

海岸流木の燃料化に向けた成分分析及び燃焼試験

富樫 憲一, 山越 幸康

Component Analysis and Combustion Test for Utilization of Driftwoods as Solid Fuel

Kenichi TOGASHI, Yukiyasu YAMAKOSHI

抄 録

近年、北海道でも暴風雨の発生頻度が上昇傾向にあり、河川の増水に伴う海岸流木の発生が問題視されている。海岸流木は船舶が出航する際の障害となることに加え、満潮時に海へと再漂流し船舶や漁網に損傷を与えるなど近隣地域に深刻な被害をもたらしている。このような被害を軽減するため、流木の早急な撤去ひいては有効利用が求められており、その一環として海岸流木の燃料化が検討されている。しかしながら塩化ナトリウムを含有する木質バイオマスを用いた燃焼機内での燃焼させる際には、塩化ナトリウムそのものが燃焼ガスに乗って飛散し機材損傷の原因となることに加え、塩化水素などの塩素化合物が生成されることで燃料としての利用が非常に困難となることが懸念される。そこで本研究では、まず海岸流木の燃料利用を念頭に置いて十勝川河口域の海岸から採取した海岸流木の塩化ナトリウム含有率分布を独自の手法で分析し、海岸流木の塩化ナトリウム含有率が6%以内であることを確認した。次に、この分析結果にもとづいて木質バイオマスに塩化ナトリウムを含ませた模擬試料を作製して実験室規模及びボイラー実機規模の燃焼試験に供し、それぞれの条件下で燃焼ガスに含まれる化学物質の分析を行った。燃焼試験の結果、塩化ナトリウムを含有する木質バイオマスを800℃以上で燃焼させると塩化ナトリウムが白煙となって飛散すること、飛散した塩化ナトリウムの大半はその化学的形態を維持したまま析出することがわかった。

キーワード：固形燃料, 低品位バイオマス, 廃棄物の有効利用, 燃焼, 成分分析

Abstract

These years, derelict driftwoods on the seashore brought by typhoons are considered as a social problem in Hokkaido as well as in other regions in Japan. Driftwoods are seriously problematic because they prevent the ships from leaving shore and when sea level rises, they damage ships, fishing net and so on by drifting around the neighborhood. To reduce these kinds of damage, immediate removal and disposal of driftwoods are required and utilization of them as solid biomass fuel is being discussed. However, sodium chloride itself which is contained in the driftwoods and combustion products such as hydrogen chloride possibly cause damages to the environment and burning appliances. In the present study, component analysis and combustion test are performed to discuss the influence of sodium chloride on combustion of driftwoods. At first, natural driftwoods on the seashore in estuarine region of the Tokachi River are sampled and the content rate of sodium chloride is analyzed by an original method developed in the present study. As a result, the content rate was determined to be within 6 mass% for all the samples. Then, the combustion tests using imitation fuels are performed in two different scales: laboratory scale test using tubular furnace and real scale test using actual boiler for solid fuels. As a result, it was found that sodium chloride is volatilized and dispersed into ambient air at the furnace temperature above 800°C and most of it crystallizes at the room temperature maintaining the chemical form of sodium chloride.

KEY-WORDS : Solid fuel, Low-grade biomass, Utilization of waste, combustion, Component analysis

1. はじめに

近年、北海道でも暴風雨の発生頻度が上昇傾向にあり、河川の増水などに伴う海岸流木の発生が問題となっている。海岸流木は強風などによりなぎ倒された樹木が河川を流下して海へ流出し、それが岸辺に再び漂着したものであるが、船舶が出航する際の障害となることに加え、満潮時に海へと再漂流し船舶や漁網に損傷を与えるなど近隣地域に深刻な被害をもたらしている。このような被害を軽減するため、自治体が流木を海岸からやや高い内陸側へ押し上げるなどの対策をとっている地域もあるが、押し上げ後の流木の処理方法が問題となっている。海岸流木の有効利用法のひとつとして燃料化が検討されているが、塩化ナトリウム（以下NaCl）を含有する木質バイオマスをボイラーなどの燃焼機内で燃焼させる際には、NaClそのものが燃焼ガスに乗って飛散し機材損傷の原因となることに加え、塩化水素（以下HCl）などの塩素化合物が生成され燃料としての利用がいっそう困難となることが懸念される。そこで本研究では、まず海岸流木の燃料利用を念頭に置き、十勝川河口域の海岸から採取した海岸流木のNaCl含有率分布を独自の分析手法により評価した。次に、木質バイオマスに分析により得られたNaCl含有率と同等のNaClを含浸させることで模擬試料を作製し、それを用いて管状炉による実験室規模及び固形燃料ボイラー-実機規模の燃焼試験を行った。これらの燃焼試験で発生した燃焼生成物を捕集してそれぞれ成分分析を行うことで、海岸流木に含まれるNaClが燃焼に及ぼす影響を評価した。

