

論文・解説

25

軸受け摩耗予測計算と薄層放射化法による予測精度検証 Wear Prediction Calculation of Bearing and Correlation Using Thin Layer Activation Technique

宮内 勇馬^{*1} 廣部 敏之^{*2} 木村 昇平^{*3}

Yuma Miyauchi

Toshiyuki Hirobe

Shouhei Kimura

権代 明典^{*4} 広田 哲昭^{*5}

Akinori Gondai

Tetsuaki Hirota

要 約

アイドルストップシステムやハイブリッドエレクトリックビークル（以下HEV）による始動停止回数の増加からエンジン軸受けにおいては境界潤滑域で使用される頻度が増加し摩耗の懸念がある。このため従来、混合潤滑を主体としていた軸受けの弾性流体潤滑（EHL）計算を、境界潤滑域まで評価可能にする計算手法を研究した。軸受けの評価には古くから修正レイノルズの式が使われているが、大量の条件を振って計算を行うには計算時間が長く、また境界潤滑域が支配的な評価には適さない。このため境界潤滑域を主体とし、軸受けの摩耗量、摩擦損失などを評価可能にする手法を研究した。

また計算精度の検証のために極短時間で運転条件や仕様ごとの摩耗量がリアルタイムに計測可能な薄層放射化によるRIトレーサ法による摩耗測定を実施したところ、実現象と高い相関を持つことを確認した。

Summary

Wear concern for bearing is raised because of expanded boundary lubrication area due to HEV and Idle Stop System. Research was taken place in search of Elasto hydrodynamic lubrication calculation procedure which enables to assess the boundary lubrication.

Furthermore, wear measurement was conducted by applying the Radioisotope Tracer Method using Thin Layer Activation Technique to examine the prediction accuracy.

1. はじめに

環境保護，地球温暖化抑制が世界的に求められており，自動車産業においては排気ガスに含まれる二酸化炭素低減すなわち燃料消費改善が実施されている。この二酸化炭素低減の一手段としてアイドルストップシステムやHEVが採用されてきている。このアイドルストップシステム，HEVは従来エンジンと比較してエンジンの停止・始動回数が大幅に増加し，これに伴いエンジン主運動系においては境界潤滑域で運転される頻度が増加する。通常運転中に速度が0になるピストン，動弁系については新たな懸念はないが，クランクシャフト主軸受けはエンジン始動する時のみ境界潤滑になるので，アイドルストップシステム，HEVでは新たな摩耗，摩擦損失増加の懸念がある。この

運転領域の関係をストライベック線図上（Fig.1）に示す。

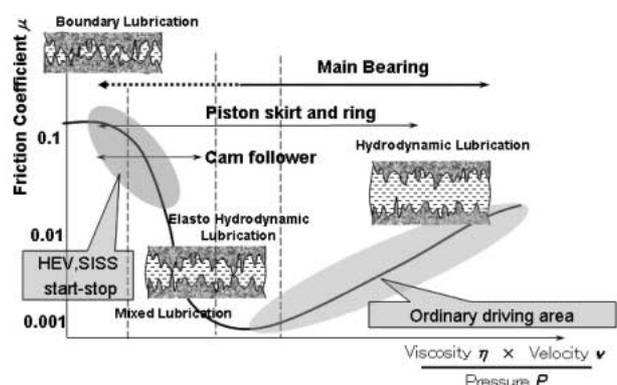


Fig.1 Stribeck Curve

*1~3 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

*4, 5 エンジン実研部
Engine Testing & Research Dept.

このため試作品ができる前の開発初期段階で主軸受けの摩耗と摩擦損失を確認可能にする予測計算評価手法の研究を実施し、境界潤滑域を主体とし混合潤滑から流体潤滑域を含め高速で計算し、軸受けの摩耗量や摩擦損失などを評価可能にする手法を開発した。

また極短時間で運転条件や仕様ごとの摩耗量がリアルタイムに計測可能な薄層放射化によるRITレーサ法(Radioisotope Tracer Method using Thin Layer Activation Technique: 以下RTM)による摩耗計測を適用し、予測計算精度検証を実施した。

