

## 論文 Article

## 未利用資源の有効活用に関する研究（第1報）

原稿受付 2010年4月29日

ものつくり大学紀要 第1号 (2010) 28~33

櫻井大八郎<sup>\*1</sup>, 納見千春<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup>ものつくり大学 技能工学学部 製造技能工学学科<sup>\*2</sup>ものつくり大学 大学院 ものつくり学研究科 元院生

## A Study on Effective Use of Unused Resources (Part 1)

Daihachiro Sakurai<sup>\*1</sup>, Chiharu Noumi<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup> Prof. of Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists<sup>\*2</sup> Former Student of Graduate School, Institute of Technologists

## Abstract

The global warming problem is one of the most serious ones for the human future. In accordance to solve this problem, the concept was tried as the searching examination, that is the general waste was carburized and the produced carbon was hardened with Phenol Resin. As the result, carburization went well and the carbon collection ratio was about 88%. But hardening did not go so well. Compression Strength was about 7~8N/mm<sup>2</sup>, which is about 1/5 of wooden material, and Specific Weight was about 1.0, which is twice of that. But the possibility for real use of this concept was confirmed. And some themes could be found for the following researches.

**Key Words** : general waste, carburization, thermal hardening, Phenol resin, global warming problem, carbon stabilization,

## 1. はじめに

昨今、地球環境・資源エネルギー問題が喫緊の課題となっている。本研究は地球環境、特に地球温暖化防止に対処するためのものである。未利用資源としては多数あり、その最たるものが現在廃棄物として取り扱われているものである。廃棄物は法律上は資源ではないが、これを資源化出来れば、資源問題の対策ともなりうる。国内法規上の産業廃棄物は、比較的分別もされており、排出者責任で対策も比較的良く実行されている。そこで、どちらかといえば分別が困難な一般廃棄物（都市ごみ）に着目し、これを木材代替材料と出来れば、現在大部分が焼却処理され、二酸化炭素の排出元

となっている一般廃棄物の炭素が固定化（二酸化炭素排出防止）でき、さらに森林資源の維持（すなわち二酸化炭素吸収源の確保）が可能となる。

現在、国内で焼却処理されている一般廃棄物は年間約4400万トンにのぼり<sup>1)</sup>、そのうち約45%が可燃成分、可燃成分のうち約44%が炭素となっている<sup>2)</sup>。この炭素全量（約870万トン）を資源化できれば、約3200万トン/年の二酸化炭素排出量が低減できることになる。さらに870万トンの炭素を木材代替材料として利用できれば、（木材比重を約0.5、添加物比率約40%として）約1450万トン/年、約2900万m<sup>3</sup>/年の木材使用量低減となる。木材と原木の比率は約80%<sup>3)</sup>であるため、これは原木量としては約1800万トン/年に相当する。

木の二酸化炭素吸収量は約 1.6 kg/kg とされており<sup>3)</sup>, 2880 万トン/年の二酸化炭素吸収に等しい。前述の焼却を行わないことによる二酸化炭素排出低減と、木材代替品としての有効利用による二酸化炭素吸収増を加えると約 6000 万トン/年の二酸化炭素排出減となるものと推定できる。これは、1990 年の国内二酸化炭素排出量（政府公約算定基準）11.4 億トンの約 5.3% に相当することとなり、かなり有効な活用手段ではないかと考えられる。

そこで、収集された一般廃棄物をフラフ化(RDF (ごみ固形化燃料, Refused Derived Fuel) 製造工程で射出成型前の状態にすること)し(RDF で実証済みの技術), これを炭化させた後, 成形し熱硬化樹脂で固める処理システムを考えた。炭化・硬化に用いる熱源としては, 炭化時に発生する可燃性ガス(水素, メタン等)を用いることにすれば, フラフに含まれている水素の持つ化学熱エネルギーで十分加熱可能であり, 300°C (577K) 以下の加熱とすればダイオキシン等の発生も防止できる。さらに, 当該木材代替材料はほとんどが炭素で構成されており, 使用後のリサイクルも破砕, 成形, 熱硬化樹脂硬化とすれば問題なく達成可能である。

