大気環境中における遷音速翼周り流れの
数値シミュレーションNumerical Simulation of Transonic Viscous Flow around Wing
in Atmospheric Conditions

○ 佐藤 大悟 (東北大・院) 正 山本 悟 (東北大) 正 申 炳録 (東北大)

Daigo SATO, Dept. of Aeronautics and Space Engineering, Tohoku Univ., Sendai 980-8579, JAPAN
Satoru YAMAMOTO, Dept. of Aeronautics and Space Engineering, Tohoku Univ., Sendai 980-8579, JAPAN
Byeong Rog SHIN, Institute of Fluid Science, Tohoku University, Sendai 980-8577, JAPAN

Key Words: CFD, Transonic Flows, Condensation, Heterogeneous Nucleation

1. 緒言

高湿度の大気中を飛行する航空機の周りでは空気中の水蒸気が凝縮し、視覚的には飛行機雲として観察される。水蒸気の凝縮は圧力や温度の変化を伴うため、揚抗比の低下など翼性能に影響を与える。凝縮現象が流れ場や翼性能に影響を及ぼすという結果がこれまでに報告されている。(1)-(3)

これまでの多くの研究では凝縮の際に核を伴わない均一核生成による非平衡凝縮が対象であり、又、大気条件の違いによる凝縮現象と流れ場への影響はほとんど考慮されてこなかった。

本研究では均一核生成並びに凝縮核を伴う不均一核生成による凝縮を伴う遷音速粘性流れを計算することにより、実際の大気条件下で起こりうる凝縮の現象とこれが流れ場及び翼性能に及ぼす影響について考察し、航空機翼周りの遷音速流れの計算において、不均一核生成による凝縮を考慮する必要があるという点を計算結果により証明する。

2. 基礎方程式

基礎方程式として、質量、運動量、エネルギー保存式に新たに蒸気の質量、液相の質量、液滴の数密度の保存式を加えた式を用いた。一般曲線座標系では次のように表される。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial \xi_i} + S + H = 0 \quad (1)$$

ここで、 Q は未知変数ベクトル、 F は流束ベクトル、 S は粘性項、そして H は凝縮・蒸発に伴う生成項である。

生成項で用いられる液相の質量生成率は、古典凝縮論(4)に基づき凝縮核生成と液滴の成長による質量増加の和で表され以下に示ようになる。

$$\Gamma = \frac{4}{3}\pi\rho_l l r_o^3 + 4\pi\rho_l n r^2 \frac{dr}{dt} \quad (2)$$

ここで、 $l, r_o, r, n, \frac{dr}{dt}$ はそれぞれ凝縮核生成率、

Kelvin-Helmholtz の凝縮核臨界半径、液滴の平均半径、単位体積当たりの液滴の個数及び液滴の成長率である。不均一核生成の場合は上式右辺が第2項のみとなる。

3. 数値解法

本研究においては、時間積分に LU-SGS 法、空間差分には Roe の流束差分法に 4 次精度コンパクト MUSCL TVD ス

キームを適用した。粘性項には 2 次精度中心差分を用いた。また、乱流モデルとして Baldwin-Lomax モデル(5)を用いた。

4. 計算結果

二次元 NACA0012 翼周りの流れを数値計算した。計算条件は迎角 2° 、主流マッハ数 0.75 とする。翼弦長を 1.5m とし、相対湿度 90%とした場合の翼表面圧力係数分布を理想気体を仮定した結果と共に Fig.1 に示す。均一核生成ならびに不均一核生成による凝縮を考慮し、凝縮核の数密度を $1.0 \times 10^{12}/\text{m}^3$ 、半径を $0.1 \mu\text{m}$ とした場合の結果について示す。湿度を考慮し凝縮が伴う場合、理想気体を仮定した場合と比べて分布が異なり、特に潜熱の影響により衝撃波上流での圧力が相対的に高くなっている。また、不均一核生成による場合には、均一核生成による場合と比べてより上流から圧力が高くなり衝撃波位置が下流に移動していることなど、凝縮の形態によっても圧力分布に違いがみられる。

Fig.1 Pressure coefficient distributions on the airfoil surface

参考文献

- (1) Schnerr, G.H. and Dohrmann, U., *AIAA J.*, Vol.28, No.7, 1990, pp.1187-1193.
- (2) 入屋明広・山本悟・大宮司久明, 日本機械学会論文集 B 編, 62 巻 603 号, 1996, pp.3845-3859.
- (3) Yamamoto, S., Hagari, H. and Murayama, M., *Trans. JSASS*, Vol. 42, No.138, 2000, pp.182-189.
- (4) Frenkel, J., *Kinetic Theory of Liquids*, 1955, Dover.
- (5) Baldwin, B. S. and Lomax, H., *AIAA Paper* 78-257, 1978.