

気液 2 相流を応用した金属微粉末の粉砕メカニズムの解明

楊念儒*, 武市恭和**, 児島忠倫***

Study of Breakup Mechanism of Metallic Minute Powder Applying A Gas-Liquid Two-Phase Flow

Nianru YANG *, Yasutomo TAKEICHI** and Tadatomo KOJIMA***

synopsis

This paper is a research development about the design of atomization nozzles that manufacture the minute metal powder used in an industrial field. The purpose of study is to clarify the influence of exit shape of an annular nozzle on the flow fields of an annular supersonic jet. This paper has clarified a gas-liquid two-phase flow issued from an annular nozzle to research and develop a practicable nozzle. Especially, the gas-liquid two-phase flows for the air-molten aluminum have been clarified by the numerical analysis. Finally, the velocity, pressure contours, and the FVF of the flow on the effects of an annular supersonic jet on the minute powder of the air-water or air-molten aluminum are examined.

As a result, it is clarified that the flow fields of a gas-liquid two-phase flow of the nozzle exit are influenced considerably by the configuration of molten metal nozzle exit and the stagnation pressure. Moreover, the fluid volume fraction (FVF) of the molten aluminum is examined, and according the breakup mechanism of minute aluminum powder is clarified.

keywords: Supersonic Flow, Compressible Flow, Numerical Analysis, Annular Nozzle, Annular Flow,
Gas-Liquid, Two-Phase Flow, Molten Metal, Atomization Nozzle, Fluid Volume Fraction

*近畿大学研究員

Researcher, Kinki University

**近畿大学大学院システム工学研究科

Graduate School of Systems Engineering, Kinki University

***近畿大学工学部知能機械工学科

Department of Intelligent Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Kinki University

1. 緒言

環状ノズルから噴出される環状超音速噴流は、工業分野で幅広く利用されている。特に、金属の微粉末を製造するアトマイズノズルに利用、応用されているが、極微細な粉末が生成されるメカニズムや効率よく生成するためのノズルのデザインについては十分に解明されていない^{(1)~(3)}。著者らは、これまでに環状ノズルから噴出される超音速噴流の定常特性や非定常特性を実験と数値解析によってある程度明確にしている^{(4)~(6)}。これらの研究では、空気のみ一流体がノズルから噴出される場合だけを取り扱っている。

本報告では、より実用的なノズルの研究開発を行うために気液二相流体がノズルから噴出される流れ場の解明を行ない、アルミ粉末の生成メカニズムを明確にすることを目的としている⁽⁶⁾。特に、環状ノズルから噴出される空気と水、および空気とアルミニウム溶湯の気液二相流体の数値解析を行い、超音速で噴出される超音速の環状噴流が水やアルミニウム溶湯に及ぼす影響とその挙動について調べている。

その結果、溶湯ノズル先端の形状、溶湯ノズル先端部の突出し量、溶湯ノズルの小孔から吸引される液体の種類およびよどみタンク圧力の違いが、環状ノズルの出口付近の二相流の流れ場に及ぼす影響、ならびに、速度、圧力および速度ベクトルについて明確にしている。さらに、水の体積率とアルミニウム溶湯の体積率を計算して、金属微粉末の生成メカニズムを明確にしている。特に、産業界でニーズの高い数千マイクロオーダーの極微細なアルミニウム粉末の粉碎メカニズムについての知見を得ている。

2. 解析モデルおよび数値解析方法

本研究では、溶湯ノズルの先端が鈍頭形状のノズルAと平坦なノズルBの2タイプのノズルを使用した。Fig.1に、環状ノズルの出口部を広げ、溶湯ノズルの先端をフラットにしたBタイプノズルを示す。B1タイプのノズルは、溶湯ノズルの突き出し量の異なるB1、B2、B3タイプの3種類のノズルを用いた。溶湯ノズルの突出し量 h が最も大きいタイプをB3とした。また、溶湯ノズルの先端を丸めたノズルをAタイプとした。

混相流には相間の境界が存在し、相間の境界面の形状を考慮することで混相流を正確に捉えることができるが、膨大なメッシュ数を必要とし計算付加が大きくなる。そこで、気液二相流の解析には、異なる2つ以上の相が混在している混相流、つまり気液の混ざり具合のみを考慮し、相が分散している2流体モデルを適用した。このような2流体モデルでは、同じ位置に各相の体積率や速度などが存在するが、圧力は、各相で共通の圧力として取り扱う。つまり、気液の各相の平均の体積割合を用いた2流体モデルによる分散混相流の手法で解析を行った。なお、環状ノズルから噴出される高圧の空気を第1相の連続相、流れ場に分散して存在する相を第2相の分散相とする。第2相の水とア

ルミニウム溶湯の液体を分散相として設定した。空気と水の気液二相流の場合には、温度は両者とも 25°C とし、空気とアルミニウム溶湯の気液二相流の場合には、空気を 500°C 、アルミニウム溶湯の温度は 660°C とした。なお、気液二相間の相互の物質移動および乱流拡散はないものとし、重力は下方向に設定した。

