

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

同期旋回キャビテーション初生時の キャビティ不均一長さと軸振動の相互関係

吉田 義樹, 永浦 克司, 風見 佑介
島垣 満, 伊賀 由佳, 井小萩 利明

2008年8月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

同期旋回キャビテーション初生時のキャビティ不均一長さと軸振動の相互関係^{*}

吉田 義樹^{*1} 永浦 克司^{*2} 風見 佑介^{*3}
島垣 満^{*1} 伊賀 由佳^{*3} 井小萩 利明^{*3}

Interaction between Uneven Cavity Length and Shaft Vibration at the Inception of Synchronous Rotating Cavitation

Yoshiki YOSHIDA, Katsuji NAGAURA, Yusuke KAZAMI,
Mitsuru SHIMAGAKI, Yuka IGA and Toshiaki IKOHAGI

ABSTRACT

Asymmetric cavitation is known as one type of the sources of cavitation induced vibration in turbomachinery. Cavity lengths are unequal on each blade under condition of synchronous rotating cavitation, which causes synchronous shaft vibration. To investigate the relationship of the cavity length, fluid force and shaft vibration in a cavitating inducer with three blades, we observed the unevenness of cavity length at the inception of synchronous rotating cavitation. The fluid force generated by the unevenness of the cavity length was found to grow exponentially in progress of time, and the amplitude of shaft vibration was also observed to increase exponentially. These experimental results indicate that the synchronous shaft vibration due to synchronous rotating cavitation is one type of self-excited vibrations arising from the coupling between cavitation instability and rotordynamics.

Key Words : Synchronous Rotating Cavitation, Inducer, Cavity Length, Fluid Force

1. 緒言

液体ロケットエンジン用ターボポンプにとって、インデューサは吸込み性能を確保するための重要な構成要素である。しかしながら、ある作動条件では旋回キャビテーション (Rotating Cavitation, 以下 RC と略す) やキャビテーションサージ (Cavitation Surge, 以下 CS と略す) のようなキャビテーション不安定が発生する⁽¹⁾⁻⁽²⁾。更に、これらのキャビテーション不安定に加えて、3枚翼インデューサの場合には比較的低いキャビテーション数で各翼のキャビティ長さが不均一となってその状態が持続する同期旋回キャビテーション (Synchronous Rotating Cavitation, 以下 SRC と略す) が、しばしば観察される。そして、SRC の不均一なキャビテーションは、インデューサ揚程の低下や同期軸振動をもたらす⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

既に、Hashimoto ら⁽⁵⁾や Kobayashi⁽⁶⁾によって同期軸

振動と SRC の関係が調べられており、SRC の発生と軸振動の振幅値に有意な相関関係があることが分かっている。しかしながら、SRC のキャビティ長さ不均一と同期軸振動の相互関係、および SRC が安定して持続するメカニズムについては未だ十分に明らかにされていない。

本報告では、特に SRC の初生時の過渡特性に着目して不均一なキャビティの成長と、インデューサに作用する流体力および軸振動の増大の関係を調査し、キャビティ長さ不均一と軸振動の相互作用を考察する。

2. 記号

F : 流体力
 F_0 : 流体力の基準値
 h : 翼列のスペーシング
 L_c : キャビティ長さ

平成 20 年 4 月 23 日受付 (received 23 April, 2008)

^{*1} 宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系推進技術開発センター (Space Transportation Propulsion Research and Development Center, Space Transportation Mission Directorate)

^{*2} 航空宇宙技術振興財団 (Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology)

^{*3} 東北大学流体科学研究所 (Institute of Fluid Science, Tohoku University)

- Q : 流量
 Qd : 設計流量
 δ : 減衰比
 ε : 軸振動の振幅
 ε_0 : 軸振動の振幅基準値
 σ : キャビテーション数
 σ_0 : キャビテーション数基準値
 Ω : 軸回転角速度
 ω : 旋回キャビテーション旋回角速度
 または、軸ふれまわり角速度
 ψ : 揚程係数
 ψ_0 : 揚程係数基準値

