鑄 鋼 技 術 の 動 向

——品質改善を中心として——

The Trend of Steel Casting Technology
—As Focused on the Improvement of Quality—

沖

進*

Susumu OKI

Key Words: Casting, Metallic Materials, Quality, Material Testing, Strength, Defect, Mold

1. はじめに

鑄鋼品は材質では低炭素鋼から超合金まで、大きさでは数 100 g の精密鑄造品から 500 t の砂型鑄鋼品まで、形状では多くの中子を用いる複雑な形から遠心鑄造品の単純な円筒形までの種々のものを含むが、本稿では重量が数 10 kg から数 100 t にいたる各種材質の砂型鑄鋼品を主な対象として最近の技術の動向を概観しよう。

この分野の生産技術では我が国の技術はおおむね世界最高水準にあるので、本稿では特にことわりのない限りすべて我が国に関して述べる。

鑄造技術にはコスト低減をめざす技術群と製品の高品質化あるいは機能拡大をめざす技術群とがあるが、本稿では本誌の性格を考え鑄鋼品の使用者がより多く関心を持つと考えられる後者の技術群に重点を置く。

以下に項目を分けて次の順序で述べる。まず後段の各品質項目にわたって広く影響を及ぼすものとして鑄型製造方法および溶解精錬法をそれぞれ眺めよう。次に鑄鋼に欠陥がない場合の機械的性質のうち特に重要なものとして低温衝撃値、破壊じん(靱)性値および疲労き(亀)裂伝ば特性について述べ、次に内部欠陥に関して各種欠陥に分けて述べ、さらに構造溶接、非破壊試験および二、三の事項を付け加えよう。

2. 鑄型材および鑄型製造方法

鑄鋼品の鑄型には元来乾燥形が用いられてい

た。乾燥形とは骨材としてのけい(珪)砂に粘結材として粘土と水とを加え突き固めて造形し、数 100°C の高温で乾燥してから鑄込みに用いるものである。1950 年代以降、種々の無機または有機化合物の化学反応によって、成形後の粘結材の硬化を行わせる新しい方法が次々に開発され造形方法は粘結材とともに著しく発展して今日にいたった。これらの方法の多くのものは自硬性鑄型法と呼ばれ、生産性向上に大きく寄与したばかりでなく鑄鋼品の品質向上にも、鑄型の強度が高く、寸法精度が良く、鑄造後に崩壊しやすい等のために大きく貢献した。なかでもフラン系やフェノール系の樹脂を粘結材として利用する有機自硬性鑄型法は、骨材の砂の再使用がたやすくでき、その際に公害を及ぼす廃棄物を出さないという利点のため、無機自硬性鑄型法よりも広く用いられるようになった。

しかし鑄鋼品の後述する内部欠陥の発生に関係して、無機法が有機法に優先して用いられる場合もある。例えばある工場では蒸気タービンケーシングの主形には水ガラス系の無機、中子にはフラン系の有機の自硬性鑄型を用いており、またある工場では原子力発電用大形鑄鋼品に全面的に水ガラス系無機自硬性鑄型を用いている。

他方、鑄型枠の大きさが 2×2 m 程度以下で同一品種を多数生産する場合には、高能率で強力な専用造形機によって生産性・品質を高めることが有利であるから、高速度で働くいわゆる高圧造形機が 1960 年代に現れはじめ、現在では砂に少量のベントナイトと少量の水のみを加え加圧成形した鑄型を直ちに鑄込みに用いる高圧造形法が、中小形多量生産鑄鋼品の主な造形法となっている。本

* 正員、(〒142 東京都品川区旗の台 6-15-16, 自宅)。

法も製品品質の向上に大きな寄与をなした。最近はこの方法が多品種少量生産にも適するように、模型交換を電子頭脳で高速・自由に行えるように改良した造形機も用いられはじめた⁽¹⁾。

さらに高い寸法精度を要求される鑄鋼品は精密鑄造法（インベストメント法）で造らなければならないが、それに用いられる消失模型の新材料が開発された結果、1000 kg までの大形品の精密鑄造が可能となり、これによるステンレス鑄鋼製船用プロペラなどの鑄造が行われている⁽²⁾。

