

## わたしたちの研究室 (9) 適応材料力学研究室



北條正樹 (S54/1979卒)

## 1. 本研究室の歴史と教員紹介

機械理工学専攻 機械材料力学講座 適応材料力学研究室は、教授・北條正樹、准教授・西川雅章、助教・松田直樹の3名のスタッフと、大学院生6名、学部生2名、事務補佐1名（いずれも令和3年12月現在）で、先進複合材料の疲労と破壊、成形プロセス、非線形超音波特性などについて、特に力学の観点から研究を行っております。北條が令和4年3月に定年を迎えるため、学生数は単調減少ですが、国内外との共同研究は引き続き活発です。店じまいをする研究室の紹介をするのは躊躇したのですが、ご指導いただいた先生方、研究室スタッフ、卒業生への謝意と、定年のご挨拶のつもりで書かせていただきます。

まず、本研究室の系譜とご関係の先生方、私の経歴についてご紹介したいと思います。研究室の本籍は柴田俊忍先生が平成12年まで担当されていた材料力学研究室・連続体力学研究室で、平成13年に北條が教授として着任しました。平成17年に改組により現在の名称である適応材料力学研究室となっております。

私は、一応京都生まれですが、常に洛外（南）に住み、途中茨城県在住期間を除き現在の宇治市の地に小学校4年生から住んでおります。海外のお客様に世界遺産の10円硬貨を使って地元を説明できとても誇りに思っております。昭和54年に本学工学部精密工学科（書類上のみ）卒業、昭和56年に大学院修士課程物理工学専攻を修了、卒業論文研究と修士論文を材料強度学研究室で指導いただきました。当時教員として在籍されていたのは、教授で急逝された平修二先生、助教授の大谷隆一先生、助手の芝山（藤野）宗昭先生、林紘三郎先生、田中啓介先生です。修論の疲労き裂近傍の転分布の写真（図1）が、のちに教科書2冊に掲載されるなど（文献1、2）、素晴らしいテーマと研究指導をいただきました。

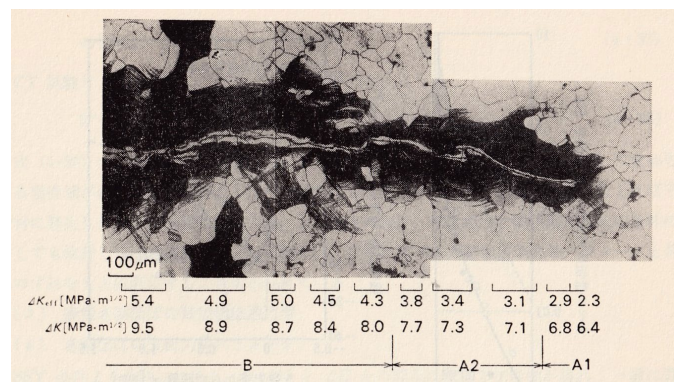


図1. 3%シリコン鉄のき裂近傍のエッチピット写真（文献1）

修士1回生のときに同級生の誘いでふらっと国家公務員試験を受け、修士課程修了後、通商産業省工業技術院製品科学研究所に入所しました。修士2年の時に官庁まわりも試みたのですが、鉄道研究会の延長線上で運輸省を訪問したところ、「今年は鉄道監督局で機械職の採用枠はない」と言われ、学部卒業後工業技術院機械技術研究所に勤務していた同級生の小谷内範穂先生（現近畿大学教授）の勧めもあり、当時の茨城県新治郡桜村（現つくば市）で研究者をスタートしました。ちなみに、同級生で博士課程に進学した箕島弘二先生、吉田篤正先生、国立研に就職した村田裕幸先生、民間から転身した冨田栄二先生と、同級生が6名教授になっています。国家公務員には、中央官庁の高官になった2名を含め5名就職、地方公務員に3名就職しており、公務員の道も是非おすすめしたいと思います。

この昭和56年に、経産省（当時通産省）の複合材料の大規模かつ基盤的な国家プロジェクトがスタートし、研究所の先輩、東大航空宇宙研の流れを汲む先生方、炭素繊維創成期の東レの研究者、YS-11の開発に携わった重工の研究者など、炭素繊維、複合材料および航空機の研究開発の世界の草分けの方々のご指導を得ました。研究所は東京からつくば移転の直後で、設備および予算とも恵まれた環境でした。破壊力学に関しては引き続き大谷先生、田中啓介先生のご指導を受け、昭和62年に半年スウェーデンに滞在したのち、平成2年に京都大学から工学博士の学位をいただきました。

