竹炭の成分組成から見た土壌改良資材としての特徴

誌名	日本土壌肥料學雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者名	南雲,俊之 安藤,真奈実 森,智郁
発行元	日本土壌肥料學會
巻/号	85巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 37-42
発行年月	2014年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

AgriKnowledge

ノ　ー　ト

竹炭の成分組成から見た土壌改良資材としての特徴

南雲俊之・安藤真奈実・森　智郁

キーワード　炭化物，竹炭，土壌改良材

1．はじめに

近年，放棄竹林の拡大が景観や生態系保全の観点から問題視されている（木村ら，2007）．ボランティア団体等による放棄竹林の保全整備活動が各地で行われており（林野庁研究・保全課，2010），行政支援もなされている．これらのボランティア団体の多くは竹炭を生産し，竹材活用に取り組んでいる（草葉・デワンカー，2009）．日本国内で生産される竹炭は約1000トンに達し，その4割が土壌改良資材を含む農業用とされ（林野庁，2012），すでに土壌改良資材としての竹炭利用が始まっている．

木炭は地力増進法で政令指定された土壌改良資材であり，土壌物理性の改善だけでなく，塩基補給や土壌の酸性矯正に効果が認められている（今野・西川，1993；磯部ら，1996；原，2003）．植物残渣や家畜排泄物の炭化物はリン・カリウム肥料としても期待されている（松丸・真行寺，2005；真行寺ら，2009；佐野ら，2011）．これらの多様な炭化物を与えた栽培試験のメタアナリシスは，土壌の化学性・物理性改善による有意な作物収量の増加を示した（Jeffery *et al.*, 2011；Biederman *et al.*, 2013）．炭化物の土壌施用は，作物生産の向上だけでなく，地球温暖化の防止にも役立つと期待されている．それは，温室効果ガスの発生を抑制し（Rogovska *et al.*, 2011；Liu *et al.*, 2011；上野ら，2012），土壌炭素貯留にも働くからである（Spokas, 2010；Rogovska *et al.*, 2011）．

しかし，竹炭に限ってみると，土壌改良資材としての作物収量や品質に対する効果を検討した報告は極めて少ない（野田，2005；朝木，2006；浦田ら，2007）．吸着剤として細孔構造や吸着性能を明らかにし，その製造条件（炭化温度，賦活法など）を検討した報告は多いものの（安部ら，2004；Asada *et al.*, 2006；脇坂ら，2006；伴野ら，2009；Yamashita and Machida, 2011），そもそも竹炭成分の報告例が少ない．そのため，竹炭のpHや養分元素含有率を作物の養分利用性と関連づけた事例はほとんどない（朝木，2006）．竹炭の成分組成を木炭と比較した研究はあるものの（藤原ら，2003），堆肥等と比較した研究は見当たらない．土壌改良資材としての竹炭の成分組成の特徴を，その変動とともに，明らかにする必要がある．

また，炭化物は植物生育阻害物質となりうるフェノール化合物や多環芳香族炭化水素（PAHs）をしばしば含み，これらの物質によると推察されるトウモロコシ種子の発芽阻害（Rogovska *et al.*, 2012）やラディッシュ幼根の成長阻害（Deenik *et al.*, 2010）が報告された．竹酢液に検出されるフェノール化合物やPAHs（駒形・本山，2004）が竹炭に残留する可能性があり，また，竹炭にPAHsが検出されている（Freddo *et al.*, 2012）．

そこで本研究では，日本国内で流通している竹炭を分析し，土壌改良資材としての竹炭成分の特徴と変動を明らかにするとともに，植物生育阻害物質を含まないことを確認しようとした．

2．材料および方法

1）供試竹炭

竹炭は関東以西の12都府県から「土壌改良資材」あるいは「園芸用」と称した15種類を入手し，実験に供した．竹炭の多くは屑炭や粉炭であった．これらの竹炭は経験的に炭焼きしたものが多く，その炭化条件は十分把握できなかった．しかし，400℃位までの比較的低温で炭化したもの（高知－1，宮崎，福岡）から800℃以上の高温で炭化したもの（東京，奈良，大阪，高知－2），ロータリーキルン（回転式連続炭化炉）で1時間の急速炭化したもの（高知－2）や窯出しまで1週間以上かけてゆっくり製造したもの（奈良，高知－1，宮崎），精錬工程があるもの（静岡－1，愛知，福岡－2）とないもの（静岡－2，香川，高知－1，－2，宮崎）が含まれた．多くの産地から竹炭を集めたことで，結果として，多様な炭化条件の竹炭が含まれた．

