

高温耐熱材料の実機使用状態を 模擬した特性評価技術

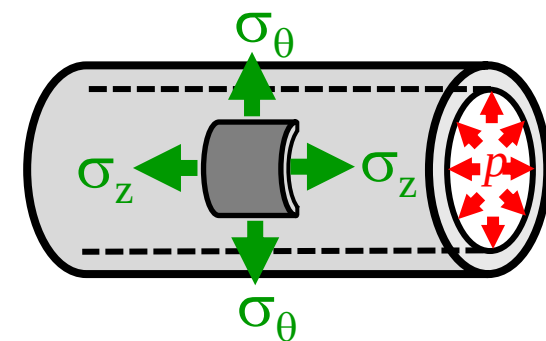
福井大学 学術研究院
工学系部門 機械工学講座
准教授 旭吉 雅健

2021年 9月 7日

従来技術とその問題点

材料（鉄鋼・非鉄、金属・非金属）の基礎特性評価試験では、**単軸**引張がほとんどである。

しかし、内圧を受ける圧力配管等の実機は、複雑な応力状態（=**多軸**）である。

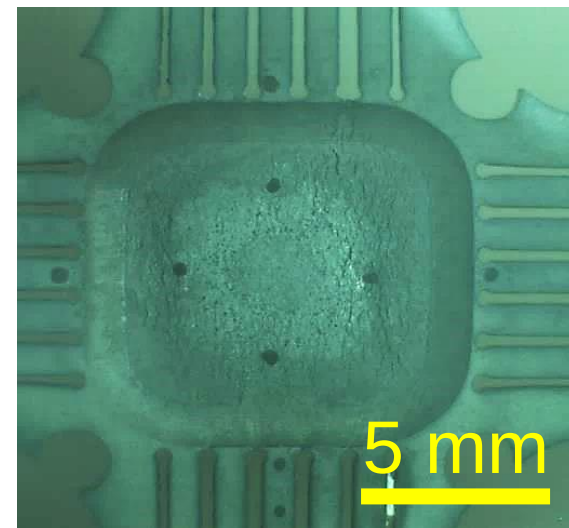


- 機器の健全性保障のためには、実機使用状態を模擬した多軸試験が不可欠であるが、市販の多軸装置はほとんど無い。
- 単軸データの実機多軸状態への拡張手法も未解明である。

新技術の特徴・従来技術との比較

- ◎ミニチュアサイズの試験片による、二軸引張型
多軸クリープ試験手法を確立。
- ◎50×50 mmサイズの試験片で、室温～700℃
で任意の応力状態での**多軸**検証が可能。
- ◎試験片の電気炉内におけるその場観察が可能で、
高温変形特性等も評価が可能。

高温炉中でのその場観察例
(ステンレス鋼の650℃での粒界割れ)→



想定される用途

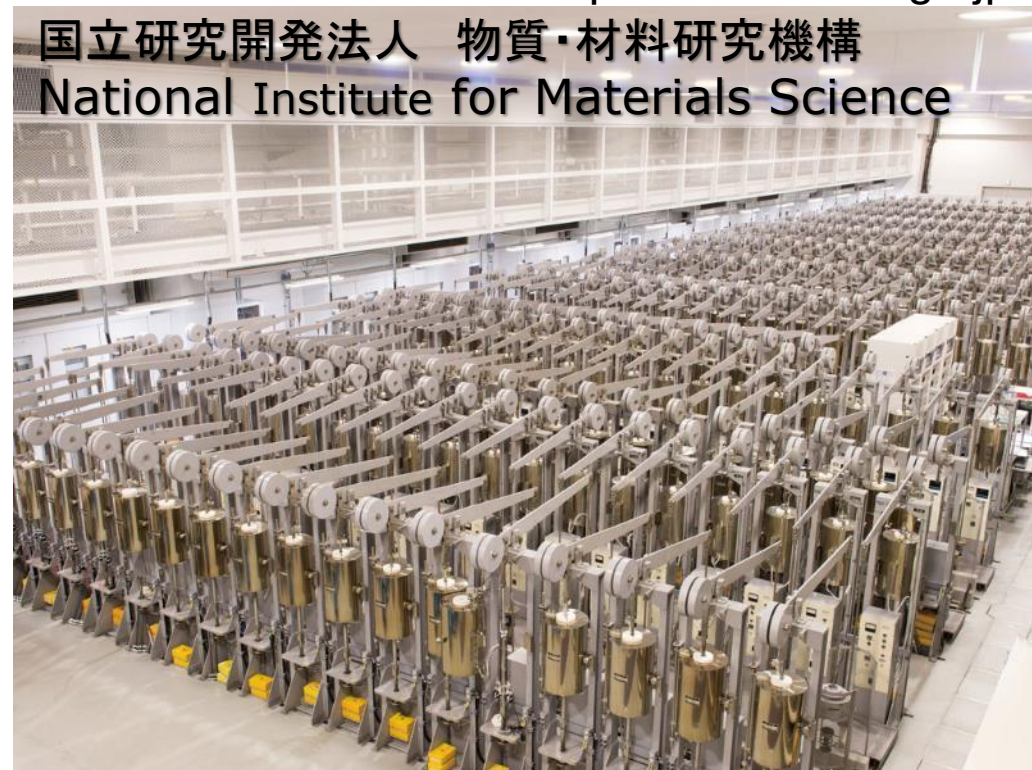
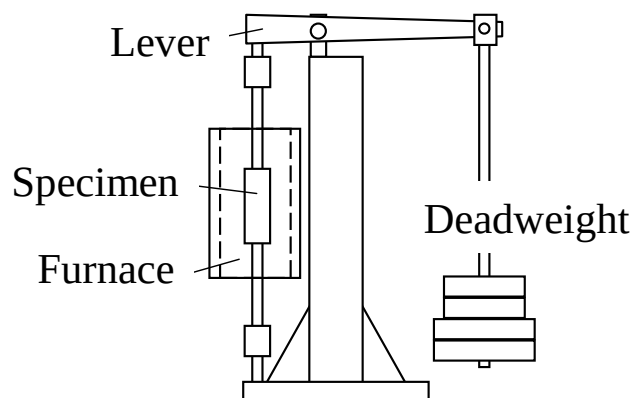
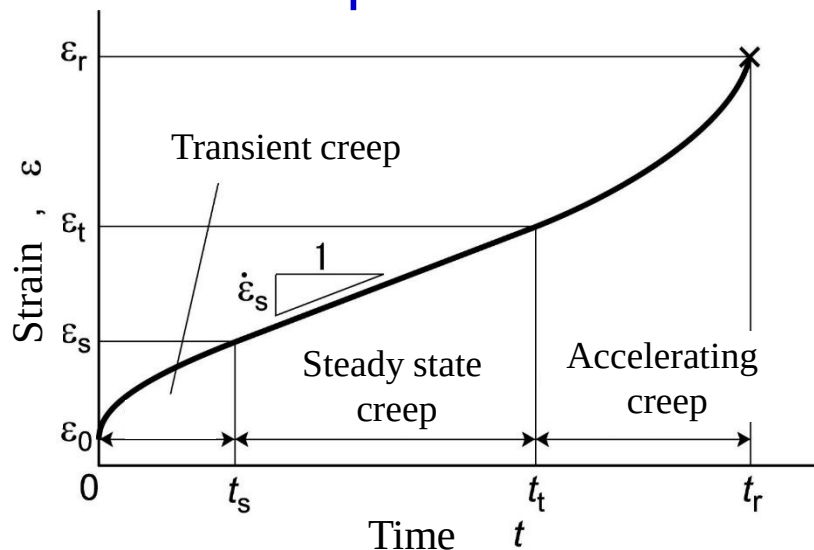
- 高温機器に用いる構造材料
高温多軸状態での特性や寿命データが取得可能なため、安全設計への貢献が可能。
- 繊維強化材料
異方性が問題となる材料の基礎特性評価試験が可能。
- FEMなど
数値シミュレーションに必要な材料定数取得にも貢献可能。

