

第46号

令和5年6月14日

博士學位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

(令和4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 128 号	博士(工学)	小倉 翔吾	射出成形における樹脂合流部の流動挙動 および繊維配向メカニズムに関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
博甲第 129 号	博士(工学)	鈴木 俊雄	高速道路トンネルの維持管理の高度化に 関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9
博甲第 130 号	博士(工学)	玉置 麻理	食品の潜在的価値に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
博乙第 62 号	博士(工学)	仲林 裕司	機能性材料形成装置の開発とセンサー・分 析への応用に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 20

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	おぐら しょうご 小倉 翔吾		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲 第128号		
学位授与の日付	令和5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	射出成形における樹脂合流部の流動挙動および繊維配向メカニズムに関する研究		
論文審査委員（主査）	教授 山部 昌	教授 吉田啓史郎	
	教授 瀬戸 雅宏	教授 中田 政之	
	日本大学 生産工学研究科	教授 高橋 進	

論文内容の要旨

輸送機器分野において環境規制の拡大により、軽量化のニーズは増加傾向であり、金属材料部品の樹脂化が進んでいる。輸送機器で使用する樹脂には高い強度や耐熱性が求められるため、強化繊維により補強し、物性を向上させた繊維強化樹脂が用いられ、生産性やコストを考慮し射出成形法によって成形されることが多い。しかし、射出成形中の金型内樹脂流動に伴うせん断応力や伸長流動によって、繊維の配向状態に分布が生じる。また、繊維が配向している方向の補強効果が大きいため、射出成形時の繊維配向分布により、弾性率、強度、線膨張係数等に異方性が生じる。そのため、繊維強化樹脂射出成形品の機械的特性を予測することは困難であり、トライ&エラーにより金型修正を繰り返し、開発期間や開発コストの増大につながっている。

樹脂部品の繊維配向に起因する機械的特性を予測または制御することを目的に、射出成形過程の繊維配向挙動や繊維配向が物性に与える影響に関する研究については多くの報告がなされているが、その多くは平板あるいはダンベル試験片等の様な樹脂流れでの繊維配向を評価している。一方、実部品形状では、樹脂充填バランス等を考慮し、多点ゲートで成形されることも多い。また、フローフロントが合流する箇所には強度低下の要因となるウェルドラインが発生するため、応力低減を目的にリブを配置することがある。そういった部品ではフローフロント合流後、流動が継続する複雑な樹脂流れになり、そのような流動における繊維配向メカニズムや繊維配向が物性に与える影響が不明である。そのため、実成形品形状においては繊維配向に起因する機械的特性を予測および制御ができず、狙いの特性を得るためにトライ&エラーを繰り返す必要があり、開発効率が向上できていない。そこで、本研究ではリブ部を有する部品の開発効率向上に貢献することが可能な機械的特性予測手法を提案するため、フローフロント合流後流動が継続する樹脂流れにおける繊維配向メカニズムと機械的特性の予測手法に関する研究を遂行した。

第1章では、繊維強化樹脂射出成形品の特性を説明した上で、リブ部等フローフロント

合流後流動が継続する樹脂流れにおける問題点として、その繊維配向メカニズムが不明であるため、繊維配向や繊維配向に起因する機械的特性を予測できないことを述べた。そして、本研究成果が、樹脂部品の開発効率向上に寄与することを研究目的とした。その目的を達成するための具体的なアプローチを整理し、本研究の構成を示した。

第2章ではフローフロント合流後の繊維配向分布を定量的に把握するとともに、金型の流動を直接観察し、フローフロント合流部の流動場を調査した。その結果、フローフロント合流後の繊維配向は合流前と異なり肉厚中央に流動方向の配向層を持つことが分かった。また、金型内樹脂流動可視化観察の結果から、フローフロント合流部には低速領域が発生し、様な樹脂流れとは異なる速度場となっており、それが繊維配向に影響していると考察した。

第3章では速度場を定量評価し、繊維配向メカニズムを検証した。これまでの先行研究では繊維配向分布を定量評価した箇所の樹脂流動挙動を観察もしくは計算により算出し、それらを比較検証することで繊維配向メカニズムが考察されてきた。しかし、本研究で実施したような樹脂流れにおいては時間的、空間的に局所的な樹脂流動挙動の観察のみでは繊維配向メカニズムを検証できなかった。そこで、リップ根本からリップ部にかけての樹脂の軌跡を追跡するとともに速度および加速度の時刻歴を算出した。それによりフローフロント合流部で生じる低速領域を樹脂が通過した際に発生する伸長流動とせん断応力により、繊維が流動方向に配向するというメカニズムを明らかにした。

第4章では壁面近傍とリップ肉厚中央の繊維配向に関して射出速度依存性を検証した。まず、射出速度を変更した際の固化層成長速度を計測し、繊維配向分布と比較検証した。その結果、壁面近傍の繊維配向は射出速度依存性が高いことを明らかにした。一方、フローフロント合流後のリップ肉厚中央の繊維配向は射出速度依存性が小さかった。この部位において、繊維配向に影響を与える低速領域の発生範囲や樹脂の軌跡が射出速度によって変化していないことを可視化観察より明らかにした。以上のように壁面近傍とリップ肉厚中央では繊維配向に支配的な因子が異なることを明らかにした。

第5章では、第2,3及び4章で明らかになったフローフロント合流部の繊維配向挙動に対して、工業的な活用に向け、繊維配向分布から複合材の物性を予測可能か検討した。まず、本研究で確認されたフローフロント合流後の繊維配向分布においても、繊維配向と機械的特性に強い相関があることを確認した。

次いで繊維配向による機械的特性を予測するため、平均場均質化法を用いて、樹脂の物性、繊維の物性、繊維の配向から複合材の物性を算出した結果、実物の物性を精度よく再現できることが分かった。

第6章では、本論文を総括し、第1章から第6章までをまとめるとともに、今後の課題および展望を明確にした。以上により、従来ではトライ&エラーにより開発を進めていく必要があったが、本研究で提案した手法により、一度の実成形品の繊維配向評価結果から機械的特性を予測することで、金型修正を最小化でき、樹脂部品の開発効率向上に貢献できるものとする。

