

# 気液二相流におけるクオリティ測定手法の研究開発

○角悠輝<sup>\*1</sup>, 佐藤哲也(早大)<sup>\*1</sup>, 小林弘明(JAXA)<sup>\*2</sup>

## Development Study on Quality Measurement of Multiphase Flow

Yuki Sumi<sup>\*1</sup>, Tetsuya Sato<sup>\*1</sup>, Hiroaki Kobayashi<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup>: 早稲田大学 理工学術院

<sup>\*2</sup>: 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

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であるクオリティの測定手法を二通り考案し, CFD, 解析, 実験を通して検証を行った. 絞り前後のボイド率と差圧からクオリティを算出する第一の手法は各種モデル化が困難であり, 最大 100%もの誤差が生じてしまった. ここで得られた知見を用い, 二相流を均質化することで, 測定したボイド率から直接クオリティを求める手法を考案した. CAE により 30%以内でクオリティ算出が可能であると予想されたが, 流動実験では最大 67%の誤差が生じた. これに対し, 画像解析・CFD から装置改修による誤差改善の指針を示した.

### 記号一覧

$\alpha$	ボイド率
$\beta$	体積流量
$\rho$	密度
$A$	流路面積
$\dot{m}$	質量流量
$M_{trans}$	気相から液相の運動量移動
$M_{x,loss}$	X相の管摩擦損失
$P$	圧力
$Pa$	加速損失
$S$	スリップ比
$x$	クオリティ
$X_{trans}^2$	気相液相の質量流量比
<b>添字</b>	
$g$	気相の物性値
$l$	液相の物性値
$1$	絞り上流側の物性値
$2$	絞り下流側の物性値
$12$	絞り前後の物性値の比

### 1. 背景

クオリティは二相流熱伝達率の整理, 流動条件の判別にしばしば用いられ, ボイド率や圧力損失等と並んで重要なパラメータである. クオリティを求める手法は大きく分けて(A)理論・実験に基づく $\alpha$ - $x$  相関式を用いる手法, (B)流量計と経験式を組み合わせる手法, (C)直接的な測定手法の3つに分けられる. 以下, それぞれについての概要, 利点, 欠点を整理する.

A. 理論・実験に基づく $\alpha$ - $x$  相関式: ボイド率—クオリティの相関に関する研究は古く, 1940年代から実験とモデル化の両面から様々な相関式が考案されてきた. 例えば Zivi<sup>[1]</sup>は最小エントロピー理論を用い, Khalil<sup>[2]</sup>はLN2の垂直流から実験的に相関式を作成した. また, Thom<sup>[3]</sup>はWintertonのスリップ比を用いて, Smith<sup>[4]</sup>は環状流モデルを発展させ気液の速度ヘッドは等しいという考えに基づき相関式を作成した. 今日に至るまで, Smithの式は広いクオリティ領域において実験値と良好な一致を示すとされ, 広く用いられているが, 多くのモデルについては, 実験における再現性が低く, 適応可能なクオリティ範囲が狭い等の問題がある. また, これらの式は十分に

発達した流動を前提としているため、流動が未発達である場合や、障害物や曲管部付近では十分な精度が得られない等の問題がある。

B. 流量計と経験式の組み合わせ：コリオリ式流量計はU字曲管部を二相流が流動する際の、管路の振動周期を検出し、全質量流量を算出することが出来る。M. Henry, R. Liuら<sup>[5][6]</sup>は温度、密度などを用いて、ニューラルネットワークにより水のみでの質量流量からクオリティを算出する手法を提案した。流量計はパッケージ化されており取り扱いが容易であるが、圧損が大きく、低クオリティにのみ適応可能で、非常に高価であり、(A)と同様に、十分に発達した流動を前提としている。

C. 直接的な測定：例えばイ字分岐路や表面張力装置を用いることで気液を分離し、各相の流量を流量計によって測定することでクオリティを算出することが出来る。気液分離さえ十分に行うことが出来れば確実に算出可能であるが、装置が大掛かりになり、流動条件によっては分離が困難である問題がある。また、相関関係法では、2点間のボイド率変動の相関から気液界面の流速を求め、クオリティを推算する事が出来るが、同様に非常に限られた流動条件にしか適応できない。

こうしたことから、流動が未発達な条件であっても再現性の高いクオリティ測定手法が求められており、佐藤研究室が保有している高精度な静電容量式ボイド率の知識を生かしたクオリティ測定装置（クオリティメータ）を研究・開発する。

## 2. 旧クオリティメータの開発

### 2.1 原理

図1のような絞り流路を通過する二相流の、絞り前後のボイド率、差圧を測定する。

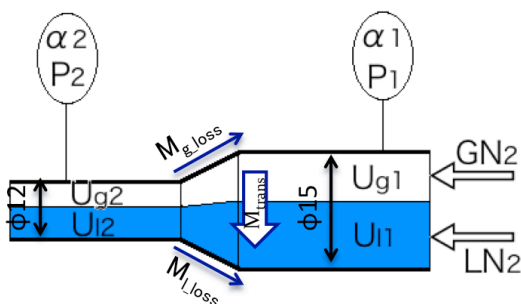


図1 旧クオリティメータ概念図

気相と液相について質量保存式、運動量保存式を立てると次のようになる（分離流モデル）。

$$\Delta\{A(1-\alpha)\rho_l U_l\} = 0 \quad (1)$$

$$\Delta(A\alpha\rho_g U_g) = 0 \quad (2)$$

$$-\Delta(A\alpha P) - \Delta(A\alpha\rho_g U_g^2) + M_{trans} - M_{g,loss} = 0 \quad (3)$$

$$-\Delta\{A(1-\alpha)P\} - \Delta\{A(1-\alpha)\rho_l U_l^2\} + M_{trans} - M_{l,loss} = 0 \quad (4)$$

