

早稲田大学大学院基幹理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

摩擦エネルギー解析による窒素添加ダイヤモンド
ライクカーボン(DLC)膜の摩耗挙動の研究

Study of Wear Behavior of Nitrogenated
Diamond-like Carbon (DLC) Films through
Friction Energy Analysis

申請者

山本	修二
Shuji	YAMAMOTO

機械科学専攻 材料強度学研究

2015年3月

近年の原発停止、環境破壊問題は、エネルギー効率を高めたシステム、機械技術の更なる進化を必要としている。その中で、摺動で発生する摩擦熱は、無駄なエネルギーであり且つ摺動部の耐摩耗性を劣化させる問題を生じる。この無駄な摩擦熱の発生は、特に自動車産業において車の信頼性、安全性、燃費性を損なう。無駄な摩擦熱を削減できる機構、材料が開発できれば、日本の自動車産業だけではなく、主な製造業は、高い国際競争力を維持できる。

摩擦熱発生を抑える低摩擦材として有望な材料に、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜がある。このDLC膜に窒素を添加して、摩擦・摩耗特性の優れたDLC膜の開発が行われている。これらDLC膜においても、温度が400℃以上になるとグラファイト化し、耐摩耗性が低下するため、DLC膜の摩耗挙動を考察するにも、摩擦熱を考慮した解析を行う必要がある。しかしながら、これまでの摩擦・摩耗挙動はせん断力で考察されてきた。摩擦熱を考慮した摩擦・摩耗の解析を行うには、摩擦エネルギーを基本とした解析法が必要となる。

本研究の目的は、摩擦エネルギー量に基づいた解析法を導出し、窒素添加DLC膜と鋼材、アルミナの摺動面での摩擦熱及び摩耗特性と摩擦エネルギー量との関係を考察し、提案する新評価法の有効性を検証する。また摩擦熱の影響を基に設計した窒素濃度傾斜を持つ新DLC膜の摩耗特性を評価し、傾斜組成DLC膜の有効性を明らかにすることである。

その研究結果、摩耗試験機を用いた摩擦エネルギー量測定法の提案、及び摩耗量－摩擦エネルギー式の導出により、摩擦・摩耗挙動と摩擦エネルギーの関係解析できる新評価法を構築した。さらに摩擦エネルギー量の定量化により、熱エネルギー量を用いた二体の摺動面での摩擦熱分布、及び摩耗特性と摩擦エネルギー量との関係を明らかにし、この新評価法の有効性を示した。次に摩擦エネルギーで生じる摩擦熱の影響を基に設計した窒素傾斜DLC膜を作製し、優れた耐摩耗性を有することを明らかにした。

本論文は、第7章で構成されている。

第1章「序論」では、摺動における無駄な摩擦エネルギーの発生の抑制が必要とされる社会背景を説明し、エネルギーの観点から摩擦・摩耗特性の解析の重要性を示し、今回の研究目的を提起した。

第2章「各種DLC膜の製造方法と構造解析」では、窒素添加量によるDLC膜の構造の変化と、硬度、ヤング率の相互関係を明らかにした。今回、基準被膜として、ベンゼン(C₆H₆)を主ガスしたDLC膜をプラズマCVD法で作製し、DLC膜中の窒素含有量が増加するとダイヤモンド(sp³)構造/グラファイト(sp²)構造比が減少することをラマン分光、XPS解析により明らかにした。また膜中の窒素含有量の増加に伴ってDLC膜の硬度も低下することを明らかにした。この原因はDLC膜中の窒素増加によるC-N結合の増加がsp³構造の生成を阻害していることを明らかにした。これらの研究は、DLC膜中のsp³構造の生成と、DLC膜の硬度の関

係を明らかにした点で新規性があり、学術的に高く評価される。

第 3 章「エネルギー量に基づいた摩擦・摩耗特性評価方法の提案」では摩擦エネルギー量を用いた摩擦・摩耗解析法を構築した。これは Holm-Archard の式を変形して、摩耗量-エネルギー式を導出するとともに、汎用の摩耗試験機を用いての摩擦エネルギー量測定法を提案した。この導出過程においてエネルギー表記による摩擦係数の式、摩耗率とスライド速度の関係式、摩耗率と温度の関係式を導出した。ここでの研究成果は、新しく摩擦エネルギー量を用いた摩擦・摩耗の解析方法を創出した点で新規性があり、学問的に高く評価できる。

