

(解説)

建築・橋梁用部材への鋳鋼品の適用と製品最適化追求への取り組み

森 啓之(工博)*・香川恭徳**・中村茂樹**・古平 准***・堤 一之****

*鉄鋼部門・鋳鋼事業部・技術部 **鉄鋼部門・鋳鋼事業部・産機品営業部 ***鉄鋼部門・鋳鋼事業部・製造部 ****技術開発本部・機械研究所

Kobe Steel's Steel Castings for Building and Bridge Components

Dr. Hiroyuki Mori・Yasunori Kagawa・Shigeki Nakamura・Jun Kodaira・Kazuyuki Tsutsumi

It is relatively easy to manufacture complicated shapes with steel casting. Castings with complicated shapes are particularly suitable for the design of connecting components as well as weldability issues related to the application of such components. As an example, this paper describes casting applications for connecting components used in buildings and bridges. Issues related to chemical composition, heat treatment and simulation techniques in relation to such casting for connecting components are introduced.

まえがき = 鋳鋼品は中空や偏肉など複雑な形状を有する製品に最適である。さらには製造工程が比較的単純であり、過大な設備が比較的少なくても製作できるため、大量生産製品のみならず、形状、材料特性や意匠性など独自設計を取入れて対応することが可能な製品と言える。

近年高性能化、軽量化、意匠性などを考慮してコストミニマイズになるよう製品最適化設計が必要となってきた。建築、橋梁用鋳鋼部材においても、製造開始前に顧客と製造者間で種々の事前検討を行い、製品を最適化することが必須であると言っても過言ではない。さらには部材への要求性能として高強度化のみならず高靱性が強く要求されるようになってきており^{1)~3)}、これからの鋳鋼品メーカーにとっては、迅速に製品仕様を決定するツールとしてこれら製造設計技術のCAE化が必要である。このような背景のもと、当社でもこれまで蓄積された知見をもとに種々の製造設計技術に関する研究・開発を行い、市場ニーズに応えてきている。

本稿では、その一例として、建築・橋梁用鋳鋼部材を

対象として、その製造事例、製造設計技術及び顧客サポートとしての構造解析技術についてCAE化事例を紹介する。

1. 建築・橋梁用部材への適用事例紹介

はじめに、最近当社で製造した建築・橋梁用部材を紹介する。

写真1に(仮称)明治生命さいたま新都心ビル地上部スーパーメガフレーム用鋳鋼ブロックを示す⁴⁾。材質はSCW620であり、構造設計仕様に基づく機械的性質(0.2%耐力、引張強さ、シャルピ吸収エネルギー)はJIS規格値よりも厳しい値が要求された⁴⁾。本製品は重量約6.9t/個で中空構造となっている。これらは合計32個製作され(写真1(a))、スーパーメガフレームの柱梁接合部に組込まれた(写真1(b))。写真1(c)に示すビルは、2002年4月に竣工予定で工事が進められている⁵⁾⁶⁾。



a) スーパーメガフレーム用鋳鋼ブロック
a) Cast block for super mega-frame



b) スーパーメガフレーム完成状況
b) Erection of super mega-frame



c) (仮称)明治生命さいたま新都心ビル完成予想図
c) Meiji Life Office Tower at Saitama new urban center

写真1 (仮称)明治生命ビルさいたま新都心ビル地上部スーパーメガフレーム用鋳鋼ブロック
Photo 1 Cast block for super mega-frame on Meiji Life Office Tower at Saitama new urban center

写真2に神戸ウイングスタジアムの屋根部に使用された鋳鋼品の一例を示す。写真ㄨ(a)~写真ㄨ(c)に支承下部ノード(重量約2.8ton/個,製作数12個),キールノード(重量約1.8ton/個,製作数8個),トラスノード(重量約3.0ton/個,製作数48個)を示す。それぞれの材質はSN520B及びSN490B相当の鋳鋼材である。本スタジアムは日韓共同開催されるFIFAワールドカップにも使用され,それに向けた一次整備は2001年10月に完成した。

写真3に電通新社屋プロジェクト用の曲げダンパ仕口鋳鋼品(写真ㄨ(a))を示す。本製品の材質はSCW480であり,重量は約2.2ton/個で合計48個製作された。写真ㄨ(b)は仕口鋳鋼品をビル内に組込んだものであり,このビルは2002年10月に完成予定である(写真ㄨ(c))。