2. 模擬試料及び流木のNaCl含有率の分析方法

2.1 模擬試料の作製方法

本研究では、塩分含有率測定手法の妥当性検証を行う際の標準試料として用いること、また燃焼試験にあたって組成と性状の安定した試料を供することの2つを目的として、所定の質量分率のNaClを含有する海岸流木模擬試料を作製した。図1を用いて、木質チップボイラーの燃料として一般的に用

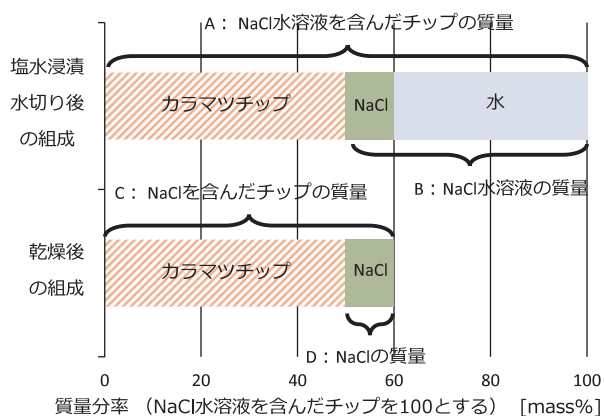


図1 模擬試料の塩分調整方法

いられているカラマツチップに所定の塩分を含ませる過程を説明する。

(1) まず所定の濃度のNaCl水溶液(B)を作り、カラマツチップを水溶液中に浸漬する。

(2) 丸2日程度浸漬すればチップの含水率が一定値（50 mass%程度）に収束することを利用し、含水したチップに占めるNaCl水溶液の質量分率（B/A）を設定する。

(3) 105℃の恒温室内にNaCl水溶液を含んだチップを5時間程度放置し、含まれていた水のみを蒸発させて除去することで、所定の塩分含有率（D/C）のチップを作製した。

本研究では以上のプロセスにより所定の塩分を含ませたチップを作成し、これを海岸流木の模擬試料として用いて塩分含有率分析手法の妥当性評価及び燃焼試験を行った。

2.2 模擬試料によるNaCl含有率の分析手法の妥当性検証

本研究では、流木試料を入れた電気炉内を2～3時間にかけて600℃の高温に維持することで可燃分を揮発させ、残った灰分をすべてNaClと見なすことでNaCl含有率の把握を試みた。しかしながら、木質試料の入った電気炉内を急速に昇温すると、300℃程度で木質試料に含まれる可燃性の揮発分に由来する煙の発生が見られるようになり、間もなくその揮発分に引火することで火炎が発生する。この火炎により試料中のNaClが空气中に飛散することで正確な含有率の測定ができなくなる可能性を考慮し、本研究ではあらかじめ所定のNaClを含浸させた木質チップを有炎と無炎のふたつの方法で灰化し、得られた灰分を設定したNaCl含有率と比較することで分析手法の妥当性を評価した。有炎及び無炎それぞれの方法の灰化過程における炉内温度の履歴を図2に示す。有炎灰化は石炭に含まれる灰分の工業分析手法を定めたJIS M8812¹⁾に準拠し、815℃まで一挙に昇温する方法であるのに対し、無炎灰化は揮発分が発生し始める300℃到達時以降、揮発分への引火を避けるために50℃ずつ段階的に炉内温度を上昇させる方法とした。図3に、それぞれの灰化方法で得られた灰分の試料全体に占める質量分率を、模擬試料の作

