

東大-JAXAシンポジウム「ロケットエンジン解析技術の新展開」

9/29/2010

多重プロセス型キャビテーションモデルの現状と課題

信州大学工学部

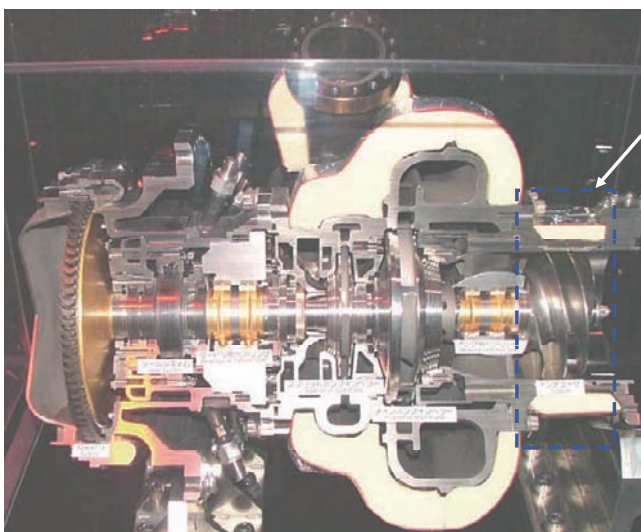
津田 伸一

(平成21年度末まで, JAXA/JEDI研究員)

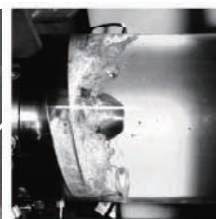
1

背景

液酸液水ロケットエンジンターボポンプの諸課題



液体酸素ターボポンプのカットモデル(LE-7)

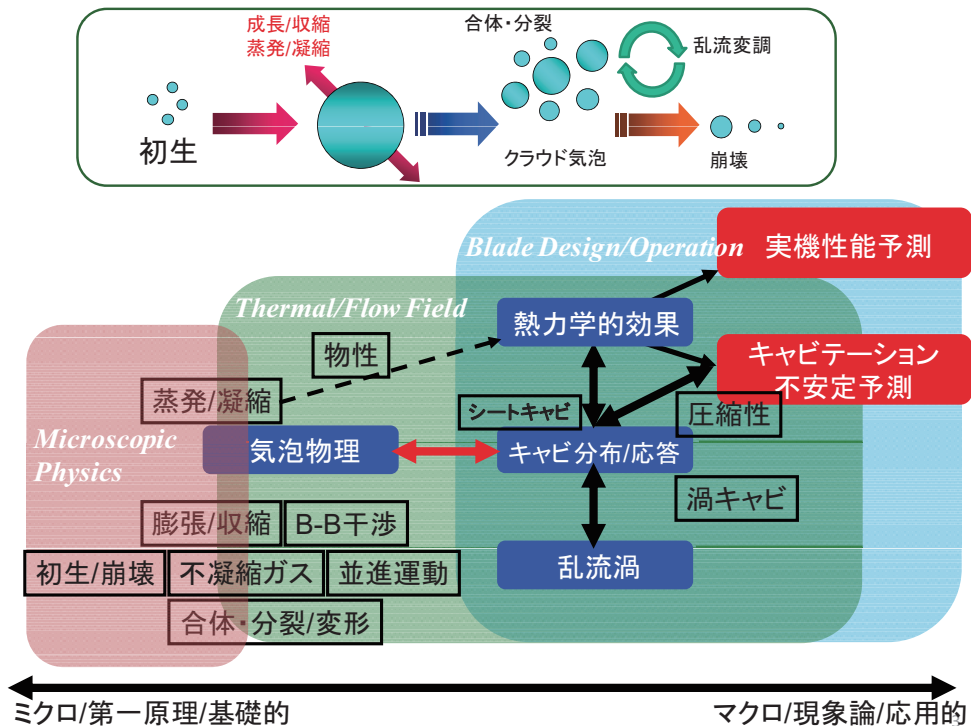


(Fujii et al., CAV2003, 2003)

