

焼却灰を原料にした園芸用人工培土 の製造の実用化研究

1. はじめに

横浜市では、下水汚泥焼却灰の有効利用方法のひとつとして、従来から焼却灰を造粒・固化した粒状培土（旧ハマソイル）を製造していたが、造粒・固化に用いるPVAの価格の上昇により、製造コストが高くなったことや、1年程度経過すると培土が粉解して灰に戻るため、根詰まりによる成育障害を生じるなどの問題があった。

本研究の対象とする技術は、こうした問題を解決

するために開発されたもので、焼却灰を造粒して焼成することで、従来品より強度および保水性に優れた製品を製造できるほか、固化に薬品を使用せず、焼成の熱源として汚泥消化ガスを使用することで製造コストの低減を図ることを目的としている。

本研究は、平成5年度～平成8年度の4ケ年度にわたって新技術活用モデル事業として、横浜市と財団法人下水道新技術推進機構が共同で実施した。本報告書は、本研究で得られた主要な結果をまとめたものである。

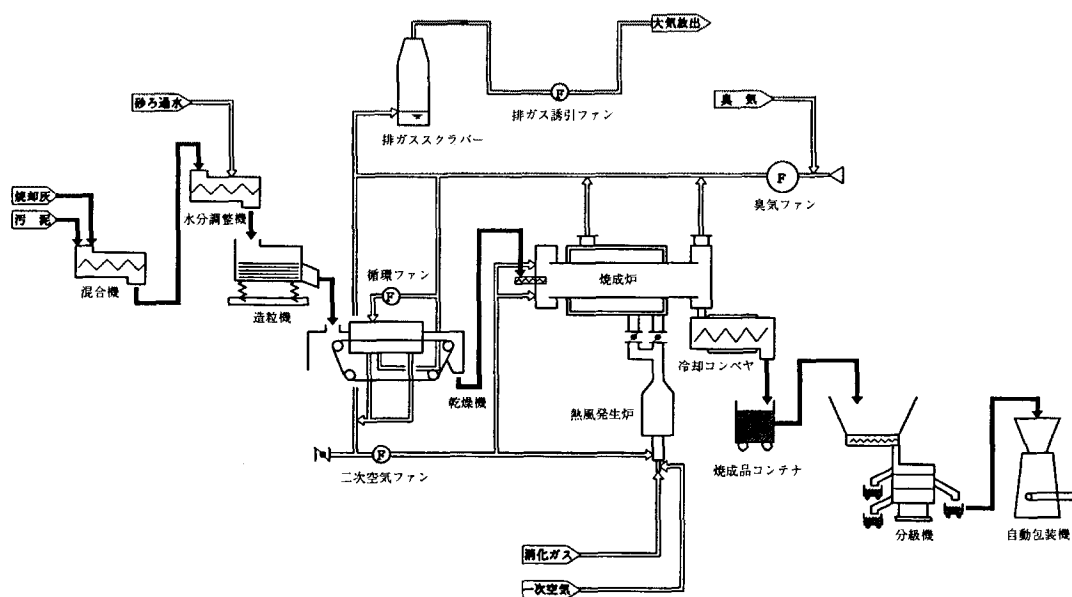


図-1 ハマソイル実証実験施設フローシート

2. 研究内容

2.1 対象技術の概要

ハマソイルは焼却灰と脱水汚泥の混合物を造粒、乾燥、焼成した園芸用人工培土である。造粒バインダーに脱水汚泥を用いることにより、薬品費およびランニングコストの低減を図ることができる。また、汚泥ケーキの利用は造粒時のバインダー効果だけでなく、製品の多孔質化（焼成時に有機物が燃焼してガス化し空孔を形成）にも寄与している。

本法の処理フローを図-1に示す。まず、焼却灰と脱水汚泥を混合し、混合物に水を添加して造粒に適した水分（約35%）に調整する。水分調整された混合物を造粒機に投入し、粒径範囲1~30mmに造粒する。次に造粒品を約200℃の熱風で30分かき絶乾近くまで乾燥させ、焼成炉で910~950℃、1時間30分~2時間かけて焼成する。焼成により、灰粒子が結合して適度な強度を持つ製品となる。