クリープ実験検証の基本

高温で一定荷重(応力)を負荷し、変形挙動や破壊までの時間を調査する

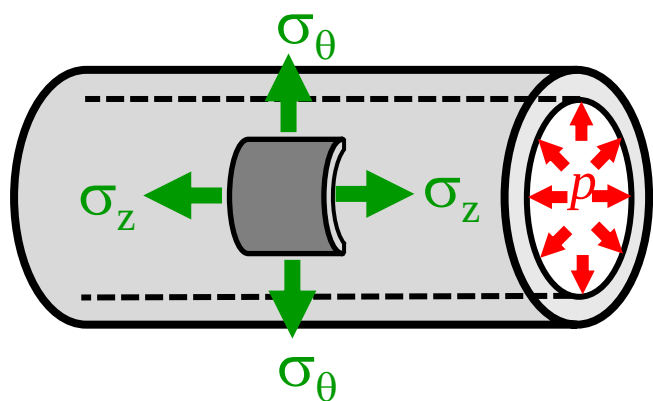
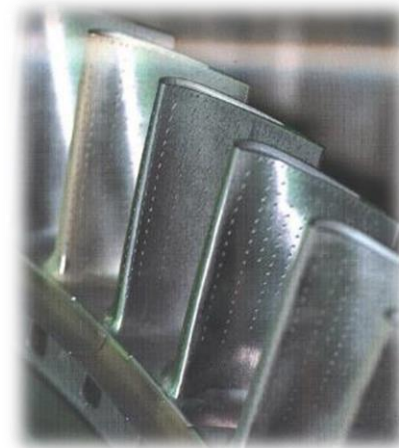
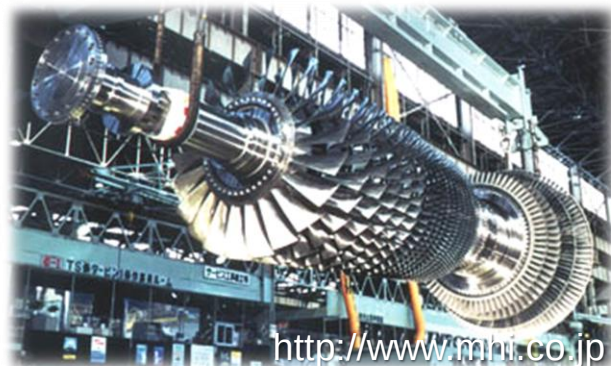
<https://www.nims.go.jp/>