上述のほか造形法の発展は多くあるが、それらは鑄鋼のみならず鑄造全般に共通のものであるから、本稿では述べない。

3. 溶解精錬法

鑄鋼の溶鋼の大部分は塩基性アーク炉で溶解精錬され、その他の部分は高周波誘導炉または酸性アーク炉で溶解・成分調整して用いられる。これらの溶解・精錬の技術は、鑄鋼におけるものと、それより大規模に生産されている圧延鋼におけるものとが基本的には同じである。またしたがって鑄鋼における溶解・精錬技術の発展は圧延鋼におけるその発展に追従する事項が多い。ただ鑄鋼用の溶解炉の大多数のものの容量が10 t 以下というように小さいことや、鑄鋼の成分調整の目標値が他と異なるものもあることなどのため、細部では鑄鋼独自の技術開発が行われている。近年における鉄鋼技術の進歩はめざましく、生産性・品質両面における鑄鋼溶解・精錬上の進歩もこれにくれてはいない。

鑄鋼品の内部の無欠陥性や低温度のじん性などのいっそうの高度化の要求に応ずるためには鋼中に含まれるC, O, N, H, S, Pなどのうちのどれかを極度に減少させる精錬技術が必要になった。同様の目的のため圧延鋼製造においていわゆる炉外精錬法が1950~1970年の間に各種の方法として発達していたが、鑄鋼にもこれら炉外精錬を適用する動きが1975年ごろから盛んになった。炉外精錬法とは溶解炉で大体の成分調整をされた溶鋼を特殊のとりべまたは炉に移し、ここで脱ガス、脱炭、脱酸、脱硫などのうち一部またはすべてを行うことである。この精錬は加熱方式、かくはん方式、O₂、アルゴン、N₂などの気体の吹込み方式、真空の有無などによって多くの種類にわ

かれる。

これらのうち小容量の炉を用い、鑄鋼用として盛んに用いられようとしているのがアメリカで開発されたAOD (argon oxygen decarburization) 法である。これは溶鋼をAOD 転炉という底の深い炉に入れ、炉底付近からO₂とアルゴンまたはN₂との混合ガスを吹き入れ、これによりかくはんとCO生成熱による昇温とを行いながら精錬する方法である。ある研究における一連の試験結果⁽³⁾によれば、炭素鋼鑄鋼の場合、アーク炉のみの精錬による分析値平均値に対してAOD法精錬による分析値平均値は、水素(H)で5.0 ppm 対3.4 ppm, 窒素(N)で78 ppm 対53 ppm, 硫黄(S)で0.008% 対0.002%であった。

鑄鋼におけるAOD法の適用はアメリカでは1976年に20 t 炉ではじめられたのに続き、炭素鋼を含むあらゆる鑄鋼種に行われている。我が国では先進の数箇所の鑄鋼工場でAOD法と同様の機能を有する諸種の炉外精錬法を行っており、AOD法の導入例は少ないが、AOD法の導入は今後急速に増加するとみられている。

これらの精錬法を用いればC%×O%を低くすることができ、したがってSi, Mn, Alのような脱酸用成分を低くすることもできる。これらの成分低減とP, S, N, Hの低減とにより、ステンレス鋼の高度耐食性、その他の鋼の溶接性と低温じん性、大形鑄鋼品の逆V偏析軽減、その他の鑄鋼品の非金属介在物、高温割れ、ミクロ引け巣の低減が行いやすくなるため、この精錬による直接的成本の増加にもかかわらず最終製品の全コストの低減および品質的価値の増大が可能であるとされている。

4. 低温衝撃値

鋼の衝撃値は一般に同一鋼種では引張強さを高めるほど、また試験温度を低くするほど低くなる。したがって所定の引張強さと所定の低温度のもとで高い衝撃値を示すほど鋼の価値が高い。

衝撃値およびその温度依存性は次章で述べる破壊じん性値と密接な関係があるため重視される。また鑄鋼は溶接が有利に適用できることが重要であるから、溶接熱影響部および応力除去焼なまし後の母材部の衝撃値も特に重視される。

