

製鉄設備管理における数値解析適用

Numerical Analysis for Iron-making Equipments Management

清 末 考 範*
Takanori KIYOSUE石 森 裕 一
Yuuichi ISHIMORI

抄 録

多くの製鉄設備は大荷重と高温の厳しい条件下で使用され、また使用期間も長期にわたる特徴がある。このため、重要設備の管理レベル向上のためには、亀裂発生の可能性と最終破壊にいたるまでの亀裂進展速度を勘案した点検・補修周期の設定が必要となる。また鋳物のように初期欠陥内在が避けられない機器は製作段階で亀裂進展を考慮した検査基準の設定が必要となる。形状や使用条件が複雑な実際の製鉄設備において、破壊力学に基づく亀裂進展評価のためには数値解析の活用が有効である。実設備に適用する数値解析の精度向上の取り組みと、解析結果を設計や設備管理に反映した事例を紹介した。

Abstract

Many of iron-making equipments are used under severe conditions of heavy load and high temperature, and they are used over long period. In order to improve management of important equipments, we have to set inspection interval and repair cycle with considering of possibilities of crack initiation and propagation up to final destruction. Also castings with initial defects must be set inspection criteria in consideration of crack propagation possibility. The application of numerical analysis is valid for crack growth assessment of actual equipments with complicated shapes and use conditions. In this report, we introduce studies on accuracy improvements of numerical analysis, and cases of equipments management based on numerical analysis.

1. 緒 言

製鉄設備は大荷重、時には高温の厳しい条件下で材料を取り扱い、また設備の使用期間も長期にわたる特徴がある。このため機械設備には経年劣化で亀裂等の損傷が生じうる前提での維持管理が求められる。

製造時の疲労設計や、稼働後の設備の破壊力学に基づく亀裂進展を考慮した検査及び余寿命評価について、原子力分野の圧力容器では ASME に評価手法が示されている。同様の手法を製鉄設備の重要な機器に適用しようとした時に課題となるのが、単純な配管や容器ではない実際の製鉄設備において予想される損傷進展と実際の損傷進展の関係を検証したデータがほとんどないことである。評価する場所の応力状態と損傷進展の両者を照らし合わせるために、前者については実測できればいいが、実際は直接測定することが困難であるため数値解析による応力推定を行うことになる。また後者の損傷進展についても、損傷が点検で顕

在化したときの情報を基にするため、情報量が少ない。

数値解析による応力評価が実際に発生している応力と同等なのかを考えたとき、応力発生的前提となる外力及び熱応力の妥当性確認は間接的にならざるをえない。設備内の部品同士が完全に接合されていない場合は、接触条件が力の伝播に大きく影響する。また塑性領域に達する大きな熱応力発生が不可避なものがある中で、高温時の材料物性や接触部での伝熱条件等が結果の正しさの外乱として大きく影響する。損傷進展の情報についても大きな設備であれば交換もできず分解しての詳細調査はできないので、途中経過は最終状態との整合性をとりながら数値解析を用いて補完する必要がある。

本報では亀裂発生リスクを考慮した維持管理や最適構造設計の一例として数値解析を用いた溶鉄鍋設計・管理の考え方を社内で標準化した取り組みについて紹介する。また製鉄設備に使用される鋳物において内部欠陥を皆無にすることは困難だが、数値解析結果をもとに部位毎に亀裂進展

* 設備・保全技術センター 機械技術部 首席主幹研究員 工博 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

を伴う有害な欠陥寸法を算出し、非破壊検査の検査基準（許容欠陥寸法）に反映した取り組みについても紹介する。

2. 亀裂発生リスクを考慮した溶銑鍋設備管理

2.1 溶銑鍋の負荷

溶銑鍋は最大で 400 トン程度の溶銑を運搬する容器である。通常の機械設計においては弾性領域を超える応力が発生しないよう形状最適化等を行うが、高温材料を取り扱う際の熱応力は剛性を上げても緩和されるわけではない。このため、設備によっては塑性領域に達する高応力下での経時劣化を前提とした設計や設備管理を行う必要がある。