- 吸込性能低下
- キャビテーション不安定
 - ✓ 旋回キャビテーション
 - ✓ キャビテーションサージ
- POGO不安定

2

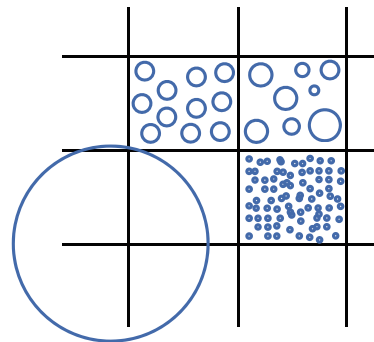
極低温キャビテーションに関する関連MAP



混相流の主な解析手法

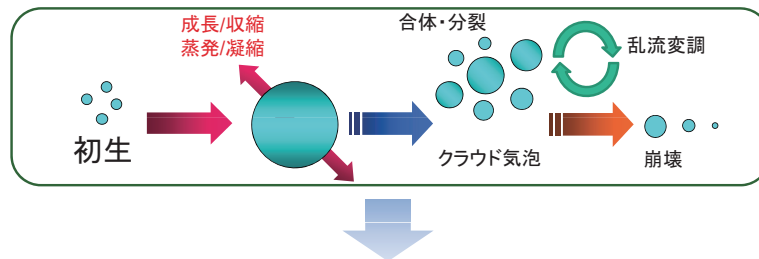


- 瞬時・局所の支配方程式 → 界面追跡法
(VOF, Level Set, Front Tracking, etc.)
- 平均化方程式
 - ✓ 二流体モデル
 - ✓ 一流体モデル
 - 均質流モデル(EOS, BD)
 - ドリフトフラックス
 - スリップ流



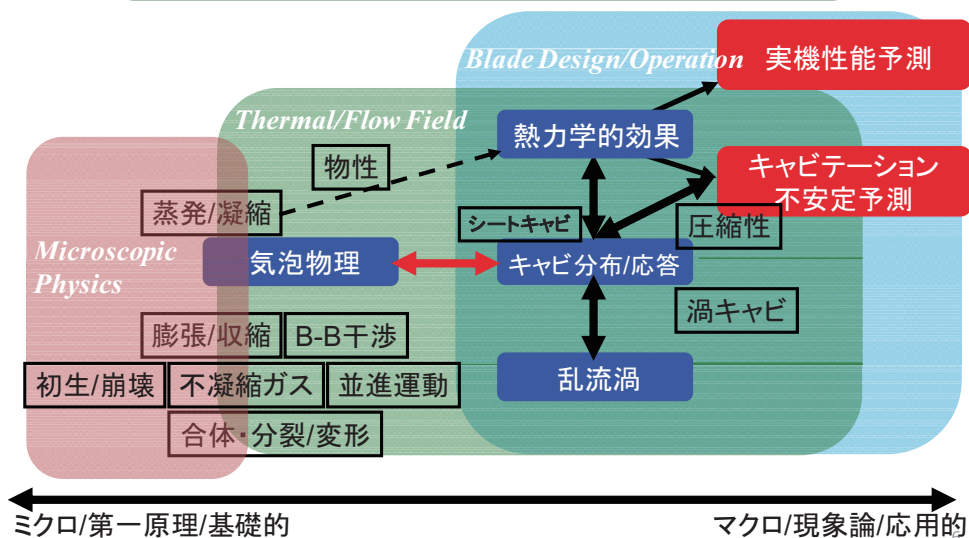
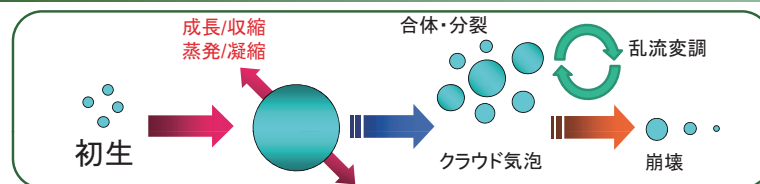
キャビテーションの主な解析手法の現状

- **状態方程式モデル**(Iga et al., 2003など)
 - ✓ 混相流中における音速を再現(～マクロモデル)
- **気泡力学モデル**(Okita&Kajishima, 2002など)
 - ✓ 単一気泡の力学方程式に準拠
 - ✓ 一素過程にもとづく一方程式モデルが大半



「気泡物理」の観点からすれば極めて粗いモデル化が現状
液酸液水では、特に充実したSGSモデルが必要

(極低温)キャビテーションに関する相関MAP



新規キャビテーションモデルの概要

目的 (FY21)

