Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費　終了研究成果報告書

3G-2001　地域産業と連携した下水汚泥肥料の事業採算性の高い循環システムの構築
(JPMEERF20203G01)

令和２年度～令和４年度

Construction of a Highly Business-Profitable Sewage Sludge Circulation System through Composting in Collaboration with Local Industries

〈研究代表機関〉
鹿児島工業高等専門学校

〈研究分担機関〉
鹿児島県農業開発総合センター
産業技術総合研究所北海道センター

〈研究協力機関〉
霧島市上下水道部
鹿児島市水道局
株式会社三州衛生公社
株式会社日水コン
ヘンタ製茶有限会社

○図表番号の付番方法について
「Ⅰ．成果の概要」の図表番号は「０．通し番号」としております。なお、「Ⅱ．成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。
「Ⅱ．成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号．通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和５年５月

目次

Ⅰ．成果の概要 ・・・・・・・・ 1
１．はじめに（研究背景等）
２．研究開発目的
３．研究目標
４．研究開発内容
５．研究成果
５－１．成果の概要
５－２．環境政策等への貢献
５－３．研究目標の達成状況
６．研究成果の発表状況
６－１．査読付き論文
６－２．知的財産権
６－３．その他発表件数
７．国際共同研究等の状況
８．研究者略歴

Ⅱ．成果の詳細
Ⅱ－１　新規下水汚泥肥料量産化技術の開発 ・・・・・・・・ 15
（鹿児島工業高等専門学校、鹿児島県農業開発総合センター、産業技術総合研究所北海道センター）
要旨
１．研究開発目的
２．研究目標
３．研究開発内容
４．結果及び考察
５．研究目標の達成状況
６．引用文献

Ⅱ－２　新規下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験 ・・・・・・・・ 30
（鹿児島工業高等専門学校、鹿児島県農業開発総合センター）
要旨
１．研究開発目的
２．研究目標
３．研究開発内容
４．結果及び考察
５．研究目標の達成状況
６．引用文献

Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細 ・・・・・・・・ 44

Ⅳ．英文Abstract ・・・・・・・・ 48

Ⅰ．成果の概要

課題名 3G-2001　地域産業と連携した下水汚泥肥料の事業採算性の高い循環システムの構築

課題代表者名　山内　正仁　（鹿児島工業高等専門学校　教授）

重点課題　主：【重点課題⑩】地域循環共生圏形成に資する廃棄物処理システムの構築に関する研究・技術開発

副：【重点課題①】持続可能な社会の実現に向けたビジョン・理念の提示

行政要請研究テーマ（行政ニーズ）　（3－5）地域循環共生圏の形成に向けたバイオマス廃棄物等を対象とした処理プロセスのより一層の高度化に関する研究

研究実施期間　令和２年度～令和４年度

研究経費

78,257千円（合計額）

（各年度の内訳：2年度：29,931千円、3年度：25,321千円、4年度：23,005千円）

研究体制

（サブテーマ１）新規下水汚泥肥料量産化技術の開発（鹿児島工業高等専門学校）

（サブテーマ２）新規下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験（鹿児島工業高等専門学校）

研究協力機関

霧島市上下水道部

鹿児島市水道局

株式会社三州衛生公社

株式会社日水コン

ヘンタ製茶有限会社

本研究のキーワード　下水汚泥、新規下水汚泥肥料、茶栽培、地域バイオマス、地域連携

１．はじめに（研究背景等）

下水道の普及により、下水処理施設から発生する下水汚泥量は増加傾向にある。2019年度における下水汚泥量は2,341千トン（乾物重量）であり、この内1,753千トンが有効利用されている。ただし、その利用法は主に焼却後、建設資材への利用に留まり、下水汚泥の8割が有機物である特性を活かしたエネルギー利用や緑農地利用はそれぞれ7.6%、14.1%である（図0.1参照）。2013年5月に閣議決定された「第三次循環型社会形成推進基本計画」では、下水汚泥の肥料利用に関して、地域内での循環利用を支援すると示された。また2015年度の下水道法改正では、汚泥の燃料又は肥料としての再生利用努力の必要性が規定された。さらに、2018年6月に閣議決定された「第四次循環型社会形成推進基本計画」では、下水汚泥を肥料として再生利用する取組みを推進するとしている。このように汚泥の農業利用は、国を挙げた取組みとなっている。しかしながら、下水汚泥の農業への利用率向上は現在においても見られない。この理由として、1）既存の汚泥肥料は水分を含むと泥状になり易く、利用者側にとって使い勝手が悪いこと、2）牛糞堆肥、化成肥料等と比べ重金属含有量が格段に高いため、「汚泥肥料＝重金属＝危険」というイメージが先行していること、3）汚泥肥料はその殆どが葉菜類、果菜類の単年作物への利用、牧草への農地還元が主であり、利用用途が少ないこと等が挙げられる。また地域の一次産業と密接に連携し、下水汚泥肥料の特性（高窒素・低カリウム）を最大限活用した取組みが行われてこなかったことが影響していると考えられる。

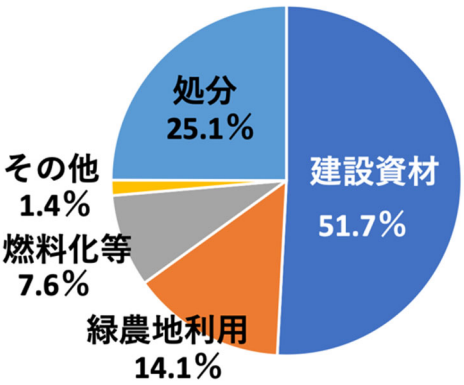


図0.1 下水汚泥の利用状況
（2019年国土交通省データ）

鹿児島県は荒茶生産量が全国第二位（7,970ha：23,900トン、2020年）であり、全国シェアの34%を占める。茶栽培では有機質肥料や配合肥料が利用されているが、その利用量は年間50kgN/10aであり、1haあたり40～60万円の肥料費がかかる。また、茶肥料の取扱数量はJA鹿児島県経済連で取り扱うすべての作物のなかで32%を占め最も多い。このような状況の中、近年の茶価低迷による粗収益の減少、肥料等生産資材価格の上昇は、茶農家の経営を圧迫しており、地域産業の衰退を引き起こす逼迫した状況となっている。また全国的に茶園土壌はカリウム含有量が増加傾向にあり、安価な高窒素・低カリウム肥料が求められている。

２．研究開発目的

本研究は、下水汚泥の農業利用に関する課題を、地域バイオマスの利用を通して顧客ニーズに合致した新たな下水汚泥肥料に調製し、地域の一次・二次産業と連携して事業採算性の高い循環システムを構築することを最終目的とする（図0.2参照）。具体的には、サブテーマ1では、下水汚泥（脱水汚泥）に地域バイオマスである竹おが屑、米糠、焼酎粕を混合し、利用者にとって使い勝手の良い、重金属含有量を低減した新規下水汚泥肥料の量産化技術を確立する。サブテーマ2では、サブテーマ1で量産化した

図0.2　本研究の地域循環共生圏のイメージ

新規下水汚泥肥料を茶栽培に適用し、既存の有機質資材の代替として利用できることを実証する。さらに新規下水汚泥肥料を核とした茶栽培への新規市場開拓可能性を評価し、事業採算性を明らかにする。

３．研究目標

全体目標	本研究では、脱水汚泥と複数の地域バイオマスを組み合わせ、安全で安価、かつ肥料効果が高い新規下水汚泥肥料量産化技術を確立する。量産化した汚泥肥料は国内初の試みとして高窒素・低カリウム肥料が求められている茶栽培に適用し、事業採算性の高い下水汚泥の地域循環システムを構築する。

サブテーマ１	新規下水汚泥肥料量産化技術の開発
サブテーマリーダー/所属機関	山田真義/鹿児島工業高等専門学校
目標	研究協力機関（三州衛生公社）の肥料化施設の一部を借用し、まず5m^{3}規模で新規下水汚泥肥料の量産化試験を実施する。本試験では小型肥料化装置で得られた新規下水汚泥肥料の成分特性（N：P_2O_5：K_2O=4.0%：3.2%：1.5%、重金属量：配合肥料、牛糞堆肥などと同等）（表1.1参照）を目標値とする。

表1.1 新規下水汚泥肥料の目標値

資材	pH	C/N比	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr
			(乾物%)					(mg/kg 乾物)					
新規下水汚泥肥料	7.5	11.0	4.0	3.2	1.5	0.4	0.9	0.3	3.8	2.6	N.D.	4.7	8.9
下水汚泥肥料(A)*	8.4	6.7	4.4	5.8	0.7	11.7	1.0	0.9	11.0	7.8	0.5	31.8	25.2
下水汚泥肥料(B)*	7.7	7.6	3.8	5.3	0.2	8.4	0.9	1.4	15	5.0	0.38	13.0	36.0
牛糞堆肥**	7.0	16.4	1.9	3.2	4.3	1.4	1.2	N.D.	1.0	0.5	N.D.	3.2	1.9
配合肥料1***	7.4	1.0	13.2	2.2	2.4	1.7	5.5	0.4	N.D.	N.D.	0.04	77.5	565
配合肥料2***	6.6	3.1	7.8	3.9	2.5	2.7	5.0	0.9	1.1	N.D.	0.05	32.9	786

＊市販されている下水汚泥肥料　＊＊牛糞、油粕などを混合して調製された堆肥　＊＊＊有機配合肥料1，2　茶栽培で利用される一般的な有機配合肥料
N.D.：検出限界値以下

新規下水汚泥肥料は、条件的嫌気条件のもと調製するため、従来の好気条件での製造法と比較して製造日数が2～3倍（好気：45日程度→条件的嫌気：90～120日程度）になることが想定される。このため、戻し肥料を利用することにより、肥料的効果を維持した状態で肥料製造期間を大幅に短縮することが可能か検討する。目標としては、60日を目指す。また、肥料的効果については、これまで窒素無機化試験において黒ボク土を利用して実施してきたが、茶園土壌は酸性土壌であることから、その特性を考慮し、酸性土壌を用いた無機化試験も併せて実施し、菜種油粕や下水汚泥肥料市販品と同程度以上の肥料的効果（窒素無機化率）が得られることを実証する。さらに、脱水方法が異なる脱水汚泥を用いて新規下水汚泥肥料の量産化試験を実施し、同様な製品特性（低重金属量、高窒素無機化率（肥効率））を有する汚泥肥料を調製する。調製した新規下水汚泥肥料の原料及び製造コストの試算を行い、茶栽培に新規下水汚泥肥料を利用した場合、1haあたりの肥料コストを現在の60万円から20%削減することを目標とする。

サブテーマ２	新規下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験
サブテーマリーダー/所属機関	山内正仁/鹿児島工業高等専門学校
目標	茶栽培における鹿児島県施肥基準は、窒素を主体に年間窒素施肥量50kg/10aで、一般的に肥料を秋肥、春肥、夏肥に分けて施肥する。新規下水汚泥肥料の特性に応じた施肥法を確立し、慣行栽培の茶葉収量1,517kg/10a（一番茶：582kg、二番茶：509kg、三番茶：426kg 鹿児島県茶業生産動向資料、H30年度）を目指す。加えて茶葉品質や茶園土壌環境への影響を慣行栽培区と比較し、問題なく新規下水汚泥肥料を施用できることを示す。具体的には、茶葉品質については、Codex基準値以下（T-As：2mg/kg、Pb ： 1mg/kg、T-Hg ： 0.5mg/kg）とし、茶園への重金属蓄積値については、土壌環境基準値以下とする。また、1haあたりの肥料コストを現在の60万円から20%削減することを目指し、実装化に結びつける。

４．研究開発内容

サブテーマ１

令和2年度は、新規下水汚泥肥料の量産化試験を5m^{3}規模で実施した。具体的には、鹿児島県霧島市の脱水汚泥（高分子凝集剤＋無機凝集剤（ポリ硫酸第二鉄溶液））と地域資源の竹おが屑、米糠および焼酎粕の成分分析後、これらの資材を小型肥料化装置で得られた新規下水汚泥肥料の最適配合割合（脱水汚泥：40%、竹おが屑：30%、米糠：20%および焼酎粕：10%（乾物重量%））でサンドウィッチ状（図0.3参照）に三層に分けて堆積させ、条件的嫌気条件（切返し時のみ酸素供給）で発酵処理を施した。堆積資材の１回目の切返しは、条件的嫌気性菌（主にバチルス菌）を優占化させるために製造開始後20～30日後に行った。2回目以降の切返しは、切返し後の内部（表面から60cm部分）温度が切返し後の最大値から5℃程度低下した時点で実施した。また資材切返し時に資材の物理化学性、菌叢解析を行い、肥料化完了の指標（C/N比、窒素成分、バチルス菌の優占度合いなど）を作成した。加えて製品（肥料化完了品）については、肥料成分、重金属量を定量した。また、肥料登録を念頭に置き、植害試験を実施した。

図0.3 原料堆積概略図

さらに量産化した汚泥肥料は窒素無機化試験に供した。窒素無機化試験は一般畑土壌及び酸性土壌である茶園土壌で実施し、既存の有機質資材、汚泥肥料と新規下水汚泥肥料の窒素無機化率を比較した。加えて、量産化試験に用いた資材の配合割合を基に原料の安定的な調達可能性の検討、製造コストを試算すると共に競合肥料の市場調査や新規下水汚泥肥料の販路調査を行った。

令和3年度は、異なる脱水方法で得られた脱水汚泥（鹿児島県鹿児島市：消石灰及び無機凝集剤、加圧濾過機）を用いて、前年度にしたがい新規下水汚泥肥料の量産化試験を実施した。また、前年度調製した新規下水汚泥肥料を戻し肥料として30%利用することで、肥料製造期間の短縮に繋がるか検討した。加えて、これらの肥料成分分析、重金属成分分析および菌叢解析を行うとともに、窒素無機化試験、植害試験などを実施し、新規下水汚泥肥料の製造の再現性、安全性を検証した。

図0.4　BISTRO下水道開催風景

調製した肥料の事業採算性を明らかにするために、前年度と同様、製造コストの試算、販路調査を行なった。さらに、地域社会に下水道資源を普及させる目的で、農業従事者、環境産業、消費者、自治体関係者および研究者らが参

画してBISTRO下水道 in 霧島・鹿児島高専を実施した（図0.4参照）。本イベントでは、研究成果の報告とパネルディスカッション（「新規下水汚泥肥料は鹿児島県で普及できるのか?」、「新規下水汚泥肥料で作った作物は安全なのか?」）を実施した。また、イベント終了時に来場者に対して、下水道資源の農業利用に関してアンケート調査を行なった。

令和4年度は、前年度、前々年度に調製した汚泥肥料を戻し肥料として利用し、肥料製造期間の短縮と新規下水汚泥肥料の製造の再現性を検証後、量産化技術を確立し、マニュアル化した。また得られた実証データをもとに、最終的な肥料化コストを試算し、新規下水汚泥肥料販売価格を検討した。さらに、地域資源（下水汚泥・竹おが屑・米糠・焼酎粕）のマテリアルフロー分析（MFA）を行い、地域産業（茶産業）への影響（貢献度など）を定量的に評価した。

サブテーマ２

令和2年度は、サブテーマ1で調製した新規下水汚泥肥料（高分子系凝集剤使用）を霧島市の協力農家の茶園および鹿児島県農業開発総合センター内の茶園（以下、鹿農総セ茶園）に施肥した。霧島市の茶園では、有機質肥料のみを用いた試験区、有機質肥料を新規下水汚泥肥料に25%、50%、75%ずつ置換した試験区、新規下水汚泥肥料100%区および慣行施肥（有機配合肥料主体体系）区の6試験区を準備し、茶葉収量と品質面から、新規下水汚泥肥料の最適配合割合量を評価した。キックオフ会議において、アドバイザーからの助言を受け、6試験区を図0.5に示す、4試験区に変更した。

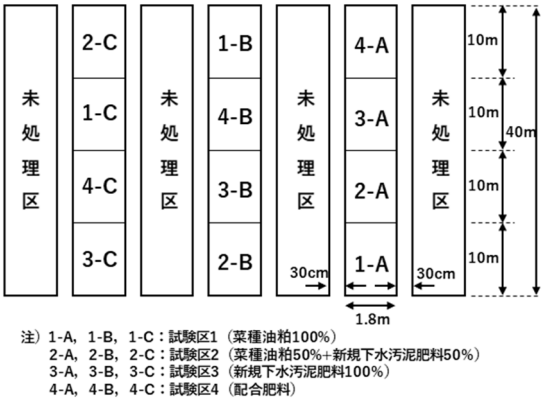


図0.5 各試験区の配置

鹿農総セ茶園では、新規下水汚泥肥料による施肥の代替時期（秋肥施用、春肥施用、秋肥＋春肥施用）について、3試験区に対照区として慣行施肥区を加えた4試験区で検討した。また、ポーラスカップを施肥位置である茶園うね間に設置し、茶園うね間土壌の深さ100cmの位置から浸透水を採水し、新規下水汚泥肥料の地下水への窒素溶脱量について評価した。本試験は3年間継続実施した。併せて、幼木試験を実証試験と並行して実施した。幼木試験では、茶苗木を定植し、無施用区、有機質肥料区、既存の下水汚泥肥料を用いた下水汚泥肥料区、新規下水汚泥肥料区、慣行施肥区の5試験区を設置し、幼木育成時における窒素成分、重金属成分のマテリアルフローを検討した。（下線部２次審査の評定者コメントを受け、追加）なお、これらの栽培試験、幼木試験開始時には、施肥前土壌を採取し、土壌の化学性（pH、EC、T-C、T-N、交換性塩基、可給態リン酸など）を調査した。また、令和2年度は茶栽培に使用する既存肥料の市場や販路、その施肥コストの調査を行なった。

令和3年度は、施肥1年目の茶葉収量・品質（官能審査、化学成分など）を調査し、有機質肥料区、慣行施肥区と同等以上を目指した。茶栽培土壌については、酸性土壌であることから、茶栽培に与える下水汚泥由来の重金属の影響について茶期別新芽を調査し、茶の食品としての安全性(コーデックス委員会規準)を確認した。また、施肥開始１年後の茶園土壌を、10月の施肥（秋肥（1回目））前に採取し、土壌化学性（pH、EC、T-C、T-N、P、K、Ca、Mgなど）、重金属蓄積量（As、T-Cr、Ni、Cd、Pb、T-Hgなど）を定量し、新規下水汚泥肥料の施肥による土壌環境への影響を検討した。さらに、鹿児島市の下水処理施設から発生する下水汚泥（脱水汚泥）は、霧島市（全量高分子凝集剤使用）と異なり、約半分量が石灰系凝集剤で処理されている。このため、石灰系凝集剤を含む脱水汚泥を用いて新規下水汚泥肥料を調製し、高分子系凝集剤使用の新規下水汚泥肥料との成分比較後、茶栽培への適用を検討した。しかし石灰系含有新規下水汚泥肥料は、Ca含有量が8.2%と高く、協力農家に茶樹への影響が大きいと判断された。また、既存の試験区での栽培試験で作業量が膨大（キックオフ会合においてアドバイザーから指摘）となることから、実施を見送った。

茶栽培試験および幼木試験については前年度に引続き実施し、茶期別新芽中及び幼木仕立てによるせん枝葉の窒素・重金属成分を調査した。（下線部2次審査の評定者コメントを受け、追加）

令和4年度は、施肥2年目の茶葉収量・品質（官能審査、化学成分など）を前年度と同様に調査した。また、最適な新規下水汚泥肥料の施肥技術を確立し、マニュアル化を図った。幼木試験では茶期別新芽を調査し、その後、樹体を抜き取り、葉、茎、根および土壌中の窒素、重金属量を定量することで、マテリアルフローを明らかにした。（下線部２次審査の評定者コメントを受け、追加）

さらに、最適な新規下水汚泥肥料施肥技術およびサブテーマ1で定量した配合資材のマテリアルフローをもとに、新規下水汚泥肥料の茶栽培への新規市場開拓可能性を評価し、事業採算性を明らかにした。

５．研究成果

５－１．成果の概要

サブテーマ1では、下水汚泥（脱水汚泥）に地域バイオマスを混合し、安全で安価、かつ肥料効果が高い顧客ニーズに合致した新たな下水汚泥肥料（新規下水汚泥肥料）の量産化技術を確立することを目標に研究を進めた。2020年度は新規下水汚泥肥料の量産化試験を2回（4月、10月）実施した。その結果、2回の量産化試験で得られた新規下水汚泥肥料の主要成分は、成分目標値（N:P_2O_5:K_2O=4.0%:3.2%:1.5%）と比較して、窒素全量、リン酸全量は目標値に近い値が得られたが、カリ全量はやや低かった（表0.1参照）。しかしながら、茶栽培では低カリウム資材が求められていることから、量産化することによりさらに茶栽培に適した肥料が調製できたと考えた。その他の成分（金属・重金属量）も同等以下であった。また、2回の量産化試験で得られた新規下水汚泥肥料の主要成分（N：P_2O_5：K_2O=3.6～3.9%：3.1～3.2%：1.0～1.2%）は、肥料の品質確保等に関する法律における誤差の許容基準（±20%）以内にあり、量産化による再現性が得られた。加えて、新規下水汚泥肥料の菌叢解析の結果、サンドウィッチ方式は2回目と3回目で菌叢が類似していること、切返し2回目と3回目の肥料成分分析結果に大きな違いが無いことから、切返し回数を1回削減できることが示唆され、新規下水汚泥肥料の発酵日数を約30日（切返し1回にかかる日数）削減できることが明らかになった。

新規下水汚泥肥料の窒素無機化試験では、本肥料は茶樹が好む速効性のアンモニア態窒素(47.4%)を多く含むことから、茶栽培に適した肥料であることがわかった。

2021年度、2022年度は、異なる脱水方法で得られた脱水汚泥（消石灰及び無機凝集剤、加圧濾過式）を用いて、前年度と同様な量産化試験を実施した。石灰系凝集剤を用いた脱水汚泥は、高分子系凝集剤を用いた脱水汚泥と比較して、保水性が悪く、肥料調製時の初期水分率を高分子系よりも5%低い状態で発酵処理を施した。完成した石灰系新規下水汚泥肥料の主要成分を高分子系と比較すると、窒素全量が1.0%程度低く（N：P_2O_5：K_2O=2.7%：3.0%：0.9%）、Ca含有量は高分子系では0.6%であるのに対し、石灰系では8.2%であり、高分子系の約14倍多く含まれていることがわかった。

肥料製造日数の短縮を目指し、前年度に調製した新規下水汚泥肥料を戻し肥料として全仕込み重量（乾物）の30%に利用して量産化試験を実施した。その結果、前年度調製した新規下水汚泥肥料の成分特性を維持した状態で製造日数を当初の90日から70日まで短縮できることが明らかになった。また、肥料

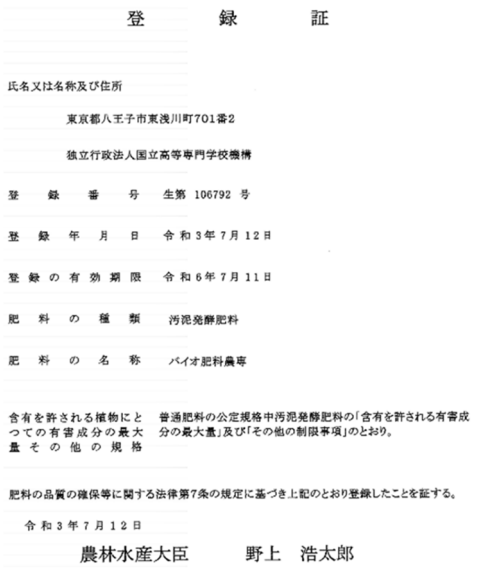
表0.1 新規下水汚泥肥料の肥料成分特性

肥料	pH	C/N比	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr	粗繊維
			(乾物%)					(mg/kg 乾物)						(乾物%)
新規下水汚泥肥料（目標値）（小型肥料化装置調製値）	7.5	11.0	4.0	3.2	1.5	0.4	0.9	0.3	3.8	2.6	N.D.	4.7	8.9	43.9
新規下水汚泥肥料（1回目）	7.2	11.0	3.6	3.2	1.2	0.4	0.8	0.2	1.5	N.D.	0.19	3.8	3.6	-
新規下水汚泥肥料（2回目）	7.1	11.0	3.9	3.1	1.0	0.3	0.4	0.2	2.1	N.D.	0.11	4.3	4.1	33.6
下水汚泥肥料(A)*	8.4	6.7	4.4	5.8	0.7	11.7	1.0	0.9	11.0	7.8	0.5	31.8	25.2	9.7
下水汚泥肥料(B)*	7.7	7.6	3.8	5.3	0.2	8.4	0.9	1.4	15	5.0	0.38	13.0	36.0	-
牛糞堆肥**	7.0	16.4	1.9	3.2	4.3	1.4	1.2	N.D.	1.0	0.5	N.D.	3.2	1.9	39.4
配合肥料1***	7.4	1.0	13.2	2.2	2.4	1.7	5.5	0.4	N.D.	N.D.	0.04	77.5	565	2.5
配合肥料2***	6.6	3.1	7.8	3.9	2.5	2.7	5.0	0.9	1.1	N.D.	0.05	32.9	786	4.5

＊市販されている下水汚泥肥料　＊＊牛糞、油粕などを混合して調製された堆肥　＊＊＊配合肥料1，2　茶栽培で利用される一般的な有機配合肥料
N.D.：検出限界値以下　ー：測定無し

調製過程における発酵温度の経日変化と菌叢解析の結果から、戻し肥料の有無に関わらず切返し回数や切返しまでの日数を短縮することで、新規下水汚泥肥料の製造日数を当初の目標である60日まで短縮できた。

事業採算性の検討では、まず地域バイオマス（下水汚泥、竹おが屑、米糠、焼酎粕）の賦存量について調査した。その結果、これらのバイオマスの賦存量は、240kgN/ha/年施肥で、県内の茶栽培面積（8,300ha）の約7割、120kgN/ha/年施肥で、全面積を網羅できることがわかった。つぎに、新規下水汚泥肥料の調製に必要な材料費を各資材の調達価格から試算した結果、12.4円/kgであった。この結果をもとに、年間1,000トン規模で製造施設を建設し、事業化費用を試算すると20円/kgで販売可能なことがわかった。さらに社会実装化を目指し、（独）農林水産消費安全技術センター（FAMIC）に、植害試験結果、成分分析結果等の資料を揃え、肥料登録申請を行なった。2021年7月12日には新規下水汚泥肥料の肥料登録（肥料登録番号：生第106792号）が完了した（図0.6）。


