

内燃機関用すべり軸受に生じるキャビテーションエロージョンの 発生位置推定手法の研究

A study on a procedure for estimating the location of cavitation erosion
in sliding bearings of internal combustion engines

大同メタル工業（正）*櫻井 真一 （非）廣瀬 達也 （非）金谷 竜次 （非）遠藤 和希
Shinichi Sakurai, Tatsuya Hirose, Ryuji Kanaya, Kazuki Endo

DAIDO METAL CO., LTD.

1. はじめに

流体潤滑下のすべり軸受は、負圧域で油膜破断と呼ばれる空洞を生じる現象が発生する。中原¹⁾は油膜破断の形態を①破断してできた空洞が大気に開いている状態、②空洞が閉じている状態、③細かい気泡が流れている状態、に分類できるとした。ここでは、①、②の状態を Cavity、③の状態を Cloud と呼ぶ事とする。また、藤川、赤松²⁾はキャビテーションエロージョンの発生機構について、衝撃波説、マイクロ・ジェット説、ウルトラ・ジェット説を解説している。いずれの説においても液中の気泡が崩壊する機構であるため、キャビテーションエロージョン発生時の油膜破断の形態は前述の③の状態、Cloud である必要がある。従ってキャビテーションエロージョンの発生位置を推定し、損傷対策を立案するためには、油膜破断の形態が Cloud であるか否かを類推する事が重要である。

Figure 1 はスラスト軸受で発生する Cavity と Cloud の可視化観察例である。図中(a), (b), (c)では発生した Cavity が成長し、その後、気泡が離脱する様子が観察される。一方(x), (y), (z)では、発生した Cloud が成長する事無く消失し、気泡も残存していない。従って Cloud の気泡内は気体組成に関わらず、極希薄な状態であると考えられる。

本研究では油膜の充填率(Fill ratio)を考慮した EHL 計算を行い、Cloud の形態をとる油膜破断を特定し、キャビテーションエロージョンの発生位置を推定する手順を提案する。また、実機エンジン軸受の損傷事例へ本研究手法を適用し、相関を明らかにする。

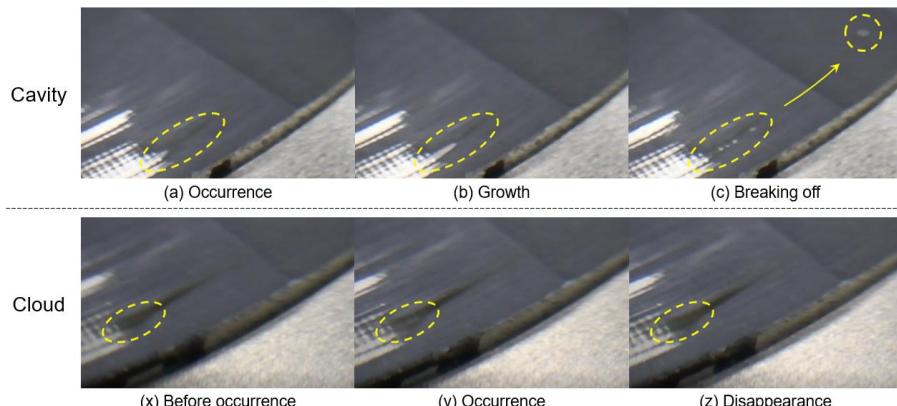


Fig. 1 Behavior of the Cavity and the Cloud

2. 推定手順

計算は商用の EHL 計算ソフトウェアである AVL 社 Excite を用いた。Excite は JFO(Jacobson-Floberg-Olsson)³⁾のキャビテーションモデルを用いており、油膜破断領域は油膜の充填率(Fill ratio: $0,0 \leq \theta \leq 1$)が 1 未満の領域として算出される。以下、キャビテーションエロージョン発生の位置、形状を推定する手順を示す。

- (1) 【油膜破断のリストアップ】: Fill ratio の時刻歴データより、発生する全ての油膜破断をリストアップする。
- (2) 【各油膜破断の形態の判定】: 油膜破断の生成から消滅までの時間が短く、Fill ratio が大きく減少しないものはまだ Cavity に成長しておらず、Cloud と判定する。反対に、経時的に消滅が見られないものや、一定時間存在し続けるものは Cavity に成長していると考えられるため除外する。
- (3) 【キャビテーションエロージョン発現の可能性のある位置の特定】: Cloud であっても Cavity に吸収されたものは除外する。Cloud の形態のままで油膜破断が収縮消滅する位置がエロージョン発生の推定位置である。
- (4) 【キャビテーションエロージョン発現の可能性の高さを評価】: Cloud の最大発生面積と、消滅時の面積から、Cloud に内包される気泡群の密度を評価、エロージョン発現の可能性を表す指標とした。

3. 実機エンジンへの適用

耐久試験にてコンロッド軸受に発生したキャビテーションエロージョンの損傷事例へ本手法を適用し、実際の損傷位置と計算結果との相関を確認した。また、油膜破断の生成消滅要因を分析し、対策案の有効性を評価した。

