

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06050

研究課題名(和文) 応力分布スケーリング新手法確立による破壊靱性値温度依存性予測法構築への展開

研究課題名(英文) New Crack-Tip Stress Distribution Scaling and its Application to the Prediction of Fracture Toughness Temperature Dependence

研究代表者

飯井 俊行 (Meshii, Toshiyuki)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：10313727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：き裂部材の構造健全性評価に使用される，材料強度：破壊靱性値 J_c は，100 の温度変化に対し約1,400%変化することから，大きな温度変化を受ける部材が検討対象となる場合は，必要な J_c データを揃えることに大きな労力が費やされてきた．本研究では，「すべり起因へき開破壊の場合には破壊時の応力が温度によらない」との知見に着目し，異温度下 22分布をスケーリングする手法(T-スケーリング法)を確立し，基準温度下最小の試験数，そして J_c が必要となる他温度における引張試験数本で取得可能とするCDS法を構築し，CDS法の妥当性を原子力圧力容器(RPV)鋼8種，非RPV鋼7種の661データを用いて示した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により，き裂部材の材料強度 J_c の値を広範囲の温度に対し，一温度の J_c と降伏応力 σ_0 から予測可能となった．今後インフラの経年劣化が進む中で，試験片に使用できる部材材料が限定される構造物がほとんどであり，本手法は劣化後のその場強度，特に温度依存性の把握を容易に可能とすることが期待される．学術的意義は， J_c がき裂のない試験片で求められている引張強度(例えば，降伏応力 σ_0)の一表現である可能性が示唆されたことである．この知見についてはさらなる検討が必要であるが，この場合にはき裂部材，非き裂部材の強度データという仕分けが不要になり，き裂の力学である破壊力学に一石を投じる可能性を秘めている．

研究成果の概要(英文)：Efficient collection of fracture toughness (J_c) is a key in structural integrity evaluation of cracked structures that experience large temperature change. This is because J_c shows approximately 1,400% change with 100 °C change.

This work focused on the fact "fracture stress for slip induced cleavage fracture is temperature independent," and developed T-scaling method to scale crack-tip stress distribution at fracture between different temperatures.

Finally, T-scaling method was applied to predict J_c temperature dependence as J_c in proportion to $(1/\sigma_0)^n$ to the $(n+1)$ th power, named as CDS method. Here, n and σ_0 is a Ramberg-Osgood exponent and scaling stress, respectively. CDS method was validated for total of 34 cases - combination of material heats and specimen types - including 661 J_c data. Especially, CDS method successfully predicted J_c temperature dependence of Cr-Mo steel (JIS SCM440), which the ASTM E1921 master curve failed to.

研究分野：材料力学

キーワード：破壊靱性値 延性-脆性遷移温度域 温度依存性 引張試験 降伏応力 マスターカーブ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

延性-脆性遷移温度 (DBTT) 域にあるき裂構造物の健全性評価(たとえば, 図1左上: 原子炉圧力容器 (RPV) の耐熱衝撃評価)を行うには, 部材の破壊靱性値 J_c の温度依存性を広範囲の温度に対し把握することが必要になる. この J_c には, 1) 試験片のタイプ, 厚さが異なると大きく変わる, 2) 大きな温度依存性を示す, などの学術的課題があり, さらに J_c は大きなばらつきを示すことから, J_c の温度依存性把握には数多くの試験が必要とされてきた. RPV のように試験片素材確保に制約がある場合には, 少ない試験データから正確な J_c の温度依存性を把握することが重要であり, 多くの研究が行われてきた.

1) のうち J_c の試験片タイプ依存性は, Larsson 以来多くの研究者が「き裂先端応力分布の強さを統一的に表すはずの J と実際の応力分布が一對一に対応しない», いわゆる J の不完全性によるとして研究を行ってきた. また, J_c の板厚依存性については, 「体積が大きくなると欠陥の存在確率が高まる結果 J_c が低下する」と説明されてきた. これに対し, 申請者らは H24~26 科研費研究を実施し, 面外応力を反映した代表寸法 δ_t を用いて応力分布を同一化 (スケーリング) する手法を構築し, 試験片板厚によらず破壊時のスケーリング後の応力分布は同一となり, J_c の板厚依存性も J の不完全性として説明できることを示した. その結果, J_c の試験片厚み間の換算が弾塑性有限要素解析 (EP-FEA) により可能となった (図1右上行). この換算は, 基準試験片の J_c の平均値 J_{cn} に対するものといえる.

