
3次元核熱結合動特性解析コード (TRAC系コード) 及び統計的安全評価手法 について

原子力エネルギー協議会
燃料技術WG
2023年11月30日

1. はじめに

- BWR事業者・ATENAは、新型燃料であるBWR 10x10燃料の導入に取り組んでいくことを第16回CNO意見交換会（22/12/12）にて表明した。
- 産業界では、10x10燃料の安全評価などで新たに必要となる3次元核熱結合動特性解析コード（以下、TRAC系コードとする）及び統計的安全評価手法の開発をこれまで進めてきた。
- 本説明では、TRAC系コード及び統計的安全評価手法に係る技術の概要を紹介する。

2. 説明内容

- 本説明では、TRAC系コードに共通的な基本事項及び統計的安全評価手法の適用事例を紹介する。
- 本日は、下記のトピックについて添付資料に基づき紹介する。
 - ✓ TRAC 系コードの熱水力保存式

(添付資料) TRAC 系コードの熱水力保存式

添付資料

TRAC系コードの熱水力保存式

TRAC系コード及び統計的安全評価手法に係る共通事項のご説明(第1回 資料)

原子燃料工業株式会社
株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
東芝エネルギーシステムズ株式会社
日立GEニュークリア・エナジー 株式会社
東京電力ホールディングス株式会社

2023/11/30

内容

- ▶ この資料で用いる記号表記
- ▶ 現行の解析コードの熱水力保存式
- ▶ TRAC系コードに係る背景, 評価手法など
- ▶ 流れ場の2相2流体モデルによる記述
- ▶ TRAC系コードの熱水力保存式
 - ▶ 保存式の適用性
 - ▶ 保存式の離散化
 - ▶ 保存式の数値解法

この資料における記号表記(1/2)

物理量

V	:	速度 [m/s]
P	:	圧力 [Pa]
T	:	温度 [K]
α	:	相の存在割合
e	:	単位体積当たりの内部エネルギー [J/kg]
h	:	単位体積当たりのエンタルピ [J/kg], 又は熱伝達係数[W/m ² -K]
ρ	:	密度 [kg/m ³]
Γ	:	単位体積当たりの相変化率 [kg/m ³ /s]
f	:	各相に作用する単位体積当たりの力 [N/m ³]
q'''	:	各相に流入する単位体積当たりの熱量 [W/m ³]
q''	:	熱流束 [W/m ²]
τ	:	せん断応力テンソル [Pa]
M	:	単位体積当たりの気液間の運動量移動 [N/m ³]
E	:	単位体積当たりの気液間のエネルギー移動 [W/m ³]
W	:	単位体積当たりの仕事率[W/m ³]
A	:	流路断面積 [m ²]

この資料における記号表記(2/2)

下添字(物理量に対する付加情報)

- k : 相(流体場)を表すインデックス
($k = g$: 気相, $k = l$: 液相)
- i : 気液界面に関する項(気液界面せん断力など)
- w : 壁面に関する項(壁面熱伝達など)

上添字

- T : 乱流項

※ 気相とは蒸気と非凝縮性ガスとの混合ガスを表す。

※ 上記の添字は重複して使用されることがある。

例: q'''_{ik} → 気液界面(i)を通じて k 相に流入する単位体積当たりの熱量

AOOなどに対するBWR安全評価手法(現行)

■ 現行の評価手法

保守的とされる入力
パラメータの設定

入力パラメータ

- ・プラント・機器データ
- ・1点近似炉心用パラメータ
ボイド・ドップラ・スクラム反応度,
ギャップコンダクタンスなど

初期運転条件

過渡の事象シナリオ条件

1点近似炉心動特性コード(REDYなど)

炉出力, 炉圧, 炉心流量,
入口エンタルピー変化など

中性子束, 表面熱流束など

- ・チャンネル特性データ
- ・燃料棒特性データ
- ・初期運転条件

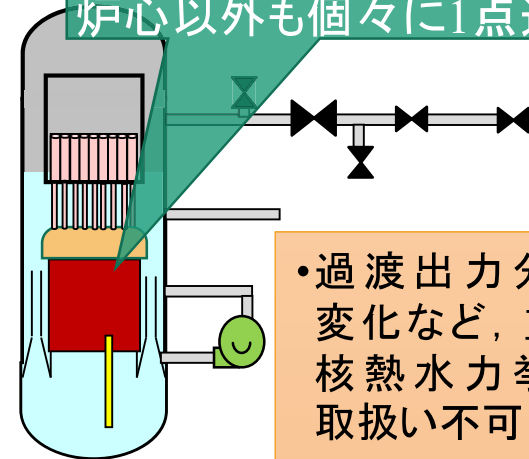
(軸方向1次元)単チャンネル熱水力評価コード

MCPRの変化

1点近似炉心

出力分布固定, 炉心境界条件に従うボイドマップ, 簡易な1点近似反応度

炉心以外も個々に1点近似



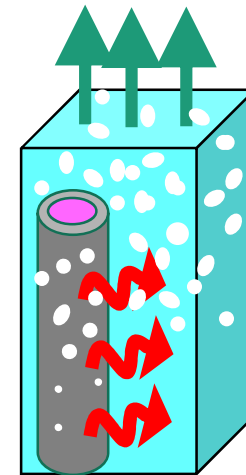
REDYなど

- ・過渡出力分布の変化など, 重要な核熱水力挙動の取扱い不可

- ・評価値の不確かさ, 安全余裕の説明に苦慮

- ・過度?に保守的な入力値の設定

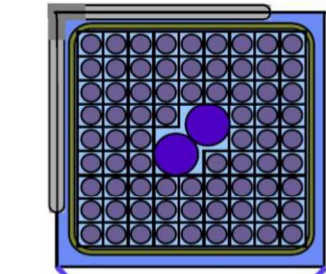
- ・計算機能力に大きな制約があった時代に開発された手法



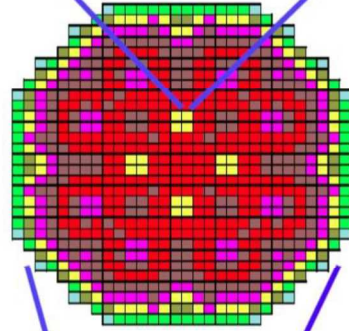
SCAT ver.3など(5保存式)

AOOなどに対するBWR安全評価手法(更新後)