平成4年に機械系と金属系が協力して創設された工学部附属メゾ材料研究セン



(a) N700系(JR西日本) (b) B787、JA811A、ANA (c) A350XWB、JA03XJ、JAL

図2. 整備工場見学時の写真

ターの落合庄治郎先生の研究室の助教授として京都大に着任し、平成13年に連続体力学研究室担任となりました。翌年にメゾ材料研究センターが国際融合創造センターに改組され落合先生が材料系の協力講座に移られたため、実質的にはメゾ材料研究センターの機械系の協力講座を引き継ぐ形になりました。

工技院時代（1981年～1992年）が私の研究者としての第1期、メゾ研の助教授時代（1992年～2001年）が第2期とすると、研究室を担当した最初の10年（2001年～2010年）が第3期になります。この時期は、複合材料に加え、第2期に落合先生にご指導いただいた超伝導材料の力学特性と超伝導特性の関係、助手として着任いただいた田中基嗣先生（現金沢工業大学教授）とのセラミックス基複合材料、助教授として着任いただいた安達泰治先生（現ウィルス・再生医科学研究所教授）、安達先生のプロジェクトの研究員から助教に着任いただいた井上康博先生（現マイクロエンジニアリング専攻教授）との骨、細胞の力学の研究を行いました。後者は、生物の全く新しい概念を機械工学にとりこみ、破壊せず損傷を自己治癒する夢の材料にもつながるテーマです。安達先生、井上先生が再生医科学研究所で独立された後、西川雅章准教授、松田直樹助教との研究が第4期（2011年～2022年）になり現在に至っています（写真参照）。この期はSIP、RIMCOF、ISMAなど、複合材料が国家プロジェクトとして再び光を得ました。振り返ってみますと、結果的に約10年毎に研究に新しい転機を迎えたことになり、優れた研究者から常に刺激を得る恵まれた巡りあわせであったと思います。



## 2. 私と材料の疲労、複合材料

私の研究のモチベーションは、「交通機械の安全性」です。図2は(a)西日本旅客鉄道、(b)全日本空輸、(c)日本航空の整備見学時に撮らせていただいた写真です。材料の疲労は鉄道の普及とともに認識され、英国で機械学会創設の原動力にもなりました。英国が世界先駆けて開発したジェット旅客機コメットの疲労による連続事故は、航空機の構造設計に大きな教訓を与えています。幼少から京都駅が遊園地代わりで、これは現在の鉄道研究会顧問につながっております。昭和41年（小学校3年から4年）には、国内で旅客機の墜落事故が5件発生し、翌年には同級生のお父様（阪大教員）が航空機事故で亡くなり、これらの悲劇が進路を決めるきっかけとなりました。機械工学に進学後は、卒論のテーマは材料の破壊かヒューマ

ンファクターと考えていました。3回生の学生実験と輪講をきっかけに、材料強度学研究室に入りました。当時新幹線が老朽化し、半日運休しての整備が頻繁に行われていました。これは担任の平先生の進言によるものと聞いており、研究室に鉄道技術研究所の方が出入りされていました。

工技院に就職して、仕事は航空機、趣味は鉄道になりました。先進複合材料の代表である炭素繊維強化樹脂基複合材料（CFRP）は、強度・剛性を担う炭素繊維（CF）が通産省工技院大阪工業技術試験所で発明された素材であるとともに、軽量で高強度・高剛性の構造材料であり、航空機構造材料として発展を遂げてきました。同材料は1980年代前半に補助翼での利用が始まり、後半から尾翼の主構造、90年代中頃にはより大型の機体およびエンジンファンブレード、2010年代前半には主翼及び胴体まで利用が拡大し、[図2\(b\)](#)のB787および(c)のA350では、ほぼすべての主要構造がCFRPとなりました。CFRPの構造材料としての発展と利用の拡大および高性能化に私の研究者としての人生が同期するという幸運に恵まれました。

