

[別紙 1]

論文の内容の要旨

論文題目 低重力環境における気液二相熱流動の研究

氏 名 姫野 武洋

人間の日常的な活動領域が地球周回軌道上まで拡大するのに伴い、宇宙活動を支える基盤技術として、低重力環境で燃料や冷却剤などの液体を貯蔵そして輸送する技術は欠かせないものであり、今後ますます重要となる。例えば、軌道上に推進機関用の燃料を貯蔵して宇宙輸送機に供給する技術が確立されれば、再使用が可能な軌道間輸送機を実現でき、低コストで柔軟性に優れた宇宙輸送のための社会基盤を構築することが期待される。

しかし、宇宙環境では重力に代わって相対的に界面張力と濡れ性の影響が卓越するため、自由表面流の挙動が地上の場合とは大きく異なり、液体を容器内部の望ましい位置に保持し、思い通りに容器外部へ輸送することすら難しくなる。地上環境での経験に頼って類推設計された流体管理機器は、軌道上で想定した性能を発揮できず計画通りに運用できない恐れがある。

このような、地上で経験されなかった流体管理の問題を解決し、軌道上での流体の輸送技術と熱管理技術を確立するためには、低重力環境における自由表面流の流動と伝熱の特性を適切に評価および予測できる知見が求められる。従来宇宙環境利用実験では、種々の流体の挙動を観察する基礎的研究が実施されてきた。しかし、残念ながら、工学的に有用なレベルでの熱流動特性の検討はほとんど行われていない。他方、大気圏内で落下塔や

航空機を用いて人為的に低重力環境を創出できる機会は設備と費用の両面から限られており、機会に恵まれたとしても獲得できる低重力環境の質と持続時間にかかなりの制約を受ける。このことが軌道上で運用される機器の設計段階における試運転を難しくしており、勢い設計は保守的にならざるを得ず、関連する技術の革新と低コスト化を阻んでいる。

このような理論的予測と実験的再現が困難な現象への第三のアプローチとして、数値シミュレーションの援用が期待されるが、低重力環境での気液共存流れ場では、流動が重力と界面張力という代表長の異なる現象に支配されるうえ、大きく変形して移動する気液界面を精度良く追跡するという困難が伴うため、未だその数値解析手法は確立されていない。

本論文では、このような技術課題に応えるべく、低重力環境を含めた様々な条件下で、自由表面流の伝熱と流動の特性を適切に評価および予測できる汎用的な手法を提案することを目的とした。提案する手法(CIP-LSM)は、いずれも近年提案された数値解析手法であるCCUP法とLevel Set法の長所を活かす形で組み合わせたもので、界面張力の効果を含むNavier-Stokes方程式を解き、3次元一般座標の固定計算格子上で気液界面をオイラー的に追跡できる。

本論文では、Fig.1にまとめるように、気相と液相の統一解法であるCCUP法のアルゴリズムを伝熱解析に適した形に改良し、さらに、非圧縮流体や理想気体といった仮想流体だけでなく実在流体の解析が容易な表式に整理して提案している。また、界面追跡のために用いられるLevel Set関数の移流だけでなく、その再初期化式も移流方程式に変形し、ここにCIP法を適用する変更を加えている。この改良により、高次精度風上スキームでありながら、同時に2点スキームであるCIP法の長所が活かされ、再初期化に伴う計算量が軽減されるとともに、境界条件の設定が容易にすることができた。

開発した数値解析手法の妥当性を確認するために、①鉛直円管内を浮力の効果で上昇する単一気泡、②落下塔を用いて独自に実施した円筒容器内自由表面流の可視化実験、③液体ロケット推進タンク内の液面挙動、について数値的な模擬を行った。その結果いずれも数値解は実験と良好に一致しており、本解析手法が、軸対称性を仮定した気液共存流れ場において、重力、表面張力そして固体壁面の濡れ性を考慮して、液面挙動をかなり正確に捕捉できることが示された。

上述の落下塔実験では、境界条件が明確に課された容器内の液面挙動を観察することで、数値解析の検証に適したデータを取得し、壁面に導入される濡れ性モデルの妥当性を評価することを目的として実施された。実験では、液体の界面張力 σ と密度 ρ で決まる物性値(σ/ρ)と容器のスケールをパラメータとし、重力が瞬間的に消失した環境における界面形状の動的変化とくに接触点の移動速度に注目し、供試液体として様々な有機溶媒を用いた。その結果、流れ場の空間的および時間的な相似則が、壁面の濡れ進行速さまでを含めて成立