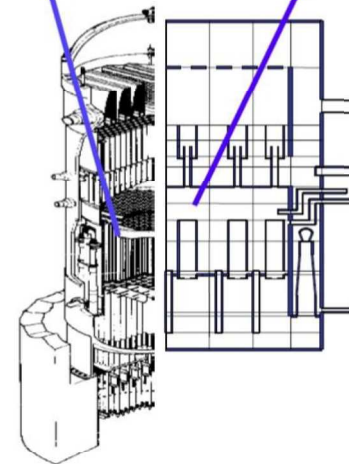
更新後の安全解析コード



2次元集合体
核計算コード



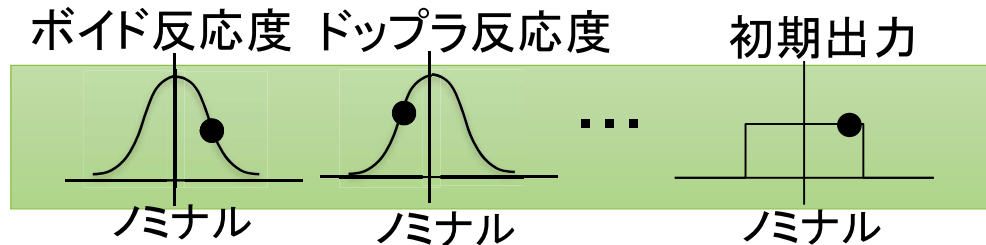
3次元炉心計算
コード



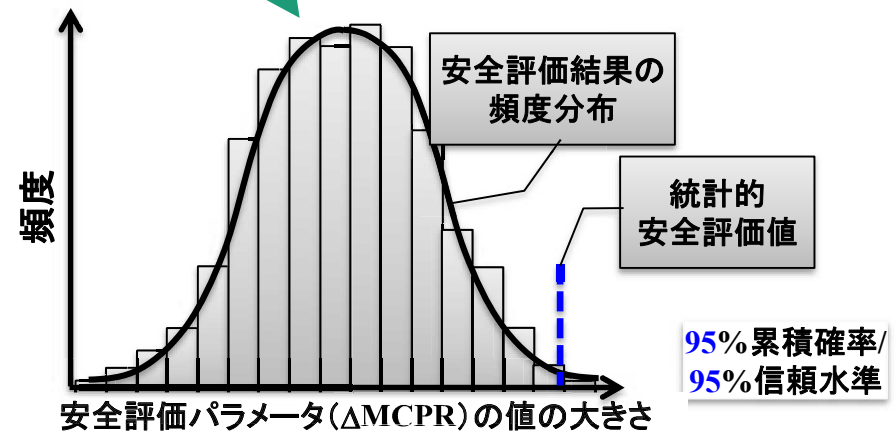
TRAC系コード
(最適評価コード)
3次元核熱結合動
特性など

統計的安全評価手法の導入

様々な不確かさ分布をもつ入力の不確かさをランダムに反映した多数回の計算を実施し、結果を統計的に整理して合理的で厳しい側の安全評価値を算出



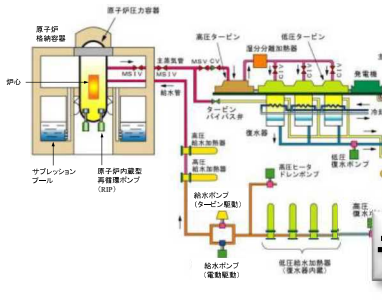
多数回の解析実行



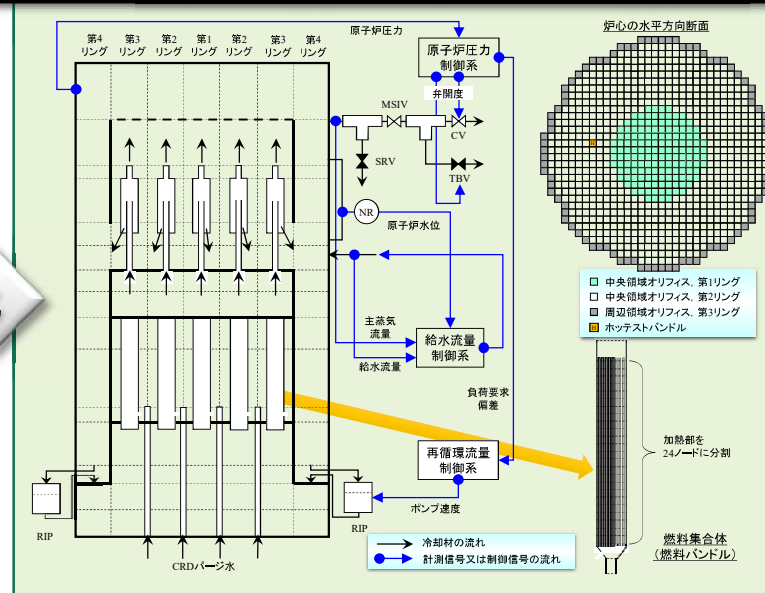
TRAC系コードによる計算の流れ

種々のコンポーネント、配管などのモデル要素を組み合わせて
原子炉施設の計算用モデルを構成

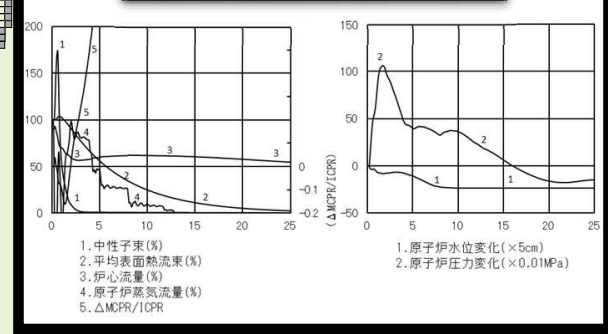
任意の原子炉施設



モデル化



主要な状態量の
計算結果のイメージ



入力データ

物理領域、配管、機器などの形状・接続・構成、燃料、構造材などの材料組成及び熱出力、圧力、流量などの系の状態

ポンプの停止、配管の破断などの事象進展を支配する解析条件

核・燃料材料に関する上流側解析コードの計算値など

入力

TRAC系コード
(最適評価コード)

核・熱・流れ・材料などの挙動・変動の計算

出力

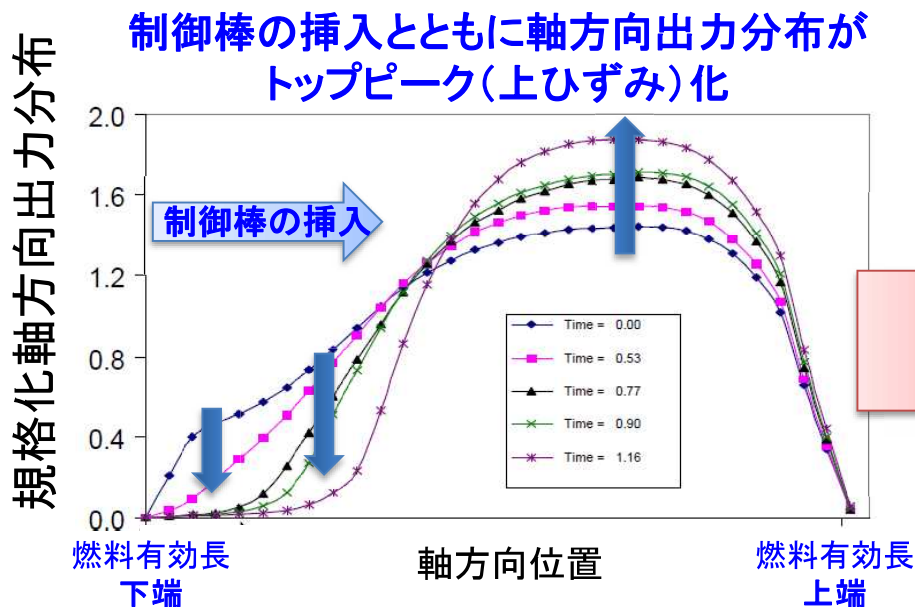
計算結果

事象進展、現象の変化、及び燃料被覆管温度などの重要なパラメータの時間変化

TRAC系コードの導入が必須となる理由

10x10燃料でTVAPSの影響が顕在化することの説明(イメージ):

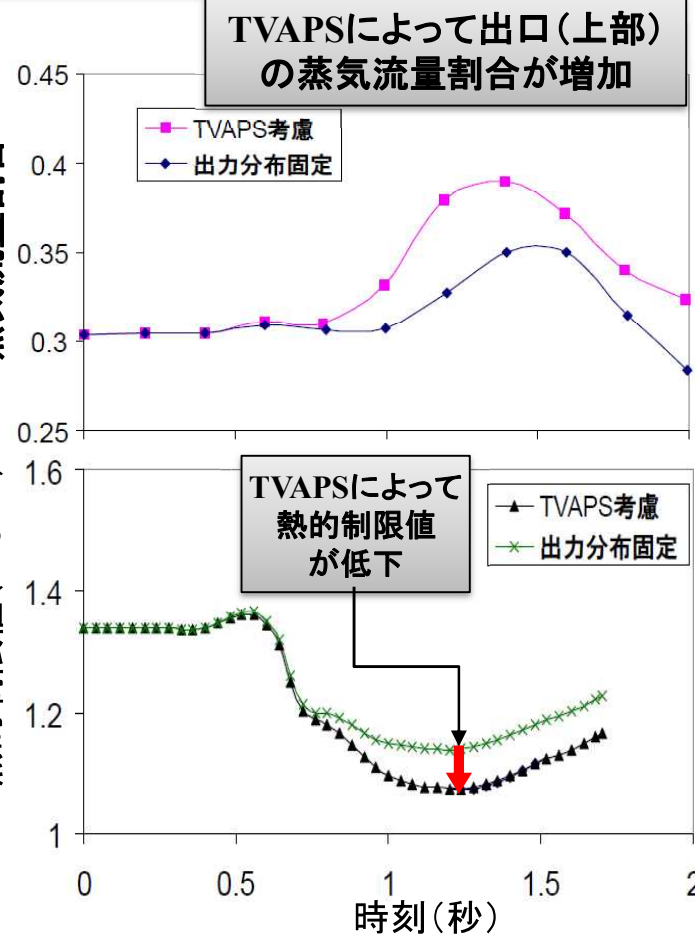
TVAPS考慮 vs 軸方向出力分布固定 の計算結果の比較



燃料集合体出口の
冷却材中の

蒸気流量割合

熱的制限値 (MCPR)



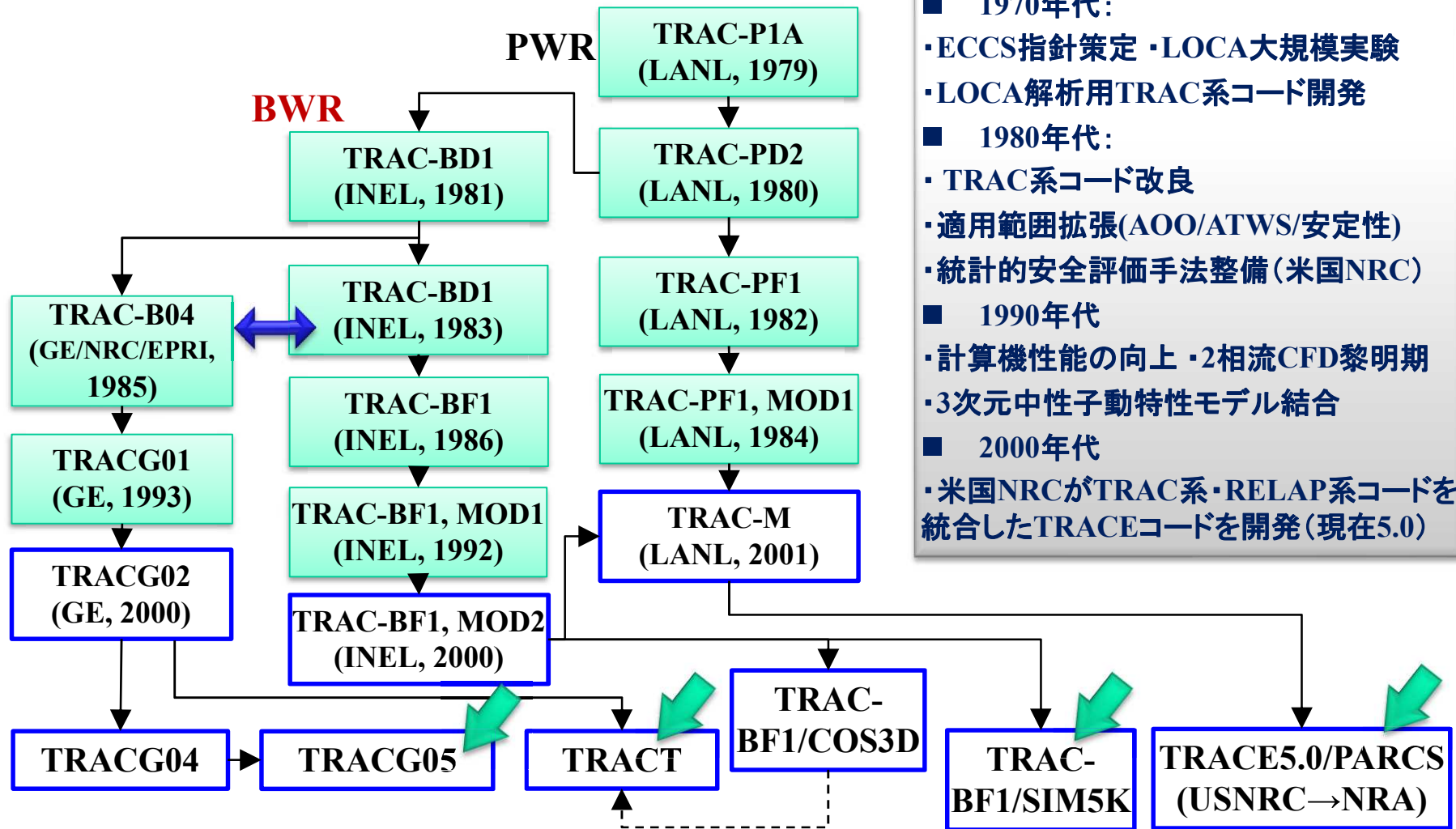
TVAPSによる熱的制限値の低下量

- 9x9燃料までは従来コードのスクラム速度の保守的設定によって相殺可能(⇒ 熱的制限値の保守的評価可能)
- 10x10燃料では細径のため上ひずみ化の影響が大きく、スクラム速度設定では相殺不可