一般廃棄物の炭化<sup>4)</sup>, 木材の炭化・セラミック化<sup>5)</sup> についての研究は実施されているが, 700K 以上の高温で実施されており, ダイオキシン発生抑制を考慮した低温域での炭化・硬化に関する研究は他に見当たらない。

本研究では, 上記システムが成立するための各種技術条件を求める探索的な研究である。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用廃棄物

一般廃棄物の越境移動は困難が伴うこと, 当大学の設備として一般廃棄物を保管する施設がないこと, フラフまでは既存技術で製造可能であること等を考慮し, 福岡県荻田町の RDF 製造設備(荻田エコプラント)で作られた RDF を用いることにした。この RDF は施設近傍のセメント工場で燃料の一部として実際に使用されている。

### 2.2 炭化試験

2.2.1 試験設備 当大学で保有する電気抵抗式加熱炉(間口 400mm, 高さ 250mm, 奥行 600mm, 最高加熱温度 1623K, (株)サーマル製 HT3 型)を用いて炭化試験を行った。

2.2.2 試験方法 ステンレスパッドに RDF2000g を入れ, 別途マーカーとして木炭 300g を入れたステンレスパッドとともに炉内に挿荷し, 100K/h で加熱し所定の温度・時間に達した後, 炉冷し, 室温に達した後, 目視および重量測定により炭化状況を確認した。加熱温度は 523K, 513K, 503K, 493K, 483K, 473K の 6 水準とし, 各温度での保持時間は 0h, 2h の 2 水準とした。

### 2.3 成形・硬化試験

熱硬化樹脂としてフェノール樹脂塗料(関西ペイント販売(株), ニューアクノン NC BN-10), 粒状フェノール樹脂(松下電工(株), フェノール樹脂成形材料 CY4715 30M)を用いて, 添加樹脂比率として 20%~50%, 粒状の全フェノール樹脂量に対する割合を 0%, 40%, 50%, 60%と変化させた。また, 加熱硬化処理時には 15kg の錘を乗せて, 加熱軟化時(453K)に圧縮成形できるようにしたものと, 加熱軟化温度(473K)でプレス成形したものとを試験した。硬化温度としては 503K, 523K, 553K に 2 時間保持して硬化を行った。

### 2.4 特性試験

比重測定は JIS Z 2101 の圧縮試験用試験片を熱硬化後の試料から切り出し, その重量と形状を測定し, 重量/体積で求めた。圧縮試験はアムスラー型万能試験機を用い, JIS Z 2101 に準じて実施した。

## 3. 試験結果

### 3.1 炭化試験結果

炭化試験の結果を Table-1 に示す。この結果から, 513K 以上では RDF の燃焼が起きており, 灰の生成が多くなり残留物量が低下している。また, 493K 以下では未分解残留物が増加している。503K では保持時間がない場合にはごく微量の未分解残留物が認められ, 2 時間保持の場合には同様にごく微量の灰の生成が認められる。ある厚み

のある物体を加熱すれば、当然内外の温度差は発生することから、均熱の必要があるため、保持時間は2時間とした方がベターであろう。

383K 2hr の処理をしたものは、RDF の水分含有量を調査する目的で実施したものであるが、これから、RDF に含まれる水分は 6.3%程度であることがわかる。

一般廃棄物の可燃成分中の炭素量は約 44% であり、今回の残留物の割合が約 36% であることは、若干の炭素はメタン等の可燃性ガスとして排出されるが、大部分は今回の 503K X 2hr の処理でうまく炭化していることがわかる。

