

第36号

平成28年4月1日

博士學位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

(平成27年度 後学期授与分)

金沢工業大学

目 次

◇博士

(学位記番号)	(学位の種類)	(氏名)	(論文題目)
博甲 第 105 号	博士(工学)	廣瀬 智博	光学部品用金型加工向け超精密加工機の 高速・高精度化に関する研究・・・1
博甲 第 106 号	博士(理工学)	金子 明裕	麹菌 <i>Aspergillus oryzae</i> の脱デンプン 小麦フスマにおける酵素生産とアミノ酸 トランスポーター遺伝子の解析・・・6
博甲 第 107 号	博士(工学)	松井 慧	プラズマ励起中性ガスによる殺菌処理 技術の研究・・・・・・・・・・・・・・11
博乙 第 53 号	博士(工学)	飯田 福司	木製水槽の容器構造物としての基本性状 と耐震性能に関する基礎研究・・・16

は し が き

本誌は、学位規則（昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号）第 8 条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

氏名	<small>ひろせ</small> <small>ともひろ</small> 廣瀬 智博
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第105号
学位授与の日付	平成28年3月14日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当
学位論文の題目	光学部品用金型加工向け超精密加工機の高速度・高精度化に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 森本 喜隆 教授 新谷 一博
	教授 加藤 秀治
	産業技術総合研究所 上級主任研究員 岡崎 祐一
	金沢大学 教授 浅川 直紀

論文内容の要旨

近年の光学金型は Blu-ray ディスクの登場やスマートフォンを代表とする携帯端末搭載向けの小型高性能カメラの普及により、小型で高い形状精度と良好な表面粗さが求められている。一方で自由曲面形状の金型では、 $f\theta$ レンズ金型等の比較的小型の部品からプロジェクタ用ミラーレンズや自動車用ヘッドライトなど大型で複雑な形状の金型加工の要求が高まり、従来のフライカット法では加工の長時間化による外乱の影響を受けて形状精度が悪化する問題が挙げられていた。

本論文では、リニアモータを移動テーブルの駆動源に用いた超精密 5 軸加工機と補正加工に使用する高精度機上形状計測装置を開発し、運動性能の評価と工作物の形状精度および表面粗さの測定を基にその有効性を検証した。本論文は 7 章から構成されており、各章の研究内容および主な成果は以下のとおりである。

第 1 章では、光学レンズと超精密加工機の歴史を示し、現在の光学レンズが抱える課題について示した。また、これまでの超精密加工機の問題点を挙げ、本研究の目的を述べている。

第 2 章では、開発した超精密 5 軸加工機の構造と主な仕様を示した。本章では、超精密 5 軸加工機の特徴である油静圧案内とリニアモータ駆動の構造について述べ、真直度や位置決め性能の静的な性能評価試験結果について示した。さらに本章では、超精密加工機の輪郭制御の性能評価方法として NC 内部情報の位置偏差を利用した評価方法を提案した。この評価に用いる位置偏差は、NC 制御装置の制御信号から取り出すことができるため、新

たに観測機器を設置する必要がなく、工作物の加工中にも評価が可能である。この評価方法を用いて従来の油静圧ねじ駆動とリニアモータ駆動による輪郭制御を比較した結果、送り速度 100mm/min 以上ではリニアモータ駆動が優れることを示した。

第 3 章では、機上形状計測装置の高精度化について述べた。近年普及している Blu-ray のピックアップレンズ用の金型は、高い開口数を確保するために、小径のレンズながら傾斜角 ± 70 度までの範囲においてその形状を確保する必要があった。本章では、機上形状計測装置の主軸材料の見直しと測定予加重の低減および測定用のプローブの形状変更を行なった。この結果、従来の機上形状計測装置では測定再現性が ± 50 度の範囲において 3σ が 60nm を超える結果であったのに対し、開発した機上形状計測装置の測定再現性は ± 75 度の範囲において 23nm であることを示した。

第 4 章では、基本的な加工性能の評価として軸対象非球面形状の工作物の切削および研削加工と形状測定による補正加工を行ない、工作物の測定結果から超精密加工機および機上形状計測装置の性能評価を行なった。本章では、補正加工の方法について示し、加工前、補正加工前、補正加工後の工作物の形状測定結果を示し、工作物の補正加工が行われていく過程を示した。この結果、切削加工では形状精度 p-v (peak to valley) 値 $0.1\mu\text{m}$ 以下の目標を上回る 40nm の工作物が得られた。回転砥石を用いた工作物の研削加工では、砥石摩耗量を機上形状計測装置により砥石形状測定結果から算出し、砥石摩耗を考慮した NC プログラムを作成し加工を行うことで形状精度 p-v 値 50nm 以下の金型を加工できることを示した。これらの形状測定結果は、三次元形状測定機による測定結果と同等の測定結果が得られることを示した。

第 5 章では自由曲面形状の加工においてフライカット法に代わる新しい加工方法として、非回転工具による切削加工法を示し、工作物の加工と形状測定を行なった、この評価試験では、送り速度 1000mm/min にて工作物を加工後、工作物を測定し、形状精度 p-v 値 80nm 以下、表面粗さ 1.9nm 以下の結果が得られ、光学金型の高速加工が可能であることを示した。