⇒ TVAPSの影響が顕在化 ⇒ TRAC系コード導入が必須

TRAC系コードの系譜, 国内BWR用の今後の主要コード

▶BWRに適用するTRAC系コードの系譜



青枠部は3次元中性子動特性解析モデルを内蔵

緑矢印は国内BWRに適用される今後の主要なTRAC系コード

2相流熱水力保存式の数と模擬性能との関係

TRAC系コード
TRACE5.0

6保存式

界面せん断力の評価にドリフトフラックスモデルを使用 ← 速い過渡にも5保存式より適合。逆流計算も可能

過渡時の単チャンネル熱水力評価
周波数領域核熱水力安定性解析
スクラムカーブ評価

液相及び気相の質量保存 → 圧力及びボイド率
液相及び気相のエネルギー保存
→ 液相及び気相のエンタルピ(又は温度)
液相及び気相の運動量保存 → 液相及び気相の流速

定常熱水力解析
3次元炉心核特性解析
LOCA解析

5保存式

気相流速をボイド相関式を用いて評価
← 速い過渡及び逆流を含む2相流には不向き

液相及び気相の質量保存 → 液相流量及びボイド率(気相流量)
液相及び気相のエネルギー保存 → 液相及び気相のエンタルピ(又は温度)
混合流の運動量保存 → 混合流の圧力
気相・液相間の流速差を直接に解けない → ボイド相関式によって流速差を評価

3保存式

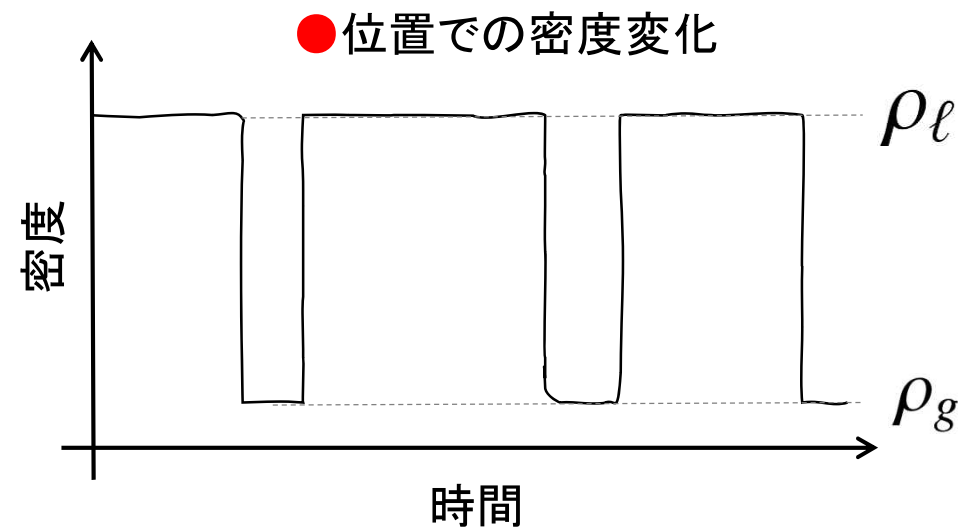
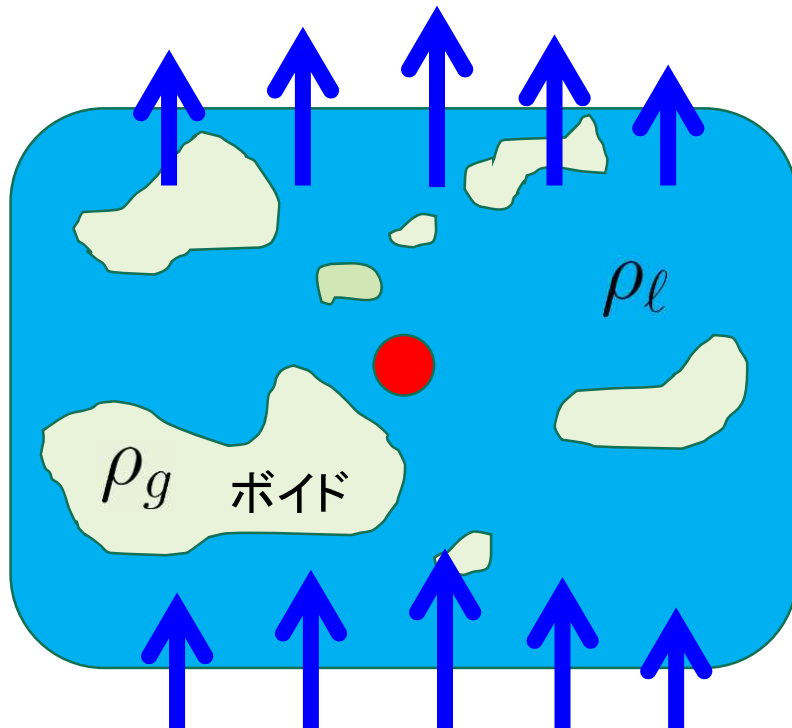
ボイド率の評価にボイド相関式を直接使用 ← 定常解析用。過渡解析には不向き

混合流*の質量保存 → 混合流の流量
混合流のエネルギー保存 → 混合流のエンタルピ(又は温度)
飽和状態を仮定(サブクール状態, 過熱蒸気などを直接に解けない)
混合流の運動量保存

* 混合流とは、気相及び液相が一体となつて流れることを想定した流れ(均質流ともいう)

流れ場の2相2流体モデルによる記述(1/10)

- ▶ 気相と液相との混合状態を記述
 - ▶ 空間の各点はいずれかの相で占められる
 - ▶ 相が切り替わる境界面で物理量が不連続に変化
- ▶ 2相2流体モデルは、気相と液相とを別々の流体として取り扱う
 - ▶ TRAC系コードの基礎式は気相及び液相の6保存式(質量・運動量・エネルギー)



流れ場の2相2流体モデルによる記述(2/10)

▶ 保存式の構成要素(一般論)

- ▶ **時間微分項** : 各空間点での ϕ の時間変化
- ▶ **移流項** : 流体に輸送されることで生じる ϕ の変化
- ▶ **ソース項** : 各空間点での ϕ の発生, 消滅, 相互作用などによる ϕ の変化

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \vec{V}) = S_{\phi}$$

時間微分項

移流項

ソース項

このような形の式を
保存形という

- ▶ 格子サイズより小さい空間スケールの現象は**ソース項にモデル化**する形で反映
 - ▶ 一部の現象・機器特性*は, **ソース項で考慮するのではなく**, 運動量保存式を修正するなどしてモデル化

* 臨界流, 気液対向流限界(CCFL), 成層流, 分岐管などの流れ, ジェットポンプ, セパレータなどの機器

流れ場の2相2流体モデルによる記述(3/10)

▶ 気相及び液相の6保存式による記述

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \vec{V}) = S_{\phi}$$

- ▶ 質量保存式 : $\phi = \rho$ (単位体積当たりの質量)
- ▶ 運動量保存式 : $\phi = \rho V$ (単位体積当たりの運動量)
- ▶ エネルギー保存式 : $\phi = \rho(e + V^2/2)$ (単位体積当たりのエネルギー)

▶ 2相2流体モデルは国内外の多数の研究者の長年にわたる研究の成果

Ref. : M.Ishii & T.Hibiki, Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow, Springer (2010).

▶ 基礎式の模擬レベル

- ▶ (1) 瞬時・局所場の式
- ▶ (2) 時間平均の式*
- ▶ (3) TRAC系コードで使用する式



* 例えば, RANSモデル(最も一般的なCFDモデル)

流れ場の2相2流体モデルによる記述(4/10)

- ▶ (1) **瞬時・局所場の式(厳密な式)**
 - ▶ **境界面(気液界面)によって相(気相又は液相)が切り替わる**
 - ▶ 空間の各点の状態は, 気相, 液相又は(無限小厚さの)気液界面のいずれかとなる
 - ▶ 空間の各点ではいずれかの相だけが存在する。
 - 当該位置の状態は単相の保存式で記述される
 - ▶ **気液界面の挙動も模擬する必要あり**
 - ▶ 気液界面の幾何形状の変化及び生成・消滅をモデル化
 - ▶ 気液界面上で成立する保存則の定式化
 - ▶ **技術的課題 及び 計算コストに課題**
 - ▶ 多数のボイドの微細な気液界面構造及び乱流構造を正確に模擬する必要あり
 - ▶ 気液界面との相互作用を通じて各流体場(各相)内で誘起される素過程の生成／消滅に係るモデル化が困難
 - ▶ 多大なメモリ及び計算時間が必要(**事実上不可能**)

流れ場の2相2流体モデルによる記述(5/10)

▶ (2) 時間平均の式

- ▶ 平均化の方法として、このほかに空間平均又は統計平均とする場合もある
 - ▶ TRAC系コードでは時間平均の式をベースとしている
- ▶ 平均化によって、気相の存在割合(ボイド率)で2相状態を記述できる
 - ▶ 保存式上、気液界面を直接に取り扱う必要がなくなる
 - ▶ 気液界面の幾何形状(界面積濃度)などの情報は構成式で表現
 - ▶ 気相・液相間の切替えによる不連続な挙動は模擬しない
- ▶ ミクロな乱流構造を平均化(レイノルズ平均*)
 - ▶ ミクロな乱流構造は陽に扱わず、平均的な挙動を記述する
 - ▶ ミクロな乱流構造の効果はレイノルズ応力**などの形で表現