一般の構造用鋼におけると同じく、鑄鋼におい

でも低温度での衝撃値を高める研究開発は近年ますます盛んに行われている。以下にその最近の例を挙げよう。高温高压容器用 2%Cr-1%Mo 鋳鋼について衝撃値に及ぼす焼入れ、焼もどし条件、とくに焼もどし後の冷却速度と化学成分との影響が系統的に実験研究された⁽⁴⁾。低温高压容器用鋳鋼の機械的性質を低下させずにその成分中の Ni と Mo とをボロン (B) で置き代えたボロン鋳鋼を安定して造るようになった⁽⁵⁾。大形水車ランナなどに用いる低炭素 13%Cr-4%Ni 鋳鋼の厚肉部の -100°C にいたるまでの低温における衝撃値が AOD 法精錬によって従来の約 2 倍に高められた⁽⁶⁾。高温ガス伝熱管用耐酸化鋳鋼としての 18~24%Cr 系ステンレス鋼の衝撃値遷移温度が AOD 法精錬による低 C 低 N 化によって大幅に低められた⁽⁷⁾。-150°C で用いられる LNG 液化プラント用鋳鋼としての 9%Ni 鋼のぜい性き裂の防止が研究され成果を得た⁽⁸⁾。寒冷地用大形バルブ鋳鋼品が、ASTM 規格鋼種を改良した低合金鋼によって、-55°C における 2 mm V ノッチシャルピー衝撃値の平均値が 6.4 kgfm として多数生産されている⁽⁹⁾。

5. 破壊じん性値および疲労き裂伝ば特性

鋳鋼品には検査に合格する製品にも小さな空けき性欠陥が存在することが多い。これら欠陥は異物かみ、ミクロ引け巣、微細高温割れなどであり、最もきびしい仕様においても、現状では直径 1 mm 程度以下の欠陥は許容するであろう。したがってこのような小さな欠陥の初期存在を前提とした破壊力学による強度設計は、鋳鋼品にはことさら合理的に適用されると考えられている。このため、最近では重要な鋳鋼品の製造に当たって、その材料の破壊じん性値 K_{Ic} および疲労き裂伝ば特性上の応力拡大係数範囲 ΔK のデータを求めることが盛んとなっている。

K_{Ic} 値の正確な測定には極めて寸法の大きな試験片を用いなければならないので、その直接の測定値はまだ少ないが、比較的小さな試験片を用いて間接的に K_{Ic} 値を求めることが進められている。(財)総合鋳物センターでは鋳物の実体強度調査研究の研究部会で鋳鋼を含む各種鋳造金属の K_{Ic} 値の測定法を検討し、それを用いて若干の鋳鋼鋼種について常温の K_{Ic} 値を求め報告してい

る⁽¹⁰⁾。アメリカでは 1970 年代から鋳鋼の K_{Ic} 値のデータが報告されハンドブックに載せられている⁽¹¹⁾。

ASTM の Method E 604 による衝撃破断エネルギー値と K_{Ic} 値との間にはある種の相関関係が認められており、鋳鋼に関してもこの関係が当てはまることが実証されている⁽¹²⁾。

疲労き裂伝ば特性の鋳鋼におけるデータも若干報告されており、それらによれば周期的応力拡大係数範囲 ΔK と 1 周期当たりのき裂伝ば長さ da/dN との関係を表す曲線は、高品質の鋳鋼では圧延鋼のそれと同等であるといえそうである。

da/dN を 0 から正の値に変える ΔK のしきい値 ΔK_{th} の鋳鋼についての測定も盛んになりつつある。(財)総合鋳物センターの前記研究部会では強度設計における ΔK_{th} の重要性に注目し、そのデータの整備を急いでいる。

6. 異物かみ欠陥

鋳物内に数 mm の大きさまでの非金属介在物が存在することが今なお完全には防ぎ得ない。これら介在物の存在は、のろかみ、砂かみ等の名で呼ばれることが多かったが、最近では異物かみと呼ぶことがより適切と思われる。この異物かみは巣や割れと同様に材料の破壊の起点となりうる有害な欠陥である。最近では異物かみの研究が盛んとなり、EPMA (電子線マイクロアナライザ) や蛍光 X 線分析や X 線回折による異物の化合物の同定、放射性トレーサによる移動の追跡等の研究が多く行われた結果、異物の発生源の内訳がおぼろげながら明らかになってきた⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。これらの研究によると異物は溶鋼がとりべからノズル、湯口、湯道を通り、鋳込まれる際、各部の耐火物と溶鋼中成分との化学反応、溶鋼中成分とふんい気との化学反応等の生成物またはそれらの再反応の生成物として鋳物に混入し浮上除去しきれないものが大部分を占め、そのほかに鋳物砂に起因するものが小部分を占めると考えられるようになった。