気泡物理に立脚したSGS詳細キャビテーションモデルの構築&問題点抽出
(FY21の検証対象は水とする)

モーメント法による定式化

$$M_i = \int R^i f(R, t) dA$$

$$\frac{DM_i}{Dt} = iG(\bar{R})M_{i-1} + S_{p,i} \quad (\text{for } i = 0, 1, 2, 3)$$

初生/崩壊, 合体/分裂

$$\text{where } G(\bar{R}) = \frac{d}{dt} \left(\frac{M_1}{M_0} \right)$$

代表半径
(平均半径とする) $\bar{R} = \frac{M_1}{M_0}$

ボイド率

$$\phi = \frac{(4\pi/3)M_3}{1 + (4\pi/3)M_3}$$

長所

- SDFを間接的に取り込める(拡張性あり)
- 個々のプロセスを見通しよく取り込める

膨張/収縮 & 非平衡蒸発/凝縮モデル

➤ 気泡間干渉を考慮した気泡力学方程式

$$\left(\frac{3}{2} + \pi \bar{d}^2 M_1 \right) G(\bar{R})^2 + \left(\frac{\pi}{2} \bar{d}^2 S_{p,i} \bar{R}^2 \right) G(\bar{R}) = \frac{p_v - p_l - 2\sigma/\bar{R}}{\rho_l}$$

\bar{d} : characteristic length for each cell

(Kubota et al., J. Fluid Mech., 1992)から拡張

➤ Schrageの式(古典的簡略化モデル)の適用

$$\dot{m}_v = \frac{2\alpha}{2 - \alpha} \frac{p_{s,in} - p_g}{\sqrt{2\pi R_v T}} \quad \text{where } p_{s,in} = p_v(T) \exp\left(-\frac{2\sigma}{\rho_l R_v T \bar{R}}\right)$$

where $p_g = \rho_g R T_g$
 α : 蒸発/凝縮係数(水の場合, $\alpha = 0.4$)

Kelvin効果
 \uparrow
 M_1/M_0

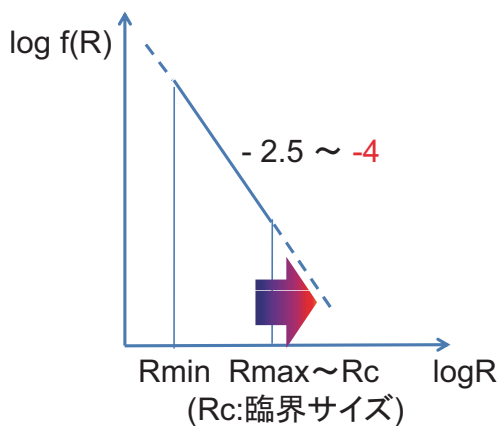
$$\frac{DM_i}{Dt} = iG(\bar{R})M_{i-1} \quad (\text{for } i = 0, 1, 2, 3)$$

where $G(\bar{R}) \sim K \left| p_{s,\infty} - p - \frac{2\sigma}{\bar{R}} \right|^{1/2}$

初生/崩壊モデル(for 水)

➤ 既存気泡核のサイズ分布に対して**べき乗則**を仮定(多くの実験的事実と合致)

$$f_0(R) = \frac{3\phi_0}{4\pi(1-\phi_0)\ln(R_{\max}/R_{\min})} R^{-4} \quad (\text{Wang, J. Fluids. Eng., 1999})$$



for $S_{p,inception}$

$$S_{p,0} = \int_{R_c}^{\infty} f_0(R) \dot{R} \delta(R - R_c) dR$$

$$\therefore S_{p,0} = J_0 = f_0(R_c) \dot{R}_c$$

($S_{p,i} (i > 0)$ can be negligible.)

