

噴流の有限要素解析における開境界の扱いの検討

日本大学大学院 学生会員 ○川島 嶺 日本大学 正会員 長谷部 寛

1. 研究背景と目的

大規模な林野火災や市街地での火災においては、風が火災の延焼を促進し、火が広範囲に広がることで甚大な被害をもたらす場合があり、このような被害を予測することの必要性は高い。

しかし、風と火災の連成現象は複雑かつスケールの大きな物理現象であるため、実験的に再現するのが難しい。また、経済面、環境面で頻繁に実験を実施することが難しいため、数値シミュレーションによる予測が有益と考えられる。

本研究室では、これまで風と火災の連成解析法を構築してきた¹⁾。しかし、燃焼に伴う強い上昇流が生じた際、解析領域側方の開境界から強い流れが生じ、発散する課題を有していた。一方、楊らは差分法に基づく2次元自由噴流の解析で、側方境界上で渦が発生することによる発散を防ぐための境界条件を提案した²⁾。本研究における上昇流に伴う発散を防ぐために、上昇流と類似した流れである噴流の解析を対象に、開境界の扱いを検討したので報告する。

2. 解析手法

本研究で用いる基礎方程式は、以下の連続条件式(式(1))、Navier-Stokes方程式(式(2))である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} = b_i \quad (2)$$

ここに、 u_i は流速、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 b_i は物体力である。方程式の離散化は、安定化有限要素法を用いている³⁾。解析対象は、燃焼に伴う上昇流をイメージし、図1に示すように、解析領域を下面のみを壁面とした開放空間とし、下面中

央に上向きの流入流速を与える2次元噴流とした。上方、側方の開境界には直応力、せん断応力を0に規定するTraction-Free境界条件(以下、TF条件)を与えた。TF条件は、次式で表される。

$$\sigma_{ij} n_j = 0 \quad (3)$$

ここで、 σ_{ij} は応力テンソル、 n_j は境界外向きの単位法線ベクトルである。後述のようにTF条件を用いた場合、境界上で発散が生じたことから、数値不安定性を回避する検討を行った。

3. 側方境界条件の検討

前述の発散が側方に与えている境界条件が適切ではないためであると考え、側方境界条件の検討を行った。まず始めに楊らによる差分法に基づく自由噴流の解析で、側方からの発散を防ぐため提案されたSimplified Traction-Free境界条件(以下、STF条件)を適用した。この境界条件は、直応力のみを0とし、せん断応力を規定しない境界条件である。STF条件を有限要素解析に適合するよう修正し、次式の形で実装した。

$$\int_{\Gamma_s} w_i \sigma_{jj} n_j d\Gamma = 0 \quad (4)$$

ここで、 Γ_s は側方境界条件を表す。

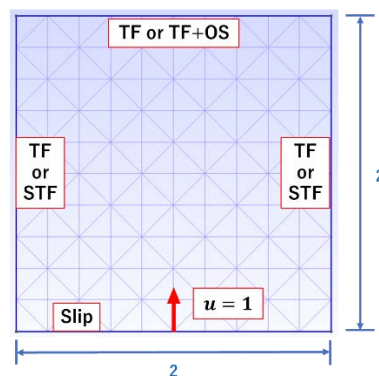


図1 解析領域と境界条件

キーワード 数値流体解析, 安定化有限要素法, STF条件, 流出境界安定化項

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1丁目8-14 日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻

解析の結果、図2に示す側方境界にTF条件を適用した結果と図3に示すSTF条件を適用した結果では、どちらも領域上方で発生する急激な流速上昇により発散し、差が見られなかった。原因として、STF条件を有限要素解析に適用するにあたって仮定を加えていることや与えられる境界積分項の値が小さいことが考えられる。一方で、解析結果を見ると、領域上方の流出境界において強い逆流が生じ発散に至ることが分かった。そこで次章で流出境界に対する安定化を検討する。

