

称号及び氏名	博士（応用生命科学）	大西 龍
学位授与の日付	平成25年3月31日	
論文名	食品廃棄物の炭化における炭品質と環境影響に関する研究	
論文審査委員	主査	小田 雅行
	副査	阿部 一博
	副査	北宅 善昭

## 論文要旨

化石燃料の使用による大気中の二酸化炭素濃度の上昇は、地球温暖化の主な原因とされている。これを抑制するために、化石燃料に代わる再生可能エネルギーの開発に期待が寄せられている。バイオマスはその一つであり、そのうちの食品廃棄物は再生利用（リサイクル）されずに、大半が焼却または埋め立てられている。これは、食品廃棄物が、少量ずつ広範囲に存在していて収集し難く、分別と異物除去が必要であり、多水分で腐り易いという特性に起因する。したがって現状では、食品廃棄物はその発生源か近傍において、高度な分別や異物除去を必要としない焼却や埋め立てによって処理せざるを得ない。

しかし、地球温暖化対策の必要性は増すばかりであり、食品廃棄物もリサイクル率を向上する必要がある。そこで、食品廃棄物の新たなリサイクル技術として‘炭化’をとりあげ、その実用化について検討した。このため、食品廃棄物の特性評価と炭化生成物の利用方法の検討ならびに炭化の環境影響と経済性評価を行った。

### 第1章 食品廃棄物の特性評価

様々な業種から発生する食品廃棄物およびその炭の特性を評価した。食品廃棄物をその発生源となる食品関連事業者の業種別に回収し、構成成分の割合を

調査するとともに、構成成分別に炭化の特性を評価した。食品製造業、食品小売業および外食産業から回収した食品廃棄物は、業種に関わらず、3つの主要な構成要素（穀類、植物性残渣および動物性残渣）が85～95%を占めた。構成成分別に見ると、いずれも多水分で、乾物重当たり可燃分が90%以上、うち炭素を50%前後含有した。これらを500℃で炭化すると、炭の収率は25～30%、炭素率は60～80%であった。その炭は、植物に有用な多量元素および微量元素を含有しており、土壌改良材としての利用の可能性と肥料成分の含有量を考慮した土壌への適切な施用の必要性が示唆された。また、食品廃棄物の炭化は、含有する炭素の30～55%を固定できるので、大気中の二酸化炭素濃度の上昇抑制に有効な手段になると考えられた。

## 第2章 炭化生成物の利用方法

わが国では古来より木炭が利用され、近年には土壌改良資材や吸着剤としても利用されている。しかし、食品廃棄物では炭化という発想がなかったため、その炭の特性はほとんど明らかにされていない。様々な食品が混在する食品廃棄物を炭化して利用しようとする場合、炭の品質を一定にする必要がある。そこで、関西地域の食品製造業、食品小売業および外食産業から回収した約5,000tの食品廃棄物が、国内で発生する平均的な食品廃棄物と同様の組成であることを確認した。それを250-700℃で炭化し、炭の特性と品質（炭素率、低位発熱量および肥料成分量）に影響する要因（季節、食品製造業の割合、穀類の割合、炭化温度）を解析した。炭素率、低位発熱量および肥料成分量の平均は、それぞれ67.7%、26.1 MJ kg<sup>-1</sup> DWおよび5.7%であり、燃料（サーマル利用）や農業資材（マテリアル利用）として利用できると考えられた。しかし、これらの品質にはばらつきがあり、その原因として影響の大きい順は、穀類の割合>季節>炭化温度>食品製造業の割合であった。これらのうち、特に影響の大きい穀類の割合を制御すれば、安定した品質の炭が得られ、燃料や土壌改良資材として利用しやすくなると考えられた。また、食品製造業の割合による影響が小さかったため、炭化はリサイクル率の低い食品小売業および外食産業でも有効に活用できると考えられた。

次に、炭の需要者が求める燃料としての品質基準に基づいて食品廃棄物の炭を評価した。この炭は、石炭の代替燃料として利用できる可能性があるため、石炭利用量の割合が高いセメント産業への供給も想定して検証した。食品廃棄物の炭は1.0～2.8 mm程度の粒状であり、需要者がもつ既存設備でも使用できると見込まれた。また、食品廃棄物の炭は、水分率が低く、発熱量は石炭あるいは木炭と同等かそれ以上であり、引火点および灰の融点も燃料として利用できる範囲であった。