Creep Test

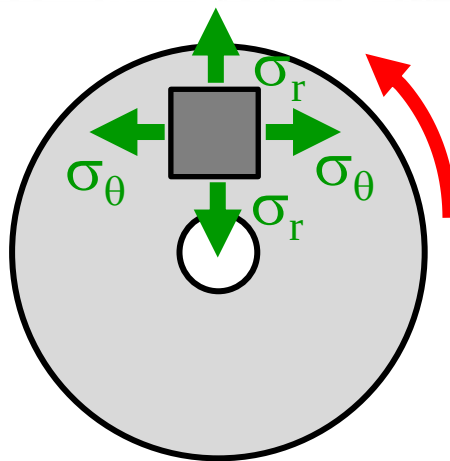


標準的な丸棒試験片

実機での状態（多軸や熱変動）



Axial stress & Hoop stress

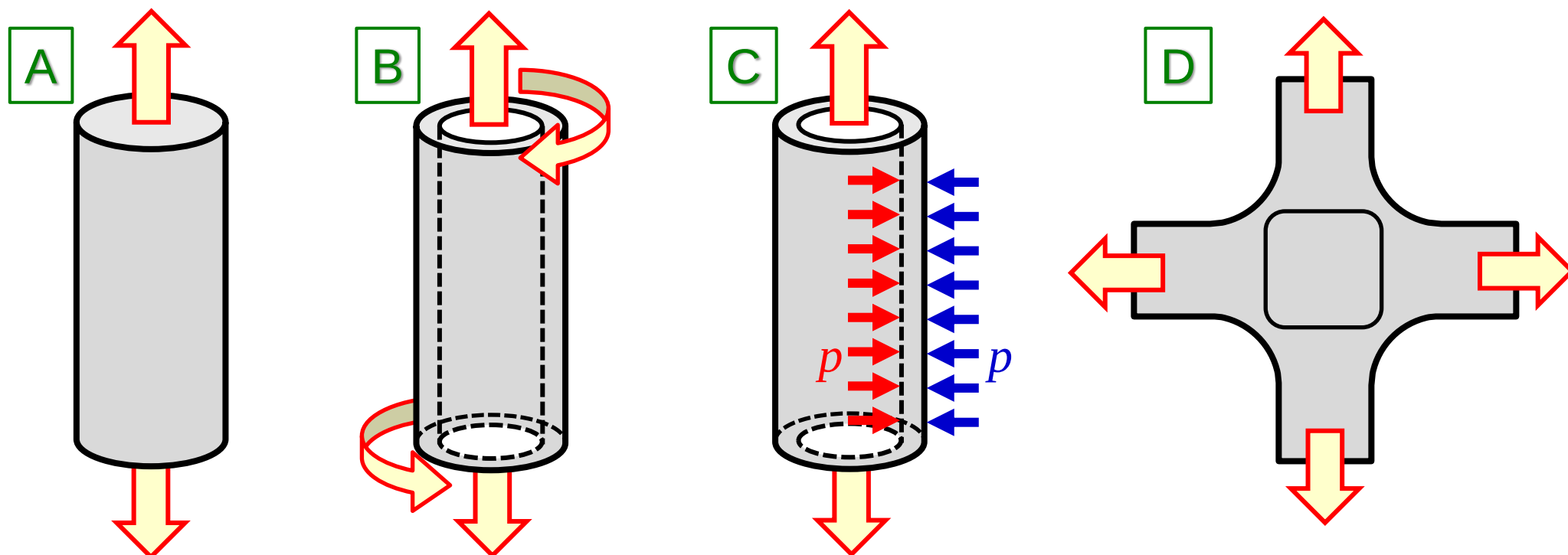


Thermal stress
& Centrifugal stress



- ☑ 多軸やTMF(熱機械疲労)での実験検証が重要
- ☑ 研究報告例が少ない／市販装置が少ない

実機状態を考慮した実験手法の例



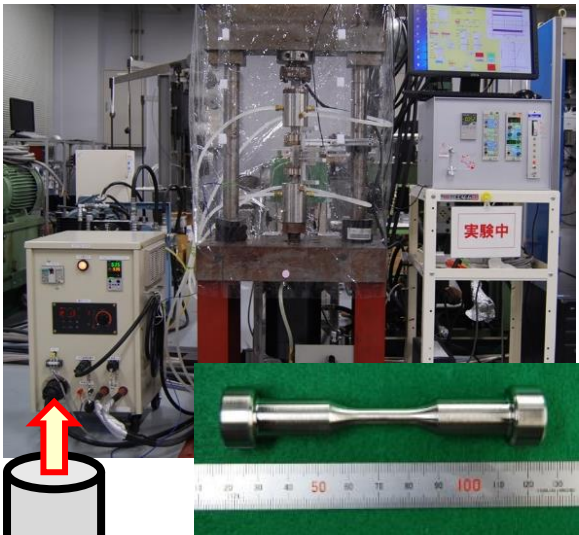
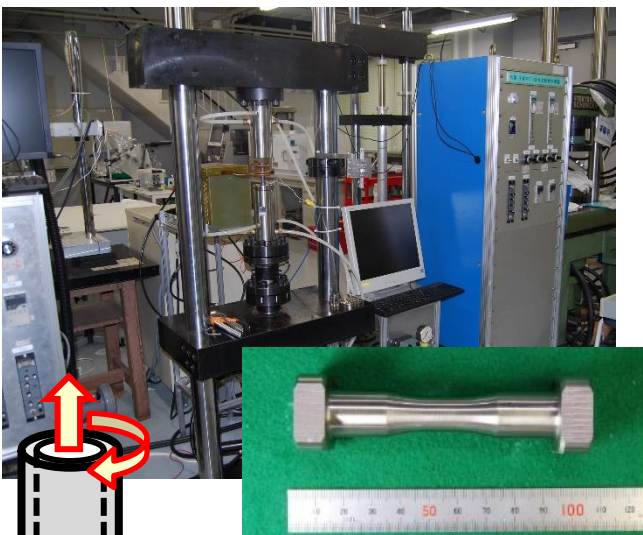
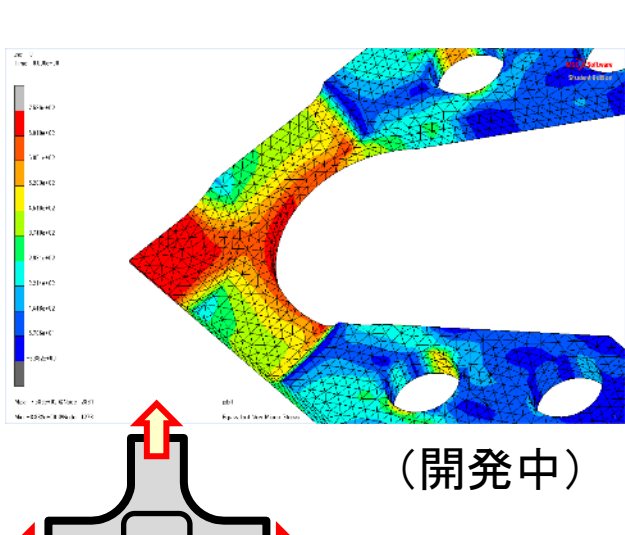
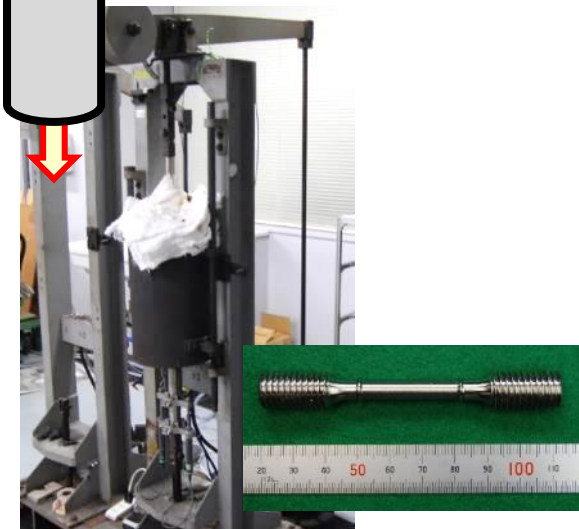
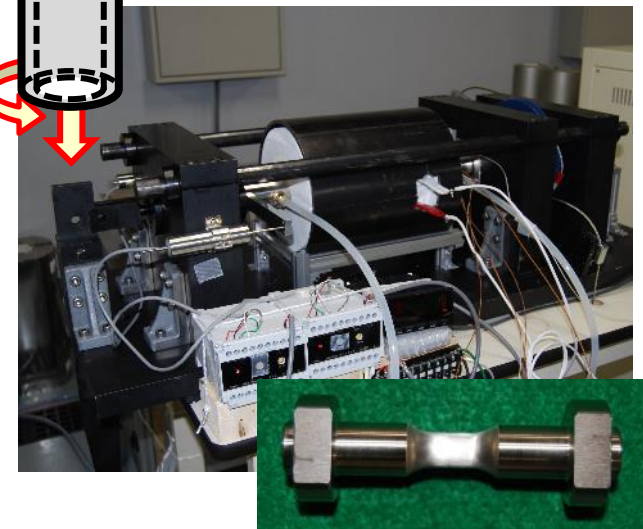
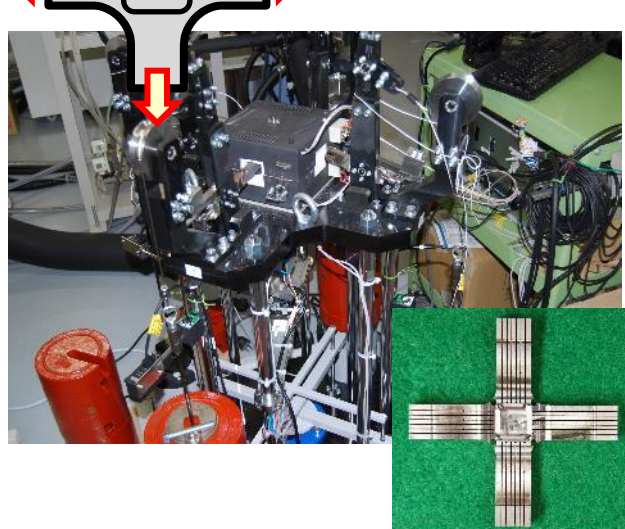
多軸度を表す指標：主応力比

$$\lambda = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\text{(最小主応力)}}{\text{(最大主応力)}}$$

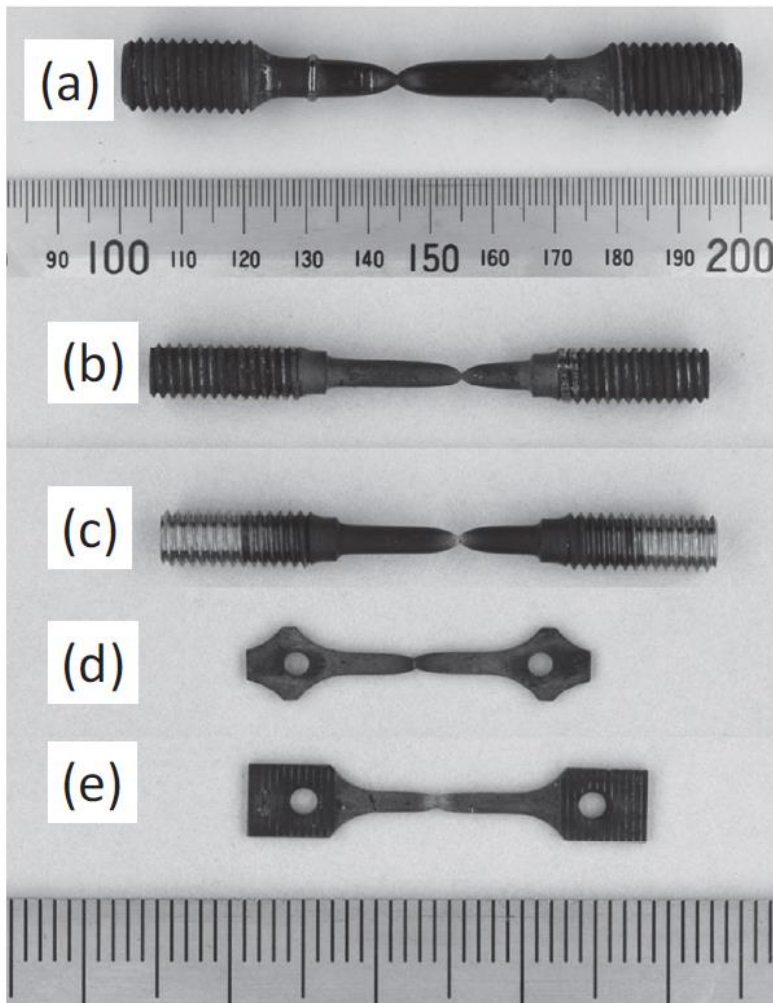
λ	-1.0		0		+1.0
A 単軸			■		
B 多軸	■	■	■	■	
C 多軸			■	■	■
D 多軸			■	■	■

☑ さまざま実験手法を併用することで、実機応力状態を網羅して評価可能

実機状態を模擬できる実験装置(福井大)

