

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450083

研究課題名(和文)代替カリ資源としてのバイオマス発電燃焼灰および乾燥海藻の肥料化とその活用

研究課題名(英文) Possible effective use of seaweed collected from Nakaumi Sea and ash discharged from biomass power station as potassium fertilizers

研究代表者

松本 真悟 (Matsumoto, Shingo)

島根大学・生物資源科学部・教授

研究者番号：00346371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：バイオマスボイラー燃焼灰と島根県中海から回収される海藻を肥料化して再利用する技術を検討した。燃焼灰のカリ濃度はバグフィルターから採取されたものが最も高かった(K₂O：15～35%)。燃焼温度が高くなるにつれてカリ濃度は低下した。主に回収される海藻はオゴノリでありカリ濃度は10～15%であった。ポット栽培試験において資材間に有意差は無く、燃焼灰と海藻がカリ鉱石の代替資源となりうる可能性を認めた。

研究成果の概要(英文)：We tried to possible effective use of biomass ash and seaweed as a potassium fertilizer. To evaluate the concentration of potassium in the ash, we collected the ash from different position of the biomass power station. The highest concentration of potassium was observed in the ash collected from the bug filter. The concentration of potassium in the ash depended on the burning temperature. Increase of the temperature decreased the concentration of potassium in the ash. The dominant seaweed collected from Nakaumi Sea was Gracilaria (*Gracilaria vermiculophylla*) which include 10% of potassium. When the ash and seaweed were applied to the soil as potassium fertilizer in the pot experiment, the growth and potassium concentration of komatuna and spinach comparable to potassium chloride. These results suggest that biomass ash and seaweed could reuse as the potassium fertilizer and the reuse of those should be contribute to the efforts to save potassium resources.

研究分野：土壌学・作物栄養学

キーワード：燃焼灰 海藻 カリ肥料 バイオマスボイラー カリウム

1. 研究開始当初の背景

(1) カーボンニュートラルな代替燃料として木質バイオマスが注目されており、これらはバイオマスボイラー発電等に利用されている。また、昨年の福島第一原発の事故以来、原子力発電の危険性が指摘されたことから、国民的に再生可能エネルギーの供給の需要が著しく高まっており、木質バイオマス発電にかかる期待も極めて大きなものとなっている。林野庁においても、「木質バイオマスのエネルギー利用に関する検討会」を開催し、今後のバイオマス発電の推進を重要施策と位置付けることを確認しており、平成 23 (2011) 年 7 月に策定した「森林・林業基本計画」では、平成 32 (2020) 年における燃料用等のパルプ・チップ用材の需要を 600 万 m^3 と見込んでおり、今後、木質バイオマスのエネルギー利用を更に推進していくこととしている。

(2) 島根県と鳥取県にまたがる中海は淡水と海水が混じりあう汽水湖である。斐伊川水系の河口部にあって、宍道湖と一連の汽水域を構成しており、その面積は日本で 5 番目である。昭和 40 年代前半に食糧増産を目的とした大規模干拓が国の重点施策となり、30 年にわたって干拓・淡水化事業が続けられた。その後、減反政策への転換による農政の変化および社会的な環境保全意識の高揚により、中海干拓・淡水化事業は中止された。近年は漁業の再生ならびに環境修復に関する取り組みが活発に行われ、水質浄化への期待が高まっている。その中で、藻場の再生は重要な取り組みではあるが、打ち上げられる藻類を放置すると腐敗が進み、水質を悪化させることが問題であり、適正に回収する必要がある。平成 21 および 22 年度には水産庁が約 1,000t の海藻の回収を実施しているが、

2. 研究の目的

(1) ほとんど廃棄物として処分されているバイオマス発電の燃焼灰が肥料として活用できれば、発電業者の経営的負担を軽減するだけでなく、カリ鉱石を 100% 輸入に頼っている日本における代替カリ資源の確保にもつながると考えられる。いわゆる有機質肥料にはカリ含量が 1% 未満のものがほとんどである。結局現状では、これまた輸入品であるパームアッシュに依存しているが、木質バイオマス燃焼灰はそれに代わる有望な資源であるといえる。

