

ジャーナル軸受に生じるキャビテーションの成長および収縮過程のその場観察

In-Situ Observation of Cavitation Growth and Shrinkage Processes in Journal Bearing

大豊工業（正）*梶木 悠一朗 九大（正）八木 和行

Yuichiro Kajiki*, Kazuyuki Yagi**

*Taiho Kogyo co., ltd., **Kyushu University

1. はじめに

ジャーナル軸受に生じるキャビテーションは油膜破断を伴うことから、主に流体潤滑理論における油膜圧力発生範囲を決める境界条件問題の一つとして取り扱われてきた。また、キャビテーションの崩壊時の衝撃が軸受表面に作用することによって生じるエロージョンは回転機械の性能を著しく低下させることが知られている。この崩壊時の衝撃の影響はエロージョンだけでなく、エンジン用主軸受周辺から断続的に高周波ノイズを発生させる一因になることも報告^{1,2)}されている。これは今後普及が進むであろう電動化車両用パワートレインの静寂性の向上によって、異音・騒音といった新たな問題が顕在化する可能性がある。

このようなキャビテーションの挙動を詳細に捉えることは、現象の理解にとって重要であり、直接観察の手法を用いた研究が進められてきた。静荷重下におけるキャビテーションの成長過程では、フィンガー状や櫛状といったキャビティが準安定的に形成されるほか、小さなキャビティが合体し成長するといった報告がされている³⁾。変動荷重下ではシダ状や樹枝状といった特徴的な気液界面をもつキャビティの観察結果が報告されている⁴⁾。

しかしながらこれらの研究の多くは低い面圧の条件で実験されており、試験機の構造上の制約から観察視野も限定的である。そのため、自動車用エンジンに代表される高面圧下におけるキャビテーションの挙動を捉えた例はほとんど報告されていない。

そこで本研究では高面圧下におけるジャーナル軸受を対象に、しゅう面をその場観察できる実験装置を用い、時々刻々と変化するキャビテーションの様相を捉えた。ここでは、しゅう動面の様々な位置におけるキャビテーションの成長と収縮過程を観察した結果について報告する。

2. 実験方法

従来は軸受側をアクリル等の透明な素材を用いハウジングを製作し、その内面に軸受のプロファイルを模擬する方法や、軸受に直接観察窓を設置する方法が採用されてきた。これらの方に共通する課題として、構造体の強度や剛性低下を招き、実験条件の範囲も限定されることが挙げられる。

そこで本実験では、軸受は加工することなく使用し、軸側から観察する手法を検討した。本実験で用いたその場観察装置の概略図を Fig. 1 に示す。回転軸はサファイア製で円筒形状とした。円筒内部にリジッドタイプのボアスコープを設置する。ボアスコープ先端の側面にレンズが設置されており、回転機構によりしゅう動面のあらゆる箇所を内側から観察することができる。なお、本実験では図中の View (A)から View (D)にかけて観察を実施した。ボアスコープはアダプタを介しハイスピードカメラに接続し連続撮影を行った。回転軸は両端をすべり軸受で支持し、供試部のすべり軸受はハウジングにセットされ、アクチュエーターによって往復動荷重を与えた。本試験ではエンジン用の半割軸受を使用し、試験機アッパー側に穴や溝のないプレーン形状の軸受を用い、ロア側に油穴および半周にわたる油溝を施した軸受を使用した。潤滑油はハウジングから給油され、ロア側軸受の油穴および溝を介して供給される。実験条件を Table 1 に示す。

