

鉄の半溶融成形技術の研究

Research of Semi Solid Casting of Iron

土 屋 雅 之*
Masayuki TSUCHIYA

上 野 宏 明*
Hiroaki UENO

高 木 勇*
Isamu TAKAGI

要 旨

ABSTRACT

鉄の半溶融成形技術の研究を行い、鉄の材料特性とアルミダイキャストと同等の形状自由度および寸法精度を併せ持つ部品の製造を可能とした。さらに本製法では、鑄物砂が不要となり生産現場の環境が改善され、アルミチクソ製法と設備を共有できる。この技術を確認するため、鉄-炭素系の材料成分、最適加熱速度と銅製金型材を用いた成形方法、鉄チクソ用原材料ビレットの連続鑄造製法について研究した。この製法をエンジンクランク直結型のオイルポンプカバーに応用したところ、従来のアルミダイキャスト品と同等の寸法精度の製品が得られ、剛性向上効果とクリアランス低減効果からオイルポンプの容積効率を向上できる事を確認した。

One result of research on the semi solid casting of iron is the development of parts having qualities that combine the superior material properties of iron with the dimensional accuracy characteristic of aluminum die-cast parts. In addition, this manufacturing method also improves the factory environment by eliminating the need for sand molds, and the same equipment and facilities can be shared with Al-thixo casting. To establish this technology, research was conducted on material composition of iron-carbon-silicon, molding methods using optimal billet heating speeds and copper die materials, and methods for the continuous casting of raw material billets for Fe-thixo casting. This manufacturing method was studied with an oil pump cover in which the oil pump is directly driven by the engine crank shaft, and the same dimensional accuracy was obtained as the conventional aluminum die-cast product. Furthermore, improvement in the volume efficiency of the oil pump was also confirmed due to the stiffness improvement and clearance reduction effects.

1. はじめに

鉄系合金のダイキャストについてはかつて米国および日本で研究されたことがあるが⁽¹⁾、高温の鉄溶湯の成分変動や取り扱い、金型寿命に問題があり実用化には至っていない。一方、半溶融成形(以下チクソ成形と記す)法は成分が安定した半溶融状態のビレットを用いることから、加熱ビレットの扱いが容易で、通常のダイキャストに比べて成形温度が低く設定でき、凝固潜熱が少ない。このため、金型への熱衝撃が比較的少なく、金型寿命が短くて経済的にダイキャストが成立しにくい高融点の鉄合金または銅合金を加圧成形する方法として研究されている。また、これまでの鉄部品成形法にくらべアルミダイキャストと同等の薄肉複雑形状成形が可能であることから、鉄の強度とアルミダイキャストの形状自由度が求められる部品に適した製法とい

える。アルミで確立されたチクソ製法の知見⁽²⁾を基に、本研究では鉄のチクソ成形技術を確認し、得られた部品を評価した。

研究項目として、材料成分、製法、原材料製法、応用部品の4点に整理し推進した。

2. 鉄チクソ成形原理と成形方法

2.1. 成形原理

鉄チクソ成形法は鉄合金を半溶融状態まで加熱し金型に加圧鑄造する方法である。固相と液相が混在するチクソ成形では製品の材料特性向上のために以下のことが求められる。

- ・半溶融状態で流体としての特性を持ち欠陥の少ない層流充填が成立すること

*栃木研究所

- ・凝固時の溶湯供給性に優れる共晶量(最終凝固時に存在する共晶成分の量)の存在する成分系であること^{(2), (3)}

鉄-炭素(Fe-C)系の2元系状態図を Fig. 1 に示す。半溶融領域は C=0.2%前後の 1500°C近辺(δ + Liquid)と C=2.0%前後の 1200°C近辺(γ + Liquid)に存在する。

半凝固温度域が広くピレット加熱時の均熱が容易で、成形装置や金型への熱負荷の軽減が可能であることから γ + L の半凝固領域を選択し、高温半溶融状態での粘度測定および冷却法による凝固潜熱を測定して成分系を評価した。その結果以下の事が判明し、鉄-炭素(以下 Fe-C)系でもアルミチクソ成形と同様の半凝固成形が成立することがわかった。

