



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

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2014-06-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 大西, 龍 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00000579

大阪府立大学博士（応用生命科学）学位論文

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

大 西 龍

2013年

目 次

第 1 章 食品廃棄物炭化の背景	1
第 2 章 食品廃棄物の特性評価	7
第 1 節 食品廃棄物の構成成分の割合と各構成成分の特性	8
第 2 節 食品廃棄物の構成成分の炭化特性	14
第 3 節 食品廃棄物の各構成成分の炭化による炭素固定の効果	20
第 4 節 考 察	22
第 3 章 炭化生成物の利用方法と可能性	25
第 1 節 炭化生成物の品質の特性と変動	27
第 1 項 食品廃棄物の特性	28
第 2 項 食品廃棄物から得られた炭の特性	30
第 3 項 変動要因が炭の品質に及ぼす影響	34
第 2 節 炭化生成物の燃料利用	38
第 3 節 炭化生成物の農業資材利用	41
第 1 項 炭施用による土壌の透水性改善	41
第 2 項 炭施用による土壌中の微生物の多様性活性	44
第 3 項 炭施用が作物栽培に及ぼす影響	47
第 4 項 炭の養液栽培用培地としての利用	51
第 4 節 考 察	58
第 4 章 炭化の環境影響および経済性の評価	64
第 1 節 大気への影響	66
第 2 節 騒音・振動による影響	71
第 3 節 水質環境への影響	75
第 4 節 炭化の炭素収支	81
第 5 節 炭化の LCA 手法を用いた環境影響の評価	83
第 6 節 炭化の経済性評価	94

第 7 節 考 察	97
総 括	101
謝 辞	105
引用文献	106

第1章 食品廃棄物炭化の背景

地球温暖化は、人間活動に伴うエネルギー消費が主な原因とされ（IPCC, 2007）、世界のエネルギー需要量は2035年までに現状の約1.6倍に達すると見込まれる（OECD, 2011）。化石燃料は、世界のエネルギー需要量の約6割を占め、発展途上国における人口増加や経済成長によって、その使用量は今後も増え続けるものと推定される。化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素は、大気中への放出量が多いので、多くの地球温暖化ガスの中で温暖化効果が最も大きい。そこで、大気における二酸化炭素濃度の上昇を抑制または低下させるために、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。

再生可能エネルギーは、「絶えず補充される自然のプロセス由来のエネルギー」と定義され（OECD, 2011）、太陽、風力、バイオマス、廃棄物（バイオマス起源）、地熱、水力、海洋資源からの生成物や海洋エネルギーが該当する。我が国においては、水力および地熱をのぞく、太陽光発電、風力発電、太陽熱利用、温度差エネルギー、廃棄物発電、廃棄物熱利用、廃棄物燃料製造、バイオマス発電、バイオマス熱利用、バイオマス燃料製造および雪氷熱利用が、新エネルギーとして定義され、利用および普及が推し進められている。

これらのうち、バイオマスは、大気中に在存する二酸化炭素を光合成によって有機物化したものであり、これを利用する過程で発生する二酸化炭素の収支はゼロ、すなわちカーボンニュートラルとなり、二酸化炭素排出量の抑制・削減に寄与する。

バイオマスは、さらに作物系（資源作物、新作物）、未利用系および廃棄物系に分類される。日本の廃棄物系バイオマスの年間発生量は、湿潤重量で32,700万t、乾燥重量で約7,600万tである。これをエネルギー換算すると約1,270 PJ（原油換算で約3,280万kL）であり、炭素量換算で約3,050万tに相当する（農林水産省, 2006）。これはバイオマスの中でもっとも発生量が多く、我が国で生産されているプラスチックに含まれる全炭素量の約3倍になる。

廃棄物系バイオマスのうち、食品廃棄物は、人口が集中する都市部に多く集積する特性があり、産業廃棄物・一般廃棄物収集運搬業の既存回収システムを利用でき、なおかつ、廃棄物処理費を付加して収集および処理できるので、その利用を比較的早く進めることができると考えられる。

我が国の事業系食品廃棄物の年間発生量は、2010年度で2,086万tに達する(第1-1表)。一方、一般家庭から発生する食品廃棄物は1,030万tと報告されており(農林水産省, 2008)、食品廃棄物の年間総発生量は約3,100万tである。これは、国内の廃棄物系バイオマス発生量(32,700万t)の約10%を占める量であり、これらの活用効果は大きいと考えられる。

近年、食品製造業における食品廃棄物の再生利用が進んだが、それ以外の業種では微増傾向であり、外食産業では、2010年度で17%の再生利用実施率にとどまっている。食品廃棄物は、食品流通の末端ほど分別が難しくなるので、食品卸売業、食品小売業、外食産業の順に再生利用実施率が低い。また、食品リサイクル法で定める用途(肥料、飼料、メタン、油脂および油脂製品)の再生利用実施率は68%で、再生利用実施量を100%とした場合、肥料17%、飼料75%、メタン4%、油脂および油脂製品3%、炭化して製造される燃料および還元剤0.3%、エタノール化0.05%である(農林水産省, 2012a)。すなわち、食品廃棄物の再生利用は、飼料以外では進んでいない。

食品廃棄物は、飼料化、肥料化(堆肥)、メタン化、エタノール化および炭化して利用される(第1-2表)。飼料化および肥料化は、食品廃棄物の利用効率が高く、簡素な設備でできるので、全国的に普及している。しかし、食品製造業から発生するような、均質な食品廃棄物を得意とする一方で、食品小売業や外食産業から発生するような高水分および異物混入率が高いものは不得手であり、食品小売業や外食産業の再生利用実施率が低い原因になっている。メタン発酵も、発酵によるので同様の状況である。

一方、炭化は、高水分で異物が混入する食品小売業や外食産業の食

品廃棄物への適合性は高いと考えられる。炭化は、炭素を固定化して二酸化炭素の排出を抑えるので、バイオマスの利用技術として注目を集めている。わが国では伝統的には木材の炭焼き、近年では燃料用オガライト炭および活性炭の製造が行なわれており、この技術に対するなじみが深い（杉浦，2005）。炭化は、化石燃料が万能の時代にあって一時衰退を余儀なくされたが、環境への負荷が小さいので、環境調和型技術として見直されている。

木材の炭化では、固形物として木炭（25%）、液体物として木酢液（40%）、および木タール（10%）、気体成分として木ガス（25%）が生成され、50%以上の炭素が固定される（柴田，2002）。その炭化工程では、自燃式で木煙も利用するので、木タールおよび木ガスの燃焼によって高いエネルギー効率を得られ、従来の焼却処理と比べて環境適応性が高い。生産した木炭を含む各種熱分解生成物は、従来のような燃料利用だけでなく、土壌改良資材（大平，1992；人見，1993；安部，1998；林晴美ら，2003^a）、水質浄化資材（谷田貝，1995；谷田貝，2005；京都府新政策形成研究会，2004）、床下調湿材等の建材（藤田，2002）、消臭用資材（谷田貝，1991；安部，2000）、環境浄化資材（安部，2003）として利用されている。さらに、最近では炭素材料としての用途開発も検討されている（Hata，2004）。このように木材の例では、炭化という「古くて新しい」技術により、炭化生成物を効率的に利用でき、かつ炭素の固定化に貢献できることが明らかである。

一方、食品廃棄物についても、炭化生成物のうち、炭の利用について研究されている。コーヒー粕（石橋，2001；林順一，2000^a）、ビール粕（林，2000^b；岡本，2002；岡本，2003）、おから（室山，1996）、醸造粕（遠藤，1995）の炭化生成物について、それぞれ、吸着特性を活かした脱臭材、消臭材、水質浄化材や土壌改良資材としての利用方法が検討され、利用に応じた機能性を有することが示されている。これらの研究は、いわゆる食品製造業で発生する単一な食品原料を由来とする廃棄物を対象とした場合が多く、食べ残しや調理過程で発生する厨芥、さまざまなものが混在していることが予測される食品小売業

や外食産業を由来とする食品廃棄物の炭化に関しては不明な点が多い。

食品廃棄物は、動植物由来の有機性廃棄物であるため、炭化によるリサイクルに対して比較的抵抗が少ないと考えられるが、炭化を適用するにあたっては、水分が多くてエネルギー効率面で不利になることや、腐敗しやすく夾雑物を含み、排出地域が広範で、排出者の業種によって量、成分、性状のばらつきが大きいという課題を認識する必要がある。

これらのことから、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、第 2 章では、食品廃棄物の特性を把握するために、食品廃棄物の構成成分の割合と各構成成分の特性および炭化特性、また、各構成成分の炭化による炭素固定の効果を検証した。第 3 章は、炭化生成物の利用方法と可能性を明らかにするため、炭化生成物の品質の特性と変動を調査し、燃料および農業資材としての利用方法を検討した。第 4 章では、炭化システムが排出する、排ガスが大気に及ぼす影響、騒音・振動による周囲環境への影響、食品廃棄物の乾燥処理によって得られる再生水による水質環境に及ぼす影響を調査した。また、食品廃棄物炭化の事業化を想定し、炭化の炭素収支と LCA 分析 (life cycle assessment) による二酸化炭素の削減効果、食品廃棄物の炭化に必要なコストから、食品廃棄物炭化の環境影響と経済性を総合的に評価した。

第 1-1 表 食品産業における食品廃棄物の発生量との推移^{*1~4}

(単位：万 t)

業種	2001	2002	2003	2004	2008	2009	2010
食品 製造業	464 (60)	483 (66)	487 (69)	490 (72)	1,861 (93)	1,845 (93)	1,715 (94)
食品 卸売業	72 (32)	75 (26)	74 (45)	75 (41)	26 (59)	25 (58)	22 (54)
食品 小売業	236 (23)	260 (25)	262 (33)	260 (28)	131 (37)	135 (36)	119 (37)
外食 産業	320 (14)	313 (13)	312 (17)	310 (17)	297 (13)	267 (16)	229 (17)
食品産業 (計)	1,092 (37)	1,131 (40)	1,135 (43)	1,136 (45)	2,315 (79)	2,272 (81)	2,086 (82)

*1 2004 年度までは、「食品循環資源の再生利用等実態調査（農林水産省大臣官房統計部，2012）」から推計。2008 年度および 2010 年度は，定期報告（食品リサイクル法により発生量が年間 100 t を超える食品関連事業者は報告を義務付け）に加え，定期報告で補足できない部分を統計調査により把握し，全体を推計した。

*2 食品リサイクルの現状（2011，農林水産省），食品循環資源の再生利用等実態調査結果（農林水産省大臣官房統計部，2012），食品廃棄物等の発生量及び再生利用等の内訳（農林水産省，2012^a）をもとに，筆者がまとめた。

*3 上段は発生量，下段の（ ）は，再生利用等実施率（%）を示す。

*4 再生利用等実施率（%）=（発生抑制の実施量+再生利用量+熱回収の実施量×0.95+減量した量）÷（発生抑制の実施量+食品廃棄物の発生量）

第 1-2 表 バイオマスの利用技術*1

変換技術 〈製品および利用用途〉	特 性 (食品廃棄物に対する適応性)
燃 焼	
直接燃焼〈熱・電気〉	△いわゆる焼却処理
固形燃料化〈固形燃料〉	△高含水の場合の適応性は不明
熱化学変換	
炭化*2〈炭・熱分解ガス〉	◎高い分別精度を要求されない 燃料および農業資材として利用可能
エステル化*2 (BDF)	△廃油のみ適応
ガス化(熱・電気)	
液体燃料化(BTL)〈MeOH〉	
液体燃料化〈MeOH, DME〉	
熱分解液化〈ディーゼル燃料〉	
生物化学変換	
メタン発酵*2 〈メタン・熱・電気〉	◎ただし、燃料利用のみ
エタノール発酵(第 1 世代)〈エタノール〉	
セルロース系発酵(第 2 世代)〈化成品〉	
生物物理変換	
肥料(堆肥)化*2〈肥料(堆肥)〉	◎技術成熟・要高度分別
飼料化*2〈飼料化〉	◎技術成熟・要高度分別

*1 農林水産省「バイオマス事業化戦略検討チーム(第一回会合)」配布資料(2012^b)をもとに筆者が作成

*2 食品リサイクル法で規定される再生利用手法

第2章 食品廃棄物の特性評価

食品廃棄物には様々な食品類が混在しており，その組成は排出事業者の業種や発生場所によって多様に変化する(西谷, 2005; 酒井, 2008). 特に，再生利用実施率の低い食品小売業や外食産業の食品廃棄物の水分率は高く，堆肥化(コンポスト)の食品廃棄物の適正な水分率は35～40%と低く課題になっている(野呂瀬, 2009). また，これらの業種から発生する食品廃棄物は，調理後残渣や食べ残し残渣を含み，飼料化においては，油分の割合が高い食べ残し残渣を不得手にしている(高橋, 2008). 炭化は，エネルギー効率の低下の問題を除けば，食品廃棄物の高い水分率や油分に対応できる. しかし，灰の成分が多く炭素率が低いものや異物として含まれる金属については炭化することができない.

そのため，食品廃棄物の炭化および炭化生成物(炭)の品質を安定するには，原料となる食品廃棄物の特性を十分に把握することが重要である.

ここでは，食品廃棄物の特性を炭化する前に，あらかじめ簡易な方法で特性を把握できるようにすることを考え，第1節において，食品製造業，食品小売業および外食産業の食品廃棄物を個別に，構成成分(穀類，植物性残渣，動物性残渣，その他)の割合を仕分けして調査し，各構成成分の特性を明らかにするため，比重，水分，可燃分，灰分および炭素の割合を測定した. 第2節では，食品廃棄物の炭化特性を明らかにするために，各構成成分を炭化して，炭化生成物(炭)を分析した. 第3節では食品廃棄物の各構成成分の炭化による炭素固定の効果を検証した.

第1節 食品廃棄物の構成成分の割合と各構成成分の特性

材料および方法

1. 食品廃棄物の構成成分割合の調査

食品製造業(2 店舗)、食品小売業(11 店舗)、外食産業(25 店舗) で発生した食品廃棄物を、産業廃棄物のサンプリング方法(JIS K 0060-1992) によってサンプリングした。調査日に発生した食品廃棄物を業種別に全量回収して、重量および最大粒度を測定後、採取するサンプルの量および採取回数を定め適量を採取して供試材料とした。調査した食品小売業および外食産業は全国にチェーン展開する食品関連事業者とし、関西に位置する店舗を調査した。食品製造業は弁当類の製造業とした。食品小売業は、スーパーマーケットおよび百貨店とした。外食産業は、居酒屋レストラン店とした。食品小売業および外食産業から発生した食品廃棄物は、およそ週1回の頻度で、各業種につき累計24回サンプリングした。食品製造業は、夏および冬に1回ずつサンプリングした。

サンプリングした食品廃棄物は、手選別によって、穀類、植物性残渣、動物性残渣、その他(骨類、夾雑物、判別不能な物)の4つの構成成分に仕分けし(第2-1図)、湿重量を測定した。穀類には主に炊飯、パンおよび麺、動物性残渣には肉および魚、植物性残渣には野菜および果物、骨類には主に動物(鶏、豚、牛)や魚の骨、卵殻および貝殻が含まれた。箸や包装用ビニル、紙などの食品以外の物は、夾雑物として除去した。腐敗などによって仕分けできなかつたものは、判別不能な物と分類した。

2. 食品廃棄物の構成成分の特性解析

手選別を行った食品廃棄物の各構成成分のうち、高い割合で含まれていた、穀類、植物性残渣、動物性残渣について、以下の方法により、比重と水分、可燃分、灰分および炭素の割合を測定した。

比重の測定では、90 Lの容器に各構成成分を充填し、高さ10 cmより容器ごと落下させできた容器の空間にサンプルを充填した。計3回この作業を繰り返した後、求めた重量を容積で割って比重とした。1つの供試材料に対して3回測定して平均値を求めた。

水分は、約5 gの構成成分を乾燥機（Muffle Furnace F0510，ヤマト科学製）を用いて105℃で24 時間維持後秤量し、減量分として求めた。可燃分は、乾燥させた構成成分約1 gをマッフル炉（Muffle Furnace F0510，ヤマト科学製）で800℃，2 時間加熱後に秤量（AUW320，島津製作所製）し、減量分を可燃分とした。灰分は、次式によって、水分と可燃分の値より求めた。1つの供試材料に対して、3回測定して、平均値を求めた。廃棄物分析法（日本環境センター，1985）に基づき測定した。

$$\text{灰分(\%)} = 100(\%) - [\text{水分(\%)} + \text{可燃分(\%)}] \quad \dots (2-1)$$

炭素は、JIS M 8819 に基づき、十分に乾燥した構成成分を、ミルを用いて1 mm以下に粉碎し、約0.5 gの試料をNCコーダー（SUMIGRAPH NC-22，住友化学工業社製）を用いて測定した。



第 2-1 図 食品廃棄物の構成成分

- (A) 穀類, (B) 植物性残渣
(C) 動物性残渣, (D) その他 (骨類, 夾雑物, 判別不能な物)

結果

1. 食品廃棄物の構成成分の割合

穀類，植物性残渣および動物性残渣の割合の合計は，食品製造業が86.4%，食品小売業が96.8%，外食産業が91.5%を示し，これらの3つの構成成分が食品関連事業者の業種にかかわらず，85～95%の高い割合で含まれていた（第2-1表）。しかし，業種別に見ると食品製造業由来では穀類の割合が高かった。食品製造業由来では，回収した食品廃棄物の腐敗が進んでおり，仕分けの際に判別できないものが多かったため，「その他」の割合が13.6%と，他の業種に比べて高かった。食品小売業および外食産業由来の食品廃棄物は，植物性残渣の割合が高く，次いで穀類，動物性残渣の順であった。また，すべての業種において食品以外の夾雑物と判別された物は1.1～2.1%程度と低かった。

2. 食品廃棄物の構成成分の特性

穀類，植物性残渣および動物性残渣の比重は，それぞれ0.62 kg/L，0.68 kg/L，0.79 kg/Lで，いずれの間にも有意差は認められなかった（第2-2表）。各構成成分の水分の割合は，植物性残渣が最も高く68.2%を示した。他の構成成分でも同様に水分の割合が高く，およそ40～50%の範囲であった。構成成分の乾重量あたりの可燃分は，穀類が98.9%，植物性残渣が92.8%，動物性残渣が93.5%といずれも90%以上の高い値を示した。炭素の割合は，穀類が45.8%，植物性残渣が46.1%，動物性残渣が53.3%であった。

第2-1表 業種別の食品廃棄物の構成成分割合

(湿重量あたり %, 平均±標準誤差)

業 種	穀 類	植物性 残 渣	動物性 残 渣	小 計	その他* ⁴
食品製造業* ¹	73.1±0.6	7.2±0.8	6.1±0.8	86.4±1.0	13.6±1.1
食品小売業* ²	34.5±13.2	43.2±14.4	19.1±10.2	96.8±1.4	3.2±5.5
外食産業* ³	20.4±12.0	53.7±16.0	17.4±8.4	91.5±1.9	8.5±1.7

*¹ 弁当類を製造する工場 2 店舗から夏と冬に 1 回ずつサンプリングした (n=4)。

*² スーパーマーケットおよび百貨店 11 店舗から, おおよそ週 1 回の頻度で 1 店舗につき 24 回サンプリングした (n=264)。

*³ 居酒屋レストラン店 25 店舗から食品小売業の場合と同様の頻度でサンプリングした (n=600)。

*⁴ その他は, 骨類, 夾雑物, 判別不能な物の合計。

第2-2表 食品廃棄物の各構成成分の特性 (平均±標準誤差)

構成成分	n	比重 (kg/L)	水分 (湿重量 あたり%)	可燃分 (乾重量 あたり%)	灰分 (乾重量 あたり%)	炭素 (乾重量 あたり%)
穀類	3	0.62±0.07	42.9±11.8	98.9±5.8	1.1±0.1	45.8±1.5
植物性残渣	3	0.68±0.14	68.2±14.8	92.8±7.2	7.2±1.1	46.1±1.4
動物性残渣	3	0.79±0.13	49.1±9.4	93.5±4.3	6.5±2.0	53.3±1.7
平均			53.4±14.3	95.1±4.4	4.9±4.4	48.4±1.4
木炭原料 ^{*1}			13.1	99.7	0.3	49.6

^{*1} 木質バイオマス発電への期待, 全国林業改良普及協会(熊崎, 2000)より広葉樹(コナラ)のデータを抜粋.

^{*2} Tukey の多重比較検定の結果, すべての項目について, 穀類, 植物性残渣および動物性残渣の間に有意な差は認められなかった.

第2節 食品廃棄物の構成成分の炭化特性

材料および方法

1. 炭化試験

第2章 第1節で仕分けした食品廃棄物の各構成成分を105℃で、水分率が1%以下になるまで重量を測定しながら乾燥した。次に、乾燥した各構成成分を約150 g秤量して、第2-2図に示す炭化装置のステンレス製チャンバーに入れ、30℃/minの昇温速度で500℃まで加熱し、30分間維持した後に自然冷却した。冷却後、ステンレスチャンバーおよびコンデンサ①、②、③から生成した炭および熱分解液を回収し、重量を測定して収率を求めた。なお、炭は吸湿性を有するので、測定までの間、デシケーター内で保管した。炭および熱分解液として回収できなかった減量分をガスとした。炭化中、エアーポンプでチャンバー内の空気を強制的に排出し、酸素希薄の状態にするとともに、加熱によって発生した気化ガスをガラス管側に吸引し、コンデンサを通して外気へ排出するようにした。コンデンサ①および③は、8～10℃の冷却水で容器自体を冷却して熱分解液を回収した。コンデンサ②は同じ温度で冷却するとともに、コンデンサ容器に水を充填してガス洗浄を行いながら熱分解液を回収した。炭化の際には、炉内温度、気化ガス温度および冷却後ガス温度を測定して、それぞれを制御した。

2. 構成成分から得た炭の分析

(1) 炭の水分、揮発分、灰分、炭素率

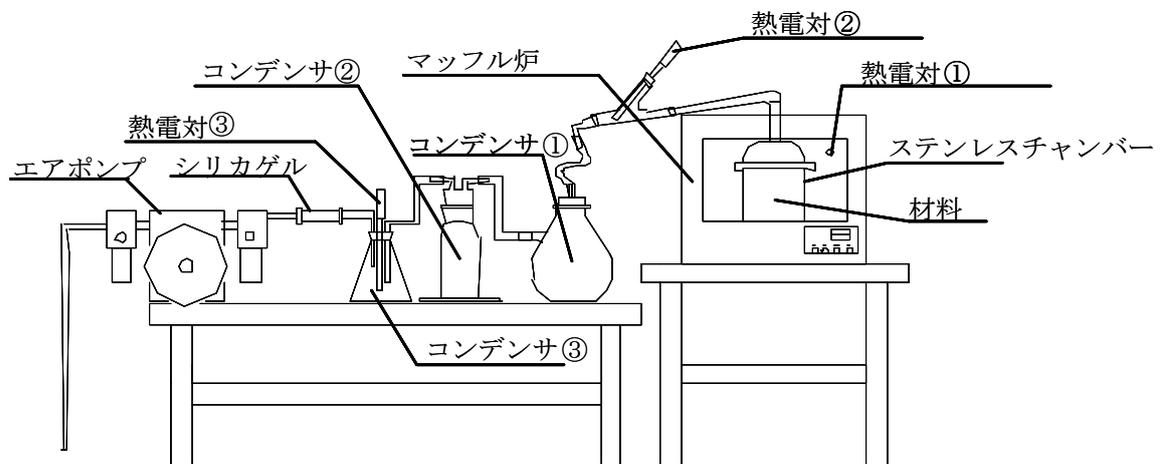
各構成成分の炭化によって得られた炭の水分、灰分、揮発分をJIS M 8812 に準拠して以下の方法で行った。水分は、1 gの炭を107℃で1時間乾燥したあと秤量し、減量分として求めた。揮発分は、るつぼに1 gの炭を入れ、900℃で7分間加熱して加熱後の減量分として求めた。灰分は、1 gの炭を815℃で90分間加熱した残渣とした。炭素率は、水分、灰分、揮発分の値より、以下の式(2-2)から求めた。また、一つの供

試材料に対して、3回測定し、平均値を求めた。

$$\text{炭素率 (\%)} = 100 (\%) - \text{水分 (\%)} - \text{灰分 (\%)} - \text{揮発分 (\%)} \cdots (2-2)$$

(2) 炭の元素分析

各構成成分から得た炭について、全窒素 (T-N) , P, K, Mg, Ca, B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn, Naを測定した。全窒素はガンニング変法を用いた (土壤環境分析法編集委員会編, 2003) 。その他の元素は乾式灰化法 (500℃) で試料1 gを灰化し、水に溶かした後、ICP-AES (VISTA-MPX, エスアイアイ・ナノテクノロジー社製) で測定した (西口, 2007) 。各試料について3回測定して、平均値を用いた。



