

# エネルギー・航空運輸機器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

平成27年度～令和元年度 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業  
研 究 成 果 報 告 書

令和2年 5月

学校法人名 千葉工業大学

大学名 千葉工業大学

研究代表者 緒方 隆志

(千葉工業大学 工学部機械工学科)

# 目 次

1. はじめに
2. プロジェクト全体の研究成果概要
3. 研究テーマ1における研究成果
  - 3-1 耐熱金属材料のクリープ、クリープ疲労条件下の微視的損傷評価法の開発（緒方隆志）
    - 3-1-1. CrMoV 鍛鋼環状切欠き試験片のボイド成長シミュレーションによるクリープ損傷評価
    - 3-1-2. CrMoV 鍛鋼のボイド成長に及ぼす繰返し負荷の影響
    - 3-1-3. SUS304 鋼のボイド発生・成長に及ぼす多軸応力の影響
    - 3-1-4. Ni 基合金 HR6W のクリープおよびクリープ疲労条件下の EBSD 方位測定
  - 3-2 耐熱金属材料のクリープ、クリープ疲労条件下の高精度寿命評価法の開発（緒方隆志）
    - 3-2-1. 多軸応力勾配を有するクリープ条件下の破断時間予測法の提案
    - 3-2-2. 多軸応力勾配を有するクリープ疲労条件下の寿命予測法の提案
    - 3-2-3. 直径 1mm 丸棒ミニチュア試験片を用いたクリープ損傷評価
  - 3-3 耐熱金属材料溶接部のクリープ損傷評価法の開発（緒方隆志）
    - 3-3-1. 改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ損傷評価法の提案
    - 3-3-2. 長期使用改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ強度評価
    - 3-3-3. 改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ強度に及ぼす試験片形状の影響
    - 3-3-4. 2.25Cr1Mo 鋼溶接継手のクリープ強度に及ぼす長期使用の影響
  - 3-4 金属クリープ変形挙動の解明に向けた原子スケール解析（原祥太郎）
    - 3-4-1. 金属／酸化物界面近傍における原子空孔挙動評価
    - 3-4-2. 金属粒界／三重点近傍における原子空孔挙動評価
    - 3-4-3. 長時間型分子動力学法による粒界拡散係数／転位発生頻度解析
    - 3-4-4. 長時間型分子動力学法によるボイド成長解析
    - 3-4-5. 転位がボイド成長に与える影響
  - 3-5 電子顕微鏡その場観察のための計測要素技術の開発（菅洋志）
    - 3-5-1. 高温引張試験に適した電子光学系の構築
    - 3-5-2. SEM 用熱電子除去フィルタの設計および評価
    - 3-5-3. 熱電子除去フィルタを用いた高温試料の観察
    - 3-5-4. TEM in-situ 計測のための試料加工法
  - 3-6 耐熱金属材料における疲労強度と加工面性状との関係（瀧野日出雄）
    - 3-6-1. CrMoV 鋼の切削加工特性
    - 3-6-2. SUS304 の疲労強度と加工面性状との関係
    - 3-6-3. CrMoV 鋼の疲労強度と加工面性状との関係

