

## マイクロウェーブ法による高品質下水汚泥肥料の開発研究

高島 正信\*

### Production of high-quality fertilizer from sewage sludge by applying microwave drying

Masanobu Takashima

In this study, microwave drying was examined to dry and fertilize dewatered sewage sludge. Microwave drying was suitable to dry dewatered sewage sludge with lower water contents, and was an easy and fast method. Rice husk charcoal or buckwheat husk charcoal as an auxiliary material was able to enhance the potassium and phosphorus content of the fertilizer produced. The fertilizer combining dewatered sewage sludge and rice husk or buckwheat husk charcoal was thus rich in nutrient content and well-balanced. It is concluded that microwave drying is appropriate to reuse and recycle biomass wastes generated in rural areas, and to produce high-quality fertilizers.

Keywords: Buckwheat husk charcoal, sewage sludge, fertilizer, microwave drying, rice husk charcoal

#### 1. はじめに

昨今、汚泥、生ごみ、家畜排せつ物など、処理・処分すべき廃棄物系バイオマスの量は増大しており、その一方で資源・エネルギーの枯渇が世界的に心配されている。サステナブルな社会の構築のため、廃棄物系バイオマスが保有する資源・エネルギーの回収や有効利用が強く求められている。下水汚泥は、その発生量が全国の産業廃棄物排出量約4億トンのうち約7,500万トン(約18%)を占めるに至っており<sup>1)</sup>、下水道の普及に伴って今後さらに増加する見込みである。しかしながら、埋め立て処分場の逼迫と地球温暖化に対する懸念が深刻化しており、下水汚泥の処理・処分にはますます工夫が求められている。

農林地の多い地方都市においては下水汚泥の緑農地利用が有効であり、近年の肥料価格の高騰はこれを後押ししている。完熟肥料を製造できるコンポスト法が理想的であると言われるが、製造に手間と時間がかかる欠点がある。また、下水汚泥は高含水率である一方、カリウムに乏しい。そこで、カリウムの補充や水分調整等の目的に地域内から出る廃棄物を有効利用すれば、高品質の肥料を作れるばかりでなく、廃棄物処理・資源循環の面からも好都合である。

本研究で着目したのは、コンポスト法に比べ、コスト的にも時間的にも効率がよいという長所を有するマイクロウェーブ乾燥法である。マイクロ波を照射することで、水分を減らすとともに

---

\* 原子力技術応用工学科

有機質をほとんど破壊することなく殺菌できる。マイクロウェーブ乾燥法は簡便性・迅速性に優れるので（例えば処理時間は、コンポスト法の2ヶ月に対し、本法の数十分）、乾燥条件、副資材との配合比などを検討しやすいというメリットがある。また、処理時間が短くても種子や寄生虫卵を不活性化する効果を有する。地域特産品から出る廃棄物としては、福井県を例にとると、米やそばから出るもみ殻、そば殻があり、くん炭にして用いるとカリウム含有量が増し、消臭効果も期待できるのでなおさら都合が良い。

本研究の目的は、①簡便性・迅速性に優れるマイクロウェーブ乾燥法を下水汚泥（脱水汚ケーキ）に適用し、この新規乾燥技術の運転条件（パワー、時間、試料量等）について検討する、および②下水汚泥に地域特産品から生じる廃棄物を混合することによって、高品質な地域ブランド肥料を製造することである。具体的には、下水汚泥ともみ殻、そば殻を混合し、窒素、リン、カリウムなどの主要成分量や有害物質の含有量、コマツナを用いた幼植物試験等から肥料効果および安全性を確認する。

## 2. 実験方法

### 2-1 マイクロウェーブ乾燥

マイクロウェーブ乾燥の手順は、まず、所定の質量の原料をはかりとり、磁性平皿に入れる。下水汚泥（脱水ケーキ）を手で細かく砕きながら、二種類の原料を用いるときは原料同士をよくもみほぐし混ぜておく。この後、家庭用マイクロウェーブと同じように、出力と時間をセットしてスタートする。実験に使用したマイクロウェーブ装置の仕様を表1に示す。脱水ケーキは福井市日野川浄化センターより採取した。

