

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 白 香 蘭

本論文は「生体・食品の凍結・貯蔵・解凍過程への応用を目的とした氷の電気物性の研究」と題し、(1)交流電場中に置かれた氷の誘電損失が 250kHz および 3 MHz 近傍において極大値を取ることを発見し、250kHz は（誘電損失が温度が高くなるほど大きくなる）緩和型損失、3 MHz は（誘電損失が温度が低くなるほど大きくなる）共鳴型損失であることを示し、(2)共鳴型損失を利用することにより、マイクロ波解凍（2.45GHz）で起るサーマル・ランナウェイ（解凍過程で温度が高くなった部分が誘電損失が大きくなりさらに温度が高くなり温度ムラが拡大される現象）を克服できる均一・急速解凍法の提案と実証とを行ない、また(3)緩和型誘電損失を利用することにより、凍結保存過程における氷結晶の形態変化を非破壊で測定する方法の提案と実証ならびにその解析的考察を行なうとともに、(4)誘電損失を利用した凍結過程における核生成制御の可能性の検討などを行なったものである。

論文は 7 章よりなる。第 1 章の「緒論」では、生体や食品の凍結保存および氷の誘電損失の利用に関する従来の研究の整理と問題点の指摘を行ない、研究の目的と論文の構成について述べている。

第 2 章は「氷の比誘電損率の測定」と題し、氷の電気物性の測定について述べている。即ち、氷の誘電損率を数 10～数 GHz の周波数帯、 $-60^{\circ}\text{C}$ ～ $-2^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で測定し、誘電損失に比例する周波数と誘電損率との積が 250kHz および 3 MHz でピークとなること、および誘電損失は、前者では温度が高くなるほど大きくなるが、後者では温度が低いほど大きくなることを報告している。そして、誘電損失のこうした温度依存性に関する解析計算を行ない、前者は緩和型損失、後者は共鳴型損失であることを示している。

第 3 章は「交流電場を利用した氷晶の解凍実験およびシミュレーション」と題し、第 2 章の結果を解凍過程へ応用することを提案・実証している。まず、交流電場中に置かれた氷晶の昇温実験を行ない、3 MHz 近傍で共鳴型誘電損失特有の発熱が発生することを確認している。次に、自然対流下での解凍過程に対する交流電場の影響を数値計算により 3.5MHz までの周波数帯について検討し、3 MHz 近傍にて急速かつ均一な解凍過程が実現できることを示している。

第4章は「凍結貯蔵時における氷晶の形態と電気物性の経時変化の計測」と題し、単結晶と多結晶の氷を作成し、これらを $-15^{\circ}\text{C}$ に保ち、氷結晶の形態変化と電気物性の変化とを同時に測定している。即ち、単結晶の氷は再結晶を起こさず、比誘電損率や誘電損失係数（比誘電損率と比誘電率との比）も経時変化を起こさないが、多結晶の氷は時間とともに、再結晶を起こし結晶粒が大きくなるとともに、緩和型損失に相当するピーク周波数が変化することを示している。また、30%、40%の果糖水溶液を $-15^{\circ}\text{C}$ で保持し、氷の結晶形態変化と上記ピーク周波数との定量的関係を求め、氷晶寸法、氷晶数密度、粒界線長さ密度などの結晶形態パラメータとピーク周波数とが良好な対応関係にあることを示している。この結果は、緩和型誘電損失を利用することにより、凍結保存中に時効効果により起る氷晶形態の変化を非破壊により推定できる可能性を示唆している。

第5章は「氷晶粒界が電気物性に及ぼす影響の解析」と題し、分子動力学法および等価回路により緩和型損失と粒界との関係を考察している。まず、分子動力学法を用いて単結晶、多結晶の氷の誘電吸収スペクトルを計算し、実験値と比較することにより計算で使用した水分子モデルの妥当性を確認し、粒界の存在が氷系の電気物性に影響することを示し、前章の結果を解析的に確認している。次に、再結晶化について等価回路を用いて解析し、再結晶化の進行とともに導電率が減少し、静電場における誘電分極は増大することを前章の測定結果を用いて示した上で、分子動力学法を用いて、静電場における誘電分極を単結晶、多結晶の氷について計算している。その結果、誘電分極は単結晶より多結晶の氷の方が小さくなることを示し、多結晶の氷の電気物性の経時変化は再結晶化の進行に伴う粒界の変化に起因していることを示している。

第6章は「低温保存した食品、生体への応用」と題し、交流電場の急速かつ均一解凍への応用、氷構造の時効効果の非破壊推定への応用に関する問題点を纏めるとともに、氷核生成制御への応用の可能性を検討している。氷核生成の制御については、核生成の抑制に必要な最小電界強度を古典的核生成理論に基づいた計算により求め、計算範囲内の周波数では極めて高い電界強度が必要であるが、理論上は可能性があることを示している。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は生体や食品の凍結・保存・解凍過程を念頭に、氷の電気物性およびその各過程への応用について論じたものであり、機械工学の発展に寄与するところが大きい。

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。