基礎方程式には、各相の質量保存式、各相の運動量保存式、乱流エネルギー式、乱流消失率の式、エネルギー保存式、および拡散物質の保存式等を用いた。なお、計算は、流れ場を非定常流として取り扱い、有限体積法を用いて三次元ノズルのモデルで計算を行った。

環状ノズルは、生産現場を想定して上向きに設置した。連続相の高圧空気は、環状ノズルの外環から噴出させ、分散相の液体は中央部の溶湯ノズルから吸引される。

なお、数値解析は、よどみゲージ圧力 P_0 を大気圧 P_a で除したよどみ圧力比 $P_0/P_a=3, 10, 30$ に対して行った。

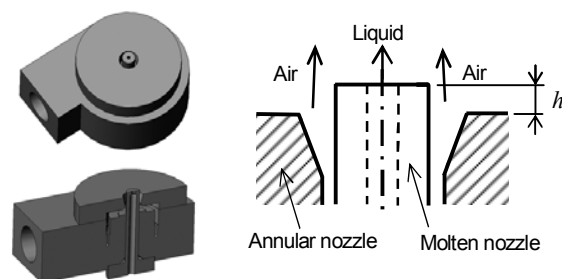


Fig.1 Shape of annular nozzle (B Type)

3. 解析結果および考察

3.1 溶湯ノズルAタイプにおける解析結果および考察

第1相を空気の連続相、第2相を液体のアルミニウム溶湯の分散相として解析した結果について述べる。

Fig.2に、溶湯ノズルAのよどみ圧力比 $P_0/P_a=30$ に対する空気とアルミニウム溶湯の気液2相流の解析結果を示す。

Fig.2(a)~(c)には、それぞれ等速度、等圧力、アルミニウム溶湯の等体積率を、Fig.2(d)には、ノズル先端付近における速度ベクトルを示す。

Fig.2(a)の等速度図を示すように、 660°C の高温のアルミニウム溶湯の影響により、空気は下流域まで 800 m/s 以上の超音速となっている。

Fig.2(b)の等圧力図に示すように、ノズルの先端付近では、第1相の超音速噴流の急膨張のために負圧領域が見られる。また、超音速噴流の合流で流速が増大する傾向にある下流域において負圧となる領域が生じている。

Fig.2(c)のアルミニウム溶湯の等体積率に示すように、体積率 $10^{-27}\sim 10^{-18}$ のアルミニウム溶湯が飛散している。イメージ的には、かなり細かい粒状のアルミニウム粉末が飛散していると推察される。

Fig.2(d)のノズル先端付近における速度ベクトルに示す。この速度ベクトルからアルミニウム溶湯の粉碎は、連続相の超音速噴流によって、離点S付近で生じていると考えられる。この離点Sでの粉碎を、一次粉碎と称することとする。

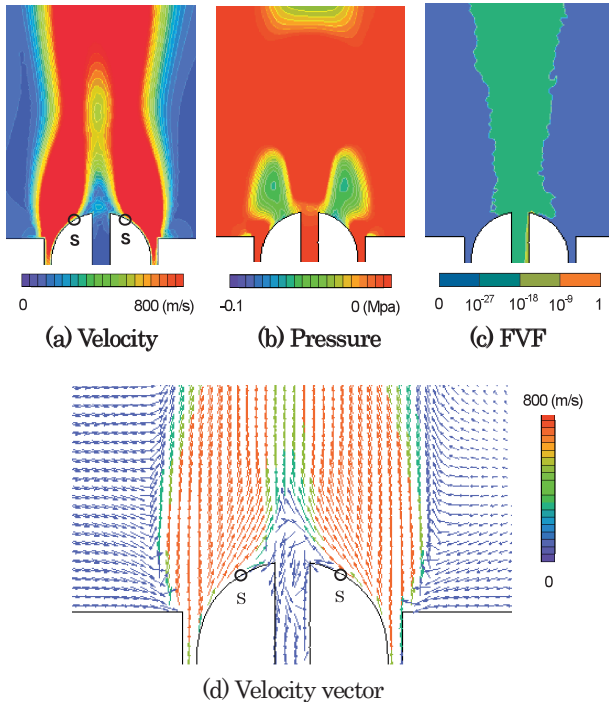


Fig.2 Flow of annular nozzle A for $Po/Pa=30$, Gas-Aluminum

3.2 溶湯ノズル B タイプにおける解析結果および考察

Fig.3に、溶湯ノズル B1 のよどみ圧力比 $Po/Pa=30$ に対する空気とアルミニウム溶湯の気液二相流の解析結果を示す。

B1 ノズルは、溶湯ノズルの突き出し量 h がもっとも小さいタイプである。

Fig.3(a)~(c)には、それぞれ等速度、等圧力、アルミニウム溶湯の等体積率を、Fig.3(d)には、ノズル先端付近における速度ベクトルを示す。溶湯ノズルの形状が A タイプの場合と異なるために、それぞれの分布形態が異なっている。

