

STCP-2016-020 均質化による気液二相流のクオリティ直接計測手法

○箕手 一眞, 佐藤 哲也 (早稲田大学), 小林 弘明 (JAXA)
坂本 勇樹, 多根 翔平, 中島 曜, 古市 敦大 (早稲田大学)

Direct Quality Measurement Method for Gas-liquid Two-Phase Flow by Homogenization

○ Kazuma Minote, Tetsuya Sato (Waseda University), Hiroaki Kobayashi (JAXA)
Yuki Sakamoto, Shohei Tane, Yo Nakajima, Atsuhiko Furuichi (Waseda University)

Abstract

二相流熱伝達率の整理, 流動条件の判別に用いられ, ボイド率や圧力損失等と並んで重要なパラメータとしてクオリティが存在する. 二相流を均質化し, ボイド率を計測することでクオリティの測定を可能にするクオリティメーターの高度化を行った. その均質化手法として, 気液の攪拌に使用例のある交差型ミキサ, らせん型ミキサを用い, ボイド率計には本研究グループで開発の行ってきた非対称型ボイド率計を採用した. 実験により水平方向, 上昇流, 下降流における十分発達した流れにおける性能取得をおこなった. その結果, 50~64%の均質化が確認され, クオリティの計測精度として-70~+100%が確認できた. また, 同様の実験を未発達流を模擬した流れに対しても実施し, 同程度の精度の確認がされ, 助走区間によらないことが確認できた. また, 低・高クオリティ域においては均質化が不十分であり, それについて考察を行い, 均質化機構の改善やメカニズムの解明の必要性を示した.

記号一覧

α	ボイド率
S	スリップ比
χ	クオリティ
Q	(換算) 流量 (S)L/min
ρ	密度 kg/m^3

添字

g	気相
l	液相
$true$	真値
QM	クオリティメーターによる計測値
err	誤差
ana	解析値
set	設定値

1. 背景

現在 JAXA では, 極超音速旅客機の実証に向け, 極超音速ターボジェット (S エンジン) の開発を進めている.^[1] S エンジンでは燃料, 冷媒として液体水素を使用しており, エンジン始動時には燃料供給配管中で水素が容易に気化, 沸騰してしまい気液二相流へと変化する. その結果, 熱伝達係数や圧力損失特性等の流動特性が変化してしまい, 燃料の流動制御が困難となることが明らかになっている.

そこで, 高度な流動制御を行うために二相流の流動様式, 熱伝達率, 圧力損失等を決定づけるパラメー

ターである気相の質量流量割合であるクオリティ χ を計測する必要がある. しかしながら, クオリティは常温下における計測法でさえ未だ確立しているとは言えない.

従来におけるクオリティの算出方法としては大きく分けて A. 理論・経験的手法, B. コリオリ流量計を用いる手法, C. 熱平衡クオリティを用いる手法の3つに分類される. 以下にそれぞれの概要及び利点・欠点について整理する.

A. 理論的・経験的手法

クオリティと気相の体積割合であるボイド率 α を理論的・経験的にモデル化し, 相関式とする研究は1940年代より行われてきており, 数多くの提案が成されてきた.^[2] その例として, 理論的なものとして, Smith^[3] は気液の速度が等しいとして発展させた環状流モデルより, Zuber^[4] は局所流速についてドリフトフラックスモデルを適用することにより相関式を作成した. 一方で経験的なものでは Thom^[5] が Winterton のスリップ比を用いて, Khail^[6] が液体水素の垂直流実験より相関式を作成した.

この手法における利点としては, 理論に基づいているため適用しやすいことや経験的なものは同条件においては精度が良いことがある. 欠点としては, 実験において同条件でない再現性の低いことや, 適用可能なクオリティの範囲が限られる場合があるこ

と、発達した定常流の前提としているために流動が未発達な場合や曲管部があると十分な精度が得られない等の問題がある。

B. 直接計測する手法

コリオリ流量計は管内に流体が流れることで生じるねじれや振動から質量流量の計測が可能な装置である。Henry^[7] や Liu^[8] はコリオリ流量計にニューラルネットワークを用いることで、二相流の質量流量およびクオリティの計測を可能にした。利点としては、流量計自体はパッケージ化されており取扱が容易なことがあげられる。欠点としては圧損が大きいこと、低クオリティ域のみでしか使用できないこと、振動を計測に用いるので機体等への搭載が難しい、高価になってしまうことが挙げられる。

また、気液分離を行い、その後の各相の質量流量を計測することで気液流量 (or クオリティ) を算出する手法も使用されている。分離する手法としては T 字管路や表面張力を用いる方法などが用いられている。利点としては完全に分離さえできれば非常に高い精度で気液流量の算出ができることがある。欠点としては、流動条件によっては分離が完全には出来ない、装置が大掛かりになってしまう、相変化のある流れでは使用できないなどがある。

C. 熱平衡クオリティを用いる手法

従来のクオリティを設定する手法として広く用いられた手法に配管を流動する液体の質量流量と入熱との熱バランスより蒸発量を算出することで熱平衡クオリティを算出する手法がある。利点としては容易に実験においてクオリティの設定が可能であることがある。欠点としては、配管周りを真空に引くなど断熱が必要であること、質量流量や配管入熱などを把握出来なければならないこと、サブクール沸騰の状態などでは実クオリティと値の乖離が発生することなどがある。