表1 使用したマイクロウェーブの仕様

製造会社・型式	シャープ（株）業務用電子レンジ RE-6300
定格電圧	単相 200V、50-60Hz 共用
定格消費電力	2,990W
定格高周波出力	1,900W
発振周波数	2,450Hz

### 2-2 くん炭製造

もみ殻くん炭については市販されているものがあるものの、そば殻のくん炭については入手が困難と思われたので、結局、両方のくん炭とも自作することとした。そのために、地元の農家からもみ殻およびそば殻を入手し、伝統的なタイプの市販くん炭器を用いて野外で製造した。くん炭製造の過程は以下のようなものである。1)種火を用意してくん炭器をセットする。2)表面に焦げ目ができてきたら切り返し、全体が黒くなるまで繰り返す。3)くん炭器をはずしてできたくん炭を自然冷却する。

### 2-3 分析方法

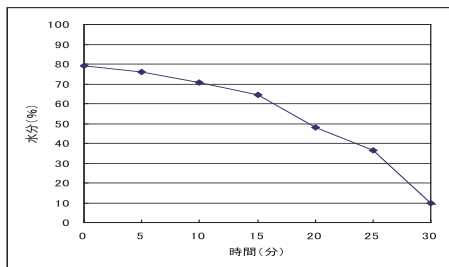
分析は肥料分析法<sup>2)</sup>に従った。水分は最も一般的な加熱減量法により測定したが、これは分析試料を蒸発皿にとり、100℃で5時間乾燥して重さを量り、その減量を水分とするものである。有機物質は分析試料を磁製のつぼに正確にとり、水分を蒸発させたのち電気マッフル炉に入れ、穏やかに加熱して炭化させたのち約550℃とし、同温度に4時間以上保ち、完全に灰化する。灰化後の重さを正確に量り、灰分の量とする。窒素、リン酸、カリ、重金属等の項目については外注分析に依頼した。

肥料の植害試験の方法として、一般に幼植物試験が適用される。幼植物試験とは、幼植物の生育状況から下水汚泥コンポストの腐熟度を調べる生物学的方法の一つで、その試験方法は「汚泥たい肥の幼植物試験法（農林水産省農蚕園芸局長通達ノイバイエルポット試験法）<sup>3)</sup>」として定められている（詳細は省略）。

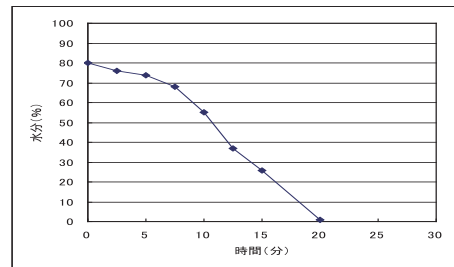
### 3. 実験結果および考察

#### 3-1 マイクロウェーブ乾燥

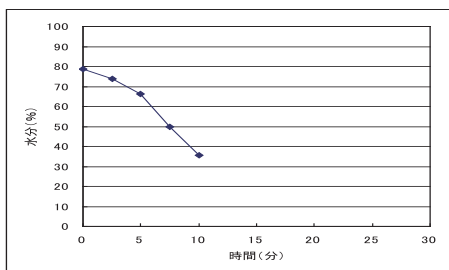
下水汚泥（脱水ケーキ）あるいは下水汚泥ともみ殻くん炭の混合物を用いて6種類の条件を設定し、マイクロウェーブ乾燥を実施した。実験の結果を図1および表2にまとめて示す。



