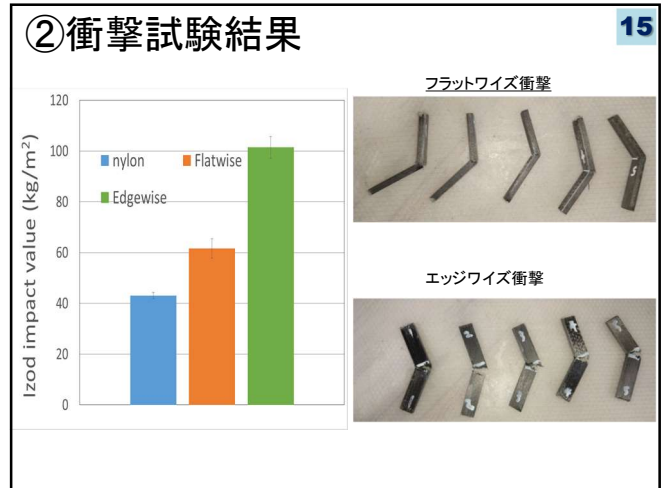
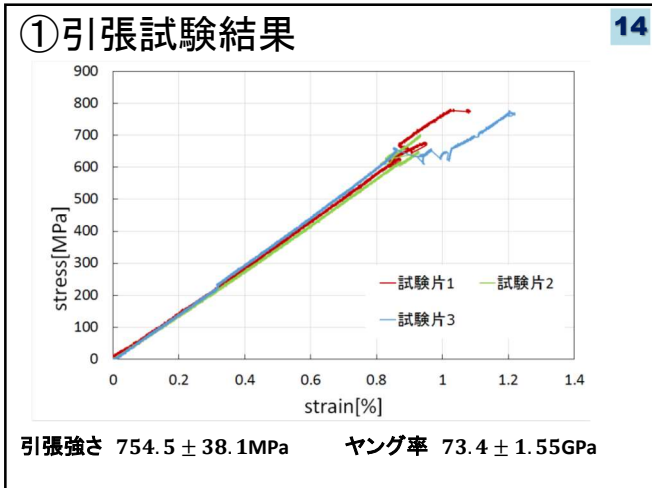
13 衝撃試験の試験条件

ハンマの持ち上げ角度 α 150°
 ハンマの空振り角度 α' 149.1°
 秤量 60kgf・cm
 ハンマ

固定治具 固定治具

フラットワイズ衝撃 エッジワイズ衝撃

衝撃方向 衝撃方向



16 ③ 静的引張試験片(ナイロン・90°)の成形

特徴

- 異なるヘッドから2種類のフィラメントを射出、成形可能

Markforged社 Mark Two

↓

各試験片ごとに板材を作成

↓

設計図に従い、切削にて切り出し

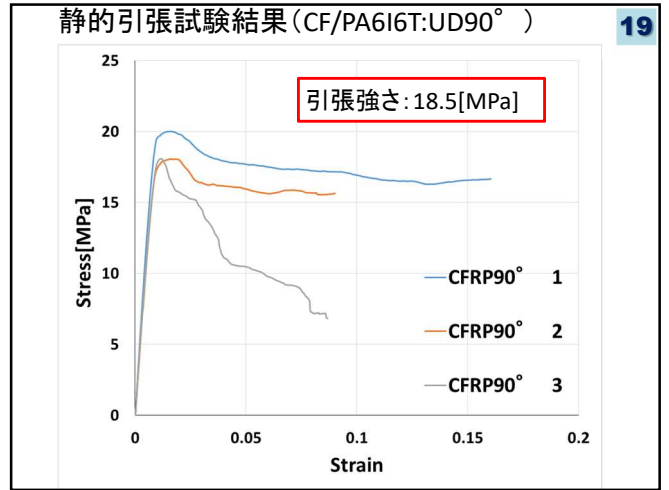
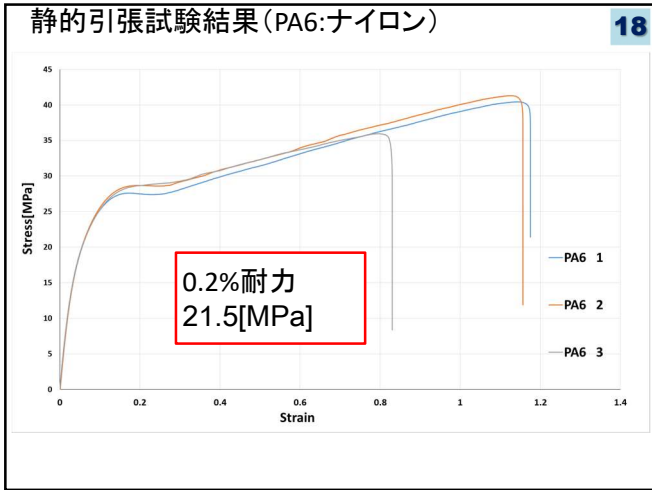
17 試験片(静的引張試験)

