

循環型社会を目指した 材料製造プロセスの研究

Environment-friendly Material Processing



教授 コマロフ・セルゲイ
Professor
Sergey Komarov



准教授 吉川 昇
Associate Professor
Noboru Yoshikawa



助教 山本 卓也
Assistant Professor
Takuya Yamamoto

本研究グループの研究目的は、環境調和型の材料プロセスを開発し、持続可能な社会を実現することである。この目的を達成するために、物理作用や波の効果をj利用して伝統的な材料プロセスを変革することに挑戦する。物理場は処理される物質に選択的にエネルギーを供給する。エネルギーを供給する手法が極端に限られた高温プロセスに対しては、このような物理場や波は特に有効である。本研究グループの別の研究は物理モデルと数値シミュレーションである。この分野では、溶湯処理や金属j鑄造、排水処理といったプロセス内での、単相流、混相流に対する流動、熱、物質輸送をj解明する基礎研究を行なっている。

The purpose of our group is to develop environmentally friendly material processes in order to contribute to building a sustainable society. To achieve this purpose, we are trying to break the barriers of traditional materials processing with the help of physical fields and waves. Physical fields offer an effective way to selectively supply energy to the materials being processed. Physical fields and waves are especially attractive for high-temperature processes, for which the choice of techniques available for supplying energy are severely limited. Another field of our research activity is physical modeling and numerical simulation. In this area, fundamental studies are performed to clarify the fluid dynamics and the heat and mass transport phenomena in single and multiphase flows in such processes as melt treatment, metal casting, and waste processing.

超音波を利用した材料プロセッシング

超音波は気体や液体、固体のような弾性体中での超音波伝播能力や必要とされる場所へ超音波のエネルギーを伝播させる能力に影響される。本研究での目的は、超音波に関連した現象を調査し、溶融金属、排水、排気ガスに対するより効率的で持続可能な処理プロセスを開発することである。特に、当研究室では実験と数値シミュレーションを利用してキャビテーションや音響流という現象を調査している (Fig.1, 2)。液中へ超音波を照射した時にこれらの現象が発生する。キャビテーション気泡は超音波によって圧壊するが、そのときに莫大なエネルギーを放出するため、溶融金属中での凝固中の結晶や固体粒子の破壊や分散、排水中での不純物分解に利用される。例えば、アルミニウム溶湯中の Al-Fe 金属間化合物粒子は超音波によって微細化されるが (Fig.3)、これはリサイクル可能な Al 合金や複合材料の開発へと繋がる。別のプロジェクトでは、超音波キャビテーションと水中プラズマを組み合わせた影響を調査し、新規高効率排水処理の技術開発を目指している。Fig.4 は様々な実験条件における Rhodamine B の分解効率を示している。

Ultrasonic processing: Fundamentals and applications

The effects of ultrasound waves are associated with the ability of these waves to propagate through elastic mediums such as gases, liquids, and solids. Thus, these waves can be used to transfer energy to places where it is needed. The purpose of our research is to investigate ultrasound-related phenomena and to develop more efficient and sustainable processes for the treatment of liquid metals, wastewater, and exhaust gases. In particular, we investigate phenomena such as cavitation and acoustic streaming through experiments and numerical simulations (Figs. 1 and 2). These phenomena arise when ultrasound waves propagate through liquid phases. When cavitation bubbles collapse, they release a huge amount of energy, which can then be used to fragment and disperse the solidifying crystals and solid particles in molten metals, as well as to decontaminate wastewater. For example, the ultrasound-assisted refinement of Al-Fe intermetallic particles in molten aluminum (Fig. 3) provides a background for the development of easy-to-recycle Al alloys and composite materials. In another project, we are investigating the combined effect of acoustic cavitation and underwater plasma, with the goal of developing new, more efficient technologies for wastewater treatment. Figure 4 shows the degradation efficiency of rhodamine B under various experimental conditions.

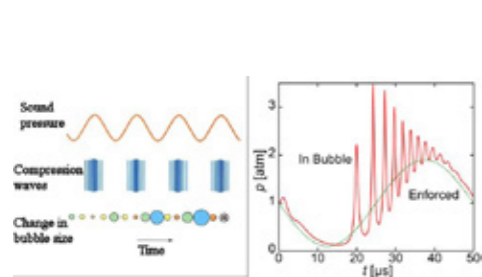


Fig.1 A schematic representation of cavitation (left) and numerically predicted pressure in a cavitation bubble (right)

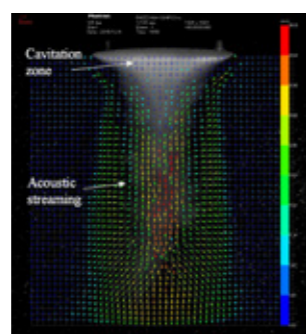


Fig.2 A typical pattern of cavitation zone and acoustic streaming

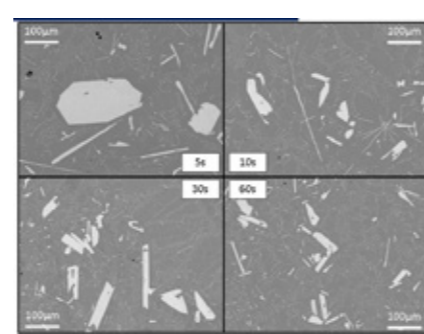


Fig.3 SEM views of Al-Fe intermetallic particles formed under various times of ultrasonic irradiation