論文審査の結果の要旨

自動車などの輸送機器分野においては環境規制の拡大により、軽量化のニーズは増加傾向であり、金属材料部品の樹脂化が進んでいる。輸送機器で使用する樹脂には高い強度や耐熱性が求められるため、強化繊維により補強し、物性を向上させた繊維強化樹脂が用いられ、また生産性やコストを考慮し射出成形法によって成形されることが多い。しかし、射出成形中の金型内樹脂流動に伴うせん断流動や伸長流動によって、繊維の配向状態に分布が生じ、弾性率・強度・線膨張係数等に異方性が生じる。そのため、繊維強化樹脂射出成形品の機械的特性を事前に予測することは困難であり、産業界ではトライ&エラーにより金型修正を繰り返し、開発期間や開発コストの増大につながっている。

小倉氏は樹脂部品の繊維配向に起因する機械的特性を予測または制御することを目的に、本研究ではリブ部を有する部品の機械的特性予測手法を提案するため、樹脂合流部の合流後の流動が継続する樹脂流れにおいて、繊維配向メカニズムと機械的特性の予測手法に関する研究を推進した。この研究で氏は、繊維を含有する樹脂の流動挙動を、速度・加速度の観点で詳細に計測し、さらには流動後、すなわち成形後の製品の繊維配向度を詳細に観察する新しい手法を提案して、理論構築を行った。

本論文は6章で構成されている。

第1章では、繊維強化樹脂射出成形品の特徴を説明した上で、リブ部等フローフロント合流後流動が継続する樹脂流れにおける問題点として、その繊維配向メカニズムが不明であるため、繊維配向や繊維配向に起因する機械的特性を予測できないことを述べている。そして、本研究成果が、樹脂部品の開発効率向上に寄与することを研究目的とした。

第2章ではフローフロント合流後の繊維配向分布を定量的に把握するとともに、金型の流動を直接観察し、フローフロント合流部の流動場を調査した。その結果、フローフロント合流後の繊維配向は合流前とは異なり肉厚中央に流動方向の配向層を持つことが分かった。また、金型内樹脂流動可視化観察の結果から、フローフロント合流部には低速領域が発生し、一様な樹脂流れとは異なる速度場となっており、それが繊維配向に影響していると考察した。

第3章では速度場を定量評価し、繊維配向メカニズムを検証した。これまでの先行研究では繊維配向分布を定量評価した箇所の樹脂流動挙動を観察もしくは計算により算出し、それらを比較検証することで繊維配向メカニズムが考察された。しかし、本研究で実施したような樹脂流れにおいては時間的、空間的に局所的な樹脂流動挙動の観察のみでは繊維配向メカニズムを検証できなかった。そこで、リブ根本からリブ部にかけての樹脂の軌跡を追跡するとともに速度および加速度の時刻歴を算出した。それによりフローフロント合流部で生じる低速領域を樹脂が通過した際に発生する伸長流動とせん断応力により、繊維が流動方向に配向するというメカニズムを明らかにした。

第4章では壁面近傍とリブ肉厚中央の繊維配向に関して射出速度依存性を検証した。まず、射出速度を変更した際の固化層成長速度を計測し、繊維配向分布と比較検証した。その結果、壁面近傍の繊維配向は射出速度依存性が高いことを明らかにした。一方、フロー

フロント合流後のリブ肉厚中央の繊維配向は射出速度依存性が小さかった。この部位において、繊維配向に影響を与える低速領域の発生範囲や樹脂の軌跡が射出速度によって変化していないことを可視化観察より明らかにした。このように壁面近傍とリブ肉厚中央では繊維配向に支配的な因子が異なることを明らかにした。

第5章では、第2,3及び4章で明らかになったフローフロント合流部の繊維配向挙動に対して、工業的な活用に向け、繊維配向分布から複合材の物性を予測可能かを検討した。まず、本研究で確認されたフロント合流後の繊維配向分布においても、繊維配向と機械的特性に強い相関があることを確認した。次いで繊維配向による機械的特性を予測するため、平均場均質化法を用いて、樹脂の物性、繊維の物性、繊維の配向から複合材の物性を算出した結果、実物の物性を精度よく再現できることが分かった。

第6章では、本論文を総括し、第1章から第6章までをまとめるとともに、今後の課題および展望を明確にした。

以上、従来ではトライ&エラーにより開発を進めていく必要があったが、本研究で提案された手法により、一度の実成形品の繊維配向評価結果から機械的特性を予測することで、金型修正を最小化でき、樹脂部品の開発効率向上に貢献できるものとする。

以上これまで述べたように、自動車部品の軽量化のニーズが益々高まる中で、射出成形過程の繊維強化樹脂の配向挙動を理論に基づき正確に予測する手法を提案し、工学的にも工業的にも汎用的で有用な研究成果であると判断する。また本研究成果は本学大学院博士課程在学中において、査読あり論文2編、国内発表3件、国際学会発表1件が示すように、学協会でも高く評価されている、よって本論文は博士（工学）の学位に十分に値すると判断する。

氏名	鈴木 俊雄
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第129号
学位授与の日付	令和5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	高速道路トンネルの維持管理の高度化に関する研究
論文審査委員（主査）	教授 木村 定雄 教授 高橋 茂樹 教授 宮里 心一 教授 田中 泰司 東京都立大学 都市環境科学研究科 教授 砂金 伸治

論文内容の要旨

山岳地帯を有する我が国において、高速道路のトンネルは重要なインフラ施設の一つであり、これを安全に運用していく必要がある。公共インフラ施設の安全性を社会に説明することが要請される現在では道路機能のサービス水準と達成すべき性能項目を明文化し、継続して性能評価を行い、その状態に適した対策を講じていることを発信することが求められるここで、道路トンネルの建設（設計、施工）にあたっては、性能評価の考え方が広く認識され、それに基づく性能評価や性能照査が実施されつつある。一方、維持管理段階の性能評価の考え方は未だ明確にされていない実情にある。

