



JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点

第13回 シンポジウム ポスター発表 EX21203

直交格子法による移動境界問題の解法に関する研究

高橋俊(東海大学), 佐々木大輔(金沢工業大学)

目次

1. 気液混相流解析 : ガソリンエンジンオイル
2. 気液液混相流解析 : ディーゼルエンジンオイル
3. 移動境界解析 : 飛翔昆虫の翼解析

目次

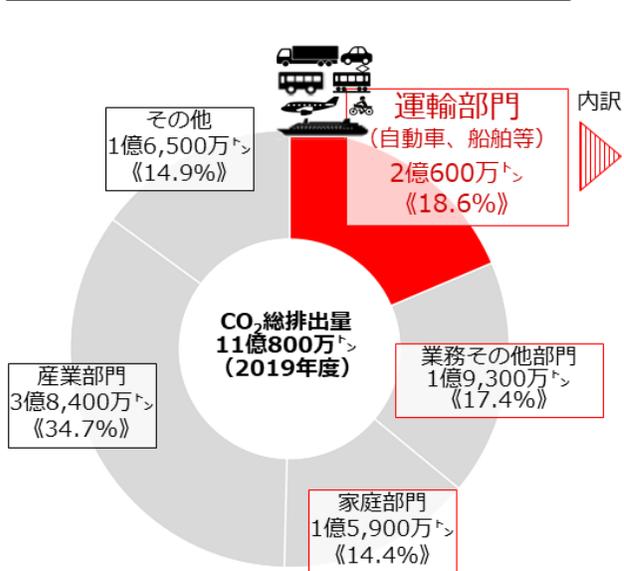
- 1. 気液混相流解析** : **ガソリンエンジンオイル**
2. 固液混相流解析 : ディーゼルエンジンオイル
3. 移動境界解析 : 飛翔昆虫の翼解析

研究背景

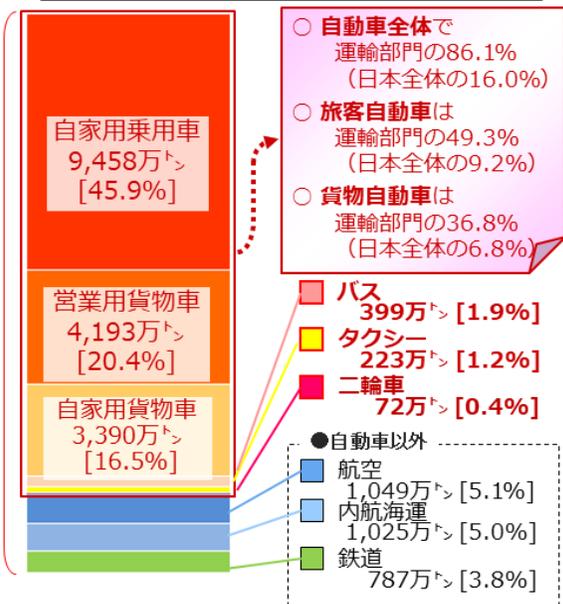
1. 気液混相流解析: ガソリンエンジンオイル

運輸部門における二酸化炭素排出量

我が国の各部門におけるCO₂排出量

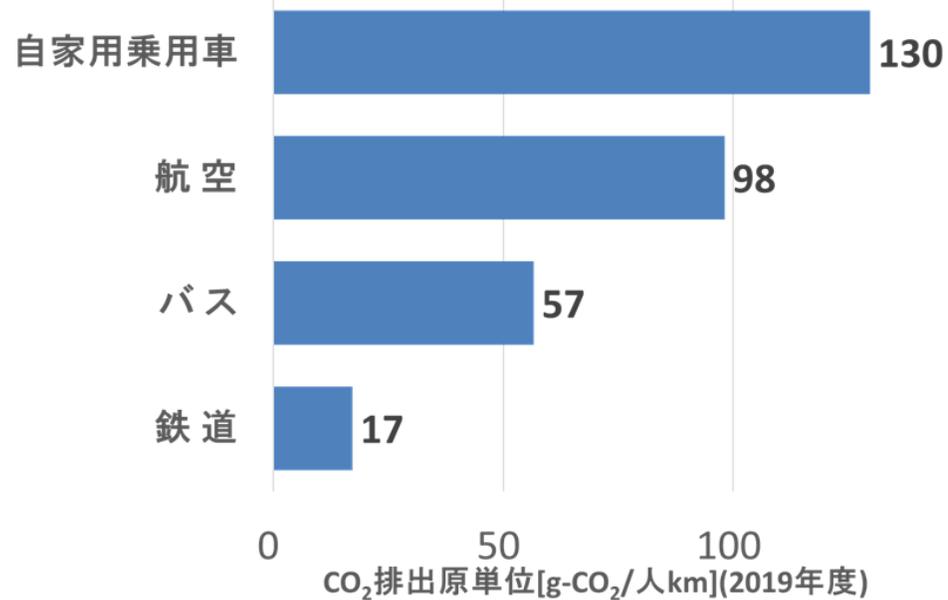


運輸部門におけるCO₂排出量



※ 端数処理の関係上、合計の数値が一致しない場合がある。
 ※ 電気事業者の発電に伴う排出量、熱供給事業者の熱発生に伴う排出量は、それぞれの消費量に応じて最終需要部門に配分。
 ※ 温室効果ガスインベントリオフィス「日本の温室効果ガス排出量データ (1990~2019年度) 確報値」より国土省環境政策課作成。
 ※ 二輪車は2015年度確報値までは「業務その他部門」に含まれていたが、2016年度確報値から独立項目として運輸部門に算定。

輸送量当たりの二酸化炭素の排出量(旅客)

