

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560154

研究課題名(和文) 膜厚方向の冷媒溶解濃度分布測定による潤滑膜内濃度変化モデルの実験的検証

研究課題名(英文) Experimental verification of the model of concentration change in lubricating film by measuring the distribution of the refrigerant concentration dissolved in the lubricating film

研究代表者

田中 真二(Tanaka, Shinji)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：40313332

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：潤滑膜内における冷媒溶解濃度変化現象の解析モデルの妥当性を検証するために、潤滑膜内の膜厚方向の冷媒溶解濃度分布を計測するシステムを開発した。このシステムは共焦点顕微鏡とレーザー誘起蛍光法(LIF法)を併用した“潤滑膜内濃度分布計測システム”および冷媒雰囲気にある潤滑膜を観察する“冷媒雰囲気下潤滑膜観察装置”から成る。本システムの膜厚方向の空間分解能を測定した結果、空間分解能の理論値と同程度であることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：To verify the validity of the analytical model of the varying concentration phenomenon of refrigerant gas dissolved in the lubricating film, the systems for measuring the refrigerant concentration distribution dissolved in the thickness direction in the lubricating film were developed. This system consists of the concentration distribution measurement system combined a confocal microscope with a laser-induced fluorescence method and the lubricating film observation system under refrigerant gas atmosphere. The spatial resolution in the thickness direction of this system was confirmed to be comparable to the theoretical value.

研究分野：トライボロジー

キーワード：冷媒 潤滑 計測 共焦点顕微鏡 レーザ誘起蛍光法 トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

冷凍空調機の脱フロン化の実現に向けて、解決が不可欠な問題の一つに、冷媒圧縮機の潤滑問題が挙げられる。冷媒圧縮機内の摺動部は潤滑油への冷媒ガスの溶解により、粘度及び粘度 - 圧力係数が減少した潤滑油で潤滑されている。また、冷媒圧縮機内には接触圧力の高い摺動部も多く、それらは弾性流体潤滑 (EHL) と呼ばれる過酷な潤滑状態にある。EHL 状態では摺動部の接触域入口部における潤滑油のレオロジー特性が、摺動部の潤滑特性を左右する重要な因子となる。冷媒雰囲気潤滑される摺動部の場合、潤滑膜内の冷媒溶解濃度が潤滑特性を大きく変化させる。従って、潤滑膜内の冷媒溶解濃度の把握は、冷媒圧縮機の性能や信頼性を左右する摺動部の潤滑特性評価において大変重要である。また、これから主流になると予想される自然冷媒に対応した冷媒圧縮機の潤滑設計指針の作成においても有益な情報となる。

これまでに顕微 FT-IR を用いて、冷媒雰囲気にある潤滑膜内の冷媒溶解濃度を測定し、摺動部の接触域入口部で冷媒溶解濃度が減少することを発見した¹⁾。これは高圧なヘルツ接触圧を受ける潤滑膜内で冷媒ガスの溶解濃度が減少するという、ヘンリーの法則に反する非常に不思議な現象である。測定対象は異なるが、顕微 FT-IR を用いて潤滑膜内の構成成分の濃度を測定した例がある。星ら²⁾は水 - グリコール系作動油について接触域近傍で構成成分の濃度が変化することを報告しており、この原因として構成成分のぬれ性を挙げている。小野ら³⁾は粘度が異なる 2 種類の PAO を混合したブレンド油について、接触域内で潤滑油の高粘度成分が減少することを示し、この原因として、分子間のすべりを挙げている。このように、実験結果から油膜内の濃度変化に対する考察は行われているが、濃度変化のメカニズムの完全な解明には、まだ至っていない。

顕微 FT-IR の測定結果に基づいて、図 1 に示す冷媒雰囲気潤滑下にある円筒 - ディスク間の摺動部を対象として、潤滑膜内の冷媒溶解濃度変化現象を説明する以下の解析モデルを提案した⁴⁾。