以上より、様々な条件で、未発達流でも再現性の高く、簡便なクオリティ測定手法が可能な手法は未だ確立されていないと言える。これらを受け上記のような場合でも直接計測が可能であるクオリティメーター (Q メーター) の開発を行うことを本研究の目標とする。また液体窒素や液体水素のような極低温流体でも使用できるようにすることを最終目標とする。

2. クオリティメーター概要

前述した例の課題を踏まえ、角^[9] は絞り管路の損失をモデル化し、絞り管路前後における差圧及びボイド率を用いてクオリティの計測を試みた。しかし、損失は相互的な作用も多く、モデル化は困難である

と結論づけた。

次に流動擾乱に注目した計測手法を考案した。クオリティとボイド率と気液の速度比であるスリップ比 S は式 (1) のような $\chi = f(\alpha, S)$ の関係がある。二相流は基本的には $S \neq 1$ の非均質流となっている。

$$\chi = \frac{\rho_g S \alpha}{\rho_g S \alpha + \rho_l (1 - \alpha)} \quad (1)$$

そこで、図 1 のように二相流を均質化機構に通過させ、気液の速度が均一である $S = 1$ の条件を作り出す。 $S = 1$ を代入することにより、式 (1) は式 (2) の様に変形できる。更に均質化された流れに置いてボイド率の計測を行うことで、式 (2) よりクオリティの算出が可能となる。

$$\chi = \frac{\rho_g \alpha}{\rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha)} \quad (2)$$

以上からわかるようにクオリティ計測の精度に影響してくるのは、ボイド率計測精度及び均質化の度合いの 2 点となる。そこで、それぞれがどの程度クオリティ計測誤差に影響するかの見積もりを行った。

まず、ボイド率の計測誤差がどの程度クオリティの計測誤差につながるかの見積もりを行った。ボイド率誤差 α_{err} が +1, 2.5, 5% であり、スリップ比は $S = 1$ であると仮定した場合のクオリティの誤差を図 2 に示す。また、誤差の算出方法としては式 (3) を用いた。ここで、 χ_{set} はボイド率誤差無し、 $S = 1$ として、 χ_{ana} はそれぞれボイド率計測誤差が +1, 2.5, 5% であり、 $S = 1$ として式 (1) より算出を行った。

$$\chi_{err} = \frac{\chi_{ana} - \chi_{set}}{\chi_{set}} \quad (3)$$

これより、ボイド率計測誤差が少々異なることで誤差が大きく異なることがわかる。また、ボイド率が低・高ボイド率域で特にクオリティ誤差に大きく影響を与えることがわかる。

次に完全に均質化された状態である $S = 1$ からのずれがどの程度影響を与えるかの調査を行った。ボイド率 α が 10, 30, 40, 80, 90% のそれぞれにおいて、スリップ比を変化させた場合のクオリティの誤差を図 3 に示す。ここでは、ボイド率計の計測誤差 α_{err} は無いものとした。なお、クオリティの誤差の算出方法は同様に式 (3) を用いた。ここで、 χ_{set} は前述したものと同様に、 χ_{ana} はボイド率計誤差無し、スリッ

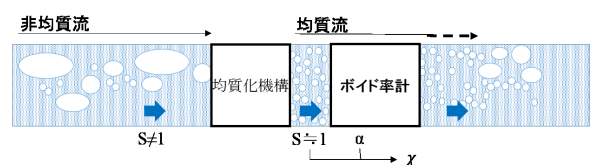


図 1: クオリティメーター概要

プ比を1から変化させて算出を行った。これよりスリップ比の1からのずれはいずれのボイド率においてもほぼ同様にクオリティの誤差に影響を与えることがわかる。また、スリップ比が1を下回るとクオリティの誤差も大きくなりやすいことがわかる。

ボイド率計測精度、スリップ比のずれによるそれぞれの影響まとめて示したものを図4に示す。ここで、スリップ比を変えた時のボイド率が50%の場合とし、ボイド率の誤差は後述する非対称型ボイド率計の最大誤差である $\pm 2.5\%$ とした。これにより、ボイド率が10~90%の領域においては均質化のずれ

