

極低温二相流を対象としたボイド率計の研究開発

効率向上に関する研究

後藤嵩人（早大院・基幹理工），佐藤哲也（早大），大平勝秀（東北大），小林弘明（JAXA）

1. はじめに

JAXA では極超音速旅客機への適用を目指して小型予冷ターボジェットエンジン（S エンジン）の開発を進めている[1]. S エンジンは燃料として液体水素を使用しているが，起動時に非予冷配管中を水素が流動する際，配管が冷却されるに従って水素の密度，流量が増加し，流量制御が困難になるという問題がある．このため，予測シミュレータを開発したが，シミュレータの精度が十分でなく実用化に至っていない．このシミュレータの精度向上のため，液体水素の熱伝達特性，圧力損失特性などの諸性質が必要であるが，液体水素についてのこれらの特性データは少なく，実験による調査が必要である．

本研究では極低温下の混相流の計測技術の確立を目標に，主要パラメータである二相流の気相体積割合を示すボイド率を計測する静電容量型ボイド率計の開発を進めている[2][3]. 本ボイド率計では，配管温度が常温から極低温への温度変遷する過程において，静電容量が変化してしまう温度ドリフトが問題となっている[4]. そこで本研究ではボイド率計の精度確認および温度ドリフトの問題解決を目的とする．

2. 問題点

図1に温度ドリフトが観測されたある実験における静電容量とボイド率計外壁の温度の時間履歴を示す．

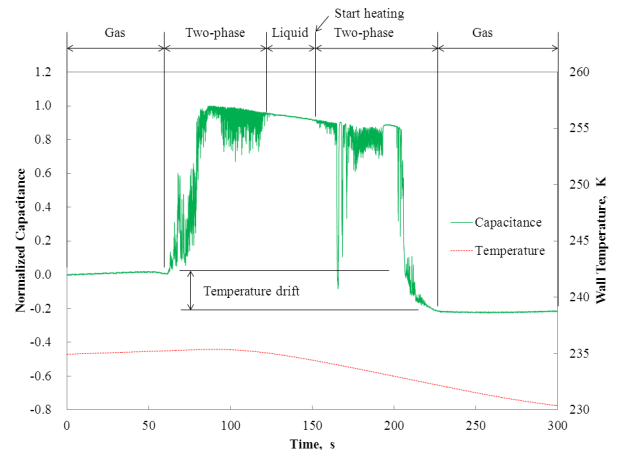


図1. 静電容量計の温度ドリフト

また，静電容量は正規化したもので，ボイド率の0～100%時に計測される静電容量差で割った値である．

$$C_N = \frac{C - C_G}{C_L - C_G} \quad (1)$$

ここで， C_N は正規化した静電容量値， C は計測した値， C_G は完全気相時の値， C_L は完全液相時の値である．

流動開始前は気相が配管内に充満している状態で，流動が開始し気液二相状態になる．その後テストセクションが冷却され，液単相状態となる．そこから加熱を開始し，気液二相流を形成させる．最後に流動と加熱を止めて，再度気体単相状態になる．この間，図1に示すように，単相状態における静電容量値が流動前後で変化しており，流動中も液単相時に静電容量値が下がり続けている．これを静電容量の温度ドリフトと呼んでいる．

3. 実験装置

実験は東北大学流体科学研究所大平・宮田研究室の実験設備を用いて行った。既存のテストセクションにJAXAと早大のテストセクションを追加した。試験装置はランタンク、テストセクション、キャッチタンクから構成される。図2に実験装置の概要を、図3にボイド率計の断面図を、図4にボイド率計を示す。テストセクションは真空断熱構造になっており、加熱区間、ボイド率計測区間、可視化区間で構成され、内径15[mm]の配管に流動させる。加熱区間は銅配管で周囲にマンガン線が巻きつけられている。この電熱線に直流電圧を印可する事によって液体窒素を加熱し二相流を形成させる。加熱管の下流には防弾ガラスであるユーピロンを用いた可視化管が設置されている。ボイド率計は早大の開発したシールド付きのものを2点、計測実績のある東北大学の開発したものを1点直列に設置し、両者の精度を比較する。この時の比較したボイド率計の諸元を表1に示す。また、管材料と電極サイズに関する温度ドリフトの影響を調べるための比較用ボイド率計の諸元を表2に示す。