第 2-2 図 小型炭化装置

結果

1. 炭化生成物の収率

食品廃棄物中の穀類、植物性残渣および動物性残渣を 500 °C で炭化した結果、それぞれ、乾重量の 31.3%, 27.9%, 25.8% が炭であり、木材を炭化した場合とほぼ同等の炭の収率であることが明らかになった (第 2-3 表)。熱分解液の収率は、穀類、植物性残渣および動物性残渣の乾重量あたりで、それぞれ 49.9%, 47.9%, 56.5% であり、動物性残渣が最も高かった。非凝縮性ガスの収率は、穀類、植物性残渣および動物性残渣の乾重量あたりで、それぞれ 18.8%, 24.2%, 17.7% であった。全体では、炭、熱分解液および非凝縮性ガスの収率が、それぞれ 28.3%, 51.4%, 20.2% だった。

2. 炭の分析

炭の水分は、乾重量あたり 1.2~2.0% で、各構成成分間に有意差はなかった (第 2-4 表)。揮発分は、穀類、植物性残渣、動物性残渣でそれぞれ 14.5%, 14.4%, 14.8% と、ほぼ同じ値を示した。灰分は穀類から得られた炭が 2.9% と有意に低かった。炭素率は、穀類由来の炭で 80.6% と高く、植物性残渣および動物性残渣由来の炭ではそれぞれ、66.7%, 63.4% と低かった。

炭の全窒素 (T-N) 含有率は、動物性残渣由来の場合には 5.5% と高かった (第 2-5 表)。これに対して、穀類および植物性残渣はそれぞれ 3.2%, 3.4% と低く、ほぼ同じ含有量であった。P は動物性残渣で 3.7% と高く、穀類や植物性残渣では、それぞれ 0.7%, 1.7% と低かった。K や Mg の含有率は、いずれの構成成分で同様であった。Na はすべての構成成分において得られた炭中に 0.2~0.5% 含有していた。多量元素含有率の合計は、動物性残渣が 16.1% と高いのに対して、穀類および植物性残渣は、それぞれ 6.0% および 7.9% と低かった。

炭の Fe, B, Mn, Cu, Mo の乾重量あたりの含有率は、穀類の場合、それぞれ、365 μ g/g, 79 μ g/g, 139 μ g/g, 13 μ g/g, 2.5 μ g/g

と高かった（第 2-6 表）。植物性残渣の場合は、それぞれ 372 $\mu\text{g/g}$, 63 $\mu\text{g/g}$, 120 $\mu\text{g/g}$, 16 $\mu\text{g/g}$, 1.4 $\mu\text{g/g}$ とほぼ同じ含有率であった。これに対して、動物性残渣は、それぞれの微量元素濃度が 261 $\mu\text{g/g}$, 36 $\mu\text{g/g}$, 20 $\mu\text{g/g}$, 10 $\mu\text{g/g}$, 0.9 $\mu\text{g/g}$ と低かった。Zn の含有率は、穀類および植物性残渣が、それぞれ 53 $\mu\text{g/g}$, 71 $\mu\text{g/g}$ であったのに対して、動物性残渣では 140 $\mu\text{g/g}$ と有意に高かった。微量元素含有率の合計は、穀類および植物性残渣が、それぞれ 657 $\mu\text{g/g}$, 648 $\mu\text{g/g}$ であったのに対して、動物性残渣では、473 $\mu\text{g/g}$ と低かった。

第 2-3 表 食品廃棄物の各構成成分の炭化生成物の収率

(乾重量あたり %)

構成成分	n	炭	熱分解液	非凝縮性ガス
穀類	5	31.3	49.9	18.8
植物性残渣	5	27.9	47.9	24.2
動物性残渣	5	25.8	56.5	17.7
全体(平均)		28.3	51.4	20.2
木炭 ^{*1}	1	31.3	46.7	22.0

*1 広葉樹（コナラ）を材料として試験を行なった場合のデータを示す。

*2 Tukey の多重比較検定の結果、各構成成分間において炭化生成物の収率（炭、熱分解液および非凝縮性ガス）に有意な差は認められなかった。

第 2-4 表 食品廃棄物の各構成成分から得られた炭の水分、揮発分、灰分および炭素率

(乾重量あたり %)

構成成分	n	水分	揮発分	灰分	炭素率
穀類	5	2.0 ^a	14.5 ^a	2.9 ^b	80.6 ^a
植物性残渣	5	1.2 ^a	14.4 ^a	17.8 ^a	66.7 ^b
動物性残渣	5	1.3 ^a	14.8 ^a	20.5 ^a	63.4 ^b
全体(平均)		1.5	14.6	13.7	70.2
木炭 ^{*1}		5~10	12~25	1~2	66~80

*1 広葉樹（コナラ）を原料とする木炭の品質（谷田貝 1996）。

*2 各構成成分について、異なるアルファベットは 5%水準で有意差があることを示す(Tukey の多重比較検定)。

第2-5表 食品廃棄物の各構成成分から得られた炭の多量元素含有率

(乾重量あたり %)

構成成分	n	T-N	P	K	Ca	Mg	Na	合計
穀類	5	3.2 ^a	0.7 ^a	0.9 ^a	0.8 ^a	0.2 ^a	0.2 ^a	6.0 ^a
植物性残渣	5	3.4 ^a	1.7 ^a	1.2 ^a	0.9 ^a	0.3 ^a	0.4 ^a	7.9 ^a
動物性残渣	5	5.5 ^a	3.7 ^a	1.2 ^a	4.9 ^a	0.3 ^a	0.5 ^a	16.1 ^b
全体(平均)		4.0	2.0	1.1	2.2	0.3	0.4	10.0

* 各元素について、異なるアルファベットは5%水準で有意な差があることを示す(Tukeyの多重比較検定).

第2-6表 食品廃棄物の各構成成分から得られた炭の微量元素含有率

(乾重量あたり $\mu\text{g/g}$)

構成成分	n	Fe	B	Mn	Zn	Cu	Mo	Total
穀類	5	365 ^a	79 ^a	139 ^a	53 ^a	13 ^a	2.5 ^a	657 ^a
植物性残渣	5	372 ^a	63 ^a	120 ^a	71 ^a	16 ^a	1.4 ^a	648 ^a
動物性残渣	5	261 ^a	36 ^a	20 ^b	140 ^b	10 ^a	0.9 ^a	473 ^a
全体(平均)		333	59	93	88	13	1.6	593

* 各元素について異なるアルファベットは5%水準で有意な差があることを示す(Tukeyの多重比較検定).

第3節 食品廃棄物の各構成成分の炭化による炭素固定の効果

材料および方法

食品廃棄物の各構成成分（穀類，植物性残渣，動物性残渣）中の炭素が，炭化して得られた炭に固定される割合（炭素固定率）を以下の式によって求めた．ここでは，第2章 第1節および第2節において示された構成成分の炭素率（穀類45.8%，植物性残渣46.1%，動物性残渣53.3%，第2-2表），炭の収率（穀類31.3%，植物性残渣27.9%，動物性残渣25.8%，第2-3表），炭の炭素率（穀類80.6%，植物性残渣66.7%，動物性残渣63.4%，第2-4表）を使用した．木材炭化の場合と比較するため，同様に，木材の炭素率を49.6%（第2-2表），木炭の収率を31.3%（第2-3表），木炭の炭素率を66～80%（第2-4表）として固定炭素率を求めた．

炭素固定率(%) =

$$\text{炭の収率} \times \text{炭の炭素率} / \text{構成成分の炭素率} \times 100 \quad \dots (2-3)$$

結果

第2-7表に，炭素固定率を示した．穀類，植物性残渣および動物性残渣に含まれる炭素を100とした場合，炭化によって，それぞれ55.1%，40.4%，30.7%の炭素が炭に固定された．全体の炭素固定率は41.0%となり，木材炭化の場合と同等であった．

第2-7表 構成成分の炭化による炭素固定率

構成成分	構成成分 炭素率 (乾重量あたり%)	炭の収率 (乾重量あたり%)	炭の炭素率 (乾重量あたり%)	炭素固定率* ¹ (%)
穀 類	45.8	31.3	80.6	55.1
植物性残渣	46.1	27.9	66.7	40.4
動物性残渣	53.3	25.8	63.4	30.7
全体(平均)	48.4	28.3	70.2	41.0
木 炭* ²	49.6	31.3	66～80	42～51

*¹ 炭素固定率(%) = 炭の収率×炭の炭素率/構成成分の炭素率×100

*² 第2-2表, 第2-3表および第2-4表に, 「木炭」として示したデータを引用した

第4節 考察

食品製造業，食品小売業および外食産業から発生した食品廃棄物の構成成分の割合は，食品関連事業者の業種によって，わずかに異なっていたが，すべての食品関連事業者において同様に，穀類，植物性残渣および動物性残渣の合計は85～95%と高い値を示した(第2-1表)．これは，食品関連事業者より発生する食品廃棄物の大きな特徴といえる．あらかじめ食品廃棄物の構成成分を調べて，廃棄物全体の特性を把握できれば，炭化温度や時間などの処理計画の作成・検討や炭化生成物の品質予測に有効である．

一方，夾雑物の割合は1.1～2.1%と低かった．西谷(2005)によると，病院，学校といった公共施設で発生する食品廃棄物に混入する異物は，分別排出を導入していない施設では最大で17%程度であった．金属類やガラス類が混入した場合には，炭化できず炭に残るので，食品関連事業者による分別の協力が不可欠である．また，食品廃棄物をいかに新鮮な状態で回収できるかが重要である．構成成分の調査の際に，腐敗により，仕分けができなかったことがあった．腐敗が進行して液状化すると，回収において漏洩および悪臭の原因になり，ベルトコンベア等による工場内の搬送効率が著しく低下する．

構成成分の割合(第2-1表)と各構成成分中の炭素量(第2-2表)を乗じて，各業種の食品廃棄物乾重量あたりの炭素を計算すると，食品製造業で50.2%，食品小売業で49.8%，外食産業で47.1%程度であり，ほぼ同等の炭素を含有していることが推測された．これは，木炭原料である広葉樹(コナラ)の場合に近い値である．家畜排泄物，食品廃棄物，建設発生木材，製材工場残材，古紙，パルプ工場廃液，下水汚泥，し尿残渣などの廃棄系バイオマスおよび稲わら，麦わら，もみ殻などの農業残渣や，林地残材および街路管理の際に発生する剪定枝葉が，同様に40～50%程度の炭素を含有することが報告されている(園田，2005；山田，2006；Nakamura，2005)．

食品廃棄物の各構成成分を500℃で炭化すると，穀類，植物性残渣お

よび動物性残渣で、それぞれ31.3%、27.9%、25.8%の炭が得られた(第2-3表)。食品廃棄物全体で考えると、炭化した場合の炭の収率は、これら主要な3つの構成成分が示した25~30%の範囲になると推測される。得られた炭の炭素率は、主要な3つの構成成分(穀類、植物性残渣、動物性残渣)において60~80%の範囲にあった(第2-4表)。したがって、食品廃棄物全体では、炭化して得られる炭の炭素率は、60~80%の範囲と考えられた。

得られた炭について多量元素6種類(第2-5表)、微量元素6種類(第2-6表)を測定した結果、PやKなどの植物に有用な元素を含んでいたため、食品廃棄物由来の炭は肥料や土壌改良材として農業分野での利用が期待される。ただし、炭の肥料成分の測定に基づく適切な施用が前提である。これら食品廃棄物から得られる炭は、食品関連事業者からの発生→回収→運搬→炭化リサイクル→リサイクル製品の流通および利用、などの工程を経る。その際に、リサイクル製品に重金属類やダイオキシン類等の有害物質が含まれていないことが確認できれば、その用途を拡大できる可能性がある。さらに、肥料や土壌改良材として土壌に施用することができれば、土中への炭素還元という、いわゆるカーボンマイナスを実現できる可能性があり、炭化が地表上の二酸化炭素の削減に有効になると考えられる。

食品関連事業者より発生する食品廃棄物のうち、85~95%の割合で含まれる穀類、植物性残渣および動物性残渣の炭化による炭素固定率は、30.7~55.1%の範囲にあり(第2-7表)、食品廃棄物の炭化による炭素固定率と考えられた。したがって、食品廃棄物の炭化は、焼却等と比較して、炭素放出を30~55%抑制できると考えられた。

西谷(2005)によれば、食品廃棄物の飼料化により、80~100%の炭素を飼料として利用することができ、炭素利用効率はメタン発酵では45%、発酵過程で発生する消化液の農地還元が可能とすれば70%、堆肥化では30~40%であると考察されている。一方、炭化によって炭に固定される炭素は30~55%であり、残りの炭素は、炭化過程で気化していると考えられる。気化ガスやタールを含む熱分解液として回収し、

土壌改良材（谷田貝，1991）や燃料（大竹，2009）として有効に利用できれば炭素利用効率は高い水準になり，既述の技術とならんで食品廃棄物の有効なリサイクル技術になるものと考えられた．

第3章 炭化生成物の利用方法と可能性

木材の炭化では、炭化生成物を効率的に利用でき、かつ炭素の固定化に貢献できることが明らかにされている。木炭は、従来のような燃料利用だけでなく、木炭の構造特性を応用した土壌改良資材（大平，1992；人見，1993；安部，1998；林晴美，2003^a），水質浄化資材（谷田貝，1995；谷田貝，2005，京都府新政策形成研究会，2004），床下調湿材等の建材（藤田，2002），消臭用資材（谷田貝，1991；安部，2000），環境浄化資材（安部，2003）としても利用されている。

一方、食品廃棄物についても、コーヒー粕（石橋，2001；林順一，2000^a），ビール粕（林，2000^b；岡本，2002；岡本，2003），おから（室山，1996），醸造粕（遠藤，1995）について、吸着特性を活かした脱臭材、消臭材、水質浄化材や土壌改良資材としての利用方法が検討され、それぞれの利用に応じた機能性を有することが示されている。しかし、いわゆる食品製造業で発生する単一の食品原料を由来とする廃棄物を対象とした場合が多く、食べ残しや調理過程で発生する厨芥、さまざまなものが混在していることが予測される食品小売業や外食産業を由来とする食品廃棄物の炭化に関しては不明な点が多い。また、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、炭の品質を一定にする必要がある。

食品廃棄物の炭化によって得られる炭の燃料利用は、化石燃料の代替利用となる。国内の産業のうち、石炭使用量が多いのはセメント産業なので（資源エネルギー庁，2009），セメント産業が求める燃料品質と比較する必要があると考えられた。

木炭は、かつて家庭用燃料の代表として炊事や暖房用に広く消費されてきたが、高度経済成長期に使い勝手の良い電気、灯油、ガスなどの代替燃料に取って代われ消費量が激減した。しかし近年では、農業資材としての用途が注目され、木炭の消費量が回復しつつある。木炭を農業資材として活用した場合、土壌の通気性、透水性、保水性、保肥性の改善、有用微生物の働きの活性化、土壌への炭素分供給や作物の冷害対策、土壌菌活性の向上などさまざまな利点がある。中でも、透水性の改善は土壌改良資材として有効である。木炭を土壌

に施用すると、植物の種類および土壌の状態によって効果および効能は異なるものの、一貫して、土壌環境が改善されて、植物の生育、収穫量が向上したと報告されている（高木，1997；小川，1996；磯部，1996；塚越，2005；川口，2004；林晴美，2003^b）。食品廃棄物から得られる炭も、上記のような効果が期待される。

一方、食品廃棄物の炭は、養液栽培用の固形培地としての利用に可能性がある。現在、養液栽培では、ロックウールが固形培地として多く利用されている。しかし、ロックウールは不燃物であるため使用後の処理に困っており、もみ殻や樹皮などの有機・無機質資材の導入による新たな取り組みが行われている。食品廃棄物から得られる炭は軟質であり、粉碎・分粒など炭の粒径調節によって粒度を操作できるため、養液栽培用培地として必要な物理性を操作することが可能である。また、炭は炭素を主成分とした安定的物質であり、培地としての利用には向いていると考えられる。さらに、炭は無菌に近く、加熱処理（殺菌処理）による再利用化や焼却処分が可能である。比重が0.2～0.4と非常に軽いので、運搬面や他の作業性（作物体の移動等）からも有利と考えられる。

以上のことより、第1節では、炭化生成物の品質の特性と変動 について検証し、様々な食品類を含む食品廃棄物を利用するのに必要な品質の特性とばらつき、およびばらつきに影響を及ぼす変動要因の解析を行なった。第2節で、食品廃棄物から得た炭の燃料品質についての評価した。第3節では、既に土壌改良資材として利用されている木炭と比較して、第1項では、土壌への炭の施用による透水性改善率の効果を評価するとともに、第2項で、土壌中の微生物の多様性および活性に及ぼす影響を調査した。また、第3項では、生産圃場への炭の施用が作物の生育に及ぼす効果を検討した。第4項では、食品廃棄物から得た炭について、養液栽培における培地利用について検証し、食品廃棄物の利用方法と可能性を検討した。

第1節 炭化生成物の品質の特性と変動

共通の材料および方法

1. 食品廃棄物の回収

近畿圏に事業所を持つ食品関連事業者から食品廃棄物を回収した。その内訳は、食品製造業は66店舗、小売業は10店舗、外食産業は7店舗とした。各店舗で反復して食品廃棄物を回収し、その回数は、食品製造業、食品小売業および外食産業で、それぞれ、1,860回、958回、1,275回であり、全回収量は約5,000tであった。回収の際には、食品廃棄物の発生形態、頻度、廃棄物保管容量および事業場回収スペースに合わせて最適な回収車両を使用した。

2. 炭化

回収した食品廃棄物を600kg/hでキルン式乾燥炉に送り乾燥した。乾燥前の食品廃棄物の平均含水率は65%、乾燥後は19%だった。その後、260kg/hでキルン式炭化炉（内熱式ロータリー炭化炉）に送った。約5,000tの食品廃棄物の炭化に24時間運転で329日間を要した。約3週間に1度の頻度で約1日間運転を停止して機械を保守点検した。炭化の際には、バーナー出力、炉回転数および炉内導入空気量を制御し、炉内で発生した熱分解ガス温度を250～700℃の範囲で制御した結果、平均で321℃であった。炭化炉は2重円筒型で、内筒で炭化を行い、外筒で空気流入を遮断し低温度（150℃以下）を保って炭を冷却した。この方法によって、火種等の混入による炭の発火は認められなかった。食品廃棄物の回収時に使用したビニル袋などは、あらかじめ風力選別機で98%以上の精度で除外した。

3. 食品廃棄物と炭のサンプリング

食品廃棄物および炭は、JIS K 0060-1992にしたがってサンプリングした。食品廃棄物は、キルン式乾燥炉への搬送コンベアから採取した。炭は、生成後ただちに炭化炉から採取した。双方とも、24時間の運転中、2時間ごとに1Lを採取し（12インクリメント）、十分に攪拌して24時間の平均サンプルとし

て分析した（24時間平均サンプル）．この操作を毎日329日間行った．炭は吸湿性があるので，採取から測定までの間，デシケーター内で保管した．

第1項 食品廃棄物の特性

材料および方法

食品廃棄物の24時間平均サンプル約5gを乾燥炉（Muffle Furnace F0510，ヤマト科学製）を用いて105℃で24時間乾燥後，質量測定器（AUW320，島津製作所製）で秤量し，減量分を水分として求めた．1サンプルにつき3回測定し，平均値を用いた．構成成分は，手選別によって，穀類，植物性残渣，動物性残渣，骨類，夾雑物，油脂類およびその他の7つに仕分けし，それぞれの湿重量を測定して割合を求めた．箸や包装用ビニル，紙などの食品以外は，夾雑物とした．油脂類として分別したものの多くは，菓子に用いるチョコレートやクリーム類とした．食品類のつぶれによって判別ができなかったものは，判別不能な物に分類した．

結果

回収した食品廃棄物は，産業廃棄物に分類される食品製造業の割合が70.3%，一般廃棄物（事業系）では，食品小売業および外食産業の割合が，それぞれ22.1%および6.7%だった（第3-1表）．穀類，植物性残渣および動物性残渣の割合は，それぞれ湿重量あたりで，37.0%，42.7%および12.3%だった（第3-2表）．これらの構成成分の合計割合は92.3%であった．油脂類は6.6%含まれていた．回収した食品廃棄物全体の水分率は65.0%で，キルン式乾燥炉で乾燥した後は19.1%だった．

第3-1表 回収した食品廃棄物の廃棄物区分別および排出事業者の業種別割合

(湿重量あたり %)

産業廃棄物	一般廃棄物		その他*
食品製造業	食品小売業	外食産業	
70.3	22.1	6.7	0.9

* 水分調整剤として食品廃棄物に添加したおがくず

第3-2表 回収した食品廃棄物の構成成分の割合

(湿重量あたり %)

穀類	植物性残渣	動物性残渣	骨類	夾雑物	油脂類	判別不能
37.0	42.7	12.3	0.8	0.5	6.6	0.1

第2項 食品廃棄物から得られた炭の特性

供試材料および方法

1. 炭の炭素率

採取した炭の24時間平均サンプルについて、水分、灰分、揮発分および炭素率をJIS M 8812に準拠して以下の方法で測定した。水分は、炭1gを乾燥機(Muffle Furnace F0510, ヤマト科学製)を用いて107℃で1時間乾燥したあと秤量し、減量分として求めた。揮発分は、るつぼに炭を1g秤り取り、900℃で7分間加熱して減量分として求めた。灰分は皿に炭を1g秤り取り、815℃で90分間加熱して残渣量とした。炭素率は、水分、灰分、揮発分の値より、以下の式(3-1)で求めた。1サンプルにつき3回測定し、平均値を用いた。

$$\text{炭素率(\%)} = 100(\%) - \text{水分(\%)} - \text{灰分(\%)} - \text{揮発分(\%)} \quad \dots (3-1)$$

2. 炭の発熱量

採取した炭の24時間平均サンプルについて、三成分分析(水分、可燃分、灰分)を行い、(3-2)の式より発熱量を推定した(日本環境衛生センター, 1985)。式中のBは炭の可燃分(%)を示す。 α は、可燃分の平均発熱量を示し、JIS M 8814に従ってボンブ熱量計(CA-4AJ, 島津製作所製)で熱量を実測して求めた($\alpha=341$)。Wは、炭中の水分(%)を示す。水分は、各構成成分を105℃で24時間乾燥後秤量し、減量分として求めた。可燃分は、乾燥させた構成成分を800℃のマッフル炉で2時間強熱した後秤量し、減量分として求めた。1つの供試材料に対し、3回測定し、その平均値を式(3-2)に代入して発熱量を推定した。

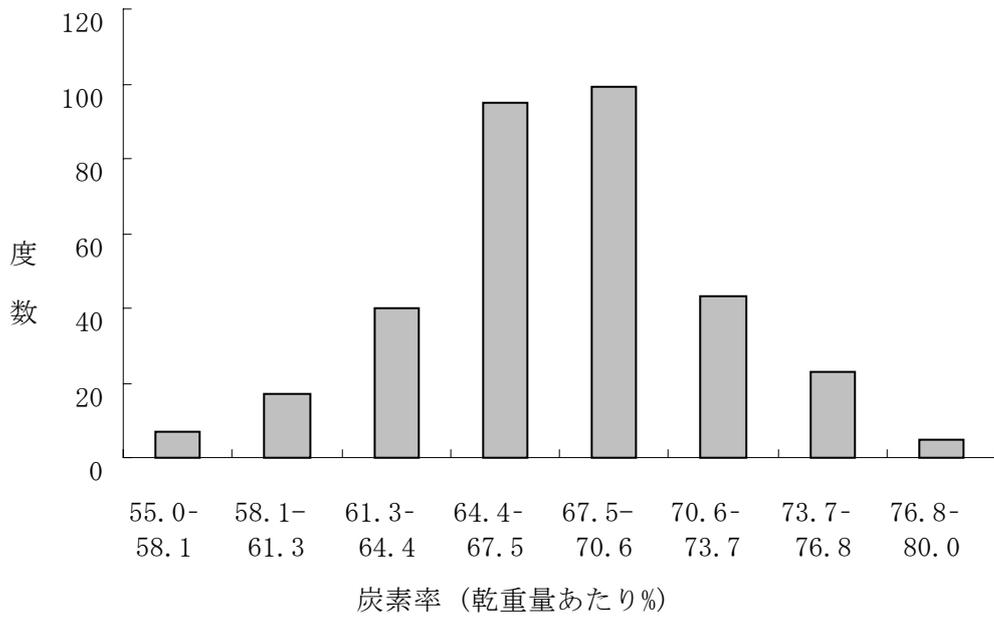
$$\text{発熱量(MJ/kg)} = \alpha B - 25W \quad \dots (3-2)$$

