

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MPの機能紹介

主管研究員 杉中 隆史

気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MPによる焼入れ解析セミナー
2015年10月22日（木）
アドバンスソフト株式会社

発表内容

- ・焼入れ解析
- ・焼入れの気液二相流解析
- ・二流体モデル(Euler-Euler法)の特長
- ・二流体モデル(Euler-Euler法)の基礎方程式
- ・焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式
- ・まとめ

メカニズムを解明する

焼入れ解析

ボイド率分布
速度分布
温度分布

気液二相流解析ソフトウェアの担当部分

出力
気液二相流解析

流体ソフトによる
固体熱伝導解析の
相変態はカスタマ
イズで対応可能

表面熱伝達率

入力(境界条件)

固体熱伝導解析
変形と残留応力解析

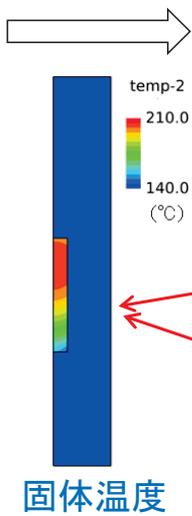
鋼などでは
相変態を考慮

構造解析ソフトウェアの担当部分

焼入れの気液二相流解析

①壁面上の各メッシュで壁面熱伝達様式を以下から判別する

- 膜沸騰
- ↓
- 遷移沸騰
- ↓
- 飽和核沸騰
- ↓
- サブクール核沸騰
- ↓
- 液単相

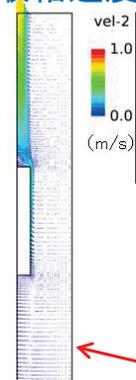


③固体の温度を計算する

②気液二相流動と壁面温度から、壁面上の各メッシュで熱流束を計算する

④気泡と液体の流動を考慮して沸騰と凝縮を計算する

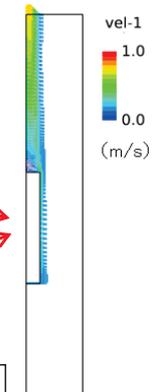
液相速度



⑥気泡と液体の界面摩擦力と、液体温度分布による自然対流を考慮して液体の流動を計算する

alpha(1)

⑤気泡の流動を計算する

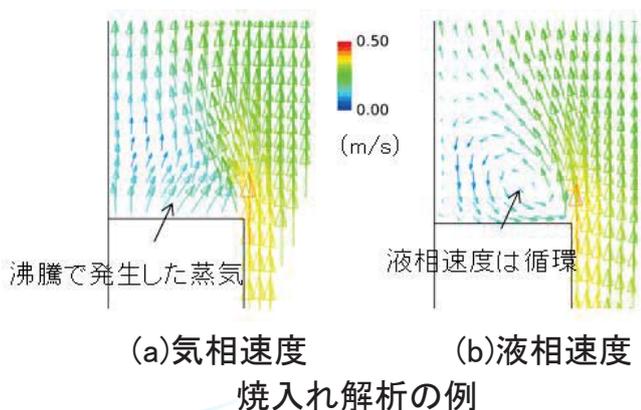


ボイド率

各時刻において、全てのメッシュで、気相と液相の質量・運動量・エネルギー輸送と①から⑥を収束させる(陰解法を使用)