ナイロン CFRP0° CFRP90°

ナイロン 16層

ナイロン 4層×2(上下) CFRP 8層

ナイロン 4層×2(上下) CFRP 8層



④ショートビーム・面外せん断強度試験 20

3.5mm
10mm
24mm

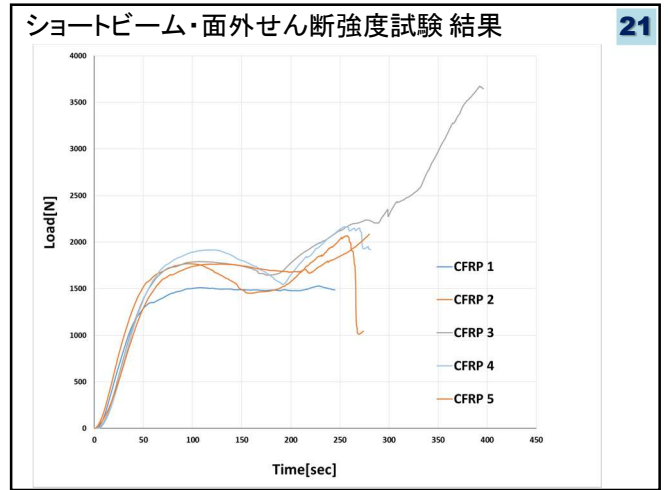
切断 研磨

積層構造

CFRP 16層

ナイロン
4層 × 2(上下)

CFRP層のみ



⑤マイクロドロップレット界面接着強度試験 22

界面せん断強度(MPa)	
84.4	平均値
77.3	82.2
① 76.6	
88.0	標準偏差
84.5	5.0

CF

SEI 2.0kV X8,000 WD 10.0mm 1 μm

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高信頼マルチスケール連携評価体系の構築 23

テーマ2: 高分子基複合材料のマルチスケール連携評価手法の構築とその高速ヘルスマニタリングへの応用
[連続CF/PA6熱可塑性複合材の3Dプリンタ成形と機械的特性評価] (○鈴木)

本日の報告内容

今後実施予定の試験項目について

- ⑥ CF単繊維引張試験 ⇒ 複合則の適用
- ⑦ 層間はく離破壊靱性試験 (DCB/ENF)

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館6階会議室

⑦ 試験片製作

MarkTwoを用い、試験片を製作した。図1のように、全24層の内、上下4層ずつがナイロンの層となっている。また、CFRPの層は幅約1mmのナイロンの層に囲まれている。

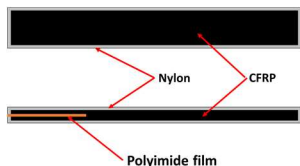


図1.試験片積層構成

<試験片製作過程>

①12層目まで積層しPause機能で一旦停止させる。

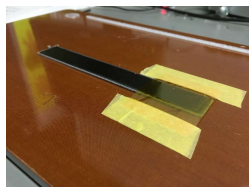


図2.フィルムの固定

②図2のように試験片端から40mmの範囲でポリイミドフィルムを2枚重ねる。固定にはフィルム1枚ごとにマスキングテープを用いた。

③MarkTwoに再度セットし、積層を再開する。図3のように、フィルム上に積層されていく。

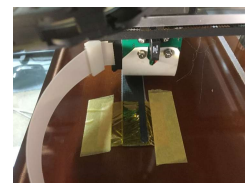


図3.フィルム上に積層されるCFRP



積層映像

④図4のように試験片の積層が完了する。その後、テーブルから試験片を剥がし、余分なフィルムを切り取り完成する。



図4.積層完了後の試験片

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高強度マルチスケール損傷評価体系の構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマシンスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「連続CF/PA6熱可塑性複合材の3Dプリンタ成形と機械的特性評価」(◎鈴木)

26

本日の報告内容

構造ヘルスマニタリングとの連携にむけて

- ⑧ 箔ひずみゲージの埋め込み
- ⑨ PVDF圧電フィルムセンサーの埋め込み

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館0階会議室

エネルギー・航空運搬機種の安全性向上に資する高強度マルチスケール損傷評価体系の構築
 テーマ2：高分子基複合材料のマシンスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマニタリングへの応用
 「連続CF/PA6熱可塑性複合材の3Dプリンタ成形と機械的特性評価」(◎鈴木)

27

まとめ

- 連続CF/PA6熱可塑性複合材の3Dプリンタ成形についてまとめた。
- CF/アモルファスナイロン複合材の機械的特性を評価した。
- 今後の構造ヘルスマニタリングとの連携に関する方向性を示した。

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業・平成29年度研究成果報告会
 平成30年2月27日(火) 13:00~17:10 千葉工業大学・津田沼校舎・5号館0階会議室