2. 主な記号

- A : ヘルツ接触面積 [m²]
- b : ヘルツ接触半幅 [m]
- D : デボラ数 = $\eta_0 U / Fb$
- E : 等価弾性係数 [GPa]
- F : せん断弾性係数
- G : 圧力による粘度増加
- h : 無次元中央最小油膜厚さ
- P : 油膜圧力 [Pa]
- R : 等価半径 [m]
- S : オイルせん断応力 [Pa]
- T : 油温 []
- u : 摺動面相対速度 [m/s]
- U : 無次元速度 = $u / E \cdot R$
- V : 摺動速度 [m/s]
- w : 単位幅あたりの荷重 [N]
- W_c : 固体接触荷重 [N]
- W_i : 無次元荷重 = $w / E \cdot R$
- η : 有効粘度 - 圧力係数 [Pa⁻¹]
- η_0 : 粘度 - 温度係数 [Pa⁻¹]
- r : 微小突起曲率 [m⁻¹]
- σ : 表面粗さの方向
- (>1 : 平行粗さ = 1 : 等方粗さ < 1 : 直交粗さ)
- η_0 : 常温大気圧粘度 [Pa · s]
- μ : 摩擦係数
- ρ : 微小突起密度
- σ : 突起高さの標準偏差
- η_0 : 無次元せん断速度 = $\eta_0 U / \sigma h$
- η_0 : オイルの特性応力 [Pa]
- η_0 : 圧力流れ係数 = $1 + 3 (\sigma - 2) / (\sigma + 1) h^2$

3. 計算手法

3.1 計算手法概要

軸受けの摩耗評価には古くから弾性流体潤滑計算手法が研究されている。この主流はPatir-Chengの修正レイノルズ方程式⁽¹⁾を基本にしたものであるが、運転条件や形状など大量の条件を振って計算を行うには計算時間が長く、ま

た境界潤滑が支配的な領域では流体計算が主体ではないのでアイドルストップシステム、HEVのエンジン停止から始動時の評価には適さない。このため摩耗と摩擦損失の解を求めるに当たり以下の手法を試行した。

Pan-Hamrockの中央油膜厚さの式⁽²⁾にPatir-Chengの平均流れ係数を取り入れた中原らの研究モデル⁽³⁾を適用し油膜厚さを求める。この油膜厚さと表面粗さからGreenwood-Trippの固体接触モデル⁽⁴⁾により瞬時の固体接触荷重を求めた。この瞬時の固体接触荷重、摺動速度、摺動距離から瞬時発生摩耗量を導き、サイクル数を考慮した時間で積分し任意のサイクル数における摩耗量を求める。

3.2 計算手法詳細

以下に計算手法の詳細を述べる。

まず、油膜厚さhを(1)式により計算する。

$$h = 2.922 W_f^{-0.166} U^{0.692} G^{0.470} \phi^{-0.692} \quad (1)$$

油膜厚さhを求める際に中原らの粗さを考慮した圧力流れ係数 η を組み入れるとともに軸受けと軸とのヘルツ接触面積を求める際に等価半径を主軸半径と軸受け半径から導いた。

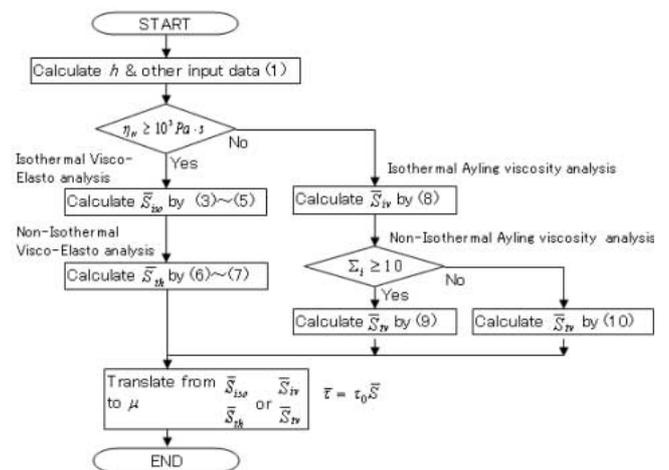


Fig.2 Flowchart of Hydrodynamic Lubrication

次に軸受けに発生する摩擦力、固体接触圧力を求める。油膜厚さhが表面粗さの標準偏差 σ の4倍以上ならば、Fig.2のフローチャートに示すように、アイリング粘性解、粘弾性解によりオイルのせん断抵抗を求める。更にBarus-Vogelの式⁽²⁾によりオイルの圧力と温度からニュートン粘度 η_N を導き、 η_N が 10^5 [Pa · s] 以上であれば粘弾性解、以下であればアイリング粘性解によりオイルのせん断応力を求める。