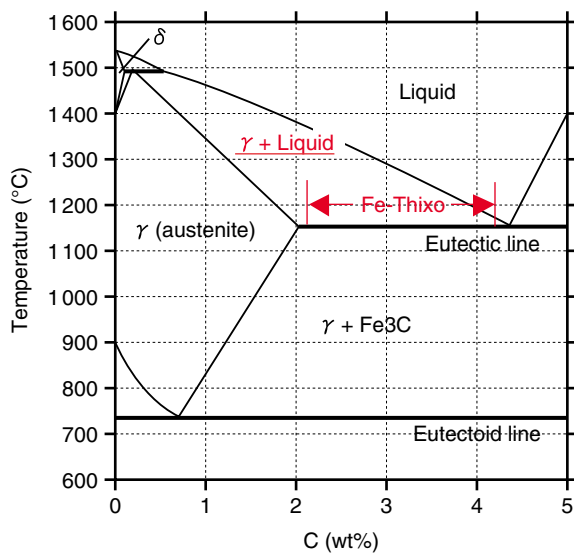


Fig. 1 Fe-Carbon

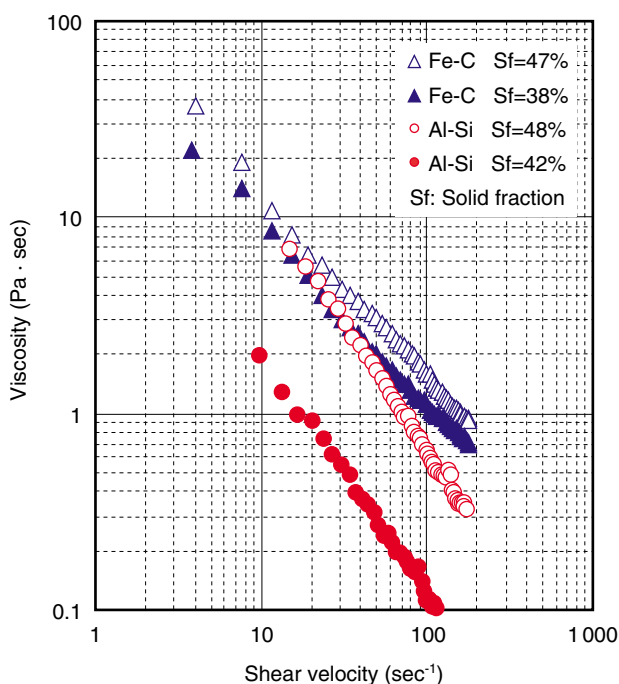


Fig. 2 Relationship between velocity and viscosity

- ・ Fig. 2 および 3 に示すように半溶融状態で固相が球状化することで、剪断速度と粘度の関係がリニアな特性を示し、Fe-C 系の半凝固領域でも Al-Si 系の半凝固成分と同様に流体としての取り扱いが可能である。

- ・ Fig. 4 に示すように潜熱分布が Al-Si 系と同様の 2 段潜熱分布を示し、最終凝固時に共晶成分が存在する。

2.2. 成形概要

実験装置での成形概要を Fig. 5 に示す。下記の手順と設備を用い鉄のチクソ成形が可能となった。

- ・ a) Fe-C 系材料では加熱時に組織中の黒鉛が固溶して体積収縮し自立困難なため、SUS 製のパレットにピレットを装填して模型加熱する。
- ・ b) 誘導加熱コイル内でピレットを 1180 ~ 1220°C まで加熱する。
- ・ c) パレットをフォークで搬送し射出口に投入する。鉄の加熱ピレットは表面に酸化膜が生成するため取り扱いが容易である。
- ・ d) アルミダイキャスト用の 200ton 横射出ダイキャストマシンを用いて成形を行う。熱処理を前提とした

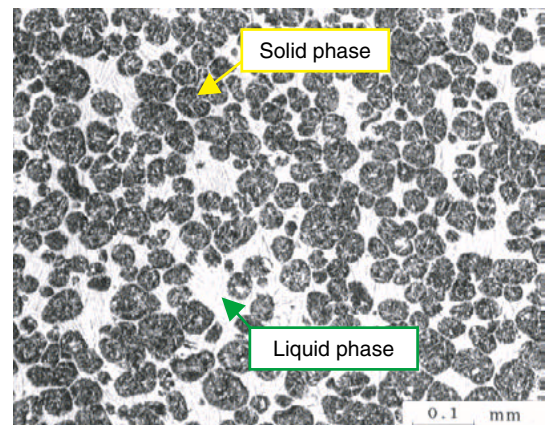


Fig. 3 Microstructure of Fe-thixo casting (etching)