(2) 前記したように陸上の有機質肥料のカリ濃度は 1% 未満のものが多く、有機農業者にとってはカリウムの供給源に苦慮している現状にある。海藻のようにカリウム濃度が高い有機質肥料は他には見当たらず、これを肥料化できれば、有機農業における有益なカリ肥料となるばかりではなく、カリ資源としてみた場合にも、そのメリットは大きい。

(3) 本研究は、カリウムの代替資源となりうるバイオマス発電燃焼灰および島根県中海で回収される海藻類の理化学分析を行ってその資源としての特性を明らかにし、植害試験(コ

マツナ、ハウレンソウ)を行ったうえで、肥料登録(副産カリ肥料または副産複合肥料)を目指す。

3. 研究の方法

(1) 一般的なバイオマス発電は 700~850°C の温度で木質バイオマスを燃焼して発電を行っている。一方、本研究がターゲットにしているカリウムの沸点は 774°C であり、燃焼温度によっては揮散されてしまう場合がある。そこで、ボイラーの燃焼温度の違いによって、燃焼灰に含まれるカリウムをはじめとする元素の濃度が異なるかどうかを検証する。本実験は申請者と協力関係にある中国木材株式会社(広島県呉市)の発電プラントを通じて行った。カリウムの揮散と吸着が起こる可能性があるため、燃焼灰の採取位置を A, B, C の三か所に設置し、どの場所で灰を採取した場合に最もカリウムなどの肥料成分濃度が高くなるのかを検証する。

(2) カリ資源としての有望性を検討するために、島根県中海に 14 か所の地点を設定し、年間を通じて海藻を採取し、採取量の季節変動およびカリをはじめとする肥料成分の地点別、季節別の変動を明らかにすることにより、カリ資源としての有用性を評価する。本実験は既に回収事業を実施している NPO 法人防人ネットワーク(鳥取県境港市)の協力のもとに行う。

(3) コマツナおよびハウレンソウを供試作物として、ポット栽培試験(1L 容)を実施する。土壌特性の違いにより、含有されるカリウムの有効化に違いがあることを想定し、供試土壌は灰色低地土、赤色土、黒ボク土とする。それぞれの土壌に塩化カリ(対照)、バイオマス燃焼灰および乾燥海藻を K20 として 75, 150, 225mg/kg 乾土の割合で添加し、コマツナおよびハウレンソウを栽培する。窒素およびリン酸の添加量はそれぞれ 150mg/kg とする。栽培期間中の土壌溶液中のカリ濃度を測定し、資材に含有されるカリウムの溶出・有効化を評価する。また、発芽率の調査により植害作用の有無を調査する。さらに、4~5 週間栽培した後に地上部を採取し、乾物重、カリ吸収量を測定し、カリ肥料としての有効性を評価する。これらの調査結果をもとにして、肥料登録の試料を作成する。

4. 研究成果

(1) 燃焼灰の理化学分析: 一般的なバイオマス発電は 500~850°C の温度で木質バイオマスを燃焼して発電を行っている。一方、本研究がターゲットにしているカリウムの沸点は 774°C であり、燃焼温度によっては揮散されてしまう場合がある。そこで、ボイラーの燃焼温度の違いによって、燃焼灰に含まれるカリウムをはじめとする元素の濃度が異なるかどうかを検証した。本実験は中国木材株式会社(広島県呉市)の発電プラントを通じて行った。この発電プラントの概要を図 1 に示したが、上記したように、カリウムの揮散と吸着

が起る可能性があるため、燃焼灰の採取位置をA(マルチサイクロン)、B(バグフィルター)、C(灰加湿器)の三か所に設置し、どの場所で灰を採取した場合に最もカリウムなどの肥料成分濃度が高くなるのかを検証した。

また、それぞれ燃焼温度の異なる3基のバイオマス発電プラント(K工場(850°C)、G工場(700°C)、I工場(550°C))から燃焼灰を回収し、燃焼温度の違いが灰の成分に及ぼす影響を検討した。燃焼灰のカリ濃度は回収位置で異なり、バグフィルターから採取されたものが最も高濃度のカリを含んでいた(図2)。また、燃焼温度が高くなるにつれてカリ濃度は低下した。

