

氏名（本籍） 佐藤魁星（青森県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第1156号
学位授与の日付 2023年3月19日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目 原子間力顕微鏡を用いた摩擦面その場観察法
による潤滑油添加剤由来トライボケミカル反
応膜の成長過程に関する研究

論文審査委員 （主査）教授 佐々木信也
教授 山本 誠 教授 牛島 邦晴
准教授 宮武 正明 教授 大竹 勝人
教授 野口 昭治 准教授 酒井 健一

論文内容の要旨

機械摺動部品の更なる低摩擦・高寿命化の実現のため、潤滑油の性能向上が求められている。潤滑状態は、流体潤滑、混合潤滑ならびに境界潤滑の3つに大別され、流体が二面間を支持する流体潤滑領域では、エネルギー損失の主要因である攪拌抵抗低減のため、潤滑油の低粘度化によりエネルギー損失低減が進められている。しかしながら、低粘度化は、摺動面間の油膜厚さの低下を招き、境界潤滑領域の拡大をもたらすことから、より一層の固体/固体の直接接触における潤滑特性の改善が求められている。境界潤滑の摩擦・摩擦特性向上に向けては、潤滑油に含まれる潤滑油添加剤の作用が重要である。反応型の潤滑油添加剤においては、摺動に伴い高温・高圧となった直接接触部において、接触部表面に吸着した添加剤が化学反応し、トライボケミカル反応膜と呼ばれる薄い被膜を摺動面に生成し、摩擦摩擦特性を改善すると考えられている。また、摺動面においては、真実接触部と呼ばれるナノメートルオーダーの固体/固体の直接接触部が、マクロ現象を支配していると考えられている。そのため、固体/固体接触部における摩擦摩擦特性のさらなる改善のため、潤滑油添加剤のトライボケミカル反応膜の生成過程をナノメートルオーダーで正確に捉える必要がある。

原子間力顕微鏡(Atomic force microscopy: AFM) は、ナノ物性ならびにナノ摩擦特性を調査できることから、真実接触部における摩擦メカニズムの調査に広く用いられている。近年、Gosvamiらは、AFMを用いた摩擦面その場観察により、潤滑油環境下におけるトラ

イボケミカル反応膜の生成過程観察を可能にした。また、AFM摩擦面その場観察法を用いることで、温度、垂直応力の上昇に伴い、反応膜の生成量が指数関数的に上昇することが報告されている。しかしながら、真実接触部における接触の効果によるトライボケミカル反応への影響を直接観察することが可能であるが、既往の研究では、マイクロスケールの摩擦面における平均値として反応膜の生成量のみを評価されており、真実接触部における垂直応力ならびにせん断応力が反応膜の生成過程に及ぼす影響に関しては調査していない。

そこで、本研究では、高温潤滑油環境下において、AFM摩擦面その場観察を用いることで、真実接触部におけるトライボケミカル反応膜の生成過程に及ぼす影響因子の検証を試みることを主目的としつつ、その応用を見据え、複合添加油中における生成過程観察を行い、潤滑油添加剤が生成する表面反応膜の生成メカニズムを検証する。

第1章では、本研究の背景と目的、本研究に関する既往研究について述べることで、AFMを用いた表面反応膜の生成過程観察の概要とその既往の研究について述べることで、ナノメートルオーダーでの表面反応膜の生成メカニズムについての課題と本研究の目的を述べる。

第2章では、AFM摩擦面その場観察法の検証を踏まえ、高温潤滑油環境下において、鉄鋼材上における潤滑油添加剤の摩擦特性とトライボケミカル反応膜の生成過程を観察し、摩擦現象の把握を試みる。

第3章では、マイクロスケールの平均面で行われてきたAFM摩擦面その場観察の結果を、真実接触部における生成過程観察に掘り下げることで、AFMの探針が実際に接触したナノメートルオーダーの領域におけるトライボケミカル反応膜の生成に及ぼす接触応力ならびにせん断応力の作用に関して考察する。

第4章では、第3章で得られた真実接触部における生成過程観察の結果をもとに、接触状態を粗さにより変化させ、トライボケミカル反応膜の生成量を増加させる新たな生成促進メカニズムを提案する。

第5章は、実用的な潤滑油添加剤においては、潤滑油添加剤の複合的な作用の解明が求められていることから、AFM摩擦面その場観察の応用として、複合添加油中での反応膜の生成過程観察を実施し、複合的に添加剤が作用する潤滑油環境下での添加剤の作用について考察する。

第6章では、本研究の総括として、今後の展望と本研究の総括を述べる。

論文審査の結果の要旨

本論文では、学長からの審査付託を受けて、標記7名の審査委員で構成する審査委員会を組織し、提出された学位論文について審査を行った。

審査委員会においては、学位申請者から、学位論文の内容や前回審査における指摘事項の対応結果について説明させ、その後、質疑応答を実施することで、博士論文として

満たすべき条件や必要な修正点を確認するという形式で進めた。

第1回審査会では、学位申請者が予備審査での指摘事項をふまえて修正した学位論文についての概要について説明があり、審査委員会委員6名から30点ほどの質問なされ、7点の指摘事項が課せられた。

第2回審査会では、学位論文の概略説明とともに、第1回審査における指摘事項の対応結果について説明があり、審査委員会委員が確認した。また、第2回審査においても、審査委員会委員から15点の追加質問がなされた。

公聴会では、第1回・第2回審査における指摘事項等を修正した学位論文発表について発表した。公聴会はハイブリッド形式で行い、審査委員のほか、対面で17名、オンラインで29名の参加があった。審査員および聴講者より合計26点の質問があった。これらに対して学申請者はすべて適切に回答し、質問者からの了解が得られた。

第3回審査会では、最終の博士論文と公聴会でのプレゼンをもとに、公聴会での質疑応答を踏まえた審査を行い、審査員が全一致で合格との判断を下した。

以上により、本論文が博士（工学）の学位論文として、十分に価値あるものと認められる。