

鑄造欠陥現象の概論

堀江 皓

岩手大学 工学部附属鑄造技術研究センター

金属の凝固現象に伴って発生する一般的な鑄造欠陥の種類や基礎的な発生機構および鑄造欠陥の解明に適用可能な分析評価機器と適用例について概説。

1. はじめに

749年に鑄造で完成した奈良の大仏(総重量380t、高さ16m)は外鑄型をはずした段階で「ひけ巣」、「湯回り不良」、「割れ」、「差し込み」、「焼付き」などの鑄造欠陥が多発し、「鑄掛け」や「鑄浚え」などの補修に約16トンの銅と5年の歳月を費やしたと記録されており、鑄造作業は2年で終了しているが、補修作業の方がはるかに長い時間を要したといわれている。紀元前3500年頃に古代文明が開いたメソポタミア地方で鑄造技術が始まったと言われているが、実はこの時から鑄物従事者は鑄造欠陥と今日まで永く付き合うことになったのである。

鑄造技術は溶解、造型、鑄込み、鑄型内凝固など、製造プロセスが多岐にわたること、高温を扱うこと、大きな温度変化を伴う工程が多いことなどから、他の金属加工法に比べて欠陥の種類がきわめて多いのが特徴である。

特に、鑄造技術は、「水は方円の器に従う」という言葉のとおり、形状付与性を最も重視した金属加工法である。すなわち、鑄造は固体の金属を溶解により形状自由度の最も大きい液体にし、これを鑄型に鑄込んで製品を作る技術であるため、必ず液体から固体への変態、すなわち凝固過程を経なければな

らない。この凝固時の液体、固体における物性の相違でガス吸収、粘性低下、体積変化および合金元素の偏析が起こり、それぞれこれらに起因するピンホール、ブローホールなどのガス欠陥、湯回り不良、ひけ巣、合金偏析などの鑄造欠陥が形成される。

また、鑄造欠陥の解明に当たっては、まず欠陥の種類を特定することが大事である。外見は同じに見える欠陥でもその種類の特定を誤れば対策は大きく異なって、欠陥を防止することはできず、逆に欠陥の増大をまねくこともある。たとえば、外見上は巣(孔)でも、「ひけ巣」か「ガス欠陥」か「介在物巻き込み」かで、その対応は大きく異なる。従来はベテラン技術者の経験と勘に頼って欠陥の種類を特定していたが、最近は走査型電子顕微鏡(SEM)やX線マイクロアナライザー(EPMA)、X線回折などの最新の分析・評価機器が用いられるようになって、欠陥に対する科学的な解明が従来に比べて大きく進んできている。

ここでは、鑄鉄を含む鑄造材料の凝固に伴って発生する鑄造欠陥現象および、これら欠陥に対する分析・評価機器について概説する。

2. 鑄造欠陥現象

2.1 金属のガス吸収に起因する欠陥

一般に金属は固体よりも液体状態の方がガスの溶解度は大きい。図1に銅(Cu)に対する水素(H)の溶解度の温度変化を示す。Cuの融点(1083℃、1357K)でHの溶解度が急激に変化するので、液体状態で吸収したHは凝固時にその溶解度の低下にとまって大量に放出され、鑄物中にブローホールなどの気泡巣を生ずる。液体金属(溶湯)に含まれるガスにはH₂、N₂、O₂、CO、CO₂、H₂O、SO₂などがある。気泡巣の原因はこのほかに溶湯が鑄型に鑄込まれるときに巻き込まれるガスや、鑄型と溶湯との反応によるガス、さらには鑄型が溶湯に加熱されて放出されるガスなどがある。いずれも脱ガス処理や鑄造方案などの対策で防止が可能である。