Fig.3(a)の空気の等速度図に示すように、第 1 相の空気はノズル先端で急膨張し、広い領域にわたっておおよそ 1200 m/s、マッハ数 2.5 程度の超音速域が形成されている。Fig.2(a)に示す A タイプのノズルの場合よりもかなり早い超音速領域が形成されている。流れの離れは、角部のやや内側にある。

ノズル出口付近の圧力は、Fig.3(b)の等圧力図に示すように、ノズルの先端では圧力が負圧になり、 -50 kpa までに低下している。さらに、噴流が出口付近と合流する領域を除き、下流側の広い領域で負圧となっている。

Fig.3(c)のアルミニウム溶湯の等体積率図に示すように、ノズル先端部から、体積率 $10^{-20} \sim 10^{-17}$ のアルミニウム溶湯が広い領域で飛散している。また、溶湯ノズルの出口部では体積率 $10^{-17} \sim 10^{-14}$ のアルミニウム溶湯がノズル先端部まで上昇、吸引されている。なお、溶湯ノズル出口部には、流れの負圧のために一對の渦域が見られる。

Fig.3(d)の速度ベクトルに示すように、溶湯ノズル出口部には、一對の明りょうな渦が形成されている。この渦領域は、A タイプの球形状のノズルよりも広い範囲にわたって形成されており、より多くのアルミニウム溶湯を吸引することができるものと考えられる。溶湯ノズルの小孔から吸引されたアルミニウム溶湯は、溶湯ノズル先端のフラットな面を矢印で示したように薄い膜となって放射状に広がる。この薄いアルミニウム膜は、溶湯ノズルの角部付近における超音速噴流の速度こう配の著しい速度せん断層によって裁断、粉碎され、下流域に飛散する。この速度せん断層が、アルミニウム膜の一次粉碎の主要因であると考えられる。なお、離点Sは、溶湯ノズルのやや内側にあることがわかる。

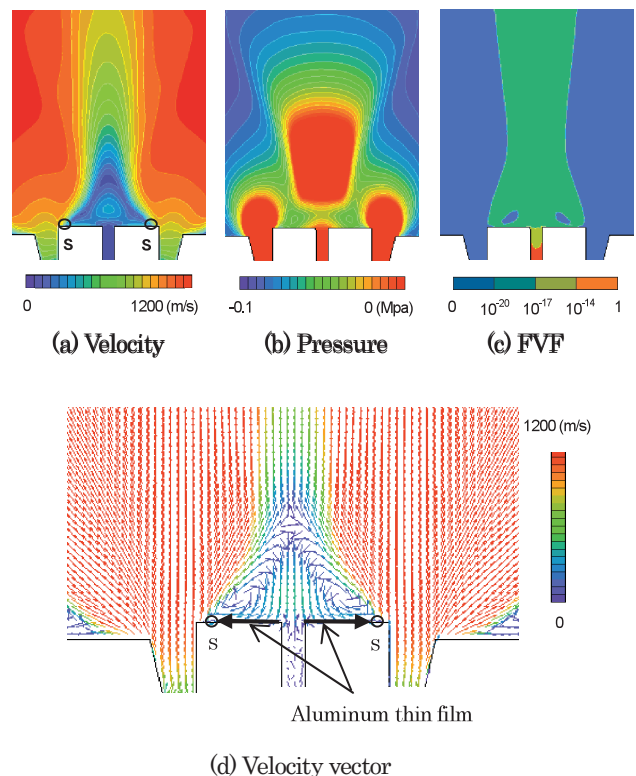


Fig.3 Flow of annular nozzle B1 for $Po/Pa=30$, Gas-Aluminum

Fig.4に、溶湯ノズル B2 のよどみ圧力比 $Po/Pa=30$ に対する空気とアルミニウム溶湯の気液二相流の解析結果を示す。

Fig.4(a)~(c)には、それぞれ等速度、等圧力、アルミニウム溶湯の等体積率を示す。

Fig.4(a)の等速度図に示すように、Fig.3(a)の溶湯ノズルB1タイプ大きな違いは見られないが、ノズルの中央部における低速領域がやや下流側まで伸びている。

Fig.4(b)の等圧力図に示すように、ノズルの先端では圧力がさらに -80kPa までに低下し、さらに溶湯ノズルの小孔の中に負圧が生じている。

Fig.4(c)のアルミニウム溶湯の等体積率図に示すように、溶湯ノズルの内部には、体積率 10^{-14} ~1のアルミニウム溶湯がノズル先端部まで上昇し、ノズルの平坦部に沿って薄いアルミニウム膜が放射状に広がっている。その後、溶湯ノズルの角部で薄いアルミニウム膜は、超音速噴流で一次粉碎され飛散している。噴流の中央部分には、体積率 10^{-17} ~ 10^{-14} のアルミニウム粉末が、その周囲にはさらに細かく粉碎された体積率 10^{-20} ~ 10^{-17} のアルミニウム粉末が飛散している。

