

## 平成 25 年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成 25 年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成 25 年 4 月 22 日現在

<b>研究代表者 氏 名</b>	兼田 楨宏	<b>所属研究機関・ 部局・職</b>	九州工業大学・工学部・特任教授
<b>研究課題名</b>	非ニュートン流体熱弾性流体潤滑理論の構築		
<b>課題番号</b>	15002009		
<b>研究組織 (研究期間終了時)</b>	研究代表者 兼田 楨宏（九州工業大学・工学部・特任教授） 研究分担者 西川 宏志（九州工業大学・工学部・助教）		

### 【補助金交付額】

年度	直接経費
平成 15 年度	35,000 千円
平成 16 年度	59,000 千円
平成 17 年度	39,000 千円
平成 18 年度	18,000 千円
平成 19 年度	15,000 千円
総 計	166,000 千円

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)～(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

### (1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

本特別推進研究は「ものづくり」の基盤となるトライボロジーが生んだ20世紀の主要な学術的成果である弾性流体潤滑理論を接触面内の3次元温度分布を考慮した熱弾性流体潤滑理論として再構築するための基盤を確立し、集中接触下で稼動する機械要素の機能・性能・信頼性の更なる向上をもたらす設計指針を提供することが目的であった。その目的は基本的には達成されたと考えている。現在、本特別推進研究の成果をさらに発展さすべく下記の事項を実施・推進している。

#### 1. 非ニュートン流体熱弾性流体潤滑の数値解析手法の利用と精度向上

開発した非ニュートン流体熱弾性流体潤滑の数値解析手法は、流体の非ニュートン挙動を等価粘性係数としてニュートン流体と同等の取り扱いが出来る利点から国内外の研究者によって非ニュートン流体挙動を取り込んだ弾性流体潤滑解析ならびに熱弾性流体潤滑解析の簡便手法として使用されている。現在、その手法を下記研究事項に対して利用するとともに、非定常運動下での現象解析のためにその計算精度の向上を図っている。

#### 2. 表面粗さを持つ潤滑面の温度計測

表面粗さを持つ潤滑面の物体表面ならびに油膜温度の計測は油膜のレオロジー特性の把握にとって重要であるにも拘らず、実験手法の困難性から取り組みが遅れていた。しかし、本研究の成果によってその重要性が再認識され、接触域内温度分布を考慮した研究が国内外で開始されている。本特別推進研究過程で培われた計測手法は、分担研究者によってさらに発展させられ、表面粗さを持つ滑り潤滑面を対象とした精密な温度計測、光干渉法を利用した油膜圧力の分布計測などに生かされ、新たな成果を提出している。その成果の一部は2013年9月にイタリアで開催される国際トライボロジー会議で発表予定である。なお、研究代表者は、チェコ共和国ブルノ工科大学において、転がり滑り運動下での温度計測を可能にするための実験装置を開発中である。

#### 3. 固化潤滑油の壁面ならびに潤滑油内滑りの弾性流体潤滑特性に及ぼす影響の究明

弾性流体潤滑域においては、潤滑油は、粘弾性あるいは弾塑性固体として挙動するとの事実から、その存在は予測されていたにも拘らず実測が不可能であった接触物体表面での壁面滑りを、衝撃によって潤滑油を閉じ込めた後に転がり滑り運動を与える新たに開発した実験手法から、把握することに世界で初めて成功した。現在は、その現象が壁面材質ならびに潤滑剤によって相違することを統一的に説明するための解析方法の開発に取り組んでいる。また、衝撃閉じ込めを伴わない実際の転がり滑り運動下での壁面滑りの発現ならびに固化潤滑油内での滑り現象の発現の可能性並びにそれらの発生が弾性流体潤滑特性に及ぼす影響の究明に向けて、佐賀大学大野信義名誉教授、馬渡俊文助教、青島工科大学のFeng Guo教授との共同研究を開始しており、その成果の一端は、2013年5月に米国で開催される米国トライボロジー学会年会やイタリアで開催される国際トライボロジー会議で発表予定である。