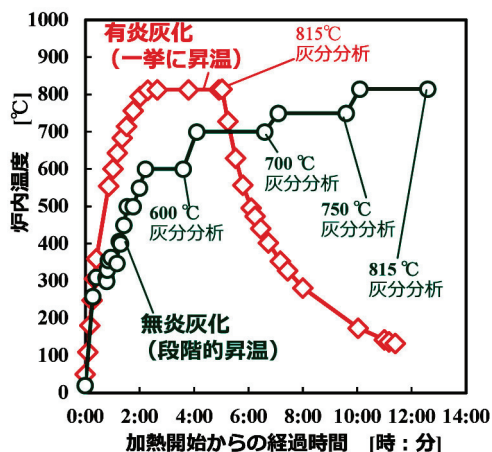


図2 NaCl含有率分析時の炉内温度履歴

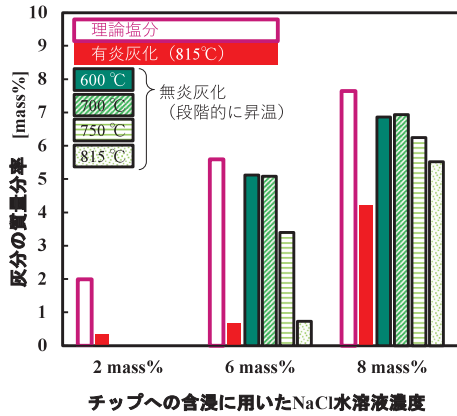
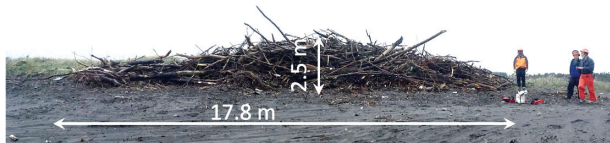


図3 有炎・無炎それぞれの灰化法で得られた灰分の比較

成時に漬け込んだNaCl水溶液の濃度から図1に基づいて算出した理論塩分とともに示す。図より、有炎灰化により得られた灰分は設定した塩分含有率よりも著しく低い値となったのに対し、600°C~700°Cの無炎灰化により得られた灰分は、設定した塩分含有率の90%程度の値を示していることがわかる。また、模擬試料の母材として用いたカラマツを600°C以上で灰化すれば、元のカラマツの質量の0.2%程度の灰分しか残留しないことがわかっていることから、今回の試験で残留した灰分はほぼ全てが意図的に含浸させたNaClであると推定される。この結果を踏まえ、本研究における流木のNaCl含有率分析に際しては最終的な炉内の到達温度を600°Cとする無炎灰化を採用した。さらに、以上の検討から得られた副次的な知見として、NaClを含む木質バイオマスが火災を伴って燃焼する際にはNaClが周囲環境に飛散すること、さらに、ほぼ純粋なNaClとなった灰分を750°C以上に維持すると周囲環境への飛散が起こることが示唆された。

2.3 十勝川河口域における海岸流木の採取及び前処理

海岸流木の成分分析のため、十勝川河口域に漂着した海岸流木の採取を行った。図4に再漂流防止のため内陸側へ押し上げられた流木の山の写真を、図5に採取した流木の外観写真をそれぞれ示す。本研究では、図4に示したような流木の