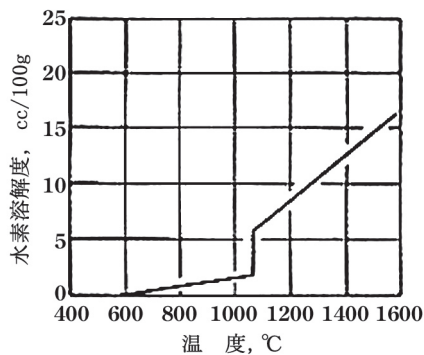


図1 Cuの温度による水素溶解度の変化

2.2 金属の粘性に起因する欠陥

図2に錫(Sn)について粘性係数と温度との関係を測定した結果を示す。横軸は温度の逆数、縦軸は

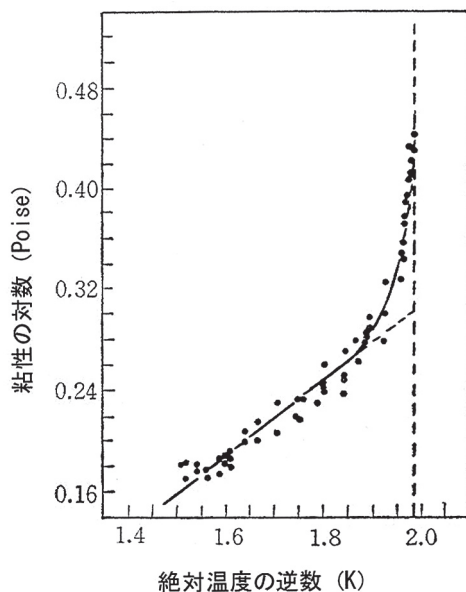


図2 Snの融点付近での粘性係数の変化

粘性係数の対数を表しているが、Snの融点(232℃、505K)付近で粘性係数が急激に高くなっている。このように、溶湯は融点に近づくにつれて粘性が極端に大きくなり、溶湯の流動性は著しく低下する。

したがって、鑄込み温度が極端に低い場合や薄肉の場合には溶湯の充満しない個所が生じ、湯回り不良や湯境いなどの欠陥が生じる。十分な鑄込み温度の確保や鑄造方案などの対策で防止が図られる。

2.3 金属の体積変化に起因する欠陥

2、3の例外を除いて、一般の金属は液体状態から凝固して固体になり、常温に至るまでに必ず収縮する。同素変態のない金属および合金の温度による体積変化は図3に示すように、凝固時に急激に収縮して欠陥の原因となる。金属および合金の液体状態から室温までの間の収縮は、液体から融点までの間の収縮(液体収縮)、凝固時の収縮(凝固収縮)および凝固後室温までの収縮(固体収縮)に分けられる。液体収縮はあまり問題にならないが、凝固収縮はひげ巣や割れなどの欠陥を生じ、固体収縮は鑄造応力や寸法変化などの欠陥の原因となる。一般的に凝固収縮は押湯で、固体収縮は鑄造方案や伸尺でこれら欠陥への対策が図られている。

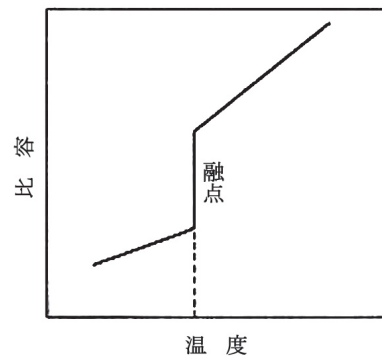


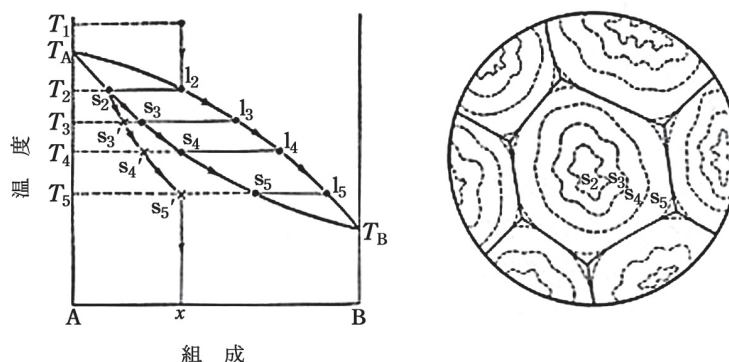
図3 温度による金属の体積変化

2.4 合金の偏析に起因する欠陥

図4¹⁾(a)に示すような状態図において、固相中の溶質濃度と液相中の溶質濃度の比 S_2/l_2 を平衡分配係数(k)という。この状態図のように、液相線、固相線が右下がりの状態図ではkは1より小さくなるが、このような全率固溶型状態図を示す合金の凝固では、X組成の合金を完全平衡が保たれるほど十分に遅い速度で冷却すると、液相と固相との間に溶質元素の拡散による分配が行われ、液相の組成は液相線上を $l_2 \rightarrow l_3 \rightarrow l_4$ 、固相の組成は $S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4$ と変