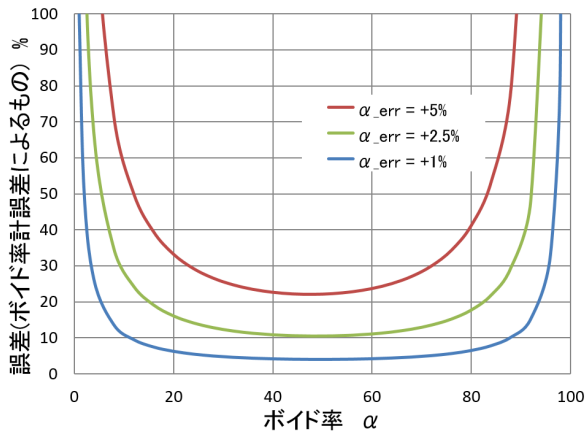


図2: ボイド率計測誤差影響

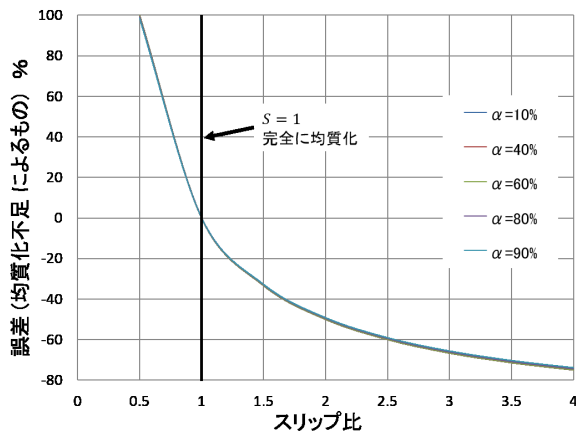


図3: スリップ比計測誤差影響

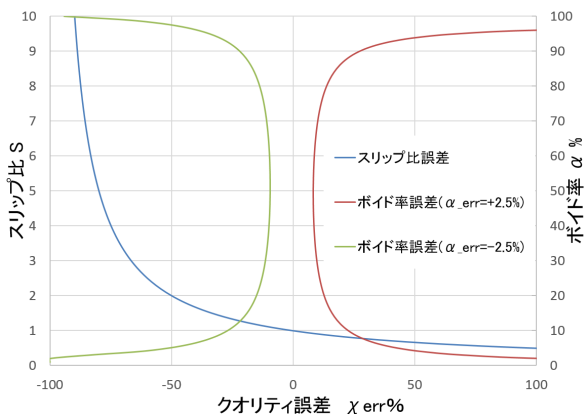


図4: パラメーター誤差影響

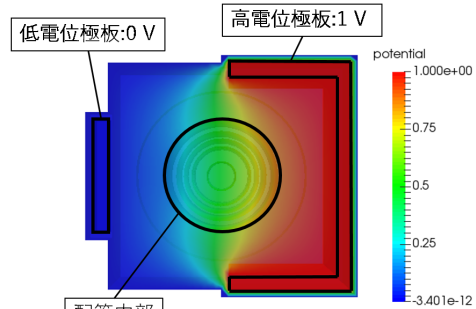
が比較的クオリティの誤差への影響が大きく、その範囲よりボイド率が小さく、ないしは大きくなることでボイド率の計測精度及び均質化不足の両方が効いてくることがわかる。

以上よりボイド率計は誤差のなるべく小さいもの、特に低、高ボイド率域において誤差の小さいものを、均質化機構はボイド率によらずスリップ比が1に近づくものが必要になることがわかる。

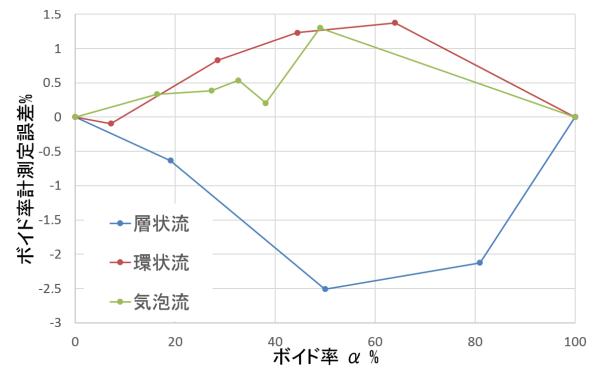
2.1 ボイド率計

クオリティメーターに組み込むボイド率計としては、当研究室にて研究開発を行ってきた非対称型ボイド率計^[10]を使用する。今回新たに実験装置に合わせ、外径25.4mm、内径15mmの配管に合わせたボイド率計を設計した。ボイド率計の寸法は各流動様式において、誤差が最も小さいものを電場解析を用いて決定した。電場解析にはすべてオープンソースのソフトウェアを使用し、格子生成にはNetgen、解析には有限体積法によりマクスウェル方程式を解くElmer、解析後の可視化にはParaViewを用いた。その際の電場解析の結果を図5に示す。

これより、最大誤差を2.5%に抑え、かつ低・高ボイド率域における誤差の小さいボイド率計の設計に成功した。そのボイド率計の概観を図6に示す。



(a) 可視化図



(b) 解析結果

図5: 電場解析結果

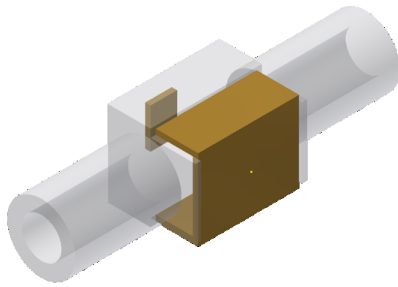


図 6: 非対称型ボイド率計

2.2 均質化機構

先述した様に均質化はボイド率によらず、クオリティ計測の大きな誤差原因となりうる。しかしながら、二相流の均質化に関する研究例は多くはない。真鍋ら^[11]による多相流量計においてはインラインミキサーと呼ばれる機構を用いて攪拌し、ボイド率分布を均一にすることを試みられている。この方式を採用した図 7 の下のようなミキサーを交差型ミキサーと呼ぶ。また、合わせて工業的に攪拌などに広く用いられている図 7 の上のようなミキサーをらせん型ミキサーと呼ぶ。これらを均質化機構として採用する。これらの組み合わせ方などについては後述する。



図 7: 均質化機構

3. 流動試験

3.1 試験概要

試験の概要について説明を行う。実験目的は均質化機構の調査及び極低温流体での計測の第一段階として、常温下でのクオリティ計測の性能取得とする。本実験の作動流体としては、常温の空気-シリコンオイルを用いた。これらの 20 °C における物性を表 1 に示す。ここで、シリコンオイルを用いる理由としては絶縁流体であること、極性が無いこと、動粘度等の

物性値が今後用いる極低温流体である液体窒素と近いこと、扱う上で安全であることがあげられる。絶縁流体であること、極性がないことは静電容量型ボイド率で計測する上で十分な精度を得るために必要になってくる。

