

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14210

研究課題名(和文)高温超伝導コイルを利用した高速アルミ溶解技術の研究

研究課題名(英文)Study on High Speed Aluminum Metal Melting Technique Using HTS Coils

研究代表者

福井 聡 (Fukui, Satoshi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70293199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、HTSコイルを用いた高速アルミ溶解技術開発のための基礎研究を行った。まず、電磁界・熱連成解析により、静磁界中でアルミ材料を回転させたときの渦電流発熱を数値解析するモデルを開発し、測定結果と解析結果が良く一致することを示した。次に、実用装置に必要な加熱性能を実現できる磁界を発生できるHTSコイルの設計及び実証装置の電磁設計を行い、現状で入手可能な市販のY系線材を用いて実現可能であることを示した。更に、誘導加熱運転で想定される反作用変動磁界の解析を行い、適切な厚みの遮蔽円筒を配置することにより、HTSコイルに悪影響を及ぼさないための遮蔽方法を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Fundamental studies to develop high speed aluminum metal melting technology using HTS coils were performed in this study. A numerical model to analyze the induction heating of aluminum metal by rotating it in DC magnetic field was developed. The heating experiment of aluminum specimen was done and the temperature increase of the aluminum specimen was measured. It was shown that the numerical results were well agree with the experimental results. A test device for aluminum metal melting by the induction heating using HTS coils was designed using the numerical electromagnetic and thermal analysis. The results of electromagnetic design illustrated the feasibility of HTS coils using the commercial HTS wire. The time-varying reaction magnetic field due to the eddy current in the aluminum material was analyzed. The numerical results showed that, by placing the electromagnetic shield, the reaction magnetic field could be reduced to the level not to affect the stability of HTS coils.

研究分野：超伝導工学，電磁気工学

キーワード：高温超伝導コイル 誘導加熱

1. 研究開始当初の背景

アルミダイカストは、複雑な三次元構造を高い寸法精度で短時間に大量に生産することができるため、自動車のエンジン、トランスミッション、サスペンションアーム、電装ボックス等多くの自動車部品に大量に使用されている。現在も、自動車の燃費改善を目的とした軽量化対応のため、ますます鉄に代わる自動車部品材料として広範囲な適用が行われつつある。アルミダイカストは大型工場の場合、中央集中型大型アルミ溶解炉 → 個別アルミ溶湯保持炉 → ダイカストマシンという流れで加工される。この工程では、アルミ溶湯の横持運搬・保持炉での放熱によるエネルギーロスや横持運搬する際の温度低下に備えた過剰加熱の必要性により発生するドロス（過剰加熱によるアルミ酸化物）が問題となっている。アルミ材料を「必要な時に」、「必要な量だけ」、「必要な時間内で」溶解しダイカストマシンへ供給する「ジャストインタイム方式」の装置が実現すれば、溶解装置とダイカストマシンを直結することにより、横持工程・温度保持炉を廃止してエネルギー効率を大幅に向上できるのみならず、横持工程の廃止による安全性の向上や不要な過熱の抑制によるドロスの発生を防止も期待できる。そのためには、アルミニウム的高速溶解技術が必要不可欠である。現在、アルミ材料の溶解方法としてはガス加熱が主流であるが、主にインゴット表面からの加熱となるため、材料内部の温度上昇が遅く、高速溶解は不可能である。本研究では、高温超伝導（HTS）コイルによる静止強磁場中でアルミインゴットを回転させた時の誘導電流による自己加熱によって、高速で溶解する装置（図2）を提案している。HTSコイルによる静止強磁場中でアルミインゴットを回転させることにより、従来のガス加熱や常電導コイルによる高周波誘導加熱では不可能であった、高速・高効率加熱が実現できる。また、溶湯保持のための不要な過剰加熱を行う必要がなくなるため、ドロスの発生を抑えた高品質化が可能となる。本研究で提案する高速アルミ溶解装置が実現すれば、アルミダイカスト工程をジャストインタイム方式に変更することが可能になり、従来のダイカスト工程の問題点を一挙に解決できるブレークスルーとなる。

2. 研究の目的

本研究で提案する HTS コイルを用いた高速溶解装置では、HTS コイルによる静止強磁場中でアルミインゴットを比較的低速で回転させることにより、従来のガス加熱や常電導コイルによる高周波誘導加熱では不可能であった、高速・均一・高効率加熱が実現できる。また、溶湯保持のための不要な過剰加熱を行う必要がなくなるため、ドロスの発生を抑えた高品質化が可能となる。更に、アルミダイカスト工程にジャストインタイム方式を導入でき、従来のアルミダイカスト工場