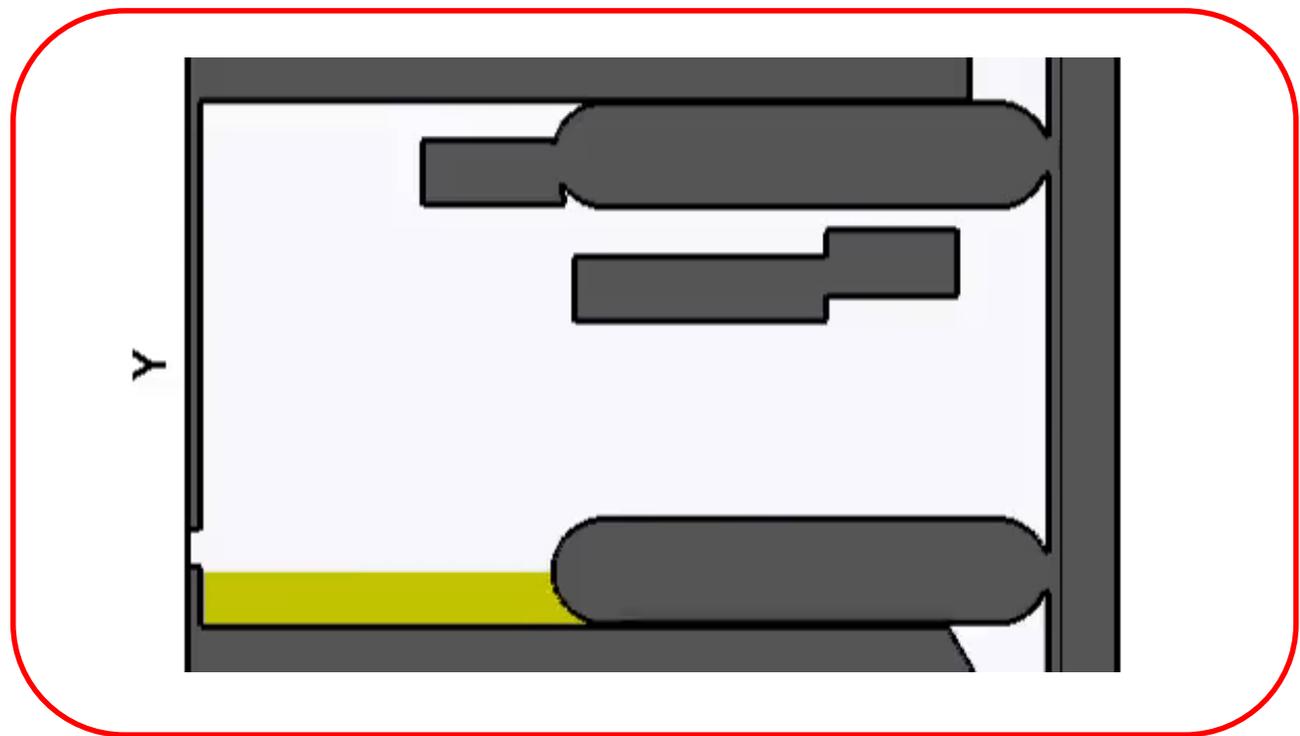
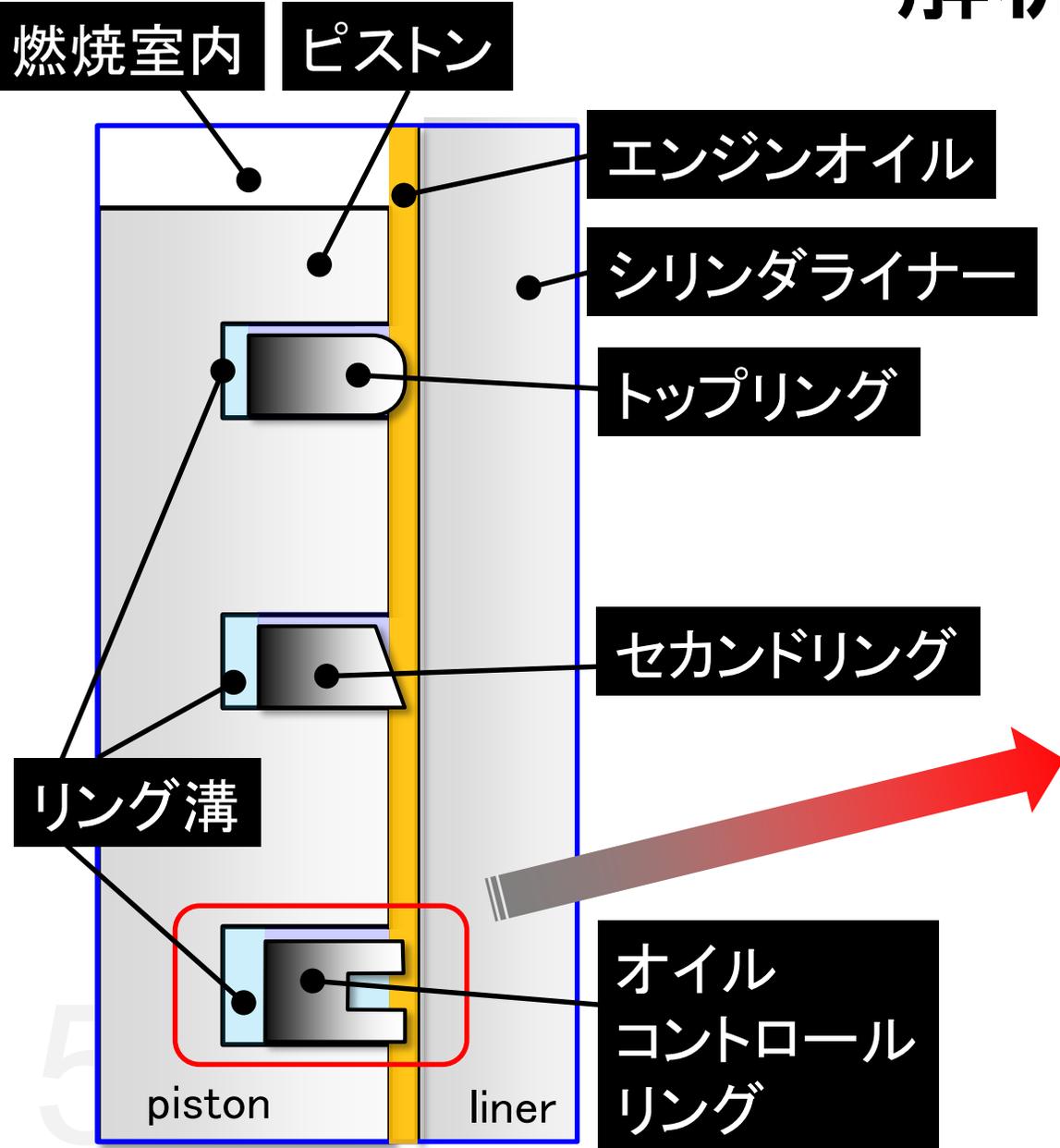


※ 温室効果ガスインベントリオフィス: 「日本の温室効果ガス排出量データ」、国土交通省: 「自動車輸送統計」、「航空輸送統計」、「鉄道輸送統計」より、国土交通省環境政策課作成

- 自動車は日本全体のCO₂排出量の16%を占める
- 今後、より一層の自動車燃費向上の必要性

解析モデル

3ピースオイルリングの場合

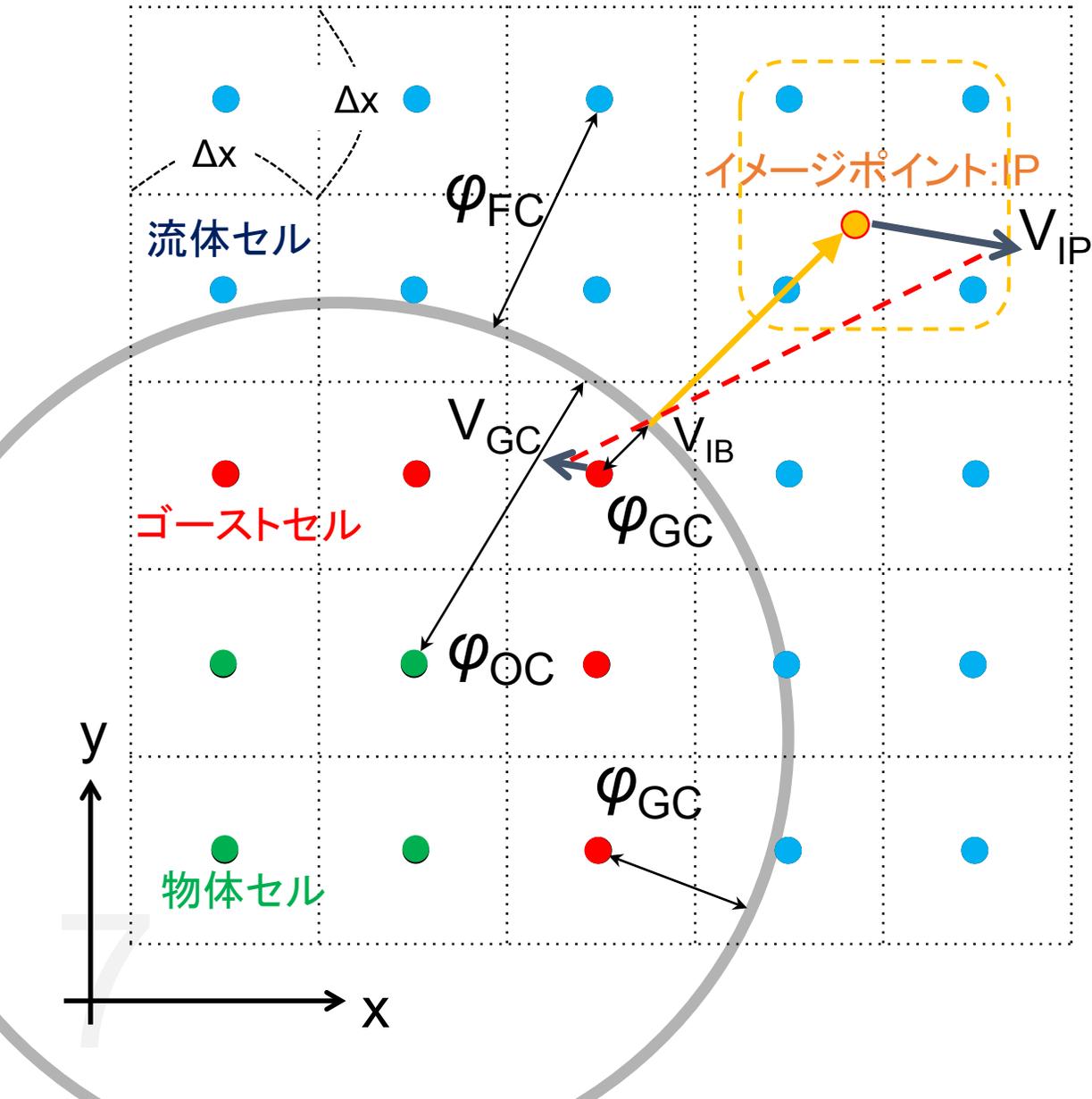


- ◆ 空気と潤滑油の気液二相流解析
- ◆ 潤滑油は下部(スカート)から流入
- ◆ ピストン加速度影響で液滴が飛散

計算手法

支配方程式	非圧縮性Navier-Stokes方程式など
乱流モデル	無し(層流計算)
対流項(空間精度)	5次精度WENO
粘性項(空間精度)	2次精度中心差分近似
対流項(時間精度)	2次精度Adams-Bashforth陽解法／ 2次精度Crank-Nicolson陰解法
粘性項(時間精度)	2次精度Crank-Nicolson陰解法
速度・圧力連成	Fractional step法
圧力反復解法	BiCGStab法
物体境界	ゴーストセル法
気液界面	ゴーストフルード法
計算格子	等間隔直交格子