* レイノルズ平均とは時間平均処理の方法で、非定常の流れ場に対して、流速を時間平均量と変動量とに分け、平均化操作を施して物理量の時間平均を求める方法

** 乱流状態においては小さいスケールの渦が多く存在する。これらの渦が流れに沿う面を通過する際に運動量を輸送する。レイノルズ応力とは、単位時間・単位面積当たりの運動量輸送量のことをいう。運動量が輸送されると、この変化量に応じたせん断応力が面に対して作用する。この作用は、流れに対してあたかも流体の粘性が大きくなったかのような影響を及ぼす。

流れ場の2相2流体モデルによる記述(6/10)

- ▶ (2) 時間平均の式(単位体積当たり): **質量保存式(保存形)**

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{V}_k) = \Gamma_k \quad (1)$$

相変化

- ▶ 質量ソース項に含まれる現象

- ▶ 気相・液相間の相変化 : Γ

- 気相と液相の存在割合 α が満たす関係式(拘束条件)

$$\alpha_g + \alpha_l = 1$$

流れ場の2相2流体モデルによる記述(7/10)

- ▶ (2) 時間平均の式(単位体積当たり) : 運動量保存式(保存形)

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k \vec{V}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{V}_k \vec{V}_k)$$

$$= \underbrace{-\nabla(\alpha_k P_k)}_{\text{圧力勾配}} + \nabla \cdot \left\{ \alpha_k (\bar{\vec{\tau}}_k + \bar{\vec{\tau}}_k^T) \right\} + \underbrace{\alpha_k \rho_k \vec{g}}_{\text{重力}} + \underbrace{\vec{M}_k}_{\text{気液界面での運動量移動}} \quad (2)$$

- ▶ ソース項(流体に働く力)に含まれる現象(単位体積当たり)

- ▶ 圧力勾配, 粘性・壁面摩擦, 重力
- ▶ 気液界面での運動量移動

- 界面での運動量移動の内訳

$$\vec{M}_k = \underbrace{\Gamma_k \vec{V}_{ik}}_{\text{相変化}} + \underbrace{P_{ik} \nabla \alpha_k}_{\text{体積変化による仕事}} + \underbrace{\vec{M}_{ik}}_{\text{界面の運動}} - \underbrace{\nabla \alpha_k \cdot \bar{\vec{\tau}}_{ik}}_{\text{界面せん断力}}$$

流れ場の2相2流体モデルによる記述(8/10)

- ▶ (2) 時間平均の式(単位体積当たり) : 運動量保存式(非保存形)
 - ▶ 等価変形により式を単純化できる
 - ▶ $\alpha\rho$ の微分を展開
 - ▶ 質量保存式を代入して変形

$$\begin{aligned} & \alpha_k \rho_k \left\{ \frac{\partial \vec{V}_k}{\partial t} + (\vec{V}_k \cdot \nabla) \vec{V}_k \right\} \\ & = -\alpha_k \nabla P_k + \alpha_k \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}_k + \bar{\bar{\tau}}_k^T) + \alpha_k \rho_k \vec{g} + \vec{M}_{ik} \\ & \quad + \Gamma_k (\vec{V}_{ik} - \vec{V}_k) + (P_{ik} - P_k) \nabla \alpha_k + \nabla \alpha_k \cdot (\bar{\bar{\tau}}_k + \bar{\bar{\tau}}_k^T - \bar{\bar{\tau}}_{ik}) \end{aligned} \quad (2)'$$

- 保存形(2)と非保存形(2)'は等価(置換え可能)
- 保存形とは、対象とする物理量に関して、時間微分と発散型で表示される移流項をもつ形式をいう。保存形では、差分計算においても計算セル間での対象物理量の移動に関する保存性を確保できる。

流れ場の2相2流体モデルによる記述(9/10)

- ▶ (2) 時間平均の式(単位体積当たり) : エネルギー保存式(保存形*)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} V_k^2 \right) \right\} + \nabla \cdot \left\{ \alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} V_k^2 \right) \vec{V}_k \right\} \quad \begin{array}{l} * \text{ 内部エネルギー+運動エネルギー} \\ \text{に関する保存形} \end{array} \quad (3)$$

$$= -\nabla \cdot \left\{ \alpha_k (\vec{q}''_k + \vec{q}''_k^T) \right\} - \nabla \cdot (\alpha_k P_k \vec{V}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{\tau}_k \cdot \vec{V}_k)$$

熱伝導・壁面熱伝達
圧力勾配による
せん断応力による

$$+ \alpha_k \rho_k \vec{g} \cdot \vec{V}_k + E_k$$

重力による
気液界面での

仕事率
エネルギー移動

- ▶ ソース項(流体に働く仕事率, 熱移動)に含まれる現象(単位体積当たり)
 - ▶ 熱伝導・壁面熱伝達, 圧力勾配による仕事, せん断応力による仕事, 重力による仕事
 - ▶ 気液界面でのエネルギー移動

$$E_k = \Gamma_k \left(h_{ik} + \vec{V}_{ik} \cdot \vec{V}_k - \frac{1}{2} V_k^2 \right) + q_{ik}''' - P_{ik} \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \vec{M}_{ik} \cdot \vec{V}_{ik} - \nabla \alpha_k \cdot \bar{\tau}_{ik} \cdot \vec{V}_{ik} + W_{ik}^T$$

相変化による熱移動
気液界面を
通じて流入
する熱量

エンタルピ
界面形成
流体移動
体積変化
界面の
界面せん断力
そのほか

輸送
に係る運動量
による
による
による
の項

変化に要する
運動
仕事率
仕事率
仕事率

エネルギー
エネルギー
仕事率
仕事率

流れ場の2相2流体モデルによる記述(10/10)

- ▶ (2) 時間平均の式: エネルギー保存式 (非保存形)
 - ▶ (3)式左辺の運動エネルギーの微分演算を展開
 - ▶ 質量保存式(1)と運動量保存式(2)'を代入し, 内部エネルギー e に関する“保存形”に変形

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\alpha_k \rho_k e_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k e_k \vec{V}_k) \\
 &= -\nabla \cdot \left\{ \alpha_k (\vec{q}''_k + \vec{q}''_k^T) \right\} - P_k \nabla \cdot (\alpha_k \vec{V}_k) - P_{ik} \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} \\
 & \quad + q_{ik}''' + \Gamma_k h_{ik} \\
 & \quad + \alpha_k \bar{\tau}_k : \nabla \vec{V}_k + W_{ik}^T - \vec{V}_k \cdot \nabla \cdot (\alpha_k \bar{\tau}_k^T) \\
 & \quad + (\vec{M}_{ik} - \nabla \alpha_k \cdot \bar{\tau}_{ik}) \cdot (\vec{V}_{ik} - \vec{V}_k) - (P_{ik} - P_k) \nabla \alpha_k \cdot \vec{V}_k
 \end{aligned} \tag{3)'$$

“:” は2重内積(2階のテンソル間の内積)

TRAC系コードの保存式(1/6)

- ▶ TRAC系コードでは“(2)時間平均の式”に対して更に次を仮定
 - ▶ **共通事項**
 - ▶ **1圧力モデル(TRACE5.0コードも同じ)**
 - ▶ 気相, 液相及び気液界面の圧力が全て等しい
(気液界面と流体バルクとで状態量(圧力など)及び流速が等しい)
 - ▶ **流路断面内で保存式を平均化(空間平均)(TRACE5.0コードも同じ)**
 - ▶ 流路断面内のボイド分布の情報は界面せん断力の構成式(ドリフトフラックスパラメータ)に含まれる
 - ▶ **運動量保存式**
 - ▶ **気液界面の運動量移行の中で相変化成分を無視**
 - ▶ 界面せん断力と比較して寄与が格段に小さいため
 - ▶ **せん断テンソルの成分に対し, 壁面せん断力及び界面せん断力以外を無視**
 - ▶ 乱流成分を含めて流体内部せん断力による影響が, 壁面上(近傍)及び気液界面上のせん断力の影響と比べて格段に小さいため
 - ▶ **壁面せん断力(壁面摩擦)による圧力損失及び界面せん断力が乱流領域を含む流速領域で適切にモデル化され, 試験データに照らして必要な不確かさ範囲内で妥当性確認がなされれば実用上十分**

TRAC系コードの保存式(2/6)

- ▶ TRAC系コードでは(2)時間平均の式に対して更に次を仮定(続き)
 - ▶ **エネルギー保存式**
 - ▶ 壁面熱伝達及び界面熱伝達を除く**流体内の熱伝導効果**を無視
 - ▶ 壁面及び気液界面で生じる熱伝達に比べて影響が格段に小さいため
 - ▶ 全ての**流体粘性(せん断応力カテンソル)の内部エネルギーへの影響**を無視
 - ▶ 粘性散逸による流体の温度変化が格段に小さいため
 - ▶ 相変化による気液界面上の熱移動において**運動エネルギーの寄与**を無視
 - ▶ 運動エネルギーが有意となる条件では、流体速度と比較して界面との相対速度が格段に小さくなる。また、別途モデル化する臨界流を除けば、内部エネルギーに対し運動エネルギー自体が小さい
 - ▶ **乱流成分(揺らぎ成分)を陽に取り扱わない**
 - ▶ (妥当性確認された)壁面熱伝達の構成式にその効果が陰に含まれる
 - ▶ 流体内では内部エネルギーに対し揺らぎ成分による運動エネルギーは格段に小さい
 - ▶ **重力による仕事率**を無視(TRACG及びTRACT)
 - ▶ 内部エネルギー及び運動エネルギーと比較して重力による仕事が格段に小さいため

TRAC系コードの保存式(3/6)

▶ 質量保存式

- ▶ TRACG, TRACT, TRAC-BF1, TRACE5.0で共通
- ▶ 時間平均の式の質量保存式(1)と同一

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{V}_k) = \Gamma_k \quad (4)$$

TRAC系コードの保存式(4/6)

▶ 運動量保存式(非保存形)

- ▶ TRACG, TRACT, TRAC-BF1で共通(TRACE5.0は保存形)

$$\alpha_k \rho_k \left\{ \frac{\partial \vec{V}_k}{\partial t} + (\vec{V}_k \cdot \nabla) \vec{V}_k \right\} = -\alpha_k \nabla P - \vec{f}_{wk} + \alpha_k \rho_k \vec{g} - \vec{f}_{ik} \quad (5)$$