このうち、パラメータは $\alpha_1, \alpha_2, \Delta P, U_{l1}, U_{l2}, U_{g1}, U_{g2}$ の7つであるが、このうち $\alpha$ と $P$ については測定可能であるため、未知のパラメータは $U_{l1}, U_{l2}, U_{g1}, U_{g2}$ の4つである。したがって連立方程式を解くことが出来、上下流の各相の流速が求まり、クオリティが算出できる。

### 2.2 実験・考察

次に、LN2の流動実験を行い、実際にクオリティ算出を試みる。装置のセットアップは図2の通りであり、実際に用いた絞り部の実験装置の写真を図3に示す。絞り管路は内径15mmから12mmへの64%の絞りとなっている。流動条件は、廃液タンク直上の流量調整弁、加圧量、加熱量を変化させることで調整した。

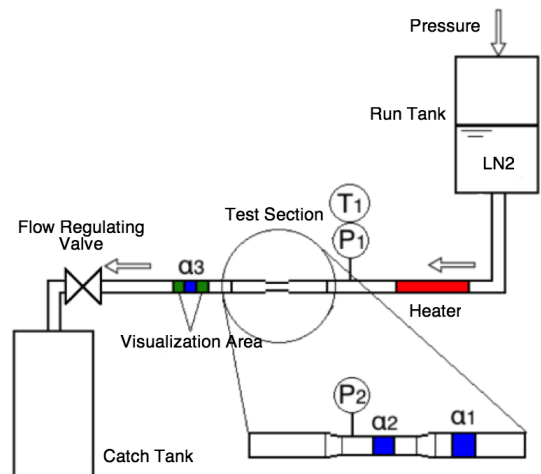


図2 LN2流動実験装置セットアップ

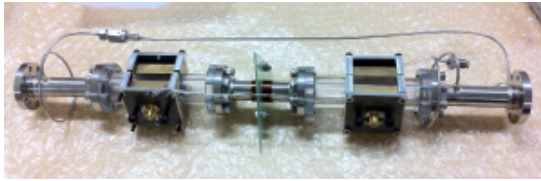


図3 絞り部外観

実験結果の解析方法について述べる。まず気相と液相について質量保存式、運動量保存式を立てると、分離流モデルの式(1)～式(4)が得られる。実験から得られた絞り前後の上流、下流ボイド率および差圧を用いて、これらの式を解くと各相の流速が得られるので、流速からクオリティを算出する(解析A)。また同時に、管摩擦損失と運動量交換を組み込んだ解析を行う(解析B)。管摩擦損失は気相・液相の管摩擦損失の比を表すLockhart-Martinelliパラメータを用いて決定する。 $M_{trans}$ の値の増加は、気相を減速、液相を加速、全質量流量を増大させるため、解析から得られた全質量流量と実験から得られた全質量流量を一致させるように、 $M_{trans}$ の値を決定する。

$M_{trans}$ を考慮しなかった場合の実験と解析の質量流量誤差、および質量流量が一致した際の $M_{trans}$ の値を図4に、Wintertonとhomogeneous, Khalilによるクオリティとボイド率の相関、解析結果を併記したものを図5に示す。また、Khalilのモデルと比較した際のクオリティ算出誤差を図6に示す。Khalilは本実験と同様にLN2を用いて相関式を作成したことから、本実験では良比較対象であると考えられ、真の値として取り扱う。