2.2 研究内容

本研究の主要な内容は以下のとおりである。

- (1) 園芸用人工培土製造装置の設計手法
- (2) 園芸用人工培土製造装置の最適運転条件
- (3) 園芸用人工培土の品質向上方法

本年度は、前年度に引き続き実証製造設備を用いて、造粒工程および焼成工程の最適運転条件下における製品歩留まり向上の検討・調査を行った。

3. 研究結果

3.1 各単位プロセスの運転調査結果

造粒、焼成、乾燥各工程の条件と製品性状（圧壊強度、吸水率、粒度分布等）の関係について調査し、最適な運転条件を求めた。製品性状の判断基準としては、圧壊強度10kgf、吸水率40%を平均的に満足し、1mm以下の焼成微粉（=不良品）の発生率がより少ないことと設定した。

3.1.1 造粒工程の運転調査（バイプロミキサ）

(1) 添加汚泥の種類

脱水汚泥と乾燥汚泥の2種類について検討を行った。脱水汚泥では、汚泥添加率12.5%で造粒粗粒品（粒径30mm以上の不良品）の発生率を10%程度とすることができた。一方、乾燥汚泥では、添加率を12.5~37.5%としたところ、吸水率の向上

はあまりみられず、圧壊強度は1kgfとなり、乾燥汚泥添加の有効性は認められなかった。

以上より、添加汚泥としては脱水汚泥が適当であるものと判断した。

(2) 汚泥添加率

汚泥添加率を上げると焼成品の吸水率は高くなるが、一方で粗粒品発生率が高くなる傾向にあった。吸水率40%程度を確保でき、かつ粗粒品の発生率が10%程度の汚泥添加率は12.5%であった。

(3) ロッド径

ロッド径 $\phi 50$ 、 $\phi 44$ （標準）、 $\phi 32$ 、 $\phi 25$ の4種類について、造粒状態、造粒粗粒品発生率との関係を調査した。ロッド径 $\phi 44$ （標準）のとき、造粒状態は最も良好であった。一方、ロッド径 $\phi 32$ 、 $\phi 25$ では造粒粗粒品発生率が60%以上となり、 $\phi 50$ では粒径8mm以下の造粒品の形状がフレーク状となった。以上より、ロッド径 $\phi 44$ が適当であると判断した。

(4) ロッド数

ロッド数を25本、20本（標準）、15本、10本の4水準で造粒粗粒品発生率との関係を調査したところ、ロッド数20本で造粒粗粒品発生率が最も低くなった。

以上より、ロッド数20本が適当であると判断した。

(5) 振動

振動モーターのインバーター周波数30Hz、40Hz、50Hzの3水準について、造粒粗粒品発生率の関係を調査した結果、周波数を50Hzより低くすると、造粒粗粒品発生率が高くなる傾向にあった。また、振動数と焼成品の物理性状の間には特に関連性はみられなかった。このことから、振動数は50Hzが適当であると判断した。

3.1.2 焼成工程の運転調査（ロータリーキルン）

(1) 焼成温度

焼成品の性状に最も影響する因子は、焼成温度である。前年度までの調査においては、物理性状のバラツキが少ない焼成温度域は、930~950℃としていた。本年度調査で更に焼成温度の影響を調査したところ、910℃で圧壊強度10kgf程度、吸水率40%を確保できたため、最適焼成温度範囲を910~950℃とした。

(2) 焼成時間

本実証炉で設定できる最短焼成時間は1時間であるため、焼成時間1時間以内については小型電気炉を用いて調査を行った。焼成時間1時間以上

については、焼成品の性状はほぼ一定で焼成時間の影響はみられなかった。また、焼成時間1時間以下については、30分を越えたところで強度の発現がみられ、その内訳は、燃焼に20分以上、焼成に10分以上各々必要であることが明らかとなった。

一般的にロータリーキルンのような連続焼成では、回分式の2倍程度の滞留時間を見込む必要があるといわれており、ロータリーキルンの基本焼成時間として1時間以上は必要であると判断した。

(3) 焼成炉回転数

回転数が高くなるほど焼成微粉（粒径1mm以下の不良品）の発生量が増え、歩留まりが低下する傾向がみられた。調査結果から、焼成炉の回転数は2rpm程度を上限に設定するのがよいと判断された。