流路断面積内の空間平均によって,

$$\alpha_k \nabla \cdot (\bar{\tau}_k + \bar{\tau}_k^T) + \vec{M}_{ik} \rightarrow -\vec{f}_{wk} - \vec{f}_{ik}$$

- ▶ 時間平均の式:

$$\ast \vec{f}_{ig} = -\vec{f}_{il} = \vec{f}_{lg} + \vec{f}_{VM}$$

\vec{f}_{lg} は界面せん断力, \vec{f}_{VM} は仮想質量項

$$\begin{aligned} & \alpha_k \rho_k \left\{ \frac{\partial \vec{V}_k}{\partial t} + (\vec{V}_k \cdot \nabla) \vec{V}_k \right\} \\ & = -\alpha_k \nabla P_k + \alpha_k \nabla \cdot (\bar{\tau}_k + \bar{\tau}_k^T) + \alpha_k \rho_k \vec{g} + \vec{M}_{ik} \end{aligned} \quad (2)'$$

$$+ \Gamma_k (\vec{V}_{ik} - \vec{V}_k) + (P_{ik} - P_k) \nabla \alpha_k + \nabla \alpha_k \cdot (\bar{\tau}_k + \bar{\tau}_k^T - \bar{\tau}_{ik})$$

仮定に従い
無視

TRAC系コードの保存式(5/6)

▶ エネルギー保存式

▶ TRAC-BF1 (非保存形):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\alpha_k \rho_k e_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k e_k \vec{V}_k) \\ & = q_{wk}''' - P \nabla \cdot (\alpha_k \vec{V}_k) - P \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + q_{ik}''' + \Gamma_k h_k \end{aligned} \quad (6)$$

▶ 時間平均の式(非保存形)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\alpha_k \rho_k e_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k e_k \vec{V}_k) \\ & = -\nabla \cdot \{ \alpha_k (\vec{q}''_k + \vec{q}''_k^T) \} - P_k \nabla \cdot (\alpha_k \vec{V}_k) - P_{ik} \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + q_{ik}''' + \Gamma_k h_{ik} \end{aligned} \quad (3)'$$

$$+ \alpha_k \bar{\tau}_k : \nabla \vec{V}_k + W_{ik}^T - \vec{V}_k \cdot \nabla \cdot (\alpha_k \bar{\tau}_k^T)$$

$$+ (\vec{M}_{ik} - \nabla \alpha_k \cdot \bar{\tau}_{ik}) \cdot (\vec{V}_{ik} - \vec{V}_k) - (P_{ik} - P_k) \nabla \alpha_k \cdot \vec{V}_k$$

仮定に従い
無視

TRAC系コードの保存式(6/6)

▶ エネルギー保存式

▶ TRACG及びTRACT(保存形)*

▶ 右辺はTRAC-BF1と $P\nabla \cdot (\alpha V) \Leftrightarrow \nabla \cdot (\alpha P V)$ だけが異なる

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} V_k^2 \right) \right\} + \nabla \cdot \left\{ \alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} V_k^2 \right) \vec{V}_k \right\} \\ = q_{wk}''' - \nabla \cdot (\alpha_k P \vec{V}_k) - P \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + q_{ik}''' + \Gamma_k h_k \end{aligned} \quad (7)$$

▶ 時間平均の式(保存形)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} V_k^2 \right) \right\} + \nabla \cdot \left\{ \alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} V_k^2 \right) \vec{V}_k \right\} \\ = -\nabla \cdot \left\{ \alpha_k (\vec{q}''_k + \vec{q}''^T_k) \right\} - \nabla \cdot (\alpha_k P_k \vec{V}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{\tau}_k \cdot \vec{V}_k) + \alpha_k \rho_k \vec{g} \cdot \vec{V}_k \\ + \Gamma_k \left(h_{ik} + \vec{V}_{ik} \cdot \vec{V}_k - \frac{1}{2} V_k^2 \right) + q_{ik}''' - P_{ik} \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \vec{M}_{ik} \cdot \vec{V}_{ik} - \nabla \alpha_k \cdot \bar{\tau}_{ik} \cdot \vec{V}_{ik} + W_{ik}^T \end{aligned} \quad (3)$$

仮定に従い
無視

* TRACES.0では整理の仕方が異なり, 移流項にソース項中の圧力勾配による仕事率の項が含まれ非保存形表現となったが, 式としては同じ

保存式の適用性(1/3)

- ▶ TRAC系コードの保存式は、一般形((2)時間平均の式)から前述の仮定(スライド20及び21)に基づき簡略化したものであることから、下記の現象を陽に解くことはできない。

【TRAC系コードの保存式がそのまま適用できない現象例】

- ▶ 静止流体内の熱伝導(熱伝導効果の無視)
- ▶ 流路断面内での複雑な流れ(流路断面内での平均化)
- ▶ 格子サイズより空間スケールが小さく、かつ、構成式で反映できない現象
 - ▶ 流路断面内の複雑な流れ(流路断面内での平均化)
 - ▶ 剥離渦構造(流路断面内での平均化, Reynolds応力の無視)
- ▶ Benard対流(粘性効果の無視)
- ▶ 気相・液相の圧力が有意に異なる状態(1圧力モデルの採用)

()内は適用が
できない理由

※構成式の適用対象外の現象にも保存式は適用できない

保存式の適用性(2/3)

- ▶ 前述の適用不可とする現象を踏まえ、TRAC系コードの保存式がAOO, LOCA, RIAなどに適用できることを示すには、次の点を確認する必要がある。
 - 1) 安全評価パラメータ(例えば, AOO: Δ MCPR, LOCA:PCT, RIA:燃料エンタルピ)に照らして、重要な現象の模擬に必要な気液状態(サブクール, 気液平衡, 過熱蒸気)をTRAC系コードの保存式が十分に取り扱えること。これには、適切な構成方程式の採用による validation を通じた実証を含む。
 - 2) スライド20及び21の仮定に基づき無視した保存式のソース項が、評価対象事象において有意とならず、評価対象パラメータに対して影響を与えないこと。

保存式の適用性(3/3)

補足) 特徴的な現象に関しては、保存式のソース項に適切な構成式を反映、又は保存式の補正を行う(次の青字部分)。構成式の採用に当たっては validationを通じて適用性を実証する。

<LOCA事象における主要な現象>

臨界流, CCFL (気液対向流制限) 及びそのブレークダウン,
蒸気凝縮, フラッシング現象(蒸発),
大幅な圧力変動(大気圧~7MPa),
沸騰遷移, 分散流膜沸騰・膜沸騰, 被覆管温度上昇, クエンチ, 2相水位
など

<RIA事象における主要な現象>

ボイド・ドップラ反応度フィードバック, ボイド挙動, 沸騰遷移, 膜沸騰,
被覆管温度の上昇, 急峻な炉出力上昇, 即発減速材加熱, 逆流など

保存式の離散化(1/11)

▶ 空間に関する離散化

▶ 空間の座標系

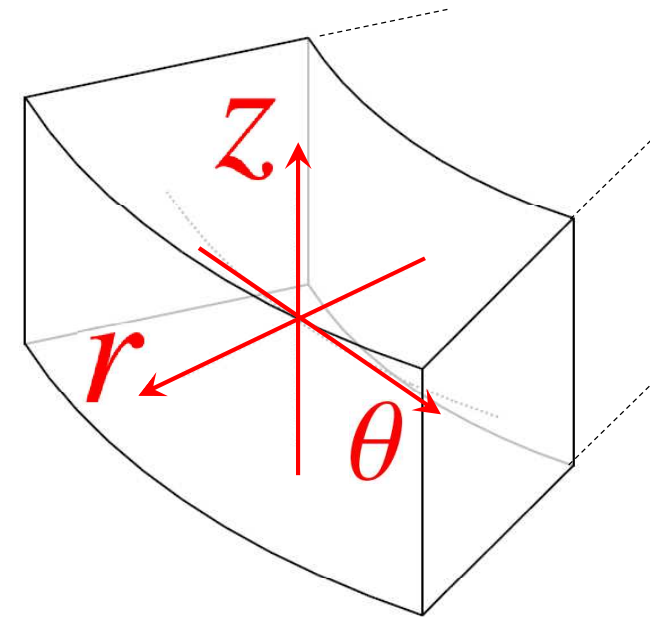
▶ 3次元は円柱座標 (r, θ, z) *

▶ 1次元は1方向の座標 (x)

▶ 状態量を離散点上でのみ定義

▶ 3次元のインデックス (R, Θ, Z)

▶ 1次元のインデックス (j)

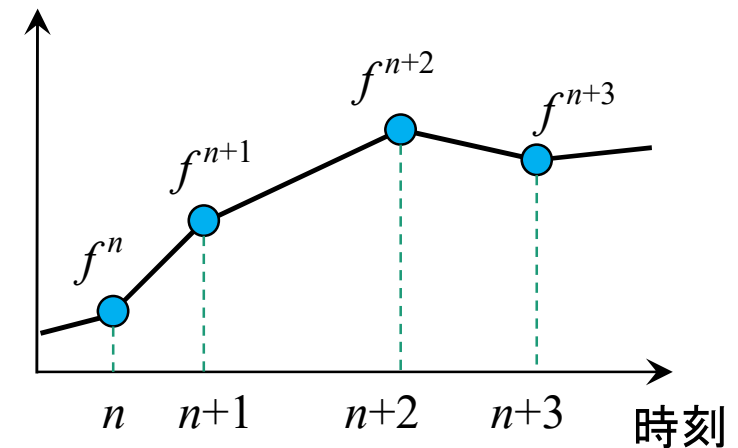


▶ 時間に関する離散化

▶ 状態量を離散時間でのみ定義

▶ 時間のインデックス (n)

▶ 新時刻 $(n+1)$ の値を旧時刻 (n) の値から算出



* TRACE5.0では3次元デカルト座標系も組める

保存式の離散化(2/11)