溶銑鍋の構造と操作サイクルを図1に示す。鉄皮とその内部の耐火物で構成されるが、この構造においては鉄皮の側板と底板の接合部（以後、鍋コーナー部）近傍に操作中高い応力が発生する。図2に応力変動の数値解析結果を示す。変動は鍋補修毎の予熱時に生じる低サイクルで大きな振幅の応力と、受銑毎に生じる高サイクルで小さな振幅の応力の2つがある。その主な発生要因は熱的要因と機械的要因に分けられる。熱的要因は耐火物の熱膨張による鍋内側からの圧力と鉄皮内の温度偏差による熱応力がある。また、機械的要因は耐火物や溶銑の重量及び吊り上げ時の鍋全体の自重、溶銑排出時の鍋の傾きの影響によるものである。

2.2 耐火物の高精度モデル化

図3に示すように、鍋コーナー部近傍で発生する応力の中で、予熱段階からの耐火物の熱膨張圧力によるものが占

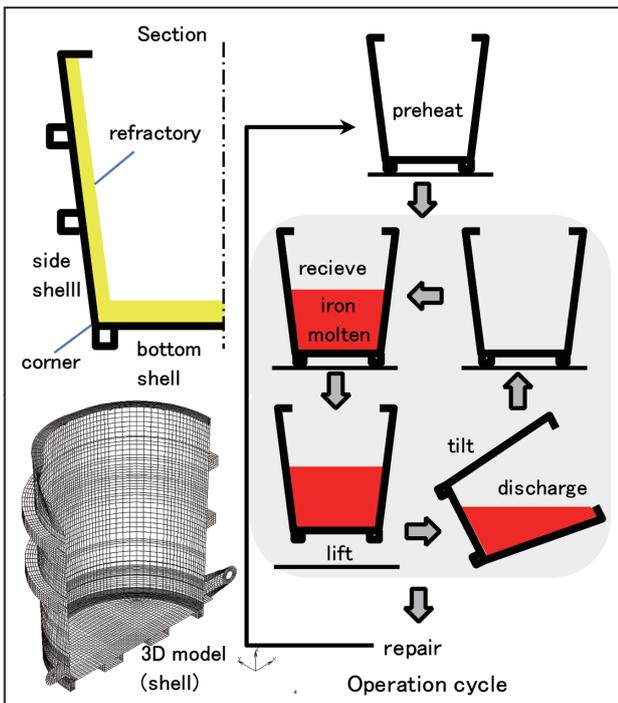


図1 溶銑鍋構造と操作形態
Structure and operation cycle of molten iron ladle

める割合がもっとも大きい。本検討では数値解析に反映する耐火物の物性精度向上のため、図4のような煉瓦熱膨張反力測定装置を用いて耐火物の膨張率、膨張反力を測定し解析の物性値に反映した。耐火物については煉瓦単体でなく目地まで含んだ全体を見たときに、目地の収縮は一定値を超えると変形しにくくなる。そこで、本解析では目地を