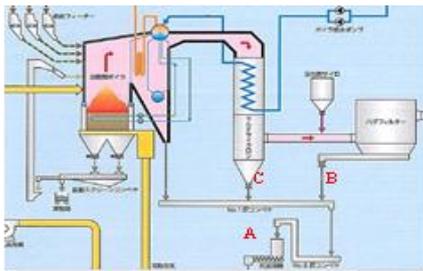


図1. バイオマス発電ボイラーの模式図

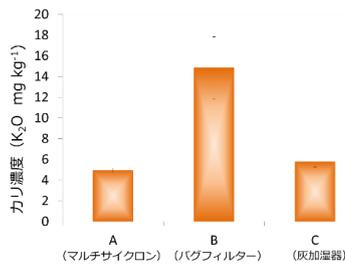


図2. バイオマスボイラーの異なる一から排出される燃焼灰のカリ濃度

表1. 異なる工場のバグフィルターから採取された燃焼灰のカリ、石灰、苦土濃度

工場	K ₂ O(%)		CaO(%)		MgO(%)	
	塩酸抽出	水抽出	塩酸抽出	水抽出	塩酸抽出	水抽出
K工場	14.9	11.1	21.0	3.2	3.3	0.01
G工場	17.1	-	14.6	-	2.3	-
I工場	35.6	28.4	16.6	3.9	2.3	0.01

K工場の燃焼灰に比べてG工場のカリ濃度が高い値を示した(表1)。両工場のボイラーの燃焼温度は異なり、G工場は約600°C、K工場は850°Cで燃焼させている。前述のように、カリの沸点は774°Cであるため、本社工場の燃焼灰ではカリが揮散している可能性が考えられた。I工場の燃焼温度は550°C程度と低く、バグフィルターで採取した燃焼灰(塩酸抽出)は35%と極めて高い値を示した。これは現在輸入されているパームアッシュを凌駕する濃度であった。K工場のバグフィルターで採取された燃焼灰もI工場には及ばないものの、

塩酸抽出で約15%、水抽出で約11%となり、副産カリ肥料の基準値である水溶性カリ9%を満たすものであった。

以上のように、工場内の採取位置および燃焼温度でカリ濃度が異なるのは、燃焼中に揮散したカリが、バグフィルター内で冷やされて、蓄積した結果ではないかと推察される。そのため、燃焼灰の肥料化にあたっては、灰の採取位置や燃焼温度が重要な要素となり、灰の排出ラインの設計を工夫する必要があると考えられた。

(2) 海藻の理化学分析: 島根県中海に14か所の地点を設定し、年間を通じて海藻を採取し、採取量と成分含量の季節変動を調査した。14地点から合計8種類の藻類が採取され、その内訳は褐藻1種、緑藻4種、紅藻2種であった(図3)。このうち、紅藻は2種とも多くの地点で採取されており、特にオゴノリ(シラモ)は中海に多く生育していることが明らかとなった。今回の調査で採取された海藻はカリウムを多く含有しているものが大部分を占めた。特に、オゴノリ(シラモ・ツルシラモ)はいずれの採取地点においてもカリウム濃度は8.25-9.22%と高い値を示した(表2)。一方、市販の有機質肥料はカリウム濃度が低いために、多くの有機栽培農家ではカリ肥料として草木灰を作り利用している。このことから、中海の海藻をカリウム肥料として活用できる可能性が示された。なかでも、オゴノリは中海の広範囲に渡って生息していることから供給量も確保できると考えられる。

安定した海藻肥料の供給体制の構築を考えるにあたり、海藻の種類によって繁茂する時期が異なるため、種別により同一地点で経時的に採取し時期別の成分組成等の調査が必要である。更に、農業利用の際には藻を乾燥させる必要があり、採取時期は夏期が望ましいと考えられることから、特に夏期の生育状況および成分の詳細な調査が必要である。

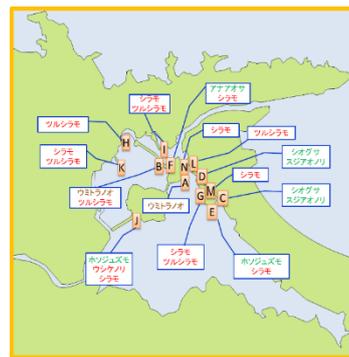


図3. 中海の14地点で採取された海藻の種類

表2. 中海の海藻の無機成分濃度(%)