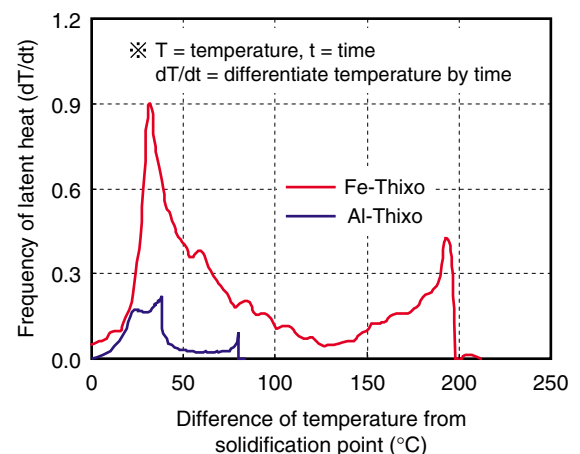


Fig. 4 Latent heat distribution

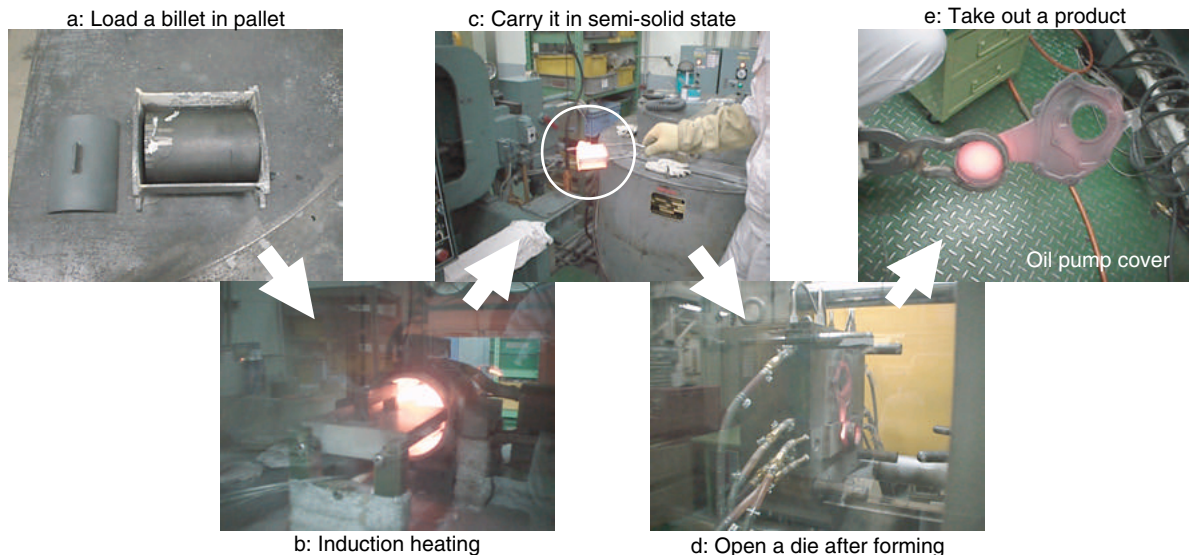


Fig. 5 Fe-thixo casting

鉄チクソ成形ではエア巻きこみによる熱処理時のブリスター発生を防止するため層流充填が基本となる。層流充填するために射出系を改良し低速射出を可能にしている。

- ・ e) ピレット表面に生成する酸化膜を除去するためゲートと分流子を金型に設け、金型内での製品クラックを防止するため金型内保持時間を5秒以下で離型する。

3. 材料特性

3.1. 成分設定

前述したようにチクソ製法では、最終凝固時に共晶成分が存在する成分系を選択することで凝固時の溶湯供給が行われ、凝固収縮部を埋める効果がある。鉄チクソに最適な最終凝固時の共晶成分量(以下共晶量)を求め、成分の設定を行った。

3.1.1. C, Si 量の設定

共晶量を設定するために、欠陥の存在に対して敏感な引張圧縮の疲労強度を評価した。共晶量を10～45%に調整した棒状のテストピースを成形し、熱処理、テストピース形状への加工後、引張圧縮の疲労強度(10⁷回で破損確率10%の値)を測定した。この測定結果を疲労限度比(引張圧縮の疲労強度を引張強度で除した値)で整理しFig. 6に示す。共晶量30%を境に二分され、内部欠陥のない鋼と同等の疲労限度比(0.45～0.60)を示すのが共晶量30%以上の領域である。共晶量を30%以上に設定することで凝固時の溶湯供給性が確保されることがわかった。

一方、共晶量が多くなると加熱後の素材が液体に近い状態になり、本来チクソ成形のメリットである加熱、搬送時の取り扱いの容易さが損なわれる。また、共晶量が50%を越

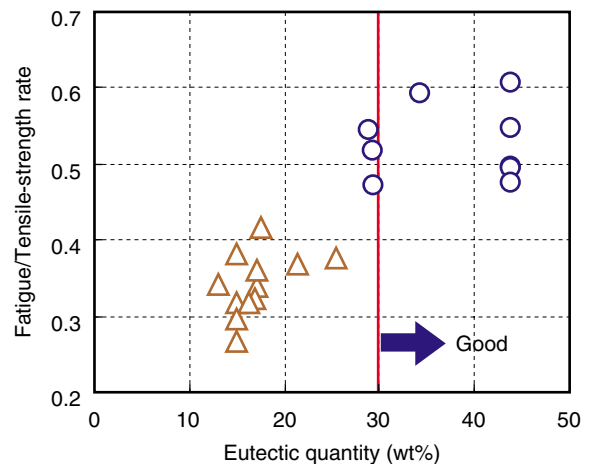


Fig. 6 Relationship between eutectic and fatigue/tensile-strength rate

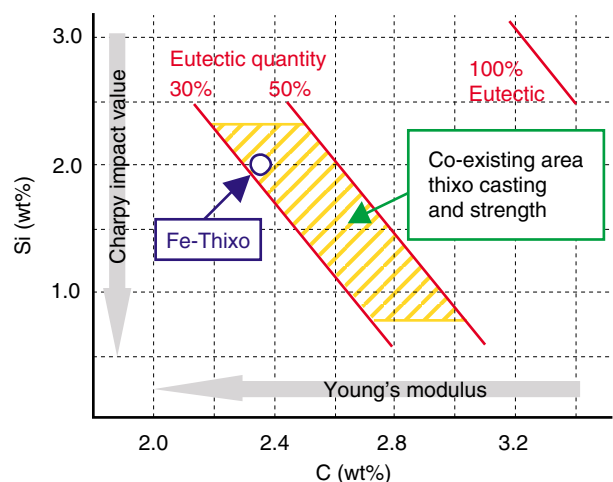


Fig. 7 Relationship between C-Si and eutectic quantity

えると最終凝固時の凝固収縮量が大きくなり、表面割れやクラックの発生が認められた。よって、鉄チクソ成形に最適な共晶量は 30%以上 50%未満である。

Fig. 7 に示すように共晶量はC量とSi量によって変化する。上記より共晶量を30%~50%をに設定した上で、鉄系材料として競争力のある球状黒鉛鑄鉄(FCD)を上回る 180GPa のヤング率と、部品として必要な FCD450 同等以上の 10J/cm²(シャルピーUノッチ・JIS3号試験片)の靱性値を目標としてC、Si 量を設定した。

C量の設定に関しては、本製法の成分系では成形品を熱処理した後の黒鉛析出によるヤング率の低下が避けられない。さらに鉄チクソ材のヤング率は析出した黒鉛面積の増加とともに低下するため、Cの添加量をなるべく少なくしなければならないことがわかった。

また、一般にSiは添加量が多くなると硬くてもろい性質のシリコフェライトを生成し、伸びおよび靱性の低下を招く。Si 量を 1.5 ~ 6.5%の間で調整し試作した材料でシャルピー衝撃試験を評価したところ、Si 添加量が 3.0%以上で靱性が著しく低下することがわかった。

上記した共晶量とCおよびSi量の関係から、鉄チクソ成形の成立範囲はFig. 7に示す斜線領域となる。原材料ピレット製造時の成分許容範囲を加味し、C=2.35%, Si=2.0%を基本成分とした。

3.1.2. Cr, Ni 量の設定

薄肉複雑形状品の成形時に発生する表面クラック防止のため、Cr と Ni を添加し最終成分とした(Table 1)。Cr は鑄造時のチル組織の強化し、Niは固相を靱性のある γ 組織にすることで表面クラックを防止する。また、これら Cr, Ni の添加量は成形品に求められる機械特性により調整し、靱性を重視する場合には Cr を添加せず Ni のみとし、強度重視の場合には Cr および Ni 両方を添加する。