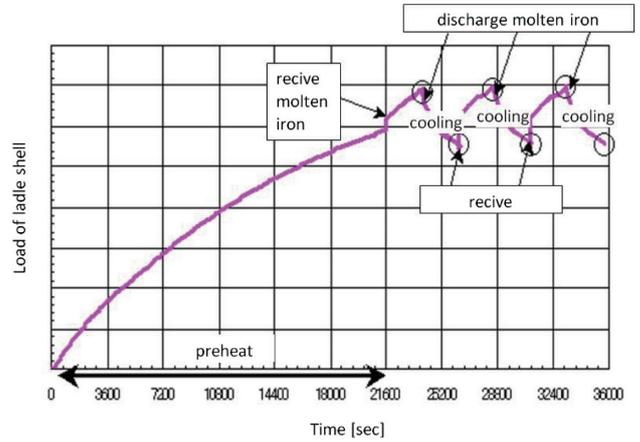


図2 鉄皮負荷変動
Load variation of molten iron ladle shell

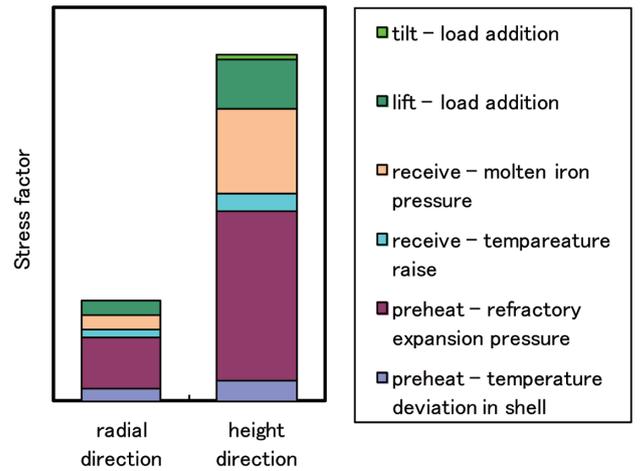


図3 溶銑鍋発生応力の要因分析
Stress factor of molten iron ladle shell

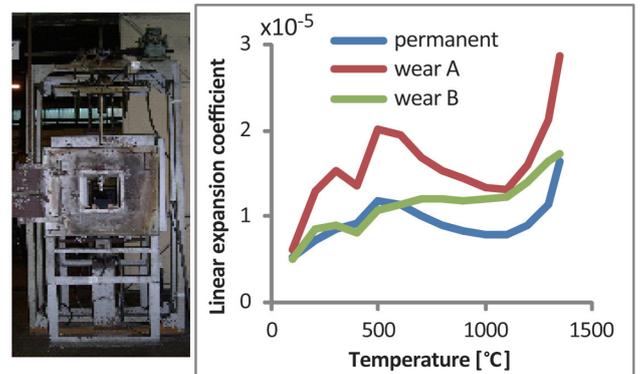


図4 煉瓦熱膨張係数測定
Measurement of refractory linear expansion coefficient

非線形ばねでモデル化して解析の高精度化を図っている。

なお、本解析では主要な検討対象が鉄皮であり、煉瓦に関しては鉄皮に与える熱膨張の圧力がわかればよいので、同一物性の煉瓦は連続体として取り扱った。一方、検討とする煉瓦積み構造体の対象によっては、目地の開きや割れ、倒壊といった損傷メカニズムが絡んでくることも多く、不連続体構造の伝熱も含む機構解析のニーズは極めて高い。このようなニーズに対して、新日鐵住金(株)では川井らの開発した剛体-ばねモデル (RBSM: Rigid Bodies-Spring Model)^{2,3)}をベースにしたNS-Brickを開発した⁴⁾。RBSMは要素が剛体であるため、要素内のひずみや応力状況を把握することはできず、構造の変形や亀裂の進展の取り扱いには限界がある。そこで、変位法だけでなく、応力法も加味した混合型の仮想仕事の原理をもとに、竹内らが開発したハイブリッド型ペナルティ法 (HPM: Hybrid-type Penalty Method)⁵⁾を用いた新煉瓦積み構造体解析プログラムNS-Brick IIを開発し、コークス炉体構造の解析等に適用している。

2.3 応力集中部の亀裂進展評価

解析の精度向上のため、温度については鉄皮温度を実機で測定し、溶鉄/鍋内壁との熱伝達や耐火物間の伝熱境界条件を修正した。また鉄皮応力については耐火物の物性精査に加え、耐火物・鉄皮間の接触も考慮し、解析結果が実機の表面応力測定結果と合うことを確認した。煉瓦物性を見極めて煉瓦膨張圧を含む定量的な応力構成要因の仕分けを行ったことによりFEM解析を用いた有効な検証が可能となった。鍋コーナー部の負荷の要因は以下のとおりである。

- 鍋修繕毎の大振幅負荷は煉瓦膨張の影響が大きい
- 受鉄毎の小振幅負荷は溶鉄静圧がほとんどである
- 大振幅、小振幅とも付け根では曲げ力として作用

次に底板/側板付け根部の鍋応力集中部の疲労寿命及び亀裂進展性の評価を行った。稼働中の亀裂進展管理を考慮するには、応力集中部の詳細検討が必要で、図5に示すように鍋全体の解析結果をもとに弾塑性解析でズームング解析を行う手法を選択した。低サイクルの疲労寿命は全ひずみで評価する。亀裂進展時の脆性破壊の可能性は補修後稼働時の大振幅負荷において、亀裂近傍に発生するひずみから亀裂の成長形態が安定成長か不安定成長かを判定し、使用材質(靱性)における亀裂許容深さを評価する(図6)。

これらを検討することで、亀裂が発生する時期と脆性亀裂発生条件をあらかじめ把握でき、稼働期間中の検査・補修計画を含む定量的な亀裂進展管理方案を鍋形状の種類毎に導出している。使用鋼材の必要靱性値は、鉄皮の材質(降伏応力値ほか)、鍋鉄皮の構造(板厚含む)、操業条件(使用煉瓦種類含む)、溶接止端形状によって変わるため、靱

