

<報 文>

木質バイオマス燃焼ボイラーの環境影響について*

—排ガス及び焼却灰—

大塚英幸**・丹羽 忍**

キーワード ①木質バイオマス燃焼 ②排ガス ③焼却灰 ④木チップボイラー ⑤薪ボイラー

要 旨

再生可能エネルギーの利活用の一環で、ボイラー燃料を化石燃料から木質バイオマスへと転換する取り組みが進められている。この転換により温室効果ガスの削減が期待される一方で、排ガスや焼却灰に関する新たな環境負荷が懸念されている。特に、ばいじんや窒素酸化物等の排ガス、木質バイオマスの燃焼に伴い多量に発生する焼却灰については、重油ボイラーとの比較検証が必要である。本研究では北海道内の木チップボイラーを対象に排ガスおよび焼却灰の環境安全性について調査を行った。その結果、木チップボイラーでは、ばいじんや窒素酸化物の排出濃度が高く、特に河川支障木を燃料とした場合、ばいじんの排出濃度がさらに高くなる傾向が見られた。また、焼却灰については、溶出試験および含有試験の結果にばらつきがみられ、処理や利用方法についてさらなる検討が必要であると考えられた。

1. はじめに

再生可能エネルギーの利活用を促進する観点から、ボイラー燃料を従来の化石燃料から木質バイオマスに転換することにより、燃焼によるCO₂排出の実質的な増加が抑制され、カーボンニュートラルの実現が期待される。北海道では木質バイオマス、特に木チップの燃料利用が増加している。こうした背景のもと、自治体においては木質バイオマスのさらなる利活用策として、河川敷地の維持管理に伴って発生する「河川支障木」に着目し、木質燃料としての利用可能性を模索する取り組みが進められている。一方で、木質バイオマスの利用に際しては、ばいじんや窒素酸化物 (NO_x) などの排ガス中の有害物質による新たな環境負荷が懸念されており、それらの排出実態の検証が求められている。さらに、燃焼に伴い多量に発生する焼却灰の処理も課題となっている。木質バイオマスをエネルギー利用する全国の事業所の約6割が、焼却灰を産業廃棄物として処理、または保管しているという報告¹⁾もある。このような現状から、処理や保管にかかるコストおよび環境負荷を軽減するための、有効利用策の検討が重要である。

本研究では北海道内の木質バイオマスボイラーを対象として、排ガスおよび焼却灰の安全性に関する実態を検証したので報告する。

2. 調査対象ボイラー

表1に、調査対象としたボイラーの概要を示す。木質バイオマスボイラーとして木チップボイラーを対象とし、比較対象として重油ボイラーを加えた。さらに、排ガス測定の実績が少ない薪ボイラーについても、1例ではあるが調査を実施した。表中の施設記号は、木チップボイラーをW、薪ボイラーをFW、重油ボイラーをOとした。木チップボイラーのうち、W1とW2は市販の木チップ、W3は間伐材由来の木チップ、W4とW5は河川支障木由来の木チップを燃料とした。

表1 調査対象ボイラー

施設	燃料	定格出力 (kW)	施設種別
W1	木チップ(市販品)	163	温水ボイラー(商業利用)
W2	木チップ(市販品)	163	温水ボイラー(商業利用)
W3	木チップ(間伐材)	301	温水ボイラー(学校暖房用)
W4	木チップ(河川支障木)	301	温水ボイラー(学校暖房用)
W5	木チップ(河川支障木)	401	温水ボイラー(学校暖房用)
FW1	薪	200	温水ボイラー(商業利用)
O1	重油	210	温水ボイラー(学校暖房用)
O2	重油	581	温水ボイラー(学校暖房用)
O3	重油	232	温水ボイラー(学校暖房用)
O4	重油	465×2基	温水ボイラー(学校暖房用)
O5	重油	581	温水ボイラー(学校暖房用)

15ptあき

*Environmental Impact of Woody Biomass Combustion Boilers - Exhaust Gas and Incinerated Ash -