9

合体/分裂モデル(今後の改良を前提としたモデル化)

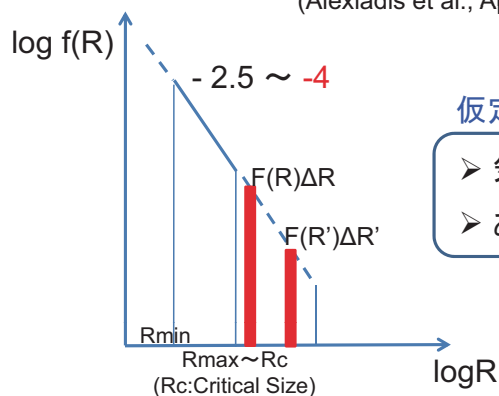
(合体) 理想気体における分子衝突との類似性から導出

(分裂) 気泡の変形に必要なエネルギーバランスから導出

$$(\text{合体}) \quad S_c \approx \pi \varepsilon^{1/3} \{f(R)f(R')(\Delta R)^2\} (d + d')^2 (d^{2/3} + d'^{2/3})^{1/2}$$

$$(\text{分裂}) \quad S_b \approx \frac{1}{d} \sqrt{8.2(\varepsilon d)^{2/3} - 12\sigma/(\rho_l d)} \quad \text{where } d = 2R$$

(Alexiadis et al., Applied Mathematical Modeling, 2007)などを参考に構築



仮定 (for 水)

- 気泡核のべき乗分布を気泡まで拡張
- ある2つの階層のランダム衝突-合体を仮定

注) 極低温流体の場合, この仮定すら採用できない

10

キャビテーションモデル(FY21版)

$$\begin{aligned}
 \textcircled{1} \quad \frac{DM_0}{Dt} &= J_0 + S_{b,0} - S_{c,0} \\
 \textcircled{2} \quad \frac{DM_1}{Dt} &= G(\bar{R})M_0 + R_c J_0 + \bar{R}(S_{b,0} - S_{c,0}) \\
 \textcircled{3} \quad \frac{DM_2}{Dt} &= 2G(\bar{R})M_1 + R_c^2 J_0 + \bar{R}^2(S_{b,0} - S_{c,0}) \\
 \textcircled{4} \quad \frac{DM_3}{Dt} &= 3G(\bar{R})M_2 + R_c^3 J_0 + \bar{R}^3(S_{b,0} - S_{c,0}) \\
 \textcircled{5} \quad \frac{D(\rho_g M_3)}{Dt} &\approx \dot{m}_v M_2 M_3 + \rho_g \frac{DM_3}{Dt}
 \end{aligned}$$

※ $p_g = \rho_g R T_g$ (Equation of state inside of bubble assuming ideal gas for vapor of water)

Inception/Collapse, Coalescence/Break-up, Expansion/Shrinkage, Inception/Collapse, Coalescence/Break-up, Evaporation/Condensation

Inception/Collapse terms for ②~④ may be neglected.
 Kinematically, this term can be neglected.

Void Fraction $\phi = \frac{(4\pi/3)M_3}{1 + (4\pi/3)M_3}$
 Quality $Y = \frac{(4\pi/3)\rho_g M_3}{\rho_l + (4\pi/3)\rho_g M_3}$

↑ from ④

0次元計算を実施して本モデルの特性評価をおこない、無視できる項は無視したうえでCFDソルバーに導入

11

CFD検証(JAXA/谷直樹博士のご協力による)

流体解析(谷 直樹, 東京大学博士論文, 2003)

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \rho u \\ P + \rho u^2 \\ \rho uv \\ (\rho e + P)u \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ P + \rho v^2 \\ (\rho e + P)v \end{bmatrix} = \text{Viscous Term}$$

解法: Thermo-CCUP法

乱流モデル: Baldwin-Lomaxモデル

※極低温キャビテーションへの適用実績

+

物理モデル

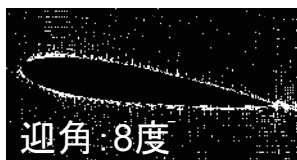
多重プロセス型キャビテーションモデル
(5方程式モデル)

12

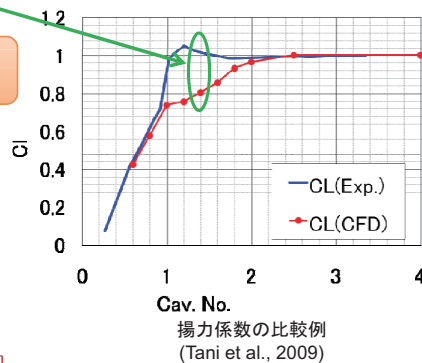
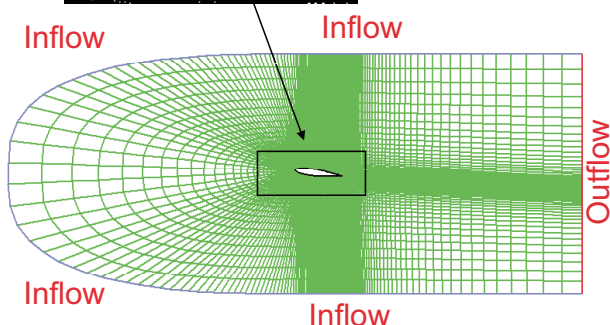
CFD検証(JAXA/谷直樹博士のご協力による)