しかし反応生成物の移動と再反応の過程についてはなお不明であり、それは鋳物の大きさ、鋳込時間の長短、鋼の成分、流れの状態などによっても異なるであろう。溶鋼と耐火物との化学反応を低減するように耐火物および鋼成分を改良したり、鋳込時のふんい気により酸素の吸収を極減し

たりすることが根本対策であるが、まだそれらの進歩はみられていない。現在の生産における対策例では鑄型に入ってきた異物を浮上除去させたり、無害な場所に集まらせたりすることによって異物かみによる不良をなんとか防止している例が大多数を占めている⁽¹⁴⁾。異物が鑄物の本体に流入する前に湯口系の中でこれを確実にトラップする技術が急がれており、ストレーナコアという耐火物製スクリーン状物の使用が有効であることが知られてきた。アルゴンふんい気による溶鋼流への酸素吸収防止も一部で試みられている。

7. ガスによる巣

とりべ中の鋼のガス成分 (O, N, H) の含有量は溶鋼精錬法の進歩により十分低くなり、巣の原因とならないので、ここでいうガスは鑄型内のガスである。鑄型内のガスが単に機械的作用により溶鋼に混入して巣となることは技術的に防止できる。また鑄型内のガスが O_2 , N_2 , H_2O , CO , CO_2 , H_2 等の分子のみであれば、これらが溶鋼に溶解吸収されて巣の原因となることは普通にはないと考えられている。

しかし有機質粘結材の中にはアミン等の窒素化合物を有するものがあり、これが鑄はだ付近の高温のため熱分解して N_2 を生ずる際、鋼に高濃度に N を溶解込ませることがあることがわかってきた。

種々のすぐれた点があるため使用が広まっているフラン系自硬性鑄型には、この過程によって鑄鋼品に異常に巣を生じさせると考えられるものがあることがわかったので、このような欠点のない粘結材の開発が急がれている。この問題も近いうちに解決されるであろう。

8. 引 け 巣

引け巣は鋼の凝固に伴う約 5% の体積減少に起因する。この体積減少が固体鋼で囲まれた液体部分に引き起こそうとする空洞が押湯からの溶鋼の流入によって完全に補償されながら、凝固が完了すれば引け巣はおこらないが、押湯量が少な過ぎるか、または押湯からの凝固進行中の部分への液体補給のための流れが阻止されれば引け巣がおこる。この阻止は凝固進行中の部分と押湯

との中間に凝固の早い低温部ができる場合、もしくは凝固進行部分が固液共存層を厚く有し、その層内で固相間の狭い液相チャンネルを補給液が流れるのに大きな粘性抵抗を生ずる場合におこる。後者の場合に生ずる引け巣は樹枝状固相のすきまに発生し厚みが小さいのでマイクロ引け巣と呼ばれる。

上述の機構から、引け巣の発生の予知は、凝固中の鑄物の温度分布とその変化速度の分布とが知られば容易となる。個々の鑄鋼品について、その形、材質、鑄型材質、押湯形状、冷し金形状などが与えられれば、凝固時の温度分布とその時間的变化はコンピュータにより数値計算されて得られる⁽¹⁵⁾。計算方式にも多くの種類と改良が報告されている。また工場の鑄造技術者が能率良くこの計算の入力作業をなし得るようなシステムも開発され、コンピュータによる引け巣予知は鑄造方案作製の道具の一つと認められるにいたった。この計算システムを標準化し普及させるための(財)総合鑄物センターの事業が計画されている。この計算は現段階では厳密には温度の二次元分布までしか行っていない。三次元分布の計算が行える時期も予想されているが、その実用化にはソフトウェアの開発でなすべきことが多いであろう。

引け巣の予知およびそれに基づく引け巣防止の鑄造方案作製で大事なことは一言でいえば早期凝固部から押湯に向かっての凝固順序を正しくすることと、凝固進行部での温度こう配を大きくすることである。コンピュータの助けを借りると否とにかかわらず、この条件を満たすために大事なことは冷し金と押湯保温または押湯発熱と、発熱パッドとを効果的に用いることである(発熱パッドとは、鑄型の一部にはめ込む化学的発熱をする特殊配合の鑄型部分をいう)。日本鑄鍛鋼会では発熱パッド適用の技術標準を作るため共同研究を行い成果を得た⁽¹⁶⁾。