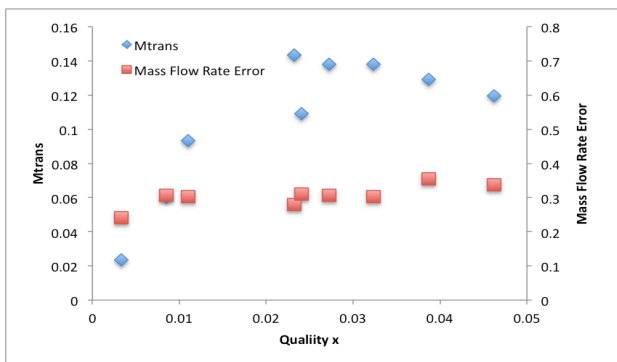


図4 補正無しの場合の質量流量誤差と誤差に対応した $M_{trans}$

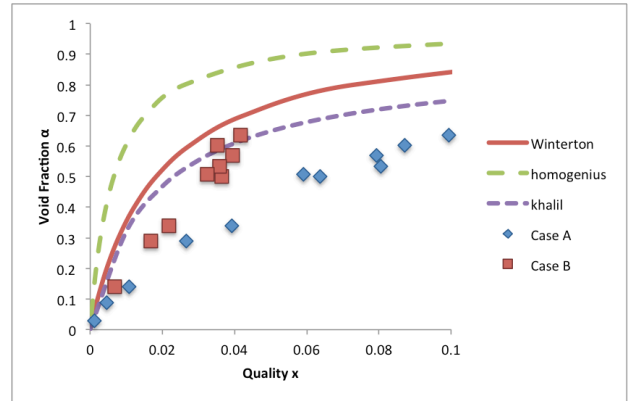


図5 クオリティとボイド率の相関

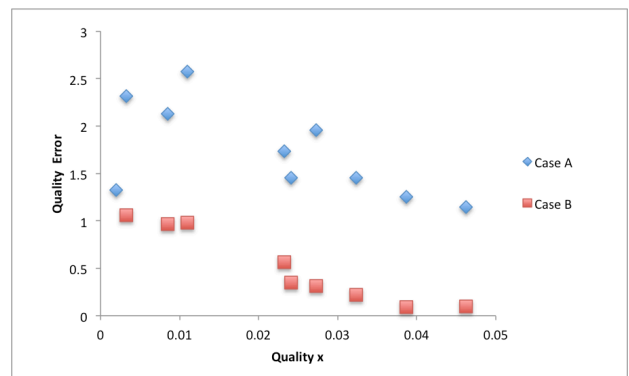


図6 クオリティ算出誤差

図4、6から、解析Aでは、質量流量誤差は30%程あり、クオリティ算出誤差は最大で260%もあることになる。また、補正を組み込んだ解析Bでは、質量流量誤差は0%、クオリティ算出誤差はクオリティが大きい程小さいが、低クオリティ域では最大で100%程の誤差が生じる結果となった。この誤差拡大要因として、解析に分離流モデルを用いたことが不適切であると考えられる。分離流モデルは気相と液相が独立した流路を持つとしているが、低クオリティの気泡流やスラグ流では気相は不連続であり、モデルと実際の流動の形式が大きく異なるためである。したがってクオリティ算出の高精度化には、ボイド率計の高精度化とともに、質量流量誤差にもとづく運動量交換モデルの改良や、低クオリティ域において均質流モデルを導入する必要があると考えられる。

### 2.3 旧クオリティメータまとめ

- ・ 運動量交換を考慮しない分離流モデルを用いた解析から得られたクオリティは誤差が大き

く、最大 260%になった。

- ・ 質量流量誤差をなくすように分離流モデルの式に気液間の運動量交換の項を組み込んだ結果、クオリティ算出誤差は高クオリティのもの程改善されたが、低クオリティ域においては最大で 100%の誤差が生じた。
- ・ 低ボイド率域では分離流モデルを適用することは不適切であり、適切なモデルを開発、適用する必要があることが分かった。
- ・ クオリティ算出誤差を減らす為にはボイド率計の高精度化、質量流量誤差にもとづく運動量交換モデルの改良が必要である。

### 3. 新クオリティメータの開発

#### 3. 1 原理

旧クオリティメータでは、絞りによる加速損失、壁面摩擦による損失、気液間剪断力による損失の3つをモデル化して統合し、ボイド率、差圧からクオリティを求めることを試みた。結果、絞りによる気液間剪断力による損失（流動擾乱の影響）が、他の2つの損失に比べて非常に支配的であることが分かった。しかし、これらの損失は複雑な相互作用の上に成り立っており、全てを包括するモデルの作成は難しいと考えられる。そこで新クオリティメータでは、流動擾乱に注目した新測定手法を考案する。まず、様々なスリップ比の流動に対し、流動を均質化してスリップ比を1にする。次に示すように、スリップ比が1の場合、ボイド率は体積流量と一致し、次式のように体積流量からクオリティが求まる。

$$x = \frac{\rho_g \beta}{\rho_g \beta + \rho_l (1 - \beta)} = \frac{\rho_g \alpha}{\rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha)} \quad (5)$$

では具体的な均質化手法について考える。例えば、図7に示すような多相流計では、インラインミキサーと呼ばれる均質化機構が用いられており、管路長手方向に対して二次流れを作ることでボイド率分布と流速分布を均一化することが出来る。

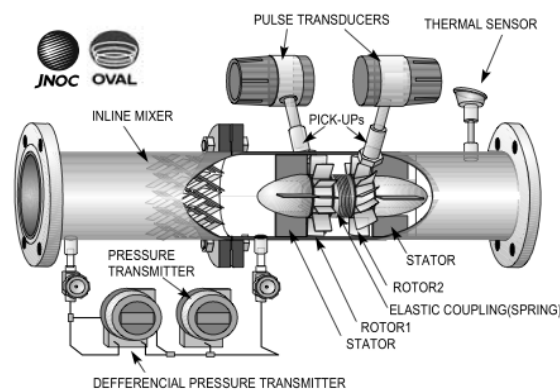


図7 JNOC/OVAL 多相流計概念図<sup>[7]</sup>

また、近藤<sup>[8]</sup>は均質化機構として、多孔を有する一対の固定板により挟持された複数の球体を用い、二相流がこの球体の間隙を通過する際、気泡の大きさが均一化され、流れの変動を抑制することに成功した。

本研究では二相流の均質化機構として、図7に示したインラインミキサー方式を採用する。

#### 3. 2 ボイド率計測誤差

均質化後のボイド率をボイド率計で測定する際、測定誤差が算出したクオリティにどの程度影響を与えるかを考察する。その際、次のような基準で許容誤差を決定する。まず、核沸騰領域 ( $x < 5 \times 10^{-4}$ ) では、熱伝達率はクオリティに関係なくほぼ一定となるため、こうした低クオリティ域では測定誤差が大きくても問題ないものとする。また、ドライアウト現象が発生する程の高クオリティになることは考えにくいので、 $4 \times 10^{-1}$ より大きい範囲における誤差は配慮しなくても良いものとする。さらに、既存の円弧型ボイド率計の測定誤差が30%程度であることから、クオリティの算出誤差も、これと同様の30%程度を限度とする。以上をまとめると、 $5 \times 10^{-4} < x < 4 \times 10^{-1}$ の範囲で30%以内の誤差でクオリティを測定することが目標となる。

図8に、ボイド率測定誤差がクオリティ算出に与える誤差を示す。図より、ボイド率計の計測精度は、 $x = 5 \times 10^{-4}$ 、 $4 \times 10^{-1}$ 付近で0.5%以下、 $x = 5 \times 10^{-3}$ 付近で6%以下であることが必要条件であることが分かる。