### 3-7 回転式攪拌装置の流体力学的荷重と疲労強度評価（仁志和彦）

3-7-1. 回転式攪拌装置の定常トルクとその動的挙動

3-7-2. 回転式攪拌装置における起動トルクとその発生メカニズム

3-7-3. 回転式攪拌装置におけるラジアル荷重とその動的挙動

3-7-4. 回転式攪拌装置の流体力学的荷重に基づく疲労強度評価

## 4. 研究テーマ2における研究成果

### 4-1 炭素繊維強化プラスチックの損傷評価ーその1（鈴木浩治・斉藤博嗣・金原勲）

4-1-1. CFRP クロスプライ積層材の層内樹脂割れ損傷の発生・進展観察

4-1-2. CFRP クロスプライ積層材の層内樹脂割れ損傷の評価とモニタリングの試み

4-1-3. CFRP 積層材の低速衝撃損傷の評価とモニタリング

4-1-4. 柔軟層挿入 CFRTPS 積層材の低速衝撃損傷の評価とモニタリング

4-1-5. 3D プリント成形 CFRTP の層間破壊靱性評価

4-1-6. 3D プリント成形 CFRTP の低速衝撃損傷観察と CAI 評価

### 4-2 炭素繊維複合材料の光ヘルスマニタリング方法の開発（長瀬亮）

4-2-1. 光ヘルスマニタリング方法の構成

4-2-2. 分岐光ファイバにおける損失変動検出方法

4-2-3. 光ひずみゲージによるひずみ測定

4-2-4. BOF センサによる AE 波検出

4-2-5. まとめ

### 4-3 画像計測を用いたデータ同化によるシステム同定技術の構築（秋田剛）

4-3-1. 拡張カルマンフィルタを用いた損傷部材の逐次データ同化

4-3-2. アンサンブルカルマンフィルタを用いた損傷部材の逐次データ同化

### 4-4 炭素繊維強化プラスチックの損傷評価ーその2（斉藤博嗣・金原勲）

4-4-1. CFRP 積層板の  $0^\circ / 45^\circ$  層間におけるモード I 静的層間破壊じん性の評価

4-4-2. CFRP 積層板の  $0^\circ / 45^\circ$  層間におけるモード II 静的層間破壊じん性の評価

4-4-3. 繊維断面を基準とするデジタル画像相関法による CF/EP 直交積層板のメゾスケールき裂進展挙動の実験的評価

## 5. 研究成果の外部公表

## 6. 研究評価

## 7. おわりに

## 1. はじめに

我が国のエネルギー、航空宇宙・運輸関連産業等では設備機器の長期使用による経年化が進行しており、維持管理における安全性の確保や有効活用のための寿命延伸が重要な課題とされている。しかしながら、これらの鍵となる現状の損傷や寿命評価法では、機器で進行する損傷を定量的に評価することが困難であるという問題点がある。設備機器の維持管理における安全性を確保し、さらには信頼性ある寿命延伸を実現するためには、より高精度で定量的に損傷の進行や寿命を予測できる評価体系の構築が必要不可欠である。加えて、これまでの非破壊検査に比べより小さな損傷の非破壊検出法の開発や将来技術としての損傷の監視手法の開発が強く望まれる。

本プロジェクトでは、これまでの損傷・寿命評価法の概念を刷新し、マルチスケールでの評価を視野に入れ、精度を格段に向上させる定量的な損傷評価法の構築を目指した研究拠点を形成することを目的とし、多くの設備機器に使用されている金属材料と複合材料の両方を対象とし、以下の2研究テーマを遂行する。

### ●【研究テーマ1】

「耐熱金属材料の損傷劣化機構の解明とマイクロ損傷定量評価法の開発」

### ●【研究テーマ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モニタリングへの応用」

研究テーマ1では、エネルギー設備機器の経年劣化要因を明らかにし、高温作動する機械に広く用いられているフェライト系合金鋼と発電用ボイラやガスタービンに使用されているニッケル基合金を主たる対象とし、独自のアイデアに基づくマイクロな視点からの損傷劣化機構を解明する。さらに、損傷劣化機構に基づく力学モデルの開発、これまでの評価法では困難であった損傷過程の定量的予測手法の開発を行うとともに、マクロな観点からの損傷評価法の改良も進め、マルチスケールの視点から定量的な損傷評価法の開発を目指す。

研究テーマ2では、近年エネルギー、航空宇宙・運輸関連産業において使用が急増している炭素繊維強化プラスチック（CFRP）に象徴される高分子基複合材料を対象に、使用環境を考慮した実験・観察に基づく損傷機構を解明するとともに、マルチスケールな損傷評価に基づく構造ヘルスマモニタリング技術を高度化させていくことで、いわゆるスマートストラクチャ（知的構造体）としての複合材料のさらなる可能性を模索する。

本報告書は、平成27年度から令和元年度にかけて実施された“私立大学戦略的研究基盤形成支援事業”の研究成果をとりまとめたものである。本プロジェクトで得られた研究成果は、産業全般にわたる設備機器の維持管理において高精度な損傷・寿命評価を可能とし、現状に比べ格段の安全性の向上と適切な寿命延伸による設備コストの抑制に寄与するものである。また、マルチスケール損傷評価を視野に入れた定量的損傷評価法の開発は、設備機器の維持管理技術の高度化に向けたさらなる研究の深化、発展に寄与するものと期待される。

## 2. プロジェクト全体の研究成果概要

### 2-1 研究テーマ 1

#### 2-1-2 フェライト系合金鋼のマクロ損傷評価法の開発・改良

##### (1) 多軸応力下のクリープ破断時間予測法の提案

フェライト系合金鋼の代表鋼種である CrMoV 鍛鋼および改良 9Cr-1Mo 鋼を対象に、切欠き先端半径の異なる種々の丸棒環状切欠き試験片を用いて、クリープ試験を実施した。クリープ破断時間は、切欠きのない平滑試験片に比べ長くなる切欠き強化を示すこと、切欠き試験片では弾性応力集中係数が大きい（切欠き先端半径が小さい）ほど破断時間が長くなることが明らかとなった。環状切欠き試験片の 3 次元有限要素弾塑性クリープ解析結果より、弾性応力集中係数が大きいほど、切欠き底表面近傍で最大主応力である軸方向応力が最大となるが、弾性応力集中係数が小さい場合には内部においてそれが大きくなること、負荷応力は軸方向のみの単軸引張負荷であるが、切欠き底最小断面においては周、径方向応力も引張となる、3 軸引張応力状態となることが初めて示された。\*1 これにより、軸方向の変形が拘束されることで平滑試験片に比べ環状切欠き試験片の破断時間が長くなることが示唆された。