**Hideyuki OTSUKA, Shinobu NIWA ((地独) 北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所) Hokkaido Research Organization, Research Institute of Energy, Environment and Geology

3. 調査方法

3.1 排ガス

ばいじん濃度、排ガス温度および流速の測定は、JIS Z 8808²⁾に準拠して行った。排ガス成分の測定について、窒素酸化物 (NO_x) はJIS K 0104³⁾ およびJIS B 7982⁴⁾、CO はJIS K 0098⁵⁾に準拠し、HORIBA PG-335により測定した。

3.2 焼却灰 (飛灰および燃え殻)

北海道における焼却灰の安全性評価方法としては、「焼却灰 (天然木由来) の利用に関するガイドライン」⁶⁾、また、道総研森林研究本部林産試験場では、「利用者向け資料 木質バイオマス燃焼灰を融雪資材として利用する方法」⁷⁾を発行している。後者では、散布場所ごと (「農用地」「農用地以外」) に、利用先の土壌や地下水を汚染しないための満たすべき要件が記載されている (表2)。本研究ではこの要件に準じ、焼却灰の溶出試験は昭和48年環境庁告示第13号に準拠し、含有量試験は肥料等試験法および平成15年環境省告示第19号に準拠して実施した (表3)。

表2 散布場所ごと (「農用地」「農用地以外」) の利用先の土壌や地下水を汚染しないための満たすべき要件⁷⁾

散布場所	満たすべき要件
農用地	溶出量：汚泥肥料に係る適合要件を準用し、金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を満たすこと※1。 含有量：①汚泥肥料に係る有害成分の許容最大量を基準として準用し、本基準を満たすこと※2。②銅、亜鉛の含有量を明らかにしておくこと※3。
農用地以外	溶出量：農用地での溶出量に係る要件に同じ 含有量：土壌基準を満たすこと※4。

※1 金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令 (昭和四十八年総理府令第五号) 分析方法：昭和48年環境庁告示第13号
 ※2 肥料取締法第三条及び第二十五条ただし書きの規定に基づく普通肥料の公定規格 (昭和六十一年二月二十二日 農林水産省告示第二百八十四号) 分析方法：肥料等試験法
 ※3 分析方法：肥料等試験法
 ※4 土壌汚染対策法施行規則 (平成十四年環境省令第二十九号) 分析方法：平成15年環境省告示第19号

表3 各施設における分析対象

施設	W3・W4	W5
定格出力(kW)	301	401
灰回収機構	燃え殻及び飛灰をそれぞれ排出の後、個別に灰回収コンテナで回収	燃え殻及び飛灰をそれぞれ排出の後、まとめて灰回収コンテナで回収
分析対象	燃え殻	間伐材及び河川支障木
	飛灰	間伐材及び河川支障木
	混合	-
		河川支障木

4. 結果と考察

4.1 排ガス

図1～3に、各施設における排ガス中のばいじん、NO_xおよびCO濃度を示す。木チップボイラーと重油ボイラーの排出ガス成分を比較した結果、ばいじん濃度はばらつきが大きいものの、全体として木チップボイラーの方が濃度が高く、特に河川支障木由来の木チップを燃料としたW4、5ではより高い傾向が認められた。NO_x濃度についても、ばいじん濃度と比べると差は小さいものの同様の傾向が見られた。CO濃度は、重油ボイラーより木チップボイラーの方が顕著に高い傾向が見られた。

1施設のみの測定ではあるが薪ボイラーと木チップボイラーおよび重油ボイラーの排ガスを比較すると、薪ボイラーは、ばいじん濃度が高くNO_x濃度は低い傾向が見られた。また、薪ボイラーのCO濃度は平均5700 cm³/m³と高く、他の施設 (最大数百cm³/m³程度) と比較しても著しく