一方, 2) J_c の温度依存性については, たとえば「温度低下による脆化」のように物性要因として理解されてきたためか, ワイブル分布を考慮したアレニウス型経験式 (MC: マスターカーブ) の検証と補正が主流となっている (例えば, ASTM E1921 の MC). ただ, 経験式であるため, 「高温側で J_c の上昇量を過大に評価する», などの不完全性が指摘されるようになってきていた.

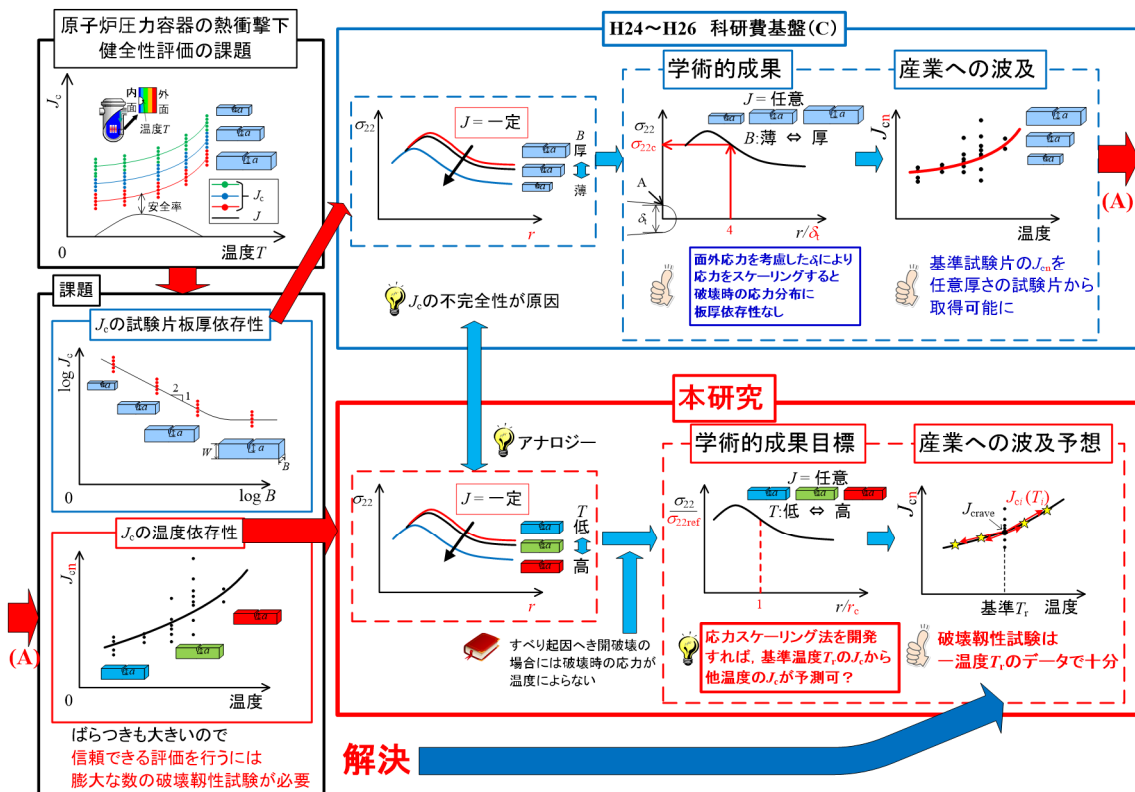


図1. 本研究に至った経緯, 着眼点, 成果目標, 産業への波及予想: 本研究が完了すると, 破壊靱性値 J_c の温度依存性が予測できるようになる結果, たとえば従来 RPV の熱衝撃下健全性評価で必要とされていた多温度下破壊靱性試験は, 基準温度のデータで十分となる. これは, 試験片の物量に制約がある多くの工業的課題の解決策となると期待された.

2. 研究の目的

本研究では, まず「すべり起因へき開破壊の場合には破壊時の応力が温度によらない」との知見に着目し, 「 J_c の温度依存性も温度毎に異なる破壊力学パラメータ J とき裂先端開口応力 σ_{22} 分布の関係が一對一に対応しないこと」に起因するとの着想の下, 異温度下 σ_{22} 分布をスケーリングする手法を確立し, J_c の温度依存性を基準温度 T_r 下の破壊靱性試験結果と予測対象温度 T_i 下の弾塑性有限要素解析 (EP-FEA) から予測する手法を構築することである.

