－研究記録（Research Note）－

木質バイオマス燃焼灰の活用に向けた検討（6）酸性土壌に対するpH矯正力

折橋　健，安久津　久*[1]，原田　陽*[2]

Study on the use of woody biomass combustion ash (6) The corrective effect of pH on acidic soil

Ken ORIHASHI, Hisashi AKUTSU, Akira HARADA

キーワード：地域エネルギー，木質バイオマス，燃焼灰，pH矯正，酸性土壌

塗料や防腐剤等の化学物質を含まない木質燃料に由来する，いわゆるクリーンな木質バイオマス燃焼灰の利用法として，本研究では酸性土壌に対するpH矯正資材に着目し，道内で採取した灰のpH矯正力を測定するとともに，灰の化学的性状とpH矯正力との関係について検討した。

1. はじめに

近年道内では，木材産業や製紙産業をはじめ，発電施設，公共施設，医療機関・福祉施設，宿泊施設・浴場，洗濯業等のエネルギー源として，木質バイオマスの利用が広がりつつある[1)]。これに伴って，木質バイオマス燃焼灰（以下，灰とする）の有効利用を図ることが重要となってきている。そこで著者らは，塗料や防腐剤等の化学物質を含まない木質燃料に由来する，いわゆるクリーンな灰について，性状分析[2)]や用途の検討[3,4)]を進めている。

灰は，カルシウムやカリウム等の無機塩を多く含んでおり，その水溶液は強アルカリ性を示す[2)]。一方，道内では，農用地等の土壌酸性化に対して炭酸カルシウムなどの石灰質資材が施用され，pH矯正が行われている。これらのことから灰は，酸性土壌に対するpH矯正資材として利用できる可能性がある。そこで本研究では，道内で採取した灰のpH矯正力を測定するとともに，灰の化学的性状とpH矯正力との関係について検討した。

2. 実験方法

2.1　灰

道内の木質専焼ボイラー9基（50～1200kW）より，クリーンな灰（主灰，もしくは主灰と飛灰の混合灰）を採取した。このうち，異なるボイラーから採取した灰に関してpH矯正力の違いを把握する目的で，ボイラー7基（A～G）から各1試料，計7試料を得た（**第1表**）。また，同一ボイラーから採取したロットの異なる灰についてpH矯正力の差異を把握する目的で，ボイラーXから3ロット分の，ボイラーYから4ロット分の試料を採取した（**第2表**）。各試料は，目の開きが1mmのふるいにかけ，1mmパスの画分を供試した。

2.2　炭酸カルシウムおよび酸性土壌

pH矯正力の比較基準用に，炭酸カルシウムの粉末試薬（富士フイルム和光純薬製，特級）を用いた。また，酸性土壌として，**第3表**に示す3種類の土壌（畑地土壌，林地土壌，強酸性土壌）を供試した。土壌は風乾状態のものを目の開きが2mmのふるいにかけ，2mmパスの画分を供試した。

2.3　pH矯正力の測定

pH矯正力の測定は，資材添加・通気法[5)]により行った。本法は，農用地のpH矯正目的で石灰質資材（炭酸カルシウム等）の土壌への施用量を決める際に使用される手法である。100mL容三角フラスコに乾物相当で土壌20g，試料5～800mgを入れ，液量が50mLになるように水を加えて撹拌した。その後24時間静置し，さらに5時間水平振とう（150～160rpm）した。そして得られた土壌溶液に毎分2Lの割合で2分間通気を行った後，速やかに土壌溶液

第1表　ボイラーA～Gより採取した供試灰

試料名称	種別	ボイラー		燃料
		名称	出力（kW）	
灰A	混合灰	A	400	主に針葉樹
灰B	主灰	B	350	主に針葉樹
灰C	主灰	C	1200	主に針葉樹
灰D	主灰	D	550	主に針葉樹
灰E	主灰	E	700	主に針葉樹
灰F	混合灰	F	200	主に広葉樹
灰G	主灰	G	360	主に針葉樹

混合灰：主灰と飛灰の混合物である

第2表　ボイラーX，Yより採取した供試灰

試料名称	種別	ボイラー		燃料
		名称	出力（kW）	
灰X1	主灰	X	225	主に針葉樹
灰X2	主灰			
灰X3	主灰			
灰Y1	主灰	Y	50	主に針葉樹
灰Y2	主灰			
灰Y3	主灰			
灰Y4	主灰			

