

PS-12 直接噴射式エンジンにおけるアンモニア噴霧の 混合気形成過程に関する考察

環境・動力系 * 川内 智詞、高木 正英

1. はじめに

海運業界のゼロエミッション実現に向け、重油からの燃料転換が検討されている。燃焼時に CO₂ を排出しない水素・アンモニアの利用拡大は、目標達成に向けたシナリオの一つである。特にアンモニアは、水素に比べて貯蔵や輸送性に優れ、既存のインフラも活用できることから関心を集めており、燃料に利用するための研究が進められている。

アンモニアを燃料としてディーゼルエンジンに利用する場合、アンモニアを数十 MPa 程度に圧縮し、液体の状態で噴射する。沸点は、液体にかかる外気圧で決まるため、図 1 に示す飽和蒸気圧線図から、例えば雰囲気圧力 P_a が 5MPa のとき、アンモニアの液相温度がおよそ 360 K で沸騰することになる。そのため、エンジンの上死点において、アンモニアの噴霧を構成する液滴は、沸騰でなく蒸発で気化することになる。したがって、蒸発速度こそ異なるものの、相変化過程自体はアンモニアと重油で変わることはないことがわかる。

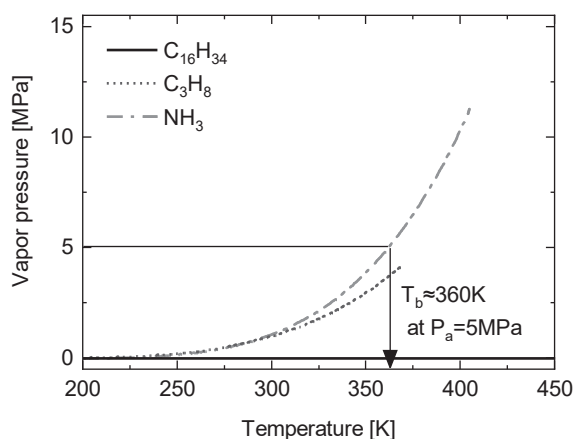


図-1 飽和蒸気圧線図 (C₁₆H₃₄, C₃H₈, NH₃)

表 1 は、アンモニア (NH₃)、石油系液体燃料の目安として用いたヘキサデカン (C₁₆H₃₄) 及び液化石油ガス (LPG) の主成分で標準沸点の類似するプロパン (C₃H₈) の物性値を示す。アンモニアは、沸点が低だけでなく、蒸発潜熱や比熱が高いなど、ヘキサデカンの物性とは大きく異なる。また、発熱量が低いため、同一の噴射期間で重油と等しい熱量を供給するには、例えば、大噴孔径を採用するなど噴射率の増加が必要となる。そのため、アンモニアと石油系燃料では、形成される混合気が大きく異なることが想定されるが、実際に噴霧内の温度や当量比がどの程度となっているか不明であ

る。噴霧内の温度や当量比は、難燃性であるアンモニアの燃焼性の向上や、燃焼過程で生成される亜酸化窒素 (N₂O) の抑制を図るための重要な制御因子である。

そこで本研究では、噴霧の蒸発と、噴霧と周囲気体との混合を記述する計算モデルを構築し、噴霧内温度や燃料蒸気濃度を推定した。得られた結果から、アンモニアの低沸点や高蒸発潜熱といった特異な性質に着目し、他燃料との噴霧混合気形成の違いについて考察した。

表-1 噴霧の混合気形成に係る燃料の物性値

	Unit	C ₁₆ H ₃₄	C ₃ H ₈	NH ₃
Liquid density	ρ_l kg/m ³	770	493	603
Latent heat of vaporization	H_v kJ/kg	357	336	1166
Specific heat capacity	C_p J/kg·K	2211	2669	4740
Boiling temperature	T_b °C	287	-42	-33
Theoretical air-fuel ratio	- kg/kg	14.9	15.7	6.1
Lower heating value	Q_{LHV} MJ/kg	44.3	46.3	18.5

