

令和 2 年 4 月 27 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06818

研究課題名（和文）真空下鑄込み鑄造と熱間鍛造を組み合わせた革新的偏析レス大型構造用鋼材製造技術

研究課題名（英文）Innovative segregation-less large-scale structural steel manufacturing technology combining vacuum cast-in casting and hot forging

研究代表者

磯部 浩一（Isobe, Kohichi）

秋田工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：10373929

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：大型鋼塊用の造塊法での効果的で汎用性に富んだマクロ偏析対策として、母材と同一組成の芯材を鑄型中央部に設置して真空下で鑄込み鑄造と熱間鍛造の組合せを検討し、偏析対策としての有効性をラボ実験で検証した。また、通常の大気中鑄込み法では接合が困難な条件下でも、本法では芯材と母材との良好な接合が実現できることを明らかにした。マクロ偏析再現鑄造と鑄込み鑄造実験での芯材の溶製挙動と溶鋼の凝固挙動を直接差分法で解析し、本法のマクロ偏析生成抑制メカニズムと抑制のための凝固条件、本法での良好な接合メカニズムと接合条件を解明した。さらに、鑄込み鑄造の実験で、発生した内部割れの原因を考察し、防止指針を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本法は汎用性と実用性を併せ持つ、極めて有効な世界初の造塊法での偏析防止対策であり、偏析レスで火力発電や原子力発電用の600t超の大型部品や大型反応容器の製造を実現できる。また、各種耐熱鋼や原子炉材料等で偏析分散の為の拡散処理やESR等でのダブルメルトやトリプルメルトの適用が不要となり、大幅なエネルギー消費量やCO2排出量の削減と製造コストの大幅な低減も可能となる。マクロ偏析による材質劣化の解消により部品の一層の大型化や高温発電等で熱効率や発電効率は大幅に改善でき、エネルギー消費量やCO2排出量を大幅に削減するなど、本技術は革新的構造材料創出とグリーンイノベーションの進展に大きく貢献する。

研究成果の概要（英文）：As an effective and versatile macro segregation countermeasure in the large ingot making method, a core material having the same composition as the base material is placed in the center of the mold and cast under vacuum and hot forging. The effectiveness of this method was verified by laboratory experiments. In addition, it was clarified that good bonding of the core and the base material can be realized by this method even under the condition where bonding is difficult by the ordinary cast-in-air method. The direct finite difference method was used to analyze the smelting behavior of the core material and the solidification behavior of the molten steel. The segregation formation suppression mechanism of this method and the solidification conditions for suppression were analyzed. The good bonding mechanism and bonding conditions, the cause and countermeasures of the internal crack in the insert casting experiment were clarified.

研究分野：凝固

キーワード：鑄込み 真空 熱間鍛造 マクロ偏析 接合 偏析防止 造塊法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 発電用蒸気タービン用ロータや圧力容器、反応容器等の重要大型部材は造塊法で製造されるが、凝固時のマクロ偏析による材質劣化で耐熱材料等として十分な機械特性を有する材料の製造が困難になったり、歩留まり低下等で製造コストが増大したりするため、抜本的な対策が求められている。

(2) 発電プラントでは、経済性の改善や CO2 削減等環境問題対応から発電効率の改善のために発電容量の増大や蒸気温度の上昇が追求されており<sup>1)</sup>、それにともない部品の大型化や耐熱材料の耐用温度の向上が必要となり、部品製造のための鋼塊サイズの大型化<sup>2)</sup>や材料に許容される偏析レベルの厳格化が進展している。鋼塊サイズが増大するほど凝固速度が減少するため、マクロ偏析の生成が促進されるため、より顕著化するマクロ偏析の生成の防止対策が必要とされる。

(3) 現状造塊法では、有効で汎用性のあるマクロ偏析対策がないため、抜本的な偏析対策の創出が渴望されている。

### 2. 研究の目的

(1) マクロ偏析の生成は、凝固時に残溶鋼が種々の原因で流動し、それによって固液間溶質分配が促進されることが原因であり、凝固速度が低い程、流動の影響が助長される<sup>3,4)</sup>。母材と同一成分の芯材を鋼塊中央部に設置して鑄包むことで、凝固時の固液共存相の縮小や凝固収縮量の分散で残溶鋼の流動を抑制でき、芯材への吸熱による凝固速度の増大により固液間溶質分配を効果的に抑制できると考え、マクロ偏析対策として鑄包み法の利用を着想した。

(2) 本研究では小型鋼塊でマクロ偏析の再現を可能する鑄造実験方法を確立し、本法用いて上記鑄包み法のマクロ偏析抑制効果について検証した。本検討においては、芯材サイズが本法のマクロ偏析改善効果に及ぼす影響や芯材と母材の接合状況に及ぼす影響を検討した。