種類	全窒素	全リン酸	全K ₂ O	全CaO	全MgO	採取物に占む		
						炭素	C/N	
ウミトリアオ	褐藻	3.34	0.35	9.03	0.94	1.40	30.62	9.17
ホソジュズモ	緑藻	3.06	0.37	10.78	0.58	0.72	28.47	9.37
シオグサ	緑藻	2.05	0.45	4.55	1.50	3.04	24.89	14.28
スジアオリ	緑藻	1.64	0.42	4.36	0.74	5.41	20.76	12.69
アナアオサ	緑藻	2.51	0.62	2.60	0.38	4.25	34.32	13.66
ウシケノリ	紅藻	2.85	0.35	12.64	0.42	1.22	25.65	9.01
ナガオゴノリ(ツルシラモ)	紅藻	2.70	0.52	11.11	1.09	0.63	29.59	11.31
オゴノリ(シラモ)	紅藻	2.95	0.54	9.94	1.28	0.52	30.99	10.73

(3) 燃焼灰および海藻を施用したコマツナとハウレンソウのポット試験

燃焼灰のカリ肥料としての評価を行うために、三種類の土壌を供試して、コマツナとハウレンソウの栽培試験を行った結果を表3、図4、5に示した。コマツナの乾物重はいずれの土壌においても一般的な化学肥料である塩化カリと燃焼灰および海藻の差は認められず、燃焼灰と海藻がカリ肥料として十分評価に値すると考えられた。一方ハウレンソウにおいては、沖積土壌では燃焼灰の施用量の増加に伴って乾物重が増加し、塩化カリを上回る値を示した(表3)。また、赤色土壌では塩化カリの場合、ハウレンソウの乾物重は極めて小さくなった。これは供試した赤色土壌のpHが低く、酸性に弱いハウレンソウの生育が抑制されたものであった。これに対し、燃焼灰および海藻では、良好な生育を示した。これらの結果は、燃焼灰の施用によるアルカリ効果(酸度矯正)によるものと考えられた。以上の結果から、燃焼灰と海藻はカリ肥料としての効果は化学肥料である塩化カリと遜色ないと考えられ、肥料化は十分に可能であることが示唆された。

表3. 燃焼灰及び海藻を施用して栽培したコマツナ並びにハウレンソウの乾物重とカリ吸収量

	コマツナ		ハウレンソウ	
	乾物重 (g/ポット)	カリ吸収量 (mg K/ポット)	乾物重 (g/ポット)	カリ吸収量 (mg K/ポット)
土壌				
	黒ボク	3.47 a	220 a	2.09 a
	灰色低地土	4.95 b	272 b	4.19 b
	赤色土	3.65 a	236 a	2.03 a
肥料				
	塩化カリ	3.80 a	271 a	2.03 a
	燃焼灰	4.00 ab	245 b	3.35 c
	乾燥海藻	4.28 b	212 c	2.92 b
施用量				
	75	3.99	206 a	2.57
	150	4.15	255 b	2.89
	225	3.95	267 b	2.91
分散分析表				
土壌	****	****	****	****
肥料	*	****	****	****
施用量	NS	****	NS	****
土壌×肥料	NS	****	****	****
肥料×施用量	NS	NS	NS	*
土壌×肥料×施用量	NS	NS	NS	NS

(4) 酸処理による木質バイオマス燃焼灰の肥料原料としての利用

複合肥料の原料として木質バイオマスボイラー燃焼灰を活用する場合、pHが高いために窒素肥料と混合するとアンモニアが揮散すること、微粒子で比重が軽いため発塵が起こり、作業性が著しく悪化することなどの問題がある。そこで、燃焼灰とリン酸および亜リン酸溶液の混合比率を6:4とすることで処理品のpHが弱酸性となること、粒径1mm以上の割合が50%以上となることを見出し、燃焼灰の肥料化の可能性を示した(表4)。

表4. 燃焼灰の肥料化のための酸処理による成分と粒径の変化

	成分分析(%)						
	pH	TP	CP	WP	CK	WK	CMg
本質燃焼灰	12.18	1.41	1.39	ND	26.9	25.4	2.2
リン酸処理	6.81	26.97	—	12.89	22.6	20.6	1.5
亜リン酸処理	6.71	26.67	—	15.97	25.5	23.8	1.5
硫酸処理	4.47	1.1	—	0.15	21.4	21.0	1.4

