



鉛直管内固気液三相スラグ流の流動特性に関する研究

南川, 久人

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1997-09-17

(Date of Publication)

2008-04-09

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2159

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3141204>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002159>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	南 川 久 人 (兵庫県)
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	博ろ第165号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位授与の日付	平成9年9月17日
学位論文題目	鉛直管内固気液三相スラグ流の流動特性に関する研究

審査委員	主査 教授 坂 口 忠 司		
	教授 木 村 雄 吉	教授 藤 井 照 重	
	教授 桜 井 春 輔	助教授 富 山 明 男	

論 文 内 容 の 要 旨

固気液三相流はマンガング塊揚鉸用、港湾の海底にたまった泥土を引き揚げる浚渫作業用等のエアリフトポンプの揚鉸管ないし揚固管、水素添加形石炭液化装置の予熱管および反応器等で用いられる各種流動床などの三相反応装置、切削機器における切削くずの排出装置などの種々の工業機器に見られる。上記の諸機器を計画・設計し、運転を効率的に行うには、固気液三相流の流動特性を精度良く評価する必要がある。しかし、固気液三相流の研究の歴史は比較的浅く、その研究論文の数も少なく、今後明らかにしなければならない事項は多岐にわたり数多い。そこで、本研究では数ある流動様式の内、鉛直管内のスラグ流に注目し、まず各相の体積率、平均速度と圧力降下という巨視的量をとり上げた。また、固気液三相スラグ流の流動特性解明にあたって、三相流から1つの相を取り除いた流れともみなせる、気液二相スラグ流並びに固液二相流に対しても、同様に検討していく必要が生じた。そこで、これら2種類の二相流も加えた3種類の混相流を研究対象とした。

本論文は10章で構成されている。第1章では、本研究の背景並びに従来の研究、本研究の目的と方法について述べた。第2章では、流動の観察結果と本研究で用いる平均量の定義および対象とする物理量について、また、第3章では、実験装置と実験方法の詳細について示した。実験には、管内径20.9、30.6、50.4mmの3種類の鉛直円管、固相には平均粒子径1.14、2.57、4.17mmのセラミック粒子と2.96mmのアルミニウム粒子を用いた。粒子の密度は2270~2640kg/m³である。

第4章では巨視的量の測定結果と体積流束や管内径などの流動条件の関係を定性的に明らかにした。その代表的な結果をあげておく。まず、各相体積率に関しては、気液二相スラグ流並びに固液二相流ともに、他の相の体積流束を一定に保ったままで、自相の体積流束を増加させた際、自相の体積率は上に凸の形状で増加し、他の相の体積率は下に凸の形状で減少するという特性が、全ての条件で見られた。固気液三相スラグ流においてもほとんど全ての条件で同じ特性となったが、気相と液相の体積流束を一定に保ったままで、固相の体積流束を増加させた際、一部の条件において、液相体積率がわずかではあるが増加することを確認した。これは、固気液三相スラグ流独特の特性であり、他の2相の体積流束を一定に保ったままで、自相の体積流束を増加させた際、自相の体積率だけでなく、他の

二相のうちの片方の体積率が増加したことになる。また、固気液三相スラグ流において、全体積流束並びに気相体積流束一定の下、固相体積流束を増加させると、気相体積率が増加する場合と減少する場合のあることが、全体積流束並びに液相体積流束一定の下、固相体積流束を増加させると、液相体積率が増加する場合と減少する場合のあることが認められた。この特性により、全体積流束－各相体積率平面において、固相体積流束をパラメータとした気相と液相の体積率曲線が一部で交差する。さらに、固気液三相スラグ流において、管内径が大きくなると気相体積率が減少し、ほぼその減少分液相体積率が増加すること、固体粒子径並びに粒子密度が大きいくほど固相体積率が大きいことがわかった。

各相平均速度に関しては、気液二相スラグ流において、気相平均速度の気相体積流束一定下での増加率の方が液相体積流束一定下での増加率よりも大きいことがわかり、従来の気液二相スラグ流に対するドリフトフラックスモデルの適用の際に結果として使用されていたように、気相平均速度に及ぼす気相並びに液相体積流束の影響は全く等しいという仮定はあくまでも近似的なものであることが確認できた。気液二相スラグ流、固液二相流並びに固気液三相スラグ流ともに、他の相の体積流束を一定に保ったままで、ある相の体積流束を増加させた際、各相平均速度はともに増加するという特性が、ほとんど全ての条件で見られた。しかし、固気液三相スラグ流において、気相と液相の体積流束を一定に保ったままで、固相体積流束を増加させた際、一部の条件において、液相平均速度がわずかではあるが減少した。これは、上述の液相体積率の増加に対応したものである。また、固気液三相スラグ流において、管内径が大きくなると気相平均速度が増加し、液相平均速度が減少すること、固体粒子径並びに粒子密度が大きいくほど固相平均速度が小さいことを確認した。