写真4に橋梁部材の一例として,シンガポールCHANGI空港地下鉄ターミナル内歩道橋メインサポートを示す。本製品の材質はSCW620であり,重量は約15ton/基で確性試験用のプロトタイプ品を含めて5基製作された。

2. 建築・橋梁用鋳鋼品の製造設計技術

前述したような種々の鋳鋼品を製造する際には,事前に顧客要求仕様を満足させるために製造条件を設計する必要がある。

図1に鋳鋼品の製造工程を示す。顧客より製品図面や材料仕様を頂いて,製造可否検討・鋳造方案作成を行った後,製型・製鋼・鋳込み・熱処理・機械加工を経て出荷される。各製造工程における製造条件設計においては,



a) 支承下部ノード
a) Bearing bottom node



b) 支承下部ノード,トラスノード組込み状況
b) Erection of bearing bottom node and truss node



c) キールノード
c) Keel node



d) トラスノード
d) Truss node



e) 神戸ウイングスタジアム完成状況
e) Erection of Kobe-wing Stadium

写真2 神戸ウイングスタジアムの屋根部に使用された鋳鋼品

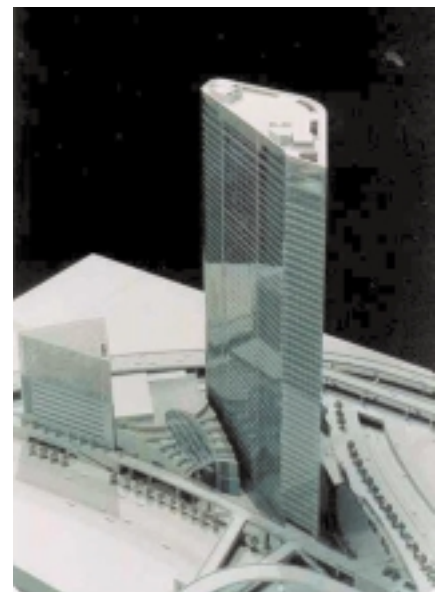
Photo 2 Cast steels used for Kobe-wing Stadium



a) 仕口鋳鋼品
a) Cast steel node



b) 仕口鋳鋼品取付け状況
b) Erection of cast steel node



c) 電通新社屋ビル完成予想図
c) Dentsu Inc.'s headquarter building

写真3 電通新社屋建設に用いられた仕口鋳鋼品

Photo 3 Cast steels used for Dentsu Inc.'s headquarter building



写真4 橋梁用メインサポート鋳鋼品
Photo 4 Main support casting for bridge

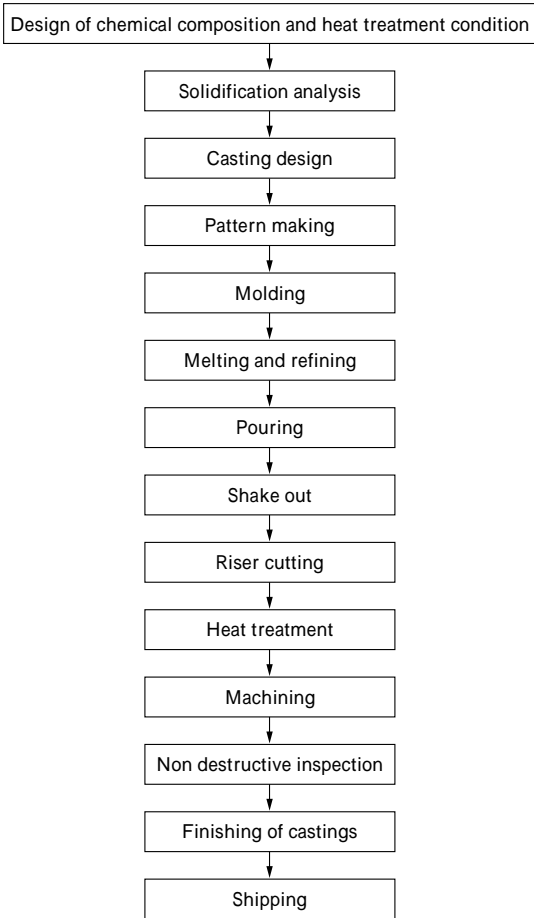


図1 鋳鋼品の製造工程
Fig. 1 Sequence of manufacturing procedure of castings

製造開始前に過去の実績データや知見などをもとに検討を実施するが、場合によっては、数値解析などを用いる場合がある。そこで以下では製造設計にかかわる、鋳造方案設計技術、材料成分・熱処理設計技術、応力解析技術に分けて当社の取組みについて説明する。

