

# 研究プロフィール



## 自己治癒力を有する超低摩擦機械システムの創成 —摩擦エネルギーによる超低摩擦発現界面の継続的自己形成—

東北大学大学院工学研究科  
機械機能創成専攻  
教授 足立 幸志

### 1. はじめに

“トライボロジー”当研究室が取り組んでいる専門分野であり、相対運動しつつ互いに作用を及ぼしあう表面及びこれに付随する問題と事象に関する科学と技術である。要求機能を果たすために必ず動く部分が存在する機械には、常にトライボロジーが存在する。

機械の代表格である自動車を考えてみると、その全エネルギー損失の約20%はエンジンやトランスミッションなどにおける相対運動する部分での摩擦に起因し、機械機器の故障や寿命の原因の75%は摩擦により引き起こされる摩擦に起因するといわれている<sup>1)</sup>。ゆえに低摩擦と耐摩擦は、自動車産業のみならず、あらゆる機械産業分野における効率的エネルギーの活用と安全・安心の鍵を握る科学技術と認識される。

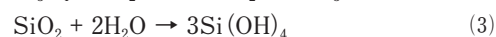
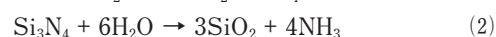
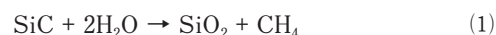
さらに、その効果は地球温暖化緩和に向けた温室効果ガス排出削減ならびに持続可能社会のための省資源・省エネルギーにも貢献する。また化学技術戦略機構の委託調査報告「ST/GSC技術開発プログラム構想—ST戦略の具体化に向けて—」によると摩擦と摩擦に起因したエネルギー損失とコスト損失はGDPの2%に達すると計算されており、経済の観点においても、低摩擦と耐摩擦に代表されるトライボロジーは、社会的要請の強い科学技術と認識される。

本稿では、そのような意義を持つ“トライボロジー”において、当研究室が取り組んでいる低摩擦に関する最近の研究を紹介する。

### 2. なじみ：トライボ化学反応による低摩擦発現界面の自己形成<sup>2)</sup>

図1に、水中において炭化ケイ素及び窒化ケイ素同士を擦らせた場合の繰り返しに伴う摩擦係数の変化の典型例を示す。いずれの場合においても、初期に比較的高い値を示した摩擦は徐々に減少し、定常状態として0.01以下の安定した低い摩擦係数を示す。この挙動は、一般に「なじみ」と呼ばれる。図1の摩擦システムでは、なじみ期間において、機械的な摩擦とともに(1)、(2)式の化学反応に伴う摩擦

面の平滑化と(3)式の化学反応に伴うせん断力の小さな水酸化SiO<sub>2</sub>ゲル層の形成により低摩擦発現界面が形成すると認識されている。



これらの化学反応は、常温常圧下では発生することは無く、摩擦部の過酷な接触状態ならびに機械的及び電気的作用に誘起されることにより起こる反応として「トライボ化学反応」と呼ばれる。相対的に過酷な接触状態にある摩擦初期は、トライボ化学反応を伴う摩擦面の幾何学的及び化学的な特性の変化が著しく、この期間に定常時の摩擦を決定する界面が形成される。図2は、図1の摩擦システムに

