

バイオマス燃焼炉の高効率・低環境負荷を実現するための バイオマス燃焼モデルの開発

錦 慎之助

鹿児島大学大学院・理工学研究科・機械工学専攻
鹿児島市郡元 1-21-40

要旨 地球温暖化防止や原油価格の不安定な変動などを考えると、再生可能エネルギーの利用は重要な課題だと言える。日本の国土の多くは森林に覆われており、資源の少ない日本にとって木材は有効な資源であり、また、間伐材を燃料として利用できれば、小規模ではあるが地産地消の再生エネルギーとして有効な活用方法として期待できる。一般的に木材の燃焼過程は非常に複雑であり、全ての現象を計算で再現することは極めて困難である。そこで本研究では、木質材の燃焼シミュレーションを、比較的簡単な方法で実行することを試みた。燃焼シミュレーションには火災分野で広く利用されている FDS を利用した。堆積した木質材の下部または上部で加熱し、上方または下方へ燃え拡がるシミュレーションを実行した。木質材の充填率や寸法、また、計算格子間隔の違いによって、木質材から木質材へ燃え移っていく様子や途中で消炎する様子を計算することができた。しかしながら実験データと比較検証できるように計算精度を向上させるためには、木質材の熱分解モデルの改善や格子間隔の影響等を調べ、計算手法の改善をさらに検討しなければならない。

1. 緒言

地球温暖化防止や原油価格の不安定な変動、さらには福島第一原発事故による原子力発電所の停止などにより、電力供給源としての再生可能エネルギーの利用は重要な課題だと言える。日本の国土の多くは森林に覆われており、資源の少ない日本にとって木材は有効な資源となりえる。また、森林保全のために間伐は有効な手法で、間伐材を燃料等として利用できれば、小規模ではあるが地産地消の再生エネルギーとして有効な活用方法として期待できる。

一般的に木材の燃焼過程は非常に複雑であり、すべての現象を計算で再現することは極めて困難である。そこで本研究では、木質材の特性が均質と仮定した木質ペレットや木質チップの燃焼シミュレーションを、比較的簡単な方法で実行することを検討した。

燃焼シミュレーションには火災分野で広く利用されている Fire Dynamics Simulator (FDS)^①を利用した。FDS は米国商務省の国立標準技術研究所(NIST)で開発が始まり、現在は各国の研究者によって開発が続けられている世界中で広く普及しているオープンソースの火災シミュレーションソフトである。以前は FDS と並列して森林火災等を計算する手法が研究されており^②、WFDS という名称で FDS とは別にリリースされて

いたが、現在は一部機能が FDS に統合されている。FDS では森林火災の計算手法の一つとして、木を可燃性固体の粒の集まりとモデル化してシミュレーションする方法がある。本研究では、この手法を適応して燃焼シミュレーションを行った。

2. 計算対象の概要

本研究では燃焼容器に堆積した可燃物の燃焼を、シミュレーションの対象とする。シミュレーションの比較対象とする実験例として、燃焼容器の下面から加熱する例として RDF の燃焼実験³⁾、また、上面から加熱する例として木材チップの燃焼実験⁴⁾をそれぞれ検討し、堆積した木質材の燃焼シミュレーションの計算条件等の参考とした。

下面を加熱する場合の計算概要を Fig. 1(a) に示す。計算領域は断面が $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 、高さが 0.4m の直方体とする。上端と下端は開放条件とし、燃焼ガスや新鮮な空気が出入り出来るものとする。計算領域側壁内側の境界条件は厚さ 0.03m のセラミックを設定した。木質材は計算領域の下端から 0.05m より上側に 0.25m 堆積させた。木質材下端から 0.03m 離れた位置に $0.06\text{m} \times 0.06\text{m}$ の加熱ヒーターを配置し、ヒーターの木質材側表面温度は、初め 20°C から計算開始後 10 秒で 2500°C に達し、 50 秒間この温度を保ち、その後、 10 秒間で 20°C まで低下すると設定した。

