

二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年1月20日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]

立命館大学 理工学部・機械工学科

[職・氏名]

教授・伊藤隆基

[課題番号]

JPJSBP 120207406

1. 事業名 相手国: 中国 (振興会対応機関: NSFC) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 多軸応力下における原子力構造材料の熱疲労強度特性

(英文) Thermomechanical fatigue of nuclear power structure materials under multiaxial loading

3. 共同研究実施期間 2020年4月1日～2022年12月31日 (2年9ヶ月)

【延長前】 年 月 日 ～ 年 月 日 (年 月 日)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Tianjin University, Professor, Chen Xu

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		4,275,000 円
内訳	1年度目執行経費	1,425,000 円
	2年度目執行経費	1,425,000 円
	3年度目執行経費	1,425,000 円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	14名
相手国側参加者等	9名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	0	0	0()
2年度目	0	0	0()
3年度目	0	0	0()

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入: 相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

本研究では、機械構造用耐熱鋼の熱機械疲労(TMF)変形・破壊特性を明らかにするため、共通サンプルを用いた多軸負荷下の系統的な実験を実施し、得られた結果を基に多面的な考察を行った。高温構造機器・部材の周期的な応力・ひずみ応答、破壊メカニズムならびに疲労寿命と組織変化や転位などの微細組織変化との関係を明らかにして、多軸負荷下での TMF 損傷評価手法を構築することを最終目標とした。具体的には、多軸負荷での高温疲労、クリープ疲労、熱機械疲労での周期的な応力・ひずみ応答および変形・破壊のメカニズムを、試験実施が極めて困難な高温多軸試験を駆使して明らかにした。さらに、疲労変形・破壊のメカニズムを明らかにした上で、機械構造用耐熱鋼の高温疲労強度評価方法および損傷評価モデルを構築した。

機械構造材料の TMF 変形・破壊挙動に関する研究は、疲労研究分野で構造機器の延命や強度保障の観点から注目されているが、本研究の成果はその課題解決の一助となることが期待できる。また、当該研究分野では、実験技術や費用面でハードルが高いため実験研究を避けて数値解析研究にシフトする傾向にあるが、本研究グループではそれぞれに高度な材料試験技術を有しており、その技術やノウハウは本研究を通して若手研究者に伝承できた。さらに、本研究では大学院生、ポスドク研究者、助教等の若手研究者が多く関わっており、両国の学生ならびに若手研究者・教員の人的・学術的交流を行った。ただし、新型コロナウイルス感染症の状況下において、中国への渡航および同国からの招聘は研究期間全体を通して困難であり、双方の研究グループは定期的に WEB 会議等や電子メールを通して研究交流を行った。

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

316LN ステンレス鋼を用いて、実験技術的に実施が極めて困難とされている等温度および変動温度の熱機械疲労とクリープ疲労試験を実施した。また、熱機械疲労き裂進展についても検討し、下記の結論が得られた。

1. 応力緩和より非弾性ひずみ緩和速度の方がクリープ損傷は大きいことが分かった。
2. 熱機械クリープ疲労の損傷は、等温度クリープ疲労のそれより大きい。それは酸化スケールとマトリクスの界面でのより深刻な酸化アシストき裂が原因であった。
3. 熱機械負荷における疲労およびクリープ疲労寿命、き裂進展速度予測モデルを提示した。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

対面で学術交流は実施できなかったが、WEB 会議等や電子メールを通して、若手研究者間の交流ができた。また、若手研究者の努力により得られた成果であり、学術的・工学的に貴重で有益な 3 件の学術論文の掲載に至った。また、1件の学術論文が投稿・査読中である。

1. Yiming Zheng, Bingbing Li, Jingwei Zhao, Caiming Liu, Takamoto Itoh, Xu Chen. Thermomechanical and isothermal fatigue crack propagation testing method for 316LN austenitic stainless steel. *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* 2022;45:3040-3052.
2. Jingwei Zhao, Bingbing Li, Gang Chen, Takamoto Itoh, Xu Chen. Effects of dwell time on the isothermal and thermomechanical fatigue behavior of 316LN stainless steel. *International Journal of Fatigue.* 2022;162:106989.
3. Bingbing Li, Yiming Zheng, Gang Chen, Takamoto Itoh, Xu Chen. Isothermal and thermomechanical fatigue behavior of 316LN stainless steel: Effects of strain amplitude. *International Journal of Fatigue.* 2023;166:107304.

(投稿・査読中)

1. Le Xu, Lei He, Zhe Zhang, Xu Chen, Takamoto Itoh. Multiaxial constitutive modeling and fatigue life evaluation for circumferential notched specimens of type 430 stainless steel under non-proportional loading conditions at elevated temperature. International Journal of Fatigue. (under review)

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

福島第一原子力発電所事故から得た教訓を胸に刻み、国民の安全と社会環境を守るため、原子力発電の健全性を向上することは必須である。世界に目を向けても、原子力発電の設計と安全評価の検討が急務であり、複雑な稼働状況での構造物の健全性評価は極めて重要な課題である。このような状況の中で、多軸熱機械疲労寿命と破壊メカニズムを明らかにし、原子力発電の健全性の向上を目指すことは、社会的なニーズに応えることでもある。また、それによって得られる研究成果は、原子力構造機器・部材のみならず、火力発電機器(蒸気、ガスタービン)や航空機エンジンなどの部材の強度信頼性の高度化につながり、日本国の産業界(とくに重工業)の要求にも貢献ができる。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

双方機関の助教のプロジェクトマネジメント能力、チームメンバー調整能力、国際コミュニケーション能力を養うことができた。さらに、助教の国際的なネットワークを拡大し、将来の研究のため、より良い基盤を築くことができた。また、博士課程後期の学生は国際コミュニケーション能力が向上した。以上のような国際交流・国際協力により、大学、国立研究所、企業研究機関において、国際的な視野を持つ多くの若手研究者の育成に寄与した。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

本研究により、平滑材を用いた 316LN ステンレス鋼の熱機械クリープ疲労寿命予測手法を提案することができたが、発電設備の部品は不連続部(溶接部・異種接合・エルボーなど)が存在し、この不連続部の材料強度は、試験温度と材料組織の影響が大きいことが予想されるため、それらの因子と強度特性との関係を明らかにする必要がある。また、不連続部では応力状態が複雑な多軸モードとなることから、疲労およびクリープ強度特性に及ぼす多軸負荷の影響を適切に評価し得る材料試験方法および評価法が必要である。それらのニーズを受けて、早急な解決が望まれる課題としては、高温環境下での非比例多軸負荷における切欠き材のクリープ疲労寿命予測手法を確立することが挙げられるが、本研究が完了した後も立命館大学と天津大学との共同研究を継続し、上記の問題の解決案を策定する。

(7)その他(上記(2)～(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

大学間協定を締結した。