表 1 鑄鉄に対する各元素の平衡分配係数

元 素	C	Si	Mn	P	S	Sb	Sn
平衡分配係数 (K)	1.2	1.6	0.85	0.2	0.002	0.4	0.5
元 素	B	Cu	Ti	Zr	Mo	Pb	Bi
平衡分配係数 (K)	0.1	0.65	0.6	0.5	0.7	0.000x	0.000x



(a) 全率固溶型 AB2 元系平衡状態図 (b) 結晶内のマイクロ偏析

図 4 全率固溶型状態図を示す二元系合金の凝固に伴うマイクロ偏析

化する。しかし、実際の鑄物では液相、固相において溶質元素が完全に拡散するほど冷却は遅くはならず、特に固相内での溶質元素の拡散は遅いので、固相の平均組成は $S_2' \rightarrow S_3' \rightarrow S_4' \rightarrow S_5'$ のように変化し、温度 T_4 においても液相が残留している。このような合金では図 4 (b) に示すように結晶の周辺部で溶質濃度が高くなり、凝固組織は不均質となる。ここでいう溶質元素は合金元素あるいは不純物元素で、このような現象は偏析と呼ばれ、通常の鑄物ではよく起こる現象である。

鑄鉄に合金される元素や不純物として含まれる可能性のある元素の k の値を表 1 に示した。 k が 1 より小さい元素は共晶凝固の進行に伴ってオーステナイト (γ) 界面前方の融液中に濃化し、1 より大きい元素は γ 中に濃化される。

鑄鉄中のリン (P) を例にとると、P の k (0.2) は 1 より小さいので、共晶凝固の進行に伴って P は固相の γ よりも液相中に多く排出される。そして溶湯中の P 濃度はしだいに上昇し、凝固の終期では共晶セル粒界近傍の液相中で P の濃化が起こり、凝固後共晶セル粒界で P の偏析が形成される。ステッド試薬を使って共晶セルを現出するのはこのような機構で起こる共晶セル粒界への P の偏析を利用している。

表 1 に示す元素の中で Sb、Sn、B、Ti、Zr、Pb および Bi の各元素は球状黒鉛鑄鉄の黒鉛球状化を阻害する元素として知られている。写真 1 に Sb0.02% 添加した試料の顕微鏡組織を示すが、基地のパライト中に微細な糸屑状の不規則形状黒鉛が認められ

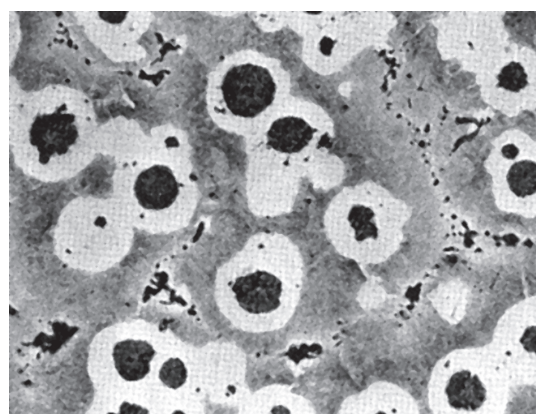


写真 1 Sb0.02% 添加した球状黒鉛鑄鉄の顕微鏡組織

る。このような黒鉛の生成した鑄鉄に加重を負荷するとこの不規則形状黒鉛が基点となって破壊が進行し、著しく衝撃値、伸びの値が低下する。

一般に球状黒鉛鑄鉄の共晶凝固は、図 5 の模式図に示すように共晶の初期に球状黒鉛が融液から直接晶出し、これを γ が直ちに取り囲み、この γ を通しての炭素の拡散によって球状黒鉛は成長し、共晶の終期に γ が互いに合一して凝固を完了する。

黒鉛球状化阻害元素は鉄に対する k が 1 より小さいので、共晶凝固の進行にともなって炭素とともに γ 界面前方の融液中に排出され、しだいに融液中の阻害元素および炭素の濃度は上昇する。また、阻害元素の多くは溶鉄中の炭素の活量を上げるように作用するので、融液の少なくなる共晶の終期ではきわめて黒鉛の晶出しやすい状態となる。阻害元素を含

まない場合は球状黒鉛として晶出すべき炭素は、融液中の障害元素濃度が高いため球状としては晶出できず、残融液中で γ 界面に沿って晶出するため、写真1のような不規則形状黒鉛²⁾を形成する。これら不規則形状黒鉛の生成機構の模式図³⁾を図6に示し