2）竹炭の成分分析

竹炭はあらかじめ粉砕し（<2mm），竹炭のpH，ECや養分元素組成を明らかにするために，以下の実験を行った．水分含有率は105℃ 24時間乾燥して求めた．pHとECは1：5水懸濁液で測定した（日本土壌協会，2000）．全炭素含有率と全窒素含有率は乾式燃焼法（スミグラフNC－95A），有機態炭素含有率はチューリン法で測定した（日本土壌協会，2000）．アンモニウム態と硝酸態窒素は2M KClで抽出し（1：10），それぞれインドフェノール法，亜鉛還元－ナフチルエチレンジアミン法（LR－NO_3，共立理化学研究所）により測定した．リンと塩基の全含有率は，硝酸－過塩素酸分解を行い，それぞれバナドモリブデン酸法，原子吸光光度法（ThermoFisher Scientific iCE－3300）で測定した（日本土壌協会，2000）．交換性塩基は亀和田・柴田（1997）の方法で抽出した．水溶性イオ

Toshiyuki NAGUMO, Manami ANDO and Chika MORI：Bamboo biochar characterized by nutrient composition as soil amendment
静岡大学農学部（422－8529 静岡市駿河区大谷836）
Corresponding Author：南雲俊之
2013年5月9日受付・2013年9月30日受理
日本土壌肥料学雑誌 第85巻 第1号 p.37～42（2014）

ン含有率の測定には1：5水抽出液を用いた．交換性と水溶性の塩基含有率は原子吸光光度法で測定した．水溶性リン酸はモリブデンブルー法，塩化物と硫酸イオンはイオンクロマトグラフ（Shimadzu PIA1000）で測定した．同じ水抽出液で，水溶性ケイ素含有率（モリブデンブルー法）も測定した．これらの測定は，全て2反復で行なった．

また，竹炭に植物生育阻害物質が含まれていないか確認するため，幼植物検定法の1つである発芽試験を行った．発芽試験は1：20熱水抽出液を調製し，発芽阻害物質に対する感受性が高いとされるコマツナ品種グリーンフライトを用いて（熊谷・山口，2004），50粒3反復で行った．対照区（脱イオン水）の発芽率が100％となった播種4日目に発芽率，根毛発生種子率を測定した．

3．結　　果

竹炭成分の分析結果を表1に示す．竹炭の水分含有率は中央値8.1％で，大部分が10％以下であった．測定されたpHは8.4～10.3の範囲にあった．また，竹炭のECは60～1160 mS m^{-1}の範囲にあり，堆肥の基準値500 mS m^{-1}（生雲ら，2007）を超える竹炭が4つ含まれた．

竹炭の全炭素含有率は中央値830 mg g^{-1}，四分位範囲799～865 mg g^{-1}であり，値の変動は小さかった．ところが，全有機態炭素含有率は全炭素含有率より少なく，中央値377 mg g^{-1}，四分位範囲327～497 mg g^{-1}であった．つまり，チューリン法で測定されない炭素量が187～570 mg g^{-1}あると見積もられ，その全炭素含有率に対する割合は21～69％に及んだ．一方，全窒素含有率は中央値5.3 mg g^{-1}，四分位範囲5.0～5.6 mg g^{-1}であった．KCl可溶無機態窒素含有率は7～22 μg g^{-1}であり，全窒素含有率に占める割合は0.13～0.40％であった．

全リン含有率は中央値0.5 mg g^{-1}で，0.3～3.8 mg g^{-1}の範囲にあった．そのうち，水溶性リン含有率は0.1～0.5 mg g^{-1}の範囲にあり，全リンの14～38％を占めた．

竹炭に含まれた塩基は，全カリウム含有率が中央値で12.3 mg g^{-1}（四分位範囲9.7～19.3 mg g^{-1}）ともっとも多く，次いでマグネシウムの3.1（2.8～4.8），カルシウムの0.4（0.3～0.6）とナトリウムの0.3 mg g^{-1}（0.2～0.4 mg g^{-1}）の順であった．竹炭中の主要な塩基はカリウムであった．また，この竹炭中カリウムの多くは交換性・水溶性イオンとして存在したのに対して，カルシウムやナトリウムでは交換性・水溶性でない形態で存在する割合が高かった．竹炭の水溶性カリウム含有率は中央値2.9 mg g^{-1}（四分位範囲1.5～4.7 mg g^{-1}）であり，全カリウムの平均23％を占めた．水溶性カリウムを含む交換性カリウム含有率では中央値6.8 mg g^{-1}（四分位範囲3.7～10.5 mg g^{-1}）と，全カリウムの平均51％を占めた．ただし，竹炭を個別に見ると，全カリウム含有率で最大13倍，水溶性カリウム含有率では最大20倍もの大きな変動があった．竹炭の交換性および水溶性カリウム含有率とECとの間には有意な正の相関があり（$p<0.001$），