埋め込み境界法 (ゴーストセル法)



1. レベルセット関数を定義
2. セルを種類別に区分
3. プローブを伸ばす
4. イメージポイントを定義
5. IPに値を内挿
6. GCの値を外挿

任意の物体境界を容易に定義

- Mittal, R., et al., JCP 227 (2008)
- Takahashi, S., et al., J. Appl. Math., 2013 (2013)

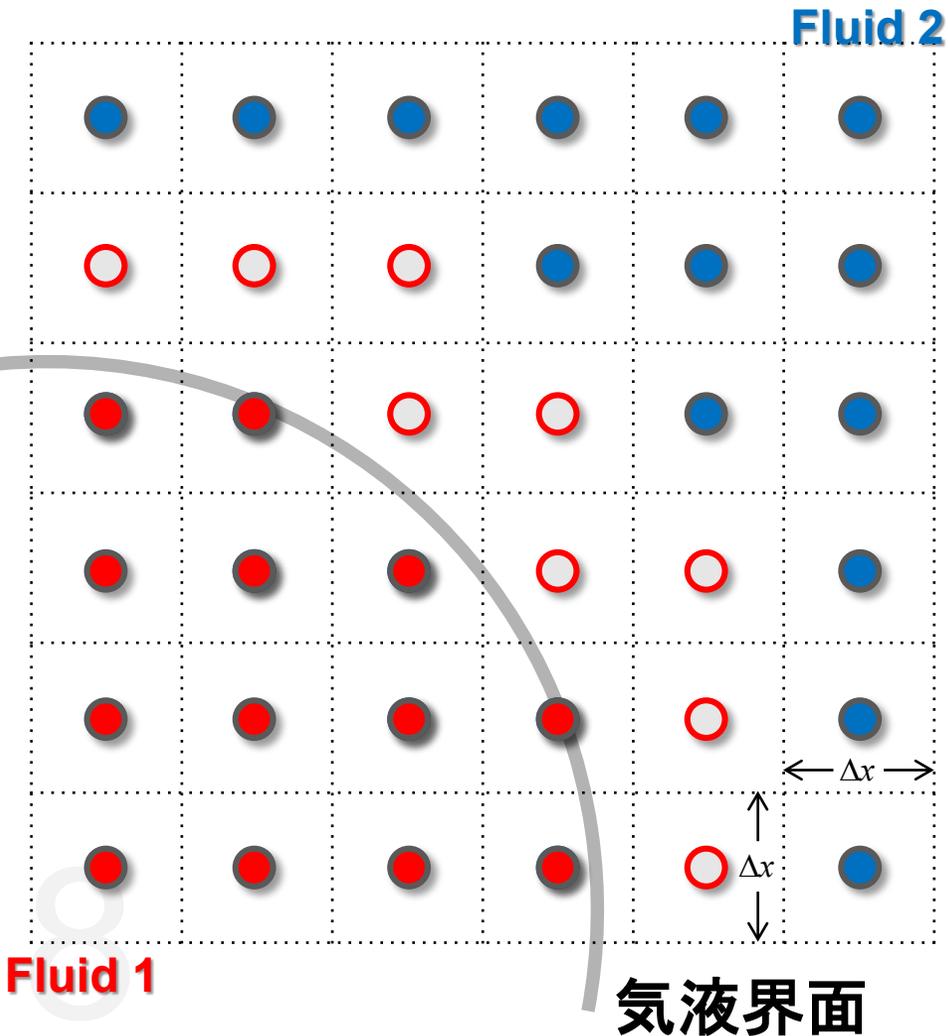
気液界面表現法 (ゴーストフルード法)

● : Fluid Cell 1

○ : Ghost Cell 1

● : Fluid Cell 2

○ : Ghost Cell 2



気液界面

Fluid 1

Fluid 2

速度 & 圧力

法線速度
: 内挿

接線速度 : 外挿

Fluid1に対するゴーストフルード法

$$\frac{\partial q_{GF}}{\partial \tau} + \text{sign}(\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \cdot \nabla q_{GF} = 0$$

$$P_{GF} = P_{GF} + \sigma \kappa$$

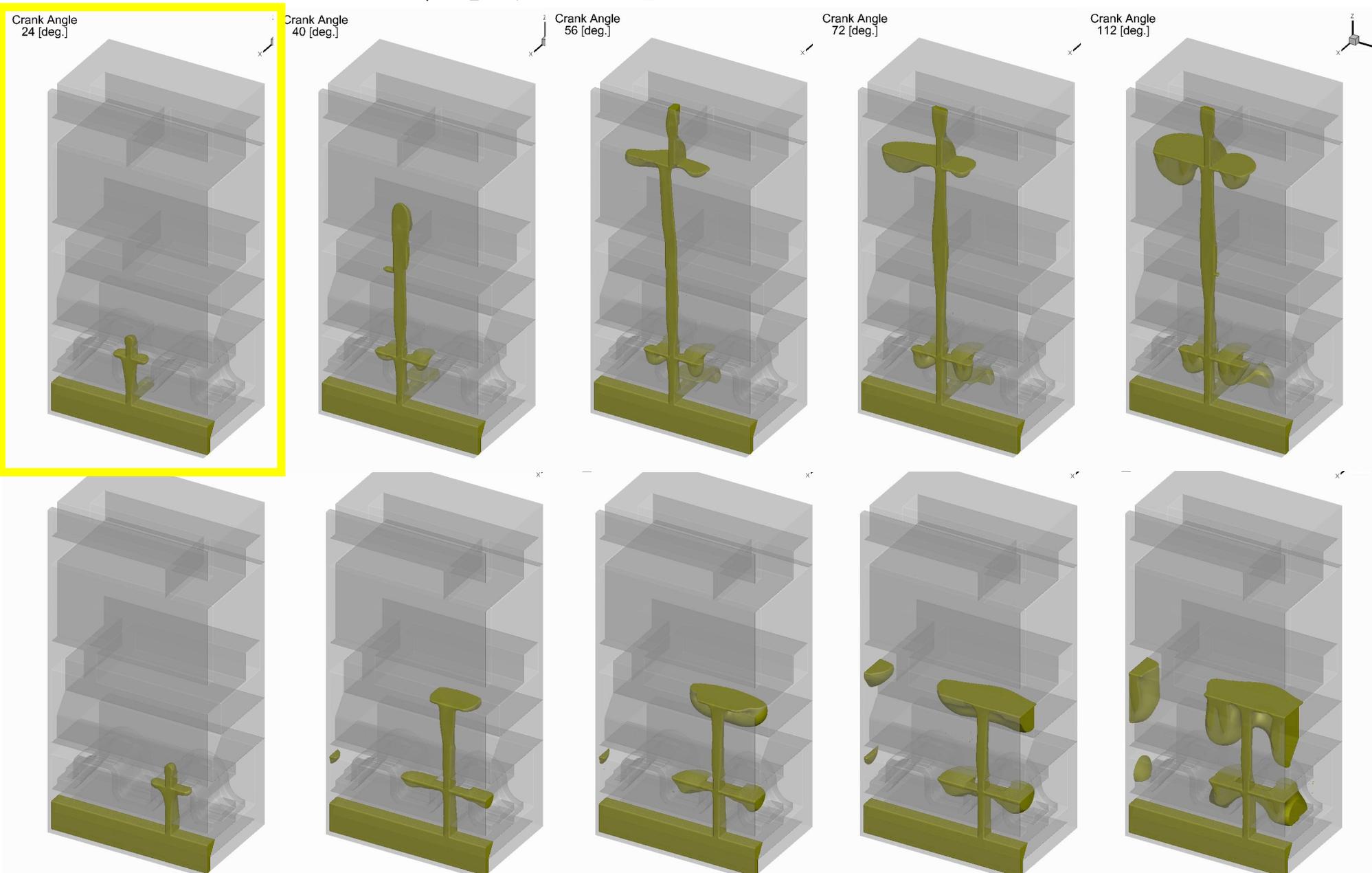
特定の線／面状の界面 & 適切な表面張力

- R. P. Fedkiw, JCP, Vol. 152, 1999, pp. 457-492
- Kawamoto, Y., et al., JAMDSM Vol. 14, No. 6, 2020

