

《総合研究プロジェクト》

廃棄物系バイオマスを用いた外部熱源不要な半炭化技術の確立

滝沢憲治*^{1,2} 井上宮雄*³

Torrefaction System Using Waste Biomass without External Heat Source

Kenji TAKISAWA, and Miyao INOUE

1. 背景

木質チップ等の堆積されたバイオマスや油分を含んだ食品残渣が自ら発熱し、外部から着火されることなく発火することで火災となるケースは国内外問わず過去何件も報告されている¹⁻²⁾。この現象は自然発火と呼ばれ、火災の要因として考えられることも多い。堆積されたバイオマスの自然発火は2段階の反応、すなわち(1)バイオマスの発酵・堆肥化による発熱(2)酸化反応による発熱を経て発火するといわれている³⁾(Fig. 1)。発酵による発熱は、雨水等でバイオマスが加水されることでバイオマス内部の微生物の活動が活発化し、バイオマスが発酵されることによって引き起こされる。この発酵熱による温度上昇がバイオマスの自己発熱による自然発火の初期段階である。発酵熱の蓄熱が進むと、バイオマスの一部が酸化反応へと移行し、発酵熱のピークを超えて温度が上昇する。最終的にバイオマスの温度は発火点へと至り、酸素が豊富な表層で発煙・発火する。これが現在考えられているバイオマスの自然発火のメカニズムである。

これまでの自然発火に関する研究はその殆どがバイオマスの自然発火を未然に防ぐことを目的としてメカニズムの解明、及び自然発火の再現に挑んだものであり、これを利用しようとするものではなかった。そこで本研究では、バイオマスの自然発火を人為的に制御し利用することで、外部熱源に依存せず試料を炭化しようと試みた。炭化とは、

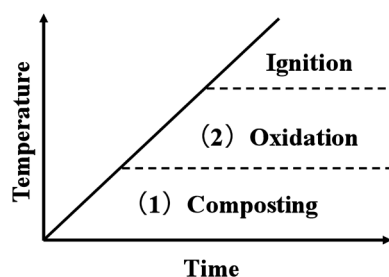


Fig. 1 自然発火のメカニズムの概略図

「有機物を無酸素、あるいは、酸素が不足した状況下で高温にすることにより、有機化合物の熱分解をおこさせ、炭素主体の物質に変換する反応である」⁴⁾。また、通常の炭化(400℃~)よりも低い温度(200~380℃)で炭化を行う、すなわち半炭化を行うことにより、加熱に用いるエネルギーを低減させ、炭化物に多くの熱量を残存させることも可能である。有機物を炭化あるいは半炭化することによって、以下のようなメリットが得られる。まず、炭化の段階で水分等の揮発物が揮発することにより、燃焼時に排出される煙の量が減少する。これにより、屋内でのレットストーブや暖炉を使用した際の室内大気汚染を軽減することが出来る。また、純粋な炭素の塊に近づくため、発熱量そのものが向上する⁵⁾。そして、揮発物の揮発によって多孔質化するため、吸着剤、あるいは土壌改良材等、燃料以外の用途にも使用可能になる⁶⁾。これらのことから、炭化あるいは半炭化によって作製されたバイオマス炭は発電用燃料や土壌改良材として利用することが考えられる。

従来の炭化方法では外部熱源が必要不可欠であったが、自然発火が制御可能になれば、外部熱源に依存することなく、試料単体での炭化が可能となるためである。しかし、実際に自然発火による火災が確認されており、メカニズムもある程度解明されてきているとはいえ、材料ごとの発火温度の違いや、微生物による有機物分解性の難易などにより、安定して常温から堆肥化、酸化を経て自然発火へ至らせることは難しい。よって、材料ごとの発火温度・堆肥化に必要な条件を調査し、それらの反応を人為的に連続させ、発火に至るまで温度を上昇させることが出来れば、安定した自然発火の再現が可能になると考えられる。そこで本研究では試料に木質を用い、木質の発火条件の調査、堆肥化による温度上昇の確認、堆肥化で到達する温度から酸化反応による発熱の検討を行うことを目的とした。