表1　竹炭成分の分析結果

産地[1]	千葉県（1），東京都（1），神奈川県（1），静岡県（2），愛知県（1），奈良県（1），大阪府（1），香川県（1），高知県（2），福岡県（2），宮崎県（1），鹿児島県（1）						
		中央値	四分位範囲	最小値	最大値	平均値	標準偏差
水分[2]	%	8.1	6.6 ～ 9.6	5.8	20.1	9.2	4.0
pH		9.9	9.5 ～ 10.1	8.4	10.3	9.7	0.6
EC	mS m^{-1}	338	91 ～ 486	60	1160	350	319
全炭素（TC）[3]	mg g^{-1}	830	799 ～ 865	725	878	825	44
有機態炭素（Org-C）	mg g^{-1}	377	327 ～ 497	259	691	424	130
⊿（TC-Org-C）	mg g^{-1}	436	310 ～ 478	187	570	401	115
全窒素[3]	mg g^{-1}	5.3	5.0 ～ 5.6	3.5	6.2	5.2	0.8
KCl可溶 NH_4-N	μg g^{-1}	7.1	6.5 ～ 7.5	5.9	10.1	7.2	1.1
KCl可溶 NO_3-N	μg g^{-1}	1.4	0.8 ～ 1.8	0.7	14.8	2.4	3.5
全リン[3]	mg g^{-1}	0.50	0.35 ～ 1.25	0.30	3.77	1.05	1.07
水溶性リン	mg g^{-1}	0.15	0.09 ～ 0.36	0.05	0.54	0.24	0.17
全カリウム[3]	mg g^{-1}	12.3	9.7 ～ 19.3	2.2	28.9	15.0	7.8
交換性[4]	mg g^{-1}	6.8	3.7 ～ 10.5	1.9	21.1	7.8	5.3
水溶性	mg g^{-1}	2.9	1.5 ～ 4.7	0.6	12.5	3.7	3.2
全マグネシウム[3]	mg g^{-1}	3.09	2.84 ～ 4.83	2.31	6.56	3.72	1.26
交換性[4]	mg g^{-1}	0.60	0.46 ～ 0.74	0.38	1.44	0.68	0.29
水溶性	mg g^{-1}	0.17	0.07 ～ 0.20	<0.01	0.73	0.17	0.17
全カルシウム[3]	mg g^{-1}	0.38	0.31 ～ 0.62	0.21	2.15	0.68	0.64
交換性[4]	mg g^{-1}	0.12	0.10 ～ 0.15	0.08	0.32	0.15	0.07
水溶性	mg g^{-1}	0.01	<0.01 ～ 0.01	<0.01	0.02	0.01	0.00
全ナトリウム[3]	mg g^{-1}	0.30	0.24 ～ 0.35	0.22	0.65	0.33	0.12
交換性[4]	mg g^{-1}	0.04	0.02 ～ 0.05	0.01	0.16	0.05	0.04
水溶性	mg g^{-1}	0.01	0.01 ～ 0.02	<0.01	0.04	0.01	0.01
水溶性ケイ素[3]	mg g^{-1}	0.027	0.021 ～ 0.060	0.016	0.194	0.054	0.057
水溶性 Cl イオン[5]	mg g^{-1}	1.09	0.49 ～ 2.22	0.23	2.68	1.27	0.89
水溶性 SO_4 イオン[5]	mg g^{-1}	0.18	0.16 ～ 0.32	0.02	0.54	0.24	0.16

[1] 産地県に付したカッコの数値は入手した竹炭数を示す．[2] 水分含有率は竹炭現物重量あたりの水分量．[3] 竹炭乾燥重量あたりの元素量（酸化物表示でない）．[4] 水溶性塩基を含む．[5] 竹炭乾燥重量あたりのイオンとしての含有量．

全カリウム含有率とECの間にも有意な正の相関があった（$p<0.001$）（図1）．しかし，他の塩基とECとの間には有意な相関はなかった（$p>0.17$）．

水溶性ケイ素含有率は0.02～0.19 mg g^{-1}の範囲にあった．水溶性塩化物イオンは中央値1.1 mg g^{-1}（四分位範囲0.5～2.2 mg g^{-1}），硫酸イオンはこれよりさらに少なく0.2 mg g^{-1}（四分位範囲0.2～0.3 mg g^{-1}）であった．

発芽試験の結果を図2に示す．対照区の発芽率が100％，根毛発生種子率が92％であったのに対して，竹炭抽出液での発芽率は98～100％，根毛発生種子率は82～89％となった．Dunnettの多重比較検定（$p<0.05$；カレイダグラフ v.4.0，ヒューリンクス）を行なったが，竹炭抽出液での発芽率と根毛発生種子率はいずれも対照区との間に有意差がなかった．