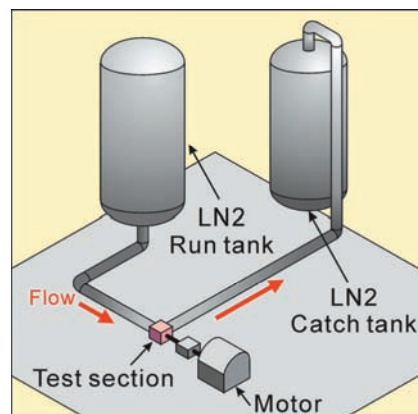


Fig. 1 Schematic diagram of the Cryogenic Inducer Test Facility

3. 実験方法

3.1 実験装置

実験は JAXA 角田宇宙センターにある極低温インデューサ試験設備を用いて行った。図 1 に設備の概略図を示す。作動流体には液体窒素を用い、インデューサ入口での測定温度は 74K である。実験に用いたインデューサは前縁にスweepのある 3 枚翼であり、ソリディティは約 2.1 である。インデューサはインバータモータと遊星歯車式増速機により駆動され、実験回転数は 18300rpm で流量は設計流量比で $Q/Qd = 1.06$ である。実験の計測精度はフライト用ターボポンプの計測精度と同等である。

3.2 キャビテーション長さの測定

キャビテーションの特性を調べるには直接キャビテーションを可視観察することが望ましい。しかしながら、極低温流体中でインデューサに発生するキャビテーションを直接可視化することは現状では実験技術的に難しい。従って今回の実験では、インデューサに起こるキャビテーションの状態を間接的に推定するために、図 2 と図 3 で示すように翼の前縁から後縁に沿って 8 つの変動圧セ

ンサをケーシング壁面に設置し、キャビティ領域では圧力が飽和蒸気圧に達して、その波形が底を打つような一定値を示すことを利用してキャビテーションの発生を観察することにした⁽⁷⁾。

この変動圧センサはインデューサ翼端付近のキャビテーションを検出するが、インデューサの上流に発生する逆流渦キャビテーションの計測はできない。しかし、これまでの研究より翼端に発生するキャビテーションが吸込み性能やキャビテーション不安定に大きな影響を与えることが分かっているので、翼端付近に発生するキャビティ長さを“キャビテーションの一指標”として考察することは妥当と考えている。

これらの 8 つの変動圧センサの信号を用いると図 4 に示すような翼間の圧力の等高線を描くことができる。図中の色の濃い部分を“キャビテーションの発生領域”と考える。なお、各翼の翼前縁からキャビテーション発生領域の後縁までの翼に沿った長さを“キャビティ長さ (L_c)”と定義する。

一方、インデューサの駆動軸後端側には図 2 に示すように、軸変位センサが x - y 方向に 2 個設置されている。

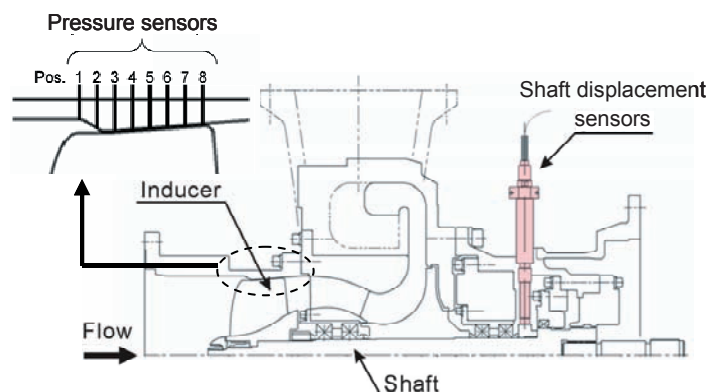


Fig. 2 Schematic diagram of the test section showing the locations of pressure sensors and shaft displacement sensors

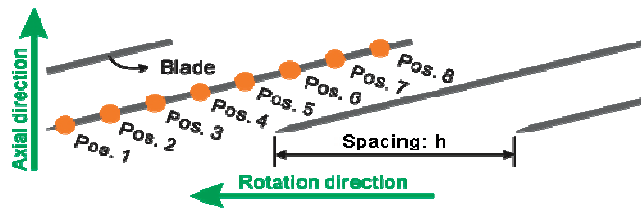


Fig. 3 Development view of the inducer showing locations of pressure sensors along the inducer blade