2010年代後半になり、[図3](#)に示すように、わが国で鉄道台車フレームにCFRPが用いられ、空港だけでなく駅で写真を撮るのも教材研究となりました。JRの方との仕事上の交流も増え、仕事も趣味も鉄道の世界に片足を突っ込んでおります。

なお、構造を複合材料にするメリットは、単純に軽くなるからと誤解されがちですが、航空機構造の場合は①疲労、腐食に強くメンテナンスコストが下げられる、②主翼を高アスペクト比にすることができ抗力が低下する、という利点に、③軽量化が合わさっています。鉄道台車では、保線状態が悪い線路でも脱線しにくいことが特徴です。これらのように、単純に従来の金属材料が複合材料に置き換えられるのではなく、構造や設計の考え方も変わります。



図3. JR四国7200系に用いられている台車（efWING, 川崎重工製）

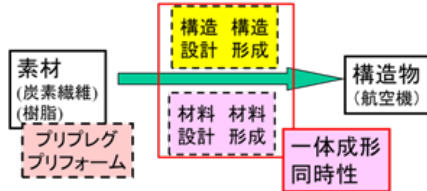
従来材料と複合材料の概念の違い

従来材料: 材料, 素形材を選択し形状を設計する



炭素繊維  
プリプレグ  
といった単独の  
技術のみでは  
材料の完成では  
ない

複合材料: 材料物性と形状を設計する



中間過程が重要  
垂直連携  
中間素材と成形により  
物性が異なる

作ってみたいと  
わからない

複合材料=階層構造を持つ材料

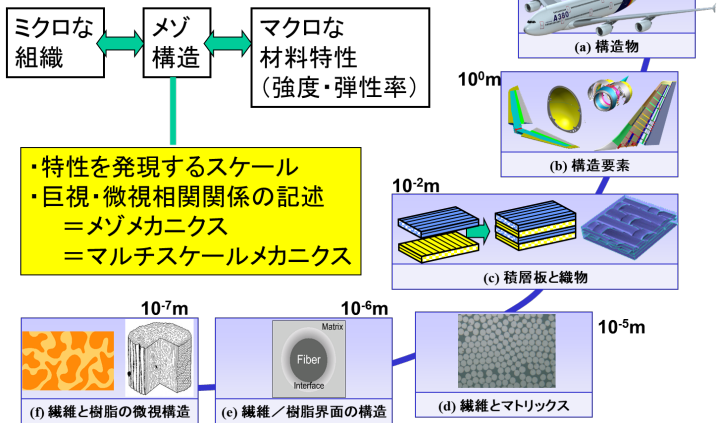


図4. 複合材料の概念と従来材料との違い 図5. 複合材料の階層構造とメゾ構造の概念

### 3. 複合材料とは：材料と構造の合体

複合材料においては、図4に概念的に示すように、成形過程で材料形成と構造形成が同時に進行し（一体成形）、素材（炭素繊維、樹脂）から直接最終的な構造物が形成されます（文献3）。通常の方法のように、ユーザーが品質保証された材料を入手し構造物を作製するのではなく、ユーザーが材料と構造物を同時に作製します。当然、成形条件により材料微視構造が変化し、破壊力学特性を含む各種物性値が影響を受けます。すなわち、同じ繊維と樹脂を用いても、複合材料の力学特性の同一性は保証されないことに注意が必要です。

複合材料は素材（メゾスケール構造）と形状（マクロな構造）とを同時に力学的に設計できる特徴があります。すなわち、「錬金術」のように、材料の各種物性を設計することが可能な夢の材料です。一方、物性は俯瞰的には内部に異材界面を無数に含む複雑系の材料で、かつ、異方性など尖った特性を持つ材料です。そのため、基本的な設計や長期信頼性保証の考え方も、従来材料と異なってきます。

複合材料の力学特性をはじめとする物性値を把握するときに、図5に示す階層構造の立場から俯瞰することが重要です（文献3）。構造用複合材料は、主に(c)のように、繊維を一方向に引き揃えた薄層を積層した内部構造を有します。これを積層材と呼びます。積層材の弾性率は概ね(c)の階層で決まりますが、強度に関しては(e)の階層の繊維／樹脂界面特性が影響を与えます。すなわち、目的とする物



図6. B787、羽田空港にて



図7. A350XWB、伊丹空港にて

性値に依り、それを司る階層が異なります。この中間的な階層をメゾ構造と概念的に定義しています。逆に、メゾ構造をうまく材料設計できれば、さらに優れた材料を生み出せる可能性があります。