4．考　　察

本研究では，土壌改良資材としての竹炭成分の特徴や変動を明らかにしようとした．ここでは，堆肥や木炭などのほかの炭化物で指摘されているpH矯正効果，土壌への炭素貯留効果，肥料三要素の窒素・リン・カリウム効果，ケイ酸肥料効果，発芽試験による植物生育阻害物質の影響に注目して考察する．

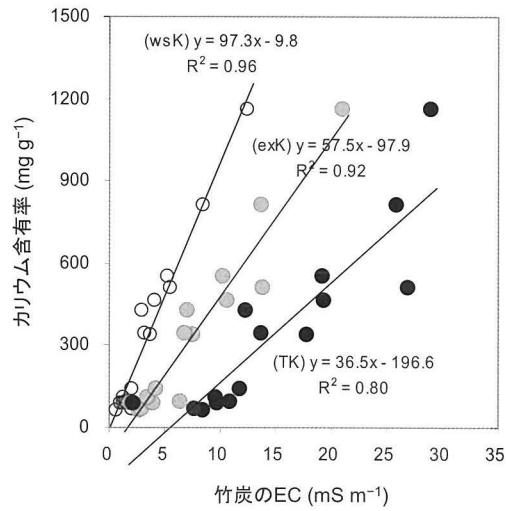


図1　竹炭のECと交換性，水溶性カリウムとの関係
TK（●）は全カリウム，exK（◉）は交換性カリウム，wsK（○）は水溶性カリウム含有率を示す．

1）pH矯正効果

pHが高い炭化物の土壌施用により土壌pHが増加する事例は様々な炭化物で認められている（磯部ら，1996；松丸・真行寺，2005；真行寺ら，2009；佐野ら，2011）．本研究で測定した竹炭は全てpH 8以上と，アルカリ性であった．これは，竹炭に塩基，とくにカリウムが多く含まれるためと考えられる（藤原ら，2003）．木炭では炭化温度が低いとpHは酸性に，炭化温度が高いとアルカリ性になることが知られているが（今野・西川，1993；松井ら，2000；原，2003；Calvelo Pereira *et al.*, 2011），竹炭は炭化条件によらずアルカリ性と見なしてよい（藤原ら，2003；朝木，2006；浦田ら，2007；伴野ら，2009；Liu *et al.*, 2011；上野ら，2012）．

ただし，竹炭施用で実際に土壌pHが上昇するかどうかは異論がある．上野ら（2012）は，造成土にpH 8.5の牛糞堆肥を1.78 kg m^{-2}施用しても土壌pHは増加しないが（無施用区のpH 7.1に対して堆肥施用区7.1），堆肥に加えてpH 9.7の竹炭を5.57 kg m^{-2}施用すると土壌pHが7.6に増加したことを示した．Liu *et al.*（2011）も，pH 9.8の竹炭を5～25 g kg^{-1}添加した湛水条件のインキュベート土壌で，未添加土壌より土壌pHが高まったことを示した．しかし，浦田ら（2007）はpH 8.2ないし8.8の竹炭を16 g kg^{-1}与えたポット試験で，朝木（2006）はpH 10.2の竹炭を1 kg m^{-2}与えた圃場試験で，土壌pHの増加が見られなかったと述べた．土壌pHが上昇するか否かは必ずしも竹炭のpHや添加量と対応しておらず，このような効果の違いが生じた理由は不明である．竹炭成分だけでなく土壌条件なども含めて，pH矯正効果との関係をさらに検討する必要がある．

2）土壌炭素貯留効果

竹炭は，木炭や他の炭化物と同様に，全炭素含有率が高く（藤原ら，2003；Liu *et al.*, 2011；上野ら，2012），土壌施用による炭素貯留効果（Spokas, 2010；Rogovska *et al.*, 2011）が期待される．

本研究の結果は，竹炭中にチューリン法で回収されない炭素が187～570 mg g^{-1}に及び，全炭素の21～69％を占めることを示した．柳田ら（1995）は籾殻炭化物で，