4. 流出境界に対する安定化

Moghadamらは、血流の流体構造連成解析における境界上の数値不安定性回避のために、逆流が生じた時に抵抗力を作用させる流出境界安定化項を提案した⁴⁾。流出境界に対する安定化の検討として、本研究の解析対象の上方境界に流出境界安定化項を適用する。流出境界安定化項は以下の式(5)、式(6)である。

$$-\beta \int_{\Gamma_o} w_i(u_i n_i)_- u_i d\Gamma \quad (5)$$

$$(u_i n_i)_- = \frac{u_i n_i - |u_i n_i|}{2} = \begin{cases} u_i n_i & (u_i n_i < 0) \\ 0 & (u_i n_i \geq 0) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 β は安定化パラメータ、 Γ_o は流出境界である。安定化パラメータの値は2.0とする。

本研究の解析対象の上方境界に流出境界安定化項を適用した解析結果を図4に示す。解析途中で発散したが、上方からの発散を防いでいることから流出境界安定化項による効果が確認できた。前述の解析不安定性の原因がメッシュの分割が粗く、流れを捉えきれていないことが原因であると考え、メッシュを細分化し、領域一辺あたり10分割から50分割へ変更した。

また、上方境界における流れの変動が側方境界にかかることによる数値不安定性を考慮し、解析領域を縦横2倍に拡張した。変更した解析対象の上方境界に流出境界安定化項を適用し、解析した結果を図5に示す。図から分かるように、解析が発散することなく、安定して上昇する流れを確認することがで

きた。

5. まとめ

本研究では、2次元噴流を対象として、従来の解析における開境界上の数値不安定性を回避するために、開境界の扱いの検討を行った。上方境界で発生する急激な流速上昇に対する安定化のための境界条件を適用し、また、解析メッシュの分割を細分化し、解析領域を拡張した結果、上昇する流れの解析を安定して行うことができた。

参考文献

- 1) 斎藤ら：林野火災解析法の構築を目的とした境界条件と解析領域の検討，第41回土木学会関東支部技術研究発表会，I-13，2014.
- 2) 楊ら：自由噴流の側方境界条件の検討，土木学会論文集，Vol. 73，No. 2，pp.587-596，2017.
- 3) 日本計算工学会編：有限要素法による流れのシミュレーション，丸善出版，2017.
- 4) M.E.Moghadam, *et al.*: A comparison of outlet boundary treatments for prevention of backflow divergence with relevance to blood flow simulations, *Comput.Mech.*, Vol.48, pp.277-291, 2011.

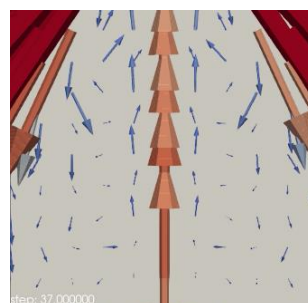


図2 側方境界にTF条件を用いた結果

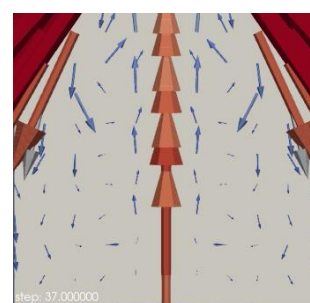


図3 側方境界にSTF条件を用いた結果

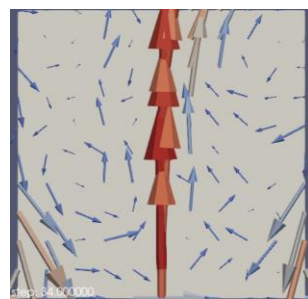


図4 上方境界に流出境界安定化項を用いた結果

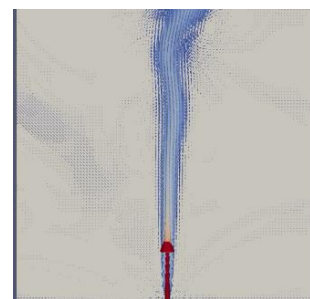


図5 領域サイズとメッシュを改良した結果