これまでに実施されてきたような、応力勾配を有する多軸応力状態となる環状切欠き試験片の切欠き底断面の代表応力（最大主応力、Mises 相当応力など）を用いて、平滑試験片のクリープ破断曲線から予測した環状切欠き試験片のクリープ破断時間は、実際の破断時間より過度に短時間となった。これより、従来の破断時間予測法では、環状切欠き試験片のクリープ破断時間を予測できないことが明らかとなった。試験片の縦断面や破断面の損傷状態と応力状態との関連についての考察に基づいて、切欠き底最小断面における損傷面積比概念を用いてクリープ破断時間を予測する新たな寿命予測法を提案した。同予測法では、切欠き底断面を表面から内部にかけて複数の同心円に分割し、各領域での損傷と面積の積を全領域にわたって加え合わせ、断面積で除すことによって損傷面積比が定義される。これによって、種々の切欠き半径の環状切欠き試験片のクリープ破断時間を高精度に予測することができ、本研究で提案した予測法が、高温機器の応力集中部におけるクリープ条件下のき裂発生寿命の予測に適用できる可能性が示された。

上述した環状切欠き試験片のクリープ試験を中断することによりクリープ損傷を与え、切欠き底表面近傍より世界で最小の直径 1mm の丸棒引張型ミニチュア試験片を採取・加工した。これらのミニチュア試験片を対象に、専用のクリープ試験機を用いて高純度アルゴン雰囲気中でクリープ試験を実施した。その結果、ミニチュア試験片を用いたクリープ試験により、環状切欠き試験片のクリープ損傷を概ね予測できることが明らかとなった。

##### (2) 多軸応力下のクリープ疲労寿命評価法の提案

代表的フェライト系合金鋼である CrMoV 鍛鋼（蒸気タービンロータ材料）を用いて、引張最大ひずみでの保持時間が異なる数種のクリープ疲労試験（1 回ごとに最大ひずみで保持のある疲労試験）を寿命（試験片が破損する）に達するまで実施した。その結果、ひずみの

保持時間が長くなるほど寿命が低下すること、保持時間が短い場合（10分程度まで）は粒内で破壊し、それより保持時間が長くなる場合には粒界で破壊を生じることなどが明らかとなった。現在、高温機器の設計や寿命評価に用いられている代表的な評価法である“時間消費則（応力を基準として寿命を評価）”と“延性消耗則（ひずみを基準として寿命を評価）”を適用して、本研究のクリープ疲労条件下の寿命を予測したが、予測された寿命は実際の寿命の2倍以上あるいは1/2倍以下となる場合があり、これらの既存の評価法では寿命を正確に予測することができないことがわかった。一方、研究代表者らが提案する“非線形累積損傷則（疲労損傷とクリープ損傷の相互作用を考慮した方法）”を適用することにより、実際の寿命を高い精度で予測することができた。**\*4** これより、クリープ疲労損傷を受ける高温機器のき裂発生寿命の予測には、“非線形累積損傷則”が有効に適用できることが確認された。

異なる切欠き先端半径のCrMoV鍛鋼環状切欠き試験片を用いて、保持のない疲労および60分引張りひずみ保持を有するクリープ疲労試験を実施した。環状切欠き試験片のクリープ疲労寿命は、平滑試験片のそれに比べ顕著に低下すること、き裂は切欠き最小断面の表面から発生し、粒界を内部に進展するが、表面からのき裂が長さ1mm程度に成長すると寿命に達することが明らかとなった。環状切欠き試験片の3次元有限要素弾塑性クリープ解析より、保持中のMises相当応力は切欠き底表面で最大となり、内部に向かうにつれて低下することから、き裂の発生・成長と対応していることが示された。従来から行われているように環状切欠き試験片の切欠き底表面での応力やひずみの解析結果に対して、非線形累積損傷則を適用した寿命予測では、実験結果に比べ過度に短寿命を予測する結果となった。一方、新たに提案した損傷面積比概念に対して、損傷則として非線形累積損傷則を適用することによって環状切欠き試験片のクリープ疲労寿命を良好に予測することができた。このように、従来の方法では予測することが困難であった応力勾配を有する多軸応力下のクリープ疲労寿命を本研究で新たに提案した損傷面積比概念に基づいて精度よく予測できることが明らかとなった。

## 2-1-2 フェライト系合金鋼のマイクロ損傷評価法の開発

CrMoV鍛鋼の平滑試験片を用いて、単軸応力下でのクリープ試験を実施し、損傷状態を本プロジェクトで導入したマイクロ組織観察装置により詳細に観察した。クリープ破断までの時間の10%程度の時間で粒界上にクリープ損傷の特徴である球状のボイド（微小空孔）が発生し、時間が経過するにつれてき裂状に遷移して成長を続けることが、観察結果から明らかとなった。この観察結果に基づいてボイド成長機構を考察し、ボイド周りの原子の拡散に加え、結晶粒のクリープ変形と周りの結晶粒からの拘束を受けてボイドが成長する、ボイド成長速度式を導出した。このボイド成長速度式を用いて、粒界上のボイド発生・成長挙動を予測するボイド成長シミュレーション手法を開発した。本シミュレーション手法を用いて、単軸応力下のボイド発生・成長挙動を定量的に予測できることが検証された。

