

微小重力環境における粉塵雲燃焼のモデリング

桑名 一徳 (東京理科大), 矢崎成俊 (明治大), 佐伯琳々 (広島大・院), 金佑勁 (広島大)

Modeling Microgravity Combustion of Dust Cloud

Kazunori Kuwana*, Shigetoshi Yazaki, Rinrin Saeki, Wookyung Kim

*Tokyo University of Science, Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510

E-Mail: kuwana@rs.tus.ac.jp

Abstract: The combustion characteristics of metal powders in the form of dust clouds have been widely studied from energy utilization and safety engineering viewpoints. In this study, we attempt to model the propagation of combustion waves in dust clouds under microgravity conditions. The model considered in this study is simple; in particular, it neglects changes in gas density due to combustion, allowing the use of given flow fields. The model's parameters include ignition temperature and combustion time. It is examined to see if the model can reproduce previous experimental results. Then, the influence of gravity is discussed.

Key words: Dust-cloud combustion, Point-source model, Continuum model, Gravity

1. はじめに

粉塵爆発に関連した安全研究や、燃焼させても二酸化炭素を発生させないエネルギー資源に関する研究で、金属粉体の燃焼挙動が調べられている。

粉塵雲燃焼の実験を行う際、通常は粉体を噴き上げることにより粉塵雲が形成される。粉体粒子の初速度の影響を排除するためには、噴き上げ後に十分な時間を設けてから着火することが望ましいが、重力により粉体が沈降してしまうという困難さがある。そこで、微小重力環境を利用した粉塵雲燃焼実験が行われてきた¹⁾。微小重力環境と通常重力環境の燃焼挙動の違いや、宇宙環境における燃焼性状を理解するためには、粉塵雲燃焼に及ぼす重力の影響を解明する必要がある。そこで本研究では、数理モデルにより重力の影響を検討することを目的とする。

粉塵雲燃焼のモデリングに関しては、連続体モデルや点熱源モデルが広く用いられている²⁾。連続体モデルは粉塵雲を連続相として取り扱うモデルであり、点熱源モデルでは個々の粒子の発熱が考慮される。点熱源モデルの方が現象をより正確に表せるが、計算負荷が高い。一方、粒子間熱伝導よりも燃焼による発熱が遅い条件では、連続体モデルが点熱源モデルの良い近似であることが知られている²⁾。

粉塵雲燃焼に及ぼす重力の影響について、連続体モデルを用いた検討結果が報告されているが³⁾、連続体モデルを用いることの妥当性について十分検討されていない。本研究では、アルミニウム粉塵雲の燃焼を対象とし、モデルパラメータの値から連続体モデルが妥当ではないことをまず確認する。その後、点熱源モデルを用いて重力の影響について検討する。

2. モデル

本研究では、Goroshin ら²⁾の連続体および点熱源モデルを拡張し、重力の影響を考慮できるようにする。

Goroshin らのモデルは、粉体温度が気相温度に等しく、粉体の存在が気相の熱移動に影響しないことを仮定する。さらに、気相密度を含めてすべての物性値が定数だと仮定されている。これらの仮定により燃焼反応が流れ場に及ぼす影響を無視できる。Goroshin らのモデルでは、気体も粉体も静止している。一方、本研究では、重力の影響を考慮するため、粒子が終端速度で落下しているものとする。本研究が対象とする条件では粒子落下のレイノルズ数が 2 未満だったので、ストークス域の式を用いて落下速度を計算した。

粒子の反応については、着火温度に到達したら与えられた燃焼時間をかけて燃焼熱を放出するというモデルが採用されている。つまり、着火温度と燃焼時間がモデルパラメータになる。本研究では、着火温度を 1000 K とし³⁾、燃焼時間の計算には Beckstead の経験式⁴⁾を用いた。

3. 結果および考察

本モデルで重要なパラメータは、粒子の反応時間と粒子間熱伝導時間の比を表す τ_c である。 $\tau_c \leq 1$ の条件では連続体モデルの誤差が大きく点熱源モデルを用いるべきである。逆に $\tau_c \geq 1$ の条件では連続体モデルは点熱源モデルの良い近似になる²⁾。点熱源モデルを数値的に解いて得た結果 (Fig. 1) によると、 $\tau_c = 1$ の条件ではかなり連続的な温度分布になっている。なお、Fig. 1 には、初期温度が 0、断熱既燃温度が 1 になるように無次元化した温度が示されている。

粒径 40 μm 程度以下のアルミニウム粉塵雲が空气中で希薄燃焼する条件では、 τ_c の値が 1 よりも小さいことが確認された。つまり、点熱源モデルを用いるべき条件範囲である。連続体および点熱源モデルで予測される燃焼速度を微小重力環境での実験結果⁵⁾と比較すると (Fig. 2)、確かに点熱源モデルの方が

精度よく実験結果を再現できているようである。

Fig. 3 は、重力加速度 $g = \pm 9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ として粒子の終端速度を求めた結果である (g が正の場合が下方伝播に相当する)。濃度が大きい条件では重力の影響は小さい(方向による違いがほとんど見られない)が、下限濃度近傍では伝播方向による違いが顕著である。

4. 結論

粉塵雲燃焼に及ぼす重力の影響に関して、数値モデルを用いて検討した。既往の連続体および点熱源モデルを拡張し、重力の影響を考慮できるようにした。具体的には、終端速度で粒子が落下する状態を考慮した。本研究が対象としている条件範囲では、燃焼反応が粒子間熱伝導と比して速く、点熱源モデルの使用が好ましいことが確認された。