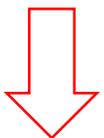
ピストン周りのオイル



ピストン外周部



- リング隙間(=合口)が揃った時(上図)と不揃いな時(下図)のオイル上昇挙動
- 回転数600rpm
- 27M格子点



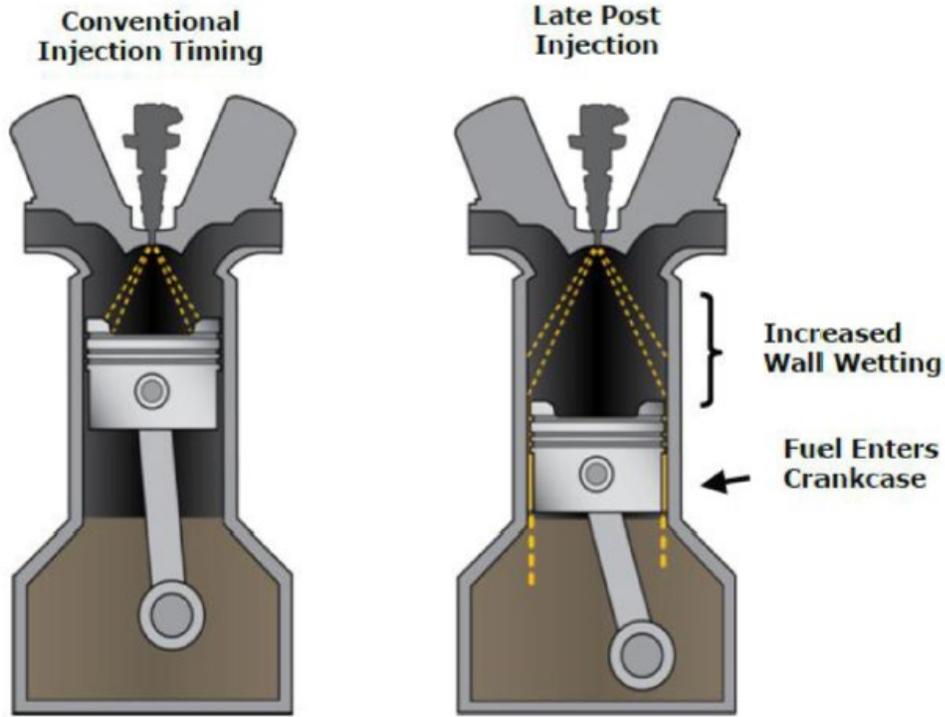
ラビリンス効果を
気液二相流解析で
明確に確認

目次

1. 気液混相流解析 : ガソリンエンジンオイル
- 2. 気液液混相流解析 : ディーゼルエンジンオイル**
3. 移動境界解析 : 飛翔昆虫の翼解析

研究背景

Mark Wattrus,
 “Fuel Property Effects on Oil Dilution in Diesel Engines”,
 SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Vol. 6, No. 3, pp. 794-806



Copyright © SAE International. Reprinted with permission from paper 2009-01-2661

Figure 1. Schematic showing fuel entry into engine oil

ポスト噴射によるオイル希釈

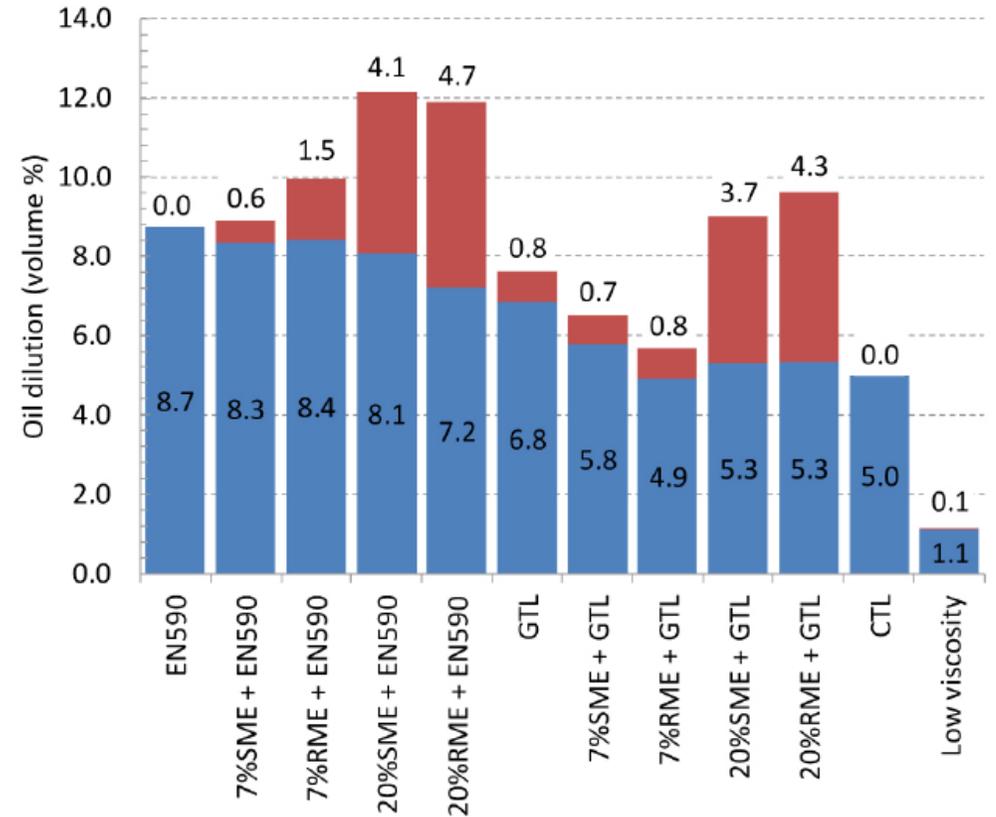


Figure 5. FAME content of fuel in oil

オイル物性による希釈率変化

詳細なメカニズムは不明

計算手法

離散化	有限差分法
支配方程式	連続の式, 非圧縮性Navier-Stokes方程式
物体境界表現	埋め込み境界法
計算アルゴリズム	Fractional step法
対流項差分	5次精度WENO法
粘性項差分	2次精度中心差分
界面移流	5次精度WENO法
界面時間進行	3次精度TVD Runge-Kutta法
界面捕獲(気液界面)	レベルセット法
界面捕獲(液液界面)	VOF法
格子	完全等間隔直交格子

Y. Kawamoto, S. Takahashi, M. Ochiai, A. Azetsu, K. Yamamoto

“Prediction of oil behavior in piston ring groove based on gas liquid two phase flow analysis” Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing Vol.14 , No .6 , (2020)