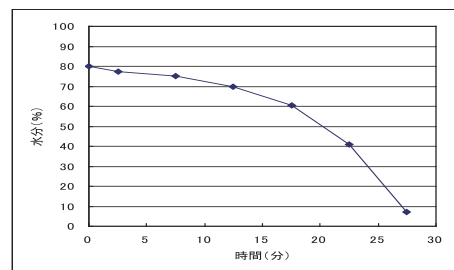
a) 出力 40%、試料量 600g、初期水分約 80%



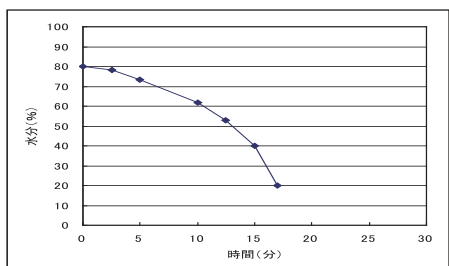
b) 出力 70%、試料量 600g、初期水分約 80%



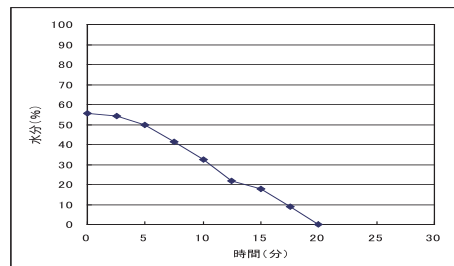
c) 出力 100%、試料量 600g、初期水分約 80%



d) 出力 70%、試料量 1,000g、初期水分約 80%



e) 出力 100%、試料量 1,000g、初期水分約 80%



f) 出力 70%、試料量 1,000g、初期水分約 50%

図1 マイクロウェーブ乾燥における水分の変化

表2 マイクロウェーブ乾燥の実験・計算結果

出力	試料量	初期水分	時間 (分)	水分 (%)	100℃ 加熱 (kJ)	蒸発 潜熱 (kJ)	熱量 合計 (kJ)	出力 (kJ)	消費 電力 (kJ)	出力 効率 (%)	消費電力 効率 (%)		
40%	600g	約 80%	0.0	79.0	202	39	242	228	359	106.0	67.4		
			5.0	76.1									
			10.0	70.7									
			15.0	64.4									
			20.0	48.1									
			25.0	36.4									
30.0			9.8	937	1139	1368	2153	83.3	52.9				
70%			0.0	80.1	202	57	259	200	314	130.0	82.6		
												2.5	75.9
												5.0	74.0
												7.5	67.8
												10.0	54.9
												12.5	36.8
100%			0.0	78.6	202	64	266	285	449	93.3	59.3		
												2.5	73.9
												5.0	66.2
												7.5	49.6
												10.0	35.7
	15.0	25.6											
70%	1,000g	約 80%	0.0	80.1	337	59	396	200	314	198.5	126.1		
			2.5	77.5									
			7.5	75.2									
			12.5	69.9									
			17.5	60.3									
			22.5	40.7									
27.5			7.1	1647	1984	2195	3453	90.4	57.5				
100%			0.0	80.1	337	45	382	285	449	134.2	85.3		
												2.5	78.1
												5.0	73.4
												10.0	61.8
												12.5	52.9
	15.0	39.9											
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	80.1	337	1351	1689	1938	3050	87.1	55.4				
										2.5	78.1		
										5.0	73.4		
										10.0	61.8		
										12.5	52.9		
										15.0	39.9		
70%	1,000g (汚泥 600g+ くん炭 400g)	約 55%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0		
			2.5	54.1									
			5.0	50.0									
			7.5	41.2									
			10.0	32.4									
			12.5	21.6									
100%			0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0		
												2.5	54.1
												5.0	50.0
												7.5	41.2
												10.0	32.4
												12.5	21.6
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
70%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		
100%	0.0	55.7	337	36	373	200	314	187.2	119.0				
										2.5	54.1		
										5.0	50.0		
										7.5	41.2		
										10.0	32.4		
										12.5	21.6		

マイクロウェーブ乾燥すると、原料は 100℃近くまで暖められ、それと同時に水分の蒸発が進む。表 2 の熱量合計は、最初は水分の蒸発なしに 100℃まで加熱され、その後から水分蒸発のための蒸発潜熱が必要となるという、二段階に分けて計算してある。乾燥効率が 100%を越えているのは、このような第一段階の加温と第二段階の蒸発というように、熱の使われ方を分離したからであると考えられ、実際は温度上昇と同時に蒸発も進行しているようである。全体的にみると、開始直後はそのために乾燥効率が非常に高いが、すぐに低くなり、一部例外もあるが、原料の温度が十分に上昇すると再び乾燥効率が上がるというほぼ一致した傾向が見られた。