第 6 章では、レンズアイ金型の加工方法として円弧シェーパ加工の提案と加工評価を行なった。レンズアレイ金型は複数のレンズモジュールを同時に組立、切断することで数多くのレンズを同時に生産することができる。しかし、金型には全てのレンズ形状が高精度かつ良好な表面粗さを求められることに加え、全てのレンズ形状が精度よく配置されている必要がある。提案した円弧シェーパ加工は、通常の旋削加工では工作物が主軸に取り付けられるのに対し、工具が主軸に取り付けられており、この工具が回転することで連続

したシェーパ加工により非球面形状を創成することが可能である。加工評価試験では、25個のレンズ形状が規則的に並んだ工作物の加工を行ない、工作物評価の結果、形状精度 $0.1\mu\text{m}$ 以下、表面粗さ 2nm およびピッチ精度 $1\mu\text{m}$ 以下の良好なレンズアレイ金型を得ることができた。

本研究では、超精密加工に関して挙げられた課題を段階的に解決することで超精密加工機の高速高精度化を実現することができた。本研究によって得られた結果は、今後の光学産業分野に対して多大な貢献を期待することができる。

論文審査の結果の要旨

Blu-ray ディスク用ピックアップレンズや、スマートフォン用小型高性能カメラ向けレンズの金型は、小型で高い形状精度と良好な表面粗さが求められている。また自由曲面形状レンズの金型では、 $f\theta$ レンズ、プロジェクタ用ミラーレンズ、自動車用ヘッドライトなど、複雑形状をもつ小型から大型の金型を加工する必要があるが、従来のフライカット法では加工が長時間におよぶため、外乱により形状精度が低下する問題があった。

本研究では、テーブル移動速度 2m/min 以上の高速動作が可能なりニアモータを駆動源に用いた超精密 5 軸加工機の開発と加工機上に設置する形状計測装置の高精度化を実現するために、開発した加工機の性能評価と工作物の精度評価を基に、超精密加工機の高速・高精度化に取り組んだ。本論文は 7 章から構成されており、各章の研究内容および主な研究成果は以下のとおりである。

第 1 章では、光学レンズと超精密加工機との関係とその研究開発の観点から先行研究の成果を基に示し、現在の光学レンズに求められる課題と、超精密加工機の現状の問題点を挙げ、本研究の目的を述べている。

第 2 章では、開発した超精密 5 軸加工機の構造と主な仕様を示し、光学部品の金型加工を行なう上で必須となる油静圧案内とリニアモータ駆動の構造について述べ、真直度や位置決め性能評価結果について示した。さらに超精密 5 軸加工機に求められる輪郭加工精度を、制御装置の位置情報を基に目標形状との偏差を利用する評価方法を提案した。これにより新たに計測機器を設置する必要がなく、工作物を機上にて評価できることを他の測定機器による測定結果と比較することにより示した。この評価方法を用いて従来の油静圧ねじ駆動とリニアモータ駆動による輪郭制御を比較した結果、送り速度 100mm/min 以上ではリニアモータ駆動が優れることを示した。

第 3 章では、Blu-ray のピックアップレンズ用の金型を加工するために加工面の傾斜角 ± 70 度まで測定範囲を確保するために機上形状計測装置の主軸材料の見直しと測定予加重の低減および測定用プローブの形状変更を行なった。

この結果、従来の機上形状計測装置の測定再現性が ± 50 度で 3σ が 60nm を超える結果であったのに対し、開発した機上形状計測装置のそれは ± 75 度の範囲において 27nm 以下となり、機上計測装置として有効であることを示した。

第 4 章では、軸対象非球面形状の工作物の切削および研削加工と、形状測定結果に基づく補正加工を行ない、超精密 5 軸加工機および機上計測装置の性能評価を行なった。ここでは、加工前、補正加工前、補正加工後の三段階で工作物の形状測定結果を示し、工作物

の補正加工と加工精度との関係を明らかにした。この結果、切削加工により、形状精度が p-v (peak to valley) 値 100nm 以下の目標を上回る p-v 値 40nm 以下の工作物が得られた。また、あらかじめ砥石摩耗量を予測した研削加工を行うことで形状精度が p-v 値 50nm 以下の金型を加工できることを三次元形状測定機との測定結果により確認し、それらの加工方法の妥当性を示した。

第 5 章では自由曲面形状の加工において主流であるフライカット法に代わる新しい加工方法として、非回転工具による切削加工法を提案した。送り速度 1000mm/min にて工作物の加工を実施し、形状精度が p-v 値 80nm 以下、表面粗さが 1.9nm 以下の工作物が得られ、提案する手法は自由曲面を従来手法の 10 倍以上の高速加工が可能であることを示した。

第 6 章では、レンズアレイ金型の加工法として新たに円弧シェーパ加工の提案を行なった。この加工は、開発した超精密 5 軸加工機により実現できるもので世界初の加工手法である。提案手法に基づき 25 個のレンズ形状が規則的に並んだ工作物を加工した結果、工作物の形状精度が p-v 値 60nm 以下、表面粗さ 2nm およびピッチ精度 1 μ m 以下の良好なレンズアレイ金型を得ることができた。

以上のように本研究では、光学部品用金型の超精密加工に関して挙げられた課題を段階的に解決することで超精密加工機の高速度高精度化を実現することができた。本研究によって得られた結果は、今後の光学産業分野および工作機械関連分野に対して多大な貢献が期待できる。よって本論文は、博士（工学）の学位授与に十分値すると判断できる。