#### 4. 航空機用高靱化複合材の破壊力学特性発現機構のメゾメカニクス

今年の2月12日、NH9648便のB787-9 (JA891A) が、ブリュッセルから最初のPfizer社ワクチンを積み、美しく主翼を撓ませ成田空港に着陸するニュース映像を、多くの方がご覧になったのではないかと思います。図6のようにB787は飛行中に主翼が大きく撓み、飛んでいる姿を遠くから容易に見分けることができます。最新鋭旅客機 (B787、A350XWB、図6、7) では、積層材の層間樹脂層に十 $\mu\text{m}$ オーダーの熱可塑性粒子を分散させる等の技術を用い、層間じん性を向上させた材料が用いられています。この技術は東レにより発明されたもので、1990年代半ばにB777の尾翼に採用されるにあたり、北條が疲労き裂伝ば挙動の基礎的評価を担当 (文献4) させていただくとともに、その発展形がB787、B777Xに用いられています。B787は今年11月によりやく定期路線就航10年を迎えました。また、当研究室の博士課程修了生 (文献5、6) がA350XWBの開発を担当し、初飛行後の機体を背にした写真をToulouseから送ってくれました。

積層材では、繊維で強化されていない繊維直角方向および板厚方向の強度は、繊維／樹脂界面破壊に支配され繊維方向強度の1/30と極端に弱くなります。また、繊維方向の圧縮強度は、微視的な繊維の座屈に支配され引張強度の半分程度です。未解明な点も多く残っていますが、設計がしっかりしており航空機は安全に飛んでおります。

実際には、異方性を和らげるために繊維方向を変えた積層材とすることが一般的で、この破壊は上記の低強度の微視破壊モードを起点として複雑な過程をたど

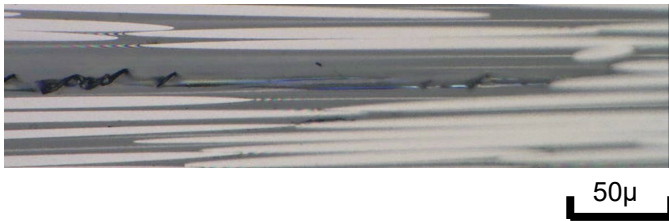


図8. CFRPのモードII疲労における  
き裂先端での損傷のその場観察（文献8）

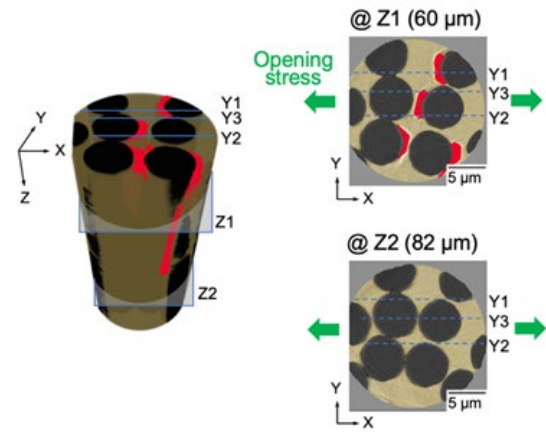


図9. 放射光X線CTでのモードI  
き裂先端の損傷のその場観察（文献10）

るため、物理的にまだ解明されていない現象が多く残っています。これらを実験や解析のみで解決するのは不可能で、繊維・樹脂オーダーの破壊現象をその場観察するとともに、有限要素解析などの手法を用いて各階層でモデル化する研究が取り組まれています（文献5、7）。近年では、高精度デジタルマイクロスコープにより大気中でSEMレベルの観察が可能になるとともに（図8、文献8、9）、より微視的な観察も放射光X線CTにより可能になってきました（図9、文献10）。これらは、その重要性はメゾ研設立当初に把握していたものの、30年待つてようやく観察技術が追いつき、その研究が可能になったものです。教訓として、あきらめずに信念をもって我慢して待つことも、研究の大切な要素と感じました。