消費電力を基にした乾燥効率は、乾燥終了時の水分が異なるので厳密に比較しづらいが、ほとんどの条件で 40~50%程度の範囲にあった。図 1 中の条件 a、b および c は試料量 600g、初期水分約 80%で出力を 40、70、100%と変化させたものだが、大まかには出力の影響は小さく、投入したエネルギーはほぼ同じ効率で乾燥に使われたことになる。条件 d および e は試料量 1,000g、初期水分約 80%で出力を 70 と 100%と変化させたものだが、同様な結果になっている。b と d、c と e は、出力がそれぞれ 70%、100%、初期水分約 80%の条件で試料量 600g と 1,000g の違いを見ることができるようにした組み合わせだが、この場合も大まかには大きな効率の違いは見受けられなかった。

唯一消費電力ベースの乾燥効率が 60%を越えたのが f の条件である。これは出力 70%、試料量 1,000g で、下水汚泥ともみ殻くん炭の混合（質量比 6:4）により初期水分を約 55%に低下させたものである。この結果から、マイクロウェーブ乾燥法は低水分の試料の乾燥においてより効率的であると考えられる。また、下水汚泥脱水ケーキのみだと塊状であるが、くん炭が加えられ混合されたことによる物理的状況の変化もこの効率向上に寄与した可能性がある。またこの場合のみ、出力をベースにした効率は他の条件が 60~80%の範囲が多いのに対しほぼ 100%を達成している。したがって、乾燥効率の観点からも、下水汚泥とくん炭を混合させた方がよいと言える。

### 3-2 くん炭製造

製造したくん炭の写真を写真 1 に示す。一般にくん炭は、原料の中に含まれるガス成分が燃えた後の多量の細かい孔をもっている。また、土壌と同様にケイ酸 (SiO<sub>2</sub>) が 50%近く含まれ、しかも植物の成長・結実等の際に必要なミネラルを豊富に含んでいる。pH は 8~9 でアルカリ性のため酸性土壌の pH 矯正に適している<sup>4)</sup>。

使用した原料の成分分析結果を表 3 に示す。今回用いた下水汚泥も、一般的なものと同様に窒素が多く、カリが乏しい。もみ殻くん炭およびそば殻くん炭はカリの含有量が全窒素、リン酸より高くなっている。したがって、もみ殻くん炭およ

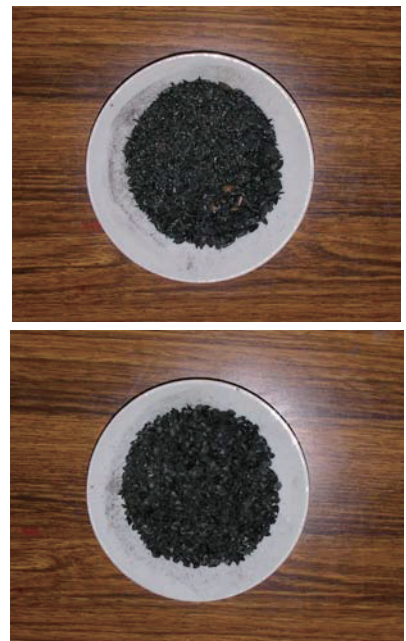


写真 1 製造したくん炭（上：もみ殻くん炭、下：そば殻くん炭）

表3 原料の成分

	下水汚泥	もみ殻くん炭	そば殻くん炭
全窒素 (乾物当たり%)	4.49	0.64	1.75
リン酸 (乾物当たり P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %)	1.25	0.28	1.79
カリ (乾物当たり K <sub>2</sub> O%)	0.23	1.04	2.52
石灰 (乾物当たり CaO%)	6.02	0.36	0.88
苦土 (乾物当たり MgO%)	---	0.15	1.16
アルカリ分 (乾物当たり%)	3.43	---	---
全炭素 (乾物当たり%)	32.4	32.3	60.5
有機物 (乾物当たり%)	63.2	55.2	
C/N 比	7.2	50.5	34.6
水分 (%)	78.4	3.0	3.8
水銀 (乾物 kg 当たり mg)	0.53	/	/
カドミウム (乾物 kg 当たり mg)	1.4		
ひ素 (乾物 kg 当たり mg)	2.6		
鉛 (乾物 kg 当たり mg)	55		
ニッケル (乾物 kg 当たり mg)	120		
クロム (乾物 kg 当たり mg)	40		
銅 (乾物 kg 当たり mg)	440		
亜鉛 (乾物 kg 当たり mg)	920		