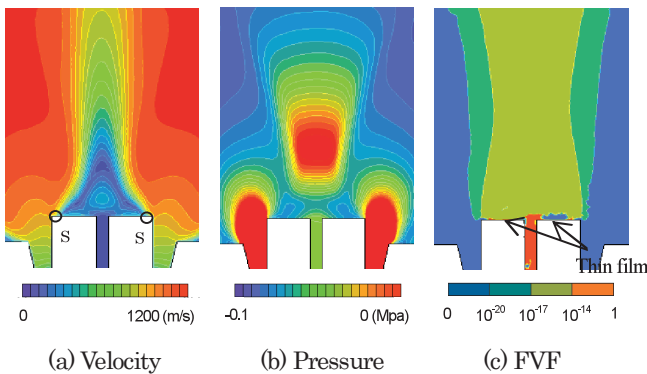


Fig.4 Flow of annular nozzle B2 for $Po/Pa=30$, Gas-Aluminum

Fig.5に、溶湯ノズルB3のよどみ圧力比 $Po/Pa=30$ に対する空気とアルミニウム溶湯の気液二相流の解析結果を示す。溶湯ノズルの突き出し量 h が、最も大きいタイプのノズルである。Fig.5(a)~(c)には、それぞれ等速度、等圧力、アルミニウム溶湯の等体積率を示す。

Fig.5(a)の等速度図に示すように、中央部の流れは、Fig.4(a)とほぼ同様となっているが、より下流側まで速度の低い領域が存在している。

Fig.5(b)の空気の等圧力図に示すように、噴流が合流する付近でやや圧力は増加するが負圧となっている。また、溶湯ノズルの小孔内では、負圧となっており、ノズルの先端では圧力がさらに低くなり、 -0.1Mpa となっている。

Fig.5(c)のアルミニウム溶湯の等体積率図に示すように、溶湯ノズル内では、体積率の大きい 10^{-14} ~1のアルミニウム溶湯が吸引されている。この体積率をもつアルミ溶湯は、ノズルのフラット面で薄膜となって放射状に流出し、はく離点付近で一次粉碎される。なお、噴流の中央付近においても、溶湯ノズル内と同じ程度の体積率をもつアルミニウム粉末が存在している。その周囲には体積率 10^{-17} ~ 10^{-14} の細かなアルミニウム粉末が、その周囲にはさらに

小さな体積率 10^{-20} ~ 10^{-17} の細かなアルミニウム粉末が飛散している。

以上のことから、溶湯ノズルの突き出し量 h が大きいノズルほど、渦領域を形成する負圧領域は広くなり、より多くのアルミニウム溶湯を吸引する要因になっていると考えられる。

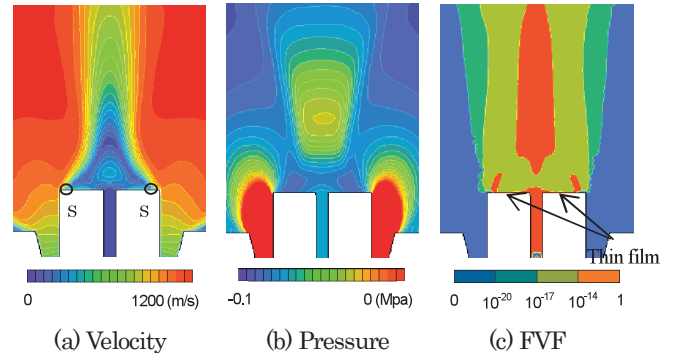


Fig.5 Flow of annular nozzle B3 for $Po/Pa=30$, Gas-Aluminum

3.3 溶湯ノズル先端部のアルミニウム溶湯の詳細な流れ

Fig.6には、Fig.2(c)で示した溶湯ノズルAのよどみ圧力比 $Po/Pa=30$ に対するアルミニウム溶湯の等体積率の詳細図を示す。溶湯ノズルの外径を d としている。環状ノズルから噴出された噴流は、出口部で急膨張する超音速噴流となり、この超音速噴流の噴流境界層は、たる形衝撃波を構