(a) 再漂流防止のため押し上げられた流木の山



(b) 採取した流木の原形の一部

図4 十勝川河口域の砂浜に押し上げられた流木

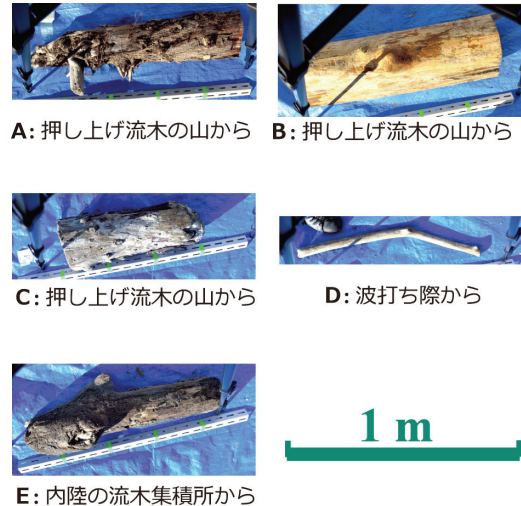


図5 採取した流木



図6 採取した流木の切り分けと粉碎工程

山から直径の大きいもの(図5試料A~C)、及び波打ち際で海水に晒されていたもの(図5試料D)、さらに砂浜から撤去され内陸の流木集積場所に運搬された後風雨に晒されていたもの(図5試料E)を抽出し、その端部から50cmの位置を切断して採取した。採取した流木は道総研林産試験場(以下、林産試)の報告²⁾に倣い、図6に示すとおり軸方向に10cm間隔で輪切りした上、表面近傍部分と中心軸近傍部分に切り分けて粉末状に粉碎し、前節で述べた無炎灰化を行うことでNaCl含有率分布を把握した。

2.4 流木のNaCl含有率分布の測定結果

図7に、流木のNaCl含有率分布の測定結果を示す。林産試による報告²⁾と同様、破断面から徐々に含有率が低くなる傾向がみられる試料もあれば、必ずしもそうではない試料もあることがわかる。これは、海水は原則的に流木の側面ではなく断面から含浸してゆくものの、海岸流木が海水に浸されていた期間や姿勢が一樣ではないことに起因するばらつきがあるためと考えられる。また、すべての試料において、塩分含有率は林産試による報告²⁾と同等の6%以内であることが確認された。さらに、灰分含有率が特に高かった部位を815

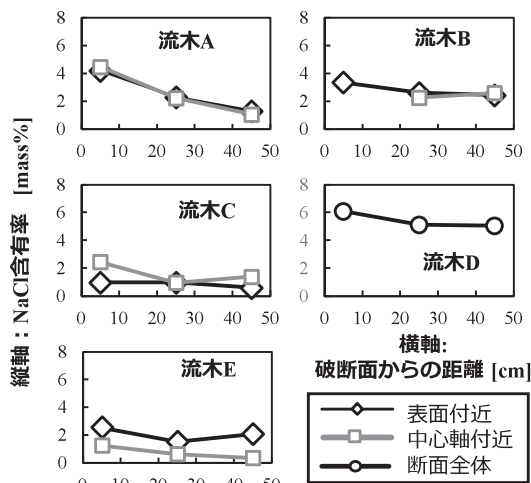


図7 採取した流木の塩分析結果

℃で灰化し、得られた灰に対してFP法による蛍光X線（リガク社製、ZSX Primus II）分析を行ったところ、部位によってばらつきが見られるものの、検出された無機元素全体のうち、質量分率にして60~80mass%がNa及びClであるという結果が得られた。

3. 管状炉を用いた実験室規模の燃焼試験

3.1 実験装置及び方法

図8に、管状炉による実験室規模の燃焼試験に用いた実験装置の系統図を示す。電熱線による加熱及び温度制御機構を備えた管状炉の中心には石英ガラス製の炉心管が設置されており、炉内の温度を1000℃程度までの一定温度に保つことが可能となっている。炉心管の末端にはゴム栓を介して吸引ポンプが接続されており、これにより炉心管内の気体を一定流量で排気することができる。燃焼試験方法として、2.1節で述べた方法により所定の分率のNaClを含浸させたカラマツおよそ1gを試料皿に乗せ、所定の温度に維持された炉内に入れて燃焼させた。燃焼に伴って発生する生成物は吸引ポンプによって下流へと流され、炉心管末端のゴム栓に設置され