3. 研究の方法

本研究では, まず温度毎に異なる破壊力学パラメータ J とき裂先端応力 σ_{22} 分布の関係をスケーリングする手法 (T-scaling 法; 図2, Step 2) を確立し, これを用いて予測対象温度 T_i 下

の J_{ci} を基準温度 T_r 下の破壊靱性試験結果 J_{crave} (図2, Step 1) と T_r 下の EP-FEA から予測する手法(SDS 法; 図2, Step 3) を構築した. そして, 手法の妥当性を, DBTT 域材 (S55C 鋼, SCM440 鋼) を用いた破壊靱性試験を行うことにより, また RPV 鋼 A533B の文献値との比較を行うことにより SDS 法の妥当性を検証した.

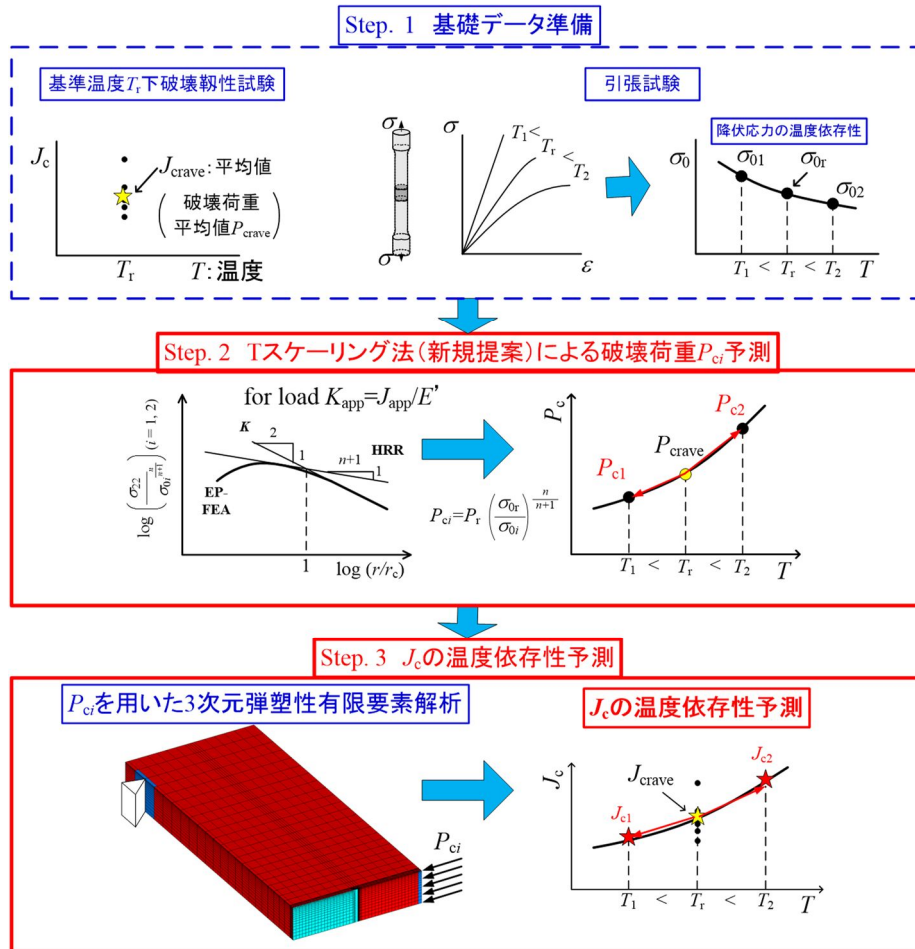


図2. 応力分布スケーリングによる J_c の温度依存性予測方法 (CDS 法)

4. 研究成果

(1) T-scaling 法の確立

DBTT 域材の応力ひずみ関係に Ramberg-Osgood (R-O)関係

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

を仮定し, き裂先端の EP-FEA 応力分布が理論応力分布である Hutchinson-Rice-Rosenberg (HRR) 応力分布と K 値応力分布に荷重によらず包絡されることに着目した (図3). そしてこの理論応力分布の交点(T-point)の x_1 軸上の σ_{22T} が荷重によらず次式として与えられることを見いだした.

$$\sigma_{22T} = \sigma_0 \tilde{\sigma}_n(n, 0)^{\frac{n+1}{n-1}} \left[\frac{2\pi(1-\nu^2)}{\alpha I_n} \right]^{\frac{1}{n-1}} \quad (2)$$

この σ_{22T} が材料の温度の違いを反映した降伏応力 σ_0 に比例することから, T-point がその材料の温度特性を代表しているとして, 応力については σ_{22T} , き裂先端からの距離については次式に示す T-point の距離 r_T を用いて σ_{22T} を無次元化する, T-scaling 法を確立した.

$$r_T = \left(\frac{K}{\sigma_0} \right)^2 \left[\frac{(\alpha I_n)^2}{(2\pi)^{n+1} (1-\nu^2)^2 \{\tilde{\sigma}_n(n, 0)\}^{2(n+1)}} \right]^{\frac{1}{n-1}} \quad (3)$$

ここに, ν はポアソン比, I_n , $\tilde{\sigma}_n(n, 0)$ は HRR 応力分布の係数である.