	単軸(丸棒試験片)	多軸(中空円筒試験片)	多軸(十字型試験片)
疲労			 (開発中)
クリープ			

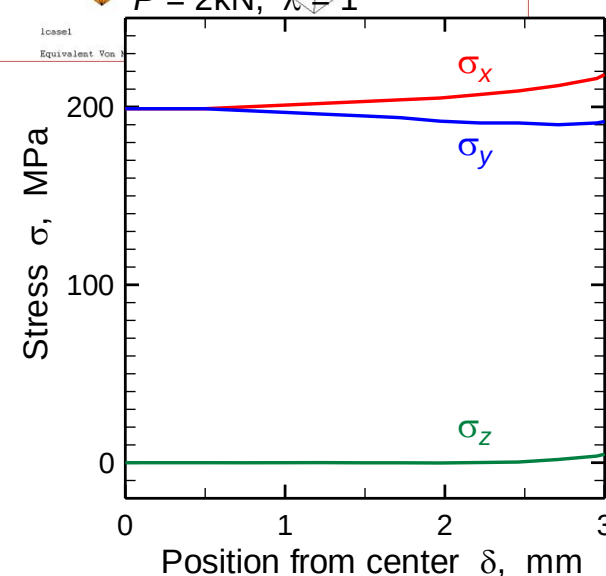
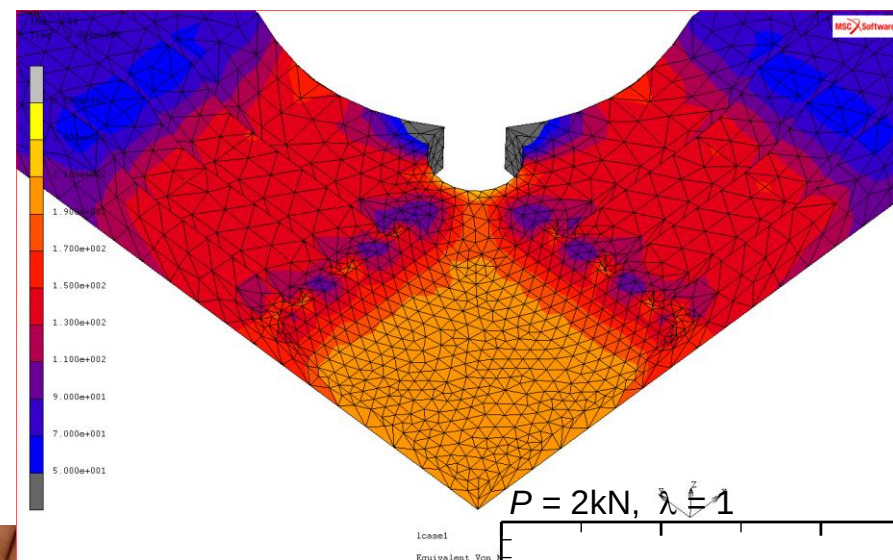
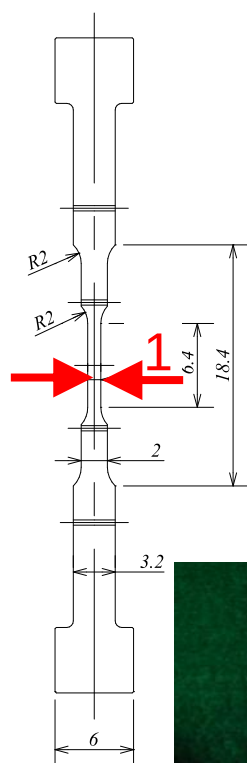
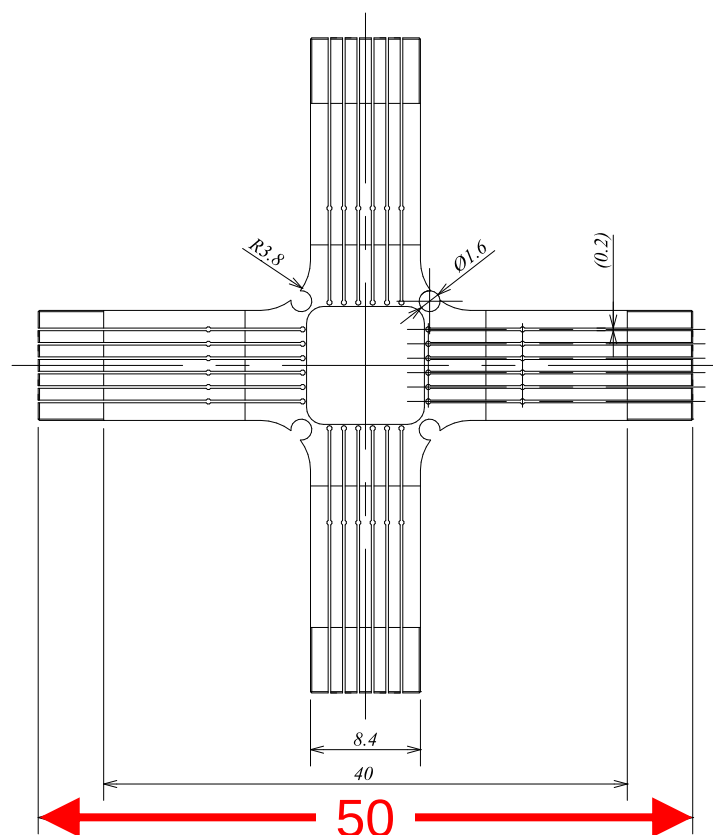
試験片サイズ小型化のニーズ



金山英幸, 旭吉雅健, 伊藤隆基, 小川文男, 若井隆純
“改良9Cr-1Mo鋼のクリープ特性に及ぼす試験片寸法
および酸素分圧の影響”
「材料」Vol.66, No.2, pp.86-92, 2017

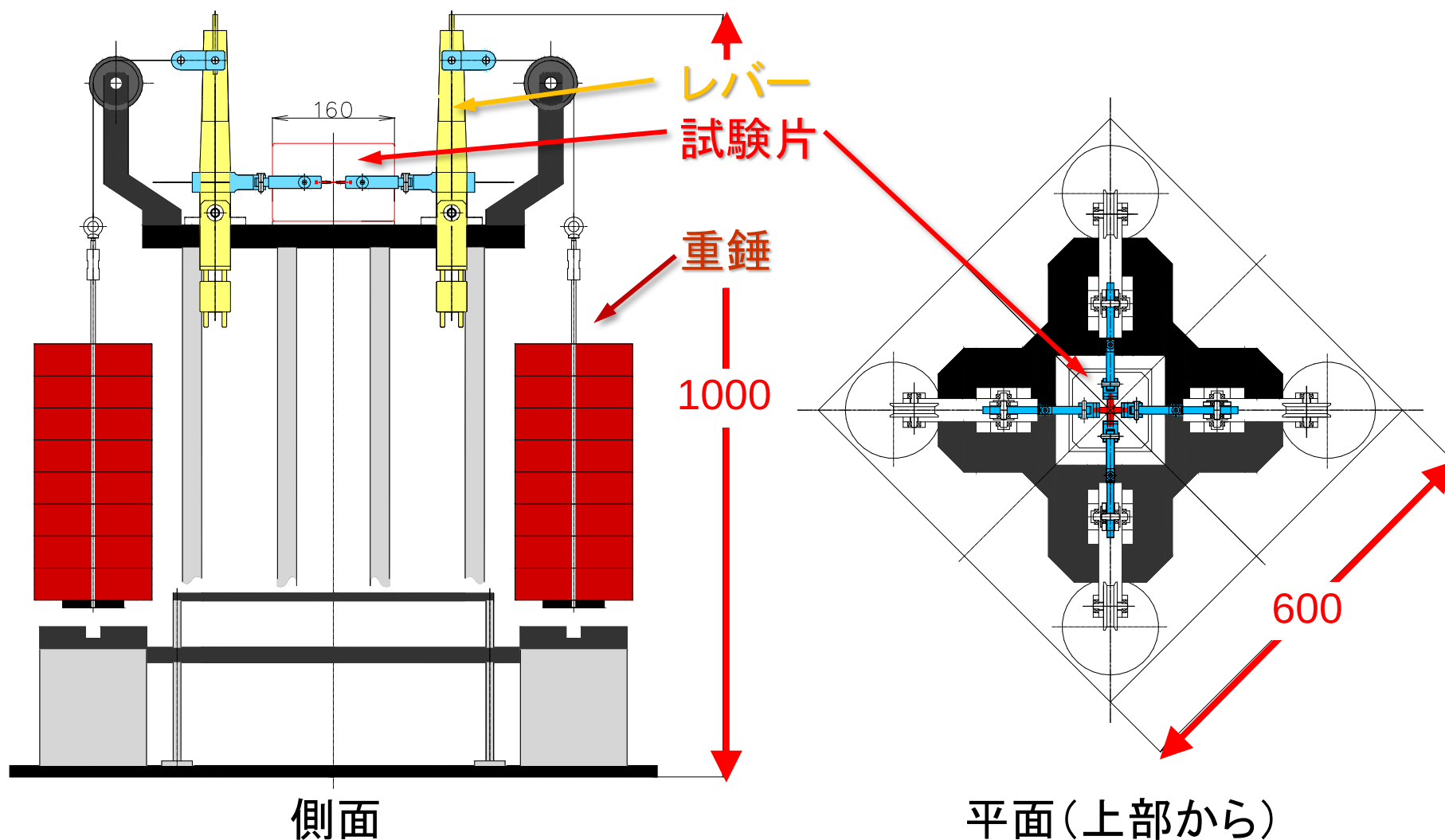
- ☑ 評価試料(試験片)の寸法小型化は多くのメリットを有する
準備する素材は小さくできる、任意の局所位置を評価できる

