

特集：やさしい破壊力学

溶接構造物のぜい性破壊防止と破壊力学

大 阪 大 学
大 畑 充

1. はじめに

溶接構造物においては、必要な強度や剛性などの性能を維持しながら、設計の合理化を行っても使用中に致命的な破壊を起こさないことが求められる。そのため、溶接構造を設計する際には、対象構造物の使用環境に応じてどのような「破壊」が起こりうるかを想定し、その「破壊」の条件を満たさないように材料や溶接プロセスを選定し、また部材寸法を決定することになる。したがって、溶接技術者にとって、材料の「破壊」を理解し、「もの」の強度（破壊強度）を量るすべを知っておくことも重要となる。それには、多種多様な環境下で様々な外力にさらされる溶接構造部材の破壊強度を支配する要因は何か、またそのメカニズムを理解しておくことが重要で、適切な材料選定や施工を行う上で必要な知識となる。

溶接構造物の性能を打ち切る破壊のなかで、甚大な被害につながるおそれのある「ぜい性破壊」を防止する上で必要となる耐破壊性能評価の基礎になるのが「破壊力学」である。溶接構造部材の耐破壊性能をいかにして評価するのか、また破壊を起こさないように材料、溶接施工、構造設計の観点から何に留意すべきか、その答えを「破壊力学」が導いてくれる。

2. 「破壊力学」に基づくぜい性破壊評価の基礎

本特集記事「破壊力学とは？」で解説があったように、破壊力学では、一般に構造物中の亀裂の厳しさを作用外力や亀裂寸法の関数である破壊駆動力 R を用いて表現し、それに対応する破壊抵抗値（破壊じん性） R_c との大小関係、すなわち

$$\text{破壊駆動力} : R(K, \delta, J) \geq R_c(K_c, \delta_c, J_c) : \text{破壊抵抗 (破壊じん性)}$$

を破壊発生条件と考える。このような破壊駆動力としての特性を備えた指標を「破壊力学パラメータ」とよぶ。特に、線形破壊力学における応力拡大係数 K は次の形で与えられ、亀裂寸法 c と外力 σ 、さらに部材と亀裂の形状によって決まる係数 F のみの関数で表される。種々の実用上重要な部材に対して F が求められており、簡易評価のための近似式も提案されている¹⁾。

$$K = \sigma \sqrt{\pi c} \cdot F \quad (1)$$

したがって、対象部材が決まれば、応力拡大係数 K （あるいは破壊じん性 K_c ）、亀裂寸法 c と外力 σ の3つの特性のうち、2つの特性を与えれば残りのパラメータが決定できることになる。具体的には、破壊力学を適用することで、図1に示すように、ぜい性破壊を対象とした以下の3つの評価が可能になる（図中の番号(1)、(2)、(3)はそれぞれ以下の評価フローと対応している）。

- (1) 構造部材の破壊強度（破壊性能）評価：主として設計・製造時に構造部材に見込まれる亀裂を想定し、所定の強度が確保できるかを評価（破壊じん性 K_c と亀裂寸法 c の2つの特性から強度 σ を評価）。

- (2) 許容欠陥評価：構造製作時あるいは供用中に見つかった欠陥が構造性能（安全性）確保に許容できるものであるかの評価（供用適合性評価：FFS (Fitness-For-Service) assessment）（破壊じん性 K_c と想定外力 σ の2つの特性から許容欠陥寸法 c を評価）。
- (3) 材料の破壊じん性要求：主として設計・製造時に、構造部材に見込まれる亀裂と供用中に想定される外力から、材料に要求すべき破壊じん性値を決定（想定外力 σ と想定欠陥寸法 c の2つの特性から必要破壊じん性 K_c を評価）。