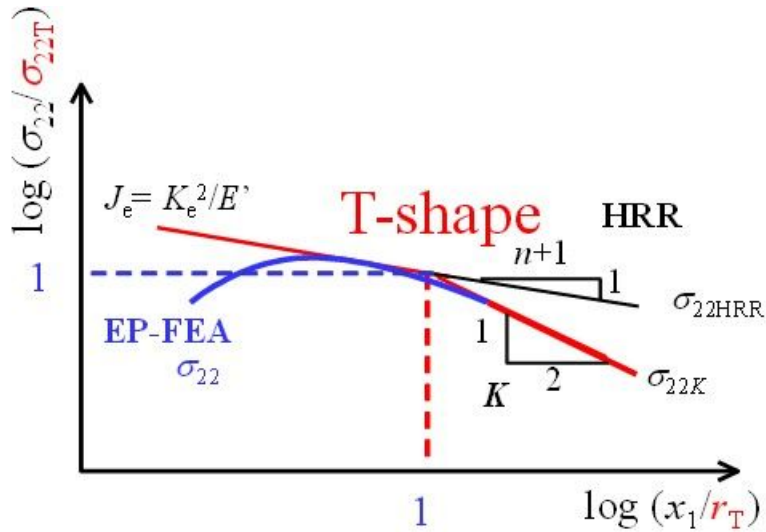


図3. T-scaling されたき裂先端開口方向応力分布

(2) CDS 法の確立

応力分布 T-scaling 法と T-point が破壊時必要な応力レベルの広がり(critical distance)に対応しているとの仮定の下で、対象とする試験片の基準温度 T_r 時の破壊荷重から異温度 T_i 下破壊荷重を予測、EP-FEA により T_i 下の J_c を予測する方法 (SDS 法) を確立した。さらに R-0 パラメータ n の温度依存性が小さいことに着目し、二温度間の破壊靱性値を直接各温度の降伏応力と関連付け、これを CDS(critical distance scaling)法と名付けた。

$$\frac{J_{ci}}{J_{cr}} \approx \left(\frac{\sigma_{0r}}{\sigma_{0i}} \right)^{(n+1)} \quad (4)$$

CDS 法の妥当性を RPV 鋼 8 種、非 RPV 鋼 7 種の J_c 文献値 34 ケース (鋼種と試験片タイプの組み合わせ) 661 データにつき、ASTM E1921 の MC と決定係数を使用して定量的に比較したところ、CDS 法が MC 法より 25 ケースについて優位であるという結果を得た。また、図 4 に示すように、同 MC が高温側で J_c の温度依存性を的確に予測できなかった SCM440 鋼についても的確な予測ができていた (図中 $K_{Jc} = (E J_c / (1 - \nu^2))^{1/2}$, E : ヤング率)。

CDS 法については、ASTM E1921 の MC のようにシャルピー衝撃試験を予備試験として行う必要がないなど、簡便であることから、今後有効活用を図る所存である。