▶ 空間の離散化

▶ スタガード格子の採用

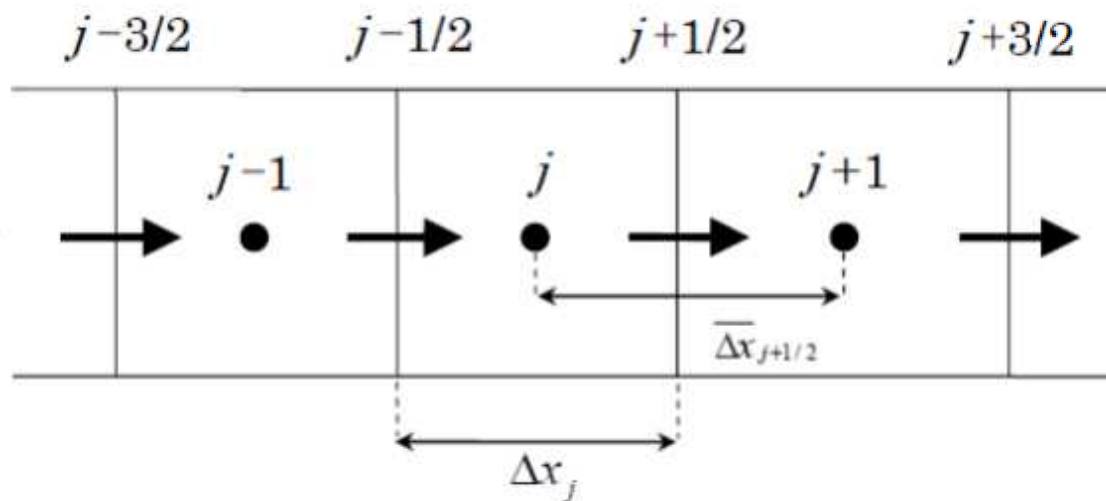
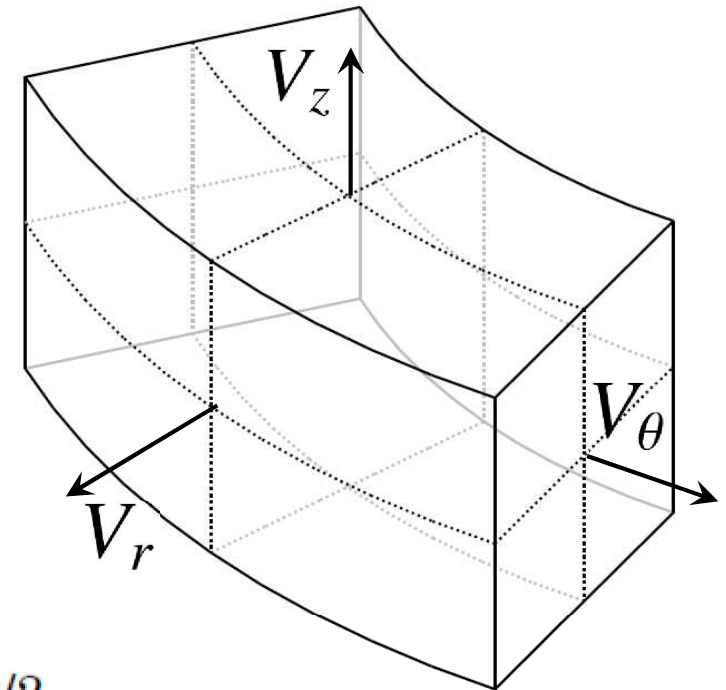
▶ 流速はセル境界で定義

□ 3次元においては流速方向の面中心で定義

▶ その他の状態量はセル中心で定義

▶ 質量・エネルギー保存式はセル中心で解く

▶ 運動量保存式はセル境界で解く



保存式の離散化(3/11)

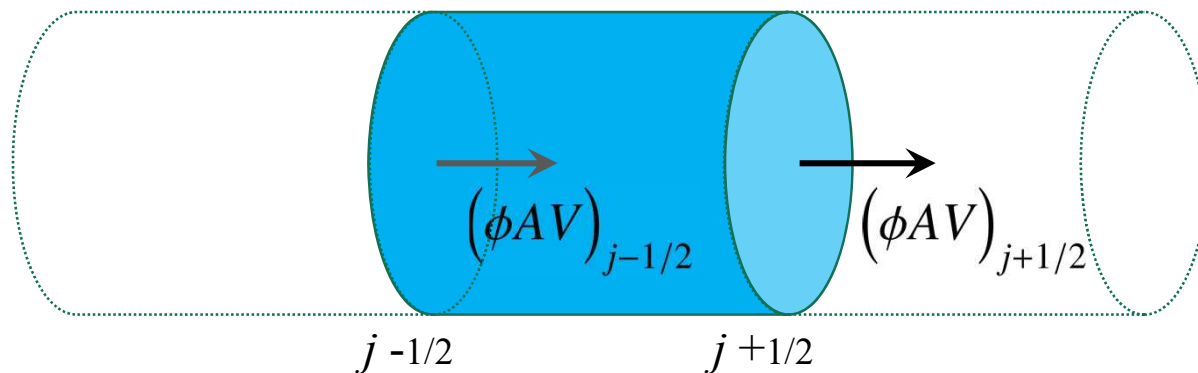
▶ 質量・エネルギー保存式の空間離散化

▶ 有限体積法

- ▶ 保存式をセル(コントロールボリューム)での体積積分で離散化
- ▶ 移流項を体積積分すると, セル境界を通過する ϕAV の差となる

$$\begin{aligned} \iiint_{\text{cell } j} \nabla \cdot (\phi \vec{V}) dV &= \iint_{\text{surface } j \pm 1/2} (\phi \vec{V}) \cdot d\vec{S} \\ &= (\phi AV)_{j+1/2} - (\phi AV)_{j-1/2} \end{aligned} \quad (8)$$

- ▶ セル j に注目するとき, セル境界 $j \pm 1/2$ からの流出入を考慮



保存式の離散化(4/11)

▶ 質量・エネルギー保存式の空間離散化

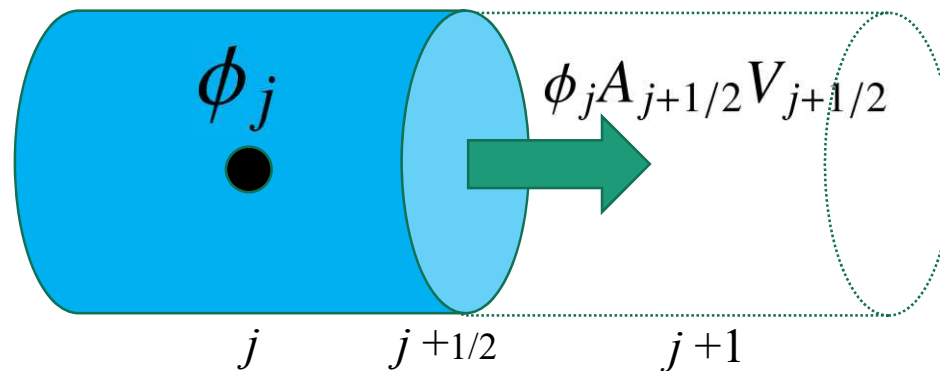
▶ セル境界で定義される ϕAV

▶ ϕ はセル中心で定義される量

▶ セル境界を横切る ϕAV は風上の ϕ の値で決める

$$(\phi AV)_{j+1/2} = \begin{cases} \phi_j A_{j+1/2} V_{j+1/2} & \text{if } V_{j+1/2} \geq 0 \\ \phi_{j+1} A_{j+1/2} V_{j+1/2} & \text{if } V_{j+1/2} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

□ $V_{j+1/2} > 0$ の例:



保存式の離散化(5/11)

▶ 質量・エネルギー保存式の空間離散化

▶ 保存式の両辺をセル内で体積積分(有限体積法)

- ▶ 移流項の差分化は前スライドと前々スライドに示すとおり
- ▶ 状態量がセル内で一定と仮定(両辺をセル体積で除算)

$$\text{1次元: } \frac{\partial \phi_j}{\partial t} + \frac{(\phi AV)_{j+1/2} - (\phi AV)_{j-1/2}}{Vol_j} = (\text{ソース項}) \quad (10)$$

- 3次元ではセル境界が6面あり, 全ての境界に対して和をとる

$$\text{3次元: } \frac{\partial \phi_{ROZ}}{\partial t} + \frac{\sum_{ROZ's \text{ surface}} (\phi A \vec{V} \cdot \vec{n})}{Vol_{ROZ}} = (\text{ソース項}) \quad (11)$$

- ▶ エネルギー保存式右辺の $P \nabla(\alpha V)$ などは移流項と同様の離散化をする

保存式の離散化(6/11)

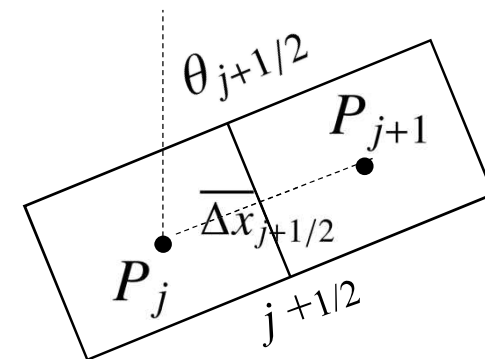
▶ 運動量保存式の空間離散化(1次元)

▶ セル境界 $j + 1/2$ における運動量保存式(5)の差分式:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial V_k}{\partial t}\right)_{j+1/2} + \left(V_k \frac{\partial V_k}{\partial x}\right)_{j+1/2} \\ = -\frac{1}{\rho_{k,j+1/2}} \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{j+1/2} - \frac{(f_{ik} + f_{wk})_{j+1/2}}{(\alpha_k \rho_k)_{j+1/2}} - g \cos \theta_{j+1/2} \end{aligned} \quad (12)$$

▶ 圧力の空間微分は、対象のセル境界を挟む二つのセル中心の圧力差で離散化

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{j+1/2} = \frac{P_{j+1} - P_j}{\Delta x_{j+1/2}} \quad (13)$$



保存式の離散化(7/11)

▶ 運動量保存式の空間離散化(1次元)

- ▶ セル中心定義の物理量は, セル境界の値として風上の値を使用

$$(\alpha_k \rho_k)_{j+1/2} = \begin{cases} (\alpha_k \rho_k)_j & V_{j+1/2} \geq 0 \\ (\alpha_k \rho_k)_{j+1} & V_{j+1/2} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