2. 材料および実験装置

本研究では廃棄物系の木質バイオマスの代表として紀州産杉のおが粉(含水率11.59%w.b.)が使用された。また本研究で用いた実験装置の概略図をFig. 2に示す。実験装置には、定温乾燥器(DX302、ヤマト株式会社)、ポンプ

*¹ 三重大学大学院生物資源学研究所 (Mie University Graduate School)

*² 東京家政大学生生活科学研究所 (Tokyo Kasei University)

*³ 東京家政大学家政学部 (Tokyo Kasei University)

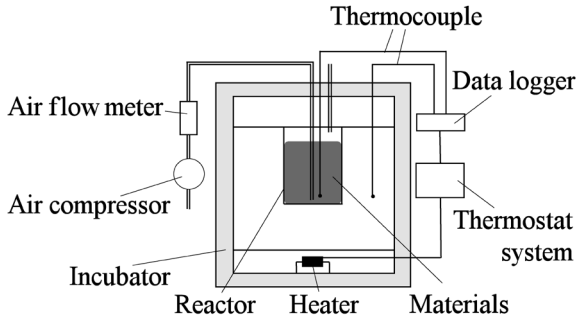


Fig. 2 実験装置概略図

(MV-6005P、株式会社 E.M.P)、流量計 (RK1200、コフロック株式会社)、記録計 (TR-75wf、株式会社ティアンドデイ) を用いた。記録計から得た温度データを基に、恒温槽の温度を容器内の温度に $\pm 2^{\circ}\text{C}$ で追従させることにより、擬似的な断熱状態を再現した。これにより、容器内で発生した熱の放熱を最小限に抑えた。

3. 木質バイオマスの堆肥化

おがくず 50 g を実験容器に充填し、試料の初期含水率を考慮したうえで、含水率が牛糞の堆肥化の場合に適しているとされる 60% w.b. になるよう水を添加し、通気を行いながら容器を加熱した⁷⁾。通気量は 50 mL/min とした。初期温度を揃えるため、容器内の温度を 40 $^{\circ}\text{C}$ まで昇温させてから温度の追従を開始した。

Fig. 3 に実験結果のグラフを示す。30 時間ほどで 70 $^{\circ}\text{C}$ まで温度が上昇した。これは堆肥化で到達するピークの温度であるため、堆肥化は成功したと考えられる。この結果より、難分解性のバイオマスである木質単体であっても、堆肥化による温度の上昇は可能であることが明らかになった。しかし、この再現実験では、堆肥化によって温度が上昇した後、時間の経過とともに温度が低下していった。これは堆肥化のために添加した水の量が多すぎたため、水の蒸発潜熱によって熱が奪われたためだと考えられる。そこで、60% w.b. 以外の含水率であっても堆肥化が可能かどうか検討した。

木村らによれば、牛糞の堆肥化には最低でも 30% w.b. の含水率が必要とすることであったため⁸⁾、木質の含水率を 30、40 および 50% w.b. に変化させ堆肥化の実験を行った。容器に充填するおがくずの量は 50 g とした。通気量は、中野ら⁹⁾ の研究を参考に、50 g のおがくずの中に含まれる有機物量を考慮し、より細かな通気量の調節が可能な流量計を用い 30 mL/min とした。結果を Fig. 4 に示す。30% w.b. であっても 10 $^{\circ}\text{C}$ 程度は温度の上昇がみられた。40 および 50% w.b. では 70 $^{\circ}\text{C}$ には到達しなかったが、40% w.b. では 66 $^{\circ}\text{C}$ まで、50% w.b. では 64 $^{\circ}\text{C}$ まで温度が上昇した。この結果から、木質の堆肥化には牛糞ほどの含水