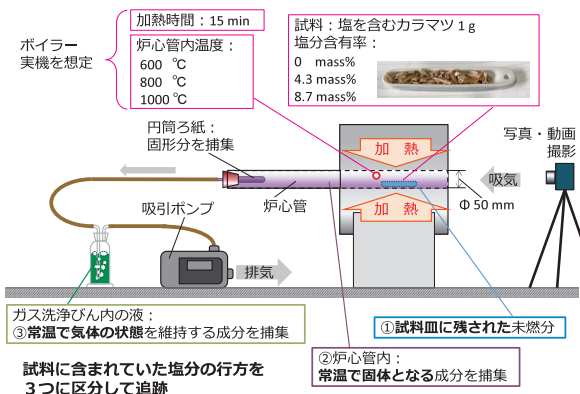


図8 管状炉を用いた燃焼試験装置

た円筒ろ紙を通過する。ここで、炉心管末端の温度はすべての条件において100℃以下であったことから、燃焼生成物に含まれる物質のうち、この温度域で固体となる成分（たとえばNaCl）がろ紙により捕集されると考えられる。ろ紙に捕集されなかった物質すなわち100℃近傍で気体の状態を維持する物質（たとえばHClなど）は、さらに下流のガス洗浄瓶にて蒸留水の中を通過し、ここで水溶性の成分が水に溶解して捕集されると考えられる。固形燃料ボイラー実機での炉内滞留時間を想定して試料の投入から15分間をもって試験終了とし、試料に由来する物質を以下の3通りに区分して捕集した。

- ①試料皿に残った固形残留物
- ②炉心管の内壁及び円筒ろ紙に付着した固形分
- ③ガス洗浄瓶に捕集された水溶性のガス

以上の生成物はそれぞれ以下のとおり捕集し分析を行った。

- ①試料皿の固形分は、重量を測定することで残留物の試料全体に占める比率を算出した。
- ②炉心管内に析出した固形分は、ろ紙を含む管内を蒸留水で洗浄し、洗浄液をICP発光分析装置（島津製作所製、ICPS8100）により分析することで、Na及びClの析出量を把握した。
- ③ガス洗浄瓶に捕集された物質については、洗浄瓶内の液をICP発光により分析することでNa及びClの捕集量を把握した。

実験パラメータとして、試料に含まれる塩分を0, 4.3, 8.7mass%に、炉内温度を600, 800, 1000℃にそれぞれ設定して実験を行った。

3.2 実験結果

図9に、試料NaCl含有率8.7mass%、炉内温度1000℃の条件における炉内を撮影した写真を示す。炉内温度やNaCl含有率に関わらず、炉内に投入した試料はただちに図9(a)のような火炎をあげて発火し、1分程度で揮発分が放出つくさることで炎が消えて熾（おき）燃焼状態となり、その後数分をかけて可燃分がすべて燃え尽き消失するという共通の挙動が見られたが、NaClを含有させた試料を800℃以上の炉内に投入した条件に限り、図9(b)に示したような白煙が試験終了となる15分後まで継続的に発生し続けることが確認

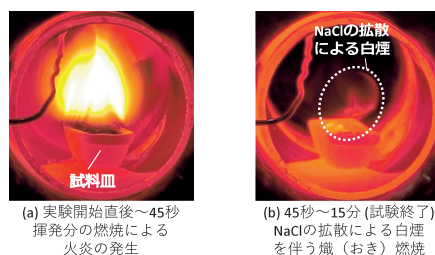


図9 炉心管内の写真
 (試料NaCl含有率：8.7 mass%，炉内温度：1000℃)

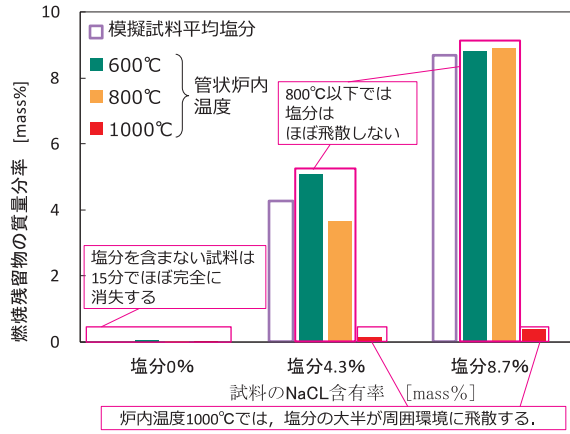


図10 試料皿に残留した固形分の試料に占める質量分率

された。これは、既に2.2節で得られていた750°C以上の高温炉内にNaClを放置すれば周囲環境への飛散が起こることを示唆する結果を視覚的に裏付けるものであり、高温環境に静置されたNaClが白煙となって少しずつ周囲環境に飛散する様子を目視で確認することができた。NaClの融点は800°C程度³⁾とされており、それとほぼ同等の炉内温度で周囲環境への拡散までもが発生することについては疑う余地が考えられたが、既往の研究において、廃棄物中に含まれるNaClが600°Cの炉内では試料皿に残留し、900°Cの炉内では揮発するという報告^{3),4)}があることから、本研究においてもNaClが揮発によって周囲環境へ拡散した可能性が十分に考えられる。