氏名	かねこ あきひろ 金子 明裕
学位の種類	博士（理工学）
学位記番号	博甲 第106号
学位授与の日付	平成28年3月14日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当
学位論文の題目	麹菌 <i>Aspergillus oryzae</i> の脱デンプン小麦フスマにおける 酵素生産とアミノ酸トランスポーター遺伝子の解析
論文審査委員	(主査) 教授 尾関 健二 教授 大澤 敏 教授 藤永 薫 教授 大箸 信一 金沢大学 准教授 坂本 敏夫

論文内容の要旨

小麦フスマは、小麦の外皮であり、ヘミセルロース・セルロースが主成分である。主に小麦粉の製粉工程に副生成物として、日本だけでも年間50万t以上排出される。バイオマス資源として「集積のコストがかからない」「均一の材料が得られる」といったメリットがあり、真菌類を利用したバイオエタノール生産に向いている。小麦フスマの主成分であるヘミセルロース・セルロースを分解する酵素が望まれる。

麹菌 *Aspergillus oryzae* は、永らく発酵食品に使われてきた安全な微生物である。麹菌の大きな特徴として豊富なタンパク質生産能力が挙げられ、産業用酵素の生産菌として、また物質生産の宿主としても利用されている。全ゲノム配列が解読され、新機能の発見が期待されている。

第一章では、小麦フスマ (WB: Wheat Bran) の主成分であるヘミセルロース類を分解するヘミセルラーゼ系酵素を高生産する麹菌の培養方法を検討した。麹菌をWBで培養を行うと、WBに約10%含まれるデンプンにより誘導されたアミラーゼ系酵素遺伝子が強力に発現し、WBの主成分であるヘミセルロースを分解する酵素の生産が抑えられていた。そこで、WBからデンプンを除去する方法を検討した。WBをクエン酸溶液中でオートクレーブ、さらに熱水と水洗浄処理により、脱デンプン小麦フスマ (SFWB: Starch Free Wheat Bran) の作製に成功した。SFWBを基質に麹菌を培養することでアミラーゼ系酵素の生産を抑えることができた。

第二章では、SFWB を基質として用いて麹菌の培養を行い、ヘミセルロースを分解するキシラナーゼ、 β -キシロシダーゼを高生産させることに成功した。また、エンドペプチターゼ（酸性、中性）、酸性カルボキシペプチターゼ活性も増加した。加えて、2次元プロテオーム解析から、新規酵素として、endo-1, 3- β -グルカナーゼと exo-1, 3- β -グルカナーゼ及び2つの β -グルコシダーゼを新たに同定した。

第三章では、麹菌を SFWB を用いて培養することで、アミラーゼ系の酵素の生産を抑え、WB の主成分であるヘミセルロース、セルロースを分解するヘミセルラーゼ、セルラーゼ系酵素遺伝子の高発現が確認できた。特に、WB の主成分であるキシロースを分解する 1, 4- β -キシラナーゼ (A0090001000208) の発現が 27 倍の高発現となった。 β -キシロシダーゼ (A0090103000423) の発現量が 3 倍、endo-1, 3- β -グルカナーゼの発現量も 73 倍、70 倍、10 倍と高発現していることが分った。

第四章では、麹菌のデンプン飢餓培養で多くのアミノ酸トランスポーターの発現上昇を見出した。中でも酵母 *Saccharomyces cerevisiae* において研究が進んでいるアミノ酸トランスポーター *gap1* と相同性の高い *gapA* の遺伝子が高発現していることを発見した。麹菌が飢餓状態で生存するためには、この *gapA* 遺伝子が発現して、様々なアミノ酸を取り込み栄養源としていると考えられた。

第五章では、麹菌の *gapA* 遺伝子破壊株を作製し、*gapA* 遺伝子の機能解明を行った。*gapA* 遺伝子破壊株はプロリン、グルタミン酸、スレオニン、アスパラギン酸、グルタミン酸、アルギニン、トリプトファン、リジン、イソロイシンを単一窒素源とした培地で生育への影響が観察された。*gapA* はアミノ酸の取り込みに重要な働きを持つ遺伝子であることが分った。しかし、メチオニン、スレオニンといった一部のアミノ酸を単一窒素源とした培養では生育差が認められず、酵母 *gap1* とは異なり、基質特異性があることを明らかにした。

第六章では、*gapA* 遺伝子破壊株は糖類を単一炭素源とした培養においても、生育に影響を受けることが分った。*gapA* 遺伝子破壊株の育成への影響はカルボキシメチルセルロースといった多糖類、二糖類さらに単糖類のフルクトースでも差が見られた。麹菌の *gapA* は、窒素源の取り込みだけでなく、炭素源の取り込みにも影響する遺伝子であることを発見した。

本研究では、WB をクエン酸溶液中のオートクレーブと熱水、水洗浄処理により SFWB を開発することができた。SFWB を基質に麹菌を培養することで、アミラーゼ系酵素の生産を抑えることに成功した。その結果、WB の主成分であるヘミセルロース、セルロースを分解するヘミセルラーゼ、セルラーゼ系酵素遺伝子の高発現・酵素の高生産が可能となった。