びそば殻くん炭はカリの少ない下水汚泥と組み合わせると非常に都合がよいと言える。

もみ殻の一般的な組成として、全炭素 34%、全窒素 0.35%、リン酸 0.16%、カリ 0.39%と報告されているので<sup>4)</sup>、くん炭化されたことによって栄養素の含有量はほぼ倍増したことになる。また、もみ殻くん炭とそば殻くん炭を比べると、三大栄養素の含有量はそば殻くん炭の方が2倍以上高いことがわかる。これから、肥料の原料としてはそば殻くん炭の方がより適しており、もみ殻くん炭は相対的に栄養分が少ない。よく用いられる堆肥化原料として稲わらがあるが、その成分は全炭素 38%、全窒素 0.50%、リン酸 0.17%、カリ 1.88%と報告されているので<sup>4)</sup>、稲わらはもみ殻くん炭とそば殻くん炭の中間に栄養素量については位置づけられる。主原料である下水汚泥の溶出試験は(結果は省略)、どの項目も基準を満たしていた。

### 3-3 製品

製造した乾燥肥料の写真を写真2に示す。

#### 3-3-1 栄養素と有害物質

肥料取締法は、下水汚泥を原料とする肥料を生産・流通させ

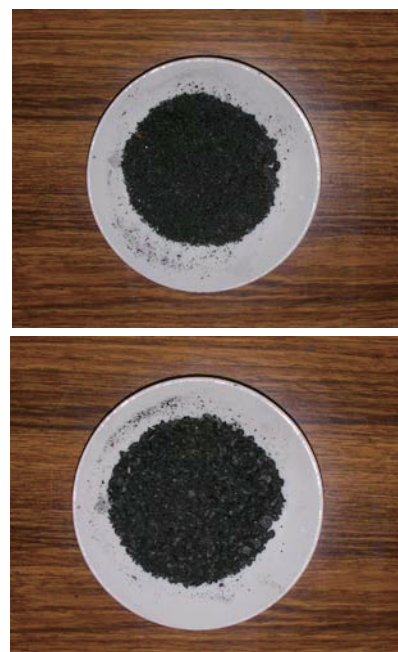


写真2 製造した乾燥肥料  
(上:もみ殻くん炭混合、下:そば殻くん炭混合)

るに当たっては、次の事柄を制限している。①ひ素、カドミウム、水銀、ニッケル、クロムおよび鉛の含有量（＝含有量基準）。②金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める基準に適合する原料を使用したものであること（＝溶出基準）。③植害試験の調査を受け、害が認められないものであること。

さらに、有機質肥料の望ましい品質を確保し、高品質で、安全・安心に使えるように品質基準や表示方法を全国農業協同組合中央会（JA 全中）が定めている<sup>5)</sup>。これらの基準と照合するために、製造肥料の含有量分析の結果を表4に示す。この表より、製造された乾燥肥料は汚泥＋そば殻くん炭の方が栄養素が豊富であり、JAの品質基準を満たしている。

含有量分析の結果は、窒素の一部がアンモニアや窒素ガスとして損失し減少するが、原料の含有量を反映している。すなわち、栄養分の多いそば殻くん炭が混合された方が栄養素の量が多くなっており、もみ殻くん炭が混合された場合にはJAの品質基準を肥料三要素のどれも満足していなかった。また、窒素、リン酸およびカリのバランスについてみると、基肥として用いられる肥料は1：1～2：1～2程度の範囲にあるので<sup>4)</sup>、この点については両方の乾燥肥料ともほぼ理想的なバランスに近い。

しかし、製造された乾燥肥料はどれもC/N比（炭素率）が高いという問題がある。下水汚泥と2種類のくん炭はもともと全炭素の含有量が高いため、三大栄養素を多く含有しながら有機物の量を抑えるのは困難である。この点が今後の課題であろう。