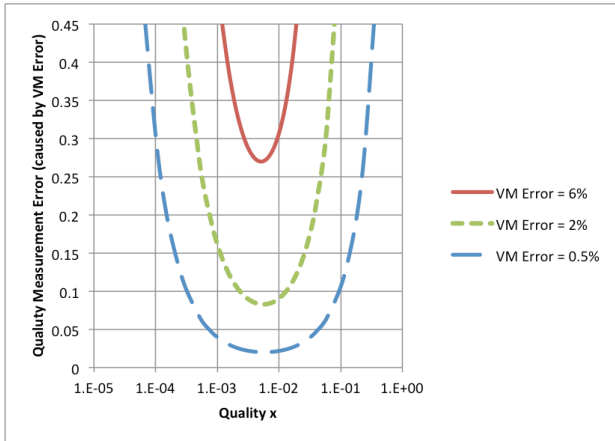


図8 ボイド率測定誤差とクオリティ算出誤差の関係

このような高精度でボイド率を測定可能な装置は存在しないため、電場解析を用いてボイド率測定誤差が極力小さくなる極板形状を決定する。ボイド率計の誤差低減に重要な要素は3点ある。まず、極板間距離を短くすることで、電気力線が極板以外へ回り込むことを防ぎ、静電容量に及ぼす影響が小さくなり、静電容量の測定値が大きくなることでS/N比が小さくなる。また、極板形状を円弧型から平板型にすることで、電気力線の向きを平行にすることが出来、静電容量とボイド率値が比例関係に近づき、誤差が小さくなる。そして、極板面積を大きくすることで静電容量の測定値が大きくなり、同様にS/N比の低下につながる。ここでは装置設計上の制約として、均質化機構、クオリティ測定部（ボイド率計取り付け部）など全ての機構が、図9に示すようなICF114変換クロス内部に収まるようにする。流路部の内圧はICFクロスが負担し、また、極力取り扱いが容易になるようにパッケージ化を図ることが出来、信頼性の向上につながる。

以上を踏まえ、図10に新クオリティメータの流路形状を示す。新クオリティメータは大きく2つの構成要素から成る。赤斜線部の均質化機構と青斜線部のクオリティ測定部である。右側の1インチ管から流入した二相流は、均質化機構でボイド率分布と流速分布が均質化され、クオリティ測定部では流路は準二次元形状に変形される。その後流路は1インチ管に接続すべく、再び元の形状へ復元する。その際、流路断面積は常に一定とする。

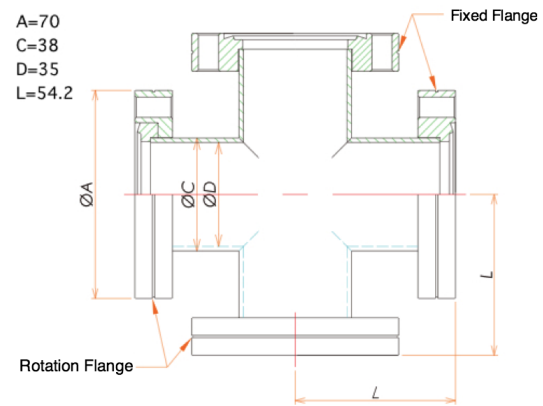


図9 ICF114変換クロス外形

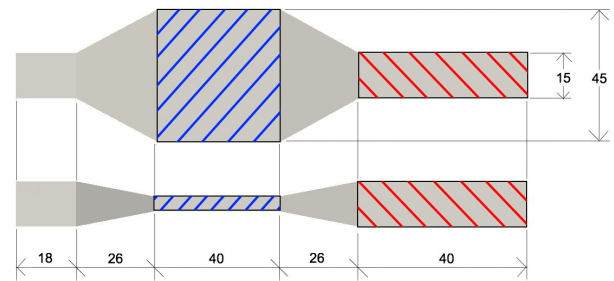
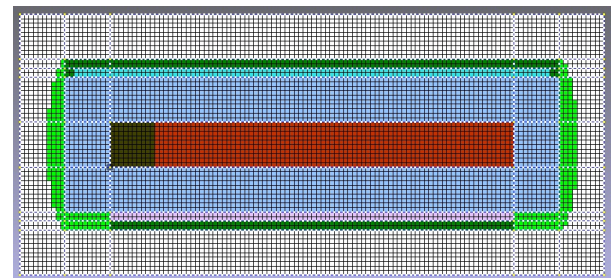


図10 新クオリティメータ概形

以上、ICFフランジに収まる制約下で、考える中で最も精度が高いと思われる形状を、坂本<sup>[9]</sup>の非対称極板手法を元に設計し、PHOTO-VOLTSTを使用した電場解析により精度確認を行う。図11に電場解析モデルの一例を示す。



- Air
- + Shield
- Insulator
- Polycarbonate
- GN2
- LN2
- Upper electrode plate: B.C. as 1[V]
- Lower electrode plate: B.S. as 0[V]

図11 電場解析モデル



解析手法は次の通りである。まず、ボイド率を0から1の範囲で様々に変化させ、それぞれについて層状流、均質流を模擬した気相・液相配置を設定する。その際の下極板の電荷量から、静電容量を算出する（真の値）。次に、ボイド率0、1時の静電容量を線形補完することで、ボイド率—静電容量の相関式を作成する（計測値）。そして、計測の相関と真の相関の誤差を算出することで、ボイド率計としての性能を評価する（図12）。また、図12から明らかになった各ボイド率での計測誤差に基づき、各クオリティにおけるクオリティ算出誤差をプロットしたものを図13に示す。