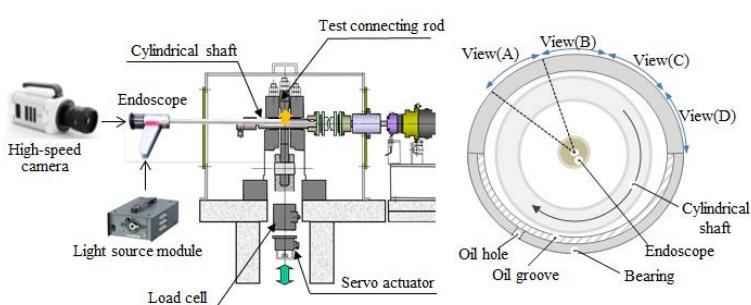


Fig. 1 In-situ observation system of journal bearing

Table 1 Test condition

Bearing width	14.7 mm
Shaft diameter	48 mm
Diametral clearance	60 μ m
Load pattern	Reciprocating
Load	a) + 5 kN/-5 kN b) +15 kN/-15 kN c) +30 kN/-30 kN
Rotational speed	1,000 rpm, 2,000 rpm 3,000 rpm
Lubricant grade	SAE SN 0W-20
Supply oil temperature	40°C
Amount of supply oil	1.0 L/min
Frame rate	50,000 fps
Shutter speed	20 μ s
Spatial resolution	512×512

3. 実験結果および考察

3.1 キャビティの成長過程

Figure 2 に View (A)から View (D)におけるキャビテーションの成長過程について、軸回転速度 2,000 rpm, 往復動荷重±15 kN の条件で観察した結果の一例を示す。View (A)において、黄色の破線で示したキャビティの輪郭に注目するとシダ状のキャビティが成長する様子が確認できる。これは、回転軸が上流側から下流側へ相対的に移動することに伴う負圧によって油中溶存ガスが析出したものと推定される。このキャビティの成長は荷重が大きいほど長く大きく成長する傾向にあり、回転速度の影響はそれに比べて小さいことが確認された。また、回転方向に逆らってキャビティが成長することは注目すべき点であり、これは全ての条件で観察された。View (B)では、往復動荷重が±5 kN の場合にのみ気液界面が確認でき、それ以外の条件では明瞭な気液界面は確認できない。しかし、観察視野全体にわたって”もや”がかかるような変化が認められ、それは View (C)でも同様であった。さらに、View (D)では、半割軸受の合わせ部近傍に排出されずに残った直径約 1.0 mm 前後の気泡が確認でき、これを起点に回転方向に逆らってシダ状に成長する様子が観察された。また上流側（図中、左端）からキャビティの一部が確認できるため、View (C)から成長してきたキャビティの先端と考えられる。このことから、View (B)ならびに View (C)で確認された”もや”は明瞭な気液界面はもたないものの、キャビテーションであることが推定される。以上の観察結果から、本実験条件におけるキャビテーションの発生は、View (B)から View (C)の範囲内にキャビテーション初生となる起点が存在し、そこから軸方向、ならびに周方向にキャビテーションが成長すると考えられる。