表4 乾燥肥料の成分

	基準*	下水汚泥＋ もみ殻くん炭	下水汚泥＋ そば殻くん炭
全窒素（乾物当たり％）	2.0 以上 JA	1.3	2.1
リン酸（乾物当たり P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ％）	2.0 以上 JA	1.2	2.0
カリ（乾物当たり K <sub>2</sub> O％）		1.0	1.9
石灰（乾物当たり CaO％）		2.4	2.8
アルカリ分（乾物当たり％）	25 以下 JA	1.5	2.0
全炭素（乾物当たり％）		32	46
有機物（乾物当たり％）	35 以上 JA	47.1	66.0
C/N 比	10 以下 JA	24.7	21.2
水分（％）	30 以下 JA	25.4	25.4
水銀（乾物 kg 当たり mg）	2 以下	0.17	0.11
カドミウム（乾物 kg 当たり mg）	5 以下	0.5	0.6
ひ素（乾物 kg 当たり mg）	50 以下	3.5	2.5
鉛（乾物 kg 当たり mg）	100 以下	33	15
ニッケル（乾物 kg 当たり mg）	300 以下	34	34
クロム（乾物 kg 当たり mg）	500 以下	16	13
銅（乾物 kg 当たり mg）	600 以下 JA	400	300
亜鉛（乾物 kg 当たり mg）	1,800 以下 JA	960	710

\* 無印は肥料取締法による含有量基準、JA 印は JA による品質基準。

下水汚泥肥料を施用したとき、この分解に最も影響するのは肥料の C/N 比である。通常、C/N 比 10 程度が肥料として適正な値とされている。下水汚泥の C/N 比は 5~11 (平均 8) で、稲わら等堆肥が大体 20 前後であるのに比べて低く、ほぼ適正な範囲にあるが、下水汚泥の有機物はわら等の植物遺体と違って下水の浄化に係った微生物の遺体やその分解生成物であるため、低分子のアミノ酸等を多く含み、分解しやすく、そのまま土壤に施用すると急激に分解して作物や土壤微生物に悪い影響を及ぼす<sup>5)</sup>。

ところで、マイクロウェーブ乾燥は、基本的には水分を蒸発させるだけであり、有機質を破壊しない。ところが、表 5 に示されているように、原料の混合比から計算された成分の含有量と実際に分析された含有量の間にはずれがあった。全体的な傾向として、乾燥後に窒素は減少し、リン酸は上昇し、カリはほぼ計算どおりである。窒素については、含まれていたアンモニアが温度の上昇によって揮散したことが考えられる。実際、有機物含有量は乾燥の経過に伴い、顕著な変化はほとんど見られなかったので(データ表示なし)、乾燥過程における有機物の分解は無視できると思われる。しかしながら、リン酸の増加については理由は不明であり、アンモニアの揮散による存在状態の変化や分析誤差が原因となっている可能性がある。

水銀等の有害金属については、基準値を十分に下回っていた(結果は省略)。

### 3-3-2 幼植物試験

表 6 には、3 週間栽培後の幼植物試験の結果を発芽数と生体重を用いてまとめてある。また、そのときの写真を写真 3 に示す。

どちらの乾燥肥料の場合も発芽数については問題なかった。生体重については、下水汚泥+もみ殻くん炭は標準量~3 倍量施用区で対照とほぼ同等だったが、4 倍量施用区で対照の 67%とかなり減少しており、生育障害があったと考えられる。下水汚泥+そば殻くん炭については、標準量~3 倍量の施用量において対照より多く、肥料効果があったと考えられる。この場合も 4 倍量施用区で減少しており、障害があったと考えられる。

表 5 乾燥肥料の成分の変化

		計算	実際	差
下水汚泥+ もみ殻くん炭	全窒素 (乾物当たり%)	1.6	1.3	-0.3
	リン酸 (乾物当たり P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %)	0.52	1.2	+0.68
	カリ (乾物当たり K <sub>2</sub> O%)	0.84	1.0	+0.16
	全炭素 (乾物当たり%)	32	32	±0
	C/N 比	20.2	24.7	+4.5
下水汚泥+ そば殻くん炭	全窒素 (乾物当たり%)	2.4	2.1	-0.3
	リン酸 (乾物当たり P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %)	1.6	2.0	+0.4
	カリ (乾物当たり K <sub>2</sub> O%)	1.9	1.9	±0
	全炭素 (乾物当たり%)	53	46	-7
	C/N 比	21.9	21.2	-0.7