NACA0015単独翼, キャビテーション数1.4

既存の解析結果の精度は一様に悪い



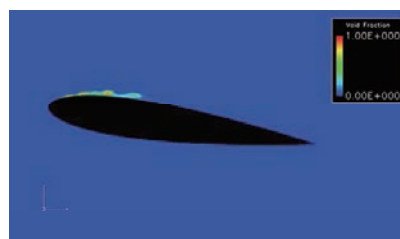
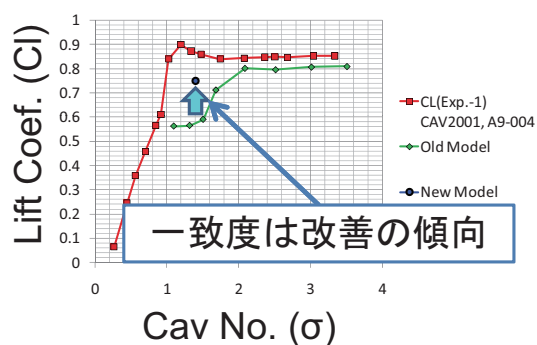
迎角: 8度



作動流体: 水
 $Re \sim 10^5$
(コード長基準)

13

CFD検証(主要な結果 & 問題点)



ボイド率の時間変化

結 論

- 初生/崩壊, 合体/分裂に起因する気泡数の変化は, 定性的には実験結果と合致
- 揚力係数の再現性については, 既往モデルよりも改善される傾向あり
- 現モデルでは, 大規模非定常現象の再現ができない
(高ボイド率における物理モデルとしての妥当性に起因)

14

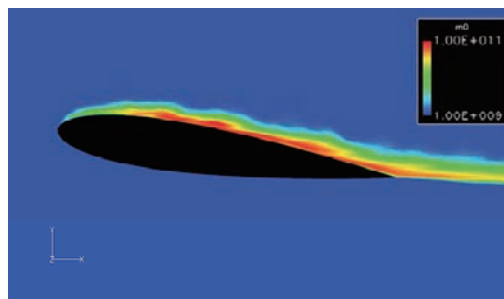
モデルの妥当性検証



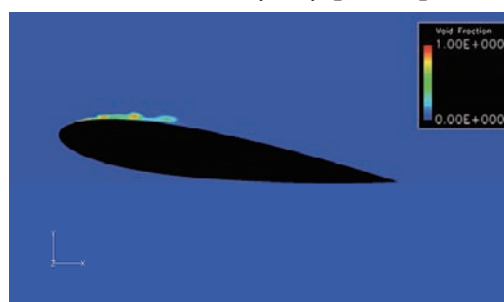
キャビティが消えた後に
気泡数増大



定性的傾向は一致



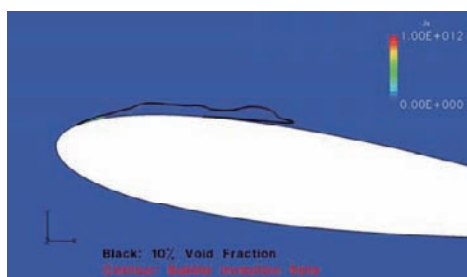
気泡数(M_0) [$1/m^3$]



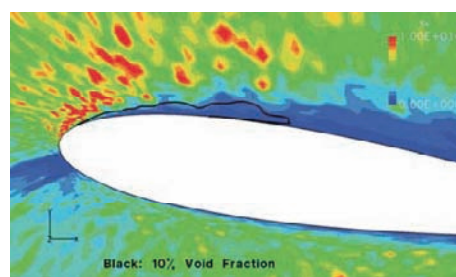
ボイド率

15

モデルの妥当性検証



気泡発生率 J_s [$1/s/m^3$]