CrMoV 鍛鋼の平滑試験片を用いて、単軸応力下でのクリープ疲労試験を走査型電子顕微鏡内で実施し、クリープ疲労条件下におけるボイドの発生・成長挙動を明らかにした。クリープ疲労条件下の任意の繰返し数で観察されたボイドの最大長さは、クリープ条件を仮定した場合のシミュレーションによる予測結果を大きく上回り、ボイド成長に繰返し負荷の影響が認められた。そこで、クリープ条件下のボイド成長速度に負荷ひずみ範囲に依存する加速項を乗じたボイド成長速度式を新たに定義した。この成長速度式を用いることによって、クリープ疲労条件下のボイドの成長過程を定量的予測できることが検証された。

CrMoV 鍛鋼の平滑クリープ試験片に先端半径が異なる 2 種類(先端半径  $R=0.5\text{mm}$  と  $2.0\text{mm}$ )の環状切欠きを導入し、多軸応力でのクリープ試験を実施した。切欠き部の詳細な観察によって多軸応力状態下のボイドの発生・成長状態を初めて明らかにした。多軸応力状態となる環状切欠き試験片の最小断面(切欠き部)において、 $R=0.5$  では、切欠き表面近傍で、 $R=2.0$  では試験片中央部でそれぞれボイド個数が最も多くなり、単軸応力状態の場合の 10 倍以上のボイド個数密度となることも確認された。環状切欠き試験片の有限要素応力解析結果より、ボイド個数密度が大きくなる部位は切欠き底断面で軸方向応力が最も大きくなる部位と対応していること、さらに周方向、径方向にも引張応力を生じる 3 軸引張応力状態となることが、単軸応力下に比べボイド個数密度が多くなる要因であることが示唆された。上述した単軸応力下に対して有効性が確認できたボイド成長シミュレーション手法を多軸応力となる切欠き試験片のクリープ損傷の予測に適用した。その結果、応力勾配のある多軸応力状態となる  $R=0.5$  および  $2.0\text{mm}$  の切欠き底最小断面でのボイド個数密度分布を、定量的に予測できることが明らかとなった。これにより、ボイド成長シミュレーション手法を適用することにより、これまで困難であった多軸応力クリープ条件下でのボイド発生・成長過程を精度よく予測することが可能となった。また、種々の応力条件下のボイド成長シミュレーションを実施することによって、最大主応力と多軸係数(多軸応力の度合を示す数値)から、同部位でのボイド個数密度を予測できる簡便ボイド個数密度予測式を導出した。同式によって、多軸応力下のボイド個数密度の時間に伴う変化を予測できることを示した。これにより、ボイド成長シミュレーションを実施しなくても、マクロな応力状態から、ボイド個数密度の時間に伴う変化を予測することが可能となった。加えて、オーステナイト系 304 ステンレス鋼の多軸応力下でのボイド発生・成長挙動を明らかにするとともに、軸方向応力とクリープひずみ速度からボイド個数密度を予測する式を導出した。

## 2-1-3 Ni 基超合金のクリープおよびクリープ疲労損傷過程の解明

### (1) クリープ条件下の損傷過程と結晶方位差解析

既存火力発電所に比べ蒸気温度・圧力を高めた先進超々臨界圧火力発電所のボイラ配管用候補材料であるニッケル基合金 HR6W を対象に、異なる度合のクリープ損傷を与えた損傷材を作製した。これらの損傷材の走査型電子顕微鏡(SEM)観察および結晶の方位を調べるための電子線後方散乱回折(EBSD)計測を実施した。その結果、結晶粒界上をボイドが発生・

成長し、ボイドの最大長さや個数が、損傷の進行とともに増大することが明らかとなった。このボイドやき裂の最大長さを、上述したようにフェライト系合金鋼に対して有用性が確認されたボイド成長シミュレーション手法によって定量的に予測することができ、Ni 基合金への適用性が検証された。EBSD で計測された結果より、局所結晶方位差(KAM)および粒内平均方位差(GROD)の平均値は、クリープ損傷の進行とともに大きくなる傾向が得られたことから、結晶方位差を計測することによって、クリープ損傷の進行状況を非破壊的に検出できる可能性が示唆された。また、結晶粒の方位差を考慮した結晶塑性有限要素解析より、結晶方位差の増大がクリープひずみの増大に対応していることが示された。

