極低温流体中でインデューサに発生する旋回キャビテーションの挙動 Behavior of Rotating Cavitation in a Cavitating Inducer in Cryogenic Fluid

○学 笹尾好史 (JAXA 技術研修生)、風見佑介 (JAXA 技術研修生)、正 吉田義樹 (JAXA)
正 井小萩利明 (東北大学流体研)、正 伊賀由佳 (東北大学流体研)

Yoshihumi SASAO*, Yusuke KAZAMI*, Yoshiki YOSHIDA**
Toshiaki IKOHAGI***, Yuka IGA ***

*JAXA Research Student at Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577

**Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 1 Koganezawa, Kimigaya, Kakuda, Miyagi 981-1525

***Institute of Fluid Science (IFS), Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577

Key Words: Rotating Cavitation, Thermodynamic Effect, Inducer, cavity length

1. 緒言

ロケットエンジン用ターボポンプには吸い込み性能を向上させるために、メインインペラの上流部にインデューサが取り付けられている。しかしインデューサには旋回キャビテーション、キャビテーションサージ等のキャビテーション不安定現象が発生し、旋回キャビテーションは軸振動や性能低下の原因となる。

本研究ではロケットエンジン用インデューサを用いて実験を行い、キャビテーション不安定現象の一種である同期、超同期旋回キャビテーションに着目して、その挙動を調べた。また温度の異なる液体窒素(74K、83K)を作動流体として用いることにより、熱力学的効果が旋回キャビテーションに与える影響についても検討した。

2. 実験設備と実験装置

2. 1 実験設備

本実験は角田宇宙センターにある極低温インデューサ試験設備にて行い、作動流体は液体窒素を用いて行った。インデューサは3枚翼でソリディティは約2.1である。試験回転数 $N=18300\text{rpm}$ 、流量比 $Q/Q_d=1.06$ (Q_d : 設計流量)を一定に保ち、入口圧を高い状態から減圧するキャビテーション試験を行った。また液体窒素の温度変化による差異を調べるために、降温(74K)と昇温(83K)をした液体窒素を用いる2種の実験を行った。

2. 2 実験装置

非定常キャビテーションの挙動を調べるにはキャビテーションを直接観察できることが望ましいが、極低温流体を用いた試験においてインデューサ内部のキャビテーションを可視化することは難しい。そこで、内部の様子を推定するために図1のようにインデューサのケーシング壁面に翼に沿ってPos.1(入口側)～Pos.8(出口側)まで8個の変動圧センサを設けた。各位置で翼がセンサ上を通過する時に発生する圧力変動から、間接的にインデューサの各翼間流路に発生するキャビテーション発生領域を推定することにより、キャビティ長さ(Lc)を求めた⁽¹⁾。

Fig.1 Photograph and illustration around the inducer

3. 実験結果

図2に液温74Kと83Kでの吸込み性能($\sigma-\psi$)、キャビティ長さ(Lc/h, h:翼列のスペーシング)と旋回キャビテーションを静止系から見た周波数(ω/Ω , ω :旋回周波数, Ω :軸回転周波数)を示し、図3には74Kの同期旋回キャビテーションと、83Kの超同期旋回キャビテーションのキャビティ長さの代表的な挙動を示す。また図4には図3中(1)(2)(3)で示す時間でのキャビティの不均一状態を示す。実験開始後、キャビテーション数 $\sigma/\sigma_0 \approx 0.8$ 付近になると両実験条件で、軸回転周波数(Ω)より高い周波数($\omega/\Omega=1.1 \sim 1.2$)で旋回する超同期旋回キャビテーションの発生が確認された。 $\sigma/\sigma_0 \approx 0.8$ よりキャビテーション数の大きなところでは、3つの流路のキャビティ長さに不均一性はなかったが、超同期旋回キャビテーション発生時には、キャビティ長さが不均一となり3流路を回転方向(channel1-2-3-1...)に移りかわることが図3(A)および図4(A)から確認できた。この様相および旋回周波数(ω/Ω)はIgaら⁽²⁾のCFDの結果と類似している。また、超同期旋回キャビテーションの旋回周波数はキャビテーション数の減少に伴いしだいに低下していくが、この時インデューサ揚程は変化していない。また図は省略するが、83Kの場合の超同期旋回キャビテーションは74Kの場合とほぼ同様な挙動を示していた。