また別に発熱パッドの形状に特殊の考案を加えその用途を広範化したことも注目値する⁽¹⁷⁾。一方大形鑄鋼品に大形の冷し金を用い、品質の向上に成功した例もあらわれ、引け巣防止技術の開発は活発化している。上の二つの開発例のいずれの場合にも、凝固時の温度分布の予測をコンピュータによって行って研究開発の助けとしていることは新しい時代の研究開発を特色づけるものとして留意すべきであろう。

9. 高温割れ

鑄造品の凝固冷却中に高温でおこる割れを高温割れと呼ぶ。鑄鋼では1000°C以上でおこりやすい。その大多数のものは結晶粒の間にまだ液相が膜状に残存する時期に粒間でおこる。したがって微小な高温割れとマイクロ引け巣との間に大きな区別はない。ただその生成に引張ひずみが関係していることだけが高温割れがマイクロ引け巣と異なる点である。

引張ひずみが関係しているために、この欠陥の生成には温度分布のみならず鋼の高温における変形特性、特に微速度・微量の変形における変形特性が関係してくるので、高温割れの予測はまだできない。鋼の凝固途中のいわゆる液膜期における変形特性は複雑で、まだ不明の点が多いからである。

現状では高温割れの防止についての鑄造技術者の知識としては、高温割れのおこりやすさと鑄造条件の各因子との間の相関関係の正負、大小が定性的な意味で知られているだけである。仕様を与えられた鑄鋼品を鑄造するに当たっての高温割れ防止法としては、同様の鑄造品での過去における高温割れ発生データの、上記の相関関係の知識とから、鑄造条件の諸元を手さぐりの加減するだけが現在なし得ることである。

それらの相関関係のうち極めて強い正の相関を示すものは、割れやすさとS含有量との間の相関関係であり、それはSが0.00x%という低い量の範囲にあっても成り立つ。したがって最近の脱硫精錬によってSが0.001%位まで低減できるようになったことは、今後の高温割れ低減に大きな力となるものであろう。

またもう一つの強い相関関係は、割れやすさと引張り軸方向への温度変動(温度曲線の山)の鋭さとの相関関係である。この温度の山をなくすように鑄造条件を調節するのが割れ防止の一要件であるが、この山を予測するにはコンピュータによる温度分布と変化との計算が大きな助けとなるであろう。

高温割れは圧縮ひずみのもとでは決して発生しないことはいうまでもないのであるから、凝固冷却中に圧縮応力のみが作用するような鑄造方法がもし可能ならば、それは割れの絶対的防止法とな

る。このような新しい技術の出現も考え得る。

10. HIP

マイクロ引け巣と内部の微小高温割れとを消滅させまたは縮小させることにより鑄物の許容応力を増大させるにはHIP(hot isostatic pressing)処理が有効で、すでに小形のクービンブレードなどの鑄鋼品または超合金鑄造品には応用されている。HIP処理装置の大容量化が進むのに従って、HIP処理が次第に大形の鑄鋼品にも適用できるようになることが期待される。

11. 大形鑄鋼品の構造溶接

鑄鋼品の構造溶接による構造物製作法はますます大形・厚肉品に應用されている。このことは溶接技術の進歩に負うところが大きい。溶接に適する鑄鋼材質の開発と選択、溶接に適する鑄造品の設計と鑄造方案、溶接施工に当たってのひずみと応力と割れとの管理、溶接後の熱処理などに関する鑄造技術者の技術向上もあずかっている。

進んだ応用例としては肉厚300mmの蒸気タービン車室の2個の鑄造品をサブマージドアーク溶接により一体化するもの、肉厚600mmのロールハウジングを狭い開先を用いてエレクトロスラグ溶接で一体化するもの、肉厚100mmの建築コラム用の遠心鑄造鋼管を極めて狭い開先で突き合わせ溶接するものなどが挙げられる。

12. 非破壊試験

鑄鋼品の欠陥の様相は前述したようなものである。圧延鋼製品のそれとは異なっているのであるから、鑄鋼の欠陥の非破壊試験法およびその結果の取扱い方法についても、鑄鋼品独特の標準を設け、製造者、使用者共同の便益を図るとともに、今後の品質向上のための道具としなければならない。このため、日本鑄鍛鋼会で調査検討を重ね、「鑄鋼品の放射線透過試験方法および透過写真の等級分類方法」(JIS G 0581-1983)の原案を作りJISとして発効させた。

超音波探傷試験については鑄鋼品のうちまず特定の製品に適用する標準を作ることとなり、最初のものとして「セメント製造装置用鑄鋼品に対す

る検査の判定基準」(JCSS I 3-1983)を制定した。これは同会規格の一つであり、この中で超音波探傷試験方法および結果の取扱いについて詳細な標準を示している。