Table-1 Results of Carburizing Tests

Carburizing Temperature & Holding Hour	Residual Ratio (%)	Residual Charcoal (%)	State of Residual
523K X 0	34.3	97.0	30% Ash
523K X 2	30.4	82.0	30% Ash
513K X 0	—	—	
513K X 2	30.5	94.0	A Little Ash
503K X 0	39.0	94.7	Very Little Underdone
503K x 2	33.8	94.0	Very Little Ash
493K X 0	40.3	100	Little Underdone
493K X 2	48.0	94.0	Little Underdone
483K X 0	42.6	100	Little Underdone
483K X 2	35.9	100	Little Underdone
473K X 0	41.9	100	Little Underdone
473K X 2	46.6	100	Little Underdone
383K X 2	93.7	100	As it was

### 3.2 成形・硬化試験結果

はじめに成形可否を確認するため、フェノール樹脂塗料（液状）を 10%~60% まで変化させて、ステンレスパッドに突き固め、これを電気抵抗式加熱炉に装入し、280°C X 1 時間の加熱を行った。その結果、フェノール樹脂塗料 20% 未満では生成炭が逃げて突き固めができない。またフェノール

樹脂塗料 50% 以上となると、ステンレスパッドに硬化した成形炭が固着し、成形炭取出し時に成形炭が破壊することがわかった。そのため、フェノール樹脂塗料添加量は 20%~40% とした。粒状フェノール樹脂は成形性には大きな影響を及ぼさないが、フェノール樹脂塗料では強度不足が懸念されるため、フェノール樹脂全量の約半分を目安に添加したが、目視での成形性、硬化性には大きな変化はみられなかった。

### 3.3 特性試験結果

3.3.1 比重測定結果 比重測定結果を Table 2 に示す。

Table 2 Results of Specific Weight Measuring (Average Value of 6 Samples)

Phenol Resin Addition Ratio & Pressing	Hardenin g 503K	Hardening 523K	Hardening 553K
Paint 40%	1.10	1.07	1.05
Paint 30%	0.96	0.94	0.89
Paint 20%	0.83	0.80	—
Paint 30 % + Drop 20%	1.11	1.11	1.11
Paint 25 % + Drop 25%	0.94	1.01	1.01
Paint 20 % + Drop 30%	1.11	1.01	1.04
Paint 40% + Press	—	1.13	—
Paint 30 % + Drop 20% + Press	—	1.09	—

フェノール樹脂のみの場合は添加量が少なく、硬化温度が高いと比重は小さくなる傾向にある。粒状フェノール樹脂が添加されたり、プレス圧縮されると比重は大きくなる傾向が認められる。

3.3.2 圧縮強度試験結果 圧縮強度試験の結果を Table 3 に示す。塗料のみの場合、フェノール樹脂添加量が多いほど、また硬化温度が低い方が圧縮強度は高くなる傾向にある。粒状フェノ

ール樹脂を添加した場合塗料のみの場合よりも圧縮高度は低い傾向にある。プレス圧縮は塗料のみの場合には効果がありそうであるが、粒状が入ってくると逆効果になりそうである。

Table 3 Results of Compression Tests (N/mm<sup>2</sup>)  
(Average Value of 6 Samples)

Phenol Resin Addition Ratio& Pressing	Hardenin g 503K	Hardenin g 523K	Hardening 553K
Paint 40%	7.79	4.96	3.60
Paint 30%	4.94	2.56	3.15
Paint 20%	0.84	0.80	—
Paint 30 % + Drop 20%	6.12	4.28	6.45
Paint 25 % + Drop 25%	3.53	1.83	3.61
Paint 20 % + Drop 30%	3.89	—	3.10
Paint 40%+Press	—	7.39	—
Paint 30 % + Drop 20%+Press	—	3.65	—

Table 4 Results of Compression Strain Tests (%)  
(Average Value of 6 Samples)