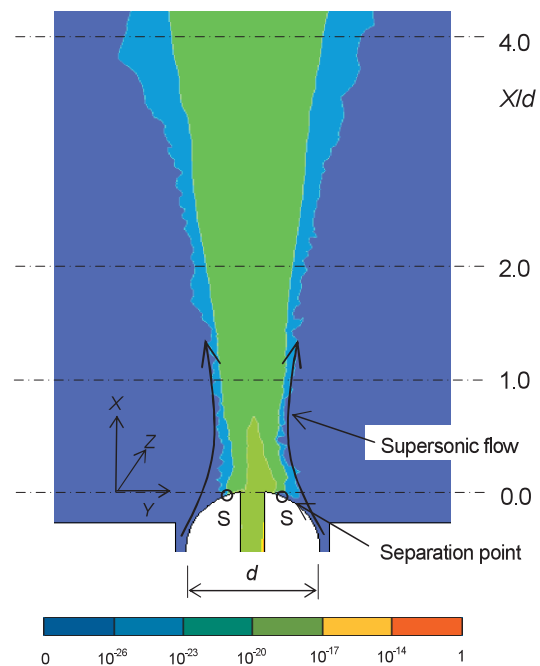


Fig.6 FVF contour of molten nozzle A for $Po/Pa=30$, Gas-Aluminum

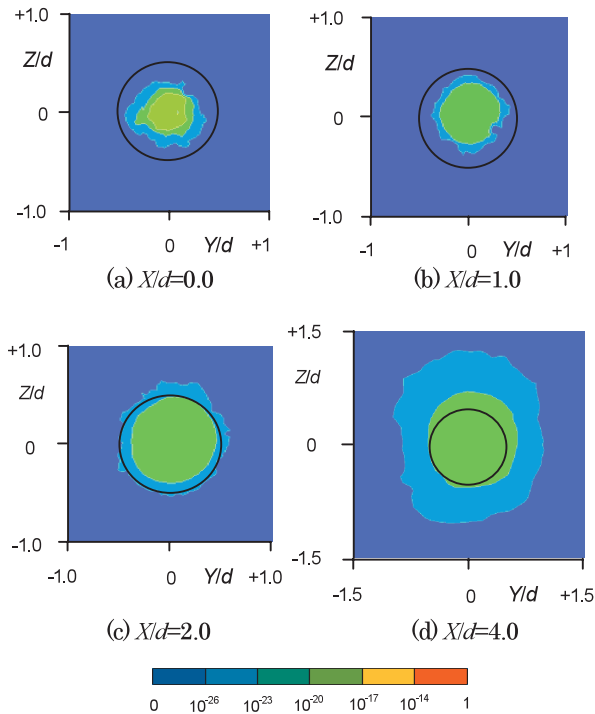


Fig.7 FVF contours in Y-Z cross section of molten nozzle A for $Po/Pa=30$, Gas-Aluminum

成していると考えられる⁽⁷⁾。したがって、超音速噴流の内側の境界層付近の流れは、矢印のようなたろ形形状に膨らんだ流れとなる。溶湯ノズル内では、体積率 $10^{-20} \sim 10^{-17}$ のアルミニウム溶湯がノズル先端まで上昇し、そのままの体積率で流出している。ノズル先端の球面に沿った薄いアルミニウム膜は、はく離点 S で超音速噴流によって一次粉碎される。そこでの体積率は、 $10^{-23} \sim 10^{-20}$ のアルミニウム粉末が、さらにその外側には体積率 $10^{-26} \sim 10^{-23}$ のより細かいアルミニウム粉末が下流側へ飛散している。下流では、さらにアルミニウムの粉碎が繰り返されるために、流れの拡散とともに細かいアルミニウム粉末の量も多くなっている。

このノズル A では、溶湯ノズル出口部に生じる渦領域が小さく、アルミニウム溶湯の吸い上げ量が少なくなっている。そのために図から判るように、少量ではあるが比較的に微細な体積率の同じ値のアルミニウム粉末が飛散している。

Fig.7(a)~(d)には、それぞれ Fig.6 で示した溶湯ノズル A のよどみ圧力比 $Po/Pa=30$ に対する $X/d=0.0, 1.0, 2.0, 4.0$ の Y-Z 断面内でのアルミニウム溶湯の等体積率の詳細図を示す。図中の丸印は溶湯ノズルの外径を示している。

図(a)に示すように、 $X/d=0.0$ の溶湯ノズルの出口部では、少量ではあるが 3 種類の体積率をもつアルミニウム粉末が見られる。

図(b)~(d)では 2 種類の体積率をもつアルミニウム粉末が見られる。下流の断面ほど体積率のより小さな領域が増

加しており、アルミニウム粉末は、下流域ほど小さな粉末が生成されていることを示唆している。

この図からも判るように、ノズル A では同じ大きさのアルミニウム粉末が安定的に生成されている。

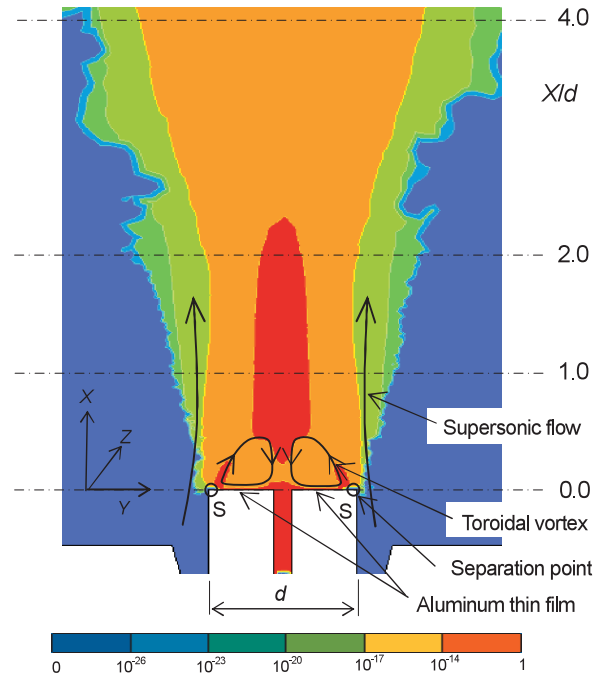


Fig.8 FVF contour of molten nozzle B3 for $Po/Pa=30$, Gas-Aluminum

Fig.8 には、Fig.5(c)で示した溶湯ノズル B3 のよどみ圧力比 $Po/Pa=30$ に対するアルミニウム溶湯の等体積率の詳細図を示す。アルミニウム溶湯が吸引されて、粉碎される基本的な粉碎メカニズムを示している。