3. 肥料成分分析

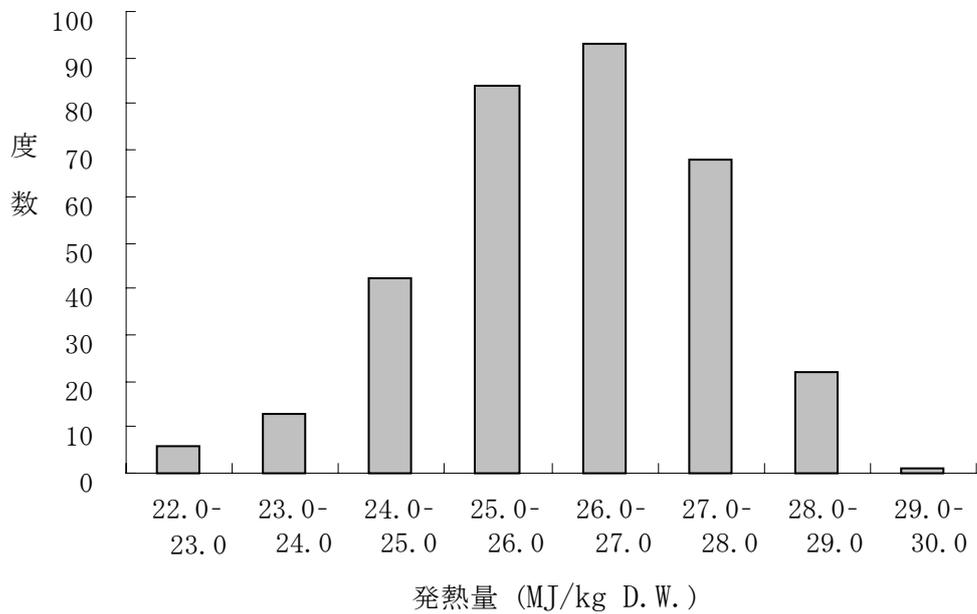
採取した炭の 24 時間平均サンプルについて P_2O_5 , K_2O , CaO , MgO , Fe_2O_3 を測定し、合計量を肥料成分量とした。乾式灰化法 (500 °C) (西口 2007) で試料 1 g を灰化し、水に溶かした後、ICP-AES (VISTA-MPX, エスアイアイ・ナノテクノロジー社製) を用いて測定した。各試料について 3 回測定して、平均値を求めた。

結果

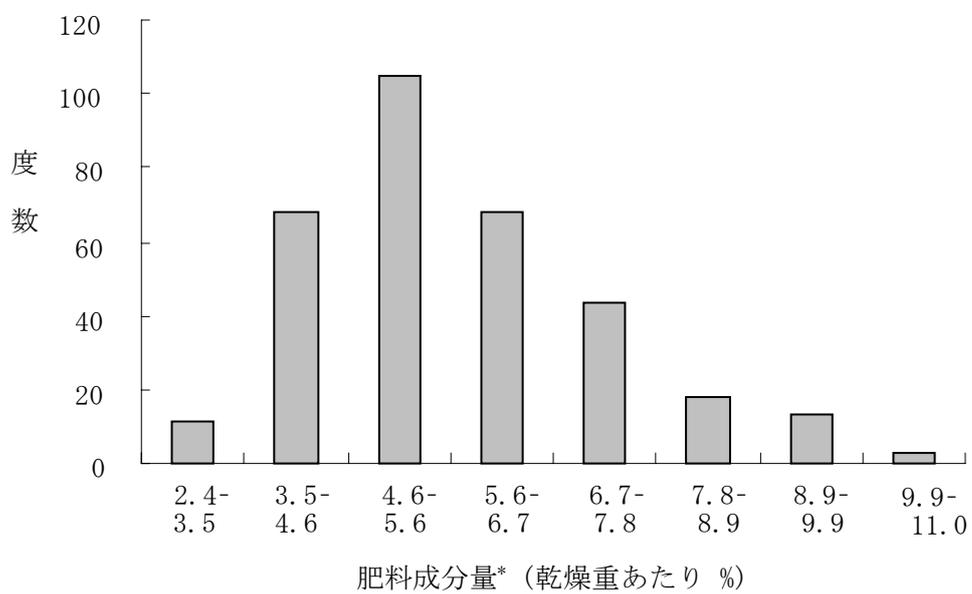
食品製造業、食品小売業および外食産業から回収した食品廃棄物を 250～700°C の範囲で炭化した結果、炭の収率は食品廃棄物の乾重量あたり 17.3% だった。得られた炭の炭素率の度数分布を第 3-1 図に示した。炭の炭素率は、55.0～79.4% の範囲であり、平均は 67.7% であった。炭の灰分および揮発分の平均がそれぞれ 16.7% および 16.7% だった。発熱量の度数分布を第 3-2 図に示した。発熱量は炭の乾重量あたりで、22.0～29.2 MJ/kg D.W. で (D.W.: dry weight) あり、その平均は 26.1 MJ/kg D.W. であった。肥料成分量の度数分布を第 3-3 図に示した。肥料成分量は 2.5 から 11.0% の範囲で確認され、その平均は 5.7% だった。肥料成分のうち、 K_2O , CaO , P_2O_5 , MgO および Fe_2O_3 のそれぞれの平均含有量は、2.4%, 1.7%, 1.4%, 0.2% および 0.1% だった。これらの結果より、炭の品質の変動が確認された。



第3-1図 食品廃棄物から得た炭の固定炭素率の度数分布



第3-2図 食品廃棄物から得た炭の発熱量の度数分布



第 3-3 図 食品廃棄物から得た炭の肥料成分量の度数分布

* P_2O_5 , K_2O , CaO , MgO , Fe_2O_3 の合計量を肥料成分量とした

第3項 変動要因が炭の品質に及ぼす影響

材料および方法

炭の品質（炭素率，発熱量および肥料成分量）に影響すると考えられた，変動要因（季節，食品製造業の割合，構成成分の割合および炭化温度）の影響を解析した．

食品廃棄物を回収した季節は，春季（3～5月），夏季（6～8月），秋季（9～11月）および冬季（12～2月）の4水準に定めた．食品製造業の割合は，食品廃棄物を回収した食品関連事業者の業種（食品製造業，食品小売業，外食産業）の中から，食品製造業を由来とする食品廃棄物の割合が少ない（0～70%）および多い（71～100%）の2水準とした．構成成分の割合は，食品廃棄物中の穀類の割合が少ない（0～39%）および多い（40～99%）の2水準とした．炭化温度は，低い（224～314℃）および高い（314～671℃）の2水準とした．すべての品質について，季節の影響は水準間においてTukeyの多重検定を，その他の変動要因は水準間のt検定を行った．

変動要因の効果量は水本の報告（2008）に従って解析した．t検定や分散分析では，サンプルサイズ（サンプル数，あるいは被験者数）が大きくなるほど，統計的に有意になりやすいという問題がある．一方，効果量は，サンプルサイズによって変化することはなく，測定単位に頼らない指標となっている．そのため，効果量を用いれば，単位の異なる変数を用いた研究の間でも，実験条件の効果の大きさを互いに比較することができる特性があり，最近の研究論文に使用されるようになった．

効果量は η^2 で表され，以下の式（3-4）により導いた．効果量は0～1で表され，数値が大きいほど影響が大きいことを表わす．

$$\text{効果量} (\eta^2) = \text{変動要因の平方和} / \text{全体の平方和} \quad \dots (3-4)$$

（水本，2008）

結果

1. 変動要因の効果量

第 3-3 表に、変動要因（季節、食品製造業の割合、穀類の割合、炭化温度）が炭の品質（炭素率、発熱量、肥料成分量）に及ぼす効果量を示した。品質に関する 3 項目のすべてが、穀類の割合 > 季節 > 炭化温度 > 製造業の割合の順で影響が大きかった。変動要因のうち、炭素率に対する穀類の割合の効果量が 0.23 と最も高い値を示した。食品製造業の割合および炭化温度の効果量は、品質に関するすべての項目に対し、低い値を示した。発熱量および肥料成分量に対する穀類の割合および季節の効果量は、これらの中間の値を示した。

2. 変動要因が炭の品質に及ぼす影響の方向

効果量では、各変動要因の影響力しか示せないなので、詳しく調べるために、分散分析および t 検定によって、各変動要因の炭の品質に及ぼす影響の方向を評価した（第 3-4 表）。

炭素率は、夏季では炭の乾燥重あたり 68.7% と高いのに対して、冬季では 65.9% と低かった。食品製造業の割合および穀類の割合がそれぞれ多い場合には、炭素率が上昇した。また、炭化温度が高い場合には、炭素率が低下した。発熱量は、夏季では炭の乾重量あたり 26.6 MJ/kg D.W.、冬季では 25.5 MJ/kg D.W. となり、季節の影響は小さかった。食品製造業の割合および穀類の割合が多い場合には、わずかであるが発熱量が増加した。また、炭化温度が高い場合には、発熱量は減少した。肥料成分量は、春季では乾重量あたり 6.2% と高く、夏季では、乾重量あたり 5.1% と低かった。製造業の割合および穀類の割合が多い場合には、肥料成分量は減少した。また、炭化温度が高い場合には、肥料成分は増加する傾向を示した。

第 3-3 表 変動要因（季節，食品製造業の割合，穀類の割合，炭化温度）が炭の品質（炭素率，発熱量，肥料成分量）に及ぼす効果量^{*1~2}

変動要因	効果量（ η^2 ）		
	炭素率	発熱量	肥料成分量
季節	0.06	0.10	0.08
製造業の割合	0.01	0.02	0.01
穀類の割合	0.23	0.13	0.10
炭化温度	0.05	0.04	0.03

*1 効果量は，水本らの報告（2008）をもとに以下の計算式で算出した。

効果量（ η^2 ）=変動要因の平方和/全体の平方和

*2 各効果量は0~1で表され，数値が大きいほど影響が大きいことを示す。

第 3-4 表 変動要因（季節，製造業の割合，穀類の割合，炭化温度）が炭の品質（炭素率，発熱量，肥料成分量）に及ぼす影響の方向

変動要因	サンプル数	炭素率 (乾重量あたり %)	発熱量 (乾重量あたり MJ/kg)	肥料成分量 (乾重量あたり %)
季節 ^{*1}				
春季(3-5月)	80	67.7 ^c	25.9 ^c	6.2 ^a
夏季(6-8月)	87	68.7 ^a	26.6 ^a	5.1 ^d
秋季(9-11月)	83	68.3 ^b	26.4 ^b	5.7 ^c
冬季(12-2月)	79	65.9 ^d	25.5 ^d	5.9 ^b
食品製造業の割合				
少(0-70%)	165	67.2	26.0	5.8
多(71-100%)	164	68.2	26.3	5.6
t-test		* ^{*2}	*	ns
穀類の割合				
少(0-39%)	165	65.6	25.7	6.2
多(40-99%)	164	69.7	26.6	5.2
t-test		***	***	***
炭化温度				
低(224-314℃)	165	68.6	26.4	5.4
高(315-671℃)	164	66.7	25.9	6.0
t-test		***	***	**

*¹ 炭素率および発熱量の a, b:d 間に 1%水準で有意差が認められた。肥料成分量の b:c 間と a:d 間にそれぞれ 1%水準および 5%水準で有意差が認められた (Tukey の多重比較検定)。

*² *: $p < 0.05$, **: $p < 0.005$, ***: $p < 0.001$, ns: 5%水準で有意差なしを示す (t-test)。

第2節 炭化生成物の燃料利用

材料および方法

1. 材料

回収した食品廃棄物を炭化して得られた炭を材料とした。炭を以下の方法で採取して、できるだけ平均的な品質の炭を供試した。

粒度分布，元素組成，引火点および灰の融点は，第3章 第1節 第2項で示した329サンプルを分析した炭素率の平均値(67.7%)に近い炭を選んで測定した。その実測値は67.3%であった。

炭の水分，灰分，揮発分，炭素率および発熱量は，第3章 第1節 第2項の測定値を使用した。JIS K 0060-1992にしたがって，生成後ただちに炭化炉から，24時間の運転中に2時間ごとに1Lの炭を採取し(12インクリメント)，十分に攪拌して24時間の平均サンプルとした。この操作を329日間，毎日実施して，329サンプルを採取した。

2. 分析方法

粒度分布は，採取した炭を，温風乾燥機を用いて107°Cで一晩乾燥し，JISZ8801に定める試験用網ふるい(目開き1 mm，2.8 mm，5 mmおよび10 mm)で分粒して調べた。

発熱量は，JISM8814に準拠し，ボンブ熱量計(CA-4AJ，島津製作所製)に適量の炭を導入して測定した。

元素組成は以下の方法で分析した。塩素(Cl)は，JISZ7302-6に準拠し，あらかじめ1,000°Cに加熱した石英製燃焼管中に試料を導入後，空気を注入し燃焼させ，生じたガスを水に吸収させて塩酸とし，イオンクロマトグラフ法を用いて定量した。硫黄(S)は，JISK2541-3に準拠し，あらかじめ1,000°Cに加熱した石英製燃焼管中に試料を導入後，空気を注入し燃焼させ，生成した硫黄酸化物を3%過酸化水素水に吸収させて硫酸とし，この硫黄を水酸化ナトリウム標準液(0.05 mol/L)で中和滴定して求めた。

引火点は、JISK2265 に準拠して測定した。50 mL の試料をあらかじめ乾燥させた試料カップに入れ、3°C/秒で昇温した。3 秒ごとに引火源に近づけ、試料の蒸気に引火する温度を求めた。

灰の融点は、JISM8801 に準拠して測定した。まず、試料 150 g を電気炉 (Muffle furnace F0510, ヤマト科学製) を用いて 900°C で灰化して灰を得た。この灰を用いて試験すい (高さ 8 mm, 底辺長さ 2.7 mm) を製作し、高温電気炉 (FUH712PA, 株東洋製作所製) を用いて連続的に加熱し、試験すいの高さが底辺の見掛け上の幅のほぼ 1/2 に等しくなったときの温度を融点とした。

結果

食品廃棄物から得られた炭化生成物 (炭) の燃料品質を第 3-5 表に示す。炭の粒度分布は、1.0~2.8 mm の割合が最も多かった。5.0~10.0 mm の割合は 8.4% と少なかった。発熱量は、26.1 MJ/kg D. W. であり、石炭および木炭と比較して、同等あるいはそれ以上であった。炭の灰分は、16.7% であり、基準値 20% 以下を満たした。塩素は基準値 (1,500 ppm 以下) を下回ったものの近い値を示した。引火点および灰の融点は、それぞれ、80°C 以上および 1,600°C 以上であり、セメント産業が石炭に求めるすべての基準 (引火点 100°C 以上、灰の融点 1,300°C 以上) を満たした。

第 3-5 表 食品廃棄物から得た炭の燃料品質

項目	単位	炭	基準・参考値
粒度分布			
1.0 mm 以下		23.4	
1.0~2.8 mm	乾重量あたり%	45.5	
2.8~5.0 mm		22.7	
5.0~10.0 mm		8.4	
工業分析			
水分		0.0	<40.0 ^{*1}
灰分	湿重量あたり%	16.7	<20.0 ^{*1}
揮発分		15.6	-
炭素率		67.7	-
発熱量	MJ/kg D. W.	26.1	石炭:18.4~30.0 ^{*1} 木炭:28.5~29.7 ^{*2~3}
元素組成			
塩素(Cl)	ppm	1,481	<1,500 ^{*1}
硫黄(S)		500	<10,000 ^{*1}
引火点	°C	>80	>100 ^{*4}
灰の融点	°C	>1,600	>1,300 ^{*1}

*1 セメント業が石炭に求める基準値および参考値

*2 谷田貝 (1991) の報告より引用

*3 岸本 (1994) の報告より引用

第3節 炭化生成物の農業資材利用

第1項 炭施用による土壌の透水性改善

材料および方法

三重県熊野市の畑土壌を2011年11月にサンプリングした。この畑は、同年の10月まで、にんにくが栽培されていた。透水性が $1.61 \text{ cm/sec} \times 10^{-2}$ の砂質土壌で、サンプルは、風乾して、4.75 mm目合いのふるいにかけて後に使用した。

食品廃棄物から得た炭（第3-5図、以下、木炭と区別するため、食炭と表現した。）は、できるだけ平均的な品質のものを使用するため、第3章第1節第2項で示した329サンプルの平均炭素率（67.7%）に近いものを選んだ。その実測値は61.3%であった。また、粒度範囲は10 mm以下だった（第3-6表）。木炭は市販の土壌改良資材（製造元：奈良炭化工業株式会社）を使用し、粒度範囲は5～13 mmだった。

3.7 Lの土壌に0.3 Lの炭を混合（体積比10%）し、1/5000 a ワグネルポットに充填し、約2週間静置後に透水性改善率を測定した。透水性改善率の測定は、日本土壌協会（1990）が行った方法を参考にした。ワグネルポットから試料を1 L量りとり、第3-6図に示す装置を用いて、以下の操作により測定した。食炭施用土壌、木炭施用土壌および対照土壌について、それぞれ3回繰り返し測定した。

- (1) アクリル筒をビニルテープで連結させ、下方部に不織布もしくはガーゼを輪ゴムでとめる。土を充填した後、上方部も同じように不織布をかぶせてとめる。
- (2) 容器の中にビーカーを4つ並べて、その上にアクリル水槽を置く。その中に空瓶を4つ置いてその上に金網をのせておく。また、ホースは水道の蛇口につなげておく。
- (3) 土壌を充填し、水を飽和水分状態した後のアクリル筒は、上下2 cmを切り離し、ろ紙をかぶせて上部に定水位ホルダ用のアクリル筒をビニルテープで

- 止める.
- (4) アクリル水槽から水があふれるぐらいまで水をいれておく.
- (5) 連結したアクリル筒を (ウ) の金網の上にのせて、上からホースで水を定水位のところまで注ぐ.
- (6) 注ぐ水は、蛇口で調節して水位を保ちながら、アクリル水槽から水があふれたときからストップウォッチで時間を計測. 一定時間、アクリル水槽から水をあふれさせ、あふれた水を洗い桶に貯める. 一定時間経過後、水を止めて、洗い桶に入った水の量を測定する.
- (7) 集めた測定値を式 (3-5) および (3-6) を使って計算する (低水位法) .

[計算方法]

$$\text{減水深} : D(\text{mm/h}) = Q(\text{cm}^3) / t(\text{s}) \times 60 \times 60 / A(\text{cm}^2) \times 10 \quad \dots (3-5)$$

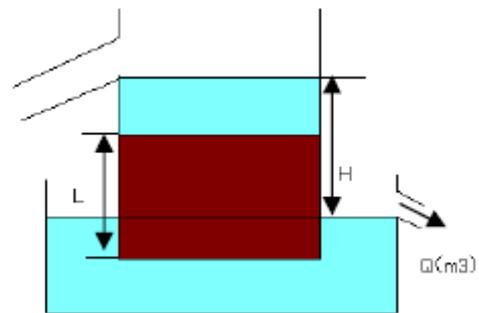
$$\text{透水性改善率}(\%) = (D_t - D_c) / D_c \times 100 \quad \dots (3-6)$$

D_t : 対照土壌の減水深(mm/h)

D_c : 検定試料処理土壌の減水深(mm/h)

H : 水頭差(cm), L : 試料の長さ(cm), Q : 流量(cm^3),

A : 試料断面積(cm^2), t : 時間(s)



第 3-4 図 透水性測定装置断面図



第 3-5 図 食炭（左），木炭（右）

第 3-6 表 食品廃棄物から得た炭および市販木炭の特徴

項 目	pH	粒度範囲 (mm)	充填密度 (g/cm ³)
食 炭*	9.4	～10	0.68
木 炭	8.8	5～13	0.33

* 食品廃棄物から得た炭を木炭と区別するために，食炭と表記した．



アクリル筒(2 cm×2.5 cm×1=土壌充填用)，(40 cm×1=定水位ホルダ用)・ろ紙(アクリル筒の断面の大きさ)，不織布もしくはガーゼ，輪ゴム，ホース，ビニルテープ，金網，洗い桶，ビーカー(500 mL×4)，空瓶(ジャム250 mL×4)，アクリル水槽

第 3-6 図 透水性測定装置

結果

第3-7表に、食品廃棄物から得られた炭が畑土壌の透水性に及ぼす影響を示した。対象土壌の透水性は $1.61 \text{ cm/sec} \times 10^{-2}$ であったのに対して、食炭を施用した場合には透水性が $3.38 \text{ cm/sec} \times 10^{-2}$ に増加した。木炭を施用した場合には、 $3.51 \text{ cm/sec} \times 10^{-2}$ に増加した。食炭および木炭を施用した場合の減水深は、それぞれ1,256 mm/hおよび1,303 mm/hであり、透水性改善率は、それぞれ110%および118%を示し、透水性が改善された。

第3-7表 食品廃棄物から得た炭の透水性に及ぼす影響 (n=3)

試験区名	土壌：改良資材 (体積比)	透水係数*5 K ($\text{cm/sec} \times 10^{-2}$)	減水深*5 (mm/h)	透水性改善率 (%)
食 炭*1~2	90:10	3.38 ^a	1256 ^a	110
木 炭*2~3	90:10	3.51 ^a	1303 ^a	118
対 照 *4	100:0	1.61 ^b	598 ^b	-

*1 食品廃棄物から得た炭を木炭と区別するために、食炭と表記した。

*2 食炭の粒径は10 mm以下、木炭の粒径は5~13 mmの範囲であった

*3 木炭（製造元：奈良炭化工業株式会社）

*4 農業生産法人より畑土提供（三重県）

*5 異なるアルファベットは5%水準で有意差があることを示す（Tukeyの多重比較検定）

第2項 炭施用による土壌中の微生物の多様性活性

材料および方法

食炭、木炭および土壌は、第3章 第3節 第1項と同じものを使用した。3.7 Lの土壌に0.3 Lの炭を混和（体積比10%）し、1/5000 a ワグネルポットに充填した。ワグネルポットを上からビニルフィルムで被覆した。土壌の中央に温度

センサーを設置して、土壤温度が30℃になるように、電熱線（農電園芸マット，日本ノーデン株式会社製）でポット下方から14日間加温した。なお，土壤中の微生物が14日間の加温期間と30℃の加温温度で増加したと報告（**糞**，2005）されていたので，これを参考にした。加温開始時にポットの下から水が排水されるまで給水し，加温期間中は，水を補給しなかった。

試験サンプルの採取では，14日間の加温後，表土5 cmを捨てた後，15 cmの深さまでの土壤を採取した。

採取した土壤について，微生物・多様性活性値を分析した。土壤の微生物相への影響を評価する方法として，土壤呼吸(土壤中の生物による酸素の吸収ないし二酸化炭素の発生)測定や希釈平板法などにより微生物数を計数するのが一般的であるが，ここでは，「土壤微生物多様性・活性値」を用いることとした。この方法によれば，これまで測定が難しかった土壤の生物性を簡易および迅速に数値化できる。土壤微生物多様性・活性値は，微生物群集の有機物分解活性の多様性と高さを数値化したものである。95種類の異なった有機物が入った試験用プレート（ディージーシー総合研究所製，第3-7図）に，サンプル土壤の懸濁液を入れ，15分間隔で48時間連続して二酸化炭素発生量を定量した。定量は，指示薬により，分解された有機物の種類および分解速度を測定できる。これにより，土壤微生物多様性・活性値を定量した。また，採取した土壤について，1:5水抽出法によってpHを測定した。

炭素源無し	アルファサイクロデキストリン	デキストリン	グリコーゲン	Tween40	Tween80	N-アセチル-D-ガラクト	N-アセチル-D-グルコサ	アドニトール	L-アラビノース	D-アラビノース	D-セロビオース
D-エリスリトール	D-フラクトース	L-フコース	D-ガラクトース	ゲンチオピオース	α-D-グルコース	m-イノシトール	α-D-ラクトース	ラクチュロース	マルトース	D-マンニトール	D-マンノース
D-メリビオース	β-メチル-D-グルココース	D-フィココース	D-ラフィノーズ	L-ラムノーズ	D-ソルビトール	シヨ糖(シュエグロコース)	D-トレハロース	ツラノース	キシリトール	rビルビン酸メチルエステル	サクシニク酸モノエステル
酢酸	シス-アコニン酸	クエン酸	蟻酸	D-ガラクトン酸ラ	D-ガラクトチュウロ	D-グルコニン酸	D-グルコサミン酸	D-グルクロン酸	α-ハイドロキシ	β-ハイドロキシ	γ-ハイドロキシ
バラハイドロキシフィニ	イタコン酸	α-ケトブチル酸	α-ケトグルタル酸	α-ケトパレリン酸	D,L-乳酸	マロニン酸	プロピオン酸	キナ酸	D-糖酸	セバシン酸	琥珀酸
プロモ琥珀酸	スクシンアミド酸	グルクロン酸アミド	L-アラニンアミド	D-アラニン	L-アラニン	L-アラニルグリニン	L-アスパラギン	L-アスパラギン酸	L-グルタミン酸	グリシル-L-アスパラギン酸	グリシル-L-グルタミン酸
L-ヒスチジン	ハイドロキシ-L-プロリン	L-ロイシン	L-オルニチン	L-フェニルアラニン	L-プロリン	L-ピログルタミン酸	D-セリン	L-セリン	T-スレオニン	D,L-カミチン	γ-ハイドロキシブチル酸アミド
ウロカニン酸	イノシン	ウリジン	チミジン	フェニルエチルアミン	プトレシン	2-アミノエタノール	2,3-ブタンジオール	グリセロール	D,L-α-グリセロール燐	α-D-グルコース-1-燐酸	D-グルコース-6-燐酸
ポリマー	糖・糖誘導体	メチルエステル	カルボン酸	アミド酸	アミノ酸・ペプチド	核酸	アミン	アルコール	リン酸化糖類		