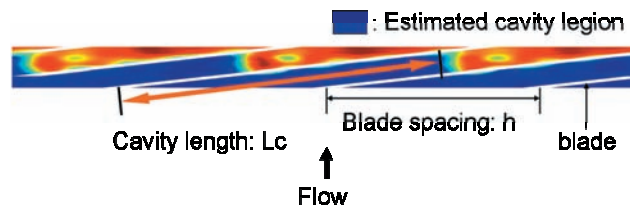


Fig. 4 Example of estimated cavity region obtained from the measured pressure distribution

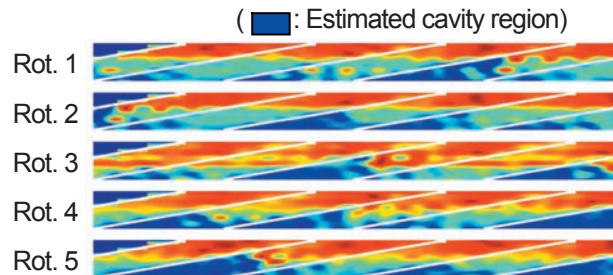


Fig. 5 (a) Examples of estimated cavity region under super-synchronous rotating cavitation

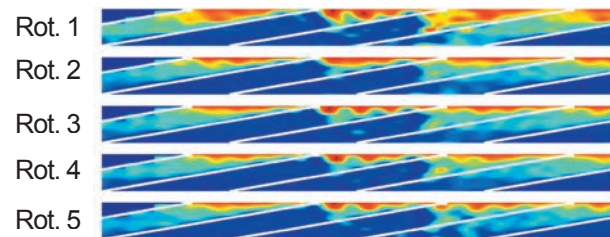


Fig. 5 (b) Examples of estimated cavity region under synchronous rotating cavitation

本来ならばインデューサ直近に設置されることが望ましいが、実験ポンプの構造上の制約によりインデューサ付近に軸変位センサを取り付けることができなかった。

3.3 旋回キャビテーション

RC には 3 枚の翼のキャビティ長さが不均一になり、時間とともにこの非対称なパターンが軸回転方向へ翼から翼へ伝播する超同期旋回キャビテーション (Super-Synchronous Rotating Cavitation, 以下 Super-SRC と略す) と、伝播しない SRC の 2 種類がある。図 5 (a) は Super-SRC のキャビテーション振動を示したものであり、キャビティ長さの不均一が翼から翼へと伝播している様子が分かる。一方、図 5 (b) に示す SRC では各翼で不均一と

なったキャビテーションパターンがインデューサの回転に同期しており、翼から見て時間的に変化してない。つまり Super-SRC は、キャビティ長さ不均一がインデューサの回転速度の 1.1 ~ 1.2 倍の角速度で周方向に伝播する現象であり、SRC はキャビティ長さ不均一が伝播しない、定常的な現象であることが分かる。

4. 実験結果

4.1 インデューサ揚程特性、キャビティ長さ、軸振動

図 6 の菱形 (◇) は各翼流路のキャビティ長さ (L_c) をスペーシング (h) で無次元化したキャビティ長さ (L_c/h) を示している。また、丸形 (○) は基準揚程 (ψ_0) で無次元化した揚程比 (ψ / ψ_0) を示す。さらに黒三角と