二流体モデル(Euler-Euler法)の特長

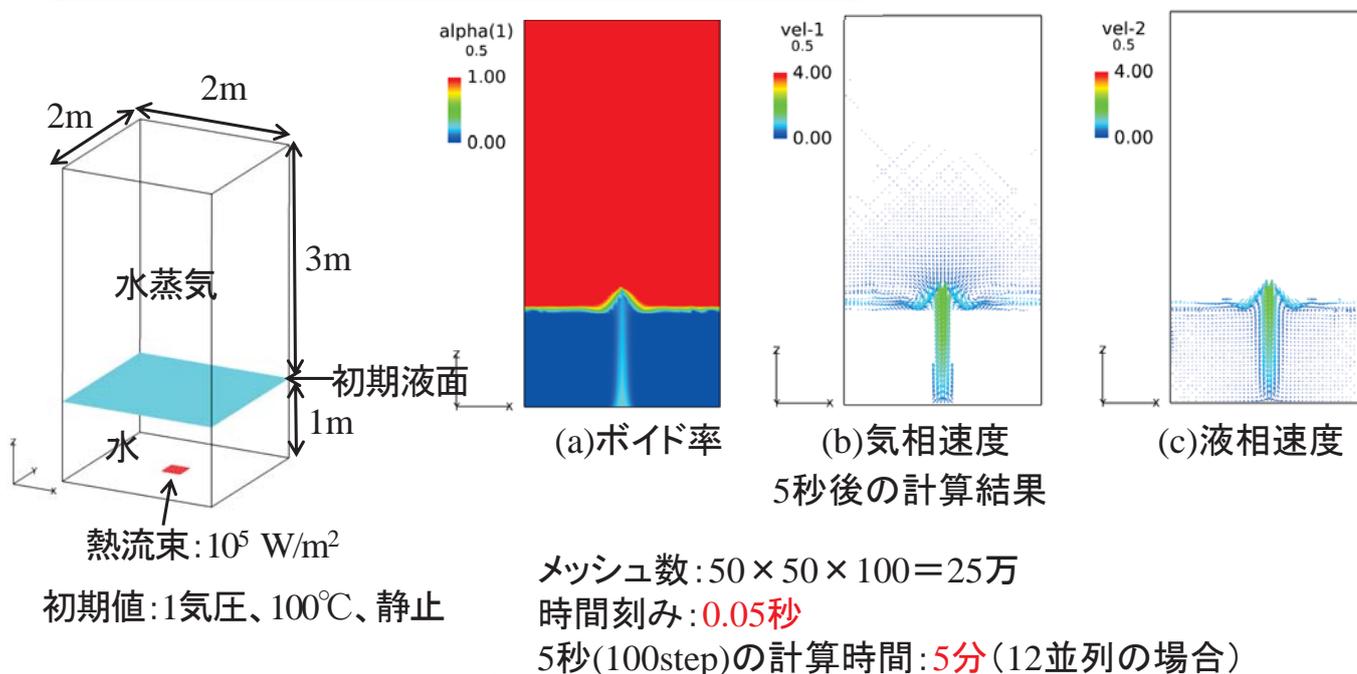
- ・気相と液相で、質量・運動量・エネルギーの保存方程式を別々に解く。
 - 同一メッシュで、気相と液相の異なる速度を計算できる。
 - 二流体の力学的非平衡状態と熱的非平衡状態を計算できる。
- ・気液界面や壁面での質量・運動量・エネルギー輸送は構成方程式(実験相関式)を使用する。
- ・メッシュより小さい気泡や液滴の質量を保存して計算できる。
 - メッシュサイズや時間刻みが大きくとれ、実用的な解析ができる。



二流体モデル(Euler-Euler法)の特長

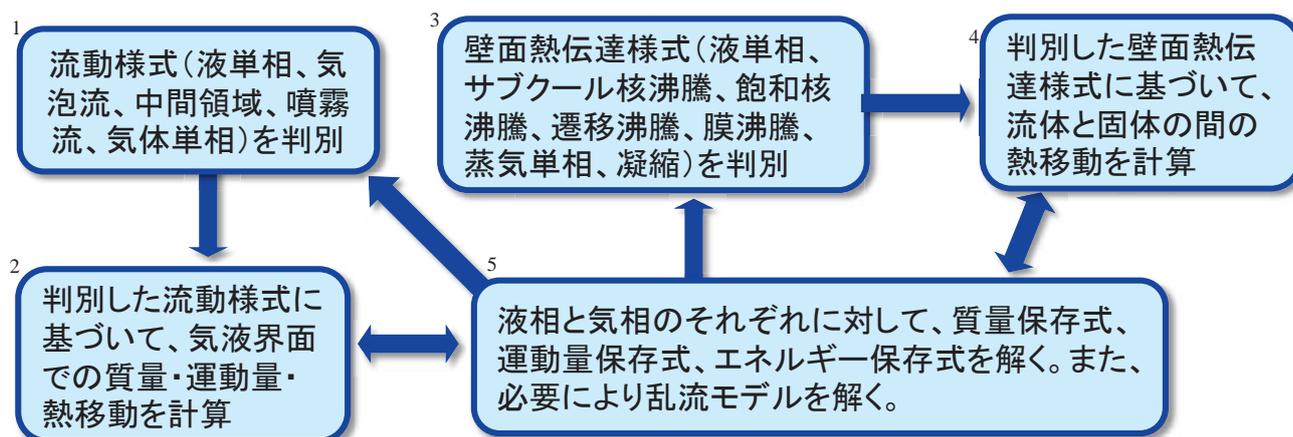
粗いメッシュで気泡流と自由表面と相変化を扱うことができる。

沸騰解析の例(Advance/FrontFlow/MP使用)