第3表　供試した酸性土壌の性状

試料名称	採取地目	土壌統群名	pH	C	N	腐植	備　考
				（%，対乾物土壌）			
畑地土壌	農耕地	細粒灰色台地土	6.20	1.6	0.14	2.8	作土
林地土壌	林地	中粗粒褐色森林土	4.80	7.3	0.49	12.6	地拵え地の表層（0～10cm）土
強酸性土壌	農耕地	中粗粒強グライ土	3.50	2.0	0.15	3.4	下層の酸性硫酸塩土壌の混入作土

pH：資材添加・通気法（灰無添加時）の値

のpHを測定した。以上の操作は20～22℃の環境下で行った。pH矯正力は，土壌溶液のpHを6.5にするのに要した試料添加量より式（1）を使用して算出し，炭酸カルシウムのpH矯正力を1とした場合の相対値で示した。

灰のpH矯正力＝［土壌溶液のpHを6.50とするのに要した炭酸カルシウム量（mg/乾物土壌20g）］÷［土壌溶液のpHを6.50とするのに要した灰量（mg/乾物土壌20g）］　　（1）

2.4　化学分析

折橋らの報告[2]に記載の方法にしたがって，灰のpH，電気伝導度（以下，ECとする），未燃分，アルカリ3成分（CaO，MgO，K_2O）の測定を行った。pHとECの測定は，固液比1:50にて行った。未燃分は，600℃における強熱減量である。アルカリ3成分は，蛍光X線分析により測定し，酸化物換算で含有割合を求めた。

また，土壌標準分析・測定法[6]における乾式燃焼法により供試土壌中の炭素および窒素量を求めた。乾式燃焼には，CHNコーダー（柳本製作所製，MT-5を使用した。また，炭素量を1.724倍[5]して腐植量を算出した。

3．結果と考察

3.1　灰のpH矯正力

資材添加・通気法によって供試土壌溶液のpHを6.50とするのに要した炭酸カルシウムの添加量を**第4表**に示す。炭酸カルシウム量は，酸性の度合いが最も弱い畑地土壌で最小であった。また，林地土壌，強酸性土壌に対する添加量は，両者の酸性の度合いに差がある割に同程度であった。林地土壌は，酸性の度合いが相対的に弱いが，pH緩衝作用がある腐植を多く含むため（第3表），添加量あたりのpHの上昇が鈍く，結果として強酸性土壌並みの炭酸カルシウム量を要したものと考えられる。

第5表に，異なるボイラー（A～G）から採取した灰7試料のpH矯正力について，供試土壌別に示す。pH矯正力は灰試料間で違いが認められ，畑地土壌では0.4ポイント，林地土壌では0.6ポイント，強酸性土壌では0.3ポイントほどの幅があった。土壌間で比較すると，pH矯正力の数値分布には差異があり，灰のpH矯正効果は土壌によって変化することが示唆された。

第4表　供試土壌のpHを6.50とするのに要した炭酸カルシウム量（mg/乾物土壌20g）

畑地土壌	林地土壌	強酸性土壌
8.8	182.8	180.1

第5表　灰A～Gの土壌別pH矯正力

試料	土壌別のpH矯正力*		
	畑地土壌	林地土壌	強酸性土壌
灰A	0.67	0.72	0.47
灰B	0.93	1.23	0.72
灰C	0.96	0.90	0.62
灰D	1.08	1.19	0.70
灰E	0.84	1.03	0.59
灰F	0.68	0.68	0.55
灰G	0.78	1.08	0.67

＊炭酸カルシウムのpH矯正力を1とした時の相対値である

第6表　灰X1～3，灰Y1～4の土壌別pH矯正力

試料	土壌別のpH矯正力*		
	畑地土壌	林地土壌	強酸性土壌
灰X1	0.76	0.92	0.62
灰X2	0.80	0.90	0.62
灰X3	0.70	0.82	0.55
灰Y1	0.77	0.77	0.47
灰Y2	0.59	0.68	0.36
灰Y3	0.42	0.37	未測定
灰Y4	0.47	0.48	0.28

＊第5表に同じ

第6表に，ボイラーXおよびYから採取したロットの異なる灰試料のpH矯正力を示す。土壌ごとに見て，ボイラーXからの3ロットの試料については，pH矯正力は安定した値であった。一方，ボイラーYからの4ロットの試料については，値がばらついており，同一ボイラーから採取した灰であっても，ロットによってpH矯正力が変化する場合もあることが明らかとなった。