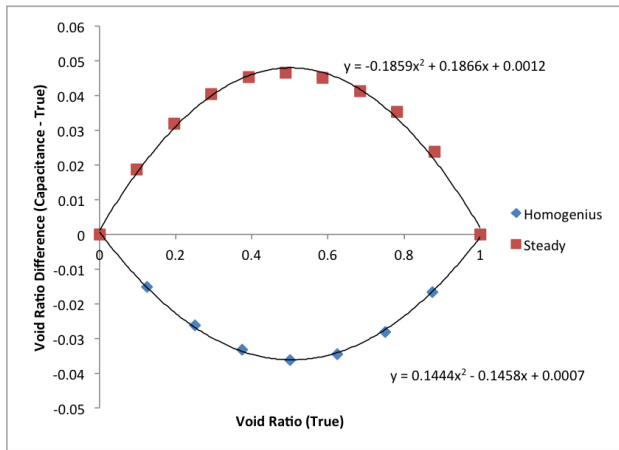


図12 ボイド率計測誤差

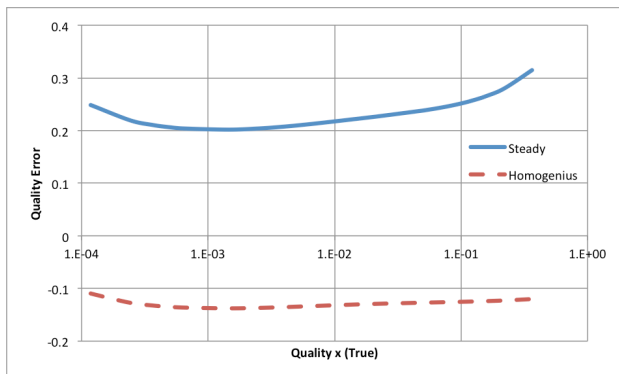
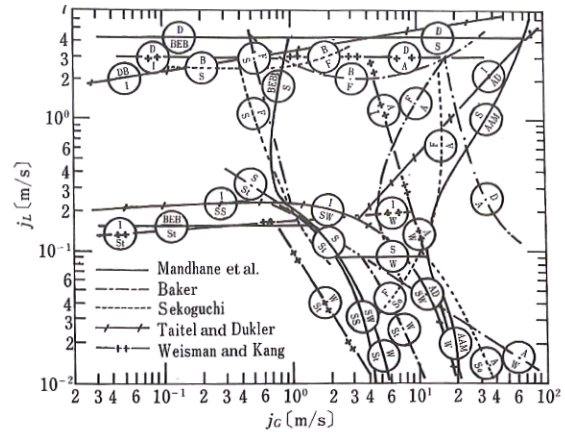


図13 ボイド率計測誤差によるクオリティ算出誤差

図13より、 $5 \times 10^{-4} < x < 4 \times 10^{-1}$ の範囲で30%以内の誤差でクオリティを測定出来ていることが分かる。

### 3.3 均質化誤差

図7に示したようなインラインミキサーによる均質化が可能かどうか、オープンソース CFD ソルバである OpenFOAM (乱流モデル: RANS, 自由界面流解析法: VOF) を用いて検証を行う。入口条件は、Bakerらの流動様式の遷移条件図(図14)を用い、気泡流から環状流の範囲で、表2に示すような4通りを設定する。



B: bubble flow, EB: extended bubble flow, S: slug flow, F: floss flow, SP: separated flow, A: annular flow, St, SS: stratified flow, W: wavy flow, D: mist flow, AM, AD: annular mist flow, I: intermittent flow, DB: dispersed bubble flow, SW: stratified wavy flow

図14 水平流の流動様式の遷移条件

表2 入口条件

Inlet case	$x$	$\alpha$	$U_l$ m/s	$U_g$ m/s	Flow Pattern
0	$1.07 \times 10^{-4}$	0.09	3.33	3.61	BEB
1	$9.77 \times 10^{-3}$	0.75	0.30	0.99	St
2	$1.79 \times 10^{-3}$	0.49	2.07	3.87	S
3	$1.93 \times 10^{-2}$	0.81	2.71	12.5	A

またこれら4つの入口条件それぞれについて、次の2つの解析モデルの計算を行う。

- ・ ケース A: 図7に示したような平板が互い違いに配置された均質化機構（水色）を持ち、先の節で設計したボイド率計形状への流路変形部にガイドベーン（青色）を配置してあるモデル。

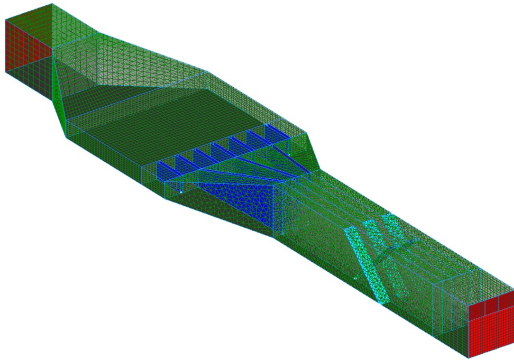


図 15 計算格子(case A)

- ・ ケース B：対照実験として、入口～出口間流路長は同じで、流路変形や均質化機構を持たない、矩形直管モデル。

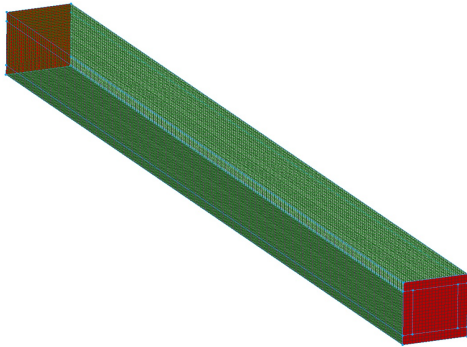


図 16 計算格子(case B)