実験装置概観を図 8 に、系統図を図 9 に示す。ここで気相と液相はベピコンおよびポンプによりそれぞれ独立した系を流動し、合流して二相流となる。その後助走区間を通過し、定常流となりクオリティ計測区間へ流入する。計測点としては、気液流量、ボイド率、タンクにおける液体温度の 4 つとなる。合流する前に流量計により各相の質量流量を計測することで、式 (4) を用いてクオリティ χ_{true} の値を算出することが可能となる。なお、気相流量は換算流量として計測しているため圧縮性の影響に関しては考

表 1: シリコンオイル-空気物性値

	空気	シリコンオイル KF-96L-0.65cs
密度 ρ [kg/m ³]	1.205	760
粘度 μ [m ² /s]	1.85×10^{-5}	4.94×10^{-4}
動粘度 ν [Pa · s]	1.56×10^{-6}	6.50×10^{-7}
表面張力 σ [N/m]	-	0.02
誘電率	1	2.17
極性	-	なし

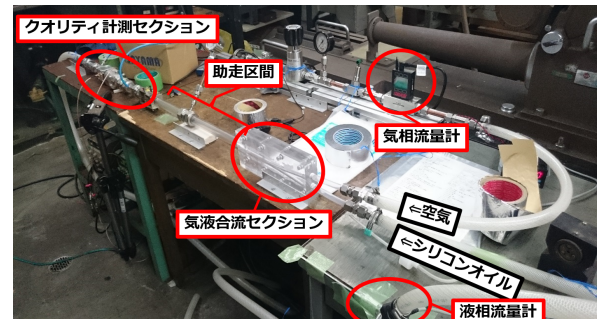


図 8: 実験装置概観

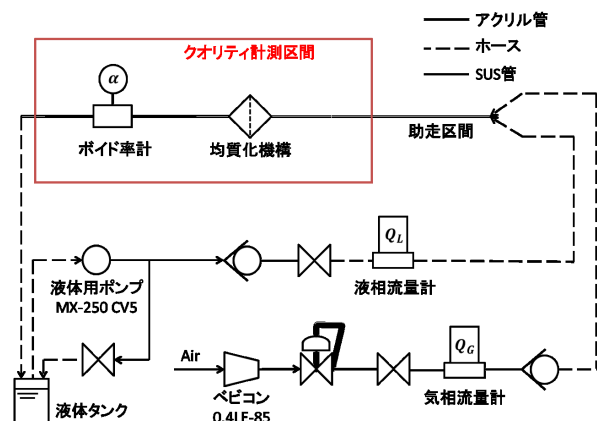


図 9: 実験装置系統図

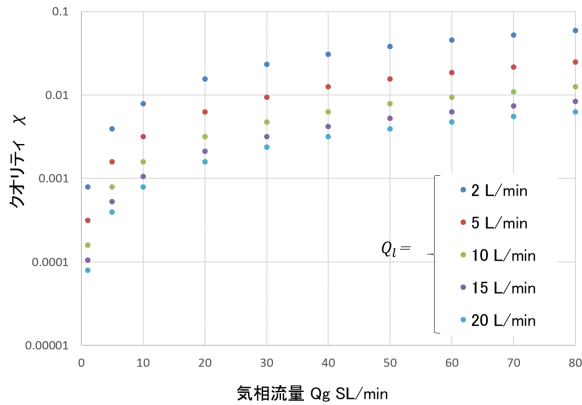


図 10: クオリティ理論値

慮されている。

$$\chi_{true} = \frac{\rho_g Q_g}{\rho_g Q_g + \rho_l Q_l} \quad (4)$$

本稿においてはこの値をクオリティの真値として取り扱う。

流動条件として液相の流量が 2,5,10,15,20 L/min の各場合において、気相流量を 1,5,10,20,30,40,50,60,70,80 SL/min で変化させて総当りの条件を変化させた。

また、各条件に対応したクオリティの変化を $S = 1$ である均質化モデルを用いて計算した結果を図 10 に示す。以上の条件を流動試験において採用する。

3.2 均質化機構比較実験

均質化機構として図 7 の交差型ミキサ単体で用いた場合とらせん型ミキサ単体で用いた場合それぞれで水平流の試験を行った。それぞれがどの程度均質化しているかの評価にスリップ比 S の変化を用いる。スリップ比の算出は式 (1) を変形して導出した式 (5) を使用した。ここで、 ρ は 25 °C, 1 気圧での値、 α はボイド率計による計測値、 χ_{true} は式 (4) より算出した。

$$S = \frac{\rho_l}{\rho_g} \frac{\chi}{1-\chi} \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (5)$$

その結果を図 11 に示す。

ここで、横軸は均質化機構を設置していない場合のスリップ比であり、縦軸は均質化機構を設置した場合となっている。この図において $y = x$ の直線が何も均質化しない場合でありこの直線より $y = 1$ に近づいている程均質化が進んでいると言える。この結果より、高クオリティ域ではらせん型、低～中クオリティ域においては交差型の方が均質化が促進されていることが確認できた。これは、らせん型ミキサでは液相の流量が多い低クオリティ域においては図 12 の様に流体が回転することにより密度の大きい液相が外側に集まり、環状流のような分離流になるた

め十分気液間での運動量交換が成されないためであると考えられる。

これら 2 つのミキサを組み合わせると均質化機構を用いることで全域における均質化が進むのではないかと考えた。そこで、交差型を上流、らせん型を後流においた場合とらせん型を上流、交差型を後流においた場合において同様に比較を行った。その結果を図 13 に示す。これより図 14 のように均質化機構を並べることで均質化が最も促進されることが確認できた。そこで、クオリティメーターの均質化機構としてはこの組み合わせ方を採用する。

