

# Volumetric Source Term モデルの解釈について

2024/10/24 石垣

## 1 概要

非凝縮ガスを含む水蒸気の壁面凝縮モデルには、凝縮量を生成項で与える Volumetric Source Term モデル（以下 VS モデル）およびステファン速度を界面に与えることで、凝縮量を計算セルからの流出量として与える Face-flux モデルの2つのモデルが格納容器熱流動解析で使われることが多い。ここでは、VS モデルにおける生成項について述べる。

## 2 定式化

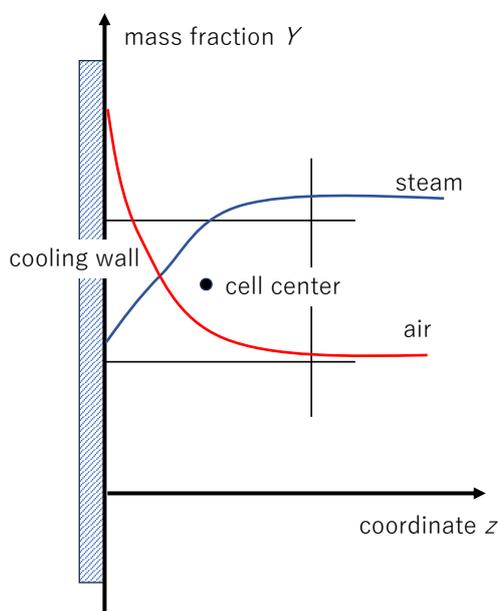


Fig.1 冷却面近傍の模式図

Fig.1 に凝縮が発生する際の冷却面近傍の模式図を示す。ここでは、水蒸気・空気の2成分系を考える。壁面垂直方向に  $z$  軸をとるものとする。水蒸気の凝縮により冷却面近傍では、非凝縮ガスの空気の濃度は上昇し、水蒸気の濃度は低下する。

Dehbi[1], Kumar[2] らの定式化について話を進める。凝縮による質量流束  $\dot{m}'''$  [kg/m<sup>2</sup>s] は以下で与えられる。

$$\dot{m}''' = \frac{\rho D}{1 - Y_s} \frac{\partial Y_s}{\partial z} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は混合気体の密度、 $D$  は拡散係数、 $Y$  は質量分率である。以下下付き添字の s, a はそれぞれ水蒸気、空気に対する値であることを示す。これを用いて、質量保存式における凝縮による質量欠損を表す生成項  $S_m$  [kg/m<sup>3</sup>s] は以下となる。

$$S_m = -\dot{m}''' \frac{A}{V} = -\frac{\rho D}{1 - Y_s} \frac{\partial Y_s}{\partial z} \frac{A}{V} \quad (2)$$

ここで、 $A$ ,  $V$  は壁面隣接セルのセル界面の面積およびセル体積である。これを用いると質量保存式は以下となる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_m \quad (3)$$

Dehbi, Kumar らはさらにガス種の質量分率の輸送方程式の生成項を以下としている。

$$S_s = S_m Y_s \quad (4)$$

$$S_a = S_m Y_a \quad (5)$$

ガス種の質量分率の輸送式は以下。

$$\frac{\partial \rho Y_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_s) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_s) + S_s \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho Y_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_a) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_a) + S_a \quad (7)$$

$Y_s + Y_a = 1$  より、上 2 式の和をとることで、式 (3) と一致することがわかる。

式 (4), (5) を見ると、非凝縮ガスである空気の質量が凝縮により減少し、蒸気の凝縮量が減少しているように見える。以下この解釈を考える。

壁面隣接セルにおける、壁面とセル中心とのガス濃度の差による拡散質量流束  $F$  [kg/m<sup>2</sup>s] (ガス拡散による質量流束) を考える。蒸気は壁面側の濃度が低いため、セルから流出し、空気は壁面側の濃度が高いため、セルへ流入する。それをふまえて、蒸気、空気それぞれの拡散質量流束は

$$F_a = -\rho D \frac{\partial Y_a}{\partial z} \quad (8)$$

$$F_s = -\rho D \frac{\partial Y_s}{\partial z} \quad (9)$$

壁面隣接セル内の凝縮による生成項の質量変化と拡散質量流束による質量変化の和を考える。空気に対しては以下となる。

$$\begin{aligned} F_a A + S_a V &= -\rho D \frac{\partial Y_a}{\partial z} A - Y_a \frac{\rho D}{1 - Y_s} \frac{\partial Y_s}{\partial z} \frac{A}{V} V \\ &= -\rho D \frac{\partial Y_a}{\partial z} A + \rho D \frac{\partial Y_a}{\partial z} A = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

となり、生成項として考慮した  $S_a$  とガス拡散による流入する質量流束が釣り合い、正味の空気の質量変化は 0 となっている。一方蒸気に対しては、

$$\begin{aligned} F_s A + S_s V &= -\rho D \frac{\partial Y_s}{\partial z} A - Y_s \frac{\rho D}{1 - Y_s} \frac{\partial Y_s}{\partial z} \frac{A}{V} V \\ &= -\frac{\rho D}{1 - Y_s} \frac{\partial Y_s}{\partial z} A = S_m A \end{aligned} \quad (11)$$

となる。拡散による蒸気流入量と生成項として考慮した  $S_s$  の和は、壁面隣接セル内の水蒸気質量の変化量は凝縮による質量変化量と一致している。

Volumetric Source Term モデルにおいて、各ガス種の質量分率の輸送式に含まれる凝縮による質量変化を表す生成項には、各ガス種の質量分率を乗じる必要がある。これは冷却壁面からの拡散による質量流束と凝縮による質量変化量の整合性をとるためのものと考えられる。

### 3 Face-flux モデル

Face-flux モデルでは凝縮による質量流束 (1) からステファン速度  $U_{stephan}$  を計算する。

$$U_{stephan} = \frac{\dot{m}'''}{\rho} \mathbf{n} \quad (12)$$

$\mathbf{n}$  は壁面に対する単位法線ベクトルである。この速度を冷却壁面の法線方向の速度の境界条件として与える。これにより、質量保存、ガス種の保存、運動量保存、エネルギー保存式に含まれる対流項  $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \phi)$  (ここで  $\phi = 1, Y_s, Y_a, \mathbf{u}, h$ ) として、凝縮による質量変化の影響が考慮される。

一方、Face-flux モデルでも冷却壁面上の水蒸気濃度は低下し、非凝縮ガス濃度は上昇させる。このため、VS モデルと同様、壁面側から壁面隣接セルへの拡散による質量流束が発生する。Face-flux モデルでは、拡散

質量流束は、ステファン速度により移流する量とバランスする。これは非凝縮ガス成分が複数種類存在しても同様である。

## 参考文献

- [1] A. Dehbi et al., “Prediction of steam condensation in the presence of noncondensable gases using a CFD-based approach”, *Nuclear Engineering Design*, 258, 199-210, (2013).
- [2] G.V. Kumar et al., “Implementation of a CFD model for wall condensation in the presence of non-condensable gas mixtures”, *Applied Thermal Engineering*, 187, 116546, (2021).