日本流体力学会 年会2002 C121

着氷現象の数値シミュレーション

Numerical Simulation of Ice Accretion Phenomena

○葛西 真吾 (東理大), 戸田 和之 (東理大), 山本 誠 (東理大)

Shingo KASAI* and Kazuyuki TODA** and Makoto YAMAMOTO**

*Graduate School of Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601, Japan

**Tokyo University of Scinece, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601, Japan

Ice accretion phenomenon occurs on an aircraft or its enigine fan. It sometimes leads to the decrease of aerdynemic performance of the wing or serious damage to the engine system. We have developed the simulation cord for ice accretion on a wing, in which the interaction between accumulating process and ambient flowfield is taken into account by conducting the NS computation for every ice accreted shape of the wing with the ice growing process. Previously, the predictability of our cord for rime ice was demonstrated, but the cord failed for the simulation of glaze ice, which has more complicated shape and rougher surface. In this study, the growing process of glaze ice is mimiced with modified thermodynamic model. Reasonable effects of the modifications are presented, comparing the accretion shape to that predicted by LEWICE cord developed in NASA.

着氷とは、気体中の過冷却水滴が物体に衝突することで凍結 して付着する現象であり、過冷却水滴の温度、大きさ、量、流 速により3つの形態が存在する。それらは、表面が滑らかな透 明または半透明の氷の膜である雨氷型着氷、気温が雨氷の場合 ほどではないが比較的高く、堅くて半透明な粗氷型着氷、そし て小さい過冷却水滴が物体に衝突し、瞬時に凍結して空気が入 ることで白く見える樹氷型着氷である。航空機における着氷現 象は主翼やエンジンファン等で発生し、空力性能の低下や剥離 した氷片による損傷といった問題を引き起こす。従って、着氷 防護システムの構築を目的に、着氷シミュレーションコードの 開発が LEWICE 研究所 (NASA)¹⁾ をはじめ、欧米各国で試み られている。LEWICE コードは特定の条件に対して優れた予測 性能を有しているが、流れ場との相互干渉が考慮されていない ため、原理的に十分とはいえず、より適応範囲の広い着氷コー ドの開発が求められている。

著者らは流れ場計算にナビエ・ストークス方程式を用い、着 氷進行過程における流れ場構造の時間変化を予測するコードの 開発を行ってきた。先の研究⁴⁾において、氷層が形成された翼 周りの流れ場をより厳密に捉えることで、樹氷型着氷を再現で きることを示した。しかし、着氷現象において深刻な被害を及 ぼすとされる雨氷型着氷の成長過程を再現するにはいたってい なかった。本研究では、着氷量を決定するための熱力学モデル を改良することにより、雨氷型着氷の複雑形状を再現すること を目的とする。



Fig. 1: Flow chart of ice accretion simulation

2. 着氷計算手法

本研究で用いた着氷現象に対する計算手法は、流れ場に依存 した着氷形状の計算と、その着氷形状に対する流れ場計算の反 復作業からなっている。まず、初期形状として着氷していない 翼周りの流れ場を計算し、水滴軌道計算によって翼面に対する 水滴衝突特性を得る。次に熱力学計算を行うことによって翼面 上における氷層の成長率を算出し、着氷形状を決定する。さら に、着氷した翼面に沿って計算格子を再構成し、再び、流れ場 計算を実行する。この手順を求められる着氷時間に達するまで 繰り返すことにより、氷層の成長過程を再現している。図1に 本計算手法のフローチャートを示す。また、以下にそれぞれの 計算手法の詳細を説明する。

2.1 流れ場計算本研究では流れ場を2次元圧縮性乱 流と仮定し、時間平均を施した質量、運動量、エネルギの保存 式を支配方程式として用いている。乱流モデルは、Launder-Spalding(1974)による高レイノルズ数型 *k-c*モデルに Kato-Launder(1993)による修正を施して導入している。

2.2 水滴軌道計算 水滴軌道計算は翼面上の衝突限界点 と収集効率を得るために行われる。収集効率は、衝突領域内の 固体表面上にある水滴の質量分布を表すパラメータである。水 滴軌道はラングランジュ的に求めているが、この時水滴に作用 する力は抗力と周囲流体の圧力勾配による力の二つとした。次 式に粒子の運動量方程式を示す。

$$m_p \frac{dv_i}{dt} = R + m_f \frac{Du_i}{Dt} \tag{1}$$

ここで、 m_p, m_f は粒子、流体の質量、 v_i, u_i は粒子、流体の 速度、R は抗力である。

2.3 熱力学計算 本コードでは、格子1セルを検査体積 とし、そこでの質量バランスとエネルギバランスを計算するこ とによって、検査体積内に堆積する氷の量を決定している。検 査体積に流入する、または検査体積から流出する熱流束の概略 を図2に示す。検査体積における質量バランス、エネルギバラ ンスは次式となる。