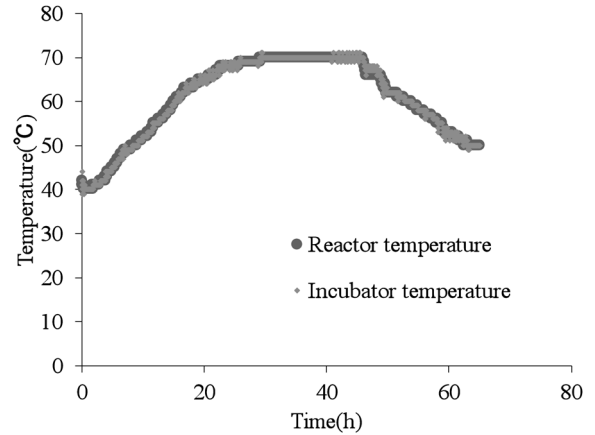


Fig. 3 堆肥化による温度上昇

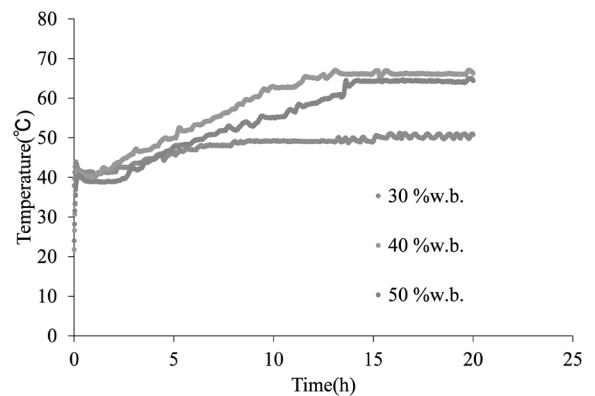


Fig. 4 各含水率の堆肥化による温度上昇

率は必要なく、40% w.b. 程度で十分に堆肥化が見込めることが分かった。

4. 木質バイオマスの自然発火

1) 雰囲気温度が発火特性に与える影響

堆積された木材チップ等の自然発火は実際に確認されているが、どのような条件下であれば木質が自然発火するのかが不明である。そこで、従前の研究を参考に条件を設定し、外部から着火することなく木質が発火するか検討した。供試材料および実験装置は堆肥化の実験と同様のものを用いた。条件は Xin-Rui Li らの論文を参考に設定した¹⁰⁾。おがくず 80 g を容器に充填し加熱した。恒温槽の雰囲気温度は実験開始から装置の停止まで 190 $^{\circ}\text{C}$ で一定とし、300 mL/min で通気を行った。その結果を Fig. 5 に示す。実験開始後から連続した急激な温度の上昇がみられ、4 時間ほどでピークに達し、ピーク時の温度は 405 $^{\circ}\text{C}$ であった。その後は時間の経過とともに温度が低下していった。これは木質の燃焼によって可燃部分が減少していったからだと考えられる。この実験でみられた温度上昇は発火によるものとするのに十分であった。