## 5. 国際標準化：ISO/TC61/SC13議長

先進複合材料は、その複雑な破壊機構に起因して、最も基礎でかつ単純な引張や圧縮の強度・剛性を評価するのも非常に困難です（文献11、12）。「真の物理的値に出来るだけ近い評価をする」、「真の破壊機構を検討する」ために、学術的にも極めて多くの研究課題が残っています（文献13、14）。すなわち、単なる試験法の制定でなく、複雑な力学特性を工学的立場から深く検討し、これを試験法に適切に反映させる取り組みを行っています。炭素繊維は我が国発の材料であり、JISやISOの所轄官庁である経済産業省が力を入れてきた分野でもあります。諸先輩の活動を受けて、平成29年から北條はISO/TC61（Plastics）SC13（Composites and reinforcement fibres）の国際議長を務め、国際的な試験法標準化を指導しています（図10）。



図10. 2019年9月のISO/TC61成都大会のSC13Plenaryでの記念写真

## 6. 先進複合材構造の設計・製造と最適成形法に関する基礎科学

図4に示すように、先進複合材料では、構成要素から材料設計と形状設計を同時に行う一体成形が特徴で、逆に製造・成形過程が極めて重要です。製造コスト削減と高性能化を両立するため、オートクレーブ成形、液相成形（RTM成形など）、低温成形、非加熱成形と多様な手法が開発されています。特に、成形サイクル中のコンパクションによる繊維プリフォーム（テキスタイル基材等）の変形や、樹脂含浸不良や樹脂溜り・ボイド等の樹脂流動に伴う欠陥、樹脂硬化時の化学反応に伴う残留変形発生などのミクロな要因は、最終的に製造された材料や構造の強度と深い関係があります。従来経験に頼っていた成形過程にレオロジーや分子動力学を用いて学術的根拠を与えると同時に、成形された材料のマクロメカニクスを同時に明らかにし、成形過程の最適化を行う上での新たな設計指標の構築を検討しています（図11、文献15、16）。

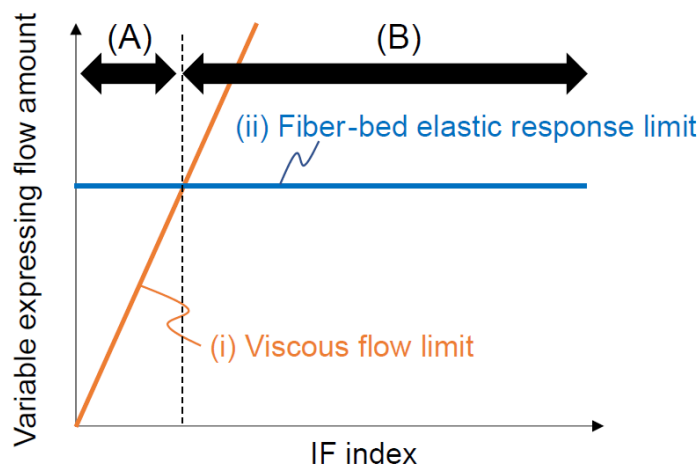


図11. 流動限界が樹脂の粘度に支配される場合と繊維層の弾性に支配される場合のモデル（文献15）



## 7. 複合材料の破壊機構解明や構造健全性評価のための超音波伝搬理論の展開

従来、金属材料などの均質・等方な材料を一次構造部材とした航空機等では、構造健全性を確保するために超音波などによるき裂の非破壊評価が行われてきました。複合材料の複雑な破壊機構に基づいた非破壊評価手法の開発は多くの人命に関わる喫緊の課題です。複合材料中における損傷を超音波により評価することを目的に、弾性波動力学に基づいた見地から検討を行っています。特に実験と解析の両面から、材料の非線形な力学特性や、高調波発生メカニズムの解明に着目した検討を行っています（図12、文献17、18）。