図10に、各条件において実験終了後の試料皿に残留した固形分の、実験開始時の試料全体に対する質量分率を示す。図の横軸は設定した試料のNaCl含有率である。図より、塩分

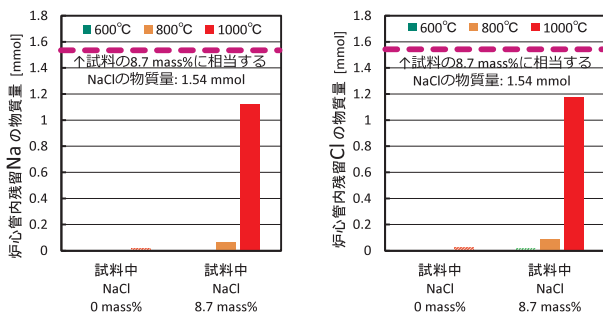


図11 炉心管内に残留したNaとClの物質質量分析結果

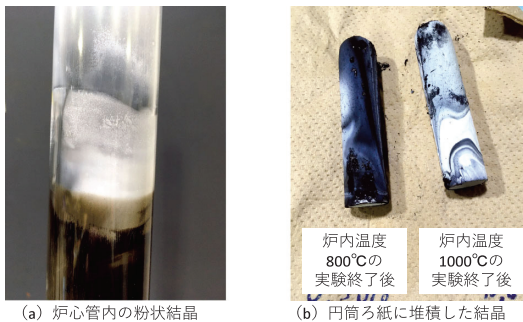


図12 炉心管内に析出した白色結晶

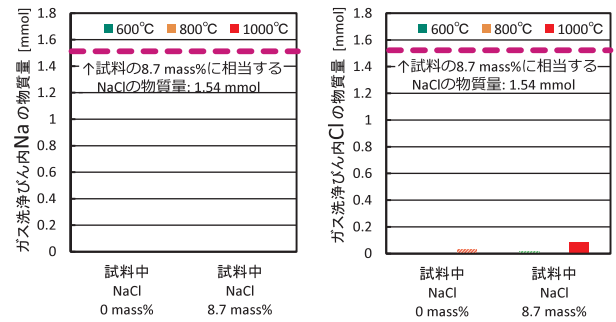


図13 ガス洗浄瓶に捕集されたNaとClの物質質量

を含まない試料はほぼ残留物を残さずに消失していることから、15分という実験時間は木質試料が燃え尽きるのに十分な時間であることがわかる。一方、塩分を含む試料に注目すると、炉内温度600°C及び800°Cでは元々試料に含まれていた塩分と同等の残留物が得られているのに対し、炉内温度1000°Cの条件においては試料の大半がわずかな残留物を残して消失していることがわかる。本節で先に述べた炉内の観察結果より、800°Cと1000°Cの炉内ではNaClの拡散を示す白煙の発生が見られたが、残留物の量に著しい相違が見られることから、炉内温度800°Cの条件と比較して1000°Cの条件の方がNaClの拡散速度が非常に速いものと考えられる。図11に、試料皿を取り除いた炉心管内を洗浄した水をICP発光により分析し、含まれるNa及びClを定量した結果を示す。元々NaClを含まない試料や600°Cで加熱した条件ではNaやClがほとんど検出されないのに対し、NaClの拡散を示す白煙が観察された800°C及び1000°Cの条件においてはNa及びClが検出された。これらの条件におけるNa及びClの検出量を図10に示した試料皿残留物の量と比較すると、炉心管における検出量は試料皿に残された残留物の量が少ないほど多くなっており、これはNaClの質量保存則と整合する傾向と見なすことができる。さらに、NaClが検出された条件ではNaとClの物質質量がほぼ等しくなっていることから、炉心管内に析出したNaCl由来物質の大半は、もとのNaClの形態を維持していることが推察される。分析結果から多量のNaClが析出していると考えられる炉内温度1000°Cの条件においては、図12に示すとおり、炉心管壁及び円筒ろ紙に目視で確認できるほどの白色結晶が析出していた。図12(b)に示したのはそれぞれ炉内温度800°C及び1000°Cにおける実験終了後の円筒ろ紙であるが、実験開始後1分間程度のうちに木質試料の揮発分由来する煤が発生し、その後実験終了までNaCl由来の白煙が継続的に発生し続けるという現象の順序に対応して、円筒ろ紙表面がまず黒い煤で覆われ、その上に白色のNaCl結晶が薄く付着している様子が確認された。さらに、試料皿の残留物及び炉心管洗浄液の分析結果が共に多量のNaClが飛散したことを示している炉内温度1000°Cの条件で、やはり多量の白色結晶が析出していることが目視で確認できる。