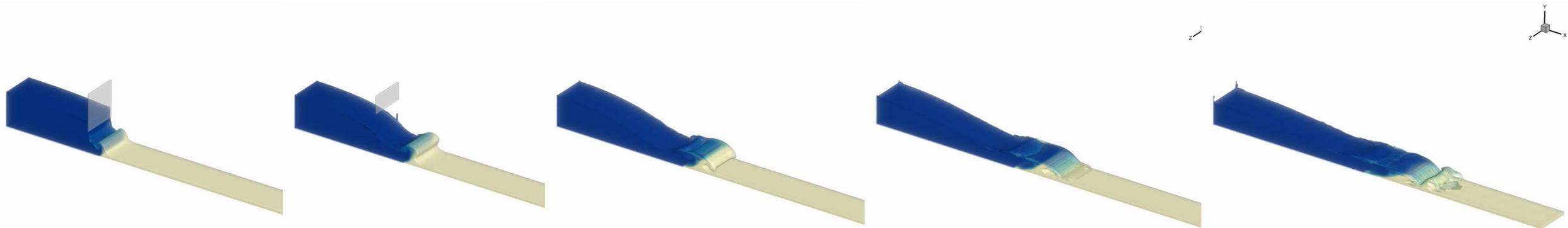
川本裕樹, 蔵本結樹, 松田拓哉, 高橋俊, 落合成行, 畔津昭彦, 山本憲司

“ピストンリング周辺のオイル消費機構に対するlevel set 法に基づく混相流解析の応用” 自動車技術会論文集 (2020)

検証計算



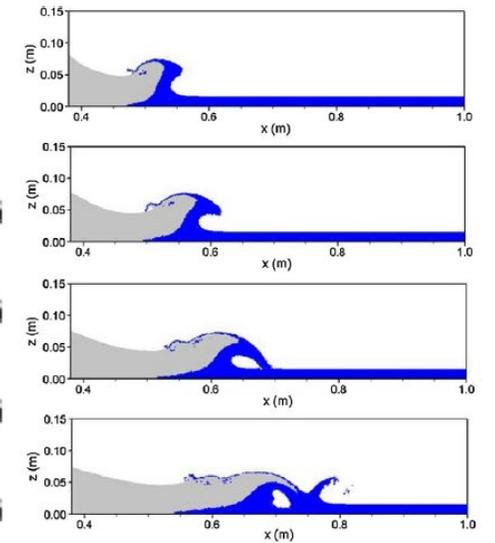
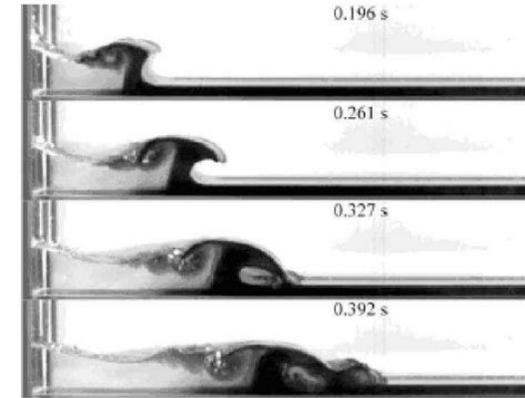
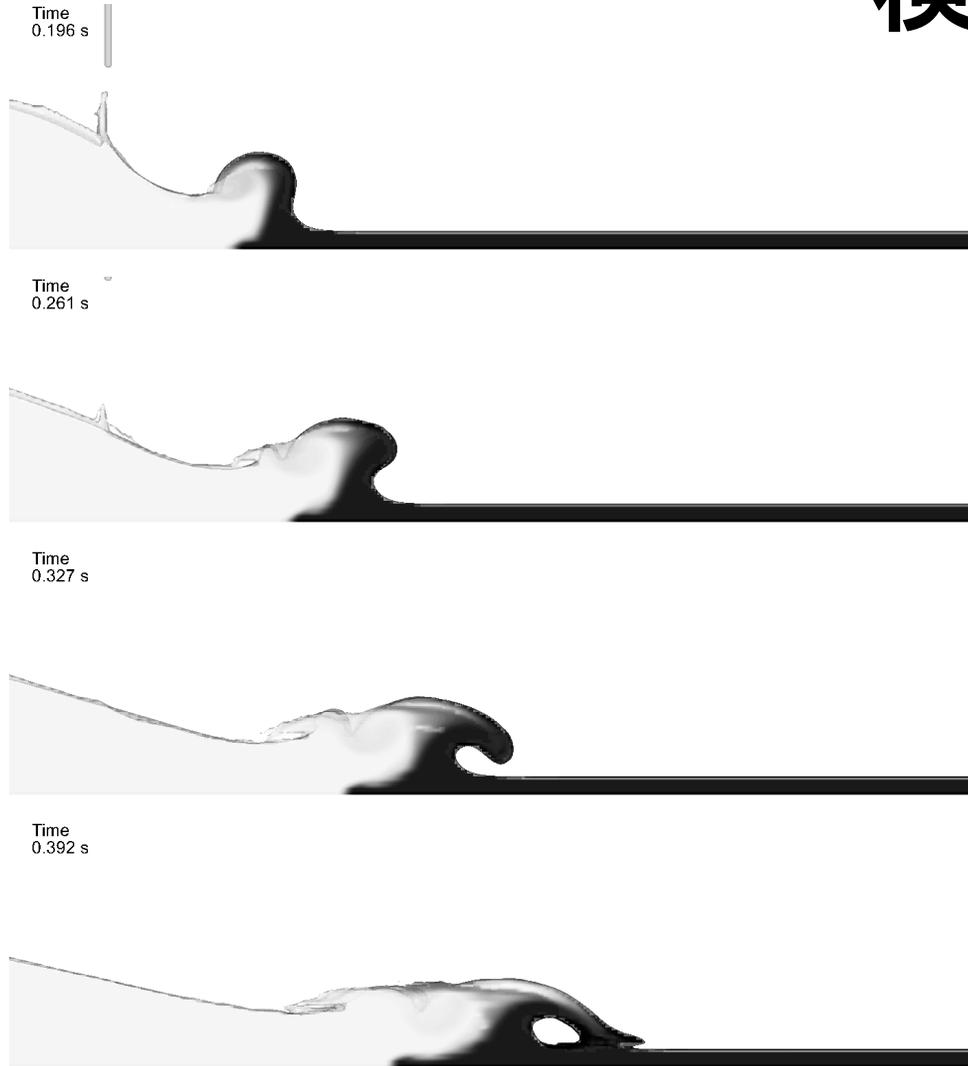
格子点数360万点だが気液液三相流解析のため高コスト



14

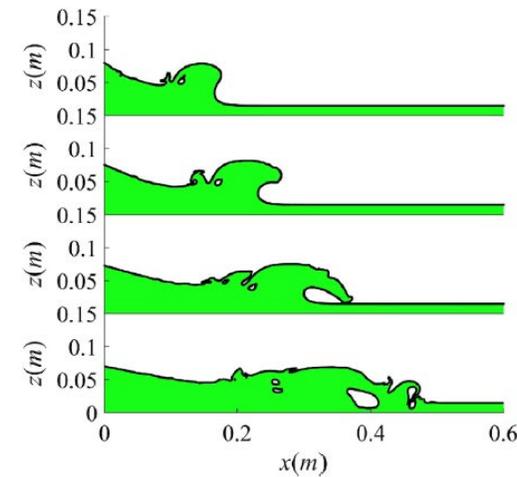
気液界面:レベルセット法, 液液界面:VOF法で解析

検証計算

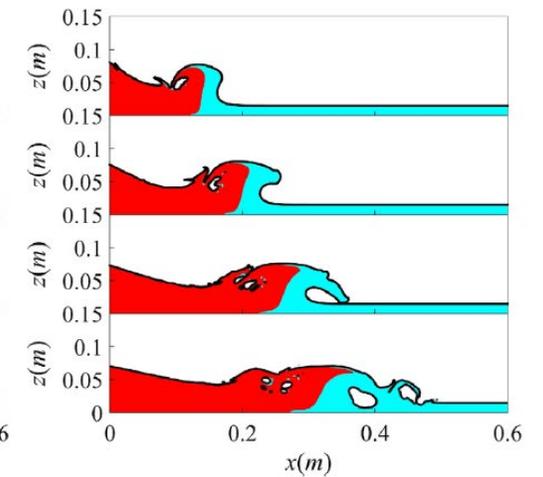


(a) Experimental results

(b) SPH results



(c) Computational results(one-liquid VOF)



(d) Computational results(two-liquid VOF)

