

(論文内容の要旨)

本論文は、毎年大量に排出され、廃棄されているもみ殻の隠された付加価値を創出するため、熱回収後のもみ殻燃焼灰を肥料として圃場へ全量還元し、持続可能な資源循環型農業を提案することを目的とした研究であり、各章の要旨は以下の通りである。

第1章では、もみ殻燃焼灰を評価するための新たな分析方法を提案した。もみ殻に含有されているシリカ（以下、もみ殻シリカ）について、けい酸の溶解性からもみ殻燃焼灰の質を評価するために、けい酸質肥料の評価基準を元にもみ殻燃焼灰に適した効率の良い分析測定方法を世界共通の指標として提案した。

第2章では、もみ殻シリカにおける基礎研究（燃焼温度・時間による物性変化）を行った。もみ殻を資源として利用するためには燃焼工程が必須である。ここでは無固定炭素を対象に、各燃焼条件における物性の違いを解析した。その結果、もみ殻に含まれる非晶質シリカは、1,000℃以上になると結晶化することがわかった。また、もみ殻シリカを効率よく非晶質のまま残存させるには、燃焼温度が800℃以下で、燃焼時間15分以内が適切であることがわかった。

第3章では、肥料化・熱利用を検討するために事例研究を行った。燃焼灰におけるシリカの溶解性評価から、実際の焼却炉において、もみ殻を燃焼する際の最適条件を検討した。最適な運転により非晶質シリカの灰が生成され、熱回収も可能となる。検討の結果、炉の最適な運転条件として2段階燃焼の有効性を明らかにした。また、この2段階燃焼について、加熱ドラム、断熱ドラム、および焼却炉システム内のシンクの3つの処理方法で生成した燃焼灰を比較した。その結果、最も溶解性の高いシリカが得られたのは焼却炉システム内シンクであり、燃焼灰が外気にさらされず処理されることが重要であることがわかった。次に、燃焼過程で発生する熱の利用法を検討した。温水利用と発電利用の2つの熱回収システムを比較した結果、温水利用の熱回収システムが経済的であることがわかった。したがって、もみ殻の処理が課題となっている地域では、もみ殻の燃焼に伴う熱エネルギーの利活用を検討することも有意義である。

第4章では、これまでの最適な燃焼処理により生成されたもみ殻燃焼灰を肥料として利用する際の影響を検討した。まず、もみ殻燃焼灰を施用した土壌で栽培した米の食味を評価した。その結果、米の味は市販のシリカ肥料を施用した場合の米と同様であることを確認した。次に、もみ殻燃焼灰が植物の生育に及ぼす影響を評価した。小松菜を対象に、3種類の生育試験を行った結果、いずれも正常であった。したがって、もみ殻燃焼灰が肥料として利用可能であることがわかった。

第5章では、もみ殻を資源として活用する際の循環システムを考察した。その結果、もみ殻の回収・運搬・灰の処理にコストをかけないこと、灰の状態が「非晶質」となるよう燃焼過程を工夫すること、燃焼に伴う熱エネルギーを有効活用するとともにもみ殻燃焼灰を肥料として農地に還元することの3点が、持続可能な資源循環システムを形成する上で必要な条件であることが分かった。

第6章では、これまでの研究の総括を行った。もみ殻シリカの溶解性に特化した測定法を提示したこと、もみ殻の燃焼方法について基礎的な知見を深めたこと、実際の燃焼炉を用いてもみ殻の燃焼と養生について検証したこと、実際の圃場でもみ殻燃焼灰を施用してその効果を評価したこと、もみ殻のリサイクルにおける条件を整理したこと等についてまとめた。

第7章では、今後の課題を提示した。本研究で開発した技術を、日本だけでなく、米を生産する東南アジアへの移転を目指し、もみ殻を利活用することによる生活向上の提案を行なった。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、毎年大量に廃棄されるもみ殻の資源化を目標として、もみ殻燃焼によって発生する発がん性物質の結晶質シリカを抑制するとともに、肥料としても農地還元可能な非晶質シリカを生成する新たな燃焼方法を開発し、持続可能なもみ殻の資源循環システムを提案している。さらには、溶解性シリカの分析方法、燃焼熱エネルギーの利用方法、肥料としての活用方法に関して有益な知見を示している。評価できる主な点は次の通りである。

(1) 現在、農林水産省によるもみ殻に含有されるシリカ（以下、もみ殻シリカ）に適したけい酸の公定分析法はなく、シリカゲル等の分析方法のみである。そこで、肥料試験法（ふっ化カリウム法 4.4.1.c）を改良したもみ殻シリカに特化した分析法を提案した。この方法により分析効率が向上し、分析時間も大幅に短縮した。この独創的な手法は、もみ殻シリカの分析方法が存在しないという従来課題を解決したものであり評価できる。

(2) もみ殻シリカは元来非晶質であるが、高温にさらされると結晶化する。したがって、もみ殻シリカのリサイクルに必須の燃焼工程を経てもできる限り非晶質で残存させることが重要となる。電気炉による燃焼実験の結果、燃焼温度800℃以下、燃焼時間15分以内が最適であることが明らかになった。ここで特筆すべき点は、もみ殻燃焼灰の安全性を評価する手法も新たに提案したことである。これはもみ殻シリカの溶解性と工業分析の結果とを照らし合わせることで燃焼灰における溶解性シリカの含有率を評価できる手法である。これら本研究で見出された燃焼技術ともみ殻燃焼灰の評価方法は、新規性と独創性があり大変評価できる。

(3) 本研究は、もみ殻燃焼に関して実際の燃焼炉を用いた実証実験も行っている。その中で最適燃焼条件を明確にしている点に特徴があり、燃焼炉の運用上有益な知見が得られている。また、もみ殻燃焼には、もみ殻自体を燃焼させる『発熱工程』と養生により燃焼灰中のもみ殻シリカの溶解性を向上させる『吸熱工程』を連続的に操作することで、より肥料に適したもみ殻燃焼灰が生産できることを明らかにした。さらに、もみ殻燃焼時の発生熱は、発電利用よりも温水の形で温室への熱供給に充てる方が経済的であることを示した。これはエネルギーの有効活用を提案しており評価できる。

(4) 実際の燃焼炉で得たもみ殻燃焼灰を圃場に施用し、植物への影響を検討している。その結果、米に関しては食味に負の影響を与えないことを明らかにした。さらに小松菜を使った実験では、もみ殻燃焼灰は小松菜の成長にも負の影響を与えないことを確認した。これはもみ殻燃焼灰の施用に関して妥当性や有効性を検証したものであり評価できる。

(5) 本研究では、持続可能なもみ殻のリサイクルを実現させるための条件として、①もみ殻の回収・運搬・灰の処理に係るコストの削減、②結晶質シリカを発生させない燃焼技術、③燃焼に伴う熱エネルギーの有効活用と燃焼灰の肥料化の3条件を新たに導き出している。今後のもみ殻循環事業計画の基礎となり得るこの3条件は汎用性を有しており評価できる。

以上のように、本論文は、世界中の水田稲作地域で大量に廃棄される農業残渣であるもみ殻の安全かつ持続可能な循環システムを構築したばかりでなく、世界共通の指標となる非晶質シリカの分析評価法、燃焼熱エネルギーの利用法、循環システムの実用的導入に向けた提案にも言及されており、地域環境工学、エネルギー学、廃棄物資源循環学およびその実際面に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（生物資源環境学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、令和4年1月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。