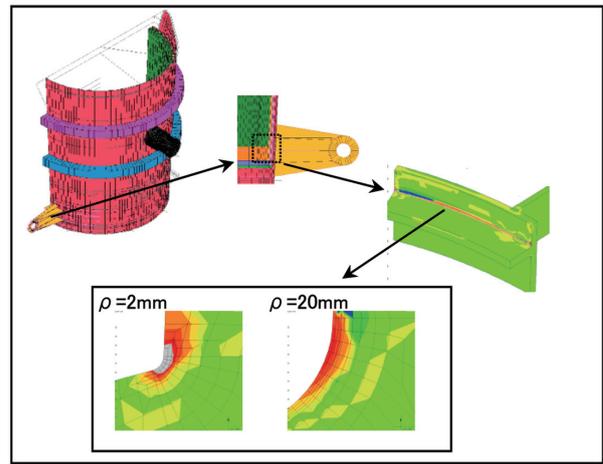


図5 応力集中部のズームング解析
Zooming analysis of hot spot

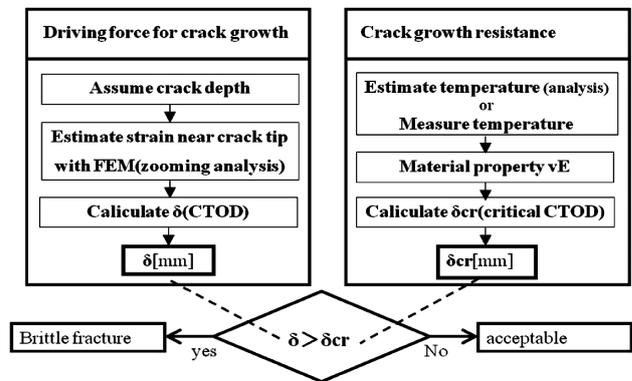


図6 脆性破壊判定フロー
Criteria of brittle fracture

性値の低い材料を使用している鍋については、個別にFEM解析と材料試験データによる亀裂進展性評価(脆性破壊移行性の評価)を行う必要がある。

以上はすでに稼働している鍋についての維持管理に関するものであるが、新作の場合においても鍋コーナー部の疲労寿命評価を行い、鍋の使用要件を満たすように、使用鋼材、溶接止端仕上げ形状、使用耐火物(煉瓦)を設計している。

3. 初期欠陥を有する鋳物の検査

3.1 鋳造欠陥を起点とした亀裂進展の評価

製鉄設備には鋳造によって製作されているものが多数あるが、長年の設備使用により鋳造欠陥を起点に疲労亀裂が進展し設備休止をせざるをえない損傷にいたる例がある。

図7はスラブせん断機の油圧シリンダーで、圧下力30MN、幅約3mの鋳造品(材質SCW490)である。シリンダー表面に亀裂が発見されたため設備を休止したが、表面亀裂部からコアボーリングでサンプルを採取したところ、内部に亀裂の起点となる欠陥が内在していた。欠陥の表面にはEPMAでPの偏析が確認され、鋳造時の欠陥であると推定した。

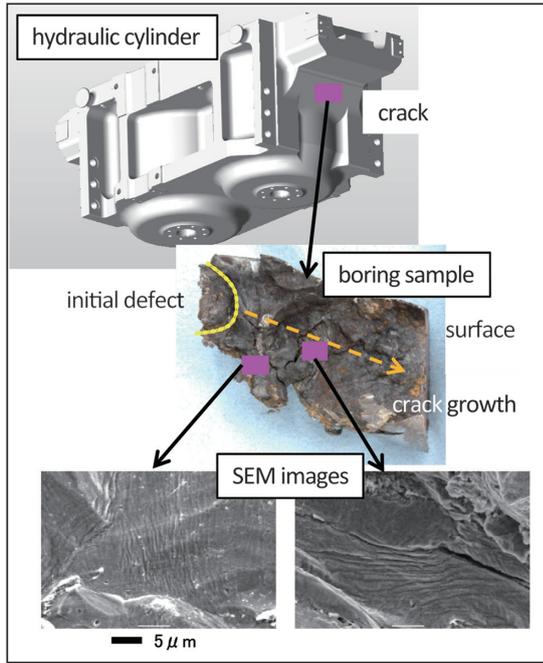


図7 油圧シリンダーの亀裂
Crack on hydraulic cylinder

ここで数値シミュレーションにより得られた応力分布から応力拡大係数範囲を計算し、修正パリズ則で亀裂進展速度を求めることで、内部欠陥から表面に亀裂が到達するまでの荷重回数が計算と実績で合うか確認した(図8)。