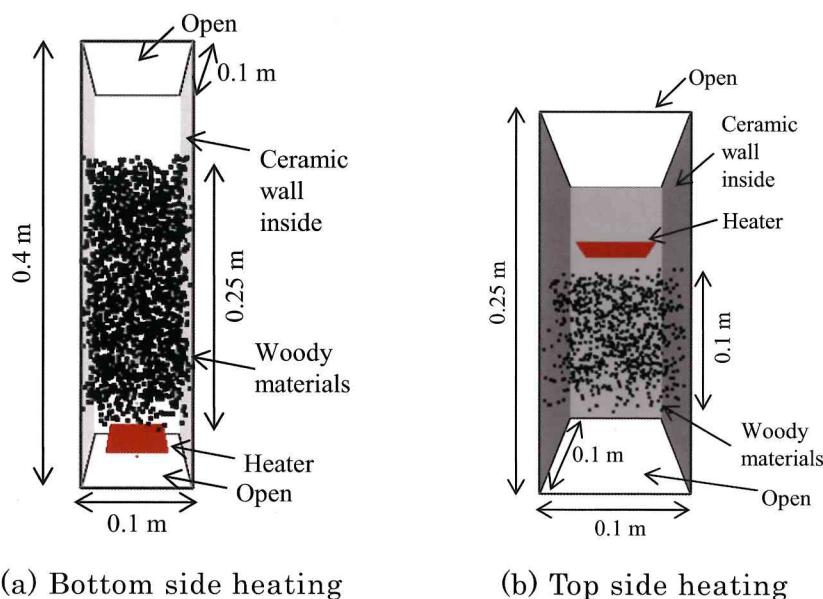


Figure 1 Schematic of simulation domain for combustion chamber model.

上面を加熱する場合の計算概要を Fig. 1(b) に示す。計算領域は断面が $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 、高さが 0.25m の直方体とする。なお、上向きに燃え拡がる場合は浮力で高温ガスが上昇し燃え拡がりが維持されるが、下向きに燃え拡がる場合は下向きの熱の移動をシミュレーションで再現する為に計算格子間隔を小さくする必要がある。このため格子点数を同程度にするには、下面加熱の場合に比べて、上面加熱の場合は高さ方向の計算領域を狭くする必要がある。上面加熱の場合も、計算領域の上端と下端は開放条件とし、燃焼ガスや新鮮な空気が出入り出来るものとし、側壁の計算領域内側の境界条件

は厚さ 0.03m のセラミックを設定した。木質材は計算領域の下端から 0.05m より上側に 0.1m 堆積させた。木質材上端から 0.02m 離れた位置に $0.06\text{m} \times 0.06\text{m}$ の加熱ヒーターを配置し、ヒーターの木質材側表面温度は初め 20°C で、計算開始後 10 秒間で 1500°C に達し、100 秒間この温度を保った後、10 秒間で 20°C まで低下する設定とした。

3、計算方法

本研究では、FDS のバージョン 6 の FDS 6.5.2 を使用した。FDS は一般的な流体解析に加えて、燃焼および燃焼により発生する浮力で駆動される流れや、火災時の輻射を考慮した計算を実行することが可能である。また、粒子の追跡も可能であるが、本計算では木質チップをモデル化した粒子は初期条件で配置した位置から移動しないものとして扱った。

可燃物の木質材は加熱により全て熱分解して可燃ガス化するものと仮定し、熱分解時の際に生成されるチャーと灰は考慮しないものとした。発生した可燃ガス燃焼時は燃料質量の 1.5% がススになると設定した。なお、木質材の含水率は 20% とした。

3. 1 下面で加熱する場合の計算方法

堆積した木質材は Fig. 1(a) に示された位置に配置し、個々の木質材は長さ 10mm、直径 7mm の円柱形の形状と仮定した。配置した木質材質量と木質材を充填する部分の体積の比 MPV (Mass per Volume) を用いて、充填率を表すと、本研究では MPV=180、 270 kg/m^3 の 2 条件で計算を実行した。木質材（水の成分は除く）の物性値は、密度 500 kg/m^3 、熱伝導率 $0.1 \text{ W/(m \cdot K)}$ 、比熱 $1.0 \text{ kJ/(kg \cdot K)}$ 、放射率 1.0 とした。また、 300°C で熱分解速度がピークになるように設定した。放出されるガスの組成は C₆H₁₀O₅ とし、このガスの発熱量は 21.5 MJ/kg と設定した。

計算格子間隔は等間隔としたが、格子間隔と燃え拡がりの関係および影響を調べるために、MPV180 の条件では格子間隔を 5mm および 10mm、MPV270 の条件では格子間隔を 10mm とした。

計算には九州大学情報基盤研究開発センターの計算機を利用した。本報で示す結果は tatara (CX400) で計算を実行した。1 ノード 4 コア OpenMP による並列計算で、400 秒間の計算を実行するのに要した計算時間は、MPV180・格子間隔 5mm は約 11.7 時間、MPV180・格子間隔 10mm は約 0.4 時間、また MPV270・格子間隔 10mm は約 1.1 時間であった。なお、モデルの開発検討は継続して別システムの hakozaki (HA8000-tc) を計算に使用しているが、現時点では十分な研究成果が得られていない。