3.1 実機損傷と計算結果の相関確認及び損傷要因の分析

実機エンジン耐久試験にて、コンロッド軸受の下半側部分溝切上り付近、軸受角度 335° 位置にキャビテーションエロージョンが発生、Fig. 2 に示すような損傷形状であった。Figure 3 は耐久試験の運転条件で EHL 計算を実施し、キャビテーションエロージョン発生の位置、形状の推定手順を適用し、Cloud の拡大から収縮消滅する瞬間を特定した結果である。その要因も併せて示す。Cloud の発生後、クランク角 280° で Cloud の最大拡大範囲となりその後収縮に転じる。クランク角 290° 時、軸受角度 335° 位置のように Cloud は液体油に囲まれた状態で収縮、クランク角 300° に至ると消滅している事が確認できる。軸受角度 335° 位置の局所的な油膜厚さは縮小しており、油圧回復による Cloud の消滅を裏付ける結果である。この Cloud 消滅の要因分析のため軸受の変形状態を確認したところ、構造体の慣性と弹性収縮によって軸受表面の方が軸へ接近し、広範囲に拡大した Cloud が局所的に集中するように構造体が弹性変形している事が分かった。本手法で推定されるキャビテーションエロージョン発生の位置と形状は、実際の損傷状態と一致する。

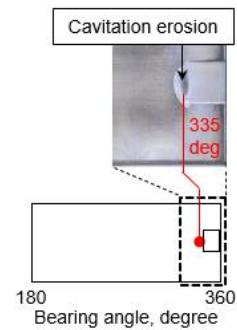


Fig. 2 Cavitation erosion on a lower half of a conrod bearing in an actual automobile engine

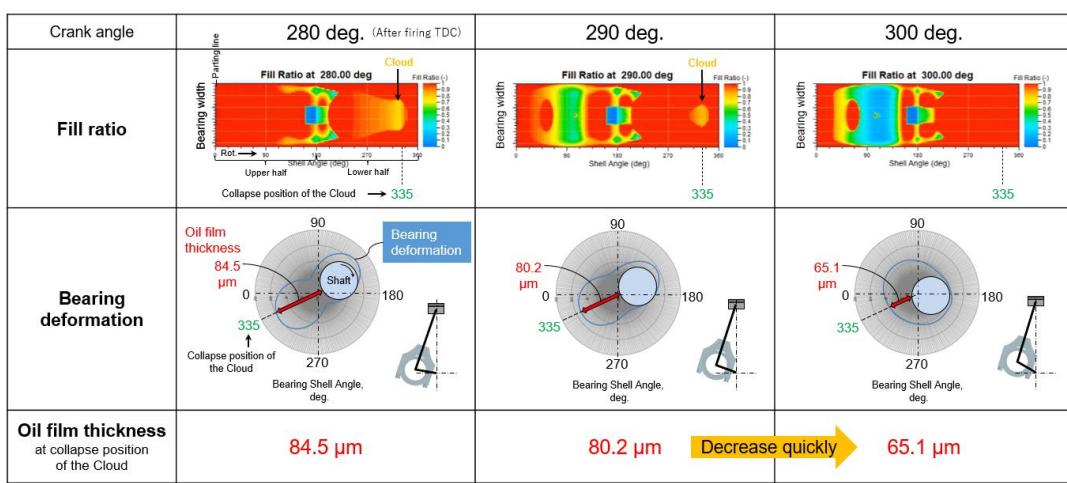


Fig. 3 Collapse of the Cloud

3.2 損傷の対策事例とその有効性検討

計算結果に基づき、期待される損傷対策案の有効性を考察し Fig. 4 にまとめた。各対策案の選定理由は Cloud の形成状態へ何等か影響を及ぼすと推測される仕様変更を選定し、影響を計算で確認した。尚実機検証は未実施である。

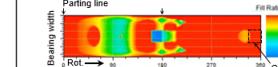
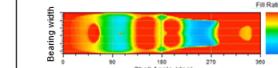
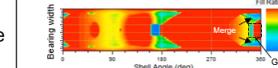
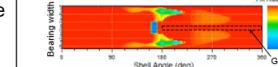
Countermeasures	Fill Ratio at that moment the Cloud collapsing	Results	Expected effectiveness of the countermeasure
Base (with partial groove)	 Groove	-	-
No groove	 Groove	Although some changes in cavitation behavior, the Cloud still collapses there.	Ineffective
Smaller oil clearance	 Groove	The Cloud merges with the Cavity, therefore no more collapsing at that position.	Effective
with a narrow groove on the lower half of the bearing	 Groove	The Cloud is split and widespread via the narrow groove at that moment the Cloud collapsing.	Potential to be milder

Fig. 4 Expected effects of the countermeasure for the cavitation erosion

4. まとめ

- (1) JFO のキャビテーションモデルを用いた EHL 計算と、細かい気泡が流れている状態の油膜破断(Cloud)を類推する手順により、キャビテーションエロージョン発生の位置、形状を推定する手法を考案した。
- (2) 本推定手法を実機エンジンの損傷事例へ適用したところ、実際の損傷位置を精度良く表す計算例が得られた。
- (3) 本手法は定量的な閾値を用いておらず、予測精度を補強する数値指標を考案する研究が必要である。

文献

- 1) 中原 綱光：流体油膜の挙動 -キャビテーション-, 潤滑, 26, 3 (1981) 146.
- 2) 藤川 重雄, 赤松 映明：キャビテーションによる壊食のメカニズム, ターボ機械, 12, 5 (1984) 277.
- 3) K. O. Olsson: Cavitation in Dynamically Loaded Bearings, Trans. Chalmers Univ. of Tech, Sweden, 308 (1957).