3.2　灰の化学的性状

ボイラーA～Gから採取した灰7試料の化学的性状を**第7表**に示す。pHは11.8～12.8を示し，強いアルカリ性であった。水溶性塩類の濃度指標であるECは，試料間で値に幅があった。アルカリ3成分（CaO，MgO，K_2O）の含有割合は，大きい方からCaO，K_2O，MgOの順であり，これら3成分の合計は61.0～81.8%であった。ECと同様に試料間で値に幅があった。未燃分は1.7～6.8%であった。廃棄物焼却施設では，焼却灰を本研究と同様に強熱処理した際，その減量（未燃分）が10%以下であれば完全燃焼と判断されている[7,8]。この指標を準用した場合，ボイラーA～Gは十分な燃焼状態であったと考えられる。

灰7試料の化学的性状については，以上のように多くの項目で値に幅があった。このようなばらつきは，燃料性状（例えば，樹種，樹皮比率，土砂混入状況）やボイラー機種（機構），燃焼条件（状態）の影響によって発生すると考えられる[9-11]。今回の7試料に関しては，ボイラーの燃焼状態がいずれも良好であったと考えられることから，燃料性状やボイラー機種の違いが化学的性状の差異をもたらしていると推測される。

第8表に，ボイラーXおよびYから採取したロットの異なる灰試料の化学的性状を示す。ボイラーXの各性状値は，3ロットの試料間でばらつきが少なく安定しており，未燃分は良好な燃焼の目安（10%以下）の範囲内であった。一方，ボイラーYの各性状値は，4ロットの試料間でばらつきが大きく，未燃分は良好な燃焼の目安（10%以下）から外れる場合もあった。

両ボイラーはいずれも暖房用であり，一定品質の燃料を使用している。両者の違いは燃焼条件であり，ボイラーXは常時一定条件で運転されているのに対し，Yは暖房先の室温が所定温度に達すると燃焼が停止する間断運転である。先にも触れたように，灰の化学的性状は，燃料性状，ボイラー機種（機構），燃焼条件（状態）の影響を受けると考えられる[9-11]が，ボイラーYではこのうちの燃焼条件が変化しやすいために，化学的性状値が4ロットの試料間でばらつき，燃焼不良の形跡もみられたものと推測される。

3.3　灰のpH矯正力と化学的性状の関係

ボイラーA～GおよびX，Yから採取した灰，計14試料のデータを用いて，供試土壌別にpH矯正力と化学的性状値との間の相関係数を求めた（**第9表**）。その結果，pH矯正力は，いずれの土壌においてもアルカリ3成分（CaO，MgO，K_2O）の合計含有割合との間で最も強い正の相関を示し，これに次いでECとの間で強い正の相関を示した。一方，pH矯正力と個々のアルカリ成分との相関関係については，畑地土壌におけるCaO含有割合との間での正の相関を除いて明瞭ではなく，pHや未燃分とpH矯正力の関係も不明瞭であった。

第7表　灰A～Gの化学的性状

試料	pH	EC	アルカリ3成分（%）				未燃分（%）
			CaO	MgO	K_2O	合計	
灰A	12.1	3.3	42.1	5.8	13.1	61.0	1.7
灰B	11.8	8.2	40.7	7.3	31.2	79.2	6.8
灰C	12.8	11.5	61.3	3.8	13.5	78.6	4.7
灰D	12.8	13.2	55.5	6.1	20.2	81.8	3.6
灰E	12.7	9.0	47.0	5.7	22.7	75.4	2.8
灰F	12.6	7.2	45.1	5.9	17.3	68.3	2.5
灰G	12.6	10.0	43.8	7.3	26.1	77.2	3.7

%：試料乾物重量あたり

第8表　灰X1～3，灰Y1～4の化学的性状

試料	pH	EC	アルカリ3成分（%）				未燃分（%）
			CaO	MgO	K_2O	合計	
灰X1	12.4	8.9	33.1	6.3	27.8	67.2	4.1
灰X2	12.4	9.0	33.2	6.3	28.6	68.1	3.1
灰X3	12.5	8.4	39.2	6.0	25.1	70.3	2.6
灰Y1	12.7	9.3	50.5	6.0	15.2	71.7	3.5
灰Y2	12.2	5.4	35.2	6.9	21.1	63.2	4.0
灰Y3	11.8	2.7	26.4	6.1	19.1	51.6	18.8
灰Y4	12.0	3.1	32.6	6.3	18.5	57.4	11.1