を一変できるブレークスルーになる。

しかしながら、以下のような学術的課題がある。

(1) 実用装置設計において、アルミ材料への入熱量を正確に評価するモデルの構築と実験による検証は必須であり、先行して取り組む必要がある。

(2) 実用化の観点に立てば、現状入手可能な線材を用いて設計可能な HTS コイルを用いて実現可能でなければ受け入れられない。従って、HTS 線材の臨界電流-磁界-温度-応力特性を考慮したコイルの最適化設計を行い、実現可能性を例証する必要がある。

(3) 本装置では、HTS コイルは直流運転されるが、ホルダーに配置されたアルミインゴットは回転対称ではないため、アルミ内に流れる誘導電流が作る反作用磁界が交流磁界として HTS コイルに印加され、交流損失の発生や温度上昇による安定性の低下が考えられる。従って、誘導加熱運転時に発生する誘導磁界の影響を正確に評価し、対策を検討する必要がある。

本研究では、上記の学術的課題についての基礎的な研究を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 電磁界解析モデルによるアルミ投入熱量の評価とモデル検証

電磁界解析と熱解析を連成させて、静磁場中でアルミ材料を回転させたときの渦電流発熱を数値解析するモデルの開発を行った。この解析モデルの妥当性を検証するため、我々の所有する電磁石の磁極間に配置した円柱状のアルミ材料を回転させて渦電流発熱させる小型の検証装置を製作して、試料温度上昇の実測を行った。本装置では、アルミ試料は大気中で回転させているため、外部雰囲気やモータの回転軸との連結部への熱移動による冷却効果も評価した。これらの冷却効果を導入を解析に導入し、測定結果の検証を行った。

(2) 高温超伝導線材の超伝導特性を考慮した HTS コイルの設計と実証モデルの電磁設計

数値解析モデルを用いて、今後の実用化に向けて開発が必要と考えられる実証装置の概念設計を行った。必要な加熱性能を実現できる磁界を発生できる HTS コイルの設計を、市販 Y 系線材の臨界電流-磁界-温度特性を考慮して、コイル巻線内の局所磁界分布に基づいて、運転温度対別のロードラインを評価した。また、アルミ材料の温度解析を行い、加熱特性の評価を行った。

(3) アルミインゴットからの誘導磁界の低減手法

数値解析モデルを用いて、誘導加熱運転で想定される反作用交流磁界の解析を行った。同時に、アルミ材料と HTS コイルの間に変動磁界を遮蔽する薄肉の銅円筒を配置した場合の解析も行い、変動磁界の低減効果を評価した。

4. 研究成果

(1) 電磁界解析モデルによるアルミ投入熱量の評価とモデル検証

直流磁界下での回転型誘導加熱の加熱特性を数値解析する手法を開発するために、小型の検証装置を製作し、加熱実験を行い、解析結果との比較を行った。図 1.1 に示すように、水冷銅マグネットのギャップ間に円筒状のアルミ試料を配置して、直流磁界を印加し、アルミ試料を駆動用サーボモータで回転させて誘導加熱実験を行った。使用した電磁石の磁極直径は 120mm であり、エアギャップ（本実験では 50mm とした）に最大 1.0T の直流磁界を発生可能である。アルミ試料は 2 つの電磁石の磁界生成範囲に収まるよう中央付近に配置し、直径 10mm の FRP 製のシャフトで電磁石下部に配置した駆動用モータに接続した。磁場中で回転している試料の温度を非接触で計測するため、赤外線サーモビューワを使用した。サーモビューワを使用して金属試料の表面温度を計測する際、対象物の放射率を設定する必要があるが、試料材質により大きく異なるため、計測器が推奨する市販のメンディングテープ（100°C における放射率 0.95）を試料表面に貼り付けて測定を行った。また加熱実験に先立ち、サーモビューワが示す温度に対して T 型熱電対を用いて校正を行った。円筒型アルミ試料に 1.0T の直流磁界を印加して、回転数 300rpm で回転させ、温度上昇の測定を行った。更に 30 分間回転させた後、印加磁界をゼロにして、加熱時と同じ回転速度で 30 分間回転させたまま、試料の温度降下を測定した。試料直径 15, 20, 25mm の場合について、同じ測定を行った。測定結果を図 1.2 に示す。図 1.2 に示す測定結果より、試料の冷却について評価した。試料の冷却は、大気への対流による熱伝達、シャフトへの熱伝導、周囲への熱放射、が考えられるが、これらを精度良く分離して評価することは困難であると考えられるので、これらの効果を全て含めて評価することにする。図 1.2 の測定結果から評価した試料の冷却量と