二流体モデル(Euler-Euler法)の基礎方程式

- ・気相と液相の質量保存方程式
- ・気相と液相の運動量保存方程式
- ・気相と液相のエネルギー保存方程式
- ・構成方程式



焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

流動様式

各時刻において、全てのメッシュで流動様式を求め、流動様式に応じて構成方程式を切り替える。

①混相状態は気泡流のみ

②混相状態は気泡流・中間領域・噴霧流



①と②の両方とも、沸騰した気泡が低温度の液体で凝縮する挙動を計算することができる。

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

気液間の運動量交換

気泡流の場合には、以下の式で単位体積当たりの力を表現する。

$$F_{D,g} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{8} a_j C_D \rho_l |V_g - V_l| (V_g - V_l)$$

気泡の運動

- ①気泡径が小さいか表面張力が大きい場合
- ・気泡は球形で直線的に運動する。
 - ・高純度の液体では、気泡内部に循環が形成されて粘性抵抗が減少して、終端速度が大きくなる。
- ②気泡径が大きい場合表面張力が小さい場合
- ・気泡は非球形で振動的に運動する。
 - ・液体の純度は影響しない。

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

①と②の両方を考慮できて、広範囲な気泡径と流体物性に対する実験データをフィッティングした神戸大・富山らの次式を使用している。

$$C_D = \begin{cases} \max \left[\min \left[\frac{16}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{48}{Re} \right], \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} & \text{高純度の液体の場合} \\ \max \left[\min \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{72}{Re} \right], \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} & \text{中純度の液体の場合} \\ \max \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} & \text{低純度の液体の場合} \end{cases}$$

ここで Eo : エトベス数(浮力と表面張力の比)

M : モルトン数(流体の物性値の影響を示す)

Re : 気泡レイノルズ数(Eo 、 M 、 C_D から計算)

富山・ほか, 機論, 61-587, B(1995), 2357

- ・ $10^{-2} < Eo < 10^3$ 、 $10^{-14} < M < 10^7$ 、 $10^{-3} < Re < 10^5$ という広範囲な気泡径と流体物性において実測値と良好に一致し、気泡が群として運動する影響が考慮されている。
- ・表面張力支配の小さいスケールの流れでは、気泡径(例 $0.01 \sim 0.1 \mu m$)と C_D (例 Ishiiらの式)で与える。
- ・液滴流の C_D は剛体球の実験式を使用している。
- ・中間領域では、気泡流と噴霧流の界面摩擦力を3次式で滑らかに補間している。

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

気液間の熱伝達

気泡流に対する相間熱伝達率 h_{il} 、 h_{ig} と界面積 A_i の計算式

$$h_{il} = \begin{cases} \max(h_{il1}, h_{il2}) & (T_l \geq T_s) \\ 0.02\rho_l V_r \frac{\partial e_l}{\partial T_l} & (T_l < T_s) \end{cases} \quad \cdot \cdot \text{液体側の相間熱伝達率}$$

$$h_{ig} = \begin{cases} 1000 & (T_g \geq T_s) \\ = 10000 & (T_g < T_s) \end{cases} \quad \cdot \cdot \text{蒸気側の相間熱伝達率}$$

$$A_i = 6\alpha_g \frac{1}{D_b} \quad \cdot \cdot \text{界面積}$$

ここで

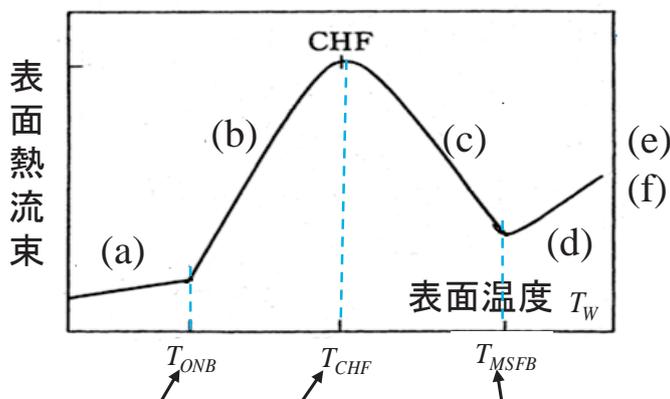
$$h_{il1} = \frac{\lambda_l}{D_b} (2 + 0.74 \text{Re}_b^{0.5})$$

$$h_{il2} = 3.81972(T_l - T_s) \frac{\lambda_l}{D_b} \frac{\rho_l \frac{\partial e_l}{\partial T_l}}{\rho_g (h_{sg} - h_{sl})}$$