加えて、セルラーゼ系の新規酵素を同定することができた。また、麴菌はデンプン飢餓状態の培養において、アミノ酸トランスポーター遺伝子 *gapA* の高発現を見出した。そこで、アミノ酸トランスポーター *gapA* 遺伝子破壊株を作製し、*gapA* 遺伝子の機能解明を行った。プロリンなどアミノ酸の取り込みに関与することが判明した。また、*gapA* 遺伝子破壊株は糖類を単一炭素源とした培養で生育に影響を受けることが分った。*gapA* は、炭素源の取り込みにも影響する遺伝子であることを発見した。

今後、麴菌の新規酵素遺伝子を獲得できたことで、これら酵素の活用が期待できる。特に WB に適した酵素群を得られたので、酵素を WB に直接作用してのキシロース、アラビノースの可溶化、さらに植物バイオマス資源からバイオエタノール生産への利用も期待できる。また、麴菌を SFWB で培養すると、いままで強力に発現していたアミラーゼ系酵素の生産が抑えられることから、他の酵素生産・精製に有効な培養基質となり、麴菌を宿主とした付加価値の高いタンパク・医薬品の物質生産に利用が考えられる。

論文審査の結果の要旨

本論文は、食品産業廃棄物の3大バイオマスの代表格である小麦フスマ(WB:Wheat Bran)の有効活用を目標に、有用成分を含有するヘミセルロース、セルロースの分解に関与する麴菌の酵素生産遺伝子群を特定する手法を開発し、有用成分に分解する各種遺伝子および栄養源の取り込み能に関与する遺伝子について詳細に解析を行ったものである。論文の主要な部分は国内の有審査論文3編と査読中の論文1編で構成されている。本論文の目的は、麴菌の脱デンプン小麦フスマ(SFWB: Starch Free Wheat Bran)で分泌生産する分解酵素(ヘミセルラーゼ、セルラーゼ)とその遺伝子群を解析し、炭素源が枯渇している環境を作り出すことにより、これまで全く解析例がない、栄養源の取り込み遺伝子(トランスポーター)の機能について詳細に解析することにある。

第一章では、麴菌をWBで培養を行うと、WBに約10%含まれるデンプンにより誘導されたアミラーゼ系酵素遺伝子が強力に発現し、WBの主成分であるヘミセルロースを分解する酵素の生産が抑えられていた。そこで、WBからデンプンを除去する方法を検討した。WBをクエン酸溶液中でオートクレーブ、さらに熱水と水洗浄処理により、SFWBの作製に成功した。SFWBを基質に麴菌を培養することでアミラーゼ系酵素の生産を抑えることができた。

第二章では、SFWBを基質として用いて麴菌の培養を行い、ヘミセルロースを分解するキシラーゼ、 β -キシロシダーゼを高生産させることに成功した。また、エンドペプチダーゼ(酸性、中性)、酸性カルボキシペプチダーゼ活性も増加した。加えて、2次元プロテオーム解析から、新規酵素として、endo-1, 3- β -グルカナーゼとexo-1, 3- β -グルカナーゼおよび2種類の β -グルコシダーゼを新たに同定した。

第三章では、麴菌をSFWBを用いて培養することで、アミラーゼ系の酵素の生産を抑え、WBの主成分であるヘミセルロース、セルロースを分解するヘミセルラーゼ、セルラーゼ系酵素遺伝子の高発現が確認できた。特に、WBの主成分であるキシロースに分解する1, 4- β -キシラーゼの発現が27倍となった。 β -キシロシダーゼの発現量が3倍、endo-1, 3- β -グルカナーゼの発現量も73倍、70倍、10倍と高発現していることが分かった。

第四章では、麴菌のデンプン飢餓培養で多くのアミノ酸トランスポーター遺伝子の発現上昇を見出した。中でも酵母 *Saccharomyces cerevisiae* において研究が進んでいるアミノ酸トランスポーター *gap1* と相同性の高い *gapA* の遺伝子が高発現していることを発見した。麴菌が飢餓状態で生存するためには、この *gapA* 遺伝子が発現して、様々なアミノ酸を取り込み栄養源としていると考えられた。

第五章では、麴菌の *gapA* 遺伝子破壊株を作製し、*gapA* 遺伝子の機能解明を行った。*gapA*

遺伝子破壊株は、9種類のアミノ酸を単一窒素源とした培地で生育への影響を観察した。*gapA*はアミノ酸の取り込みに重要な働きを持つ遺伝子であることが分かった。しかし、メチオニン、スレオニンといった一部のアミノ酸を単一窒素源とした培養では生育差を認められず、酵母 *gap1*とは異なり、基質特異性があることを明らかにした。

第六章では、*gapA* 遺伝子破壊株は糖類を単一炭素源とした培養においても、生育に影響を受けることが分かった。*gapA* 遺伝子破壊株の生育への影響はカルボキシメチルセルロースといった多糖類、二糖類、単糖類のフルクトースでも差が見られた。麹菌の *gapA* は、窒素源の取り込みだけではなく、炭素源の取り込みにも影響する遺伝子であることを発見した。