多軸評価試験片の数値解析設計



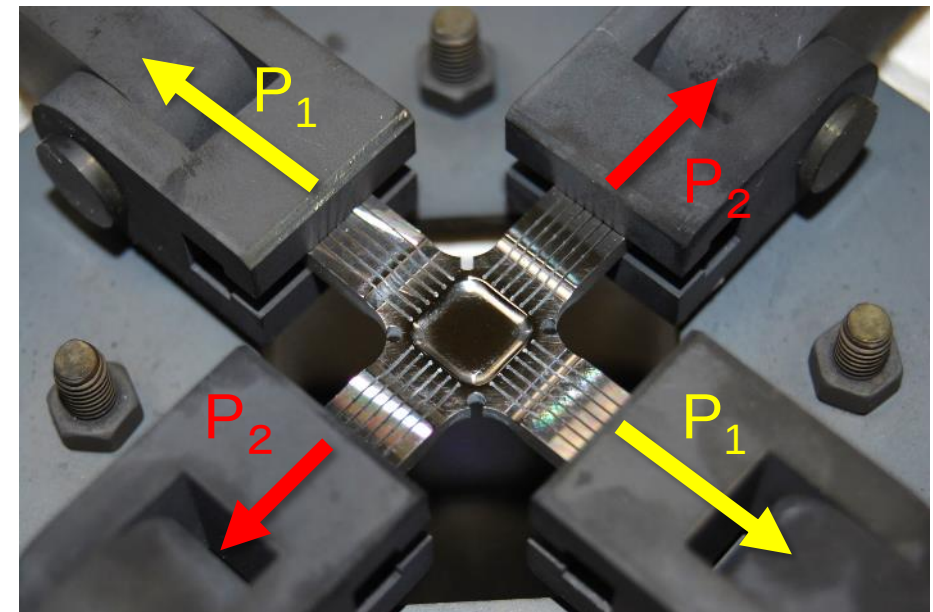
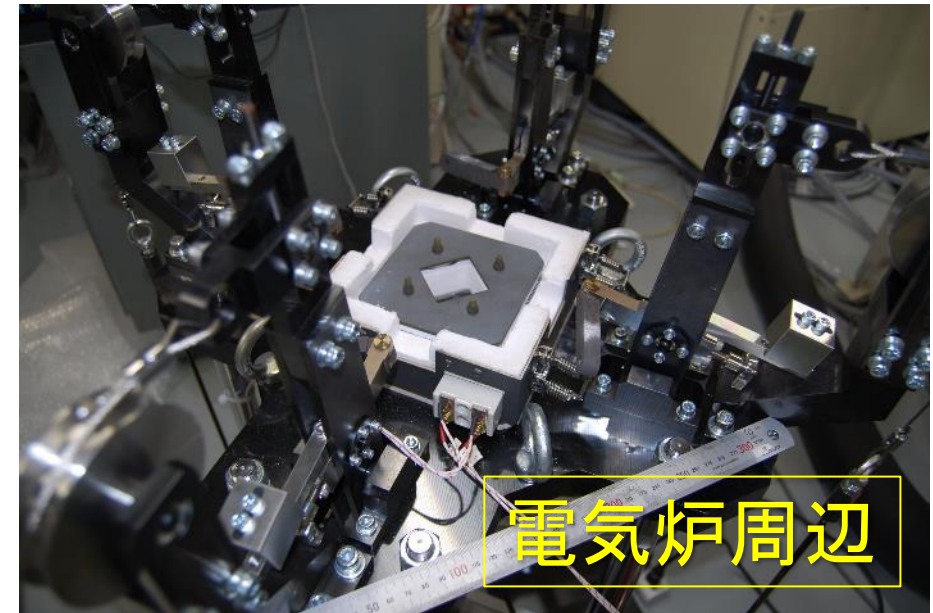
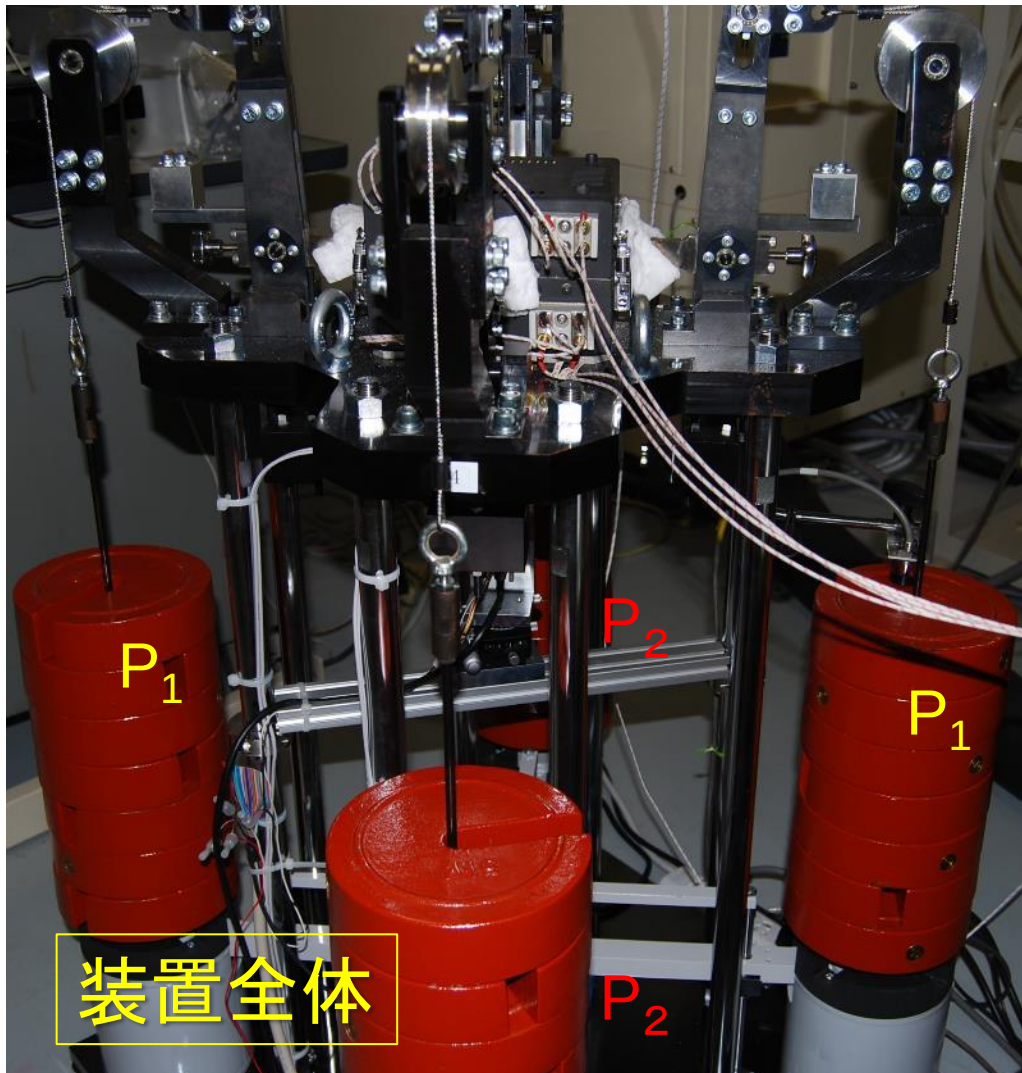
- ☑ 中央標点部で平面応力状態を達成
- ☑ 素材寸法: 60 × 60 × 10 mm (平面度や直角度を有していれば51 × 51 × 7)

開発した実験装置（機構図）



- 荷重容量 2 kN
- 600 × 600 × H1000 mm

開発した実験装置(写真)

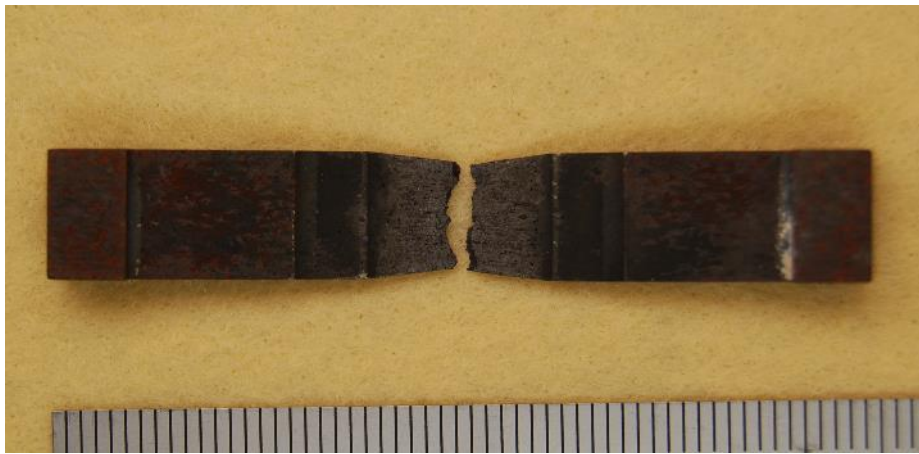


- ☑ 電気炉下面から高温変形中の試料表面をその場観察可能

結果の一例 (SUS304の破断結果)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
Type304	0.06	0.56	1.48	0.33	0.25	8.16	18.30	0.19