$$\eta_N = \eta_0 \exp(\alpha P - \beta T) \quad (2)$$

各粘性解の解法は村木 - 木村らの研究に基づく式⁽⁵⁾を利用した。Fig.2の()内処理番号(1)から(10)は文中の式番号に対応させた。

等温粘弾性解による平均せん断応力計算

$$X_c = \left(\frac{D}{4}\Sigma\right) \sinh^{-1} \Sigma \tag{3}$$

Xc 2が真であれば

$$\bar{S}_{iso} = \frac{\Sigma}{D} \tag{4}$$

偽であれば

$$\bar{S}_{iso} = \sinh^{-1} \Sigma(1 - X_c) \tag{5}$$

非等温粘弾性解による平均せん断応力計算

$$D_i = \eta_{Ni} \frac{\bar{U}}{Fb} \tag{6}$$

$$\bar{S}_{th} = \frac{\ln 2\Sigma_i \left(1 - \frac{D_i}{4\Sigma_i} \ln 2\Sigma_i\right)}{1 + \Phi\Sigma_i \left(1 - \frac{D_i}{2\Sigma_i} \ln 2\Sigma_i\right)} \tag{7}$$

等温アイリング粘性解による平均せん断応力計算

$$\bar{S}_{iv} = \sinh^{-1} \Sigma \tag{8}$$

非等温アイリング粘性解による平均せん断応力計算

$$\bar{S}_{iv} = \frac{\ln 2\Sigma_i}{1 + \Phi\Sigma_i} \tag{9}$$

$$\bar{S}_{iv} - \sinh^{-1} \left\{ \Sigma_i \exp(-\Phi\Sigma_i \bar{S}_{iv}) \right\} = 0 \tag{10}$$

次に、混合潤滑および境界潤滑時の計算方法を示す。油膜厚さ h が表面粗さの標準偏差の4倍未満ならば、Greenwood-Trippの式(11)より固体接触分担荷重を求め、軸受け荷重からこれを減じ、その減じた荷重に対する流体潤滑状態の油膜厚さを再度計算し、流体潤滑膜による分担荷重と固体接触による分担荷重の和が軸受け荷重になるよう収束計算を繰り返す。この式中の硬さ H は軸側が軸受け側より十分硬いことから軸の値を入力し、関数 F_1 には正規確率密度関数を適用する。更にArchardの粗さモデルは解析的に求めるのは難しいため実験経験値とする。

$$W_c = \pi H A (\rho_r \beta_r \sigma) F_1 \left(\frac{h}{\sigma}\right) \tag{11}$$

収束したときの油膜厚さを用いて、油膜せん断応力による摩擦力と固体接触荷重 W_c に境界摩擦係数を乗じて得られる摩擦力を求め、それぞれの和を全体の摩擦力とすることによって摩擦損失を求める。

一方、摩擦量については式(11)から算出された固体接触荷重と摺動速度の積を求めることにより瞬時発生摩擦量 $W_c V$ を算出し、エンジン1サイクルあたりの摩擦量 W_i を導く。この時 θ はクランク角である。