環状ノズルからの超音速噴流は、矢印に示すように下流側に噴出している。溶湯ノズル出口部には矢印のような閉じられた負圧域となる一対の循環する円錐状の渦領域が形成されている。溶湯ノズル内では、体積率 $10^{-14} \sim 1$ のアルミニウム溶湯が吸引されており、ノズルのフラット面で薄いアルミニウム膜として放射状に周囲に広がっている。この薄いアルミニウム膜は、はく離点付近で超音速噴流によって一次粉碎され、下流域に飛散する。薄いアルミニウム膜と同じ体積率のアルミニウム粉末が噴流中心付近に飛散している。また、この一次粉碎によって体積率 $10^{-17} \sim 10^{-14}$ のアルミニウム粉末が広い範囲にわたって飛散している。はく離点付近で粉碎されるアルミニウム粉末は、経験的に数十ミクロンの比較的大きな粉末であると推測される。なお、少量ではあるがその外側には体積率 $10^{-20} \sim 10^{-17}$ 、および $10^{-23} \sim 10^{-20}$ のアルミニウム粉末が飛散している。さらに、その外側には体積率 $10^{-26} \sim 10^{-23}$ の極少量のより微細なアルミニウム粉末が飛散している。これは、超音速噴流境界層付近の速度こう配の大きい速度せん

断層によって、さらに細かく粉碎されるからと推察される。

Fig.9(a)~(d)には、それぞれ Fig.8 で示した溶湯ノズル B のよみ圧力比 $Po/Pa=30$ に対する $X/d=0.0, 1.0, 2.0, 4.0$ の Y-Z 断面内でのアルミニウム溶湯の等体積率の詳細図を示す。図中の丸印は溶湯ノズルの外径を示している。

Fig.9(a)の $X/d=0.0$ に示すように、溶湯ノズルの出口面に沿ってアルミニウム溶湯が薄い膜となって放射状に広がっている。そして、はく離点ではなく離した流れは、激しく振動するために、その周囲に体積率の小さなアルミニウム粉末が飛散している。

図(b)に示す $X/d=1.0$ においては、種々の大きさをもつ体積率のアルミニウム粉末が飛散している。

図(c) に示す $X/d=2.0$ においても同様の傾向が見られるが、より小さな体積率をもつアルミニウム粉末が飛散している。この付近の領域は、自励振動によって流れが激しく振動するために、より小さな体積率のアルミニウム粉末が非定常的に飛散している。

図(d)に示す $X/d=4.0$ の下流域においては、さらに小さな体積率をもつアルミニウム粉末が飛散している。しかし、流れの中には、種々の大きさのアルミニウム粉末が混在しており、同じ径のアルミニウム粉末を必要とする場合には、分類する作業を必要とする。

以上のことより、流れは非定常流で溶湯ノズルのはく離点付近において激しく振動しているために、いずれのノズルにおいても体積率 FVF の図に示したように、流れ場全

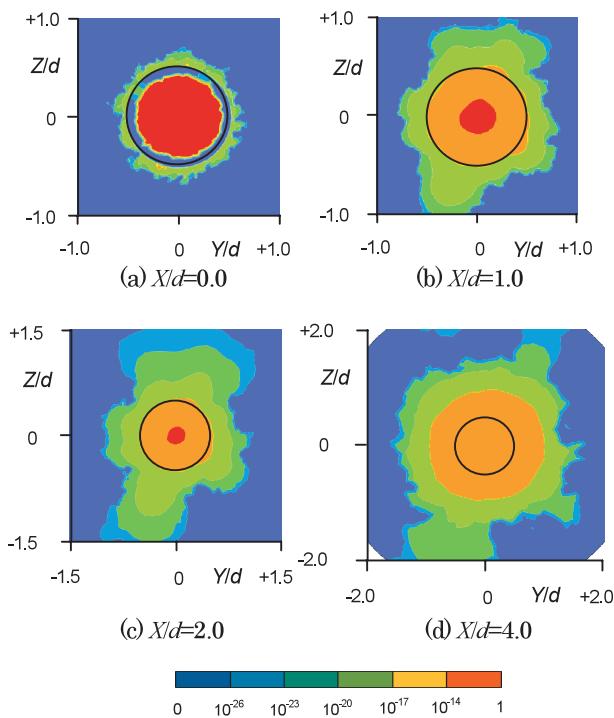


Fig.9 FVF contours in Y-Z cross section of molten nozzle B3 for $Po/Pa=30$, Gas-Aluminum