Table 1 Chemical compositions of Fe-thixo casting (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
2.30/2.40	1.95/2.05	0.60/0.70	<0.035	<0.04	0.50/1.00	0.00/0.50

3.2. 熱処理と機械特性

鉄チクソ製法では金型中の急冷により液相部がCを固溶した硬くて脆いチル組織となるため、必要な靱性を確保するうえで焼鈍熱処理が必須となる。本研究では最適熱処理条件を設定することにより、幅広い材料特性を得ることを目標とした。

すなわち、i)球状黒鉛鑄鉄代替をねらった引張強度 σ_B =400 ~ 600MPa 域、ii)非調質鋼代替をねらった σ_B =600 ~ 800MPa 域、iii)高強度部品代替をねらった σ_B =600 ~ 1000MPa 域である。

設定した熱処理条件を Table 2 に、棒状テストピースを成形し各熱処理後の引張強度を Fig. 8a に示す。i), ii)については焼鈍後の冷却速度を調整することで作り分けを可能とし、i)は冷却速度 0.05 ~ 0.10°C/sec の炉中冷却で引張強度 500 ~ 700MPa、ii)は冷却速度約 2°C/sec の大気冷却または2段焼鈍で引張強度 600 ~ 900MPa が得られ目標強度を達成した。また、iii)の高強度材料としては、焼き入れ焼戻しを行い強度と靱性を向上させる調質熱処理、あるいは焼鈍直後に300°C~450°Cの温度で恒温変態させるオーステンバ熱処理により σ_B =800 ~ 1300MPa が得られ、鉄チクソ材料は幅広い強度レンジに適用できることがわかった。ヤング率も Fig. 8d に示すとおり 180GPa 以上を達成した。

また、引圧疲労強度試験、シャルピー衝撃試験も実施した。Fig. 8bのグラフに示すとおり、引圧疲労強度に関しても σ_B =200 ~ 500MPa の幅広い範囲の強度を得られた。また、シャルピー衝撃値に関してはFig. 8cに示すとおり炉冷材が10J/cm²を上回りFCD450 と同等の靱性値を達成した。

Table 2 Heat treatment

Tensile strength	Heat-treatment (Hardness HB)
500 ~ 700MPa	i : Furnace cooling (HB 150-200) 950°C × 60min. Cooling rate = 0.05 ~ 0.10°C/sec.
600 ~ 900MPa	ii : Annealing/Annealing (two steps) (HB 200-350) 1000°C × 60min. Air cooling T °C × t min. Air cooling Cooling rate = 2.0°C/sec.
800 ~ 1300MPa	iii : Heat refining/Austemper (HB 250-350) 1000°C × 60min. T °C × t min. T °C × 60min. Oil quench Air cooling