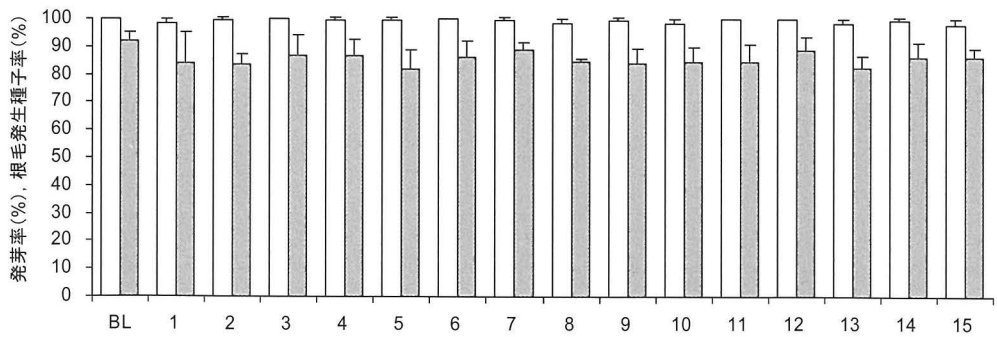


図2　竹炭抽出液によるコマツナの発芽率と根毛発生種子率
横軸のBLはブランク，ほかは竹炭抽出液を示す．竹炭抽出液は，竹炭のECが低いものから順に並べた．
発芽率は白抜き棒グラフで，根毛発生種子率はグレー棒グラフで表し，いずれも標準偏差バーを付した．

Calvelo Pereira *et al.* (2011) はマツ，ポプラとヤナギ炭化物で，チューリン法ないしWalkley-Black変法で回収されない炭素がそれぞれ全炭素含有率の44～87％，45～82％を占めると報告した．このとき，有機態炭素として回収されない炭素の割合は，炭化温度が高いほど増加した（柳田ら1995；Calvelo Pereira *et al.*, 2011）．一般に，炭化温度の増加は，炭化物中の炭素化合物の変化，すなわち芳香族環の生成，架橋，重縮合をもたらし（松井ら，2000），微生物分解に対する抵抗性を高める（Baldock and Smernik, 2002）．300℃以上の炭化温度で製造された炭化物は，半減期1000年以上の安定な炭素化合物を含有する（Spokas, 2010）．つまり，炭化物中のチューリン法で回収されない炭素は，高い炭化温度で生成される分解抵抗性をもつ炭素化合物といえる（Calvelo Pereira *et al.*, 2011）．よって，竹炭は分解抵抗性の高い炭素を多く含み，チューリン法で回収されない炭素が多い竹炭ほど，高い炭素貯留効果が期待できることが示唆された．

3）窒素，リン，カリウム肥料効果

一般的な土壌改良資材である堆肥は肥料三要素である窒素，リン，カリウムを含み（生雲ら，2007），一部の炭化物はリン，カリウム肥料効果が期待されている（松丸・真行寺，2005；真行寺ら，2009；佐野ら，2011）．そこで，竹炭の窒素，リン，カリウム肥料効果を検討した．

竹炭の全窒素含有率は中央値で5.3 mg g^{-1}程度と，一般的な堆肥（例えば，牛糞堆肥で全窒素含有率19±7 mg g^{-1}；生雲ら，2007）と比べると多くない（藤原ら，2003；朝木，2006；Liu *et al.*, 2011；上野ら，2012）．さらに，竹炭中の無機態窒素は全窒素の1％に満たなかった．これは，熱処理・炭化温度が高いために無機態窒素が揮散した結果であり，同時に，難分解性・不可給態窒素が増加したものと推察される（牧ら，2009）．Chan *et al.* (2007) は，植物残渣炭化物のみをいくら与えてもラディッシュ生育に効果はないが，窒素を適切に与えると炭化物施用量に応じてラディッシュ乾物重が増加することを示した．この事例は，炭化物施用で土壌物理性の改善や塩基補給はなされても（Chan *et al.*, 2007），炭化物に窒素肥料効果は期待できないことを示唆する．さらに，炭化温度が低いと炭化物中に揮発分が増加し（Spokas, 2010），この揮発分が土壌微生物の炭素源となって窒素有機化を生じ，植物利用可能窒素の減少を招く可能性も指摘された（Deenik *et al.*, 2010）．有機態炭素含有率の高い竹炭は土壌窒素の有機化をもたらす可能性があり，注意が必要である．

また，竹炭の全リン含有率は窒素よりさらに少なく（中央値0.5 mg g^{-1}），最大3.8 mg g^{-1}であった．これは，一般的な堆肥（例えば，牛糞堆肥で全リン含有率10±7.4 mg g^{-1}；生雲ら，2007）より少ない（持丸ら，2005；朝木，2006；脇坂ら，2006；Yamashita and Machida, 2011）．さらに，リン肥料効果が期待される牛糞や牛糞堆肥の炭化物の全リン含有率は18～52 mg g^{-1}であり（松丸・真行寺，2005；真行寺ら，2009；牧ら，2009），これと比べると竹炭のリン含有率は1/10以下である．持丸ら（2005）は竹炭の全リン含有率2.4 mg g^{-1}のおよそ30％が水溶性であったと報告し，本研究の結果も水溶性リンが全リンの14～38％を占めることを示した．しかし，竹炭は水溶性リンを含むとはいえ，リン含有率そのものが少ないため直接的なリン肥料効果は小さいと考えられる．今野・西川（1993）も，竹炭の水溶性リンと同レベルのTruogリン（0.04～0.6 mg g^{-1}）を含む木炭に，コマツナとダイコンに対するリンの直接的肥料効果がなかったと報告した．