	仮比重	粒度分布(%)				計
		16me<	16-32	32me>	(0.5mm<)	
本質燃焼灰原料	0.4	18.4	21.6	60	100	
リン酸処理	0.65	57.6	24.5	17.9	100	
亜リン酸処理	0.68	51.2	27.5	21.3	100	

作成した燃焼灰の酸処理品を用いてコマツナおよびハウレンソウのポット栽培試験を行い、木質バイオマス燃焼灰のカリ肥料としての肥効および収穫物の安全性について検討し

た。ポット栽培試験は島根大学生物資源科学部附属本庄総合農場内の無加温ビニルハウスで行った。片倉チッカリン(株)で作成された燃焼灰の酸処理品 No.1(リン酸処理), No.2(亜リン酸処理), No.3(硫酸処理)を供試肥料とし、塩化カリを対照とした。灰色低地土を供試土壌とし、それぞれの肥料をK₂Oとして、75, 150, 225mg kg⁻¹施用した。窒素は硫酸を用いて、すべての処理区で150mg kg⁻¹施用した。リン酸はリン酸含量が最も高いNo.2の燃焼灰酸処理品の225mg kg⁻¹施用量の施用量に合わせて、不足分を過リン酸石灰で補てんし、すべての処理区で318mg kg⁻¹となるように施用した。施肥した土壌を1L容ポットに充てんし(乾土1kg相当), 2014年10月31日にコマツナおよびハウレンソウを播種した。播種後2週間までに間引きを行い、2株/ポットに調整し、12月24日に収穫した。試験は3連で行った。

収穫時のコマツナおよびハウレンソウの乾物重は処理間に有意差は認められず、燃焼灰由来肥料の肥効は塩化カリと同等であることが明らかとなった(表5)。これは、木質バイオマス燃焼灰に含まれるカリのほとんどが水溶性であることから、コマツナおよびハウレンソウによるカリの吸収は塩化カリ同様に容易であり、生育の制限要因にはならないことを示していると考えられた。一方、コマツナのカリ吸収量は木質バイオマス燃焼灰を亜リン酸処理したNo.2で塩化カリよりも有意に高くなった。亜リン酸は土壌への吸着がリン酸よりも小さいため、その肥効が高く、生育が促進されたため、カリの吸収量の増加につながったものと考えられた。

表5. 燃焼灰酸処理品を用いて栽培したコマツナおよびハウレンソウの乾物重とカリ吸収量

カリ肥料	コマツナ		ハウレンソウ	
	乾物重 (g/ポット)	カリ吸収量 (mg/ポット)	乾物重 (g/ポット)	カリ吸収量 (mg/ポット)
リン酸処理	4.44	167ab	2.48	133
亜リン酸処理	4.66	195a	2.91	147
硫酸処理	4.43	180ab	2.94	149
塩化カリ	4.32	162b	2.69	133
分散分析	NS	*	NS	NS

カリ肥料施用量を共変量とした共分散分析(施用量は150mg/ポットに調整)危険率5%で有意差あり、**危険率1%で有意差あり異なるアルファベット間に有意差あり(Tukey法, p<0.05)

コマツナの無機成分濃度を表6に示した。施用肥料の違いはカリウム濃度において有意であったが、処理間の有意差は認められなかった。また、施用肥料の違いはリン酸濃度にも有意であり、処理間に有意差が認められた。これは上述したようにNo.2は木質バイオマス燃焼灰をリン酸に比べて土壌中での吸着が少ない亜リン酸で処理したものであり、コマツナによるリン酸の吸収が多かったためと考えられる。コマツナ中の亜鉛、銅およびカドミウム濃度には処理間に有意な差は認められなかった。このため、木質バイオマス燃焼灰をカリ肥料として使用した場合の安全性には問題がなく、慣行化学肥料である塩化カリと

