

# 着氷現象のマルチフィジックス・モデリング

*Multi-Physics Modeling for Ice Accretion Phenomena*

---

東京理科大学  
山本 誠

*Tokyo University of Science*  
*Makoto Yamamoto*

## 内容

---

- 研究背景
- 数値計算手法
- 検証
- FEGVにおける着氷シミュレーション
- まとめ

## 研究背景

- 着氷現象は過冷却水滴が固体表面に衝突することで発生



- 比較的低い温度で発生
- 水滴は衝突点で瞬時に凍る

Rime Ice (霧氷)



- 比較的高い温度で発生
- 衝突した水滴は固体表面を流れつつ凍る (Runback)

Glaze Ice (雨水)

Ref. <http://www.nasa.gov/centers/glenn/home/index.html>

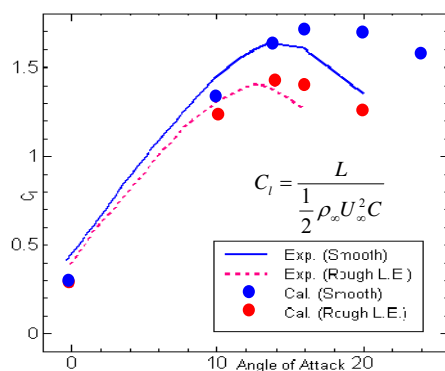
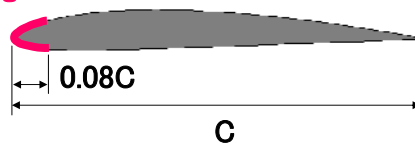
- 着氷の発生箇所

航空機, 電線, 風車, 自動車等

→ 主翼や尾翼, ファン, コンプレッサーと全体的に発生

## 翼の空力性能への影響

Rough



Abbott and von Doenhoff (1959)

- 翼弦長  $C$  : 1.33 [m]
- 翼型 : NACA4412
- 静温 : 293 [K]
- 静圧 :  $1.0 \times 10^5$  [Pa]
- 粗さ要素高さ : 0.5 [mm]
- 粗さの範囲 : 前縁から  $0.08C$