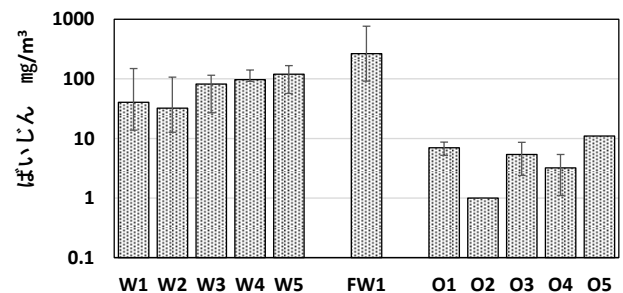


図1 ばいじん濃度 (バーは最大最小)

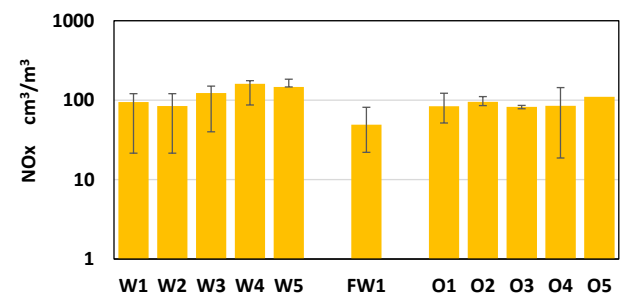


図2 NO_x濃度 (バーは最大最小)

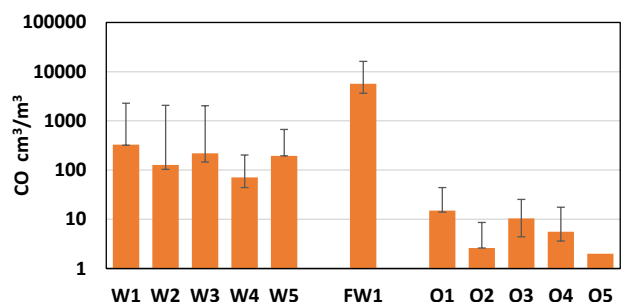


図3 CO濃度 (バーは最大最小)

高い結果であった。このため、ボイラー管理者や測定者などの作業者に対して、十分な換気の確保などの対策が必要であると考えられた。

図4に、ばいじん濃度とNO_x濃度の相関を示す。木チップボイラーでは両者の間に正の相関が、重油ボイラーでは逆に負の相関が認められた。この違いは、それぞれから発生するばいじんの主成分が、木チップボイラーでは灰分、重油ボイラーでは未燃カーボンであることと関係すると考えられる。木チップボイラーでは、木チップ供給量が増えると燃焼温度が上昇し、それに伴いNO_x濃度も増加する。また、燃焼量の増加により灰分の排出量も多くなり、ばいじん濃度が高くなると考えられる。先行調査においても、木チップ供給量とばいじん濃度およびNO_x濃度に正の相関がみられたという試験結果が多く得られていた⁸⁾。一方、重油ボイラーでは、燃焼温度が上がるにつれNO_x（特にサーマルNO_x）の生成が増加し、完全燃焼に近づくことでばいじんの主成分である未燃カーボンが減少し、結果としてばいじん濃度は低下する傾向を示すと考えられる。