その後キャビテーション数 $\sigma/\sigma_0 \approx 0.5$ 付近になると、静止系から見て軸回転周波数と同じ周波数($\omega/\Omega=1$)で旋回する、同期旋回キャビテーションが発生した。この時のキャビティ長さを図3(B)でみると、50回転中数回だけキャビティ長さが変化しているが、キャビティ長さは図4(B)に示すように不均一性を保ったままほぼ一定の状態となっているが確認される。また、74Kの場合には同期旋回キャビテーション発生時に揚程が一度低下しているが、83Kの実験では74Kと異なり揚程は低下していない。またキャビティ長さの不均一性を調べると74Kは83Kの時に比べ3流路における不均一性が大きい。

4. 考察

キャビテーションでは、キャビティ気泡の成長に必要な気化熱のために周囲の流体から熱移動が起き、それに伴いキャビティ周囲の温度および飽和蒸気圧が低下し、その結果キャビティの成長が抑制される。これをキャビテーションの熱力学的効果という。極低温流体の場合はその物性から熱力学的効果が顕著に現れる。

4. 1 超同期旋回キャビテーション

図3より超同期旋回キャビテーション発生時のキャビティ長さの変動振幅は74K、83Kの両条件においてほぼ等しい。このことより熱力学的効果は超同期旋回キャビテーシ

Fig.2 Cavity length(Lc/h), suction performance, and frequency(ω/Ω)

Fig.3 Behavior of cavity length of

(A)Super-R.C(83K), (B)Synchronous-R.C(74K)

Fig.4 Estimated cavity region of (A)Super-R.C(83K), (B)Synchronous-R.C(74K)

ン発生中のキャビティ長さの不均一性にさほど影響を与えていないことがわかる。また超同期旋回キャビテーションが発生し始めるキャビテーション数ではキャビティ長さはいずれも $Lc/h \approx 0.5$ であるが、83K の場合には 74K の場合に比べてキャビテーション数が小さいほうにシフトしている。これは熱力学的効果がキャビテーション不安定に対してダンピング効果を与えるためと考えている。しかし旋回キャビテーションの旋回周波数は両温度ではほぼ同一であり、周波数には熱力学的効果は現れていない。

4. 2 同期旋回キャビテーション

図2より 83K の場合の同期旋回キャビテーション発生時のキャビティ長さの不均一性は、74K の場合に比べて小さくなっている。つまり昇温することにより、熱力学的効果が大きくなり同期旋回キャビテーション発生中の長いキャビティの成長を抑制し、その不均一性を小さくしているものと推定される。同期旋回キャビテーションの発生し始めるキャビティ長さは、 $\omega/\Omega=1$ が明確となる周波数から判断すると 74K、83K のいずれの場合もキャビティ長さが $Lc/h \approx 0.8$ であり⁽³⁾その発生点はキャビティ長さに依存しているといえる。83K の場合は熱力学的効果によって、キャビティの成長が抑制されるために、発生点は 74K に比べてキャビテーション数の小さい方向にシフトしている。

4. 3 揚程とキャビティ長さ

74K の同期旋回キャビテーション発生中の場合にだけ揚程低下がみられた。この時、翼間のキャビティ長さはそれぞれ異なり、もっとも成長したキャビティは $Lc/h > 1.5$ となっておりその流路がキャビテーションで閉塞されることにより、一時的な揚程低下が発生したものと考えられる。また低キャビテーション数ではキャビティ長さに不均一性がなくても $Lc/h \approx 1.5$ となるあたりから揚程が急激に下

がり始めている。また両試験条件の揚程とキャビティ長さを比べてみると、キャビティ長さが同じなら揚程低下量も $Lc/h > 1.5$ でほぼ同じとなることがわかる。つまり揚程低下はキャビティ長さのみに依存している。

5. 結言

液体窒素温度を変化させ、旋回キャビテーションに着目して考察を進めた結果、以下のような知見を得た。

- (1) 旋回キャビテーションの発生点は液体の温度が高いと、熱力学的効果によってキャビテーション数の小さい方にシフトする。
- (2) 超同期旋回キャビテーション発生中のキャビティの平均長さ、および旋回周波数には熱力学的効果は小さかった。
- (3) 低キャビテーション数で発生する同期旋回キャビテーション発生中のキャビティ長さの不均一性には熱力学的効果が現れ、液体温度が高いほどキャビティの不均一性の程度は小さい。

謝辞

本研究を進めるにあたり JAXA 角田宇宙センターのターボポンプセクションの方々に実験データを使用させていただき、助言していただいたことを感謝いたします。

参考文献

- (1) 吉田義樹・他 5 名, 日本機械学会論文集(B 編) 72 巻 713 号(2006-1), pp. 54-60.
- (2) Iga, Y・他 3 名, 2004, ASME Journal of Fluids Engineering, 126, pp. 419-429.
- (3) 吉田義樹・他 5 名, 日本機械学会論文集(B 編) 73 巻 727 号(2007-2) 掲載予定