図13に、それぞれの実験条件においてガス先浄瓶に捕集さ

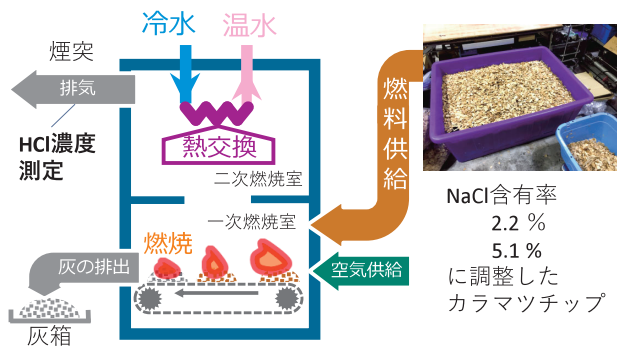


図14 燃焼試験に用いたボイラー実機模式図

れたNa及びClのICP発光分析結果を示す。少量のClが捕集されていることを示す結果が得られているものの、試料に含まれていたNaClの大半がそのまま炉心管内で析出したことを裏付ける結果となっている。

以上の分析結果をNaClの質量保存の観点から考えると、「試料に含まれていたNaClの質量」は、原則的に図8に示した「3通りの燃焼生成物①、②、③に含まれるNaおよびClの合計質量」と一致するはずである。今回の分析の妥当性を評価するため、分析結果から両者を算出して比較したところ、燃焼生成物に含まれるNaおよびClの合計質量は、元の試料の平均NaCl含有質量に対して71%から116%の範囲に分布していることがわかった。差異が生じた要因としては、燃焼生成物の分析のための前処理として経由した各過程（捕集、洗浄、希釈など）における誤差が累積されたことに加え、燃焼試験に供する試料の量を1g程度の少量にしなればならなかったことから、試料に元々含まれているNaClの量にばらつきが生じていたことが考えられる。

4. 固形燃料ボイラー実機における燃焼試験

4.1 実験装置及び方法

道総研と富良野市役所にて共同改良を行った固形燃料ボイラー（出力350kW）を用いて実機における燃焼試験を行った。図14に、固形燃料ボイラーの模式図を示す。燃料はスクリュウコンベアにてボイラー内への自動供給が可能となっており、ボイラー内部のストーカー（燃料搬送機能付き火格子）上に一定の供給速度で投入される。投入された燃料はストーカー上の火種から引火することで燃焼を開始し、可燃分が燃え尽きるのに十分な時間をかけて出口まで搬送され、燃え残った未燃残留物が灰箱に落とされて排出される。燃焼室には水が流れる伝熱管が通っており、燃焼で発生した熱が伝熱管内の水に伝わることで温水が得られる構造となっている。本研究では、海岸流木を模擬して2.1節で述べた方法によりNaCl含有率を2.2及び5.1mass%に設定したカラマツチップを燃料として用いて燃焼試験を行い、排気系統最下流の煙突から排気ガスを採用して燃焼機損傷の原因となるHClの濃度を

表1 ボイラー実機による燃焼試験 条件及び結果

		燃料のNaCl含有率	
		2.2 mass%	5.1 mass%
試験条件	燃料水分 [mass%]	18.6	14.5
	燃料供給速度 [kg/h]	76.8	73.1
	実験時間 [h:min]	1:24	1:47
	積算燃料供給量 [kg]	108	130
	積算NaCl供給量 [kg]	1.96	5.70
試験結果	排気中のHCl濃度 [mg/m^3]	1.1	13
基準値	排気中のHCl濃度 [mg/m^3]	700	