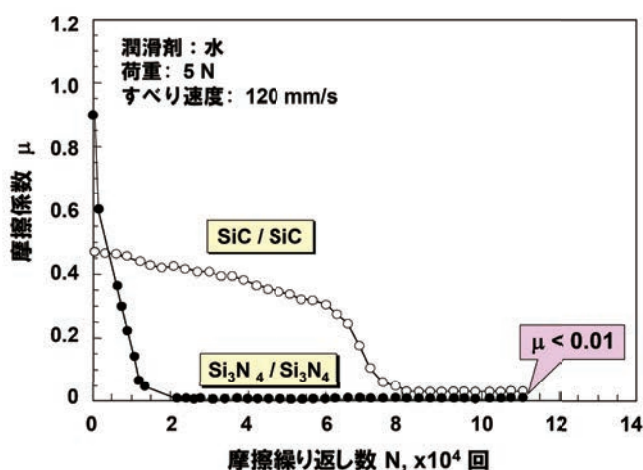


図1 水中における炭化ケイ素および窒化ケイ素同士の摩擦特性

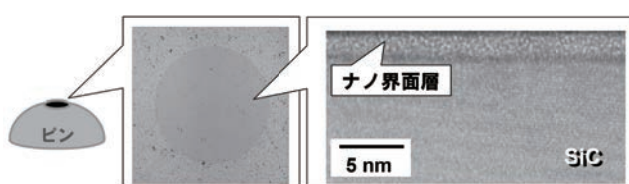


図2 水中における超低摩擦発現時の炭化ケイ素摩擦痕の断面TEM像

おいて形成された摩擦面であり、時にナノメートルの厚さの自己形成された界面（ナノ界面）によって低摩擦が発現する。

本研究室では、摩擦現象を「摩擦界面における化学反応」と捉え、トライボ化学反応の視点から超低摩擦の発現原理を解明し、その理論限界を実現するための技術開発により超低摩擦機械システムの構築を目指している。中でも従来経験的に扱われていた「なじみ」をトライボ化学反応の視点から科学的に着目し、定常時の摩擦面形成の基本原則を明らかにし、それに基づき低摩擦発現界面を形成するための技術（低摩擦技術）の開発に取り組んでいる。

**3. 超低摩擦発現界面形成のためのなじみ処理、表面テクスチャ及び新規コーティング<sup>2, 3)</sup>**

摩擦を抑制するための潤滑剤として水を用いる水潤滑システムは、水の低い粘性ゆえに従来の潤滑油では実現できない極めて低い摩擦を発現させることが可能となる。医療機器や食品及び半導体の製造等の特殊環境下における不可欠な潤滑技術として期待されている。問題は、低摩擦を与える水の特徴である低粘性に起因する許容荷重（低摩擦を発現させ得る限界荷重）の低さである。すなわち、水潤滑においては低摩擦と耐荷重性の両立が実用化のための重要課題となる。

これに対し、水潤滑において低摩擦と耐荷重性を両立し得る理想的な界面の自己形成を追求することにより、同じ材料、同じ摩擦条件においても、摩擦初期のなじみ処理の最適化により、低摩擦の発現（図3）に加え低摩擦と耐荷重性の両立が可能になることを明らかにしている（図4）。さらにトライボ化学反応の促進などを目的に導入するマイクロからナノメートルレベルで制御した表面テクスチャにより、非常に高い許容荷重とともに摩擦係数0.0001オーダーの超低摩擦を発生させることも可能となる（図5）。次に、低摩擦界面形成のためのトライボ化学反応を促進する新規コーティングを導入した際の摩擦特性を図6に示す。図6では、X軸の減少にともない潤滑状態が過酷になることを意味しており、新規コーティングによって、より過酷な条件においても低い摩擦を発現し得ることを示している。

これらの結果は、なじみ時における低摩擦発現界面（例えば図2）の自己形成技術を低摩擦技術と呼ぶことが可能であることを示している。

トライボ化学反応を制御するためのなじみ処理ならびにナノメートルオーダーで制御される表面テクスチャやコーティングは、低摩擦発現界面の自己形成技術として今後、期待される手法である。

