

極低温キャビテーションモデリングの 多面的研究と開発への応用に向けて



谷直樹(JAXA)
伊藤優(東工大)
津田 伸一(信州大)
石川 勝利(東大)
姫野武洋(東大)
河津要(JAXA)
山西伸宏(JAXA)

1

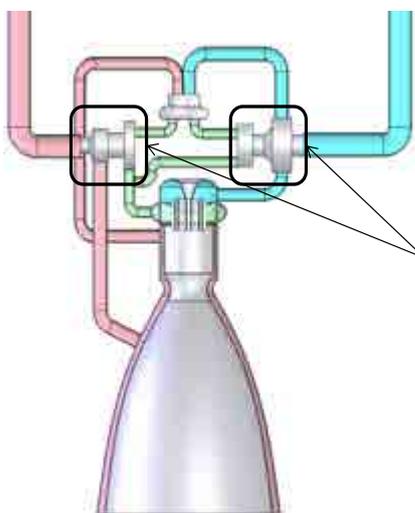
ターボポンプとキャビテーション

高性能ロケット推進剤

水素/酸素、ケロシン/酸素、メタン/酸素 etc....

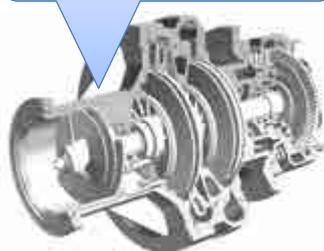


-100°C以下の極低温流体



ターボポンプ
小型・高速回転ポンプ
ポンプで液体が気化

極低温流体中の
キャビテーション

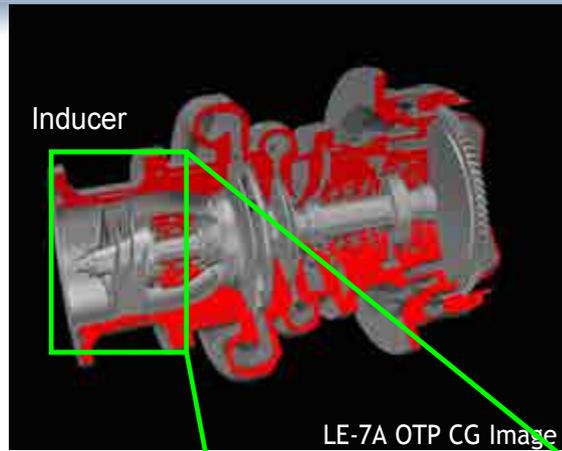


2

極低温流体中でのキャビテーション

キャビテーション

-
-
-
- 急激な性能低下
- 軸振動



極低温流体中での キャビテーション

熱力学的効果

- 特徴
- キャビティ縮小
- 性能向上

Advances in Rocket Engine Modeling and Simulation

熱力学的効果

熱力学的効果とは？

水

$$T_{\text{cavity}} \doteq T_{\text{fluid}}$$

潜熱の吸収

極低温流体

$$T_{\text{cavity}} < T_{\text{fluid}}$$

$$P_{\text{cavity}} < P_{\text{sat}}$$

Advances in Rocket Engine Modeling and Simulation

問題点

現在のインデューサ設計時の
キャビテーション性能予測



水でのCFD解析



実際は極低温流体中での作動

- 実作動流体での試験
→開発後期の試験で初めて実施



リスクが高い

極低温キャビテーションの適切なシミュレーションの実現による
開発リスク低減

目的とアプローチ

目的: 極低温キャビテーションを適切に再現可能な
数値解析モデルの構築

4方向のアプローチによる総合理解

1. 極低温インデューサ可視化実験

東工大 伊藤先生

目的: 実現象理解

2. 気泡流モデルによる微細現象理解

信州大 津田先生

目的: ミクロスケール現象理解

3. 気液界面追跡法による現象把握

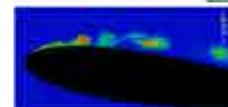
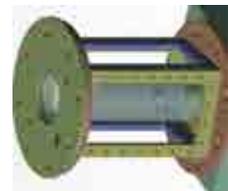
東大 姫野先生

