

# 高温材料強度の研究

システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 堂崎 隆志、船井まどか、渡部 修

## 1. はじめに

日本の電力の安定供給に火力発電が欠かせない。しかし火力発電設備は老朽化しており、更新や大幅な改修が必要である。またCO<sub>2</sub>削減の観点から、エネルギー機器はより高温・高圧での使用が望ましい。システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻、渡部研究室では、材料や構造の高温での強度に関する研究を行っている。第2章では堂崎氏のスモールパンチ実験、第3章では船井氏のき裂進展実験を紹介する。

## 2. 室温スモールパンチ試験と有限要素解析

火力発電所などの高温プラントにおいて、プラントの信頼性及び余寿命評価を適切に行うために、実機を対象とした材料試験が実施されている。しかし、従来の静的引張試験やクリープ試験では試験片の寸法が大きいため、実機から供試材を採取することや採取後の補修が困難な場合がある。そこで近年国内外において、微小試験片を用いた材料試験法の一つであるスモールパンチ（SP）試験・スモールパンチクリープ（SPC）試験が注目を集めている [1] [2]。ここではSP試験を対象とし、SP試験の現状を踏まえたうえで、実験と解析の両面から検討した。

オーステナイト系ステンレス鋼について、温度及び板厚の影響を実験によって検討する。

有限要素解析によって、室温SP試験における基本的な変形挙動や、治具寸法などの影響を検討する。

SP試験ではこの試験特有の試験片・治具が必要となるが、それらの製作については筑波大学研究

基盤総合センター工作部門の方々にご支援を頂いた。ここではSP試験の試験方法を示した後に、室温SP試験の結果とその有限要素解析について紹介する。

### 2.1 試験方法

まず研究で用いたSP試験用の円盤試験片を図1に示す。SP試験の試験片は、板厚0.3～0.5mmの平板状の円盤試験片を用いることが多い。円盤試験片の両面を#1000と#2000のサンドペーパーで研磨した後、支持ホルダーの上に置き（図2）、図3のように押えホルダーを被せて試験片を固定する。そして図3に指し示す硬球投入口へセラミック製の直径2.4mmを有する硬球を投入する。試験片及び治具の断面図と寸法は、図4及び表1の通りである。

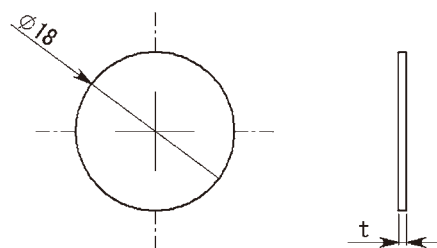


図1 円盤試験片

表1 治具と試験片の基本寸法 [単位:mm]

Disc Specimen	Diameter D	18.0
	Thickness t	0.5
Fix Holder D <sub>F</sub>		3.0
Support Holder	D <sub>S</sub>	4.8
	R <sub>S</sub>	1.2
Ball Punch D <sub>B</sub>		2.4

試験片及び治具、荷重を負荷するパンチャーを試験機に取り付け、室温下でパンチャーを通して

## 研究ノート

硬球に鉛直方向の変位速度0.20mm/minを与える。荷重治具はインコネル600を用いている。試験での計測量は、試験片に加わる荷重と硬球の鉛直方向変位である。硬球の鉛直方向変位は、変位計の2本の石英ガラス棒を、パンチャーと固定治具に取り付けることで計測している。