修正パリズ則で示される亀裂進展速度は式(1)で示される。

$$\frac{da}{dN} = C \times (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (1)$$

日本溶接協会(WES-2805)や日本鋼構造協会(JSSC)では溶接構造の継手に対して各パラメータを提示しており、平均曲線では以下の値となる^{6,7)}。

$$C = 1.45 \times 10^{-11}, m = 2.75, \Delta K_{th} = 2.45 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

溶接継手においては引張の残留応力が残っている前提となるが、鋳造品について残留応力は大きくはないと想定し、さらに無負荷状態での応力が自重分しかなく負荷状態の応力に対して十分に小さいことから、片振り応力(応力比R=0)として各パラメータを決定した。このときのパラメータは以下となる。

$$C = 5.39 \times 10^{-12}, m = 2.75, \Delta K_{th} = 8.14 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

この結果、亀裂は徐々に進展速度を早めながら約150万回の動作回数で両表面に達し貫通した。一方で実際の動作回数は約140万回であった。このことから、内部欠陥から表面まで亀裂が進展するまでの時間を説明するのに、数値シミュレーションによる応力解析とWESに準拠した疲労亀裂進展解析を用いることの有効性を実機で確認できた。また本検討より、鋳造品では残留応力を無視できるほど小さいと仮定して検討しても問題ないことを確認した(図9)。

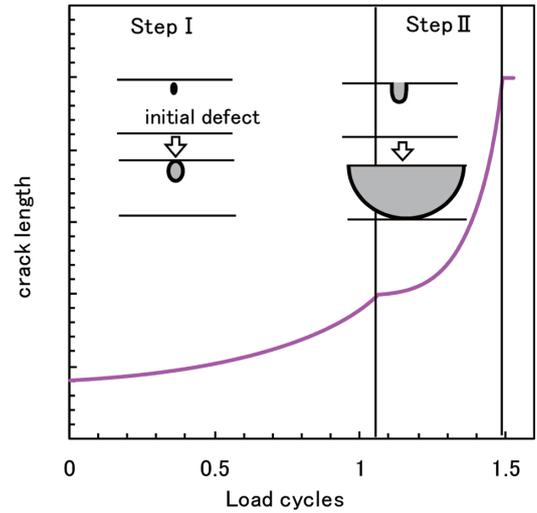


図8 亀裂進展解析
Analysis of crack propagation

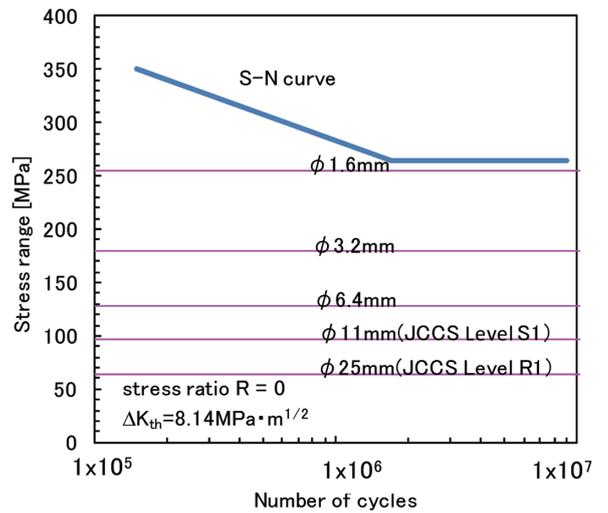


図9 欠陥寸法と許容応力範囲
Relation between defect size and allowable stress range

3.2 鋳造品の非破壊検査合格基準設定

鋳造後の初期欠陥が亀裂の起点であることはわかったが、この欠陥は製造時の超音波探傷検査で合格となっており、実際の欠陥寸法も検査基準に収まるものであった。ただ、欠陥存在部は応力が70MPa程度と比較的高く、亀裂寸法とあわせて求めた応力拡大係数範囲は下限界応力拡大係数範囲を超えるものであった。このように、重要設備が鋳造品である場合、製作時の鋳造欠陥の検査合格判定基準及び検査要領の妥当性が課題となる。