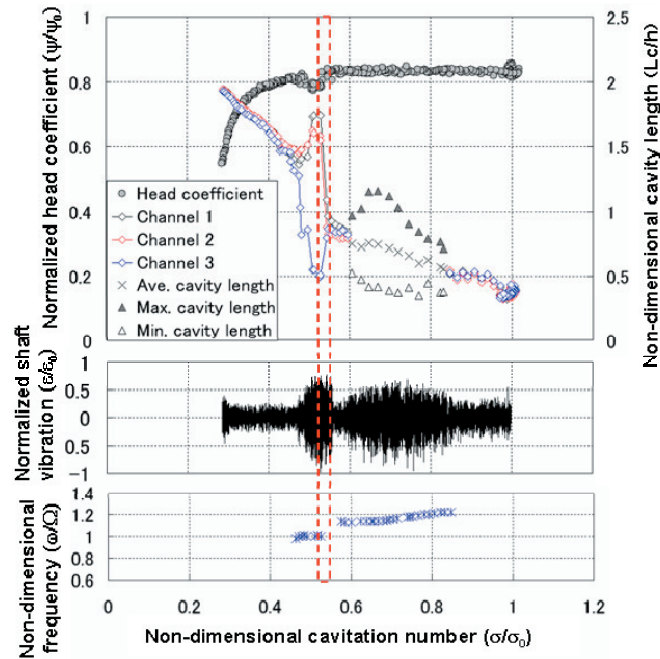


Fig. 6 Cavitation performances, cavity length of each channel (top), shaft vibration (middle), and variations of frequency of shaft vibration (bottom)

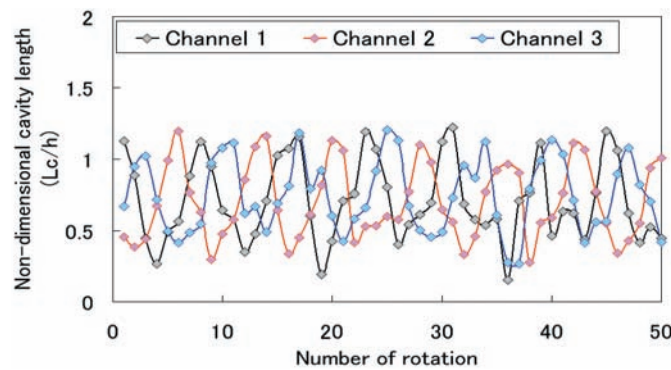


Fig. 7 (a) Fluctuations of cavity length under super-synchronous rotating cavitation

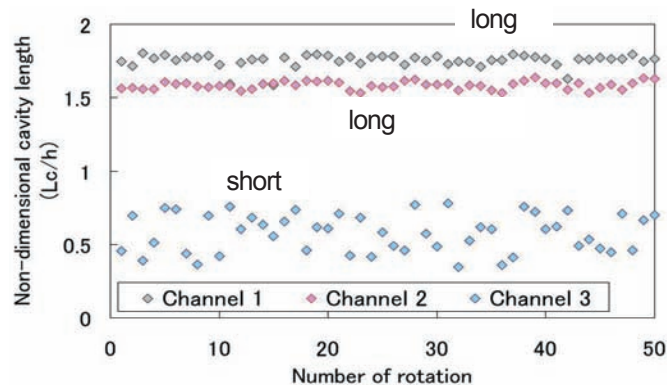


Fig. 7 (b) Fluctuations of cavity length under synchronous rotating cavitation

白三角 (\blacktriangle and \triangle) は Super-SRC 発生時のキャビティ長さ変動の振幅の最大と最小を示し、バツ印 (x) はその時のキャビティ長さを時間平均したものを示している。この時間平均値を見ると、キャビテーション数 (σ/σ_0)

の減少に伴い Super-SRC 発生中にも平均キャビティ長さは漸増していることが分かる。加えて図 6 の中段には軸変位センサにて計測された軸振幅、下段には米印 ($*$) で Super-SRC と SRC の巡回速度比 (ω/Ω) を示

している⁽⁸⁾。

キャビテーション数が減少しキャビティ長さが $Lc/h \approx 0.5$ ($\sigma/\sigma_0=0.85$) に達すると Super-SRC が発生している。Super-SRC の状態では図 7(a) に示すように、キャビティ長さはインデューサの約 8 回転を 1 周期として、3 枚の翼の位相差が $2\pi/3$ で変動している。Channel 3, 2, 1 の順に位相差が $2\pi/3$ であること、また約 8 回転で元の状態に戻ることから、キャビティは回転座標系でインデューサの回転角速度の約 $1/8=0.13$ で旋回していることが分かる。これを絶対系から見ると軸角速度の 1.13 倍 ($\omega/\Omega = 1.13$) で伝播していることになり、これが図 6 の下段に示す超同期軸振動の原因となっている。