測定した。

4.2 実験条件及び結果

表1に、ボイラー実機における燃焼試験の条件及びHCl濃度の測定結果を示す。実験中における炉内温度は800℃程度であったが、ストーカー上の火種の中に熱電対を挿し込んで温度を測定したところ、位置やタイミングによってばらつきがあるもののおおむね1000℃程度であったため、前章で述べた管状炉試験の結果からNaClが周囲環境へ拡散する炉内条件となっていたことが推察される。燃焼により発生した排気を採用して分析を行った結果、HClの濃度は大気汚染防止法の基準値を大幅に下回ることがわかった。ただし、本実験における排気ガスの採取位置はボイラー排気系統最下流付近の煙突であるため、燃焼で発生したHClが採取位置に至るまでの系統内で凝縮した水に溶解して捕集されることで、測定されたHClの量が燃焼室で発生した量を下回っている可能性がある。従って、今回得られたHCl濃度については、今後さらなる検討を要すると思われる。

5. おわりに

本研究では、海岸流木を燃料として利用することを念頭に置き、海岸流木に含まれるNaClの含有率を把握した上で、それと同等の塩分を含ませた木質燃料を燃焼させ、NaClが燃焼に及ぼす影響について検討を行った。結果として、以下の知見が得られた。

- (1) 木質バイオマスに含まれるNaClの定量手法を確立した。
- (2) 採取した海岸流木のNaCl含有率分布を測定し、おおむね6 mass%未満であることを確認した。
- (3) NaClを含む木質バイオマスを750℃以上の高温炉内に静置するとNaClが周囲環境へ拡散することがわかった。
- (4) NaClを含む木質バイオマスを1000℃以上で加熱すると、15分以内に大半のNaClが周囲環境に拡散することがわかった。
- (5) 高温炉内で拡散したNaClの大半はNaClの形態を維持して周囲へ飛散し、常温まで冷やされれば結晶として析

出する。

- (6) ボイラー実機にてNaClを含む木質チップを燃焼させ、排ガス中のHCl濃度を測定した結果、大気汚染防止法の基準値を大幅に下回る数値が得られたが、ガス採取位置の影響など今後さらなる検討が必要である。

以上の知見を踏まえ、今後海岸流木を燃料として利用しようとする際には、以下の点に留意する必要があると思われる。

- (1) ボイラーなどの燃焼機でNaClを含む木質を燃焼させる際、750℃以上の高温となる炉内ではNaClがその形態を維持したまま周囲へ拡散し、燃焼機の損傷や周囲環境への悪影響をもたらす可能性が高い。
- (2) 一般的に、木質燃料を完全燃焼させ、排気中の煤塵発生など不完全燃焼の弊害を回避するためには1000℃以上の炉内温度が望ましいとされており、木質燃料とNaClそれぞれの環境負荷低減を両立させることは難しいと考えられる。
- (3) 以上(1)、(2)より、海岸流木を燃料として利用あるいは焼却処分する際には、雨ざらしによる脱塩やNaClを含まない木質バイオマスとの混合などにより、NaCl含有率を許容範囲まで低減する前処理が望まれる。

謝辞

本研究で用いたICP発光分析装置（島津製作所製、ICPS8100）は、公益財団法人JKAの補助を受けて当場に導入されたものである。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本工業規格 M 8812-1993 石炭類及びコークス類—工業分析法 (1993)
- 2) 斎藤 直人, 平成21年度循環型社会形成推進科学研究費補助金 総合研究報告書 「海岸流木のリサイクルに向けたシステム提案 (漂着ごみ問題解決に関する研究)」, 北海道立林産試験場 (2010)
- 3) 「廃棄物試験・検査法研究部会」1998年度報告書, 日本廃棄物学会 (1999)
- 4) 渡辺 信久, 谷川 昇, 石川 千晶, 山本 実, 前 弘, 篠原 明義, 松江 努, 佐藤 茂夫, 及川 智, 河村 清史, 「ごみ中塩素計測法に関する検討」, 廃棄物学会誌, Vol.12, No.1, pp.60-66 (2001)