第 4 章「DLC 膜と鋼材の摩擦エネルギーの定量化」では、摩擦エネルギー内の摩耗粉形成エネルギー、弾性ひずみエネルギー、塑性変形エネルギー、化学反応エネルギー及び摩擦熱エネルギーの定量化を行った。得られた熱エネルギー量を用いて、摺動中の鋼材ボール中の温度分布シミュレーションを行った。熱電対による鋼材ボール中の温度の実測値と、DLC 膜とボール鋼材への熱エネルギーの分配率で補正した温度シミュレーション値が一致することを明らかにした。摩耗粉形成エネルギーは、圧痕法で求めた窒素添加 DLC 膜の表面エネルギーと、画像解析から求めた摩耗粉総表面積の積から求め、摩擦エネルギー量に対するそのエネルギー消費率は数 ppm 程度であることを明らかにした。弾性ひずみエネルギーはヘルツ理論を用いて、垂直応力及び摩擦力によってボール中に生じる弾性ひずみエネルギー、せん断ひずみエネルギーを求め、そのエネルギー消費率は ppm 以下であることを明らかにした。塑性変形エネルギーは、鋼材の応力-ひずみ曲線を用いて推定し、そのエネルギー消費率は ppm 以下であることを明らかにした。また、化学反応熱エネルギーは鉄の酸化反応過程による発熱反応であり、摩擦エネルギー消費内訳から除外できることを明らかにした。前述したエネルギー量を摩擦エネルギー量から減じることにより、摩擦エネルギー量の 99% 以上が摩擦熱エネルギーに変換されることを明らかにした。これらの研究は、摩擦エネルギー中の各消費モードのエネルギー消費率を明らかにすると共に、その結果から得られた熱エネルギー量を使った温度分布シミュレーションは、熱エネルギー分配率を考慮することにより、実測値と一致できることを明らかにした点は新規性が高く、工学的、学術的に高く評価される。

第 5 章「DLC 膜に対する鋼材の摩擦・摩耗特性」では、DLC 膜に対する鋼材の摩耗特性を、第 3 章で提案、導出したエネルギー法を用いて解析した。SUJ2 鋼（炭素鋼）、SUS440C 鋼（マルテンサイト系ステンレス）ボールと相手材 DLC 膜で摩耗試験を行い、SUJ2 鋼に比べ、SUS440C 鋼の方が摩耗特性に優れていることを明らかにした。SUJ2 鋼及び SUS440C 鋼の摩耗面の温度を、熱シミュレーション解析で推定し、SUJ2 鋼の摺動面温度は、SUS440C 鋼のそれよりも高く、各鋼の硬度の温度特性から、摩擦熱によって SUJ2 鋼では硬度が 20 % 程度低下するのに対し、SUS440C 鋼は全く変化がないことを示し、SUJ2 鋼の摩耗特性が低い原因

は、摩耗面温度上昇による硬度低下であることを明らかにした。また、Holm-Archard の式と今回提案した摩耗量－エネルギー式の摩耗係数の比が各鋼材と DLC 膜の摩擦係数と等しいことを示し、Holm-Archard の式と摩擦量－エネルギー式が等価であることを明らかにした。これら研究は、摩擦エネルギー量を用い、摩擦熱が鋼材の摩耗特性に影響を与えることを明らかにした点で新規性が高く、工学的、学問的に高く評価できる。

第 6 章「アルミナに対する DLC 膜及び窒素添加 DLC 膜の摩擦・摩耗特性」では、最初に DLC 膜及び窒素含有量の異なる DLC 膜のアルミナボールに対する摩擦・摩耗特性を、摩擦エネルギー量を用いて考察した。その結果、窒素含有量が多いと DLC 膜の摩擦係数は上昇し、耐摩耗量が低下すること明らかにした。また、摩耗量－エネルギー式の摩擦係数は、摩耗に消費されるエネルギー消費率であることを明らかにした。次に摩擦熱による DLC 膜と基板間の熱応力を緩和するよう、窒素組成傾斜 DLC 膜構造を設計、作製し摩耗特性を解析した。その結果従来の DLC 膜に比較して、耐摩耗性が優れていることを明らかにした。これら研究では、摩耗量－エネルギー式の摩耗係数は、摩耗の消費エネルギー率という物理的意味を明らかにし、摩擦熱による熱膨張を緩和した DLC 構造の設計を行うことにより、耐摩耗性の優れた DLC 膜が製作できることを明らかにした点で新規性が高く、工学的、学問的に高く評価できる。

第 7 章「結論」では、本論文の結論と今後の展望について述べた。

以上を要約すると、本論文は摩擦エネルギー量を用いた新しい摩擦・摩耗解析法を考案し、摩擦エネルギーの内訳を定量化する共に、摺動面で発生する熱及び摩擦量と摩擦エネルギーの関係を初めて解析したものである。この結果を用いて、摩擦・摩耗特性の優れた DLC 膜の設計・製作できることを示し、摩擦エネルギーによる摩擦・摩耗特性解析の有効性を明らかにしたことは、工学的に意義あるものと言え、高く評価できる。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2015 年 3 月

審査員

(主査)

早稲田大学 教授	工学博士(早稲田大学)	増田 千利
早稲田大学 教授	工学博士(早稲田大学)	富岡 淳
早稲田大学 教授	博士(工学)(東京大学)	酒井 潤一
関東学院大学 教授	工学博士 (東京大学)	高井 治