2.1 鋳造方案設計技術

図1に示す鋳造方案作成においては、製品図面をもとに付け肉や押湯及び湯道、堰の設計を行う。また必要に応じて鋳込み時の流動解析や凝固解析を実施し、鋳造方案を最適化する。図2に写真1で示した建築ブロックの凝固解析結果を示す。図2は一例として鋳放重量の約57%が凝固したときの固相部、半凝固部、液相部の状態を示したものである。このような結果をもとに凝固進行状況を確認し、指向性凝固が促進されているか確認できる。さらには各部位の温度勾配や凝固速度から引巣判定パラメータを算出することにより製品内部品質の確認も実施することができる。

2.2 材料成分・熱処理設計技術

製品に要求される機械的性質を満足させるためには、機械的性質に大きく影響を及ぼす化学成分や熱処理条件を決定しなければならない。そのためにはあらかじめ材料の強度や靱性を予測する技術が必要となる。図3にそ

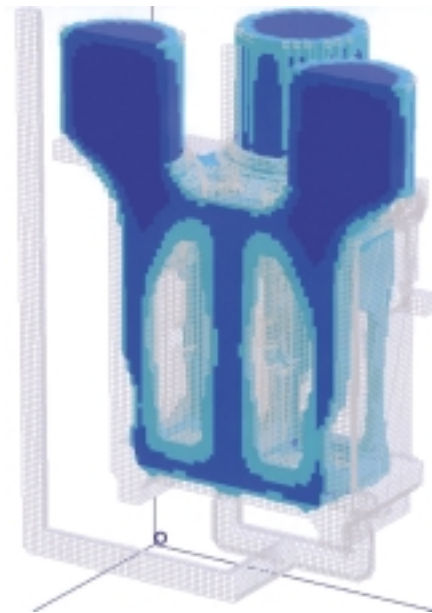


図2 建築用鋳鋼ブロックの凝固解析結果
Fig. 2 Solidification analysis result of cast block for building construction

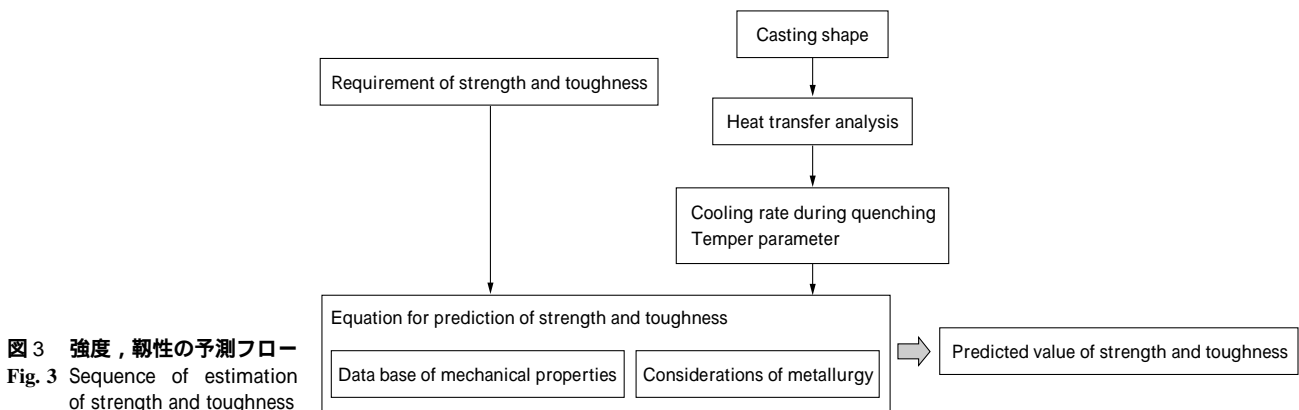
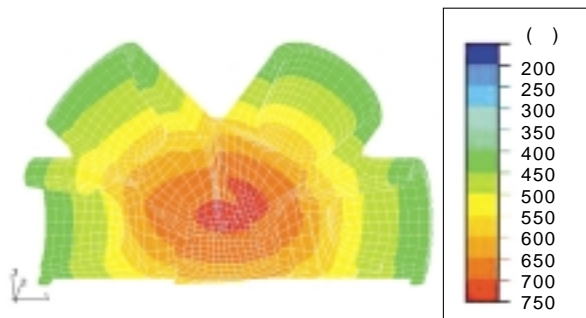