微小な粗さでも空力性能には大きく影響する

## 研究背景

### ■ ジェットエンジンファン翼における着氷

- ✦ エンジンに入る空気の流れを乱し、作動不調を誘発
- ✦ はく離した氷片によるエンジン内部の損傷



エンジンファンへの着氷

#### 着氷試験を行う上での問題点

- 気象条件を容易には再現できない
- 実験設備に多大なコストを要する
- 飛行テストの危険性

様々な気象条件、形状に  
適用可能な数値シミュレーション  
が求められる

#### 着氷シミュレーションコードの開発により

- 設計・開発段階で着氷過程を再現可能
- 開発初期段階で性能低下を低減する対策が取れる

➡ 設計・開発時間、開発コストの削減

## 内容

- 研究背景
- 数値計算手法
- 検証
- FEGVにおける着氷シミュレーション
- まとめ

## モデル化すべき物理現象

### ■ 流体挙動

### ■ 水滴挙動

飛行軌道、シェディング、スプラッシュ

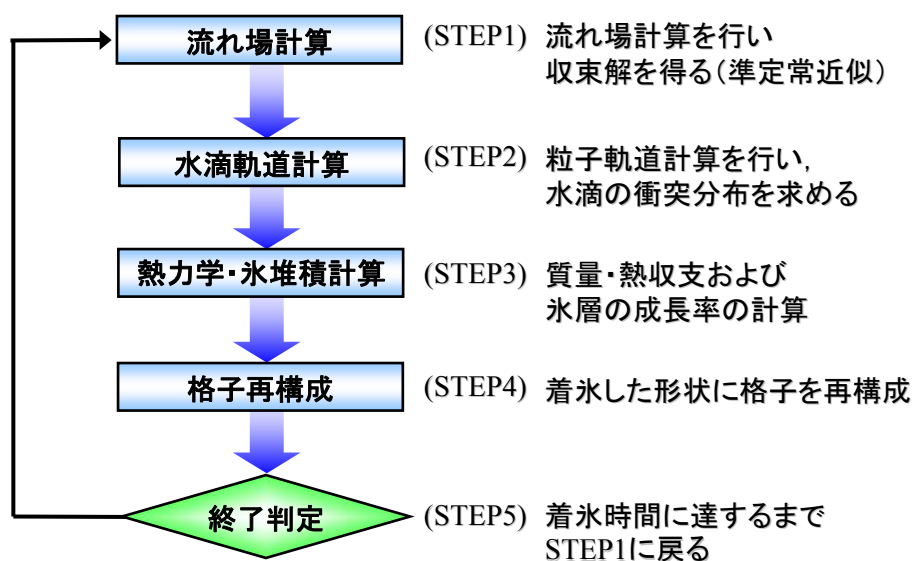
### ■ 氷層形成プロセス

質量保存、エネルギー保存、着氷量

### ■ 壁面形状変化

典型的なマルチフィジックス現象

## 計算アルゴリズム



## モデル化すべき物理現象

### ■ 流体挙動

### ■ 水滴挙動

飛行軌道、シェディング、スプラッシュ

### ■ 氷層形成プロセス

質量保存、エネルギー保存、氷層成長

### ■ 壁面形状変化

## 流れ場計算

### ✦ 流れ場を3次元圧縮性乱流と仮定

#### □ 支配方程式 ( RANS )

- 連続の式, ナビエ・ストークス方程式, エネルギー式

#### □ 乱流モデル

- 高レイノルズ数型  $k-\epsilon$  モデル (Launder-Spalding , 1974)
- 遷移モデルは未使用(全領域乱流)

#### □ 離散化手法

- 非粘性項 ... 2次精度風上型TVDスキーム (Yee-Harten,1987)
- 粘性項 ... 2次精度中心差分
- 時間項 ... 4段階 Runge-Kutta 法

## 氷表面粗さの考慮

### ■ 粗さ効果を付加した壁関数

$$k_s^+ = \frac{u_\tau k_s}{\nu} \quad k_s^+ \text{ が粘性底層内: 滑面}$$

粘性底層外: 粗面

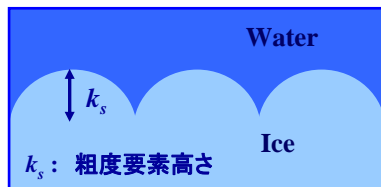
$k_s^+ > 4$  ( $\approx 11.63/3$ ) のとき粗面になると仮定

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y^+}{k_s^+} + A_r$$

$Ar$  の値は Nikuradse (1933) の実験より

$4 < k_s^+ < 70$  (粗滑遷移領域) のとき  $Ar = 9.525$

$k_s^+ > 70$  (完全粗面領域) のとき  $Ar = 8.5$

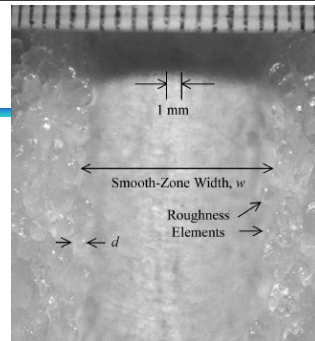


Shin & Bond による補正 (1992)

$$k_s = k_0 \times 0.6839 \times (0.047T_0 - 11.27) \times (0.571 + 0.246 \cdot LWC + 1.257 \cdot LWC^2)$$

$$k_0 = 0.628 \text{ [mm]} \quad T_0: \text{壁面温度}$$

Roughness Model



## モデル化すべき物理現象

### ■ 流体挙動

### ■ 水滴挙動

飛行軌道、シェディング、スプラッシュ

### ■ 氷層形成プロセス

質量保存、エネルギー保存、氷層成長

### ■ 壁面形状変化

## 水滴軌道計算(ラグランジュ法)

### Droplet Motion

#### BASSET-BOUSSINESQ-OSEEN (BBO) EQUATION

$$\begin{aligned}
 m_p \frac{dv_i}{dt} = & (m_p - m_f)g_i && \text{:Body Force} && \text{Mei(1996)} \\
 & + m_f \frac{Du_i}{Dt} && \text{:Pressure Gradient} \\
 & - \frac{1}{2} m_f \left( \frac{dv_i}{dt} - \frac{Du_i}{Dt} - \frac{1}{10} a^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right) && \text{:Additional Mass} \\
 & - 6\pi a \mu \phi \left( v_i - u_i - \frac{1}{6} a^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right) && \text{:Drag} \\
 & - 6\pi a^2 \mu \int_0^t d\tau \left( \frac{\frac{d}{d\tau} \left( v_i - u_i - \frac{1}{6} a^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right)}{(\pi \nu (t - \tau))^{1/2}} \right) && \text{:Basset History} \\
 & + F_{\text{etc}} && \text{:Others}
 \end{aligned}$$