目的: 解析モデル依存性理解

4. 巨視的キャビテーションモデルの評価

JAXA

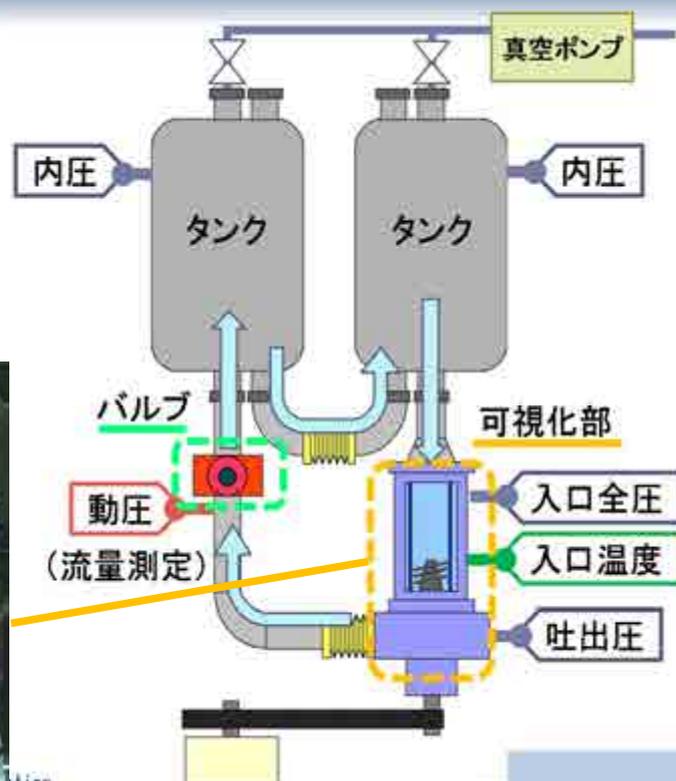
目的: マクロスケール現象理解



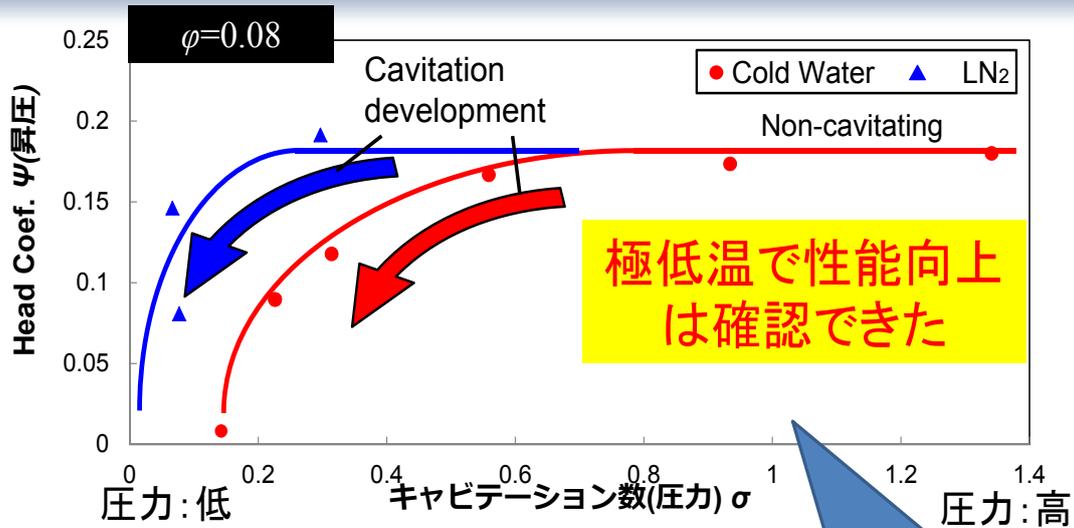
1. 極低温インデューサ可視化実験



実験装置全体図



キャビテーション性能



Cavitation Number σ

σ is criterion of cavitation generation.