登　録　証

氏名又は名称及び住所
東京都八王子市東浅川町701番2
独立行政法人国立高等専門学校機構

登録番号　生第 106792 号
登録年月日　令和3年7月12日
登録の有効期限　令和6年7月11日
肥料の種類　汚泥発酵肥料
肥料の名称　バイオ肥料農専
含有を許される植物にとつての有害成分の最大量その他の規格　普通肥料の公定規格中汚泥発酵肥料の「含有を許される有害成分の最大量」及び「その他の制限事項」のとおり。

肥料の品質の確保等に関する法律第7条の規定に基づき上記のとおり登録したことを証する。

令和3年7月12日
農林水産大臣　野上　浩太郎

図0.6 肥料登録証

サブテーマ2では、サブテーマ1で調製した新規下水汚泥肥料を地域の一大産業である茶産業へ適用することで、地域の一次・二次産業及び環境産業を巻き込んだ地域循環共生圏を創出することを最終目標に研究を進めた。

表0.2に新規下水汚泥肥料の最適な施肥割合の検討結果を示す。新規下水汚泥肥料を施肥した試験区において、菜種油粕を用いた慣行施肥区と同等の生葉収量が得られ、また、茶葉品質（主要成分、金属・重金属成分）についても有意差はなく、菜種油粕の代替肥料として100%利用（最大年間施肥窒素量50kgNのうち24kgN/10a施肥）できることがわかった。

表0.2 新規下水汚泥肥料の最適な施肥割合の検討（一番茶の収量・品質）

試験区	収量（10a）	茶葉成分			茶葉重金属含有量					
	一番茶	全窒素	遊離アミノ酸	テアニン	As	T-Cr	Ni	Cd	Pb	T-Hg
	(kg)	(乾物%)			(mg/kg乾物)					
1 慣行施肥区	630 ± 19 b	5.2 ± 0.3	3.4 ± 0.3	1.8 ± 0.2	N.D.	0.7 ± 0.27	4.2 ± 0.2	N.D.	0.2 ± 0.1	N.D.
	450 ± 32	5.4 ± 0.1	3.5 ± 0.1	1.8 ± 0.1	N.D.	0.31 ± 0.11	4.3 ± 0.3	N.D.	0.1 ± 0.1	N.D.
2 新規下水汚泥肥料（50%）区	620 ± 36 b	5.1 ± 0.2	3.4 ± 0.2	1.8 ± 0.1	N.D.	0.6 ± 0.20	3.9 ± 0.4	N.D.	N.D.	N.D.
	461 ± 32	5.2 ± 0.1	3.3 ± 0.2	1.7 ± 0.2	N.D.	0.24 ± 0.06	4.7 ± 0.2	N.D.	0.1 ± 0.1	N.D.
3 新規下水汚泥肥料（100%）区	667 ± 31 ab	5.2 ± 0.1	3.3 ± 0.1	1.7 ± 0.1	N.D.	0.89 ± 0.31	4.6 ± 0.4	N.D.	N.D.	N.D.
	494 ± 22	5.2 ± 0.1	3.3 ± 0.2	1.7 ± 0.1	N.D.	0.35 ± 0.12	5.3 ± 1.2	N.D.	0.1 ± 0.1	N.D.
4 配合肥料区	717 ± 27 a	5.2 ± 0.1	3.5 ± 0.1	1.8 ± 0.1	N.D.	0.41 ± 0.10	3.9 ± 0.1	N.D.	N.D.	N.D.
	511 ± 60	5.5 ± 0.1	3.4 ± 0.3	1.8 ± 0.1	N.D.	0.31 ± 0.10	5.0 ± 0.7	N.D.	0.1 ± 0.1	N.D.

＊ 平均値±標準偏差を示す．Tukeyの多重比較により5%水準で有意差あり（N=3）．　上段：2021年度　下段：2022年度

表0.3に新規下水汚泥肥料の最適な施肥時期の検討結果を示す。試験区間（秋肥区、秋春肥区、春肥区及び対照区(有機配合肥料区)で生葉収量、茶葉品質とも有意差は認められなかったが、秋肥区では、一番茶の生葉収量が多くなる傾向にあった。品質においても、遊離アミノ酸量が高くなる傾向にあった。さらに、茶

表0.3 新規下水汚泥肥料の最適な施肥時期の検討（一番茶の収量・品質）

試験区	収量（10a）	茶葉成分		茶葉重金属含有量					
	一番茶	全窒素	遊離アミノ酸	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr
	(kg)	(乾物%)		(mg/kg乾物)					
秋肥区	481	5.6	4.5	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.01未満	3.8	0.1未満
	378	6.0	4.7	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.01未満	5.7	0.1未満
春肥区	441	5.6	4.4	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.01未満	3.8	0.1未満
	327	6.1	4.4	0.1未満	0.21	0.1未満	0.01未満	4.5	0.1
秋春肥区	430	5.6	4.3	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.01未満	4.1	0.1未満
	350	6.0	4.2	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.01未満	4.4	0.1未満
対照区	433	5.4	4.0	0.1未満	0.1未満	0.1未満	0.01未満	4.2	0.1未満
	351	6.0	4.3	0.1未満	0.21	0.1未満	0.01未満	4.4	0.1
分散分析	ns	ns	ns					ns	
	ns	ns	ns					ns	

注１）ns;p>0.05を示す。　上段：2021年度　下段：2022年度

葉中の金属・重金属含有量は慣行施肥区と同等、かつCodex基準値以下であり、安全性も確認できた。加えて、栽培試験を通して、新規下水汚泥肥料はアンモニア態窒素が多く、茶樹に吸収され易く、かつ施肥後も遅効的な特性があることや、秋肥として施用することで、土壌pHがやや改善される傾向にあった。

茶栽培では、肥料を多量に施すことから、地下水への窒素・重金属の溶脱が懸念される。また、茶樹や土壌におけるこれらの成分の動態が未解明である。そこで、2020年10月にうね間中央部の深さ100cm位置にポーラスカップを埋設し、浸透水を採水して分析した。その結果を図2.4に示す。新規下水汚泥肥料を施肥した試験区では、対照区（有機配合肥料区）と比較して、硝酸態窒素濃度が低く、特に新規下水汚泥肥料を秋春に施肥した試験区（秋春肥区）では、15～20mg/Lであり、対照区（35～50mg/L）より極端に低かった。浸透水中の重金属量は、対照区と同レベルであった。これらのことから、新規下水汚泥肥料は環境に優しい肥料であることがわかった。

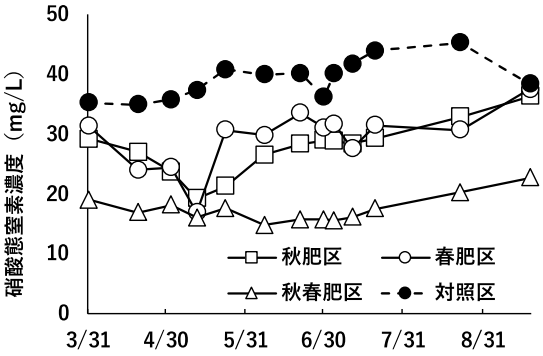


図2.4　茶園土壌浸透水の硝酸態窒素濃度の推移(2021年度)

新規下水汚泥肥料を茶樹幼木・成木に施肥することによる窒素・重金属のマテリアルフロー（葉、幹、根および土壌）を調査した。幼木については、新規下水汚泥肥料を2年間施用し、有機質資材を施用する慣行区を対照区とした。Cdに着目すると、新規下水汚泥のCd含有率は0.2mg/kgで、含有が許される最大量である5mg/kgの1/25程度であった。これを茶の肥料に施用した場合、2年間の施用量が10ａあたり0.189g、茶樹の吸収量は0.012gで、施用量の6%程度が吸収割合であった。一方、慣行肥料（有機配合肥料）の場合は、施用量が0.238ｇ、吸収量が0.044gで、吸収率は施用量の18%であった。また、土壌中のCd含有率は、いずれもの肥料試験区も0.1mg/kg乾物で蓄積の傾向は認められなかった。

成木については、50年生‘やぶきた’に対し、施肥窒素量に対する生葉の窒素持出量から施肥窒素利用率を計算した。新規下水汚泥肥料を施用した秋肥区、春肥区、秋春肥区の施肥窒素利用率は、2022（令和4年）度の春肥区を除いて対照区より高く、特に秋肥施用で利用率が高まる傾向であった。

表2.17に各試験区における資材からの重金属施用量（2年間合計）を示す。成木に対する重金属の影響について、2年間の資材投入量から重金属の投入量を計算すると、新規下水汚泥肥料の施用量が最も多い秋春区のPb、Hg施用量は、対照区のPbで7.5倍、Hgで9.2倍であるのに対し、有機質資材の施用量が最も多い対照区のCd、Ni、Cr施用量は、秋春肥区のCdで1.3倍、Niで1.8倍、Crで3.0倍であった。

表2.18に茶樹における重金属の現存量を示す。2年間の栽培試験終了後に‘やぶきた’52年生樹を堀取り、茶樹における重金属の現存量を調査した。茶樹の重金属現存量は、地上部にCd、Crが多く、地下部にHgが多かった。Pb、As、Niは地上部、地下部でバラツキが見られた。秋肥区、春肥区、秋春肥区における茶樹の重金属現存量は、対照区に対してCd:1～2.1倍、Pb:1.1～2.6倍、As:1.3～3.3倍、Hg:2～5.9倍、Ni:1.1～1.4倍、Cr:0.8～1.4倍で、いずれの元素も高い傾向を示したものの、Cd、Ni、Crは対照区の施用量が多く、必ずしも茶樹の重金属現存量と一致しなかった。このことから、施肥による茶樹の重金属含量に対する影響は小さいと考えられた。茶園土壌における重金属の現存量を、深さ20cm、仮比重0.7として計算した。新規下水汚泥肥料を施用した区におけるCd、As、Ni、Crの土壌の重金属現存量が対照区より高い傾向であった。しかし、土壌現存量に対して2年間の重金属施用量は非常に少なく、新規下水汚泥肥料の施用が土壌の重金属蓄積に及ぼす影響は小さいと考えられた。

以上の結果から、新規下水汚泥肥料の施用が茶樹及び茶園土壌に対

表2.17 各試験区における資材からの重金属施用量（2年間合計）
（g/10a・2year）

試験区	Cd	Pb	As	Hg	Ni	Cr
秋肥	0.35	0.95	0.00	0.11	51.3	360
春肥	0.57	1.74	0.00	0.19	39.8	433
秋春肥	0.39	2.37	0.00	0.26	32.2	201
対照	0.52	0.31	0.00	0.03	58.9	592

表2.18 茶樹における重金属の現存量（上：成木全体、下：成木部位別）

（g/10a）

試験区	Cd	Pb	As	Hg	Ni	Cr
秋肥	0.97	13.9	2.11	0.12	8.8	4.6
春肥	0.45	8.3	1.05	0.06	7.0	4.2
秋春肥	0.46	5.5	0.84	0.04	6.7	7.4
対照	0.46	4.9	0.65	0.02	6.1	5.3

（g/10a）

試験区	部位	Cd	Pb	As	Hg	Ni	Cr
秋肥	地上（葉，枝条）	0.49	3.76	0.49	0.02	3.39	2.79
	地下（根）	0.47	10.16	1.62	0.09	5.37	1.84
春肥	地上（葉，枝条）	0.27	6.40	0.54	0.03	5.48	2.77
	地下（根）	0.18	1.92	0.51	0.03	1.55	1.39
秋春肥	地上（葉，枝条）	0.26	2.91	0.26	0.00	4.38	4.57
	地下（根）	0.21	2.59	0.59	0.04	2.36	2.85
対照	地上（葉，枝条）	0.26	2.94	0.26	0.00	3.79	3.88
	地下（根）	0.20	1.97	0.39	0.02	2.34	1.42

する重金属蓄積に及ぼす影響は小さいことがわかった。

表0.4に各試験区の肥料費と新規下水汚泥肥料を利用することによる肥料費削減率を示す。肥料費については、新規下水汚泥肥料1kgあたりの単価を20円（既存の下水汚泥肥料：21円/kg）に設定した場合、菜種油粕を50%置換することで肥料費削減率18.3%となり、100%置換では36.6%の削減効果が期待できることがわかった。肥料価格が高騰している昨今、新規下水汚泥肥料は安価な茶栽培肥料として利用できることがわかった。

表0.4 各試験区の肥料費と新規下水汚泥肥料を利用することによる肥料費削減率

試験区	秋肥	春肥	芽出し	夏肥	1hあたりの肥料費	肥料費削減率
	（千円）					（%）
1 慣行施肥区	148	206	17	170	541	ー
2 新規下水汚泥肥料（50%）区	106	148	17	170	442	18.3
3 新規下水汚泥肥料（100%）区	64	90	17	170	343	36.6
4 配合肥料区	122	122	17	170	429	20.7

注1）a：菜種油粕 78円/kg、b：新規下水汚泥肥料 20円/kg、c：有機配合肥料A 85.1円/kg、d：有機配合肥料B 93.9円/kg、e：硫安 45.9円/kg

注2）肥料費削減率は慣行施肥区を基準として、算出

下水汚泥（脱水汚泥）と地域バイオマスから調製した新規下水汚泥肥料を地域の一大産業である「茶」に適用することで、事業採算性の高い循環システムを構築できた。

５－２．環境政策等への貢献

本研究は、以下の3点から、選択した【重点課題⑩】「地域循環共生圏形成に資する廃棄物処理システムの構築に関する研究・技術開発」、および、行政ニーズ3-5「地域循環共生圏の形成に向けたバイオマス廃棄物等を対象とした処理プロセスのより一層の高度化に関する研究」に資すると考える。

・新規下水汚泥肥料は、食品廃棄物（焼酎粕）や竹資材といった鹿児島県特有のバイオマスを活用している。これにより、下水汚泥処理システムに茶栽培のみならず酒造メーカーや林業といった、第一次・第二次産業を巻き込んだ地域循環共生圏を創出できる。

・地域の一大産業(茶栽培)と結びつけることで、大量の下水汚泥を地域で有効活用できる。

・保水性が改善され、重金属含有量が低減し、肥料効果が格段に高まった新規下水汚泥肥料は、汚泥

肥料の付加価値を高め、販路拡大に寄与する。

このように、新規下水汚泥肥料を鹿児島県の特産であるお茶へ利用することで、地域の農業振興につながり、環境政策としての取り組みの一つである、「バイオマスの再資源化による地域循環共生圏の促進」、「地域資源を活用した持続可能な地域づくり」にも大いに貢献する。

＜行政等が既に活用した成果＞

2021年11月26日（金）に鹿児島県農業開発総合センターで開催された令和3年度土壌肥料成績設計検討会において、本県研究担当者から「普及に移す研究成果」として、本研究の成果である「高分子凝集剤を用いた下水汚泥肥料の肥料特性」が提案され、協議・審査の結果、鹿児島県の「研究情報（新知見や研究、行政施策策定等の基礎・基盤となり得る情報）」に採用された。また、2022年11月25日(金)に開催された令和4年度土壌肥料成績設計検討会では、本研究の成果として「下水汚泥肥料の施用が茶の収量、品質に及ぼす影響」及び「化学肥料の代替として利用可能な下水汚泥肥料の特性」が提案され、協議・審査を経て、前者は「研究情報」、後者は「普及情報」に採用された。「普及情報」は農業者、実需者等に直接的または間接的に利用可能な新技術であり、技術員が現場で指導する上で活用する情報であり、県のウェブサイト上で公開されている。

https://www.pref.kagoshima.jp/ag11/pop-tech/nenndo/documents/documents/104090_20230410115510-1.pdf

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

令和5年度においても、本研究成果が土壌肥料成績設計検討会に「普及に移す研究成果」として示される予定である。令和4年度は「化学肥料の代替として利用可能な下水汚泥肥料の特性」として、本研究成果の一部が公表されたが、「下水汚泥肥料を用いた茶栽培」についても「研究情報」から「普及情報」にとりまとめることで、研究成果の速やかな普及と生産現場での活用・定着が見込まれる。

５－３．研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
本研究では、脱水汚泥と複数の地域バイオマスを組み合わせ、安全で安価、かつ肥料効果が高い新規下水汚泥肥料量産化技術を確立する。量産化した汚泥肥料は国内初の試みとして高窒素・低カリウム肥料が求められている茶栽培に適用し、事業採算性の高い下水汚泥の地域循環システムを構築する。	目標を上回る成果をあげた。 （具体的な理由・根拠） ・新規下水汚泥肥料の量産化試験、窒素無機化試験及び植害試験を通して、肥料の主要成分の再現性（肥料の品質の確保等に関する法律の誤差許容基準（±20%）以内）、安全性等を確認できた。また、これらの試験データを用いて、肥料登録を行い、市場に流通可能な肥料の量産化技術を確立した。 ・本肥料を年間1,000トン規模で調製すると、肥料を20円/kgで販売できることが製造コスト（原材料費、人件費、機械設備費など）から算出できた（目標値：20円/kg）。 ・量産化した新規下水汚泥肥料を茶栽培に適用し、従来の有機質資材（菜種油粕）や有機配合肥料と収量、品質とも遜色ない結果を得ることができた。加えて、本肥料を有機質資材の代替として、24kgN/10a施肥することで、肥料費を当初の目標である20%を大きく上回る36.6%削減できることが示唆された。 ・鹿児島高専、自治体（霧島市、鹿児島市）、国・県の公設機関、地域の環境産業、農林業（茶栽培農家、米農家、竹チップ製造業）、製造業（酒造メーカー）及びコンサル業（下水道コンサル）とで、事業化に向けてコンソーシアムを構築できた。

サブテーマ１目標

研究協力機関（三州衛生公社）の肥料化施設の一部を借用し、まず5m³規模で新規下水汚泥肥料の量産化試験を実施する。本試験では小型肥料化装置で得られた新規下水汚泥肥料の成分特性（N：P_2O_5：K_2O=4.0%：3.2%：1.5%、重金属量：配合肥料、牛糞堆肥などと同等）（表参照）を目標値とする。

表1.1 新規下水汚泥肥料の目標値

資材	pH	C/N比	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr
			(乾物%)					(mg/kg 乾物)					
新規下水汚泥肥料	7.5	11.0	4.0	3.2	1.5	0.4	0.9	0.3	3.8	2.6	N.D.	4.7	8.9
下水汚泥肥料(A)*	8.4	6.7	4.4	5.8	0.7	11.7	1.0	0.9	11.0	7.8	0.5	31.8	25.2
下水汚泥肥料(B)*	7.7	7.6	3.8	5.3	0.2	8.4	0.9	1.4	15	5.0	0.38	13.0	36.0
牛糞堆肥**	7.0	16.4	1.9	3.2	4.3	1.4	1.2	N.D.	1.0	0.5	N.D.	3.2	1.9
配合肥料1***	7.4	1.0	13.2	2.2	2.4	1.7	5.5	0.4	N.D.	N.D.	0.04	77.5	565
配合肥料2***	6.6	3.1	7.8	3.9	2.5	2.7	5.0	0.9	1.1	N.D.	0.05	32.9	786

＊市販されている下水汚泥肥料　＊＊牛糞、油粕などを混合して調製された堆肥　＊＊＊有機配合肥料1，2　茶栽培で利用される一般的な有機配合肥料
N.D.：検出限界値以下

新規下水汚泥肥料は、条件的嫌気条件のもと調製するため、従来の好気条件での製造法と比較して製造日数が2～3倍（好気：45日程度→条件的嫌気：90～120日程度）になることが想定される。このため、戻し肥料を利用することにより、肥料的効果を維持した状態で肥料製造期間を大幅に短縮することが可能か検討する。目標としては、60日を目指す。また、肥料的効果については、これまで窒素無機化試験において黒ボク土を利用して実施してきたが、茶園土壌は酸性土壌であることから、その特性を考慮し、酸性土壌を用いた無機化試験も併せて実施し、菜種油粕や下水汚泥肥料市販品と同程度以上の肥料的効果（窒素無機化率）が得られることを実証する。さらに、脱水方法が異なる脱水汚泥を用いて新規下水汚泥肥料の量産化試験を実施し、同様な製品特性（低重金属量、高窒素無機化率（肥効率））を有する汚泥肥料を調製する。調製した新規下水汚泥肥料の原料及び製造コストの試算を行い、茶栽培に新規下水汚泥肥料を利用した場合、1haあたりの肥料コストを現在の60万円から20%削減することを目標に事業採算性を目指す。

目標の達成状況

目標を上回る成果をあげた。
（具体的な理由・根拠）

・新規下水汚泥肥料の量産化試験において、その主要成分は、成分目標値（N：P_2O_5：K_2O=4.0%：3.2%：1.5%）と比較して、窒素全量、リン酸全量は目標値に近い値（N：P_2O_5：K_2O=3.6～3.9%：3.1～3.2%：1.0～1.2%）が得られた。カリ全量はやや低かったが、茶栽培用肥料としては、プラスに働く結果であった。

・量産化試験で得られた肥料の主要成分は、肥料の品質の確保等に関する法律における誤差の許容基準（±20%）以内であり、量産化による再現性が確認された。

・新規下水汚泥肥料を発酵温度の経日変化と菌叢解析の結果を反映させることで、目標の60日で製造できた。

・窒素無機化試験を実施し、新規下水汚泥肥料は、茶樹が好む速効性のアンモニア態窒素を47.4%、無機化が期待できる遅効性の窒素を12.2%含み、有機質資材の菜種油粕（無機化率：54%）よりも、茶樹に吸収され易い無機化パターンであり、同等以上の肥料的効果が期待できることがわかった。

・新規下水汚泥肥料の植害試験（コマツナ）を実施した結果、生体重指数は、肥料添加量の増加に伴い4倍量施肥区で236と既存の下水汚泥肥料（生体重指数：87）より格段に高かった（濃度障害は無し）。新規下水汚泥肥料には作物に対する成長促進効果が示唆された。

・当初の予定（目標設定時）にはなかったが、肥料の量産化による再現性、保証（肥料）成分・重金属成分の分析結果、汚泥原料の溶出試験及び植害試験結果から、実装化を見据え、肥料登録を完了させることができた。

・新規下水汚泥肥料を年間1,000トン規模（脱水汚泥を現物で1,708トン使用（脱水汚泥:5.6トン/日×305日））で製造する施設を建設し、事業化費用を試算すると20円/kgで販売できることがわかった。

・新規下水汚泥肥料を1haあたり24kgN/年（新規下水汚泥肥料:20円/kg）菜種油粕の代替として利用すると、肥料費を当初の目標である20%を大幅に上回る36.6%削減できることがわかった。

・下水汚泥肥料の肥料的特性は、2021年度（令和3年度）に「研究情報」、2022年度（令和4年度）に「普及情報」としてとりまとめ、鹿児島県のウェブサイト上で公表した。

サブテーマ２目標	目標の達成状況
茶栽培における鹿児島県施肥基準は、窒素を主体に年間窒素施肥量50kg/10aで、一般的に肥料を秋肥、春肥、夏肥に分けて施肥する。新規下水汚泥肥料の特性に応じた施肥法を確立し、慣行栽培の茶葉収量1,517kg/10a（一番茶：582kg、二番茶：509kg、三番茶：426kg 鹿児島県茶業生産動向資料、H30年度）を目指す。加えて茶葉品質や茶園土壌環境への影響を慣行栽培区と比較し、問題なく新規下水汚泥肥料を施用できることを示す。具体的には、茶葉品質については、Codex基準値以下（T-As：2mg/kg、Pb ： 1mg/kg、T-Hg ： 0.5mg/kg）とし、茶園への重金属蓄積値について、土壌環境基準値以下とする。また、1haあたりの肥料コストを現在の60万円から20%削減することを目指し、実装化に結びつける。	目標どおりの成果をあげた。 （具体的な理由・根拠） ・新規下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験を実施し、生葉収量・茶葉品質（主要成分（窒素、テアニンなど）、金属・重金属成分：Codex基準以下）から慣行施肥区と同等以上の成果が得られ、菜種油粕の代替肥料として100%利用できることがわかった。 ・施肥時期の検討では、新規下水汚泥肥料を秋肥、春肥および秋肥・春肥として利用できることが、生葉収量・茶葉品質（主要成分（窒素、テアニンなど）の分析で明らかになった。特に、新規下水汚泥肥料を秋肥として利用すると、一番茶の生葉収量が多くなる傾向にあった。品質についても、遊離アミノ酸量が高くなる傾向にあった。 ・新規下水汚泥肥料を施用した土壌中の金属・重金属値は、各試験区とも栽培開始時と比較して微増減したが、統計的有意差は認められなかった（土壌環境基準値以下）。 ・新規下水汚泥肥料は窒素溶脱が少なく、対照区（有機配合肥料）と比較して、環境に優しい肥料であることがわかった。また浸透水中の重金属量は慣行区と同レベルであった。 ・茶樹幼木・成木に対する重金属のマテリアルフローを調査した結果、茶樹、土壌に対する重金属蓄積の影響は少ないことがわかった。 ・菜種油粕の50%及び100%を新規下水汚泥肥料に置換すると、肥料費をそれぞれ18.3%、36.6%削減できることがわかった。特に菜種油粕を新規下水汚泥肥料に全量（100%）置換すると、当初の目標である20%から大幅に改善できることがわかった。 ・下水汚泥肥料を用いた茶栽培について、2022年度（令和4年度）の鹿児島県の「研究情報」に採用された。