総括では、WB をクエン酸溶液中のオートクレーブと熱水、水洗浄処理によりデンプンを除去した SFWB を開発することができた。SFWB を基質に麹菌を培養することで、アミラーゼ系酵素の生産を抑えることに成功した。その結果、WB の主成分であるヘミセルロース、セルロースを分解するヘミセルラーゼ、セルラーゼ系酵素遺伝子の高発現・酵素の高生産が可能となった。加えて、セルラーゼ系の新規酵素を同定することができた。また、麹菌はデンプン飢餓状態の培養において、アミノ酸トランスポーター遺伝子 *gapA* の高発現を見出した。そこで、*gapA* 遺伝子破壊株を作製し、*gapA* 遺伝子の機能解明を行った。プロリンなどアミノ酸の取り込みに関与することが判明した。また、*gapA* 遺伝子破壊株は糖類を単一炭素源とした培養で、炭素源の取り込みにも影響する遺伝子であることを発見した。

以上の様に、本論文では産業廃棄物である WB の有効活用法への基礎的知見を数多く見出し、博士（理工学）の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

氏名	まつい けい 松井 慧		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲 第107号		
学位授与の日付	平成28年3月13日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当		
学位論文の題目	プラズマ励起中性ガスによる殺菌処理技術の研究		
論文審査委員	(主査) 教授	作道 訓之	教授 上田 修
		教授 遠藤 和弘	教授 花岡 良一
		産業技術総合研究所 主任研究員	小木曾 久人

論文内容の要旨

医療や製薬、食品などの分野の産業プロセスにおいて、微生物による汚染を除くことは基本的に重要である。従来の殺菌技術としては、熱や紫外線、薬剤による負荷を与える手法が知られているが、これらの方法は処理時間が長いことや、処理による材料の劣化、および人体に害を与えるリスクなどの問題があった。そのため、近年ではプラズマによる殺菌処理技術が注目されてきた。プラズマから生じる熱や紫外線のほかに、イオンや電子などの荷電粒子および中性活性種などを利用して、効率の良い殺菌効果を得ようとしたものである。

産業プロセスとして利用するためには、均一な殺菌処理が可能であると共に、そのメカニズムが明確であることが求められる。しかし、上記したように処理対象物をプラズマへ直接曝した場合プラズマから発生する熱や紫外線の影響は避けられず、また処理対象物をプラズマから少し離れたところに置いたとしても均一で安定した殺菌処理が困難であることが明らかになった。つまり、プラズマから生じる荷電粒子や中性活性種などの寿命はそれぞれ異なり、処理対象物までの到達時間に依存して殺菌効果に変化するからである。そのため、処理対象物全体への殺菌効果に偏りが生じ、均一な処理を行うことが困難であった。また、処理対象物がプラズマから生じる多様な殺菌要因へ一度に曝されることは、その殺菌メカニズムを複雑化し、プロセス技術としての設計を難しくしていた。

本研究では、プラズマによる殺菌処理技術の産業プロセスでの実用化を目的とし、プラズマ由来の中性の活性種のみを含むプラズマ励起中性ガスによる殺菌処理手法を提案した。

具体的には、プラズマ生成部と処理室を離して設置し、それらをガス配管で接続して、プラズマで励起されたガスを処理室に導入する。プラズマから生じる殺菌要因の内、熱や紫外線、短寿命の中性活性種は処理室への導入前に消失させ、荷電粒子はプラズマ生成部と処理室の間に接地した金属メッシュを置くことで除去する。このような装置構成により、プラズマ由来の比較的長寿命の中性の活性種のみを含む、プラズマ励起中性ガスで処理室を満たし、処理対象物を含む処理室の内部を均一に殺菌することを可能とする。また、殺菌要因を単純化することで殺菌メカニズムの解明が容易な手法とした。本研究ではその基礎研究として、プラズマ励起中性ガスによる処理装置の構築と、その処理条件の最適化、および殺菌メカニズムの解析を行った。以下に、各章での実施事項を示す。

第二章では、プラズマ励起中性ガスによる処理装置の構築と共に、プラズマ原料ガス種による殺菌効果と生成物濃度への影響を調べた。プラズマから長寿命の中性の活性種のみを取り出し、処理室内の処理対象物を殺菌する装置を構築した。種々のプラズマ原料ガスを用いて試験を行った結果、プラズマ原料ガスへ各種の蒸気を加えた条件でのみ、高い殺菌効果が得られることを明らかにした。

第三章では、第二章で高い殺菌効果を示した水蒸気を加えた空気をプラズマ原料ガスとした条件に着目し、プラズマ原料ガスに窒素と酸素の混合ガスを用いて、それらの混合割合による影響を調べた。結果、腐食性の強いオゾンの生成を伴わずに高い殺菌効果を示す、実用に適した混合ガス条件を見出した。

第四章では、第三章で選定したプラズマ原料ガス条件における、相対湿度の影響を調べた。結果、プラズマ原料ガス中の相対湿度、およびサンプル近傍の相対湿度の二種類の相対湿度がそれぞれ殺菌効果に大きく影響することが分かり、高い殺菌効果を得るために必要な相対湿度条件を明らかにした。また、プラズマ原料ガスの相対湿度に対する殺菌効果と窒素酸化物の生成濃度に相関が見られたことから、窒素酸化物が殺菌に寄与することを見出した。

第五章では、第二章から第四章で得られた好適な処理条件における、プラズマ励起中性ガスによる殺菌メカニズムの解析を行った。プラズマを用いない手法で窒素酸化物を生成することで、プラズマ励起ガス中に含まれる硝酸や一酸化窒素、二酸化窒素が主な殺菌要因であることを明らかにした。続いて、処理による菌体への影響から、殺菌処理によって菌体の変形すると共に、菌体の内部物質が漏出するような損傷が与えられており、さらに処理によってアミノ酸が損傷することが分かった。このことから、処理による菌体のアミノ酸等への損傷によってその構造が破壊され、内部物質の漏出や内部への殺菌要因の流入