本論文は、高速道路トンネルを対象として、維持管理段階の性能評価手法を構築し、その手法を用いて特定すべき課題を抽出して、課題解決のための技術開発を実施するとともに、高速道路トンネルの新たな維持管理手法を提案するものである。本論文は6章で構成されている。

第1章 序論

わが国の道路トンネルは高度成長期における道路整備の進捗とトンネル技術の進歩とともに建設が進み、とりわけ、高速道路トンネルの資産は、2019年3月末時点で約1,900本、総延長約1,800kmに達している。2013年の道路法改正等を受け、2014年7月より、全ての道路管理者は5年ごとに近接目視による定期点検が義務づけられている。高速道路トンネルにおいては点検、診断および措置の流れに従って、維持管理を実施してきているものの、性能評価に基づく評価体制は確立されていない。また、長期にわたる供用によって、煤や遊離石灰等の著しい汚れが覆工表面に付着し、変状状態の正確な把握が困難となる場合がある。さらに、点検結果を鑑みると、建設年次が古い矢板工法によって構築されたトンネルの変状が著しく、中でも材質劣化および漏水による覆工変状、内装工や漏水防止樋等の附属物の変状が多い特徴があり、これらによる事故発生リスクが懸念される。本章ではこれらの課題を示すとともに本論文の目的と構成を述べる。

第2章 高速道路トンネルのサービス水準と実用化に向けた性能評価手法の構築

本章では、高速道路トンネルの維持管理段階の性能評価の考え方を整理し、機能、サービス水準、要求性能および性能評価からなる性能評価手法の体系を構築した。また、実用的な性能評価項目を抽出し、高速道路トンネルの実際の点検データを用いて、性能評価手法の実用性と有効性を検証した。その結果、サービス水準の達成に向けては、主に覆工に生じる材質劣化や漏水および内装工の損傷が利用者の安全性を脅かす事故発生リスクになり得ることを提示した。

第3章 覆工の変状把握の精度向上技術の提案

本章では、変状把握の精度向上を目的とした、覆工表面の洗浄手法および画像撮影点検によって透明型樋内部の変状を可視化するための手法について述べる。覆工表面の洗浄手法としてウォータージェットをとり上げ、既設の覆工コンクリートの洗浄では、表面状態やコンクリート強度等がトンネルごとに異なることから、コンクリート表面の凹凸を制御し、適切な洗浄をするためには、事前のキャリブレーションが重要になることを実験により検証し、その手法を提案した。その結果、覆工表面に付着した汚れによって把握できなかった変状の新規発見や点検精度の向上が図れることを明らかにした。他方、画像撮影に用いる照明光が透明型樋の表面で反射し、樋内部の変状把握を困難にしていた。そこで、透明型樋とカメラの正対角に着目し、これを適正に調整することで、照明光の反射が軽減されることを示した。その結果、透明型樋内部の新たな変状検知の有効性を確認し、透明型樋内部の変状把握には近接目視のみならず、画像撮影点検によっても変状種類とその規模を把握できることを明らかにした。

第4章 矢板工法トンネルの覆工再生工法技術の構築

本章では第2章で抽出した矢板工法で施工された覆工の事故発生リスクを抑止・防止することを目的として、大断面となる高速道路トンネルに適した覆工再生工法の設計手法を構築し、具体的な施工基準を提示した。覆工再生工法の適用にあたっては、トンネル内空間の建築限界を確保するため、既設覆工を切削し、薄厚の覆工コンクリートを打継ぐ必要がある。そこで、切削時の既設覆工の構造安定性を評価するための設計手法を検討した。すなわち、切削前にロックボルト支保工を施すこととし、切削が既設覆工や周辺地山に及ぼす影響を把握するため、弾塑性有限差分法による数値解析を行い、覆工と周辺地山の安定性が確保できることを確認した。また、再生覆工が薄厚となるため、覆工再生コンクリートの要求性能を現行のNATMで適用される設計基準強度($f_{ck}=18\text{N}/\text{mm}^2$)から、再生覆工用コンクリートの設計基準強度($f_{ck}=36\text{N}/\text{mm}^2$)に変更することで、覆工の耐荷力が確保できることを示した。

第5章 粘着シートを用いたトンネル内装工の開発

本章では第2章で抽出した内装工の損傷による事故発生リスクの回避を目的とした粘着

シートを用いた内装工（以下，粘着シート工）を提案した新たな粘着シート工の実用にあたっては，既設トンネルの施工環境を考慮した要求性能の設定と性能評価手法を定める必要がある．そこで，内装工の機能から粘着シート工の要求性能を定め，性能評価のための試験法を室内実験により確立し，実存トンネルにおいて，粘着シート工の現場適用性を検証した．すなわち，粘着シートの主たる要求性能項目を引きはがし粘着力と定めた性能評価手法を確立したまた，粘着シート工を供用中のトンネルに適用し，実施工においても引きはがし粘着力が保持できることを確認した．一方，引きはがし粘着力を長期にわたって保持するためには，覆工表面の洗浄処理と粘着シートを貼付する前のプライマー処理の品質確保が重要になることを示した．

第6章 結論

本章は結論の章であり，第2章から第6章の結論を総括し，高速道路トンネルの維持管理段階の性能評価手法に基づく，維持管理体系を提案した．

- ・ 高速道路トンネルの維持管理段階の性能評価の考え方を整理し，機能，サービス水準，要求性能および性能評価からなる体系を構築し，これを適用して，事故発生リスクとなる変状を特定できた
- ・ 変状把握の精度向上を目的とした，覆工表面の洗浄手法および画像撮影点検によって透明型樋内部の変状を可視化するための手法を提案した．これらを実用して，変状把握の精度向上が図れた．
- ・ 矢板工法で施工された覆工の事故発生リスクを抑止・防止することを目的として，大断面となる高速道路トンネルに適した覆工再生工法の設計手法を構築し，具体的な施工基準を提示した．
- ・ 内装工の損傷による事故発生リスクの回避を目的とした粘着シートを用いた新たな内装工を開発するとともに，その実存トンネルにおける実用性を検証した．
- ・ 以上の研究開発の成果を踏まえ，高速道路トンネルの維持管理段階の性能評価手法に基づく維持管理フローを提案した．