**4. 摩擦環境を利用した低摩擦発現ナノ界面の継続的自己形成<sup>4-8)</sup> —自己治癒力を有する超低摩擦機械システム—**

窒化ケイ素と窒化炭素膜の摩擦界面に不活性ガスを吹き付けることにより無潤滑状態にもかかわらず油潤滑と同様の摩擦係数0.003の低摩擦を発生する（図7）という、当

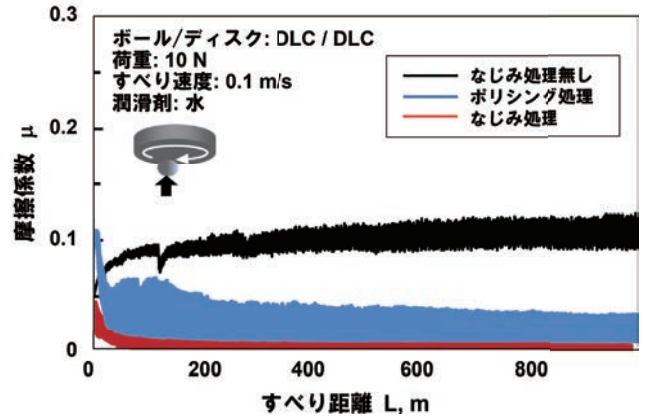


図3 なじみ処理による水中DLC同士の低摩擦発現

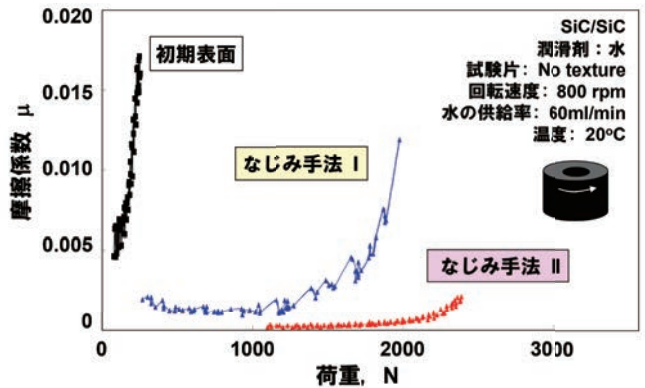


図4 なじみ処理の最適化による低摩擦と耐荷重性の両立

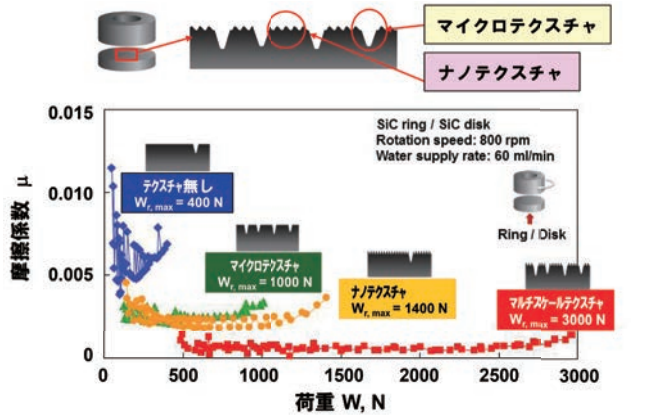


図5 表面テクスチャの最適化による低摩擦と耐荷重性の両立

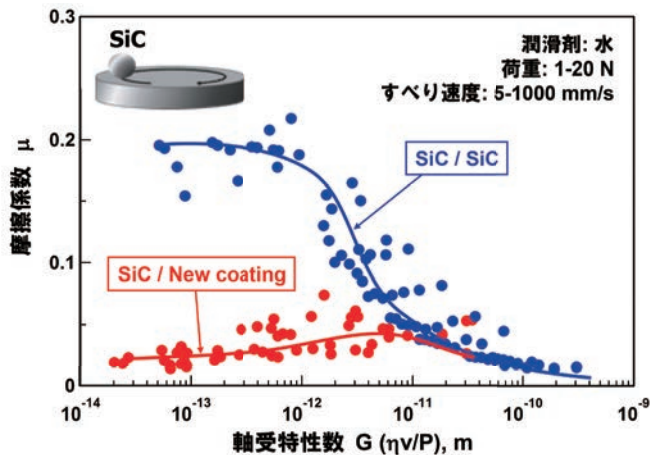


図6 新規コーティングによる過酷な潤滑条件下での低摩擦の実現



研究室で発見された現象を起点に本摩擦システムにおける低摩擦発現界面の解析を推進してきた。その結果として、新たに導入した炭素系硬質薄膜により、80℃程度の温度環境下であれば、大気中無潤滑下において極めて安定な低摩擦が発生することを明らかにしている（図8）。図9にその際のボール摩擦面の光学顕微鏡写真及び断面TEM像を示す。非常に安定した低摩擦を発現する際には、光学顕微鏡では移着を確認することが不可能な摩耗痕ではあるものの厚さ5nm程の低摩擦発現ナノ界面が自己形成していることが明らかにされている。さらに近年、大気中に存在す

る水分子がトライボ化学反応により乖離し、摩耗痕に水素基、水酸基として終端されていることが実験的に示され、この終端により低摩擦が発現し得ることがシミュレーションにより明らかにされている（図10）。このような大気中における無潤滑状態での低摩擦技術は、油など液体の潤滑剤や摩耗粒子が問題となる固体潤滑剤の使用が困難な機械システムの潤滑法として大いに期待される。さらに常に最表面にナノメートルオーダーの層が自己形成し続けるとともに、大気中に存在する無尽蔵の水の乖離と摩耗面への水素基、水酸基としての終端によりこの極めて低く安定した摩擦が持続していることが示されており、「超低摩擦発現ナノ界面の継続的な自己形成による半永久的な安定した低摩擦システム」の可能性を明示している。またこれは「トライボ化学反応を制御したナノ界面の創成」による超低摩擦の発現のみならず、実用化に不可欠な「低摩擦の信頼性・耐久性」の保証を与え得る現象であり、安全・安心な機械システムの鍵となる可能性を有している。