$m_p$  : Particle Mass  
 $m_f$  : Fluid Mass  
 $a$  : Particle Radius  
 $v_i$  : Particle Velocity  
 $u_i$  : Fluid Velocity

## 水滴軌道計算(ラグランジュ法)

### 仮定

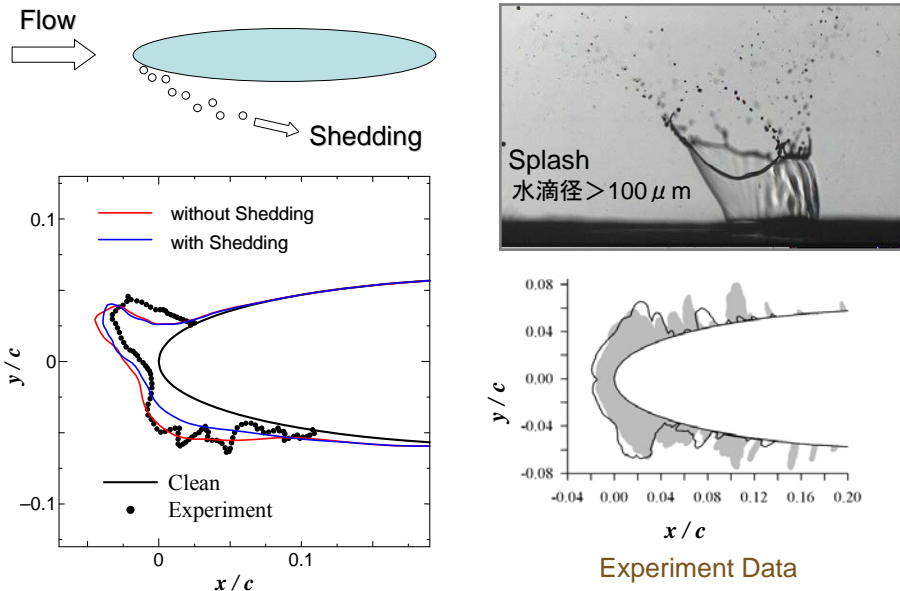
- 水滴は球形で変形しない
- 水滴に働く力は抗力のみ
- 水滴間衝突は無視
- 水滴は気体に影響を及ぼさない
- 入口における水滴の速度は気体の速度と等しい

■ 運動方程式: 
$$\frac{du_p}{dt} = -\frac{3}{8} C_d \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{1}{r_p} |u_f - u_p|^2$$

$m_p$  : 粒子質量  $u_p$  : 粒子速度  $\rho_p$  : 粒子密度  
 $r_p$  : 粒子半径  $\rho_f$  : 流体密度  $u_f$  : 流体速度

抗力係数: 
$$C_d = \frac{24}{Re_d} \left\{ 1 + 0.15 Re_d^{0.687} \right\} \quad Re_d : \text{粒子レイノルズ数}$$