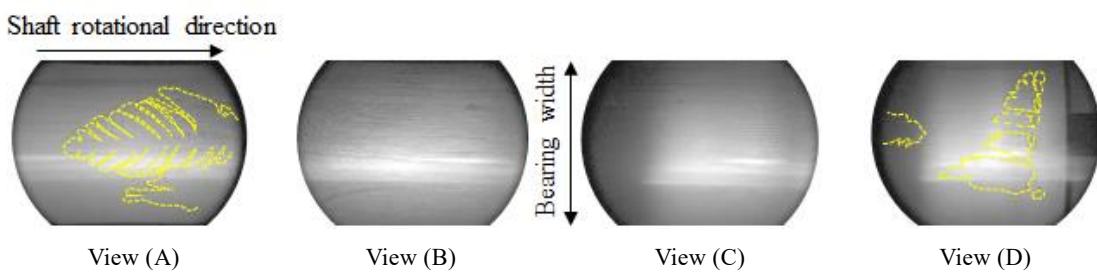


Fig. 2 Observation results of cavitation behavior in growth process

3.2 キャビティの収縮過程

Figure 3 に View (A)から View (D)におけるキャビテーションの収縮過程について、Fig. 2 と同じ条件で観察した結果の一例を示す。シダ状に成長したキャビティはその輪郭を保つつつ、徐々に収縮しながら下流へ流れていく様子が観察された。この様子は View (B), (C)においても同様であった。View (D)では閉じたキャビティが形成されていることがわかる。このキャビティは Fig. 2 の View (D)の状態に至るまでに数個に分裂する。これは下流側から溝を通って供給された潤滑油の体積力がキャビティの気液界面に作用したことが原因と推定される。また、この領域ではラジアル方向に渦のように流れることも確認された。

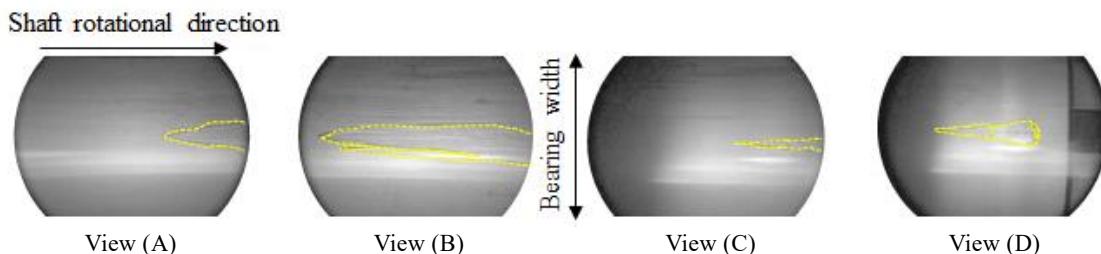


Fig. 3 Observation results of cavitation behavior in shrinkage process

一方、条件をさらに厳しくすると、これまでに比べて大きく異なる収縮過程を示す。Figure 4 に軸回転速度 3,000 rpm, 往復動荷重±30 kN の条件における View (C)の収縮過程の観察結果を(a)から(f)の順に時系列で示す。Figure 4 (a)では、観察視野の大部分を覆うようにキャビティが形成され、それが徐々に収縮する。収縮にともなって軸受端部からしうる動面内に向かって気泡の侵入（図中、左上）が確認できる。白の破線が侵入した気泡の輪郭を表す。Figure 4 (b)では、収縮に伴い侵入する気泡量は増加している。そして、収縮中のキャビティと干渉すると、気泡はすぐさま破裂する。この時キャビティの形状に大きな変化は見られない。Figure 4 (c)において、さらにキャビティの収縮が進むと、キャビティから軸受端部に向かってガスが放出（図中、右上）されているように見受けられる。Figure 4 (d)が示すようにガスの放出がつづく中、キャビティの収縮も進み、しだいにキャビティの気液界面の形状が内側にくびれ始める。Figure 4 (e)のようにその直後、気液界面は引きちぎられるように分裂し、Fig. 4 (f) のように下流側にむかって勢いよく崩壊する。Figure 4 (d)から(f)の状態に要した時間は約 400μs である。キャビティ先端部の収縮と崩壊時の位置をもとに速度を試算すると約 12.5m/s であり、回転軸の周速の約 1.7 倍に相当する。このことは、キャビティの崩壊に伴う潤滑油の再充填が生じる際、すきま方向の流速分布が極めて複雑になっていることが示唆され、キャビテーションアルゴリズムを含む従来の流体潤滑モデルの適用性についても検証が必要とされる。

このように、キャビテーションの収縮過程は、条件によって異なることが明らかになった。特に、Fig. 4 で示した複雑な収縮と崩壊を伴う様子は、崩壊する速度や、その様相が水の電気分解等で見られる单一気泡の崩壊にも類似していることから、本実験で捉えたキャビテーションは、溶存ガスの析出による気体性キャビテーションだけでなく、一部相変化を伴った蒸気性キャビテーションも含んでいる可能性があると考えている。