第 3-7 図 微生物・多様性活性値の測定に用いた試験プレートの有機物の種類

結果

対照区の微生物多様性・活性値が、579,974であったのに対して、食炭を施用すると、686,107と高い値を示した（第3-8表）。この値は、木炭を施用した場合に比べても高かった。これらの結果より、食品廃棄物から得られた炭は、土壤の微生物活性を高めることが明らかになった。また、土壤のpHは、食炭、木炭ともに土壤への施用によって上昇した。

第3-8表 食品廃棄物から得た炭の施用が微生物多様性・活性値に及ぼす影響
(n=4)

試験区名	土壤:改良資材 (体積比)	微生物多様性 活性値*5	pH*5
食炭*1~2	90:10	686,107 ^a	6.2 ^a
木炭*2~3	90:10	611,520 ^a	6.0 ^a
対照*4	100:0	579,974 ^b	4.8 ^b

*1 食品廃棄物から得た炭を木炭と区別するため、食炭と表記した。

*2 食炭の粒径は10 mm以下、木炭の粒径は5~13 mmの範囲であった。

*3 木炭(市販品)(製造元:奈良炭化工業株式会社)

*4 三重県の農業生産法人より畑土提供(砂質土壤)

*5 異なるアルファベットは5%水準で有意差があることを示す(Tukeyの多重比較検定)

第3項 炭施用が作物栽培に及ぼす影響

材料および方法

鉢が峰営農組合（大阪府堺市）の圃場を使用した。2010年8月9日に、ハクサイ‘きらぼし65’（タキイ交配）、キャベツ‘YR50号’（タキイ交配）およびブロッコリー‘ハイツSP’（タキイ交配）を28穴セルトレーに播種して育苗した。育苗土にメトロミックス（ハイポネックスジャパン社製）を使用した。育苗苗は、同年9月10日に各実験区画に20株ずつ定植し、定植後79日の同年11月28日に収穫した。圃場の実験区画は、食炭区、木炭区、対照区として、各供試作物に対して、畝幅1.5 m、畝全長4.4 m、約7 m²とした。耕作土深を30 cmとして、第3章 第3節 第1項および第2項において炭の施用によって土壌の改善効果が認められた体積比（10%）で、食炭および木炭をそれぞれ施用した。

収穫日（11月28日）に、キャベツを栽培した各実験区画の5点より土壌を採取した。土壌は、風乾した後、1:5水抽出法によって、土壌懸濁液を得た。pHおよびECは、pH測定器（B-211 コンパクト pH メータ、HORIBA 社製）およびEC測定器（B-173 コンパクト Twin EC メータ、HORIBA 社製）を用いて測定した。全窒素は、ガンニング変法により測定した。P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、B、Cu、Mo、Naは、硝酸-過塩素酸による湿式灰化（180～200℃）して、懸濁液の有機物を分解したあと、ICP-AES（VISTA-MPX、エスアイアイ・ナノテクノロジー社製）で測定した。

結果

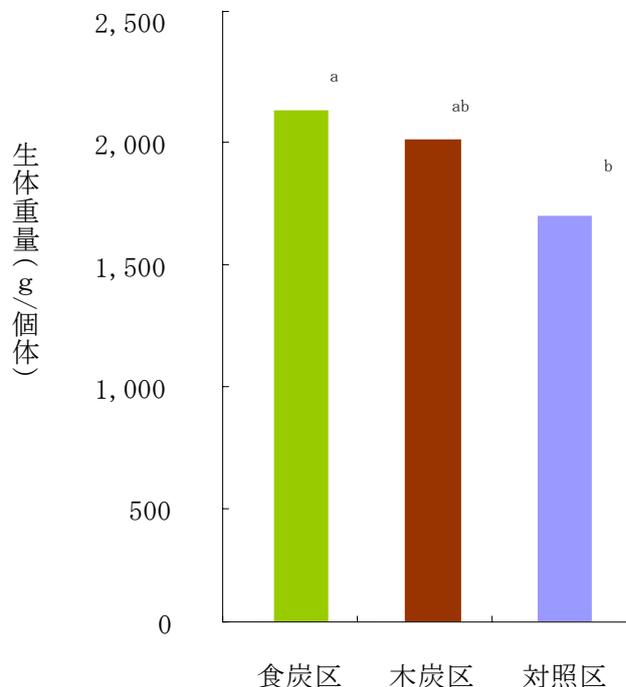
ハクサイ（第3-8図）では、対照区の収穫量が1648 g/個体であったのに対して、食炭区および木炭区が、それぞれ2079 g/個体、1967 g/個体と高く、炭の施用によって収穫量が増加した。また、食炭区の収穫量が最も高かった。

キャベツ（第 3-9 図）では，対照区の収穫量が 525 g/個体であったのに対して，食炭区および木炭区がそれぞれ，676 g/個体，669 g/個体と高く，炭の施用によって収穫量が増加した．また，食炭区の収穫量が最も高かった．

ブロッコリー（第 3-10 図）では，対照区の収穫量が 340 g/個体であったのに対して，食炭区および木炭区では，それぞれ 353 g/個体，364 g/個体と高く，炭の施用によって収穫量が増加した．食炭区と木炭区の違いはなかった．

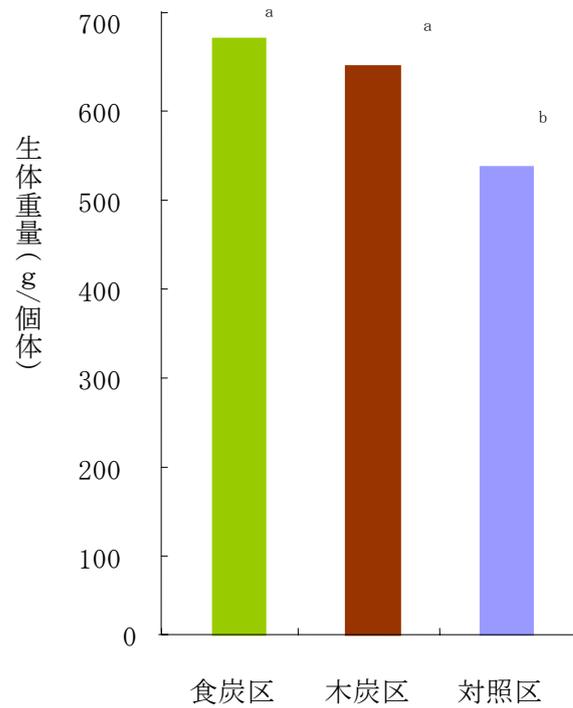
これらの結果より，炭を施用することによって収穫量が増加し，ハクサイおよびキャベツでは，食炭区の収穫量が最も高くなった．

キャベツ収穫時の土壌の pH および EC は，炭を施用した方が高かった（第 3-9 表）．土壌の T-N 量は，食炭を施用した場合，7.3 mg/100g と木炭を施用した場合および対照区に比べて高かった．また，食炭区の，リン (P)，カリウム (K)，カルシウム (Ca)，マグネシウム (Mg) が木炭区および対照区に比べて高かった（第 3-10 表）．



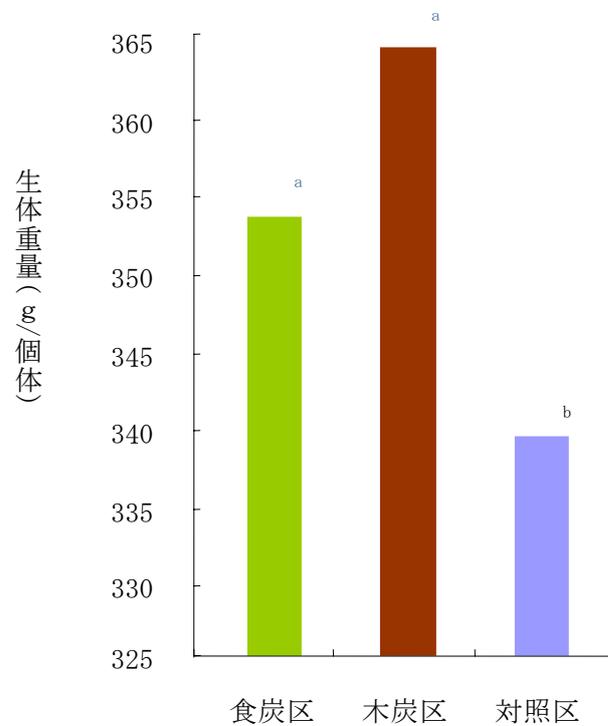
第 3-8 図 食品廃棄物から得た炭を施用して栽培したハクサイの収穫量

*異なるアルファベットは 5%水準で有意差があることを示す (Tukey の多重比較検定)



第 3-9 図 食品廃棄物から得た炭を施用して栽培したキャベツの収穫量

*異なるアルファベットは 5%水準で有意差があることを示す (Tukey の多重比較検定)



第 3-10 図 食品廃棄物から得た炭を施用して栽培したブロッコリーの収穫量

*異なるアルファベットは 5%水準で有意差があることを示す (Tukey の多重比較検定)

第 3-9 表 食品廃棄物から得た炭を施用したキャベツ栽培土壌の収穫時における pH と EC

(n=5)

試験区	pH*	EC* (mS/cm)
食炭区	7.0 ^a	0.43 ^a
木炭区	6.3 ^a	0.28 ^b
対照区	6.0 ^b	0.23 ^b

* 各測定項目について、異なるアルファベットは 5%水準で有意差があることを示す (Tukey の多重比較検定)

第 3-10 表 食品廃棄物から得た炭を施用したキャベツ栽培土壌の収穫時における無機成分量

(n=5)

試験区	T-N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo	Na
	(mg/100g)	(ppm)										
食炭区	0.73	6 ^a	88 ^a	81 ^a	76 ^a	79 ^a	-*1	-	5 ^a	-	0.2 ^a	16 ^a
木炭区	0.25	2 ^b	27 ^b	48 ^b	22 ^b	61 ^a	-	13 ^a	6 ^a	-	0.3 ^a	18 ^a
対照区	0.23	4 ^a	30 ^b	44 ^b	21 ^b	53 ^b	40	25 ^a	4 ^a	-	0.1 ^a	18 ^a

*1 -は検出可限以下を示す

*2 各元素について、異なるアルファベットは 5%水準で有意差があることを示す (Tukey の多重比較検定)

第4項 炭の養液栽培用培地としての利用

材料および方法

2007年5月初旬から同年8月末までの期間、大阪府立大学の養液栽培施設を用いて実験を行なった。実験区は各供試作物に対して、pH5.5に矯正後、水洗した炭を培地として用いた炭培地区およびロックウールスラブ(グロダン社製)を用いたロックウール区を設定した。

培地のCEC (Cation exchange capacity) は、セミマイクロ Schollenberger 法により、浸透管に培地を詰めたカラムを作成し、酢酸アンモニウムを用いて、交換性陽イオンを交換・浸出した後、エタノールで余剰の酢酸アンモニウムを洗浄し、次いで、塩化ナトリウム液で NH_4^+ を浸出し、水蒸気蒸留法によって NH_4^+ を定量してCECとした(土壤環境分析法編集委員会編 2003)。培地の透水性は、第3章 第3節 第1項と同じ方法で測定した。pHは、1:5水抽出法によって検液を採取し、第3章 第3節 第3項と同じ方法で測定した。

トマト

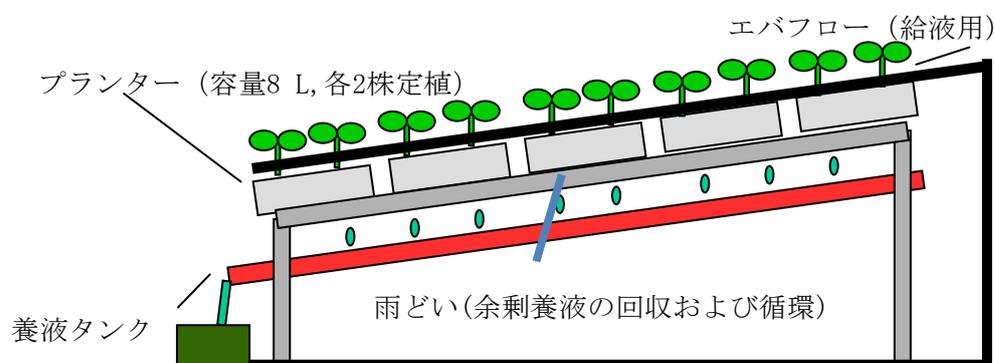
トマト (*Lycopersicon esculentum* Mill.) ‘プチ’ および ‘桃太郎ヨーク’ の2品種を、2007年4月18日に播種した。砂を培地とした直径9cmの素焼き鉢に120粒播種した。昼温25°C、夜温18°C、日長12時間に設定した人工気象機で育苗した。灌水は、底面給水法で行った。同年5月3日に砂を培地としたバットに生育の揃っている苗を移植し、昼温25°C、夜温18°C、日長12時間に設定した苗テラスで育苗を続けた。灌水は、表土の乾きから判断して底面給水法で行った。同年5月13日にメトロミクスを培地とした直径9cmの黒ポリポットに2回目の移植を行なった。無加温のガラス室で管理した。苗の生育状態を見て、同年5月24日に本圃に‘プチ’ および ‘桃太郎ヨーク’ をそれぞれ20株ずつ定植した。定植後65日に収穫し、このときに草丈、葉数、地上部乾燥重を測定した。

パプリカ

パプリカ (*Capsicum annuum* L.) ‘SPECIAL’ および ‘FAIRWAY’ を供試した。の2品種を、2007年5月3日にシャーレに50粒ずつ播種した。昼温25℃、夜温18℃、日長12時間に設定した人工気象機で管理し、同年5月9日にハイドロミクスを培地としたセルトレイに発芽個体を移植した。これ以降、トマトと同様に育苗し、同年5月21日に黒ポリポットに移植し、無加温のガラス室で育苗後、同年5月30日に各区それぞれ20株ずつを本圃に定植した。定植後77日に収穫した。このときに収穫時に草丈、葉数、地上部乾燥重を測定した。

栽培方法

炭培地をプランターに8L、ロックウールはプランターに入る大きさにカットして充填し、プランター1個に2株ずつ苗を定植した。給液による炭培地のプランター外への流出を防ぐため、不織布をプランター下部に敷いた。養液の供給はエバフロー（ビニル製のチューブに無数の養液滴下用の穴が開いているもの）を用いて行い、余剰となる養液は雨どいを用いて養液タンク（200L）に回収し、ポンプを用いて再度養液として利用する循環型の栽培システムとした（第3-11図）。養液は大塚ハウスA処方とし、栽培開始初期は1/2倍処方を施用した。地上部の生育が旺盛だったため、同年6月1日より1/6倍処方とした。生育が落ち着いたため、生育ステージに合わせて液肥濃度を順次上げた。給液は6:00～19:00に毎時2分間[0.21L/(時・株)]とした。液肥の濃度管理は、養液タンク中のpH(B-211コンパクトpHメータ, HORIBA社製)およびEC(B-173コンパクトTwin ECメータ, HORIBA社製)を毎日、測定して維持した。



第3-11図 養液栽培装置

結果

1. 食品廃棄物より得られた炭の理化学的特性

食品廃棄物より得られた炭の透水性およびCEC（保肥力）は、ロックウールに比べて高い値を示した。pHはアルカリ性が強かった（第3-11表）。炭のpHは10前後のアルカリ性であった。

炭10gに対して、0.02~0.1Nの硝酸溶液をそれぞれ25mL加えた後、経時的にpHを測定した結果、0.1Nの硝酸を使用した場合、添加直後（1日目）にpHが4.0付近まで低下し、2日目ではpH5.0まで戻った（第3-12図）。3日目以降は、わずかであるがpHが中性側（pH7.0）に移行する傾向が確認されたが、5日目移行でpHは5.3~5.5で安定した。すなわち、炭10gに対して0.1N硝酸溶液を25mL加えれば、炭培地を作物根域として最適なpHに補正できることが明らかになった。

2. 食品廃棄物より得られた炭を培地にした養液栽培が作物の生育および収穫量に及ぼす影響

トマト

炭を培地にした養液栽培がトマトの生育および収穫量に及ぼす影響を第3-12表に示した。‘プチ’は、ロックウール区が、草丈150.0cm/株、地上部乾物重が71.8g/株であったのに対して、炭培地区では、それぞれ、179.2cm/株、地上部乾物重が102.1g/株と有意に大きい値を示した。果実重、果実数および収穫量は、全てにおいて、炭培地区がロックウール区よりも大きい値を示した。‘桃太郎ヨーク’では、地上部乾物重が、ロックウール区が95.4g/株であったのに対して、炭培地区が107.9g/株であった。果実数は、炭培地区がロックウール区と比較してわずかに差が認められ、果実重および収穫量が炭培地区で、それぞれ133.3g/株、977g/株と大きかった。

以上の結果から、炭を培地にしたトマトの養液栽培により、ロックウール区に比べて収穫量が150%以上増加することが明らかになった。

パプリカ

炭を培地にした養液栽培がパプリカの生育および収穫量に及ぼす影響を第3-13表に示した。‘SPECIAL’では、草丈および葉数に差は認められなかったが、地上部乾物重で、ロックウール区が37.9 g/株だったのに対して、炭培地区では、46.3 g/株と大きかった。炭培地区の方が、果実数が多く、その結果、収穫量が441 g/株とロックウール区に比べて133%増加した。しかし、

‘FAIRWAY’では、草丈、葉数および地上部乾物重がロックウール区に比べて低かった。また、果実重は炭培地区がロックウール区を上回ったが、果実数が6.8個/株でロックウール区に比べて少なく、収穫量がロックウール区を下回った。

以上の結果から、パプリカの場合、品種によって炭培地への反応性が異なることが示唆された。

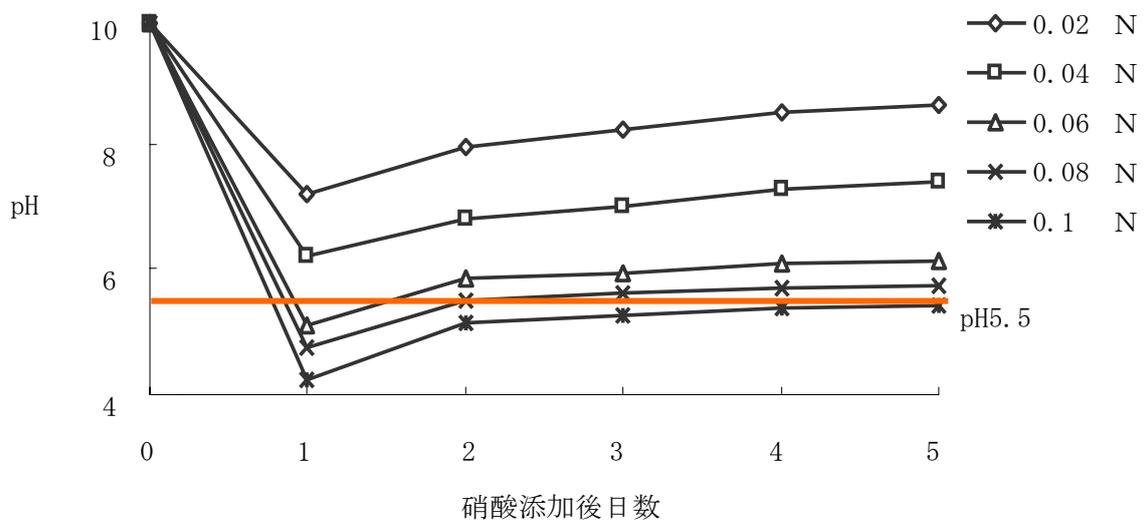
第3-11表 食品廃棄物から得た炭の理化学的特性

(n=1)

	透水性 (cm/sec)	pH	CEC* ² (me/100g)
炭	1.03	9.93	34.6
ロックウール	0.07	-* ¹	2.5

*¹ 未測定を示す(pH調整済みのロックウールを使用した)。

*² 陽イオン交換容量(保肥力)を示す。



第3-12図 食品廃棄物から得た炭の硝酸添加後のpHの経時的変化*

*炭培地10 g(乾重量)に対して, 0.02~0.1 Nの硝酸溶液をそれぞれ25 mL加えた後,

上澄み液のpHを測定

第 3-12 表 食品廃棄物から得た炭を培地にした養液栽培によるトマトの生育および収穫量*1~2

品種	草丈	葉数	地上部 乾物重	果実重	果実数	収穫量	
	(cm/株)	(枚/株)	(g/株)	(g/果)	(個/株)	(g/株)	
プチ	炭培地区	179.2 ^a	27.9 ^a	102.1 ^a	24.8 ^a	24.3 ^a	603 ^a
		(119)	(99)	(142)	(130)	(122)	(158)
ロック	ウール区	150.0 ^b	28.1 ^a	71.8 ^b	19.1 ^b	20.0 ^a	381 ^b
		(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)
桃太郎	炭培地区	179.6 ^a	29.3 ^a	107.9 ^a	133.3 ^a	7.3 ^a	977 ^a
		(103)	(98)	(113)	(137)	(114)	(157)
ヨーク	ロック	173.7 ^a	30.0 ^a	95.4 ^b	97.5 ^b	6.4 ^a	624 ^b
	ウール区	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)

*1 異なるアルファベットは、5%水準で有意差があることを示す (t-test) .

*2 上段は実測値，下段の()内は、ロックウール区を 100 として計算した.

第 3-13 表 食品廃棄物から得た炭を培地にした養液栽培によるパプリカの生育
および収穫量^{*1~2}

品種	草丈	葉数	地上部	果実重	果実数	収穫量	
	(cm/株)	(枚/株)	乾物重 (g/株)	(g/果)	(個/株)	(g/株)	
SPECIAL	炭培地区	55.6 ^a	13.0 ^a	46.3 ^a	66.8 ^a	6.6 ^a	441 ^a
		(108)	(106)	(122)	(97)	(138)	(133)
	ロック	51.7 ^a	12.3 ^a	37.9 ^b	68.9 ^a	4.8 ^b	331 ^b
	ウール区	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)
FAIRWAY	炭培地区	58.9 ^a	10.5 ^a	30.0 ^a	52.5 ^a	6.8 ^a	357 ^a
		(86)	(80)	(52)	(107)	(81)	(86)
	ロック	68.4 ^a	13.1 ^a	57.9 ^b	49.1 ^a	8.4 ^a	415 ^b
	ウール区	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)

*1 異なるアルファベットは、5%水準で有意差があることを示す (t-test) .

*2 上段は実測値、下段の()内は、ロックウール区を 100 として計算した.