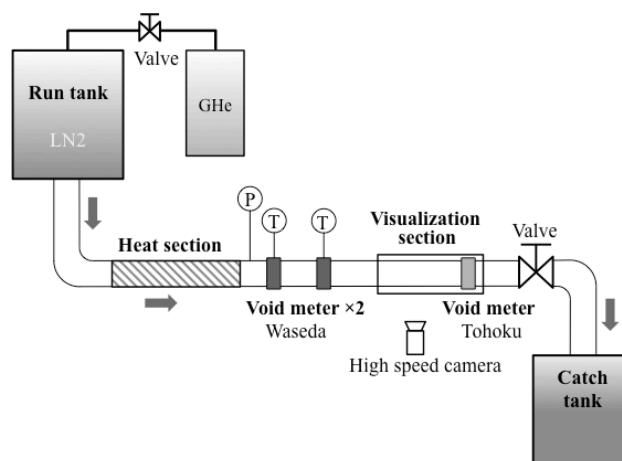


図2. 実験装置概略

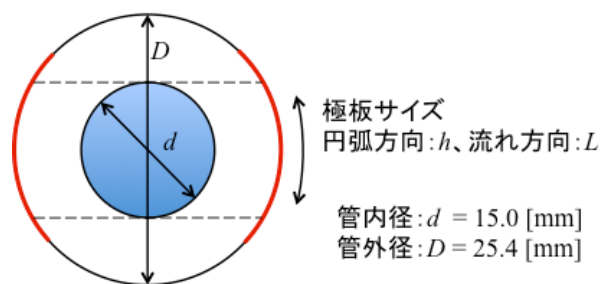


図3. ボイド率計断面

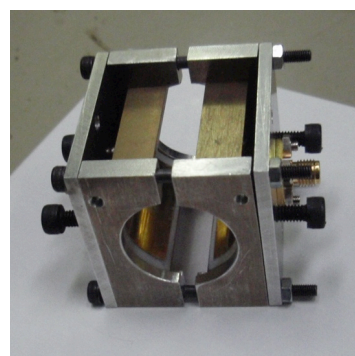


図4. ボイド率計

表1. 精度比較ボイド率表

No.	作成	シールド	備考
VM-A	東北	無	螺旋
VM-B	東北	無	並行
VM-C	早稲田	有	-

表2. 温度ドリフト比較ボイド率計

管材質	比誘電率	円弧長 h mm	Name
ユーピロン	3	16	Small
ユーピロン	3	29	Normal
ジルコニア	33	16	Zirconia

以前までの研究[4]においてはユーピロンを用いた極板円弧長が29[mm]のボイド率(Normal)を用いていた。今回は極板円弧長サイズを内径に過不足なく覆うサイズの16[mm]を使用したものと、配管の材質として新たにジルコニアを使用した

ボイド率計を用意した。

4. 実験結果

図 4 に気液二相流が流動しているケースの VM-A, VM-B と VM-C のボイド率結果を示す。この結果では 40[s]から加熱を開始し, 二相流が流動している。両ボイド率計測定結果はほぼ一致していることが分かる。また, 32~40[s]の間, 液単相時のデータを比較すると, 金属シールド付きボイド率計の方がシールド無しの場合と比べて, ノイズが小さいことがわかる。

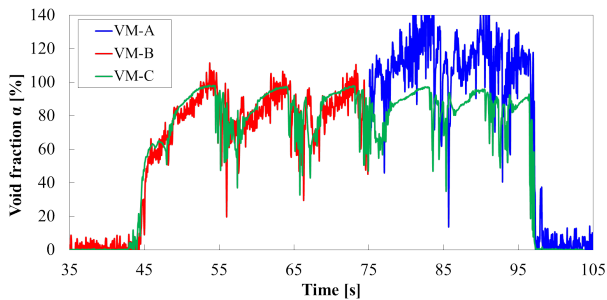


図 4. ボイド率履歴

次に, 8 ケース分の実験について, 二相流が流動時の取得データを比較したグラフを図 5 に示す。このグラフは測定ノイズの影響を減らすため 10 点平均した値を取り, 横軸が VM-C のボイド率, 縦軸は VM-B と VM-C のボイド率値の相対差を実験フロー毎にプロットしたものである。各プロットの数字は実験 No.である。両者の相対差は 50% を境に高ボイド率において両者の誤差は低いが, 逆に低ボイド率時の相対差は最大+30%である。また, 誤差はプラス側に多い。この誤差は 2 点のボイド率計が離れて設置してあることから熱が侵入してボイド率が上昇し, 低ボイド率程その影響が大きくなることによるものと考えられる。逆にマイナス側の誤差の要因は, 流動中のボイド率が大きく変動しているためと考えられる。