より詳細な木質の発火温度を調査するため実験を行っ

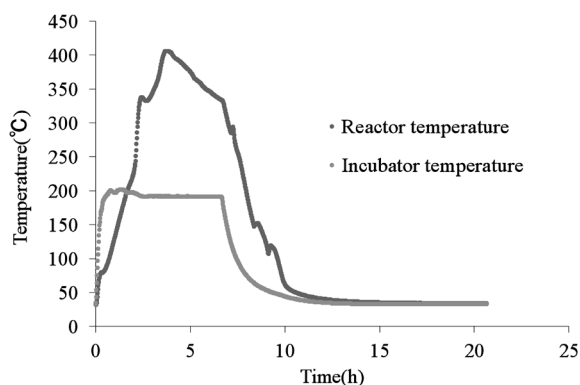


Fig. 5 発火による温度の上昇

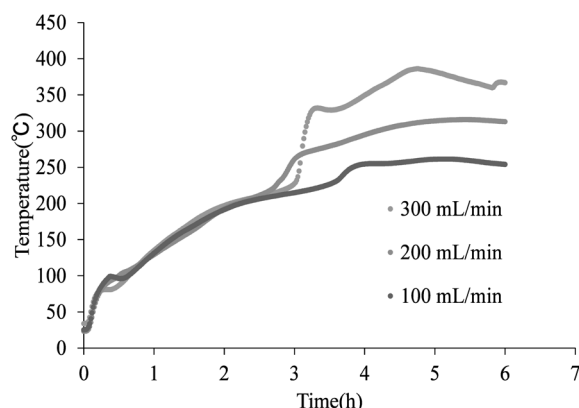


Fig. 8 通気量による発火後の温度上昇の変化

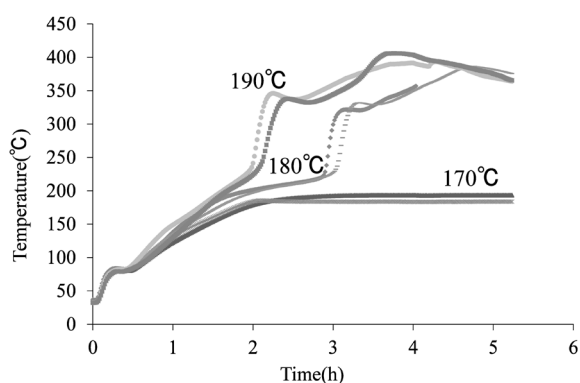


Fig. 6 雰囲気温度の違いによる発火特性

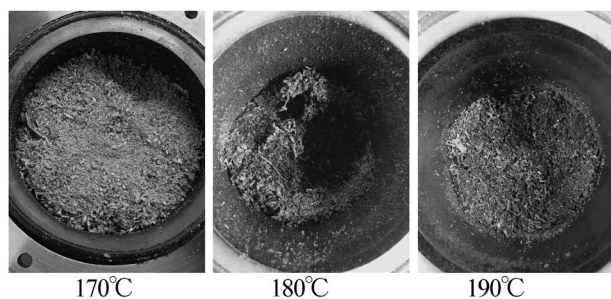


Fig. 7 各雰囲気温度における反応後の写真

た。おがくずを 80 g、通気量を 300 mL/min、雰囲気温度を 170、180 および 190°C の三通りに変化させて容器内のおがくずを加熱し発火の有無をみた。その結果を Fig. 6 に示す。恒温槽の雰囲気温度が 170°C の場合、10~20°C 程度の温度上昇しかみられず、時間が経過した後も温度が上昇する気配はなかった。雰囲気温度が 180°C の場合、実験開始から 3 時間程度経過したところで発火に伴う急激な温度上昇をみせた。雰囲気温度が 190°C の場合、発火による急激な温度上昇は実験開始から 2 時間程度でみられ、180°C の時と比べて発火するのが早かった。また、ピークも 400°C を超えるなど、雰囲気温度を 180°C にして実験した場合よりも温度上昇のピークが高かった。この結果から、

十分な通気が行われた場合、木質の温度が 180°C を超えた場合に自然発火が起きると考えられる。

2) 通気量が発火特性に与える影響

木質の発火温度が明らかになったため、これを基に恒温槽の雰囲気温度は 180°C とした。容器におがくず 80 g を充填し通気を行い加熱した。通気量は 100、200 および 300 mL/min とし、通気は実験開始直後から実験終了まで行った。温度変化のグラフを Fig. 8 に示す。どの通気量であっても温度が上昇し、試料も炭化した。温度の変化に関しては、通気量の増加に伴い、発火後の温度の上昇度合いも上昇する傾向がみられた。この結果から、通気量による発火後の温度の上昇は制御可能であり、自然発火を用いた半炭化は可能であると考えられる。

5. 堆肥化で到達する温度からの酸化反応

堆肥化によって木質の温度が 70°C 程度まで上昇することは、堆肥化の再現実験によって確認できた。しかし 70°C という低い温度から木質が酸化され、これによる発熱がみられるかは不明であった。そこで、人為的に木質を 70°C まで加熱し通気を行うことで、酸化に伴う発熱がみられるか実験を行った。

容器内におがくず 50 g を充填し、通気を行い温度の変化をみた。通気量は 5、10、30 および 50 mL/min の 4 通りとした。温度追従システムを用いて、おがくずを 70°C まで加熱した段階で恒温槽の雰囲気温度を容器内の温度に追従させるようにした。その結果、5 mL/min では温度の上昇がみられなかったが、それ以外の通気量であれば酸化に伴う温度上昇が確認できた (Fig. 9)。ここで、通気量が低いほど到達する温度のピークが高くなり、また温度の上昇速度も向上するといった傾向がみられた。最も温度が上昇したのは 10 mL/min であり、105°C まで温度が上昇した。この結果から、この温度帯での酸化による発熱量は