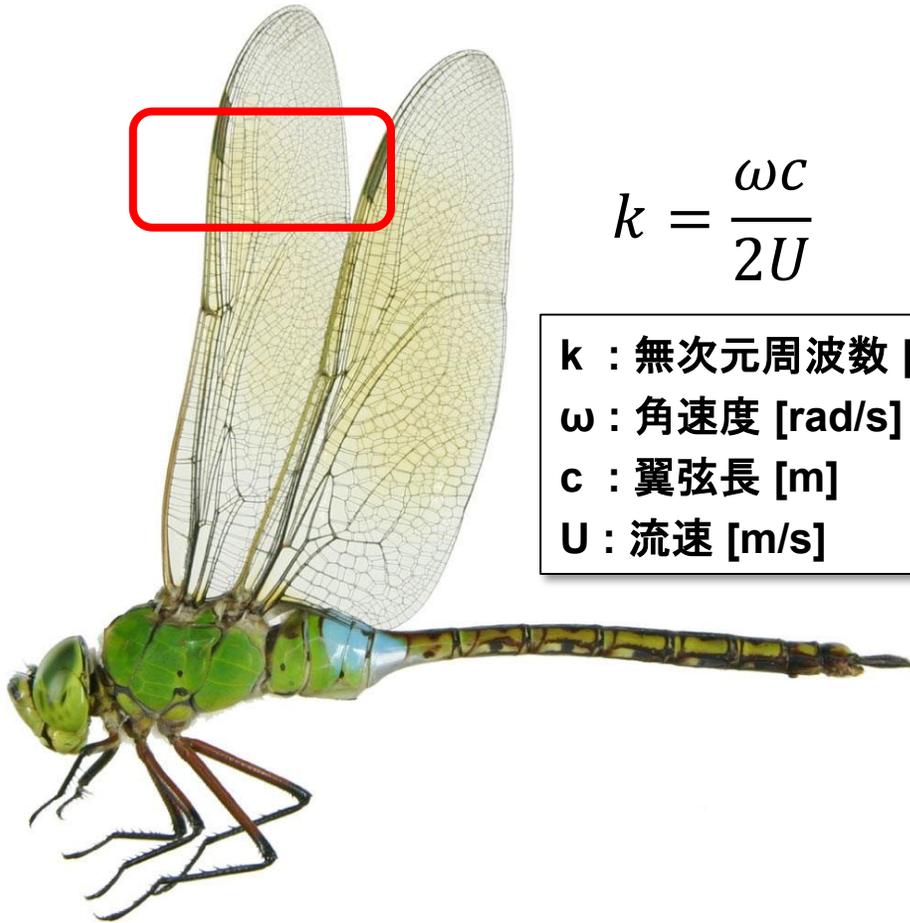
15 白色と黒色の水の混合の様子
(燃料とオイルの混合の検証)

Ye et al., Investigation of water-water interface in dam break flow with a wet bed, Journal of Hydrology, Vol. 548, 2017, 104-120

目次

1. 気液混相流解析 : ガソリンエンジンオイル
2. 気液液混相流解析 : ディーゼルエンジンオイル
- 3. 移動境界解析 : 飛翔昆虫の翼解析**

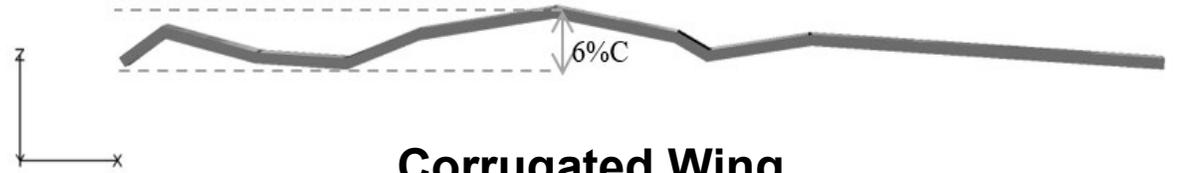
研究背景



<https://mintclub.kobe-np.co.jp/skip/event/4089.html>

$$k = \frac{\omega c}{2U}$$

k : 無次元周波数 [-]
ω : 角速度 [rad/s]
c : 翼弦長 [m]
U : 流速 [m/s]



Corrugated Wing

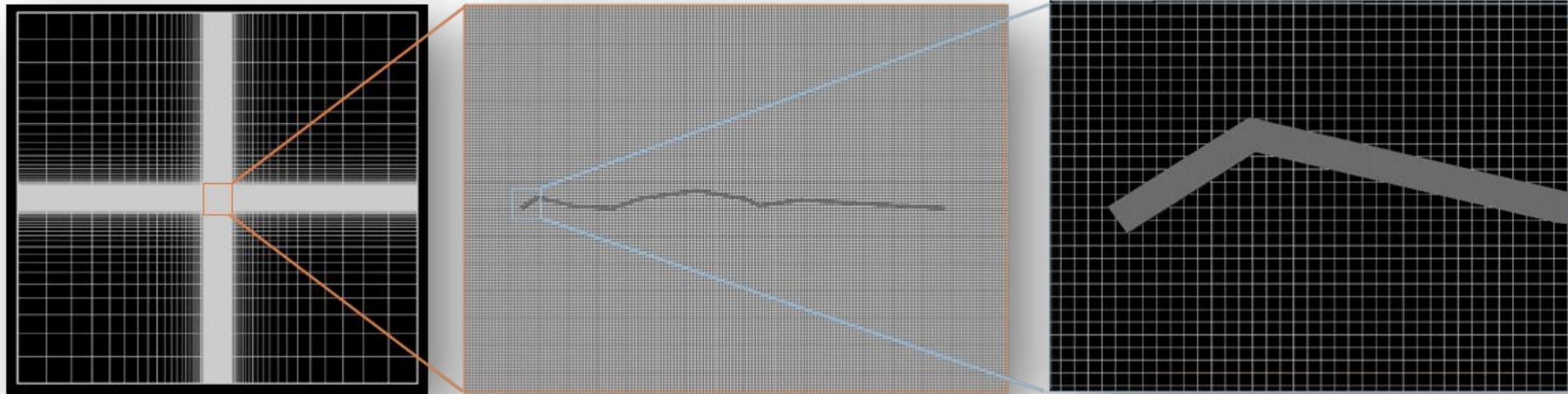
一様流・翼弦長基準Re数	2800
無次元周波数	0.1~0.9
羽ばたき運動	ヒービング (上下方向のみ)

➤ コルゲート翼と
平板翼の空力特性の比較

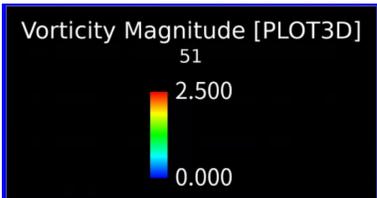
長沼, 佐々木, 高橋, 岡本,
第53 回流体力学講演会 / 第 39 回航空数値シミュレーション技術シンポジウム
講演論文集, 2021年

計算手法

支配方程式	非圧縮性3次元NS方程式
計算格子	等間隔直交格子
物体表現	レベルセット法
物体境界条件	ゴーストセル法



計算結果(上昇時の渦度)