## シェディング、スプラッシュ

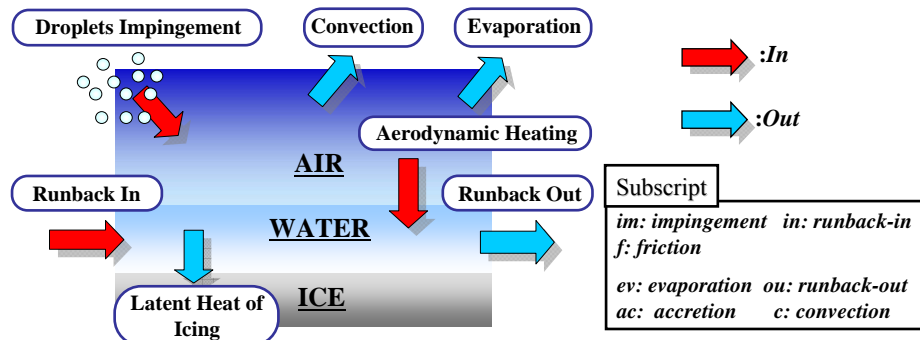


## モデル化すべき物理現象

- 流体挙動
- 水滴挙動
  - 飛行軌道、シェディング、スプラッシュ
- 氷層形成プロセス
  - 質量保存、エネルギー保存、氷層成長
- 壁面形状変化



## 質量・エネルギー保存、氷堆積計算



*Schematic of Heat Balance for Control Volume*

**Mass Balance**  $m_{im} + m_{in} = m_{ev} + m_{ou} + m_{ac}$

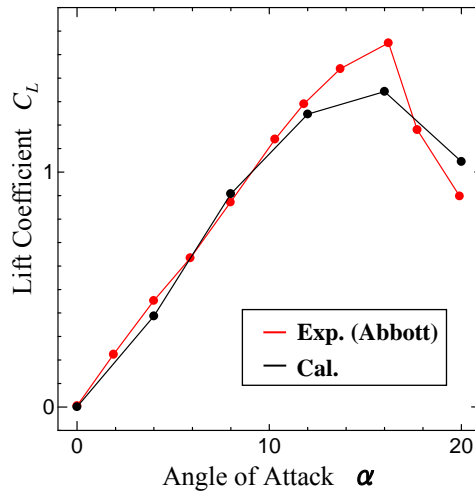
**Energy Balance**  $E_{im} + E_{in} + q_f = E_{ev} + E_{ou} + E_{ac} + q_c$

**Ice Volume [m<sup>3</sup>]**  $dv = m_{ac} \Delta t / \rho_{ice}$

## 内容

- 研究背景
- 数値計算手法
- 検証
- FEGVにおける着氷シミュレーション
- まとめ

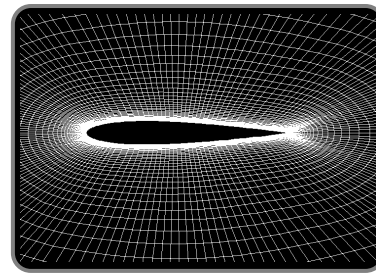
## 予測精度の検証(流れ場)



計算対象 NACA0012 ( $C=0.53$  [m])

計算条件  $Re : 3.0 \times 10^5$

計算格子



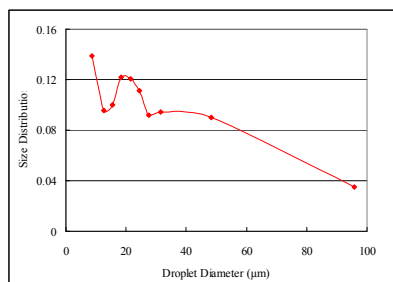
O-Type Grid  
181 × 81

## 予測精度の検証(着氷)

Computational Conditions

	AOA(deg)	Velocity(m/s)	Temperature(°C)	LWC(g/m <sup>3</sup> )	MVD( $\mu$ m)	Ice Type
Case 1	4.00	58.10	-27.8	1.3	20.0	Rime
Case 2	4.00	58.10	-19.8	1.3	20.0	Mix
Case 3	4.00	58.10	-13.9	1.3	20.0	Mix
Case 4	4.00	58.10	-6.7	1.3	20.0	Graze

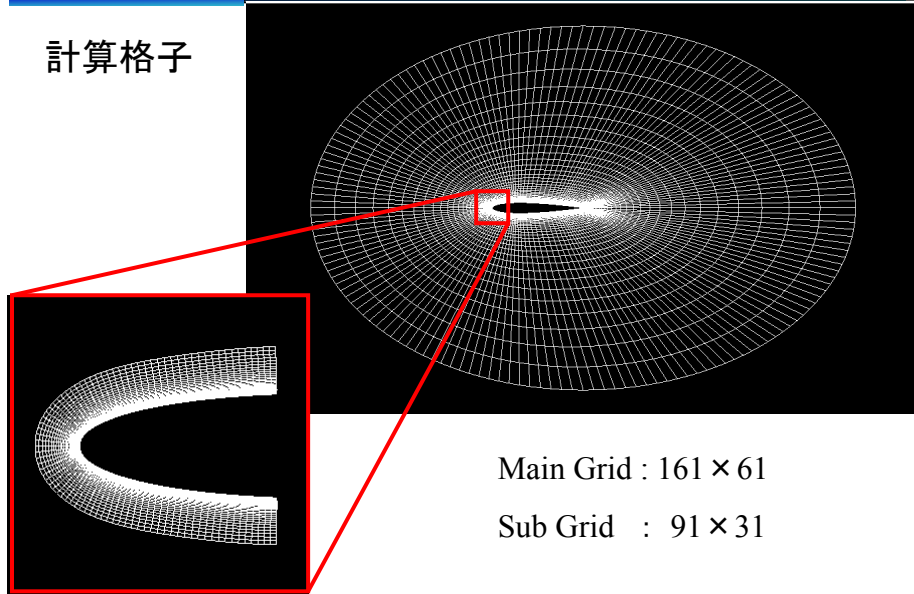
AOA: Attack of Angle 、 LWC: Liquid Water Content 、 MVD: Median Volume Diameter