3. 2 上面で加熱する場合の計算方法

堆積した木質材は Fig. 1(b) に示された位置に配置した。上面で加熱して下方向へ燃え拡がる計算は、下側から温度の低い空気が流れ込むため、消炎してしまう傾向が強い。このため、格子間隔を小さくして燃え移る現象を再現する必要がある。また個々の木質材の形状も燃え移りに影響があると考えられる。そこで、木質材の充填率は MPV=180 kg/m³ として、個々の木質材の形状を Table 1 に示すような直径、長さ、粒子数の 3 条件設定し、計算を実行した。なお、各木質材の粒子は円柱形状を仮定した。

また、木質材（水の成分は除く）の物性値は、下面で加熱する場合と同じとした。

計算格子間隔は5mmの等間隔とした。計算には九州大学情報基盤研究開発センターの計算機を利用した。本報で示す結果はtatara(CX400)で計算を実行した。1ノード4コアOpenMPによる並列計算で、600秒間の計算を実行するのに要した計算時間は、(a)は約4.9時間、(b)は約7.0時間、(c)は約4.5時間であった。

Table 1. Woody material particle

Case	Diameter	Length	Number of particles
(a)	7.0 mm	10 mm	780
(b)	3.5 mm	10 mm	3120
(c)	7.0 mm	5 mm	1560

4. 結果および考察

4. 1 下面で加熱する場合のシミュレーション結果および考察

下面で加熱した場合のシミュレーション結果を以下に示す。Figure 2は、各木質材の表面温度を示しており、熱分解が完了して粒子が消失したものは表示されていない。(a) MPV180・格子間隔10mmの場合は図で示した時刻の後、ヒーターの温度が低下して、間もなく消炎し、多くの木質材が燃えずに残った。(b) MPV180・格子間隔5mmおよび(c) MPV270の場合はFig.2で示す時刻以降も燃焼が継続し、燃焼容器の壁付近に燃え残りがあるものの、中心部では多くの木質材が燃え尽きていた。

