



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Comprehensive Study on the Development of Decay-Controllable Paper-Based Seedling Pots and Their Seedling Growth Characteristics
Author(s)	中川, 卓也
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第16761号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16761
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99606
Type	doctoral thesis
File Information	NAKAGAWA_Takuya_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称： 博 士（農学）

氏名 中川 卓也

学 位 論 文 題 名

Comprehensive Study on the Development of Decay-Controllable Paper-Based Seedling Pots and Their Seedling Growth Characteristics

（分解制御可能な紙製育苗ポットの開発および育苗特性に関する包括的研究）

農業分野では、育苗資材としてプラスチック製ポットが広く利用されている。しかし、プラスチック製ポットは耐久性に優れるが、使用後は病害拡散防止などの理由から再利用されることは少なく、廃棄物として処理されるため、農業廃プラスチック問題の一因となっている。一方、紙製ポットは土壌中で分解しやすく環境負荷は低いと想定されるが、効率的な移植の際には一定の強度が必要なため、育苗中の紙の強度維持には化学繊維や薬品の添加が多用されている。そのため、紙が土壌残渣として残留する懸念があるうえ、従来技術では紙の強度と分解性の間にトレードオフが存在する。また、近年は欧州の Farm to Fork 戦略や日本の「みどりの食料システム戦略」により、プラスチック代替資材や有機農業への適合性が強く求められている。このような状況から、育苗資材には環境負荷低減と機能性の両立が求められ、育苗中は十分な強度を保持しつつ、移植後には分解を促進できる「分解制御型」育苗ポットの開発が重要な課題となっている。本研究では、分解制御を可能にする二つの技術的アプローチとして（1）生分解性プラスチック（以下、生プラ）ポットに生プラを特異的に分解する酵素を処理し、移植後の土壌中で分解を促進する方法（2）クエン酸によるセルロース架橋を付与した紙製ポットに移植前にアルカリ処理で架橋を切断し、移植後の土壌中で分解を促す方法を検討し、材料特性・育苗性能・実用性を総合評価した。

生分解性プラスチックラミネート紙と酵素による分解制御

分解を制御可能な育苗ポットの開発を進めるにあたり、まずは生分解性マルチ向けに実証済みの技術、すなわち生プラと酵素（*Pseudozyma antarctica* が産生するポリエステラーゼ）を組み合わせた技術をポット製造に応用し、その分解制御の可能性を検討した。しかしマルチに使用される材料は使用条件がポットとは異なるため、そのまま転用することはできない。そこで、紙筒製造技術に着目し、生プラ材料でも可能なポット製造法の確立及び酵素を組み合わせたポットの評価を目的とした。具体的には、紙基材に生プラ層をラミネートすることで両材料の利点を組み合わせる方法を検討することとし、ポリブチレンサクシネート（PBS）、ポリ乳酸（PLA）、ポリブチレンアジペートテレフタレート（PBAT）を組み合わせることで樹脂組成を調整し、酵素処理の効果と得られたラミネート紙の土壌中での分解性を評価した。

酵素処理後の土壌中での分解性は、土壌埋没試験による SDRI（Soil Decay Resistance Index）＝「土壌分解処理後の湿潤引張強度／標準湿潤強度 × 100」により評価した。なお、標準湿潤強度は JIS P 8113 に準拠し、水浸 24 h 後の値を用いた。試験サンプルを土壌（ニッテンスーパー培土、含水率 50%に調整）に埋没し 30℃で一定期間静置した結果、酵素未処理のラミネート紙は組成により差はあるものの、2 週間で SDRI 22～29、4 週間では SDRI 15～28 と形状を保持した。これに対し、移植直前に酵素処理を行うと分解が促進され、PBS 高含有試料では 2 週間で SDRI 2～9、4 週間では分解による引張強度の測定不能のため SDRI 値が算出不可となり、酵素処理が分解トリガーとして機能することを確認した。

目的の性能を有する生プララミネート紙が選抜されたため、これを用いて生プラポットを製造し、実用性を評価するために栽培試験を行った。供試植物はレタス（*Lactuca sativa* ‘L-121’）およびア