シミュレーション結果のナンバリングとして、入口条件を1の位、格子形状を10の位として整理する。図17に、全シミュレーション結果を示す。これは、シミュレーションが十分定常状態になった際の、クオリティ測定部の時間平均ボイド率からクオリティを求めた際の誤差である。

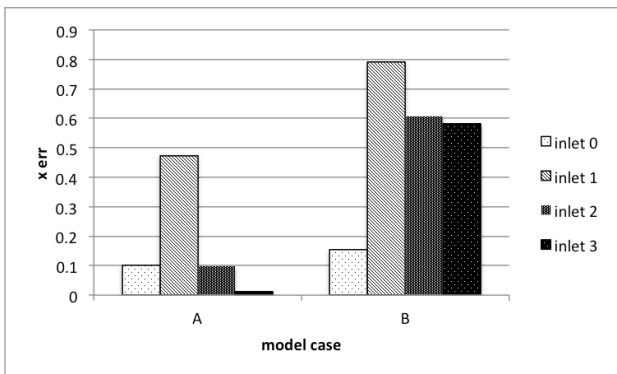


図 17 クオリティ測定誤差 (CFD)

まず、入口条件1を除いて考える。モデルAで

は、均質化機構によって、誤差が10%以内に抑えられている。一方で単純な矩形直管であるモデルBの場合、入口で設定したスリップ比は下流側でもほぼ変化しておらず、当然ボイド率測定位置では十分に均質化 ( $S=1$ ) されていない。したがってクオリティを算出すると、誤差は最小で15%、最大で60%も生じてしまう結果となった。

次に、入口条件1 (赤色) について考える。表2に示したように、流動条件が層状流 ( $St$ ) であり、気液流速は他のケースに比べて小さい ( $Re_{TP}=1.21 \times 10^4$ )。このような低  $Re$  流れでは、攪拌機構が十分に機能せず、誤差47%と大きくなってしまったと考えられる。

以上から、層状流のような低  $Re$  流れ以外の場合において、Qメータによって、クオリティを誤差10%以内で算出できることが分かった。ただし、これにはボイド率計自体の誤差は含まれていないことに留意したい。

### 3.4 累積誤差

均質化誤差、ボイド率計測定誤差が分かったので、これらを合わせた累積誤差について考える。CFDから得られた気泡流、スラグ流、環状流の誤差を、各流動様式の代表値と仮定し、それらの間を線形補間することで、均質化誤差をボイド率測定誤差に組み込む。図18はボイド率計測定誤差、均質化誤差、累積誤差を真のクオリティについて整理したものである。

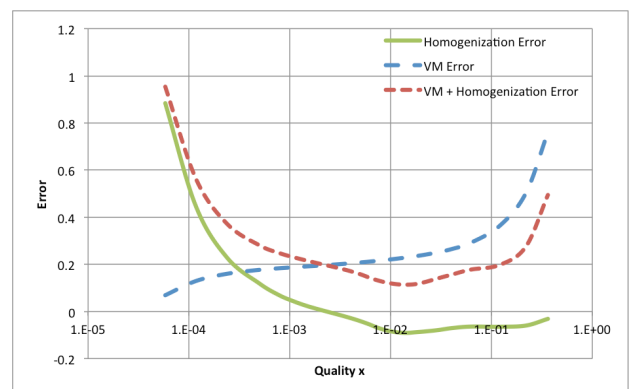


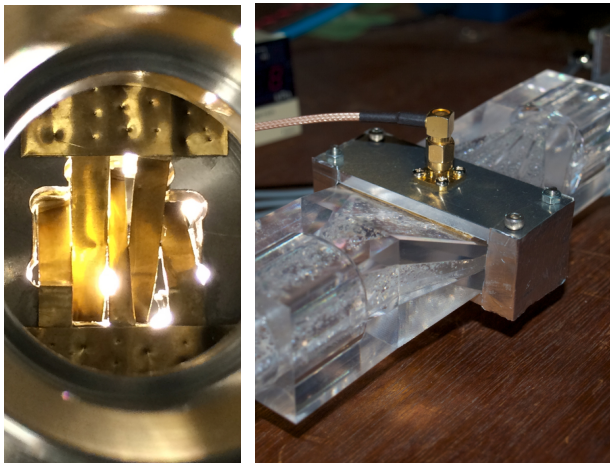
図 18 累積誤差

図18よりクオリティが  $5 \times 10^{-4} < x < 4 \times 10^{-1}$  の範囲で30%以内の誤差でクオリティを測定可能

であることが確認できる。

### 3. 5 実験手法

クオリティメータの概形が定まり、実現可能性が確認できたことから、実際に二相流を流動してデータを取得する。均質化機構に関しては、図7に示すようなインラインミキサー形状を用いることにする。本実験の作動流体は、2章で述べた気液窒素系ではなく、常温の空気—シリコンオイル系を用いる。極低温流体ではなく常温流体を用いる理由は、実験が簡便である点、真のクオリティの測定が可能である点である（後述）。また、シリコンオイルを用いる理由は、動粘度と比誘電率が液体窒素のそれに近いためである。図19にインラインミキサーとクオリティ測定部の写真を、図20に実験系統図を示す。