3.1.3 乾燥工程の運転調査

乾燥工程の必要性を確認するため、造粒品を未乾燥で焼成し、焼成品の粒度分布を乾燥した場合と比較した。表-1に各々の焼成品の粒度分布を示す。乾燥なしでは、乾燥ありに比べ1mm以下の焼成微粉発生率が15%増え、8~20mmが約20%減った。これは、未乾燥のため焼成炉内で急激な水分蒸発が生じ、造粒品が粉化していることに起因するものと考えられた。よって、焼成微粉発生を抑えるために乾燥工程は必要と判断した。

表-1 焼成品の粒度分布 (%)

粒径 (mm)	乾燥あり	乾燥なし
8~30	41.5	20.5
5~8	25.7	25.0
3~5	12.3	17.3
1~3	2.8	4.5
1以下	17.8	32.7

3.2 連続運転安定性の確認

長時間の連続運転安定性を確認するため、24時間の連続運転を実施した。

3.2.1 運転条件

- (1) 供給焼却灰80kg/h, 脱水汚泥50kg/h (水分80%)
- (2) 造粒機ロッド数: φ44×20本, 振動: 50Hz
- (3) 焼成温度940℃, 回転数1.8rpm

3.2.2 運転結果

運転が途中で停止することもなく、24時間安定していた。表-2に排出分の内訳を示す。

表-2 排出分内訳

項目	重量 (kg)	比率 (%)
製品 (焼成品 1~30mm)	1,466	75.0
造粒粗粒品灰分 ※	76	3.9
乾燥機こぼれ灰分 ※	11	0.6
焼成品 1mm以下	292	14.9
その他	116	5.6
合計 (全供給量灰分)	1,961	100

※は計算値 (水分35%, 汚泥固形物中のVTS60%)

3.2.3 造粒機の安定性

造粒品の不良品発生率の経時変化を図-2に示す。粒径30mm以上の造粒粗粒品発生率は、7時間までは20~50%であったが、8時間後に10%程度まで減少し、その状態で安定した。粒径2mm以下については1~5%で推移した。以上より、ある程度長時間運転すれば、粗粒品の発生は減少することがわかった。ただし、発生量を完全になくすことは困難であり、実設備には粗粒品の解砕機設置が必要と考えられた。

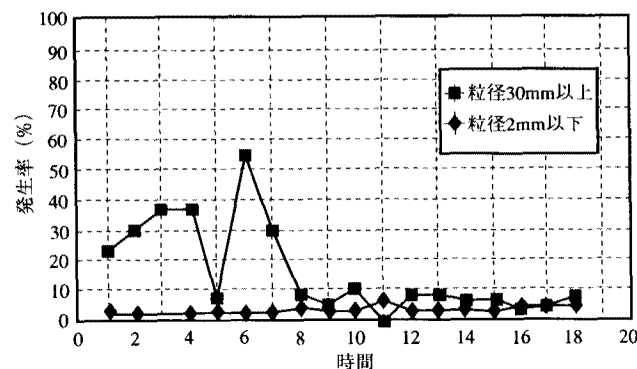


図-2 不良品発生率の経時変化

3.2.4 焼成炉の安定性

炉内温度はほぼ安定していた。また、焼成品の物理性状の経時変化を図-3, 図-4に示す。

圧壊強度は平均で15kgf, 吸水率35~40%と焼成品性状もほぼ安定していた。

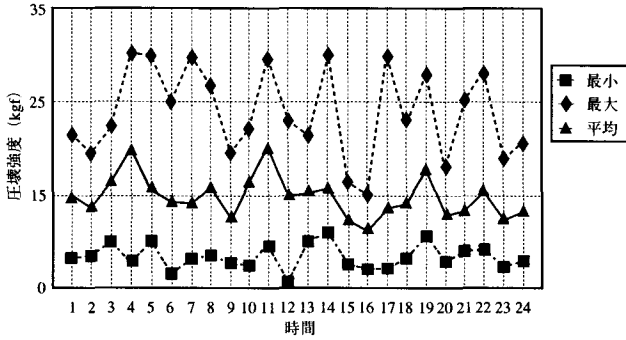


図-3 製品圧壊強度の経時変化

表-3 解砕品の粒度分布

粒径 (mm)	重量百分率 (%)
26.5以上	1.8
19~26.5	5.4
13.2~19	24.7
8~13.2	27.7
5~8	16.5
2~5	14.5
2以下	9.4