これに対して、SRC はキャビティ長さ $Lc/h \approx 0.9$ ($\sigma/\sigma_0=0.55$) で発生し、キャビティ長さの不均一パターンは、図 7 (b) に示すように (short, long and long) となっており、その不均一の程度は Super-SRC の時よりも大きい。しかし、図 6 を見ると SRC は $Lc/h \approx 1.5$ で消滅し、その後再び等長キャビテーションとなっていることが分かる。これらのことから、Super-SRC と SRC の発生と消滅にはキャビティ長さがそのトリガとなっており、“本来 Super-SRC と SRC はキャビテーションに起因する流体不安定の一つ”と考えられる。

図 6 の丸形 (○) のインデューサ揚程を見ると、Super-

SRC の発生範囲ではこのキャビテーション不安定による揚程への影響はほとんど認められない。しかしながら、SRC の発生範囲 (2 流路のキャビティ長さが $Lc/h > 1.5$) では一時的な揚程の低下が明瞭に認められる。しかし、SRC 消滅後はキャビティ長さは 3 流路で $Lc/h \approx 1.5$ で等長となり、一度揚程は元の状態に戻るが、それ以降の低キャビテーション数では、3 流路のキャビティ長さが $Lc/h > 1.5$ となり揚程が漸減して行く。以上のことから揚程低下はキャビティ長さ ($Lc/h > 1.5$) に強く依存していることがわかる。

4.2 初生での成長過程

4.1 で示したように SRC は一時的な揚程低下と同期軸振動の原因となっている。本実験では SRC と工学的に問題となる同期軸振動が持続するメカニズムを調べるために、SRC 初生時にキャビティが成長して行く過渡現象に着目した。

図 8 に、図 6 中の点線の範囲で示した SRC 初生時のキャビティ長さ不均一の成長の挙動を示す。また、インデューサに作用する流体力を調べるために、ケーシング壁面の非定常圧力分布を積分することにより“流体力 (F)”を算出した。但し、この流体力はインデューサ壁面の圧力分布からのみ推定しているため、厳密にはイン