$$W_i = \int_0^{4\pi} W_c V \cdot d\theta \tag{12}$$

全サイクル数 Cy の摩擦量 W_M はホルムの式を応用し、固体接触域では摩擦し流体潤滑域では摩擦しないことを考慮

に入れ式(13)を仮定した。は比摩擦量を示す。

$$W_v = \lambda \cdot W_i \cdot Cy \tag{13}$$

軸受け荷重や速度などを算出するための計算モデルをFig.3に示す。指圧線図、エンジン主運動系の慣性力、補機ベルトの張力や挙動を機構解析によって求める。

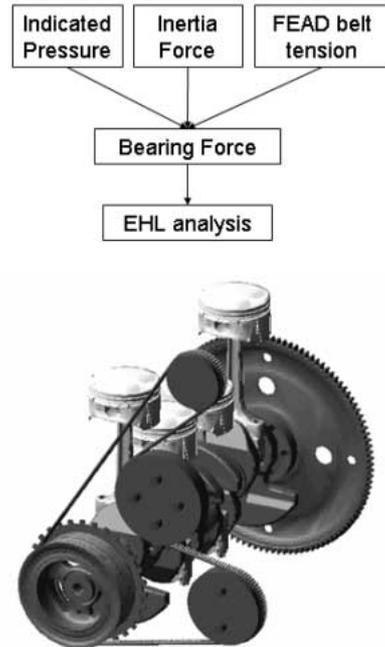


Fig.3 Motion Dynamics Model

上記モデルにより算出した速度と軸受け荷重とEHL計算結果をFig.4に示す。2Lクラス直列4気筒エンジンの(i)一般的なスタータによる始動、(ii)アイドルストップシステムの例としてスタータを使用せず燃焼エネルギーのみでエンジンを始動させるスマートアイドルリングストップシステム⁽⁶⁾(以下SISS)による始動、(iii)HEV用高出力モータによる始動の3種類の始動時におけるエンジンフロント側主軸受けの摩擦計算結果を比較した。グラフ横軸は時間でありタイミングをそろえてある。1番目のグラフがFig.3の機構解析モデルで求めた始動時のエンジン回転数、2番目が同モデルにより導いた補機ベルトと燃焼荷重により発生するエンジン前側主軸受け荷重である。3番目が瞬時発生摩擦量として $W_c V$ 値を示し、4番目にこの積算として1サイクルあたりの摩擦発生量 W_i を示す。極低回転時に境界潤滑が発生しておりこの期間において摩擦が発生していることが見て取れる。なおSISSに負のエンジン回転数がある理由は、エンジン停止時すなわち気筒内が大気圧下において燃料噴射後燃焼させるとクランクシャフトを半回転させる程度のエネルギーが発生するが、この半回転分のエネルギーを逆転方向に使い膨張気筒を圧縮行程にさせることに利用し、燃料の直接噴射と点火をし、正転始動に必要なエネルギーを得るためである。

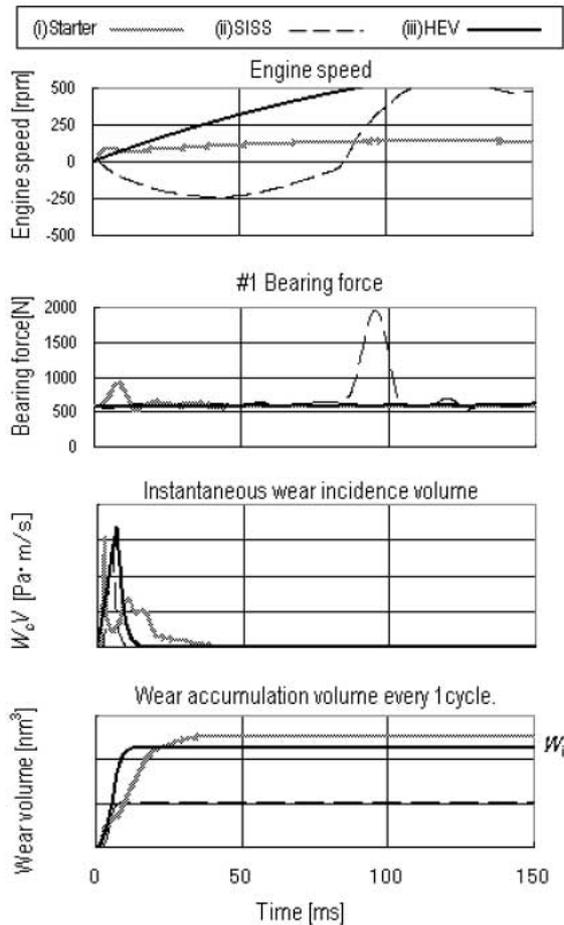


Fig.4 Input Data and Wear Prediction Results

4. 計算入力データの計測

計算では材料の種類による比摩耗量を求めることは難解であるので軸 - 軸受け間の摩耗と摩擦損失を計測する基礎実験⁷⁾により比摩耗量を求めた。この機器構成をFig.5に示す。