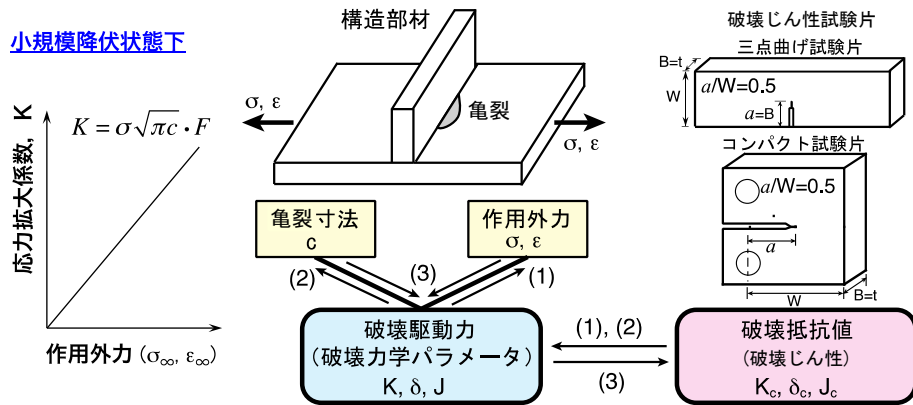


図1 線形破壊力学のぜい性破壊評価への活用法

3. 破壊力学をベースとする工業的破壊評価法の基礎

3.1 弾塑性破壊力学パラメータ

一般に、鉄鋼材料など金属材料からなる実構造部材では、亀裂の先端で比較的大きな塑性変形を伴って破壊する場合が多い。このような、塑性域の大きさが亀裂寸法などに比べて無視できなくなる大規模降伏状態での破壊を扱う場合、応力拡大係数 K はもはや破壊力学パラメータとしての意味を失ってしまう。そこで、大規模降伏状態下での破壊を取り扱うために、Wells や Cottrell によって CTOD、 δ (Crack Tip Opening Displacement：亀裂先端開口変位) が、また Rice により J 積分なる新たな破壊力学パラメータが提案された。

図1に示した破壊力学に基づいた評価において鍵となるのが、評価対象部材が決まれば、破壊駆動力となる破壊力学パラメータが、亀裂寸法と外力のみの関数として表されることである。それに対し、図2に示すように、大規模降伏下まで拡張した破壊力学パラメータである CTOD や J 積分は、亀裂寸法 c と外力 σ だけでなく、材料の加工硬化特性（加工硬化係数 n ）の影響も受ける。そのため、あらゆる材料、あらゆる構造要素に対して破壊駆動力を与えることは現実的には不可能で、工業的適用のためには簡便化が図られる必要がある。

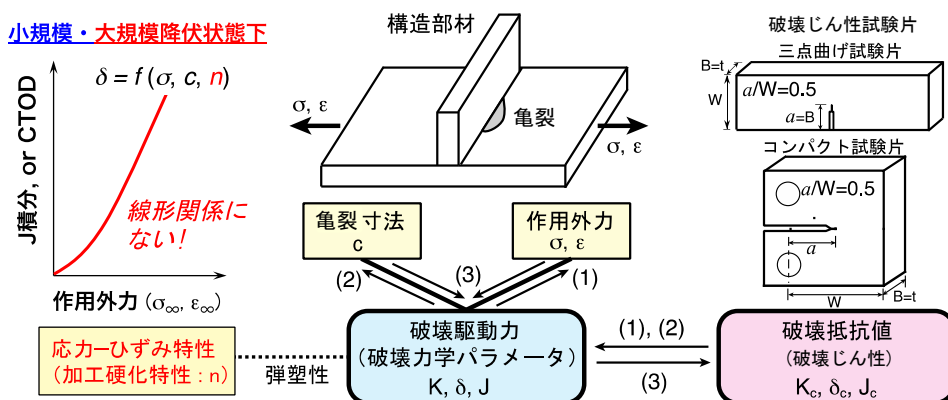


図2 大規模降伏を考慮したぜい性破壊評価（弾塑性力学を用いた破壊評価の特徴）

3.2 工業的破壊評価法（CTOD デザインカーブ法）

国内外において、弾塑性領域での破壊まで扱おうとする工業的な種々の基準、規格が取りまとめられており、大きく分けて CDF (Crack Driving Force : 亀裂駆動力) と FAD (Failure Assessment Diagram : 破壊評価線図)法とよばれる手法が適用されている。これらは、工業的な近似の方法が異なるものの、いずれも破壊力学に基づいた手法であり本質的には同じ手法と言える。ここでは、我が国の工業的規格として採用されている CDF 法（通称 CTOD デザインカーブ法）について紹介する。