Figure 3および4はそれぞれ堆積した木質材中央断面におけるガス層の発熱速度分布

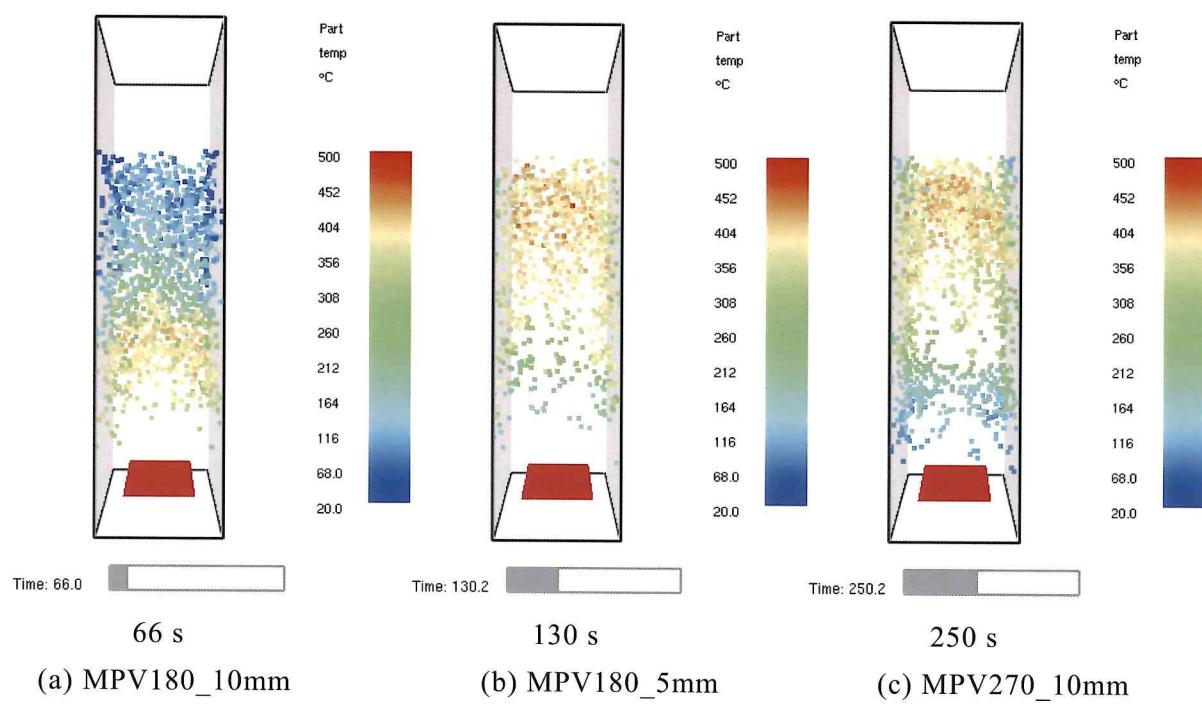


Figure 2 Remaining of woody material and its surface temperature.

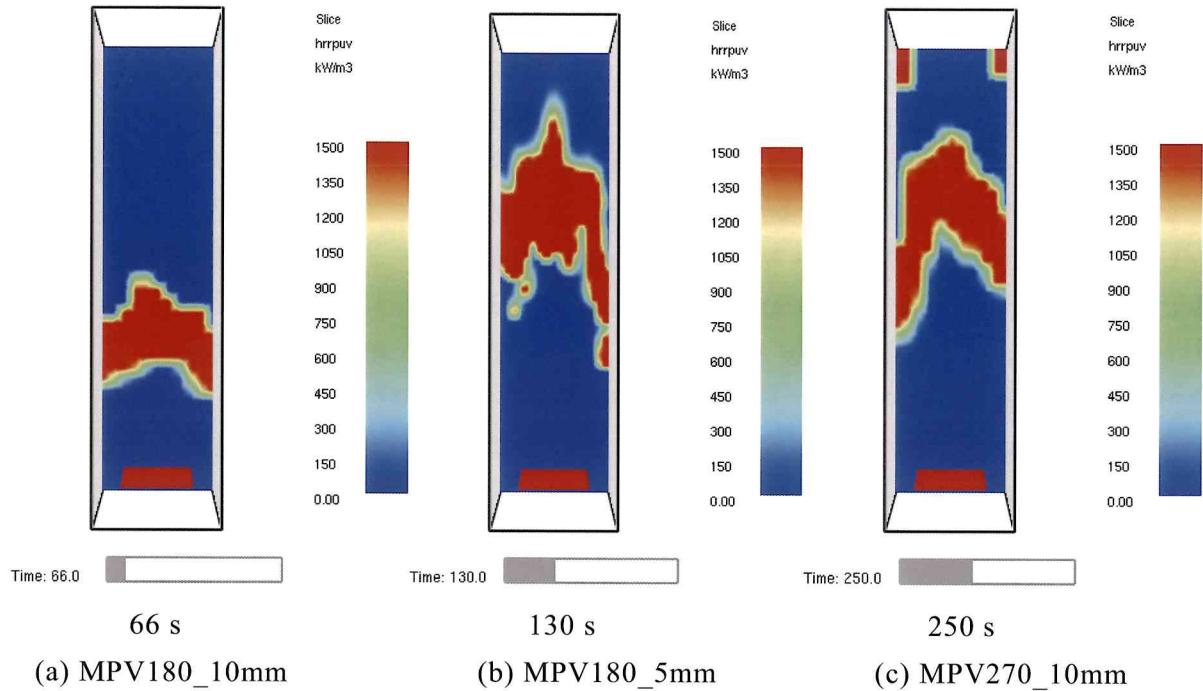


Figure 3 Distribution of heat release rate.