摺動部でヘルツ圧を受けた潤滑膜は、粘度

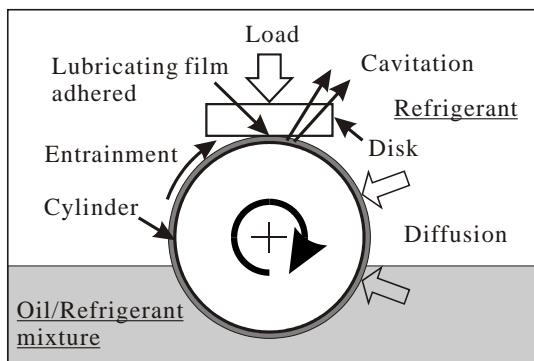


図 1 解析モデル

が非常に高くなり、円筒の最表面に付着する。

円筒最表面に付着した潤滑膜は接触域を通過後にキャビテーション領域で負圧を受け、潤滑膜内に溶解した冷媒ガスが脱気され、冷媒溶解濃度が減少する。

冷媒溶解濃度の減少した潤滑膜は雰囲気冷媒ガスに曝されて、潤滑膜に冷媒が溶解し、潤滑膜内の冷媒溶解濃度が増加する。

潤滑膜が油槽内を通過すると、冷媒が溶解している油槽内の潤滑油が、円筒最表面の潤滑膜上に付着して、共に摺動部へ引き込まれる。

円筒の回転速度が増加すると、冷媒溶解濃度増加よりも、冷媒溶解濃度減少の方が優勢となり、潤滑膜内の冷媒溶解濃度は減少する。また、逆に粘度は高くなるため、円筒最表面の潤滑膜が接触域内へ優先的に引き込まれる。従って、接触域入口から接触中心にかけて、冷媒溶解濃度の低い潤滑油の割合が増加し、その結果、潤滑膜内の冷媒溶解濃度は減少する。

本解析モデルの妥当性を示すためには、円筒の最表面に付着した潤滑膜内の冷媒溶解濃度が油槽内の冷媒溶解濃度よりも低いこと、および円筒最表面に付着した潤滑膜が接触域内に優先的に引き込まれることを実証する必要がある。そのためには、接触域入口から接触域内にかけての潤滑膜内の膜厚方向の冷媒溶解濃度分布を示す必要があるが、従来の顕微 FT-IR による測定では潤滑膜内の平均溶解濃度しか測定できなかった。

<参考文献>

- 1) S. Tanaka, T. Nakahara & K. Kyogoku : Measurements of two-dimensional distribution of refrigerant concentration in EHL film using micro FT-IR and effect of variation of concentration on oil film thickness, Tribology Letters, 14, 1 (2003), pp.9-15.
- 2) 星 靖, 南 一郎, 森 誠之: 水 - グリコール系作動油の EHL 接触域近傍における濃度変化, トライボロジスト, 49, 11 (2004), pp.878-885.
- 3) 小野文慈, 山本雄二: 流体潤滑下の接触域での潤滑油の構成成分変化に関する研究, トライボロジスト, 49, 6 (2004), pp.501-508.
- 4) 池田幸一郎, 田中真二, 中原綱光: 潤滑膜内における冷媒溶解濃度変化現象の理論的検討, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集 - 東京, (2007), pp.197-198.

2. 研究の目的

提案した冷媒溶解濃度変化現象の解析モデルの妥当性を確認するために、冷媒雰囲気にある潤滑膜内の膜厚方向の冷媒溶解濃度分布を測定する。

3. 研究の方法

(1) 冷媒雰囲気下潤滑膜観察装置の開発

冷媒雰囲気下で形成された潤滑膜を外部から観察できる“冷媒雰囲気下潤滑膜観察装置”を開発する。この装置は冷媒ガスと潤滑油が入った耐圧容器内に、ボールオンディスク型の摺動試験機が設置されている。ディスクは摺動試験片と観察窓を兼ねており、この窓から摺動試験部に形成された潤滑膜を共焦点顕微鏡で観察する。