表6 幼植物試験の結果

		発芽数		生体重	
		本	対照に 対する%	g	対照に 対する%
対照		15	---	2.77	---
下水汚泥+ もみ殻くん炭	標準量	18	120	2.75	99
	2倍量	20	133	3.12	113
	3倍量	18	120	2.65	96
	4倍量	16	107	1.85	67
下水汚泥+ そば殻くん炭	標準量	17	113	3.51	127
	2倍量	20	133	3.70	134
	3倍量	20	133	3.24	117
	4倍量	18	120	2.46	89

肥料効果については、下水汚泥+そば殻くん炭は栄養素が豊富であったことから、成分分析の結果を反映していると思われる。これらの結果は、4倍量施用を除けば、製造肥料によるコマツナの生育に対する障害はなかったと結論付けられる。また、下水汚泥+そば殻くん炭については、コマツナに対する肥料効果が確認されたと言える。



写真3 3週間栽培後の幼植物試験（下段：対照、中段：下水汚泥+もみ殻くん炭、上段：下水汚泥+そば殻くん炭、左より標準、2倍、3倍および4倍施用量）

#### 4. 結論

本研究では、下水汚泥（脱水ケーキ）ともみ殻くん炭またはそば殻くん炭という廃棄物系バイオマスを混合し、マイクロウェーブ乾燥を適用して高品質な下水汚泥肥料の製造を試みた。

(1) 下水汚泥単独（初期水分約80%）よりも下水汚泥ともみ殻くん炭を混合したもの（初期水分約55%）の方が消費電力を基にした乾燥効率が20%程度アップした。これから、混合することによる物理的性状の変化もあるが、マイクロウェーブ乾燥法は低水分の試料の乾燥においてより効率的であると考えられる。

(2) くん炭の製造は、表面に焦げ目ができてきたらまめに切り返すことがポイントであった。成分分析から、もみ殻くん炭はカリ、そば殻くん炭はカリおよびリン酸の成分量が倍増しており、両者ともカリの少ない下水汚泥と組み合わせることは都合がよいと言える。もみ殻くん炭とそば殻くん炭を比べると、三大栄養素の含有量はそば殻くん炭の方が2倍以上豊富であった。

(3) 製造された乾燥肥料は下水汚泥+そば殻くん炭の方が栄養素が豊富であり、JAの品質基

準を満たしていた。しかし、C/N比（炭素率）については、JAの推奨基準をはるかにオーバーしており、この基準を満足するのは困難である。

（4）幼植物試験の結果から、4倍量施用のような過剰な施用さえ避ければ、製造肥料によるコマツナの生育に対する障害はないと考えられた。また、下水汚泥+そば殻くん炭については、コマツナに対する肥料効果が確認された。

以上より、マイクロウェーブによる乾燥肥料化はこれら廃棄物系バイオマスの緑農地還元の方法として適当であると結論付けられる。今後の展望として、マイクロウェーブ乾燥法は、小規模で簡便かつ迅速に乾燥・肥料化を行えるので、車載して巡回しながら乾燥肥料を製造する方法も有効である。また、地域から発生する廃棄物系バイオマスの循環利用促進や地域の活性化等に多少とも貢献できることが期待される。

#### 謝辞

下水汚泥の脱水ケーキを快く提供していただいた福井市下水道部に厚く御礼申し上げます。また、(株)ニシデコンストラクション(当時)の庭本仁実氏にはくん炭の原料の入手と製造について協力していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 鈴木あや子：下水汚泥資源利用の動向と今後の課題について、再生と利用、Vol.31、No.119、30-42、2008.
- 2) 農林水産省農業環境技術研究所：肥料分析法—1992年版.
- 3) 農林水産省園芸局長通達第1943号：ノイバウエルポット試験法、1984.
- 4) 藤原俊六郎：堆肥のつくり方・使い方、農村漁村文化協会、2003.
- 5) (社)日本下水道協会：下水汚泥の農地・緑地利用マニュアル、2005.

(平成24年3月31日受理)