欠陥を含む構造物の破壊評価法（あるいは欠陥評価法）が、1960年代の Wells のアイデアに基づいて、1971年にイギリスの TWI の Burdekin、Dawes により初めて手法として構築され、現在、デザインカーブ法と呼ばれている。その基礎は、破壊駆動力として弾塑性破壊力学パラメータである CTOD δ （あるいは J 積分）と外力である歪 ε_∞ とを関連づけるものであり、小規模降伏状態との整合性を考慮した次式が起源となっている。

$$\delta = 2\pi\varepsilon_Y a \begin{cases} (\varepsilon_\infty / \varepsilon_Y)^2 & \text{for } (\varepsilon_\infty / \varepsilon_Y) \leq 0.5 \\ (\varepsilon_\infty / \varepsilon_Y) - 0.25 & \text{for } (\varepsilon_\infty / \varepsilon_Y) > 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 a は想定亀裂寸法、 ε_Y は材料の降伏歪である。外力 (σ_∞ , ε_∞) が大きくなると破壊駆動力である CTOD δ （あるいは J 積分）が大きくなり、また、亀裂寸法 a が大きくなると同じ外力に対して破壊駆動力が大きくなる。これにより、図3に示すように、破壊駆動力である CTOD（あるいは J 積分）が同じパラメータを用いて決定された当該材料の限界値（限界 CTOD、 δ_{mat} あるいは限界 J 積分、 J_{mat} ）に達したときに破壊が生じるものとして評価される。このような破壊評価法を CDF 法と呼んでおり、駆動力と限界値を直接比較することで評価が行われる。

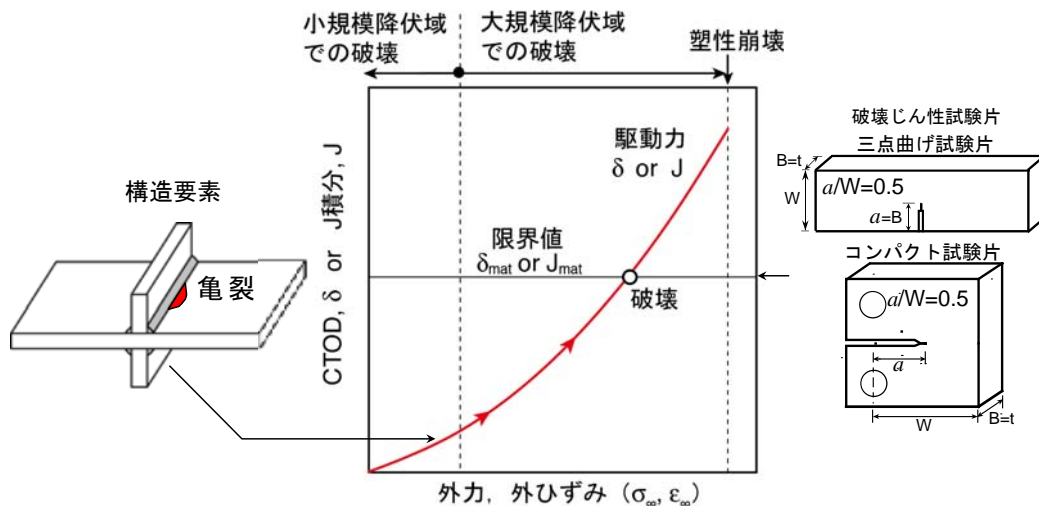


図3 CDF 法による構造部材の破壊評価法

本来、弾塑性領域（大規模降伏域）での破壊駆動力（CTOD と外力との関係）は、材料の加工硬化特性の影響を受けるため、そのままでは汎用的な評価手法とはならない。これに対して、多くの実験あるいは FEM の援用による材料の加工硬化特性の影響の検討に基づき、継手の耐破壊性能を危険側に評価することがないように設定された「CTOD デザインカーブ」なるものが提案されている。代表的な工業的デザインカーブに、我が国の日本溶接協会規格 WES 2805²⁾で定める式(3)のデザインカーブがある。

$$\delta = \varepsilon_Y \bar{c} \left(\frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{e}{\varepsilon_Y} \right)^2 \quad : \left(\frac{e}{\varepsilon_Y} \right) \leq 1 \quad (3)$$

$$\delta = \varepsilon_Y \bar{c} \left(\frac{\pi}{8} \right) \left\{ 9 \left(\frac{e}{\varepsilon_Y} \right)^2 - 5 \right\} \quad : \left(\frac{e}{\varepsilon_Y} \right) > 1$$

想定亀裂には表面亀裂や埋没亀裂などの種々の亀裂があるが、それらの亀裂寸法を一般化するため、同じ応力拡大係数を示す無限板の板厚貫通亀裂に置き換え、その亀裂長さ \bar{c} を等価貫通亀裂寸法として採用している。また、欠陥の存在が構造部材の剛性に影響を与えないような応力集中部（構造的な不連続部）に存在する場合を対象としていること、および外力として局所的な歪 e を採用していることに特徴がある。この局所的な歪は「 $e = e_1 + e_2 + e_3$ 」で定義され、