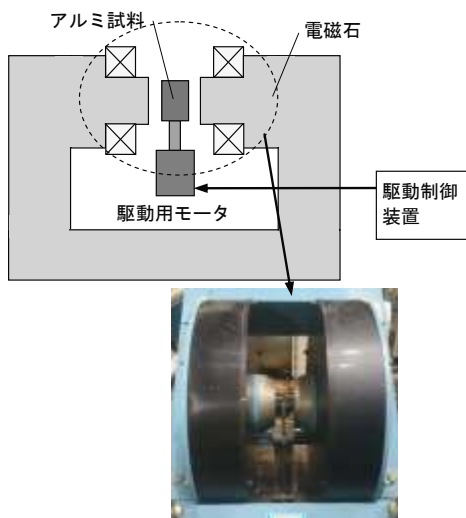


図 1.1 アルミ試料の加熱実験装置

温度変化の関係を図 1.3 に示す。評価した冷却量の特性を数値解析モデルに導入し、実験と同じ条件での、アルミの温度上昇を解析して、測定結果と比較した結果を図 1.4 に示す。図 1.4 の結果から明らかなように、解析結果は測定結果と良く一致しており、本解析モデルの妥当性を示すことができた。

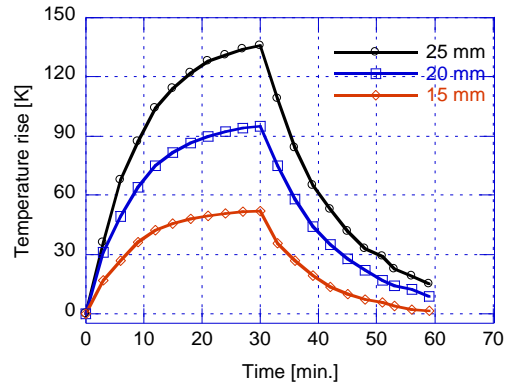


図 1.2 アルミ試料の温度変化

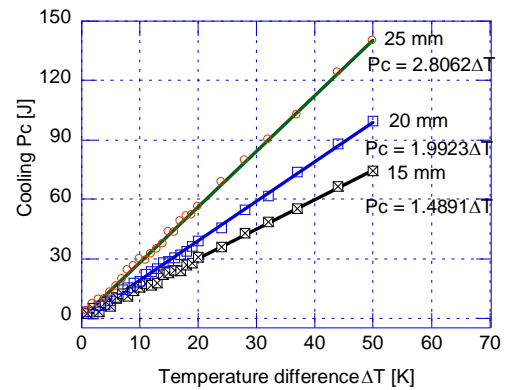


図 1.3 試料の冷却量と温度変化の関係

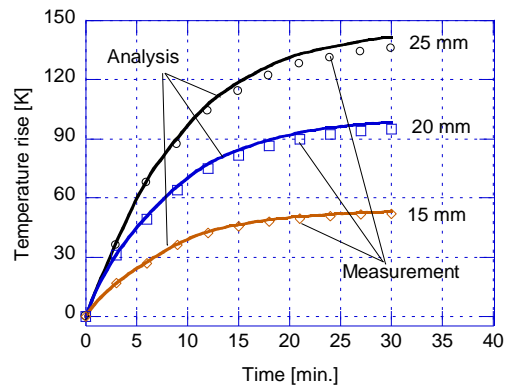


図 1.4 アルミ試料の温度上昇の解析結果と測定結果の比較

(2) 高温超伝導線材の超伝導特性を考慮した HTS コイルの設計と実証モデルの電磁設計

本研究で想定してる実用装置の性能は、1 個 5 kg のアルミニウムインゴット 5 個を 75 秒で溶解することが可能な加熱性能を有するものである。標準的なアルミニウムインゴットのサイズは幅 108 mm×厚さ 34 mm×長さ 504 mm であるので、これらを回転させる

空間の大きさは概ね決まってくる。また、必要な磁界強度は概ね $0.6 \sim 1\text{T}$ とする。これらに加えて装置製作にあたっての入手可能な線材量の制約等から、HTS コイルのサイズも概ね決まる。本研究で想定する実証装置は、実用装置と断面寸法は同程度とし、長さを $1/5$ にしたスケールモデルとする。図 2.1 に実証装置におけるアルミインゴットと HTS コイルの幾何学的配置及び断面寸法を示す。アルミインゴットを五角形に配置し、長方形型の HTS コイルによるダイポール構造になっている。本構造に基づいて FEM 解析により、実証装置の電磁設計を行い、その成立性を検証する。