第4節 考察

日本国内では、事業系の食品廃棄物が年間 22.7 万 t 発生し、そのうちの 80% を食品製造業が、残りの 20% を食品小売業と外食産業が占める（農林水産省，2011）。近畿圏内で回収した本実験の食品廃棄物では、食品製造業が 70.3%，食品小売業が 22.1%，外食産業が 6.7% であった（第 3-1 表）。これらのことから、国内で発生している食品廃棄物と、発生源の構成比が類似する食品廃棄物が回収できた。

回収した食品廃棄物の水分率は、平均が 65.0%，最高が 77.0%，最低が 53.6% だった。食品廃棄物の高い水分率は、乾燥の効率を下げる可能性が高い。したがって、炭化工程で発生する熱分解ガスを水分率の高い食品廃棄物の乾燥に利用する必要があると考えられる。一方、バイオマスを有用な可燃性ガスに変換し、ガス発電機や燃料電池の燃料に利用する研究が、盛んなので（今井，2003；田中，2011），熱分解ガスを有効に利用できるようになれば、効率的な再生利用が可能と考えられた。

回収した近畿圏の食品廃棄物は、穀類、植物性残渣および動物性残渣の合計が 92% を占めており（第 3-2 表），第 2 章 第 1 項における食品廃棄物の構成成分割合の調査の場合と同様であった。第 2 章 第 1 項に比べて、調査対象の食品廃棄物量および調査店舗数を大幅に増やした。両者が同様の結果であったことから、事業化時に実際に回収する食品廃棄物の性状により近いサンプルであったと考えられた。

食品廃棄物中の油脂類は 6.6% を占めた（第 3-2 表）。油脂類は、大豆油や菜種油などの植物性油脂やラードなどの動物性油脂単体の廃油ではなく、いずれも菓子類を製造するのに使用するクリームなどの加工原料であった。これら油脂類の割合が多い食品廃棄物を炭化した場合、炭化炉内温度が安定的に上昇する現象が認められ、炭も灰になることなく生産できた。油脂類が持つ高いカロリーが作用していると考えられた。これらの回収した油脂類は、バイオディーゼル燃料化（Nishizaki, 2009）などで使用する廃食用油類と競合しないと予測され、炭化の安定化を目的に、有価物原料としての取り扱いが可能であると考えられた。

炭の収率は、食品廃棄物の乾重量に対して 17.3%だった。一方、第 2 章 第 2 節において、食品廃棄物を小型炭化炉で炭化した際の収率は 25～31%だった。炭の収率が低くなった原因は明らかではないが、小型炭化炉は外熱式の固定床炉である一方、本章で用いたロータリー炭化炉は内熱式の移動床炉であり、炭化の形式が違うことが収率に差を生じさせたと考えられた。同様に、固定床炉や移動床炉による炭化形式の違いによって、木炭収率が変化することが報告されている（宮藤，2006）。

炭の炭素率は、55.0%から 70.4%まで分布し、平均は 67.7%であった（第 3-1 図）。針葉樹（スギ、ヒノキ）および広葉樹（ナラ、クヌギ、サクラ）から得た木炭の炭素率は 64～67%であったと報告され（松永，2011），食品廃棄物の炭の炭素率は木炭の場合と同様であった。灰分および揮発分の平均はそれぞれ 16.7%，15.6%だった。揮発分が低かったことから、全体に熱がとおり、炭素固定されていると考えられた。加熱温度や炭化時間が不十分な場合には、未炭化となって揮発分が増加する一方で、炭素率は減少する。炭は無臭であるが、未炭化の場合、炭に残ったタール類や有機物が臭いを放つので、炭の品質が低下する。

炭化はバイオマス中の炭素を炭に固定するので、二酸化炭素の抑制に効果がある。下式で表わされる炭素固定率は、炭の炭素率が重要な因子である。したがって、二酸化炭素の排出抑制のためには、炭素率の高い良質な炭を得ることが重要である。

炭素固定率 (%) =

$$\text{炭の炭素率}(\%) \times \text{炭の収率}(\%) / \text{食品廃棄物中の炭素率}(\%) \cdots (3-3)$$

食品廃棄物から得られた炭を燃料利用する場合には、石炭代替燃料としての利用が見込まれる。石炭の品質は、JIS 規格（JIS M1002）によって、燃料比（固定炭素/揮発分）および発熱量を指標として評価され、品質が良いとされる順に、無煙炭、瀝青炭、亜瀝青炭および褐炭に分類される。食品廃棄物から得られた炭の発熱量は、褐炭（24.28～29.47 MJ/kg D.W.）と同程度だった（第 3-2 図）。また、志村（2007）によれば、下水汚泥炭化物の利用を目的に、石炭火力発電

所で燃焼利用できる代替燃料の性状を調査した結果、通年で 12.6 MJ/kg D.W. 以上を維持できれば利用できる可能性がある。食品廃棄物から得た炭の発熱量は、最小でも 22.0 MJ/kg D.W. だったので、燃料として利用できることが示された。

炭の肥料成分量は平均が 5.7%であったが、2.5%から 11.0%の範囲で分布してばらつきが認められた（第 3-3 図）。 K_2O 、 CaO 、 P_2O_5 、 MgO および Fe_2O_3 は、平均で、それぞれ 2.4%、1.7%、1.4%、0.2%および 0.1%だった。これらの肥料成分は植物の必須元素である。炭を土壌改良資材として利用する場合には、これら肥料成分の取り扱い方に留意する必要がある。ナシ剪定枝を炭化して得た炭では、K 供給材として利用できることが報告されている（塚越，2005）。また、木炭も様々な肥料成分を含んでいることが報告されている（磯部，1996）。オカラの炭化物が多量元素の他に、微量元素である Fe_2O_3 を含み、インゲンマメの生育を促進した（Isobe，2002）。本研究で得られた炭も、 K_2O 、 P_2O_5 を含むとともに MgO や Fe_2O_3 および CaO を含んでいたことから、酸性土壌の pH 調製に使用する苦土石灰の代わりにも使用でき、化学肥料を削減できると考えられた。しかし、これら肥料成分量は、原料となる食品廃棄物自体が含有する影響されるため、炭の製造ロットごとに測定・管理し、適宜、施用方法を定めることが求められる。

食品廃棄物から得た炭の品質には、ばらつきがあることが明らかになった（第 3-4 表）。しかし、炭素率、発熱量および肥料成分量の平均値から、燃料利用や農業資材利用の可能性が示された。そして、以下のような解析および方法によって、炭の品質のばらつきを最小限にし、品質を上げる可能性が考えられた。

炭の炭素率は、穀類の割合による影響を最も受けた（第 3-3 表）。そして、発熱量および肥料成分量も、主に、穀類の割合と季節による影響を受けることが明らかになった。さらに、食品製造業の割合の影響は小さかった。また、木炭の製造では、炭化温度が炭の品質に影響を及ぼすが（谷田貝，1991）、食品廃棄物の炭化の場合には、炭化温度の影響は小さかった。したがって、効果量の大きい穀類の割合を制御すれば、炭の品質が安定すると考えられた。そして、食品製造業の割合による効果量は、すべての品質項目で 0.01~0.02 と小さかった。したがって、食品廃棄物に占める小売業および外食産業の割合が増えたと

しても、炭の品質に及ぼす影響は小さいと考えられた。すなわち、炭化は、再生利用実施率が低い食品小売業および外食産業の食品廃棄物を再生利用するために有効な技術であることが示された。

石炭利用量の割合が高いセメント産業への供給を想定して、食品廃棄物から得られた炭の燃料品質を検証した。炭の粒度分布からは、1.0~2.8 mmの割合が最も高く、1.0~5.0 mmの範囲のものが合計で約70%を占めた（第3-5表）。このような粒状の場合、石炭との混合利用の際の搬送が容易であり、利用者がもつ既存設備でも使用できると見込まれた。また、水分率が低く、発熱量は石炭と同等かそれ以上であり、引火点および灰の融点も、利用者が求める燃料品質の基準を満たしたので、炭の燃料利用は可能であることが示された。

食品廃棄物は、食品が含むミネラルや味付けに使用する塩分を含む。これらは、炭化の過程で炭に灰分として残る可能性がある。この灰分の融点が低い場合には、スラグやクリンカーが形成されやすくなり、燃焼器に熔融・付着して支障をきたす。灰の融点は基準値よりも高い値を示したので、利用しやすいと考えられた。その一方、塩素は燃焼器の腐食の原因になる。炭の塩素量は基準に近い値を示したので、塩素量の測定・管理が必要と考えられた。

これらの炭は食品廃棄物の炭素を固定したものであるため、燃料として利用すれば、石炭や石油などの化石燃料由来の炭素の放出を抑制する効果がある。食品廃棄物の炭化は、大気中のCO₂濃度の上昇を抑制するので、付加価値は高く、その利用が見込まれる。

食品廃棄物より得た炭の透水性改善率は、木炭に比べてやや低かった（第3-7表）。これは、木炭の粒径が5~13 mm前後と大きく、かつ揃っていたことが原因と考えられた。木炭の場合、おがくず炭や廃材炭を5%の割合で土壌に施用すると、木炭の細孔構造の作用により、それぞれ、140%および210%の透水性改善率を示す。一方で、粒度が細かい籾殻炭や木粉炭を土壌に施用した場合には、透水性が改善されない（土壌保全調査事業全国協議会、2003）。本実験では、食品廃棄物から得た炭を土壌に10%施用することによって、土壌の透水性が改善されたことから、食品廃棄物を炭化して炭にする過程において、炭に細孔構造が形成されている可能性が高い。

pH4.8の弱酸性土壌（対照区）に炭を施用するとpHが上昇し、土壌微生物の活性が高くなった（第3-8表）。土壌微生物は、土壌中の有機物の分解、マメ科植物で見られる根粒菌のような植物根との共生、植物に必要な窒素の可吸態化など、さまざまな役割を果たす。したがって、一般的には、炭の施用は、作物の収量増加や生育促進効果が期待できる。

土壌に炭を施用すると、ハクサイ（第3-8図）、キャベツ（第3-9図）およびブロッコリー（第3-10図）の収穫量が増加した。籾殻燻炭を低湿地土壌に埋設すると、通気性が向上し、サツマイモの塊根発達が促される（Islam A., 2000）。さらに、燻炭の塊を埋設した方が、燻炭を土壌に混合（mixture）した場合よりも塊根発達を促すことが報告されている（Islam A., 1999）。食品廃棄物より得た炭を塊にして施用した場合に、収穫量がさらに向上する可能性がある。

同様の効果によって食品廃棄物より得られる炭で収穫量が増加した可能性が高い。また、木炭では多孔質部分に多くの有効な微生物が棲息して、肥料成分の無機化が促進されるからと言われている。谷田貝らは（1991）、木炭の施用が、樹栽3年目のクロマツの生長とショウロ（松露）の形成を促進し、木炭の通気性と保水性に富む多孔質な物理構造が、独立栄養生物である窒素固定菌や光合成する一般細菌の増殖に作用したと報告している。したがって、対照区と同等の肥料量であっても、炭が肥料の吸収効率を上げて、作物の生育を促進し、その結果、収穫量を増加させた可能性が高い。また、食炭は食品廃棄物を由来とする肥料成分を含むことから、収穫量の増加に作用している可能性が考えられる。これらの作用機序の解明は今後の課題である。

あらかじめ食品廃棄物から得た炭を酸処理（硝酸）し、水洗して過剰な窒素などを流亡させたあと、養液栽培装置に炭を充填して、液肥をしばらく流して炭による吸着の影響を小さくすると、養液栽培用培地として利用できると考えられた（第3-12図）。しかし、これらの工程は、農作業時間に影響を及ぼすため、より効率的な方法を開発する必要がある。

栽培試験の結果、トマト2品種については、生育および収穫量は炭培地区の方がロックウールよりも優れた（第3-12表）。このことから、炭培地は、トマトの養液栽培用培地として利用できることが明らかになった。その一方で、パプリカでの栽培は、生育および収穫量が品種によって異なったので（第3-13

表) , 食品廃棄物より得られた炭培地をパプリカの養液栽培に導入する場合には、品種ごとに培地への反応を確認する必要がある。

現在、養液栽培用に主に使用されているロックウールは、不燃性により、使用後の廃棄に問題がある。一方、炭は、焼却処理でき、ハウス用暖房機などの燃料として利用することができれば、より、効率的に利用できる。すなわち、食品廃棄物より得た炭の養液栽培用培地としての利用は、重油や灯油などの化石燃料使用量の削減と二酸化炭素排出抑制に寄与するものと考えられる。

第4章 炭化の環境影響および経済性の評価

食品廃棄物の炭化を事業化して処理施設を設置する場合には、工業地域が望ましいが、宅地や一般商業施設の隣接地も考えられ、炭化が周囲の環境に及ぼす影響を確認する必要がある。

食品廃棄物の炭化では、処理に伴って、排ガス、騒音および振動、食品廃棄物の乾燥によって得られる再生水が環境に影響を及ぼす可能性がある。炭化は燃焼に比べて、酸素の供給を制約して熱処理するため、不完全燃焼条件下でダイオキシン類が合成されやすい(平岡, 1992)。また、食品廃棄物は、窒素(N)や硫黄(S)を含むため、炭化過程でNO_xやSO_xが合成される可能性がある。炭化は、1日の処理能力が5 t以上の場合には、炭化の過程で生成される熱分解ガスを815℃以上で、2秒間以上燃焼させることが法的に求められている。また、炭化は、食品廃棄物を搬送するためのコンベア、および乾燥や炭化によって発生する水蒸気および熱分解ガスを誘引するための送風機を必要とするので、これらの運転により騒音および振動が発生する。また、食品廃棄物は水分率が高いので、あらかじめ乾燥して炭化しやすくする。乾燥によって発生した水蒸気は再生および利用して効率を高める必要がある。再生水はクーリングタワーで冷却し、その一部は、冷却過程で大気に放出されるため(西村, 1981)、水質汚濁物質が含まれている場合には、周囲環境へ影響を及ぼすこととなる。そのため、再生水の環境影響も評価する必要がある。

炭化は、食品廃棄物中の炭素を炭に固定するので二酸化炭素の発生を抑制する。しかし、食品廃棄物の炭化にかかるエネルギーの使用にともなう二酸化炭素発生量および食品廃棄物の回収、処理および利用に至るまでの全工程の二酸化炭素発生量は明らかでない。したがって、食品廃棄物の炭化についての二酸化炭素削減効果を総合的な評価が必要である。また、食品廃棄物の炭化を事業化するには、経済的な持続性を有するか検証する必要がある。

そのため、第1節では、炭化によって発生する排ガスの有害物質と悪臭物質を測定して、大気への影響を調べた。第2節で、炭化システムの騒音および振動、第3節で、炭化システムの水質環境への影響を検証した。第4節では、食品廃棄物の炭化による炭素放出の抑制効果を明らかにするため、炭素収支を調

べた。そして、第5節では、食品廃棄物の炭化について、LCA手法（life cycle assessment）を用いて、回収、処理（炭化）および利用に至る二酸化炭素排出量を推定し、環境影響を総合的に評価した。第6節では、食品廃棄物の炭化について、持続的運用および事業化が可能であるか検討するため、そのコストを他のリサイクル技術と比較した。

第1節 大気への影響

材料および方法

1. 炭化システムの運転方法

排ガス測定の際、以下の方法で炭化を行なった。

(1) 食品廃棄物

湿重量割合で、食品製造業が71.5%、食品小売業が15.9%、外食産業が12.6%の食品廃棄物を供試した。平均水分率は、61.3%だった。

(2) 装置稼働実績

乾燥キルンの時間当たりの最大能力4.3 tに対して、2.8 tの食品廃棄物を処理した。食品廃棄物の処理量に基づく装置の稼働率は約65%だった。また、測定中の炭化システムを構成する各種装置の稼働実績を、第4-1表に示した。

2. 測定箇所

測定箇所は、第4-1図に示す排ガスの最終煙道とした。排ガス処理設備では、炭化キルンで発生する熱分解ガスを排ガス燃焼炉で高温熱処理（815℃以上、2秒以上滞留）を行い、その後、ダイオキシン類の再合成を抑制するため、200℃以下に排ガスを急速冷却した。急速冷却後の排ガスに、消石灰および活性炭を噴霧し有害物質を吸着させた後、集塵器で煤じんを除去して大気に放出した。炭化施設は、廃棄物処理法でいう焼却炉に相当するので、大気汚染防止法の構造基準に基づいた構造とした。

3. 有害物質の測定

大気汚染防止法およびダイオキシン類対策特別措置法に定める各種有害物質を測定した。測定対象の有害物質は、ダイオキシン類、NO_x（窒素酸化物）、SO_x（硫黄酸化物）、HCl（塩化水素）、煤じん、悪臭物質（22項目と）した。

(1) ダイオキシン類

JISK0311に準拠して、排ガス中のダイオキシン類を測定した。炭化システムの運転中に、連続的に4時間かけて排ガスをガス吸収瓶に通過させ、ダイオキ

シン類を吸着回収した。吸収瓶から試料を抽出後、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC/MS) でダイオキシン類を定量した。ダイオキシン類は、毒性等価係数を用いて毒性当量 (TEQ) として算出した。

(2)NO_x (窒素酸化物)

JISK0104 に準拠して、炭化システムの運転中に、あらかじめ硫酸を入れたガス吸収瓶に排ガスを通過させ、NO_x を硝酸イオンとして回収した。試料を回収後、イオンクロマトグラフを用いて NO₂⁻および NO₃⁻を定量し、NO_x 量とした。

(3)SO_x (硫黄酸化物)

JISK0103 に準拠して、炭化システムの運転中に、あらかじめ過酸化水素水を入れたガス吸収瓶に排ガスを通過させ、SO_x を硫酸として回収した。試料を回収後、イオンクロマトグラフを用いて硫酸イオンを定量し、SO_x 量に換算した。

(4)HCl (塩化水素)

JISK0107 に準拠して、炭化システムの運転中に、排ガスを一定時間、あらかじめ水を入れておいたガス吸収瓶に通過させ HCl を吸着回収した。吸収瓶から試料を回収後、イオンクロマトグラフを用いて、Cl⁻を定量し、塩化物イオンに相当する塩化水素量の係数 (1.032) を用いて HCl 量を求めた。

(5)煤じん

JISZ8808 に準拠して、炭化システムの運転中に、排ガスを一定時間、ろ紙を備えた煤じん捕集器に通過させ、煤じんを回収し、重量測定により、煤じん量を求めた。

(6)悪臭物質 22 項目

炭化システムの運転中に、JISK0901 に規定する捕集器に排ガスを通過させ、悪臭物質を吸着回収した。昭和 47 年環境庁告示第 9 号に基づき、アンモニアはイオンクロマトグラフ、その他の悪臭物質はガスクロマトグラフ質量分析計 (GC/MS) を用いて定量した。すべての悪臭物質について、検出下限値を基準値の 10 分の 1 に設定して評価した。

第 4-1 表 食品廃棄物の炭化システムにおける各種装置の稼働実績 (%)^{*1}

排ガス処理装置		炭化キルン		乾燥キルン
排ガス 誘引ファン ^{*2}	乾燥ガス 誘引ファン ^{*3}	原料供給 フィーダー ^{*4}	キルン 回転数 ^{*5}	キルン 回転数 ^{*5}
100	60	70	50	25

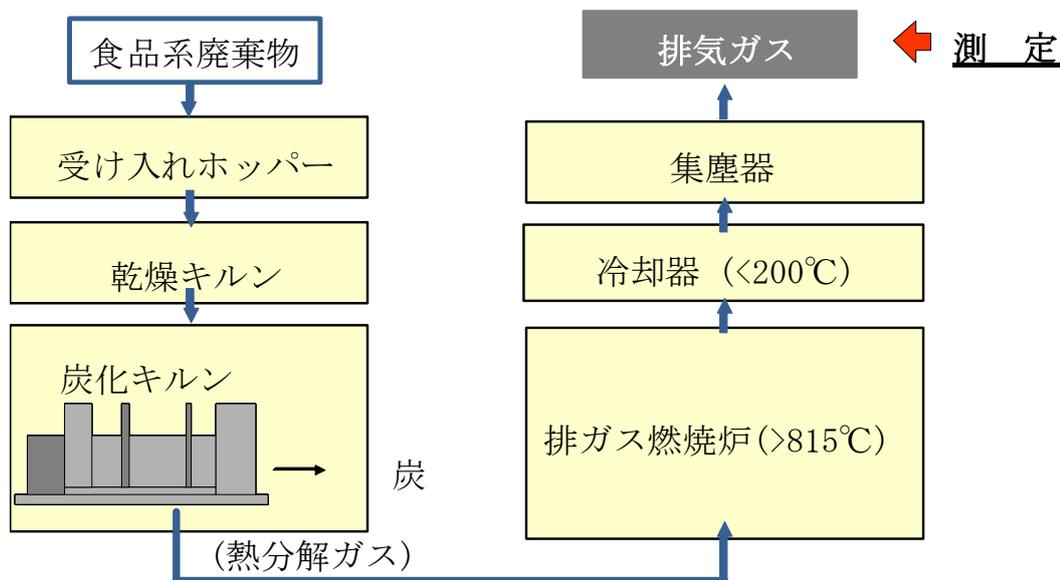
^{*1} 各装置の最大能力を 100%とした際の稼働率 (%)を示す。

^{*2} 集塵器後にあるファンであり、排ガスフローにおける炭化キルン→排ガス燃焼炉→急速冷却器→集塵器のガス流れ誘引し制御するファンである。

^{*3} 非接触により空気と排ガスを熱交換して熱回収した空気を乾燥キルンに導入する際のファンを示す。

^{*4} 炭化キルンに乾燥後の食品廃棄物を投入する速度を示す。

^{*5} 乾燥キルンおよび炭化キルンの回転数を示す。回転数が高いほど、処理する物の流れが速くなり、処理量が増す。



第 4-1 図 食品廃棄物の炭化システムの排ガスフロー

結果

炭化システムの大気への影響を評価するため、排ガス中の有害物質を測定した（第 4-2 表）。測定点におけるダイオキシン類濃度は、0.06 ng-TEQ/m³N と低く基準を下回った。排ガス燃焼炉の炉内平均温度は 823℃だった。その一方で、測定点の平均温度は 163℃であった。CO 濃度も 39 ppm と低く、排ガスの完全燃焼ができていることが示された。その他の、窒素酸化物、硫黄酸化物、塩化水素、煤じんはそれぞれ、82 ppm, 0.15 m³N/h, 4.7 mg/m³N, 0.002 g/m³N 以下であり、すべて基準値を下回った。悪臭物質 22 項目（第 4-3 表）は、アンモニア、トリメチルアミン、アセトアルデヒド、ノルマルアルデヒド、ノルマル酪酸およびノルマル吉草酸が基準値以下であるが、わずかに検出された。残りの悪臭物質 16 項目はすべて検出されなかった。

第 4-2 表 食品廃棄物の炭化によって発生した排ガス中の有害物質濃度

測定項目	CO (ppm, v/v)	ダイオキシン類 (ng-TEQ/m ³ N)	NO _x (ppm, v/v)	SO _x (m ³ N/h)	HCl (mg/m ³ N)	煤じん (g/m ³ N)
測定値	39	0.06	82	0.15	4.7	<0.002
規制基準 ^{※1}	-	5.0	250	0.31	44.2	0.15
管理目標 ^{※2}	-	0.1	150	0.28	5.0	0.10

*1 大気汚染防止法, ダイオキシン類対策特別措置法に定められた排出規制基準値。測定値と規制基準値を比較する場合には、原則、測定値の O₂ 12%換算にて比較を行う（SO_x は除く）。

*2 大阪府堺市の条例に基づいた場合の管理目標値

第4-3表 食品廃棄物の炭化によって発生した排ガス中の悪臭物質濃度

(ppm, v/v)

悪臭物質	濃度	基準*
アンモニア	0.2	<1.0
メチルメルカプタン	<0.0002	<0.002
硫化水素	<0.002	<0.2
硫化メチル	<0.001	<0.01
二硫化メチル	<0.0009	<0.009
トリメチルアミン	0.0027	<0.005
アセトアルデヒド	0.028	<0.05
プロピオンアルデヒド	<0.005	<0.05
ノルマルアルデヒド	0.0026	<0.009
イソブチルアルデヒド	<0.002	<0.02
ノルマルバレルアルデヒド	<0.0009	<0.009
イソバレルアルデヒド	<0.0003	<0.003
イソブタノール	<0.09	<0.9
酢酸エチル	<0.3	<3.0
メチルイソブチルケトン	<0.1	<1.0
トルエン	<1.0	<10.0
スチレン	<0.04	<0.4
キシレン	<0.1	<1.0
プロピオン酸	<0.003	<0.03
ノルマル酪酸	0.0001	<0.001
ノルマル吉草酸	0.0002	<0.009
イソ吉草酸	<0.0001	<0.001

* 大気汚染防止法による敷地境界線における規制基準値

第 2 節 騒音・振動による影響

材料および方法

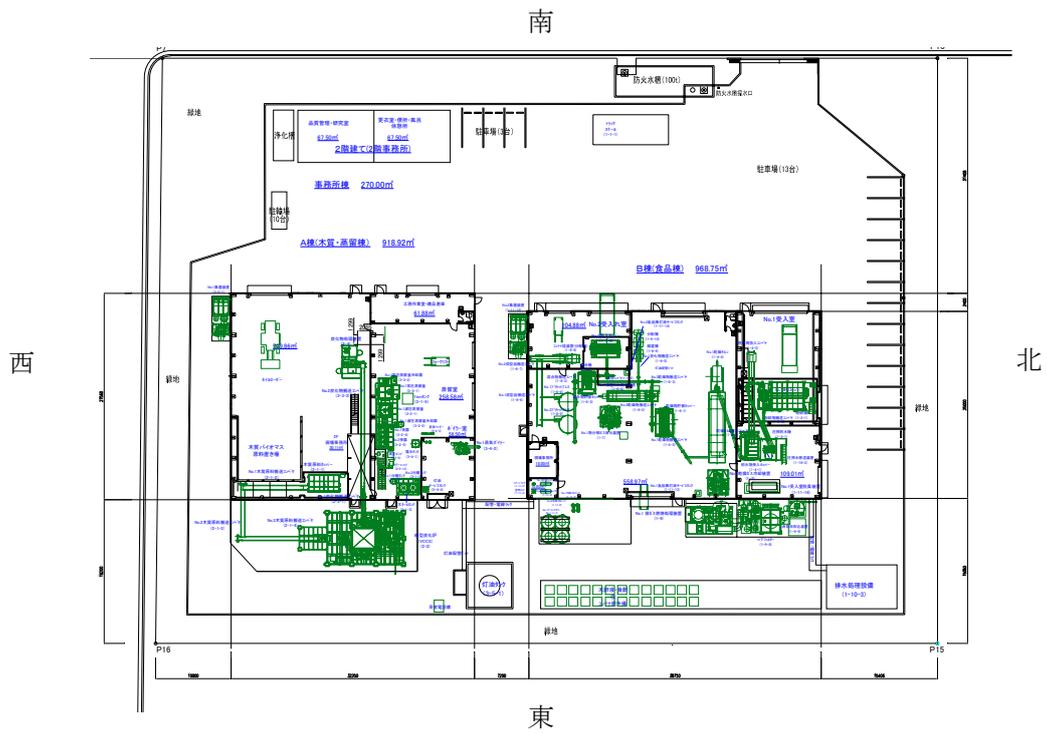
1. 炭化システムの運転

騒音および振動の測定時、乾燥キルンの時間当たりの最大能力 4.3 t に対して、2.8 t の食品廃棄物を処理した。食品廃棄物の処理量に基づく装置の稼働率は約 65%だった。