論文審査の結果の要旨

山岳地帯を有する我が国において、高速道路のトンネルは重要なインフラ施設の一つであり、これを安全に運用していく必要がある。公共インフラ施設の安全性を社会に説明することが要請される現在では、道路機能のサービス水準と達成すべき性能項目を明文化し、継続して性能評価を行い、その状態に適した対策を講じていることを発信することが求められる。ここで道路トンネルの建設（設計施工）にあたっては、性能評価の考え方が広く認識され、それに基づく性能評価や性能照査が実施されつつある。一方、維持管理段階の性能評価の考え方は未だ明確にされていない実情にある。本論文は、高速道路トンネルを対象として、維持管理段階の性能評価手法を構築し、その手法を用いて特定すべき課題を抽出して、課題解決のための技術開発を実施するとともに、高速道路トンネルの新たな維持管理手法を提案したものである。本論文は6章で構成されている。

第1章 序論

わが国の道路トンネルは高度成長期における道路整備の進捗とトンネル技術の進歩とともに建設が進み、とりわけ、高速道路トンネルの資産は、2019年3月末時点で約1,900本、総延長約1,800kmに達している。2013年の道路法改正等を受け、2014年7月より、全ての道路管理者は5年ごとに近接目視による定期点検が義務づけられている。高速道路トンネルにおいては点検、診断および措置の流れに従って、維持管理を実施してきているものの、性能評価に基づく評価体制は確立されていない。また、長期にわたる供用によって、煤や遊離石灰等の著しい汚れが覆工表面に付着し、変状状態の正確な把握が困難となる場合がある。さらに、点検結果を鑑みると、建設年次が古い矢板工法によって構築されたトンネルの変状が著しく、中でも材質劣化および漏水による覆工変状、内装工や漏水防止樋等の附属物の変状が多い特徴があり、これらによる事故発生リスクが懸念される。本章ではこれらの課題を示すとともに、本論文の目的と構成を述べている。

第2章 高速道路トンネルのサービス水準と実用化に向けた性能評価手法の構築

本章では、高速道路トンネルの維持管理段階の性能評価の考え方を整理し、機能、サービス水準、要求性能および性能評価からなる新たに性能評価手法の体系を構築している。また、実用的な性能評価項目を抽出し、高速道路トンネルの実際の点検データを用いて、性能評価手法の実用性と有効性を検証している。すなわち、点検データを用いた新たな性能評価によって、サービス水準の達成に向けては主に覆工に生じる材質劣化や漏水および内装工の損傷が利用者の安全性を脅かす事故発生リスクになり得ることを検証している。

第3章 覆工の変状把握の精度向上技術の提案

本章では、変状把握の精度向上を目的とした覆工表面の洗浄手法および画像撮影点検によって透明型樋内部の変状を可視化するための手法について述べている。覆工表面の洗浄手法としてウォータージェットをとり上げ、既設の覆工コンクリートの洗浄では、表面状

態やコンクリート強度等がトンネルごとに異なることから、コンクリート表面の凹凸を制御し、適切な洗浄をするためには、事前のキャリブレーションが重要になることを実験により検証し、その手法を提案している。その結果覆工表面に付着した汚れによって把握できなかった変状の新規発見や点検精度の向上が図れることを明らかにしている。他方画像撮影に用いる照明光が透明型樋の表面で反射し、樋内部の変状把握を困難にしていた。そこで、透明型樋とカメラの正対角に着目し、これを適正に調整することで、照明光の反射が軽減されることを示している。その結果透明型樋内部の新たな変状検知の有効性を確認し、透明型樋内部の変状把握には近接目視のみならず、画像撮影点検によっても変状種類とその規模を把握できることを明らかにしている。

第4章 矢板工法トンネルの覆工再生工法技術の構築

本章では第2章で抽出した矢板工法で施工された覆工の事故発生リスクを抑止・防止することを目的として、大断面となる高速道路トンネルに適した覆工再生工法の設計手法を構築し、具体的な施工基準を提示している。覆工再生工法の適用にあたってはトンネル内空間の建築限界を確保するため、既設覆工を切削し、薄厚の覆工コンクリートを打継ぐ必要がある。そこで、切削時の既設覆工の構造安定性を評価するための設計手法を検討している。すなわち切削前にロックボルト支保工を施すこととし、切削が既設覆工や周辺地山に及ぼす影響を把握するため、弾塑性有限差分法による数値解析を行い、覆工と周辺地山の安定性が確保できることを確認している。また再生覆工が薄厚となるため、覆工再生コンクリートの要求性能を現行の NATM で適用される設計基準強度 ($f_{ck}=18\text{N/mm}^2$) から再生覆工用コンクリートの設計基準強度 ($f_{ck}=36\text{N/mm}^2$) に変更することで、覆工の耐荷力が確保できることを示している。

第5章 粘着シートを用いたトンネル内装工の開発

本章では、第2章で抽出した内装工の損傷による事故発生リスクの回避を目的とした粘着シートを用いた内装工（以下、粘着シート工）を提案した。新たな粘着シート工の実用にあたっては、既設トンネルの施工環境を考慮した要求性能の設定と性能評価手法を定める必要がある。そこで内装工の機能から粘着シート工の要求性能を定め、性能評価のための試験法を室内実験により確立した上で、実存トンネルにおいて粘着シート工の現場適用性を検証している。すなわち、粘着シートの主たる要求性能項目を引きはがし粘着力と定めた性能評価手法を確立した上で、粘着シート工を供用中のトンネルに適用し、実施工においても引きはがし粘着力が保持できることを確認している。一方、引きはがし粘着力を長期にわたって保持するためには、覆工表面の洗浄処理と粘着シートを貼付する前のプライマー処理の品質確保が重要になることを示している。