食品廃棄物の炭を土壌改良資材として利用するために、その機能性について検証した。土壌への炭の施用によって透水性が改善されるとともに、微生物の多様性と活性値が増加した。さらに圃場では、食品廃棄物の炭の施用によって酸度が中和され、キャベツ、ブロッコリーおよびハクサイの収量が増加した。木炭は、土壌改良資材としても利用されており、主な効果として透水性の改善が挙げられる。食品廃棄物の炭でも同様の効果があったので、土壌改良資材として利用できることが分かった。食品廃棄物の炭を土壌改良資材として利用すれば、炭素が土中に貯留されるので、大気中の二酸化炭素濃度の上昇を抑制できると考えられる。また、炭は無菌であり、軽くて作業性がよいので、使用後の廃棄が困難なロックウールに代わる養液栽培用培地としての利用も考えられる。食品廃棄物の炭は強アルカリ性を示したが、硝酸の施用によって酸度を調整できた。その結果、この炭培地を使用した養液栽培においてトマトの生育および収穫量がロックウール耕よりも優れることが実証された。

### 第3章 炭化の環境影響と経済性評価

炭化システムが排出するガス中の有害物質（ダイオキシン類、窒素酸化物、硫黄酸化物、塩化水素、ばいじんおよび悪臭防止法で定める 22 の悪臭物質）、騒音・振動レベルおよび再生水の水質（pH、懸濁物質、ノルマルヘキサン抽出物質、硝酸・亜硝酸量、COD、BOD、T-N および T-P）はすべて基準以下の低濃度であった。したがって、食品廃棄物の炭化が周辺環境に及ぼす負荷は極めて小さいと判断された。炭化の炭素収支は、24 t/day 以上の食品廃棄物処理によって炭素固定量が炭素放出量を上回ったので、大気中の二酸化炭素濃度の上昇を抑制できると考えられた。また、食品廃棄物の炭化に必要なコストは、ごみ焼却施設やその他のリサイクル方法と比べても同等かそれ以下であり、経済的に優位であることが明らかになった。

#### 総括

本研究により、食品廃棄物とその炭の特性と利用方法が示され、食品廃棄物の炭化は環境に及ぼす影響が小さくて経済的にも実用性のあることが明らかになった。

食品廃棄物、特に事業系廃棄物は人口の多い都市部に集中するので、食品廃棄物の回収は既存の流通網（廃棄物収集運搬業）を利用できる。しかし、家庭ごみ（一般廃棄物）に含まれる食品廃棄物は、食品以外の異物が混入している場合が多いので、分別の徹底と資源として量を確保できるような地域単位（市町村単位）の回収が必要である。

一方、人口の少ない地域では、食品廃棄物は散在しており、広範囲な回収が

必要になる。そのため、食品廃棄物のみならず、その他のバイオマス資源も併せて処理して効率を高める必要がある。したがって、多量に存在するにもかかわらず未利用な地域の廃棄物系バイオマス（家畜排泄物、下水汚泥、製材工場残材や建設発生木材）および未利用系バイオマス（農作物非食用部、林地残材）についても炭化が適用できるか検討する必要がある。

炭は、燃料や農業資材としてリサイクルできるが、地域で発生するバイオマス資源はできる限りその地域で利用するのが望ましく、利用先を地域で確保する必要がある。これらのことを考慮し、回収や処理および利用の方法を地域のバイオマスの特性に合わせて検討して地域に適したシステムを構築することが重要である。

## 審査結果の要旨

化石燃料の使用による大気中二酸化炭素濃度の上昇は、地球温暖化の主な原因とされている。これを抑制するために、化石燃料に代わる再生可能エネルギーに期待が寄せられている。バイオマスはその一つであり、そのうちの食品廃棄物の大部分は、再生利用されずに焼却または埋め立て処分されている。これは、食品廃棄物が少量ずつ広範囲に存在していて回収が困難であり、また飼料などに再利用するためには、高度な分別や異物除去などに多くのコストを要するためである。そこで、食品廃棄物の新たなリサイクル技術として‘炭化’をとりあげ、その実用化について検討した。