### 非線形動弾性論に基づく非破壊評価

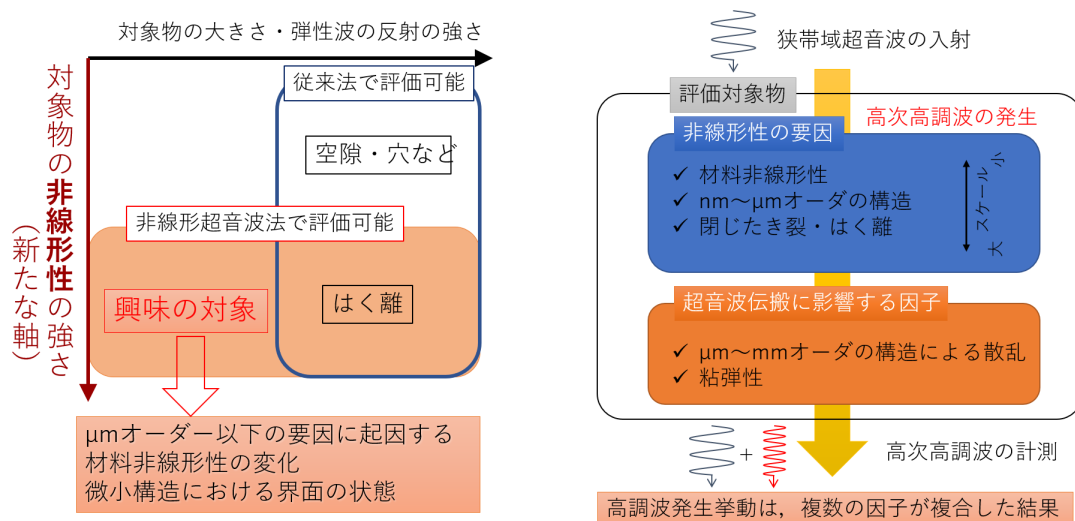


図12. 非線形動弾性論に基づく非破壊評価の課題（文献17、18）

## 8. まとめ

「わたしたちの研究室」を書くはずが、半分以上「私の定年のご挨拶」になってしまったと思います。複合材料が苗木から立派な木に育つ過程に関われ、かつ、「何か失敗したら、また元のアルミに戻る」という不安の時代から、複合材料が航空機構造材料として磐石になり、主な構造がすべて複合材料の旅客機が普通になるのを見届けられたのは、とても幸運でした。その中で、高分子材料の繰り返し荷重下での変形の原理はまだ闇のままです。ノーベル物理学賞と化学賞のメダルのように、ベールを持ち上げようとする若手研究者も育ってきております。

工学部でも「学問の本質は真理の追究」である本学の精神は、是非教員と学生で今後も引き継いでいただきたいと思います。スマホで明日の〇〇時の天気、気

温、風向風力の予報が見られる時代になりましたが、皆様には是非毎日天気図を見る、数値データだけでなく空をよく見る姿勢を大事にさせていただきたいと思います。また、研究者はどうしても無理をしがちですが、常に俯瞰的立場で冷静に判断することも大切です。私自身は、出張の途中の飛行機や新幹線の窓から見る美しい風景や、海外出張でのコンサートが、その機会を与えてくれました。半ば自戒ですが、石橋を叩いていれば渡れないのですが、研究の独創性・独自性、教育における学生の独自性を育てることと、行政組織としての大学内での協調をうまく両立することが、結局研究や教育の独自性とその発展に結実するように思います。



図13. E-JUST（京機短信 No. 324、中村康一氏の記事参照）の帰路の機窓から見たカラコルム山脈。上部中央から少し右の三角形のピークは世界で2番目に高いK2（8611m）

私が研究室に配属されたときに、在籍されていたすべての先生に大変お世話になりました。田中啓介先生には卒論・修論・博士論文をご指導いただき、大谷先生には学生時代は大所高所から、助教授時代にはメゾ研の評議員としてご指導いただきました。林先生には私がバイオメカニクス分野を勉強した第3期にお世話になりました。私にとっての驚きは、卒業後約40年を経て、芝山先生にも大変お世話になったことです。芝山先生のお嬢様がAirbus社 Orchard副社長の奥様で、

2019年Toulouse訪問時に副社長ご一家に夕食をご馳走になるという大変光栄な機会を与えていただきました（図14）。

最後に、私たちの研究に関わっていただきました全ての方々に感謝するとともに今後の発展を祈念して、本稿を閉めたいと思います。ありがとうございました。



図14. Airbus社 Orchard副社長ご夫妻とToulouse Capitole 広場にて (2019)



図15. 研究室旅行での記念写真 (2017年)