#### 4. 機械の運転履歴が表面損傷発生に及ぼす影響の解明

本特別推進研究過程で実施した二物体衝突実験ならびに数値解析結果から発想して、ロケット打ち上げなどに起因して機械要素が受ける衝撃荷重が油膜および油膜圧力に及ぼす諸条件の影響を広範囲に検討、究明した(英国機械学会 Journal of Engineering Tribology, 2011年最優秀論文賞)。現在は、この研究成果を表面粗さを持つ表面に対して適用するとともに、研究対象を実際の機械のように、停止・稼動・停止を繰り返す転がり・滑り接触面をモデル化した実験ならびに理論解析に拡大し、衝撃あるいは機械の停止に伴い発現する潤滑油の閉じ込め現象が表面粗さの存在に起因して過大な油膜圧力をもたらす機構を解明しつつある。この現象は、機械要素に発生する転がり接触疲労損傷が、機械の運転履歴に関係することを示す証左とも考えられ、その面から転がり接触疲労損傷の新たな発生機構の解明に向けての研究を実施中である。

#### 5. 国際共同研究体制の構築

特筆すべきは、特別推進研究で得た成果の国内外研究者による吟味によって、接触域内での潤滑油の相変化、すなわち、粘性流体、粘弾性固体、弾塑性固体、を表示する潤滑領域図内に摩擦(トラクション)係数ならびに最小膜厚値を等高線として図示することが広範な実験による潤滑油特性の把握と熱弾性流体潤滑理論の適用によって可能であるとの結論に達したことである。現在、この評価図作成に向けた国際共同研究体制を構築しつつある。すなわち、本特別推進研究の基礎的成果は、外接触的接触をする潤滑された機械要素の新たな実用設計支援ツールの開発に向けて国際的にも大きな展開を見せ始めている。

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

**論文発表**

- Nishikawa, H., Miyazaki, H., Kaneta, M. and Guo, F., 2008, “Effects of Two-Stage Impact Load on Point Contact Elastohydrodynamic Lubrication Films”, Journal of Engineering Tribology, Proc. I.Mech.E., J7, Vol.222, pp.807-814.
- Guo, F.; Wong, P. L., Geng, M. and Kaneta, M., 2009, “ Occurrence of Wall Slip in Elastohydrodynamic Lubrication Contacts”, Tribology Letters, Vol.34, No.2, pp.103-111.
- Kaneta, M., Nishikawa, H., Mizui, M., and Guo, F., 2011, “Impact Elastohydrodynamics in Point Contacts”, Journal of Engineering Tribology, Proc. I.Mech.E., J1, Vol.225, pp.1-12.
- Kaneta, M., Guo, F. and Wang, J., 2011, “Impact Micro-Elastohydrodynamics in Point Contacts, Journal of Tribology, Trans. ASME., Vol.133, No.3, 031503.
- Sunahara, K., Ishida, Y., Yamashita, S., Yamamoto, M., Nishikawa, H., Matsuda, K. and Kaneta, M., 2011, “Preliminary Measurements of Electrical Micropitting in Grease-Lubricated Point Contacts”, Tribol. Trans., Vol.54, No.5, pp.730-735.
- Kaneta, M., Wang, J., Guo, F., Krupka, I. and Hartl, M., 2012, “Effects of Loading Process and Contact Shape on Point Impact Elastohydrodynamics,” Tribol. Trans., Vol.55, pp. 772-781.
- Kaneta, M., Guo, F., Wang, J., Krupka, I. and Hartl, M., 2013, “Pressure Increase in Elliptical Impact Elastohydrodynamic Lubrication Contacts with Longitudinal Asperities,” ASME J. Tribology, Vol.135, 011503.

**依頼論文、招待講演など**

- 研究展望：弾性流体潤滑理論, 2008, 日本機械学会論文集, C編, 第74巻, 第744号 pp.1931-1937.
- 総説：弾性流体潤滑, 2012, 日本トライボロジー学会, Vol.57, No.2, pp.64-73.
- 依頼論文：Kaneta, M. and Yang, P., 2010, “Effects of the Thermal Conductivity of Contact Materials on Elastohydrodynamic Lubrication Characteristics”, Journal of Mechanical Engineering Science, Proc. I.Mech.E., Vol.224, C12, pp.2577-2587.
- Keynote address: 2010, “Optical Approach to EHL Problem Studies”, ASIATRIB 2010, 5-9 December, 2010 Perth, Western Australia
- Invited talk: 2013, “Microgroove Formation in Surface Ridges in Impact Elliptical EHL Contacts”, 3<sup>rd</sup> International Symposium of IFToMM – ITS2013 Lulea, 19-21 March, 2013, Lulea, Sweden.