2. 計算方法

計算には、著者らが気液間の相互作用を考慮できるよう独自に修正した Musculus-Kattke の噴霧モデル¹⁾を用いた。計算で与えた液滴径は、液柱から分裂した後のザウタ平均粒径を想定して 20 μ m とし、液滴温度は 333 K とした。矩形の噴射率を仮定し、噴射圧力は 80 MPa、噴射期間は 5ms、噴霧角は 15deg. とした。噴孔径は、各燃料のエネルギー流束が等しくなるように設定した。燃料の噴出速度をベルヌーイの定理によって求め、流量係数が燃料によって変化しないとする仮定から、各燃料で設定する噴孔径 d_N が次式によって求められる。

$$d_N = d_{N,ref} \cdot \left(\frac{\rho_{l,ref}}{\rho_l} \right)^{0.25} \cdot \left(\frac{Q_{LHV,ref}}{Q_{LHV}} \right)^{0.5}$$

なお、 ρ_l 、 Q_{LHV} はそれぞれ液相密度、低位発熱量を表している。上式から、基準としたヘキサデカンの噴孔径を 0.3mm とすると、プロパン、アンモニアの噴孔径は、それぞれ 0.34mm、0.5mm となる。雰囲気は空気、圧力、温度はそれぞれ 5MPa、773K とした。

3. 結果と考察

図 2 に噴射開始後 5ms における温度、当量比の噴霧軸方向の分布を示す。周囲気体より温度が低く、当量比の高い領域は、液滴の蒸発によって生じた結果であり、噴霧領域を表し

ている。アンモニアの噴霧到達距離がヘキサデカン、プロパンと比べて大きくなっているのは、計算条件で与えたアンモニアの大噴孔径により噴霧の運動量が大きいためである。ヘキサデカンは、液滴の蒸発が進行するまでに時間を要するため、当量比は噴孔近傍から噴霧先端に向かって増加した。一方で、アンモニアやプロパンでは、噴射直後から蒸発が進み、噴孔付近の当量比が高く、先端に向かって低下した。一般的に、大噴孔径や蒸発性の高さは、噴霧内の当量比を高める要因となる。しかしながらアンモニアの場合、燃焼に必要な空気量が小さいため、プロパンほど過濃にならず、量論比からやや希薄な混合気が形成される結果となった。

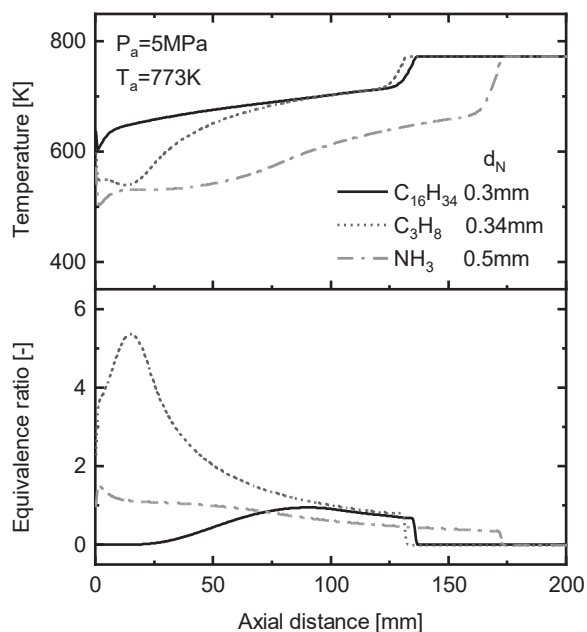


図-2 噴霧軸方向の温度・当量比分布 ($t=5.0\text{ms}$)