を引き起こし、殺菌に至ると考えられる。

第六章は結論であり、各章で得られた結果を総括した。本研究により、プラズマ励起中性ガスによる好適な殺菌条件と、その殺菌メカニズムを明らかにした。本研究成果に基づいて、処理容積のスケールアップなどの応用研究を進めることで、従来法よりも処理時間を短縮化した殺菌技術が確立された。

論文審査の結果の要旨

医療や製薬、食品などの分野の産業プロセスにおいて、微生物による汚染を除くことは基本的に重要である。古くからの殺菌技術としては、熱や紫外線、薬剤による負荷を与える手法が知られているが、これらの方法は処理時間が長いことや、処理による材料の劣化、および人体に害を与えるリスクなどの問題があった。そのため、近年ではプラズマによる殺菌処理技術が注目されてきた。これはプラズマから生じる熱や紫外線のほかに、イオンや電子などの荷電粒子、及び中性活性種などを利用して、効率の良い殺菌効果を得ようとしたものである。

しかしながら、これまで学会等で報告されてきた技術開発において、その殆どが処理対象物をプラズマへ直接曝す、もしくは極近傍に曝す処理手法を用いているために、産業応用の観点からは多くの問題点が分かってきた。

産業プロセスとして利用するためには、均一な殺菌処理が可能であると共に、そのメカニズムが明確であることが求められる。しかし、上記したように処理対象物をプラズマへ直接曝した場合プラズマから発生する熱や紫外線の影響は避けられず、また処理対象物をプラズマから少し離れたところに置いたとしても均一で安定した殺菌処理が困難であることが明らかになった。つまり、プラズマから生じる荷電粒子や中性活性種などの寿命はそれぞれ異なり、処理対象物までの到達時間に依存して殺菌効果が変化するからである。そのため、処理対象物全体への殺菌効果に偏りが生じ、均一な処理を行うことが困難であった。また、処理対象物がプラズマから生じる多様な殺菌要因へ一度に曝されることは、その殺菌メカニズムを複雑化し、プロセス技術としての設計を難しくしていた。

本研究では、プラズマによる殺菌処理技術の産業プロセスとしての実用化を目的とし、プラズマ由来の中性活性種のみを含むプラズマ励起中性ガスによる殺菌処理技術を提案した。具体的には、プラズマ生成部と処理室を離して設置し、それらをガス配管で接続して、プラズマで励起されたガスを処理室に導入する。プラズマから生じる殺菌要因の内、荷電粒子と短寿命の中世活性種は処理室への導入前に消失させ、比較的寿命の長い中性活性種のみを含むガスで処理室を満たし、処理対象物を含む処理室の内部を均一に殺菌することを可能とした。また、殺菌要因を単純化できたので殺菌メカニズムの解明が容易になった。

本研究ではその基礎研究として、プラズマ励起中性ガスによる処理装置の構築と、その処理条件の最適化、および殺菌メカニズムの解析を行った。以下に、各章での実施事項を示す。

第二章では、プラズマ励起中性ガスによる処理装置の構築と共に、プラズマ原料ガス種による殺菌効果と生成物濃度への影響を調べた。プラズマから長寿命の中性の活性種のみを取り出し、処理室内の処理対象物を殺菌する装置を構築した。種々のプラズマ原料ガスを用いて試験を行った結果、プラズマ原料ガスへ各種の蒸気を加えた条件でのみ、高い殺菌効果が得られることを明らかにした。

第三章では、第二章で高い殺菌効果を示した水蒸気を加えた空気をプラズマ原料ガスとした条件に着目し、プラズマ原料ガスに窒素と酸素の混合ガスを用いて、それらの混合割合による影響を調べた。結果、腐食性の強いオゾンの生成を伴わずに高い殺菌効果を示す、実用に適した混合ガス条件を見出した。

第四章では、第三章で選定したプラズマ原料ガス条件における、相対湿度の影響を調べた。結果、プラズマ原料ガス中の相対湿度、およびサンプル近傍の相対湿度の二種類の相対湿度がそれぞれ殺菌効果に大きく影響することが分かり、高い殺菌効果を得るために必要な相対湿度条件を明らかにした。また、プラズマ原料ガスの相対湿度に対する殺菌効果と窒素酸化物の生成濃度に相関が見られたことから、窒素酸化物が殺菌に寄与することを見出した。

第五章では、第二章から第四章で得られた好適な処理条件における、プラズマ励起中性ガスによる殺菌メカニズムの解析を行った。プラズマを用いない手法で窒素酸化物を生成することで、プラズマ励起ガス中に含まれる硝酸や一酸化窒素、二酸化窒素が主な殺菌要因であることを明らかにした。続いて、処理による菌体への影響の解析から、殺菌処理によって菌体に変形すると共に、菌体の内部物質が漏出するような損傷が与えられており、さらに処理によってアミノ酸が損傷することが分かった。このことから、処理による菌体のアミノ酸等への損傷によってその構造が破壊され、内部物質の漏出や内部への殺菌要因の流入を引き起こし、殺菌に至ると考えられる。