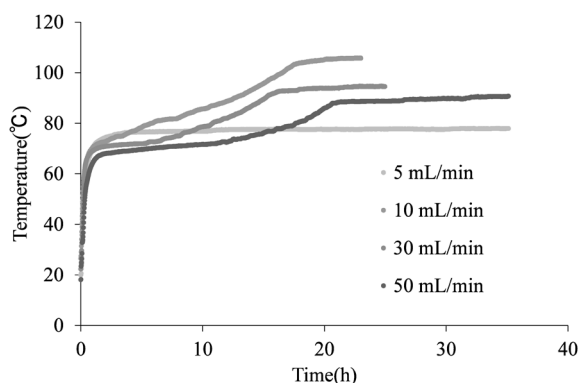


Fig. 9 70℃からの酸化による発熱

極微量であり、強すぎる通気は容器内で発生した熱を奪っていると考えられる。また、すべての通気量において、ある程度温度が上昇したところで昇温が停滞してしまい、それ以上温度が上がらないという現象がみられた。この現象については、温度の上昇に伴い消費する酸素量が増加しているため、一定の通気では酸素の供給が不足している、室温の空気を通気しているために温度の上昇が妨げられている等の原因が考えられ、今後検証を重ね調査を進めていく必要がある。

6. 結論

本研究は木質の自己発熱による自然発火を用いて、外部熱源に依存することなく試料を炭化することを目標とし、木質の自然発火条件を明らかにすることを目的とした。このために既往の研究による諸条件を参考に実験を行い、木質の自然発火の再現および木質の発火温度の調査を試みた。実験結果から、十分な通気を行った場合、木質の温度が180℃以上であれば自然発火が起きることが明らかとなった。また通気量による発火後の温度上昇の制御は十分に可能であることが分かった。

次に、堆肥化で到達する温度のピークである70℃という低温から木質が酸化され、それによって発熱するかの検討を行った。おがくずを70℃まで加熱し通気を行ったところ、10、30および50 mL/minの通気量において温度の

上昇が確認できた。酸化による発熱の実験を行った際、通気量が低いほうが到達するピークが高くなり、温度の上昇速度も向上するといった傾向がみられたため、この温度帯での酸化による発熱は極微量のものであり、強すぎる通気は発生した熱を奪うため逆効果であることも分かった。しかし、低温からの酸化によって温度は上昇したが、温度が上昇したどの通気量であってもある程度温度が上昇するとそこで温度上昇が停滞しそれ以上温度が上がらなくなるという結果が得られたため、温度上昇が停滞してしまう原因については今後調査していく予定である。

文 献

- 古積 博：廃棄物の蓄熱火災事例と危険性評価. 都市清掃57 (262), 542-546 (2004).
- 安原昭夫：RDFの発熱事故例と発熱メカニズムの化学的考察. 安全工学, 45(2), 117-124 (2006).
- Ashman, J. M., Jones, J. M., & Williams, A.: Some characteristics of the self-heating of the large scale storage of biomass. *Fuel Processing Technology*, 174, 1-8 (2018).
- 薬師堂謙一：家畜排せつ物の炭化処理技術の現状と課題（特集炭化処理技術について）. 畜産環境情報, (38), 3-6 (2007).
- 石村健志, 井田民男, 淵端 学, 本庄孝子, 佐野 寛：半炭化固形化技術による木質系バイオマスの熱エネルギー特性の向上. 高温学会誌, 33(1), 38-42 (2007).
- Ogura, T., Date, Y., Masukujane, M., Coetzee, T., Akashi, K., & Kikuchi, J.: Improvement of physical, chemical, and biological properties of aridisol from Botswana by the incorporation of torrefied biomass. *Scientific Reports*, 6, 28011 (2016).
- 鳥巢, 木村茂信, 田代克己：牛ふんの急速堆肥化への含水率と通風量の影響. 農業機械学会誌, 42(1), 135-139 (1980).
- 木村俊範, 清水 浩：家畜ふんの堆肥化における温度上昇の難易に及ぼす通気量, 含水率の影響. 農業機械学会誌, 51 (4), 77-81 (1989).
- 中野芳雄, 岩淵和則：家畜ふんのコンポスト化反応に及ぼす供給ガス酸素濃度の影響. 農業機械学会誌, 62(5), 120-122 (2000).
- Li, X. R., Koseki, H., & Momota, M.: Evaluation of danger from fermentation-induced spontaneous ignition of wood chips. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1-3), 15-20 (2006).