$$M_{im} + M_{in} + M_{va} + M_{ou} + M_{ac} = 0 \tag{2}$$

$$E_{im} + E_{in} + E_{va} + E_{ou} + E_{ac} + q_f + q_c = 0 \tag{3}$$

ここで、*M、E*はそれぞれ質量流量、エネルギを示している。 また、添え字_{im}は衝突する水滴、_{in}は隣り合う検査体積から 流れてくる水、_{va}は蒸発もしくは昇華する水、_{ou}は検査体積 から流れ出る水、ac は翼面上で凍る水を示し、qf は摩擦によっ て空気から得られる熱量、qc は熱の対流による損失を表してい る。先の研究で用いた熱力学モデルでは、雨氷型着氷に対して 空気 - 氷層間の熱伝達量を過小評価してしまっていた。熱の伝 達量は界面の表面積に依存するが、先の研究で対象とした樹氷 型着氷と異なり、雨氷型着氷は表面が粗いため、外形が同様で も熱の伝達量が増加すると考えられる。数値計算上、氷層の表 面粗さまで再現することは困難であるため、熱伝達計算におい て粗さの影響をモデル化する必要がある。そこで、本研究では 熱伝達率にモデル定数を掛けることにより、粗さの効果を反映 させた。なお、モデル定数は実験データとの比較により決定し ている。

3. 計算結果および考察

本研究で用いた計算条件を表1に示す。ここで α は迎え角、 U_0 は主流速度、Dは水滴直径、 T_0 は大気温度、LWCは水分 含有量である。これらの条件は、LEWICE コード構築に際し て使用されたものであり、同条件下でLEWICE コードは高い 再現性を示している。

Tab	le1:Comj	putational	Conditions

$\alpha(\circ)$	$U_0(m/s)$	$D(\mu m)$	$T_0(^{\circ}\mathbb{C})$	$LWC(g/m^3)$
4.0	67.05	20.0	-7.7	2.1

まず、t=160[s] の翼前縁部分の速度ベクトルを図3に示す。 この結果より、本コードが定性的に妥当な流れ場を予測してい ることが分かる。前縁の凸部分は速度が速くなっており、凹の 部分は速度が遅くなっている。よって、せん断速度を考慮した 熱力学計算の寄与により、速度の遅い部分ではランバック量が 減り、ますます前縁部分に着水していくと推測される。40[s] 毎 の着水進行過程を図4に示す。前縁部分の着水は幅を広げるこ ともなく上流方向に成長しており、先の推測を実証する結果と なっている。









次に、LEWICE コードとの形状比較を図5に示す。本研究 で施した熱力学モデルの修正によって、これまで予測できてい なかった着氷部両端の凸部が再現されており、本修正の有効性 が伺える。しかしながら、修正モデルは着氷量を過大予測する 傾向にある。衝突した水滴は翼、または氷層上を凍結しながら 対流するが、この向きは流れ場のせん断速度と一致する。従っ て、着氷領域上下の凸部からのランバックは殆どなく、この間 に堆積した氷層は衝突量と蒸発量にのみ依存することとなる。 先の研究において収集効率の再現性は検証されているため、着 氷量の過大予測は蒸発量の見積もりに問題があるものと考えら れる。蒸発量の算出には多くの経験式が含まれているため、こ れらを改善することにより、着氷形状の再現が向上するものと 思われる。

4. 結 言

- 1. 氷層の表面粗さ効果を熱力学モデルに反映することにより、 雨氷型着氷の再現性が向上した。
- 2. 着氷形状に対する予測性能の向上には、蒸発量の見積もり 等、更なる改良が必要である。

引用文献

- 1. Ruff,G.A.,and Berkowitz, B.:User's Manual for the NASA Lewis Ice Accretion Prediction Code LEWICE,NASA CR-185-129,May 1990
- 2. P.Tran et al:Ice Accretion on Aircraft Wings with Thermodynamic Effects, AIAA 94-0605 1994
- 3. B.E.Launder and D.B.Spalding: The Numerical Computation of turbulent flows, Com.Meth. Appl. Mech. Eng. Vol.3, pp 269-289 1974
- 4. Kunihito ONA:Numerical Simulation of Ice Accretion in Jet Engine Inlet, Isromac, May 2000



Fig. 3: Velocity vectors at t=160[s]