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

### (3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

2011-2014

Czech Science Foundation

課題番号：P101/12/1687

課 題：A novel concept of non-conforming contact lubrication based on thermal micro-elastohydrodynamics

総 額：2,585,000Kc

### (4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

#### • 外接的接触をする潤滑された機械要素の新設計指針の提案

将来、機械要素は多種多様な材料の組合せで構成されること考えられる。その際、両物体の熱伝導率が相違すると接触面の運動形態に応じて油膜圧力の増大ないしは最小膜厚の減少を引き起こす。この事実を考慮した実用設計が必要不可欠であることを提案した。

#### • 微小振幅往復運動用シールならびに一般往復運動機械要素の油膜崩壊機構の発見

往復運動する機械要素の油膜崩壊は、限界行程長、油量不足、表面粗さによって発生することを見出した。限界行程長は、例えば、線接触では接触面運動方向幅の2倍である。この限界行程長を満足していても高い往復周波数では油量不足によって油膜崩壊が発生する。往復運動用機械要素の設計においてはこれらを考慮せねばならないことを指摘した。

#### • 耐電食グリースの開発に寄与

グリース選択の立場から電食発生を防止するためには、粘度の圧力係数の高い基油を使用することが必要不可欠であることを発見し、それに立脚したグリース開発指針を与えた。

#### • スーツ混入油による摩耗機構の解明

ディーゼル機関などで発生するスーツによる摩耗機構には諸説ある。その摩耗機構を接触面の直接観測によってアブレッシブ摩耗であることを突き止め、摩耗防止のためには接触面の材料選択と油膜厚さの考慮が必要であることを明らかにした。

#### • 円盤状分子構造を持つ潤滑油の低摩擦特性の解明とその開発に寄与

開発した実験装置で摩擦特性を計測し、低摩擦特性の解明ならびに実用低摩擦潤滑油の開発に寄与した。

#### • 転がり接触疲労損傷発生原因に対する新知見

転がり疲労損傷原因の解明は古い研究課題である。表面粗さを持つ潤滑された集中接触面が衝撃的荷重を受ける場合や機械の稼働停止時に発現する潤滑油閉じ込め現象が油膜圧力上昇に大きく寄与することを発見し、転がり接触疲労損傷発生原因問題に対する新知見を得た。

#### • 弾性流体潤滑域における固化潤滑油の壁面滑り現象の発見

1. (1) 研究の概要の項目3参照。

#### • 集中接触する機械要素の摩擦係数ならびに最小油膜厚さ等高線の潤滑領域図内記述可能性の発見

1. (1) 研究の概要の項目5参照。

## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

### (1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

フランスで開催されている Leeds-Lyon Symposium on Tribology で若年層発表者 1 名に授与されることになった Maurice Godet Award の第一回（2003）ならびに第二回（2005）受賞者には本研究に従事した大学院前期課程、後期課程の学生がそれぞれ選ばれた。前者は開発装置による変動荷重油膜特性に関する実験的研究、後者は非ニュートン潤滑油が表面粗さの変形に与える影響を論じた理論的研究であり、この分野へ大きなインパクトを与える研究として国際的に評価されたものである。

弾性流体潤滑研究手法の斬新性と将来への研究成果の貢献が評価され Royal Swedish Academy of Engineering Sciences から、Jacob Wallenberg Foundation Award (2006) が授与された。

本特別推進研究の成果は旧来の弾性流体潤滑理論を熱弾性流体潤滑理論として再構築することの重要性を喚起した。それ故、英国機械学会 Journal of Mechanical Engineering Science の弾性流体潤滑に関する特集号への論文執筆を依頼された。機械要素設計における材料の選択に際しては両接触材料の熱伝導率の考慮がその運動特性に関連して必要不可欠であるとの研究成果を基軸に執筆（2010）した。また、日本機械学会（2008）、日本トライボロジー学会（2012）からの依頼展望および総説記事も本研究成果を基本に執筆した。すなわち、本研究成果の国内外における研究者、技術者への貢献は多大である。

特別推進研究過程で実施した一部の実験結果を敷衍した発表論文 “Impact Elastohydrodynamics in Point Contacts”, Kaneta, M., Nishikawa, H., Mizui, M. and Guo, G., Journal of Engineering Tribology, Proc. I. Mech. E., 2011, Vol.225, pp.1-12 は、英国機械学会 Journal of Engineering Tribology の最優秀論文賞（2011）を受けた。

諸外国の分野専門研究者による審査の結果授与されるチェコ共和国 Czech Science Foundation からの研究資金の採択（2012）も、上記で裏付けられる特別推進研究の研究成果の国際的貢献が評価され、かつ、引き金になったものと自負している。