923 K, $\lambda = 0$, 180 MPa, $t_r = 1034$ h

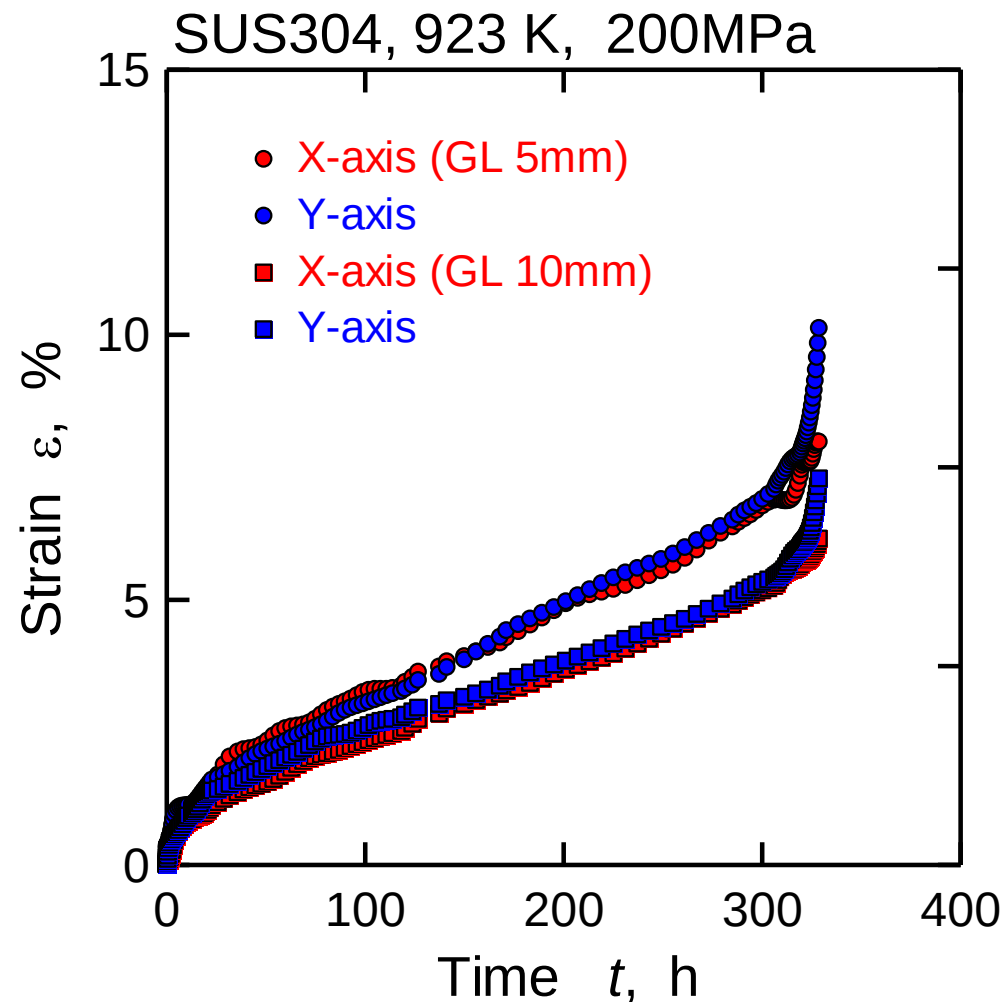
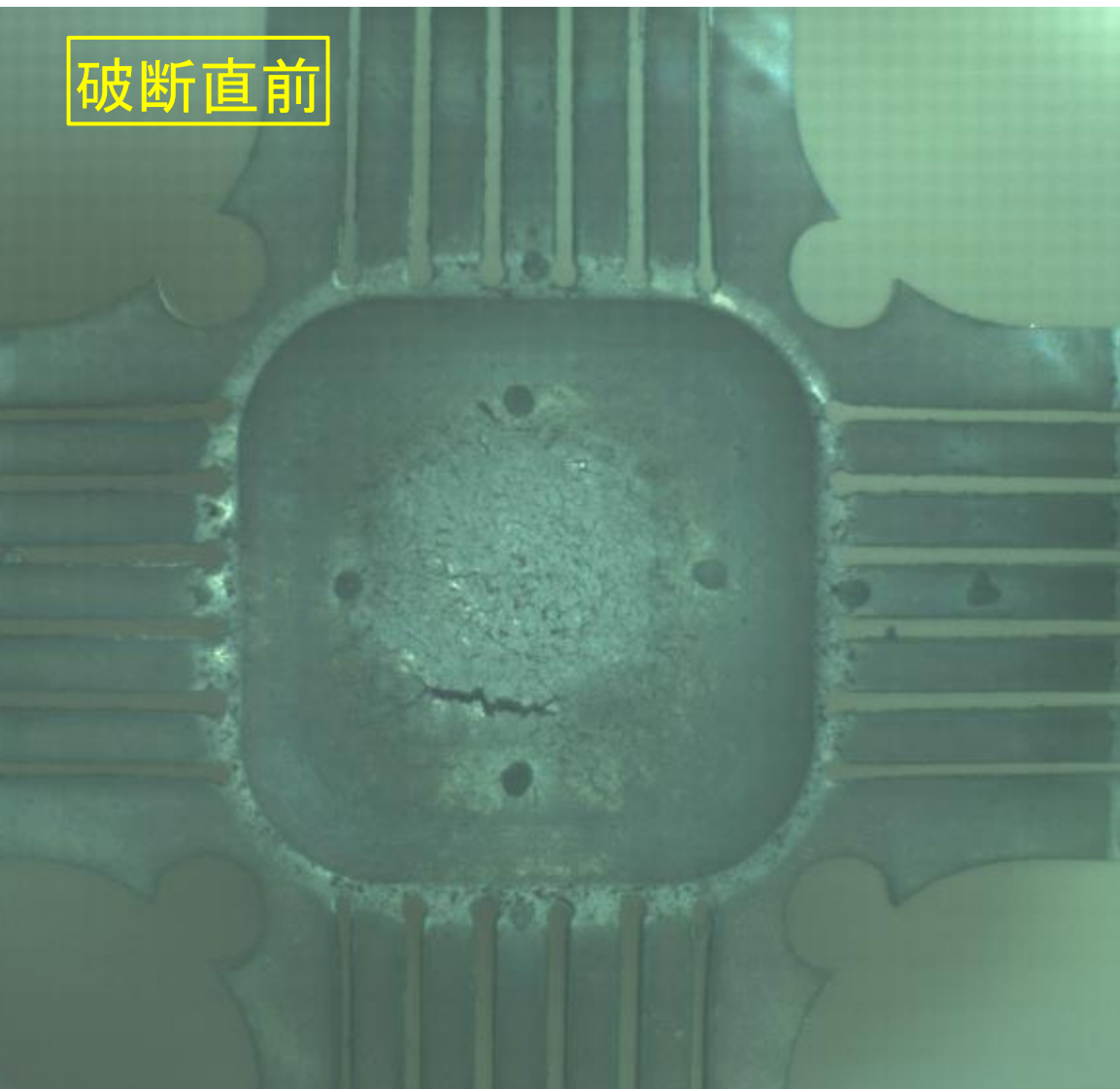


923 K, $\lambda = 1$, $\sigma_{eq} = 200$ MPa, $t_r = 329$ h



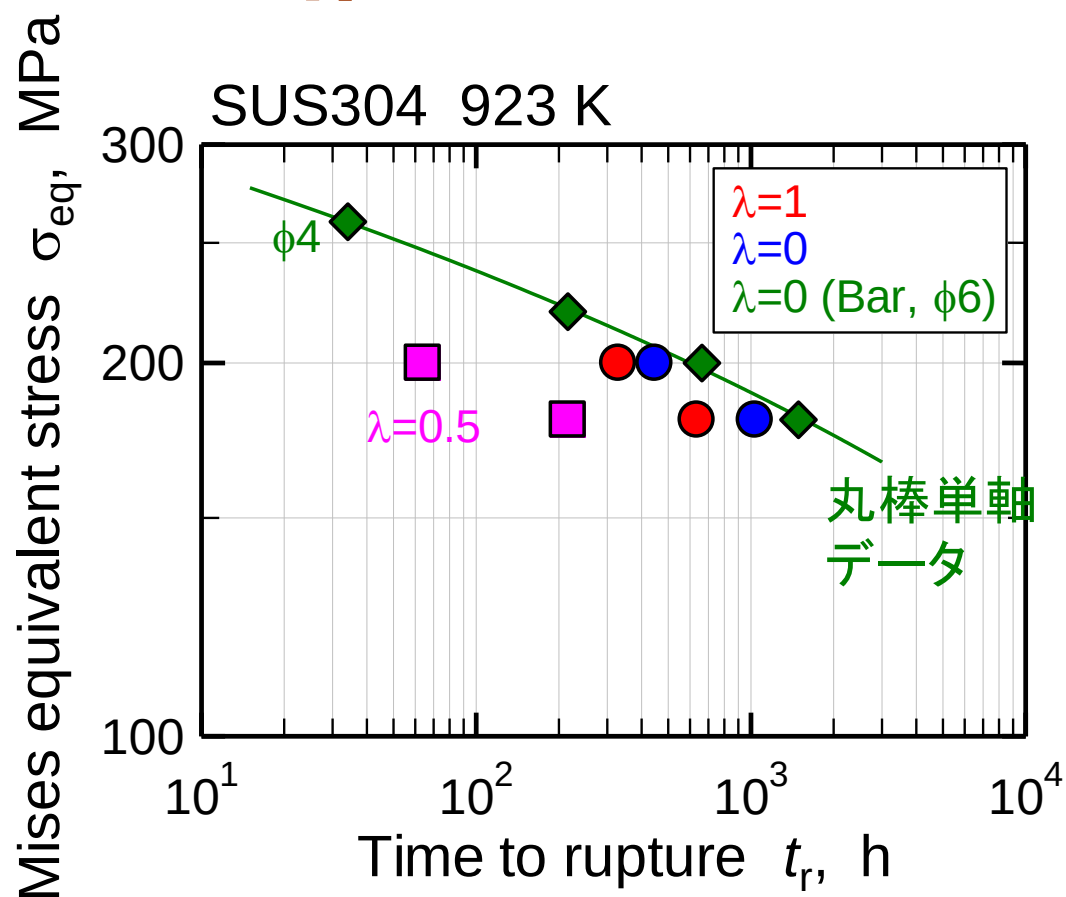
高温クリープ特性(ひずみ曲線)

