

研究部会紹介

超音波鋳造研究部会の紹介

Introduction of Research Group for Ultrasonic Casting

コマロフ セルゲイ*

Sergey KOMAROV*

1. 研究部会の背景と目的

金属鋳造では、超音波照射により凝固組織微細化の効果が得られることが以前から知られている。超音波振動により金属組織を改善する最初の試みは旧ソ連で1935年になされた。Sokolovは低融点溶融金属に超音波振動を付加すると、金属の凝固組織を微細化できることを初めて示した¹⁾。それ以来、多くの国々で基礎および応用の研究がなされてきて、超音波鋳造の工業的適用例についても報告されてきているが、量産化の例はまだない。ところで、例えばWeb of Science (学術文献・引用検索データベース)を中心に、超音波エネルギーを利用した溶融金属の処理に関する分野の過去20年における論文数を検索してみると、その推移は図1の通りであり、最近、超音波鋳造技術に関する関心が高まり、盛んに研究開発が行われていることがわかる。その中で、溶融軽金属、特にアルミニウム合金の超音波処理、主に鋳造と脱ガスに関する論文は圧倒的多数となっている。さらに、最近の耐熱材料と超音波発生装置の進歩により急激に発展しつつあり、従来では困難な超音波処理が高温でも可能になったため、これまでにない超音波技術やそのプロセスの提案に対する期待も増してきている。

このような背景の中、新しく超音波鋳造研究部会を設立し、金属組織・鋳造や超音波応用の分野で活躍している大学研究者およびアルミニウムメーカーと超音波装置メーカーの方々参加のもと、情報交換、技術交流、共同調査、試験等を通じて、超音波鋳造に関する創造的な研究の発展と早期実用化を目指した取り組みを進めている。

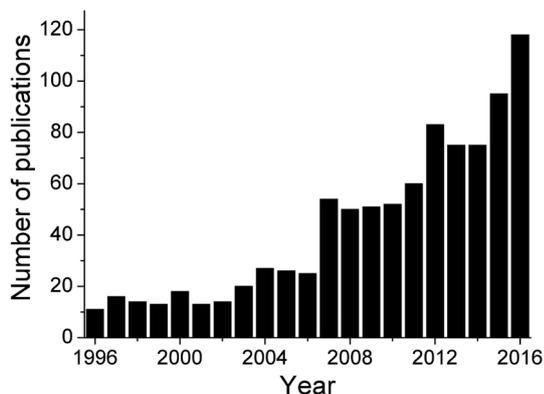


図1 超音波鋳造分野における年別論文数

2. 研究部会の構成

本研究部会は平成27年4月に開設されてから、約2年半が経った。委員の交代はあったが、平成29年7月現在は部会委員構成は14名である(表1)。学界からは、アルミニウム合金鋳造が専門の先生5名、および超音波プロセッシングが専門の先生4名に参加いただいた。企業側ではアルミニウムメーカー2社、自動車メーカー1社、超音波装置メーカー代理店1社から計5名の方々に参加いただいている。また、溶融アルミニウム処理用超音波装置がレンタルできるという点が本研究部会の特徴である。装置の外観を図2に示す。

3. 研究課題および活動概要

以下に研究部会の活動項目を示す。これらを平成27年度から平成30年度の4年間で達成することを目標としている。

- (1) 超音波鋳造における研究動向と技術展開の調査・情報交換
- (2) アルミニウム鋳造に利用可能な超音波装置についての調査・性能評価
- (3) 高温用超音波ホーンの設計・性能および実用可能性の検討
- (4) 超音波鋳造に関連する基礎現象についての検討
- (5) 各種合金の凝固組織に対する超音波振動の効果の検討
- (6) 超音波鋳造における数値計算の活用についての検討
- (7) 超音波装置と鋳造プロセスの大型化や高速化の課題

表1 超音波鋳造研究部会委員 (2017年7月現在)

氏名	所属	備考
コマロフ・セルゲイ	東北大学大学院	部会長
恒川 好樹	豊田工業大学	
安斎 浩一	東北大学大学院	
平田 直哉	東北大学大学院	幹事
林 大和	東北大学大学院	
成田 一人	大阪教育大学	
奥村 圭二	名古屋工業大学	
畑中 信一	電気通信大学	
柳楽 知也	大阪大学	
福田 時春	トヨタ自動車株式会社	
白井 秀友	日本軽金属株式会社	
久保 貴司	株式会社UACJ	
蓬田 翔平	株式会社UACJ	
加藤 和彦	株式会社テクノアイ	