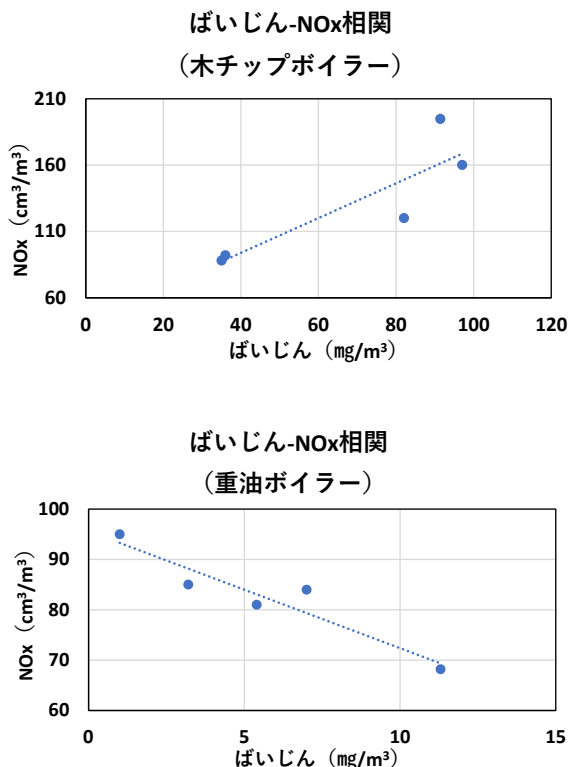


図4 ばいじんとNO_xの相関

4.2 焼却灰（飛灰および燃え殻）

表4および表5に、焼却灰の溶出試験および含有試験の結果を示す。なお、基準値を超過した項目については、背景色を灰色で表示している。以下に、燃料種ごとに検討を行った結果を示す。

表4 溶出試験結果

試料諸元				対象元素									
No.	施設	燃料種	焼却灰形態	Cd	Cr ⁶⁺	Hg	Se	Pb	As	Ni	Zn	Cu	単位
①	W3	間伐	燃え殻	ND	0.95	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	mg/L
②	W3	間伐	飛灰	ND	0.91	ND	0.036	0.006	0.13	ND	0.93	0.1	mg/L
③	W4	河川	燃え殻	ND	1.6	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	ND	mg/L
④	W4	河川	飛灰	0.87	2.5	ND	0.1	0.22	0.19	0.22	51	1.6	mg/L
⑤	W4	河川	燃え殻	ND	2.2	-	-	-	-	-	-	-	mg/L
⑥	W4	河川	飛灰	0.1	4.3	-	-	-	-	-	-	-	mg/L
⑦	W5	河川	混合	ND	2.2	ND	ND	0.006	ND	ND	ND	ND	mg/L
⑧	W5	河川	混合	ND	6.8	-	-	-	-	-	-	-	mg/L
基準値※1				0.09	1.5	0.005	0.3	0.3	0.3	-	-	-	mg/L

※1 金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令

表5 含有試験結果

試料諸元				対象元素									
施設	燃料種	焼却灰 形態		Cd	Cr	Hg	Se	Pb	As	Ni	Zn	Cu	単位
⑨	W3	間伐	燃え殻	0.06	63	-	0.47	0.55	1.9	36	50	120	mg/kg
⑩	W3	間伐	飛灰	23	80	-	0.83	11	3.5	32	1900	90	mg/kg
⑪	W4	河川	燃え殻	0.12	110	ND	1.8	0.61	2.2	290	77	120	mg/kg
⑫	W4	河川	飛灰	120	110	ND	4	17	7.5	94	4600	130	mg/kg
⑬	W4	河川	燃え殻	0.1	99	-	-	-	-	-	-	-	mg/kg
⑭	W4	河川	飛灰	160	47	-	-	-	-	-	-	-	mg/kg
⑮	W5	河川	混合	ND	89	ND	ND	1	1.5	300	50	160	mg/kg
⑯	W5	河川	混合	ND	120	-	-	-	-	-	-	-	mg/kg
基準値※2				5	500	2	-	100	50	300	-	-	mg/kg
基準値※4				45	250	15	150	150	150	-	-	-	mg/kg

基準値※2 肥料取締法第三条及び第二十五条ただし書きの規定に基づく普通肥料の公定規格

基準値※4 土壌汚染対策法施行規則

4.2.1 燃料種：間伐材の場合

焼却灰の形態が燃え殻である試料（試料番号①⑨）ではいずれも基準値を下回っていた。また、飛灰試料（②⑩）では、溶出試験は基準値※1（表2）を下回っていたが、含有試験はカドミウム(Cd)が肥料基準値※2（表2）を超過した。これは、Cdは沸点が765℃と金属元素としては比較的低く、燃焼時に気化したCdが燃焼ガスに輸送され、熱交換器で冷却されて再び固体化しやすい性質があるため、燃え殻よりも飛灰中のCd濃度が高くなったと考えられる。