スター (*Callistephus chinensis* ‘Stella Mix’) とし、灌注 (100 mL pot⁻¹) と浸漬 (250 mL pot⁻¹) の二方式で酵素処理を行った。移植前のポット強度は 13.6~14.2 N・15 mm⁻¹ と移植作業に十分であり、収穫時 (移植後約 1 または 2 ヶ月) の酵素処理区の地上部乾物重は、対照区と比較して有意差はなかった。一方、移植後土壌に残存するポットは酵素処理区で顕著に減少し、250 mL 浸漬ではポットの形状が失われるほど分解が進んだ。以上より、生プラポットは、育苗期間中には十分な強度を維持し、移植後には事前の酵素処理により土壌中で分解を促進できることから、分解制御が可能であることが示された。

クエン酸架橋原紙とアルカリによる分解制御

既存技術を応用した移植前の酵素処理で分解を促す生プラポットは分解制御が可能である一方で、製造コスト、有機農業での適用、酵素液の実用化など課題も残っている。そこで次なる手法として、より低コストで、さらに理想的には有機農業に適合する育苗ポット用材料の開発に焦点を当てた。具体的には、天然物由来のクエン酸による紙の木材パルプ (セルロース) への架橋形成が育苗用原紙に必要な耐腐性を付与できるか検討した。

従来の研究では数十分間のオープン加熱等による架橋が採用されているが、工業生産には非効率的である。これに対し、本研究では加熱ローラーによる数秒間の接触加熱を適用した。処理液はクエン酸と次亜リン酸ナトリウム (触媒) を 5:1 で混合し、原紙を室温で 3 分浸漬後、ローラー搾水・乾燥し、220°C で 4.5 秒加熱して架橋を形成した。

FT-IR 測定では 1700~1750 cm⁻¹ にエステル結合由来の C=O 伸縮ピークが現れ、未処理紙にはない特徴が確認されたことから、クエン酸架橋がエステル結合で成立していることを示した。また育苗期間の強度維持を重視し、処理濃度は 7.5~15 wt.% を適切範囲とした。この範囲において、土壌中での分解性を評価する土壌埋没試験 (ニッテンネギ培土、含水率 50%、温度 30°C) では、10% 以上のクエン酸処理紙が 4 週間 (育苗 2 ヶ月相当) でも紙の形状を保持し SDRI 78~97 を維持した。また、クエン酸架橋紙に炭酸カリウム (20 g・L⁻¹、24 h) または水酸化カルシウム (2 g・L⁻¹、24 h) でアルカリ処理し、土壌埋没処理を行ったところ、分解が進み、引張強度を測定できず SDRI を算出できないサンプルが認められた。対照の従来技術であるジメチロールジヒドロキシエチレン尿素 (DMDHEU) 架橋紙はアルカリ前処理後も EDRI 82~93、SDRI 68~79 を維持し、架橋構造の違い (DMDHEU はエーテル結合、クエン酸はエステル結合) が分解挙動に影響することがわかった。

クエン酸架橋紙の実用性を評価するために栽培試験を実施した。供試植物はコマツナ (*Brassica rapa* var. *perviridis*, “Yokattana”) を用い、Chainpot® 形状 (六角口径 29 mm) に加工したクエン酸架橋紙ポット (CA) と DMDHEU 架橋紙ポットで試験を行った。その結果、移植前に水酸化カルシウムでアルカリ処理 (2 g・L⁻¹、6 h) を施した CA ポットでのみ、22 日間栽培した後の収穫時には全て分解された。茎葉・根の乾物重は DMDHEU ポットと CA ポットとの間で有意差を示さず、アルカリ処理の有無による生育差も認められなかった。以上より、クエン酸架橋紙ポットで育苗時の耐腐性を確保し、移植前のアルカリ処理で架橋を切断して分解を促すことで、育苗中の耐腐性と移植後の分解性を両立できることを示された。さらに、ポットを構成する糊などその他の材料についても天然物由来原料を使用することで、将来的に有機農業に適用できる可能性があると考えられた。

本研究の成果

本研究では、育苗期間中の耐腐性と移植後の分解性を両立し、分解を制御できる二種類の育苗ポットを開発した。まず (1) 生分解性プラスチックポットと酵素 PaE による「酵素誘導型」システムと、次に (2) クエン酸架橋した紙製ポットとアルカリ処理で特異的に架橋を切断して分解を促進する「アルカリ切断型」システムを確立した。今後は、圃場条件下での長期分解挙動の追跡、土壌微生物や化学性への影響評価、処理条件などを整備することで、分解制御型育苗ポットの社会実装を加速できる。