* 東北大学大学院環境科学研究科循環材料プロセス学分野 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-02) Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University (6-6-02 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8579) E-mail: komarov@material.tohoku.ac.jp
 受付日: 平成29年7月25日



図2 溶融金属超音波処理用装置

3.1 超音波発生装置に関する検討

初年度は項目(1)～(3)について重点的に取り組んだ。まず、超音波を利用したアルミニウム鑄造に関する文献の調査と整理を進めるとともに、溶融金属の超音波処理を中心とする情報交換を通じて、超音波鑄造技術の利用状況とニーズについて調査を行った。特に、各参加企業から超音波鑄造技術に対する現状と今後の期待に関する貴重な意見をいただき、それをもとに本研究部会において今後の取り組みの方向性を決定した。そのうち、優先的に解決すべき課題として、工業的規模のアルミニウム鑄造プロセスに利用可能な超音波ホーンが求められている。現在、高温実験・工業的試験に適用できる既存ホーンには技術面・コスト面で課題がある。具体的には、以前ロシアで開発されたNb-Mo基耐熱合金製ホーンはアルミニウム鑄造において他の金属製ホーンと比べ優れた性能と寿命を達成し、高い評価を得た。しかしながら、鑄造温度が高くなるとAl中のNb溶解度が大きくなるためホーン寿命が短くなり、かつNbがアルミニウム溶湯汚染の原因の一つとなる。日本軽金属㈱開発製品の大型ダンベル状セラミックスホーンはNb-Mo合金製ホーンと比べ極めて高い高温安定性と寿命を有するものであるが残されている課題として低コスト化と振動子との接続部の高耐久性が挙げられる。また、1本のホーンにより処理可能な溶湯流量が15kg/minを超えると、超音波による効果は低下してしまうため、超音波処理の高効率化も重要な課題である。これらの課題を解決しない限り、超音波鑄造法の実用化は不可能である。

3.2 超音波鑄造に関連する基礎現象の検討

初年度と次年度に、項目(4)、(5)を中心とした超音波鑄造プロセスに生じる基礎現象、具体的には、音響キャビテーションと音響流について調査を行った。音響キャビテーションとは超音波を液体に照射する時の振動振幅があるしきい値を超えた場合、液体中で無数の気泡が発生し、膨張、圧縮を繰り返し、ある条件で崩壊する現象である。溶融金属において、超音波を溶湯に照射することで溶湯中にキャビテーションが発生し、これにより溶湯脱ガス、凝固組織制御等の効果が得られることがよく知られている。しかし、溶融金属中におけるキャビテーションに関する実験も精密な測定が極めて

困難であるために研究例が非常に少ないのが現状である。そこで本研究部会では、音響キャビテーションについて活発に研究が行われているソノケミストリー分野(超音波化学)に着目して、部会メンバーの電気通信大学の畑中委員に「キャビテーション気泡ダイナミクスに関する研究」を紹介いただき、水溶液中におけるキャビテーション気泡の動的挙動とその測定法について解説を受けた。また、(株)UACJの久保委員が超音波応用技術について広い視野に立った「超音波材料プロセスの基礎的研究と応用」のテーマで報告を行った。その中で、低融点モデル合金を用いた実験結果を踏まえ、凝固組織微細化に対する溶湯の冷却速度と超音波処理時間の影響について明確にした。

さらに、大阪大学の柳楽委員が「放射光X線を利用した超音波振動下での組織形成のその場観察」に関する研究を紹介して、Al-Cu合金の凝固におけるデンドライトの成長と溶断をその場観察でき、凝固組織の形成に及ぼす超音波振動と音響流の影響について解明を行った。

3.3 各種合金の凝固組織に対する超音波振動の効果

2年目と3年目には、超音波振動が各種合金の凝固過程・組織に及ぼす効果とそのメカニズムについて、特に応用面に重点を置いて調査・検討を行っている。平成28年度に早稲田大学の吉田 誠教授を招き、「超音波によるAl-Si亜共晶合金の結晶粒微細化に関する研究」と題した講演を聴講した。超音波振動による初晶 α (Al)相の微細化に対し、超音波処理時間と温度の影響について貴重な話を伺った。また、豊田工業大学の恒川委員がAl-Si系亜共晶合金の凝固と半凝固鑄造、およびAl-Si過共晶合金の鑄造に関する、初晶 α -Al、初晶SiとAl-Fe-Si化合物の晶出に対する超音波振動の効果と微細化メカニズムを解明した研究について3回にわたり紹介を行った。特に、いずれの合金でも、キャビテーション気泡は核生成サイト(異質核)として作用するが、各晶出物に対してそれぞれ異なる効果をもたらすことが示された。また、初晶 α -Alは音響流による攪拌効果によって粒状化することが確認された。それらの研究成果は本部会にとって大きな支えとなるものである。