## (2) クリープ疲労条件下の損傷過程と結晶方位差解析

ニッケル基合金 HR6W を対象に、1 回あたりの引張ひずみ保持時間が 1 時間および 5 時間のクリープ疲労試験を実施し、異なるクリープ疲労損傷を与えた損傷材を作製した。これらの損傷材の SEM 観察および EBSD 計測を実施した。粒界上に発生した擬球状ボイドはき裂状ボイドに遷移して成長を続け、寿命末期には 200 $\mu\text{m}$  程度に達することが観察された。KAM および GROD は、クリープ疲労損傷が大きくなるにともない増大するが、その変化量はクリープ条件下に比べ小さいことがわかった。本試験結果の範囲内では、上述した非線形累積損傷則によってクリープ疲労寿命を予測することができた。

## 2-1-4 改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ損傷評価法の開発

### (1) 新材溶接継手のクリープ損傷過程と破断時間予測

超々臨界圧火力発電所の改良 9Cr-1Mo 鋼製配管の溶接部では、母材部に比べクリープ損傷が優先して進行することが報告されており、同溶接部のクリープ損傷評価法の開発・改良が喫緊の課題とされている。MAG 溶接を施した改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手を対象に溶接部各部位（母材、溶接金属、熱影響部(HAZ)）から直径 1mm 丸棒引張型ミニチュア試験片を採取し、開発された専用のクリープ試験装置を用いて、アルゴン雰囲気中で温度 650 $^{\circ}\text{C}$ でのクリープ試験を実施した。母材のミニチュア試験片のクリープ曲線は、標準試験片と同様に遷移、定常、加速クリープがみられ、同一応力下の標準サイズ試験片とミニチュア試験片がほぼ同等の変形挙動を示し、ミニチュア試験片を用いて適切にクリープ試験が実施されたことが確認された。また、クリープ破断時間にもミニチュア試験片と標準試験片との顕著な差異は認められず、標準サイズ試験片と同等の結果が得られた。同一応力条件下では、母材および溶接金属から切出したミニチュア試験片は、同様なクリープ変形を示したが、HAZ から採取したミニチュア試験片は、これらより速くクリープ変形が進行した。ミニチュア試験片を用いたクリープ試験結果から得られた応力と最小クリープひずみ速度の関係は、母材と溶接金属は同等であったが、HAZ はこれらに比べ同一応力での最小クリープひずみ速度が 10 倍程度速くなることが明らかとなった。これらの結果より、溶接継手試験片の有限要素クリープ解析に用いる応力とクリープひずみ速度の関係を示す各部位の材料定数を導出した。

次に、上記溶接継手より、HAZ が試験片平行部の中央に位置し、両側に母材と溶接金属を含む直径 10mm の標準溶接継手試験片および直径 1mm のミニチュア溶接継手をそれぞれ採取した。これらを用いたクリープ試験結果より、同一応力においてミニチュア溶接継手試験片が標準溶接継手試験片に比べて短時間で破断することが明らかとなった。このことは、ミニチュア溶接継手試験片を用いたクリープ試験によって、実機配管溶接部のクリープ損傷評価に用いられる標準溶接継手試験片の破断時間を直接的に予測できないことを意味している。両溶接継手試験片でクリープ破断時間の差異を生じた要因を明らかにするため、有限要素クリープ解析を実施した。その結果、標準溶接継手試験片では、破壊の起点となる HAZ において 3 方向（軸、半径、周方向）から引張応力が作用するが、ミニチュア溶接継手試験片では軸方向応力のみが発生することが明らかとなった。これより、標準溶接継手試験片では軸方向のクリープ変形が抑制されるのに対し、ミニチュア溶接継手試験片では、軸方向クリープ変形が容易に進行することにより、短時間で破断するものと解釈された。

標準溶接継手試験片を用いて任意のクリープ試験時間で試験を中断することにより、損傷度の異なるクリープ損傷材を作製した。これらの損傷材を走査型電子顕微鏡で観察した結果、母材と溶接金属ではクリープポイドは観察されなかったが、HAZ では損傷初期にクリープポイドが発生し、損傷が進行するにつれてポイド個数密度が増加することが確認された。このように溶接継手がクリープ損傷を受けると HAZ でポイドが発生・成長することにより同部位で破断を生じることが示唆された。上述したポイド成長シミュレーション手法を HAZ でのポイド発生・成長の予測に適用した。その結果、HAZ におけるポイド個数密度の損傷に伴う変化を定量的に予測することができ、ポイド成長シミュレーション手法を用いて、改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ損傷の進行を定量的に予測できることが明らかとなった。