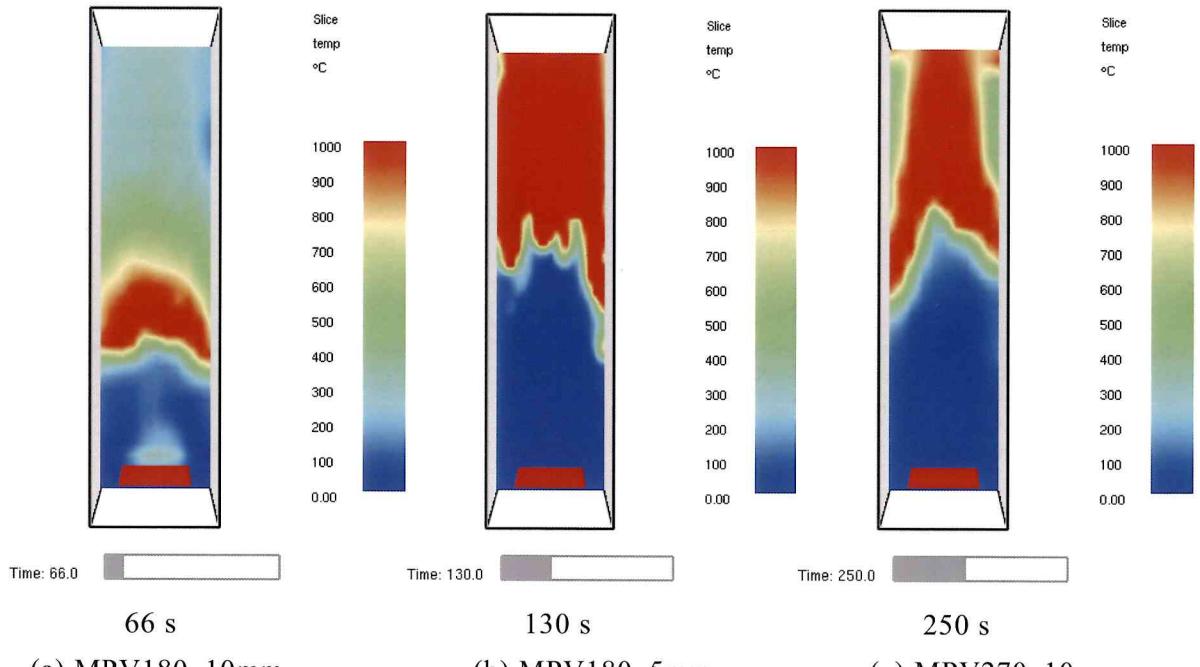


Figure 4 Distribution of gas temperature.

および温度分布を示す。(a) MPV180・格子間隔 10mm の場合は、図で示す時刻では発熱速度・温度はともに高い値を示すが、図で示す時刻の後、急速に発熱速度・温度が低下する。このことから、主にヒーターの熱で木質材が熱分解して燃焼していると考えられる。(b) MPV180・格子間隔 5mm および(c) MPV270 の場合は、図で示す時刻以降でも発熱速度・温度の高い領域が上方に移動しており、木質材から木質材へ燃え移り

ながら燃焼が継続していることが分かる。

堆積した木質材の質量減少の時間経過を Fig. 5(a) に、計算量機内の発熱量の時間履歴を Fig. 5(b) に、また、堆積した木質材上部のガス温度の時間履歴を Fig. 5(c) に示す。MPV180・格子間隔 10mm の場合は約 70 秒で質量減少が止まり、熱分解がほぼ停止している。発熱量や温度は他の条件比べて低い値で推移しており、ほとんど燃焼していないことが分かる。MPV180・格子間隔 5mm の場合はヒーター温度が低下した後も順調に木質材の質量は低下し、200 秒手前でほぼ燃え尽きていることが分かる。発熱速度のピークは 150 秒頃に約 14kW となっている。温度の最大値は 1500°C を超えている。MPV270 の場合は、MPV180 に比べ最初に堆積させた木質材の質量が多く、300 秒頃まで質量減少が続き、その後、停滞している。発熱速度のピークは 30 秒手前で約 11kW、最高温度は 1500°C 超となっており、ピークを迎える時刻が MPV180・格子間隔 5mm に比べ遅くなっている。

MPV180・格子間隔 10mm の場合は格子間隔が粗く熱が十分に伝わらずに、燃え抜がらなかつたと考えられ、MPV270 の場合は格子間隔 10mm でも堆積させた木質材の密度が大きく発熱量が十分あったため燃え抜がりが継続したものと考えられる。