- (1) 外力による歪 e_1
- (2) 溶接部における残留応力による歪 e_2
- (3) 形状的不連続による歪集中による歪増分 e_3

が加味されている。すなわち、破壊駆動力に、溶接残留応力や歪集中による歪増分を全て取り込んで評価しようとするものである。図4は、使用する材料の破壊じん性試験結果から、想定亀裂寸法の亀裂が存在する部材が想定外力条件にさらされた場合の安全性を、CTOD デザインカーブを用いて評価する手順を示したものである。この図のケースでは、破壊じん性値 δ_c が破壊駆動力 δ を上回っており、この部材は安全である（外力や亀裂は許容できる）ものと判定される。

このように、CTOD デザインカーブ法では弾塑性領域での亀裂部材の破壊を扱うものの、材料の加工硬化特性の影響を安全側に配慮し、応力拡大係数と同様に亀裂寸法と外力のみで破壊駆動力を与えており、工業的破壊評価法として適用されている。

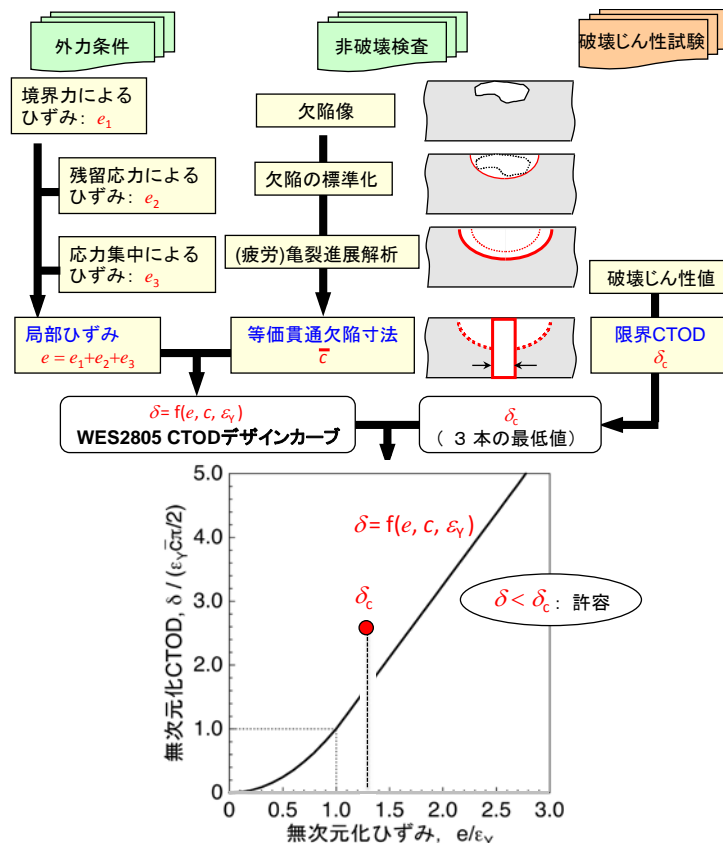


図4 CTOD デザインカーブを用いた構造部材の安全性評価手順

4. 溶接構造物のぜい性破壊評価・防止のための留意点

4.1 溶接部の力学的特徴

一般に、鋼の溶接では、母材が熱やひずみの履歴を受け、さらに熔融・凝固現象を伴う。また、溶接熱源によって母材が局部的に急速加熱・急速冷却されるため、溶接部には熱応力・熱変形が発生することは避け難く、それによって高温で塑性変形さえ生じる。そのため、一般に溶接部の材質は母材とは異なったものとなる。また、室温に冷却後には継手に応力や変形（それぞれ溶接残留応力、溶接変形という）が残ることがある。図5は、鋼の溶接によって形成される継手部の主な力学的特徴（ぜい性破壊への影響）をまとめたものである。一般に、構造部材を溶接により組み立てる場合には、必然的に溶接部は構造的な不連続部となり、これが応力／ひずみ集中をもたらす。さらに、溶接部近傍においては、前述の理由から力学的特性の変化は避けられず、大別して、以下のような典型的な特徴を有することになる。

- ① 材質変化に伴う強度・延性などの強度不均質およびじん性不均質の存在
- ② 溶接欠陥、継手の形状的不連続などによる応力／ひずみ集中源の発生
- ③ 溶接残留応力の存在