2. 騒音および振動の測定

騒音測定は、JISZ8731 に準拠して第 4-3 図に示す計測器により、昼間(8～18 時)、夜間(21～翌朝 6 時)に測定した。測定は、第 4-2 図に示す敷地境界線上の東西南北の各位置で 3 回計測を行ない、その平均値を用いた。

振動測定は、特定工場等において発生する騒音の規制に関する基準（昭和 43 年 11 月 27 日厚生省、農林省、通商産業省、運輸省告示第 1 号，改正：平 11 政令 283）に基づき、第 4-4 図に示す計測器により、昼間(8～18 時)、夜間(21～翌朝 6 時)に、騒音測定と同じ位置で行なった。測定回数も騒音測定と同じとした。



第 4-2 図 食品廃棄物の炭化システム鳥瞰図と騒音・振動の測定位置



第 4-3 図 騒音計(日置電機製)



第 4-4 図 振動計(リオン製)

結果

昼間の敷地境界線上の騒音レベルは、北、東、南、西で、それぞれ、60 dB, 62 dB, 59 dB, および 60 dB であり、すべての測定地点で基準の 70 dB よりも低かった(第 4-4 表)。夜間の敷地境界線上の騒音レベルは、北、東、南、西で、それぞれ、50 dB, 61 dB, 57 dB および 55 dB であり、すべての敷地境界線上の測定地点における騒音レベルは、基準の 65 dB を下回った。

昼間の敷地境界線上の振動加速度レベルは、北、東、南、西で、それぞれ、36 dB, 34 dB, 41 dB, および 27 dB であり、すべての測定地点で基準の 70 dB よりも低かった(第 4-5 表)。夜間の敷地境界線上の振動加速度レベルは、北、東、南、西で、それぞれ、33 dB, 33 dB, 31 dB および 27 dB であり、すべての測定地点で基準の 65 dB を下回った。騒音レベルおよび振動加速度レベルは、すべての測定地点で、昼間の方が夜間に比べて大きい値だったが、昼間、夜間ともに基準を下回った。

第 4-4 表 食品廃棄物の炭化システムにおける敷地境界の各地点における騒音レベル

(dB)

測定地点	昼間(8時～18時)	夜間(21時～翌6時)
北	60	50
東	62	61
南	59	57
西	60	55
規制基準値*	70	65

* 騒音に係る環境基準について（昭和 46 年 5 月 25 日閣議決定，改正：平 10 環告 64，平 12 環告 20）に定める規制基準値。

第 4-5 表 食品廃棄物の炭化システムにおける敷地境界の各地点における振動加速度レベル

(dB)

測定地点	昼間(8時～18時)	夜間(21時～翌6時)
北	36	33
東	34	33
南	41	31
西	27	27
規制基準値*	70	65

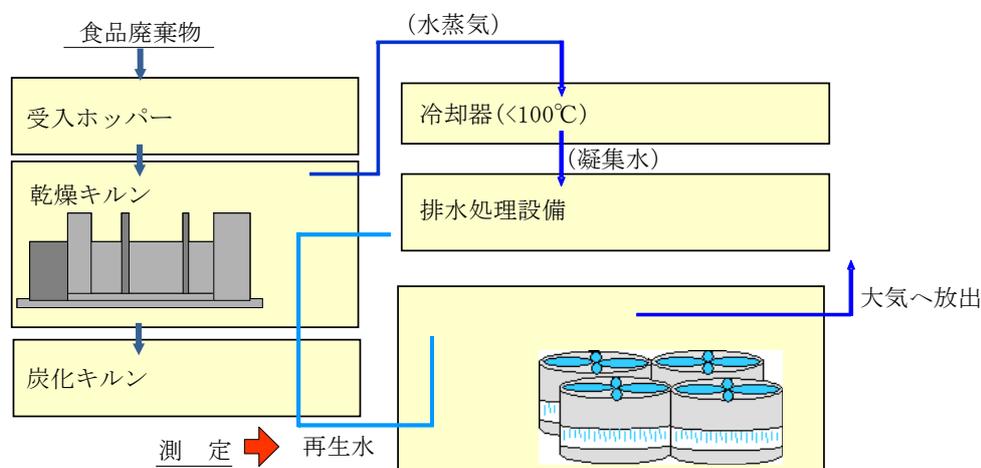
* 特定工場等において発生する振動の規制に関する基準（昭和 51 年 11 月 10 日 環境庁告示第 90 号，改正：平 10 環告 41）に定める規制基準値。

第3節 水質環境への影響

材料および方法

1. 食品廃棄物の炭化システムにおける乾燥水蒸気の再生処理フロー

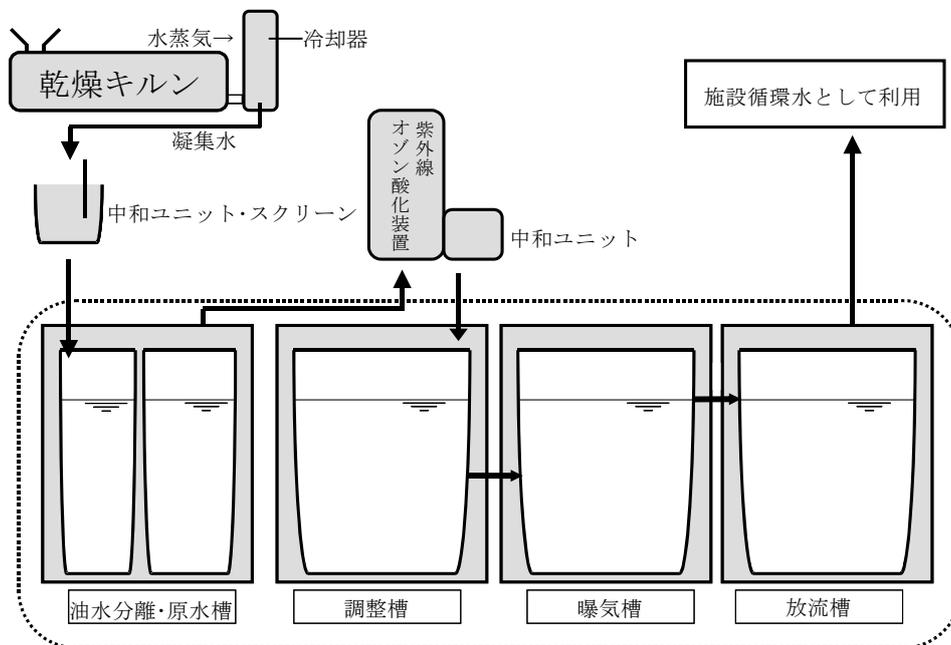
炭化システムによって食品廃棄物を乾燥する際に発生した水蒸気を 100℃以下に冷却して回収した（第4-5図）。食品廃棄物を受け入れホッパーで受け入れ後、乾燥キルンを用いて食品廃棄物を乾燥し、発生した水蒸気を、冷却器を用いて 100℃以下に冷却して凝集水を回収し、排水処理設備を用いて再生処理した。得られた再生水は、乾燥キルンおよび炭化キルンの冷却水として利用し、クーリングタワーを用いた冷却の過程で大気へ放出される構造になっている。



第4-5図 食品廃棄物の炭化システムにおける乾燥水蒸気の再生処理フロー

2. 乾燥水蒸気の再生処理方法と検液の採取

乾燥水蒸気の再生処理は、第4-6図に示す排水処理設備を使用した（アイエンス社製）。乾燥水蒸気を冷却回収した得た凝集水は、中和ユニット・スクリーンで、pH調整および浮遊物を除去して、油水分離・原水槽で、油水を分離した後、紫外線・オゾン酸化装置により凝集水中の有機物を酸化分解した。調整槽で中和した後、曝気槽で曝気処理した。曝気槽からオーバーフローで放流槽へ凝集水を移動した。検液は、処理前の凝集水および処理後の再生水を放流槽より必要量採取して検液とした。



第4-6図 食品廃棄物の炭化システムの排水処理設備の構成

3. 分析方法

JISK0102 に基き、以下の方法によって、採取した検液の水質汚濁物質を測定した。

pH は、コンパクト pH メータ (B-211, HORIBA 社製) を用いて測定した。

懸濁物質では、あらかじめ乾燥重量を測定したガラス繊維ろ紙 (孔径 $1\ \mu\text{m}$, 直径 30mm, アドバンテック社製) を用いて検液をろ過した。マッフル炉 (Muffle furnace F0510, ヤマト科学製) を用いて、ろ過後のろ紙を 105°C で 2 時間加熱し、デシケーター内で放冷してから重量を測定して、その増加分を懸濁物質として求めた。

ノルマルヘキサン抽出物質は、検液を分液漏斗に移し、塩酸 (1+1) を用いて pH4 以下の酸性に調製し、ノルマルヘキサンを加えて攪拌した後、しばらく静置して水層とヘキサン層が分離してから、水層を捨てた。この操作を 2 回行った後、ノルマルヘキサンをあらかじめ重量を測定しておいた蒸留フラスコに移し、マントルヒーターを用いて 80°C で加温して、ノルマルヘキサンを蒸留した。フラスコの重量を測定して、重量の増加分をノルマルヘキサン抽出物質とした。

硝酸および亜硝酸化合物は、検液を $0.45\ \mu\text{m}$ フィルター (アドバンテック社製) でろ過後、イオンクロマトグラフで以下の条件で測定した。使用したカラムは、Shim-Pack IC-A3 (島津製作所社製) を使用し、移動相は $8.0\ \text{mM}$ p-ヒドロキシ安息香酸および $3.2\ \text{mM}$ Bis-Tris を使用し、流量 $1.2\ \text{m/min}$, カラムオーブン温度 40°C の条件で測定した。

COD (Chemical oxygen demand, 化学的酸素要求量) は、検液 300 mL に蒸留水 100 mL を加えた後、フラスコに移し、硫酸 (1+2) 10 mL を加えた後、攪拌しながら $200\ \text{g/L}$ 硝酸銀溶液 5 mL を加えた。次に、 $5\ \text{mmol/L}$ 過マンガン酸カリウム溶液 10 mL を加えて振り混ぜ、直ちに沸騰水浴中に入れ、30 分間加熱した。水浴から取り出し、 $12.5\ \text{mmol/L}$ しゅう酸ナトリウム溶液を 10 mL 加えて振り混ぜた。液温が 60°C になるまで冷ましてから、 $5\ \text{mmol/L}$ 過マンガン酸カリウム溶液で検液が赤色を呈するまで滴定した。以下の式 (4-1) により COD を求めた。

$$\text{COD} = (a-b) \times f \times 1000/V \times 0.2 \quad \dots (4-1)$$

a : 滴定に要した $5\ \text{mmol/L}$ 過マンガン酸カリウム溶液 (mL)

b : 水を用いた試験の滴定に要した 5 mmol/L 過マンガンカリウム溶液 (mL)

f : 5 mmol/L 過マンガンカリウム溶液のファクター

V : 検液量 (mL)

また、f は以下のようにして求めた。0.42 g しゅう酸ナトリウムを少量の水に溶かして全量を 200 mL フラスコに入れ、水で定容した。25 mL を 300 mL 三角フラスコに移し、水で 100 mL とし、硫酸 (1+2) 10 mL を加え、ビュレットで 5 mmol/L 過マンガン酸カリウム溶液 22 mL を加え、紅色が消えるまで放置した。次に、50°C に加熱し、この 5 mmol/L 過マンガン酸カリウム溶液で微紅色を約 30 秒間保つようになるまで滴定した。f は以下の式 (4-2) で求めた。

$$f = a \times b / 100 \times 25 / 250 \times 1 / (x \times 0.001675) \dots (4-2)$$

a : しゅう酸ナトリウムの量 (g)

b : しゅう酸ナトリウムの純度 (%)

x : 滴定に要した 5 mmol/L 過マンガン酸カリウム溶液 (mL)

BOD (biochemical oxygen demand, 生物化学的酸素要求量) は、水を 20°C に調節した後、曝気して溶存酸素を飽和させた水 1 L に対して、緩衝液 (リン酸水素二カリウム 21.75 g, リン酸二水素カリウム 8.5 g, リン酸水素二ナトリウム・12 水 44.6 g および塩化アンモニウム 1.7 g を 1 L の水に溶かしたもの) 1 mL, 22.5 g/L 硫酸マグネシウム七水和物溶液 1 mL, 27.5 g/L 塩化カルシウム溶液 1 mL および 12.5 mmol/L 亜硫酸ナトリウム溶液 1 mL を加え、希釈水を作成した。この希釈水を用いて検液を希釈して培養瓶に移した後、20°C で 5 日間培養した。培養前後の溶存酸素量を溶存酸素計 (D0402G, 横河電機社製) で測定し、以下の式 (4-3) により、COD を求めた。

$$\text{BOD} = (D1 - D2) / P \dots (4-3)$$

BOD : 生物化学的酸素要求量 (mg/L)

D1 : 希釈検液を調製してから 15 分間後の溶存酸素 (mg/L)

D2 : 培養後の希釈検液の溶存酸素 (mg/L)

P : 希釈検液中の検液の占める割合 (検液/希釈検液)

全窒素 (T-N) の測定は、総和法を用いて測定した。検液に水酸化ナトリウムを加えて蒸留し、アンモニウムイオンおよび有機窒素化合物の分解で生じたアンモニアを除いた後、デバルタ合金を加えて亜硝酸イオンおよび硝酸イオンを還元してアンモニアとし、蒸留によって分離してから、インドフェノール青吸光度法で窒素を定量した。別に、検液に硫酸銅、硫酸カリウム、硫酸を加えて加熱分解して有機体窒素をアンモニウムイオンに変えた後、アルカリ性として蒸留し、検液中に含まれるアンモニウムイオンとともに蒸留分離し、インドフェノール青吸光度法によってその窒素の量を定量した。先に求めた亜硝酸イオン、硝酸イオン相当の窒素量を合わせて全窒素量を求めた。

全燐 (T-P) は、硝酸-化塩素酸法による湿式灰化を行った後、1 g/L p-ニトロフェノール溶液数滴を加え、初めに 200 g/L 水酸化ナトリウム溶液を、次に、40 g/L 水酸化ナトリウム溶液を加えて溶液がわずかに黄色になるまで中和した。検液を 50 mL に定容した後、25 mL を試験管に分取し、吸光度を測定して以下の式 (4-4) により、燐の量を求めた。

$$P = a \times 50 / 25 \times 1000 / V \cdot \cdot \cdot (4-4)$$

P : 全燐 (mg P/L)

a : 検液 25 mL 中の全燐量 (mg)

V : 検液量 (mL)

結果

凝集水の懸濁物質およびノルマルヘキサン抽出物質は、それぞれ 7.8 mg/L および 61.3 mg/L であったが、処理後は、どちらも検出されなかった (第 4-6 表)。また、硝酸・亜硝酸化合物は、処理前で検出されなかったのに対して、処理後では 2.9 mg/L が検出された。COD および BOD は処理前で、それぞれ、79.0 mg/L および 48.0 mg/L であり、処理後は検出されなかった。T-N および T-P は、それぞれ 35.0 mg/L および 0.6 mg/L であったのに対して、処理後は 2.2 mg/L

および非検出であった。処理前の凝集水は、水質汚濁物質を含んでいたが、排水処理設備により処理した再生水は、すべての水質汚濁物質が除去され、基準を満たした。

第 4-6 表 食品廃棄物の炭化システムで発生した乾燥水蒸気の再生水の処理前後における水質汚濁物質濃度

水質汚濁物質	再生水		基準* ²
	処理前	処理後	
	pH	5.0	7.8
懸濁物質	7.8	N. D. * ¹	<2.5
ノルマルヘキサン抽出物質	61.3	N. D	検出されないこと
硝酸・亜硝酸化合物	N. D.	2.9	<10.0
COD	79.0	<5.0	<8.0
BOD	48.0	<5.0	<10.0
T-N	35.0	2.2	<120
T-P	0.6	<0.1	<16

*¹ N. D. は、検出下限値以下を示す。

*² 生活環境の保全に関する環境基準値を示す。

第4節 炭化の炭素収支

材料および方法

炭への炭素固定量および処理に使用するエネルギー起源の炭素放出量から炭化の炭素収支を算出した。供試した食品廃棄物の内訳は、湿重量あたりで、食品製造業が 69.1%，食品小売業が 23.3%，外食産業が 7.6%だった。食品廃棄物の炭化処理に伴う炭素固定量は、食品廃棄物の水分率を 65%，炭の収率を乾重量あたり 17.3%，炭の炭素率を 67.7%として、以下の式(4-5)によって算出した。

$$\begin{aligned} \text{炭素固定量(t)} = \\ \text{食品廃棄物処理量(t)} \times (100\% - 65\%) \times 17.3\% \times 67.7\% \quad \dots (4-5) \end{aligned}$$

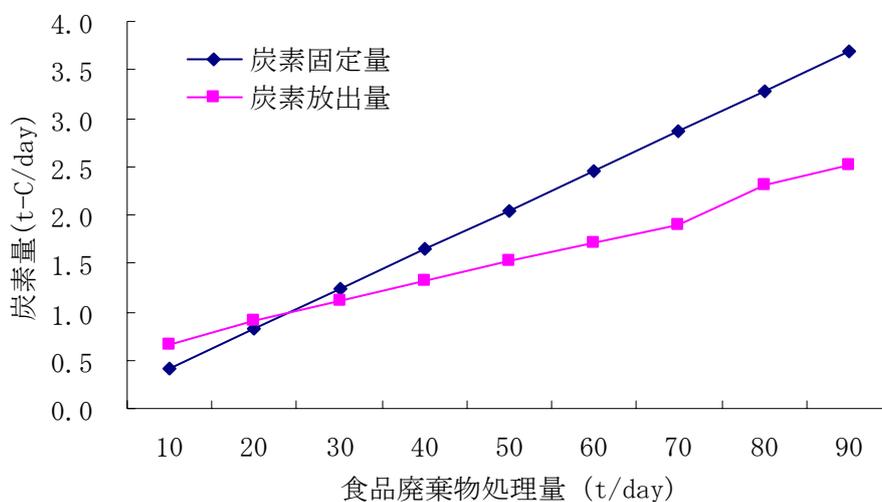
また、食品廃棄物を日量で 10 t, 30 t, 50 t, 70 t, 90 t を処理した際の灯油使用量および電気使用量を実測し、以下の式(4-6)により、炭素放出量を算出した。二酸化炭素の排出係数は「地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく地方公共団体の事務及び事業に係る温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン」を使用し、灯油は 1 L 当たり 2.5284 kg-CO₂，電気は 1 kWh あたり 0.384 kg-CO₂ とした。

$$\begin{aligned} \text{炭素放出量(t)} = \\ [\text{灯油使用量(L)} \times 2.5284 \text{ kg-CO}_2/\text{L} + \text{電気使用量(kWh)} \times 0.384 \\ \text{kg-CO}_2/\text{kWh}] \times 12/44 \quad \dots (4-6) \end{aligned}$$

結果

炭化システムの炭素収支を第4-7図に示した。炭化システムによる食品廃棄物の1日当たりの炭素固定量および炭化に伴う炭素放出量を示した。

炭素固定量は、10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 および 90 t/day で、それぞれ 0.41, 0.82, 1.23, 1.64, 2.05, 2.46, 2.87, 3.28, 3.69 t-C/day であった。一方、炭素放出量は、それぞれ 0.67, 0.91, 1.12, 1.31, 1.52, 1.71, 1.90, 2.32 および 2.51 t-C/day であった。第4-7図に示した炭素固定量および炭素放出量の線形から、交点の食品廃棄物処理量を求めると 24 t/day であった。24 t/day 以上のすべての食品廃棄物処理量において、炭素固定量が炭素放出量を上回った。90 t/day での炭素固定量および炭素放出量は、3.69 t-C/day および 2.51 t-C/day であり、その差は、1.18 t-C/day だった。



第4-7図 食品廃棄物の炭化の炭素収支 (1日当たり)

第5節 炭化の LCA 手法を用いた環境影響の評価

材料および方法

食品廃棄物の炭化について、LCA手法を用いて各段階における二酸化炭素発生量を以下に示す条件を設定して算出し、焼却の場合と比較した。

1. 炭化処理

(1) 食品廃棄物の回収

食品廃棄物の回収における二酸化炭素排出量原単位は、以下の設定で計算した。食品廃棄物の水分率を65%、食品廃棄物の車両積載量を車両1台あたり5 t W. W. (wet weight : W. W.) とし、輸送回数は食品廃棄物の湿重量 1 tあたり、0.2 台/t W. W. とした。平均輸送距離は実績値を用いて、片道あたり30 kmとした。回収車両の燃料を軽油および燃費を3.5 km/Lとして、燃料消費量を食品廃棄物の重量あたり3.43 L/t W. W. とした。軽油の二酸化炭素排出係数 2.49 kg-CO₂/Lを用いて、食品廃棄物の回収にかかる二酸化炭素排出量原単位を求めた。

(2) 炭化処理

90 t W. W. /dayで食品廃棄物を炭化した際の実績値を用いて、炭化の処理に係る灯油使用量および電力使用量を、食品廃棄物の重量あたり、それぞれ、54 L/t W. W. および122 kWh/t W. W. とした。灯油および電力の二酸化炭素排出係数は、それぞれ2.49 kg-CO₂/Lおよび0.339 kg-CO₂/kWh (東京電力株) とし、食品廃棄物の炭化処理にかかる二酸化炭素排出量原単位を求めた。

(3) 得られた炭の輸送

炭製造量は、炭の収率を食品廃棄物の乾重量あたり17.3%、食品廃棄物の水分率65%から、炭製造量は食品廃棄物の重量あたり0.088 kg D. W. /t W. W.