一方，竹炭に含まれる塩基のうちカリウム含有率は，マグネシウム，カルシウム，ナトリウムと比べて明らかに高かった（藤原ら，2003；持丸ら，2005；脇坂ら，2006；伴野ら，2009；Yamashita and Machida, 2011）．これは，竹炭の材料となる竹稈にカリウム含有率が高いこと（平田，1927；西田，1989；Scurlock *et al.*, 2000）を反映している．一般的な牛糞堆肥のカリウム含有率は平均で20±11 mg g^{-1}とされ（生雲ら，2007），竹炭のカリウム含有率はこれに匹敵する．また，本研究の結果は，全カリウム含有率のうち交換性カリウムが約50％を占め，水溶性カリウムが多いことも示した．水溶性カリウムの含有率は中央値2.9 mg g^{-1}であり，最大値は12.5 mg g^{-1}に及んだ．竹炭の水溶性カリウム含有率はコマツナにカリウム肥料効果が認められた樹木葉炭化物の水溶性カリウム含有率（3.5～6.6 mg g^{-1}；佐野ら，2011）に匹敵する．脇坂ら（2006）は竹炭中カリウムの40％が水洗により除去されることを示し，持丸ら（2005）は竹炭を水で浸漬すると全カリウムの60％以上が溶出すると報告した．竹炭はカリウム含有率が高く，かつ交換性ないし水溶性カリウムが多いことから，カリウム肥料効果があると示唆される．

朝木（2006）は，慣行肥料に竹炭（全カリウム含有率13.6 mg g^{-1}）を1 kg m^{-2}添加すると，慣行肥料のみの場合と比べてホウレンソウのカリウム吸収量が25％増加したと報告した．カリウム含有率が高い竹炭を施用する場合，カリウム肥料の省略ないし削減が可能と考えられる．ただし，竹炭のカリウム含有率には全カリウム含有率で13倍，水溶性カリウム含有率で20倍もの大きな変動が見られた．カリウム含有率の変動は，炭化温度や賦活法の違い（藤原ら，2003；牧ら，2009）とともに，原料となるタケのカリウム含有率が竹齢や部位によって変化すること（平田，1927；西田，1989；Scurlock *et al.*, 2000）も原因と考えられる．竹炭のカリウム含有率の違いは，カリウム肥料効果の違いをもたらす原因となる．竹炭のカリウム含有率，とくに交換性および水溶性カリウム含有率とECとの間には強く有意な相関があった（図1）．この関係に従えば，ECの高い竹炭は水溶性・交換性カリウム含有率が高く，カリウム肥料効果が高い竹炭であると推測できる．また，ECによるカリウム含有率の予測式を作ることで，カリウム肥料の省略ないし削減を行なうとき，竹炭のカリウム量を予測することも可能と考えられる．

4）ケイ酸肥料効果

タケはケイ素集積植物であり（高橋ら, 1981），これを原料として製造した竹炭はケイ素を多く含み，ケイ酸肥料になると期待された．今岡ら（2008）は竹炭の水溶性ケイ素含有率を0.14～0.80 mg g^{-1}，釜谷ら（2010）も最大0.75 mg g^{-1}と報告した．しかし，本研究の結果は，水溶性ケイ素含有率が最大0.19 mg g^{-1}に過ぎないことを示した．伴野ら（2009）は竹炭の全ケイ素含有率を7.6～11.4 mg g^{-1}と報告したが，Yamashita and Machida（2011）と脇坂ら（2006）はそれぞれ0.62，0.48 mg g^{-1}であったと報告した．タケはケイ素集積植物であるが，吸収したケイ素の大部分は葉に集積し，竹炭の原料となる稈に少ないため（平田, 1927；西田, 1989；Scurlock *et al.*, 2000），一般的な竹炭のケイ素含有率は低いと考えるほうが妥当である．釜谷ら（2010）は，竹炭のケイ素肥料効果がケイ素含有率の高い籾殻くん炭に大きく劣ると述べた．これらのことは，ケイ素含有率の高い部位，すなわち竹葉を一緒に炭化して，ケイ素含有率を高めない限り，竹炭のケイ酸肥料効果は期待できないことを示唆する．

5）発芽阻害物質の生物検定

竹炭は植物生育阻害物質となるフェノール化合物やPAHsを含む可能性があり（駒形・本山, 2004；Freddo *et al.*, 2012），その悪影響がないことを確認する必要がある．本研究では発芽試験により，この植物生育阻害物質の検定を行った．その結果は，発芽率と根毛発生種子率ともに異常がないことを示した．よって，本研究で供した竹炭はフェノール化合物やPAHsを含有したかもしれないが，少なくとも発芽阻害を生じる濃度ではなかったと示唆される．