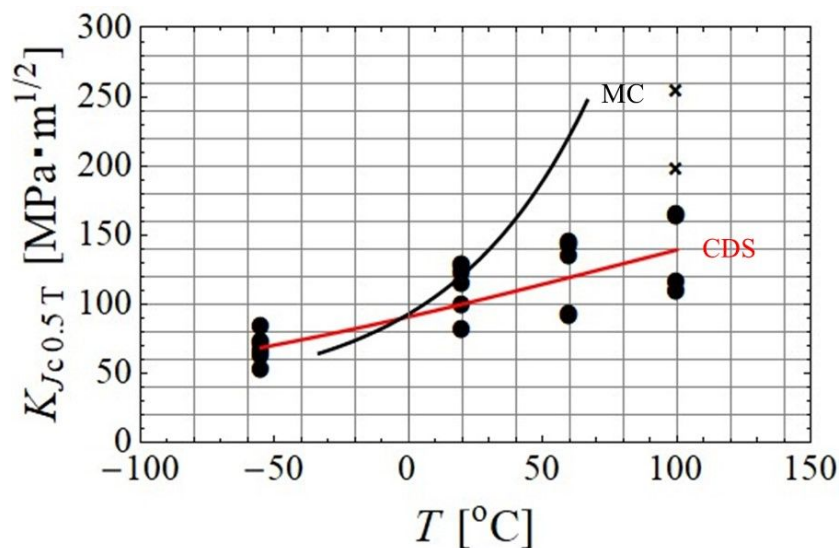


図4. CDS 法と ASTM E1921 MC による J_c 温度依存性予測比較 (SCM440)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Meshii Toshiyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Spreadsheet-based method for predicting temperature dependence of fracture toughness in ductile-to-brittle temperature region	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Mechanical Engineering	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/1687814019870897	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Meshii Toshiyuki, Yakushi Goh, Takagishi Yoichi, Fujimoto Yohei, Ishihara Kenichi	4. 巻 111
2. 論文標題 Quantitative comparison of the predictions of fracture toughness temperature dependence using ASTM E1921 master curve and stress distribution T-scaling methods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Failure Analysis	6. 最初と最後の頁 104458-1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.engfailanal.2020.104458	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Meshii Toshiyuki	4. 巻 100
2. 論文標題 Failure of the ASTM E 1921 master curve to characterize the fracture toughness temperature dependence of ferritic steel and successful application of the stress distribution T-scaling method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 354~361
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tafmec.2019.01.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 飯井俊行	4. 巻 85
2. 論文標題 ASTM E1921のマスターカーブに適合しないフェライト鋼に関する一考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 18-00431-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.18-00431	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ishihara Kenichi、Hamada Takeshi、Meshii Toshiyuki	4. 巻 90
2. 論文標題 T-scaling method for stress distribution scaling under small-scale yielding and its application to the prediction of fracture toughness temperature dependence	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 182 ~ 192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tafmec.2017.04.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ISHIHARA Kenichi、SHIMOIKE Toshinori、MESHII Toshiyuki	4. 巻 83
2. 論文標題 応力分布Tスケールリング法適用による圧縮残留応力付与時破壊靱性値の予測	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 17-00323-1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Meshii Toshiyuki、Ishihara Kenichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Fracture Toughness Prediction under Compressive Residual Stress by Using a Stress-Distribution T-Scaling Method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 6-1 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met8010006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Meshii Toshiyuki
2. 発表標題 Comparison of ASTM E1921 master curve and stress distribution T-scaling method to predict fracture toughness temperature dependence in the ductile-to-brittle transition temperature region
3. 学会等名 ICSID2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Meshii, T. and Ishihara, K.
2. 発表標題 Application of the T-scaling method to predict fracture toughness under compressive residual stress in the transition temperature region
3. 学会等名 ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Inoue, T. and Meshii, T.
2. 発表標題 Prediction of fracture toughness temperature dependence over a wide temperature range using simplified and direct scaling method
3. 学会等名 ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakano, H. and Meshii, T.
2. 発表標題 Application of T-scaling method to account for the effects of notch acuity on notch fracture toughness in the ductile-to-brittle transition temperature region
3. 学会等名 ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野浩樹, 飯井俊行
2. 発表標題 延性 脆性遷移温度域材での破壊靱性値のき裂とノッチの連続性のTスケーリング法による説明
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第55期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Meshii Toshiyuki、Ishihara Kenichi、Nakano Hiroki
2. 発表標題 Application of SDS method to predict fracture toughness temperature dependency of A533B steel
3. 学会等名 ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ishihara Kenichi、Hamada Takeshi、Meshii Toshiyuki
2. 発表標題 Prediction of the temperature dependence on fracture toughness by new stress distribution scaling method
3. 学会等名 ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上崇史、飯井俊行
2. 発表標題 SDS法による広範囲の温度に対する破壊靱性値予測の検証
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第55期総会・講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

福井大学研究者総覧 http://t-profile.ad.u-fukui.ac.jp/profil/ja.c48cca1436851576520e17560c007669.html google scholar citation https://scholar.google.co.jp/citations?user=HD-5QckAAAAJ&hl=ja Web of Science, Researcher-id https://publons.com/researcher/1483100/toshiyuki-meshii/ ORCID https://orcid.org/0000-0001-5496-6087 Researchgate https://www.researchgate.net/profile/Toshiyuki_Meshii 研究室HP http://ffg.mech.u-fukui.ac.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----