破断直前

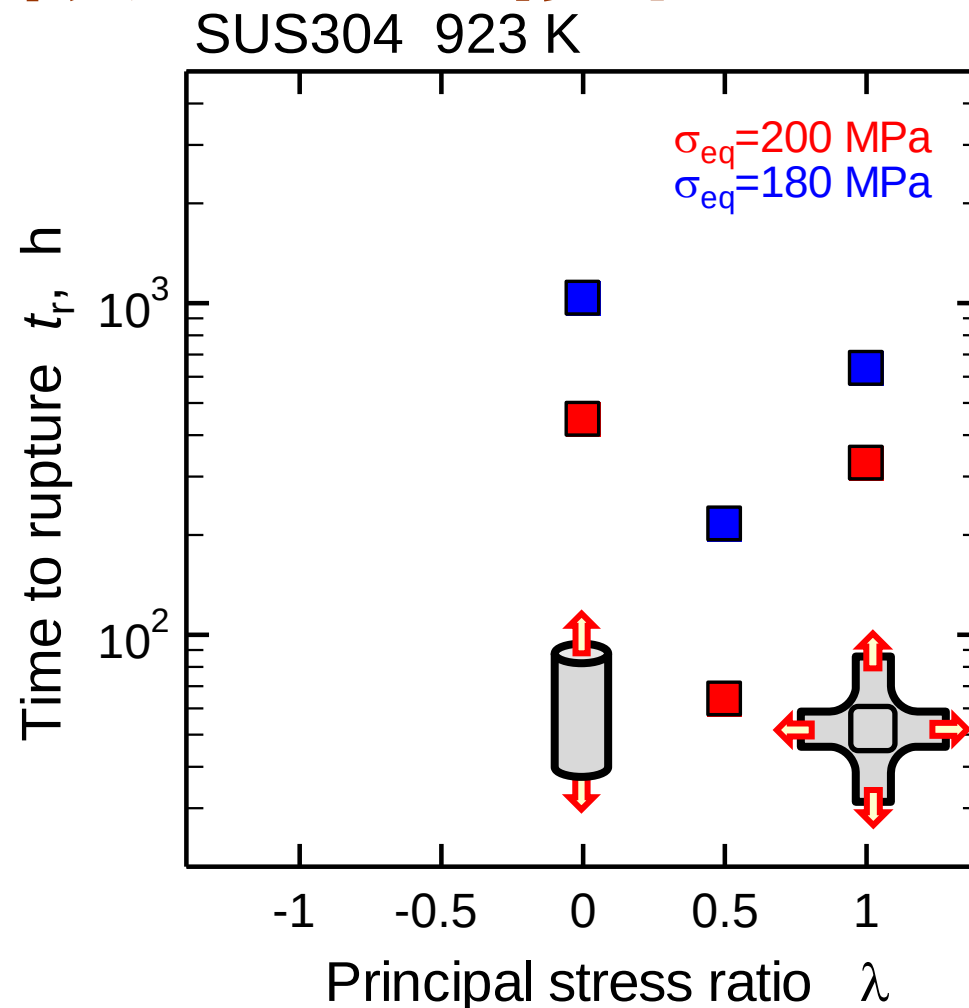


☑ 非接触手法で変形特性曲線も描画可能

相当応力による設計の危険性



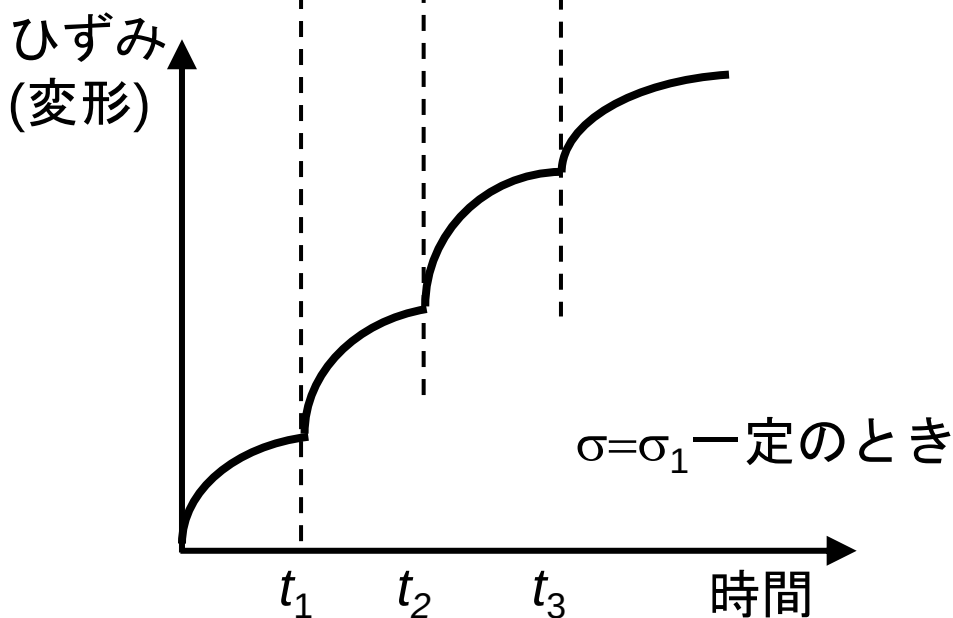
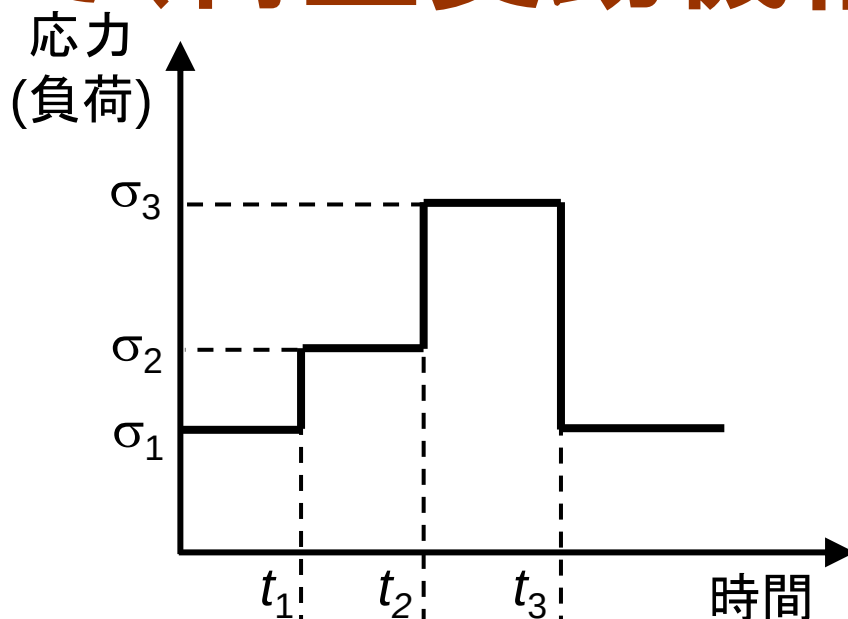
■ クリープ寿命の相当応力評価
 多軸 ($\lambda=0.5$) < $\lambda=1$ < 丸棒単軸