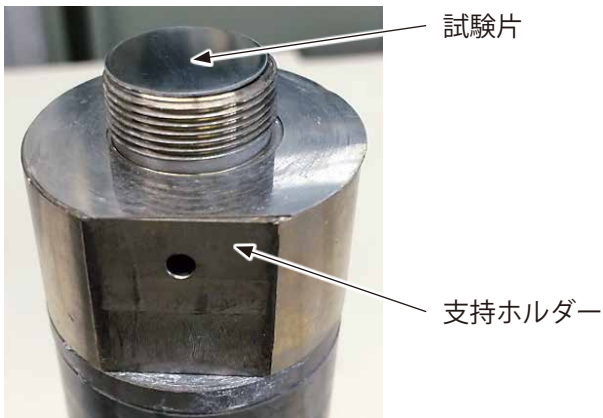


図2 円盤試験片と支持ホルダー

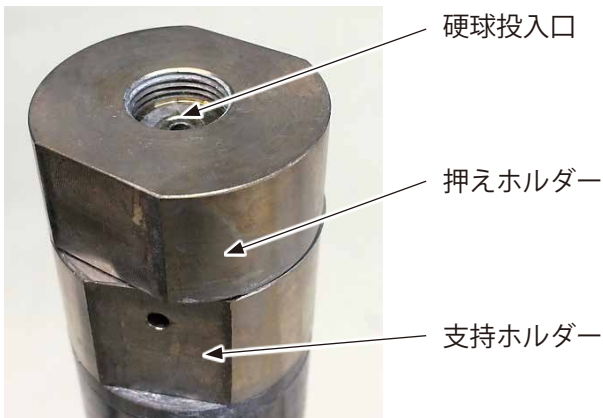


図3 試験片固定完了

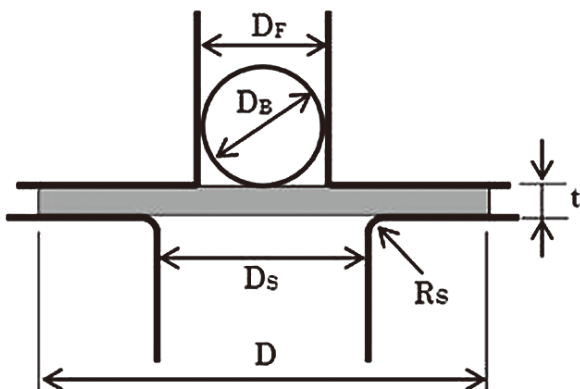


図4 治具及び試験片断面図

## 2.2 試験結果

図5に室温SP試験と有限要素解析の荷重変位曲線を示す。有限要素解析においては、治具寸法は表1と同じ値を用いたが、試験片遠方は結果に影響しないと考え、試験片の直径Dは10.0mmとしている。また解析プログラムは、研究室で作成された大規模変形弾塑性解析コードに、接触と摩擦を考慮できるサブルーチンを付加したものを使用した。図5より、4回の実験と有限要素解析は概ね一致していることが確認できる。

また試験片内部の応力状態を調べるために、図6に主応力図を示す。図6より、試験片には曲げ変形によって生じる引張応力が、試験片に沿うように発生していることがわかった。

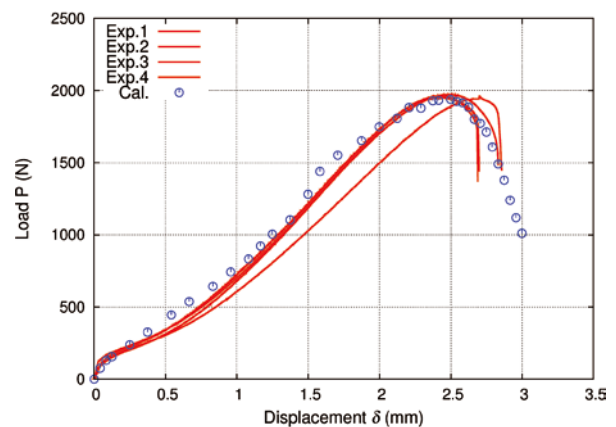


図5 荷重変位曲線

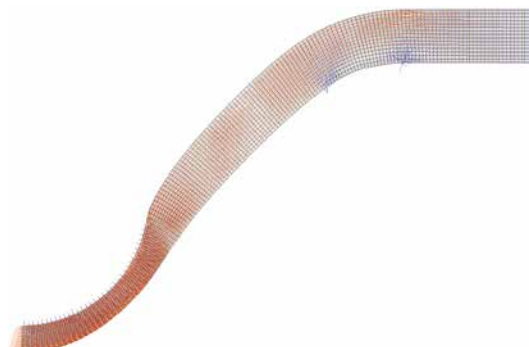


図6 試験片内部の応力状態

### 3. 高温平板のクリープ疲労荷重による き裂進展評価

超々臨界圧火力発電では、運転年数の短い機器の損傷が報告されている。高温機器の不具合や事故を回避するには、部材の損傷状態を把握し寿命に達する時期を予測することが重要である。高温機器の寿命評価法の1つに目視可能なき裂の発生をもって寿命とする評価法がある [3]。本研究では破壊の第一要因である疲労と、クリープによって部材に生じるき裂の進展実験を行った。