第6章 結論

本章は結論の章であり、第2章から第6章の結論を総括し、高速道路トンネルの維持管理段階の性能評価手法に基づく維持管理体系を提案している。

- ・ 高速道路トンネルの維持管理段階の性能評価の考え方を整理し、機能、サービス水準、要求性能および性能評価からなる体系を構築し、これを適用して、事故発生リスクとなる変状を特定した。
- ・ 変状把握の精度向上を目的とした、覆工表面の洗浄手法および画像撮影点検によって透明型樋内部の変状を可視化するための手法を提案した。これらを実用して、変状把握の精度向上が図れた。
- ・ 矢板工法で施工された覆工の事故発生リスクを抑止・防止することを目的として、高速道路トンネルに適した覆工再生工法の設計手法を構築し、具体的な施工基準を提示した。
- ・ 内装工の損傷による事故発生リスクの回避を目的とした粘着シートを用いた新たな内装工を開発するとともに、その実存トンネルにおける実用性を検証した。
- ・ 以上の研究開発の成果を踏まえ、高速道路トンネルの維持管理段階の性能評価手法に基づく維持管理フローを提案している。

以上の研究成果は、審査有り論文 2 編他によって公表されており、その成果の客観性は確保している。高速道路トンネルの維持管理における性能評価手法の提案、特定された事故発生リスクを抑制・防止する技術の提案は、新規性有用性を有するとともに、高速道路トンネルの維持管理の高度化に大いに貢献するものである。したがって、高速道路トンネルの維持管理の実装技術に言及した本論文の価値は、博士（工学）を授与されるに値するものと判断する。

氏名	たまおき まり 玉置 麻理
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第130号
学位授与の日付	令和5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	食品の潜在的価値に関する研究
論文審査委員（主査）	教授 神宮 英夫 教授 渡邊 伸行 教授 山本 知仁 三菱電機(株)開発本部 杉浦 博明 立命館大学 食マネジメント学部 教授 和田 有史

論文内容の要旨

本研究では、食品の新たな潜在的価値、すなわち人と食品の関係についての潜在的価値を発見するための手法の検討を行い、その存在を明らかにすることを目的とする。本論文の構成を図1に示す。

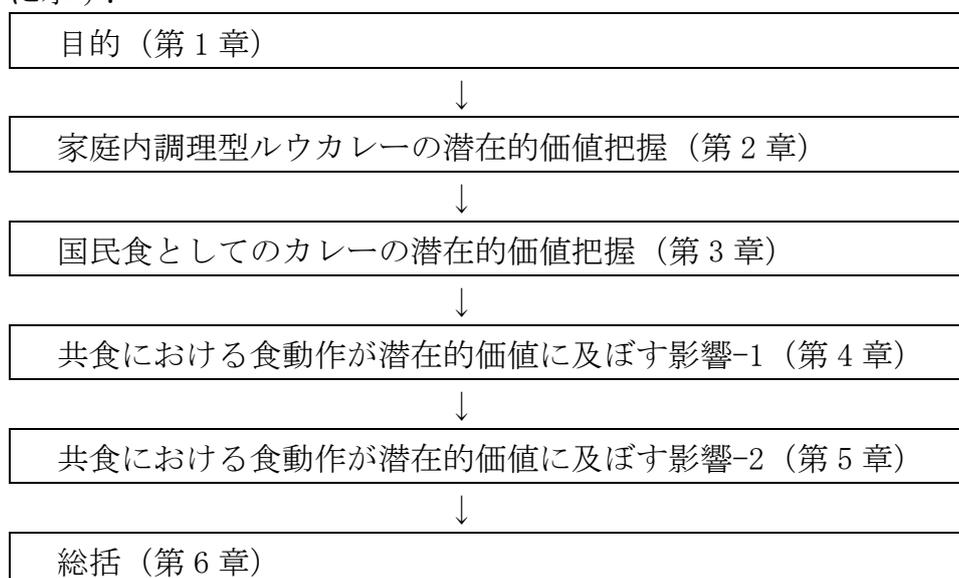


図1 本論文の構成

第1章では、研究背景と研究目的について述べた。これまでの食品科学工学では、食品の顕在的価値を向上させる品質要素を探求し、得られた知見を活かして食品のモノづくりが行われていた。しかしながら、食品を買いたい、食べたいという気持ちを引き起こす要因には、顕在的価値だけでなく、消費者が何となく感じている潜在的価値も存在すると考えられる。顕在的価値の中でもおいしさについては、人と食品の関わりまでを考慮する試みが広がっているが、食経験を通して人が食品に対してどのように感じているか（人と食

品との潜在的な関係性)までは考慮されておらず, 先行研究も見当たらない. 潜在的価値を明らかにするためには, 従来の実験的な状況では得られなかった, 日常的の中に潜む潜在的なデータを取得し, 解析および評価する必要があることが考えられる. 潜在的価値の存在が明らかになれば, 食品科学工学の学問領域が広がり, 従来とは異なる視点でのモノづくりが行える可能性がある. 本研究ではカレーを題材に3つの潜在的価値の現れ(シンクロ, 場の共有感, およびポジティブ感)を捉えることができるか検証する中で, 潜在的価値を発見する手法の検討, および潜在的価値存在の手掛かりを得ることを目的とした.

第2章では, 家庭で調理される調理型ルーカレーの潜在的価値の存在の手掛かりを得ることを目的とした. カレーとハヤシの喫食時の行動を比較する予備実験を行い, カレーの方がハヤシよりもスプーン同士(スプーンと箸も含む)のシンクロ率という指標が高い傾向を見出した. 次に, 日常会話をしてもらいながら家庭で調理されたカレー, ハヤシ, および牛丼(または豚丼)の3メニューを母子で喫食してもらった実験を行い, 潜在的価値の現れ(シンクロおよびポジティブ感)を捉える試みを行った. 行動観察結果および感性評価結果の解析により, カレーは他メニューと比較し, シンクロ率や, メニューに対するポジティブ感が多いことが明らかになった. 日常的な実験状況の設定, 日常の何気ない行動の解析や, 感性評価結果解析の工夫によって, 潜在的価値の現れを捉えることができ, 潜在的価値が存在することの手掛かりが得られた.