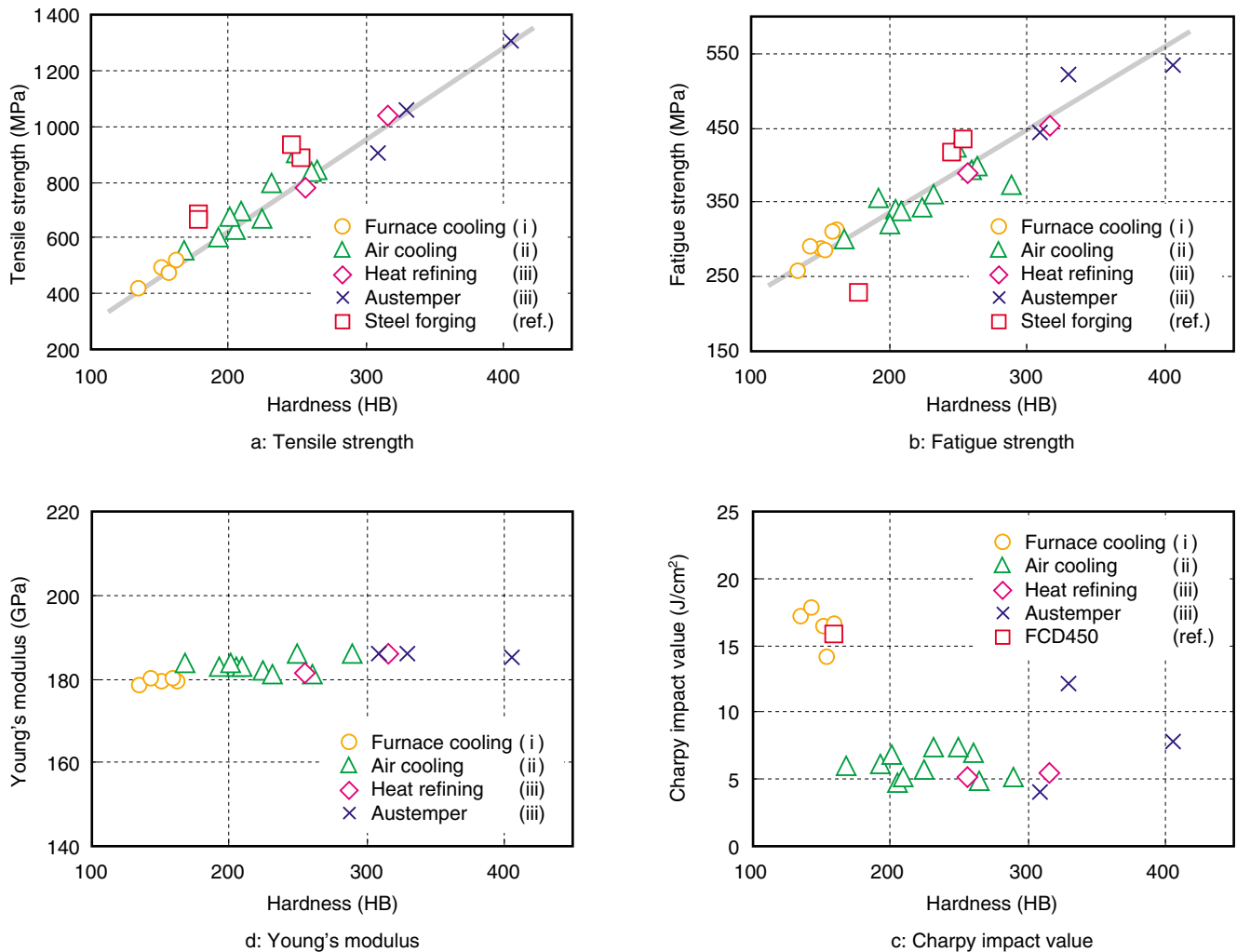


Fig. 8 Mechanical properties vs heat treatment

一般に可鍛鉄でチル化した組織を焼鈍するためには900℃近辺で5～15hr程度の保持が必要である⁽⁴⁾。それに対し鉄チクソにおいては、保持時間が1hr.以下でチルの分解が可能となる。短時間でのチル分解が可能となった要因としては、以下のようなメカニズムにより黒鉛析出サイトが多くなりCの拡散距離が短くなったためであると思われる。

- ・加熱成形時の固相部は、過飽和にC量を固溶するマルテンサイト(M)+オーステナイト(γ)組織となることから、焼鈍時の黒鉛析出サイトが多く、拡散距離が短くなり析出時間が短縮化される。
- ・液相であったチル部は、固相と広い界面を持つため熱処理時に固相であった部分とチル部との熱膨張差による歪が発生し、その部分が黒鉛がエネルギー的に安定に析出できるサイトとして寄与する。

堀江らによれば拡散距離が短く表面がエネルギー的に安定に析出するアトマイズ鉄粉でも焼鈍時間が短くなるとの報告⁽⁵⁾があるが、後者に関してはこれと同様の原理が働いていると思われる。

4. 成形方法

4.1. 加熱方法による固相の球状化

半溶融状態で流体としての特性を持つには固相が球状であることが必要である。アルミの半溶融成形では素材ビレット組織中のデンドライトを素材製造工程で分断し球状化しているが、本研究ではFig. 9aに示すような通常のデンドライト組織素材ビレットを加熱速度コントロールで分断球状化する手法を確立した。

オーステナイト変態点以上の温度域で加熱速度を変えてビレットを1200℃まで加熱し、その後水冷した組織をFig. 9b, cに示す。高速加熱(80℃/min)したビレットはデンドライトが分断されチクソ成形に適した組織となるが、加熱速度が小さい場合(44℃/min)は固相がつながり粗大化した組織を呈す。Fe-C系でデンドライトが球状化する理由として、Cの固溶限が2.1%と広いため、急速加熱時にデンドライト内にC濃度の差異が発生し、濃度の高い部分が液相に、濃度の低い部分が固相とに分かれ、デンドライトが分断されると考え

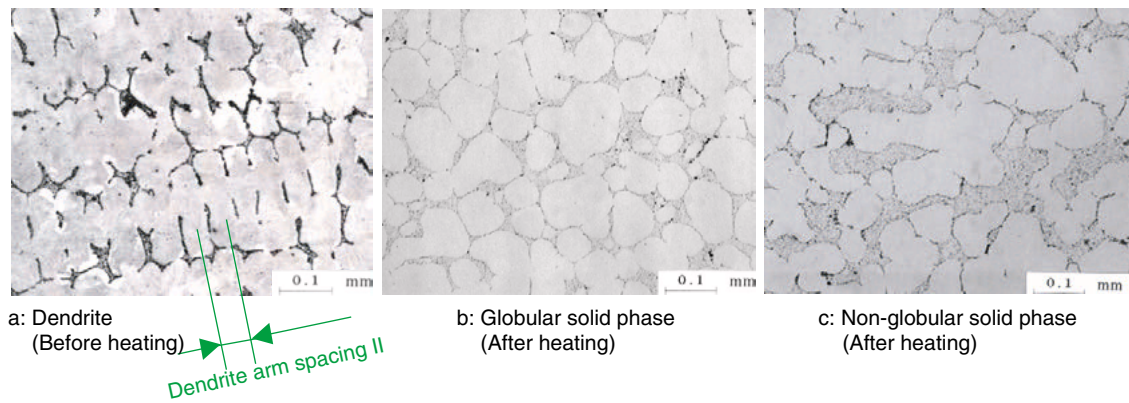


Fig. 9 Microstructure of Fe-thixo casting

られる。また、Fig. 10 に示す様に分断可能な加熱速度はデンドライト2次アームスペース(DAS II, Fig. 9a 参照)に依存することが判明した。DASIIが小さい方がCの拡散距離が短く加熱速度が小さくても分断可能と考えられる。

4.2. 金型材質

鉄チクソ成形では1200°Cの半溶融溶湯が流入するため金型は熱衝撃を受けるが、金型にCu材を用いることで金型温度上昇と発生熱応力を抑え対策した。金型の熱衝撃による2次元拘束条件下の発生熱応力は下式(1)であらわされる⁽⁶⁾。

$$\sigma = \frac{\alpha E (T_m - T_d)}{1 - \nu} \quad (1)$$

ここで σ は熱応力、 α は熱膨張率、 E はヤング率、 T_m は最大测温値、 T_d は金型予熱温度、 ν は金型材ポアソン比を示す。溶湯流入時の熱応力が金型材の圧縮降伏応力を上回ると、製品取りだし後の温度が下がった時に引張応力が金型に残留し、これが蓄積してクラックに至る。アルミダ