上記以外の鑄鋼品に対してはASTM等の規定による超音波探傷試験が行われている。

これらの基準とは別に、非破壊試験による欠陥検出能力、欠陥形状寸法判別能力は進歩を続けているので、進んだ鑄鋼品製造者はそれを最大限に活用して鑄造欠陥の解析と防止研究を進めつつある。

材料内に存在する欠陥の寸法の最大のものを $2a$ とすると、材料に許容される使用応力の最大限は $1/\sqrt{a}$ に比例するのであるから、非破壊検査合格品で保証できる a の値を逐年小さくしていくための鑄鋼欠陥防止技術と非破壊試験能力との両々相まうての進歩発達は目下の緊要課題である。

13. 鑄鋼品の設計

鑄鋼品製造者の鑄造技術と使用者の設計技術との相互理解と連携の促進は長年なされてきて、その実も挙げられている。最近はさらに一步を進めて鑄造技術者が自ら設計技術を身につけ、積極的に使用者の設計に協力または参加しようとする動きが出てきている。

本稿でもみてきたように鑄鋼の製造は複合されており、個々の現象でも未解明なものが多く、解明された事項も専門的に難解であって、設計はこれらのことを理解しようとしながら機械技術者が行うと同時に、機械技術者の意図を理解しようとしながら鑄造技術者も自ら行い、両者を突き合わせることによって、機能・品質・製造コストのすべてに対して最適の設計を完成することができるという考えである。その際、与えられた形状の部品に荷重を加えたときの応力分布と変形量とを見積る技術が必要であるが、プラスチック材で作ったモデルで実験的に推定する方法などを活用することが推奨されている。

14. おわりに

主として砂型鑄鋼品を対象として、品質向上に関係ある技術を中心として最近の鑄鋼技術の動向を概観してきた。

鑄鋼に用いられる技術の大半は一般の鑄造技術と共通しているものおよび一般の鉄鋼技術と共通しているもので占められるから、それら共通技術の動向については、それぞれの分野での動向の解説書にゆだねるべく、本稿では触れなかったものが多い。それらは各種鑄造法、鑄型材料、鋼の材質、鋼の性能等の事項の中に多い。

遠心鑄造、精密鑄造、エレクトロスラグ鑄造、圧力ダイカスティング、レオカスティング、耐摩耗鋼、耐熱鋼、超合金、超高張力鋼等は鑄鋼の重要事項であり、特に将来性の大きい事項であるが触れる余裕がなかったことをことわっておく。これらの各事項に関しては改めて解説記事が本誌に寄せられることを願っている。

(原稿受付 昭和59年2月6日)

文 献

- (1) 青田, 鑄物, 55-7 (昭 58), 438.
- (2) 宇賀田, クボタ技報, 1-2 (昭 51), 165.
- (3) Böhm, H.J., *Giesserei*, 67-17 (1980), 517.
- (4) 岩淵・ほか2名, 鑄物, 49-8 (昭 52), 489.
- (5) 安達, 総合鑄物, 24-1 (昭 58), 25.
- (6) Böhm, H.J., *Giesserei*, 69-1 (1982), 1.
- (7) 岡村・ほか4名, R & D 神戸製鋼技報, 33-3 (昭 58), 37.
- (8) 藤野・ほか6名, 鉄と鋼, 67-12 (昭 56), S901.
- (9) 浜田・ほか4名, R & D 神戸製鋼技報, 33-3 (昭 58), 53.
- (10) 総合鑄物センター, 鑄物の実体強度調査研究部会研究調査報告, 293 (昭 58).
- (11) Steel Founders' Soc. Am., *Steel Castings Handbook*, (1980).
- (12) Lange, E.A., *AFS Trans.*, 86-10 (1978), 303.
- (13) 日本鑄物協会, 鑄鋼の表面欠陥対策研究部会研究報告, 23 (昭 55).
- (14) 日本鑄物協会, 鑄鋼の補修低減研究部会研究報告, 32 (昭 57).
- (15) 新山・ほか2名, 総合鑄物, 23-3 (昭 57), 10.
- (16) 日本鑄鍛鋼会, 発熱パッド使用に関する技術研究報告第1報, (昭 57).
- (17) 長沼・ほか2名, 鑄物, 56-1 (昭 59), 60.