

熱分解吸熱反応燃料を用いた再生冷却式燃焼器に関する研究

著者	木村 博幸, 蛭澤 直人, 高橋 将人, 湊 亮二郎, 棚次 巨弘
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2005
ページ	97-102
発行年	2006-08
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008614

熱分解吸熱反応燃料を用いた再生冷却式燃焼器に関する研究

著者	木村 博幸, 蛭澤 直人, 高橋 将人, 湊 亮二郎, 棚次 巨弘
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2005
ページ	97-102
発行年	2006-08
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008614

熱分解吸熱反応燃料を用いた再生冷却式燃焼器に関する研究

木村 博幸(生産情報システム工学専攻 航空宇宙機システム研究室)

蛭澤 直人(機械システム工学専攻 航空宇宙機システム研究室)

○高橋 将人(機械システム工学科 航空宇宙機システム研究室)

湊 亮二郎(機械システム工学科 助手)

棚次 亘弘(航空宇宙機システム研究センター長, 教育研究等支援機構 教授)

1. はじめに

再使用型宇宙輸送システムへの搭載が見込まれている極超音速空気吸い込み式エンジンの燃料として、現在最も注目されているのは液体水素 (LH_2) 燃料である。極低温燃料である LH_2 は、比推力が大きく、さらに冷媒としての能力が高いという利点を備えている。しかしながらその密度は通常の航空機用炭化水素燃料と比べ著しく小さいため、燃料タンクや機体の大型化が避けられず、高い加速飛行性能を発揮させることが困難となる。

一方、熱分解吸熱反応燃料 (Endothermic Fuel; EF) と呼ばれる炭化水素系のジェット燃料 (JP-4, JP-10 等) は、常温燃料でありながら約 700 K 以上の高温環境下で大きな吸熱反応を示すことが知られている[1]。また、EF は LH_2 の約 10 倍の密度を有し、さらに常温燃料であることから、燃料タンクの小型化・分散化が可能となり、機体の小型化や抗力の低減、機体設計の高自由度化などといった多くの利点をもたらす。このことから、極超音速機用空気吸い込み式エンジンの燃料・冷媒としての EF の利用が提案されているが、未だその実用化には至っていないのが現状である。その主な原因は、熱分解吸熱反応特性、熱分解後の燃料組成、着火・燃焼特性、および熱分解反応に伴う炭素析出特性等、EF の利用に関わる特性の大半が未解決のままであるという点にある。

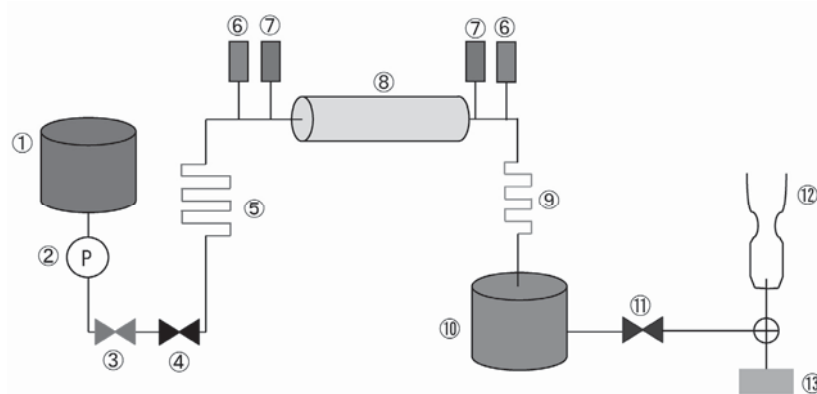
そこで本研究では、EF の熱分解吸熱反応特性、着火・燃焼特性、炭素析出特性等に関する加熱・燃焼試験データを取得し、これらの各種特性を調べる。将来的には再使用型宇宙輸送システムのための極超音速機用空気吸い込み式エンジンの燃料・冷媒として EF の実用化を目指す。

2. 2005 年度研究内容

上述のような EF の各種特性を調べるため、図 1 に示すような燃料の加熱・燃焼試験装置を構想した。また、以下のような実験手順を想定した。

- (1) 高温・高圧の空気と燃料が反応することによって起こる爆発を防ぐため、装置内に窒素を充填させる。
- (2) 実験装置の管内を 50 atm まで加圧する。
- (3) 燃料は⑤の予熱器で 300 °C まで加熱された後、⑧の直管型加熱器 (電熱管もしくは電気炉加熱式) で 700 °C まで加熱される。
- (4) 燃料の圧力と温度は、加熱器の入口と出口に設けられた⑥の圧力センサと⑦の熱電対で計測される。