特別推進研究での研究成果は、現在執筆中（九州大学山本雄二名誉教授との共著）のトライボロジーに関する研究者、専門技術者向け書籍に収録しており（2回目の校正中）、出版後は、他の研究者、技術者によって活用される可能性は極めて高いと判断される。

すなわち、本特別推進研究で得た研究成果は、未解決問題である集中接触潤滑面での油膜挙動ならびにトラクション係数評価解明の鍵との認識が高まり、外接的機械要素の更なる機能・性能・信頼性の向上をもたらすべく、滞っていた弾性流体潤滑領域研究に新風を送り込んでおり、当該分野での研究の活性化が始まっている。

## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

### 【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Liu, X., Jiang, M., Yang, P. and Kaneta, M., 2005, "Non-Newtonian Thermal Analyses of Point EHL Contacts Using the Eyring Model, Journal of Tribology", Journal of Tribology, Trans. ASME, Vol.127, No.1, pp.70-81.	アイリング流体モデルに立脚した非ニュートン流体熱弾性流体潤滑理論数値解析法を完成させるとともにそれから得られる基本特性を論じた。	19
2	Wang, J., Hashimoto, T., Nishikawa, H. and Kaneta, M., 2005, "Pure Rolling Elastohydrodynamic Lubrication of Short Stroke Reciprocating Motion", Tribology International, Vol.38, No.11-12, pp.1013-1021.	油量不足が顕著に現れる微小振幅下での実験結果に立脚して、油量不足を数値解析に簡便に取り入れる手法を開発提案した。	15
3	Yang, P., Wang, J. and Kaneta, M., 2006, "Thermal and Non-Newtonian Numerical Analyses for Starved EHL Line Contacts", Journal of Tribology, Trans. ASME, Vol.128, pp.282-290.	曖昧であった油量不足の意味を物理的に解釈しなおし、油量不足と油膜厚さ・温度上昇・トラクションとの関係を解明した。	12
4	Guo, F., Nishikawa, H., Yang, P. and Kaneta, M., 2007, "EHL under Cyclic Squeeze Motion", Tribology International, Vol.40, pp.1-9, 2007.	繰り返し衝撃荷重を受ける場合の油膜挙動の諸特性依存性を数値解析によって究明し、実験結果の物理的裏付けを与えた。	11
5	Guo, F., Kaneta, M., Wang, J., Nishikawa, H. and Yang, P., 2006, "Occurrence of a Noncentral Dimple in Squeezing EHL Contacts", Journal of Tribology, Trans. ASME., Vol.128, pp.632-640.	純スクイズ運動下で発生する油膜の閉じ込めが初期隙間に依存して相違する現象を実験、数値解析の両面から見出した。	9
6	Kaneta, M., Shigeta, T. and Yang, P., 2005, "Effects of compressive heating on traction force and film thickness in point EHL contacts", Journal of Tribology, Trans. ASME, Vol.127, No.2, pp.435-442.	実用作動範囲である滑り率の低い領域におけるトラクション係数は、粘性発熱よりも圧縮発熱起因温度上昇によって基本的に支配されることを解明した。	8
7	Wang, J., Kaneta, M. and Yang, P., 2005, "Numerical Analysis of TEHL Line Contact Problem under Reciprocating Motion", Tribology International, Vol.38, No.2, pp.165-178.	往復運動下では、温度上昇がわずかであっても油膜厚さと摩擦力は顕著な影響を受けることを見出し、これらに影響を及ぼす諸因子の効果を明らかにして往復運動する機械要素の基本設計指針を提供した	8
8	Kaneta, M., Ozeki, S., Nishikawa, H. and Guo, G., 2007, "Effects of Impact Loads on Point Contact Elastohydrodynamic Lubrication Films", Journal of Engineering Tribology, Proc. I. Mech. E., Vol.221, pp.271-278.	衝撃荷重下で発生する油膜の閉じ込め現象が初期隙間に依存して相違する現象に立脚して、転がり滑り運動する機械要素が変動あるいは衝撃荷重を受けた場合の油膜応答機構を論理的に説明した。	8
9	Kaneta, M., Shigeta, T. and Yang, P., 2006, "Film pressure distributions in point contacts predicted by thermal EHL analyses", Tribology International, Vol.39, No.8, pp.812-819.	油膜厚さ及び油膜圧力分布は、接触面の熱伝導率、大気圧下粘度、すべり率などに大きく依存することを指摘し、熱弾性流体潤滑理論適用の重要性を指摘した。	5