また，炭化物に含まれる高い塩類濃度による生育障害も指摘される．松丸・真行寺（2005）は，ECが約1700 mS m^{-1}と高い牛糞炭化物によるコマツナの生育障害を報告し，この障害回避のために除塩が必要であると述べた（真行寺ら, 2009）．過去に報告された竹炭のEC値は77～157 mS m^{-1}であったが（朝木, 2006；Liu *et al.*, 2011），本研究の結果は，竹炭のECが堆肥の基準値500 mS m^{-1}（生雲ら, 2007）を超え，最大1160 mS m^{-1}に及ぶ場合があることを示した．しかし，発芽試験で異常がなかったことは，高ECによる生育阻害を生じる可能性が低いことを示唆する．竹炭には水溶性塩化物イオンも含まれたが，その量は牛糞炭化物（真行寺ら, 2009）より1桁少なかった．

6）まとめ

竹炭を土壌改良資材として使うことにより，土壌への炭素貯留効果，カリウム肥料効果が期待できることが示唆された．カリウム肥料効果の大きさは，竹炭のECを測定することで推定可能と考えられた．一方，竹炭に窒素肥料効果はなく，リン肥料やケイ酸肥料効果も低いと示唆された．竹炭はアルカリ性の資材であるが，土壌pH矯正効果については結論が得られなかった．また，フェノール化合物や多環芳香族炭化水素等の植物生育阻害物質による悪影響は，少なくとも発芽試験の結果からは見出せなかった．

文　献

安部郁夫・長谷川貴洋・澁谷康彦・岩崎　訓 2004. 竹炭の細孔構造特性. 炭素, 215, 241-245.

Asada, T., Ohkubo, T., Kawata, K., and Oikawa, K. 2006. Ammonia adsorption on bamboo charcoal with acid treatment. *J. Health Sci.*, 52, 585-589.

朝木隆行 2006. ホウレンソウ栽培における竹炭の利用. 農及園, 81, 1262-1266.

Baldock, J. A., and Smernik, R. J. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Org. Geochem.*, 33, 1093-1109.

伴野雅之・久場隆広・佐野弘典・河村直哉・市川瞬平・酒井雄介 2009. 竹炭における硝酸イオン吸着能とその機構. 水環境学会誌, 32, 369-374.

Biederman, L. A., and Harpole, W. S. 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5, 202-214.

Calvelo Pereira, R., Kaal, J., Camps Arbestain, M., Pardo Lorenzo, R., Aitkenhead, W., Hedley, M., Macías, F., Hindmarsh, J., and Maciá-Agulló, J. A. 2011. Contribution to characterisation of biochar to estimate the labile fraction of carbon. *Org. Geochem.*, 42, 1331-1342.

Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., and Joseph, S. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Aust. J. Soil Res.*, 45, 629-634.

Deenik, J. L., McClellan, T., Uehara, G., Antal, M. J., and Campbell, S. 2010. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74, 1259-1270.

Freddo, A., Cai, C., and Reid, B. J. 2012. Environmental contextualization of potential toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar. *Environ. Pollut.*, 171, 18-24.

藤原　敏・嶋　一徹・千葉喬三 2003. 竹炭, 灰の性状. *Bamboo J.*, 20, 52-59.

原　正之 2003. 木炭. 農林水産省生産局農産振興課監修　土壌改良と資材改訂第2版, p. 131-144, 日本土壌協会, 東京.

平田満穂 1927. 苦竹の幹形・比重・灰分量及び化学成分に就て. 林学雑, 9, 5-20.

生雲晴久・森江昌史・山本直之・山口武則 2007. 家畜排泄物等有機物資源の循環的利用のための調査研究と技術開発－プロジェクト研究第6チームと総合研究第5チームの研究概要. 中央農研研究資料, 7, 93-117.

今岡　務・山崎一穂・鶴田　聡 2008. カキイカダ廃竹炭化物を添加した藻礁ブロックのケイ酸イオン供給能と海中設置効果. 環境工学研究論文集, 45, 487-494.

磯部勝孝・藤井秀昭・坪木良雄 1996. 木炭の施用がサツマイモの収量に及ぼす影響. 日作紀, 65, 453-459.

Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., and Bastos, A. C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 144, 175-187.

釜谷美則・新里剛志・長島珍男 2010. 可溶性シリカの供給源としての籾殻炭化物および竹炭の評価. 用水と廃水, 52, 521-524.

亀和田國彦・柴田和幸 1997. 陽イオン交換容量の測定を要さない土壌試料のための簡易な交換性陽イオンの浸出法. 土肥誌, 68, 61-64.