第六章は結論であり、各章で得られた結果を総括した。本研究により、プラズマ励起中性ガスによる好適な殺菌条件と、その殺菌メカニズムを明らかにした。本研究成果に基づいて、処理容積のスケールアップなどの応用研究を進めることで、従来法よりも処理時間を短縮化した殺菌技術が確立された。

公聴会の発表においては研究の背景と目的を的確に示し、質疑応答においても的確な回答を示すことができた。

よって、本論文は博士（工学）の学位授与に十分値すると判断する。

氏名	いいだ ふくじ 飯田 福司				
学位の種類	博士（工学）				
学位記番号	博乙 第53号				
学位授与の日付	平成28年3月14日				
学位授与の要件	学位規則第4条第2項相当				
学位論文の題目	木製水槽の容器構造物としての基本性状と耐震性能に関する 基礎研究				
論文審査委員	（主査）教授	後藤 正美	教授	浦 憲親	
		教授	西村 督	教授	宮里 心一
		金沢大学			
		教授	宮島 昌克		

論文内容の要旨

日本における木材を利用した容器構造物は、桶や樽という呼称で古来より製作され貯蔵用および発酵用容器として活用されている。1900年代初頭、米国の木製容器製造技術と工作機械設備が導入されるや、それまでの桶および樽に比べ規模の大きい木製容器の製造が開始された。当時の度重なる戦争は鉄材料の不足を生じさせたことから、工業の勃興と相俟って木製容器の需要が高まった。また、木材が弱酸性や弱アルカリ性液体に耐える性質を有していることから、化学工業用、鉱山製錬用および澱粉工業用等の多様な木製容器が製造された。その後1950年代後期には、本論文の対象である飲料水用の木製容器（以下は、木製水槽）の製造が始まり、現在では公共性の高い大規模集客施設や集合住宅で利用されている。国内の工業化が進展し容器構造物が増加する中、1964年の新潟地震で容器内の液体のスロッシングによる大型鋼製タンクの被害を機に鋼製容器構造物の耐震設計に関する研究が多く報告されている。一方、木製水槽は供給数が少ないためか地震被害報告がほとんどなく、大地震時の耐震性能に関する研究成果の蓄積もないため、他の容器構造で得られている知見に基づき設計し製造されてきた。また鋼製、鉄筋コンクリートおよび繊維強化プラスチックの容器構造と異なり、木製水槽は木材同士を^{さね}実ハギで組み、鋼製の^{たが}箍（以下は、バンド）で締め付けて自立する組み立て式の構造である。この構造体を単純に連続体シェルとしてモデル化すると、剛性および終局耐力を危険側に評価してしまう可能性が

あり、適切な力学モデルは未だ提案されていない。1995年兵庫県南部地震以降、従来の設計で考慮していたレベルを超える地震動が複数観測される等の背景を受け、木製水槽の耐震性能評価と設計指針の確立が求められている。

本論文は、木製水槽の耐震性能評価と設計指針を確立するために行ってきた一連の研究をまとめたものである。まず、実大水槽の各種実験結果から、材料および容器構造としての基本特性、特に今まで工学的に解明されていなかった組み立てから注水までの過程における木製水槽の歪変動を定量的に明らかにした。この資料を基に、容器構造としての耐震性能評価が可能になり、耐震性能に関する実験および解析を行った。

最終的に、木製水槽の終局状態を想定した静的加力実験で、変位性状を把握し耐震性能を評価しうる力学モデルおよび部材断面に関する設計式を初めて提示した。

本論文は6章で構成されている。各章で得られた木製水槽の耐震性能に関する知見をまとめ、今後の研究課題と展望を述べている。

第1章 序論

ここでは、木製水槽をとりまく社会的背景と容器構造物の地震被害と耐震性能に関する文献調査および現地調査を行った。被災特性をまとめ、耐震設計上の問題点と既往の研究を整理することで、解明すべき研究の方向性を示した。

第2章 木製水槽の構成部材と構造体としての基本特性

この章では、木製水槽の耐震性能の把握の第1段階として実大木製水槽を用い、構成材料の木材および鋼材の材料試験を行い、物性値（機械的性質、含水率）を確認した。また実験結果は希少で組み立て開始からバンドの締め付けおよび注水前後の容器構造各部の歪分布と時間的変動を初めて定量的に示した。外部因子（温度、湿度）による歪への影響を含め、常時における木製水槽の基本特性を実験的に明らかにした。

第3章 振動実験による木製水槽の振動特性

この章では、実大木製水槽の自由振動、スイープ加振、強震動加振の各種実験結果を示している。実験パラメータは木製水槽の側板の厚さおよび水量とし、固有振動数や減衰特性の基本的動特性を把握すると共に、各部の変位、加速度、変動水圧、歪の応答値を測定した。得られた実験結果から強震動下での木製水槽の振動特性と材料の許容応力度に対する余裕度を明らかにした。

第4章 静的加力実験による木製水槽の力学特性

この章では、木製水槽の使用条件を再現した接水状態での木材変位の把握を行った。さらに、耐震性能の検討上で水槽が水平地震動を受け変動水圧により崩壊する終局限界状態

を想定した静的な加力実験を行い、木製水槽の挙動や各部への影響を明らかにした。

第5章 木製水槽の力学モデルの検討と側板厚設計式の提案

この章では、木製水槽の側板の厚さとアスペクト比をパラメータとする数値解析を示している。まず数値解析と実験結果とを比較し、木製水槽の力学モデルを構築した。次に第3章および第4章の実験結果から限界水平変位を設定し、限界変位に対応する側板厚を算定する設計式を提案した。