3次元 FEM 解析により得られた断面内の磁界分布のコンタープロットを図 2.2 に示す。本解析では、コイル断面内の平均電流密度を 150 A/mm^2 としている。また図 2.3 に、 $(x, y) = (90\text{ mm}, 0\text{ mm})$ 及び $(x, y) = (134\text{ mm}, 0\text{ mm})$ における x 方向磁界の z 方向分布を示す。 $(x, y) = (90\text{ mm}, 0\text{ mm})$ はアルミインゴットの最内位置であり、 $(x, y) = (134\text{ mm}, 0\text{ mm})$ はアルミインゴットの最外位置である。図 2.3 より、アルミインゴットの z 方向長さの範囲である $z = \pm 50\text{ mm}$ で概ね $0.6 \sim 0.95\text{T}$ の磁界を発生できることが分かる。

電磁界-熱連成 FEM 解析により、実証装置の加熱特性を検証する。コイル断面内の平均電流密度は同様に 150 A/mm^2 とし、アルミインゴットの回転数を 300, 800, 1000, 1500 rpm で変化させて解析を行った。電磁界-熱連成解析は非常に解析時間を要するため、解

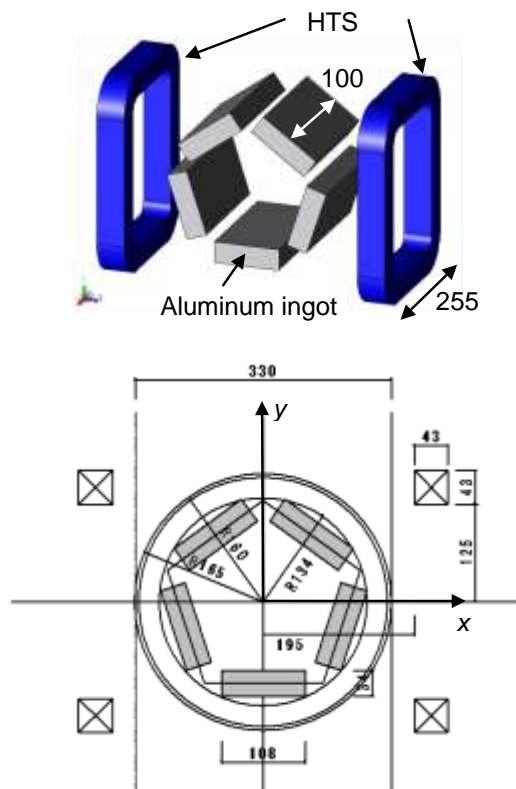


図 2.1 アルミインゴットと HTS コイルの配置及び断面寸法

析時間は回転開始から 10 s までとした。図 2.4 に、1000 rpm、回転開始から 10 s 経過後のアルミインゴットの温度分布のコンター図を示す。図 2.5 に、アルミインゴットの最大温度と最小温度の時間展開を示す。表 2.1 には、図 2.5 より求めた $5 \sim 10\text{ s}$ の間のアルミインゴットの温度変化率及びそれに基づいた熔融温度までの必要時間の推定値を纏めた。表 2.1 の結果から、1000 rpm 程度以上でアルミインゴットを回転させれば、所望の加熱性能を実現できると考えられる。図 2.6 には、10 s のときのアルミインゴット内の渦電流発熱量と回転数の関係を示す。ここで、アルミ 5 kg を室温 (20°C) から溶湯温度 (650°C) まで加熱するために必要なエネルギーは、 $5\text{ kg} \times [1\text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times (650^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) + 397\text{ kJ/kg}] = 5135\text{ kJ}$ と見積もれるので、75 s で溶解させるために必要な渦電流発熱は 68.5 kW と見積もれる。図 8 の結果からも、回転数が 1000 rpm 程度であれば、この条件を満たすことが分かる。