#### 3.1 実験方法

荷重を1サイクル負荷した際に進展するき裂長さ (da/dN) を写真から観測した実験値と、破壊力学パラメータ  $\Delta J$  から算出した推測値を比較してき裂進展推測の精度を検証した。クリープ疲労試験とは、試験片に引張保持のクリープ荷重、圧縮引張の疲労荷重を1サイクルとして、この荷重を試験片が破損するまで負荷し続ける試験である。クリープ疲労試験は従来、荷重制御型が主流で、比較的長時間の保持時間を有する変位制御の試験でき裂進展が推測されたのは0.5時間が1例と8時間が1例しかなかった [4]。本研究では引張ひずみを与え、これを保持時間0.0、0.5、1.5、2.5時間の保持した時の変位制御実験を行った。変位制御の試験は、弾塑性変形境界による部材の拘束を模擬しているため、高温で用いられる部材の損傷を、荷重制御の試験と比べてより忠実に模擬できる。

#### 3.2 実験評価

き裂進展速度 (da/dN) をJ積分  $\Delta J$  による評価を行った [3]。

- ①荷重を1サイクル負荷した際の応力ひずみ曲線と試験形状から破壊力学パラメータ  $\Delta J_f$ 、 $\Delta J_c$  を算出する
- ②図7の青字で示す条件下で行われた実験データから提唱された関係式を用いて、 $\Delta J_f$  から (da/dN)<sub>f</sub>、 $\Delta J_c$  から (da/dN)<sub>c</sub> を算出する [4]。

③ (da/dN)<sub>f</sub> と (da/dN)<sub>c</sub> を加算し (da/dN) の推測値を算出する。

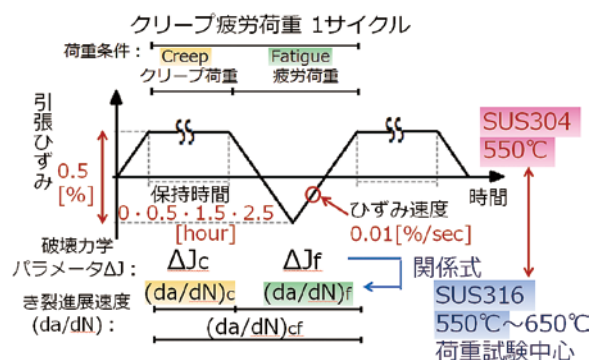


図7  $\Delta J$  による (da/dN) 推測の概要

#### 3.3 試験片、試験装置

試験片はJIS規格 [5] を参考に図2のような SUS304鋼平板をSOLIDWORKSで設計した。初めに工作部門に工作依頼のアポイントを取り、図面に問題が無いかを確認して頂いた。今回は試験片のき裂進展に興味があったので、試験片にあらかじめ幅の細いき裂を入れたいと相談したところ、ワイヤーカット放電でのき裂加工を提案していただいた。そして加工に入る前に、工作を担当する方と図面の確認を行った。初め、図8のR28の部分について、Rを小さくした方が良いと助言をいただいた。しかし、JIS規格 [5] でRは平板の幅の2倍以上が望ましいとされているため、14mmの平板部に対してRは28mmにしたいと相談したところ、R28で加工を引き受けていただけた。なお試験装置に試験片を取り付ける治具等や変位計など、実験で用いた器具のほとんどは工作部門で製作していただいたものである。そのため、工作部門には試験片、治具等の工作だけでなく、治具が破損した際の修理でもお世話になった。(図9)

#### 3.4 試験結果

本研究ではJIS規格 [5] に準拠して試験片の破損を定義し、破損時のサイクル数を破損サイクル数  $N_f$  とした。各試験で、破損まで等間隔40のサイクルで試験片のき裂長さをCCDカメラで撮影した写真