６．研究成果の発表状況

６－１．査読付き論文

＜件数＞

3件

＜主な査読付き論文＞

1) 山内正仁、原田隆大、山田真義、潟龍平、黒田恭平、片平智仁、碇智、山口隆司：土木学会論文集G（環境）、77(7)、Ⅲ_161-Ⅲ_168（2021）
「下水汚泥肥料およびマッシュルーム廃菌床の茶栽培への適用」
2) 片平智仁、原田隆大、潟龍平、上薗一郎、中村憲知、山田真義、黒田恭平、碇智、山口隆司、山内正仁：土木学会論文集G（環境）、78(7)、Ⅲ_223-Ⅲ_231（2022）
「新規下水汚泥肥料の量産化技術の開発と茶栽培への適用」
3) K.Kuroda,T.Katahira,M.Yamada,I.Uezono,N.Nakamura,T.Yamaguchi,M.Yamauchi:Bioresource Technology Reports,22 101401(2023)
「Co-composting of sewage sludge with plant biomass, and analysis of microbiome relevant to plant growth promotion.」

６－２．知的財産権

1) 山内正仁、山田真義、（株）日水コン、大成建設（株）、（株）海連：「窒素無機化率が高い汚泥肥料」特願2020-110731、2020年6月26日
2) 鹿児島工業高等専門学校：新規下水汚泥肥料の肥料登録、肥料登録番号：生第106792号
肥料の種類：汚泥発酵肥料肥料の名称：バイオ肥料農専、肥料登録年月日：2021年7月12日

６－３．その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	4件
口頭発表（学会等）	17件
「国民との科学・技術対話」の実施	3件
マスコミ等への公表・報道等	11件
本研究費の研究成果による受賞	4件
その他の成果発表	7件

７．国際共同研究等の状況

「特に記載すべき事項はない。」

８．研究者略歴

研究代表者

山内　正仁

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（工学）、博士（農学）
現在、鹿児島工業高等専門学校都市環境デザイン工学科教授
豊橋技術科学大学大学院工学研究科教授（併任）

研究分担者

1）山田　真義

長岡技術科学大学大学院博士後期課程エネルギー・環境工学専攻、博士（工学）
現在、鹿児島工業高等専門学校都市環境デザイン工学科教授

2）上薗　一郎

高知大学農学部卒業、博士（農学）
鹿児島県農業開発総合センター大隅支場環境研究室研究専門員（～2022年3月）
鹿児島県農業開発総合センター企画調整部普及情報課農業専門普及指導員
（土壌肥料）農業革新支援専門員（2022年4月～2023年3月）
現在、鹿児島県農業開発総合センター生産環境部土壌環境研究室室長

3）黒田　恭平

長岡技術科学大学大学院工学研究科エネルギー・環境工学専攻、博士（工学）
現在、産業技術総合研究所生命工学領域生物プロセス研究部門研究員

4）片平　智仁

長岡技術科学大学大学院環境システム工学専攻、（修士）
現在、鹿児島工業高等専門学校都市環境デザイン工学科助教

5）中村　憲知

鹿児島大学農学部卒業、
鹿児島県農業開発総合センター生産環境部土壌環境研究室研究専門員（～2022年3月）
現在、鹿児島県姶良・伊佐振興局農林水産部農政普及課茶普及係技術専門員

6）中川路　光庸

宮崎大学大学院生物資源利用学専攻、（修士）
現在、鹿児島県農業開発総合センター生産環境部土壌環境研究室研究専門員

7）勝田　雅人

宮崎大学農学部卒業
現在、鹿児島県農業開発総合センター大隅支場環境研究室研究専門員（2022年4月～）

8）田中　正一

九州大学大学院農学研究科、（修士）
鹿児島県農業開発総合センター生産環境部土壌環境研究室室長（2022年4月～2023年3月）
現在、鹿児島県農業開発総合センター企画調整部普及情報課農業専門普及指導員
（土壌肥料）農業革新支援専門員

Ⅱ．成果の詳細

Ⅱ－１　新規下水汚泥肥料の量産化技術の開発

鹿児島工業高等専門学校
　都市環境デザイン工学科　教授　　山田　真義
　都市環境デザイン工学科　教授　　山内　正仁
　都市環境デザイン工学科　助教　　片平　智仁

鹿児島県農業開発総合センター
　大隅支場　環境研究室　室長　　上薗　一郎（2020年4月～2022年3月）
　大隅支場　環境研究室　研究専門員　　勝田　雅人（2022年4月～2023年3月）
　　※人事異動に伴う研究分担者の交代

産業技術総合研究所
　北海道センター　生物プロセス研究部門　微生物生態工学研究グループ　黒田　恭平

〈研究協力者〉
　株式会社三州衛生公社　石川　武則、二見　勇二、松原　剛
　株式会社日水コン　種市　尚仁、佐々木　俊郎、占部　章次郎、大嶋　義章

［要旨］
サブテーマ1では、まず、小型肥料化装置の1,000倍量（5m^3）の規模で、新規下水汚泥肥料の量産化試験を実施し、スケールアップによる肥料成分の再現性、製造日数の短縮化および肥料販売価格について検討した。その結果、新規下水汚泥肥料の主要成分（N：P_2O_5：K_2O=3.6～3.9%：3.1～3.2%：1.0～1.2%）の中でカリウム全量は目標値（N：P_2O_5：K_2O = 4.0%：3.2%：1.5%）よりやや低い値であったが、茶栽培では低カリウム資材が求められていることから、量産化することによりさらに茶栽培に適した肥料が調製できたと考えられた。また、量産化試験で得られた新規下水汚泥肥料は、「肥料の品質確保等に関する法律」における誤差許容基準（±20%）以内にあり、スケールアップした肥料の再現性を確認できた。新規下水汚泥肥料の製造日数については、発酵温度の経日変化と菌叢解析の結果を反映させることで、目標の60日を達成できた。肥料販売価格については、新規下水汚泥肥料を年間1,000トン（脱水汚泥を現物で1,708トン使用（脱水汚泥：5.6トン/日×305日））規模で製造する施設を建設し、事業化費用を試算すると当初の目標値である20円/kgを達成できることがわかった。つぎに、量産化した新規下水汚泥肥料の窒素無機化パターンを明らかにするために、茶園土壌を用いて窒素無機化試験を実施した。その結果、新規下水汚泥肥料は、茶樹が好む速効性のアンモニア態窒素を47.4%、無機化が期待できる遅効性の窒素を12.2%含むことがわかった。また、窒素無機化パターンから、有機質資材の菜種油粕（無機化率：54%）よりも、茶樹に吸収され易く、同等以上の肥料的効果が期待できることがわかった。さらに、新規下水汚泥肥料の植物への安全性を明らかにするために、コマツナを用いて植害試験を実施し、発芽率、生体重指数の結果から、新規下水汚泥肥料は、植物に対する害を与えないことがわかった。加えて、新規下水汚泥肥料は既存の下水汚泥と異なり、肥料添加量の増加に伴い、生体重指数が大きくなったことから、植物に対する成長促進効果が示唆された。また、新規下水汚泥肥料の事業化に向けて、肥料登録（肥料登録番号：生第106792号）を完了した。

１．研究開発目的

本研究は下水汚泥の農業利用に関する課題を、地域バイオマスの利用を通して顧客ニーズに合致した新たな下水汚泥肥料を調製し、地域の一次・二次産業と連携して事業採算性の高い循環システムを構築することを最終目的とする。具体的には、サブテーマ1では、下水汚泥（脱水汚泥）に地域バイオ

マスである竹おが屑、米糠、焼酎粕を混合し、利用者にとって使い勝手の良い、重金属含有量を低減した新規下水汚泥肥料の量産化技術を確立する。

２．研究目標

目標	研究協力機関（三州衛生公社）の肥料化施設の一部を借用し、まず5m^{3}規模で新規下水汚泥肥料の量産化試験を実施する。本試験では小型肥料化装置で得られた新規下水汚泥肥料の成分特性（N：P_2O_5：K_2O=4.0%：3.2%：1.5%、重金属量：配合肥料、牛糞堆肥などと同等）（表参照）を目標値とする。 表1.1 新規下水汚泥肥料の目標値 資材 / pH / C/N比 / N / P_2O_5 / K_2O / CaO / MgO（乾物%） Cd / Pb / As / T-Hg / Ni / Cr（mg/kg 乾物） 新規下水汚泥肥料 7.5 11.0 4.0 3.2 1.5 0.4 0.9 0.3 3.8 2.6 N.D. 4.7 8.9 下水汚泥肥料(A)* 8.4 6.7 4.4 5.8 0.7 11.7 1.0 0.9 11.0 7.8 0.5 31.8 25.2 下水汚泥肥料(B)* 7.7 7.6 3.8 5.3 0.2 8.4 0.9 1.4 15 5.0 0.38 13.0 36.0 牛糞堆肥** 7.0 16.4 1.9 3.2 4.3 1.4 1.2 N.D. 1.0 0.5 N.D. 3.2 1.9 有機配合肥料1*** 7.4 1.0 13.2 2.2 2.4 1.7 5.5 0.4 N.D. N.D. 0.04 77.5 565 有機配合肥料2*** 6.6 3.1 7.8 3.9 2.5 2.7 5.0 0.9 1.1 N.D. 0.05 32.9 786 ＊市販されている下水汚泥肥料　＊＊牛糞、油粕などを混合して調整された堆肥　＊＊＊有機配合肥料1，2　茶栽培で利用される一般的な肥料　N.D.：検出限界値以下 新規下水汚泥肥料は、条件的嫌気条件のもと調製するため、従来の好気条件での製造法と比較して製造日数が2～3倍（好気：45日程度→条件的嫌気：90～120日程度）になることが想定される。このため、戻し肥料を利用することにより、肥料的効果を維持した状態で肥料製造期間を大幅に短縮することが可能か検討する。目標としては、60日を目指す。また、肥料的効果についてはこれまで窒素無機化試験において黒ボク土を利用して実施してきたが、茶園土壌は酸性土壌であることから、その特性を考慮し、酸性土壌を用いた無機化試験も併せて実施し、菜種油粕や下水汚泥肥料市販品と同程度以上の肥料的効果（窒素無機化率）が得られることを実証する。さらに、脱水方法が異なる脱水汚泥を用いて新規下水汚泥肥料の量産化試験を実施し、同様な製品特性（低重金属量、高窒素無機化率（肥効率））を有する汚泥肥料を調製する。調製した新規下水汚泥肥料の原料及び製造コストの試算を行い、茶栽培に新規下水汚泥肥料を利用した場合、1haあたりの肥料コストを現在の60万円から20%削減することを目標に事業採算性を目指す。

３．研究開発内容

３．１　新規下水汚泥肥料の量産化試験

３．１．１　原料分析

新規下水汚泥肥料を調製するにあたり、鹿児島県霧島市の国分隼人クリーンセンター内で発生した下水汚泥（脱水汚泥）、地域バイオマスの竹おが屑（鹿児島県さつま町産）、米糠（鹿児島県霧島市産）および甘藷焼酎粕乾燥固形物（以下、焼酎粕、鹿児島県南九州市頴娃町産）を肥料原料として準備した。各原料の成分分析は肥料等試験法（pH： ガラス電極法、C/N比：全窒素・全炭素測定装置NC-22A、（株）住化分析センター、N： ケルダール法、P_2O_5： バナドモリブデン酸アンモニウム吸光光度法、K_2O、CaO、MgO：原子吸光光度法、重金属：T-Hg ：還元気化原子吸光法、Ni ： フレーム原子吸光光度法、Cd、Pb、As、Cr：ICP質量分析法）にしたがい実施した。なお、脱水汚泥には無機凝集剤（ポリ硫酸第二鉄溶液）、高分子凝集剤（両性脱水剤）で脱水処理されたものを用いた（以下、高分子系汚泥）。

３．１．２　新規下水汚泥肥料の調製

量産化試験は、研究協力機関の（株）三州衛生公社内に図1.1に示す肥料製造舎を設置し、5m³規模で4回（1回目：2020年4月24日～7月28日、2回目：2020年10月23日～2021年1月27日、3回目：2021年7月7日～10月15日、4回目：2022年4月15日～2022年7月22日）実施した。本試験では、小型肥料化装置で得られた新規下水汚泥肥料の最適配合割合（下水汚泥（脱水汚泥）：40%、竹おが屑：30%、米糠：20%、甘藷焼酎粕乾燥固形物：10%、何れも乾物重量%）を用いて新規下水汚泥肥料の量産化を試みた。具体的には、まず堆積物（原料）全体の水分率が60%となるように各原料の使用量を算出した。つぎに、各原料を図1.2に示すように円錐状に以下の手順で堆積した。

①最下部に使用量の1/3量の下水汚泥を広げ、その上に米糠、竹おが屑および焼酎粕を使用量の1/2量ずつ積み上げる。

②必要加水量の1/2量の水道水を加える。

③同様な作業を繰返し、最後に使用量の1/3量の下水汚泥を積み上げる。

図1.1 量産化試験状況

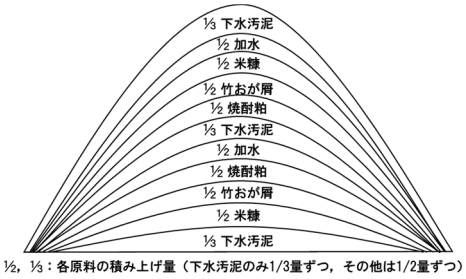


図1.2 原料堆積概略図

上記方法で円錐状に積み上げた肥料原料は、ホイールローダーによる切返し時のみに酸素供給を行う条件的嫌気条件（切返し時に酸素が供給されるがそれ以外では堆肥表面および表面近辺を除き嫌気状態が維持される条件）で発酵させた。図1.3に肥料製造時の発酵温度の変化を示す。切返し操作は資材中心部の発酵温度の低下を目安として約4週間ごとに計3回（1回目：製造開始後28日目、57日および81日目、2回目：製造開始後26日目、61日目および82日目、3回目：製造開始後30日目、58日目および85日目、4回目：製造開始後28日目、56日目および84日目）実施した。新規下水汚泥肥料の水分率が約20%になったところで、粉砕機（（株）カルイ：KDC-802B）で粉砕し、３．１．１と同様な分析法で、肥料成分、重金属成分等を調査し、既存の下水汚泥肥料、有機配合肥料と比較した。

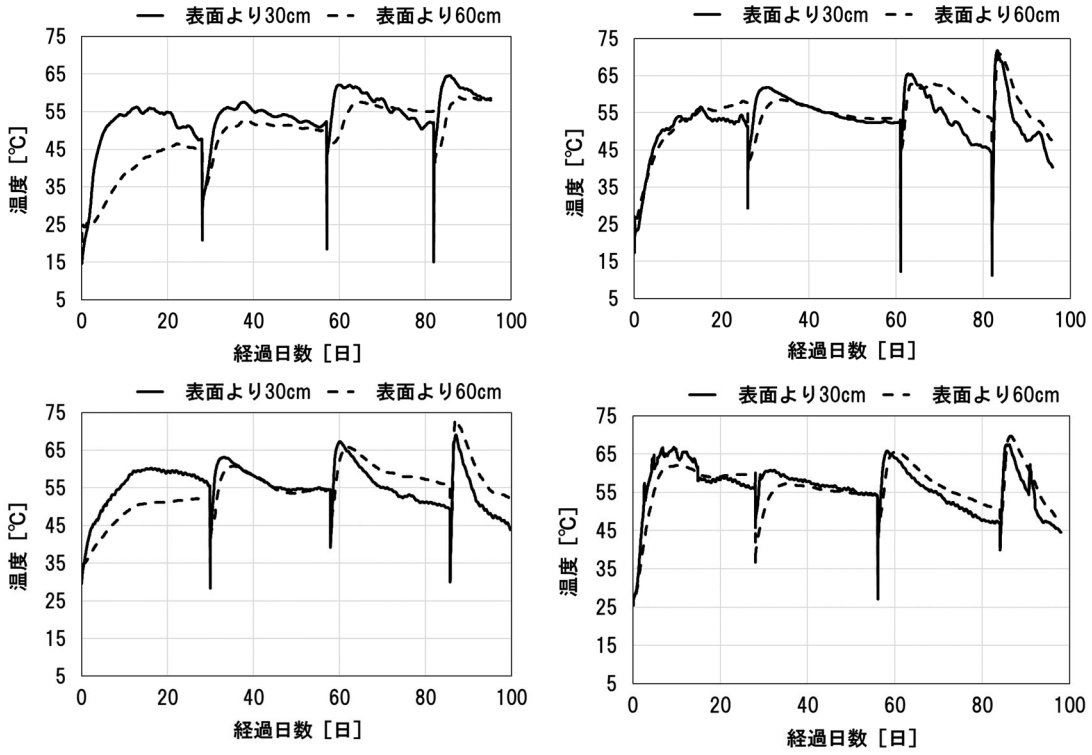


図1.3 新規下水肥料製造時の発酵温度の変化
（左上：1回目、右上：2回目、左下：3回目、右下：4回目）

３．１．３　新規下水汚泥肥料を用いた植害試験

汚泥肥料は2000年10月以降、普通肥料として扱われており、新規下水汚泥肥料を将来、市場へ流通させるためには肥料登録が必要不可欠となる。このため、肥料登録申請時に必要となる植害試験を「植物に対する害に関する栽培試験の方法」(農林水産消費安全センター:FAMIC)[1)]にしたがい実施した。表1.2に施肥の設計および試験区の名称を示す。試験区には、N、P_2O_5およびK_2Oとして、それぞれポットあたり25mgに相当する硫酸アンモニア、過燐酸石灰および塩化加里のみを施用した標準区、新規下水汚泥肥料を用いた供試肥料区および既存の下水汚泥肥料を用いた対照肥料区を準備した。なお、供試肥料区、対照肥料区は、標準区にポットあたりNとして100～400mg上乗せ施用した標準量施用区～4倍施用区を準備した。供試土壌には、砂壌土を用いた（表1.3参照）。栽培用ポットには、ノイバウエルポット（内径11.3cm、高さ6.5cm）を用いた。

表1.2 施肥の設計および試験区の名称

試験区		成分量(mg/鉢) N	P_2O_5	K_2O
供試肥料	標準量施用区 T_1	100	79.8	30.0
	2倍量施用区 T_2	200	160	59.9
	3倍量施用区 T_3	300	239	89.9
	4倍量施用区 T_4	400	319	120
対照肥料	標準量施用区 S_1	100	137	12.8
	2倍量施用区 S_2	200	275	25.5
	3倍量施用区 S_3	300	412	38.3
	4倍量施用区 S_4	400	549	51.0
標準区 B		25.0	25.0	25.0

表1.3 砂壌土の特性

土性	沖積土又は洪積土の別	pH	交換（置換）酸度	電気伝送率 (mS/cm)	塩基置換容積 (meq/乾土100g)	容積重 (g/風乾土500mL)	最大容水量 (乾土当り重量%)
砂壌土	洪積土	6.3	0.12	0.025	8	550	47

各ポットには、砂壌土550gと各種肥料（供試肥料：2.88g～11.53g/ポット、対照肥料：2.50g～10.00g/ポット）を混合し、土壌の水分が最大容水量の60%程度になるように調整後充填した。供試作物にはコマツナ（品種：極楽天、発芽率85%以上）を用い、各ポット20粒播種した。その後、ポットを室温20℃の人工気象装置内に移し、栽培試験を開始した。栽培開始7日後に発芽率（%）、21日後に葉長（cm）、生体重（g/ポット）を測定した。また、標準区の生体重を100とし、生体重指数も算出し、これらの試験結果から、有害物質（重金属）による障害、生理障害（窒素、りん酸、加里、銅、亜鉛）の有無を確認した。なお、本試験は、2反復で実施した。

３．１．４　新規下水汚泥肥料を用いた窒素無機化試験

新規下水汚泥肥料の窒素無機化特性を明らかにするために、恒温器内で窒素無機化試験を実施した。表1.4に窒素無機化試験の概要、表1.5、表1.6に供試した土壌、資材の化学性を示す。

窒素無機化試験は、2mmふるいを通過した茶園土壌5gと微粉砕した供試資材100mg（何れも乾物重量）を50mLのガラス製培養瓶内で混合し、最大容水量の60%となるように蒸留水を添加後、9箇所穴を空けた蓋でガラス瓶に封をし、恒温器内に静置した。なお、本試験では培養温度（20℃、30℃）、供試資材（新規下水汚泥肥料、牛糞堆肥、菜種油粕）、培養期間（0日、3日、1週、2週、3週、4週、6週、9週、12週、15週および20週）ごとに培養瓶を各2個準備した。また、試験期間中は培養瓶中の試料水分率を一定に保つために、水分蒸発量に合わせて適宜蒸留水を添加した。

表1.4 窒素無機化試験概要

培養温度	20℃，30℃
土壌条件	茶園土壌
供試資材	新規下水汚泥肥料，菜種油粕，牛糞堆肥，（資材なし：ブランク）
培養期間	0日，3日，1週，2週，3週，4週，6週，9週，12週，15週，20週

表1.5 供試土壌の化学性

土壌	pH	無機態窒素 (mg/100g)	CEC (meq)	交換性塩基 Ca (mg/100g)	Mg	K	可給態 リン酸 (mg/100g)	窒素
茶園土壌	4.2	2.2	53.5	2.7	0.7	1	130	10.3

CEC(Cation Exchange Capacity)：陽イオン交換容量：保肥性の目安となる項目.

表1.6 供試資材の化学性

資材	pH	全窒素 (乾物%)	全炭素	C/N比	無機態窒素 NH_4-N (g/kg乾物)	NO_3-N
新規下水汚泥肥料	7.1	3.9	41.9	11.0	9.5	0.4
牛糞堆肥	7.0	1.9	32.3	16.4	0.3	1.8
菜種油粕	6.1	6.7	47.4	7.1	0.1	0.2

分析は培養期間ごとに培養瓶内試料に2M塩化カリウム溶液を30mL加え、30分間振とう後、円形定量ろ紙（No.5C）でろ過し、蒸留法によりアンモニア態窒素、硝酸態窒素を測定した。これらの窒素量から土壌由来の窒素量（ブランク；供試資材無添加）を差し引いた値を各供試資材からの無機態窒素量とし、窒素無機化率（%）を算出した[2)]。

３．１．５　新規下水汚泥肥料の菌叢解析方法

新規下水汚泥肥料の肥料化完了の指標として利用する目的で、肥料調製過程における菌叢変遷を調査した。本試験では、新規下水汚泥肥料の原料（下水汚泥、竹おが屑、米糠）、新規下水汚泥肥料の切返し1回目、2回目、3回目および完成時の試料を2反復で採取した。なお、切返し1回目までの肥料原料の発酵は、図1.2のサンドウィッチ方式で静置したもの（以下、サンドウィッチ方式）、サンドウィッチ状に積み重ね、その後、肥料原料全てを混合して静置したもの（以下、混合方式）の2種類を準備し、2回目以降は両方式とも、同様な方法で肥料調製を行った。

全ての試料はFastDNA®SPIN Kit for Soil（MP Biomedicals）を用いてDNA抽出を行った。抽出したDNAは原核生物の16S rRNAを対象としたUniv515F-Univ909Rプライマーセットを用いてPCR反応により増幅した。PCR増幅産物はQIAquick® PCR Purification Kit（Qiagen）により精製した。精製後はDNAシークエンス解析まで-20°Cで冷凍保存した。DNAシークエンス解析はMiSeq Reagent Kit v3（600サイクル、Illumina）とMiSeq（Illumina）により行った。得られた16S rRNA遺伝子配列データの解析にはQuantitative Insight Into Microbial Ecology 2（QIIME 2）を用いた。16S rRNA遺伝子配列の生データのイルミナシークエンシングエラーの除去、クオリティトリミング、アセンブリおよびキメラチェックはDADA2を用いて行った。相同性97%以上の系統群を同一のOperational Taxonomic Unit（OTU）とした。系統分類はSILVA 138に基づいた。原料を除く、新規下水汚泥肥料中で平均して存在割合の多い優占種100種を選定し、R softwareを用いた非計量多次元尺度法（Non-metric Multidimensional Scaling; NMDS）で多様性解析を行った。NMDS解析の際の環境変数には、新規下水汚泥肥料の一般成分および重金属分析データを用いた。また、原料および新規下水汚泥肥料中の*Bacillus*属細菌の存在量を定量するため、16S rRNA遺伝子を対象としたB360f-B513rを用いた定量PCRを2反復で行った。

３．２　異なる脱水汚泥を用いた新規下水汚泥肥料の調製

本試験では、鹿児島県鹿児島市の南部処理場から発生する石灰系脱水汚泥（消石灰及び無機凝集剤、加圧濾過機：以下、石灰系汚泥）と、３．１．１で示した地域バイオマス（竹おが屑、米糠、焼酎粕）を用いて新規下水汚泥肥料の量産化試験を行った。図1.4に石灰系汚泥を示す。石灰系汚泥は、高分子系汚泥と比較して、保水性が悪かった。このため、肥料調製時の初期水分率は高分子系よりも5%低く（堆積物全体の水分率55%）設定した。図1.5に肥料製造時の発酵温度の変化を示す。本試験では、製造開始後30日目、58日および87日目に肥料原料の切返し操作を行い、３．１．1と同様な分析を行い、完成肥料を評価した。

図1.4 石灰系凝集剤使用の脱水汚泥

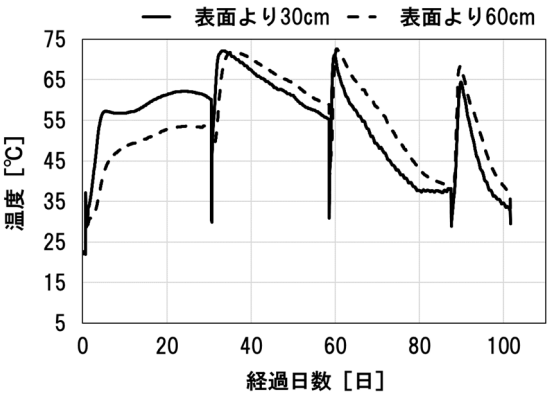


図1.5 石灰系汚泥を用いた新規下水汚泥肥料製造時の発酵温度の変化

３．３　新規下水汚泥肥料の製造日数短縮試験

新規下水汚泥肥料は、条件的嫌気条件もと発酵処理を施すことから、従来の好気的な調製法と比較して製造日数が2～3倍になり、肥料のストックヤード整備費が大きくなること予想される。肥料製造費を削減するためにも、肥料製造日数の短縮が必要である。