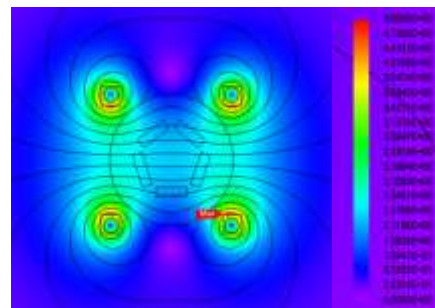


図 2.2 装置断面内の磁界分布のコンター図

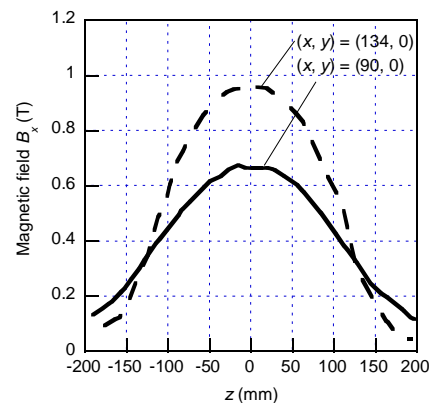


図 2.3 アルミインゴット領域の磁界分布

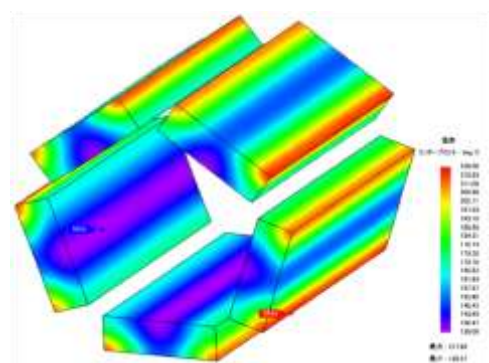


図 2.4 アルミインゴット内温度のコンター図 (1000 rpm, 10s)

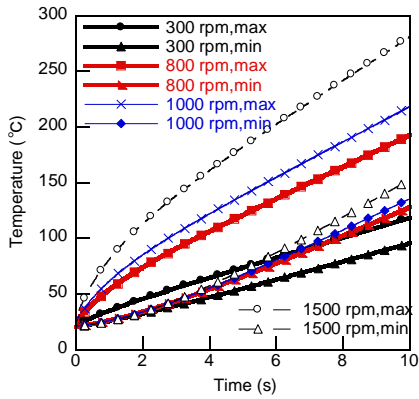


図 2.5 アルミインゴットの最大及び最小温度の時間発展

表 2.1 数値解析により得られたアルミインゴットの温度上昇率と溶解温度までの所要時間推定値

回転数	温度上昇率		推定所用時間	
	(max.)	(min.)	(max.)	(min.)
300 rpm	9.00 °C/s	8.14 °C/s	69.4 s	78.1 s
800 rpm	14.4 °C/s	12.5 °C/s	41.7 s	51.9 s
1000 rpm	15.8 °C/s	13.6 °C/s	37.3 s	47.9 s
1500 rpm	19.8 °C/s	16.2 °C/s	28.7 s	40.7 s

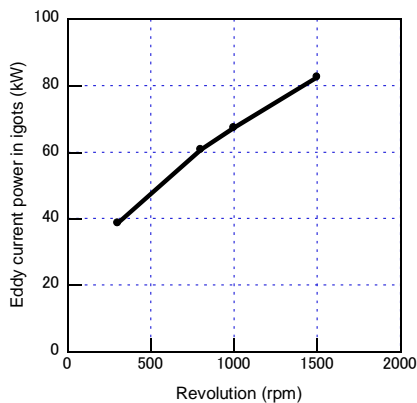


図 2.6 アルミインゴット内の渦電流発熱

次に、コイル断面内の垂直磁界分布の解析を行い、HTS 線材の臨界電流-垂直磁界-温度特性に基づき、コイルのロードラインを求めた。コイル断面内の垂直磁界の評価は、図 2.7 に示す断面において行った。図 2.8 に各断面内の垂直磁界分布の解析結果を示す。本結果

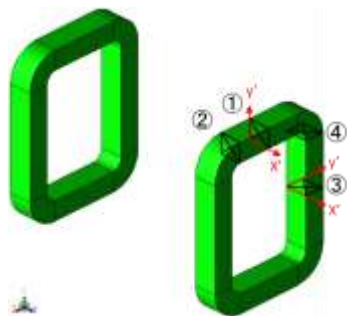


図 2.7 垂直磁界評価断面

より、最大垂直磁界とコイル電流の関係がロードラインとなる。これを、線材の臨界電流特性曲線の図に重ねて示すと図 2.9 のようになる。この結果から、運転温度 30K 以下であれば、市販の HTS 線材を用いて実現可能であると考えられる。