することが実験から確認された。この知見は数値解析手法の構築にフィードバックされ、結果として、接触角のみをパラメータとする濡れ性のモデルを構築し固体壁表面に導入することができ、実験と照らしてその有効性を確認した。例として、内径 150 mm を持つ円筒容器内のエタノール液面を可視化した結果と、本手法を用いてこれを数値的に模擬した結果を比較して Fig.2 に示す。

液体ロケット推進タンク内の液面挙動の解析では、実際に使用される液体ロケット上段推進系(H2A ロケット第2段)のタンク形状に適合した計算格子を生成し、ロケットエンジン始動時における液体推進剤の吸引を模擬した。その結果、微小重力環境に特有な液面落ち込みを計算でも捉えることができた。また、吸引開始から落ち込みが液相を貫通して気相の吸込みに至るまでの時間について、対応する既存の落下塔実験と良好な一致を得ることができた。

以上要するに、本論文はCCUP法と Level Set法に改良を加えたうえで組み合わせ、重力、界面張力、濡れ性および伝熱を考慮して大変形する気液界面を 固定格子上で追跡する数値解析手法を提案し、これが様々な重力環境における自由表面流の解析に適用できることを検証したものである。

・ 基本変数 : $\bar{Q} = (T, p, \bar{u})^T$

・ 移流フェイズ : $\bar{Q}^n \rightarrow \bar{Q}^*$

物理量 $\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + U_c^n \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \xi} + V_c^n \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \eta} + W_c^n \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \zeta} = \bar{0}$

[解法] : 陽解法 ← CIP 法

・ 拡散フェイズ : $\bar{Q}^* \rightarrow \bar{Q}^{**}$

速度 $\int_{\Omega} \rho^* \frac{\bar{u}^{**} - \bar{u}^*}{\Delta t} dV = \int_{\Omega} \nabla : (\mathbf{T}_v + \mathbf{T}_\sigma)^* dV = \int_{\partial\Omega} (\mathbf{T}_v + \mathbf{T}_\sigma)^* : d\bar{S}$

温度 $\frac{T^{**} - T^*}{\Delta t} = \frac{Q_{DIF}^*}{\rho^* C_v^*}$

圧力 $\frac{p^{**} - p^*}{\Delta t} = \frac{\gamma^* - 1}{1 + \rho^* C_p^* \mu_J^*} Q_{DIF}^*$

$\mathbf{T}_v = (\lambda + \lambda_A)(\nabla \cdot \bar{u})\mathbf{I} + (\mu + \mu_A)(\mathbf{D} + \mathbf{D}^T)$

$\mathbf{T}_\sigma = \sigma \delta_s (\mathbf{I} - \bar{n}_s \bar{n}_s)$

$\int_{\Omega} (Q_{DIF}) dV = \int_{\Omega} \{ \nabla : (\mathbf{T}_v : \bar{u}) - \rho^* (\partial \bar{u}^2 / 2 \partial t) - \nabla \cdot \bar{q} \} dV$

$\mu_A = - \frac{3}{4} \rho \left(\frac{\gamma+1}{8} \cdot \delta_{Shock} \right)^2 \min(\nabla \cdot \bar{u}, 0)$

$\lambda_A = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\gamma+1}{8} \cdot \delta_{Shock} \right)^2 \min(\nabla \cdot \bar{u}, 0)$

[解法] : 陽解法

・ 音響フェイズ : $\bar{Q}^{**} \rightarrow \bar{Q}^{n+1}$

圧力 $\int_{\Omega} \frac{p^{n+1} - p^{**}}{\rho^{**} C_s^{**2} \Delta t} dV = - \int_{\partial\Omega} \left(\bar{u}^{**} - \frac{\nabla p^{n+1}}{\rho^{**}} \Delta t + \bar{g} \Delta t \right) \cdot d\bar{S}$

[解法] : 陰解法 ← 非定常反復法 (BiCG-STAB 法)

速度 $\left(\frac{\bar{u}^{n+1} - \bar{u}^{**}}{\Delta t} \right) \cdot d\bar{S} = \left(- \frac{\nabla p^{n+1}}{\rho^{**}} + \bar{g} \right) \cdot d\bar{S}$

温度 $T^{n+1} - T^{**} = \left(\frac{1}{\rho^{**} C_p^{**}} + \mu_J^{**} \right) (p^{n+1} - p^{**})$