第 1 章では、様々な業種から発生する食品廃棄物およびその炭の特性を評価した。食品製造業、食品小売業および外食産業から回収した食品廃棄物は、3つの主要な構成成分（穀類、植物性残渣および動物性残渣）が 85～95%を占めた。これらの構成成分の乾物率は約 50%であり、乾物重あたりの可燃分は 90%以上、炭素含有率は約 50%であった。これらを 500℃で炭化すると、炭の収率は 25～30%、炭素率は 60～80%であった。また、食品廃棄物の炭化は、含有する炭素の 30～55%を固定でき、大気中の二酸化炭素濃度の上昇抑制に有効な手段になると考えられた。

第 2 章では、様々な食品が混在する食品廃棄物の炭品質に影響する要因と炭の利用法を検討した。関西地域の食品製造業、食品小売業および外食産業から回収した湿重約 5,000 t の食品廃棄物を 250-700℃で炭化し、炭の品質（炭素率、発熱量および肥料成分率）に影響する要因（季節、食品製造業の割合、穀類の割合、炭化温度）を解析した。炭素率、発熱量および肥料成分率の平均値は、

炭の乾物重あたりそれぞれ 67.7%、26.1 MJ/kg および 5.7%であり、燃料や農業資材として利用できる範囲内であった。これらの値の偏差に及ぼす影響は、穀類の割合、季節、炭化温度、食品製造業の割合の順で大きかった。特に影響の大きい穀類の割合を制御できれば、安定した品質の炭が得られ、燃料や土壌改良資材として利用しやすくなると考えられた。

次に、食品廃棄物の炭の燃料品質を評価した。炭は、含水率が低く、発熱量、引火点および灰の融点が燃料として利用できる範囲内であった。

土壌への炭の施用によって透水性の改善および微生物の多様性と活性が増加した。また、キャベツ、ブロッコリーおよびハクサイの収穫量が増加したことから、土壌改良資材として利用できることが分かった。さらに、炭の新たな利用方法として、使用後の廃棄が困難なロックウールに代わる養液栽培用培地としての利用を検討した。その結果、トマトの生育および収穫量がロックウール耕よりも優れることが明らかになった。

第 3 章では、炭化システムが排出するガス中の有害物質（ダイオキシン類、窒素酸化物、硫黄酸化物、塩化水素、ばいじんおよび悪臭物質 22 項目）、騒音・振動レベル、再生水の水質（pH、懸濁物質、ノルマルヘキサン抽出物質、硝酸・亜硝酸量、COD、BOD、T-N および T-P）はすべて基準値以下で、環境への影響は小さいと判断された。炭化の炭素収支については、24 t/day 以上の食品廃棄物処理によって炭素固定量が炭素放出量を上回った。したがって、大気中に放出される二酸化炭素量は、これ以上の規模の炭化システムによって減少できると考えられた。また、食品廃棄物の炭化に必要なコストは、ごみ焼却施設やその他のリサイクル方法と比べ、経済的に優位であることが明らかになった。

本研究は、焼却や埋め立てによる処理の割合が高い食品廃棄物を炭化し、その石油代替エネルギーとしての活用と土壌改良資材としての土中貯留によって大気中の二酸化炭素濃度の上昇を抑制しようとする試みである。申請者は、食品廃棄物の炭の特性をはじめて明らかにし、その炭が燃料として基準を満たし、土壌改良材として作物の増収効果があることを示した。さらに、食品廃棄物の炭化は環境への影響が小さく、しかも経済的に実用性のあることも明らかにした。これらの知見は、資源循環学の発展に寄与するとともに、食品廃棄物の処理に困っている地域における新たな処理技術に繋がり、地域住民の生活の質を向上するものである。また、この技術が他の未利用バイオマスに適用できれば、大気中の二酸化炭素濃度の上昇が一層抑制され、地球温暖化の阻止にも貢献する可能性がある。したがって、最終試験の成績と併せて博士（応用生命科学）の学位を授与することを適当と認める。