$$\sigma = \frac{p_1 - p_v}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

p_1 : Inlet static pressure
 p_v : Saturated vapor pressure
 U : Tip blade velocity ($R\Omega$)

性能がいい = 低い圧力でも昇圧
 性能が落ちない
 青い線の方が高性能

9

実験より判明した点

逆流渦キャビテーション=気泡

シートキャビテーション



水



LN2相当



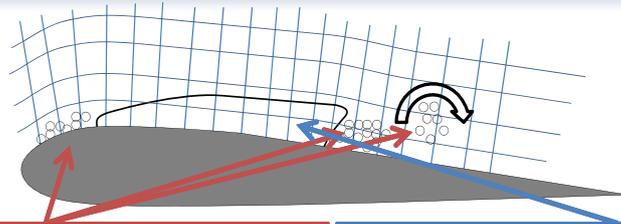
R113での実験(LN2相当)

小直径インデューサでは発生しない

発生量が小規模になるものの、必ず発生

2つの異なる物理事象を再現する必要あり

2つのアプローチ



<p>初生・崩壊・渦部 気泡キャビテーション 熱力学的効果:スケール効果有り</p>	<p>発達部 シートキャビテーション 熱力学的効果:スケール効果無し</p>
--	--

微細な物理機構をモデル化

気液界面を考慮したモデル

多重プロセス型
キャビテーションモデル

界面追跡法

特性を評価して工学的に有意な
キャビテーションモデル構築



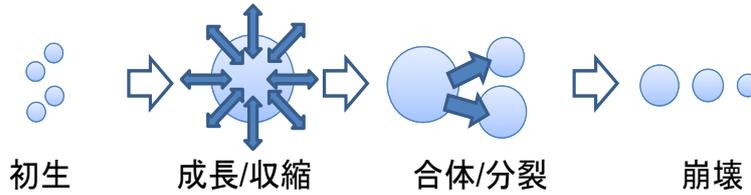
2. 気泡流モデルによる微細現象理解

多重プロセス型キャビテーションモデルの構築と検証



多重プロセス型キャビテーションモデル

気泡流・・・初生、成長/収縮、合体/分裂といった多重プロセス



モーメント法を用いた多重プロセス型モデル

$$\frac{D}{Dt} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ \rho_g M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_s \leftarrow \text{初生} \\ G(\bar{R}) \cdot M_0 \\ \text{相変化} \downarrow 2G(\bar{R}) \cdot M_1 \\ \dot{m}_v \cdot M_2 \cdot M_3 + 3\rho_g \cdot G(\bar{R}) \cdot M_2 \end{bmatrix}$$

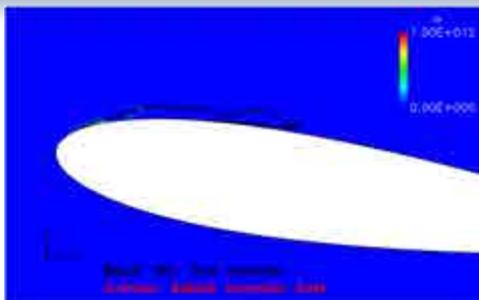
気泡数
 気泡径
 気泡表面積
 気泡質量

気泡の体積割合(ボイド率) $\alpha = \frac{4/3 \pi M_3}{1 + 4/3 \pi M_3}$ 合体・分裂を考慮したボイド率

Advances in Rocket Engine Modeling and Simulation

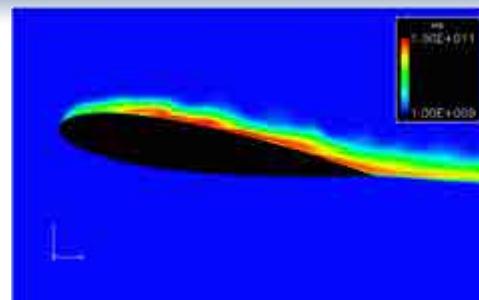
13

多重プロセスモデル 定性評価



気泡発生率 [1/s/m³]