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

(a)から(g)までの表面熱流束式を切り替えて使用している。例えばRohsenowの核沸騰式だけで全体を表現することはできない。

沸騰曲線



沸騰開始温度 限界熱流束温度 最小安全膜沸騰温度

- (a) 液単相
- (b) サブクール核沸騰(サブクール、飽和)
- (c) 遷移
- (d) 膜沸騰
- (e) 蒸気単相
- (f) 凝縮

焼入れでは、表面の熱伝達様式は (d)→(c)→(b)→(a) の順に変わる。

表面温度と流れ場に依存するバルク(温度境界層より外)の温度、速度、ボイド率を使用して、各時刻、各メッシュで、(a)から(g)を判別して、各領域の表面熱流束式を計算している。

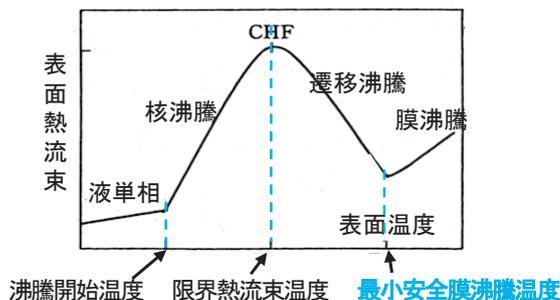
↑
バルクの物理量を使用することで、メッシュサイズに依存しないで、気液二相流の流動を考慮している。

- $T_w \leq T_{CHF}$: 膜沸騰
- $T_{CHF} < T_w \leq T_{MSFB}$: 核沸騰
- $T_{MSFB} \leq T_w$: 遷移沸騰

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

最小安全膜沸騰温度

最小安全膜沸騰温度は、膜沸騰から遷移沸騰に切り替わる表面温度のことである。



均質沸騰核生成温度 T_{HN} に基づく式で最小安全膜沸騰温度 T_{MSFB} を求めている。

$$T_{MSFB} = T_{HN} + (T_{HN} - T_l) \left(\frac{\lambda_l \rho_l C_{pl}}{\lambda_w \rho_w C_{pw}} \right)^{0.5}$$

ここで

$$T_{HN} = 705.44 - (4.722 \times 10^{-2}) DP + (2.3907 \times 10^{-5}) DP^2 - (5.8193 \times 10^{-9}) DP^3$$

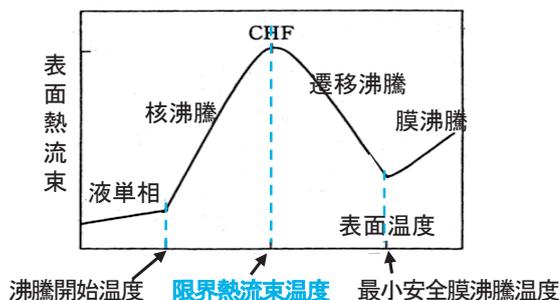
$$DP = 3203.6 - P$$

T_{MSFB} は流体の種類、表面性状、形状、材質に影響される。
上記のほかに、実験式あるいは実験値を場所ごとに与えることができる。

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

限界熱流束温度

限界熱流束温度は、遷移沸騰から核沸騰に切り替わる表面温度のことである。



以下の(a)と(b)の熱流束相関式が一致するように限界熱流束温度 T_{CHF} を求めている。

(a)Chenによる核沸騰熱流束式

ここで

$$q_{CHEN}'' = h_{nucb} (T_w - T_l)$$

$$h_{nucb} = 0.00122 \frac{\lambda_l^{0.79} C_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} (h_{sg} - h_{sl})^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_w - T_s)^{0.24} (p_w - p)^{0.75} S W_{n2}$$

(b)Zuberによる限界熱流束式

$$q_{CHF}'' = 0.15 h_{fg} \rho_g^{0.5} \{ \sigma g (\rho_l - \rho_g) \}^{0.25}$$

$$S = \begin{cases} 1.0 & (\text{Re}_{TPP} \leq 0) \\ (1 + 0.12 \text{Re}_{TPP}^{1.14})^{-1} & (0 < \text{Re}_{TPP} \leq 32.5) \\ (1 + 0.42 \text{Re}_{TPP}^{0.78})^{-1} & (32.5 < \text{Re}_{TPP} \leq 70) \\ (1 + 0.42 \times 70^{0.78})^{-1} & (70 < \text{Re}_{TPP}) \end{cases}$$