第3章では, 過去の食経験が異なる友人同士の関係にあるペアを対象に第2章と同様の実験を行い, 潜在的価値の現れ(場の共有感, シンクロ, およびポジティブ感)を捉えることが可能か検証を行った. 会話をしてもらいながら, カレー, ハヤシ, および牛丼を喫食してもらい, 結果を比較した. 喫食時の記憶の振り返りを利用した感性評価, および行動観察結果の解析により, 友人同士のペアにおいても母子と同様, カレーはハヤシよりも場の共有感やシンクロ率が高いことが分かった. また, 発話内容の解析から, カレーはハヤシよりもポジティブ感が高く, 共通体験が多いメニューであることが示された. すなわちカレーを食べる際は, ポジティブな内容の会話が弾み, また会話内容も互いの共通体験を確認し合うようなものであることから, 良好な雰囲気醸成され, 場の共有感やシンクロを引き起こしていることが示唆された. 日常的な実験状況の設定, 記憶の振り返りを利用した感性評価, および日常の何気ない行動の解析が潜在的価値を発見するために有用な手法であることが示され, これらの手法により潜在的価値の存在の手掛かりを得ることができた.

第4章および第5章ではカレー(第4章)およびスパゲッティ(第5章)の共食時の食事動作が潜在的価値に及ぼす影響の解明を行った. 混ぜ, 寄せ集め動作(以下動作)の有無で2種類の食事方法を比較し, 動作がもたらす安心感や潜在的価値の現れ(シンクロ)を捉える試みを行った. 生理機能測定(心電計測による自律神経の活動), 喫食時の記憶の振り返りを利用した感性評価, およびシンクロ率の結果から, カレーにおける動作により, 食事に安心感やシンクロ率の高まりがもたらされることが分かった. 一方で, スパゲッティにおける動作では, 安心感やシンクロ率に差が見られないことが分かった. つまり共食におけるカレーの動作は安心感をもたらす, 一体感を高めた食環境の実現につ

ながっていることが示唆された。このような動作によって得られる効果が、潜在的価値の形成に影響を与えている可能性も推測される。食品を喫食する際の食事動作が消費者の気持ちに影響を与える可能性が示唆されたことから、食品を囲む場においては、食事動作にも着目することで、より差別性の高い食品開発が行える可能性があることが示された。

第6章では、これらの総括と結論について述べた。本研究ではカレーについて3つの潜在的価値の現れ（シンクロ、場の共有感、およびポジティブ感）を捉えることができた。つまり、本研究結果から、長期間に渡り繰り返し食べ続けられている食品には、人と食品との関係についての潜在的価値が存在することが示された。潜在的価値は、食経験の蓄積により形成された、人が食品に対して抱くイメージであることが推測される。本研究結果により、人と食品の関係についての潜在的価値の存在を示すことができ、また、潜在的価値を発見するための手法の有用性を確認することができた。本研究結果により、食品の価値拡張の手掛かりが得られたことで、食品科学工学の学問領域を広げられる可能性が見出され、従来とは異なる視点でのモノづくりが行える可能性を示すことができた。

論文審査の結果の要旨

食品の開発に際して、食品科学工学の視点では油分や甘味や粘度などの品質要素を組合せて、あるコンセプト、例えばおいしさに見合ったものになっているかが評価される。本論文の著者たちは長年にわたって、おいしさややみつき感がどのような品質要素によってもたらされているのかを、油分や香辛料の変更などを行った試作品を用いて評価実験を行い、感性評価や生理・脳機能測定の結果から明らかにしようとしてきた。しかし、必ずしも満足できるような結果には至っておらず、これらの研究を通して、別の視点での研究の必要性を感じていた。それは、食品を喫食している時に何となく感じている価値が存在し、このことがおいしさややみつき感に影響しているのではないかという視点である。

本研究では、食品の新たな潜在的価値、すなわち人と食品との関係についての潜在的価値を明確にするための手法の検討を行い、その存在を明らかにすることを目的としている。論文は全体で6章から構成されている。

第1章では、研究背景と研究目的について述べられている。おいしさについては人と食品の関わりを考慮する試みが広がっているが、食経験を通して人が食品に対してどのように感じているか（人と食品との潜在的な関係性）までは考慮されておらず、先行研究も見当たらない。潜在的価値を明らかにするためには、従来の実験的な状況では得られなかった、日常生活の中に潜む潜在的なデータを取得し、解析および評価する必要がある。このことが明らかになれば、食品科学工学の学問領域が広がり、従来とは異なる視点でのモノづくりが行える可能性がある。本研究ではカレーを実験材料として共食時での3つの潜在的価値の現れ（食事動作の同期、以下シンクロと、場の共有感およびポジティブ感）に着目して、潜在的価値に関する手法の検討とその存在の手掛かりを得ることを目的としている。

第2章では、家庭で調理される調理型ルウカレーの潜在的価値の存在の手掛かりを得ることを目的としている。カレーとハヤシの喫食時の行動を比較する予備実験を行い、カレーの方がハヤシよりもスプーン同士のシンクロ率が高い傾向を見出した。そこで、家庭で調理されたカレー、ハヤシ、および丼物の3メニューを母子で喫食してもらう実験を行い、潜在的価値の現れを捉える試みを行った。結果の解析により、カレーは他メニューと比較し、シンクロ率や、メニューに対するポジティブ感が多いことが明らかになった。日常的な実験状況の設定、日常の何気ない行動の解析や、感性評価結果解析の工夫によって、潜在的価値の現れを捉えることができた。

第3章では、過去の食経験が異なる友人同士のペアを対象に第2章と同様の実験を行い、潜在的価値の現れを捉えることが可能かについての検証が行われている。結果の解析により、友人同士のペアにおいても母子と同様、カレーはハヤシよりも場の共有感やシンクロ率が高いことが分かった。また、発話内容の解析から、カレーはハヤシよりもポジティブ感が高く、共通体験の発話が多いメニューであることが示された。日常的な実験状況の設定、記憶の振り返りを利用した感性評価、および日常の何気ない行動の解析が潜在的価値を明確にするために有用な手法であることが示され、潜在的価値の存在の手掛かりをさら