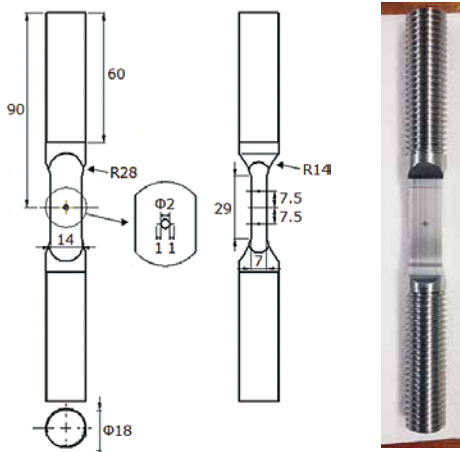
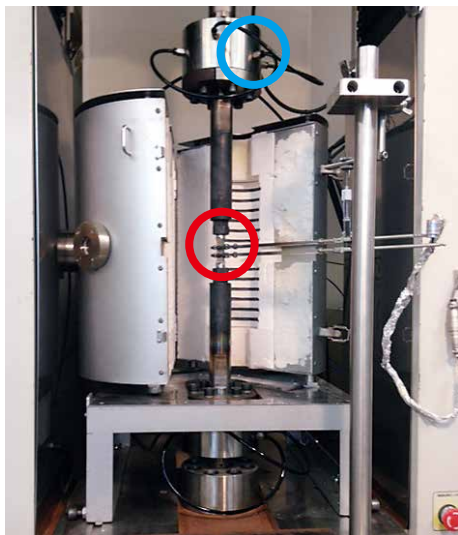


図8 試験片

から計測した。そしてき裂長さのデータからASTMの提唱する7点近似法を用いて、き裂進展速度 (da/dN) の実験値を求めた [6]。(da/dN) とは、荷重を1サイクル負荷した際に進展するき裂長さのことである。0.2N<sub>f</sub>から0.9N<sub>f</sub>まで0.05N<sub>f</sub>ごと15のサイクルでの (da/dN) について、上記の方法でき裂の写真から実験値を求め、2章で示した方法で破壊力学パラメータΔJから推測値を求めた「4」。(da/dN) の実験値を横軸、推測値を縦軸とした図12から推測の精度を検証したところ、60のうち58の (da/dN) のデータがfactor of 2の精度で推測でき、保持時間が長い試験ほど (da/dN) の推測の精度が高くなることが確認できた。



※1  
※2

図9 試験装置

工作部門の皆様にはクリープ疲労試験やクリープ試験の試験片、治具、変位計等の様々な工作依頼で大変お世話になりました。私は設計に関して何の知識もなかったため、良い部品を考えることができなかつた。しかし、どんな機能を果たす部品を作成したいのかを工作依頼時に組立図を用いて説明すると、工作部門の方から部品図に対する助言をたくさんいただき、より機能性、加工性に優れた部品を提案、工作していただきました。(図7、8) 工作相談を通じて部品が改良される過程はとても面白く、完成した部品を受け取る時はとても嬉しかったです。この経験から私はもっといろいろなものを作りたいと考え、ものづくりに携わることができるメーカーへ就職しました。そう思うようになったのは、工作部門の皆様がいつも丁寧に対応してくださったからです。

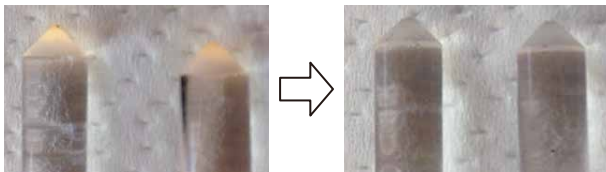


図10 変位計のガラス棒 (※1部分)  
(欠けた先端を研磨)



図11 冷却水ホースの接続部 (※2部分)  
(接続部は折れやすく、何度も修理依頼)

また、修士論文提出間際の時期に最後1本の試験片を使った試験が失敗し、気が動転したまま工作部門に駆け込んだところ、緊急での仕事を快諾してくださったことに深く感謝します。