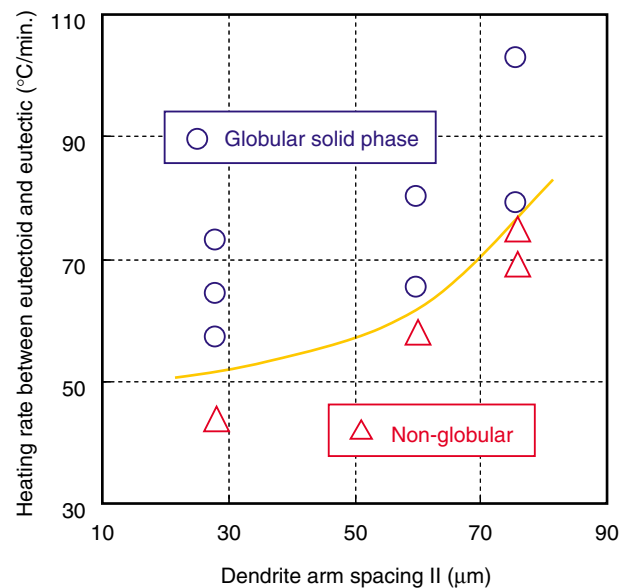


Fig. 10 Relationship between dendrite arm spacing II and heating rate

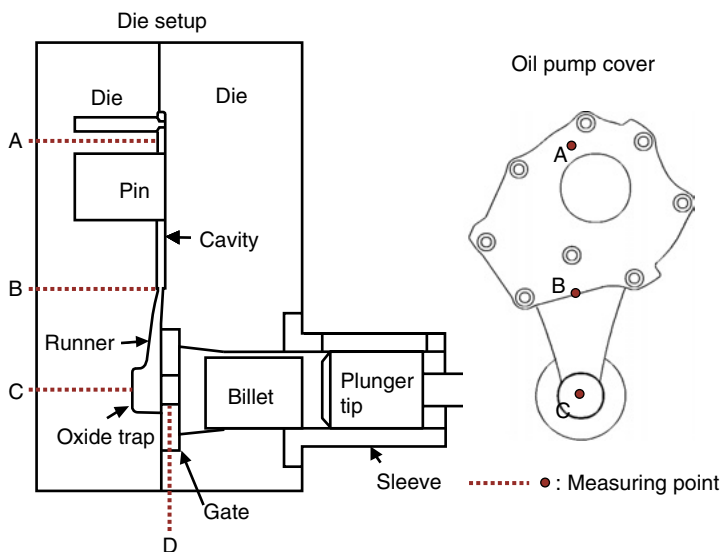
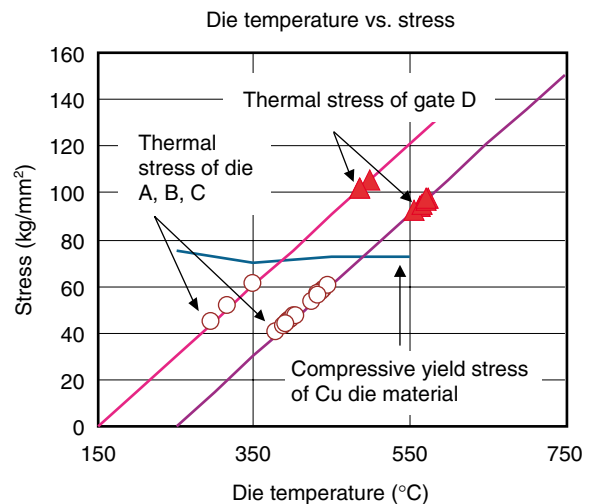


Fig. 11 Measuring points of die temperature and calculated thermal stress



イキャストで使用される鉄系金型に対し、鉄チクソではCu（日本ガイシ製 MC-9）金型を用いた。Cu 材は密度と熱伝導率が大きいので溶湯流入時の上昇温度が低く発生熱応力が小さい。溶湯接触面から深さ 1 mm 部分で熱電対による測温を行ない、各部の熱衝撃による発生圧縮熱応力を算出し Fig. 11 に示す。Cu 金型の圧縮降伏応力を超える部分は酸化膜除去用のゲートのみで湯道と製品部の発生応力は Cu 金型の圧縮降伏応力を下回る。以上のことから、ゲート部は定期交換部品とし、湯道と製品部は Cu 金型を用いることで成立することがわかった。テストピース成形に Cu 金型を用いて 1200 ショット成形したが、ヒートクラックの発生は認められなかった。

4.3. 成形サイズと流動長

ダイキャスト製法における製品流動長(2)および最大充填時間(3)Pokorny 式は下式で表される⁽⁷⁾。

$$\text{流動長 } L = \text{流速 } V \times \text{最大充填時間 } T_f \quad (2)$$

$$T_f = \frac{0.5p \times 2\{qa + c(tm - ts)\}}{k\{tm - (td \times 1.15)\}} \quad (3)$$

K : 溶湯の熱伝導率, qa : 溶湯潜熱, c : 比熱
p : 溶湯密度, tm : 溶湯温度, ts : 固相線温度
td : 金型温度, x : 肉厚の 1/2

鉄の半溶融成形ではアルミダイキャストに比べ溶湯温度と金型温度の差が大きいことから最大充填時間の短縮が懸念されたが、Table 3に示すように溶湯密度が大きく熱伝導率が低いためアルミダイキャストと同等以上の充填時間が得られる。