(a)インラインミキサー (b)クオリティ測定部  
図19 自作インラインミキサー

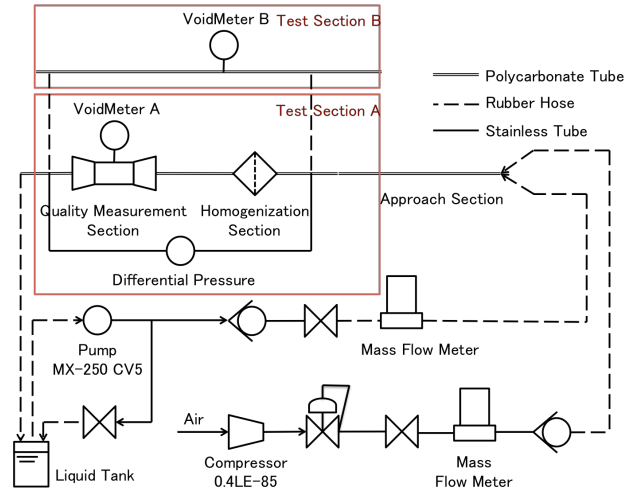


図20 空気—シリコンオイル系実験系統図

液相と気相はポンプとコンプレッサにより、それぞれ独立した系統を流動する。Y字合流管によって合流して二相流を形成する前に、流量計により各相の質量流量が測定されるため真のクオリティが算出可能となっている。合流部後流に設けられた助走区間を通して定常状態となった二相流は、テストセクションへ流入する。テストセクションはクオリティ測定用のセットアップ (case A) に加え、対照実験として均質化機構や流路変形を伴わないセットアップ (case B) がある。それぞれ液相流量を 5~25l/m、気相流量を 1~100l/min と変化させることでクオリティがおよそ  $10^{-4}$ ~ $10^{-1}$  の範囲の流動を行う。測定点は、気相流量、液相流量、高速度カメラ3点、テストセクション前後の差圧、クオリティ測定部のボイド率 (セットアップ A)、助走区間後のボイド率 (セットアップ B) の7点である。

### 3. 6 実験結果

まず、Qメータによってどの程度の均質化がなされたのかを、もっとも直感的に理解し易いスリップ比の変化を元に評価する。図21は Case A と B のスリップ比の比較である。



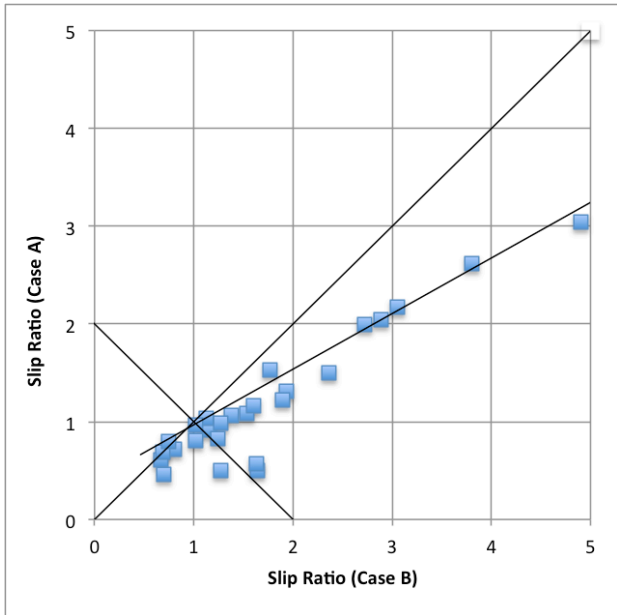


図 2.1 Case A,B 間のスリップ比比較

図より、スリップ比が1近傍の低クオリティ域の流動では大きな均質化は見られないが、スリップ比  $S > 2$  では42%の均質化効果が得られていることが分かる。

次に、図 2.2 に流動実験クオリティ測定誤差の一覧を示し、CAE 段階での測定誤差予測曲線と既存の相関式(Thom)からクオリティを算出した際の誤差を併記する。図中のエラーバーは、クオリティ測定部の流動様式によって取りうる誤差範囲を示している(図 1.3 を参照のこと)。図より、Thom による算出誤差は Q メータによる誤差に比べて非常に大きくなっていることが分かり、既存相関式の信頼性が、流動条件によって非常に不確実であることを示している。また、Case A と B を比較すると、Q メータの設置により、全テストケースの誤差の絶対値平均(平均誤差)は29%改善されている。しかし、CAE 段階では最大誤差を30%と見込んでいたにも関わらず、実際は高クオリティ域において最大82%、平均27%の誤差が生じてしまう結果となった。

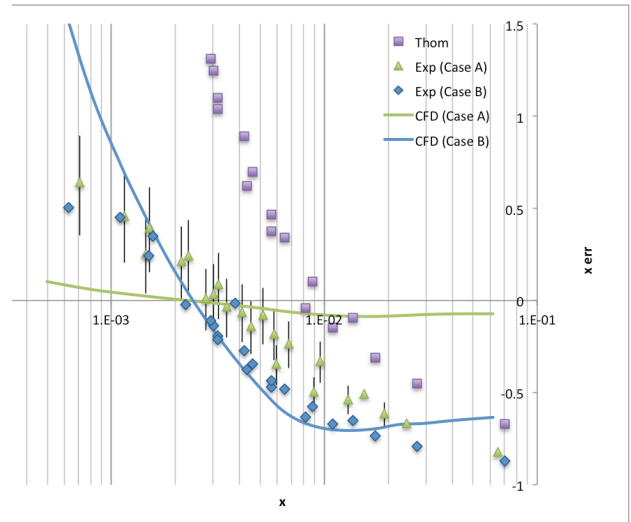


図 2.2 クオリティ測定誤差

### 3. 7 誤差要因考察

#### 3. 7. 1 ガイドベーン

CFD と実験結果に乖離が生じた要因に、ガイドベーン後流部における、流速とポイド率の不均一化が考えられる。図 2.3 からは低クオリティ条件でガイドベーン後端に気泡が滞留したことで真の値よりも計測値が大きくなったこと、図 2.4 からは高クオリティ条件で液相が糸状にガイドベーン後流の低流速域に集中したことで、真の値よりも計測値が小さくなったことが分かる。したがってガイドベーン後端の先鋭化により後流へ及ぼす影響を低減できることが予想される。