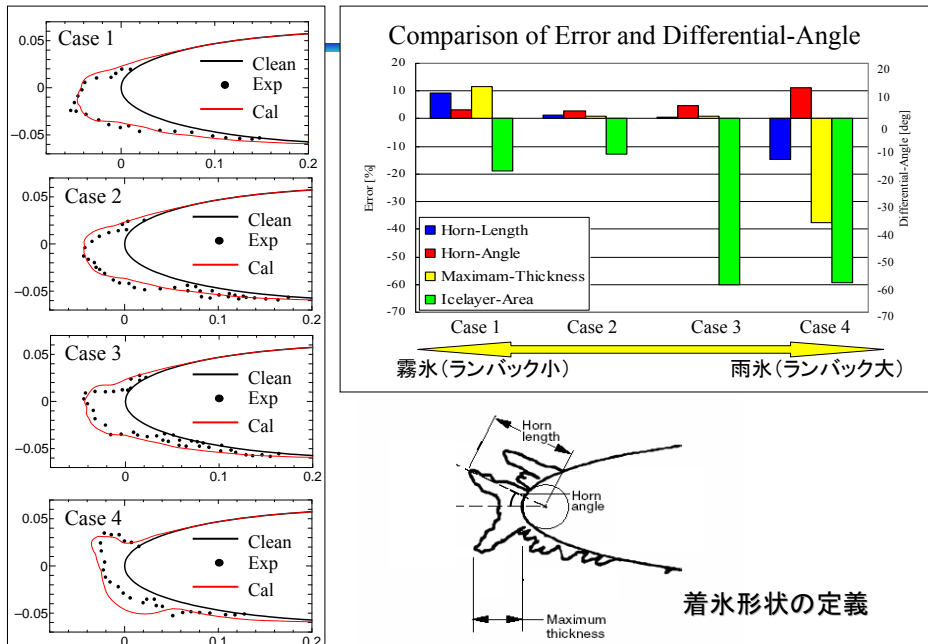
Particle Diameter Distribution  
Wright et.al (2005)

## 予測精度の検証(着氷)

計算格子

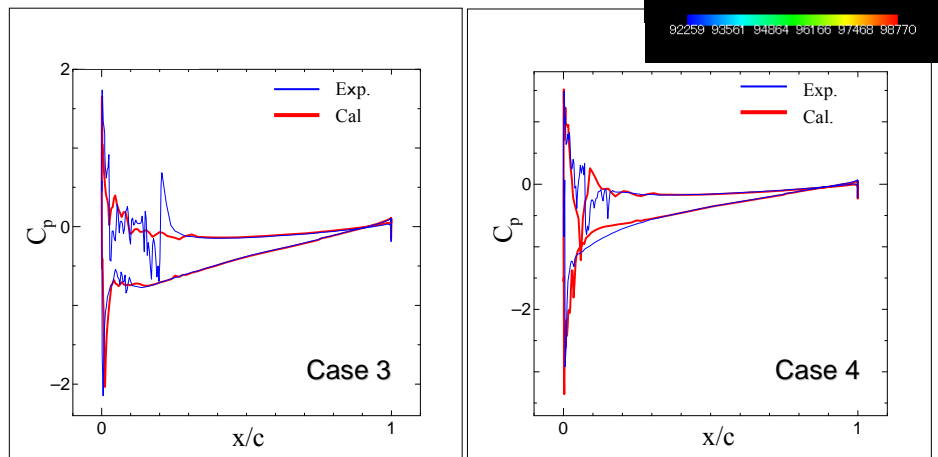


## 予測精度の検証(着氷)



## 予測精度の検証(着氷)

### Cp分布の比較



## まとめ

- 今後はマルチフィジックス・シミュレーションが必要
- 着氷コードを開発
- Rime, Glaze, Mixed Ice形状を妥当に予測可能
- 翼の空力性能変化を妥当に予測可能
- Shedding, Splashingのモデル化はOn-Going