(2) 潤滑膜内濃度分布計測システムの開発

潤滑膜内における膜厚方向の冷媒溶解濃度分布を測定するために、共焦点顕微鏡とレーザ誘起蛍光法 (LIF 法) を併用した“潤滑膜内濃度分布計測システム”を開発する。このシステムは冷媒ガスが溶解した潤滑膜に対して垂直に励起レーザ光を照射して、共焦点顕微鏡で潤滑膜内の膜厚方向の特定位置を観察し、その位置にある潤滑膜が発した蛍光強度から冷媒溶解濃度を求めるものである。

(3) 潤滑膜内濃度分布計測システムの性能評価

開発した“潤滑膜内濃度分布計測システム”および“冷媒雰囲気下潤滑膜観察装置”を用いて、潤滑膜の膜厚方向の空間分解能を測定する。また、既知の濃度で冷媒が溶解している潤滑油の蛍光画像を撮影し、本システムの濃度測定精度を確認する。

4. 研究成果

開発した冷媒雰囲気下潤滑膜観察装置と潤滑膜内濃度分布計測システムの概略を図 2 に示す。冷媒雰囲気下潤滑膜観察装置の摺動試験部は圧力容器に格納されており、耐圧は真空～1MPa (ゲージ圧) である。冷媒ガスはレギュレータで調圧後、電磁弁を用いて圧力容器内に導入する冷媒ガス圧を調整した。鋼球はマグネットカップリングを介してサーボモータで回転される。潤滑油は鋼球表面に付着した試料油が鋼球の回転により摺動部に引き込まれる。ディスクは摺動試験片と耐圧窓を兼ねており、2つのベローズシールでシールされたディスクホルダーに固定されている。このホルダーをばねで引っ張ることで鋼球/ディスク間に荷重を与えている。なお、同一サイズのベローズシールを用いているため、容器内の圧力が変化しても荷重は変化しない。ディスクホルダーの下部にはシリコンヒータを設置して、装置内の潤滑油の温度を調整した。

潤滑油には蛍光剤としてクマリン 30 を溶解させた。摺動試験部に形成された潤滑膜にレーザ (405nm) を照射して励起した。潤滑膜から発せられた蛍光とレーザ反射光はダイクロイックミラーとバンドパスフィルターを通過することによりレーザ反射光が除去され、蛍光のみになる。この蛍光は共焦点顕微鏡に取り付けた冷却 CCD カメラで撮影された。対物レンズはピエゾステージに取り

付けられており、膜厚方向に測定位置を nm オーダーで変えることができる。冷却 CCD カメラの前には 2 つの共焦点レンズとピンホールを配置した。ピンホールは対物レンズの焦点と共役な位置に配置されている。これにより、焦点の前後の光はピンホールで除去され、焦点位置のみの蛍光を測定することができる。得られた蛍光画像は焦点深度がマイクロオーダーと非常に浅いため、膜厚方向の特定の位置の蛍光画像を測定することができる。潤滑膜内で焦点位置を変えながら撮影することにより、膜厚方向の蛍光輝度分布が得られる。

本研究では潤滑膜内の膜厚方向の空間分解能が重要であるため、対物レンズは開口数が高くなければならない。一般にボールオンディスク型摺動試験機ではディスクとして、硬度の高いサファイアが用いられる。しかし、サファイアは屈折率が高いために、開口数の高い対物レンズでは、サファイアディスクの球面収差のためにピントがぼやける。そこで、本研究では球面収差を補正できる補正環付きの対物レンズを用いた。また、この対物レンズが補正できるディスク材質に合わせて、ディスクを BK7 で製作した。ディスクは摺動試験片と耐圧窓を兼ねているために強度が求められるが、対物レンズで球面収差を補正できるディスクの厚さは 1.3mm までに限られる。そこで、ディスクの応力解析した結果 (図 3) に基づき、形状を図 4 のように決定した。