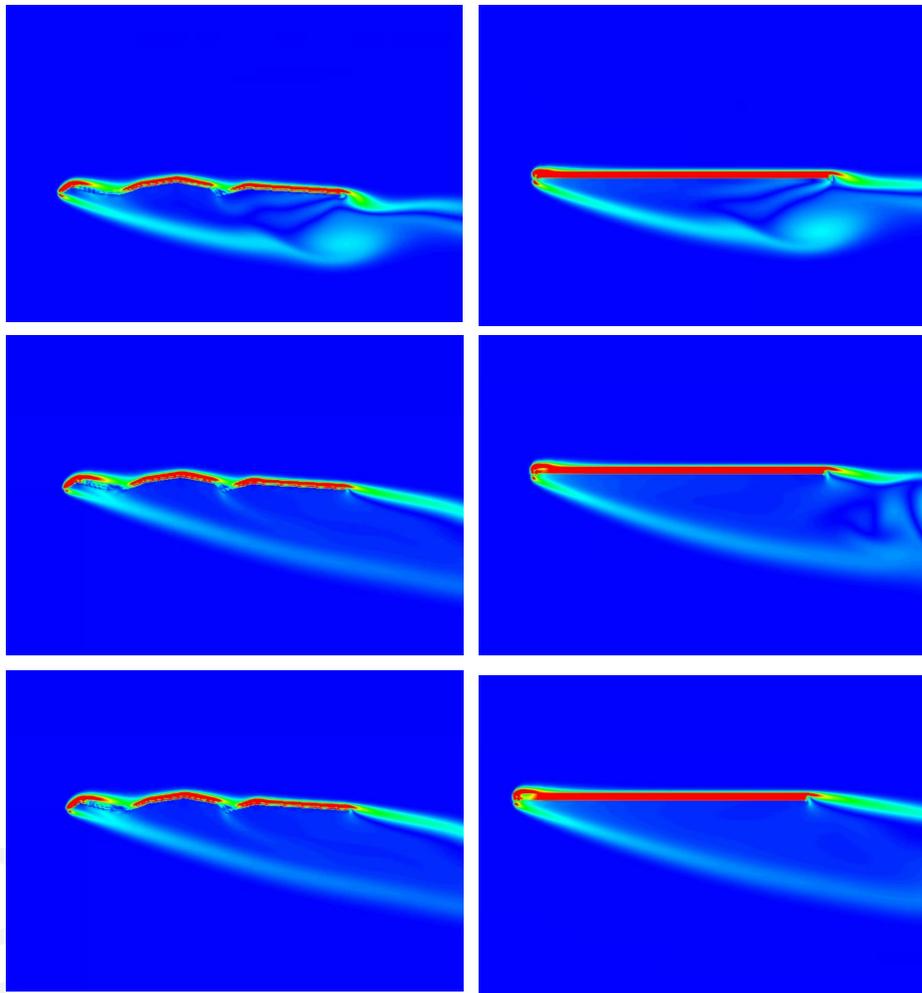
コルゲート翼

平板

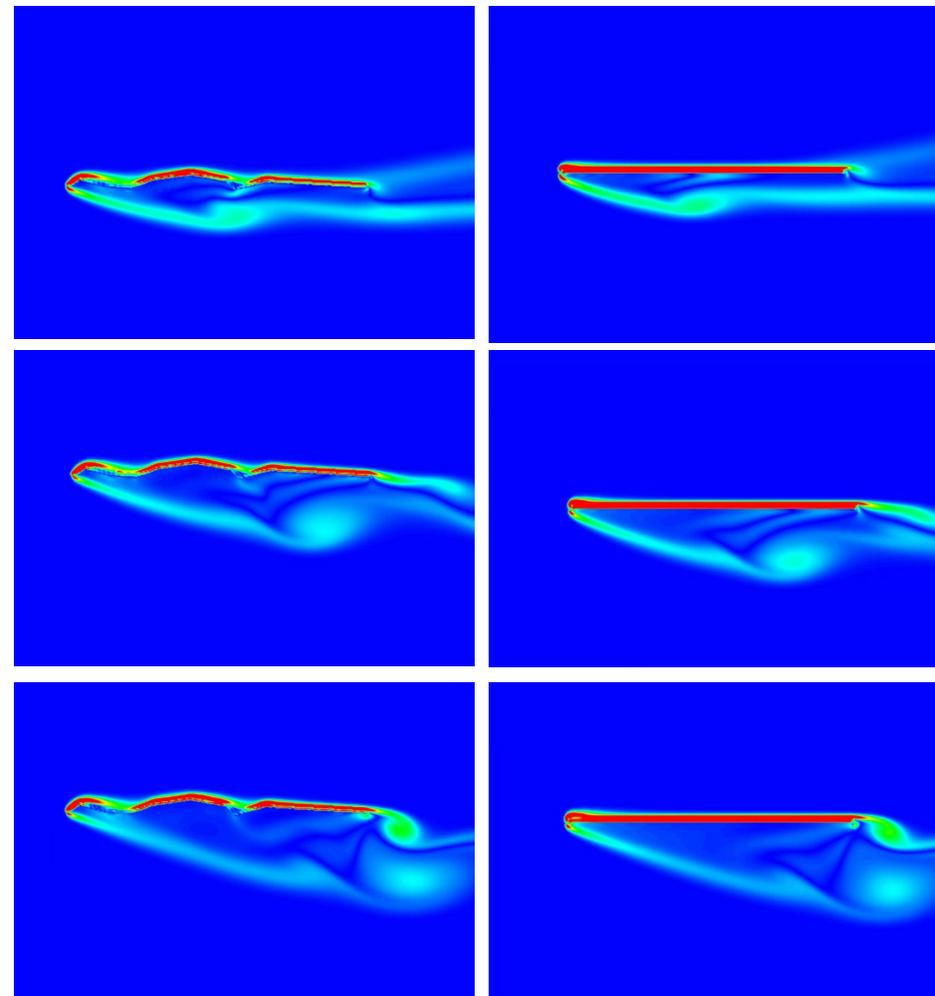
コルゲート翼

平板

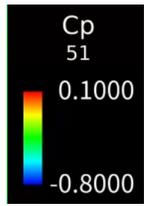
k=0.2



k=0.4



計算結果(上昇時のCp)



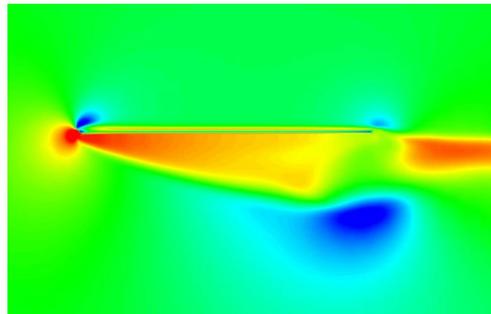
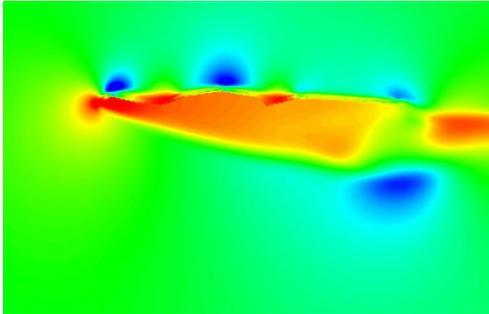
コルゲート翼