4.2.2 燃料種：河川支障木の場合

溶出試験（試料番号③④）では、飛灰中のCd、燃え殻および飛灰中の六価クロム（Cr⁶⁺）で基準値※1を超過した。CdおよびCr⁶⁺のみを対象とした追加試験（試料番号⑤⑥）でも同様に超過した。含有試験（試料番号⑪⑫）では飛灰中のCdが基準値※2を超過した。この傾向はCdおよびクロムのみを対象とした追加試験（試料番号⑬⑭）においても同様に確認された。Cr⁶⁺の超過については、ステンレス部材が使用された燃焼装置の高温腐食が原因となっている可能性がある⁹⁾。さらに、燃料種が間伐材の場合と比較（試料番号①②と③④との比較）すると、燃え殻の場合で約1.7倍、飛灰の場合で約2.7倍とCr⁶⁺の溶出量が増加しており、河川支障木の利用による影響も考えられる。一方、Cdの含有量も燃え殻で2倍、飛灰で約5倍（試料番号⑨⑩と⑪⑫との比較）と間伐材よりも河川支障木のほうが高濃度であった。一般にクロムは土壤中に5～1000 mg/kgの範囲で含まれていると報告されている¹⁰⁾。

また、文献¹¹⁾によると、河川の底質中にもクロムが10 mg/kg, Cdは1 mg/kgのオーダーで検出されている。河川支障木は河道内樹木を伐採したものであり、通常の森林施業による木材と異なり、河川底質が付着しやすい環境にある。このため、Cr⁶⁺の溶出試験の基準値※1の超過およびCdの含有試験の基準値※2の超過は、河川底質が付着した河川支障木由来のチップを燃焼することにより、焼却灰中にCr⁶⁺およびCdが濃縮されたことが、要因の一つであると推察された。

また、焼却灰の形態が燃え殻と飛灰の混合である施設W5における溶出試験（試料番号⑦）では、Cr⁶⁺が基準値※1を約1.5倍超過した。一方、含有試験（試料番号⑮）では、すべての項目で基準値※2以下であった。さらに、CdおよびCr⁶⁺、クロムのみを対象とした追加試験（試験番号⑧⑩）においても溶出試験のCr⁶⁺が基準値※1を超過した。

以上の結果から、溶出試験においてはCr⁶⁺およびCd、含有試験においてはCdが基準値を超過していた。溶出試験においてCr⁶⁺の基準を超過した場合の対策としては、土壌や堆肥と混合することで無害化を図る手法が考えられる。Cr⁶⁺は人体に有害であるが、土壌中の有機物等により毒性が低い三価クロムへと還元されることが知られている。この還元機構を用いて、安全が確認できなかった焼却灰を対象に、無害化試験を実施した。その結果を図5に示す。

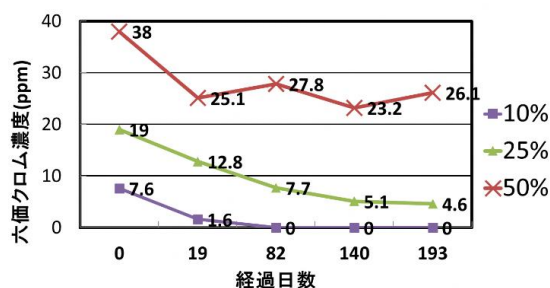


図5 「土壌の還元作用」を用いた焼却灰中六価クロムの無害化試験結果

無害化試験に用いた焼却灰は、本研究とは異なる施設で発生した焼却灰（Cr⁶⁺濃度76 mg/L）を用いた。土壌に対して試料をそれぞれ、10%、25%および50%の割合で混合し、Cr⁶⁺の減衰傾向を測定した。その結果、50%の割合ではCr⁶⁺を完全に還元できないものの、10%の割合では3ヶ月程度ではほぼ完全に還元されることが確認された。また、焼却灰から溶出するCr⁶⁺は、堆肥と混合することにより、還元されて溶出が抑制されること、また、焼却灰と堆肥を絶乾重量比1:7で混合した肥料は、すべての項目で基準値以下であることが確認されている⁹⁾。