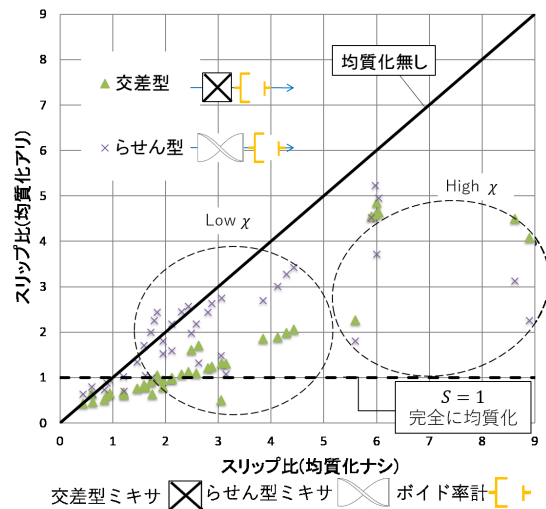


図 11: 交差型ミキサ VS らせん型ミキサ

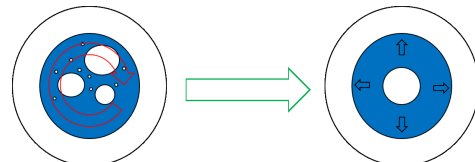


図 12: 低クオリティ域でのらせん型ミキサ内の挙動予測

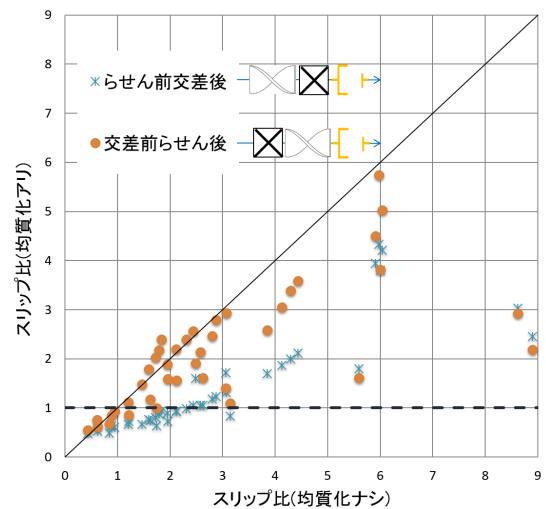


図 13: 交差型らせん型組み合わせ比較

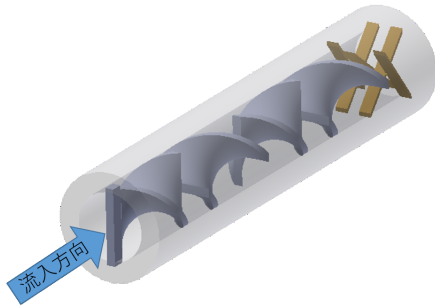


図 14: 均質化機構組み合わせ方

3.3 クオリティメーター精度取得実験

図 14 で示した様な均質化機構及び図 6 で示した様なボイド率計の 2 つを用いたクオリティメーターとしての計測精度の取得を行った。試験は水平流および上昇流、下降流の 3 パターンにおいて実施した。まず、前節と同様にスリップ比の変化を元に評価した。その結果を図 15 に示す。これよりスリップ比が完全に 1 となる場合を 100% 均質化されたとした時、水平方向で約 64%，上昇方向で約 54%，下降方向で約 50% の均質化が促進されたことが判明した。ここで、各流動方向のデータとしては Excel により線形近似したものをそれぞれ参考値にした。この結果より均質化は促進されたものの未だ不十分な範囲が存在することがわかる。次に、クオリティの計測結果について図 16, 17 に示す。ここで、クオリティ真値は流量計の計測値を用いて式 (4) より、クオリティ計測値は計測されたボイド率を用いて式 (2) より、誤差は以下の式 (6) より導出した。