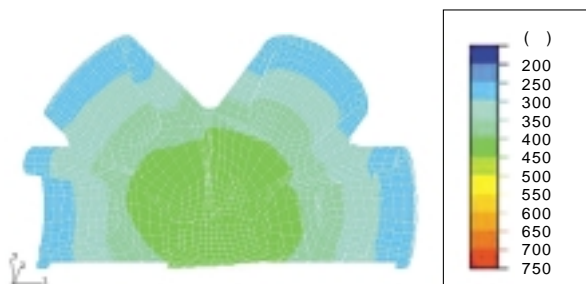
図3 強度、靱性の予測フロー
Fig. 3 Sequence of estimation of strength and toughness

の予測フローを示す。鋳鋼品は部位による肉厚変化が大きい場合が多いが、製品肉厚が異なると熱処理時（焼入れ時）の材料内部の冷却速度が異なり、同一の化学成分であっても機械的性質が異なる。従って、焼入れ時の冷却速度を予測することは機械的性質の予測において非常に重要である。さらには焼入れには空冷（＝焼ならし）、油焼入れ、水焼入れなどがあり、焼入れ条件と冷却速度の関係も把握しておく必要がある。当社では、各種冷却方法ごとの平板の板厚と冷却速度の関係データを有し製造設計に活用しているが、複雑な製品形状の場合や厳しい機械的性質の要求がある場合には、3次元のFEM解析により確認する。図4に曲げダンパ仕口部断面の空冷時の解析結果を示す。図4には冷却開始から60分後と270分後の温度分布を示しているが、このような結果をもとに各部位の冷却速度を算出することができる。

材料の機械的性質には熱処理条件とともに材料化学成分が大きく影響する。建築部材によく使用される溶接構造用鋳鋼品はJIS G 5102で規格化されている。表1にSCW480, SCW550, SCW620の成分規格を示す。このようにJIS規格では各元素の上限が規定されているのみで、所定の機械的性質を得るためにはこの範囲内での詳細な成分設計が必要となる⁷⁾⁸⁾。当社では、これまで種々の化学成分における機械的性質のデータベースを蓄積している。



a) 冷却開始から60分後の温度分布
a) Temperature distribution chart at 60 minutes during air cooling



b) 冷却開始から270分後の温度分布
b) Temperature distribution chart at 270 minutes during air cooling

図4 仕口鋳鋼品の空冷中の温度分布
Fig. 4 Temperature distribution chart of cast steel node during air cooling

表1 SCW材の化学成分範囲(JIS)

Table 1 Chemical composition range of SCW steels on Japanese Industrial Standard

| Steel | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | V | C _{eq} |
|--------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-----------------|
| SCW480 | 0.22 | 0.80 | 1.50 | 0.040 | 0.040 | 0.50 | 0.50 | - | - | 0.45 |
| SCW550 | 0.22 | 0.80 | 1.50 | 0.040 | 0.040 | 2.50 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.48 |
| SCW620 | 0.22 | 0.80 | 1.50 | 0.040 | 0.040 | 2.50 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.50 |

図5に一例としてSCW480材における焼入れ時の冷却速度と引張強さの関係を示す。図中には規格成分内で2種類の化学成分を選定した場合の結果を同時に示している。このように焼入れ時の冷却速度が大きくなるに伴い引張強さが上昇し、また規格内であっても化学成分の影響が大きいことがわかる。

このような熱処理解析技術や材料データベースをもとに機械的性質の予測が可能となる。図6に一例としてSCW480, SCW550において化学成分、熱処理条件をパラメータとした場合の引張強さの予測値と実測値の関係を示す。相関係数は0.97で非常に精度よく予測でき、迅速に顧客のニーズに応えることを可能としている。