黒い線は10%ボイド率



気泡数(Mo) [1/m³]



キャビティ前縁で気泡発生
 キャビティが消えた後に気泡数増大



ボイド率

定性的傾向は一致

Advances in Rocket Engine Modeling and Simulation

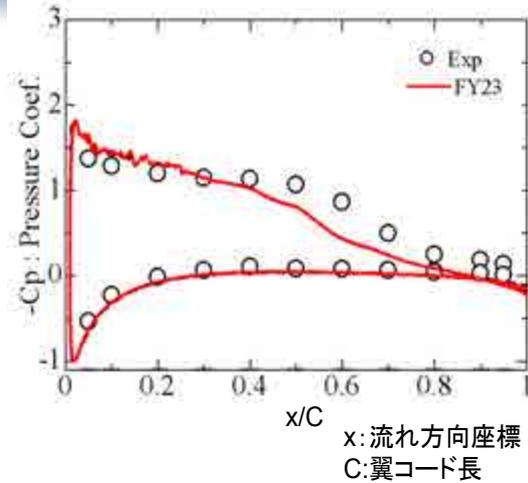
14

多重プロセスモデルの特性

NACA0015単独翼で検証
キャビテーション数: $\sigma = 1.4$



キャビテーションの様子
(ボイド率分布)



前縁部での微細キャビティが大規模に成長する特徴は捉えられている
大規模不安定事象の再現は可能だが、規模が小さい

定義

キャビテーション数 $\sigma = \frac{P - P_{sat}}{\frac{1}{2} \rho_{in} u_{in}^2}$

圧力係数

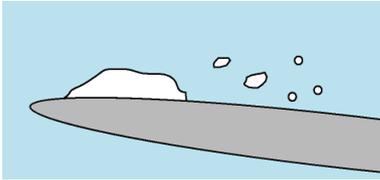
$$C_p = \frac{P - P_{in}}{\frac{1}{2} \rho_{in} u_{in}^2}$$

3. 気液界面追跡法による現象把握



界面追跡法によるキャビテーション計算

界面追跡モデル

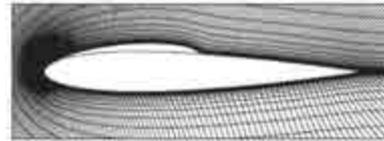


仮定
キャビティ内は完全に蒸気

特徴

- シートキャビテーションを精度よく捉えるためのアプローチ
- 研究例は少ない

研究例



re-generation-gridによるシートキャビテーション計算,
Tokumasu et al.

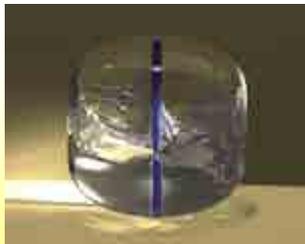
界面追跡的に計算した例は少なく、知見は少ない。
研究例としては、シートキャビテーションを一つの気膜として捉えるモデルであり、キャビテーションの詳細構造を界面追跡的に数値計算した例はない。

計算手法

キャビテーションへの解析アプローチ

- 気液界面流解析コードCIP-LSM(CIP Level Set Method)での流体計算
- 相変化を考慮したことによるキャビティ成長計算

CIP-LSMを用いた計算例



スロッシング数値計算、姫野



微粒化数値計算、宮下

相変化を考慮するときの仮定

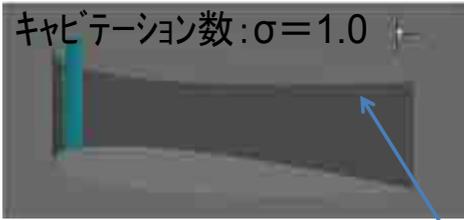
- 相変化は界面で生じ、温度差によって駆動される
- 界面では圧力・温度が常に平衡している
- 界面を通過できない熱は全て相変化に使われる