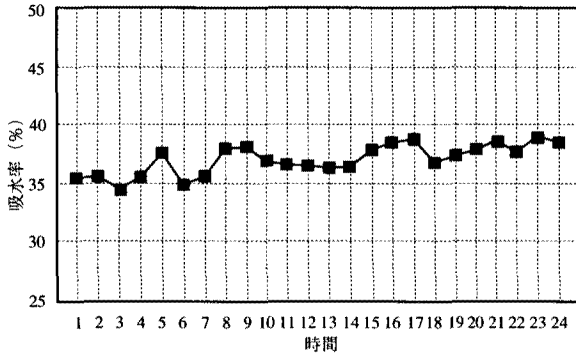


図-4 製品吸水率の経時変化

3.3 製品歩留まり向上の検討

平成7年度の連続運転の結果、製品歩留まりは75%であり、製造の過程で発生する主なロス分は“造粒粗粒品（粒径30mm以上）”と“焼成微粉（粒径1mm以下）”であった（表-2参照）。そこで、平成8年度調査で歩留まり向上を目指して、造粒粗粒品、焼成微粉を再度製品に取り込む方法として、以下の検討を行った。

- ・造粒粗粒品：造粒機出口に解砕機を設置して粗粒品を粒径30mm以下に解砕して製造ラインに戻す。（解砕法）
- ・焼成微粉：原料供給側へ戻して製品へ取り込み、系外への排出量を減らす。（循環法）

ここで、歩留まりの目標値は、造粒粗粒品の処分量をゼロ、焼成微粉の処理量を半分以下（焼成微粉発生率15%を7~8%とする）とし、85%以上とした。

3.3.1 予備実験

(1) 造粒粗粒品の解砕法について

実験では、粒径30~50mmの粗粒品を解砕機に投入し、解砕品の形状確認と粒度分布および微粉（2mm以下）の発生率を確認した。解砕時に発生する微粉の発生割合は表-3に示すように1割程

度であり、採用した機器が造粒粗粒品の解砕機として有効であることを確認した。

(2) 焼成微粉の循環利用について

予備的に焼成微粉のみでの製造実験を行った結果、圧壊強度は1kgf以下、焼成微粉の発生率は50%を越え、焼成微粉のみでは、強度を確保できないことが明らかとなり、微粉の混合割合を変化させた実験を行った。実験結果を表-4に示す。

焼成微粉の発生率は、混合率に比例してわずかに増加する傾向が見られた。微粉混合率や微粉発生率については、連続実験で検証していくものとした。

表-4 焼成微粉混合結果

焼成微粉混合率 (%)	圧壊強度 (kgf)	吸水率 (%)	かさ密度 (g/cm ³)	焼成微粉発生率 (%)
100	1以下	48.3	0.64	54.9
38	6.2~10.4	41.5	0.64	31.1
25	6.9~10.1	42.9	0.64	28.7
0	9.4~19.2	39.7	0.67	22.5

※圧壊強度の測点数は5点、かさ密度は粒径5~8mm

3.3.2 焼成微粉混合による歩留まり向上検討

(1) 焼成微粉混合による歩留まり向上について

図-5に焼成微粉混合率と歩留まりの関係を最大値、最小値、平均値で示す。焼成微粉の混合率を上げると歩留まりは向上する傾向にあり、混合した焼成微粉の一部が焼成品に取り込まれたものと考えられる。