に得ることができた。

第4章および第5章では、カレー（第4章）およびスパゲッティ（第5章）の共食時の食事動作が潜在的価値に及ぼす影響の解明が行われている。混ぜ、寄せ集め動作（以下、動作）の有無での食事方法を比較し、動作がもたらす安心感や潜在的価値の現れを捉える試みを行った。結果の解析から、カレーにおける動作により、食事に安心感やシンクロ率の高まりがもたらされることが分かった。一方で、スパゲッティにおける動作では、安心感やシンクロ率に差が見られないことが分かった。つまり、共食におけるカレーの動作は安心感をもたらす、一体感を高めた食環境の実現につながっていることが示唆された。このような動作によって得られる効果が、潜在的価値の形成に影響を与えている可能性も推測される。食品を囲む場においては、食事動作にも着目することで、より差別性の高い食品開発を行える可能性のあることが示された。

第6章では、これらの総括と結論について述べられている。本研究成果により、人と食品の関係についての潜在的価値の存在を示すことができ、また、潜在的価値を明確にするための手法の有用性を確認することができた。本研究成果により、食品における価値拡張の手掛かりが得られたことで、食品科学工学の学問領域を広げることができ、従来とは異なる視点でのモノづくりが行える可能性を示すことができた。

以上に述べたように、食品科学工学における従来までの試行錯誤的な製品開発の過程に対して感性工学の視点から潜在的価値に着目することで、より人と食品との親和性の高い製品開発の可能性を本研究は示唆している。このような視点は、食品のみならず、製品全般にも汎用性のあるものであり、工学的にも工業的にも有用な研究成果であると判断する。また本研究成果は本学大学院博士課程在学中において、査読あり論文3編、海外での発表1件、国内での発表3件が示すように、学協会でも高く評価されている。

よって本論文は博士（工学）の学位に十分値すると判断する。

氏名	なかばやし ゆうじ 仲林 裕司	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博乙 第62号	
学位授与の日付	令和5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	機能性材料形成装置の開発とセンサー・分析への応用に関する研究	
論文審査委員（主査）	教授 鈴木 亮一	教授 高野 則之
	教授 竹井 義法	教授 宮田 俊弘
	石川高等専門学校 電気工学科	教授 山田 悟

論文内容の要旨

多種多様な特性や性質を有する機能性材料は、我々の生活や産業活動を支える材料のひとつとして知られている。また機能性材料は、表面形態や結晶構造などを制御することでその機能性を変化させることができることから、様々な材料形成法や装置が提案されている。薄膜材料の形成手法に着目すると、真空蒸着に代表される気相成長法は、清浄な空間で材料成長が進むことから不純物が少ない半導体材料の製造技術として利用されている。一方で、昨今では産業界が地球環境に配慮した技術の進展を目指す方向に舵を取り始め、電力をはじめとする消費エネルギーを削減する材料形成技術に大きな期待が寄せられている。その薄膜形成技術のひとつであるミスト化学気相成長(CVD)法及びミストデポジション法は低環境負荷で操作が容易な特徴を有しているが、装置運用のための専門知識が必要なため技術の進化が望まれている。

本論文では、ミスト化学気相成長(CVD)法とミストデポジション法を用いた材料形成装置の開発及び改良を行い、酸化ガリウム、銀粒子、イオン化支援剤の特性を評価した。更に、明らかとなった材料特性をセンサー及び分析分野に応用し、性能や効果について従来技術と比較して評価している。以下に本論文の概要を示す。

第1章「序論」では、機能性材料の用途と既存の材料形成技術を説明する。次いで、ミストCVD法及びミストデポジション法の技術的特徴を述べ、従来技術に対する優位性を示す。この手法における材料形成上の課題の解決手段を提示し、本研究の目的を述べる。

第2章「材料形成装置」では、ミストCVD法及びミストデポジション法の形成装置の構成と材料形成部の特徴及び材料成長の原理を説明する。次に、機能性材料を成長させるための装置の詳細を述べる。

第3章「熱交換器の設置と形成条件が与える酸化ガリウム薄膜特性の影響」ではミストCVD法によるc面サファイア基板に α 層の酸化ガリウム薄膜成長において、懸念される部品の熱劣化を防ぐ装置開発を実施し、形成した薄膜の表面及び構造特性の比較からその

効果を評価している。また、前駆体濃度毎の条件で形成した薄膜の表面及び構造特性を比較し、形成条件と物理的特性の関係性を評価している。更に、電子顕微鏡を用いて薄膜中の原子配列を観察し、薄膜中の欠陥種を推定している。

第4章「ミスト CVD 法により形成した銀粒子の物理的特性と表面増強ラマン分光法への応用」ではミスト CVD 法による金属粒子の形成と応用を目的として形成装置の開発と銀粒子の形成及び特性を評価している。更に、形成した銀粒子の光学特性を表面増強ラマン分光法(SERS)で用いる電場増強ツールとして応用し、スペクトルの形状、強度及び励起光照射時間が与えるスペクトルの変化を評価している。

第5章「色汚染された排水を検知する SERS センサーの開発と評価」では、工場排水に含まれる色素の検出を目的として、ミスト CVD 法により形成した石英基板上の銀粒子の特性評価とセンサーの開発及び性能の評価をしている。銀粒子を組み込んだ SERS センサーは、実用環境を模した簡易流路に組み込み、工場排水モデルを用いて SERS スペクトルの形状、強度及びセンサーの安定性を評価している。

第6章「ミストデポジション法によるイオン化支援剤の形成と質量分析イメージングへの応用」ではマトリックス支援レーザー脱離イオン化法による質量分析イメージングで用いるイオン化支援剤の形成を目的として、ノズル温度が制御されたミストデポジション形成装置を開発し、生体試料上にイオン化支援剤の形成と物理的及び光学的特性を評価している。特性評価の結果からノズルの最適温度を決定し、質量分析イメージングにより生体試料中の成分が可視化された質量像とノズル温度との関係を比較し、従来技術で形成されたイオン化支援剤との違いについて評価している。