記号

- ρ : 密度 (静密度) [kg/m³]
- \bar{u} : 速度 [m/s]
- p : 圧力 (静圧) [Pa]
- e : 内部エネルギー [J/kg]
- $\mathbf{T}_v = [\tau_{ij}] = \lambda(\nabla \cdot \bar{u})\mathbf{I} + \mu(\mathbf{D} + \mathbf{D}^T)$: 粘性応力テンソル [Pa]
- \mathbf{D} : 歪みテンソル [1/s]
- μ : 粘性率 [Pa·s]
- λ : 第2粘性率 [Pa·s]

$\mathbf{T}_\sigma = \sigma \delta_s (\mathbf{I} - \bar{n}_s \bar{n}_s)$: 界面張力テンソル [Pa]
σ	: 界面張力 [N/m]
$\bar{F}_B = \rho \bar{g}$: 体積力 [N/m ³]
\bar{g}	: 重力加速度 [m/s ²]
$\bar{q} = -k \nabla T$: 熱流束 [W/m ²]
$k = \frac{\mu C_p}{Pr}$: 熱伝導係数 [W/(m·K)]
Pr	: Prandtl 数 [-]
C_p	: 定圧比熱 [J/(Kg·K)]
T	: 温度 (静温) [K]

算 出 式

$$C_p(T, p) = C_p(T, p_0) - \int_{p_0}^p T \left\{ \frac{\partial^2}{\partial T^2} \left(\frac{1}{\rho} \right) \right\}_p dp$$

$$C_v(T, p) = C_p(T, p) - T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_p \left\{ \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{\rho} \right) \right\}_p$$

$$\gamma(T, p) = \frac{C_p(T, p)}{C_v(T, p)}$$

$$\mu_I = - \frac{\rho^2 C_p}{\left(\frac{\partial(\rho T)}{\partial T} \right)_p}$$

Fig.1: 熱輸送解析用 CCUP 法のアルゴリズム

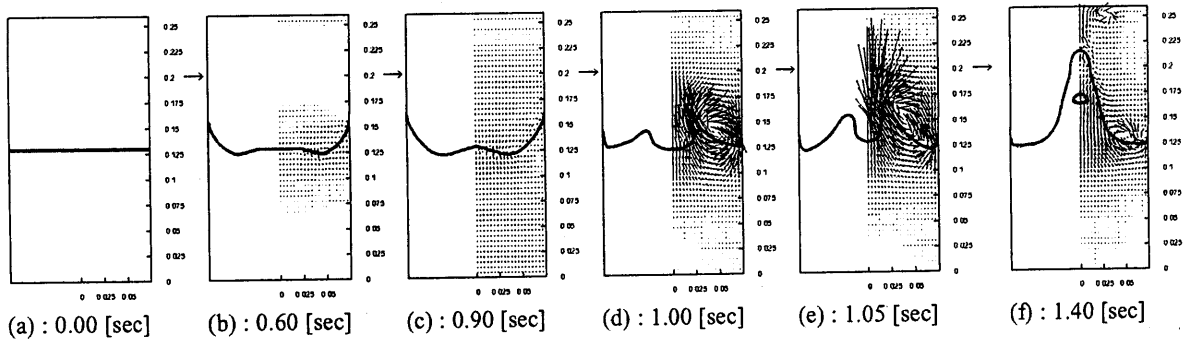
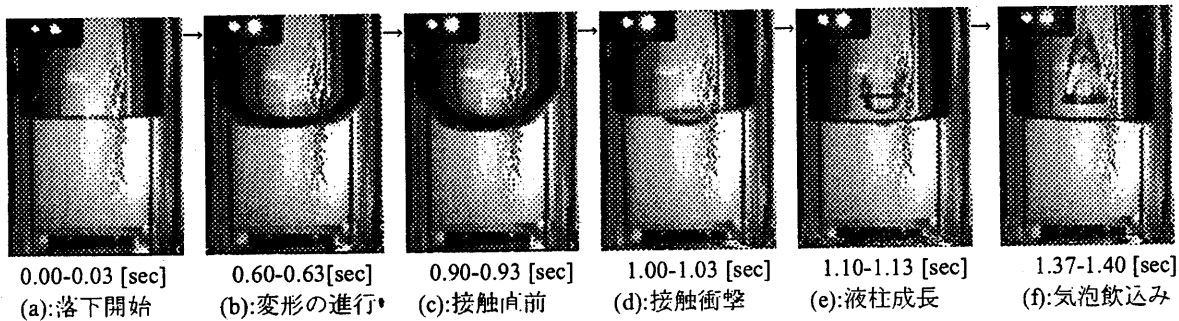


Fig.2: 落下塔を用いた液面可視化実験結果とその数値的模擬の比較