単独翼計算結果

NACA0015単独翼で検証

キャビテーション数: $\sigma = 1.0$

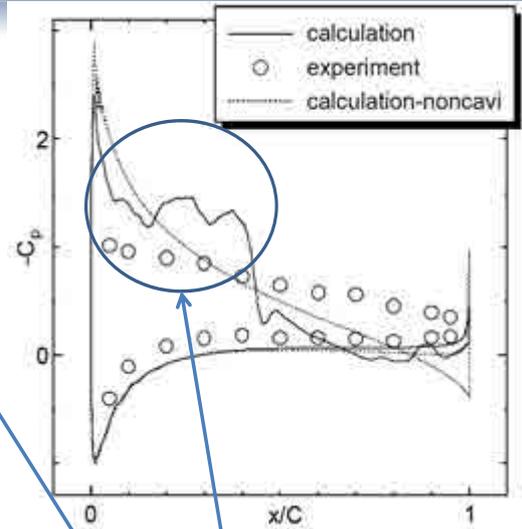


キャビテーションの様子
(ボイド率0.5%以上を白色)

定義

キャビテーション数 $\sigma = \frac{P - P_{sat}}{\frac{1}{2} \rho_{in} u_{in}^2}$

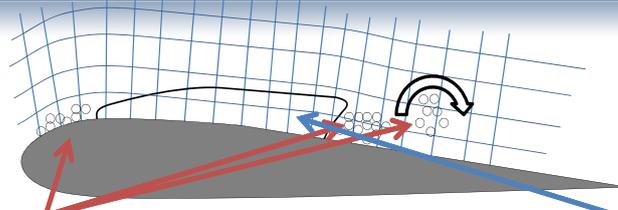
圧力係数 $C_p = \frac{P - P_{in}}{\frac{1}{2} \rho_{in} u_{in}^2}$