%：試料乾物重量あたり

第9表　灰14試料のpH矯正力と化学的性状の相関関係（土壌別）

	pH	EC	アルカリ3成分（%）				未燃分（%）
			CaO	MgO	K_2O	合計	
pH矯正力（畑地土壌）	0.599	<u>0.901</u>	<u>0.760</u>	-0.200	0.197	<u>0.938</u>	-0.571
pH矯正力（林地土壌）	0.419	<u>0.803</u>	0.522	0.164	0.509	<u>0.916</u>	-0.564
pH矯正力（強酸性土壌）	0.332	<u>0.782</u>	0.388	0.017	0.484	<u>0.846</u>	-0.364

表中数値：相関係数を示し，0.7以上のものには下線をつけた

以上の結果より，灰によるpH矯正には，灰に含まれるアルカリ3成分が総合的に作用していることが示唆される。また，先述のとおり，異なるボイラーA～Gの灰やボイラーYの異なるロットの灰では試料間でpH矯正力に差異があったが，ここでの結果から，試料間におけるアルカリ3成分の総量的な違いがその要因と推測される。ECは，アルカリ3成分の合計含有割合と強い正の相関（r = 0.911）があり，このためにpH矯正力との相関も強くなったものと考えられる。

3.4　pH矯正力に関する総合考察

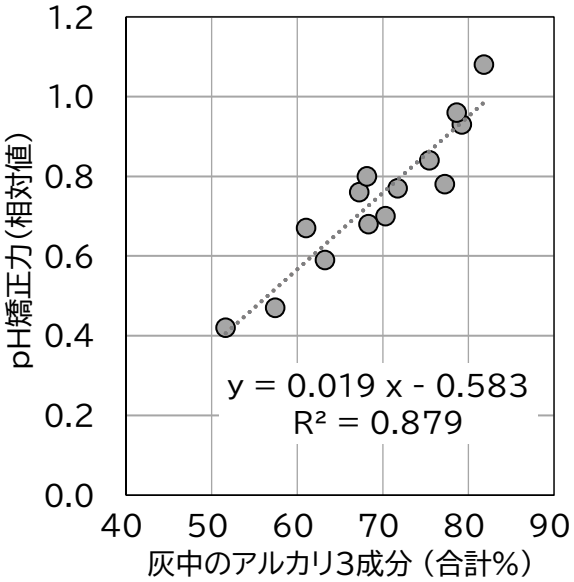
本研究において，灰は酸性土壌各種に対してpH矯正効果を示した。実際の施用先として可能性が高い畑地土壌ばかりでなく，腐植の多い林地土壌や強酸性の土壌であっても灰はpH矯正資材として利用できることが示唆された。しかし，灰のpH矯正効果は供試土壌によって変化したことから，pH矯正力は土壌タイプごとに把握が必要と推測された。

灰のpH矯正力は，灰に含まれるアルカリ3成分（CaO，MgO，K_2O）が総合的に寄与していると示唆された。灰中のアルカリ3成分の合計含有割合は，ボイラー間で異なっていた。また，同一ボイラーでも灰ロット間で異なる場合があった。これらの差異に伴って，pH矯正力にも差が出ると推測された。アルカリ3成分をはじめとする灰の化学的性状は，燃料性状，ボイラー機種（機構），燃焼条件（状態）

の影響を受けると考えられる[9-11]。したがって，これらの条件が異なるボイラーやロットからの灰については，それぞれpH矯正力の把握が必要になると言える。

pH矯正力の把握は，それを直接測定するか，アルカリ3成分の合計含有割合やECなどpH矯正力と相関のある性状値から推定するかのパターンが考えられる。後者の場合，土壌のタイプごとに性状値とpH矯正力の関係式（**第1図**）を作る必要があるが，式の作成後は性状値の把握のみでpH矯正力を推定できるようになる。性状値の測定が，pH矯正力の直接測定よりも迅速，簡便，経済的で，pH矯正力の推定精度も許容レベルに達するのであれば，直接測定よりも性状値からの推定の方が有利と思われる。このようなpH矯正力の把握手法の選択に関しては，今後，データの蓄積や検討が必要である。