体にわたって水およびアルミニウム粉末が飛散している。そして、Fig.6, 8 に示したように、噴流の中心部ほどアルミニウム粉末の体積率は大きい。そして、溶湯ノズルのはく離点Sからの流れから生じる速度こう配の大きい境界層付近が体積率は小さく、微細なアルミニウム粉末が見られる。

3.4 アルミニウム溶湯の粉碎メカニズム

アルミニウム溶湯の粉碎メカニズムについて、次に述べる。

Fig.10 には、溶湯ノズル B タイプの出口付近の超音速噴流の流れと溶湯ノズルから吸引されるアルミニウム溶湯の粉碎メカニズムを模式図として示している。液体の粉碎メカニズムについては、これまでに A. ÜNAL⁽¹⁾⁽²⁾ や I.E.Anderson⁽³⁾ らがある程度明確にしている。

著者らは、本論文の数値解析によって、気体として空気、液体として水およびアルミニウム溶湯を用いた気液二相流体の粉碎メカニズムを明確にすることができた。さらに、これまでの実験や可視化^{(5),(7)~(9)}の結果から数値解析の妥当性、信頼性についても確認することができた。

Fig.10 の模式図に示すように、環状ノズルから噴出される噴流は、ノズル出口部で流れの急膨張によって超音速噴流となり、周囲流を巻き込みながら下流で合流する流れとなる。溶湯ノズルの出口部では、矢印で示すような閉じられた一対の円錐状の循環する渦領域が生じている。この円錐状の開空間での渦領域は、比較的大きな負圧となるために、溶湯ノズルの小孔から少量のアルミニウム溶湯が吸引される。このアルミニウム溶湯は、負圧によって出口部の P 点まで吸引され、その後溶湯ノズルのフラット面に沿っ

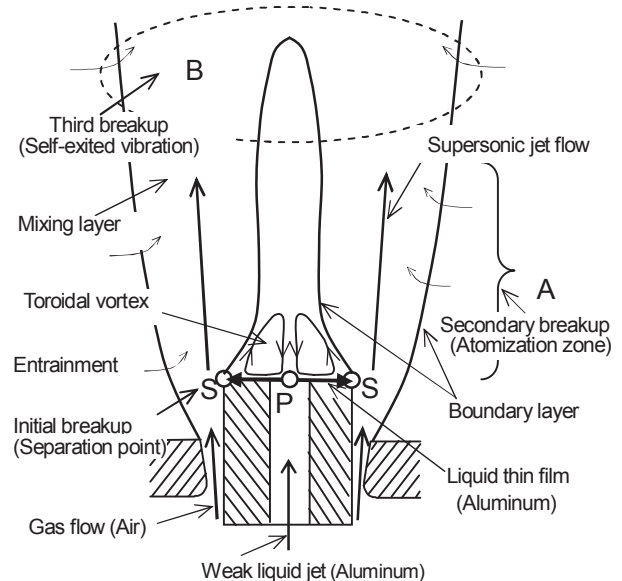


Fig.10 Gas-liquid two phase flow pattern and breakup mechanisms in annular nozzle

た薄いアルミニウム溶湯の膜となって放射状に流出する。薄いアルミニウム溶湯の膜は、環状ノズルから噴出される超音速噴流によって溶湯ノズルの角部で生じるはく離点 S で粉碎され飛散する。

このはく離点で一次粉碎されたアルミニウム粉末は、数十ミクロンの粒子であると考えられる。大半のアルミニウムは、このはく離点付近で超音速噴流境界層の速度こう配の著しい速度せん断層によって粉碎され、粉碎が繰り返される粉碎領域 A が存在する。ここでの粉碎を二次粉碎と称することとする。数十ミクロン程度のアルミニウム粉末の大半は、この二次粉碎領域で生じているものと考えられる。

著者らは、既報⁽⁴⁾⁽⁵⁾において超音速噴流が合流する B の領域で流れは、自励振動⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾によって激しく振動することを報告している。一次粉碎されたアルミニウム粉末は、合流する B の領域でさらに細かく粉碎されるものと考えている。この自励振動による B の領域での粉碎を三次粉碎と呼ぶことにする。

これらのことより、アルミニウム溶湯の粉碎は、一次粉碎と二次粉碎に加えて三次粉碎によってさらに細かく粉碎される。三次粉碎によって、数ミクロンオーダーの微細な微粉末の生成が可能であると推察する。

なお、環状超音速噴流は、まき込み現象やはく離渦によって激しく振動するために、アルミニウム粉末は流れ場全体に分布して飛散するが、噴流の中央付近に比較的に大きな粉末が飛散し、その周囲に微細な粉末が飛散する傾向が見られる。