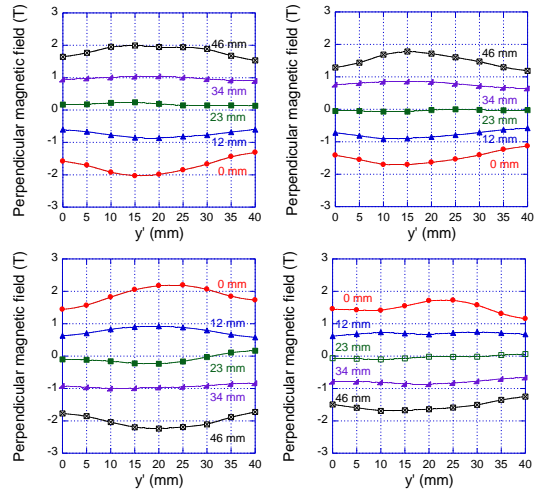


図 2.8 各断面内の垂直磁界分布

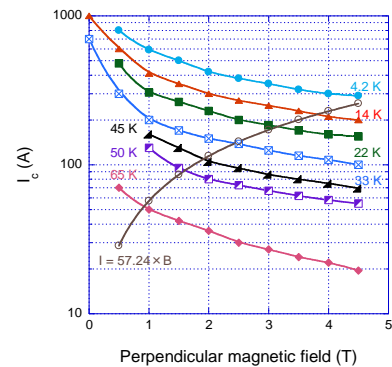


図 2.9 HTS コイルのロードライン

(3) アルミインゴットからの誘導磁界の低減手法

アルミインゴットは概ね直方体形状のため、回転角によりアルミ材料の内部を流れる渦電流分布は変化する。その結果、渦電流による誘導磁界は時間的に変化し、HTS コイルには反作用として変動磁界が加わる。この変動磁界は HTS コイルを不安定にする要因となるため、然るべき対策を講じる必要がある。アルミ材料と HTS コイルの間にアルミの電磁シールドを配置して、反作用誘導磁界の低減を図る方法について検討を行った。図 3.1 に、電磁シールドの厚さを 1mm, 3mm, 7mm と変化させた場合のコイル中心位置 ($x=216.5 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) の磁界の時間波形の解析結果を示す。電磁シールドの厚みが 7mm の場合、反作用誘導磁界は 1/10 程度に抑制できることが分かった。

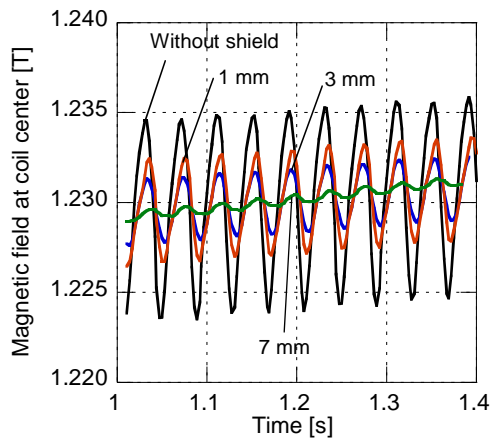


図 3.1 コイル中心位置の磁界の時間波形

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. T. Watanabe, S. Nagaya, N. Hirano, S. Fukui, M. Furuse, "Development of Conduction-cooled Superconducting Split Coil for Metal Melting by DC Induction Heating", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28, 3700104, 2018 [査読あり].

[学会発表] (計 3 件)

1. 福井 聡, 小野 稜平, 小川 純, 佐藤 孝雄, 渡部 智則, 長屋 重夫, 平野 直樹, 古瀬 充穂, 「高温超伝導コイルを用いた誘導加熱によるアルミ溶解実証装置の開発」, 2017 年度秋季低温工学・超電導学会, 高知市文化プラザ, 高知, 2017 年 11 月 22 日.
2. S. Fukui, R. Ono, J. Ogawa, T. Sato, T. Watanabe, S. Nagaya, N. Hirano, M. Furuse, "Development of Test Device for Aluminum Metal Melting by Electromagnetic Induction Heating Using HTS Coils", 25th International Conference on Magnet Technology, RAI-Amsterdam, Amsterdam, Netherland, Aug.27-Sep. 1, 2017.
3. 福井 聡, 小野 稜平, 小川 純, 佐藤 孝雄, 渡部 智則, 長屋 重夫, 平野 直樹, 古瀬 充穂, 「高温超伝導コイルを用いた誘導加熱によるアルミ溶解実証装置の開発」, 電気学会 超電導機器研究会, 新潟大学トキメイト, 新潟, 2017 年 1 月 19 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福井 聡 (FUKUI SATOSHI)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 70293199