鉄チクソでは成形時にエア巻きこみを防止するため、充填速度をコントロールし層流充填が基本となる。層流充填を前提としたチクソ成形では流速の上限が決まるため、理論的には製品肉厚と流動長に相関があり Fig. 12 に示す各レイノルズ数の直線群下部領域が健全製品の成形可能範囲と推察される。薄板階段状テストピース等の成形にて充填可否を検証すると、Fig. 12のプロットのとおりに、5.0mmと2.5mmの肉厚部は充填するのにに対し1mm肉厚部の流動長は10mm程度であることを確認した。

Table 3 Calculated maximum filling time

		Fe-thixo	ADC12
K	cal/s · cm · °C	0.099	0.23
qa	cal/g	55	94
c	cal/g · °C	0.166	0.26
p	g/cm ³	7.1	2.4
tm	°C	1200	650
ts	°C	1150	520
td	°C	200	200
x	cm	0.3	0.3
Filling time	sec	0.21	0.14

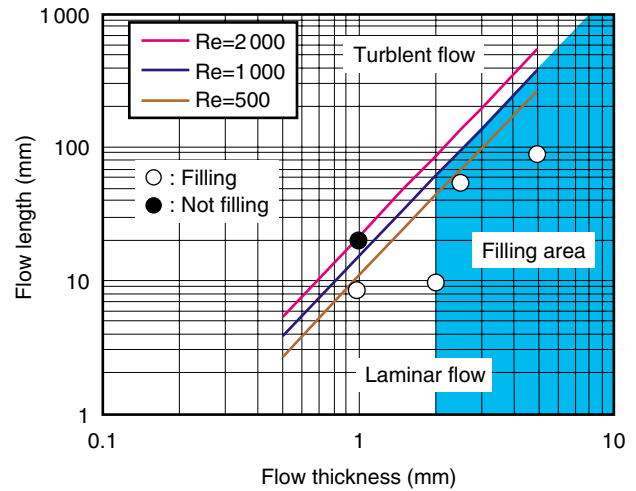


Fig. 12 Filling area of Fe-thixo

5. 原材料の連続鋳造

鉄チクソ成形に用いるピレットに関しては、成分および内部品質の安定した均一な形状の素材を低コストで大量生産する必要がある。半溶融領域が200°Cある開発材は凝固核の発生部が不安定でモールド内で破断しやすく、半溶融領域の狭い成分を選択している従来の連続鋳造技術では製造不可能で、連続鋳造技術の確立が必要であった。本研究ではモールドの材質、引抜条件、溶湯の温度制御を最適化し、Fig. 13に示すような構造で開発材の水平型連続鋳造を可能にした。

連続鋳造素材(以下連鋳材)の課題として表面の黒皮と中心部の凝固収縮欠陥が考えられたが、棒状テストピースを成形して欠陥の有無に敏感な疲労強度を評価して解決した。表面に存在する厚さ0.5mm程度の黒皮(Fig. 14)は製品内に混入すると欠陥として作用し、疲労強度の低下を招く。黒皮の存在する連鋳材を用いて成形したテストピースの疲労強度を評価し、黒皮が疲労強度に影響の無いことを確認した。

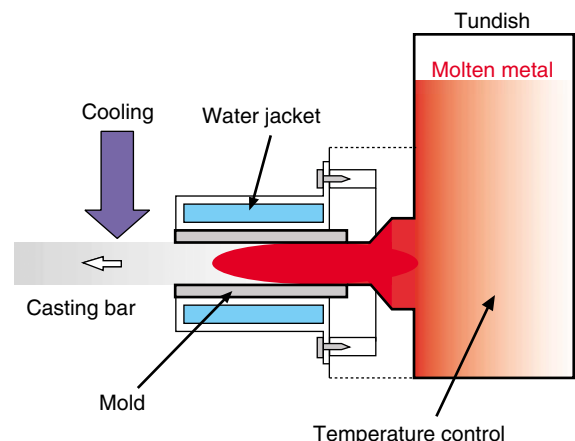


Fig. 13 Horizontal continuous casting

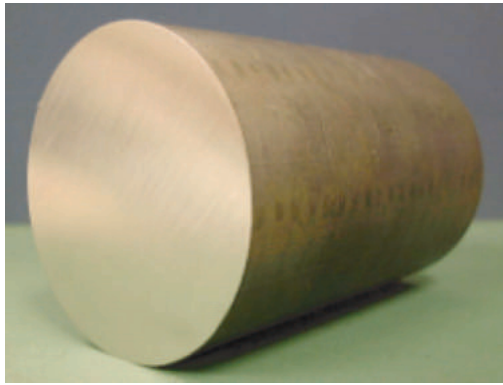


Fig. 14 Continuous casting bar

また内部欠陥については、中心に直径 5 mm 程度の空洞を意識的に作成したピレットを用いて評価した。この欠陥は加熱・成形工程を経て押しつぶされ成形品の中に欠陥として残らず、疲労強度への影響は認められなかった。

6. 自動車部品への適用例

鉄チクソ製法を用いエンジンクランク直結型オイルポンプのカバーを試作した。成形品 Fig. 15 に、ポンプ構造を Fig. 16 示す。従来アルミダイキャストで製造されている部品であるが、鉄チクソ製による剛性向上と鉄ローターとの熱間時クリアランス低減によりポンプの容積効率を向上できる。また、カバーの剛性をアルミダイキャストと同等に保てばカバーが薄肉化でき、その分ポンプローター厚さをあげられることから、クランク軸長の変更無しにポンプ容量を上げられる。他社では鋼板のファインブランピング製法で製作している例もあるが、ポート部のプレス成形後の凸部や皿ネジ締結面の加工等、ほとんどの面に加工が必要となりコストが上がる。鉄チクソ製法の特徴である鉄の材料