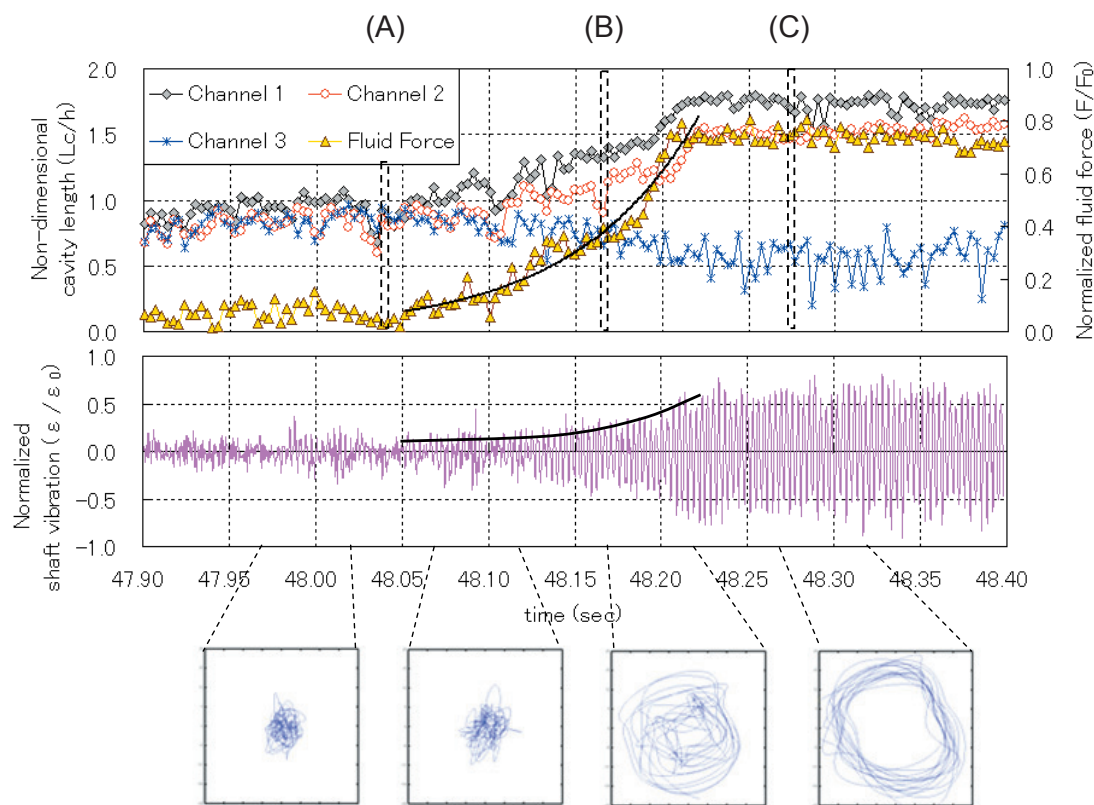


Fig. 8 Cavity length of each channel, fluid force (top), the amplitude of shaft vibration (middle), and the lissajous figures showing the orbit of shaft vibration (bottom)

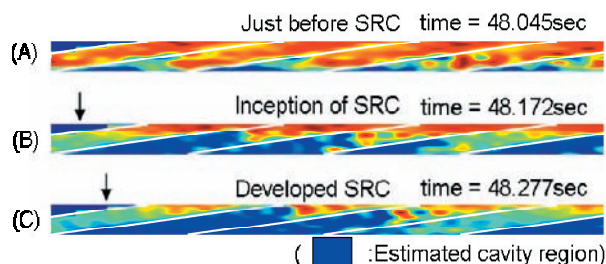


Fig. 9 Figures of estimated cavity region near inception of Synchronous rotating cavitation (SRC)

デューサに作用する流体力そのものではない。ここでは、軸振動に影響を及ぼす“流体力の一指標”と考えることを予め注意しておく。流体力 (F) を基準流体力 (F_0) で無次元化したものを図8の黄三角 (A) で示す。

図9はSRC初生時のキャビテーション不均一の成長過程 (図8の時刻 (A), (B), (C) に相当する) を示した図で、図中の矢印は上記方法で算出した流体力ベクトルがロータ中心方向に作用する方向の位相位置を示している。SRC発生下での流体力の位相は短いキャビティの発生している流路からロータ中心に向かう方向である。なお、図8の下段には同時刻での軸振動の軌跡 (x-y座標) の変化する様子をリサージュ図で示した。

48.05秒以前ではキャビティ長さ、流体力、軸振動の変動はわずかであり、SRCは発生していない。48.05秒以後にキャビティ長さの不均一が始まり、流体力も増加し始めていることから、キャビテーション不安定としてのSRCの開始は48.05秒以後であることがわかる。一方、48.22秒以後にはキャビティ長さの不均一の程度と、流体力の増加はほぼ飽和しており、SRCは完全に成長し切った状態にある。従って、SRCの成長する時間は約0.17秒で、これは軸回転数で約50回転に相当する。

48.22秒後のSRCの安定した状態では、翼間流路1と2のキャビティ長さは $Lc/h > 1.5$ で安定しているが、翼間流路3では $Lc/h < 0.8$ (スロートの手前) で、ランダムに変動している。

図8の下段に示したx-y方向の軸変位センサから描いたリサージュは、48.05秒以前では振幅は小さく軌跡はランダムな振動を示しているが、48.22秒以後では振動がリミットサイクルのような大きな円軌道となり、完全に発達した状態となって安定しており、上述のSRCのキャビティの不均一の発達過程と一致する。

5. 検討

5.1 同期旋回キャビテーションの成長

図8に示したSRCの成長の間に、キャビティ長さ不均一による流体力は時間に対して指数関数的に増加し、

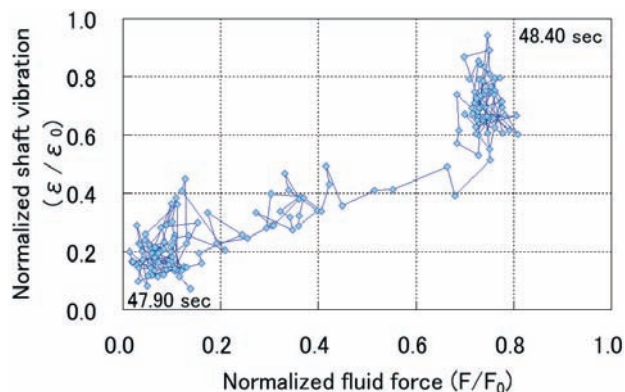


Fig. 10 Increase of the amplitude of shaft vibration as a function of the fluid force