各圧力降下に関しては、気液二相スラグ流並びに固気液三相スラグ流において液相体積流束のみを増加させた場合、全圧力降下、重力による圧力降下、摩擦と気泡後端圧力降下の和はともに増加した。気液二相スラグ流並びに固気液三相スラグ流において気相体積流束のみを増加させた場合、全圧力降下と重力による圧力降下は減少した。摩擦と気泡後端圧力降下の和は気液二相スラグ流では増加したが、固気液三相スラグ流では減少する場合も見られた。一方、固液二相流並びに固気液三相スラグ流において固相体積流束のみを増加させた場合、全圧力降下、重力による圧力降下、摩擦と気泡後端圧力降下の和はともに増加し、その増加の度合いは、他の相の体積流束を増加させた場合よりも大きかった。固気液三相スラグ流において、管内径が大きくなると重力による圧力降下が大きくなり、摩擦と気泡後端圧力降下の和が小さくなること、固体粒子径並びに粒子密度が大きくなるにつれてわずかではあるが、全圧力降下と摩擦と気泡後端圧力降下の和が大きくなることを確認した。

次に、各種流動条件からこれらの巨視的量を推定する推算方法について検討した。第5章では気液二相スラグ流と固液二相流に対して、第6章では固気液三相スラグ流に対して、まず、既存の方法を用いて、ついで、新たな推算法をいくつか提案し、その推算特性を調べた。その結果、新たな推算法の一つである局所相対速度モデルによる推算法は定量的に良い精度で各混相流の各相体積率を推算できたが、定性的には既存の方法並びに新たな推算法のうちで細部にわたるまで満足に各巨視的量を再現しうる推算法は見いだせなかった。これは、これらの推算法が全て一次元モデルに基づいており、おのずと限界があるためであると考えられる。したがって、より詳細なモデルに基づいた新たな推算法の開発が不可欠であることが確認できた。

そこで、第7章において、固気液三相スラグ流の流動機構をさらに詳細に解明し、その知見に基づいたより詳細な物理モデルを構築し、これを基にさらに精度の高い巨視的量の推算法を導出することとした。流動状態を参考に「固気液三相スラグ流モデル」を考えた。このモデルから上記巨視的量

を推算するためには、各部における各相体積率、平均速度、各部の長さの値が必要となることがわかった。そこでまず、これらの量を求める方法の骨格を提案した。種々の仮定を行った結果、「固気液三相スラグ流モデル」として、流動軸方向には、液体スラグ部、ウェイク部並びに大気泡部の三部分からなるモデルを提示した。未知量となる各相体積率と各部分での各相断面平均体積率と平均相速度、各部長さは32個ある。したがって、独立した関係式32個を与えれば、方程式系は閉じ、全ての値が求められる。このモデルに、質量保存則並びに種々の仮定による関係式を適用した。その結果、独立な関係式が25個が得られた。したがって、残る7個の関係式を与えれば方程式系は閉じ、32個全ての未知量の値が数値に求められる。

第8章では、固気液三相スラグ流の流動機構をより正確に把握して上記の巨視的量が示す物理的な特性を説明し、固気液三相スラグ流に対する知識を蓄積するとともに、残りの7個の関係式を得るために、スラグ特性量を研究対象として取り上げた。これらの測定結果を示し、その特性について述べた後、各部の長さ、大気泡上昇速度並びに大気泡体積率の5個の相関式を作成した。さらに、残る2個の構成方程式として、三相気泡流の研究によって得られている体積率推算式を液体スラグ部に適用して用いることとした。

これで、各部における各相体積率、平均速度並びに各部の長さを求める部分における方程式系は閉じ、32個全ての未知量の値が数値的に求められるようになった。これらが求められた後に行う、各部の摩擦圧力降下並びに気泡後端圧力降下の推算式を加えて、本推算法が完成した。

第9章では、この推算法の全容並びに推算結果を示した。推算結果は、定性的にも、定量的にも推測結果とよく一致した。すなわち、定性的には巨視的量の定性的特性のうち、固相体積率をパラメータとした各相体積率あるいは平均速度曲線が、気相と液相において一部で交差するという測定値の特性も含め、ほぼ測定結果と一致した。圧力降下に関してもほぼ満足に測定値の特性と一致した。定量的にも、気相、液相、固相体積率の標準偏差がそれぞれ6.09%、3.37%、12.4%で、全圧力降下、重力による圧力降下、摩擦と気泡後端圧力降下の和の標準偏差はそれぞれ3.24%、4.07%、31.2%で、推算できた。これらの値からも本推算法の有効性が確認できた。さらに本章では、推算の過程で得られる諸量、すなわち各部における各相速度や体積率の値を示し、巨視的量とこれらの量の関係を調べた。これより、気相体積率が大きくて液相内の固相体積率が大きくなる条件では、固相の添加により大気泡体積率が急激に減少し、大気泡上昇速度が急激に増加し、その結果として、固相添加により気相体積率は急激に減少するが、液相体積率はほとんど変化しないという状況が生じていることが確認できた。