これらの技術開発のためには、なじみ期間のトライボ化学反応の制御とともに摩擦中に継続的に自己形成する低摩擦発現ナノ界面の形成機構、それによる超低摩擦機構の解明が不可欠となる。現在、摩擦研究と並行して進めている走査電子顕微鏡、環境制御型走査電子顕微鏡、ラマン分光装置、X線光電子分光装置（図11）と摩擦試験機を組み合わせたその場摩擦摩耗解析プラットフォームの構築が、低摩擦発現技術開発を加速するものと信じられる。

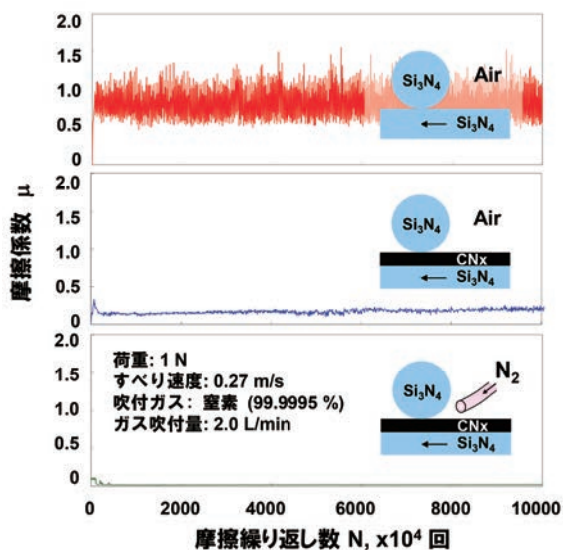


図7 窒素ガス吹付による無潤滑下における超低摩擦発現

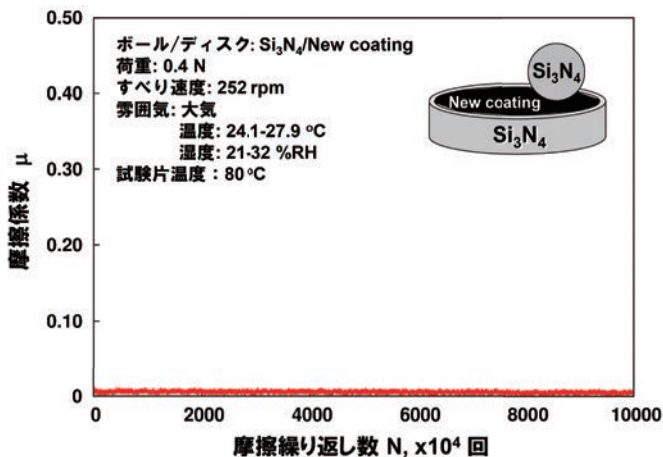


図8 大気中無潤滑下における超低摩擦発現

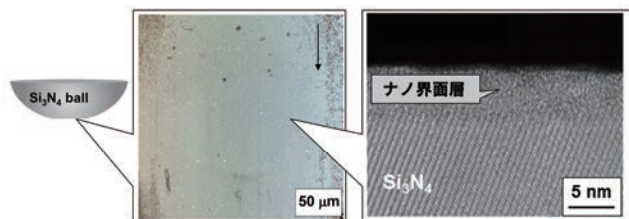


図9 大気中無潤滑下での超低摩擦発現時の窒化ケイ素摩耗痕に自己形成されたナノ界面の断面TEM像

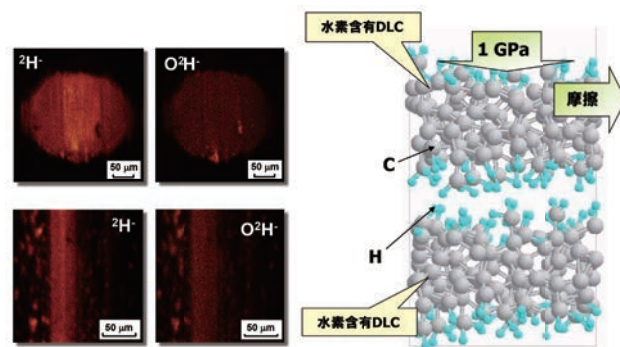


図10 大気中無潤滑下での超低摩擦発現時の摩耗痕（ボール、ディスク）表面の水素及び水酸基終端と水素終端炭素膜同士の摩擦のシミュレーションモデル



図11 摩擦面のその場X線光電子分光装置の外観

5. おわりに

人間は怪我や病気に対し、生まれながらにして自然に治す力を有している。自己再生機能と自己防衛機能に代表される自己治癒力である。もし、機械システムに自己治癒力が存在すれば、求められる機能に対する信頼性と耐久性を保証することが可能となる。これまでの寿命という概念を覆す新しい発想の機械システム創成が可能となる。本稿で紹介させていただいた摩擦エネルギーを利用した超低摩擦発現界面の継続的自己形成は、低摩擦機械システムの自己治癒の1つの形であろう。

材料構造、表面テクスチャ、表面エネルギー、摩擦発熱、摩擦帯電等の視点から、摩擦エネルギーを利用した機能性ナノ界面の創成による機械システムの自己治癒(図12)を目指し本研究室で推進している種々の研究テーマ例を以下に列記する。

- ・窒化炭素膜を用いた摩擦システムにおける超低摩擦ナノ界面の自己形成
- ・室温大気中における窒化炭素膜による低摩擦発現のためのなじみ制御
- ・DLC膜を用いた窒素ガス対応メカニカルシールの低摩擦化
- ・DLC膜を用いた水中摩擦システムにおける低摩擦発現