(3) また、本法によるマクロ偏析改善機構を確認するため、実施した鑄包み実験での芯材の溶解挙動や母溶鋼を含めた凝固挙動を凝固解析で推定するとともに、界面の温度履歴を推定し、その履歴と実験結果を対比することで芯材と母材が接合する熱的条件について検討を加えた。

(4) 金属素材の高機能化や高性能化を目的に、異種金属や異鋼種間の接合に鑄包みが利用されているが、それらの接合で良好な接合を実現するための条件が検討され、種々の知見が得られている<sup>5-8)</sup>。ただし、本研究のような鋼塊のマクロ偏析の改善を目的とした鑄包みに関する研究はなく、また、同一鋼種の接合を目的とした鑄包みや異種金属や異鋼種間の接合のための鑄包みも含め、真空雰囲気下での鑄包みの実施例はなく、よって真空雰囲気下での接合条件に関する研究もなされていない。本研究では真空雰囲気下で母材と芯材が同一鋼種での鑄包みによる接合条件について検討を加えた。

### 3. 研究の方法

(1) 小型鋼塊でマクロ偏析を再現する実験方法は 150kg の真空溶解炉を用い、凝固速度を減少してマクロ偏析を再現しやすくするため、150kg 鋼塊用の鑄鉄製の鑄型を加工し、鑄型内面に厚み 30mm になるよう断熱材（デンカ製アルセンボード）を内貼りした状態で溶鋼を鑄造した。

(2) この鑄型を用いて、S50C を鑄造した結果、顕著な逆 V 偏析と中心偏析の生成が確認され (Fig.1(a))、マクロ偏析の生成が再現可能なことが確認されたので、本鑄型を用いて鑄包みによるマクロ偏析の防止効果を検証する実験を行った。

(3) 鑄包み実験では市販の S50C の鋼材から 60mm 角または 35mm 角×長さ 400mm に加工した角材を芯材として鑄型中央部に設置し、その周囲に S50C 相当の組成に成分調整した溶鋼を真空下で 上注ぎ法で鑄造した。また、通常の鑄造、鑄包み鑄造共に、凝固解析が必要となる溶鋼～鑄型～周囲での熱伝達挙動を検討するため、鑄型内部に熱電対を設置して凝固中の温度推移を測定した。

(4) 凝固後の鋼塊から縦断面のエッチプリント (EP)<sup>9)</sup> を採取し、マクロ偏析の生成状況を調査するとともに、通常鑄造では観察された逆 V 偏析や中心偏析部から、また、60mm 角の芯材を鑄包んだ鋼塊では EP でマクロ偏析が観察されなかったため、凝固層の厚み中間部からサンプルを切り出し、EPMA での元素マッピングで C, Mn, P の濃度分布を調査した。また、上記鑄包み材については芯材と凝固層の界面を挟むようにマイクロサンプルを採取し、SEM により界面での空隙の有無など界面の接合状況を 20~2000 倍で観察した。

(5) さらに、通常鑄造と鑄包み鑄造での凝固挙動の差異や鋼塊断面内や芯材溶解挙動および芯材内部の温度推移を把握するため、直接差分外節点法<sup>10)</sup>と等価比熱法<sup>11)</sup>を組合わせて、鋼塊の 1/4 断面を対象に 2 次元の伝熱・凝固解析を実施した。

(6) 真空鑄包み法で製造した鋼塊を熱間鍛造し、20~60φの丸棒に加工し、その縦断面でEPの元素マッピングやSEM観察により、母材と芯材の接合状況について調査した。

#### 4. 研究成果

(1) マクロ偏析が再現可能な鑄造条件で、母材と同一組成の芯材を鋼塊中央部に設置して真空下で鑄包むラボ実験を実施し、逆V偏析や中心偏析の生成や収縮孔の生成も顕著に抑制できることを明らかにした(図1)。

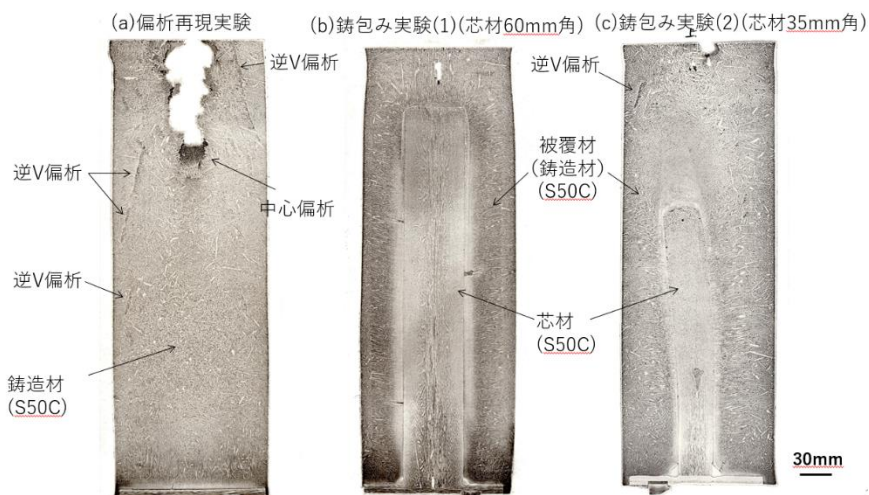


図1 マクロ偏析再現材および真空鑄包み材のマクロ偏析生成状況(鋼塊縦断面 EP)