(2) 焼成品の性状への影響について

図-6~図-8に焼成微粉混合率と焼成品の性

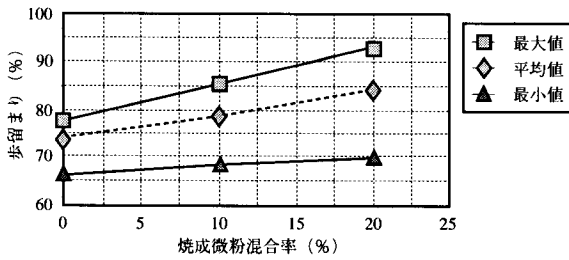


図-5 焼成微粉混合率と歩留まりの関係

状の関係を示す。予備実験の結果と同様に、焼成微粉を混合した場合、圧壊強度は低下し、吸水率は若干高くなる傾向を示した。圧壊強度の低下は、造粒品中の焼成微粉の粒子が焼却灰の粒子の結合を阻害しているものと考えられ、逆に吸水率は焼却灰単独時に比べ結合が不完全なためやや向上したものと考えられる。一方、かさ密度はほぼ同等で焼成微粉混合の影響は特にみられなかった。

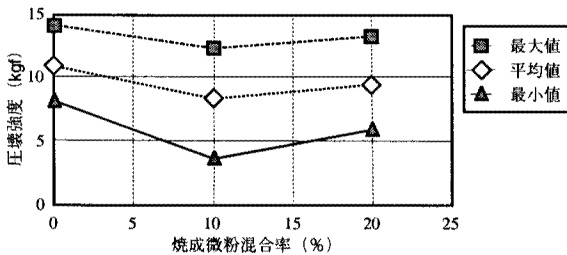


図-6 圧壊強度への影響

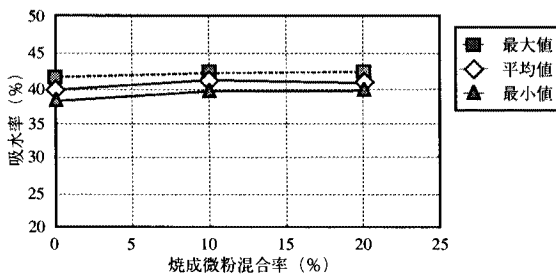


図-7 吸水率への影響

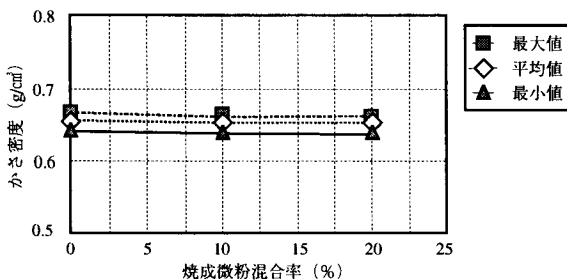


図-8 かさ密度への影響

3.3.3 造粒粗粒品の解砕による歩留まり向上検討

解砕機の運転条件を決定するため、解砕歯の回転数と解砕品の収率（解砕品中に占める粒径2～30mmの割合）の関係を調査した。なお、解砕機への投入量は3通り（1.2m³/h、0.6m³/h、0.3m³/h）に変化させ実験を行った。図-9に実験結果を示す。

低回転（周波数が低い）の方が解砕品の収率は高くなる傾向を示し、周波数20Hz以下で収率90%前後を確保できた。よって、解砕機は10～20Hzで運転するのがよいと判断した。