このような溶接部における力学的特徴は、継手の破壊性能に大きく影響を及ぼすことから、図1、図2で示した3つの破壊力学評価を行う上でそれらをどのように取扱うべきかを十分に理解しておく必要がある。

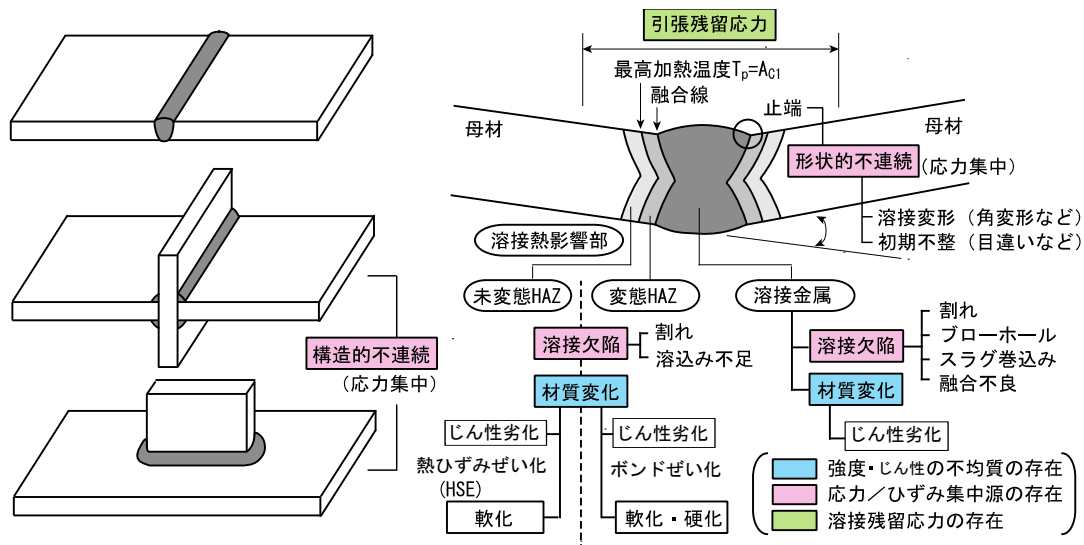


図5 鋼溶接部の力学的特徴（ぜい性破壊への影響）

4.2 継手のぜい性破壊評価・防止のための留意点

これまで述べてきた「破壊力学」に基づく破壊評価法から、溶接構造部材の破壊強度や破壊性能（安全性・健全性）は、破壊駆動力（亀裂寸法と作用が外力の関数である破壊力学パラメータ）と、破壊じん性（破壊力学パラメータを指標とした破壊抵抗値）の両因子の影響を受けることがわかる。したがって、どちらの要素に影響を及ぼす因子も破壊強度や破壊性能に影響をもたらすことになる。

図6に、図5に示した溶接部の力学的特徴が、破壊の駆動力かあるいは破壊抵抗値（破壊じん性）のどちらに影響をもたらすかを整理して示した。この中で、特に多層溶接による熱影響部（溶接HAZ：Heat Affected Zone）において生じる局部的なぜい化や硬化・軟化によるじん性の不均質（①）は破壊抵抗値に直接影響を及ぼす。一方で、溶接部に存在（あるいは生成）する亀裂状の欠陥はぜ

い性破壊の芽となりやすく、大きな欠陥になると応力／ひずみ集中源 (②) となり破壊駆動力に影響して継手性能に影響を及ぼす。また、溶接変形 (特に角変形) や初期不整 (特に目違い) についても局所的な応力集中 (②) をもたらすことから外力に重畳されることで破壊駆動力を高める場合がある。溶接残留応力 (③) (引張残留応力) は、溶接線方向では材料の降伏応力レベルになり、同じく外力に重畳されることにより破壊駆動力を高めることで破壊性能に影響を及ぼす。一方、強度的不均質 (①: 母材、溶接金属、溶接熱影響部で強度が異なること) は、破壊抵抗値に影響を及ぼす場合があるが、破壊駆動力にも影響を及ぼす場合がある。そのため、強度的不均質の程度が大きい (15%程度以上) 継手の破壊評価においては、溶接部、特に溶接金属と母材 (あるいは熱影響部) の間の強度的不均質にも配慮する必要が生じる。