一方で鋳造品の全領域にわたって微小な欠陥も許容しない高水準の検査レベルを定めるのは経済的ではない。そこでまずは一般的な検査合格基準を適用し、その基準で許容される欠陥寸法であると亀裂が進展するような発生応力が高いところはより厳しい検査合格基準を適用するのが、欠陥の影響を最小化するためには妥当である。

具体的にはまず数値シミュレーションにより設備使用状

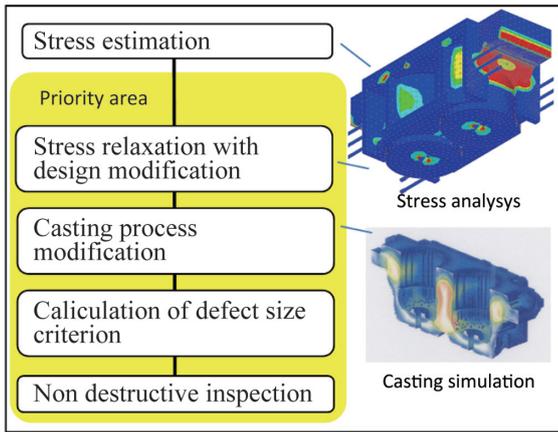


図 10 鋳造時の欠陥緩和と検査の手順
Procedure of defect minimization and inspection

況を想定した発生応力を算出する。ここで発生応力が高いところは重点管理部位として特定し、可能な限り形状修正にて応力緩和を図った。さらに緩和した応力前提で応力拡大係数が下限応力拡大係数範囲を超えない許容欠陥サイズを求める。発生応力の高い箇所は許容欠陥サイズも小さくなるため重点管理部位として厳しい合格基準を適用することになる。本事例においては日本鋳鍛鋼会（JCSS）の S1 基準⁸⁾とした。さらに重点管理部位では欠陥を抑制する鋳造方法が必要になるが、ここでも鋳造シミュレーションを活用し、凝固指数が小さくならないよう注湯位置や冷し金の配置等を見直した。最後に鋳造後の検査では予め決定された検査基準に基づく合格判定を実施し、許容サイズを超えた場合は欠陥の除去、補修を行った。以上の手順をまとめたのが図 10 であり、要点は次の 2 つである。

- 設備使用条件を想定した応力解析の実施による重点管理箇所の特定制と応力に応じた検査基準の決定
- 鋳造解析による重点管理箇所の鋳造欠陥抑制手段の検討
本事例で設計段階から製作、製造検査、その後の維持管

理まで一貫した設備管理を行うことの有効性の確認がとれたことから、圧延機のハウジングのような大型の鋳造品に適用している。

4. 結 言

本報では大型の製鉄設備で破壊力学に基づいた損傷進展評価を行う上で必要となる数値解析の精度向上の取り組みと適用事例について紹介した。

溶銑鍋では全温度での耐火物物性値測定や目地可縮非線形性の考慮、鉄皮と耐火物の接触考慮により応力解析の精度向上を図った。その上で応力集中部に亀裂が発生する時期と脆性亀裂発生条件をあらかじめ把握し、稼働期間中の検査・補修計画を含む定量的な亀裂進展管理方案を鍋形状の種類毎に導出することで溶銑鍋の設備管理に活用している。大型鋳物では残留応力を微小と仮定して亀裂進展評価ができることを確認し、経済的な製造時検査基準の設定を行う方法を示した。

参照文献

- 1) ASME: ASME Boiler and Pressure Vessel Code
- 2) Kawai, T.: J. of the Society of Naval Architects of Japan. 114, 1867-193 (1977)
- 3) 都井, 清末: 日本機械学会論文集, 59 (568), 2858 (1993)
- 4) 山村, 松崎, 藤, 山田, 中川: 新日鉄技報. (391), 143 (2011)
- 5) 竹内, 草深, 武田, 佐藤, 川井: 土木学会構造工学論文集. 46A, 261-270 (2000)
- 6) 日本溶接協会: 溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法. 2007
- 7) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説. 技報堂出版, 1993
- 8) 日本鋳鍛鋼会: 炭素鋼及び低合金鋼鋳鋼品の超音波垂直探傷試験基準, JCSS I4-1984



清末考範 Takanori KIYOSUE
設備・保全技術センター 機械技術部
上席主幹研究員 工博
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



石森裕一 Yuuichi ISHIMORI
名古屋製鉄所 設備部 冷延・めっき整備室
課長