プロパンは、噴孔付近で大部分の燃料が蒸発するため、噴孔近傍の温度が低く、噴霧先端に向かってヘキサデカンの温度に漸近した。一方でアンモニアの結果を見ると、噴霧内の温度は噴孔近傍だけでなく噴霧全域でも大幅に低下する結果となった。今回の計算条件では、ヘキサデカンの場合、周囲気体の温度より 150 K 程度低下するのに対し、アンモニアの温度低下は 250 K 程度であった。この温度低下は、難燃性であるアンモニアの燃焼を支援するために噴射される補助燃料の着火や燃焼を阻害する。そのため、補助燃料によってアンモニアの燃焼をアシストするには、補助燃料を高温の火炎にした状態で、アンモニアの噴霧に干渉させることが望まれる。

図 3 は蒸発量とその時刻までの噴射量との比である蒸発割合の結果を示す。図 1 が示すようにプロパンとアンモニアの飽和蒸気圧曲線は類似するが、アンモニアの蒸発割合はプロパンと比べて低くなった。プロパンとアンモニアの蒸発割合に差が生じた理由について考察するため、計算で求めた液相燃料の温度上昇に費やす熱量 (顕熱) Q_{sens} と蒸発潜熱に費やす熱量 (潜熱) Q_{lat} を図 4 に示す。図から明らかなように、

蒸発潜熱が大きいアンモニアでは、液滴が周囲から受け取る熱量の大部分が顕熱でなく、相変化のための潜熱に分配される。本条件では、図 4 の顕熱がマイナスになっているように、噴霧内の状態量と液滴の蒸発の関係から、アンモニアの液滴温度は低下する結果となった。そのため、顕熱が正となり液滴温度が上昇するプロパンと比べると蒸発速度は低下してしまう。これがアンモニアの蒸発割合がプロパンに比べて低下する原因である。

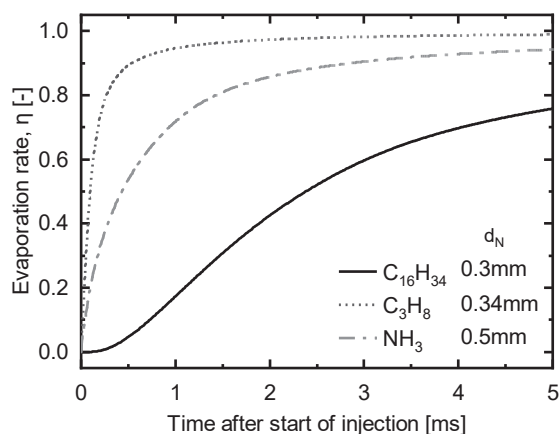


図-3 蒸発割合

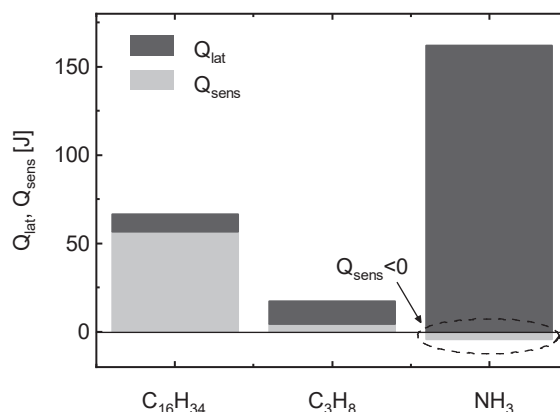


図-4 噴霧の蒸発による熱吸収量

7. まとめ

本研究では得られた知見を以下に示す。

- アンモニアは、ヘキサデカンと異なり噴射直後から蒸発が進行するため、噴孔近傍から当量比が増加する。
- プロパンとアンモニアの飽和蒸気圧曲線は類似するものの、潜熱の大きいアンモニアの蒸発速度は、プロパンに比べて低下する。
- アンモニアの理論空気量は小さいため、蒸発量に比して比較的希薄な混合気が形成される。また潜熱の大きさから、噴霧全域で温度が低下する。

参考文献

- 1)川内智詞, 高木正英: 日マリ学会誌, 56 巻 3 号 (2021)