(D. W. : dry weight) とした。製造した炭の輸送距離は、実績より100 km、炭の車両積載量を車両1台あたり10 t D. W. および炭の輸送回数を食品廃棄物の湿重量 1 tあたり0.008 台とし、食品廃棄物より得られた炭の輸送にかかる二酸化炭素排出量原単位を求めた。

2. 焼却処理

(1) 食品廃棄物の回収

第4章 第5節 供試材料および方法 (1)炭化处理 と同じとした。

(2) 焼却

焼却処理は、一般廃棄物の焼却処理の場合の二酸化炭素排出量原単位を用いて（社団法人産業環境管理協会，2003），食品廃棄物の重量あたり33.4 kg-CO₂/t W.W.とした。

(3) 焼却灰輸送

食品廃棄物の焼却によって発生する焼却灰の量は、食品廃棄物中の灰分を3%（食品成分データベース，2012），すべて焼却灰になると仮定した場合の焼却灰の発生量を食品廃棄物の重量あたり，0.03 t D.W./t W.W.とした。焼却灰の輸送距離は、一般的な輸送距離 100 km（環境省・経済産業省，2009）とし，輸送原単位 0.101 kg-CO₂/tkmとした（経済産業省，2012）。焼却灰輸送の二酸化炭素排出量原単位を求めた。

(4) 焼却灰埋立

焼却灰の埋立に伴う二酸化炭素排出量原単位は，報告値0.038 t-CO₂/t D.W.（経済産業省，2012）を用いて，食品廃棄物の焼却処理によって発生する焼却灰量（0.03 t D.W./t W.W.）から，焼却灰埋立にかかる二酸化炭素排出量原単位を求めた。

3. 炭の利用方法

(1) 炭の石炭代替燃料利用

一般炭のボイラー燃焼にともなう二酸化炭素排出量2.37 kg-CO₂/kg（経済産業省，2012）を使用した。食品廃棄物より得られる炭の発熱量は，実績より26.1 MJ/kgとし，供給熱量を食品廃棄物の重量あたり，2,284 MJ/t W.W.とした。一方，代替石炭量は，食品廃棄物から得られた炭の供給熱量を一般炭の発熱量26.6 MJ/kgで除して求め，代替石炭量は食品廃棄物の重量あたり，0.086 t D.W./t W.W.とし，石炭燃焼による二酸化炭素排出量原単位を求めた。

(2) 炭の土壌改良資材利用

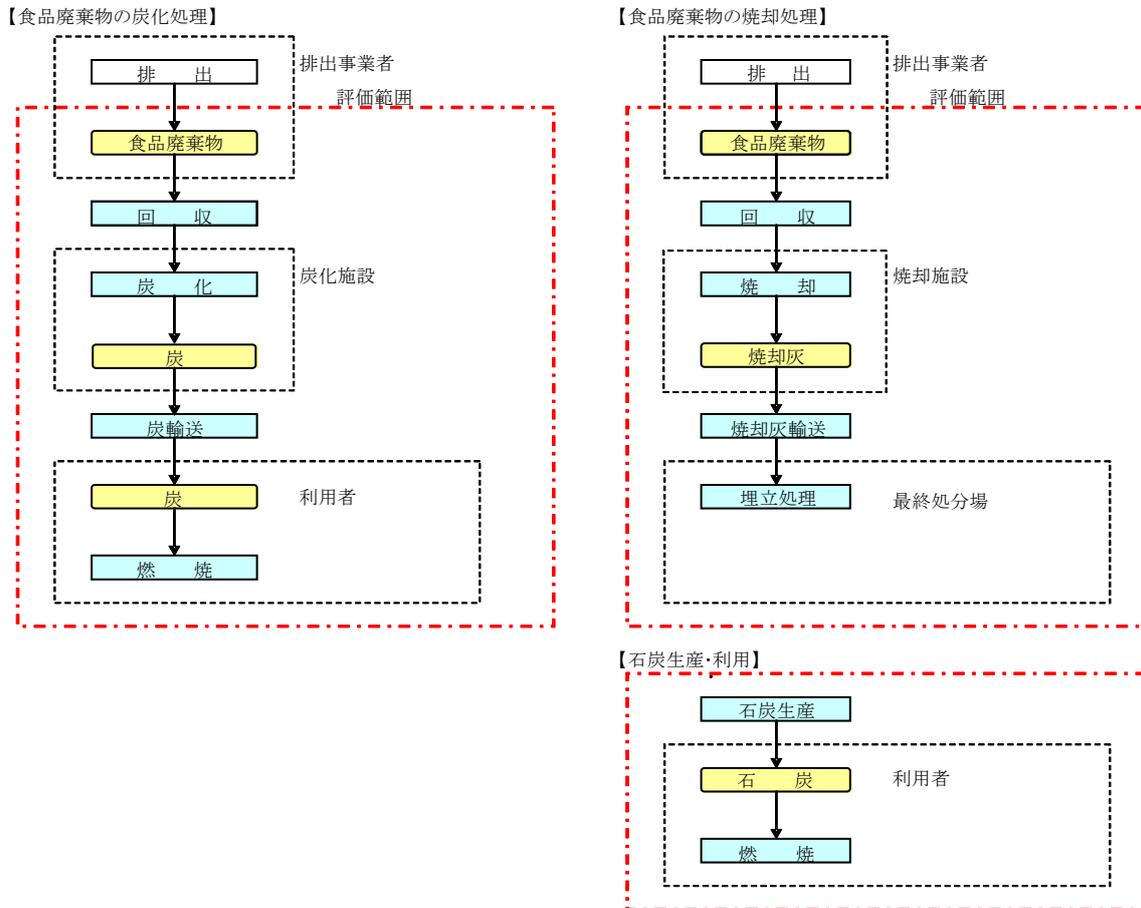
炭を土壌改良資材として利用し、土壌に施用した炭中の炭素が長期貯留すると仮定した場合の二酸化炭素排出量（削減量）原単位を求めた。炭製造量は、本章（第4章）の、1.炭化处理、(3)得られた炭の輸送 で求めた炭の製造量（食品廃棄物の重量あたり0.088 kg D. W. /t W. W.）とし、炭の平均炭素率（67.7% D. W. 第3章 第2項 食品廃棄物から得られた炭の特性）をかけて炭素量を求めた。

4. LCA分析の評価範囲

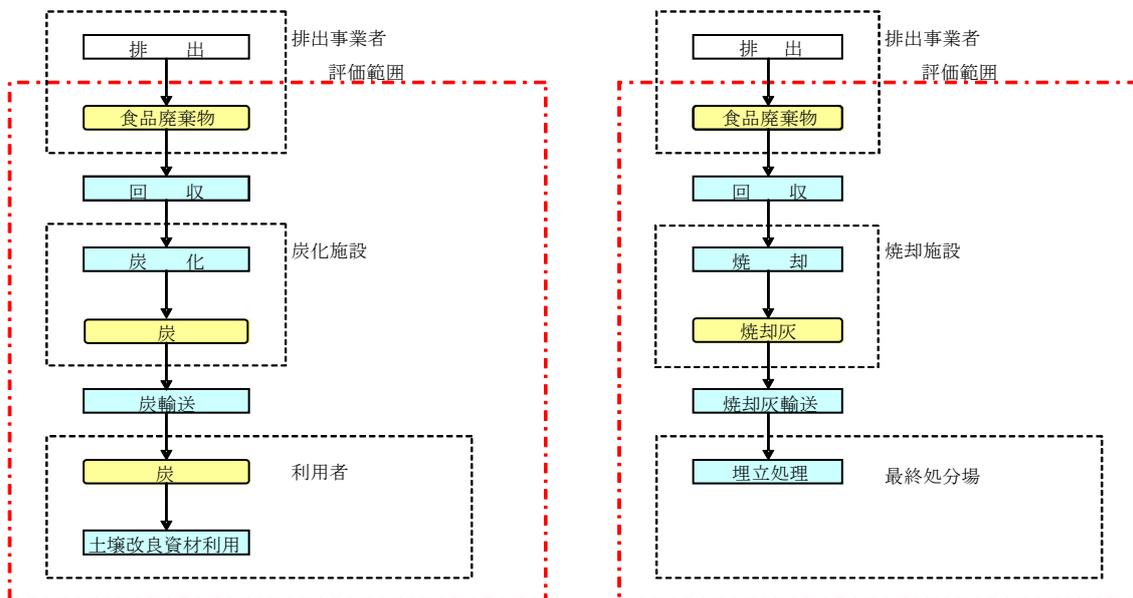
食品廃棄物より得た炭を石炭代替燃料として利用した場合の炭化および焼却の評価範囲は第4-8図に示すとおりにした。食品廃棄物の炭化は、食品廃棄物の排出から回収、炭化处理、炭の輸送から利用に至るまでの全工程を対象にした。

焼却処理では、食品廃棄物の回収、焼却および焼却に伴って発生する焼却灰の輸送および埋立処理に至るまでの全工程を評価範囲にした。また、食品廃棄物の炭化によって得られた炭を石炭の代替燃料として利用することを想定し、代替する石炭を燃焼させた場合の二酸化炭素発生量を焼却に加えた。

また、食品廃棄物より得た炭を土壌改良資材として利用し、炭中の炭素が土壌に長期貯留すると仮定した場合の炭化および焼却の評価範囲を第4-9図に示した。炭中の炭素貯留による二酸化炭素削減量は食品廃棄物の炭化に加えた。



第4-8図 食品廃棄物より得た炭を石炭代替燃料として利用した場合の食品廃棄物の炭化および焼却のLCA分析の評価範囲



第4-9図 食品廃棄物より得た炭を土壌改良資材として利用し，炭中の炭素が長期貯留すると仮定した場合の食品廃棄物の炭化および焼却のLCA分析の評価範

囲

結果

(1) 食品廃棄物より得た炭を石炭代替燃料として利用した場合の食品廃棄物の炭化および焼却におけるLCA手法を用いた二酸化炭素排出量

食品廃棄物の炭化は、回収距離を30 km、往復60 km、運搬車両の燃料を軽油、燃費を3.5 km/Lと仮定すると、食品廃棄物の回収にかかる二酸化炭素発生量の原単位は、食品廃棄物湿重量あたり8.5 kg-CO₂/t W.W.となった（第4-7表）。90 t/dayで食品廃棄物を処理した際の実績値（灯油使用量 54.0 L/t W.W.、電気使用量 122.0 kWh/t W.W.）に基づいて計算した結果、炭化にかかる二酸化炭素発生量の原単位は食品廃棄物湿重量あたり175.8 kg-CO₂/t W.W.となった。食品廃棄物の炭化によって得られる食品廃棄物の乾重量あたりの炭の収率を17.3%とし、運搬車両1台あたり10 tの炭を積載し、炭の利用先までの距離を100 kmとした場合には、炭輸送にかかる二酸化炭素排出量の原単位は、食品廃棄物湿重量あたり40.1 kg-CO₂/t W.W.となった。食品廃棄物の回収から炭の利用に至るまでの二酸化炭素排出量の原単位は、食品廃棄物の湿重量あたり192.4 kg-CO₂/t W.W.と推定された。

食品廃棄物の焼却の場合には（第4-8表）、食品廃棄物の回収にかかる二酸化炭素排出量の原単位を炭化と同じにした（食品廃棄物湿重量あたり8.5 kg-CO₂/t W.W.）。焼却処理にかかる二酸化炭素排出量の原単位は、一般廃棄物の焼却処理にかかる二酸化炭素排出量原単位を使用し、食品廃棄物湿重量あたり33.4 kg-CO₂/t W.W.となった（産業環境管理協会、2003）。食品廃棄物中の灰分を3%として、灰分がすべて焼却灰になると仮定した場合すると、その発生量は食品廃棄物湿重量あたりで0.03 t D.W./t W.W.となった。軽油燃料車両1台あたり10 tの焼却灰を積載して100 km離れた埋立処分場まで輸送すると仮定した場合の焼却灰輸送にかかる食品廃棄物湿重量あたりの二酸化炭素排出量の原単位は、0.303 kg-CO₂/t W.W.となった。焼却灰の埋立にかかる二酸化炭素発生量原単位を0.038 kg-CO₂/t D.W.とし（経済産業省、2012）、食品廃棄物の焼却によって発生する焼却灰の量から、二酸化炭素排出量の原単位を求めた結果、食品廃棄物湿重量あたり1.14 kg-CO₂/t W.W.となった。また、食品廃棄物の炭

化によって得られる炭によって代替できる石炭（一般炭）の燃焼に伴う二酸化炭素排出量を求めた結果、食品廃棄物湿重量あたり203.7 kg-CO₂/t W.W.となった。食品廃棄物の焼却の二酸化炭素排出量の原単位は、湿重量あたりで246.9 kg-CO₂/t W.W.であり、炭化の方が焼却に比べて排出量が低いと考えられた。

(2) 食品廃棄物より得た炭を土壌改良資材として利用し、炭中の炭素が長期貯留すると仮定した場合の食品廃棄物の炭化および焼却におけるLCA手法を用いた二酸化炭素排出量

第4-9表に、食品廃棄物より得た炭を土壌改良資材として利用し、炭中の炭素が長期貯留すると仮定した場合の食品廃棄物の炭化における二酸化炭素排出量原単位を推定した結果を示した。食品廃棄物の回収から炭化および土壌改良資材としての炭の利用先までの輸送は、第4-7表に示した石炭代替燃料として炭を利用した場合と同じと推定された。炭の土壌改良資材利用による炭中の炭素の貯留量は、食品廃棄物の湿重量あたり218.4 kg-CO₂/t W.W.と推定された。食品廃棄物の炭化における回収から利用に至る二酸化炭素排出量原単位は、炭素の貯留量を減算した結果、食品廃棄物の湿重量あたり-26.1 kg-CO₂/t W.W.と推定された。食品廃棄物を土壌改良資材として利用した場合における焼却の二酸化炭素排出量は、食品廃棄物の湿重量あたり43.3 kg-CO₂/t W.W.と推定され（第4-10表）、食品廃棄物の炭化が、二酸化炭素排出量原単位が低い値を示した。

第4-7表 食品廃棄物より得た炭を石炭代替燃料として利用した場合の食品廃棄物の炭化におけるLCA手法を用いた二酸化炭素排出量

工 程	二酸化炭素排出量	算出基礎
食品廃棄物		
発生量	1.0 t W.W.	
水分率	65.0%	実績値
回 収		
輸送距離	60.0 km	片道 30km
台数	0.2 台	1台あたり食品廃棄物 5 t W.W. 積載
軽油	3.4 L	燃費 3.5 km/L
回収原単位	8.5 kg-CO ₂ /t W.W.	軽油排出係数 2.49kg-CO ₂ /L
炭 化		
灯油消費量	54.0 L/t W.W.	90 t/day で炭化した際の実績値
電気消費量	122.0 kWh/t W.W.	90 t/day で炭化した際の実績値
灯油起源 CO ₂ 発生量	134.5 kg-CO ₂ /t W.W.	CO ₂ 排出係数：2.49 kg-CO ₂ /kWh
電気起源 CO ₂ 発生量	41.3 kg-CO ₂ /t W.W.	CO ₂ 排出係数：0.339 kg-CO ₂ /kWh
炭化原単位	175.8 kg-CO ₂ /t W.W.	
炭輸送		
輸送距離	100 km	実績値
台数	0.008 台/t W.W.	1台あたり炭を 10 t D.W. 積載
軽油	3.1 L/t W.W.	CO ₂ 排出係数：2.49kg-CO ₂ /L
炭製造量	0.088 t D.W./t W.W.	炭収率 17.3%
供給熱量	2284 MJ/t W.W.	発熱量 26.1 MJ/kg
代替石炭量	0.086 t/t W.W.	一般炭発熱量 26.6 MJ/kg
炭輸送原単位	8.0 kg-CO ₂ /t W.W.	
計	192.4 kg-CO ₂ /t W.W.	

第4-8表 食品廃棄物より得た炭を石炭代替燃料として利用した場合の食品廃棄物の焼却におけるLCA手法を用いた焼却の二酸化炭素排出量

工 程	算出基礎	
食品廃棄物		
発生量	1.0 t W.W.	水分率 65%
回 収		
輸送距離	60.0 km	片道 30km
台数	0.2 台	1台あたり食品廃棄物 5 t W.W. 積載
軽油	3.4 L	燃費 3.5 km/L
回収原単位	8.5 kg-CO ₂ /t W.W.	軽油排出係数 2.49 kg-CO ₂ /L
焼 却		
単純焼却	33.4 kg-CO ₂ /t W.W.	焼却処理の CO ₂ 排出量原単位
焼却灰発生量	0.03 t D.W./t W.W.	食品廃棄物 3%含有想定
焼却原単位	33.4 kg-CO ₂ /t W.W.	
焼却灰輸送		
輸送距離	100 km	産業廃棄物輸送標準条件
焼却灰輸送量	0.03 t D.W./t W.W.	1台あたり焼却灰を 10 t D.W. 積載
輸送原単位	0.10 kg-CO ₂ /tkm	CFP 共通原単位 DBver. 3.0
焼却灰原単位	0.303 kg-CO ₂ /t W.W.	
焼却灰埋立		
焼却灰埋立量	0.03 t D.W./t W.W.	
埋立原単位	0.038 kg-CO ₂ /t	CFP 共通原単位 DBver. 3.0
焼却灰埋立原単位	1.14 kg-CO ₂ /t W.W.	
炭の利用		
代替石炭量	0.086 kg/t W.W.	第 4-9 表の計算値
一般炭ボイラー燃焼	2.37 kg-CO ₂ /t	一般炭の採掘～燃焼
石炭代替原単位	203.7 kg-CO ₂ /t W.W.	
計	246.9 kg-CO ₂ /t W.W.	

第4-9表 食品廃棄物より得た炭を土壌改良資材として利用した場合の食品廃棄物の炭化におけるLCA手法を用いた二酸化炭素排出量

工 程	二酸化炭素排出量	算出基礎
食品廃棄物		
発生量	1.0 t W.W.	
水分率	65.0%	実績値
回 収		
輸送距離	60.0 km	片道 30km
台数	0.2 台	1台あたり食品廃棄物 5 t W.W. 積載
軽油	3.4 L	燃費 3.5 km/L
回収原単位	8.5 kg-CO ₂ /t W.W.	軽油排出係数 2.49kg-CO ₂ /L
炭 化		
灯油消費量	54.0 L/t W.W.	90 t/day で炭化した際の実績値
電気消費量	122.0 kWh/t W.W.	90 t/day で炭化した際の実績値
灯油起源 CO ₂ 発生量	134.5 kg-CO ₂ /t W.W.	CO ₂ 排出係数 : 2.49 kg-CO ₂ /kWh
電気起源 CO ₂ 発生量	41.3 kg-CO ₂ /t W.W.	CO ₂ 排出係数 : 0.339 kg-CO ₂ /kWh
炭化原単位	175.8 kg-CO ₂ /t W.W.	
炭輸送		
輸送距離	100 km	実績値
台数	0.008 台/t W.W.	1台あたり炭を 10 t D.W. 積載
軽油	3.1 L/t W.W.	CO ₂ 排出係数 : 2.49kg-CO ₂ /L
炭製造量	0.088 t D.W./t W.W.	炭収率 17.3%
供給熱量	2284 MJ/t W.W.	発熱量 26.1 MJ/kg
代替石炭量	0.086 t/t W.W.	一般炭発熱量 26.6 MJ/kg
炭輸送原単位	8.0 kg-CO ₂ /t W.W.	
炭素貯留原単位	-218.4 Kg-CO ₂ /t W.W.	炭の炭素率 67.7% D.W.
計	-26.1 kg-CO ₂ /t W.W.	

第4-10表 食品廃棄物より得た炭を土壌改良資材として利用した場合の食品廃棄物の焼却におけるLCA手法を用いた二酸化炭素排出量

工 程	算出基礎	
食品廃棄物		
発生量	1.0 t W.W.	水分率 65%
回 収		
輸送距離	60.0 km	片道 30km
台数	0.2 台	1台あたり食品廃棄物 5 t W.W. 積載
軽油	3.4 L	燃費 3.5 km/L
回収原単位	8.5 kg-CO ₂ /t W.W.	軽油排出係数 2.49 kg-CO ₂ /L
焼 却		
単純焼却	33.4 kg-CO ₂ /t W.W.	焼却処理の CO ₂ 排出量原単位
焼却灰発生量	0.03 t D.W./t W.W.	食品廃棄物 3%含有想定
焼却原単位	33.4 kg-CO ₂ /t W.W.	
焼却灰輸送		
輸送距離	100 km	産業廃棄物輸送標準条件
焼却灰輸送量	0.03 t D.W./t W.W.	1台あたり焼却灰を 10 t D.W. 積載
輸送原単位	0.10 kg-CO ₂ /tkm	CFP 共通原単位 DBver. 3.0
焼却灰原単位	0.303 kg-CO ₂ /t W.W.	
焼却灰埋立		
焼却灰埋立量	0.03 t D.W./t W.W.	
埋立原単位	0.038 kg-CO ₂ /t	CFP 共通原単位 DBver. 3.0
焼却灰埋立原単位	1.14 kg-CO ₂ /t W.W.	
計	43.3 kg-CO ₂ /t W.W.	

第6節 炭化の経済性評価

材料および方法

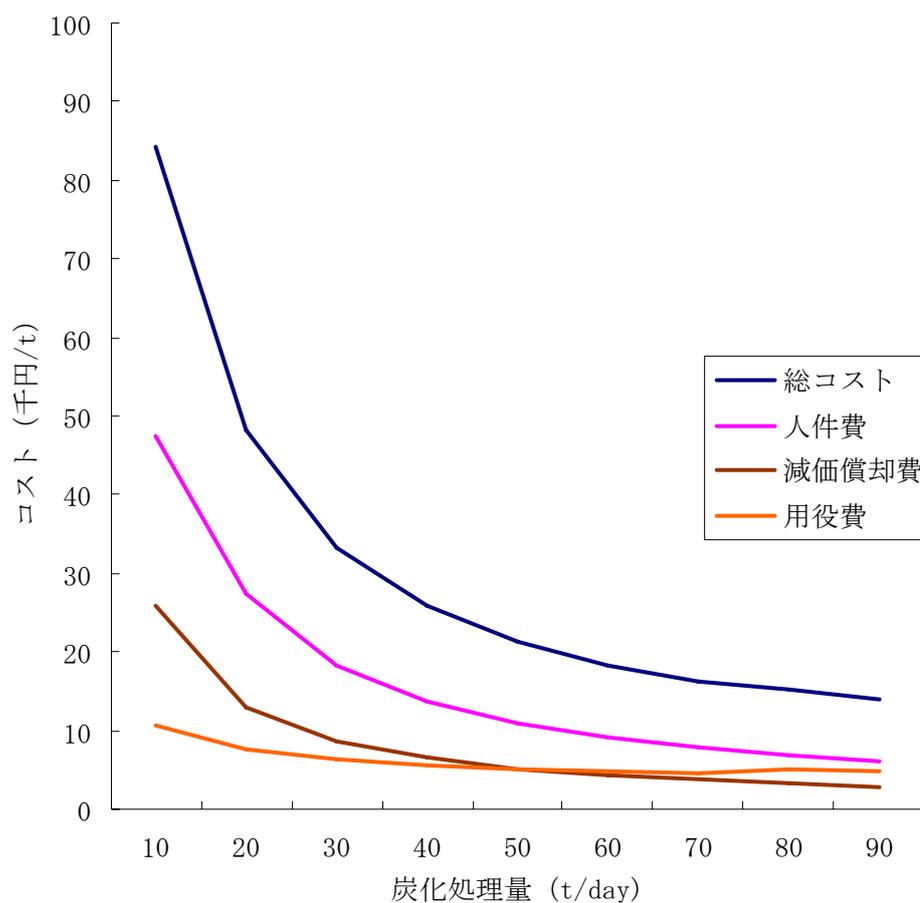
使用した食品廃棄物の内訳は、湿重量あたりで、食品製造業が 69.1%、食品小売業が 23.3%、外食産業が 7.6%だった。人件費は食品廃棄物処理量 10 t/day までは作業員 9 名体制(3 交代 24 時間)、20 t 以上は作業員 12 名体制(3 交代 24 時間) + 管理部門 10 名で算出(人員数×25,000 円/day)した。電力費(15 円/kWh)、水道費(大阪府堺市水道局水道料気計算式より算出)、燃料費(70 円/L)および薬品類費の合計を用役費とした。減価償却費は、定額制とし、26 万円/日/設備建物(耐用年数 15 年)で計算した。炭化システムの最大能力 90 t/day まで検証した。

結果

10 t/day から 90 t/day までの食品廃棄物を炭化した場合のコストを試算した(第 4-10 図)。人件費は、10 t/day の場合には 47,500 円/t、90 t/day の場合には 6,111 円/t であった。用役費は、10 t/day の場合には 10,661 円/t であったのに対して、90 t/day の場合には、4,944 円/t であった。減価償却費は、10 t/day の場合には 26,000 円/t であったのに対して、90 t/day の場合には 2,889 円/t であった。10 t/day で 84,161 円/t、90 t/day の場合には、13,944 円/t であり、処理量の増加に伴って、コストが低下した。

第 4-11 表に、炭化システムの 90 t/day の場合のコストをごみ焼却施設およびメタン発酵施設(環境省, 2006)と比較した。人件費は、ごみ焼却施設が 3,440 ~ 7,250 円/t、メタン発酵施設が 5,210 ~ 7,130 円/t に対して、炭化は 5,238 円/t であった。用役費は、ごみ焼却施設が 710 ~ 2,500 円/t、メタン発酵施設が 3,870 ~ 7,600 円/t に対して、炭化は、4,723 円/t であった。減価償却費は、ごみ焼却施設が 2,500 ~ 10,720 円/t、メタン発酵施設が 12,370 ~ 15,740 円/t に対して、炭化は 2,476 円/t であった。全体のコストは、ごみ焼却施設が 13,450 ~ 18,790 円/t、メタン発酵施設が 24,820 ~ 27,100 円/t に対して、炭化は

13,944 円/t であった。炭化システムの人件費および用役費は、焼却に比べて同等かそれ以下であった。また、メタン発酵施設と比較するとコストは低い値を示した。



*1：人件費はバイオマス処理量 10 t/day までは作業員 9 名体制(3 交代 24 時間)，20 t 以上は作業員 12 名体制 (3 交代 24 時間) + 管理部門 10 名で算出 (人員数×25,000 円/day) 。

*2：用役費は電力費 (15 円/kWh) ，水道費 (大阪府堺市水道局水道料気計算式より算出) ，燃料費 (70 円/L) および薬品類費を内訳とする。

*3：減価償却費は、定額制とし、26 万円/日/設備建物 (耐用年数 15 年) で計算。

第 4-10 図 食品廃棄物の炭化における 1 t あたりの人件費，用役費，減価償却費および総コストの推定

第 4-11 表 食品廃棄物の炭化と焼却およびメタン発酵の処理コストの比較*

	処理能力 (t/day)	人件費 (円/t)	用役費 (円/t)	減価償却費 (円/t)	合計 (円/t)
炭化システム	90	5,238	4,723	2,476	13,944
ごみ焼却施設 A	600	3,440	710	10,720	17,020
ごみ焼却施設 B	450	6,820	900	2,500	14,570
ごみ焼却施設 C	600	7,250	2,500	7,600	18,790
ごみ焼却施設 D	600	6,050	1,410	2,740	13,450
メタン発酵施設 A	55	7,130	7,600	12,370	27,100
メタン発酵施設 B	22	5,210	3,870	15,740	24,820