道内で灰を利用するのにあたり，道では「焼却灰（天然木由来）の利用の手引き」を発行し[12]，この手引きに沿った事前の情報整理を求めている。 このため，灰のpH矯正資材利用においても，本研究で明らかにした灰のpH矯正力に関する情報の他，手引きで求めている灰の利用や保管の際の安全性や留意事項等の情報が必要である。最初に触れたように，著者らは灰の性状分析も行っており[2]，それらの結果を本研究の結果と合わせて活用しながら情報整理を進め，pH矯正資材としての利用法について，手引きに沿った情報発信をしていきたいと考えている。



第1図　灰中のアルカリ3成分（CaO，MgO，K_2O）の合計含有割合とpH矯正力との関係（畑地土壌の例）

4. まとめ

本研究では，塗料や防腐剤等の化学物質を含まない木質燃料に由来する，いわゆるクリーンな木質バイオマス燃焼灰の利用法として，酸性土壌に対するpH矯正資材に着目した。道内で採取した灰のpH矯正力を測定するとともに，灰の化学的性状とpH矯正力の関係について検討した結果は以下のようにまとめられる。

- 灰は，3種類の酸性土壌（畑地土壌，林地土壌，強酸性土壌）に対してpH矯正効果を示した。また，その効果は供試土壌によって変化したことから，灰のpH矯正力は土壌タイプごとに把握が必要と考えられた。
- 灰のpH矯正力は，灰中のアルカリ3成分（CaO，MgO，K_2O）の合計含有割合と強い正の相関を示し，pH矯正力に対してアルカリ3成分が総合的に寄与していると示唆された。また，灰のpH矯正力は，ECとの間でも強い正の相関を示した。
- 灰中のアルカリ3成分の合計含有割合は，ボイラー間で異なっていた。また，同一ボイラーでも灰ロット間で異なる場合があった。これらの差異に伴って，pH矯正力に差が生じると推測された。

謝　辞

本研究の実施にあたり，道内の関係各位より燃焼灰をご提供いただいた。土壌の採取，pH矯正力の分析に関して，北海道立総合研究機構花・野菜技術センターの古館明洋氏に多くのご助言，ご協力をいただいた。また，土壌の採取には同機構中央農業試験場の塚本康貴氏，上川農業試験場の熊谷聡氏にもご協力いただいた。灰の分析にあたり，同機構エネルギー・環境・地質研究所の富田恵一氏にご協力いただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

引用文献

1）北海道水産林務部林務局林業木材課木質バイオマス係：林産試だより2020年11月号, 10（2020）.
2）折橋健・安久津久・丹羽忍・大塚英幸 ： 木材学会誌67(1), 33-43（2021）.
3）折橋健・西宮耕栄・山田敦・安久津久 ： 日本木材学会北海道支部講演集49, 61-64（2017）.
4）折橋健・西宮耕栄・山田敦・安久津久・原田陽：日本木材学会北海道支部講演集51, 29-31（2019）.

5）北海道立総合研究機構農業研究本部：“土壌・作物栄養診断のための分析法2012”, 2012. https://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/bunseki2012/index.html
6）土壌標準分析・測定法委員会：“土壌標準分析・測定法 [POD版]”, 博友社, 東京, 2003.
7）環境省：“一般廃棄物処理事業に対する指導に伴う留意事項について”, 1990. https://www.env.go.jp/hourei/11/000013.html
8）環境省：“廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行令の一部改正等について”, 1997. https://www.env.go.jp/hourei/11/000460.html
9）Sano, T., Miura, S., Furusawa, H., Kaneko, S., Yoshida, T., Nomura, T., Ohara, S. : J. Wood Sci. 59, 307−320（2013）.
10）Someshwar, A. V. : J. Environ. Qual. 25, 962−972（1996）.
11）土屋陽子・下垣　久：“木質バイオマス燃焼灰の安全性評価（その3）－低温燃焼時における微量成分の溶出性評価－”, 2009. https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/V08016.html
12）北海道：“焼却灰（天然木由来）の利用の手引き－”, 2017. http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/rrm/chizai/syokyakubainoriyounotebiki.htm

－企業支援部　研究調整グループ－
－＊1：利用部　資源・システムグループ－
－＊2：利用部　微生物グループ－
（原稿受理：2021.10.14）