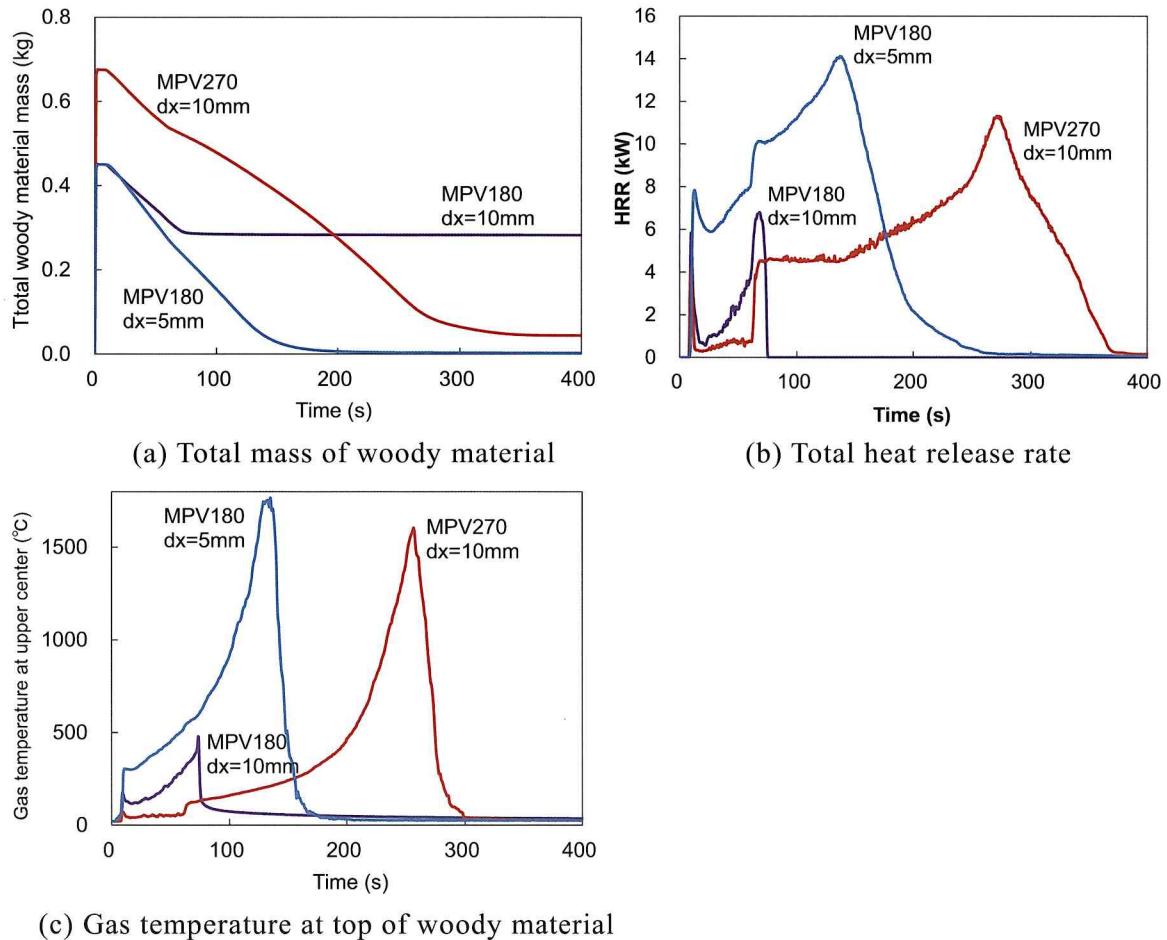


Figure 5 Time history of observed data.

4. 2 上面で加熱する場合のシミュレーション結果および考察

上面で加熱した場合のシミュレーション結果を以下に示す。Figure 6 に計算終了時の木質材の消失の様子を示す。上面で燃焼が始まり、Case (b) が最も低い位置まで木質材が消失しているが、いずれの Case でも多くの木質材が燃え残っている。Figure 7 および 8 はそれぞれ堆積した木質材中央断面におけるガス層の発熱速度分布および温度分布を示す。発熱速度分布は燃焼反応を示しており、下向きに燃え拡がる先端付近には酸素が十分に存在しているため、燃焼反応により高い発熱速度を示す分布が見られる。温度分布は、燃焼による温度上昇によって計算領域下端から空気が進入し、上方に高温ガスが流れているため、発熱速度が高い領域とそれより上方に高い温度領域が見られる。

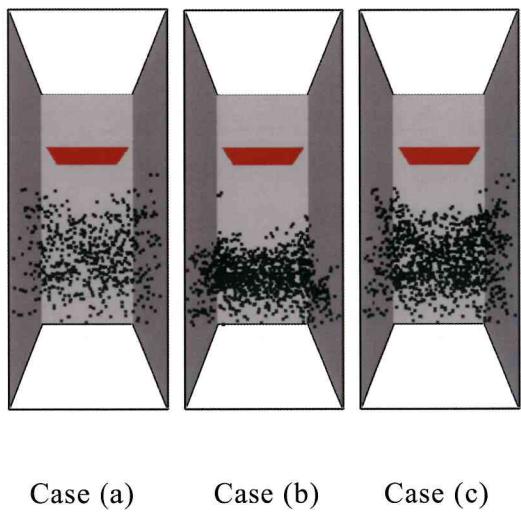


Figure 6 Remaining of woody material.