- ・ナノカーボンを用いた水中における低摩擦発現ナノ界面の創成
- ・ダブルネットワークゲル表面の自己形成テクスチャによる超低摩擦発現
- ・アルミ合金を用いた摩擦システムにおけるMoDTC油中での低摩擦発現界面形成のための表面テクスチャリング
- ・MoDTC油中におけるDLC膜を用いた低摩擦発現システムのための摩擦化学反応制御

- ・真空中における新規コーティングによる低摩擦発現界面創成
- ・補助人工心臓用メカニカルシールの接触面設計<sup>9)</sup>

人類が抱える地球規模の環境保全や持続可能社会のための創造性に富んだ革新的技術を生み出すためには、細分化された個々の学問のみでの対応は非常に難しくなっており、多様な科学技術の高度な融合が不可欠である。学際科学、基盤技術として位置し、科学と技術の両側面を有し、幅広い学問分野との接点を有するトライボロジーには、新しい技術を創成する鍵が多々存在する。今後も国内外の技術者、研究者との深い交流とそれにより得られる幅広い知識と多面的、論理的な考察を展開し、独創的な研究を進めるべく鋭意努力していく所存である。

最後に、これまで産官学の皆様より頂戴している多大なるご支援に心より感謝申し上げますとともに、今後も皆様からのご鞭撻とご支援を賜りますよう、宜しく申し上げます。

【参考文献】

- 1) 中村隆, トライボロジー技術の進展による自動車の省エネ, トライボロジスト, 61, 2 (2016) 65-70.
- 2) 足立幸志, 水潤滑システムにおける低摩擦発現のための表面テクスチャリング, 日本フルードパワーシステム学会誌, 48 (2017) 208-210.
- 3) Yasunori Niiyama, Naotoshi Shimizu, Akinori Kuwayama, Hiroshi Okada, Takanori Takeno, Kazue Kurihara, Koshi Adachi, Effect of running-in for delamination and friction properties of self-mating diamond-like carbon coatings in water, Wear, 378-379 (2017) 27-34.
- 4) Pengfei Wang, Koshi Adachi, Low frictions of self-