$$\chi_{err} = \frac{\chi_{QM} - \chi_{true}}{\chi_{true}} \quad (6)$$

以上より、各流動方向で定性的な傾向はおおよそ一致することがわかった。計測精度としてはおおよそ誤差-70~+100% となった。

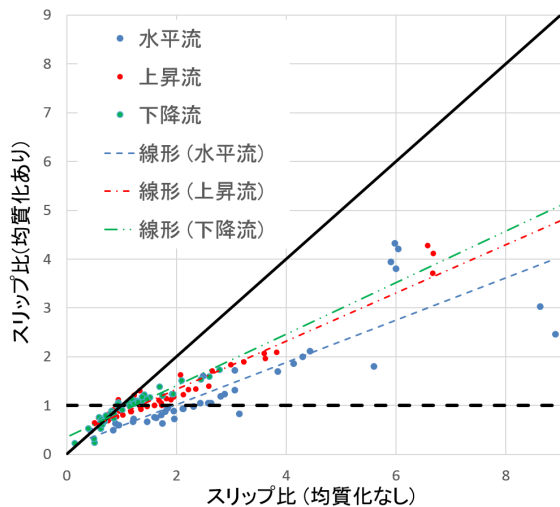


図 15: 各流動方向におけるスリップ比変化

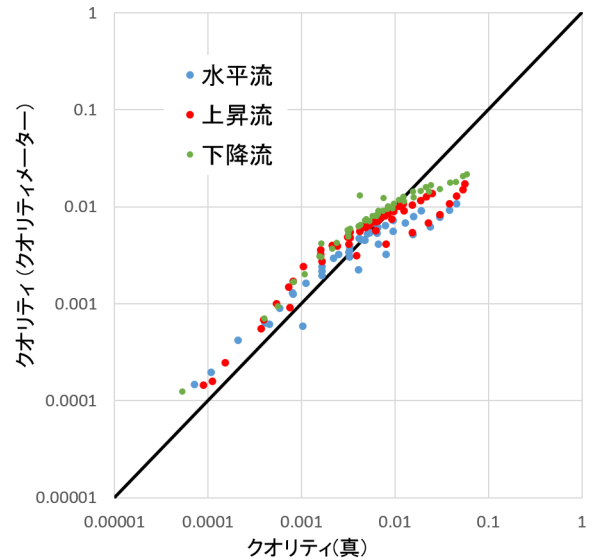


図 16: 真値 VS クオリティメーター計測値

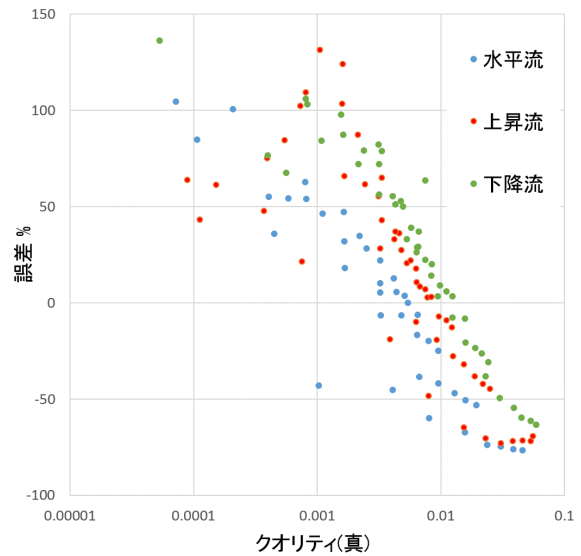


図 17: クオリティメーター誤差

また、理論式の中でも比較的一致するとの報告のある Smith の式^[3]と下降流におけるクオリティメーターの試験結果の比較を行った。その結果を図 18 に示す。また、Smith の式は式 (7) で表される。ここで、 e は経験的な定数であり、推奨値である 0.4 を用いた。

$$\alpha^{-1} = 1 + \frac{\rho_g}{\rho_l} e \left(\frac{1}{\chi} - 1 \right) + \frac{\rho_g}{\rho_l} (1 - e) \left(\frac{1}{\chi} - 1 \right) \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho_l}{\rho_g} + e \left(\frac{1}{\chi} - 1 \right)}{1 + e \left(\frac{1}{\chi} - 1 \right)}} \quad (7)$$

これより理論式の一つである Smith の式に対してクオリティメーターの方が誤差が少ないこと、及びばらつきが小さいことが確認された。

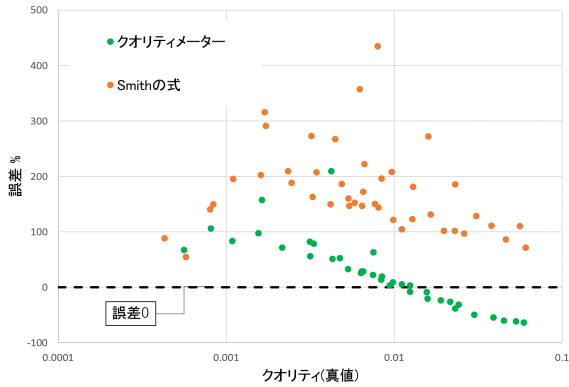


図 18: Smith の式との比較

3.4 未発達流における精度取得試験

クオリティメーターの目標の一つである、未発達流における測定について精度を取得した。図 19 の様に曲がり部直後に測定区間を置くことで、未発達流の模擬を行った。その結果を図 20, 21 に示す。