*ごみ焼却施設およびメタン発酵施設については、平成 18 年「第 6 回生ごみ等の 3R・処理に関する検討会」参考資料をもとに筆者が作成した。施設の減価償却費は（取得価格-残存価格）×償却率（耐用年数 15 年）で計算し、報告している。

第7節 考察

炭化は、食品廃棄物に対して酸素供給を制約するので、人為的に不完全燃焼を誘発する。そのため、ダイオキシン類が合成されやすい（平岡，1992）。本研究の結果では、熱分解ガスの燃焼および燃焼ガスの急速冷却ができており、ダイオキシン類の合成を低減および除去できることが明らかになった（第4-2表）。ダイオキシン類は、原料中に塩素を含むビニル類が多く含まれる場合に合成されやすい（Yasuhara, 1991）。また、ダイオキシン類が合成されやすい温度帯は300～600℃の低温であり（三好，2007）、燃焼後のガスを300℃の不十分な冷却をした場合には、約6.6倍のダイオキシン類が再合成される（久保田，2005）。排出事業者の分別が不十分な場合には、食品廃棄物中にビニル類が多く含まれる場合がある（西谷，2005）。ビニル類は比重が軽いので、風力選別機を用いて（大井，2000）、あらかじめ取り除く方が望ましい。また、ダイオキシン類は、温度条件によって合成および再合成されやすいので、その合成を防ぐためには、熱分解ガスの815℃以上の燃焼および200℃以下への急速冷却を維持管理しなければならない。原則として、悪臭物質は、作業環境中の雰囲気あるいは工場施設の敷地境界線に適用される基準であるが、高い精度で安全性を確認することを目的に、本研究では、排ガスの悪臭物質を測定した。すべての悪臭物質が基準以下であったことから（第4-3表）、排ガスが大気へ及ぼす影響は極めて低いと考えられた。産業廃棄物および一般廃棄物に区分される食品廃棄物を炭化する場合には、廃棄物処分量の許可を取得する必要がある、国が指定する環境アセスメントの実施や環境影響を調査しなければならない。また、大気汚染防止法によって、年2回以上の排ガスの検査および基準の遵守が義務付けられていることより、本研究で得られた結果の意義は大きい。

供試した炭化システムは設置する際、建屋の防音、防振対策の充実を図ったので、すべての測定地点で、騒音レベル（第4-4表）および振動加速度レベル、（第4-5表）が、昼間、夜間で基準を満たし、周囲への影響は極めて低いレベルであることが明らかになった。夜間の方が昼間よりも騒音レベルおよび振動加速度レベルの数値が低かった。これは、リフト車両の往来が夜間で少なかったことが原因と考えられた。本研究では、炭化を設置する敷地の境界線上で測

定した。しかし、周囲の環境への影響を考えると、炭化施設周辺のみならず、食品廃棄物の回収車両の往来に伴う道中における騒音・振動の影響についても考慮する必要がある。最近の研究により、低レベル騒音によって、周辺住民に悪影響を及ぼし、苦情の原因になることが分かっている（渡邊，2002）。したがって、炭化施設の設置の際には、周囲環境を吟味して最適な設置場所を選択する必要がある。

食品廃棄物の乾燥によって発生した水蒸気を冷却回収して得られた凝集水中には、水質汚濁物質が含まれており、特に、懸濁物質、ノルマルヘキサン抽出物質、COD および BOD は高い値を示した。食品廃棄物の乾燥によって食品中の成分が水蒸気と一緒に揮発している可能性が高いと考えられた（堀内，2005；谷田貝，1996）。また、亜硝酸および硝酸化合物が処理後で増加したのは、脱窒過程で有機態窒素の硝化が進んだこと（井上，2003）が原因と考えられた。これらの水質汚濁物質が排水処理設備によって、すべて低減および除去できることが明らかになり、炭化システムが水質環境に及ぼす影響は極めて小さいと考えられた。

炭化システムの炭素収支を分析した結果、1日あたり 24 t 以上の食品廃棄物を炭化することによって、炭素固定量が炭素放出量を上回ることが明らかになった（第 4-7 図）。このことから、大気中への炭素放出を減少できることが示された。また、処理量の増加に伴って、炭素固定量の増加率は炭素放出量を上回る傾向であり、炭化が炭素収支においてマイナスであることが明らかになった。90t/day で食品廃棄物を炭化した場合には、炭素固定量と炭素放出量の差が、 -1.18 t-C/day であり、二酸化炭素に換算すると -4.33 t-C/day であった。

また、LCA 手法を用いて、食品廃棄物の回収、処理および利用に至るまでの二酸化炭素発生量を炭化（第 4-7 表）と焼却（第 4-8 表）で比較した結果、食品廃棄物より得た炭を石炭代替燃料として利用した場合、食品廃棄物を炭化した方が焼却に比べて、二酸化炭素排出量が少ないことが明らかになり、食品廃棄物の湿重量あたりで $54.5 \text{ kg-CO}_2/\text{t W. W.}$ の削減になることが示された。また、食品廃棄物より得た炭を土壌改良資材として利用し、炭中の炭素が土壌に長期貯留すると仮定した場合には、食品廃棄物の湿重量あたりの二酸化炭素排出量原単位が、炭化（第 4-9 表）および焼却（第 4-10 表）が、それぞれ、 $-26.1 \text{ kg-CO}_2/\text{t}$

W.W. および 43.3 kg-CO₂/t W.W. となり、二酸化炭素の削減量は食品廃棄物の湿重量あたり 69.4 kg-CO₂/t W.W. と推定され、食品廃棄物より得られた炭を土壤改良資材として利用した場合の方が、石炭利用した場合に比べて、二酸化炭素の削減効果が大きいと考えられた。楠部によれば（1998）、単一原料であるオカラ、醤油粕、パン屑の食品廃棄物の飼料化について、LCA 手法を用いて焼却の場合と比較している。この報告によれば、肥料化による二酸化炭素の削減効果は、これら食品廃棄物の湿重量あたりで、それぞれ、オカラが 227 kg-CO₂/t W.W.、醤油粕が 220 kg-CO₂/t W.W.、パン屑が 289 kg-CO₂/t W.W. と報告しており、炭化と比較して二酸化炭素の削減効果大きいことが伺える。炭化については、二酸化炭素削減効果があるものの、さらに効率を高める必要があると考えられた。地球温暖化の主な原因が、人間の活動によって増加した大気中の二酸化炭素によるとほぼ断定されている（IPCC, 2011）。その対策としては、炭素を固定する植物の増加、化石燃料消費の減少、二酸化炭素を固定する、が考えられる（小島, 1992）。植物を増やす方法は、植物が炭素を固定してくれるが、森林伐採と植林のバランスを保つことが難しく、森林が著しく増加した場合には、炭素循環のサイクルが早まるのみで、二酸化炭素の削減への早急な対策にならないとの見解もある（畑中, 2002）。化石燃料消費量の減少は、太陽光や風力による再生可能エネルギーの利用やバイオマスの利用が有効である。また、大気中の二酸化炭素を分離・回収して、有機合成の材料として利用できる（坂倉, 2002）。しかし、製品のライフサイクルにあわせて、比較的、短い期間で二酸化炭素に戻るため、化石燃料消費の削減に有効である一方、二酸化炭素の削減策としての効果は低い。一方、二酸化炭素を圧入して地中や海中に貯蔵することができる（守吉, 1997）。しかし、実用化に至っておらず、今後の動向が注目される。食品廃棄物の炭化は、食品廃棄物の利用を進め、かつ、化石燃料消費を減らすことができる。また、炭を土壤改良資材として土中に利用した場合には、炭素として貯蔵できる期間は不明であるが、少なくとも 3,000 年前に使用された木炭が発掘されていることから（浜口, 1978）、貯蔵期間は長いと考えられ、二酸化炭素の減少に有効と考えられる。

使用した炭化システムの最大能力（90 t/day）で食品廃棄物を炭化した場合のコストは、食品廃棄物湿重量あたりで 13,944 円/t であった（第 4-10 図）。

炭化は、設備への初期投資が非常に小さく、90 t/day の場合における食品廃棄物湿重量あたりの減価償却費は、600 t/day の7倍以上の処理が可能な焼却施設と比較した場合においても、同等もしくはそれ以下であった。また、メタン発酵施設と比較した場合、食品廃棄物湿重量あたりのコストが約1/5であった（第4-11表）。また、炭化によって得られる再資源化物の販売によって、コストをさらに下げられると考えられた。これらのことより、使用した炭化システムの規模の場合には、1日あたり90 tの食品廃棄物を安定して調達することができれば、経済的に優位性をもつと考えられた。逆に言えば、地域で発生する食品廃棄物の発生量に見合った規模の炭化施設を設置することが重要である。

これらのことより、食品廃棄物の炭化によって発生する排ガス中の有害物質（ダイオキシン類、窒素酸化物、硫黄酸化物、塩化水素、煤じんおよび悪臭防止法で定める悪臭物質22項目）、騒音・振動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・亜硝酸化合物、COD、BOD、T-N、T-P）は、すべて基準を満たし、炭化が周辺に及ぼす環境影響は小さいと判断できた。また、炭化システムの炭素収支は、24 t/day以上の食品廃棄物を処理することにより、炭素固定量が炭素放出量を上回り、かつ、食品廃棄物の回収から処理、利用に至るまでの二酸化炭素発生量は、焼却の場合と比較して低いことが明らかになった。事業化を想定した場合、炭化にかかるコストは、ごみ焼却施設やメタン発酵施設に比べて同等がそれ以下であり、経済的に優位であることが明らかになった。

総 括

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。食品廃棄物と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5,000 t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 D.W. 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。

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。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、指導を賜りました千葉大学環境健康フィールド科学センター 教授 池田英男博士に謹んで感謝の意を表します。また、本論文を取りまとめるにあたり、終始懇切なご指導を賜りました大阪府立大学大学院生命環境科学科 教授 小田雅行博士に対し、心より感謝を申し上げます。

研究活動における全面的支援を賜りましたサラヤ株式会社 更家悠介 代表取締役社長，中山文利 常任顧問 に心より感謝申し上げます。また、有益なデータ，実験施設および分析機器などを全面的にご提供およびご協力を賜りました，株式会社 関西再資源ネットワーク 福田裕司 代表取締役社長，林田季昭 常務取締役および社員の皆様に深く感謝の意を表します。

最後に、多大なご協力を賜りました関係者の皆様と、いつも変わらず支えていただきました私の家族 妻 景子と子供達 奏太郎，和琴に感謝します。

引用文献

- IPCC, The Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change pp.249
- 安部郁夫 岩崎訓 岩田良美 古南博 計良善也 (1998) 木炭の製造方法と吸着特性の関係 炭素 TANSO 185 : 277-284
- 安部郁夫 岩崎訓 丸山純 福原知子 (2000) 木炭の脱臭性能 科学と工業 74 (3) :106-111
- 安部郁夫 (2003) 吸着剤としての使用目的に合った炭化技術と活性炭化技術 日本吸着学会吸着技術講習会講演集 pp.1-14
- 石橋新一郎 佐藤寿彦 山下廣治 高瀬昭三 石橋定己 嶋貫孝 (2001) 木材チップ, コーヒー等の産業廃棄物による炭化材と脱臭及び脱色効果 粉体および粉末冶金 48 (11) : 1037-1043
- 磯部勝孝 藤井秀昭 坪木良雄 (1996) 木炭の施用がサツマイモの収量に及ぼす影響 日本作物学会紀事 65 (3) : 453-459
- Isohe K., Yamanaka W., Katano K. (2002) Effects of Charbureted Tofu Refuse (Okara) on the Soil Chemical and Physical Properties and the Growth of Kidney Bean Jpn. J. Sci. Plant. Nutr. 73 (3) :287-290
- 井上一哉 小林晃 青山咸康 (2003) 地盤内の窒素化合物の形態変化を伴う物質移動解析 農業土木学会 225 : 319-328
- 今井潔 中島良 伊部英紀 中込秀樹 (2003) 廃棄物ガス化改質システムによるエネルギーリサイクル 表面技術 54 (12) : 902-907
- 遠藤勝之 (1995) 醤油粕の炭化による資源化について 日本醸造協会誌 90 (7) : 512-518
- Islam A., Kitaya Y, Hirai H., Yanase M., Mori G., Kiyota M (1999) Effects of placing rice husk charcoal inside soil ridges for soil aeration and growth and yield of sweet potato in wet lowland fields. J. Root Crops 25(1):85-97

- Islam A., Kitaya Y., Hirai H., Yanase M., Mori G., Kiyota M. (2000) Effect of volume of rice husk charcoal masses inside soil ridges on growth of sweetpotato in a wet lowland. *J. Agric. Meteorol* 56(1):1-9
- 大井英節 (2000) 廃プラスチックの乾式選別 資源処理技術 47 (4) : 159-162
- 大竹哲也 太田嶺 宍戸昌広 安藤則男 (2009) 建築廃木材炭化物による成型木炭の調製とその特性評価 廃棄物資源循環学会論文誌 20 (2) :133-140
- 大平辰郎 谷田貝光克 廣居忠量 雲林院源治 (1992) 木炭の土壌中における微生物担体としての機能 防菌防黴誌 20 (10) : 511-517
- 岡本裕行 佐藤清仁 八木紀依 井上雅夫 山崎秀一 石田清治 芝田隼次 (2002) ビール粕を原料とする成形炭の製造装置の開発 化学工学論文集 28 (2) : 137-142
- 岡本裕行 八木紀依 井上雅夫 山崎秀一 石田清治 芝田隼次 山本秀樹 林浩志 塩野貴史 常田聡 平田彰 (2003) 環境資源工学 50 (4) : 165-174
- 小川真 (1996) 土壌改良材としての炭の効用 農業開発のための技術情報第1集 農林業協力専門家通信 pp. 394-406
- OECD, Organization for Economic Co-operation and Development (2011) IEA World Energy Outlook 2011 pp. 59-229
- 温室効果ガスインベントリオフィス (2009) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 pp. 8. 1-8. 69
- 川口エリ子 (2004) 竹炭による土壌改良がクロマツ苗の成長および菌根菌に及ぼす影響-施用1年目の変化- 第115回日本林学会大会 pp. 2121
- 環境省 (2006) メタン発酵施設と焼却施設のコスト比較等 第6回 生ごみ等の3R・処理に関する検討会参考資料 pp. 1-10
- 環境省・経済産業省 (2009) 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 pp. II. 211-228
- 岸本定吉 (1984) 木炭の博物誌 総合科学出版 pp. 56-50
- 岸本定吉 (1994) 炭人たちへ：炭博士にきく木炭書誌 pp. 14-17

- 京都府新政策形成研究会（2004）建設発生木材を活用した河川水質浄化方策の
検討 京都府新政策形成研究会報告 pp. 23-56
- 楠部孝誠 津村和志 内藤正明（1998）食品系有機廃棄物の再資源化による環境
負荷削減効果 環境システム研究 26 pp. 311-316
- 久保田英士 茂地徹 桃木悟 山田たかし（2005）都市ごみ焼却炉ガス中のダイオ
キシン類の生成抑制に関する研究 長崎大学工学部研究報告 35（65）：
5-12
- 熊崎実（2000）『木質バイオマス発電への期待』林業改良普及双書 135：23-25
- 経済産業省（2012）カーボンフットプリント制度試行事業 CO₂換算量共通原単
位データベース ver. 3.0 <http://www.cms-cfp-japan.jp/>
- 糞春明（2005）堆肥・土壌における細菌群集の解析および大腸菌など糞便汚染
指標菌の生残性に関する研究 鹿児島大学大学院連合農学研究科生物環
境保全科学専攻博士論文 pp. 59-100
- 小島 紀徳（1992）二酸化炭素問題対策とエネルギー利用 鉄と鋼 78（5）：697-705
- 酒井護 山本攻（2008）ごみ分析において発生する“ばらつき”の要因解析 大
阪市立環境研報告 70：53-58
- 坂倉俊康 安田弘之 崔準哲（2004）二酸化炭素の特性を活かした有機合成有機
合成化学協会誌 62（7）：716-726
- 資源エネルギー庁 荷主のための省エネ法ガイドブック（2006）省エネルギーセ
ンター pp. 103
- 資源エネルギー庁（2009）エネルギー総合統計エネルギーバランス表
- 柴田晃（2002）木質系廃棄物の熱分解処理循環クローズド木質成分熱分解シス
テムの開発とその可能性に関する研究 立命館大学政策科学研究科博士
論文 pp. 23-30
- 志村進 甲忠敏 北林誠 清水健司（2007）下水汚泥炭化物のバイオマス燃料利用
電気製鋼 78（1）：73-78

- 社団法人産業環境管理協会（2003）平成 14 年度新エネルギー・産業技術総合
開発機構委託製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発成果報告書
pp. 123-186
- 杉浦銀治（2005）炭やきは地球を救う-農業と環境と海外に活かす炭やき-木質
炭化学会誌 1（2）：60-66
- 園田哲也 米倉勇雄 齋藤博之 新里光男 川村浩 齋藤健司 下河原哲也（2005）
新方式木質チップボイラーの開発 岩手県工業技術センター研究報告
12：73-75
- 高木和広（1997）木質炭化素材を用いた土壌中の農薬分解細菌の迅速集積法 農
業環境技術研究所年報 14：72-75
- 高橋巧一（2008）食品廃棄物の発生抑制の事例 廃棄物学会誌 19（4）：171-176
- 田中祥起 黒岡達男 島倉久範（2011）大型流動床式ガス化溶融施設の稼働状況
神鋼環境ソリューション技報 8（1）：29-35
- 塚越覚 吉本葉子 佐藤玲子 篠山浩文 野田勝二（2005）炭化したナシせん定
枝の野菜栽培用土としての有効利用 園芸学研究 4（3）：287-290
- 土壌環境分析法編集委員会編（2003）『土壌環境分析法』博友社 pp. 239-241
- 土壌保全調査事業全国協議会編（2003）『土壌改良と資材』 日本土壌協会
pp. 134-138
- Nakamura M. and Yuyama Y.（2005）Development of a Composition Database for
Various Types of Biomass Technical report of the National Research
Institute of Agricultural Engineering 203：57-80
- 西口靖彦 安藤貞 早坂貴代史 池田順一 堀兼明 須賀有子 福永亜矢子（2007）
飼料中マグネシウム，カリウム，カルシウム含量の迅速測定法 1. 希塩
酸抽出法による分析試料の前処理 近中四農研報 6：133-139
- Nishizaki K.（2009）Current status and prospects of biomass technologies
in Japan - For successfully using Biofuels - Engineering in
Agriculture, Environment and Food 2(4):156-159

- 西谷隆司 池田由起 山本攻 立道誠 新居広隆 (2005) 病院・学校等の公共施設における食品廃棄物の排出実態と資源化の検討 生活衛生 49 (1) :35-43
- 西村たつ朗 (1981) クーリングタワーによる節水対策 建築設備と配管工事 19 (3) : 91-93
- 日本環境衛生センター (1985) 廃棄物分析法ごみ編 日本環境衛生センター pp19-22
- 日本土壌協会 (1990) 土壌改良資材の試験方法及び効果検定法 pp. 3, 15-18
- 日本木炭新用途協議会 (2004) 木炭の新しい使い方-新用途木炭の用途別基準-財団法人全国燃料協会 pp. 5-13
- 農林水産省 (2006) バイオマスニッポン総合戦略 pp. 1-5
- 農林水産省 (2008) 食品ロスの現状 第1回 食品ロスの削減に向けた検討会 配布資料 pp. 1-10
- 農林水産省 (2011) 食品リサイクルの現状 食料・農業・農村政策審議会 食品産業部会 配布資料 pp. 1
- 農林水産省 (2012^a) 食品廃棄物等の発生量及び再生利用等の内訳 pp. 1-2
- 農林水産省 (2012^b) 主要なバイオマス利用技術の現状と課題 バイオマス事業化戦略検討チーム 配布資料 pp. 1
- 農林水産省大臣官房統計部 (2012) 食品循環資源の再生利用等実態調査結果 (平成22年度) -食品廃棄物等の年間発生量100 t未達の事業所の集計結果-
- 野呂瀬幸政 岩崎和則 Ronald B. (2009) 食品廃棄物のコンポスト化における適正含水率 農業施設 39 (4) : 285-294
- Hata T., Vystavel T., Bronsveld P., DeHosson J., Kikuchi H., Nishimiya K., Imamura Y. (2004) Catalytic carbonization of wood Charcoal: graphite or diamond CARBON 42 (5-6) : 961-964
- 畑中研一 粕谷マリアカルメリタ 大倉一郎 (2002) 二酸化炭素固定化は必要か? 生産研究 54 (1) : 95-98

- 浜口隆 杉浦銀治 岸本定吉 (1978) 埋蔵木炭に関する研究(I) 芝谷遺跡出土木炭の性状 日本林学会誌 60 (2) : 49-55
- 林順一 室山勝彦 藪ノ美樹 大谷毅 (2000^a) 炭酸カリウムを用いた薬品賦活法による食品廃棄物を原料とした活性炭の製造 環境科学会誌 13(5) : 632-635
- 林順一 久保綾子 古川朗 室山勝彦 (2000^b) 水酸化カリウムを用いた薬品賦活法によるビール粕からの高比表面積活性炭の製造 化学工学論文集 26 (2) 293-297
- 林晴美 関真恵 池田穂高 伊藤健一 藤崎健一郎 勝野武彦 (2003^a) 木炭による窒素分保持効果と芝生用土壌改良資材としての利用可能性 日本緑化工学会誌 29 (1) : 285-288
- 林晴美 関真恵 池田穂高 伊藤健一 藤崎健一郎 勝野武彦 (2003^b) 塩化鉄処理木炭および植物による水質浄化技術に関する基礎的研究 日緑工誌 29 (1) : 215-218
- 人見充則 計良善也 立本英機 幾田信生 川舟功朗 安部郁夫 (1993) 多孔性炭素材料の吸着性能評価法(第2報)木炭類の細孔構造と吸着特性炭素 TANSO 156 : 22-28
- 平岡正勝 武田信生 酒井伸一 金田晃 大賀貞彦 瀬川道信 手島肇 西垣正秀 早田芳浩 (1992) 既設ごみ焼却炉におけるダイオキシン類の抑制に関する研究 廃棄物学会論文誌 3 (2) : 26-35
- 藤田晋輔 前村記代 (2002) 環境と共生する炭化資材の性能と産業化への挑戦 日本木材学会第32回木材の化学加工研究会シンポジウム講演集 pp. 57-62
- 堀内哲嗣郎 (2005) 香り作りの材料を知る におい・かおり環境学会誌 36 (4) : 187-192
- 松永安希子 大西龍 入江満美 山口武則 牛久保明邦 (2011) 炭化・過熱水蒸気処理・爆砕による木質バイオマスの化学成分変化に関する研究 廃棄物資源循環学会論文誌 22 (2) : 149-156
- 水本篤 竹内理 (2008) 研究論文における効果量の報告のために-基礎的概念と注意点- 英語教育研究 31 : 57-66

- 宮藤久士 坂志朗 (2006) 古くて新しい木炭のゆくえ -エネルギー・環境浄化材料への応用- 材料 55(4):356-362
- 三好康彦 (2007) 『ばい煙・ダイオキシン類処理の知識と技術』 オーム社 pp. 139-197
- 室山勝彦 林順一 佐藤淳之 竹本晋 (1996) おからを原料とした薬品賦活法による高比表面積活性炭の製造 炭素 172 : 95-99
- 守吉佑介 府川潤平 (1997) 環境素材の化学(VIII) -二酸化炭素の固定化技術- Inorganic Materials 4 : 163-168
- 文部科学省 (2012) 食品成分データベース <http://fooddb.jp/index.pl>
- Yasuhara A., Ito H. (1991) Combustion Products of Poly (vinyl chloride) Journal of Environmental Chemistry 1 (3) : 525-528
- 谷田貝光克 山家義人 雲林院源治 (1991) 簡易炭化法と炭化生産物の新しい利用 林業科学技術振興所 pp. 20-39
- 谷田貝光克 伊藤蘭 大平辰朗 大庭喜八郎 (1995) 木炭の水質浄化効果 木材学会誌 41 (4) : 425-432
- 谷田貝光克 (1996) 樹木抽出成分関連研究組合の活動 木材保存 22 (2) : 110-115
- 谷田貝光克 (2005) 未来を担う新素材-木炭 木材学会誌 51 (1) : 62-63
- 山田敦 (2006) 北海道産木質バイオマスを原料としたペレット燃料の燃料特性 J.Hokkaido For. Prod. Res. Inst. 20 (2) : 35-43
- 山本攻 (2008) 大阪市における廃棄物分析の歴史と大阪市立衛生試験所の果たした役割 生活衛生 52 (3) : 176-187
- 渡邊秀夫 (2002) 低レベル設備騒音と苦情発生の実態 騒音制御 26(4) : 253-257