

論文の内容の要旨

論文題目：自由液面乱流場における液面形状と流場の3次元同時計測手法

氏名： 田中源太郎

自由液面を有する体系、例えば種々の工業プラント内等において、気液界面での流場と液面の相互作用は、液面の自励振動や旋回渦による気泡巻き込みといった非線形現象を引き起こす要因となる。これらの非線形界面現象は、ループ内流体の流動特性を著しく低下させるとともに、プラント内配管等に深刻な影響を与える。原子力分野では、「もんじゅ」に代表される高速増殖炉の、冷却材の混合領域を構成する炉容器内筒の上端がNa液面より下にある沈潜堰になっている。そのため大型・薄肉構造物の振動特性と強度、ならびにナトリウム自由液面の地震時スロッシング応答を高い精度で予測する解析技術の開発が急がれている。同様に地震などによって石油貯蔵タンク内でスロッシングが発生した結果、容器破損や溶液噴出事故が数多く報告されている。また、H-II ロケットの様な宇宙開発分野においてもタンク内推進薬の液面制御が大きな課題となっており、液面状況に応じたタンク内圧力制御が必要となっている。

これらの現象の回避のためには、気液界面での流場と液面との相互作用の解明が必要である。現在、数値解析手法の充実により様々な体系での流体計算が可能である。流れの数値解析において、自由液面を有する体系における流動計算は、波動する液面を境界条件としなくてはならない。しかしながら、準静的液面を除いてこの境界条件を正しく与えるような知見は未だ得られていない。従来、自由液面と液体内部の流速との相互作用を計測した研究は主としてLDVを用いて行われている。ところが、これらの研究のほとんどは、液体側の流速分布を測定しているに留まっており、液面変動の同時測定は行われていないため、自由液面乱流場におけるSurface Sub-layerの組織構造の詳細は明らかにされていない。また、その相互作用は多分に3次元である。LFDのような液位計やLDVといった流速計は測定の精度は高いが、点計測であるというデメリットがあり、液面と流場の相互作用を解析する上では、十分な情報を得ることができない。

本研究では、液面下の流場計測にステレオPIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像流

速測定法)、及び LIF(Laser Induced Fluorescence)を用いる。PIV は流場断面の速度ベクトル分布を時系列で高精度に測定することが出来る流速測定法である。さらに、ステレオ撮影により流場のある断面上の 3 次元流速を可視化できるため、自由液面乱流場と液面の 2 次元形状の相関を解析することができる。また、近年ハードウェア及び画像処理技術の著しい進歩によって、LIF による定量的な流場解析が可能となりつつある。流体に混入したレーザー蛍光染料により、超高解像度の流場拡散情報を取得することによって、Coherent Structure を認識できるまでに至っている。Walker らによると、Surface Sub-layer 内の非等方性および液面近傍での流速と渦度の相関が自由液面乱流場を支配している重要なパラメータであり、これらの観点からも本手法が強力なツールとなることが期待できる。気液の成層界面である自由液面の 2 次元形状は、気相、液相それぞれの流れと強い相関がある。液面の 2 次元形状を測定する手法としては、モアレ法や Dabiri のカラーパレット法等があるが、液面での光の反射を用いるため、測定系が非常に複雑となり、定量化が難しい。そこで本研究では、自由液面形状測定にスペックル法を適用する。スペックル法は申請者によって提案された、レーザーを用いた新しい液面形状測定手法である。スペックル法は、液面での光の屈折を利用した液面形状測定法であるため、非常に簡易な光学系で液面の 2 次元形状の過渡変化が追えるという強みがある。しかしながら、得られる液面情報は撮影されるスペックルの解像度に依存するため高解像度カメラによる測定が望ましい。

上記の工学的計測手法を組み合わせることによって、自由液面と液面下流場の高精度同時計測が可能となる。本研究では、この高解像度同時計測システムを構築するとともに、得られる液面形状及び液面下乱流の 3 次元情報を解析することによって、気液界面での流動現象の解明が期待できる。さらに、この気液二相界面の情報は気泡スラグ流等の気液混相流解析の基礎データをも成り得る。これらの気液界面での流体相互作用について定量的なデータの蓄積、及びその解析による貝目非線形現象とその組織構造の解明が本研究の目的とするところである。

本研究では、自由液面乱流場を対象とした実験的研究を行った。自由液面乱流場は多分に 3 次元であり、また液面擾乱生成源である液面下の流場と液面自身との相互作用の解明が重要となる。その際、液面形状を定量的かつ 3 次元的に計測できる手法が必要となる。

可干渉性の光を用いた 3 次元液面計測手法であるスペックル法を開発した。

本手法は、計測が困難な透明物体である液面形状を、高精度かつ 3 次元的に測定可能な手法であった。さらに、近年開発が進んでいるその他 3 次元測定法と比較して、液面での光の屈折を利用することからくる測定系の簡便性が特徴である。自由液面乱流場自体の測定には、3 次元速度成分が計測可能なステレオ PIV 法を用いた。ステレオ PIV 法は、2 台以上のカメラの視差を利用してその奥行き方向速度成分を算出する方法であるが、乱流解析

に用いるにはその解像度、精度に疑問があり、そのまま実施することは出来ない。

本研究では最新の PIV 処理技術ならびに画像処理技術を組み合わせることによって、ステレオ PIV 法の解像度ならびに精度を向上させることが出来た。

本研究で使用したステレオ PIV 計測手法は、そういった点で非常に将来性のある解析手法であるといえるが、まだ 3 次元ベクトル再構築の場面での最適化を必要としており、さらなる改良が望まれる。

スペックル法とステレオ PIV 法の 2 つの光学的手法を組み合わせ、液面乱流解析にあらたな視点を導入することができた。

ステレオ PIV 法によって得られた速度ベクトル場はスペックル法で得られた液面形状データと完全に同期しており、全く同時刻の、非常に近接した領域での測定が実施された。これは両計測手法が光学的手法であること、簡便な計測法であるために実現可能な測定であった。

液面下円形噴流を用いた実験結果からは、液面と流場との確かな相関関係を見ることが出来た。

- 液面が拘束条件として存在する場合、ノズル先端から噴出したジェットは、下流に行くにしたがって、その最大流速点が液面寄りにシフトしていくことがわかった。
- レイノルズ応力分布 $(v'^2 - w'^2)/(U_{in})$ の違いは液面の有無によって引き起こされたものである。これがいわゆる “Surface Current” を生成する力となっていることがわかった。
- 高レイノルズ数・高フルード数流れでは、ノズルから噴出したジェットは液面と衝突した後、液面を隆起・振動させて扇状の液面波を発生させる。
- それに対して、低レイノルズ数・低フルード数流れでは、ジェットは下流方向に進むにつれ液面に接近し付着するが、その鉛直方向速度成分はレイノルズ応力 $(v'^2 - w'^2)/(U_{in})$ となって液面表層にスパン方向流場を発生させる。

さらなる実験データの蓄積により自由液面を有する体系での数値解析における境界条件、また種々の工業プラント内の貯蔵タンクの振動制御といった方面での活用が期待される。