- ▶ 移流項は, 流路面積変化による圧力変化を再現する風上差分

$$\left(V \frac{\partial V}{\partial x} \right)_{j+1/2} = \begin{cases} D_{j+1/2} V_{j+1/2} \frac{E_{j+1/2} V_{j+1/2} - F_{j+1/2} V_{j-1/2}}{\overline{\Delta x}_{j+1/2}} & V_{j+1/2} \geq 0 \\ D_{j+1/2} V_{j+1/2} \frac{E_{j+1/2} V_{j+3/2} - F_{j+1/2} V_{j+1/2}}{\overline{\Delta x}_{j+1/2}} & V_{j+1/2} < 0 \end{cases} \quad (15)$$

保存式の離散化(8/11)

▶ 運動量保存式の空間離散化(1次元)

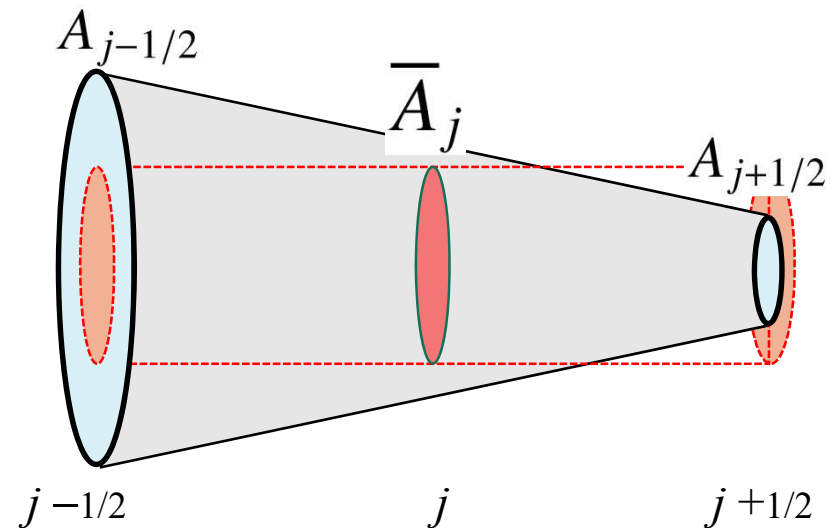
▶ 流路面積変化による圧力変化を再現するように係数を決める

▶ 定常, 単相の状態を仮定し, 流体の密度変化の効果(圧縮, 気液間の質量移動)は考えずに, 流路面積変化の効果だけを考慮して導出

$$D_{j+1/2} = \frac{1}{2} \left(\frac{A_{j+1/2}}{\bar{A}_j} + \frac{A_{j+1/2}}{\bar{A}_{j+1}} \right) \quad \bar{A}_j = \frac{Vol_j}{\Delta x_j}$$

$$(16) \quad E_{j+1/2} = \begin{cases} \frac{A_{j+1/2}}{\bar{A}_{j+1}} & V_{j+1/2} \geq 0 \\ \frac{A_{j+3/2}}{\bar{A}_{j+1}} & V_{j+1/2} < 0 \end{cases}$$

$$F_{j+1/2} = \begin{cases} \frac{A_{j-1/2}}{\bar{A}_j} & V_{j+1/2} \geq 0 \\ \frac{A_{j+1/2}}{\bar{A}_j} & V_{j+1/2} < 0 \end{cases}$$



保存式の離散化(9/11)

▶ 運動量保存式の空間離散化(3次元)

▶ 3次元では, ∇ 演算子の離散化を除き1次元と同様の空間離散化

▶ 移流項では, 対象とする座標成分の離散化に限って流路面積依存

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = V_r \frac{\partial \vec{V}}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial \vec{V}}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \quad (17)$$

□ 移流項の r 成分の例:

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} = (\text{流路面積考慮の風上差分})$$

$$\frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} = (\text{通常 of 風上差分}) \quad (18)$$

$$V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = (\text{通常 of 風上差分})$$

保存式の離散化(10/11)

▶ 時間の離散化

- ▶ 新時刻の量を上添字 $n+1$, 旧時刻の量を上添字 n で表す
- ▶ 時間微分は1次精度差分, その他の項は基本的に陰的に取り扱う
- ▶ 質量保存式(1次元)

$$\frac{(\alpha_k \rho_k)_j^{n+1} - (\alpha_k \rho_k)_j^n}{\Delta t} + \frac{(\alpha_k \rho_k AV_k)_{j+1/2}^{n+1} - (\alpha_k \rho_k AV_k)_{j-1/2}^{n+1}}{Vol_j} = \Gamma_{k,j}^{n+1} \quad (19)$$

- ▶ エネルギー保存式(1次元; 非保存形)

$$\begin{aligned} & \frac{(\alpha_k \rho_k e_k)_j^{n+1} - (\alpha_k \rho_k e_k)_j^n}{\Delta t} + \frac{(\alpha_k \rho_k e_k AV_k)_{j+1/2}^{n+1} - (\alpha_k \rho_k e_k AV_k)_{j-1/2}^{n+1}}{Vol_j} \\ &= (q''')_j^{n+1} - P_j^{n+1} \left\{ \frac{(\alpha_k AV_k)_{j+1/2}^{n+1} - (\alpha_k AV_k)_{j-1/2}^{n+1}}{Vol_j} + \frac{\alpha_{k,j}^{n+1} - \alpha_{k,j}^n}{\Delta t^n} \right\} + (q''')_j^{n+1} + \Gamma_k h_k \end{aligned} \quad (20)$$

保存式の離散化(11/11)

▶ 時間の離散化

▶ 運動量保存式(1次元)

$$\begin{aligned} & \frac{V_{k,j+1/2}^{n+1} - V_{k,j+1/2}^n}{\Delta t} + \left(V_k \frac{\partial V_k}{\partial x} \right)_{j+1/2}^{n+1} \\ &= - \frac{1}{\rho_{k,j+1/2}^n} \frac{P_{j+1}^{n+1} - P_j^{n+1}}{\Delta x_{j+1/2}} - \frac{(f_{ik} + f_{wk})_{j+1/2}^{n+1}}{(\alpha_k \rho_k)^n_{j+1/2}} - g \cos \theta_{j+1/2} \end{aligned} \quad (21)$$

- ▶ 3次元でも1次元と同様の離散化(式が複雑なので省略)
- ▶ 陰的な取扱い($n+1$ の値を使用)は数値解法に依存する
 - ▶ 例えば, $(\alpha \rho V)$ のうち, どの変数を陰的な扱いとするかなど

保存式の数値解法(1/7)

- ▶ 差分式は新時刻の状態量に関する非線形方程式
 - ▶ Newton-Raphson法による解法
- ▶ 解法に依存して新時刻の量とする変数が変わる
 - ▶ 半陰解法(各コード共通に具備)
 - ▶ SETS法(TRAC-BF1及びTRACE5.0)
 - ▶ 完全陰解法(TRACG及びTRACT)
- ▶ 以降, 両解法と大部分が共通する半陰解法を説明
 - ▶ 運動量保存式 : 流速と圧力との関係式算出
 - ▶ 質量・エネルギー保存式 : その他変数と圧力との関係式算出
 - ▶ ネットワーク解法 : 新時刻の圧力の算出
 - ▶ 主に1次元での式を用いて説明するが, 3次元の場合でも解き方は1次元と同様

保存式の数値解法(2/7)

▶ 運動量保存式の解法

▶ 運動量保存式の差分式

$$\begin{aligned} & \frac{V_{k,j+1/2}^{n+1} - V_{k,j+1/2}^n}{\Delta t} + \left(V_k \frac{\partial V_k}{\partial x} \right)_{j+1/2}^n : \text{半陰解法では移流項は陽的に取扱う} \\ & \hspace{15em} \text{TRAC系コードではここを} n+1 \text{とする} \\ & \hspace{15em} \text{(スライド49【補足】参照)} \\ & = - \frac{1}{\rho_{k,j+1/2}^n} \frac{P_{j+1}^{n+1} - P_j^{n+1}}{\Delta x_{j+1/2}} - \frac{(f_{ik} + f_{wk})_{j+1/2}^{n+1}}{(\alpha_k \rho_k)_{j+1/2}^n} - g \cos \theta_{j+1/2} \end{aligned} \quad (22)$$

▶ 界面・壁面せん断は流速の関数

$$\begin{aligned} f^{n+1} &= f(V_g^{n+1}, V_\ell^{n+1}) \\ &\approx f^n + \left(\frac{\partial f}{\partial V_g} \right)^n (V_g^{n+1} - V_g^n) + \left(\frac{\partial f}{\partial V_\ell} \right)^n (V_\ell^{n+1} - V_\ell^n) \end{aligned} \quad (23)$$

保存式の数値解法(3/7)

▶ 運動量保存式の解法

- ▶ 気相及び液相の運動量保存式を変形(サブスクリプト $j + \frac{1}{2}$ は省略)

$$\begin{pmatrix} a_{11}^n & a_{12}^n \\ a_{21}^n & a_{22}^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_g^{n+1} \\ V_l^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1^n \\ b_2^n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1^n \\ c_2^n \end{pmatrix} (P_{j+1}^{n+1} - P_j^{n+1}) \quad (24)$$

- ▶ 上式を解けば, 新時刻の流速と圧力との関係式が得られる

$$\begin{pmatrix} V_g^{n+1,m} \\ V_l^{n+1,m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{V}_g^{n+1,m-1} \\ \tilde{V}_l^{n+1,m-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_g^n \\ D_l^n \end{pmatrix} \delta^m (P_{j+1}^{n+1} - P_j^{n+1}) \quad (25)$$

$$\text{※ } \tilde{V}_k^{n+1,m} = V_k^{n+1,m} \quad (m > 0)$$

- ▶ $\delta^m f^{n+1} \equiv f^{n+1,m} - f^{n+1,m-1}$ と定義 ($f^{n+1,0} = f^n$)

$$\tilde{V}_k^{n+1,0} = V_k^n + D_k^n (P_{j+1}^n - P_j^n)$$

- ▶ m は Newton-Raphson法(後述)に関する反復回数

保存式の数値解法(4/7)