図 2.3 気泡の滞留 (G:1 [l/m], L:20 [l/m])



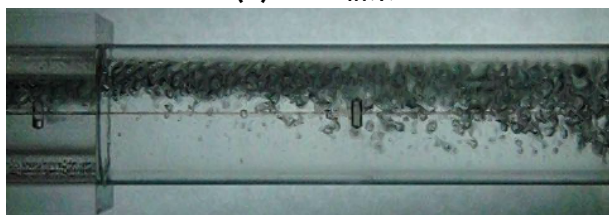
図 2 4 液相の不均一分布 (G:60[l/m], L:10[l/m])

### 3. 7. 2 均質化機構とミキサ間距離

図 2 5 に、CFD と実験それぞれについて均質化機構直後の流動の可視化図を示す。(a)からは均質化機構によって気泡が流路断面に対して一様に分布して均質化されていることが分かる。一方(b)からは、均質化機構直後では均質化されているが、クオリティ測定部へと流動するにしたがって気泡が上方へ遷移し、不均一化が進行していることが分かる。このような不均質化を CFD にて再現できなかったことが、実験での誤差が CFD の誤差に比べて大きくなってしまった要因であると考えられる。対策として、均質化機構とクオリティ測定部の距離を、現在の 15cm から更に短縮することが考えられる。



(a) CFD 結果



(b)実験結果

図 2 5 気泡の上方遷移例 (G:1[l/m], L:10[l/m])

### 3. 7. 3 CAE の問題点

CAE 段階にてこうした誤差を予見できなかった原因は様々な要因が考えられる。今回 CFD にて用いた界面輸送法である VOF は、気泡流のような微細な界面が鈍る欠点がある。従って VOF

に Level-set 法をカップリングすることでこれを防ぎ、精度の向上が期待できる。また、気泡直径に対して 15 程度の格子数を取ることが望ましいとされているが、今回は計算機性能の制約から、最悪の場合は 1 気泡に対して 2 程度の格子数しか割り当てられていない。これら解決策は今後の研究にて検証することとする。

### 3. 8 新クオリティメータまとめ

- ・ インラインミキサーによりスリップ比基準で 42%の均質化効果が得られた。
- ・ 実験では、クオリティ測定部の気泡滞留や均質化機構後流での不均質化現象により、CAE 段階の予想誤差 30%を超える、最大 82%の誤差が生じた。
- ・ 画像解析・CFD からガイドベーンの先鋭化、均質化機構とクオリティ測定部の距離短縮といった誤差改善の指針を示した。

### 4 新・旧クオリティメータ比較

表 3 に新・旧クオリティメータの、クオリティ範囲  $x=3 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$  での測定誤差をまとめる。

表 3 測定誤差まとめ

	最大誤差	平均誤差
旧クオリティメータ	1	0.53
新クオリティメータ	0.67	0.29

表から、旧クオリティメータに比べて新クオリティメータは最大誤差が 33%、平均誤差が 24% 改善したことが分かる。

### 5. 結論

旧クオリティメータは、絞り前後のボイド率と差圧から分離流モデルに基づいてクオリティを算出していたため、特に低クオリティにて誤差が拡大し、最大 100%の誤差が生じた。流動様式に左右されない高精度クオリティ算出手法の確立を目指し、二相流を均質化することで、測定したボイド率から直接クオリティを求める手法を考案した。旧クオリティメータに比べて 24%精度向上が達成できたが、流動実験では、CAE 段階での予想を超える、最大 82%の誤差が生じた。これに対し、

画像解析・CFD から、ガイドベーンの先鋭化と均質化機構とクオリティ測定部の距離の短縮などの装置改修により誤差改善がなされることが分かった。今後は装置の改修、流動実験に加え、CFD 二相流ソルバに Level-set 法を導入することで、より高精度な CAE を行う環境の構築を目指す。

の精度向上に関する研究, 日本機械学会, 2014.

## 参考文献

[1] Zivi, S.M., 1964. Estimation of steady state steam void fraction by means of the principle of minimum entropy production. Trans. ASME, J. Heat Transfer 86, 247-252.

[2] A. Khalil, G. McIntosh and R.W. Boom, 1981. Experimental measurement of void fraction in cryogenic two phase upward flow. CRYOGENICS, 411-414.

[3] Thom, J.R.S., 1964. Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water. Int. J. Heat Mass Transfer 7, 709-724.

[4] Smith, S.L., 1969. Void fractions in two phase flow: a correlation based upon an equal velocity head model. Proc. Inst. Mech. Engrs, London 184, 647-657, Part 1.

[5] M. Henry, D. Clarke, N. Archer, J. Bowles, M. Leahy, R. Liu, J. Vignos and F. Zhou: A self-validating digital Coriolis mass- flow meter: an overview, Control Engineering Practice, **8**-5, 487/506 (2000)

[6] R. Liu, M. Fuent, M. Henry 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, **12**-1, 53/63 (2001)

[7] 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 (2), pp.21-33, 2002.

[8] 近藤喜之.“蒸気発生器特開 2006-322683”. j-tokkyo.<http://www.j-tokkyo.com/2006/F22B/JP2006-322683.shtml>, (参照 2014-10-10).

[9] 坂本勇樹, 非対称極板を用いた静電容量式ボイド率計