## 参考文献

- 1) 田中啓介, “疲労破壊の力学”, “疲労強度学, 4章”, 総合材料強度学講座6, オーム社 (1985).
- 2) 中井善一, 久保司郎, “破壊力学”, 朝倉書店 (2014).
- 3) 北條正樹, “複合材料の現状と動向”, 素形材, 55-9, pp. 2-8 (2014).
- 4) Hojo, M., Matsuda, S., Tanaka, M., Ochiai, S. and Murakami, A., “Mode I Delamination fatigue properties of interlayer-toughened CF/epoxy laminates”, Composite Science and Technology, Vol. 66, No. 5, pp. 665-675 (2006).
- 5) Hobbiebrunken, T., Hojo, M., Adachi, T., Jong, C.D. and Fiedler, B., “Evaluation of interfacial strength in CF/Epoxy using FEM and in-situ experiments”, Composites Part A, Vol. 37, No.12, pp.2248–2256 (2006).
- 6) Hobbiebrunken, T., Fiedler, B., Hojo, M. and Tanaka, M., “Experimental determination of the true epoxy resin strength using micro-scaled specimens”, Composites Part A, Vol.38, pp.814-818 (2007).
- 7) Hojo, M., Mizuno, M., Hobbiebrunken, T., Adachi, T., Tanaka, M., Ha, S.K. “Effect of fiber array irregularities on microscopic interfacial normal stress states of transversely loaded UD-CFRP from viewpoint of failure initiation”, Composites Science and Technology, Vol.69, No.11-12, pp.1726-1734 (2009).
- 8) Adachi, Y., Mamishin, A., Somiya, R., Sato, N., Hojo, M., Matsuda, N., Nishikawa, M., Kanasaki, M., “In situ High-resolution microscopic characterization on mode II fatigue delamination in CFRP laminates, Abstract #265, 11th Asian-Australasian Conference on Composite Materials, Cairns, 29th July – 1st August, 2018.
- 9) Hojo, M., “Why mode I fatigue delamination under different stress ratio is controlled by  $K_{max}$ ? – Damage zone strain observation during loading-unloading and comparison with mode II results”, Keynote lecture, 8th International Conference on Fatigue of Composites, Online, University of Padova, 23rd-25th June, 2021.
- 10) Watanabe, T., Takeichi, Y., Niwa, Y., Hojo, M., Kimura, M. “Nanoscale crack initiation and propagation in carbon fiber/epoxy composites using synchrotron: 3D image data”, Composites Science and Technology, Vol.197, 108244 (2020).

- 11) Hojo, M., Sawada, Y., and Miyairi, H., "Influence of clamping method on tensile properties of unidirectional CFRP in 0° and 90° direction" *Compo-sites*, Vol.25, No.8, pp786-796 (1994).
- 12) 三木三範, 福田武人, 元木信哉, 北條正樹, "複合材料", 4.4節, 共立出版(1997).
- 13) Hojo, M., Kageyama, K., and Tanaka, K., "Pre-standardization study on mode I interlaminar fracture toughness test for CFRP in Japan", *Composites*, Vol. 26, No. 4, pp. 243-255 (1995).
- 14) Matsuda, N., Wakayama, K., Nishikawa, M., Hojo, M., Arai, M., Goto, K., Katoh, H., "Experimental observation and FEM analysis of initial fractures in quasi-isotropic CFRP laminates subjected to compressive loading", *Advanced Composite Materials*, Volume 30, Issue sup2, pp. 50-70 (2021).
- 15) Naito, Y., Nishikawa, M., Mobuchon, C., Poursartip, A., Matsuda, N., Hojo, M., . "Effect of rheological transitions in matrix resin on flow mechanism of carbon fiber/epoxy prepreg", *Composites, Part A*, Vol. 151, 106612 (2021).
- 16) 内藤悠太, 西川雅章, 大矢豊大, 岡部朋永, 松田直樹, 北條正樹, "全原子分子動力学法を活用した熱硬化性樹脂の分子構造と粘度変化との関係の評価", *日本複合材料学会誌*, Vol. 47, No. 3, pp. 97-108 (2021).
- 17) 河原康太, 松田直樹, 北條正樹, 西川雅章, "円柱界面における非線形力学特性を考慮した高調波発生挙動の解析", *日本機械学会論文集*, Vol. 83, No. 849 (2017), 16-00582.
- 18) Matsuda, N., Furuta, Y., Nishikawa, M., Hojo, M., Kusaka, T., Mori, N., "Evaluation of interfacial characteristics of adhesive joints by ultrasonic reflection technique", *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Vol. 38, No. 1 (2019).