これより、発達流および未発達流においてクオリティの計測精度はほぼ変わらないことがわかった。よって助走区間の有り無しに計測精度は依存しないことが判明した。

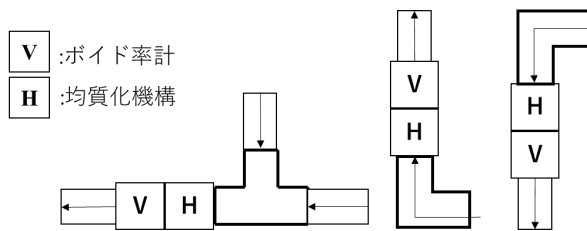


図 19: 未発達流模擬方法

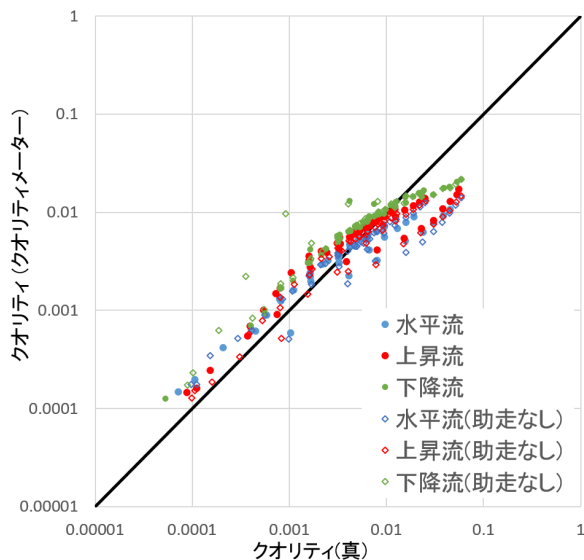


図 20: 未発達流における真値 VS クオリティメーター計測値

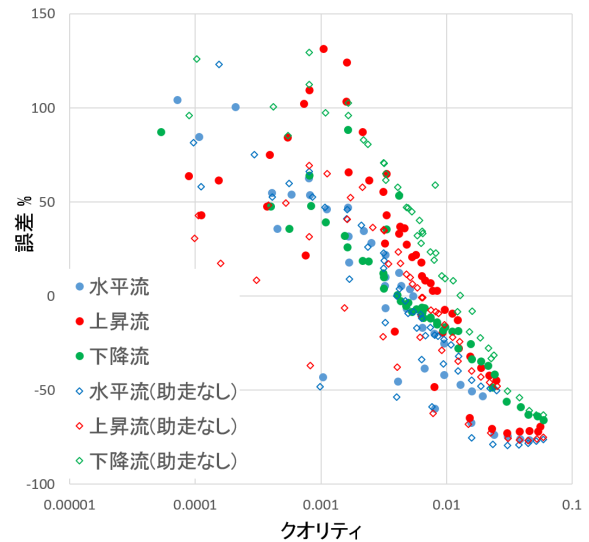


図 21: 未発達流におけるクオリティメーター誤差

4. 考察

前節の実験結果より、低クオリティ域及び高クオリティ域における計測誤差が大きくなる傾向にあることがわかる。そこで、これらの要因について考察を行った。

まず、均質化機構をおいていない際の各流量とスリップ比の関係を図 22 に示す。ここでは水平流のデータを用いて、式 (5) より先述の方法と同様に算出した。これより液相流量が多い低クオリティ域においてはスリップ比は均質化機構を設置していない場合においても比較的 1 に近いもしくは下回っていることがわかる。しかし、そのような流動条件での実験を実際に行った際には均質化機構直後の流れにおいては図 23 の青矢印の様に配管内における気泡が旋回しながら流動する様が見て取れた。これはらせん型ミキサ内を流動する際に図 12 の左図の様に流れが旋回するものの、ボイド率が十分大きくないため分離流になりきらず、液相と気相が共に回転しながら流動してしまったためであると考えられる。この

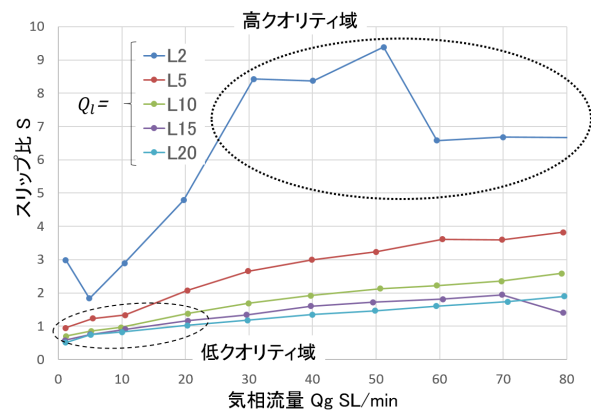


図 22: 流量とスリップ比の関係 (均質化ナシ)

ことにより流れを旋回させることで、液相の主流方向への流速を落とすことができたものの、同時に気相の主流方向の流速も落ちてしまったために結果としてスリップ比が必要以上に小さくなってしまったと考えられる。また、目視できる範囲では気泡の旋回流れが確認されたが、他にも交差型ミキサにより液相によって気相が図 23 の赤矢印の様に流れに対して斜めに押し出されることで 2 次流れが生じると予想される。しかし、流れの擾乱とも相まってこちらは断言できるほどの目視による確認はできなかった。結果として図 23 のような旋回流れ及び 2 次流れをもってしまうことで、主流方向の気相速度が落ちて、スリップ比が必要以上に小さくなってしまったため、クオリティメーターでの計測値としてのクオリティが大きくなったと考えられる。また、高クオリティ域では図 24 の様に少ない液相が壁面にへばりつき、薄い液膜として流動するために均質化機構の隙間を通り過ぎるなどで十分に均質化がなされないためであるとされる。

以上のような場合にも均質化が十分に可能な均質化機構への改善の必要性が示唆された。しかし、将来的に極低温流体に適用して行くには圧損を大きくしすぎないことも重要である。そのためには流動様式による均質化の体系的な整理を行い、どのように各流動様式で均質化を行うべきかの知見を得ることが必要であると考えられる。

また、最終的な目標である極低温流体に適用する際に誤差がどのように変化するかを液体窒素及び液体水素にて検討した。そこで、 $S = 1$ である式 (2) においてそれぞれ α - χ 相関がどのようになるか図 25 に示す。ここで、各密度比は大気圧下での値を使用した。

これより、空気-シリコンオイル系に比べて密度比の小さい窒素や水素においては低・高ボイド率域でのボイド率の変化に対するクオリティの勾配が小さくなるのがわかる。すなわちボイド率計の誤差の影響が空気-シリコンオイル系に比べ、比較的小さい