第10章は本論文の総括である。

論文審査の結果の要旨

固気液三相流は、マンガント塊揚鉤用エアリフトなどの工業機器で見られる。これらの計画・設計・運転には、その流動特性に関する情報が必要である。しかし、その研究の歴史は浅く、研究論文の数は少ない。

このような状況下、本研究は、鉛直円管内のスラグ流に注目し、巨視的量である体積率、平均速度と圧力降下、スラグ特性である大気泡や液体スラグの長さや速度などについて研究している。

本論文は10章で構成されている。第1章では、従来の研究、本研究の目的と方法、第2章で、流動の観察結果、対象とする物理量など、第3章で、実験装置と方法について述べている。実験には、管

内径20.9, 30.6, 50.4mmの3種類の円管, 固相には密度2270-2640kg/m³の平均粒子径1.14, 2.57, 4.17mmの球形セラミック粒子と2.96mmの球形アルミニウム粒子, 気相と液相には常温で大気圧状態の空気と水を用いている。

第4章では, 巨視的量の測定結果と体積流束, 固体粒子径, 管内径などとの関係を示している。体積率に関する代表的結果は, 他の相の体積流束を一定に保ったままで, 自相の体積流束を増加させた際, 自相の体積率は上に凸の形状で増加し, 他相の体積率は下に凸の形状で減少する二相流で一般的な特性が, 三相スラグ流におけるほとんどの条件で認められたが, 気相と液相の体積流束を一定に保ったままで, 固相体積流束を増加させた際, 一部の流動条件において, 液相体積率がわずかではあるが増加することが認められたことである。また, 全体積流束並びに気相体積流束一定の下, 固相体積流束を増加させると, 気相体積率が增加する場合と減少する場合があること, 全体積流束並びに液相体積流束一定の下, 固相体積流束を増加させると, 液相体積率が增加する場合と減少する場合があることが認められた。これらは, 固気液三相スラグ流独特の特性である。

各相平均速度に関しては, ある相の体積流束を一定に保ったままで, 他相の体積流束を増加させた際, 各相平均速度は増加するという二相流での一般的特性が, 三相スラグ流のほとんどの条件で見られた。しかし, 固気液三相スラグ流において, 気相と液相の体積流束を一定に保ったままで, 固相体積流束を増加させた際, 一部の流動条件において, 液相平均速度がわずかではあるが減少した。これは, 上述の液相体積率の増加に対応したものである。また, 従来ドリフト流束モデルにおいて係数を定数とした場合に導出されていた, 平均相速度に及ぼす各相体積流束の効果は同じであるとの結論が普遍的ではないと指摘している。

各圧力降下に関しては, 液相体積流束のみを増加させた場合, 全圧力降下, 重力による圧力降下並びに摩擦と気泡後端圧力降下の和とともに増加し, 気相体積流束のみを増加させた場合, 全圧力降下と重力による圧力降下は減少する, 一方, 固相体積流束のみを増加させた場合, いずれの圧力降下も増加し, その増加の度合いは, 他の相の体積流束を増加させた場合よりも大きいなどの結果を得ている。

次に, 第5, 6章で, 既存の巨視量の推算方法による推算結果の検討と新たな推算法の提案, その推算特性について述べている。新提案の推算法の一つである局所相対速度モデルによる推算法は, 定量的により精度で体積率を推算できる。しかし, 体積流束との定性的関係を細部にわたるまで満足に説明できる推算法は, 新旧のいずれの推算方法中にもない。

この状態を打開するために, 第7章において, 固気液三相スラグ流を流動軸方向に, 液体スラグ部, ウェイク部並びに大気泡部に分割した「固気液三相スラグ流モデル」と方程式を提示し, この章と第8章で, これら連立方程式系を閉じるのに必要な構成式等を, モデルへの質量保存法則の適用, 局所的流動機構の研究によって導いている。

第9章に, この推算法の推算結果を示している。この推算結果は, 定性的にも, 定量的にも推測結果とよく一致している。すなわち, 気相, 液相, 固相体積率の推算結果の標準偏差は, それぞれ6.09%, 3.37%, 12.4%で, 全圧力降下, 重力による圧力降下, 摩擦と気泡後端圧力降下の和の推算値の標準偏差は, それぞれ3.24%, 4.07%, 31.2%である。さらに, 各部における各相速度や体積率の値と巨視的量の関係性を調べ, 巨視的量の特性を説明している。

第10章は本論文の総括である。

本研究は, 鉛直管内固気液三相スラグ流について, その巨視的量和スラグ特性を介して固気液三相

スラグ流の本質を明らかにすると共に各種相関式を提示して、工学上並びに工業上有用な貢献をしたものであり、混相流の流動特性について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、本研究者は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。