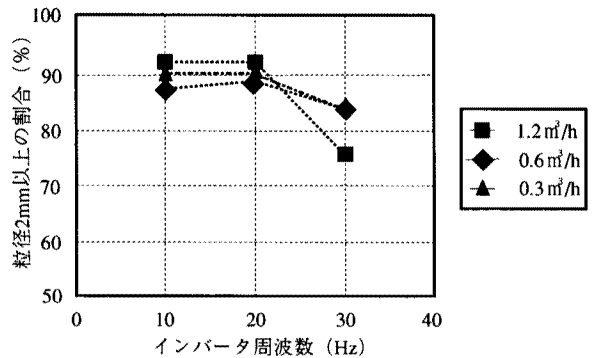


図-9 回転数（周波数）と収率の関係

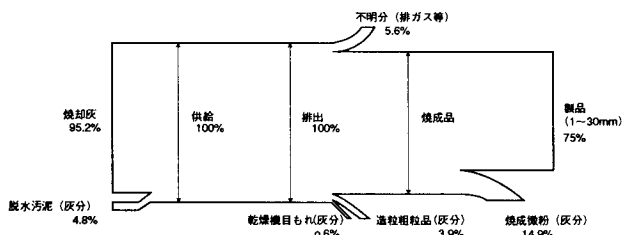
3.3.4 連続運転安定性の確認（24時間運転）

焼成微粉混合率10%、および焼成微粉混合率20%で24時間の連続運転を行い、長時間運転時の歩留まり向上の効果を確認した。

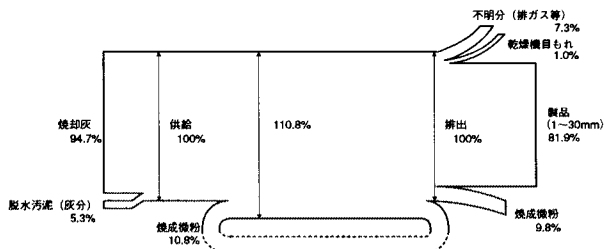
図-10に①焼却灰のみ、②焼成微粉混合率10%、③焼成微粉混合率20%の物質収支をそれぞれ示す。

焼却灰のみでは歩留まり75%であったが、微粉混合率10%で歩留まりは81.9%に向上した。微粉混合率20%では歩留まりは90%となり、目標歩留まり85%以上を達成することができた。これは、焼成微粉が製品へ取り込まれ歩留まりが向上したものと考えられる。また、焼成微粉混合率20%時には、焼成微粉の供給量と分級後の焼成微粉発生量がほぼ等しく、焼成微粉の全量循環が可能であった。

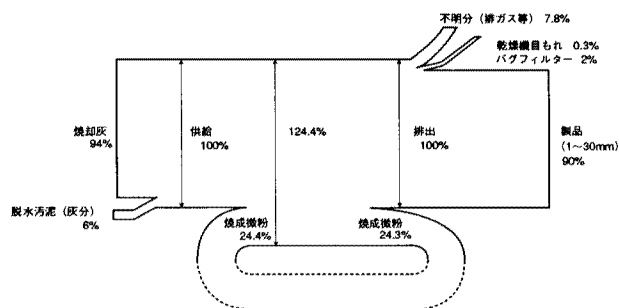
次に、焼成微粉混合率20%の圧壊強度、吸水率、かさ密度の経時変化を図-11～図-13に示す。圧壊強度は、平均で10kgfを越え、ほぼ安定した製造が行えたと考えられる。吸水率については、圧壊強度の低かった15:00のサンプルが他と比べ、やや高い吸水率を示したが、それ以降は安定し約40%で推移した。かさ密度は平均で0.67g/cm³でほぼ一定の値を示した。



① 焼却灰のみ (H7.6.14 ~ 15)



② 焼成微粉混合率10% (H8.11.26 ~ 27)



③ 焼成微粉混合率20% (H9.1.30 ~ 31)