コマロフは、日本軽金属㈱で以前実施した水中および溶融アルミニウム中で発生されるキャビテーションと音響流の特性についての研究開発の紹介を行った。この結果によれば、音響流は凝固組織に対して必ずしも正の効果のみをもたらすとは限らない。例えば、Al-Si過共晶合金のDC鑄造で初晶Siの微細化を目的として、ヘッダ内またはサンプル内に超音波振動を付加した試験では、音響流によってサンプル内温度が低下してしまったため、初晶Siは逆に粗大化した。このような結果から、固液共存領域への超音波照射を利用する鑄造プロセスでは、キャビテーションと音響流を同時に制御する必要があることが明らかになった。一例として、超音波DC鑄造におけるAl-Si過共晶合金の初晶Siの微細組織と均一分布の両方の効果を得られる絞ヘッダ内超音波処理法の開発について紹介した。

超音波振動は凝固組織改善だけではなく、アルミニウム溶湯の脱ガスと非金属介在物除去にも有効である。それを対象とした研究についてはトヨタ自動車㈱の福田委員により報告を受け、部会メンバーで活発な質疑応答を行った。

もう一つの活動として、超音波処理によりAl-Fe系化合物

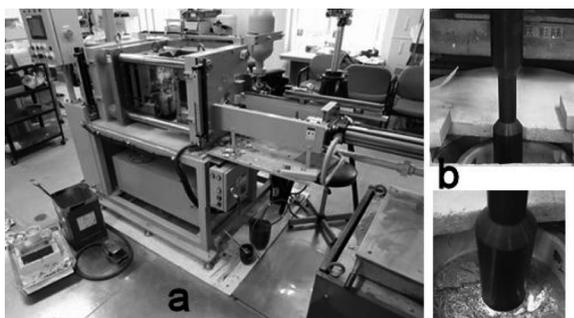


図3 東北大学保有の30tダイカストマシン (a) とラドル内超音波処理 (b)

を無害化（球状化・微細化）することによって、アルミニウム溶湯中の鉄の混入許容濃度とアルミニウムスクラップ再生率を向上することを目的として、28年度に超音波ダイカスト試験を行った。平田委員にご協力いただき、東北大学の安齋研究室の30tダイカストマシン（図3a）を借り、ADC12合金を用いた試験では、Fe濃度を0.7%（通常合金）または1.2%（リサイクル合金）にして、鑄造温度700°Cまたは630°Cにおいて、超音波ラドル内処理有り（図3b）と無しの影響を調査した。この結果を現在整理中である。

4. 残された課題と今後の活動予定

約2年半の間に7回の部会により、超音波発生装置とホーンの仕様、音響キャビテーションや音響流などの基礎現象、およびAl-Si系合金の凝固組織に対する超音波振動の影響に

ついて、文献調査、情報交換、技術交流と鑄造試験から知見を深めることができた。これからまだ1年半の活動が残っているが、超音波鑄造の実用化のためには次のような技術的課題解決に向けた取り組みが必要であることがすでに現時点でもわかっている。

- ① 超音波処理の大規模化に対応したホーン的设计改善、高性能化と低コスト化
- ② 超音波処理場内における溶湯流動の最適化
- ③ 凝固組織に影響を与える冷却速度、超音波処理時間と温度、異質核特性などの要因の複雑な絡み合い

さらに、ラボ実験では得られた効果が、実際のプロセスでは確認できないという問題があり、原因を明確にする必要がある。

これからの1年半では、部会の目標を達成するために、上述の課題に重点を置いて、超音波鑄造と関連現象の数値シミュレーションを積極的に行う予定である。それによって、厳密かつ定量的な数値解析に基づいて超音波鑄造条件の最適化とそれに関連するアルミニウム合金の組織と特性を予測することが新プロセスの効率的な開発につながると考えている。さらに、本部会で得た結果をもとに、軽金属学会第133回秋期大会（平成29年11月5日）では、「超音波鑄造技術とその関連現象」をキーワードとしたテーマセッションを開催し、様々な方面の発表を募り、研究紹介と討論を通じて情報・意見交換を行うことを予定している。

参考文献

- 1) S. Ya. Sokolov: Acta Physicochim. USSR, 3 (1935), 939-944.