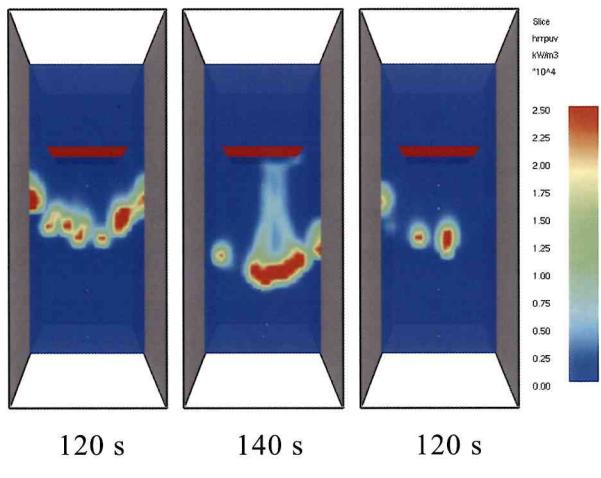


Figure 7 Distribution of heat release rate.

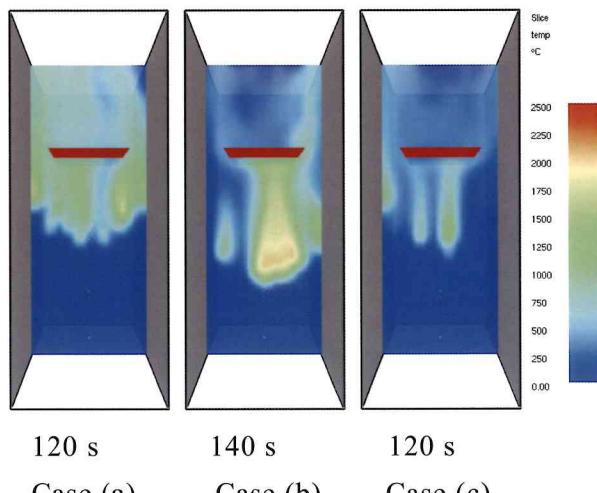
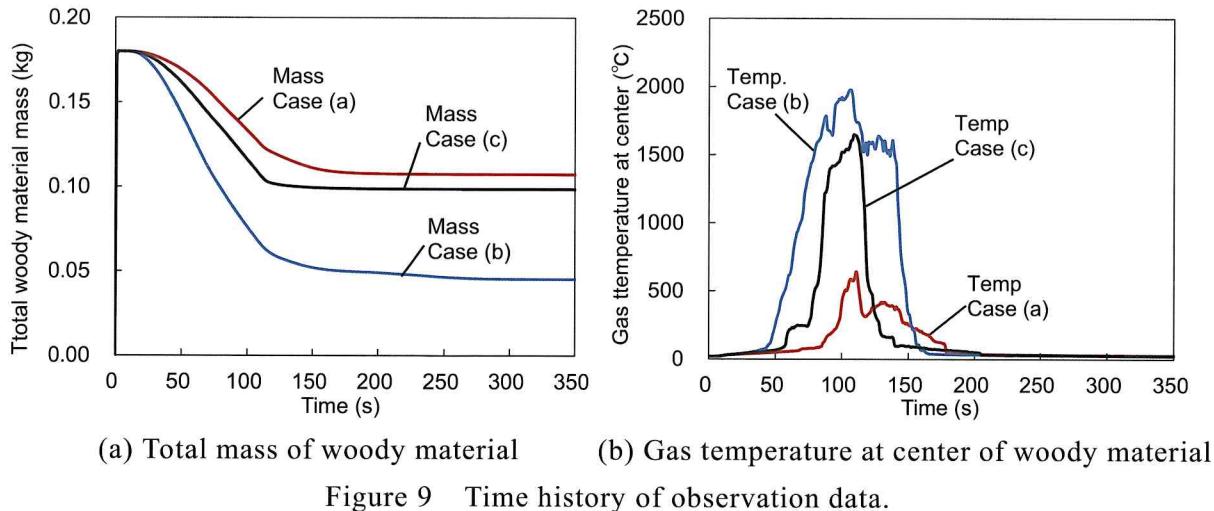


Figure 8 Distribution of temperature.



(a) Total mass of woody material (b) Gas temperature at center of woody material

Figure 9 Time history of observation data.