図-10 24時間連続運転の物質収支

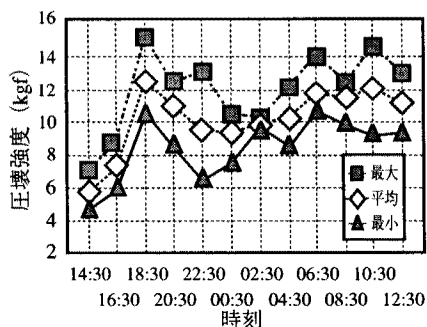


図-11 圧壊強度の経時変化

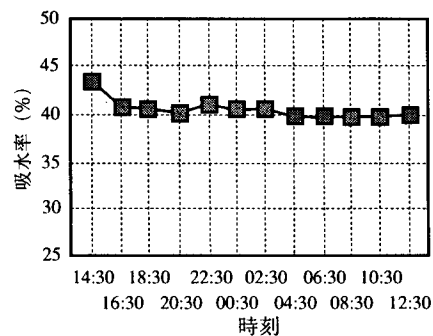


図-12 吸水率の経時変化

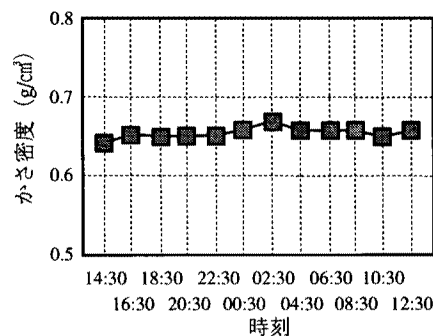


図-13 かさ密度の経時変化

3.4 製品の品質調査

ハマソイルの培土としての特徴を明らかにするため、培土の性状を示す代表的な項目について、分析を行った。また、比較のため市販用土の分析も合わせて行った。

表-5にハマソイル(焼成微粉混合)の物理化学的性状を示す。作物に吸収され易いリン酸を示す指標である有効態リン酸が多く、ハマソイルがリン酸供給源としての価値を持つことがわかった。また、値が小さいほど施肥したリン酸のうち作物が利用できる割合が多くなるリン酸吸収係数の値からも、ハマソイルが市販用土にない有利な特徴を有することがわかった。

表-5 ハマソイル(焼成微粉混合)の物理化学的性状

	ハマソイル (焼成微粉混合)			市 販 用 土			
	850℃	910℃	940℃	赤玉土	鹿沼土	パーミキュライト	パーライト
比重	0.7	0.75	0.75	0.71	0.39	0.3	0.3
pH (H ₂ O)	8.2	7.0	6.9	5.2	5.8	6.3	6.8
有効態リン酸 (mg/100g)	606	499	470	8.3	2.3	0.9	0.2
リン酸吸収係数 (mg/100g)	390	310	410	2,370	3,990	640	650
陽イオン交換容量 (me/100g)	2.6	1.2	0.9	18.8	26.5	1.6	11.3
三相分布 (pF 1.8) (%)	固相	24.7	26.4	23.6	25.8	13.5	27.9
	液相	37.7	33.6	34.4	56.1	54.0	24.0
	気相	37.6	40.0	42.0	18.1	32.5	48.1

3.5 経済性の検討

実証実験施設の運転結果をもとに、5t/日、10t/日設備のモデル設計を行い維持管理コストを試算した。旧ハマソイル（焼却灰にPVAを添加混合して製造したハマソイル）の製品1kg当たり単価と比較すると、5t/日規模では、焼成ハマソイルのコスト削減効果は認められなかった。これは、焼成ハマソイルでは排ガス処理などの付帯設備が増加したこと、また運転管理体制の違い（昼夜連続運転）による人件費が増加したことに起因している。しかし、スケールアップによるコスト削減効果は大きく、10t/日規模では約7円/kgのコストダウンが図れる試算結果を得た。

4. まとめ

本研究で得られた園芸用人工培土の製造技術に関する主要な結果を以下にまとめる。

(1) 各単位プロセスの運転調査

添加汚泥		造粒機		
種類	添加率	ロッド径	ロッド数	振動インバータ周波数
脱水汚泥	12.5%	φ44	20本	50Hz

① 造粒の基本操作条件

焼成温度	910~950℃
焼成時間	1時間
焼成炉回転数	2rpm以下

② 焼成の基本操作条件

(2) 製品歩留まり向上の検討

製品の歩留まり向上方法として、造粒粗粒品の解砕法と焼成微粉の循環法を導入した結果、歩留まり向上効果が確認された。

焼成微粉混合率20%で平均歩留まりは90%となり、目標歩留まり85%を達成できた。また、焼成微粉混合率20%の焼成品性状については、圧壊強度平均10kgf、吸水率約40%、かさ密度平均0.67g/cm³ではほぼ安定した値を示した。

(3) 製品の品質調査

ハマソイルと市販用土を培土の性状を示す代表的な項目について比較した結果、ハマソイルがリン酸供給源としての価値を持ち、市販用土にない有利な特徴を有することが明らかとなった。

(4) 経済性の検討

実証実験施設の運転結果もとに、5t/日、10t/日設備のモデル設計を行い維持管理コストを試算した。旧ハマソイルの製品1kg当たりの単価と比較すると、5t/日規模ではコスト削減効果は認められなかった。しかし、スケールアップによるコスト削減効果は大きく、10t/日規模では約7円/kgのコストダウンが図れる試算結果を得た。

●この研究に関する問い合わせは

研究第一部長

研究第一部主任研究員

研究第一研究員

山根 昭
鎌田 勝美
細谷 守生