た。このような挙動を示す元素は粒界偏析型の障害元素として分類され、希土類元素を添加することによりこれら元素の障害作用は中和・抑制される⁴⁾。なお、Sの障害機構は、黒鉛の球状化に必要なMgとSが反応してMgSを形成してMgを消費する阻

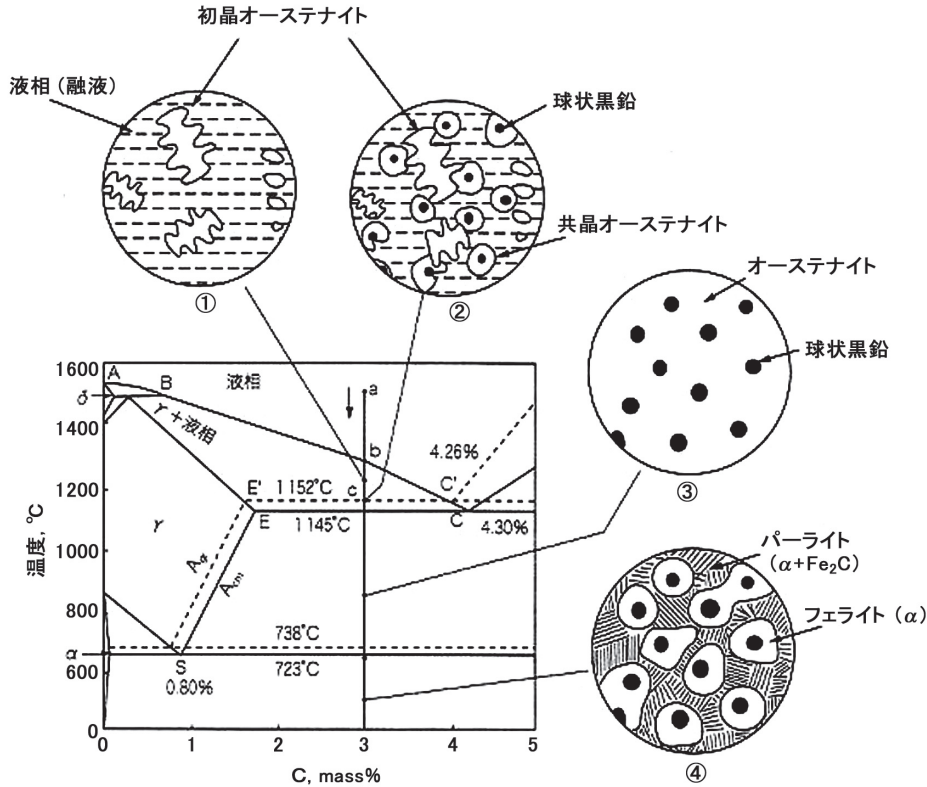


図5 球状黒鉛鑄鉄の凝固過程模式図

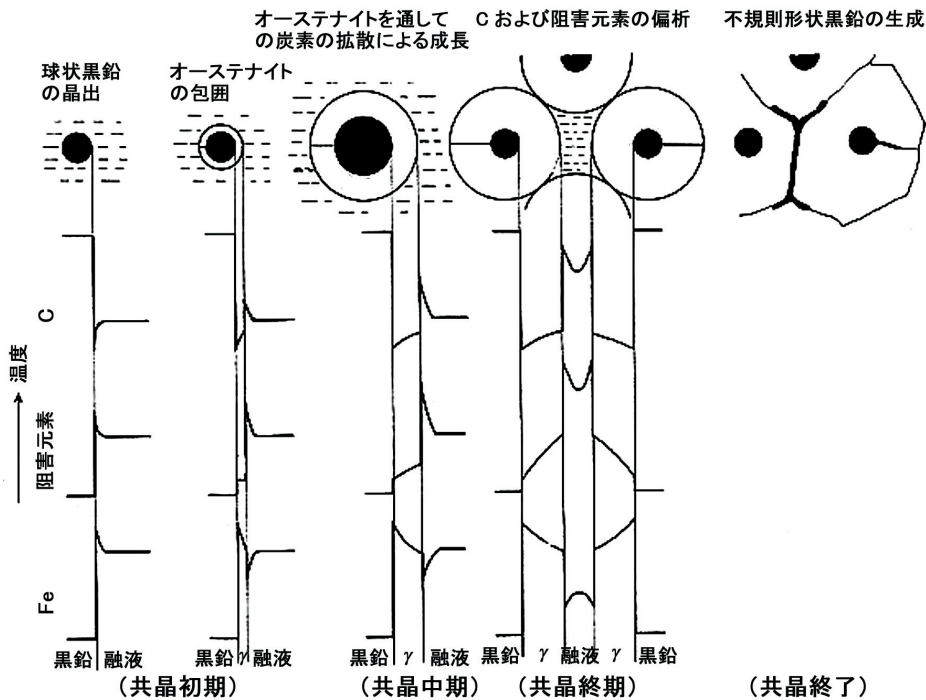


図6 不規則形状黒鉛生成模式図

害機構である。また、Cuの阻害機構は二元偏晶反応および三元偏共晶反応により黒鉛と同時に晶出したCuに富む液相が黒鉛の周囲を取り囲み、 γ を通しての炭素の拡散による成長過程を阻害する機構である。したがって、SおよびCuの阻害機構は上述の偏析による阻害機構とは異なる。

また、Mn含有量の高いオーステンパー球状黒鉛鑄鉄 (ADI) では未変態 γ (γ プール) が生成して機械的性質が低下する現象が認められるが、これらは γ 粒界へのMnの偏析に起因することが多い。

2. 5 共晶凝固と共析変態間での黒鉛析出現象

鑄鉄の共晶凝固終了後のオーステナイトの炭素濃度は、図7に示すFe-C系状態図からも明らかのように、鑄物が冷却するに従ってE点 (2%) からS点 (0.8%) まで減少し、共析変態に至るまでに ΔC (1.2%) に相当する炭素を黒鉛として析出する。