Phenol Resin Addition Ratio& Pressing	Hardening 503K	Hardening 523K	Hardening 553K
Paint 40%	7.78	8.87	6.92
Paint 30%	5.90	5.10	5.39
Paint 20%	5.14	4.42	—
Paint 30%+Drop 20%	6.51	6.14	5.12
Paint 25%+Drop 25%	6.28	5.13	4.64
Paint 20%+Drop 30%	6.10	—	3.87
Paint 40%+Press	—	7.39	—
Paint 30%+Drop 20%+Press	—	4.06	—

3.3.3 圧縮ひずみ試験結果 圧縮試験における破断ひずみ (%) を Table 4 に示す。圧縮破断ひずみとしては塗料 40% 添加のものが比較的良好な結果となった。塗料添加率の高いものほど圧縮破断ひずみが大きい傾向が認められる。プレス圧縮は逆効果の傾向にある。

## 4. 考察

### 4.1 炭化状況について

今回は特別に炭素の分析は実施せず、目視で炭化状況を観察した。また一応密封された炉を使用はしたが、若干の通気性はあり、隙間から可燃性ガスが漏れている（点火すると燃える）こと、水分、酢酸等の蒸発・液化が起きている（臭い）ことが確認できている。503K での一般廃棄物の熱分解発生物質としては、水素、メタン、エタン、プロパン、酢酸、アンモニア、水等が考えられ、メタン、エタン、プロパンや酢酸として炭素が持ち去られていることが考えられる。一般廃棄物の RDF の内、今回の実験で約 36% が残留物として回収できたが、自然吸収水分が約 6.3% あったことを考慮すると、もともと約 41% 程度の炭素が約 36% 残留したことになり、残留率約 88% と考えてよい。残りの約 12% がメタン等の有機化合物として気化したことになる。この有機物は、発生水素ガスとともに燃焼させて、残留物（生成炭）の硬化加熱用熱源として、また熱分解用加熱熱源として有効活用することになる。

### 4.2 気化生成物の燃焼熱量について

気化生成物には一部炭素化合物も含まれているが、安全側の想定として、水素のみが気化生成物の燃焼に寄与すると仮定する。この場合、一般廃棄物中の可燃成分の約 6.5% が水素であるので、1kg の一般廃棄物中に含まれる水素（水分は除く）は約 3% で 30g となる。水素 1g 当りの燃焼熱量は 142 kJ であるので、全体としては 4.3MJ/kg ゴミとなる。一般廃棄物中にはいろいろな物質が含まれているが、主成分は紙、プラスチック、木材等であり、これらの比熱は概ね 1.2J/g・K である<sup>6)</sup>、水の蒸発潜熱が 2.3 kJ/g、比熱 4.2J/g として、一

般廃棄物を約 250K 加熱する場合の必要熱量を計算すると、約 1.3MJ/kg ゴミとなる。これは前述の水素による発生熱量の約 30%であり、通常の燃焼熱効率を考えると、熱分解時（炭化処理時）の発生水素の持つ燃焼熱で、一般廃棄物を 553K 程度（硬化最高温度）まで加熱が可能であることになる。当然熱分解に必要な熱量もあるが、これは気化有機物（メタン、エタン等）の炭素の燃焼熱でカバーできると考えられる。このことは、今回考えているシステムが、初期熱量を加えれば、熱量的に独立して稼働することが可能であることを示している。なお、熱分解炉は密封しておけば熱分解ガスは圧力で系外に排出され、冷却・気液分離後、この気体を加圧し、タンク等に貯留しておけば、必要時には熱源として使用可能となる。特別に分離精製する必要はない。

#### 4.3 炭化温度・保持時間について

今回の試験の結果から、503K で 2 時間保持するのが最適であることがわかったが、今回は当大学の加熱炉で試験したものであり、現実のプラントを考えると処理量、処理速度等から、ロータリーキルン等での炭化が好ましい。この場合、フラフ層の厚みがある程度となること、内外部での温度差が発生すること等から、現実のプラントの場合には温度条件・時間条件が変化するものと考えられ、それぞれのプラントにあった操業条件を求める必要がある。