これまで引張強さの予測について述べたが、靱性（シャルビ吸収エネルギー）についても同様である。さらにシャルビ吸収エネルギーについては材料の清浄度が大きく影響する。図7に、480MPa級鋳鋼材のS含有量と0におけるシャルビ吸収エネルギーの関係を示す。JIS規格ではS含有量は0.040%以下とされているが、S含有量が小さ

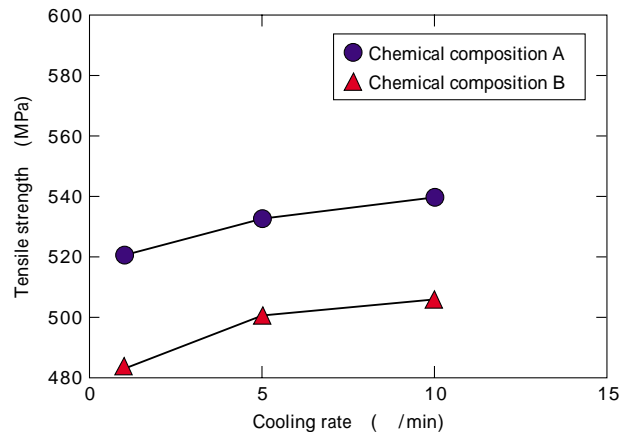


図5 SCW480材における焼入れ時の冷却速度と引張強さの関係
Fig. 5 Relation between cooling rate during quenching and tensile strength on SCW480 steels

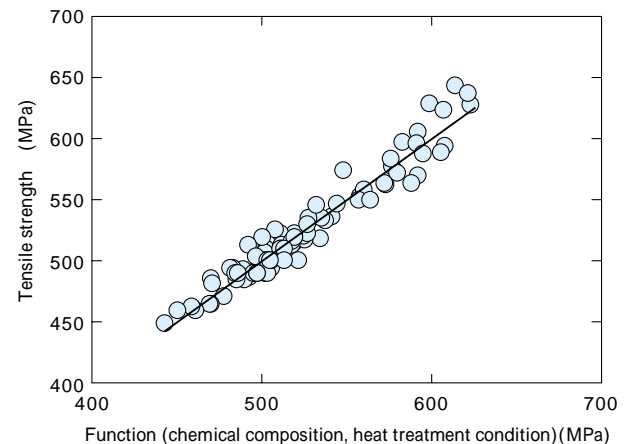


図6 SCW480, SCW550における引張強さの予測結果
Fig. 6 Estimated result of tensile strength on SCW480 and SCW550 steels

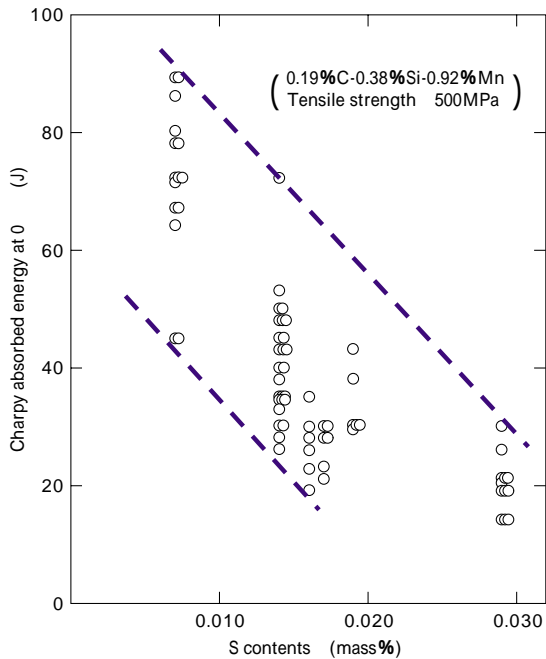


図7 S含有量と0°Cにおけるシャルビ吸収エネルギーの関係
Fig. 7 Relation between S contents and Charpy absorbed energy at 0°C