(2) 本鑄包みによるマクロ偏析の改善は、固液共存相や凝固縮量の分散や凝固の加速等により、残溶鋼の流動や固液間の溶質分配が抑制されたりするためと推定される(図2)。

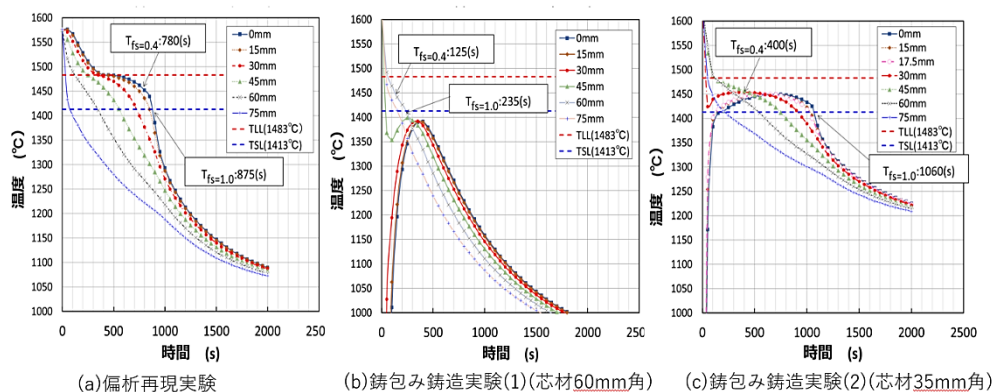


図2 直接差分法によるマクロ偏析再現実験および真空鑄包み実験での溶解・伝熱・凝固解析結果

(3) 芯材が部分的に熔融する場合でも、鋼塊断面の広範囲で固相率が所定以上の固液共存域への移行が早期化され、残溶鋼の流動を抑制する場合は、マクロ偏析の生成を軽減することができる(図2)。

(4) 本真空雰囲気下での鑄包みでは、軟鋼と鑄鉄では接合が困難な条件でも、芯材と母材の良好な接合が実現できた(図1)。

(5) 本鑄包みでの芯材と母材の良好な接合は、芯材と凝固シェルとの接触が阻害されることなく、所定時間以上の高温に保持されることで拡散接合が促進されたためと推察された。

(6) 今回鑄包み実験の一部で発生した内部割れが、実験の制約に起因して発生したこととその防止指針を提示した。

#### <引用文献>

- ① 梶川耕 司、世界最大 670t 鋼塊の製造技術と超大型鋼塊の鍛造技術、ふえらむ、24 巻、2019、248-253
- ② 正田淳 一郎、日本機械学会誌、発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望、119 巻、2016、434-437

- ③ 磯部 浩一、ブルーム連続鋳造における各種偏析の生成機構、鉄と鋼、98 巻、2012、405-414
- ④ J. A. Dantzig and M. Rappaz、Solidification、EPFL Press, Lausanne、2019、567-607
- ⑤ 野口 徹、鴨田 秀一、鋳ぐるみにおける接合要件と界面の制御、鋳造工学、70 巻、1998、920-927
- ⑥ 堀川 紀孝、鋳造を利用した異種部材複合化における接合条件に関する研究、北海道大学学位論文、2002、1-138
- ⑦ 北岡 英就、鎌田 征雄、川原 田昭、藤井 徹也、奥村 健夫、千貫昌一、鋳込圧延法によるステンレスクラッド鋼板の製造技術、鉄と鋼、75 巻、1989、1680-1687
- ⑧ 竹之内 朋夫、円尾 俊明、原 貞夫、一岡 敏夫、鋳包み法によるステンレスクラッド鋼板の製造、鉄と鋼、66 巻、1980、S778
- ⑨ K. Miyamura、S. Kitamura、S. Sakaguchi、C. Hamaguchi and M. Hirai、Development of segregation etch print method and its application to investigation of CC slab segregation、Trans. Iron Steel Inst. Jpn.、24 巻、1984、718-725
- ⑩ 大中逸雄、コンピュータ伝熱。凝固解析入門、丸善株式会社、東京、1985、43-75
- ⑪ 大中逸雄、コンピュータ伝熱。凝固解析入門、丸善株式会社、東京、1985、200-208

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 磯部浩一
2. 発表標題 鋳包み法の利用による鋼塊のマクロ偏析防止技術の開発
3. 学会等名 日本鉄鋼協会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----