

## 審査の結果の要旨

論文名：プラズマイオン注入法を用いた集積化カーボンナノ粒子薄膜の合成とトライボロジー応用に関する研究

氏名 澤井 周

近年、低摩擦・高耐久性を目的として、モリブデンやタンゲステンを用いた数十～数百ナノメートルサイズのナノ粒子、あるいはグラフェン、カーボンオニオンやカーボンナノチューブなどの炭素クラスタを潤滑油に添加する研究が数多く行われている。しかし、ナノ粒子、炭素クラスタの潤滑油への分散性、潤滑部への侵入性などに課題があり、実用化までには至っていない。本研究では、これらの問題を解決するために、球形のカーボンナノ粒子からなる被膜を摩擦表面に形成する手法を提案すると同時に、具体的な成膜手法を研究し、さらにそのトライボロジー特性を明らかにすることを目的としている。今やエネルギー損失の低い機械システムが求められているが、その摩擦・潤滑部分の実現において、本研究は多くの示唆を与えるものである。

「第1章 緒論」では、これまでに潤滑添加剤として研究されてきたナノ粒子・炭素クラスタの研究を概説し、そのメカニズム及び課題を述べている。そして、本研究の目的として、バイポーラ PBII 法を用いて集積化 CNP 粒子薄膜の合成を行うとともに、集積化 CNP(carbon nano-particles) 薄膜の固体潤滑材としての応用を目指すことを述べている。

「第2章 イオン注入法による CNP 合成原理および集積 CNP 薄膜合成手法の検討」では、シリコン基板への銀薄膜成膜、銀薄膜へのカーボンイオン注入、および熱処理による銀薄膜の蒸発の三段階からなる、集積化 CNP 薄膜成膜手法を提案し、また、各段階での課題を述べている。特に第二段階でのカーボンイオン注入の重要性について述べ、そのために用いるバイポーラ PBII(Plasma based ion implantation and deposition)法について詳述している。

「第3章 バイポーラ PBII 装置を用いた CNP 薄膜合成プロセスの提案と検証」では、三段階からなる集積 CNP 薄膜合成のそれぞれの段階を個別に実験し、パラメータの検討を行っている。走査型電子顕微鏡(SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM)、ラマン分光分析、X線光電子分光分析などを用いて詳細に検討し、各段階での銀成膜、イオン注入、銀蒸発における設定パラメータの最適値を明らかにしている。そして、提案する手法を連続して用いることにより、粒径 20nm 程度の CNP からなる、集積 CNP 薄膜が合成されたことを示している。

「第4章 CNP 薄膜形成に及ぼす合成プロセスの影響」では、CNP の成長に焦点を当てて実験を進めている。そして、第二段階の銀薄膜へのカーボンイオン注入において CNP は成長し、第三段階の熱処理による銀薄膜の蒸発では、CNP の構造は成長（グラファイト化）するもののサイズの成長は停止していることを明らかにした。すなわち、第二段階ではイオン注入に伴う加熱が CNP の成長を促すこと、およびこの段階の制御により CNP のサイズが決定されることを示した。続いて、第一段階の銀成膜の影響を調べ、この段階の加熱は集積 CNP 薄膜のマクロな構造、および CNP のサイズに影響を与えることを明らかにした。

「第5章 CNP 薄膜の固体潤滑剤としての摩擦摩耗特性の検討」では、第4章で合成した集積 CNP 薄膜のトライボロジー特性について軸受球（SUJ2 製）を相手として摩擦試験を行って検討した。大気中においては、シリコン基板、CO(カーボンオニオン)分散膜と比較して、集積 CNP 薄膜が 0.1 の低い摩擦係数を表すこと、すなわち集積化の有効性を示した。また、SUJ2 球の摩耗痕を光学顕微鏡、ラマン分光法で分析することにより、低摩擦化のメカニズムについて、移着 CNP が部分的に破壊されグラファイト化することが原因であることを明らかにした。続いて、水素雰囲気下で摩擦試験を行い、摩擦係数が 0.01 まで低下することを示し、今後の水素エネルギー社会での活用性を示した。

「第6章 結論」では、本論文の総括と将来への展望を述べている。

以上まとめると、本研究においては、集積化カーボンナノ粒子薄膜の提案、成膜手法の検討・実践、そしてトライボロジーへの応用まで幅広く研究したものである。これまでのナノパーテクルの潤滑油への添加利用に関する課題を一気に解決したものであり、高強度、高耐久性、低摩擦固体潤滑膜としての活用が期待できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。