一方、溶出試験および含有試験におけるCdについては、農用地利用のための要件である肥料取締法の基準値

（5 mg/kg）だけではなく、農用地以外の利用要件である土壤汚染対策法の基準値（45 mg/kg）も超過する可能性がある。そのため、特に含有試験のCd濃度に留意し、45 mg/kgを超える場合は当該焼却灰を産業廃棄物として適切に処理することが必要であると考えられた。

5 終わりに

今回の結果から、木チップボイラーは重油ボイラーに比べて、ばいじんおよびNOxの排出濃度が高く、特に、河川支障木由来の木チップを燃料とした場合には、ばいじん濃度がさらに高くなる傾向が見られた。また、木質バイオマスの燃焼に伴い、焼却灰が多く排出される。燃焼装置の部材や燃料種によっては、有害物質を含む可能性があるため、焼却灰の処理法についても検討が必要である。したがって、木質バイオマスへの燃料転換に際しては、このような排ガスや焼却灰などによる環境影響について十分に評価を行う必要があると考えられる。

6. 引用文献

- 1) 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構：第1期戦略研究報告書「地域・産業特性に応じたエネルギーの分散型利用モデルの構築」PP. 60-61, 2019
https://www.hro.or.jp/upload/1082/H30_Final_Report_Energy1_rev.pdf (2025. 7. 17アクセス)
- 2) 日本規格協会：排ガス中のダスト濃度の測定方法（JIS Z 8808），日本規格協会，東京，2013
- 3) 日本規格協会：排ガス中の窒素酸化物分析方法（JIS K 0104），日本規格協会，東京，2011
- 4) 日本規格協会：排ガス中の窒素酸化物自動計測システム及び自動計測器（JIS B 7982），日本規格協会，東京，2002
- 5) 日本規格協会：排ガス中の一酸化炭素分析方法（JIS K 0098），日本規格協会，東京，2016
- 6) 北海道水産林務部林務局林業木材課，環境生活部環境局循環型社会推進課および農政部生産振興局技術普及課：焼却灰（天然木由来）の利用の手引き，2017
https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/1/0/0/8/4/1/0/0/_riyounotebiki.pdf (2025. 7. 17アクセス)
- 7) 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構：利用者向け資料 木質バイオマス燃焼灰の融雪資材としての利用法，2019，
<https://www.hro.or.jp/upload/13142/nensyoubai.pdf> (2025. 7. 17アクセス)
- 8) 大塚英幸，丹羽 忍，福田陽一朗，仮屋 遼，芥川智子，西宮耕栄，阿部佑平：木チップ燃焼機のばいじん排出実態，全国環境研会誌，**46**，No. 3，56-58，2021
- 9) 高橋徹，富田恵一，若杉郷臣，山田敦，折橋健，古

- 賀信也：木質系バイオマス燃料灰の安全性評価および有効利用，第19回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp. 208-210, 2008
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jswmepac/19/0/19_0_208/_pdf (2025. 7. 17アクセス)
- 10) 中川良三，大八木義彦：土壌および底質中のクロムの原子吸光分析，日本化学会誌，**12**，2331-2335, 1974
https://www.jstage.jst.go.jp/article/nikkashi/1972/1974/12/1974_12_2331/_pdf (2025. 7. 17アクセス)
- 11) 山田亜矢，小野芳朗，河原長美，並木健二，谷口守：最終処分場浸出水中重金属の河川及び底質への影響評価，土木学会論文集，**713/VII-24**，37-43，2002
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2002/713/2002_713_37/_pdf (2025. 7. 17アクセス)