同様であることが明らかになった。ハウレンソウの無機成分濃度に対する施用肥料の違いはカルシウムでは有意であったが（但し、処理間の有意差は無し）、カリ、マグネシウム、リン酸においては有意ではなかった（表7）。また、銅およびカドミウムにおいては塩化カリに比べてやや高くなる傾向が認められたが、有意差は認められなかった。ハウレンソウはカドミウムを吸収しやすい代表的な野菜の一つであるが、この場合も有意差が認められなかったことは、木質バイオマス焼灰の安全性には問題がないことを示していると考えられた。

表6. 焼灰処理品を用いて栽培したコマツナの無機成分含有率

カリ肥料	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	P2O5 (%)	Zn (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)
No.1	5.58	0.26	0.65	1.75	100.1	9.75	0.75
No.2	5.08	0.27	0.55	1.61	90.8	9.08	0.62
No.3	5.21	0.21	0.52	1.80	113.6	8.37	0.78
塩化カリ	5.01	0.22	0.55	1.57	94.6	7.60	0.55
分散分析	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS

表7. 焼灰処理品を用いて栽培したハウレンソウの無機成分含有率

カリ肥料	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	P2O5 (%)	Zn (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)
No.1	3.76	0.90	0.22	1.04	29.4	6.51	0.32
No.2	4.20	0.92	0.23	1.23	41.0	6.33	0.30
No.3	4.07	0.99	0.23	1.09	32.2	5.75	0.31
塩化カリ	3.76	0.97	0.22	1.15	47.8	6.09	0.26
分散分析	*	NS	NS	**	NS	NS	NS

以上の結果から、木質焼灰をリン酸、亜リン酸および硫酸で処理して中和と造粒を行った場合、肥料工場における焼灰由来肥料の大量生産が可能であり、それぞれの酸処理品のカリの肥効は慣行化学肥料である塩化カリと同等以上であることおよびその安全性に問題がないことが確認された。

林野庁では年間 2,000 万 m³ 発生する林地残材等のうち「森林・林業基本計画（平成 23 年 7 月策定）」で平成 32 年における燃料用等のパルプ・チップ用材の利用目標を 600 万 m³（6,000 千 m³）と見込んでおり、それを木質バイオマス発電した場合の焼灰の処分費を計算（林地残材のかさ比重 0.4 [ton/m³]）すると焼灰の処分費は総額 9.6 億円必要となる。本研究で示したように、木質バイオマス焼灰を肥料として有効利用できれば処分費は削減できるだけでなく、カリ資源として確保することが可能となり、今後の日本農業にとって大きなメリットとなるであろう。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 3 件）

①松本真悟・春日純子、宍道湖・中海から回収される海藻・水草の有機質肥料としての利用可能性、汽水域研究会第 4 回例会、2016 年 1 月 9 日、島根県労働会館（松江市）

②松本真悟・春日純子・野口勝憲、酸処理による木質バイオマス焼灰の肥料原料として

の利用、日本土壤肥料学会 2015 年度京都大会、2015 年 9 月 9 日～11 日、京都大学（京都市）

③松本真悟・春日純子・野口勝憲・竹下新・松岡秀尚、代替カリ資源としての木質バイオマス焼灰と乾燥海藻の利用可能性、日本土壤肥料学会 2013 年度名古屋大会、2013 年 9 月 11 日～13 日、名古屋大学（名古屋市）

〔図書〕（計 1 件）

①松本真悟、土壤養分の種類・形態とその移動性・可給性. 土のひみつ（日本土壤肥料学会「土のひみつ」編集グループ編、ISBN:978-4-254-40023-6）. 朝倉書店、東京、pp. 60-63（2015 年 9 月）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

①木質焼灰を原料とした化成肥料の登録、登録番号：生第 93665 号、肥料の種類：化成肥料、肥料の名称：化成肥料 26-22. 肥料成分：CP26.0 (WP13.0) CK22.0 (WK21.0) CMg1.0, 2013 年 12 月 25 日、片倉チッカリン(株)

②木質焼灰兵庫県届出、届出番号：兵特肥第 1140 号、肥料の名称：木質バイオマス焼灰 K, 2013 年 12 月 19 日、片倉チッカリン(株)

③島根大学発ベンチャー「株式会社なかうみ海藻のめぐみ」の設立

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 真悟 (MATSUMOTO SHINGO)
島根大学・生物資源科学部・教授
研究者番号：00346371

(2) 研究分担者 ()
研究者番号：

(3) 連携研究者 ()
研究者番号：