第6章 結論

ここでは、各章で得られた木製水槽の耐震性能に関する知見をまとめ、今後の研究課題と展望を述べている。

論文審査の結果の要旨

日本における木材を利用した容器構造物は、桶や樽という呼称で古来より製作され貯蔵用および発酵用容器として活用されている。1900年代初頭、米国の木製容器製造技術と工作機械設備が導入されるや、それまでの桶および樽に比べ規模の大きい木製容器の製造が開始された。当時の度重なる戦争は鉄材料の不足を生じさせたことから、工業の勃興と相俟って木製容器の需要が高まった。また、木材が弱酸性や弱アルカリ性液体に耐える性質を有していることから、化学工業用、鉱山製錬用および澱粉工業用等の多様な木製容器が製造された。その後1950年代後期には、本論文の対象である飲料水用の木製容器（以下は、木製水槽）の製造が始まり、現在では公共性の高い大規模集客施設や集合住宅で利用されている。国内の工業化が進展し容器構造物が増加する中、1964年の新潟地震で容器内の液体のスロッシングによる大型鋼製タンクの被害を機に鋼製容器構造物の耐震設計に関する研究が多く報告されている。一方、木製水槽は供給数が少ないためか地震被害報告がほとんどなく、大地震時の耐震性能に関する研究成果の蓄積もないため、他の容器構造で得られている知見に基づき設計し製造されてきた。また鋼製、鉄筋コンクリートおよび繊維強化プラスチックの容器構造と異なり、木製水槽は木材同士を^{さね}実ハギで組み、鋼製の^{たが}箍（以下は、バンド）で締め付けて自立する組み立て式の構造である。この構造体を単純に連続体シェルとしてモデル化すると剛性および終局耐力を危険側に評価してしまう可能性があり、適切な力学モデルは未だ提案されていない。1995年兵庫県南部地震以降、従来の設計で考慮していたレベルを超える地震動が複数観測される等の背景を受け、木製水槽の耐震性能評価と設計指針の確立が求められている。

申請論文は、木製水槽の耐震性能評価と設計指針を確立するために行ってきた一連の研究をまとめたものである。まず、実大水槽の各種実験結果から、材料および容器構造としての基本特性、特に今まで工学的に解明されていなかった組み立てから注水までの過程における木製水槽の歪変動を定量的に明らかにしている。この資料を基に、容器構造としての耐震性評価が可能になり、耐震性能に関する実験および解析を行っている。

最終的に、木製水槽の終局状態を想定した静的加力実験で、変位性状を把握し耐震性能を評価しうる力学モデルおよび部材断面に関する設計式を初めて提示している。

申請論文は6章で構成されている。各章で得られた木製水槽の耐震性能に関する知見をまとめ、今後の研究課題と展望を述べている。

第1章 序論

ここでは、木製水槽をとりまく社会的背景と容器構造物の地震被害と耐震性能に関する文献調査および現地調査を行っている。被災特性をまとめ、耐震設計上の問題点と既往の研究を整理することで、解明すべき研究の方向性を示している。

第2章 木製水槽の構成部材と構造体としての基本特性

この章では、木製水槽の耐震性能の把握の第1段階として実大木製水槽を用い、構成材料の木材および鋼材の材料試験を行い、物性値（機械的性質、含水率）を確認している。また実験結果は希少で組み立て開始からバンドの締め付けおよび注水前後の容器構造各部の歪分布と時間的変動を初めて定量的に示している。外部因子（温度、湿度）による歪への影響を含め、常時における木製水槽の基本特性を実験的に明らかにしている。

第3章 振動実験による木製水槽の振動特性

この章では、実大木製水槽の自由振動、スイープ加振、強震動加振の各種実験結果を示している。実験パラメータは木製水槽の側板の厚さおよび水量とし、固有振動数や減衰特性の基本的動特性を把握すると共に、各部の変位、加速度、変動水圧、歪の応答値を測定している。得られた実験結果から強震動下での木製水槽の振動特性と材料の許容応力度に対する余裕度を明らかにしている。

第4章 静的加力実験による木製水槽の力学特性

この章では、木製水槽の使用条件を再現した接水状態での木材変位の把握を行った。さらに、耐震性能の検討上で水槽が水平地震動を受け変動水圧により崩壊する終局限界状態を想定した静的な加力実験を行い、木製水槽の挙動や各部への影響を明らかにしている。

第5章 木製水槽の力学モデルの検討と側板厚設計式の提案

この章では、木製水槽の側板の厚さとアスペクト比をパラメータとする数値解析を示している。まず数値解析と実験結果とを比較し、木製水槽の力学モデルを構築している。次に第3章および第4章の実験結果から限界水平変位を設定し、限界変位に対応する側板厚を算定する設計式を提案している。

第6章 結論

ここでは、各章で得られた木製水槽の耐震性能に関する知見をまとめ、今後の研究課題と展望を述べている。

以上、申請論文は木製水槽の耐震設計に関する基礎的な知見を多く有しており、博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと判断される。