軸振幅もまた指数関数的増加していることが観察できる。この流体力と軸振動の成長時の挙動を比較するために、図8中に示したフィットカーブから対数減衰率 (δ) を求めた。フィットカーブから求めた軸振動の対数減衰率 δ_s は -0.03、流体力の対数減衰率 δ_F は -0.04 となり、両対数減衰率は共に負で、ほぼ同等の値を示している。

また、図10にはSRC初生時の軸振幅と流体力の関係を示した。軸振動の振幅は流体力に比例して、ほぼ直線的に増加していることが分かる。

翼端漏れ渦キャビテーションの程度はチップクリアランスに大きく依存する⁽⁴⁾が、同期軸振動の振幅が増加すると、インデューサ翼端とケーシングの間のクリアランスは各翼ごとで異なるようになる。それ故、同期軸振動は各翼の翼端漏れ渦キャビテーションの不均一を作るようになり、SRCのキャビテーション不均一をも助長するものと考えられる。これらのことから、“SRCが発生している状態での同期軸振動の成長は、SRCと軸振動の連成による一種の自励振動である”という解釈も出来る。これは“キャビテーションが原因となってインデューサに作用する流体力が軸に強制振動的に同期軸振動を発生させる”というRosenmann⁽³⁾らの古典的な考え方とは異なる。

5.2 Hydrodynamics-rotordynamics coupling mechanism

前節までに述べたキャビティ長さ、流体力、軸振動の関係からだけでは、現状はまだ推定にすぎないが、SRCが安定して持続し、工学的に問題となるような軸振動の振動メカニズムを図11に示した。

まず初めに、キャビティ長さが“臨界長さ”に達すると、キャビティ後縁と隣接翼前縁との干渉から流体的不安定として“対称性が破れ”キャビティ長さが不均一となるキャビテーション不安定が起こる⁽⁹⁾。このキャビティ長さ不均一によって発生する流体力は、インデューサロー

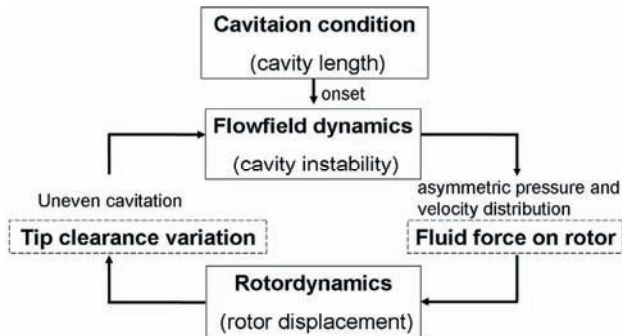


Fig. 11 Hydrodynamics (cavitation) - rotordynamics coupling mechanism

タに軸変位を与え、軸中心はふれまわり運動となる。そして、軸のふれまわり半径に応じて、各翼の翼端隙間に不均一が生じ、これは翼端隙間の流れに影響される翼端渦キャビテーションのキャビティ長さ不均一を更に助長させる結果となる。図 1 1 に示すように、このプロセスが繰り返されることで Super-SRC および SRC は成長し、最終的には軸剛性と釣り合うふれまわり半径で安定したふれまわり軸振動の状態となる。

ここで提示したキャビテーションに関する Hydrodynamics-rotordynamics coupling は、軸流圧縮機の旋回失速に関して Al-Nahwi ら⁽¹⁰⁾が提案している、翼端隙間の不均一に起因する Aerodynamics-rotordynamics coupling と同種のものと考えている。図 1 2 に、これを真似て上記で説明したメカニズムをスケッチ図で示した。