### 3.5 クリープ試験機

研究室で高さ1.5m、重さ200kgのクリープ試験機を製作しました。私は指導教員の渡部先生が考

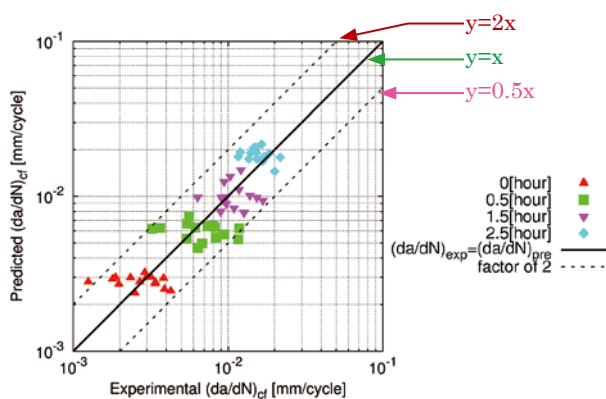


図12 き裂進展速度 (da/dN) の推測精度

えた組立図をもとに60パーツの部品を設計しました。仕事を担当してくださった方には大変お世話になりました。

クリープ試験機の部品図は手書きで作成していたため、寸法を間違いに気づけずに部品図を提出してしまうこともありました。しかし、担当の技術職員の方が3DCADで組立図を作成して寸法の間違いを指摘してくれたことに対し謝意を表します。

しかしながらクリープ試験機はまだ、順調に作動せず、さらなる工夫が必要である。

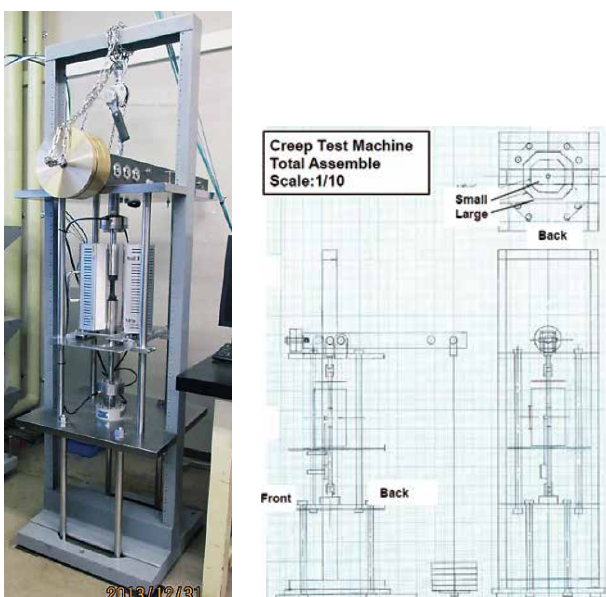


図13クリープ試験機

#### 4. おわりに

渡部研究室では、学生一人一人に異なる研究テーマを与えている。このため、人数分だけの工作治具と試験片が必要になる。本研究を行うにあたり、筑波大学研究基盤総合センター工作部門の皆様には大変お世話になり、ここに感謝の意を表する。

#### 5. 参考文献

- [1] 小林謙一 他, 圧力技術, 第45巻, 第4号, pp180-186, 2007
- [2] Karel Matocha, Proceedings of the ASME 2012 PVP Conference, Vol.6, pp997-1001, 2012
- [3] 緒方隆志, 火力発電用高温機器の損傷評価法, 日本機械学会論文集78巻789号, 2012
- [4] Yasunari Nakayama, et al., Development of Fatigue and Creep Propagation Law for 316FR Stainless Steel in Consideration of FBR Operating Condition, PVP-Vol.365, pp.191-198, 1998
- [5] 日本工業規格, 金属材料の高温低サイクル疲労試験方法, JIS Z2279, 1992
- [6] W. G. Clark Jr. et al., Journal of Testing and Evaluation, 3.6, ASTM, 1975

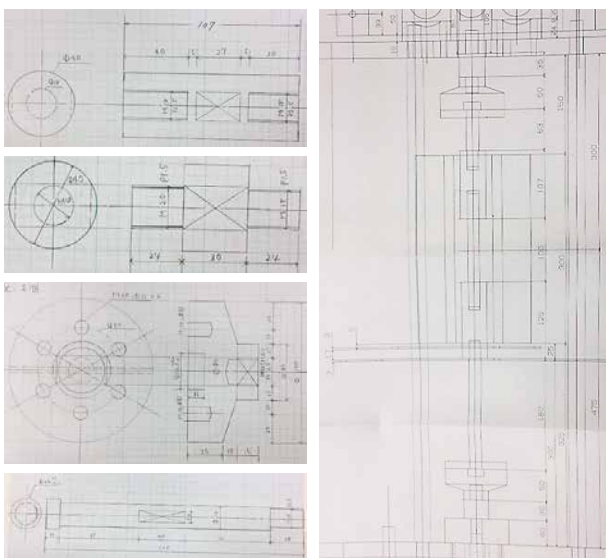


図14寸法確認