平板

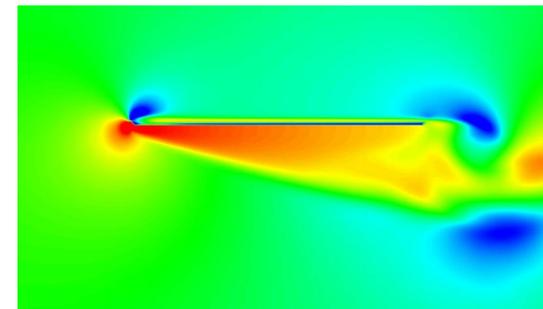
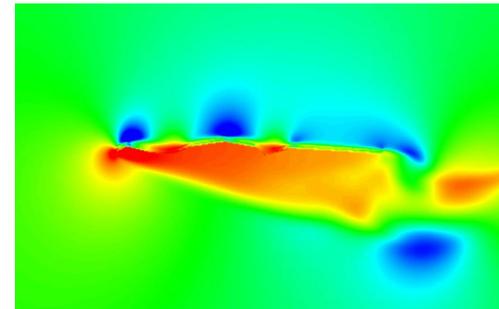
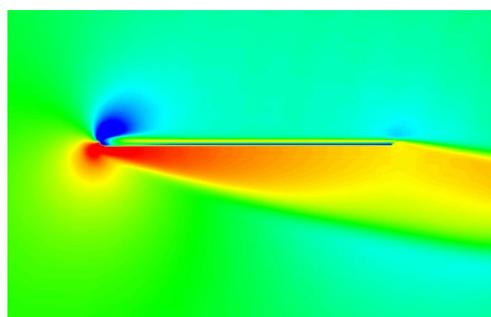
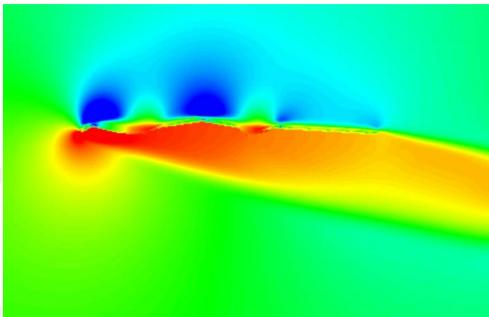
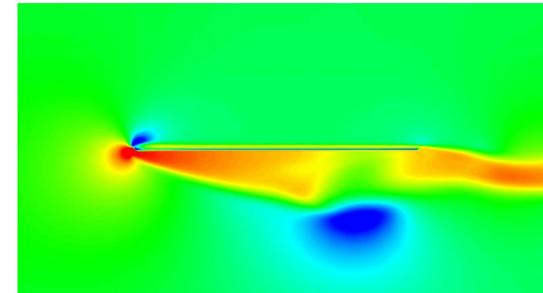
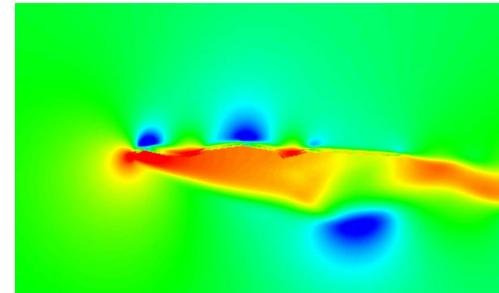
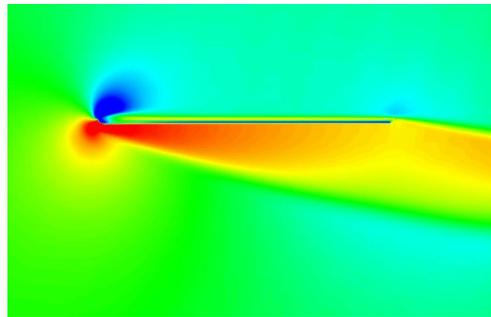
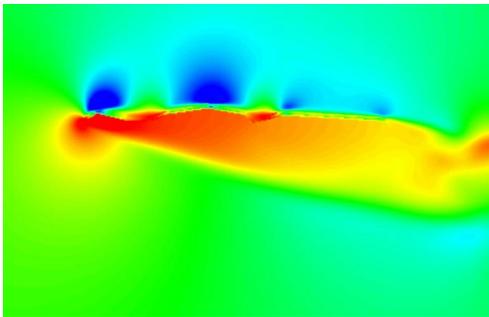
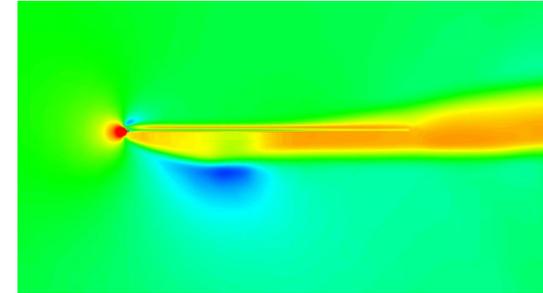
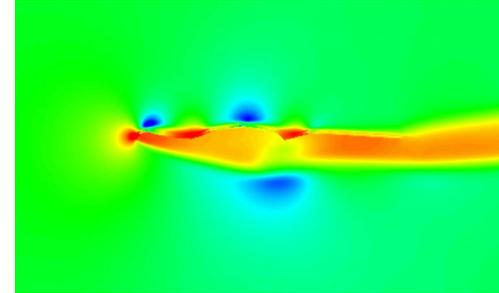
コルゲート翼

平板

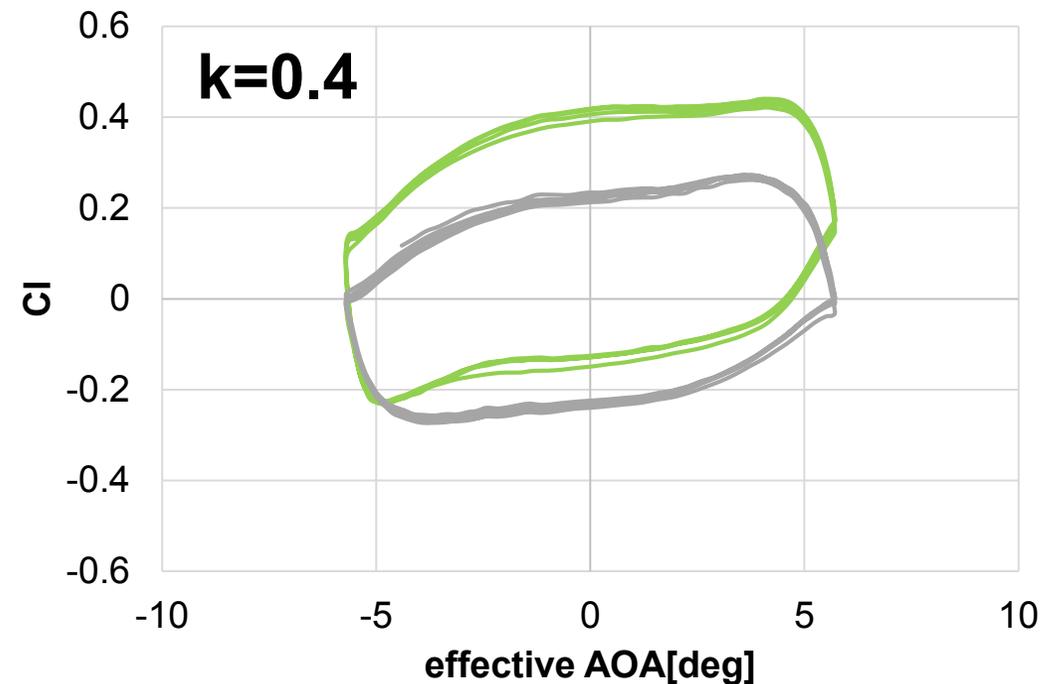
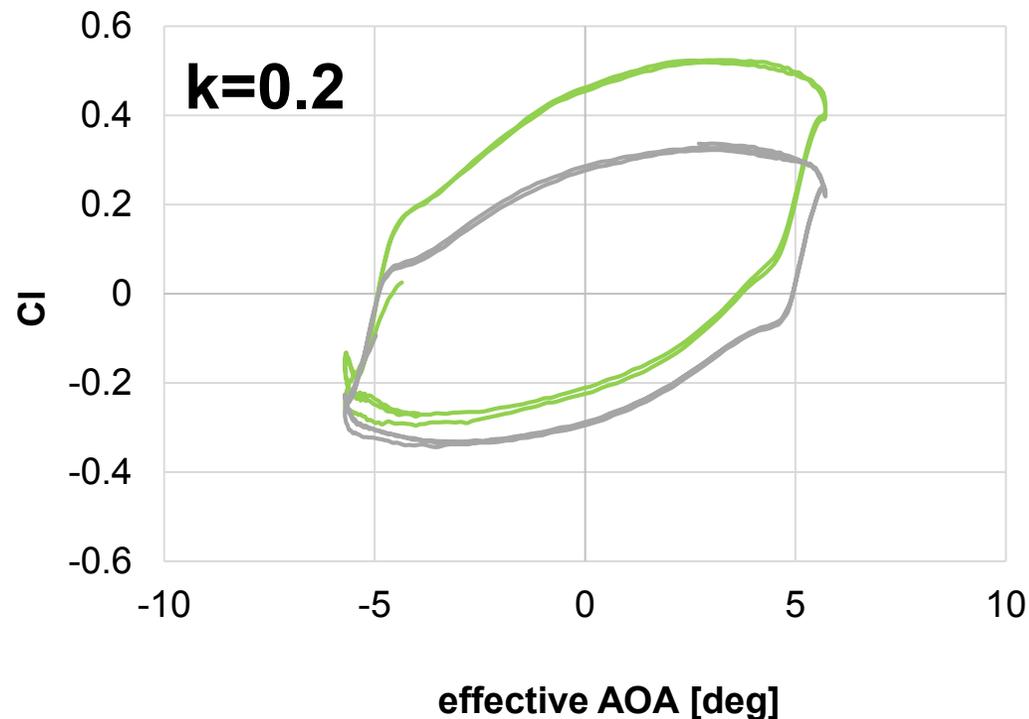
k=0.2



k=0.4



計算結果(揚力係数)



flat plate (1.5%c)



corrugated wing



21 ➤ いずれの場合にもコルゲート翼の方が高Cl

まとめと今後の課題

1. ゴーストセル法の応用性を移動境界問題で確認
2. ゴーストフルード法を気液液三相界面に拡張
3. さらに高精度かつ汎用性の高い解析法の構築
4. SX-AURORA TSUBASAでの高速化