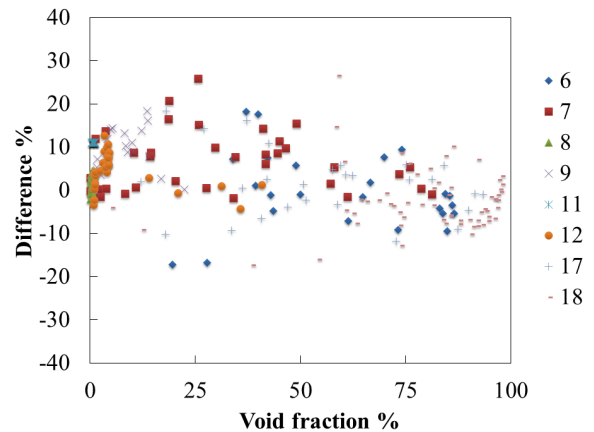


図 5. 精度比較

図 6 は低温の気体窒素のみの流動における温度ドリフトの様子を表 2 の三パターンで比較した結果である。

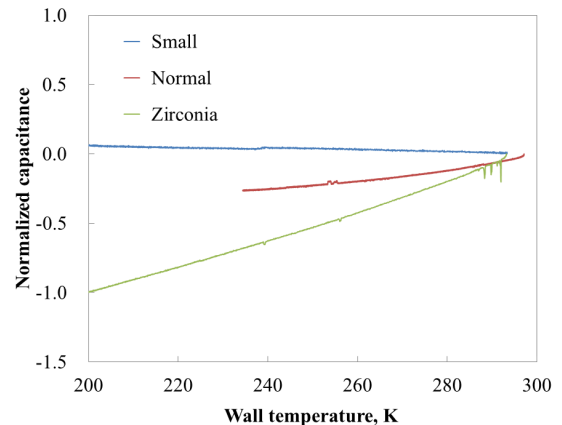


図 6. 温度結果

温度ドリフト量は Small と 3.7×10^{-1} [%/K], Normal が -5.0×10^{-2} [%/K], Zirconia が 9.8×10^{-1} [%/K] である。Small と Zirconia は図 7 のように, 内径の流路を過不足なく覆う極板を用いている。一方, Normal は図 3 のスケッチのように大きく覆い被さる形の極板となっている。Small と Normal を比較すると Small の方が, 温度ドリフトが小さい。これは, 温度変動に伴い配管部分の材料の比誘電

率が変化した影響を受けたためだと考えられる。また、Zirconia は Small と同じ極板を使用しているにも関わらず、Zirconia において大きな温度ドリフトが表れている。この理由を以下に考察する。ボイド率計を作成する際に、図7のように電気力線が平行と仮定した。しかし、実際は図8のようになるため、比誘電率が 33 と大きいジルコニアの場合配管の温度変化の影響が大きくでてしまい、大きな温度ドリフトが発生したと考えられる。まとめると、温度ドリフトは極板の円弧長が小さく、ユーピロンを用いたボイド率計が温度ドリフトの影響が最も小さい。また、ジルコニアを用いた管では大きな温度ドリフトが発生する。しかし、図9のような配管内の電場を適正に捉えられる極板を使用すれば、ジルコニアを用いたボイド率計も作成可能であると考えられる。

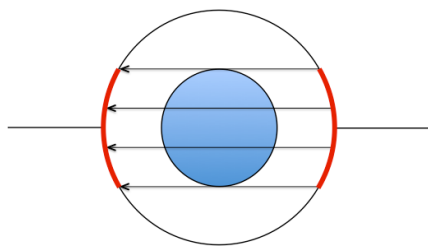


図7. 平行仮定

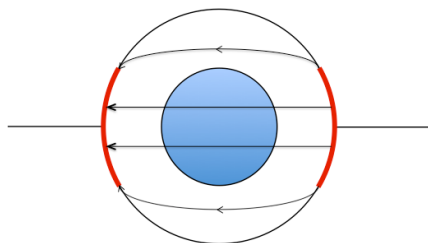


図8. 実際の電気力線

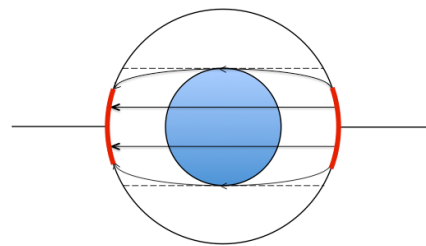


図9. 今後の方針

5. まとめ

静電容量型ボイド率計を開発し、比較実験を行い、以下の結論を得た。

- (1)本研究で開発したボイド率計は 50%以上のボイド率域において精度を確認した。
- (2)ボイド率計に金属シールドを付加することによりノイズを抑えることができた。
- (3)温度ドリフトは極板の円弧長と管の比誘電率に起因することを特定し、温度ドリフトの解消に成功した。

参考文献

- [1] Taguchi, H., et al: "Research on hypersonic aircraft using pre-cooled turbojet engines," Acta Astronautica, Vol.73, pp.164-172, 2012.
- [2] 渡部将光, 長谷川晃子, 大塚勝允, 飯塚ひとみ, 佐藤哲也, 小林弘明, 田口秀之, 小島孝之, 相変化を伴う水素のボイド率計測に関する研究, 平成 21 年度宇宙輸送シンポジウム STCP-2009-50, 2010.
- [3] 佐藤哲也, 田口秀之, 小林弘明, 小島孝之, 宮村圭太, 長谷川晃子, 内野隆, 大塚勝允, 小川春陽, 小川正倫, 林映里, 予冷ターボジェットエンジンに関する基礎研究, 平成 20 年度宇宙輸送シンポジウム STCP-2008-69, 2009.
- [4] 平山歩, 大塚勝允, 渡部将光, 飯塚ひとみ, 後藤嵩人, 佐藤哲也, 小林弘明, 田口秀之, 極低温二相流を対象としたボイド率計測に関する研究, 平成 22 年度宇宙輸送シンポジウム STCP-2010-10, 2011.