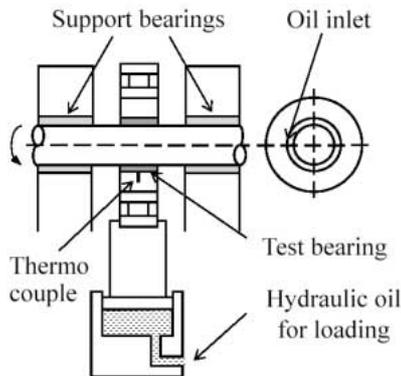


Fig.5 Bearing Rig Test

5. 計算予測精度検証実験

5.1 計算予測精度検証実験手法

HEV, アイドルストップシステムにおける計算予測精

度確認はモータによる始動速度(加速度), 補機ベルトやタイミングチェーンなどの張力ベクトル, 軸受けの材質, エンジン停止時間などさまざまなパラメータにおける感度を評価し, 計算と実機との相関を確認したい。しかし摩耗の耐久試験を実施する場合, 1パラメータにおける摩耗量を評価するだけでも多大な始動 - 停止の繰り返し運転を行い, 更に試験後エンジンを分解して摩耗寸法を計測する必要があるため多大な時間を必要とする。この方法では多くのパラメータを振ったシミュレーションとの計算予測精度検証を実施するには不向きである。

このためエンジン運転中にリアルタイムに摩耗量が計測可能なRTM[®]を採用した。供試エンジンは直列4気筒, 排気量2.3L乗用車用ハイブリッドガソリンエンジンである。まず摩耗計測の対象となる主軸受け単品を加速器の一種であるサイクロトロンで発生させたイオンビームを照射し放射化する[®]。サイクロトロンはイオンの円運動の周期がその速度によらず一定であるという事実を利用し, 高周波電場とイオンの円運動の周期を共鳴させながらイオンを高エネルギーまで加速する。Fig.6は住重試験検査の設備である。左手がサイクロトロンであり中央から右手に向かってイオンビーム伝送ラインが設けられている。

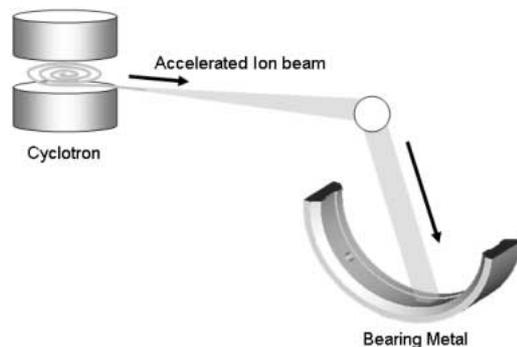


Fig.6 Cyclotron and Beam Transport Line

サイクロトロンにより発生させたイオンビームは直径8mm程度となるので照射位置や角度を変えて軸受け内面にビームが均一に照射されるようにする。このイオンビー

ムが軸受け内面の原子核と核反応を起こし放射性同位元素が生成される。

今回放射化の対象核種は軸受け表面アルミ合金層に含有される¹²⁰Snとしサイクロトロンにより^{120m}Sbに原子核反応させた物をトレーサとした。軸受け表面に最も多く存在する核種は²⁷Alであり⁴He+を照射することにより²²Naをトレーサとする手法⁽⁹⁾もあるが、強力な照射強度と期間を必要とするためトレーサを^{120m}Sbとした。^{120m}Sbの半減期は約5.8日であり1ヶ月程度の期間の摩耗試験には十分であることから選定した。この同位体の量は非常に少ないため、試験部品の機械的、化学的性質を変化させることはない。またTable 1に示すようにRTMによるエンジン摩耗試験で得られる放射能強度は、0.037~3.7 [MBq] (0.001~0.1 [mCi]), 被曝線量1~10 [μSv] で、摩耗試験をする時の室内の汚染等を心配する必要がない量であり、放射化後の軸受けによる試験作業者の被曝線量も日常生活による被曝量以下であり、非常に軽微である。

Table 1 Comparison of Radiation Dose

Radiation dose [mSv]	Item
0.001~0.010	Thin Layer Activation Technique
0.19	It shuttles between Tokyo and New York by aircraft.
0.1~0.3	X rays of chest taking a picture
2.4	Global average of radiation that person receives in one year.
4	X-ray taking a picture of stomach.
7~20	Taking a picture by CT scan.
50	Limit of radiation to which person who attaches on business related to nuclear power may be exposed in one year.
250	A decrease of white blood corpuscle. (When you receive it at a time collectively. It is the same as follows.)
500	A decrease of lymphocyte.
1,000	Acute radiation damage. Evil intention and vomiting, etc.
2,000	Hemorrhage and depilation, etc.The person of 5% dies.
3,000~5,000	The person of 50% dies.
7,000~10,000	The person of 100% dies.