▶ 質量・エネルギー保存式の解法

- ▶ 密度 ρ_k 及び内部エネルギー e_k は, 圧力 P 及び各相の温度 T_k の関数
 - ▶ コードに組み込んだ蒸気表を使用する

$$\begin{aligned}\rho_k^n &= \rho_k(T_k^n, P^n) \\ e_k^n &= e_k(T_k^n, P^n)\end{aligned}\tag{26}$$

- ▶ 上式と運動量保存式で求めた新時刻の流速の関係式を, 質量・エネルギー保存式に代入すると, 新時刻の気液温度 T_k , 圧力 P , ボイド率 α に関する非線形方程式が得られる
 - ▶ 隣接セルとの圧力差 ($P_{j+1} - P_j$ 及び $P_j - P_{j-1}$) の反復前後での差を含む

保存式の数値解法(5/7)

▶ 質量・エネルギー保存式の解法

- ▶ 保存式には、新時刻の量として、自セルの温度、圧力、ボイド率と、隣接セルとの圧力差(流速に含まれる)だけが含まれる。

▶ 質量保存式:

$$\frac{(\alpha_k \rho_k)_{j}^{n+1} - (\alpha_k \rho_k)_{j}^n}{\Delta t} + \frac{(\alpha_k^n \rho_k^n AV_k^{n+1})_{j+1/2} - (\alpha_k^n \rho_k^n AV_k^{n+1})_{j-1/2}}{Vol_j} = \Gamma_{k,j}^{n+1} \quad (27)$$

▶ エネルギー保存式:

$$\begin{aligned} & \frac{(\alpha_k \rho_k e_k)_{j}^{n+1} - (\alpha_k \rho_k e_k)_{j}^n}{\Delta t} + \frac{(\alpha_k^n \rho_k^n e_k^n AV_k^{n+1})_{j+1/2} - (\alpha_k^n \rho_k^n e_k^n AV_k^{n+1})_{j-1/2}}{Vol_j} \\ & = (q_{wk}''')_{j}^{n+1} - P_j^{n+1} \left\{ \frac{(\alpha_k^n AV_k^{n+1})_{j+1/2} - (\alpha_k^n AV_k^{n+1})_{j-1/2}}{Vol_j} + \frac{\alpha_{k,j}^{n+1} - \alpha_{k,j}^n}{\Delta t^n} \right\} + (q_{ik}''' + \Gamma_k h_k)_{j}^{n+1} \end{aligned} \quad (28)$$

:TRAC系コードでは α, ρ, e の
全て又は一部を陰的に扱う
(スライド50, 51【補足】参照)

保存式の数値解法(6/7)

▶ 質量・エネルギー保存式の解法

- ▶ 新時刻($n+1$)の気液温度 T_k , 圧力 P , ボイド率 α に関する非線形方程式をNewton-Raphson法(方程式を線形化)で解く:

$$\begin{pmatrix} \delta^m P_j^{n+1} \\ \delta^m T_{g,j}^{n+1} \\ \delta^m T_{\ell,j}^{n+1} \\ \delta^m \alpha^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{1,j}^{n,m} \\ d_{2,j}^{n,m} \\ d_{3,j}^{n,m} \\ d_{4,j}^{n,m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{1,j}^{n,m} \\ e_{2,j}^{n,m} \\ e_{3,j}^{n,m} \\ e_{4,j}^{n,m} \end{pmatrix} \delta^m \Delta P_{+,j}^{n+1} + \begin{pmatrix} f_{1,j}^{n,m} \\ f_{2,j}^{n,m} \\ f_{3,j}^{n,m} \\ f_{4,j}^{n,m} \end{pmatrix} \delta^m \Delta P_{-,j}^{n+1} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{+,j}^n &= P_{j+1}^n - P_j^n \\ \Delta P_{-,j}^n &= P_j^n - P_{j-1}^n \end{aligned} \quad (30)$$

- ▶ m はNewton法の反復回数

保存式の数値解法(7/7)

▶ 収束判定

- ▶ 圧力場が定まれば, 全状態量が決まる
- ▶ 得られた新時刻の状態量について収束の有無を判定
 - ▶ 前反復からの状態量変化が既定値(入力設定値)以内であること
 - ▶ ボイド率が0~1の範囲にあること
 - ▶ Courant条件を満たすかなど, そのほかの設定条件を満足すること
- ▶ 上記の判定条件を満たせば収束, 満たさなければ再反復
- ▶ 最大反復回数を超える, 又は状態量の大きな変動などが検知された場合には, 時間ステップを減じて再計算

參考資料

保存式の数値解法(補足)

▶ ネットワーク解法

- ▶ 質量・エネルギーの保存式から得られる圧力の関係式:

$$\delta^m P_j^{n+1} = d_{1,j}^{n,m} + e_{1,j}^{n,m} \delta^m \Delta P_{+,j}^{n+1} + f_{1,j}^{n,m} \delta^m \Delta P_{-,j}^{n+1} \quad (31)$$

- ▶ 全計算セルに対して上の関係式が得られる。この関係式を全てのセルで連立すれば、本反復での新時刻圧力に関する連立1次方程式となり、解くことができる。コーディング上は次のとおり
 - ▶ まず1次元コンポーネント内で上の連立1次方程式を解き、隣接コンポーネントとの圧力差に関する関係式を算出
 - ▶ その関係式をさらに1次元コンポーネント鎖(両端が境界コンポーネント又は3次元コンポーネント)で連立して解く
 - ▶ 両端が境界コンポーネント(BREAK/FILL)であれば方程式が閉じるためそのまま解き、3次元コンポーネント(VESSEL)と結合する全てのコンポーネント鎖は、それらとVESSELの圧力関係式を全て連立すれば解けるので、そこで反復計算が終了となる。

完全陰解法及びSETS法について(1/3)

▶ 運動量保存式の移流項

※TRAC-BF1の運動量保存式の移流項の扱いは、オリジナルのSETS法*の手法と異なる

(質量・エネルギー保存式の扱いはオリジナルと同じ)

*J. H. Mahaffy, NUREG/CR-0971 (1979).

▶ 完全陰解法とSETS法で共通

▶ 対象セルのエッジ上の流速だけを陰的に扱う

$$\left(V \frac{\partial V}{\partial x}\right)_{j+1/2}^{n+1} = \begin{cases} D_{j+1/2} V_{j+1/2}^n \frac{E_{j+1/2} V_{j+1/2}^{n+1} - F_{j+1/2} V_{j-1/2}^n}{\overline{\Delta x}_{j+1/2}} & V_{j+1/2} \geq 0 \\ D_{j+1/2} V_{j+1/2}^n \frac{E_{j+1/2} V_{j+3/2}^n - F_{j+1/2} V_{j+1/2}^{n+1}}{\overline{\Delta x}_{j+1/2}} & V_{j+1/2} < 0 \end{cases} \quad (32)$$

▶ 半陰解法

▶ 全ての流速を陽的に扱う

$$\left(V \frac{\partial V}{\partial x}\right)_{j+1/2}^n = \begin{cases} D_{j+1/2} V_{j+1/2}^n \frac{E_{j+1/2} V_{j+1/2}^n - F_{j+1/2} V_{j-1/2}^n}{\overline{\Delta x}_{j+1/2}} & V_{j+1/2} \geq 0 \\ D_{j+1/2} V_{j+1/2}^n \frac{E_{j+1/2} V_{j+3/2}^n - F_{j+1/2} V_{j+1/2}^n}{\overline{\Delta x}_{j+1/2}} & V_{j+1/2} < 0 \end{cases} \quad (33)$$

完全陰解法及びSETS法について(2/3)

▶ 質量・エネルギー保存式の移流項

▶ 完全陰解法

※ $\phi = \alpha\rho$ (質量保存式), $\alpha\rho e$ (エネルギー保存式)

▶ 全ての項を陰的に扱う

$$\nabla(\phi V)_j^{n+1} = \begin{cases} \frac{\phi_j^{n+1} A_{j+1/2} V_{j+1/2}^{n+1} - \phi_{j-1}^{n+1} A_{j-1/2} V_{j-1/2}^{n+1}}{Vol_j} & \text{if } V_{j+1/2} \geq 0 \\ \frac{\phi_{j+1}^{n+1} A_{j+1/2} V_{j+1/2}^{n+1} - \phi_j^{n+1} A_{j-1/2} V_{j-1/2}^{n+1}}{Vol_j} & \text{if } V_{j+1/2} < 0 \end{cases} \quad (34)$$

▶ 半陰解法

▶ 流速を陰的に, ϕ を陽的に扱う

$$\nabla(\phi V)_j^{n+1} = \begin{cases} \frac{\phi_j^n A_{j+1/2} V_{j+1/2}^{n+1} - \phi_{j-1}^n A_{j-1/2} V_{j-1/2}^{n+1}}{Vol_j} & \text{if } V_{j+1/2} \geq 0 \\ \frac{\phi_{j+1}^n A_{j+1/2} V_{j+1/2}^{n+1} - \phi_j^n A_{j-1/2} V_{j-1/2}^{n+1}}{Vol_j} & \text{if } V_{j+1/2} < 0 \end{cases} \quad (35)$$

完全陰解法及びSETS法について(3/3)

▶ 質量・エネルギー保存式の移流項

▶ SETS法

- ▶ 流速を陰的に, ϕ は自セルの量だけを陰的に扱う

$$\nabla(\phi V)_j^{n+1} = \begin{cases} \frac{\phi_j^{n+1} A_{j+1/2} V_{j+1/2}^{n+1} - \phi_{j-1}^n A_{j-1/2} V_{j-1/2}^{n+1}}{Vol_j} & \text{if } V_{j+1/2} \geq 0 \\ \frac{\phi_{j+1}^n A_{j+1/2} V_{j+1/2}^{n+1} - \phi_j^{n+1} A_{j-1/2} V_{j-1/2}^{n+1}}{Vol_j} & \text{if } V_{j+1/2} < 0 \end{cases} \quad (36)$$

- ▶ 隣接セルと1時間ステップずれた ϕ をやり取りするため, セル間の ϕ の移動に係る保存性が破れる。SETS法では, その保存性を回復するように修正子ステップで補正する。