x: 流れ方向座標
C: 翼コード長

大規模不安定事象の再現は可能
キャビテーション発生部で相違が大きい

2つのアプローチの違い



初生・崩壊・渦部
気泡キャビテーション

発達部
シートキャビテーション

多重プロセス型キャビテーションモデル
初生部に強いが非定常性が弱い

界面追跡法
非定常性が強く発生

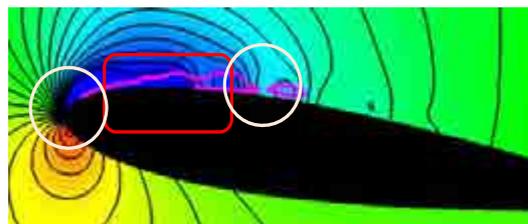
これらの特徴双方を包含する巨視的相変化モデルとは？

4. 巨視的キャビテーションモデルの評価



巨視的キャビテーションモデル

マクロ視点でのキャビテーション発生状況



マゼンタ色の線
ボイド率10%等値線

初生・崩壊部

気泡流

- ・合体/分裂の効果は局所的
- ・相変化量: 圧力差に比例

$$\dot{m} = \frac{2a}{2-a} (4\pi M_2) \frac{P_{sat} - P}{\sqrt{2\pi RT}}$$

シート部

界面流

- ・相変化量: 界面の温度差に比例
- ・飽和温度-圧力関係は局所線形

→ 相変化量: 圧力差に比例

巨視的観点では圧力差駆動の相変化考慮のみで実用上は十分

巨視的相変化モデル

$$\text{相変化量: } m = K_f \rho_l (1 - \alpha) + K_b \rho_g \alpha$$

$$K_b = \begin{cases} 0 & P < P_v \\ k_b (P - P_v) & P \geq P_v \end{cases}$$

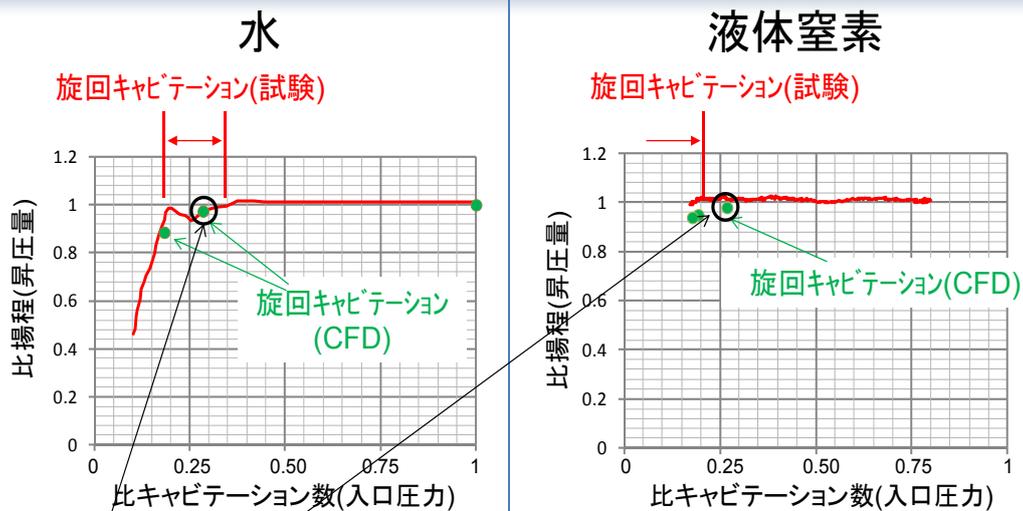
$$K_f = \begin{cases} 0 & P > P_v \\ k_f (P - P_v) & P \leq P_v \end{cases}$$

圧力差で相変化が駆動

検証

翼型より相対的に高速で大スケールのインデューサで検証

インデューサ吸い込み性能比較

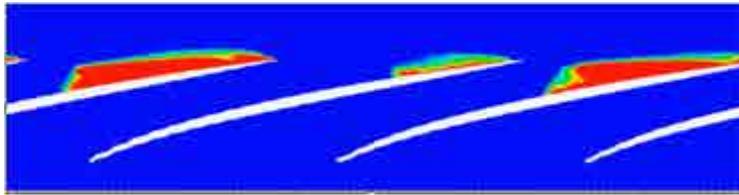


双方とも試験結果と良い一致。
 極低温での性能向上も捉えられている。
 旋回キャビテーション発生範囲も良い一致を示す

次ページで可視化

非定常特性比較

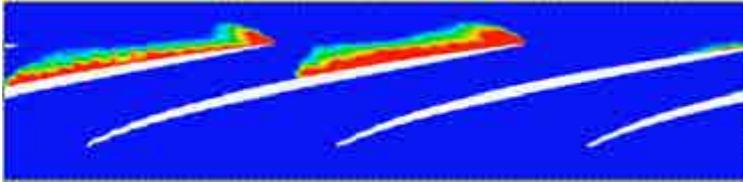
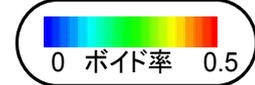
Rotation → 回転座標系上での可視化



水



90%半径での展開図

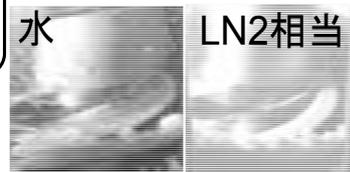


液体窒素

極低温キャビテーションの特徴
キャビティ発生が抑制=ボイド率が低くなる

実験で得られた傾向と等しい

水



R113での実験(LN2相当)

LN2相当

結論

結論

極低温インデューサ可視化実験の結果を参考に、
キャビテーション発生状況に応じた2種のモデルを評価

- ・気泡流に特化した多重プロセス型キャビテーションモデル

初生部に強いが非定常性再現性が弱い

- ・シートキャビテーション捕獲を主目的とする界面追跡法

非定常性が強く発生するがキャビティ部圧力が異なる

これらの特徴双方を包含する、圧力差で相変化が駆動される
巨視的キャビテーションモデルでインデューサを評価

- ・試験結果と定量的に良い一致を示し、極低温キャビテーション
の特徴も適切に補足

現象理解・・・多重プロセス型 + 界面追跡法ハイブリッド
実用解析・・・巨視的キャビテーションモデルの活用