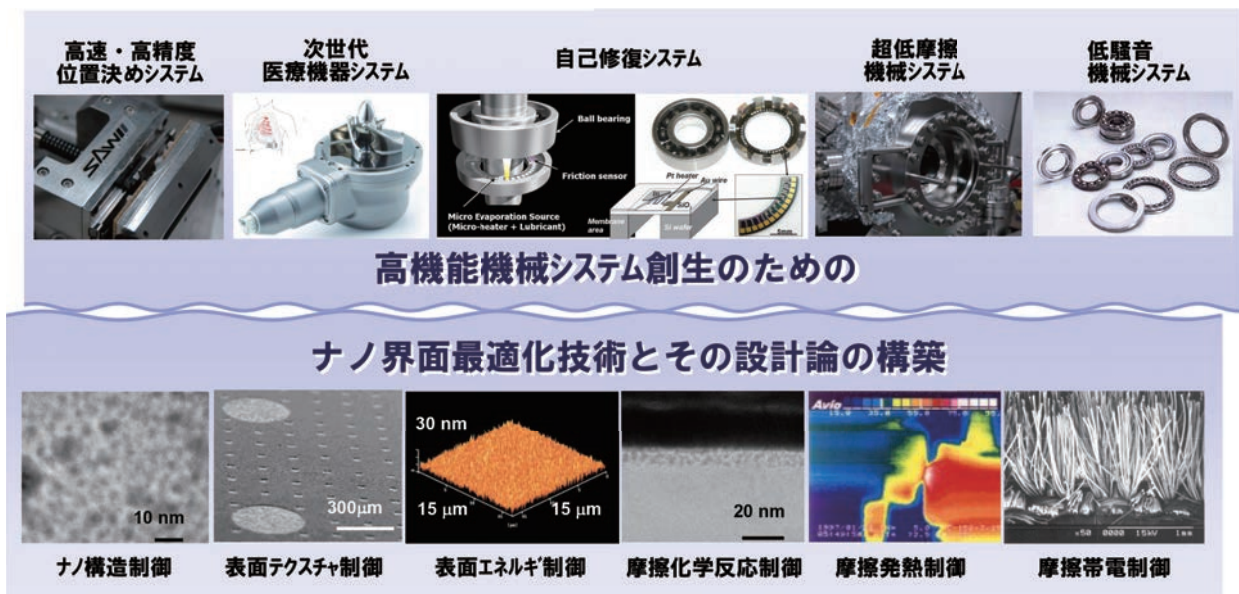


図12 摩擦エネルギーを利用した機能性ナノ界面の創成による機械システムイノベーション

- mated CN<sub>x</sub> coatings in dry and humid inert gas environments, *Surface and Coatings Technology*, 258 (2014) 1137-1144.
- 5) K. Hayashi, S. Sato, S. Bai, Y. Higuchi, N. Ozawa, T. Shimazaki, K. Adachi, J.M. Martin, and M. Kubo, Fate of Methanol Molecule Sandwiched between Hydrogen-Terminated Diamond-Like Carbon Films by Tribochemical Reactions: Tight-Binding Quantum Chemical Molecular Dynamics Study, *Faraday Discussions*, 156 (2012) 137-146.
- 6) Pengfei Wang, Masakatsu Sugo and Koshi Adachi, Stable and super-low friction of amorphous carbon nitride coatings in nitrogen gas by using two-step ball-on-disk friction test, *LUBRICATION SCIENCE*, 27 (2015) 137-149
- 7) Naohiro Yamada, Naohiro Yamada, Takanori Takeno, Koshi Adachi, Role of water and oxygen molecules in the lubricity of carbon nitride coatings under a nitrogen atmosphere, *Tribology Online*, 11, 2 (2016) 308-319.
- 8) Naohiro Yamada, Tomomi Watari, Takanori Takeno, Koshi Adachi, Effect of Oxygen on the Self-formation of Carbonaceous Tribo-layer with Carbon Nitride Coatings under a Nitrogen Atmosphere, *Tribology Letters*, 65: 27, 2017.
- 9) 神田航希, 足立幸志, 血液用メカニカルシールのトライボロジー, *トライボロジスト*, 63 (2018) 746-754.

## 【著者略歴】

あだち こうし  
足立 幸志

1964年8月生まれ

1988年 東北大学工学部機械工学科 卒業

1990年 東北大学大学院工学研究科博士課程前期2年の課程(機械工学専攻)修了

1990年 東北大学工学部 助手

2000年 東北大学大学院工学研究科講師

2001年 東北大学大学院工学研究科助教授

2002年 英国ケンブリッジ大学 客員研究員

2004年 東北大学機械系トライボベーストデザイン研究センター センター長

2010年 フランス国立中央理工科大学院リヨン校 客員教授

2011年 東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻教授

2017年 改組により同機械機能創成専攻教授