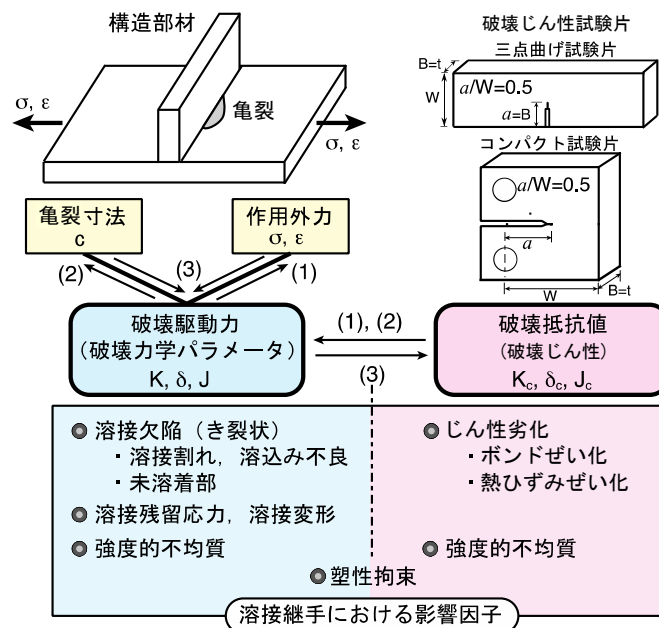


図6 破壊力学評価における溶接部の力学的特徴の位置付け

このように、溶接部の力学的特徴が破壊抵抗値と破壊駆動力のどちらにも影響を及ぼすことで継手性能に影響を及ぼすかを十分理解しておくことで、材料、溶接施工、構造設計のあらゆる観点からぜい性破壊防止策を講じることが可能となる。

5. おわりに

本稿で紹介した破壊力学に基づく継手の破壊評価法は、簡便な工業的手法として広く活用されており、溶接構造部材のぜい性破壊の防止に役立てられている。一方で、このような手法を適用すると、しばしば過度に安全側の評価結果を与える場合があることも知られている。特に、この傾向は高い降伏比 YR (引張強さに対する降伏応力の比) を有する高強度鋼において顕著であり、より合理的な評価を追求するには、構造部材とじん性試験片で異なる「塑性拘束度」の違いが破壊限界値に及ぼす影響を考慮する必要があることが指摘されている。これに対して、我が国で実施された研究成果であるじん性補正手法³⁾が国際標準化 (ISO 27306、Method of Constraint Loss Correction of CTOD Fracture Toughness for Fracture Assessment of Steel Components : 2009、2016⁴⁾) されている。そこでは、破壊が生じるときの構造要素の CTOD と、破壊じん性試験片の CTOD の比 (等価 CTOD 比と呼ばれる) が、材料の加工硬化特性に応じて与えられており、破壊じん性試験で得られる限界値を構造要素の限界値

に適切に補正することができ、より合理的な破壊評価に活用できる。このように、破壊力学をベースとした工業的な破壊評価法に、ISO 27306 によるじん性補正法を取り入れることで、より合理的な破壊評価が可能となり、今後、広く活用されることが期待される。

参考文献

- 1) 例えば, 日本材料学会 : Stress Intensity Factors HandBook, Pergamon Press (1987).
- 2) WES 2805-2011 : 溶接構造物の脆性破壊強度評価手法, (社) 日本溶接協会 (2011).
- 3) F. Minami, M. Ohata, H. Shimanuki, T. Handa, S. Igi, M. Kurihara, T. Kawabata, Y. Yamashita, T. Tagawa, Y. Hagihara : Method of Constraint Loss Correction of CTOD Fracture Toughness for Fracture Assessment of Steel Components, Engineering Fracture Mechanics, Vol.73, No.14, pp.1996-2020 (2006).
- 4) ISO 27306 : Method of Constraint Loss Correction of CTOD Fracture Toughness for Fracture Assessment of Steel Components (2016).

<略歴>

大畑 充 (おおはた みつる)

1993年 大阪大学 工学部 生産加工工学科 卒業
1995年 大阪大学 大学院 工学研究科 生産加工工学専攻 博士前期課程修了
1997年 大阪大学 大学院 工学研究科 生産加工工学専攻 博士後期課程修了
1997年 大阪大学 大学院 工学研究科 助手
2001年 スロベニア マリボル大学 客員研究員
2001年 ドイツ GKSS 研究所 客員研究員
2004年 大阪大学 大学院工学研究科 助教授
2007年 大阪大学 大学院工学研究科 准教授
2016年 大阪大学 大学院工学研究科 教授