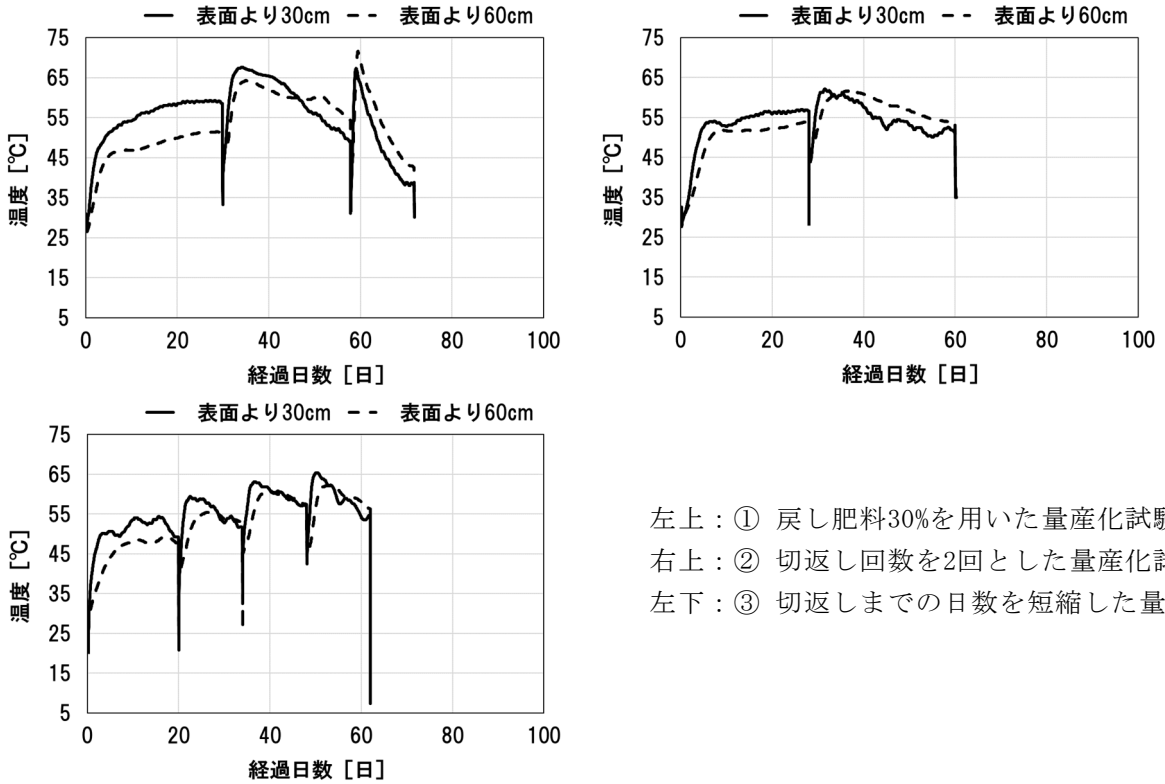
本試験では、以下の3条件で量産化試験を実施し、新規下水汚泥肥料の製造日数の短縮化を図った。

①３．１．２で調製した新規下水汚泥肥料を戻し肥料として全仕込み重量（乾物）の30%に用いた量産化試験（戻し肥料：30%、下水汚泥（脱水汚泥）：28%、竹おが屑：21%、米糠：14%、焼酎粕：7%）。

②３．１．５の菌叢解析結果をもとに切返し回数を2回に削減した量産化試験。

③発酵温度の経日変化に着目して、切返しまでの日数を短縮した量産化試験。

なお、②、③の試験における原料の配合割合は３．１．２と同様とした。図1.6に製造日数短縮試験における肥料製造時の発酵温度の経日変化を示す。原料の切返しは、①では、製造開始後30日目、58日目、②では、製造開始後28日目、30日目、③では、製造開始後20日目、34日目および48日目とした。



左上：① 戻し肥料30%を用いた量産化試験
右上：② 切返し回数を2回とした量産化試験
左下：③ 切返しまでの日数を短縮した量産化試験

図1.6 製造日数短縮試験での新規下水汚泥肥料製造時の発酵温度の変化

３．４　新規下水汚泥肥料の事業化に向けた検討

新規下水汚泥肥料の事業化に向けて、次の項目について検討した。

① 地域バイオマスの賦存量調査

量産化試験で用いた資材の配合割合をもとに、原料の安定的な調達可能性を各原料の賦存量から検討した。賦存量の調査範囲は鹿児島県を対象とした。

② 新規下水汚泥肥料販売価格と肥料削減効果の検討

新規下水汚泥肥料の販売価格を原料費や製造施設、人件費等をもとに試算した。また試算した販売価格から新規下水汚泥肥を茶栽培に適用した場合の1haあたりの肥料費削減効果を検討した。

③ 新規下水汚泥肥料のマテリアルフロー分析（MFA）

新規下水汚泥肥料原料の地域バイオマス（下水汚泥・竹おが屑、米糠、焼酎粕）についてマテリアルフロー分析（MFA）を行い、地域産業への影響（貢献度など）を評価した。霧島市の茶畑面積の半分(297.5ha)を基準として、下水汚泥と地域バイオマスの使用量を算出した。そこから得られる新

規下水汚泥肥量をもとに下水汚泥の利用率と肥料費削減効果、温室効果ガス排出量を試算した。

④ 新規下水汚泥肥料の販路調査と普及に向けた検討

新規下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験の結果と肥料製造規模等をもとに販路を検討した。また、下水道資源利活用促進のためのイベント（BISTRO下水道 in 霧島・鹿児島高専）を2021年12月22日に実施した。本イベントでは、下水道資源の有効利用に関する研究成果の報告と「新規下水汚泥肥料は鹿児島県で普及できるのか?」、「新規下水汚泥肥料で作った作物は安全なのか?」について、パネルディスカッションを開催した。また、イベント終了時に来場者に対して、下水道資源の農業利用に関してアンケート調査を行い、普及に向けた情報を収集した。

４．結果及び考察

４．１　新規下水汚泥肥料の量産化試験

４．１．１　原料分析

表1.7に新規下水汚泥肥料を調製するために用いた肥料原料の成分分析結果を示す。脱水汚泥（高分子系汚泥）は窒素量が5.95%（乾物%）と最も高く、カリウム量が0.19%（乾物%）と極端に低かった。また、他の資材と比較して重金属が非常に多く含まれており、脱水汚泥のみで調製されている下水汚泥肥料は重金属含有量が高くなることが推察された。

表1.7 肥料原料分析結果

資材	pH	C/N比	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr
			（乾物%）					（mg/kg 乾物）					
下水汚泥（脱水汚泥）	5.1	6.8	5.95	3.81	0.19	0.25	0.21	0.33	5.29	3.64	0.31	7.94	6.28
竹おが屑	6.3	98	0.30	0.09	0.49	0.04	0.07	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
米糠	6.7	17	2.58	6.13	2.77	0.06	2.14	0.14	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.
甘藷焼酎粕乾燥固形物	4.1	10	4.15	0.80	1.78	0.69	0.17	0.17	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	2.80

＊N.D.　検出限界値以下

４．１．２　新規下水汚泥肥料の成分特性

高分子凝集剤を含む脱水汚泥を主体に調製された新規下水汚泥肥料の成分特性を表1.8に示す。小型肥料化装置で得られた新規下水汚泥肥料の主要成分の目標値（N：P_2O_5：K_2O=4.0%：3.2%：1.5%）に対して、1回目製造の分析値は、N：P_2O_5：K_2O=3.6%：3.2%：1.2%、2回目は、N：P_2O_5：K_2O=3.9%：3.1%：1.0%、3回目は、N：P_2O_5：K_2O=3.7%：2.6%：1.1%、4回目は、N：P_2O_5：K_2O=3.8%：3.6%：1.3%であった。このように窒素、リン酸は目標値に近い値が得られたが、カリウムについては、やや低い値になった。しかし、茶栽培では低カリウム肥料が求められていることから、茶栽培により適した肥料が調製できたと考えられた。肥料の品質の確保等に関する法律では、汚泥肥料の主要成分（窒素全量、リン酸全量、カリ全量）の誤差の許容基準を±20%と定めている[3)]。本試験で量産化した新規下水汚泥肥料の主要成分は誤差の許

表1.8 新規下水汚泥肥料の肥料成分特性

肥料	pH	C/N比	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr	粗繊維
			（乾物%）					（mg/kg 乾物）						（乾物%）
新規下水汚泥肥料（目標値）（小型肥料化装置調製値）	7.5	11.0	4.0	3.2	1.5	0.4	0.9	0.3	3.8	2.6	N.D.	4.7	8.9	43.9
新規下水汚泥肥料（1回目）	7.2	11.0	3.6	3.2	1.2	0.4	0.8	0.2	1.5	N.D.	0.19	3.8	3.6	-
（2回目）	7.1	11.0	3.9	3.1	1.0	0.3	0.4	0.2	2.1	N.D.	0.11	4.3	4.1	33.6
（3回目）	7.2	11.0	3.7	2.6	1.1	0.3	0.5	0.2	1.0	1.0	0.03	4.1	3.7	31.1
（4回目）	7.3	12.0	3.8	3.6	1.3	0.4	0.7	0.2	2.1	1.7	0.05	3.9	3.7	33.3
下水汚泥肥料(A)*	8.4	6.7	4.4	5.8	0.7	11.7	1.0	0.9	11.0	7.8	0.5	31.8	25.2	9.7
下水汚泥肥料(B)*	7.7	7.6	3.8	5.3	0.2	8.4	0.9	1.4	15	5.0	0.38	13.0	36.0	-
牛糞堆肥**	7.0	16.4	1.9	3.2	4.3	1.4	1.2	N.D.	1.0	0.5	N.D.	3.2	1.9	39.4
配合肥料1***	7.4	1.0	13.2	2.2	2.4	1.7	5.5	0.4	N.D.	N.D.	0.04	77.5	565	2.5
配合肥料2***	6.6	3.1	7.8	3.9	2.5	2.7	5.0	0.9	1.1	N.D.	0.05	32.9	786	4.5

＊市販されている下水汚泥肥料　＊＊牛糞、油粕などを混合して調製された堆肥　＊＊＊配合肥料1，2　茶栽培で利用される一般的な有機配合肥料
N.D.：検出限界値以下　ー：測定無し

容基準以内にあり、量産化の再現性を実証できた。リン酸全量、カリ全量については、許容基準以内にはあるが、大きく変動した。この要因として、一度に製造する肥料量が挙げられる。大家ら[4]は成分変動について、大型の施設で大量に肥料製造するほど肥料成分の変動が小さくなることを報告している。本試験では5m³規模で量産化試験を実施したが、肥料成分の変動については、規模をさらに大きくすることで改善できると考える。

新規下水汚泥肥料の重金属含有量は目標値と同等以下であった。また、汚泥公定規格許容最大量（Cd:5mg/kg、Pb:100mg/kg、As:50mg/kg、T-Hg:2mg/kg、Ni:300mg/kg、Cr:500mg/kg）より極端に低く、既存の下水汚泥肥料の1/3～1/6程度であった。さらに牛糞堆肥や茶栽培に利用されている有機配合肥料のNi、Crを除き、同レベルであった。

以上のことから、量産化した新規下水汚泥肥料は、小型肥料化装置で調製した肥料と同様、重金属含有量も低く、顧客ニーズにあった肥料成分特性を有することがわかった。

４．１．３　新規下水汚泥肥料を用いた植害試験

表1.9に発芽率および栽培終了時の葉長、生体重および生体重指数を示す。新規下水汚泥肥料を用いた試験区（供試肥料区）の発芽率は、播種後7日目で95～100%であり、既存の下水汚泥肥料（対照肥料）を用いた試験区と同等であった。また、本種子の基準発芽率は85%以上であることから、新規下水汚泥肥は、発芽へ影響を及ぼさないことがわかった。

供試肥料区の葉長は、対照肥料区、化学肥料を用いた標準区と比較して同等以上であった。また、生体重についても対照肥料区、標準区と同等以上であった。加えて、供試肥料区の生体重は対照肥料区（標準施肥区S1：8.6g/鉢、4倍施肥区S4：6.5g/鉢）と大きく異なり、肥料添加量が増加するにつれて増加し、4倍施肥区では17.6g/鉢であった。さらに供試肥料区の生体重指数（各供試肥料区、対照区の生体重（g/鉢）を標準区の生体重の平均値（N=2）で除し、100を掛けた指数）は標準施肥区では115、4倍量施肥区では236と100以上であった。生体重指数は80未満の場合、肥料中に何らかの生育阻害物質が含まれている可能性が高いと考えられる[1]が、新規下水汚泥肥料の生体重指数は肥料添加量に関係なく100以上であった。一方、既存の下水汚泥肥料の生体重指数は、肥料添加量の増加に伴い、標準施肥区で115、4倍量施肥区で87と小さくなった（図1.7）。これらの結果から、新規下水汚泥肥料は植物の成長を促進させる特性を有することが示唆された。

表1.9 植害試験結果

試験区		ポット	発芽調査成績			生育調査成績			
			発芽率(%)			葉長(cm)	葉長(cm)	生体重(g/鉢)	生体重指数
		No.	5日目	6日目	7日目	14日目	21日目	21日目	21日目
供試肥料	T_1	1	100	100	100	4.7	5.5	9.7	130
		2	100	100	100	4.2	5.0	7.5	101
		平均	100	100	100	4.5	5.3	8.6	115
	T_2	1	100	100	100	4.2	6.0	8.9	119
		2	90	90	90	5.3	7.9	13.9	187
		平均	95	95	95	4.8	7.0	11.4	153
	T_3	1	95	100	100	4.7	7.7	18.7	251
		2	95	95	95	4.6	7.6	14.4	193
		平均	95	98	98	4.7	7.7	16.6	222
	T_4	1	95	95	95	4.8	8.8	19.1	256
		2	95	95	95	4.5	7.3	16.1	216
		平均	95	95	95	4.7	8.1	17.6	236
対照肥料	S_1	1	90	95	95	4.5	5.4	9.1	122
		2	95	100	100	4.5	5.4	8.1	109
		平均	93	98	98	4.5	5.4	8.6	115
	S_2	1	95	95	95	4.2	4.8	7.8	105
		2	95	100	100	4.0	4.9	7.2	97
		平均	95	98	98	4.1	4.9	7.5	101
	S_3	1	90	95	95	4.0	5.7	8.0	107
		2	85	95	95	4.0	5.2	8.0	107
		平均	88	95	95	4.0	5.5	8.0	107
	S_4	1	90	90	90	3.5	4.6	5.6	75
		2	95	95	100	3.5	5.2	7.4	99
		平均	93	93	98	3.5	4.9	6.5	87
標準区	B	1	100	100	100	3.9	5.2	7.7	103
		2	100	100	100	4.6	5.1	7.2	97
		平均	100	100	100	4.3	5.2	7.5	100

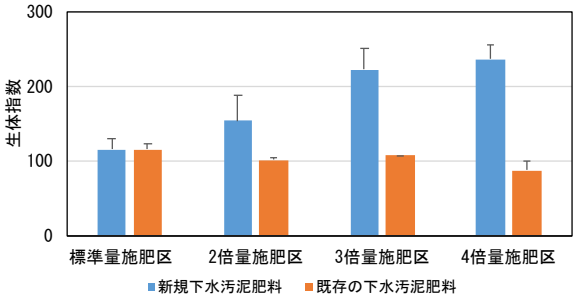


図1.7　新規下水汚泥肥料および既存の下水汚泥肥料の生体指数

４．１．４　新規下水汚泥肥料を用いた窒素無機化試験

図1.8に菜種油粕、牛糞堆肥および新規下水汚泥肥料の窒素無機化率の経日変化を示す。有機質肥料の窒素無機化特性を把握する手法として反応速度論的解析法があり、杉原ら[5]は有機性汚泥を用い

て、一定の温度で窒素無機化試験を行い、その結果から得られる窒素無機化曲線を速度論的に解析し、温度から窒素無機化量を推定することを明らかにしている。また、有機態窒素から無機態窒素が生成される最も単純な不可逆一次反応モデル（単純型モデル）を提案している[5)]。単純型モデルを式（1）に示す。

$$N = N_0 \ [1 - exp(-kt)] \qquad (1)$$

Nは窒素無機化率(%)、N_0は可分解性窒素量(%)、kは無機化速度定数(d^{-1})、tは温度変換日数(d)を示す。培養日数、培養温度、窒素無機化量から測定値と推定値の残差平方和が最小になるようなN_0、k、tの値を求めた[5)]。本モデルに菜種油粕と牛糞堆肥の窒素無機化試験の結果を当てはめると、図1.8に示すような窒素無機化モデルを得ることができた。菜種油粕は無機態窒素をほとんど含まず、全窒素の54%が無機化される。また、牛糞堆肥には無機態窒素が10.2%（うち88%が硝酸態窒素）含まれるが、易分解性窒素（無機化する窒素）は7.4%程度である。新規下水汚泥肥料は、既存の無機化モデル式に当てはめにくい結果となった[5)]。この要因として、新規下水汚泥肥料は一部の窒素が微生物の取り込みにより有機化されていることや、新規下水汚泥肥料に含まれる無機態窒素量が窒素全量に対して多いことなどから、窒素の無機化が複雑な状況となっているためと推察された。

新規下水汚泥肥料には、速効的な肥料効果が期待できる無機態窒素が47.4%（うちアンモニア態窒素が97%）、遅効的な窒素が12.2%含まれ、全窒素の59.6%が植物体に利用可能と推定された。また新規下水汚泥肥料に含まれる無機態窒素は、硝酸態窒素が低く、ほとんどが陽イオンであるアンモニア態窒素であるため、土壌に吸着されることにより硝酸態窒素より溶脱されにくく[6)]、好アンモニア性植物である茶樹に適していると考えられた[7)]。

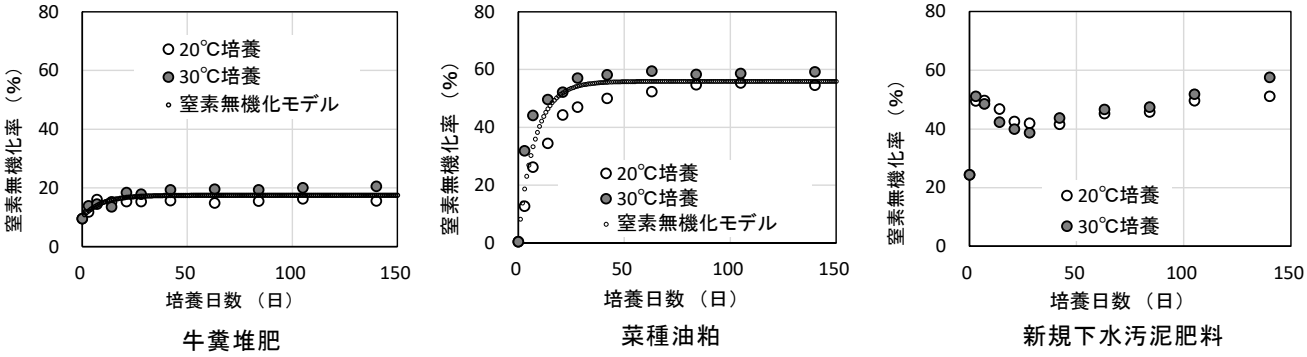


図1.8 各資材の茶園土壌での窒素無機化率の経日変化

４．１．５　新規下水汚泥肥料の菌叢解析

新規下水汚泥肥料の原料、製造過程および製造方法における菌叢の変遷と肥料成分の関係から肥料製造日数の短縮の可能性を検討した。表1.10に新規下水汚泥肥料の優占30種の存在割合を示す。OTUレベルで優占種の存在割合を比較すると、新規下水汚泥肥料では肥料原料（下水汚泥、竹おが屑、米糠）中にほとんど検出されなかった系統群が優占していることが明らかとなった。新規下水汚泥肥料に存在する最も優占する系統群は*Bacillales*目細菌であり、小型肥料化装置で調製した新規下水汚泥肥料と同様な結果が得られた。*Bacillales*目に属する一部の細菌種には抗菌・制菌作用が認められており、微生物農薬として利用されている[8)]。その他にも植物成長促進細菌に属する微生物も数多く報告されており、植物生産における有用微生物群として知られている[9)]。このことから、本試験で得られた新規下水汚泥肥料には、優占化した*Bacillales*目細菌によって植物生産性を向上させる可能性が考えられた。発酵方式（原料調製時の堆積方法）で菌叢比較を行った結果、*Bacillales*目細菌全体の存在割合は、混合方式で平均32.7%、サンドウィッチ方式で平均43.2%を示し、サンドウィッチ方式が良質な新規下水汚泥肥料を作製できることがわかった。

図1.9に新規下水汚泥肥料の優占100種のNMDS解析結果を示す。混合方式とサンドウィッチ方式共に切返し1回目から完成まで菌叢が大きく変遷していることがわかった。また、各方式における切返し時の試

料の成分分析結果と菌叢の相関関係を評価した結果、TN、NH_4-Nなどの8個のパラメータが菌叢と有意に相関（$p<0.05$）を示し、これらパラメータが菌叢の変遷に影響を及ぼしていることを確認した。つぎにそれぞれの発酵方式で菌叢の優占種を比較すると、混合方式は切返し3回目まで菌叢が変遷しているが、サンドウィッチ方式は2回目と3回目で菌叢が類似していた。加えて、切返し2回目と3回目の試料の成分分析結果に大きな違いが無いことから、サンドウィッチ方式の場合は切返し回数を1回削減できることが示唆され、新規下水汚泥肥料の発酵日数を約30日（切返し1回にかかる日数）削減できることがわかった。

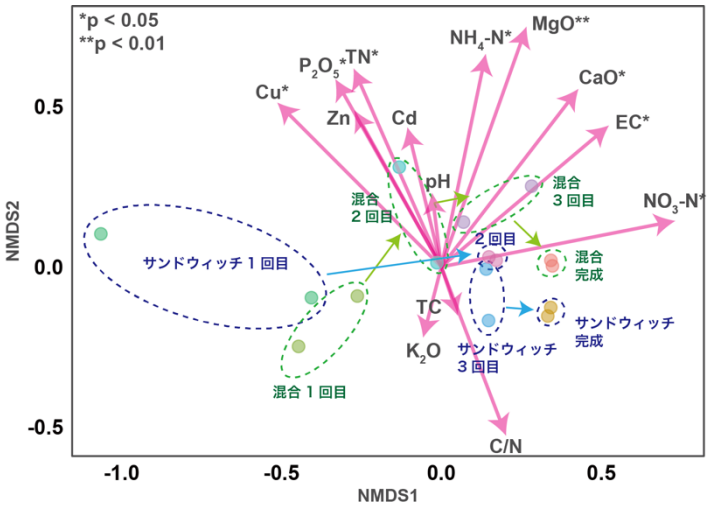


図1.9　新規下水汚泥肥料の優占100種のNMDS解析結果

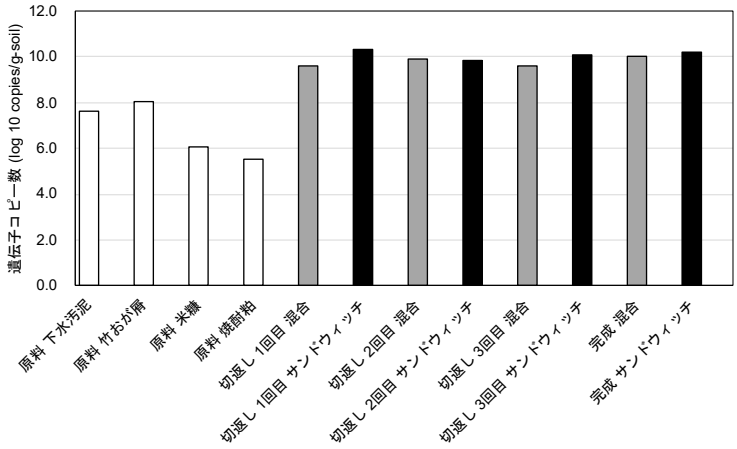


図1.10　新規下水汚泥肥料中の*Bacillus*属の定量PCR解析結果

図1.10に*Bacillus*属細菌の定量PCR結果を示す。原料中の*Bacillus*属細菌のコピー数は5.54-8.04 Log_{10} copies/g-soilを示したのに対し、切返し毎及び完成時の新規下水汚泥肥料中のコピー数は9.62-10.35 Log_{10} copies/g-soilを示し、新規下水汚泥肥料の発酵過程において、*Bacillus*属細菌を増殖させることができたと考えられる。発酵方式の違いで比較すると、混合方式で9.61-10.05 Log_{10} copies/g-soil（平均9.83）、サンドウィッチ方式で9.86-10.35 Log_{10} copies/g-soil（平均10.16）を示した。これら平均値の比較をWelchのt検定により行った結果、$p<0.1$を示し、サンドウィッチ方式を用いた場合において*Bacillus*属細菌をより優占化できることが示唆された。

４．２　異なる脱水汚泥を用いた新規下水汚泥肥料の調製

表1.10に霧島市、鹿児島市の下水処理施設から発生した下水汚泥（脱水汚泥）の成分分析結果を示す。霧島市の下水汚泥（高分子系汚泥）の肥料主要成分は、N：P_2O_5：K_2O=5.95%：3.81%：0.19%であった。一方、鹿児島市の下水汚泥（石灰系汚泥）の肥料主要成分は、N：P_2O_5：K_2O=4.18%：3.74%：0.07%であった。石灰系汚泥は高分子系汚泥に比べて全窒素量とカリ全量が低かった。また、石灰系汚泥は、pH、カルシウム全量、ニッケル、クロムが高分子系汚泥よりも高く、凝集剤の種類によって汚泥中の成分特性が異なることがわかった。

表1.10　下水汚泥の成分分析結果

資材	pH	C/N比	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr
			(乾物%)					(mg/kg 乾物)					
霧島市下水汚泥（高分子凝集剤）	5.1	6.8	5.95	3.81	0.19	0.25	0.21	0.33	5.29	3.64	0.31	7.94	6.28
鹿児島市下水汚泥（石灰系凝集剤）	11.4	8.0	4.18	3.74	0.07	14.4	0.82	0.34	N.D.	N.D.	0.05	16.7	10.6