なお、本論文中には示していないが、環状ノズルの出口形状によって、超音速噴流は不足膨張超音速噴流と過膨張超音速噴流の形態が見られた。不足膨張超音速噴流が見られるノズル形状では、出口部での噴流境界層が明りょうなたる形形状の衝撃波が形成され、その後方にマッハディスクが生じる。さらに、下流域では斜め衝撃波から構成される擬似衝撃波群が生じることが認められた。また、過膨張超音速噴流では、噴流境界層付近での流れ、および第一相の連続相である超音速噴流中の流れの形態が、不足膨張超音速噴流とは異なり、そこで生じる衝撃波の構造に違いが見られる。そのために、二次粉碎の領域での粉碎メカニズムに超音速噴流の衝撃波構造が影響を及ぼすものと考えられる。特に、アルミニウム粉末の粒子形状に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

4. 結 言

環状ノズルから噴出される気液二相流の非定常な超音速噴流の流れと溶湯ノズルの形状の違いが、アルミニウム粉末に及ぼす影響を明確にして、アルミニウム溶湯等の粉碎メカニズムの解明を行い、次の結論を得た。

(1) 溶湯ノズルの先端が鈍頭形状のノズルでは、体積率が小さく、少量ではあるがより微細なアルミニウム粉末を生成できる。また、同一の粒子径のアルミニウム粉末を生成するノズルに適している。

(2) 先端がフラットなノズルでは、多量のアルミニウム粉末の生産が可能であるが、体積率の大きい粉末が飛散している。したがって、比較的に大きなアルミニウム粉末の生成に適している。

(3) また、先端がフラットなノズルでは、アルミニウムの溶湯量は多く、しかも、溶湯ノズルの突き出し量が大いノズルほど、より多くのアルミニウム溶湯が吸引されることが分かった。

(4) フラットなノズルでは、突き出し量の小さな場合には、少量であるが比較的に細かい粒子の粉末の生成が可能と考えられる。しかし、鈍頭形状のノズルに比べるとアルミニウム粉末の粒子径は大きいことが分かった。

(5) 溶湯ノズル先端に生じる円錐形状の閉じられた循環する一对の渦によって吸引されたアルミニウム溶湯は、溶湯ノズルの先端で薄い膜となって放射状に広がる。この薄いアルミニウム膜は、超音速噴流によってはく離点付近で飛散し、一次粉碎が生じる。

(6) アルミニウム粉末のメカニズムは、溶湯ノズル先端のはく離点付近で生じる一次粉碎に加えて、二次粉碎および三次粉碎があるものと推察される。

(7) 二次粉碎は、超音速噴流の流れの形態によって影響を受けるが大半のアルミニウム粉末はこの領域で粉碎されるものと推察される。

(8) さらに、三次粉碎は、環状噴流が合流する付近で発生する激しい自励振動によって生じると推察される。この自励振動によって少量ではあるが、さらに微細な粉末が生成されるものと推察される。この三次粉碎は、ノズル形状に依存するものと考えられる。

(9) アルミニウム粉末は、噴流の中央付近に比較的に大きな粉末が、その周囲に微細な粉末が飛散する。

(10) また、粉碎領域の速度こう配の著しい速度せん断層においてもアルミニウム粉末は繰り返し粉碎されている。

(11) 溶湯ノズルの出口形状によって、超音速噴流の形態が異なり、特に、二次粉碎の領域での超音速の流れ場の影響がアルミニウム粉末の粒子の粉碎形状の良否に影響を与えたと考えられる。

参考文献

- (1) A. ÜNAL, Flow separation and liquid rundown in a gas-atomization process, Metallurgical Transactions B, Vol.20B, pp.833-843 (1989).
- (2) A. ÜNAL, Influence of gas flow on performance of "confined" atomization nozzles, Metallurgical Transactions B, Vol.20B, pp.613-622 (1989).
- (3) I.E.Anderson, H.Morton, and R.S.Figiola, Fluid flow effects in gas atomization processing, The Minerals, Metals Society, pp.229-249 (1989).
- (4) 児島忠倫, 楊念儒, 環状超音速噴流に及ぼす環状ノズル

- ルの幾何学的形状の影響, 噴流工学, Vol.23, No.3, pp.14-19 (2006).
- (5) 楊念儒, 児島忠倫, 環状ノズルから噴出される超音速流れの解明, 噴流工学, Vol.24, No.3, pp.11-15 (2007).
 - (6) 楊念儒, 児島忠倫, 環状ノズルから噴出される気液二相流に関する解明, 日本機械学会講演論文集 (中国四国支部), No.105-1, pp.485-486 (2010).
 - (7) 児島忠倫, 松岡祥浩他, 不足膨張噴流に関する研究(第2報, 擬似衝撃波の構造と管内径の影響), 日本機械学会論文集, Vol.53, No.495, pp.3146-3151(1987).
 - (8) 児島忠倫, 松岡祥浩他, 擬似衝撃波構造と離散周波数騒音の関連性(二値化画像法による解明), 日本機械学会論文集, Vol.65, No.629,B, pp.78-85(1999).
 - (9) 児島忠倫, 劉 渝他, 非対称な不足膨張噴流中に発生する擬似衝撃波構造の解明 (単一噴流の定常特性について), 日本機械学会論文集, Vol.70, No.696 B, pp.1972-1977 (2004).