## (2) 溶接部のクリープ強度に及ぼす長期使用の影響

長期間使用された溶接部のクリープ損傷評価を精度よく行うため、火力発電所において約 8 万時間使用されたボイラ管台溶接部を対象に溶接部のクリープ強度に及ぼす長期使用の影響を調べた。微視組織観察からは、対象溶接継手各部位の使用中に受けたクリープ損傷は軽微であることが示された。溶接部各部位より直径 1mm のミニチュア試験片を採取して、アルゴン雰囲気中でクリープ試験を実施した。その結果、母材および HAZ から採取した試験片は、新材の応力と最小クリープひずみ速度の関係と同等であり、長期使用による劣化は認められなかったが、溶接金属では同一応力の最小クリープひずみ速度が 10 倍以上速く、長期使用により顕著にクリープ変形抵抗が低下することが明らかになった。これは、溶接金属においてクリープ強度の向上に寄与していた微細炭化物や高密度の転位組織が、高温での長期使用中に炭化物の粗大化および転位密度の低下を生じたことによるものと推察された。これらの試験結果より、長期使用溶接部の母材、HAZ、溶接金属の応力と最小クリープひずみ速度の関係を定式化した。

対象溶接部から採取した標準溶接継手試験片およびミニチュア溶接継手試験片を用いた

クリープ試験結果より、最も高応力(90MPa)の標準溶接継手が溶接金属で破断したことを除き、すべての溶接継手試験片はHAZで破断し、新材同様にミニチュア溶接継手試験片は標準溶接継手試験片に比べ短時間で破断した。長期使用による溶接金属のクリープ特性の変化を考慮した溶接継手試験片の有限要素クリープ解析を実施した結果、ミニチュア溶接継手試験片はHAZのクリープひずみが限界値に達して破断し、標準試験片では低応力側ではHAZでクリープひずみが限界値に達するが、高応力側では溶接金属の変形が優先し、同部位でクリープひずみが限界値に達して破断したものと推察された。さらに、長期使用2.25Cr鋼溶接継手各部位からミニチュア試験片を採取してクリープ試験を実施した結果、母材および細粒HAZのクリープ特性は新材と同様であったが、溶接金属ならびに粗粒HAZでは顕著なクリープ特性の低下を示すことが明らかとなった。

### (3) ミニチュア溶接継手試験片を用いたクリープ損傷評価法の提案

上述したように新材および長期使用材において、ミニチュア溶接継手試験片は標準溶接継手試験片に比べ同一応力でのクリープ破断時間が短時間となり、ミニチュア溶接継手試験片を用いたクリープ試験によって実機配管溶接部のクリープ損傷を適切に評価できないことが明らかとなった。そこで、実機配管溶接部から採取可能なミニチュア溶接継手試験片を用いたクリープ損傷評価法、即ちミニチュア溶接継手試験片のクリープ試験によって標準溶接継手試験片のクリープ破断時間を予測する方法を検討した。ミニチュア溶接継手試験片の平行部(5mm)の母材(1.5mm)、HAZ(2mm)、溶接金属(1.5mm)の長さ標準試験片でのクリープ特性取得が可能な母材および溶接金属のクリープ特性が既知のときに、1本のミニチュア溶接継手試験片のクリープ試験結果からHAZのクリープ特性を取得する式を導出した。同式より得られたHAZのクリープ特性は、HAZより採取下ミニチュア試験片を用いて得られるクリープ特性とほぼ一致することを確認した。次に、標準溶接継手試験片の有限要素クリープ解析結果から、このHAZのクリープ特性から標準溶接継手内のHAZのクリープひずみ速度を予測する式を導出した。さらに、標準溶接継手のHAZのクリープひずみ速度から破断時間を予測する式を導出した。これらの式を用いて、ミニチュア溶接継手試験片のクリープ試験結果より、HAZのクリープ特性を求め、これを用いて標準溶接継手試験片の破断時間を予測した結果、実際の破断時間と良好に一致することが確認された。\*13 これらのことより、実機配管溶接部から1本のミニチュア溶接継手試験片を採取し、クリープ試験を実施することによって、同部位の標準溶接継手試験片の破断時間が予測できる、即ち実機配管溶接部のクリープ損傷を精度よく予測できる可能性が示された。

## 2-2 研究テーマ2

### 2-2-1 通常 CFRP 積層材の低速衝撃損傷問題

航空機構造材料として欠かせない炭素繊維強化熱硬化樹脂(CFRP)の一方向積層材、クロスプライ積層材および擬似等方積層材の以上 3 種類の積層材およびそれらの中央層間にダンピングシートを挟んだ制振 CFRP 積層材を成形した。そして 3 段階の低速・低エネルギー落錘衝撃を与えた際に発生・進展する多形態損傷をマルチスケールな視点から観察しそのメカニズムを解明することを試みた。特に、損傷の導入前後にマイクロフォーカス X 線 CT 撮像を各供試体に対して取得しておき、それら衝撃導入前後の CT 像から供試体部および衝撃損傷部を抽出して比較するというリバースエンジニアリング的発想を損傷評価に取り入れ、新たな損傷評価法の模索を行い、以下のような成果を得た。

(1) 一方向、クロスプライおよび擬似等方積層の CFRP 積層板および制振/耐衝撃損傷型 CFRP 積層板に低速衝撃損傷を導入し、さらにマイクロフォーカス X 線 CT 撮像を取得した。