点熱源モデルを用いた検討によれば、粒径が $10 \mu\text{m}$ のアルミニウム粒子の粉塵雲燃焼では、粉塵濃度が $150 \text{ g}/\text{m}^3$ 程度以上の場合には重力の影響は小さく、伝播の方向により燃焼速度はほとんど変化しない。一方、粉塵濃度が小さくなると伝播方向の影響が顕著になり、下向き伝播に比べて上向き伝播の方が、燃焼速度が速い。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP21H04593 および明治大学先端数理科学インスティテュート (MIMS) 共同利用・共同研究拠点「現象数理学研究拠点」ライフサイエンス・数理学融合研究支援プログラムによる支援を受けて実施されたものである。

参考文献

- 1) Kim, W., Saeki, R., Dobashi, R., Endo, T., Kuwana, K., Mogi, T., Lee, M., Mikami, M. and Nakamura, Y.; Research on risk of dust explosions in microgravity for lunar and planetary exploration, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* 38, 380204 (2021).
- 2) Goroshin, S., Lee, J. H. and Shoshin, Yu.; Effect of the discrete nature of heat sources on flame propagation in particulate suspensions, *Proc. Combust. Inst.* 27, pp. 743-749 (1998).
- 3) Kuwana, K., Yazaki, S., Kim, W., Mogi, T. and Dobashi, R.; Gravity effects on the minimum explosive concentrations in 1-D dust explosion, *Combust. Sci. Tech.* 195, pp. 1622-1636 (2023).
- 4) Beckstea, M. W.; Correlating aluminum burning times, *Combust. Explosion Shock Waves* 41, pp. 533-546 (2005).
- 5) Ballal, D. R.; Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity, *Proc. R. Soc. Lond. A* 385, pp. 21-51 (1983).

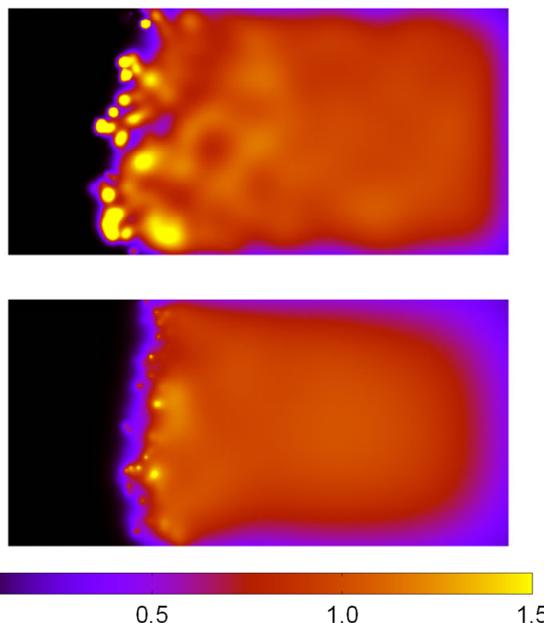


Fig. 1 Temperature distributions numerically obtained by the point-source model. Top: $\tau_c = 0$; bottom: $\tau_c = 1$.

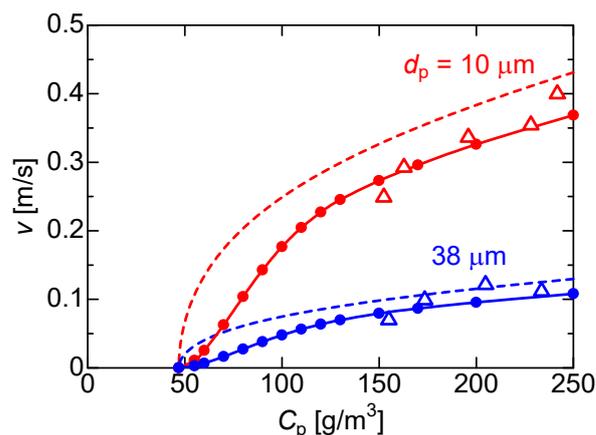


Fig. 2 Comparison between model predictions (solid line, the point-source model, and the dashed line, the continuum model) and microgravity experiments⁵⁾ (open triangle).

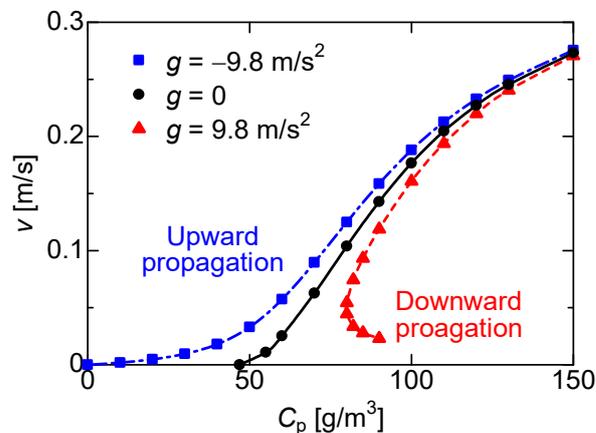


Fig. 3 Influence of propagation direction on the propagation speed for aluminum particles of $d_p = 10 \mu\text{m}$. Particle diameter is $10 \mu\text{m}$.