表1.11 下水汚泥の成分分析結果

肥料	pH	C/N比	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr	粗繊維
			(乾物%)					(mg/kg 乾物)						(乾物%)
新規下水汚泥肥料（目標値）（小型肥料化装置調製値）	7.5	11.0	4.0	3.2	1.5	0.4	0.9	0.3	3.8	2.6	N.D.	4.7	8.9	43.9
新規下水汚泥肥料														
鹿児島市石灰系汚泥	7.7	12.0	2.7	3.0	0.9	8.2	0.9	0.3	N.D.	1.3	0.04	16.0	18.0	20.9
霧島市高分子汚泥（1回目）	7.2	11.0	3.6	3.2	1.2	0.4	0.8	0.2	1.5	N.D.	0.19	3.8	3.6	-
（2回目）	7.1	11.0	3.9	3.1	1.0	0.3	0.4	0.2	2.1	N.D.	0.11	4.3	4.1	33.6
（3回目）	7.2	11.0	3.7	2.6	1.1	0.3	0.5	0.2	1	1.0	0.03	4.1	3.7	31.1
（4回目）	7.3	12.0	3.8	3.6	1.3	0.4	0.7	0.2	2.1	1.7	0.05	3.9	3.7	33.3

N.D.：検出限界値以下　ー：測定無し

表1.11に新規下水汚泥肥料の成分分析結果を示す。高分子系汚泥を含む新規下水汚泥肥料（以下、高分子系汚泥肥料）の主要成分は、石灰系汚泥を含む汚泥肥料（以下、石灰系汚泥肥料）と比較して全窒素量が1%以上低かった。また、石灰系汚泥肥料はカルシウム、ニッケル、クロムを多く含むことがわかった。このように、下水汚泥の脱水方法の違いが、新規下水汚泥肥料の肥料成分に大きく影響を及ぼすことがわかった。

茶は酸性土壌を好む作物であり、pH4.0～5.0では地上部、地下部とも良く生育する。一方で、pHが4.0を下回ると生育は低下し、またpH6.0以上においても生育は劣るとされている[10]。近年、茶園ではこれまでの化学肥料の多用によって酸性物質が蓄積し、pH4.0以下の土壌が多くなっている。土壌pHが低下し、pH3.0以下になると、落葉などの生育異常が起こり始めるため、茶園土壌を適正値（pH4.0～5.0）に調整する必要がある[11]。石灰系汚泥肥料は適切に施用すれば、茶園の酸性土壌改良材として利用できる可能性がある。しかし、本研究（サブテーマ2）で使用している茶園土壌のpHは3.5程度であり、石灰系汚泥肥料を高分子系汚泥肥料と同量施用した場合、土壌pHの急激な上昇による茶樹、茶葉への影響が懸念されること（協力農家からの指摘）、栽培試験区の増加により、作業量が膨大（キックオフ会合においてアドバイザーからの指摘）となることから、本試験では茶栽培試験への適用を見送った。

４．３　新規下水汚泥肥料の製造日数短縮試験

表1.12に製造日数短縮試験で得られた新規下水汚泥肥料の成分分析結果を示す。本試験では、①戻し肥料を利用した方法、②菌叢解析結果を利用し、切返し回数を2回に削減した方法、③発酵温度の経日変化から切返しまでの日数を短縮した方法で量産化試験を実施した。その結果、製造日数は、①で71日、②で60日、③で62日であった。これらの各新規下水汚泥肥料の肥料主要成分の値（① N：P_2O_5：K_2O=3.4%：3.8%：1.4%、② N：P_2O_5：K_2O=3.5%：2.9%：1.1%、③ N：P_2O_5：K_2O=3.4%：4.0%：1.2%）は霧島市の高分子系汚泥を用いて調製した新規下水汚泥肥料と同等であり、肥料の品質の確保等に関する法律で定められている汚泥肥料の主要成分（窒素全量、リン酸全量、カリ全量）の誤差の許容基準を±20%を満たした。また、重金属含有量は汚泥公定規格許容最大量（Cd:5mg/kg、Pb:100mg/kg、As:50mg/kg、T-Hg:2mg/kg、

表1.12 製造日数を短縮した新規下水汚泥肥料の成分分析結果

肥料	pH	C/N比	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr	粗繊維
			(乾物%)					(mg/kg 乾物)						(乾物%)
新規下水汚泥肥料（目標値）（小型肥料化装置調製値）	7.5	11.0	4.0	3.2	1.5	0.4	0.9	0.3	3.8	2.6	N.D.	4.7	8.9	43.9
新規下水汚泥肥料														
霧島市高分子汚泥（1回目）	7.2	11.0	3.6	3.2	1.2	0.4	0.8	0.2	1.5	N.D.	0.19	3.8	3.6	-
（2回目）	7.1	11.0	3.9	3.1	1.0	0.3	0.4	0.2	2.1	N.D.	0.11	4.3	4.1	33.6
（3回目）	7.2	11.0	3.7	2.6	1.1	0.3	0.5	0.2	1	1.0	0.03	4.1	3.7	31.1
（4回目）	7.3	12.0	3.8	3.6	1.3	0.4	0.7	0.2	2.1	1.7	0.05	3.9	3.7	33.3
新規下水汚泥肥料（製造日数短縮）														
①戻し肥料30%使用	7.4	11.0	3.4	3.8	1.4	0.6	0.7	0.3	3.2	2.0	0.06	8.2	10	28.9
②切返し2回目で完成	7.6	13.0	3.5	2.9	1.1	0.4	0.5	0.2	1.7	1.1	0.03	5.1	3.7	36.4
③切返しまでの日数短縮	7.1	12.0	3.4	4.0	1.2	0.5	0.8	0.3	2.7	1.8	0.07	4.5	4.3	32.7

N.D.：検出限界値以下　ー：測定無し

Ni:300mg/kg、Cr:500mg/kg）より低く、目標値と同等であった。さらに、これらの肥料の植害試験を実施した結果、いずれにおいても植物に対する害は認められず安全性を確認することができた。これらのことから、戻し肥料の使用や切返し回数削減、切返しまでの日数を短縮することで新規下水汚泥肥料の製造日数を短縮することができ、目標である製造日数約60日を達成することできた。

４．４　新規下水汚泥肥料の事業化に向けた検討

４．４．１　地域バイオマスの賦存量調査

表1.13に原料の安定的な調達可能性について、各原料の賦存量（鹿児島県）を試算した結果と有機質資材（菜種油粕）50%および全量を新規下水汚泥肥料に代替した場合の1haあたりの各種バイオマスの使用量を示す。各種バイオマスの賦存量は、茶園1haあたり、年間240kgN施肥した場合、県内の茶栽培面積（8,300ha）の約7割、120kgN施肥の場合、全面積を網羅できることがわかった。竹おが屑、焼酎粕については、必要量に対して十分な賦存量であり、事業化後も安定して原料調達できると考えられる。

表1.13　各種バイオマスの賦存量と茶栽培に必要な各種バイオマス量

（トン乾物）

資材		下水汚泥（脱水汚泥）	竹おが屑	米糠	焼酎粕
賦存量		14,210	52,000	7,396	14,190
1haでの必要量*	120KgN/年	1.28 (0.009%)	0.96 (0.002%)	0.64 (0.009%)	0.32 (0.002%)
	240kgN/年	2.56 (0.018%)	1.92 (0.004%)	1.28 (0.017%)	0.64 (0.004%)

*各資材（脱水汚泥：40 %、竹おが屑：30 %、米糠：20%、焼酎粕：10 %何も乾物重量%）を三層に分け堆積し、5トン（W.C.60%）規模で調製。最終生産物（新規下水汚泥肥料）の水分率を20%とし、その生産量を2,500kgとした場合の1haあたりの各資材の必要量。（調製過程での微生物分解による資材の減少量を考慮しない場合）
（　　）内は賦存量に対する割合（%）。

４．４．２　新規下水汚泥肥料販売価格と肥料削減効果の検討

表1.14に新規下水汚泥肥料（W.C.20%）を1トン製造するために必要な材料費を示す。各資材の単価から算出すると、12,399円/トン（12.4円/kg）となった。また、肥料販売目標額の20円/kgを達成するために、新規下水汚泥肥料の製造規模（原料貯留場所、肥料発酵場所、完成肥料保管場所など）や人件費、肥料製造量と出荷量に関して試算を行った。図1.11に完成肥料のストック量と出荷肥料のバランス試算例を示す。新規下水汚泥肥料の年間製造量を1,000トンとし、鹿児島県霧島市の茶園148.8ha（霧島市の茶栽培面積の約25%）に240kgN/年施肥可能な製造設備を建設し、事業化コストを試算すると、新規下水汚泥肥料の販売価格を20円/kgとすることが可能であった。

表1.14　新規下水汚泥肥料を1トン製造するために必要な各資材の材料費

資材	下水汚泥（脱水汚泥）	竹おが屑	米糠	焼酎粕（粉末）	水道水	計
単価（円/トン）	0	15,500	30,000	20,000	97.9	-
新規下水汚泥肥料(円/トン)	0	5,314	5,393	1,684	8.52	12,399

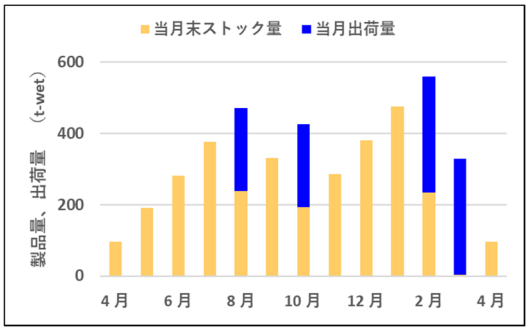


図1.11 完成肥料のストック量と出荷肥料のバランス計算例

表1.15に今回施用した肥料の1haあたりの肥料費を示す。新規下水汚泥肥料は目標額の20円/kgで年間の肥料費を算出した。その結果、菜種油粕の50%および100%を新規下水汚泥肥料に置換すると、それぞれ18.3%、36.6%の肥料費の削減に繋がると推察された。また、新規下水汚泥肥料100%区では配合肥料区よりも1haあたりの肥料費が安価になることが示唆された。

表1.15　1haあたりの肥料費

試験区	秋肥(1)	秋肥(2)	春肥(1)	春肥(2)	芽出し	夏肥(1)	夏肥(2)	1hあたりの肥料費
	(千円)							
1 慣行施肥区	74 a	74 a	103 a	103 a	17 e	85 c	85 d	541
2 新規下水汚泥肥料（50%）区	53 ab	53 ab	74 ab	74 ab	17 e	85 c	85 d	442
3 新規下水汚泥肥料（100%）区	32 b	32 b	45 b	45 b	17 e	85 c	85 d	343
4 配合肥料区	61 c	61 c	60 d	60 d	17 e	85 c	85 d	429

注1）a：菜種油粕 78円/kg、b：新規下水汚泥肥料 20円/kg、c：有機配合肥料A 85.1円/kg、 d：有機配合肥料B 93.9円/kg、e：硫安 45.9円/kg
注2）新規下水汚泥肥料は目標額

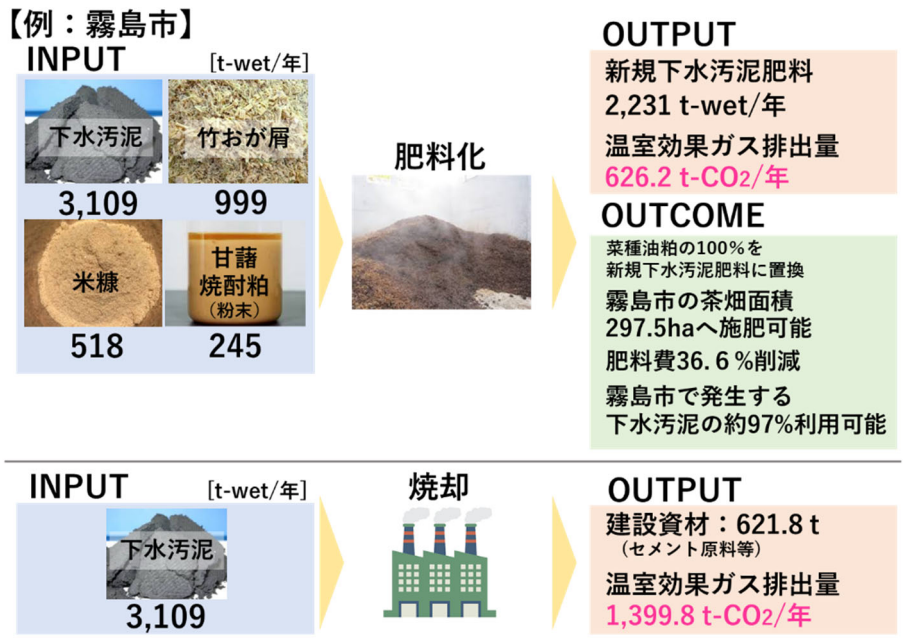


図1.12 新規下水汚泥肥料のマテリアルフロー分析結果

４．４．３ 新規下水汚泥肥料のマテリアルフロー分析（MFA）

図1.12に新規下水汚泥肥料を菜種油粕の代替として霧島市の茶園295.7ha（霧島市の茶栽培面積の50%）に240kgN/ha/年施肥した場合のマテリアルフロー分析結果を示す。鹿児島県霧島市から発生する脱水汚泥量は3,200トン/年（乾物で784トン/年）であり、このうち、現物で3,109トン（乾物で761.6トン）利用可能となり、霧島市から発生する脱水汚泥の約97%を地域で循環可能と考えられた。また、温室効果ガス排出量を下水道における地球温暖化対策マニュアル（環境省・国土交通省）[12] をもとに算出すると、肥料化では、626.2t-CO_2/年となり、焼却（1,399.8t-CO_2/年）と比べ、温室効果ガス排出量を約半分削減できることがわかった。

４．４．４ 新規下水汚泥肥料の販路調査と普及に向けた検討

新規下水汚泥肥料の販路調査と普及に向けた検討として、BISTRO下水道 in 霧島・鹿児島高専を実施した。本イベントには、農業従事者、環境産業、消費者、自治体関係者および研究者など130名が参加した。イベント終了時に来場者に対して、下水道資源の農業利用に関してアンケート調査を実施した。アンケート調査で得られたコメントの一部を以下に示す。

①ホームセンター等の様々な場所で購入できるようにして欲しい。
②肥料のペレット化や有機JAS認定が取れるなど付加価値があると利用しやすい。
③新規下水汚泥肥料の普及には、産官学の活動を通じて有用性・安全性をPRすることが必要である。報告会だけでなく、実際に汚泥肥料を使用する農業イベントなどを実施することも必要と思われる。
④下水汚泥肥料のブランディングが重要と考える。「下水」や「汚泥」という言葉を使用しなくても良いのではないか。
⑤茶栽培だけでなく、その他の作物にも利用できることを情報発信する必要があるなど。

本調査では、ネガティブなイメージの意見は見られなかったが、新規下水汚泥肥料の普及に向けては引続き、研究情報等を随時発信していくことや、ペレット化や有機JAS認定などの付加価値が必要なことがわかった。本調査結果の一部は、政策決定者向けサマリーへ反映させた。

鹿児島県の現行のガイドライン（1994年（平成6年）制定）では、「下水汚泥堆肥（肥料）は多量の重金属を含んでいることや消石灰混入による高pHであること等から茶園には原則、施用しない。」ことと

なっている。

このような状況の中、新規下水汚泥肥料の今後の茶園への適用・実装化を見据えて、肥料の量産化による再現性、保証（肥料）成分・重金属成分の分析結果、汚泥原料の溶出試験および植害試験結果を、（独）農林水産消費安全技術センター（FAMIC）へ提出し、肥料登録申請（2021年5月31日）を行い、2021年7月12日に肥料登録（肥料登録番号：生第106792号）が完了した。また、2022年11月に開催された県の土壌肥料試験成績検討会において、本研究成果が鹿児島県農業開発総合センターの分担者から報告され、協議・審査の結果、「普及情報」に採用された。「普及情報」は農業者、実需者等に直接的または間接的に利用可能な新技術であり、技術員が現場で指導する上で活用する情報であり、県のウェブサイト上で公開されている。

https://www.pref.kagoshima.jp/ag11/pop-tech/nenndo/documents/documents/104090_20230410115510-1.pdf

下水汚泥肥料の農業利用については、バイオマス活用推進基本計画が2022年9月に閣議決定されたことも追い風となり、今後、加速すると考えられる。

５．研究目標の達成状況

サブテーマ１目標

研究協力機関（三州衛生公社）の肥料化施設の一部を借用し、まず5m^{3}規模で新規下水汚泥肥料の量産化試験を実施する。本試験では小型肥料化装置で得られた新規下水汚泥肥料の成分特性（N：P_2O_5：K_2O=4.0%：3.2%：1.5%、重金属量：配合肥料、牛糞堆肥などと同等）（表参照）を目標値とする。

表1.1 新規下水汚泥肥料の目標値

資材	pH	C/N比	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr
			(乾物%)					(mg/kg 乾物)					
新規下水汚泥肥料	7.5	11.0	4.0	3.2	1.5	0.4	0.9	0.3	3.8	2.6	N.D.	4.7	8.9
下水汚泥肥料(A)*	8.4	6.7	4.4	5.8	0.7	11.7	1.0	0.9	11.0	7.8	0.5	31.8	25.2
下水汚泥肥料(B)*	7.7	7.6	3.8	5.3	0.2	8.4	0.9	1.4	15	5.0	0.38	13.0	36.0
牛糞堆肥**	7.0	16.4	1.9	3.2	4.3	1.4	1.2	N.D.	1.0	0.5	N.D.	3.2	1.9
配合肥料1***	7.4	1.0	13.2	2.2	2.4	1.7	5.5	0.4	N.D.	N.D.	0.04	77.5	565
配合肥料2***	6.6	3.1	7.8	3.9	2.5	2.7	5.0	0.9	1.1	N.D.	0.05	32.9	786

＊市販されている下水汚泥肥料　＊＊牛糞、油粕などを混合して調製された堆肥　＊＊＊有機配合肥料1，2　茶栽培で利用される一般的な有機配合肥料
N.D.：検出限界値以下

新規下水汚泥肥料は、条件的嫌気条件のもと調製するため、従来の好気条件での製造法と比較して製造日数が2～3倍（好気：45日程度→条件的嫌気：90～120日程度）になることが想定される。このため、戻し肥料を利用することにより、肥料的効果を維持した状態で肥料製造期間を大幅に短縮することが可能か検討する。目標としては、60日を目指す。また、肥料的効果については、これまで窒素無機化試験において黒ボク土を利用して実施してきたが、茶園土壌は酸性土壌であることから、その特性を考慮し、酸性土壌を用いた無機化試験も併せて実施し、菜種油粕や下水汚泥肥料市販品と同程度以上の肥料的効果（窒素無機化率）が得られることを実証する。さらに、脱水方法が異なる脱水汚泥を用いて新規下水汚泥肥料の量産化試験を実施し、同様な製品特性（低重金属量、高窒素無機化率（肥効率））を有する汚泥肥料を調製する。調製した新規下水汚泥肥料の原料及び製造コストの試算を行い、茶栽培に新規下水汚泥肥料を利用した場合、1haあたりの肥料コストを現在の60万円から20%削減することを目標に

目標の達成状況

目標を上回る成果をあげた。

（具体的な理由・根拠）

・新規下水汚泥肥料の量産化試験において、その主要成分は、成分目標値（N：P_2O_5：K_2O=4.0%：3.2%：1.5%）と比較して、窒素全量、リン酸全量は目標値に近い値（N：P_2O_5：K_2O=3.6～3.9%：3.1～3.2%：1.0～1.2%）が得られた。カリ全量はやや低かったが、茶栽培用肥料としては、プラスに働く結果であった。

・量産化試験で得られた肥料の主要成分は、肥料の品質の確保等に関する法律における誤差の許容基準（±20%）以内であり、量産化による再現性が確認された。

・新規下水汚泥肥料を発酵温度の経日変化と菌叢解析の結果を反映させることで、目標の60日で製造できた。

・窒素無機化試験を実施し、新規下水汚泥肥料は、茶樹が好む速効性のアンモニア態窒素を47.4%、無機化が期待できる遅効性の窒素を12.2%含み、有機質資材の菜種油粕（無機化率：54%）よりも、茶樹に吸収され易い無機化パターンであり、同等以上の肥料的効果が期待できることがわかった。

・新規下水汚泥肥料の植害試験（コマツナ）を実施した結果、生体重指数は、肥料添加量の増加に伴い4倍量施肥区で236と既存の下水汚泥肥料（生体重指数：87）より格段に高かった（濃度障害無し）。新規下水汚泥肥料には作物に対する成長促進効果が示唆された。

・当初の予定（目標設定時）にはなかったが、肥料の量産化による再現性、保証（肥料）成分・重金属成分の分析結果、汚泥原料の溶出試験及び植害試験結果から、実装化を見据え、肥料登録を完了させることができた。

事業採算性を目指す。	・新規下水汚泥肥料を年間1,000トン規模（脱水汚泥を現物で1,708トン使用（脱水汚泥;5.6トン/日×305日））で製造する施設を建設し、事業化費用を試算すると20円/kgで販売できることがわかった。 ・新規下水汚泥肥料を1haあたり24kgN/年（新規下水汚泥肥料;20円/kg）菜種油粕の代替として利用すると、肥料費を当初の目標である20%を大幅に上回る36.6%削減できることがわかった。 ・本研究成果を鹿児島県の「普及に移す研究成果」に提案し、2021年度(令和3年度)に「研究情報」、2022年度（令和4年度）に「普及情報」としてとりまとめ、鹿児島県のウェブサイト上で公表した。

６．引用文献

1) 独立行政法人農林水産省消費安全技術センター：植物に対する害に関する栽培試験の方法・解説(2017)、2017.
http://www.famic.go.jp/ffis/fert/obj/sub9_8_2017.pdf

2) 内村浩二、三浦伸之：黒ボク茶園における有機物資材の窒素無機化特性、茶業研究報告、2004巻、98号、pp.11-19、2004.

3) 農林水産省告示：肥料の品質の確保等に関する法律に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件、
http://www.famic.go.jp/ffis/fert/kokuji/60k0284.pdf

4) 大家理哉、鷲尾建紀、石橋英二：牛ふんを主原料とする堆肥中リン酸並びにカリウム含量の変動特性：岡山県農林水産総合センター農業研究所研究報告：9号、pp.33-39、岡山県農林水産総合センター農業研究所、2018.

5) 杉原進、金野隆光、石井和夫：土壌中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法.農環研報、No.1、pp.127-166、1986.

6) 西尾隆、荒尾知人：土壌中の施肥アンモニア態窒素有機化量の推移に関する土壌間差異、日本土壌肥料科学雑誌、73巻、5号、pp.493-499、2002.

7) 石垣幸三：茶樹に対するアンモニア態窒素と硝酸態窒素の比較（第1報）、茶業研究報告、1971巻35号、pp.57-64、1971.

8) 川口章：バクテリア製剤の現状と今後の展望、Agricultural biotechnology 2 (2)、pp.115-119、2018.

9) 横田健治：拮抗性 *Bacillus*属細菌を利用した植物病害の生物防除　機能性物質とその防除メカニズムを中心に、土と微生物（Soil Microorganisms）、66(1)、pp.27-31、2012.

10) 農林水産省：茶生産における施肥の現状と課題、2009.
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/nenyu_koutou/n_kento/pdf/3siryo4.pdf

11) 岩橋光育：土壌のｐH及び塩基飽和度が茶木の生育、品質に及ぼす影響、静岡県茶業試験場研究報告、15号、pp.21-28、1990.

12) 環境省・国土交通省：下水道における地球温暖化対策マニュアル～下水道部門における温室効果ガス排出抑制等指針の解説～、2016.