黒鉛が析出する場合、鉄の密度7.8に比べて黒鉛の密度は2.2と小さいので、鉄中での黒鉛の析出は大きな体積膨張を伴う。しかし、あらかじめ空隙があればそれだけ体積変化は緩和されるので、そこに析出した方がエネルギー的にも安定である。したがって、ピンホールやブローホールのようなガス欠陥やひげ巣、あるいは割れのような空隙が存在すれば黒鉛は優先的にそこに析出する⁵⁾。

ガス欠陥やひげ巣などの空隙を走査型電子顕微鏡で観察すると空隙内面に黒鉛の析出が認められることが多いが、これはこのような機構で生成した黒鉛である。また、鑄鉄の割れ欠陥内部にも黒鉛の析出が認められることがあるが、このような場合、黒鉛の析出が割れ発生の原因と思われることが多い。共析変態前に何らかの原因で割れが発生し、割れの空隙に共析変態で黒鉛が析出したのであって、黒鉛の析出が割れ発生の原因ではない。

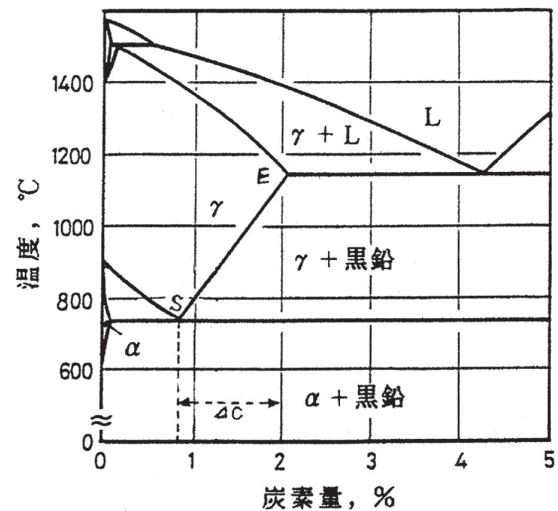


図7 Fe-C系平衡状態図

3. 鑄造欠陥の解明に用いられる最新の分析機器と適用例

3. 1 SEMとEPMA

これらの分析機器は「拡大して知る」という観点から、材料の組織および表面形態、構造解析に用いられてきたが、鑄造欠陥の解明にも使用されてきている。従来はこのような目的には光学顕微鏡が用いられ、光学顕微鏡は安価で操作も簡単であるが、SEM、EPMAに比べて次のような欠点がある。