次に、潤滑膜内濃度分布計測システムの膜厚方向の空間分解能を確認した。冷媒雰囲気下潤滑膜観察装置のディスクにレーザ光を照射し、ディスク下面の反射光の輝度分布を膜厚方向に測定して、反射輝度分布の半値幅から空間分解能 (深度分解能) を評価した。その結果を図 5 に示す。縦軸は正規化した反射輝度値、横軸は膜厚方向の位置で、 $0\mu\text{m}$ は

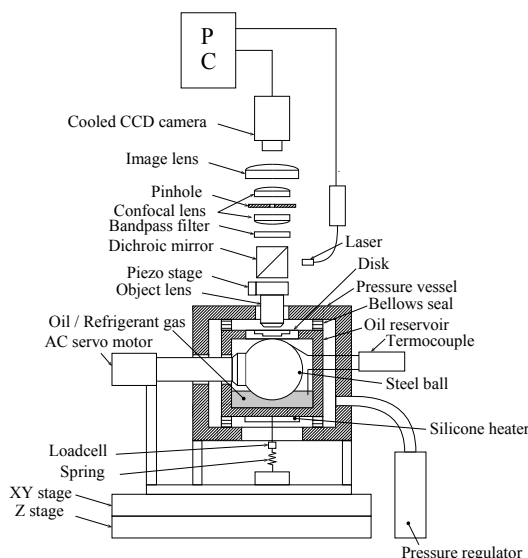


図 2 冷媒雰囲気下潤滑膜観察装置と潤滑膜内濃度分布計測システム

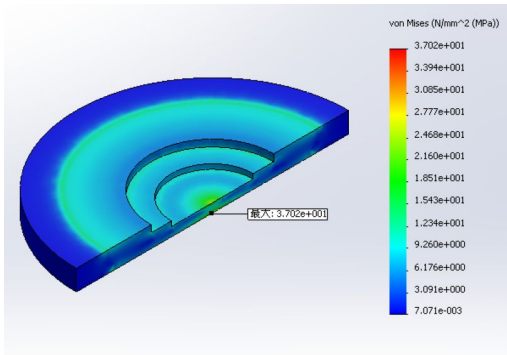


図3 応力解析結果

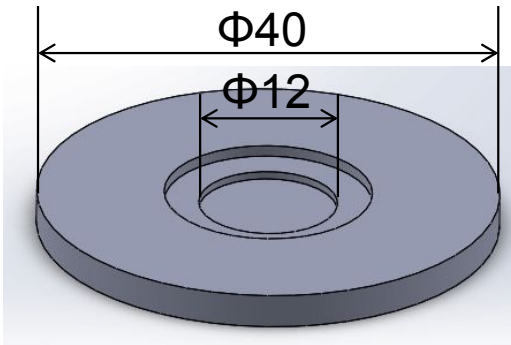


図4 ディスク

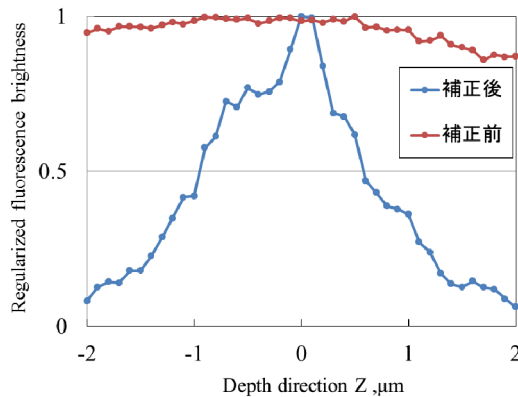


図5 ディスク下面におけるレーザー反射輝度分布

ディスク下面である。また、赤線は球面収差の補正前（対物レンズ：補正環なし，ディスク：サファイア），青線は補正後（対物レンズ：補正環あり，ディスク：BK7）である。この図より，反射輝度分布の半値幅は補正後の方が小さく，その値は約 $1.5 \mu\text{m}$ であった。この値は用いた式(1)から求められる対物レンズの焦点深度 ($1.25 \mu\text{m}$) とほぼ同じであった。このことから，開発した潤滑膜内濃度分布計測システムの空間分解能は設計通りであることが確認できた。