第7章「ミストデポジション法により形成したイオン化支援剤を用いた植物性試料中の成分の可視化と手法の優位性の評価」では第6章の知見を基に実用試料への応用を試みることを目的として、植物試料上にイオン化支援剤を形成し、光学顕微鏡観察とラマン分光測定及び密度汎関数理論に基づく骨格振動特性の比較から、表面形態と化学的安定性を評価している。更に、精密質量分析による植物試料成分の化学組成の推定及び質量分析イメージングによる試料成分の局在評価を行い、ミストデポジション法をイオン化支援剤調製法として応用した際の優位性について従来技術と比較している。

第8章「結論」では本論文の総括と今後の課題を述べている。

論文審査の結果の要旨

機能性材料は、用途に適した多種多様な特性や性質を有しており、我々の生活や産業活動を支える材料のひとつとして知られている。また、表面形態や構造特性を制御することで、透過特性や電気的特性をはじめとする光学的・物理的な特性を変化させられることから、様々な材料形成法が提案され、それを実現するための装置の開発も進められている。薄膜材料の形成手法に着目すると、真空蒸着に代表される気相成長法は、清浄な空間で材料成長が進むことから不純物が少ない半導体材料の製造技術として利用されている。一方で、産業界が地球環境に配慮した生産技術への転換を目指していることから、電力をはじめとする消費エネルギーを削減する材料形成技術に大きな期待が寄せられている。ミスト化学気相成長(CVD)法、及びミストデポジション法は、低環境負荷で、比較的容易な操作で材料形成をすることができる技術のひとつである。しかしながら、ミスト法の特徴から、材料形成装置の運用には専門的な知識と技術が必要なため、ミスト法に関する研究の更なる進展が望まれている。

本研究では、ミスト CVD 法とミストデポジション法に必要な材料形成装置の構成方法を検討し、実際に装置を製作した。この装置を用いて形成された、酸化ガリウム、銀粒子、イオン化支援剤の結晶に関する機能性材料の特性を分析し評価している。また、これらの物性評価により明らかとなった材料特性をセンサーとして活用するため、種々の分野への応用を試み、形成された機能性材料のセンサーとしての特性を評価している。

申請論文は 8 章で構成されており、各章の内容は次のとおりである。

第 1 章では、本研究の着想に至る研究背景、既存の材料及び機能性材料の材料形成技術を説明している。次いで、ミスト CVD 法、及びミストデポジション法の技術的特徴を述べ、従来技術に対する優位性を示している。これらの手法における材料形成上の課題と解決手段が提示され、本研究の目的が述べられている。

第 2 章では、ミスト CVD 法及びミストデポジション法の形成装置の装置構成と、既存の材料形成部の特徴及び材料形成の原理を説明している。次に、3 つの機能性材料を成長させるための材料形成装置及びその詳細について述べている。

第 3 章では、ミスト CVD 法による c 面サファイア基板上に α 相の酸化ガリウム薄膜成長において懸念される部品の熱劣化を防ぐ装置を開発し、形成された薄膜の表面及び構造特性を評価して提案する装置の有効性を確かめている。また、前駆体濃度毎の条件で形成した薄膜の表面及び構造特性を比較し、形成条件と物理的特性の関係性を明らかにしている。

第 4 章では、ミスト CVD 法による金属粒子の形成を目的として銀粒子の物性を評価している。更に、形成された銀粒子の光学特性を、表面増強ラマン分光法(SERS)で用いられる電場増強ツールとして利用し、SERS スペクトルの形状、強度及び励起光照射時間が与えるスペクトル変化を評価し、センサーとしての応用可能性について述べている。

第 5 章では、工場排水に含まれる色素の検出を想定した SERS センサーの開発を目的として、ミスト CVD 形成装置により石英基板上に形成された銀粒子の物理的特性及び光学的特

性を実験により解析し、それらの特性を評価している。次いで、顕微ラマン分光装置内に簡易流路を作成し、そこに銀粒子を組み込んだ SERS センサーを実装して工場排水を想定した Rhodamine6G 及び Crystal violet の単一色素水溶液、及び河川水を溶媒とする混合色素水溶液の色素を検出するセンサーとして機能するか検証している。ここでは、SERS スペクトルの形状と強度、及びセンサーとしての安定性を評価している。

第 6 章では、マトックリス支援レーザー脱離イオン化法による質量分析イメージングで用いるイオン化支援剤の形成を目的として、ノズル温度を制御できるミストデポジション形成装置を製作した。この装置を用いて、生体試料上にイオン化支援剤を形成した場合の、物理的及び光学的特性を明らかにしている。この結果からノズルの温度を適切に制御し、質量分析イメージングにより生体試料中の成分を可視化できること示した。また、提案する方法と従来の方法で形成されたイオン化支援剤との特性の違いについても比較している。

第 7 章では、第 6 章の知見を基に実用試料へ応用することを目的として、植物試料上にイオン化支援剤を形成し、光学顕微鏡観察とラマン分光測定、及び密度汎関数理論に基づく骨格振動特性を比較して、表面形態と化学的安定性を評価している。そして、植物試料であるジャガイモの成分の化学組成を精密質量分析により推定し、質量分析イメージングによる試料成分の局在を評価してミストデポジション法を応用する優位性を示している。

第 8 章では、本論文の結論をまとめ、今後の課題を述べている。

以上のとおり、本論文では、ミスト法を利用した機能性材料を形成するための装置を自ら製作し、その装置で形成された材料の物性や特徴を明らかにしているだけでなく、その特性を活かして機能性材料のセンシング技術への応用例までを示しており、研究成果は高く評価できる。ミスト法は低環境負荷で比較的容易な操作で材料形成ができることから、本研究の内容は今後のミスト法や関連分野の研究の進展に寄与することが期待される。また、学位申請者は、2018 年以降に有審査論文 5 編と国際会議論文 1 件に研究成果をまとめており、研究者としての高い能力を有していることも明白である。

よって、本論文は博士（工学）に十分値すると判断する。