Fig. 15 As-cast oil pump cover

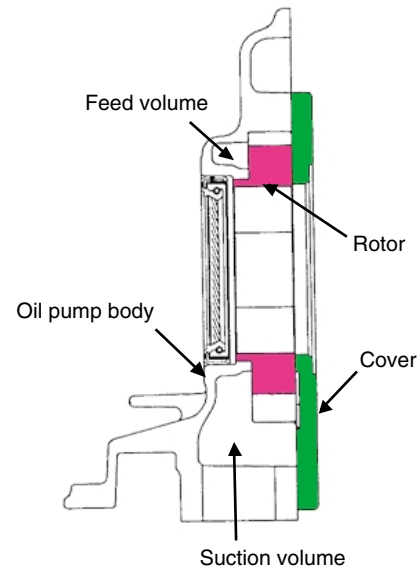


Fig. 16 Structure of engine oil pump directly driven by crank shaft

特性とアルミダイキャストの形状自由度とが生かせる部品である。

Fig. 17 に示すようにオイルポンプの単体特性試験において容積効率、ポンプ効率の向上が認められ、単体耐久試験においても流量劣化率、皿ネジ締めつけトルク劣化、摩耗、は規定値をクリアしており実用品として性能を確保している事を確認した。

また、ポンプカバーのネジ穴間寸法にて評価した寸法精

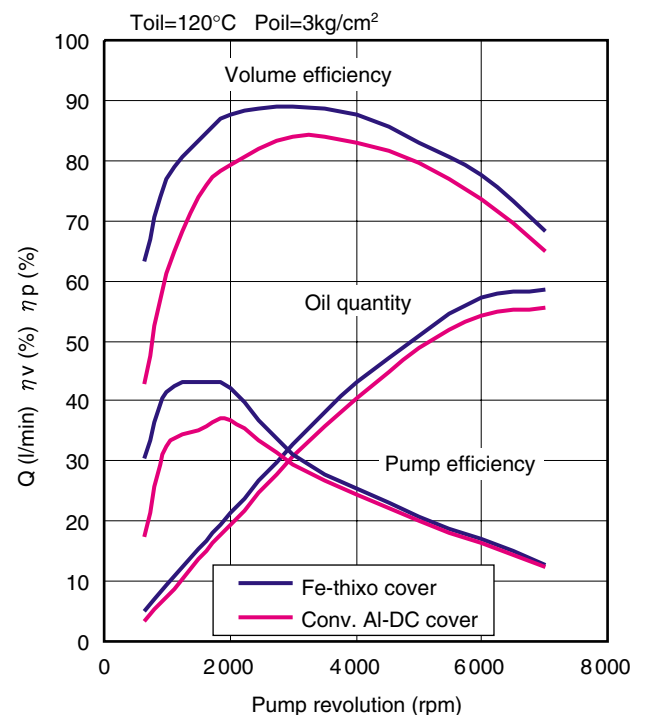


Fig. 17 Difference in oil pump efficiency between Fe-thixo and Al-DC cover

Table 4 Accuracy of Fe-thixo cover (mm)

	Size range	~30 (mm)	50-80(mm)
Fe-thixo cover	Deviation 3σ	0.16	0.31
General tolerance 1st class of JIS	Al die-cast	± 0.25	± 0.35
	Steel forging	± 0.4	± 0.6

度を Table 4 に示す。寸法設定値が 30mm 以下および 50 ~ 80mm における寸法ばらつきが 3σ でそれぞれ ± 0.25 , ± 0.35 以内であり、アルミダイキャストの JIS 一般部寸法公差 1 級を満足する。また、面粗度については熱処理を窒素雰囲気下で行うことにより 25S 以下が可能であることを確認した。

7. まとめ

良好な成形性を持ち、鉄の材料特性とアルミダイキャスト同等の形状自由度および寸法精度を併せ持つ部品の製造を可能とする鉄のチクソ成形技術確立し、以下の知見を得た。

- (1) 鉄チクソ成形では共晶量が 30 ~ 50% の組成に於いて良好な成形性を示す。成形品に熱処理を選択することにより $\sigma_B = 400\text{MPa}$ から 1000MPa 以上の幅広い強度レンジを持った材料が得られた。
- (2) オーステナイト域でのピレット急速加熱、Cu 金型材質、射出系の低速化により鉄チクソ成形が可能となる。また、最大充填時間がアルミと同等以上に得られ、部分的には 1 mm の肉厚成形が可能であった。
- (3) モールド材質、引き抜き条件、溶湯温度の最適化により、鉄チクソ用成分系の連続鑄造法を確立した。
- (4) オイルポンプカバーの試作を行い、鉄チクソ製法がアルミダイキャスト同等の形状自由度および寸法精度を併せ持つことを確認した。クランク直結型のエンジンオイルポンプカバーに適用することで、ポンプの容積効率が向上しサイズダウンが可能である。

参考文献

- (1) 宮田, 浜中, 小松, 鈴木: 鉄ダイキャストによる自動車部品の試作とその考察, 鋳物 50, p.629-635 (1978)
- (2) 斎藤, 中村ら: チクソ成形による車体継手部品の開発, HONDA R&D Technical Review Vol.11, No.2, p.149-158 (1999)
- (3) 斎藤, 椎名ら: 特許第 2794539, チクソキャスティング法
- (4) 日本鋳物協会編: 改訂 4 版鑄造工学便覧, p.688 (1986)

- (5) 堀江, 平塚, 小錦ら: アトマイズ鑄鉄粉の焼きなまし挙動, 鑄造工学 73, p.662-667 (2001)
- (6) 日本機械学会編: 伝熱工学資料改訂第 4 版, 東京, 丸善, p.32 (1994)
- (7) 全国ダイカスト工業協同組合連合会編: ダイカスト技能者ハンドブック, 東京, 軽金属通信ある社, p.169 (1988)

■著 者■



土屋 雅之



上野 宏明



高木 勇