参考までにエンジン部品の材料中にある材料でトレーサに有効な元素とラジオアイソトープを周期律表Fig.7に示す。

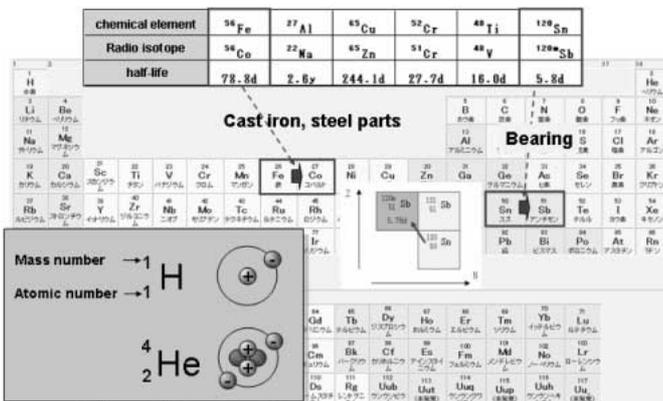


Fig.7 Kinds of Nuclear Reaction for Activation of Mechanical Components

次に摩耗量の測定原理図をFig.8、試験装置の写真をFig.9に示す。まず、放射化された軸受けをエンジンに組み込む。摩耗粉はオイル中に排出されるためオイルに混入した^{120m}Sbから放射されるガンマ線をディテクタによって計測する。オイルフィルタにトラップされる程度の比較的粒径の大きな摩耗粉はFMD (Filter Measurement Device) により計測し、フィルタを通過する粒径の小さな摩耗粉はオイルパン下側から導いたオイルをポンプで攪拌し、CMD (Concentration Measurement Device) により計測する。摩耗粉の放射強度は半減期の影響や放射化深さの影響を受け変化するため、放射化軸受けとほぼ同時に同条件で放射化した薄膜をガンマ線放射量の参照基準とする。この参照ガンマ線計測装置がRMD (Reference Measurement Device) である。

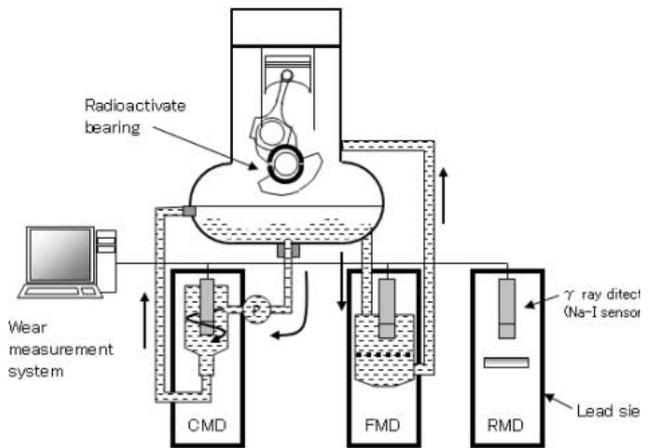


Fig.8 Wear Measurement by RTM

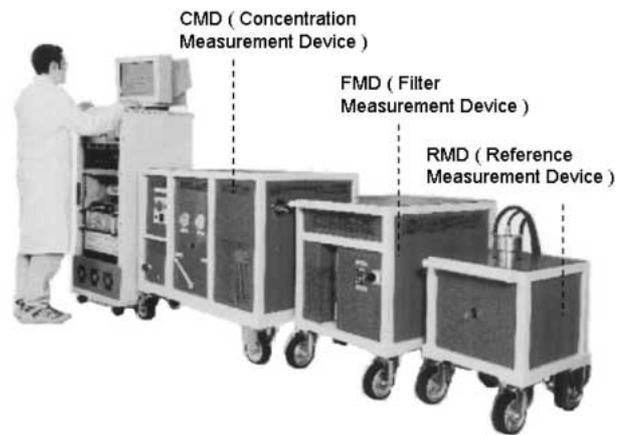


Fig.9 Wear Measurement Devices

この手法により運転条件や仕様の変化によって刻々と摩耗量が変化して行く様を捉えることができる。

5.2 計算予測精度検証結果

まずRTMの有用性と計算予測精度を確認するため、従来の実験方法との比較評価を行った。変化させるパラメー

タとして、軸受け内面の材質、クランクシャフト軸の表面粗さ、エンジン始動時の加速度を変えて試験を実施した。この結果をFig.10に示す。3者間で非常に高い相関が見られる。このことから3者の試験は同程度の現象再現性を有すると考える。