Ⅱ－２　新規下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験

鹿児島工業高等専門学校
　都市環境デザイン工学科　教授　　山内　正仁
　都市環境デザイン工学科　助教　　片平　智仁

鹿児島県農業開発総合センター
　生産環境部　土壌環境室　研究専門員　　中村　憲知（2020年4月1日～2022年3月31日）
　生産環境部　土壌環境室　室長　　田中　正一（2022年4月1日～2023年3月31日）
　　※人事異動に伴う研究分担者の交代
　生産環境部　土壌環境室　研究専門員　　中川路　光庸

〈研究協力者〉
有限会社ヘンタ製茶　邉田　孝一
株式会社日水コン　　種市　尚仁、佐々木　俊郎、占部　章次郎、大嶋　義章

［要旨］

サブテーマ2では、サブテーマ1で量産化した新規下水汚泥肥料の地域循環を目指して、地域の一大産業である「茶」に適用した。茶栽培では、まず、最適施肥割合と最適施肥時期について検討した。新規下水汚泥肥料の最適な施肥割合の検討では、新規下水汚泥肥料を施肥した試験区（50%区、100%区）において、菜種油粕を用いた慣行施肥区と同等の生葉収量が得られ、また、茶葉品質（主要成分、金属・重金属成分）も有意差はなく、菜種油粕の代替肥料として100%利用（最大年間施肥窒素量50kgNのうち24kgN/10a施肥）できることが明らかになった。新規下水汚泥肥料の最適な施肥時期の検討では、試験区間（秋肥区、秋春肥区、春肥区及び対照区（有機配合肥料区））で生葉収量、茶葉品質とも有意差は認められなかったが、秋肥区では、一番茶の生葉収量が増加傾向にあった。品質においても、遊離アミノ酸量が高くなる傾向にあった。さらに、茶葉中の金属・重金属含有量は慣行施肥区と同等、かつCodex基準値以下であり、安全性も確認できた。つぎに、新規下水汚泥肥料施肥による地下水への窒素溶脱量を評価するために、畝間に設置したポーラスカップから浸透水を採水し、硝酸態窒素濃度を測定した。新規下水汚泥肥料を施肥した試験区では、対照区（有機配合肥料区）と比較して、硝酸態窒素濃度が低く、特に新規下水汚泥肥料を秋春に施肥した試験区（秋春肥区）では、15～30mg/Lであり、対照区（35～100mg/L）より極端に低かった。このことから、新規下水汚泥肥料は環境に優しい肥料であることがわかった。また、新規下水汚泥肥料を茶樹幼木・成木に施肥することによる窒素・重金属のマテリアルフロー（葉、幹、根および土壌）を調査した。その結果、窒素については秋肥施用で利用率が高まり、地下浸透水の硝酸態窒素濃度も慣行栽培より低く推移した。また重金属については茶樹、土壌に対する重金属蓄積の影響は小さいことがわかった。さらに、新規下水汚泥肥料を茶栽培へ適用した場合の肥料費削減効果を検討した。菜種油粕の50%および100%を新規下水汚泥肥料に置換すると、肥料費をそれぞれ18.3%、36.6%削減できることがわかった。以上の結果から、下水汚泥と地域バイオマスから調製した新規下水汚泥肥料を地域の一大産業である「茶」に適用することで、事業採算性の高い循環システムを構築できた。

１．研究開発目的

本研究は下水汚泥の農業利用に関する課題を、地域バイオマスの利用を通して顧客ニーズに合致した新たな下水汚泥肥料に調製し、地域の一次・二次産業と連携して事業採算性の高い循環システムを構築することを最終目的とする。具体的には、サブテーマ2では、サブテーマ1で量産化した新規下水汚泥肥料を茶栽培に適用し、既存の有機質資材の代替として利用できることを実証する。さらに新規下水汚泥肥料の茶栽培への新規市場開拓可能性を評価し、事業採算性を明らかにする。

２．研究目標

目標	茶栽培における鹿児島県施肥基準は、窒素を主体に年間窒素施肥量50kg/10aで、一般的に肥料を秋肥、春肥、夏肥に分けて施肥する。新規下水汚泥肥料の特性に応じた施肥法を確立し、慣行栽培の茶葉収量1,517kg/10a（一番茶：582kg、二番茶：509kg、三番茶：426kg 鹿児島県茶業生産動向資料、H30年度）を目指す。加えて茶葉品質や茶園土壌環境への影響を慣行栽培区と比較し、問題なく新規下水汚泥肥料を施用できることを示す。具体的には、茶葉品質については、Codex基準値以下（T-As：2mg/kg、Pb ： 1mg/kg、T-Hg ： 0.5mg/kg）とし、茶園への重金属蓄積値について、土壌環境基準値以下とする。また、1haあたりの肥料コストを現在の60万円から20%削減することを目指し、実装化に結びつける。

３．研究開発内容

３．１　新規下水汚泥肥料の最適施肥量(割合)の検討

３．１．１　栽培方法

栽培試験は鹿児島県霧島市の茶農家の圃場で2020年8月29日から開始した。供試茶園は条間50cm、株間45cm間隔の二条ちどり植え栽植方式で、供試品種‘やぶきた’の12年生園である。

‘やぶきた’は日本全国の約8割の茶園で栽培され、最も普及率の高い品種である。表2.1に試験区および施肥条件を示す。試験区には菜種油粕（水分率：11.0%、N:P:K = 5.3%:2.0%:1.0%）を用いた慣行施肥区(対照区)、菜種油粕に含まれる窒素の50%をサブテーマ1で調製した新規下水汚泥肥料(水分率20.0%、N:P:K=3.1%:3.6%:1.3%）に含まれる窒素に置換した菜種油粕・下水汚泥肥料併用区（50%区）、新規下水汚泥肥料100%区および配合肥料区の4試験区を設け、新規下水汚泥肥料の茶栽培への利用可能性を施肥量（割合）から検討した。試験規模は1試験区あたり18.0m^2（1.8m×10.0m）とし、3反復で実施した（図2.1参照）。各試験区の施肥量は窒素として年間50kg/10aとし、7回に分けて施肥した。新規下水汚泥肥料は秋肥（1）、（2）に最大5kgN/10a、春肥（1）、（2）に最大7kgN/10a施肥した。また、秋肥（2）、春肥(1)の施肥時に茶園土壌の地力維持のために腐葉土を各500kg/10a施用した（表2.2参照）。 なお、本試験ではアドバイザーから頂いた助言と茶栽培予備試験結果をもとに、試験区を6試験区から4試験区に変更した。

表2.1 試験区および施肥条件

試験区	施肥時期	施肥窒素配分(kgN/10a)							年計
		秋肥(1) 8月下旬	秋肥(2) 10月上旬	春肥(1) 2月上旬	春肥(2) 3月中旬	芽だし 4月上旬	夏肥(1) 5月上旬	夏肥(2) 6月中旬	
1 慣行施肥区　菜種油粕(100%)		5.0a	5.0a	7.0a	7.0a	8.0e	8.0d	10.0d	50.0
2 新規下水汚泥肥料(50%)		5.0ab	5.0ab	7.0ab	7.0ab	8.0e	8.0d	10.0d	50.0
3 新規下水汚泥肥料(100%)		5.0ab	5.0ab	7.0ab	7.0ab	8.0e	8.0d	10.0d	50.0
4 配合肥料区		5.0ab	5.0ab	7.0ab	7.0ab	8.0e	8.0d	10.0d	50.0

注）a：菜種油粕(5.3-2.0-1.0)，b：新規下水汚泥肥料(3.1-5.3-0.6)，c：有機配合(7-2-2)，d：有機配合(11-1-2)，e：硫安（21-0-0）
※（ ）内は（N-P_2O_5-K_2O)の現物値を示す.

表2.2 茶園に施用した資材の特性

資材	N	P_2O_5	K_2O	MgO	CaO	繊維
	(乾物%)					
腐葉土	1.8	3.0	0.2	0.4	3.3	35.2

３．１．２　調査分析方法

一番茶の生育調査、収穫は、2021年5月3日、2022年5月1日、二番茶は、2021年6月3日、2022年7月5日、秋番茶は、2021年10月14日、2022年10月14日に行った。本茶栽培試験は、協力農家と協議を行い、三番茶の収穫は行わず、秋番茶を収穫した。生育調査は枠摘み法（20×20cm）で行い、新梢基部から約2～3cm

上部を摘採し、収量構成要素である新葉数、摘芽長、摘芽数、摘芽重、出開きの有無を調査した（N=3）。その後、収穫機で各試験区9m²ずつ摘採した。摘採した茶葉は全量、蒸機で蒸熱処理を施し、90℃で15分間ネットベルト式乾燥機で乾燥後、さらに透気乾燥機で1時間乾燥させた。乾燥茶葉はサイクロンミル（UDY Co.,Ltd. CYCLONE SAMPLE MILL）で粉砕後、近赤外分析法（静岡製機（株）　茶成分分析計 GTN-9）で水分、全窒素、遊離アミノ酸量、テアニン、繊維、タンニン、カテキン、カフェインを定量した。また、茶葉の安全性を確認するために、ICP質量分析法（（株）パーキンエルマージャパン製「ELAN　DRC-e」）で、As、Cr、Ni、Cd、Pbを、原子吸光光度法（Agilent製「SpectrAA　55B」）でZn、Cu を、還元気化原子吸光光度法（日本インスツルメンツ（株）製「RA-4500」）でT-Hgを定量した。さらに茶園土壌中への金属・重金属の蓄積等を調査するために、秋肥1回目の施肥前（2020年8月29日、2021年8月30日、2022年8月30日）に各試験区2ヶ所（茶樹両側のうね間から1箇所ずつ）から土壌を採取した。土壌は土壌表面から20cmの箇所で採取し、2mmのふるいを通過させ、風乾後、金属・重金属、pH（ガラス電極法）、EC（CM-30R）、無機態窒素（アンモニア性窒素：蒸留法、硝酸性窒素：デバルダ合金-蒸留法）を測定した。また交換性陽イオン、可給態リン酸を「土壌、水質及び植物体分析法[1)]」にしたがい測定した。

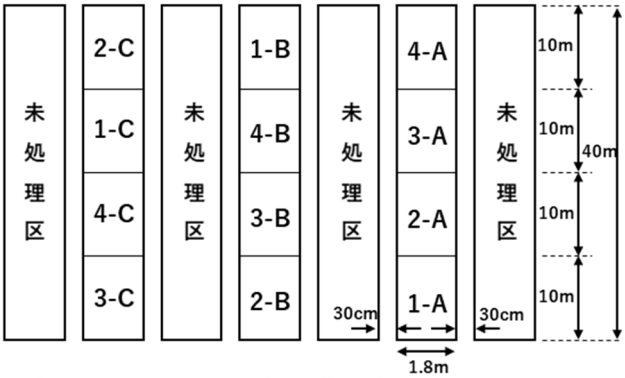


図2.1 各試験区の配置

３．２　新規下水汚泥肥料の効果的な施肥時期の検討

新規下水汚泥肥料の効果的な施肥時期について、秋肥施用、春肥施用および秋肥＋春肥施用の3区を設置し、それぞれ表2.3の条件のもと施肥した。また対照区として慣行施肥区（有機配合肥料施用）を設置した。試験規模は1試験区あたり18.0m²（1.8m×10.0m）とし、3反復で実施した。年間施肥窒素量は各区とも鹿児島県の施肥基準量の50kg/10aで、新規下水汚泥肥料代替時期以外の肥料は対照区と同じとし、同量施用した。茶園は多腐植質厚層黒ボク土で、供試品種は‘やぶきた’（昭和45年定植）である。

一番茶の生育調査、収穫は2021年4月21日、2022年4月20日、二番茶は2021年6月9日、2022年6月6日、三番茶は2021年7月16日、2022年7月12日に行った。調査項目は収量、摘芽中の成分（全窒素：摘採葉を硫酸-過酸化水素分解後、ケルダール法、リン酸:バナドモリブデン酸法(分光光度計 SHIMADZU UV-1880)、塩基類：原子吸光光度計（PerkinElmer PinAAcle500））、荒茶品質（官能審査、近赤外分光光度計（静岡製機（株）茶成分分析計 GTN-9））ならびに土壌の化学性（３．１．２参照）とした。なお、官能審査は2K型製茶機械で製茶し、各項目20点満点の標準審査法で行った。

表2.3 施肥条件

試験区		施肥時期	施肥窒素配分（kgN/10a）							
			秋肥(1)	秋肥(2)	春肥(1)	春肥(2)	芽だし	夏肥(1)	夏肥(2)	年計
			8月上旬	9月上旬	2月上旬	3月上旬	3月下旬	5月上旬	6月下旬	
1	秋肥区		5.0[a]	5.0[a]	7.0[c]	7.0[c]	8.0[d]	8.0[b]	10.0[c]	50.0
2	春肥区		5.0[b]	5.0[b]	7.0[a]	7.0[a]	8.0[d]	8.0[b]	10.0[c]	50.0
3	秋春肥区		5.0[a]	5.0[a]	7.0[a]	7.0[a]	8.0[d]	8.0[b]	10.0[c]	50.0
4	対照区		5.0[b]	5.0[b]	7.0[c]	7.0[c]	8.0[d]	8.0[b]	10.0[c]	50.0

注）a：新規下水汚泥肥料(3.1-5.3-0.6)，b：有機配合(7-2-2)，c：有機配合(11-1-2)，
d：硫安（21-0-0）　※（　）内は（N-P_2O_5-K_2O)の現物値を示す.

３．３　新規下水汚泥肥料の地下水への窒素溶脱量評価

新規下水汚泥肥料施肥による茶園土壌からの窒素溶脱量を調査するために、2020年10月21日に各試験区、うね間中央部の深さ100cmの位置にポーラスカップを埋設（各区3反復）した（図2.2参照）。土壌浸透水の採取は降雨があり、深さ100cmまで降雨が浸透したと予想された日に、ポーラスカップに接続したポンプを稼働させて吸引し、回収した。なお、ポンプの吸引圧は35kpaとした。浸透水（採水）中の硝酸態窒素濃度の測定は３．１．２の試験法に準じた。

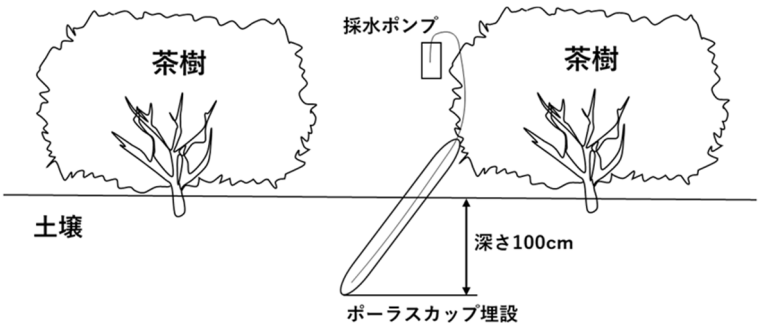


図2.2 浸透水採取概略図

３．４　窒素・重金属成分のマテリアルフロー解析

成木試験は、３．２の各試験区の茶葉、３．３で得た浸透水中の窒素・重金属成分に加え、試験最終年度（2022年度）に掘り起こした茶樹を茶樹体内の葉、枝条、根の各部位別に分け、これらに含まれる窒素・重金属成分を調査した。

幼木試験は、2019年11月に抜根した茶園跡地（多腐植質厚層黒ボク土）を利用した。本試験では、新規下水汚泥肥料区、既存下水汚泥肥料区、慣行施肥資材区、有機質肥料区、慣行体系区（ロング肥料活用）の5区設け、2020年10月28日に施肥を行い、マルチを施し、2020年11月4日に供試品種として‘やぶきた’１年半生苗を定植した。幼木試験では、仕立て剪除時に枝条中の窒素・重金属成分について分析した。また、掘取り時の茶樹体内の葉、枝条、根の各部位別の窒素・重金属成分の吸収量、土壌残存量について調査した。

なお、両試験における窒素・重金属成分の分析は３．１．２の試験法に準じた。

３．５　肥料費削減効果の検討

サブテーマ1（４．４）で算出した新規下水汚泥肥料の販売価格および茶栽培試験の結果から、新規下水汚泥肥を菜種油粕の代替として茶栽培に利用した場合の1haあたりの肥料費の削減効果を検討した。

４．結果及び考察

４．１　新規下水汚泥肥料の最適施肥量(割合)の検討

４．１．１　試験開始時の茶園土壌

表2.4に栽培試験開始時の茶園土壌の土壌診断結果を示す。茶園土壌全体（A～C）のpH、ECおよび可給態リン酸（P_2O_5）は鹿児島県の土壌診断基準値内（pH：4.0～5.0、EC：1.0mS/cm、可給態リン酸（P_2O_5）：5～50mg/100g乾土）であったが、交換性石灰（CaO）、交換性苦土（MgO）および交換性カリ（K_2O）は基準値（CaO：3.0～5.0meq/100g、MgO：1.0～2.0、K_2O：0.4～0.8）より低い傾向にあった。また無機態窒素は土壌中に殆ど残存していなかった。

表2.4　試験開始時の茶園土壌の化学性

試験区	pH	EC	C/N比	無機態窒素		T-N	P_2O_5	K_2O	MgO	CaO	交換性塩基			可給態
				NH_4-N	NO_3-N						K_2O	MgO	CaO	P_2O_5
	(−)	(mS/cm)	(−)	(乾物%)							(meq/100g乾物)			(mg/100g乾物)
A区	4.1	0.28	9.2	N.D.	0.05	0.60	0.99	0.10	0.10	0.29	0.35	0.2	2.34	13.4
B区	4.1	0.27	7.8	N.D.	0.03	0.65	1.00	0.10	0.19	0.29	0.35	0.26	2.58	12.4
C区	4.3	0.25	8	N.D.	0.03	0.56	0.91	0.10	0.20	0.34	0.41	0.38	3.81	12.4

＊N.D.　検出限界値以下

表2.5に栽培試験開始時の土壌中の金属・重金属含有量を示す。全ての試験圃場で同様な値を示した。土壌管理基準ではZnを120mg/kg乾土としている[2)]。本試験圃場のZnは76.1～90.1mg/kg乾土であり、基準値内であった。

表2.5　栽培開始時の土壌中の金属・重金属量

試験区	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr	Cu	Zn	Al
	(mg/kg 乾物)								
A区	0.11	14.6	7.2	0.13	6.0	31.4	75	76.1	67,000
B区	0.12	14.6	7.4	0.15	6.1	23.6	74.2	82.1	65,000
C区	0.14	14.6	7.0	0.15	6.0	24.8	70.9	90.1	68,000

＊N.D.　検出限界値以下

４．１．２　新規下水汚泥肥料の最適施肥量(割合)の検討

表2.6に一番茶の生育調査結果を示す。新規下水汚泥肥料を用いた試験区の平均新葉数は2021年度で4.3枚、2022年度で3.8枚であり、慣行施肥区、配合肥料区と有意差は認められなかった。新摘芽長は新規下水汚泥肥料を施用した試験区で慣行施肥区よりやや長い傾向にあるが、全試験区間で有意差は認められなかった。また、全芽数についても有意差はなかった。2021年度の全芽重は配合肥料区で46.7±4.4gと新規下水汚泥肥料施肥区と比較して重く、両試験区間に統計的有意差が認められた。出開度（出開いた新芽の占める割合）は、2021年度、2022年度ともに摘採適期とされる70%よりも高く、摘採がやや遅かったと考えられる。2021年度の収量は、新規下水汚泥肥料施肥区では慣行施肥区と同等の収量を得ることができた。特に新規下水汚泥肥料100%区の収量は667±30.8kg/10aと多く、配合肥料区との有意差は認められなかった。これは、サブテーマ1（４．１．４）で示したように、新規下水汚泥肥料には速効性のアンモニア態窒素が多く含まれるため、特に地温の低い秋肥(2)、春肥(1)、春肥(2)において、茶に対する窒素供給速度が菜種油粕よりも配合肥料に近いことが影響していると考えられる。表2.7に二番茶、表2.8に秋番茶の生育調査結果を示す。新規下水汚泥肥料を用いた試験区では、慣行試験区、配合肥料区と同等の結果が得られ、全試験区間で統計的有意差は認められなかった。

2021年度の秋番茶収穫後に茶園の更新のため、摘採面から下へ10～20cm深く刈込む、整せん枝を実施

表2.6　一番茶の生育調査結果

試験区	平均新葉数 (枚)	平均新摘芽長 (cm)	枠摘全芽数 (本)	枠摘全芽重量 (g)	出開度 (%)	収量（10a） (kg)
1 慣行施肥区	4.3 ± 0.1	7.6 ± 0.9	51.0 ± 4.7	42.5 ± 3.1 ab	75.8 ± 0.1	630 ± 19 b
	3.8 ± 0.2	6.2 ± 0.5	47.4 ± 6.3	26.7 ± 6.7	81.9 ± 7.0	450 ± 32
2 新規下水汚泥肥料（50%）区	4.3 ± 0.1	8.0 ± 0.2	42.0 ± 5.1	36.6 ± 4.4 b	76.7 ± 2.8	620 ± 36 b
	3.8 ± 0.1	6.7 ± 0.7	43.1 ± 7.1	26.8 ± 3.0	75.2 ± 3.2	461 ± 32
3 新規下水汚泥肥料（100%）区	4.3 ± 0.1	7.8 ± 0.3	41.0 ± 0.8	36.1 ± 0.8 b	80.5 ± 5.5	667 ± 31 ab
	3.8 ± 0.1	6.3 ± 0.4	47.6 ± 7.2	29.1 ± 2.5	79.9 ± 9.2	494 ± 22
4 配合肥料区	4.4 ± 0.2	8.5 ± 1.8	54.0 ± 6.2	46.7 ± 4.4 a	77.7 ± 10.0	717 ± 27 a
	3.8 ± 0.1	6.3 ± 0.9	46.1 ± 7.6	28.2 ± 6.5	78.6 ± 2.0	511 ± 60

＊ 平均値±標準偏差を示す．Tukeyの多重比較により5%水準で有意差あり（N=3）．
上段：2021年度　下段：2022年度

表2.7　二番茶の生育調査結果

試験区	平均新葉数 (枚)	平均新摘芽長 (cm)	枠摘全芽数 (本)	枠摘全芽重量 (g)	出開度 (%)	収量（10a） (kg)
1 慣行施肥区	3.8 ± 0.1	5.4 ± 1.2	52.7 ± 3.1	32.6 ± 6.5	76.0 ± 9.5	581 ± 130
	2.8 ± 0.1	3.6 ± 0.6	37.3 ± 8.4	16.8 ± 0.8	91.6 ± 6.1	386 ± 2.6
2 新規下水汚泥肥料（50%）区	3.8 ± 0.2	4.9 ± 1.3	55.7 ± 1.9	29.8 ± 6.6	75.7 ± 3.4	511 ± 152
	3.1 ± 0.3	3.5 ± 0.7	43.0 ± 12.4	16.2 ± 2.7	85.5 ± 6.4	389 ± 5.4
3 新規下水汚泥肥料（100%）区	3.6 ± 0.3	4.3 ± 1.3	52.3 ± 3.3	25.9 ± 9.5	70.6 ± 16.8	557 ± 99.4
	3.1 ± 0.1	3.9 ± 0.3	41.9 ± 4.5	24.0 ± 0.6	89.6 ± 1.2	335 ± 20.7
4 配合肥料区	3.8 ± 0.2	5.0 ± 0.6	50.8 ± 1.4	30.1 ± 4.3	76.4 ± 8.7	599 ± 38.6
	3.2 ± 0.3	4.0 ± 0.6	36.8 ± 9.0	23.1 ± 1.5	86.8 ± 8.5	333 ± 26.7

＊ 平均値±標準偏差を示す．Tukeyの多重比較により5%水準で有意差あり（N=3）．
上段：2021年度　下段：2022年度

表2.8　秋番茶の生育調査結果

試験区	平均新葉数（枚）	平均新摘芽長（cm）	枠摘全芽数（本）	枠摘全芽重量（g）	出開度（%）	収量（10a）（kg）
1 慣行施肥区	3.0 ± 0.2	3.8 ± 0.4	20.2 ± 1.7	15.9 ± 1.4	84.5 ± 12.5	352 ± 66
	3.5 ± 0.3	6.4 ± 1.0	16.0 ± 2.0	16.3 ± 3.5	70.1 ± 4.9	378 ± 33
2 新規下水汚泥肥料（50%）区	3.3 ± 0.3	4.3 ± 0.4	25.4 ± 3.2	21.7 ± 2.0	95.4 ± 4.4	313 ± 93
	3.4 ± 0.2	6.1 ± 0.5	13.7 ± 2.3	13.2 ± 3.3	58.6 ± 2.9	336 ± 60
3 新規下水汚泥肥料（100%）区	3.2 ± 0.4	4.3 ± 2.1	22.3 ± 2.2	18.3 ± 4.3	99.1 ± 0.8	365 ± 30
	3.6 ± 0.3	6.6 ± 0.9	16.3 ± 2.9	16.4 ± 4.0	68.0 ± 11.3	381 ± 34
4 配合肥料区	3.1 ± 0.3	4.1 ± 0.8	25.0 ± 3.8	16.9 ± 3.7	84.6 ± 6.7	388 ± 19
	3.6 ± 0.4	6.8 ± 0.3	15.8 ± 2.7	17.1 ± 1.5	64.7 ± 7.0	378 ± 19

＊ 平均値±標準偏差を示す．Tukeyの多重比較により5%水準で有意差あり（N=3）．
上段：2021年度　下段：2022年度

した。茶園の更新は、樹体の老化による生産力低下を改善するために3～5年ごとに実施する[3]。茶園更新実施後の茶葉収量は減少するため、2022年度の一番茶と二番茶では2021年度より収量が減少した。一方、秋番茶の収量は、2021年度より2022年度の方が多くなった。これは、茶園更新による生産力の改善効果が見られたと推察される。

表2.9に一番茶の成分分析結果を示す。新規下水汚泥肥料を用いた試験区の茶葉成分は、全ての分析項目において慣行施肥区、配合肥料区と有意差は認められなかった。一番茶の全窒素量、テアニン量および遊離アミノ酸量は、タンニン量、繊維量と負の相関があるとされ[4]、また、タンニンとカテキンは正の相関があることが報告されている[5]。本試験においても同様な傾向が見られた。つぎに、茶葉品質を確認するために、近赤外分析法における測定値の目安と比較検討した[6]。本試験結果を茶葉の品質指標に照合すると、全窒素、遊離アミノ酸および旨味・甘味成分のテアニン量は「良い」であったが、繊維については「普通」であった。タンニンは茶の苦味・渋味の主成分であり、カフェインは苦味成分であるが、本試験で得られた茶葉ではタンニンは10.8～11.4%、カフェインは2.1～2.5%の範囲にあった。タンニンは茶の品質に関係なく12～16%の範囲で含まれるが、本試験ではそれよりも低かった。

表2.9　一番茶の成分分析結果

試験区	全窒素	遊離アミノ酸	テアニン	繊維	タンニン	カテキン	カフェイン
				（乾物%）			
1 菜種油粕(100%)区	5.2 ± 0.3	3.4 ± 0.3	1.8 ± 0.2	23.3 ± 1.2	11.4 ± 0.2	12.3 ± 0.4	2.2 ± 0.1
	5.4 ± 0.1	3.5 ± 0.1	1.8 ± 0.1	20.7 ± 0.5	10.9 ± 0.2	12.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
2 新規下水汚泥肥料(50%)区	5.1 ± 0.2	3.4 ± 0.2	1.8 ± 0.1	23.3 ± 0.8	11.3 ± 0.1	12.2 ± 0.2	2.3 ± 0.1
	5.2 ± 0.1	3.3 ± 0.2	1.7 ± 0.2	21.0 ± 0.6	11.0 ± 0.3	12.2 ± 0.3	2.5 ± 0.1
3 新規下水汚泥肥料(100%)区	5.2 ± 0.1	3.3 ± 0.1	1.7 ± 0.1	23.5 ± 0.7	11.2 ± 0.4	12.1 ± 0.2	2.2 ± 0.1
	5.2 ± 0.1	3.3 ± 0.2	1.7 ± 0.1	21.3 ± 0.3	11.0 ± 0.3	12.2 ± 0.3	2.5 ± 0.1
4 配合肥料区	5.2 ± 0.1	3.5 ± 0.1	1.8 ± 0.1	23.5 ± 0.6	10.8 ± 0.4	11.8 ± 0.3	2.1 ± 0.1
	5.5 ± 0.1	3.4 ± 0.3	1.8 ± 0.1	21.1 ± 0.5	10.9 ± 0.3	12.0 ± 0.4	2.5 ± 0.1