$$FWHM = \frac{0.88\lambda_{exc}}{n - \sqrt{n^2 - NA^2}} \quad (1)$$

また，膜厚方向に蛍光輝度分布を測定した際の深度分解能を確認するために，冷媒が溶解していない潤滑油で潤滑膜内の蛍光輝度分布を測定した。図6に示すように，接触領

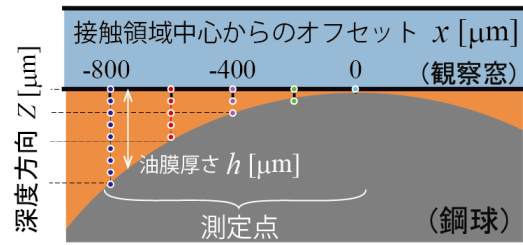


図6 蛍光輝度値の測定位置

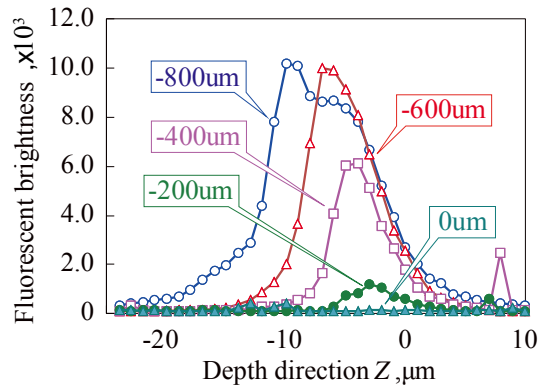


図7 潤滑膜内における膜厚方向の蛍光輝度分布

域中心から潤滑油の流入側に $0 \sim 800 \mu\text{m}$ 離れた場所で膜厚方向に位置を変えながら測定した。図7に測定された潤滑膜内における膜厚方向の蛍光輝度分布を示す。冷媒が溶解していない潤滑油を用いているため，共焦点顕微鏡の深度分解能が十分であれば，潤滑膜内濃度分布計測システムの空間分解能（約 $1.5 \mu\text{m}$ ）以上の膜厚のところでは蛍光輝度の最大値が同じになることが予想される。しかし，図7より油膜厚さが $3.2 \mu\text{m}$ である $-400 \mu\text{m}$ では蛍光輝度の最大値が $-600 \mu\text{m}$ 以上に比べて低いことがわかる。これは本システムの深度分解能がレーザーの反射輝度値を測定した場合と比べ，低下しているためと考えられる。この原因としてはレーザーと蛍光で波長が異なることによる共焦点レンズの焦点位置のずれが考えられる。今後は蛍光を用いた際の深度分解能をさらに向上させる必要がある。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2件)

S. Tanaka, T. Matsuo, Y. Takeda and D. Matsuura, Measurement of Refrigerant Concentration Distribution in Lubricating Film Using Confocal Microscopy and Laser Induced Fluorescence Method, International Tribology Conference Tokyo 2015, September 16th, 2015, Katsushika Campus, Tokyo University of science (Katsushika-ku, Tokyo)

松尾高広，田中真二，武田行生，松浦大輔，共焦点顕微鏡とレーザー誘起蛍光法を用いた潤滑膜内の冷媒溶解濃度分布の測

定，トライボロジー会議 2015 春 姫路，
2015 年 5 月 27 日，姫路商工会議所（兵
庫県・姫路市）

6．研究組織

(1)研究代表者

田中 真二 (TANAKA, Shinji)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40313332