#### 4.4 硬化生成物の比重について

今回の試験で得られた結果では、硬化生成物の比重は 0.8~1.1 程度であり、一般的な木材の比重である 0.5 前後と比較すると 2 倍程度となった。また比重が比較的小さい 0.8 クラスのものでは圧縮破断強度が  $0.8\text{N/mm}^2$  程度と非常に低い値を示すことになった。これは使用したフェノール樹脂が適切でなく、また混練も十分でなかったために加熱硬化時の接着面積が不十分となったものと考えられる。次回の試験にはフェノール樹脂の種類、混練方法をもう少し検討したうえで実行する必要がある。

#### 4.5 圧縮破断強度について

圧縮破断強度としては最大平均値で約  $7.8\text{N/mm}^2$  となっており、目標値（杉材：30~

$40\text{N/mm}^2$ ）と比較すると 1/5 程度の値となっている。炭化生成物の強度にもよるが、一般的なフェノール樹脂の強度は  $50\text{N/mm}^2$  程度であり<sup>7)</sup>、熱硬化型フェノール樹脂を想定すれば、混練方法や硬化方法を検討することにより改善可能であると考えられる。

#### 4.6 圧縮破断ひずみについて

比較的高強度の試料で 7~8%程度の値となっており、一般のフェノール樹脂の破断変形ひずみである 1~2%と比較すると、かなり高くなっている。このことは圧縮破断強度改善の余地があることを示しており、混練・硬化方法の検討により、木材により近い代替材料の開発が可能であることになる。

### 5. まとめ

昨今地球温暖化問題が大きく取り上げられており、その対策の一つとして、一般廃棄物を木材代替材料とする研究を始めた。コンセプトとしては、二酸化炭素の元である炭素を固定化し、この炭素を何らかの方法で成形・硬化させればよいことになる。そこで一般廃棄物を炭化させる方法として蒸焼き法を電気抵抗式加熱炉を用いて試験した。その結果、一般廃棄物は 503K で 2 時間加熱すれば炭素回収率 88%で炭化することがわかった。次に成形・硬化としてフェノール樹脂を硬化剤として用い、家庭用ミキサーで混練後、成形し上述の加熱炉で加熱 (Max.553K) 硬化させた。その結果、比重が約 1.0、圧縮破断強度が約  $7.8\text{N/mm}^2$  の成形体をつくることができたが、この値は木材代替品としては不十分であった。

また、このコンセプトを用いた実用化がエネルギー的には可能であることがわかった。

今後はより現実的なプラントとして成立させるための炭化方法の研究と成形・硬化体の強度改善のための樹脂の選定と混練・硬化方法の研究が必要である。また、将来的には生成ガス、生成液体、成形体の成分分析を行い、プラントとして必要となる諸元・周辺機器の選定が必要であり、同時に成形体等の生体毒性の確認等が必要である。

なお本論文は納見千春のものづくり大学大学院

の修士論文の一部を纏め直したものである。

## 文 献

- 1) 環境省総合環境政策局環境計画課：「図で見る環境循環型社会白書（平成 19 年版）」(株)ぎょうせい（2007. 6）
  - 2) (社)全国都市清掃会議：検証・確認報告書「川鉄サーモセレクト式ガス化溶融技術」（2000.5） pp17
  - 3) 宇沢弘文：「地球温暖化を考える」岩波新書（2008.10） pp109
  - 4) 前田あずさ，西澤章：「ごみ炭化技術の開発」クリモト技報 No.45 栗本鉄工(株)
  - 5) 岡部敏弘監修：「木質系多孔質炭素材料ウッドセラミックス」内田老鶴圃（1996.5）
  - 6) 国立天文台：「理科年表」丸善(株)（2004.11） pp368,485
  - 7) (株)プラスチック・エージ：「プラスチック読本」(株)プラスチック・エージ（1992.8） pp437
-