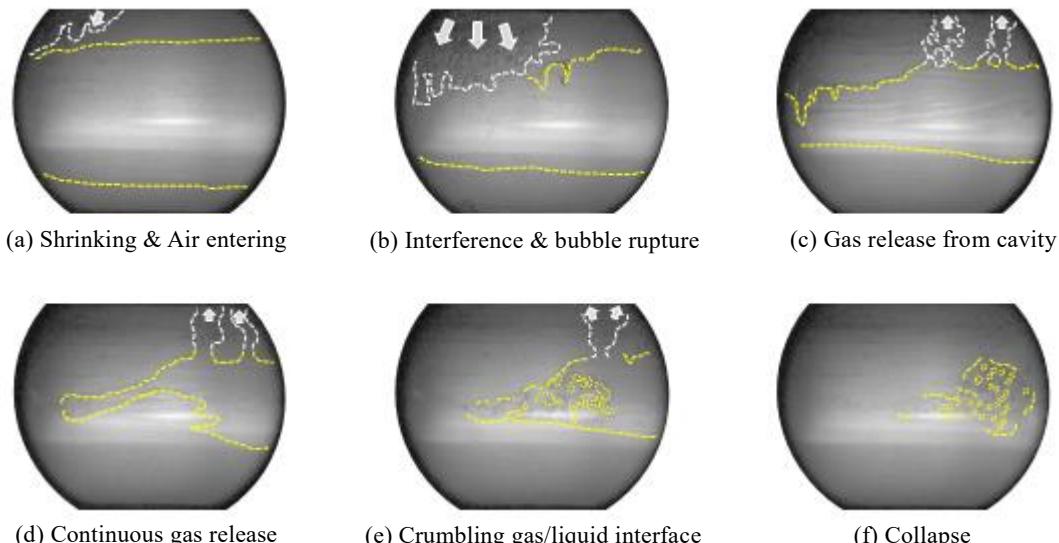


Fig.4 Cavity collapse sequence during shrinkage process observed in View (C)

4. おわりに

本研究ではジャーナル軸受に生じるキャビテーションを対象に、その場観察手法を用いて成長と収縮過程の観察を行った。その結果、往復動荷重下では、負のスクイズ作用によってシダ状の特徴的な気液界面をもつキャビテーションが発生し、軸方向ならびに回転方向やそれに逆らって成長することが明らかになった。また、半割軸受の合わせ部近傍では閉じたキャビティが複数個存在し、そこを起点に成長することも明らかになった。収縮過程では、条件によってその様相は異なり、閉じたキャビティが形成されマイルドな遷移を示す場合や、気泡の侵入と破裂さらにキャビティ内部からガスを放出しながら激しく崩壊する場合が含まれることが明らかになった。

今後、これらのキャビテーションの成長と収縮のメカニズムの考察のため、実験検証ならびに従来のキャビテーションアルゴリズムを用いた解析に加え、3次元ナビエストークス方程式にキャビテーションモデルを考慮した計算モデルを用いて現象解析を行う。

文献

- 1) T. Aoyama, A. Kawamoto, T. Noda, T. Ozasa, T. Kato, & T. Murai; Analysis of Noise Occurrence by Cavitation in the Main Bearing of Diesel Engine, JSAE Review, 24, 1 (2003) 59.
- 2) X. Liu, X. Chen, P. Wang, X. Shen, & B. Ni;, Principle Experiments Research of Noise in Engine Main Bearing, Tribology Online, 13, 3 (2018) 131.
- 3) 大津, 西田 : ジャーナル軸受におけるキャビテーションの成長と軸受特性への影響, トライボロジスト, 61, 2 (2016) 127.
- 4) B.O. Jacobson, & B.J. Hamrock;, High-Speed Motion Picture Camera Experiments of Cavitation in Dynamically Loaded Journal Bearings, ASME, J. of Lub. Tech., 105, 3 (1983) 446.