くなるほど高靱性が確保できることがわかる。そのため当社では、製鋼時に真空炉外精錬法を採用しSの除去を効果的に行っている⁹⁾。

2.3 構造解析技術

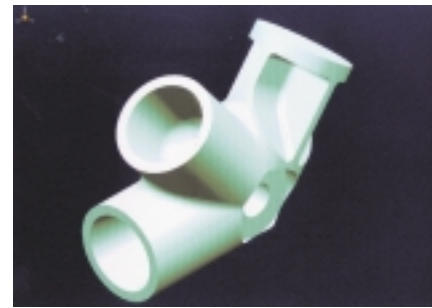
鑄鋼品の詳細な形状は、構造物の安全性と鑄鋼品製作の容易さの両面から検討して決定することが最も望ましい。そのため当社では、顧客への技術サポートとしてソリッドモデルでの3次元FEM解析を行い、部材に発生する応力分布を確認・評価している。図8にその一例として仕口部の発生応力分布を計算した結果を示す。このような部材の発生応力と材料の耐力や疲労強度を比較することによって、詳細に部材の安全性を確認することができる。

3. 今後の取り組み

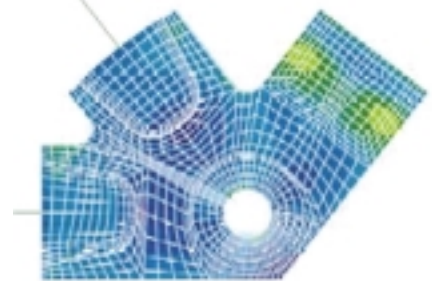
以上、当社の鑄鋼品製造にかかわる設計技術と顧客サポート技術について述べた。これらの要素技術を駆使することにより高性能、意匠性を考慮したコストミニマイズの製品設計が可能になった。すなわち、製造者からの提案もしくは顧客と製造者間で製品形状決定や材料選定などを実施することで製品最適化が追求できるものと考えており、これまで以上に前記活動を推進していきたいと考えている。

むすび = 建築・橋梁部材における構造物用鑄鋼品に対する高強度・高靱性化要求はますます厳しくなるものと考えている。これまで述べた鑄造・設計技術、材料成分・熱処理設計技術、構造解析技術などの要素技術を活用することにより、製品性能はもとよりコストミニマイズした製品最適化を迅速に対応できるものと確信している。今後も鑄鋼メーカーからの提案や顧客と一体化した活動を実施していきたい。

最後に、本稿は前述した建築・橋梁用鑄鋼品の受注にあたって得られた成果をもとに記したものであり、多大



a) 鑄鋼仕口のソリッドモデル
a) Solid model of cast steel node



b) 応力分布解析結果
b) FEM analysis result of stress distribution

図8 鑄鋼仕口の発生応力解析結果
Fig. 8 FEM analysis result of cast steel node

なるご協力を頂いた以下の方々に謝意を表する。

(仮称) 明治生命さいたま新都心ビル用鑄鋼ブロック：
明治生命保険相互会社，(株)日建設計，明生JV，川崎重工業(株)，(株)横河ブリッジ

神戸ウイングスタジアム用鑄鋼品：神戸市建設局，(株)大林組本店一級建築士事務所，大林・神鋼建設事業共同企業体

電通新社屋建設プロジェクト用曲げダンパ仕口鑄鋼品：
(株)電通，(株)大林組一級建築士事務所，電通本社屋建設工事共同企業体，(株)宮地鐵工所，川崎重工業(株)，駒井鉄工(株)
CHANGI 空港地下鉄ターミナル内歩道橋メインサポート：Land Transport Authority, Singapore, Yongnam Engineering & Construction Pte. Ltd.

参考文献

- 1) 吉江慶祐ほか：日本建築学会学術講演梗概集(中国) C - 1 (1999) p.371.
- 2) 土田公司ほか：日本建築学会学術講演梗概集(中国) C - 1 (1999) p.373.
- 3) 小坂橋裕一ほか：日本建築学会学術講演梗概集(中国) C - 1 (1999) p.375.
- 4) 森啓之ほか：R & D神戸製鋼技報，Vol.51, No.1 (2001) p.38.
- 5) 小堀徹ほか：日本建築学会学術講演梗概集(東北) C - 1 (2000) p.559.
- 6) 寺田隆一ほか：日本建築学会学術講演梗概集(関東)，C - 1 (2001) p.897.
- 7) 森啓之ほか：日本鑄造工学会第135回全国講演大会講演概要集，(1999) p.91.
- 8) 中田毅ほか：日本鑄造工学会第137回全国講演大会講演概要集，(2000) p.81.
- 9) 森啓之ほか：R & D神戸製鋼技報，Vol.50, No.3 (2000) p.41.