## 【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Guo, F., Wong, P. L., Geng, M. and Kaneta, M., 2009, "Occurrence of Wall Slip in Elastohydrodynamic Lubrication Contacts", Tribology Letters, Vol.34, No.2, pp.103-111.	潤滑されたガラス-鋼球転がり接触面の油膜挙動の直接観察結果に基づき、滑り環境下では壁面滑りが発生し、その程度が接触面材質に依存することを始めて明らかにした。	9
2	Kaneta, M., Nishikawa, H., Mizui, M., and Guo, F., 2011, "Impact elastohydrodynamics in point contacts", Journal of Engineering Tribology, Proc. I.Mech.E., J1, Vol.225, pp.1-12.	衝撃荷重を受ける集中接触潤滑面のトライボロジー特性に影響を与える諸因子の影響を実験理論の両面から解明。	6
3	Nishikawa, H., Miyazaki, H., Kaneta, M. and Guo, F., 2008, "Effects of two-stage impact load on point contact elastohydrodynamic lubrication films", Journal of Engineering Tribology, Proc. I.Mech.E., J7, Vol.222, pp.807-814.	転がりすべり面が時間的に相違する衝撃荷重を受ける際の油膜特性を把握し、衝撃荷重の影響過程を解明した。	4
4	Kaneta, M. and Yang, P., 2010, "Effects of the thermal conductivity of contact materials on elastohydrodynamic lubrication characteristics", Journal of Mechanical Engineering Science, Proc. I.Mech.E., Vol.224, C12, pp.2577-2587.	熱伝導率が転がりすべり接触潤滑面に及ぼす影響を系統的に論じ、熱伝導率が互いに相違する場合の機械要素の設計指針を与えた。	3
5	Kaneta, M., Guo, F. and Wang, J., 2011, "Impact Micro-Elastohydrodynamics in Point Contacts", Journal of Tribology, Trans. ASME., Vol.133, No.3, 031503.	表面粗さを持つ面が衝撃荷重を受ける場合の特性を始めて解明した。	1
6			
7			
8			
9			

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

#### (1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

本研究は、機械工学分野における基盤である摩擦、摩耗、潤滑を取り扱うトライボロジーの一分野であり、機械の性能、機能、信頼性の向上を目指したものである。すなわち、エネルギー消費の低減、地球資源の確保、地球汚染物質の排出低減に直結する「ものづくり」の基盤学問領域である。この立場から鑑みれば、「研究の概要」、「特別研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見について」、「学会への貢献の状況など」で記述した事項のいくつかは、学問的にも世界的に大きく評価されているものであり、その成果は他の研究者や技術者による研究活動を通して、機械の性能、機能、信頼性の向上に更なる寄与をなすとともに、新たな学問分野を創生する可能性の高いものであると自負している。また、実際的な設計指針の提案は、設計技術者によって機械設計に反映され、社会に還元されること大である。研究過程で開発した実験装置は、多くの企業研究者や設計技術者によって使用されている。なお、弾性流体潤滑理論は生体関節の開発や長寿命化に直結するため、バイオトライボロジーの基礎としても本研究成果が活かされる可能性は高い。

本研究に携わった外国研究者や国内企業の研究者、技術者、ならびに大学院学生、更には1年間研究室で活動した学部学生はこの研究課題を通じて大きく成長し、他分野においてもそこで学んだ考え方や手法を適応して活躍している。これは大きい社会への還元であり、大学の最も基本的な使命である。

研究代表者は、2011年9月から3年間の契約で、チェコ共和国ブルノ工科大学機械工学部に招聘され、特別推進研究で目的とした研究課題の更なる発展推進のために活動するとともに、研究室スタッフとの研鑽を介して、チェコ共和国におけるトライボロジー研究の発展と推進に寄与している。また、研究の概要において述べたように、国内外の研究者からなる国際共同研究体制の構築に向けて活動している。

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

#### (2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポストク等の研究終了後の動向を記述してください。）

当時本研究に携わった若手研究者および学生の全ては現在も大学や企業で活躍している。

(Qingdao Technological University 助教授) → 現：Qingdao Technological University 教授

(九州工業大学大学院 博士課程後期) → 現：Qingdao Technological University 准教授

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：日本精工（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：NOK（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 富士写真フィルム（株） → 現：サンデン（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：日本精工（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：NOK（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：いすゞ自動車（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：いすゞ自動車（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：（株）矢野特殊自動車

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：日産自動車（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：マツダ（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：（株）いすゞ中央研究所

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：日本精工（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：古河電気工業（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：住友電気工業（株）

(九州工業大学大学院 博士課程前期) → 現：日本貨物鉄道（株）