*tukey法で有意差なし　　上段:2021年度　下段:2022年度

表2.10、表2.11に、2021年度、2022年度の茶葉の金属・重金属分析結果を示す。全ての試験区でT-Cr（0.4～0.9mg/kg）、Ni（3.7～5.9mg/kg）、Pb（0.1～0.3mg/kg）、Zu（19.7～34.0mg/kg）、Cu（11.0～15.1mg/kg）が検出されたが、試験区間に有意差は見られなかった。食品衛生法では食品中の有害物質として重金属の残留基準値が設定されている[7]。しかし、「茶」の残留基準値は示されていない。一方、茶を海外に輸出する場合、輸出先によりPbの最大基準値が設けられ、中国では5.0mg/kg、タイでは0.5mg/kgとなっている。本試験で得られた茶葉はこれらの基準値以下であった。

表2.12に茶園土壌の金属・重金属分析結果を示す。全体的な傾向として、栽培開始1年後（2021年8月30日）、2年後（2022年8月30日）の土壌中の金属・重金属量は、各試験区とも栽培開始時（2020年8月29日）と比較して微増減したが、統計的有意差は認められなかった。また、試験区間においても同様であった。このように、新規下水汚泥肥料の施用による茶園土壌への金属・重金属の蓄積は現段階では確認

できなかった。

以上の結果から、菜種油粕全量（100%）を新規下水汚泥肥料に置換することが可能と考えられる。

表2.10　茶葉の金属・重金属含有量（2021年度）

試験区	As	T-Cr	Ni	Cd	Pb	T-Hg	Zn	Cu
	(mg/kg乾物)							
1　菜種油粕（100%）区	N.D.	0.7 ± 0.3	4.2 ± 0.2	N.D.	0.2 ± 0.1	N.D.	33.0 ± 2.0	12.4 ± 1.0
	N.D.	0.2 ± 0.1	5.2 ± 0.9	N.D.	0.2 ± 0.1	N.D.	32.3 ± 3.8	13.0 ± 0.6
	N.D.	0.3 ± 0.1	4.5 ± 0.6	N.D.	0.1 ± 0.1	N.D.	21.8 ± 0.2	13.2 ± 0.6
2　新規下水汚泥肥料（50%）区	N.D.	0.6 ± 0.2	3.9 ± 0.4	N.D.	N.D.	N.D.	31.8 ± 0.9	11.3 ± 0.0
	N.D.	0.3 ± 0.1	5.3 ± 0.4	N.D.	N.D.	N.D.	33.2 ± 2.5	15.1 ± 2.2
	N.D.	0.4 ± 0.1	4.4 ± 0.6	N.D.	N.D.	N.D.	21.8 ± 2.7	13.2 ± 0.5
3　新規下水汚泥肥料（100%）区	N.D.	0.9 ± 0.3	4.6 ± 0.4	N.D.	N.D.	N.D.	31.6 ± 2.3	14.1 ± 3.0
	N.D.	0.2 ± 0.1	5.9 ± 0.3	N.D.	N.D.	N.D.	32.5 ± 2.0	13.3 ± 0.0
	N.D.	0.3 ± 0.1	4.8 ± 0.2	N.D.	0.2 ± 0.1	N.D.	24.5 ± 5.6	13.4 ± 0.0
4　配合肥料区	N.D.	0.4 ± 0.1	3.9 ± 0.1	N.D.	N.D.	N.D.	30.9 ± 0.1	11.0 ± 0.6
	N.D.	0.2 ± 0.1	5.7 ± 0.5	N.D.	N.D.	N.D.	31.5 ± 1.6	13.0 ± 0.6
	N.D.	0.3 ± 0.1	4.6 ± 0.2	N.D.	0.3 ± 0.1	N.D.	27.6 ± 3.9	14.5 ± 0.1

*tukey法で有意差なし　　上段：一番茶　　中段：二番茶　　下段：秋番茶

表2.11　茶葉の金属・重金属含有量（2022年度）

試験区	As	T-Cr	Ni	Cd	Pb	T-Hg	Zn	Cu
	(mg/kg乾物)							
1　菜種油粕（100%）区	N.D.	0.3 ± 0.1	4.3 ± 0.3	N.D.	0.1 ± 0.1	N.D.	28.8 ± 1.7	12.2 ± 0.7
	N.D.	0.2 ± 0.2	4.3 ± 0.4	N.D.	0.1 ± 0.0	N.D.	21.0 ± 1.2	12.4 ± 0.0
	N.D.	0.2 ± 0.0	4.4 ± 0.6	N.D.	0.1 ± 0.0	N.D.	21.0 ± 1.2	11.7 ± 0.6
2　新規下水汚泥肥料（50%）区	N.D.	0.2 ± 0.1	4.7 ± 0.2	N.D.	0.1 ± 0.1	N.D.	30.9 ± 1.2	12.9 ± 0.5
	N.D.	0.2 ± 0.2	3.9 ± 0.3	N.D.	0.1 ± 0.0	N.D.	19.7 ± 0.1	11.4 ± 1.0
	N.D.	0.2 ± 0.0	3.9 ± 0.4	N.D.	0.1 ± 0.0	N.D.	19.7 ± 0.1	11.0 ± 0.5
3　新規下水汚泥肥料（100%）区	N.D.	0.3 ± 0.1	5.3 ± 1.2	N.D.	0.1 ± 0.1	N.D.	32.5 ± 5.7	13.8 ± 2.2
	N.D.	0.2 ± 0.0	4.1 ± 0.6	N.D.	0.1 ± 0.0	N.D.	20.4 ± 0.7	12.1 ± 0.6
	N.D.	0.2 ± 0.0	4.4 ± 0.2	N.D.	0.1 ± 0.0	N.D.	20.4 ± 0.7	11.7 ± 0.7
4　配合肥料区	N.D.	0.3 ± 0.1	5.0 ± 0.7	N.D.	0.1 ± 0.1	N.D.	34.0 ± 3.0	13.9 ± 1.6
	N.D.	0.2 ± 0.1	5.1 ± 0.9	N.D.	N.D.	N.D.	23.3 ± 3.0	12.0 ± 0.6
	N.D.	0.2 ± 0.1	3.7 ± 0.2	N.D.	0.1 ± 0.0	N.D.	23.3 ± 3.0	11.3 ± 0.0

*tukey法で有意差なし　　上段：一番茶　　中段：二番茶　　下段：秋番茶

表2.12　茶園土壌の金属・重金属含有量

試験区	Cd	Pb	As	T-Hg	Ni	Cr	Cu	Zn	Al
	(乾物%)								
1　菜種油粕（100%）区	0.12	14.6	7.20	0.14	6.03	26.6	73.4	82.8	66,700
	N.D.	14.6±0.02	7.72±0.41	0.06±0.01	5.49±0.34	31.0±7.85	78.7±5.72	72.0±3.86	71,300±1,800
	N.D.	14.3±0.01	6.44±0.32	0.07±0.01	5.59±0.44	25.8±1.27	73.2±13.2	68.4±7.74	66,200±2,900
2　新規下水汚泥肥料（50%）区	0.12	14.6	7.20	0.14	6.03	26.6	73.4	82.8	66,700
	N.D.	14.5±0.80	7.49±0.18	0.06±0.01	5.73±0.52	28.4±7.10	83.4±10.1	74.3±6.00	70,000±4,500
	N.D.	14.1±0.56	6.35±0.35	0.07±0.01	5.97±0.62	29.1±5.94	88.4±12.4	68.4±6.63	60,700±3,800
3　新規下水汚泥肥料（100%）区	0.12	14.6	7.20	0.14	6.03	26.6	73.4	82.8	66,700
	N.D.	14.6±0.65	7.28±0.37	0.06±0.01	5.69±0.43	24.8±8.35	77.3±14.7	80.8±11.0	71,600±4,400
	N.D.	14.2±0.83	6.49±0.34	0.07±0.01	6.08±0.49	26.0±7.03	82.1±13.7	70.0±8.92	61,000±4,300
4　配合肥料区	0.12	14.6	7.20	0.14	6.03	26.6	73.4	82.8	66,700
	N.D.	14.5±0.60	7.30±0.34	0.06±0.01	5.75±0.39	25.8±7.90	78.2±13.3	81.3±9.57	71,400±3,700
	N.D.	14.4±1.25	6.47±0.34	0.07±0.01	6.07±0.59	26.2±5.53	82.2±10.9	71.0±7.34	59,500±4,900

*tukey法で有意差な上段：2020年8月29日（試験開始時）　　中段：2021年8月30日（試験開始から1年後）　　下段：2022年8月30日（試験開始から2年後）

４．２　新規下水汚泥肥料の効果的な施肥時期の検討

表2.13に新規下水汚泥肥料の施肥時期ごとの茶期別茶葉収量と2カ年の累計収量を示す。茶葉収量は2021年度、2022年度とも、施肥時期による有意差は認められなかった。しかしながら、新規下水汚泥肥料を秋に施肥した試験区では、他区と比較して収量がやや多くなる傾向にあった。これは、４．１．２で考察したように、新規下水汚泥肥料に多く含まれる速効性のアンモニア態窒素が影響したと考えられる。

表2.13　茶葉収量

(kg/10a)

試験区	一番茶	二番茶	三番茶	合計	2カ年累計
秋肥区	481	670	502	1,654	2,931
	378	522	377	1,277	
春肥区	441	645	479	1,564	2,733
	327	473	368	1,168	
秋春肥区	430	678	494	1,602	2,884
	350	506	427	1,283	
対照区	433	627	452	1,512	2,703
	351	488	351	1,191	
分散分析	ns	ns	ns		
	ns	ns	ns		

上段：2021年度　下段：2022年度

一方、一番茶の収量は鹿児島県内の過去5年間（2016-2020）の茶期別10a当たりの生葉収量536.8kgより少なかった。これは出開度が56～63%と低く、やや早い摘採であったためと推察される。

表2.14に一番茶の摘芽中の成分含有率を示す。2021年度の一番茶摘芽中の窒素含有率は、新規下水汚泥肥料を施用した秋肥区、秋春肥区、春肥区の順に高い傾向にあり、慣行資材施用の対照区が最も低かった。秋肥区は対照区に対して、有意に高かった。また、リン酸、カリウム、カルシウム、マグネシウム含有率は各試験区間で有意差はなかった。2021年の二番茶、三番茶は全分析項目で試験区間に統計的有意差は認められなかった。

表2.14　摘芽中の成分含有率

(乾物%)

茶期	試験区	T-N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO
一番茶	秋肥区	5.54 a	1.17	1.97	0.28	0.24
		5.72	1.38	2.28	0.37 ab	0.35
	春肥区	5.46 ab	1.19	2.00	0.29	0.24
		5.69	1.37	2.22	0.39 a	0.34
	秋春肥区	5.49 ab	1.18	1.94	0.28	0.24
		5.86	1.43	2.30	0.37 ab	0.36
	対照区	5.36 b	1.14	1.98	0.28	0.24
		5.88	1.40	2.30	0.35 b	0.35
	分散分析	*	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	*	ns
二番茶	秋肥区	4.23	0.94	2.21	0.31	0.26
		4.70	1.12	2.50 ab	0.38	0.38
	春肥区	4.20	0.93	2.25	0.31	0.26
		4.76	1.09	2.49 ab	0.41	0.38
	秋春肥区	4.19	0.94	2.23	0.30	0.26
		4.77	1.14	2.62 a	0.39	0.38
	対照区	4.24	0.92	2.22	0.33	0.28
		4.68	1.07	2.44 b	0.39	0.38
	分散分析	ns	ns	ns	ns	ns
		ns	na	**	ns	ns
三番茶	秋肥区	3.89	0.85	2.39	0.37	0.19
		4.10	0.88	3.29	0.47	0.38
	春肥区	3.87	0.83	2.41	0.36	0.19
		4.14	0.89	3.00	0.52	0.39
	秋春肥区	3.98	0.86	2.45	0.36	0.20
		4.12	0.87	2.94	0.47	0.43
	対照区	3.91	0.84	2.51	0.38	0.20
		4.22	0.88	3.04	0.50	0.43
	分散分析	ns	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns	ns

注１）**;p<0.01, *;p<0.05, ns;p>0.05を示す。　上段：2021年度　下段：2022年度
２）同一英小文字間に有意差無し(TukeyのHSD検定)

2022年度の一番茶、二番茶の摘芽成分は新規下水汚泥肥料を用いた試験区間では有意差は見られなかった。また、三番茶は全分析項目で試験区間に有意差は認められなかった。

表2.15に官能審査による荒茶品質の調査結果と化学成分分析結果を示す。2021年度、2022年度の一番茶、二番茶の荒茶品質は、試験区間で有意差は見られず、対照区と同等であった。また、処理区間による差も見られなかった。

近赤外分光光度計による一番茶荒茶の化学成分値は、2021年度、2022年度とも試験区間での有意差は見られなかったが、全体的な傾向として、下水汚泥肥料を施用した試験区では慣行資材施用の対照区と比較して、全窒素含有率、アミノ酸含有率は同等、それ以上、繊維含有率、カテキン含有率はやや低くなる傾向にあった。二番茶荒茶の化学成分値についても、試験区間、処理区間とも有意差は見られなかった。

図2.3に茶園土壌のpH、ECおよび無機態窒素量の推移を示す。土壌pHは、調査期間を通して全試験区で

表2.15　荒茶の品質調査と化学成分

茶期	試験区	荒茶品質（点） 外観	内質	総計	化学成分（乾物%） 全窒素	遊離ｱﾐﾉ酸	繊　維	カテキン
一番茶	秋肥区	33.0	49.5	82.5	5.63	4.5	18.9	12.5
		33.0	47.0	80.0	6.00	4.7	16.7	12.5
	春肥区	33.5	51.0	84.5	5.63	4.4	18.7	12.7
		32.5	47.0	79.5	6.10	4.4	16.4	12.8
	秋春肥区	34.0	50.0	84.0	5.60	4.3	19.0	12.7
		33.0	49.5	82.5	6.00	4.2	16.0	13.0
	対照区	33.5	51.0	84.5	5.37	4.0	19.4	13.0
		32.5	49.0	81.5	6.00	4.3	16.9	12.7
二番茶	秋肥区	26.5	40.0	66.5	4.33	1.8	24.9	14.5
		26.0	37.0	63.0	4.60	2.0	22.4	15.0
	春肥区	26.0	40.0	66.0	4.33	1.8	25.1	14.5
		25.0	36.5	61.5	4.60	1.7	21.2	16.2
	秋春肥区	27.0	39.0	66.0	4.27	1.6	25.1	14.9
		26.0	38.5	64.5	4.70	2.0	21.4	15.5
	対照区	26.5	39.0	65.5	4.27	1.6	24.9	15.0
		26.0	39.0	65.0	4.90	2.2	20.6	15.6

注１）荒茶品質は各項目20点満点の標準審査法による官能審査評点　　上段：2021年度　下段：2022年度
２）化学成分は、近赤外分光光度計値

3.0～3.6の間で推移し、新規下水汚泥肥料を施肥した試験区で対照区よりも高くなる傾向にあった。

ECは全体的な傾向として、有機配合肥料を施用した対照区が新規下水汚泥肥料を施用した試験区と比較して高くなる傾向にあった。また、施肥を繰返すことで、栽培開始時(2020年度)と比べ2022年度はやや高くなる傾向にあった。加えて、芽出し肥に硫安を施用した4月は、全試験区でECが大きく上昇した。

無機態窒素量は2020年9月から2021年1月にかけて、新規下水汚泥肥料を秋肥として施肥した区（秋肥区、秋春肥区）では、有機配合肥料を施肥した区（春肥区、対照区）と比較して低く推移したが、全ての試験区で秋季（9月上旬から10月上旬）の土壌中の無機態窒素量は目安とされる12mg/100gより高い値で推移した[8]。2021年2月から5月の無機態窒素量は、春肥に新規下水汚泥肥料を施肥した区（春肥区、秋春肥区）が低く、秋肥区、有機配合肥料を施用した区(対照区)で高く推移した。しかし、全試験区とも春季(2月中旬から3月中旬）の土壌中の無機態窒素量は、目安とされる22mg/100gよ

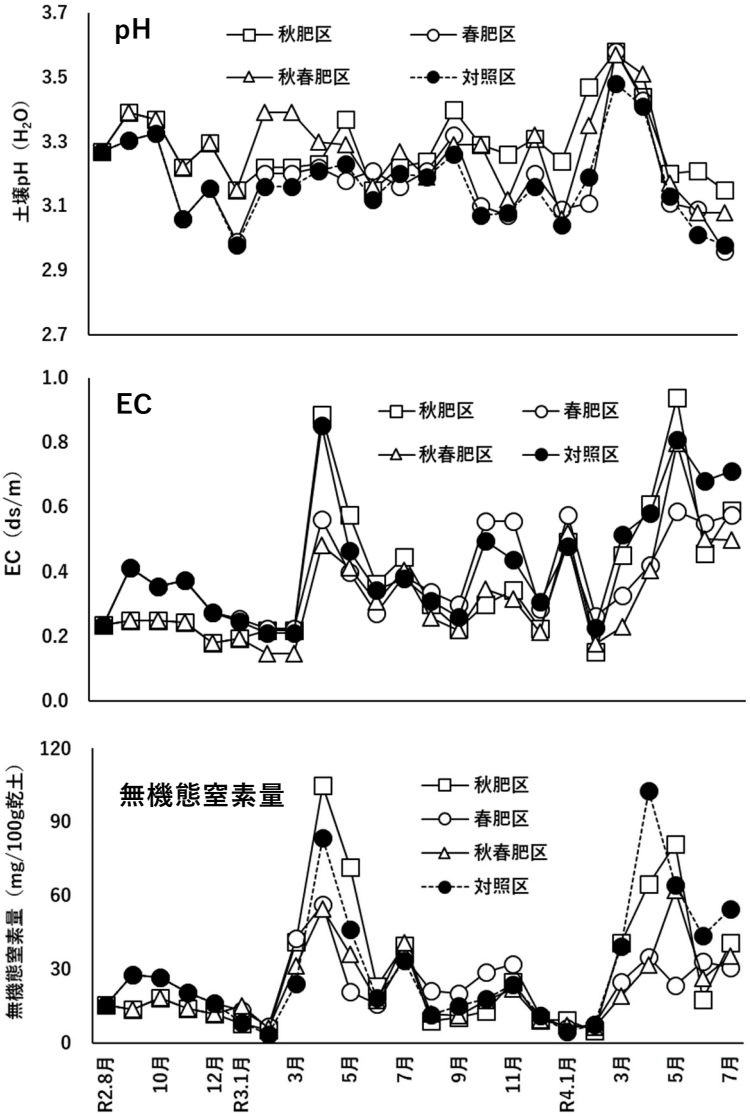


図2.3　茶園土壌のpH、EC、無機態窒素量の推移

り高かった[8)]。2021年8月から11月の無機態窒素量は、春肥区で高い傾向が見られた。ECの推移と同様、芽出し肥に硫安を施肥した2022年4月は全試験区で無機態窒素量が大幅に上昇した。

以上の結果から、新規下水汚泥肥料を秋肥資材として施用すると、慣行資材（有機配合肥料）施肥に比べて一番茶収量が多い傾向にあり、生葉の品質が優れた。これは、秋季に新規下水汚泥肥料を施用することで、上述した速効性のアンモニア態窒素に加え、土壌pHがやや改善されたことによる影響が大きいと考えられた。また、春肥としての施用、秋肥と春肥の2回施用した場合でも、慣行施肥区と大差なく、生葉品質では全窒素含有率が高い傾向にあったことから、新規下水汚泥肥料の活用は品質向上に有効であると考えられた。

４．３　新規下水汚泥肥料の地下水への窒素溶脱量の評価

図2.4、図2.5に2021年度、2022年度の茶園土壌浸透水の硝酸態窒素濃度の推移を示す。調査は浸透水がポーラスカップから採水できた期間に実施した。2021年度の新規下水汚泥肥料施用区では、調査期間を通して対照区（有機配合肥料区）より全体的に低く推移し、特に秋春肥区が最も低い傾向にあった。2022年度の新規下水汚泥肥料施用区では、調査期間を通して前年度と同様、秋春肥区が最も低く、硝酸態窒素濃度の増加傾向は見られなかった。また、秋肥区は対照区（有機配合肥料区）と比べて、概ね低い傾向にあった。新規下水汚泥肥料を用いた試験区の硝酸態窒素濃度が低い理由として、新規下水汚泥肥料の無機態窒素はアンモニア態窒素が主体のため、マイナスに帯電している土壌粒子に吸着・保持され、流亡が少なくなったためと考えられる。今回の調査では、新規下水汚泥肥料は有機配合肥料に比べ、窒素溶脱量が少なく、環境負荷が小さいことが示唆された。特に秋肥、春肥に新規下水汚泥肥料を用いることが、より効果的であった。新規下水汚泥肥料は環境に優しい肥料であることがわかった。

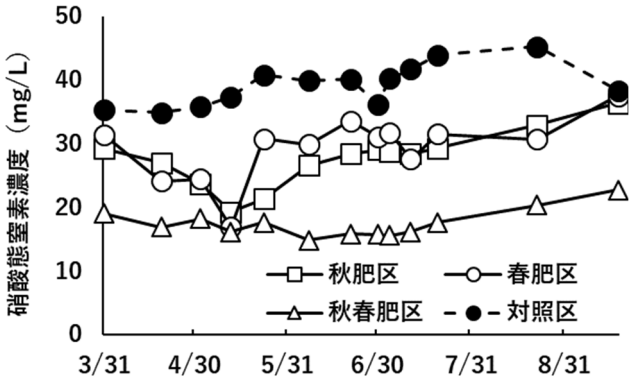


図2.4　茶園土壌浸透水の硝酸態窒素濃度の推移(2021年度)

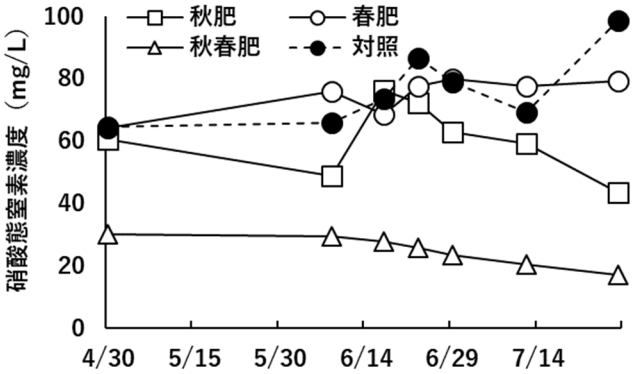


図2.5　茶園土壌浸透水の硝酸態窒素濃度の推移(2022年度)

４．４　茶樹の重金属成分等のマテリアルフロー解析

幼木については、新規下水汚泥肥料を2年間施用し、有機質資材を施用する慣行区を対照として、重金属の収支を調査した。

表2.16に幼木茶園における重金属の2年間収支および土壌現存量を示す。Cdに着目すると、新規下水汚泥のCd含有率は0.2mg/kgで、含有が許される最大量である5mg/kgの1/25程度であった。これを茶の肥料に使用した場合、2年間の施用量が10ａ当たり0.189g、茶樹の吸収量は0.012gで、施用量の6%程度が吸収割合であった。一方、慣行肥料（有機配合肥料）の場合は、施用量が0.238ｇ、吸収量が0.044gで、吸収率は施用量の18%であった。また、土壌中のCd含有率は、いずれもの肥料試験区も0.1mg/kg乾物で蓄積の傾向は認められなかった。

成木については、50年生‘やぶきた’に対し、施肥窒素量に対する生葉の窒素持出量から施肥窒素利

表2.16　幼木茶園における重金属の2年間収支および土壌現存量

元素	試験区	濃度 (mg/kg) 含有率	濃度 (mg/kg) 許容最大	投入量 (kg/10a)	吸収量 (kg/10a)	土壌中の含有率 (mg/kg乾物) 栽培前	土壌中の含有率 (mg/kg乾物) 栽培後	土壌現存量 (kg/10a)	投入量/土壌現存量 (%)
As	新規下水汚泥肥料	N.D.	50	0.0	0.130	7.0	11.0	700	0.0
	慣行			0.0	0.078		11.0	686	0.0
Cd	新規下水汚泥肥料	0.2	5	0.189	0.012	＜0.10	0.10	14	1.4
	慣行			0.238	0.044		0.10	14	1.7
Hg	新規下水汚泥肥料	0.2	2	0.189	0.003	0.17	0.05	7	2.7
	慣行			0.017	0.004		0.07	10	0.2
Ni	新規下水汚泥肥料	4.1	300	3.9	2.6	13.98	3.30	462	0.8
	慣行			20.2	3.0		3.80	532	3.8
Cr	新規下水汚泥肥料	3.9	500	4	1.77	53.8	22.0	3,080	0.1
	慣行			245	2.14		30.0	4,200	5.8
Pb	新規下水汚泥肥料	1.8	100	1.705	0.765	12.9	11.0	1,540	0.1
	慣行			0.189	0.641		11.0	1,540	0.0

用率を計算した。新規下水汚泥肥料を施用した秋肥区、春肥区、秋春肥区の施肥窒素利用率は、令和4年度の春肥区を除いて対照区より高く、特に秋肥施用で利用率が高まる傾向であった。

表2.17に各試験区における資材からの重金属施用量（2年間合計）を示す。成木に対する重金属の影響について、2年間の資材投入量から重金属の投入量を計算すると、新規下水汚泥肥料の施用量が最も多い秋春肥区のPb、Hg施用量は、対照区のPbで7.5倍、Hgで9.2倍であるのに対し、有機質資材の施用量が最も多い対照区のCd、Ni、Cr施用量は、秋春肥区のCdで1.3倍、Niで1.8倍、Crで3.0倍であった。

表2.17 各試験区における資材からの重金属施用量（2年間合計）

（g/10a・2year）

試験区	Cd	Pb	As	Hg	Ni	Cr
秋肥	0.35	0.95	0.00	0.11	51.3	360
春肥	0.57	1.74	0.00	0.19	39.8	433
秋春肥	0.39	2.37	0.00	0.26	32.2	201
対照	0.52	0.31	0.00	0.03	58.9	592