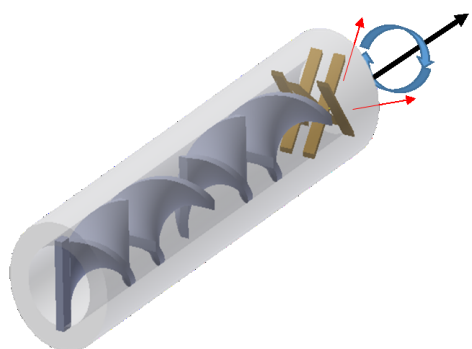


図 23: 旋回流 & 2 次流れ発生イメージ

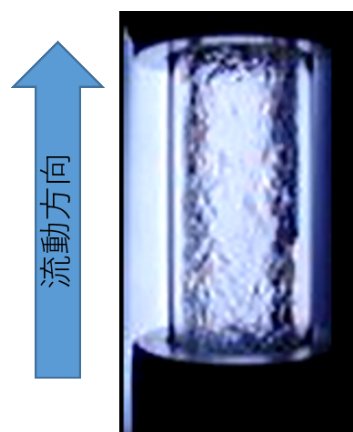


図 24: 上昇流

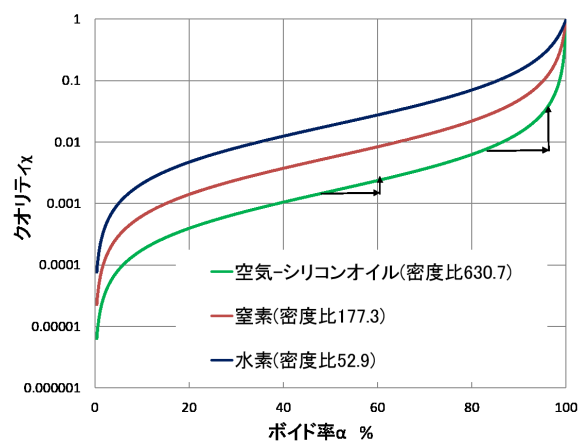


図 25: 密度比による α - χ 相関

ものになると予想できる。例として、ボイド率の誤差が $\alpha = 10\%$ においては、ボイド率計誤差が -2% の時には、クオリティの計測誤差は空気-シリコンオイル系と比較して、窒素で約 5% 、水素で約 8% 低減すると見積もれる。そこで、同様に均質化でき、及びボイド率計測精度を小さくすることができれば、低・高ボイド率における相対誤差の低減が見込める。

5. 結論及び今後の課題

結論

本研究ではクオリティ計測手法として開発を行っているクオリティメーターにおいてボイド率計に非対称型ボイド率計を、均質化機構に交差型ミキサ及び新たにらせん型ミキサを導入し、流動試験を行った。それにより得た知見を以下に示す。

1. スリップ比で評価を行ったところ $50\sim 64\%$ ほどの均質化の促進が確認された。
2. 空気-シリコンオイル系においてはクオリティメーターの誤差は $-70\sim +100\%$ 程であった。また、比較的一致するとの報告のある理論式である Smith の式と比較しても誤差が小さいことが確認された。

3. 各流動方向において定性的傾向が一致することが判明した。
4. 未発達流においてもほぼ同様の計測精度が確認でき、計測に助走区間が不要であることが確認できた。
5. 低クオリティ域では旋回、2次流れの発生、高クオリティ域での計測誤差は均質化不足によるものと考え、さらなる均質化機構のメカニズム改善の必要性が示唆された。
6. 極低温流体へ適用する際には、低・高ボイド率域にて誤差が現在より小さくなる可能性が見込まれた。
- 7) N.Archer J.Bowles M.Leahy R.Liu J.Vignos M.Henry, D.Clarke and F.Zhou. A self-validating digital coriolis mass- flow meter. *Control Engineering Practice*, Vol. 1899/12/31, , 2000.
- 8) M. Henry R. Liu, M. Fuent and M. Duta. A neural network to correct mass flow errors caused by two-phase flow in a digital coriolis mass flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 12, , 2001.
- 9) 角悠輝, 佐藤哲也, 小林弘明. 気液二相流におけるクオリティ測定手法の研究開発. 宇宙輸送シンポジウム, 2015.

今後の課題

また、今後の予定としては OpenFOAM などを用いた計算により均質化のより詳しいメカニズムの解明を行うと共に、流動試験時に撮影したものより流動様式線図や理論式などと比較することで流動様式ごとの体系的な整理を行い、均質化のモデル化等を行っていく。均質化手法の改善が見込めたら合わせて極低温試験への適用および相関関係法を用いた質量流量計測を行う。

参考文献

- 1) Tetsuya Sato, Hideyuki Taguchi, Hiroaki Kobayashi, Takayuki Kojima, Katsuyoshi Fukiba, Keiichi Okai Daisaku Masaki, Kazuhisa Fujita, Motoyuki Hongo, and Shujiro Sawai. Development study of a precooled turbojet engine. *Acta Astronautica*, Vol. 66, , 2010.
- 2) Afshin J. Ghajar Melkamu A. Woldesemayat. Comparison of void fraction correlations for different flow patterns in horizontal and upward inclined pipes. *Int J. Multiphase Flow* , Vol. 33, , 2007.
- 3) S.L. Smith. Void fractions in two phase flow: a correlation based upon an equal velocity head model. *Proc. Inst. Mech. Engrs, London*, Vol. 184, , 1969.
- 4) Novak Zuber and JAa Findlay. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. *J. Heat Transfer*, Vol. 87, , 1964.
- 5) JRS Thom. Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 7, , 1964.
- 6) G. McIntosh A. Khalil and R.W. Boom. Experimental measurement of void fraction in cryogenic two phase upward flow. *IPC Business Press Ltd*, 1981.
- 10) Yuki SAKAMOTO, Tetsuya SATO, and Hiroaki KOBAYASHI. Development study of a capacitance void fraction sensor using asymmetrical electrode plates. *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 11, , 2016.
- 11) 真鍋亮. 多相流流量計の原理とフィールド適用—multi-phase flow meter—. 石油／天然ガスレビュー, Vol. 2, , 2002.