上記のほかに、実験式あるいは実験値を場所ごとに与えることができる。

焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

膜沸騰の表面熱流束

輻射熱伝達率、Bromleyの膜沸騰熱伝達率、Forslund-Rohsenowの液滴の熱伝達率で液相の熱伝達率 h_{wl} を表現している。

$$h_{wl} = h_r \frac{T_W - T_S}{T_W - T_l} + h_f \frac{T_W - T_S}{T_W - T_l} + h_d$$

ここで

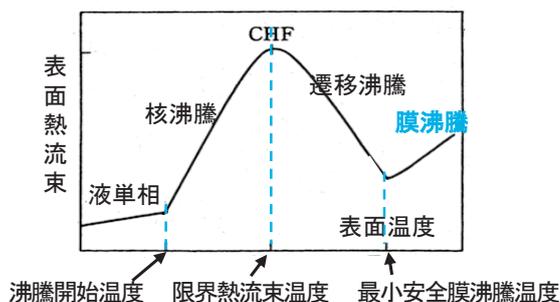
$$h_r = (1 - \alpha_g) \sigma_{SB} \varepsilon_r \frac{T_W^4 - T_S^4}{T_W - T_S}$$

$$h_f = \begin{cases} h_{f0} & (\alpha_g \leq 0.5) \\ h_{f0} (3 - 2X_1) X_1^2 & (0.5 < \alpha_g \leq 0.75) \\ 0 & (0.75 \leq \alpha_g) \end{cases}$$

$$h_{f0} = 0.62 \left\{ \frac{\rho_g \lambda_g^3 (\rho_l - \rho_g) g h'_{lg}}{\mu_g (T_W - T_S) \lambda} \right\}^{0.25} \quad \text{Bromleyの膜沸騰熱伝達率}$$

h_d Forslund-Rohsenowの液滴の熱伝達率

水や油の種類により修正して使用している。



焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

遷移沸騰の表面熱流束

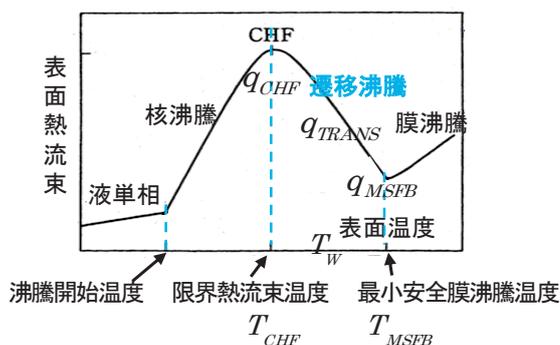
限界熱流速温度における熱流束 q_{CHF} と最小安全膜沸騰温度における熱流束 q_{MSFB} を補間して、遷移沸騰の表面熱流束 q_{TRANS} を求めている。

$$q_{TRANS} = \gamma q_{CHF} + (1 - \gamma) q_{MSFB}$$

ここで

$$\gamma = \left(\frac{T_W - T_{MSFB}}{T_{CHF} - T_{MSFB}} \right)^2$$

水や油の種類により修正して使用している。



焼入れ解析におけるAdvance/FrontFlow/MPの構成方程式

サブクール核沸騰の表面熱流束

Chenの式をサブクール域に拡張した式を使用している。

$$q_{w1} = (1 - \varepsilon)q_{NB} + \varepsilon q_C + q_{SPL}$$

ここで

$$q_{NB} = 0.00122 \frac{\lambda_l^{0.79} C_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} (h_{sg} - h_{sl})^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_W - T_s)^{0.24} (p_W - p)^{0.75} S W_{n2} (T_W - T_l)$$

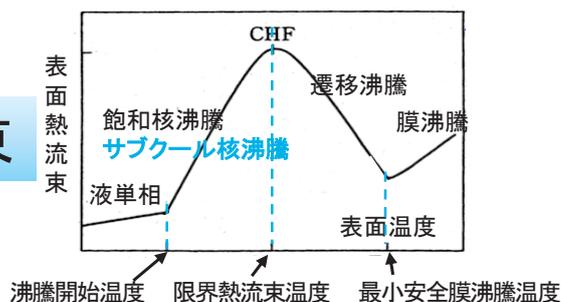
Chenの核沸騰熱流束式

q_C Hancox-Nicollの流束式から強制対流分を除いた凝縮に使用される熱流束

q_{SPL} Dittus-Boelterの乱流強制対流熱流束式とNusselt数4の大きい方を使用

ε Rouhaniモデルにより、サブクール水を熱するのに費やされる割合

水や油の種類により修正して使用している。



まとめ

気液二相流解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/MPを使用して、焼入れ解析のための表面熱伝達率を解析する機能を紹介した。