(2) 損傷量を定量的に示すことのできる可能性のあるものとして「損傷表面積  $\Delta S$ 」を本研究にて提案し、衝撃吸収エネルギーとの間に正の相関が存在する可能性を示した。

(3) CT 撮像観察結果から直接生成したイメージベース FEM メッシュをもとにした損傷 CFRP 積層材の固有振動モード解析を実施し、モード形状変化(表面のモード最大ひずみ値)がある種の損傷指標となりうる可能性の一端を示した。

さらに、構造ヘルスマニタリングへの応用への展開をにらみ、インパルスハンマ加振実験モーダル解析を本供試体に適用し、衝撃前後での周波数応答関数およびモード形状の差から衝撃損傷の度合いを非破壊検査することも検討した結果、以下のような成果を得た。

(1) SACMA 規格に沿った 32 プライ擬似等方 CFRP 積層板を新規に成形し、低速衝撃損傷を導入した。損傷導入の前後の供試体のマイクロフォーカス X 線 CT 撮像を取得し、それらにリバースエンジニアリング的手法を適用して衝撃損傷の度合いを可視化することに成功した。

(2) SACMA 規格に沿った 32 プライ擬似等方 CFRP 積層板の損傷導入前後でのインパルスハンマ加振実験モーダル解析により計測した周波数応答関数を重ねて表示した。衝撃損傷を有すると主に曲げ剛性の低下および内部摩擦の増加により、周波数応答関数におけるピーク(固有振動数)は低周波数側にシフトするとともに、山のピークがなだらかになることがわかった。また、その変化の程度は高周波側になればなるほど著しくなることがわかった。これらの変化を調べることにより、CFRP 積層複合材料の低速衝撃損傷やその他の損傷を非破壊で検出できる可能性が示された。

### 2-2-2 通常 CFRP 積層材の個別損傷問題

個々の破壊モードを検討する目的で、直交対称 CFRP 積層材短冊試験片を準備し、トランスバースクラック(母材樹脂部中の強化繊維に沿った貫通亀裂)破壊靱性値を実験的に取得した。さらに、モード I DCB 試験およびモード II ENF 試験の層間破壊靱性値を実験的に取得した。直交対称 CFRP 積層材の引張試験では、トランスバースクラックに起因するアコースティックエミッション(AE)データも取得した。

(1) 静的引張試験について、90°層応力-ひずみ線図中にニーポイントと呼ばれる応力がわずかに急落する点を確認することができた。これは、最初のニーポイントの発生点と AE

カウンターの検出開始点がほぼ等しいことから、層内樹脂割れ損傷や繊維破断の発生によるものだと考えられる。

(2) 与損傷試験については、各積層構成の試験片における 90° 層応力と層内樹脂割れ密度(き裂密度)の関係を示した。90° 層の応力に対して低いき裂密度ではき裂密度の増加率が大きく、高いき裂密度になるほど増加率が下がることがわかった。これは、損傷の発生開始直後は損傷の発生による積層材の応力伝達に変化が生じ、連鎖的に層内樹脂割れ損傷が発生するのに対し、き裂密度が高くなるにつれてそれが飽和状態に収束するからだと考えられる。

(3) 有限要素法 (FEM) 解析によるき裂進展法により 90° 層のひずみエネルギー解放率を求めた。各積層構成ともばらつきはあるものの、層内樹脂割れに関する破壊靱性値に相当するものを得た。その結果、90° 層の割合が多い積層構成に見られる傾向として、層内樹脂割れ密度の増加とともに増加傾向にあったひずみエネルギー解放率が、ある点から減少傾向になることがわかった。各積層構成においてひずみエネルギー解放率の平均値を求めると、0° 層の割合が少なく、90° 層の割合が多いものほど平均値が高い結果となった。

### 2-2-3 熱可塑 CFRTP 積層材の機械的特性評価・低速衝撃損傷問題・個別損傷問題

FDM 型 3D プリンタ (Markforged 社 Mark Two) による連続炭素繊維強化アモルファスナイロン (連続 CF/PA6I-PA6T) 熱可塑複合材の研究を実施した。具体的には 3D プリンタ (Mark Two) により連続 CF/PA6I-PA6T 複合材を成形し、その機械的特性、低速衝撃損傷特性および個別損傷としてモード I 層間はく離破壊靱性を評価した。積層構成は一方方向積層 (UD) 材とした。また、DCB モード I 層間破壊靱性試験片の 3D プリンタ直接成形の試みから、3D プリンタを用いたシート状センサ (箔ひずみゲージや PVDF 圧電フィルムセンサ) の直接埋め込みとそれによる構造ヘルスマニタリングに関する基礎検討までを実施した。