電磁場を利用した環境 / 材料プロセッシング

本研究室では、マイクロ波 (GHz) を用いた材料プロセッシングを行なっている。マイクロ波は電磁波であり、GHz で振動する電場と磁場を有している。我々は、材料に対する電場と磁場による照射効果を分離して調べている。特にマイクロ波磁場と外部静磁場との関係は、磁気共鳴をはじめとし、新規な材料プロセッシング手法の開発において興味深い。さらにマイクロ波には、熱平衡論では説明が難しい「非熱的効果」が存在すると言われている。Fig.5 には (a) ZrO_2, B_2O_3, C のマイクロ波励起反応による ZrB_2 の合成に関する熱力学的考察および (b) 反応により生成した ZrB_2 の SEM 写真を示す。熱力学で予想される温度より低い温度で ZrB_2 が生成することが確認されている。これは材料製造プロセスにおいて、省エネルギー化に寄与すると考えられ、期待されている。またガラスリサイクルにおける成分の均一化等を目的として、高周波 (kHz) 印加に依る非金属融体の誘導加熱攪拌に関する基礎研究 (低融点の溶融ガラスや溶融塩を対象として実験及びシミュレーション) を行なっている。

環境調和を考慮した金属製造・加工プロセス

アルミニウムのリサイクル率を向上させることを目的として、リサイクルによって再生された二次地金を利用する割合を高めるための研究を行っている。具体的には、アルミニウム溶湯を機械攪拌することで不純物を吸着させるフラックスを高速に分散させる技術や機械攪拌に伴って発生する酸化物等の巻き込み低減を達成する技術開発のために、水を用いた流動、物質輸送実験、アルミニウム攪拌・鑄造実験、スーパーコンピュータを利用した大規模アルミニウム溶湯攪拌シミュレーションを行っている。Fig.6 のように水モデル実験や数値シミュレーションを利用することで機械攪拌操作中での気液界面変形挙動をj解明し、酸化物巻き込み低減のための指針を示している。

Application of electromagnetic fields to environmental and materials processing

Our laboratory also hosts fundamental studies on the microwave processing of materials. Microwaves are electromagnetic waves with oscillating electric and magnetic field components at GHz frequencies. We separately investigate the irradiation effects of electric and magnetic fields. Notably, microwave magnetic-field irradiation with the imposition of an external magnetic field is of interest, not only because this raises magnetic resonance but also because it could be used in the development of new process for material fabrication. Moreover, microwave processing has a so-called nonthermal effect.

In Figure 5, part (a) is a composition diagram of the thermodynamic-equilibrium calculation for the reaction of ZrO_2, B_2O_3 , and C. Part (b) is a SEM photograph of a ZrB_2 particle formed via a microwave-excited reaction. These results demonstrate that the ZrB_2 was formed at an unexpectedly low temperature, based on the thermodynamic equilibrium. This feature could contribute to energy savings in industrial production. In addition, we conduct fundamental studies on the high-frequency (kHz) induction heating and stirring of nonmetallic molten fluids. This includes experimental and simulation studies of molten vanadium oxide glass and molten salts.

Environmentally friendly metallurgical processing

To improve the recyclability of aluminum, there is a need to use more secondary aluminum and scrap; however, such materials contain a lot of impurities. We are thus developing novel methods for the mechanical stirring of molten aluminum, with the goal of producing better flux dispersion and thus more efficient removal of impurities. To achieve these purposes, we performed water-model experiments to investigate fluid flow and mass transfer during the stirring and casting of molten aluminum. In addition, we conducted numerical simulations on a supercomputer to investigate transport phenomena in large-scale melting furnaces. As shown in Figure 6, we investigated the gas-liquid interface deformation during mechanical stirring using a water-model experiment and a numerical simulation; we thus developed a method to reduce the entrainment of oxide film.

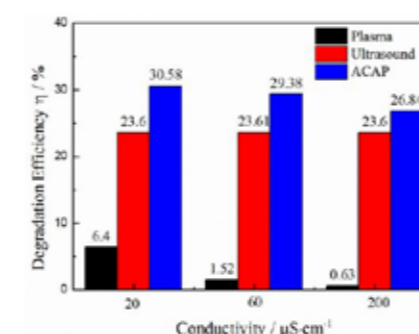


Fig.4 Degradation efficiency of Rhodamine B under various conditions: underwater plasma, ultrasound and their combination (ASAP)

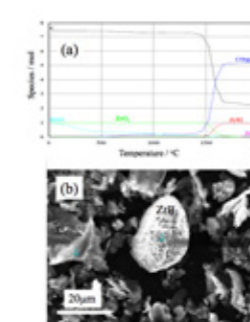


Fig.5 (a) Thermodynamic calculation of phase composition at high temperature for consideration of reaction among ZrO_2, B_2O_3 and C. (b) SEM photograph of formed ZrB_2 by microwave excited reaction at $1300^\circ C$.

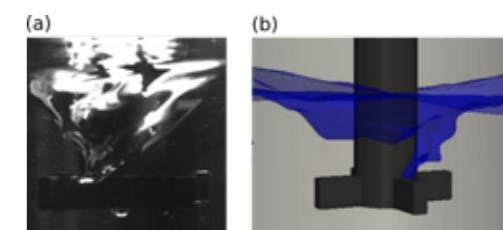


Fig.6 Snapshots of (a) experimental and (b) simulated free surface shapes during mechanical stirring.