堆積した木質材の質量減少の時間経過を Fig. 9(a) に、また、堆積した木質材中央のガス温度の時間履歴を Fig. 9(b) に示す。いずれの Case でも 130 秒頃に熱分解による木質材の質量減少がほぼ停止しており、計算終了時に残留する木質材は初期に配置した木質材の質量の Case (a) は約 60%、Case (b) は約 25%、Case (c) は約 55% となっている。Case (b) が最も熱分解が継続し、Fig. 6 に示すように最も下向きに燃え拡がったことが分かる。堆積した木質材中央付近のガスの最高温度は、Case (b) では約 2000°C で、Case (c) でも約 1600°C まで上昇しているが、Case (a) では約 500°C 程度となっている。Case (b) はヒーター温度低下後もしばらくの間、高温状態が続いていること、木質材から木質材へ燃え移る現象をシミュレーションできていることが分かる。各 Case で各木質材の直径、長さが異なっているが、燃え拡がり現象への影響について、現状では十分な物理現象の理解と考察ができていない。

5. まとめ

堆積した木質材の下部および上部で着火させる燃焼シミュレーションを、火災シミュレーター-FDS を利用して、比較的簡便に実行できるようにすることを目的として、検討を行った。

下面を加熱した場合は、現時点での実験データと比較検討できる計算精度に至っていないが、木質材の充填量や計算格子間隔の違いによって木質材から木質材へ燃え移っていく様子や途中で消炎する様子を計算することができた。

上面を加熱した場合は、同じ充填率でも粒子の直径や長さが違うと、燃え拡がりの様子に違いがあることは分かったが、いずれの計算条件でも途中で消炎してしまい、現時点での実験データと比較検討できる計算精度に至っていない。

今後は、木質体の熱分解モデルの改良や格子間隔の影響等を調べ、計算精度を改善する必要がある。現時点では現実的な木質材の燃焼シミュレーションの実現には程遠いため、特にチャーの生成や燃焼モデルを取り入れることや、赤熱する現象のモデル化を検討しなければならないと考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成をしていただいた公益財団法人サンケイ科学振興財団に謝意を表します。

引用文献

- (1) FDS-SMV、<https://pages.nist.gov/fds-smv/>（2017年3月現在）
- (2) R. Mell、Wildland-Urban Fire Models、<http://www.fs.fed.us/pnw/fera/wfds/index.shtml>（2017年3月現在）
- (3) 八島正明、RDF 堆積層内の燃え拡がり、労働安全衛生総合研究所特別研究報告、**34** (2006)、pp29-36 (SRR-No.34-06)
- (4) 阿部文明、中原真也、徳永賢一、木質バイオマスの二段階燃焼法に関する研究、日本機械学会論文集、Vol. **80**、No. 820 (2014)、TEP0367

なお、本研究報告の内容は、以下で発表を行った。

- 錦慎之助、F D Sによる木質材の燃焼シミュレーションの検討、日本機械学会熱工学コンファレンス 2016、D132、2016年10月
- 錦慎之助、F D Sによる堆積した木質材の燃焼シミュレーションの検討、第54回燃焼シンポジウム、E224、2016年11月

Study of Biomass Combustion Model for Woody Material Pile in Combustion Furnace using FDS

Shinnosuke Nishiki

Department of Mechanical Engineering, Kagoshima University
1-21-40 Korimoto Kagoshima 890-0065, Japan

Considering global warming prevention, it can be said that the use of renewable energy is an important issue. The land of Japan is covered with forests widely, and wood is a valuable resource for Japan. And although it is small scale, thinned wood can be effectively used as renewable energy source for local production for local consumption. The combustion process of wood is very complicated and it is extremely difficult to reproduce all phenomena by simulation. In this study, it is studied the simulation of woody material pile combustion of by a relatively simple method using FDS (Fire Dynamics Simulator), which is widely used in the simulation for fire study. Upward and downward fire spreading in woody material pile is simulated. Many particles of woody material are filled in combustion chamber. For upwards fire spreading, the bottom side of filled material is heated, and is caused to ignite. It is shown the difference of filling rate of the woody material and grid size for simulation are possible to strongly affect calculation accuracy. For downwards fire spreading, the upper side of filled material is heated, and is caused to ignite. Woody particles are assumed to three types of cylindrical body with difference of diameter and length while same filling rate of woody material. In all cases, fire spreading is extinct on the way of fire traveling. It seems it is burning well when the length and the diameter of woody material are smaller, though it is not yet investigated sufficiently now. For the future works, the woody material pyrolysis model must be developed, and the grid size sensitivity exam is required, in order to improve the calculation accuracy.