6. 結言

SRC 初生時のキャビティ長さ不均一、流体力、および軸振動の関係を実験的に調べることで以下ことが明らかとなった。

- 1) SRC 初生時のキャビティ長さ不均一と軸振動の成長は、同じ時刻で起きている。
- 2) 不均一なキャビティ長さによって生じる流体力は時間に対して指数関数的に発達し、軸振動の振幅もまた同様に時間に対して指数関数的に増加する。
- 3) 不均一なキャビティ長さによって生じる流体力と、軸振動の振幅の増大はほぼ比例関係にある。
- 4) SRC による同期軸振動は図 1 1 に示すような、キャビテーション不安定に起因する Hydrodynamics-rotordynamics coupling による自励振動の一つであると推定され、軸変位による翼端隙間の変化が大きなカップリング要素となっているものと考えられる。

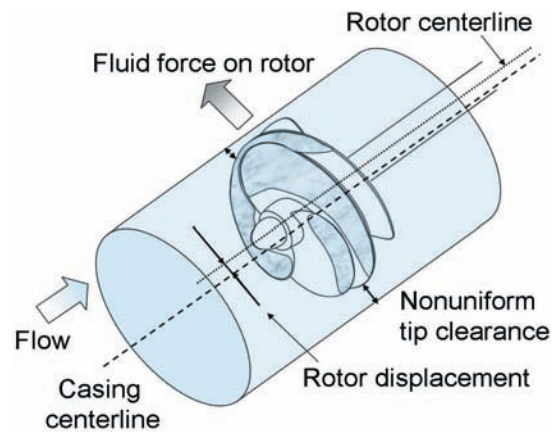


Fig. 12 Schema of Hydrodynamics (cavitation)-rotordynamics coupling mechanism

謝辞

データ解析にご助力いただき、貴重なご討論をいただいた東北大学大学院生笹尾好史君、(株) IHI 呉 宏堯氏、本井久之氏、(株) 荏原総合研究所 江口真人氏に心から御礼申し上げる。

参考文献

- (1) Acosta, A. J., 1958, "An Experimental Study of Cavitating Inducer," Proceedings of the Second Symposium on Naval Hydrodynamics, ONR/ACR-38, pp. 537-557.
- (2) Kamijo, K., Shimura, T., and Watanabe, M., 1977, "An Experimental Investigation of Cavitating Inducer Instability," ASME Paper 77-WA/FW-14.
- (3) Rosenmann, W., 1965, "Experimental Investigations of Hydrodynamically Induced Shaft Forces with a Three-bladed Inducer," ASME, Symposium on Cavitation in Fluid Machinery, pp. 172-195.
- (4) Tsujimoto, Y., Yoshida, Y., Maekawa, Y., Watanabe, S. and Hashimoto, T., 1997, "Observations of Oscillating Cavitation of an Inducer," ASME, J. Fluids Eng., Vol. 119, No. 4, pp. 775-781.
- (5) Hashimoto, T., Yoshida, M., Watanabe, M., Kamijo, K. and Tsujimoto, Y., 1997, "Experimental Study on Rotating Cavitation of Rocket Propellant Pump Inducers," AIAA J. Propuls. Power, Vol. 12, No. 4, pp. 488-494.
- (6) Kobayashi, S., 2006, "Effects of Shaft Vibration on Occurrence of Asymmetric Cavitation in Inducer," JSME International Journal, Series B, Vol. 49, No. 4, pp. 1220-1225.

- (7) Yoshida, Y., Kikuta, K., Hasegawa, S., Shimagaki, M. and Tokumasu, T., 2007, "Thermodynamic Effect on a Cavitating Inducer in Liquid Nitrogen," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 129, pp. 273-278.
- (8) Yoshida, Y., Sasao, Y., Watanabe, M., Hashimoto, T., Iga, Y. and Ikohagi, T., 2007, "Thermodynamic Effect on Rotating Cavitation in an Inducer," ASME, FEDSM2007-37468, San Diego, CA.
- (9) Horiguchi, H., Watanabe, S., Tsujimoto, Y., and Aoki, M., 2000, "A Theoretical Analysis of Alternate Blade Cavitation in Inducers," ASME J. Fluids Eng., 122, pp. 156-163.
- (10) Al-Nahwi, A. A., Paduano, J. D., and Nayfeh, S. A., 2003, "Aerodynamic-Rotordynamic Interaction in Axial Compression Systems – Part 2: Impact of Interaction on Overall System Stability," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 125, pp. 416-424.