表2.18 茶樹における重金属の現存量（上：成木全体、下：成木部位別）

（g/10a）

試験区	Cd	Pb	As	Hg	Ni	Cr
秋肥	0.97	13.9	2.11	0.12	8.8	4.6
春肥	0.45	8.3	1.05	0.06	7.0	4.2
秋春肥	0.46	5.5	0.84	0.04	6.7	7.4
対照	0.46	4.9	0.65	0.02	6.1	5.3

（g/10a）

試験区	部位	Cd	Pb	As	Hg	Ni	Cr
秋肥	地上（葉，枝条）	0.49	3.76	0.49	0.02	3.39	2.79
	地下（根）	0.47	10.16	1.62	0.09	5.37	1.84
春肥	地上（葉，枝条）	0.27	6.40	0.54	0.03	5.48	2.77
	地下（根）	0.18	1.92	0.51	0.03	1.55	1.39
秋春肥	地上（葉，枝条）	0.26	2.91	0.26	0.00	4.38	4.57
	地下（根）	0.21	2.59	0.59	0.04	2.36	2.85
対照	地上（葉，枝条）	0.26	2.94	0.26	0.00	3.79	3.88
	地下（根）	0.20	1.97	0.39	0.02	2.34	1.42

表2.18に茶樹における重金属の現存量を示す。栽培試験終了後、新規下水汚泥肥料および有機質資材を2年間施用した‘やぶきた’52年生樹を堀取り、茶樹における重金属の現存量を調査した。地上部と地下部の現存量は、Cd、Crは地上部に多く、Hgは地下部に多かった。Pb 、As、Niは地上部、地下部でバラツキが見られた。秋肥区、春肥区、秋春肥区における茶樹の重金属現存量は、対照区に対してCd:1～2.1倍、Pb:1.1～2.6倍、As:1.3

表2.19　茶園土壌における重金属の現存量（調査：2022年8月）

（g/10a）

試験区	Cd	Pb	As	Hg	Ni	Cr
秋肥	45	4,133	1,240	17	3,272	65,436
春肥	41	3,788	1,205	24	2,927	86,100
秋春肥	48	3,788	1,102	24	2,996	65,436
対照	34	4,133	1,137	24	2,652	65,436

表2.20　地下浸透水の重金属濃度（2023年度、地下1m）

Cd　mg/L

試験区	4月30日	6月8日	6月16日	6月21日	6月29日	7月12日	7月28日
秋肥	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
春肥	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003
秋春肥	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
対照	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002

Pb　mg/L

試験区	4月30日	6月8日	6月16日	6月21日	6月29日	7月12日	7月28日
秋肥	0.10	0.07	0.04	0.04	0.04	0.06	0.11
春肥	0.04	0.07	0.07	0.04	0.05	0.13	0.09
秋春肥	0.06	0.05	0.03	0.04	0.05	0.10	0.13
対照	0.02	0.04	0.04	0.07	0.07	0.08	0.04

Ni　mg/L

試験区	4月30日	6月8日	6月16日	6月21日	6月29日	7月12日	7月28日
秋肥	0.09	0.09	0.07	0.06	0.05	0.11	0.09
春肥	0.18	0.16	0.11	0.19	0.18	0.32	0.17
秋春肥	0.11	0.12	0.09	0.17	0.13	0.29	0.15
対照	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.57	0.11

～3.3倍、Hg:2～5.9倍、Ni:1.1～1.4倍、Cr:0.8～1.4倍であった。いずれの元素も高い傾向を示したものの、Cd、Ni、Crは対照区の施用量が多く、必ずしも茶樹の重金属現存量と一致しなかったことから、新規下水汚泥肥料の施用による茶樹の重金属含量の影響は小さいと考えられた。

表2.19に茶園土壌における重金属の現存量を示す。茶園土壌における重金属の現存量を、深さ20cm、仮比重0.7として計算した。新規下水汚泥肥料を施用した区におけるCd、As、Ni、Crの土壌の重金属現存量が対照区より高い傾向であった。しかし土壌現存量に対して2年間の重金属施用量は非常に少なく、土壌の重金属現存量に及ぼす影響は少ない量であることから、新規下水汚泥肥料の施用により土壌への重金属蓄積は対照区と同程度と考えられた。

表2.20に地下浸透水の重金属濃度を示す。茶園の通路の深さ１ｍに設置したポーラスカップを用いて、2022(令和4年)度4月～7月の地下浸透水を採取し、重金属濃度を測定した。茶期の4～7月において、新規下水汚泥肥料を施用した秋肥区、春肥区、秋春肥区地下浸透水のCd、Pb、Ni含有率はいずれも対照区と同等であった。また、すべての区においてAs、Hg、Cr含有率は検出限界以下であった。

以上のことから、新規下水汚泥肥料の施用による重金属類の地下浸透は有機質資材を施用する慣行施肥と同等であり、安全性が確認できた。また、新規下水汚泥肥料の施用が茶樹及び茶園土壌に対する重金属蓄積に及ぼす影響は小さいことがわかった。

４．５　新規下水汚泥肥料の利用による肥料費削減効果

４．１．２と４．２の結果から、新規下水汚泥肥料施用による茶葉収量や品質、土壌への影響は現段階では認められず、菜種油粕全量（100%）を新規下水汚泥肥料に置換することが可能と考えられた。また新規下水汚泥肥料の販売価格を原料費、製造規模、人件費等から20円/kgと算出した（サブテーマ1　４．４参照）。この販売価格をもとに茶栽培における年間1haあたりの肥料費を算出した。表1.15に各試験区における1haあたりの肥料費を示す。菜種油粕の50%および全量（100%）を新規下水汚泥肥料に置換とすると、それぞれ18.3%、36.6%の肥料費を削減できることがわかった。また、菜種油粕全量（100%）を新規下水汚泥肥料に置換した試験区は、有機配合肥料区の肥料費よりも安価になった。

肥料価格が高騰している昨今、新規下水汚泥肥料は、地域産業に大きく貢献できると考えられる。

表1.15　1haあたりの肥料費

試験区	秋肥（1）	秋肥（2）	春肥（1）	春肥（2）	芽出し	夏肥（1）	夏肥（2）	1hあたりの肥料費
	（千円）							
1 慣行施肥区	74 a	74 a	103 a	103 a	17 e	85 c	85 d	541
2 新規下水汚泥肥料（50%）区	53 ab	53 ab	74 ab	74 ab	17 e	85 c	85 d	442
3 新規下水汚泥肥料（100%）区	32 b	32 b	45 b	45 b	17 e	85 c	85 d	343
4 配合肥料区	61 c	61 c	60 d	60 d	17 e	85 c	85 d	429

注1）a：菜種油粕 78円/kg、b：新規下水汚泥肥料 20円/kg、c：有機配合肥料A 85.1円/kg、　d：有機配合肥料B 93.9円/kg、
e：硫安 45.9円/kg
注2）新規下水汚泥肥料は目標額

今後は、本研究成果を基盤に、今年5月11日に設立したコンソーシアム「鹿児島県新下水汚泥肥料活用促進コンソーシアム」の組合員（鹿児島工業高等専門学校、鹿児島県農業開発総合センター、農研機構九州沖縄農業研究センター、農研機構農業環境研究部門、鹿児島市、霧島市、ヘンタ製茶（有）、（株）三州衛生公社、（株）日水コン）と協議し、新規下水汚泥肥料の社会実装を目指す。

５．研究目標の達成状況

サブテーマ２目標	目標の達成状況
茶栽培における鹿児島県施肥基準は、窒素を主体に年間窒素施肥量50kg/10aで、一般的に肥料を秋肥、春肥、夏肥に分けて施肥する。新規下水汚泥肥料の特性に応じた施肥法を確立し、慣行栽培の茶葉収量1,517kg/10a（一番茶：582kg、二番茶：509kg、三番茶：426kg 鹿児島県茶業生産動向資料、H30年度）を目指す。加えて茶葉品質や茶園土壌環境への影響を慣行栽培区と比較し、問題なく新規下水汚泥肥料を施用できることを示す。具体的には、茶葉品質については、Codex基準値以下（T-As：2mg/kg、Pb：1mg/kg、T-Hg：0.5mg/kg）とし、茶園への重金属蓄積値について、土壌環境基準値以下とする。また、1haあたりの肥料コストを現在の60万円から20%削減することを目指し、実装化に結びつける。	目標どおりの成果をあげた。 ・新規下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験を実施し、生葉収量・茶葉品質（主要成分（窒素、テアニンなど）、金属・重金属成分：Codex基準以下）から慣行施肥区と同等以上の成果が得られ、菜種油粕の代替肥料として100%利用可能であることがわかった。 ・施肥時期の検討では、新規下水汚泥肥料を秋肥、春肥及び秋肥・春肥として利用できることが、生葉収量・茶葉品質（主要成分（窒素、テアニンなど）の分析で明らかになった。特に、新規下水汚泥肥料を秋肥として利用すると、一番茶の生葉収量が多くなる傾向にあった。品質についても、遊離アミノ酸量が高くなる傾向にあった。 ・新規下水汚泥肥料を施用した土壌中の金属・重金属値は、各試験区とも栽培開始時と比較して微増減したが、統計的有意差は認められなかった（土壌環境基準値以下）。

	・新規下水汚泥肥料は窒素溶脱が少なく、対照区（有機配合肥料）と比較して、環境に優しい肥料であることがわかった。また浸透水中の重金属量は慣行区と同レベルであった。 ・茶樹幼木・成木に対する重金属のマテリアルフローを調査した結果、茶樹、土壌に対する重金属蓄積の影響は少ないことがわかった。 ・菜種油粕の50%及び100%を新規下水汚泥肥料に置換すると、肥料費をそれぞれ18.3%、36.6%できることがわかった。特に菜種油粕を新規下水汚泥肥料に全量（100%）置換すると、当初の目標である20%から大幅に改善できることがわかった。 ・本研究成果の「下水汚泥肥料の施用が茶の収量・品質に及ぼす影響」が、2022年度（令和4年度）の鹿児島県の「研究情報」に採用された。 ・サブテーマ1、2の共通事項として、鹿児島高専、自治体（霧島市、鹿児島市）、国・県の公設機関、地域の環境産業、農林業（茶栽培農家、米農家、竹チップ製造業）、製造業（酒造メーカー）及びコンサル業（下水道コンサル）とで、事業化に向けてコンソーシアムを構築できた。

６．引用文献

1) 財団法人日本土壌協会：土壌機能モニタリング調査のための土壌、水質及び植物体分析法、2001.
2) 環境省：農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る管理基準について、1984. https://www.env.go.jp/hourei/06/000049.html
3) 大場正明：茶樹の更新方法とその後の生育収量および品質への影響、静岡県茶業試験場研究報告、14号、pp.11-16、1989.
4) 森田明雄、小西茂毅、中村順行、清水絹恵、横田博実：チャ品種の育成年度に応じた茶葉中の各種成分含量の変化、育種学研6、pp.1-9、2004.
5) 長崎県農林技術開発センター:近赤外分光法による乾燥茶葉中に含まれるカテキン含有率の簡易推定法、https://www.pref.nagasaki.jp/e-nourin/nougi/theme/result/H25seika-jouhou/shidou/S-25-31.pdf、2013.
6) 静岡県志太榛原農業改良普及センター・静岡県茶業試験場編：茶成分分析のための近赤外分析計マニュアル、2019.
7) 厚生労働省：食品、添加物等の規格基準、1959. https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/shokuhin/jigyousya/shokuhin_kikaku/index.html
8) 鹿児島県・鹿児島県茶業技術協会・一般社団法人鹿児島県茶生産協：茶生産技術指針（7版）、pp. 70、2017.

Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細

（１）誌上発表

＜査読付き論文＞

【サブテーマ１】

1) K.Kuroda,T.Katahira,M.Yamada,I.Uezono,N.Nakamura,T.Yamaguchi,M.Yamauchi： Bioresource Technology Reports,22 101401(2023)
「Co-composting of sewage sludge with plant biomass, and analysis of microbiome relevant to plant growth promotion.」

2) 片平智仁、原田隆大、潟龍平、上薗一郎、中村憲知、山田真義、黒田恭平、碇智、山口隆司、山内正仁：土木学会論文集G（環境）、78(7)、Ⅲ_223-Ⅲ_231（2022）
「新規下水汚泥肥料の量産化技術の開発と茶栽培への適用」

【サブテーマ２】

1) 山内正仁、原田隆大、山田真義、潟龍平、黒田恭平、片平智仁、碇智、山口隆司：土木学会論文集G（環境）、77(7)、Ⅲ_161-Ⅲ_168（2021）
「下水汚泥肥料およびマッシュルーム廃菌床の茶栽培への適用」

＜その他誌上発表（査読なし）＞

【サブテーマ１】

1) 山内正仁：水道公論 12月号、水道新聞社、pp.24-27（2022）
「特別寄稿　下水汚泥と地域バイオマス廃棄物を活用した肥料の開発」

2) 山内正仁、高部祐剛、治多伸介、中村真人、堀部英郎、松下知広、和木美代子、野村洋平：農産業に関わる水・バイオマス循環技術研究委員会、水環境学会誌、44（A）（12）、417-423（2021）
「農産業における水・バイオマス循環利用に関する最近の動向」（下水道関連、2.1　汚泥利用の研究・導入事例を執筆）

【サブテーマ２】

1) 山内正仁：再生と利用、46（170）、pp.85-90（2022）
「研究紹介　厄介者だった下水汚泥の有効利用」

2) 山内正仁：水環境学会誌　43（A）（4）、pp.113-116（2020）
「下水汚泥と地域バイオマスの利用による食用きのこ生産技術の開発と廃培地、炭酸ガスの農業利用」

（２）口頭発表（学会等）

【サブテーマ１】

1) 片平智仁、原田隆大、潟龍平、上薗一郎、中村憲知、山田真義、黒田恭平、碇智、山口隆司、山内正仁：第59回環境工学研究フォーラム（2022）
「新規下水汚泥肥料の量産化技術の開発と茶栽培への適用」

2) 潟龍平、志戸遥風、片平智仁、山田真義、中川路光庸、勝田雅人、黒田恭平、山内正仁：第3回エコテクノロジーフォーラム（2022）
「異なる凝集剤を含む下水汚泥肥料の成分特性と作物栽培への影響」

3) R.Gata, H. Shido, T. Katahira, M. Yamada, K. Kuroda, R. Harada, T.Yamaguchi and M.Yamauchi: 7th STI-Gigaku 2022(2022)
「Mass production test of new sewage sludge fertilizer for practical use and its

Adaptation to tea cultivation」

4) 潟龍平、志戸遥風、原田隆大、片平智仁、山田真義、黒田恭平、中村憲知、上薗一郎、山内正仁：第56回日本水環境学会年会（2022）
「新規下水汚泥肥料の量産化による茶栽培試験への適用」

5) 原田隆大、潟龍平、志戸遥風、片平智仁、山田真義、黒田恭平、中村憲知、上薗一郎、碇智、山口隆司、山内正仁：第58回環境工学研究フォーラム（2021）
「新規下水汚泥肥料の量産化と茶栽培への適用」

6) 原田隆大、森重朱理、片平智仁、山田真義、黒田恭平、佐々木俊郎、種市尚仁、碇智、山口隆司、山内正仁：第57回環境工学研究フォーラム（2020）
「新規下水汚泥肥料の開発とその利用」

【サブテーマ２】

1) 志戸遥風、田尾桃佳、潟龍平、池田匠児、片平智仁、黒田恭平、中川路光庸、勝田雅人、山田真義、山内正仁：2022年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会(2023)
「新規下水汚泥肥料の茶栽培への適用と地下水への影響」

2) 志戸遥風、潟龍平、原田隆大、片平智仁、山田真義、黒田恭平、中村憲知、上薗一郎、碇智、山口隆司、山内正仁：第59回環境工学研究フォーラム（2022）
「新規下水汚泥肥料の茶栽培への適用効果」

3) 中川路光庸、中村憲知、上薗一郎、山内正仁、山田真義、片平智仁、黒田恭平：2022年度日本茶業学会研究発表会（2022）
「新規下水汚泥肥料の施肥時期が茶の収量及び環境負荷に及ぼす影響」

4) 田尾桃佳、志戸遥風、潟龍平、片平智仁、山田真義、中川路光庸、勝田雅人、黒田恭平、山内正仁：第3回エコテクノロジーフォーラム（2022）
「下水汚泥と地域バイオマスで調製した肥料の茶栽培への適用」

5) 志戸遥風、潟龍平、原田隆大、片平智仁、山田真義、山内正仁、黒田恭平、中村憲知、上薗一郎：2021年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会（2022）
「新規下水汚泥肥料の特性と茶栽培への適用」

6) 志戸遥風、潟龍平、原田隆大、片平智仁、山田真義、黒田恭平、中村憲知、上薗一郎、山内正仁：第2回エコテクノロジーフォーラム（2021）
「新規下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験」

7) 中村憲知、中川路光庸、上薗一郎、山内正仁、山田真義、片平智仁、黒田恭平：2021年度茶業学会研究発表会（2021）
「新規下水汚泥肥料の施肥時期が茶の収量・品質に及ぼす影響」

8) R.Harada,R.Gata,H.Shido,T.Katahira,M.Yamada,K.Kuroda,Z.Nagai,M.Nagai,T.Yamaguchi, M.Yamauchi:6th STI-Gigaku2021（2021）
「Application of sewage sludge fertilizer and spent mushroom (*Agaricus bisporus*) substrate on tea (*Camellia sinensis*) cultivation」

9) 原田隆大、潟龍平、山田真義、片平智仁、山内正仁：令和3年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会（2021）
「下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験に関する研究」

10) 原田隆大、潟龍平、山田真義、片平智仁、山内正仁：2020年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会(2021)
「下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験に関する研究」

11) R.Harada,K.Kuroda,T.Watari,T.Yamaguchi,M.Yamauchi: 5th STI-Gigaku2020（2020）
「Application of sewage fertilizer for tea cultivation」

（３）「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ１】【サブテーマ2】共通

1) BISTRO下水道 in 霧島 鹿児島高専 4th （主催：鹿児島工業高等専門学校、2021年12月22日、定員100名に対し、参加者130名、ホテル京セラ）において、「地域産業と連携した下水汚泥肥料の事業採算性の高い循環システムの構築」と題し、講演（山内正仁）。また、「下水道資源を活用した地域循環共生圏形成に向けて」と題し、パネルディスカッションを開催（原田隆大、山田真義、中村憲知、上薗一郎、黒田恭平、邉田孝一（ヘンタ製茶）、種市尚仁（日水コン）、中村真優（ミス日本「水の天使」））。

2) New環境展（主催：日報ビジネス株式会社、2022年5月25～27日、来場者67402人、東京ビックサイト）に参加し、国立高等専門学校機構のブースで「新規下水汚泥肥料の開発による地域循環共生圏の形成」と題し、本研究成果について説明、来場者と意見交換。

3) ビストロ下水道研究発表会 in 鶴岡（共催：鶴岡市、山形大学農学部、2022年8月23日、参加者150名（会場：90名、オンライン：60名、山形大学農学部301講義室）に参加し、「地域産業と連携した下水汚泥肥料の事業採算性の高い循環システムの構築」と題し、講演（山内正仁）。また、パネルディスカッションにパネラーとして登壇し、「下水道資源の農業利用」をテーマに、今後の生産者および消費者への普及拡大方法などについて意見交換を実施（山内正仁）。

（４）マスコミ等への公表・報道等

【サブテーマ１】【サブテーマ２】共通

1) 南日本新聞　（2021年5月25日、15面、「下水汚泥を肥料に」 ）
2) PR TIMES　（2021年10月6日、「厄介者だった下水汚泥を鹿児島高専が有効利用」）
https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000066.000075419.html
3) 西日本新聞　（2022年1月4日、3面、「下水汚泥から茶栽培肥料　鹿児島高専が開発　資源循環とコスト減両立」）、西日本新聞電子版にも掲載。
4) PR TIMES　（2022年1月18日、「地域が元気になるBISTRO 下水道 in 霧島 鹿児島高専4th 開催 」） https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000121.000075419.html
5) 日本下水道新聞（2022年1月26日、10面、「鹿児島高専　ビストロの知見を共有　資源循環でシンポ開催」）
6) 日刊工業新聞　（2022年5月10日、13面、「第49回環境賞に5件」）
7) 水道産業新聞　（2022年6月30日、3面、「下水汚泥と地域バイオマスで肥料」）
8) 日刊工業新聞　（2022年7月12日、10面、11面、「第49回　環境賞　下水汚泥と地域バイオマス廃棄物を活用した肥料の開発」）
9) 環境新聞　（2022年7月27日、9面、「下水汚泥から地域を元気にする方法」）
10) 水道産業新聞　（2022年7月28日、21面、「下水汚泥と地域バイオマスを活用した肥料の開発」）
11) 日本水道新聞社（2022年3月、9頁、「下水汚泥をお茶栽培で活用」、BISTRO下水道パンフレット（令和4年度版）にBISTRO下水道関連の研究事例として紹介、令和5年度　国土交通省発行）

（５）本研究費の研究成果による受賞

1) 原田隆大：下水汚泥肥料を用いた茶栽培試験に関する研究、「優秀発表賞」、日本水環境学会九州沖縄支部、2021年3月16日（原田隆大、潟龍平、山田真義、片平智仁、山内正仁）

2) 鹿児島工業高等専門学校、鹿児島県農業開発総合センター、産業技術総合研究所、（株）日水コン、（株）三州衛生公社：下水汚泥と地域バイオマス廃棄物を活用した肥料の開発、「第49回環境賞/優

良賞」日刊工業新聞社、2022年5月10日

3) 潟龍平：Mass production test of new sewage sludge fertilizer for practical use and its adaptation to tea cultivation,「7th STI-Gigaku 2022 Best Research Presentation Award by Sumitomo Riko Company,(R.Gata,H.Shido,T.Katahira,M.Yamada,K.Kuroda,R.Harada,T.Yamaguchi and M.Yamauchi）,2022年11月18日

4) 山内正仁、原田隆大、山田真義、潟龍平、黒田恭平、片平智仁、碇智、山口隆司：下水汚泥肥料およびマッシュルーム廃菌床の茶栽培への適用、「第58回環境工学研究フォーラム論文賞」、土木学会環境工学委員会 2022年11月29日

（６）その他の成果発表

1) 第23回水環境学会シンポジウム（2020年9月10日）で「下水汚泥利用の新展開～きのこ及び永年作物栽培へ～」と題し講演、意見交換を実施（山内正仁）。

2) 鹿児島県農業開発総合センター令和3年度土壌肥料成績設計検討会（2021年11月26日）で研究情報として、「高分子凝集剤を用いた下水汚泥肥料の肥料特性」と題し発表、意見交換を実施。（上薗一郎）

3) 第2回エコテクノロジーフォーラム（主催：エコテクノロジー研究会、2021年12月4日、鹿児島県霧島市）で「鹿児島における循環型社会形成に関する研究の取り組み」と題し講演。意見交換実施（山内正仁）。

4) 日本水処理生物学会第58回(熊本)大会(2022年11月18日)で「下水汚泥(肥料)の農業利用(Fertilizer & Food）への展開」と題し講演、意見交換実施（山内正仁）。

5) 鹿児島県農業開発総合センター令和4年度土壌肥料成績設計検討会（2022年11月25日）で「地域未利用バイオマス有効活用による新下水汚泥肥料量産化技術の開発」と題し、(1)新規下水汚泥肥料が茶の収量、土壌環境などに及ぼす影響解析（中川路光庸）、(2)新規下水汚泥肥料の窒素無機化試験について（勝田雅人）発表、意見交換実施。

6) （独）環境再生保全機構パンフレット2022に研究成果紹介、8頁「厄介者だった下水汚泥を鹿児島高専が有効利用」

Ⅳ．英文Abstract

Construction of a Highly Business-Profitable Sewage Sludge Circulation System through Composting in Collaboration with Local Industries

Principal Investigator: Masahito YAMAUCHI
Institution: National Institute of Technology, Kagoshima College, Kirishima, Kagoshima, JAPAN
Tel: +81-995-42-9124 / FAX: +81-0995-42-9126
E-mail: yamauti@kagoshima-ct.ac.jp
Cooperated by: Kagoshima Prefectural Institute for Agricultural Development, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

[Abstract]

Key Words: Sewage sludge, Newly developed sewage sludge compost, Tea cultivation, Regional biomass, Regional linking

The objective of this study is to mass-produce newly developed sewage sludge compost (NSSC) using regional biomass and to establish a highly profitable recycling process for tea cultivation. In sub-theme 1, a pilot-scale co-composting process (volume: 5 m^3) was conducted using sewage sludge (dewatered sludge) and plant biomass such as bamboo sawdust, rice bran, and shochu lees, and the process was optimized for the development of the mass production technology of NSSC. In sub-theme 2, we applied the NSSC mass-produced in sub-theme 1 to tea cultivation and evaluated the possibility of using NSSC as a substitute for commercially available organic fertilizers. In addition, we clarified the fertilizer cost reduction effect when using the NSSC for tea cultivation. In the pilot-scale co-composting test of the NSSC, the main components of mineral nitrogen, available phosphate, and soluble potassium were found to be comparable to the target values (N: P_2O_5: K_2O = 4.0%: 3.2%: 1.5%). The main components of the NSSC obtained in the mass production test were within the permissible margin of error (±20%) established by the Fertilizer Control Law, confirming the reproducibility through the co-composting process. Furthermore, by incorporating the results of composting temperature changes and microbiome analyses, the NSSC could be produced within 60 days, the target composting days. As a result of the germination and growth tests of the NSSC using komatsuna, the fresh weight index of the NSSC was significantly higher than that of the commercial sewage sludge compost, indicating its promoting effect on plant growth. In the tea cultivation test using the NSSC, the tea yields were equal to or better than those of the conventionally fertilized areas, indicating that the NSSC can be substituted for rapeseed cake (conventional organic fertilizer) as a fertilizer. The concentration of metals and heavy metals in the NSSC-fertilized soil did not change significantly during the tea cultivation tests, and the values were below the soil environmental standard. In the NSSC-fertilized area, the concentration of nitrogen leaching was lower than that in the conventionally fertilized areas; therefore, the NSSC was found to be an environmentally friendly fertilizer. Besides, the amount of heavy metals in the infiltrated water was similar to that in the conventional areas. This study showed that replacing all rapeseed cakes with the NSSC could reduce fertilizer costs by 36.6%.