☑ 汎用解析ソフトでの標準的指標を用いると、危険側設計の可能性

評価精度向上を目指して(荷重変動機構)

- ① 頻繁な稼働・停止が予想される火力発電では、**負荷変動**検証が要求される。
- ② **数値解析の精度向上**のために、**負荷変動**実験が不可欠である。



$$\varepsilon_c = A\sigma^n t^m$$

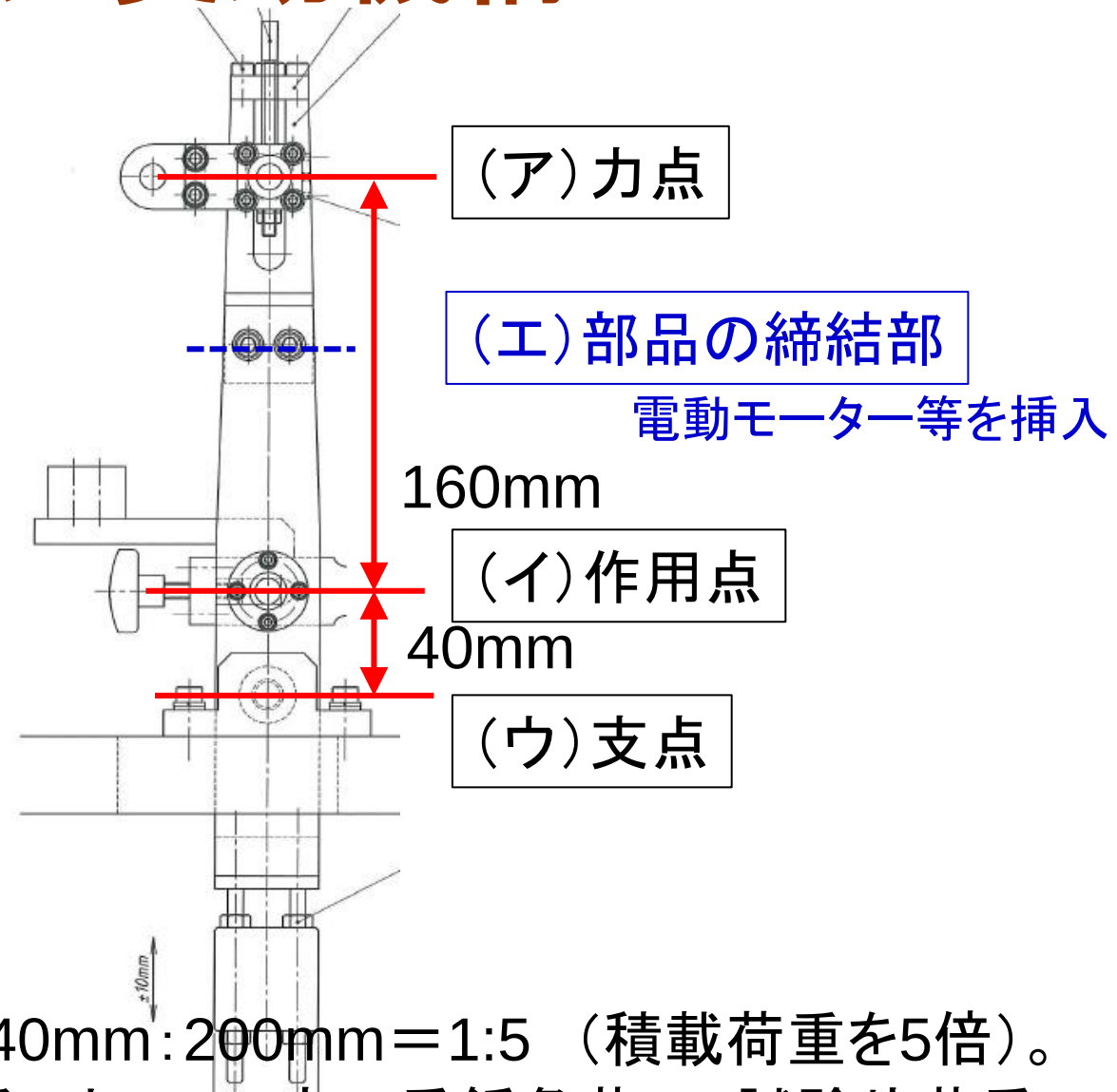
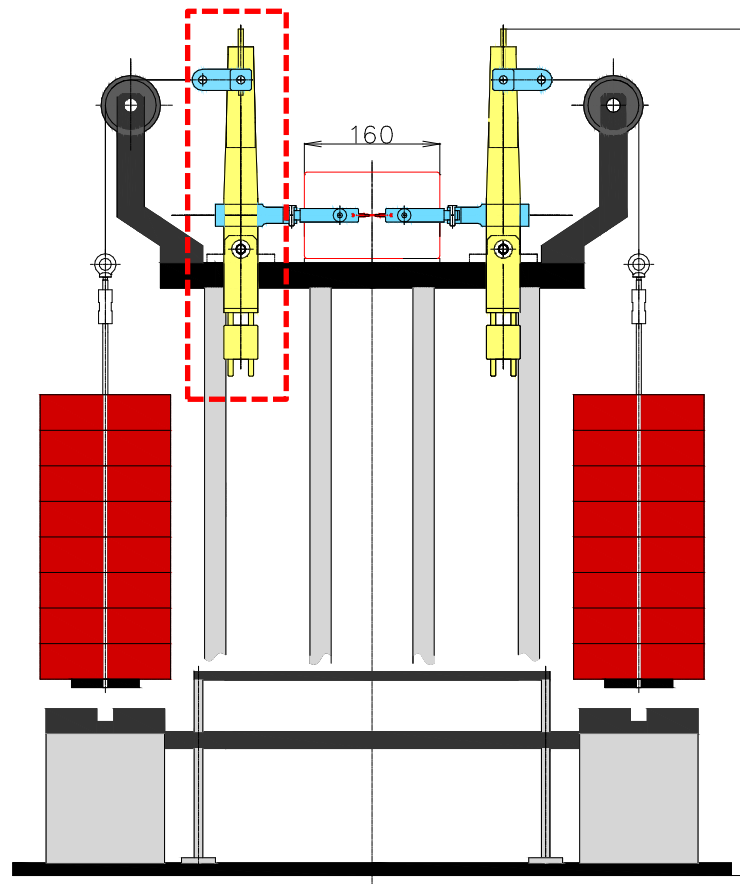
時間硬化則 $\dot{\varepsilon}_c = mA\sigma^n t^{m-1}$

ひずみ硬化則 $\dot{\varepsilon}_c = mA^{\frac{1}{m}} \sigma^{\frac{n}{m}} \varepsilon_c^{\frac{m-1}{m}}$

荷重(応力)変動時の変位(ひずみ)挙動を検証する。

荷重を任意に変動させる機構を追加する。

荷重・応力変動機構



現状のレバー比(荷重増幅比)は、 $40\text{mm}:200\text{mm}=1:5$ (積載荷重を5倍)。
(ア)(エ)間距離を制御して変更することで、一定の重錘負荷で、試験片荷重を任意に変更させることが可能。

実用化に向けた課題

- 荷重一定条件での多軸試験技術は開発済みである。今後、特性評価の精度向上を図るために、荷重変動機構を拡張することが課題。
- 光学カメラでの観察画像を用いて（簡易版DIC法によって）、試験中の試験片の変位分布をリアルタイム表示できる機能拡張が課題。

企業への期待

- 耐熱材料の高温多軸クリープ特性や寿命評価を希望する企業には、本試験装置や技術が有益である。
- 二軸引張試験による材料定数取得を希望する企業には、本試験装置が有益である。
- サンプリングモアレ法等のひずみ分布計測技術を有する企業との共同研究を希望。
- 微細な格子マーキング技術を有する企業との共同研究を希望。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : クリープ試験機及び
クリープ試験方法
- 出願番号 : 特願2020-184743
- 出願人 : 福井大学
- 発明者 : 旭吉雅健

産学連携の経歴

(共同研究以外の技術相談など)

- 2017年～現在 “照明ポールのリブ溶接部の健全性保障”
- 2018年～現在 “TiAl合金の強度評価”
- 2019年～現在 “ミニチュアクリープ試験技術の開発”
など 強度評価実験および構造数値シミュレーション

(JST事業採択)

- 2006年度 実用化検討に係る試験研究(FS)
- 2012年度 A-STEP FS探索タイプ
- 2016年度 マッチングプランナープログラム

お問い合わせ先(必須)

福井大学 産学官連携本部
コーディネータ 奥野 信男

TEL 0776 - 27 - 8956

FAX 0776 - 27 - 8955

e-mail office@hisac.u-fukui.ac.jp