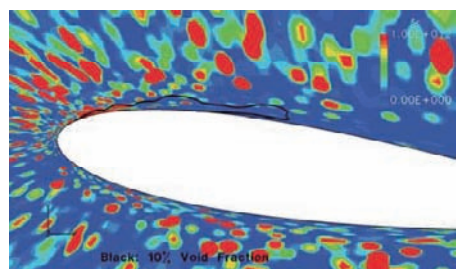


気泡分裂率 S_b [$1/s/m^3$]

気泡発生後にキャビティ成長
キャビティ外縁で分裂率(大)
キャビティ前縁で合体率(大)
キャビティ後縁で合体率(小)



定性的な傾向は一致

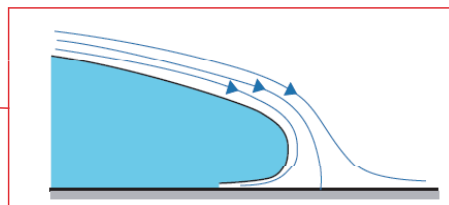


気泡合体率 S_c [$1/s/m^3$]

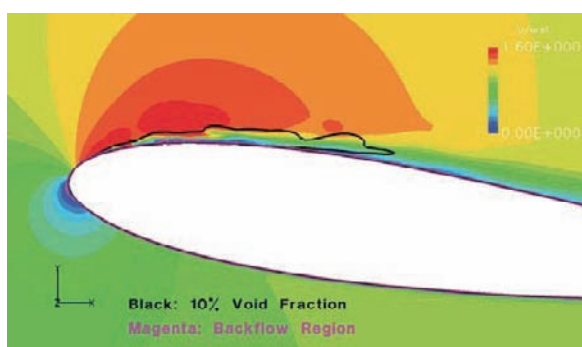
16

大規模非定常現象が再現できない原因

クラウドキャビテーションの発生原因



キャビティ後縁で逆流発生 → キャビティを引きちぎる



(流速の等値線)

黒: ボイド率10%

ピンク: 軸流流速0m/s

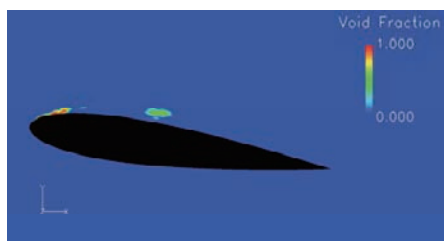
**キャビティ後縁の
逆流が現れず...**

密度勾配?

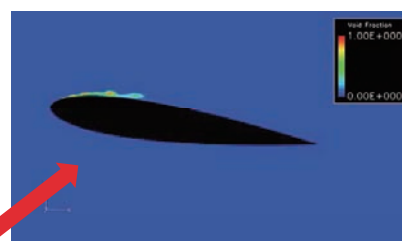
圧力勾配?

17

大規模非定常現象が再現できない原因

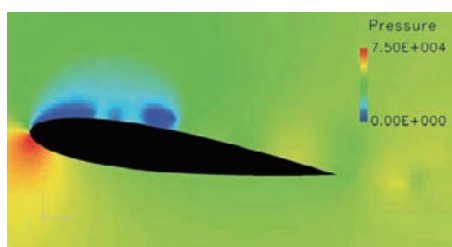


ボイド率

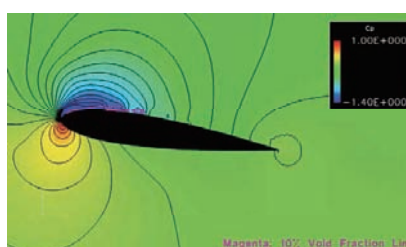


ボイド率

密度変化が緩やか



圧力
旧モデル($\sigma=1.4$)



圧力
新モデル($\sigma=1.4$)

圧力変化はどちらも同程度

18

まとめ

- 多重プロセス型キャビテーションモデルを独自に構築
- 実績のあるCFDコードに実装して1次検証を実施



- 初生/崩壊, 合体/分裂に起因する気泡数の変化は, 定性的に実験結果と合致
- 揚力係数の再現性は既往モデルよりも改善の傾向
- 現モデルでは, 大規模非定常現象の再現ができない
(気泡物理モデルの限界に起因)

～今後の方針～

- SGSモデルの限界確認 with 合体/分裂モデルの改良等
- 極低温流体での検証(モデルは構築済)
- GS気泡に対する界面追跡型手法との併用