- ① 焦点深度が浅いため、破面のような凹凸のある試料では焦点が合わず、さらに巣の内面を観察することも困難である。
- ② 分解能は光の波長に依存しており、 $0.2\mu\text{m}$ が限界で、高倍率の観察ができない。
- ③ 分析機能がないので組織の構造解明ができず、形状、分布状態の観察だけである。

これに対して、SEMの場合は優れた分解能と焦点深度を有し、特に特性X線検出器を付けたEPMAは元素分析が可能であることから、組織や金属間化合物の同定が可能である。特に、「鑄巣」などの鑄造欠陥に対しては欠陥内部の観察や介在物巻き込み

欠陥などの欠陥の原因となる介在物の特定も可能である。

3. 2 鑄造欠陥解析例

これらの機器を使用した鑄造欠陥の一例について下記に示した。写真2は球状黒鉛鑄鉄製ハウジング

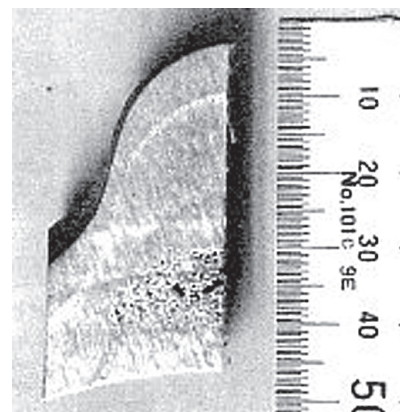


写真2 球状黒鉛鑄鉄製ハウジングの切断面

グ (FCD700) の切断面で、巣のような欠陥が認められ、光学顕微鏡で観察しても単なる孔には見られない。この孔についてSEM観察すると、孔の内部に写真3に示すようなデンドライト (樹脂状晶) が認められた。

球状黒鉛鑄鉄が凝固するときには前述の図5に示すようにまず初晶オーステナイト・デンドライトが晶出し、次いで共晶に達してオーステナイトと黒鉛からなる共晶セルの晶出による共晶凝固が進行し、残融液が無くなって凝固は完了する。初晶オーステナイトが晶出した段階で残融液の補給が停止するとひげが発生し、初晶オーステナイト・デンドライトはこの写真3のように孤立して孔の中に存在する。この例のように、ひげ巣の中にはデンドライトが認められることが多いので、ひげ巣を特定するときの

目安となる。また、2.5項で述べたように、このひげ巣の中には黒鉛が析出している。

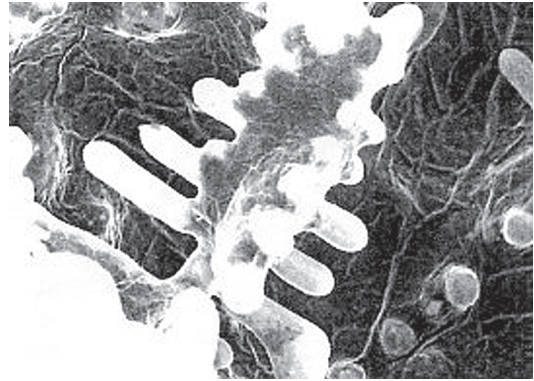


写真3 巣内部のSEM像

4. おわりに

前項でも述べたように鑄造欠陥は鑄造技術が始まったときから常につきまってきた問題であり、歩留まりを低下し、鑄物の原価を押し上げる要因の一つである。鑄造欠陥がたとえゼロにならなくても、大幅に低下できればユーザーからの鑄物に対する信頼は格段に向上するはずである。

鑄造欠陥に対する学会、研究者のこれまでの取り組みは現場経験が乏しいこと、現場技術に関心が薄いことなどから必ずしも積極的ではなかった。また、製造者側は鑄造欠陥を発生させることは製造者の恥ととらえ、表に出さない傾向があった。

これからは、鑄造欠陥は鑄造技術に携わる技術者、研究者の共通の課題として認識し、鑄造欠陥に関するデータを積極的に公開し、最近の科学分析・評価機器を駆使して業界、学会が連携して鑄造欠陥を低減・撲滅することが必要である。

参考文献

- 1) 西沢泰二：金属組織学，丸善（1972）p.68
- 2) 堀江皓：鑄物，48巻（1976）10号，p.629
- 3) 堀江皓：鑄鍛造と熱処理，8号（1980）p.9
- 4) 堀江皓：鑄物，54巻（1982）5号，p.295
- 5) 堀江皓，小綿利憲，大倉武博：鑄物，61巻（1989）7号，p.475