木村栄理子・深町加津枝・古田裕三・奥　敬一・柴田昌三 2007.

嵯峨嵐山における竹林景観の実態と景観保全施策に関する研究. ランドスケープ研究, 70,605-610.
駒形 修・本山直樹 2004.各種市販および自家製木酢液・竹酢液の主要成分と抗菌活性. 環動昆, 15,83-94.
今野一男・西川介二 1993.炭化条件の異なる各種木炭粉の施用が畑作物の生育・養分吸収に及ぼす影響. 土肥誌, 64,190-193.
熊谷千冬・山口武則 2004.家畜ふん堆肥品質評価における発芽試験検定植物の品種間差異. 土肥誌, 75,355-358.
草葉敏一・デワンカー バート 2009.竹林保全活動及び竹利活用に関する研究－竹林保全活動団体全国調査. 日本建築学会九州支部研究報告, 48,653-656.
Liu, Y., Yang, M., Wu, Y., Wang, H., Chen, Y., and Wu, W. 2011. Reducing CH_4 and CO_2 emissions from waterlogged paddy soil with biochar. *J. Soils Sediments*, 11,930-939.
牧 浩之・河野 哲・永井耕介 2009.熱および炭化処理による牛ふん堆肥の無機元素収支と溶解性の変化. 土肥誌, 80,257-262.
松井隆尚・松下洋一・菅本和寛・徳田陽之助・小玉義和・中田一則・小田 誠・山内博利 2000.スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) 材の炭化生成物の調製と分析. 日化, 2000,53-61.
松丸恒夫・真行寺孝 2005.牛ふん炭化物中リン酸, カリの肥料効果－特にコマツナに対する多量施用の影響－. 土肥誌, 76, 53-57.
持丸慎介・大谷貴美子・冨田圭子・南出隆久 2005.竹炭ミネラルとその溶解性. *Bamboo J.*, 22,61-70.
日本土壌協会 2000.堆肥等有機物分析法, p.217. 日本土壌協会, 東京.
西田豊昭 1989.竹令に伴うマダケの化学的成分の変化. *Bamboo J.*, 7,1-4.
野田 滋 2005.竹炭利用によるホウレンソウの11作連続栽培. 島根中山間セ研報, 1,1-10.
林野庁 2012.特用林産物生産統計調査 (確報) 平成23年度特用林産基礎資料 年次2011年. http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001105433 (2013年2月15日閲覧).
林野庁研究・保全課 2010.森林づくり活動についてのアンケート集計結果 (平成22年3月調査). http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001067029 (2013年2月15日閲覧).
Rogovska, N., Laird, D., Cruse, R., Fleming, P., Parkin, T., and Meek, D. 2011. Impact of biochar on manure carbon stabilization and green house gas emissions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75,871-879.
Rogovska, N., Laird, D., Cruse, R.M., Trabue, S., and Heaton, E. 2012. Germination tests for assessing biochar quality. *J. Environ. Qual.*, 41,1014-1022.
佐野修司・内山知二・東 昌弘 2011.樹木オイル抽出残さより作成された各種炭におけるカリウムの肥料効果の解析. 土肥誌, 82, 58-60.
Scurlock, J. M. O., Dayton, D. C., and Hames, B. 2000. Bamboo: an overlooked biomass resource? *Biomass Bioenergy*, 19,229-244.
真行寺孝・松丸恒夫・犬伏和之 2009.牛ふんの炭化物および除塩炭化物のコマツナに対するリン酸肥効の持続性と除塩炭化物による塩類障害軽減効果. 土肥誌, 80,355-364.
Spokas, K. A. 2010. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O: C molar retio. *Carbon Management*, 1, 289-303.
高橋英一・田中輝夫・三宅靖人 1981.植物界におけるケイ酸植物の分布について (その5) イネ科植物における分布. 土肥誌, 52, 503-510.
上野貴史・太田誠一・根田遼太 2012.畑地への堆肥施用とバイオ炭の併用が N_2O と CO_2 の地表面フラックスおよび土壌炭素量に及ぼす影響. 土肥誌, 83,36-43.
浦田光雅・武永順次・及川洋征・神田修平・石川駿二・福田清春 2007.土壌への木竹炭混入が葉菜類の生育に及ぼす影響. 木質炭化学会誌, 4,7-12.
脇坂博之・三宅 肇・河原 豊 2006.竹からの活性炭の製造および含有カリウムによる賦活工程への影響. 炭素, 224,272-275.
Yamashita, N., and Machida. M, 2011. Carbonization of bamboo and consecutive low temperature air activation. *Wood Sci. Technol.*, 45,801-808.
柳田友隆・江 耀宗・松本 聰 1995.籾殻の理化学性に及ぼす炭化処理の影響. 土肥誌, 66,270-272.