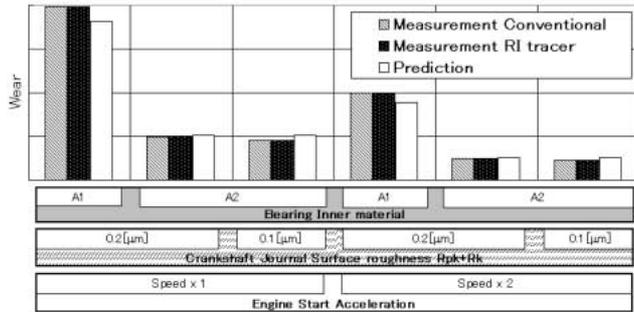


Fig.10 Comparison of Bearing Wear

6. RTMと予測計算の有用性

一方、従来実験手法は始動停止を数十万回繰り返すため1試験あたり数週間を要する試験であり、RTMは1試験に1日程度である。RTMに必要な薄層放射化にかかるコストは、数週間を要する従来実験手法においてエンジンが消費する燃料費よりも安価であり、本実験手法が期間的にもコスト的にも極めて優れていることが分かった。またPatir, Chengらによる修正レイノルズの式を基本にした弾性流体潤滑計算は数時間から数日を要するが、今回開発した予測計算手法に要する時間は数分であり、100分の1以下の極短時間計算を実現している。計算の評価期間、コストは実測よりも更に少なく有用である。

7. まとめ

- (1) 中原らの手法を主軸受けに応用し境界潤滑域の摩耗問題に適用可能な高速計算手法を構築した。
- (2) 薄層放射化によるRIトレーサ法(RTM)を利用し、短い試験期間かつ安価で、従来の摩耗評価手法と同等以上の評価が可能なことを確認した。
- (3) (2)の手法により多くのパラメータ変化における計算予測精度検証を実施し、計算予測計算と実測の比較結果が高い相関を示していることを確認した。これにより、計算手法が実用的であることを確認した。

計算手法についてご指導いただいた東京工業大学 中原綱光教授、薄層放射化試験についてご指導、ご協力いただいた帝国ピストンリング㈱、住友重機械㈱、住重試験検査㈱の方々には感謝の意を表します。

参考文献

- (1) N.Patir, et al. : An average flow model for determining effect of 3D roughness, Transaction of the ASME VOL100 (1978)
- (2) P.Pan, et al. : Simple Formulae for Performance Parameters Used in Elastohydrodynamically. Lubricated Line Contacts, Trans. ASME J. Tribology, 111, 2, p.246-251 (1989)
- (3) T.Nakahara, et al. : Approximate oil film thickness formula considering surface roughness effect on line contact EHL and its application to friction between cam and follower under mixed lubrication condition, The 10th Nordic symposium on tribology (2002)
- (4) J. A. Greenwood, et al. : The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces, Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Trib. Group vol.185, 48, 625 (1970-71)
- (5) 村木ほか：アイリング粘性解による低粘性流体のEHLトラクションの計算, 日本機械学会論文集 (C編) 55巻520号 (1989)
- (6) 細谷ほか：スマート・アイドリング・ストップ・システムの開発, 日本機械学会 第19回内燃機関シンポジウム A5-3 (2007)
- (7) Y.Kagohara, et al. : Development of lead-free aluminum alloy bearing with higher amount of silicon, FISITA F2006P191 (2006)
- (8) 山本ほか：薄層放射化法によるエンジン摩耗計測, トライボロジスト35.1 26 (1990)
- (9) 山本：薄膜放射化法によるコンロッド軸受けの摩耗計測・解析, トライボロジー会議 (1998)
- (10) 片岡ほか：サイクロトロンによる薄膜放射化法と摩耗試験技術への応用, 住友重機械技報, Vol.40, No.120 (1992)

著者



宮内勇馬



廣部敏之



木村昇平



権代明典



広田哲昭