(1) 一方向 0° 積層材に対する応力-ひずみ線図は、ほぼ直線的で、最終破断部付近で試験片肩部付近でのスプリッティング破壊による影響で乱れが生じ、その後極限応力 (引張強さ) に達したところで脆性破断することがわかった。3 本の試験片の引張強さの平均値が 755MPa、標準偏差が 38.1MPa、引張弾性率の平均値が 73.4GPa、標準偏差が 1.55GPa となった。オートクレーブ成形など既存の CFRP 積層複合材料と比べて機械的特性で劣ると思われていた FDM 型 3D プリンタ成形であったが、本結果からは構造材料として十分な剛性・強度が得られることがわかった。

(2) 3D プリンタ成形一方向強化 CF/PA6I-PA6T 熱可塑複合材のとナイロン単体の比較のためアイゾット衝撃試験を、フラットワイズ (積層面に垂直な衝撃) とエッジワイズ (積層面に平行な衝撃) の 2 ケースを実施した。その結果、ナイロン単体に比べて、本熱可塑複合材の衝撃値はフラットワイズで 30%、エッジワイズでは 120% 程度の増加を示した。これは繊維強化複合材の場合には衝撃破断の際に繊維の樹脂母材からの引き抜けや繊維破断によるエネルギー消費が生じるためである。また、エッジワイズの方がフラットワイズに比べて衝撃値が大きくなったのは、フラットワイズの場合には、靱性の低い積層層間のはく離が生じるのに対し、エッジワイズの場合には、そのような層間はく離がほとんど生じないことがその大きな理由であり、破断後の試験片の SEM 観察からも確認することができた。

(3) 本熱可塑複合材供試体の強化繊維 (CF) と母材樹脂 (PA6I-PA6T) との間の界面せん断

強度 (interfacial shear strength, ISS) をマイクロドロプレット試験により求めた。本試料に対する ISS の平均値は 82.2MPa, 標準偏差が 5.0MPa となり, 界面接合強度としては十分な高さであることがわかった。

(4) 熱溶解積層造形 FDM 型の付加製造装置, いわゆる 3D プリンタにより成形された繊維体積含有率 30%の連続炭素繊維強化アモルファスナイロン積層複合材の DCB 試験によるモード I 層間破壊靱性評価を実施した。また, き裂先端近傍における本 CFRTP 積層複合材の層間き裂状損傷の静的進展挙動を X 線 CT 撮像および SEM により観察し, 本 CFRTP 積層材の層間靱性発現機構について考察した。その結果, DCB 試験結果より, き裂進展過程におけるモード I 層間破壊靱性値  $GIR=2.07[kJ/m^2]$ を得た。また試験片毎のばらつきがみられた。一方き裂先端部付近の X 線 CT 撮像観察より, 試験片中には多数のボイドが成形時に生じていることが分かった。また主き裂面上のはく離き裂に加え, 隣接する他層間においても副次的なはく離き裂が誘起されつつ層間のはく離が進展していくことが分かった。さらにき裂面上の SEM 観察結果より, 繊維破断や繊維と樹脂のはく離が観察された。また樹脂がフィブリル状に引き伸ばされた破面が観察され, 延性的な破壊が発生し, 結果として高い層間破壊靱性を示したということが分かった。

(5) FDM 型 3D プリンタを使用して成形した連続 CFRTP 疑似等方積層材へ低速面外衝撃損傷を与え, その耐衝撃特性を評価するとともに, X 線 CT および光学顕微鏡によりその損傷状態を詳しく観察した。さらに, 衝撃後圧縮(Compression after impact : CAI)強度試験も実施し, その残留圧縮強度を評価した。その結果, 落錘衝撃試験により得られた衝撃吸収エネルギーは平均 14195J/mm で, それは衝撃吸収率に換算すると平均 80.9%であった。なお, 変動率は 2.34%であった。一方, CAI 強度は 81.3MPa, 健全材圧縮強度は 130MPa となり, CAI 強度は健全材圧縮強度と比較し, 約 37%低くなった。また, 衝撃後圧縮弾性率は 21.8GPa, 健全材圧縮弾性率は 20.4GPa となり, 両者にほぼ有意な差が今回みられなかった。X 線 CT 観察では, 衝撃前供試体に 3D プリンタ成形特有の初期ボイドが確認された。また, 衝撃後の CT および低倍率 DOM 観察結果より, 衝撃負荷面から裏側面に向けて裾野を広げるような層間のはく離の分布に加え, 中立面付近に面外せん断応力により増長された大きな層間のはく離が確認できた。引張の曲げ応力の作用する裏表面付近の off-axis 層内に横断面線から 45° ほどの傾斜でトランスバースクラック損傷を低倍率および高倍率 DOM により確認でき, さらに曲げ荷重を分担していた 90° 層が引張側最外層から順次の繊維破断していった痕跡も確認された。特にトランスバースクラックの形成について, 3D プリンタ特有の初期ボイドおよび樹脂リッチ部塑性変形が繊維/母材デボンディングの伝播機構よりも優先的に生じていることが示唆される観察結果となった。最後に CAI 後では圧痕部を中心としたブルーミング圧壊を確認できた。