- (5) 加熱器を出た燃料は、⑨の冷却器により、300℃まで冷却される。
- (6) ⑫の小型ロケット型燃焼器を用いて、加熱後の燃料の燃焼特性を評価する。
- (7) ⑬のガスクロマトグラフを用いて加熱後の燃料の組成を調べる。



- | | | |
|-----------|---------|--------------|
| ① 燃料タンク | ⑥ 圧力センサ | ⑪ コントロールバルブ |
| ② 燃料供給ポンプ | ⑦ 熱電対 | ⑫ 小型ロケット型燃焼器 |
| ③ 安全弁 | ⑧ 加熱器 | ⑬ ガスクロマトグラフ |
| ④ 切換弁 | ⑨ 冷却器 | |
| ⑤ 予熱器 | ⑩ 回収タンク | |

図1 実験装置構想図.

熱分解吸熱反応による冷却特性および炭素析出特性は、加熱器において計測される温度・圧力データ、および炭素析出量データを用いて評価するものと想定した。燃焼特性は、加熱・分解後の燃料を小型ロケット型燃焼器で燃焼させ各種性能を検証することにより評価するものと想定した。また、ガスクロマトグラフを設けることにより加熱・分解後の燃料組成を調べることも想定した。

2005年度は、燃料加熱試験に際し重要となる加熱器の設計予備計算として、燃料を所定の温度まで加熱するために必要な加熱区間長の推算と、高温・高圧条件下において加熱管に作用する応力の推算を行った。

3. 2005年度研究結果

3.1. 加熱器の解析モデル

加熱器はステンレス (SUS304) 製円管 (加熱管) の周囲を銅ブロックで覆った構造を想定した。SUS304に含まれるNiによって、燃料の熱分解反応による炭素析出を抑制する効果が期待できる。また、熱伝導性の良い銅ブロックで円管周囲を覆うことにより、ヒートシンクとしての効果や、円管周りの温度を軸方向に一定に保つといった効果が期待できる。図2に示すように、加熱器の解析モデルとして銅ブロックの外側から加熱するモデルと、ステンレス円管外周の温度を一定 (700℃) としたモデルを想定した。各部材の諸元は表1のように設定した。

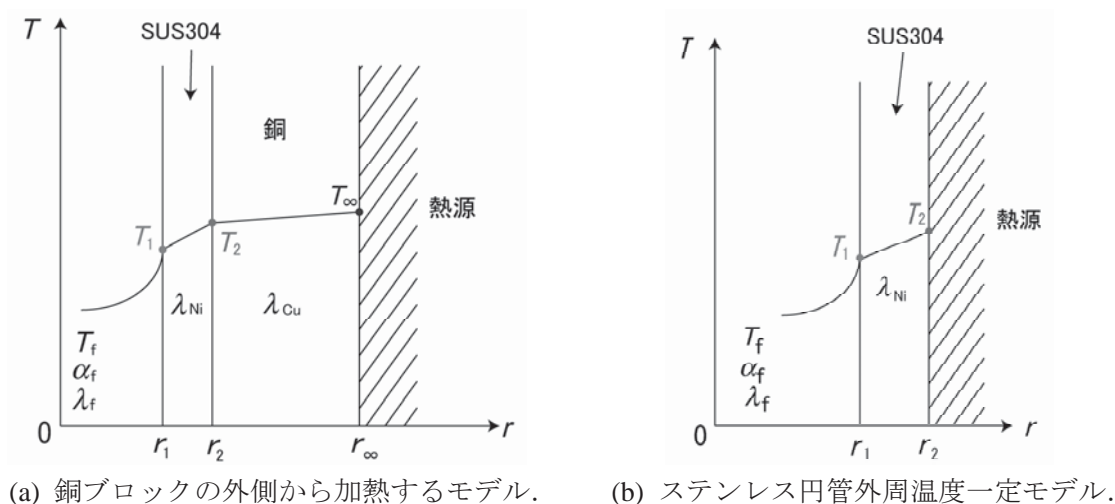


図2 解析モデル.

表1 加熱器諸元

	SUS304 円管	銅ブロック
外径 [mm]	10	100
内径 [mm]	5	10

3.2. 模擬燃料

本研究ではEFを模擬する燃料としてn-パラフィン(直鎖飽和炭化水素, 炭素数9~14)の利用を想定した. 今回は解析対象の燃料としてn-パラフィンの平均の炭素数を持つn-dodecaneを用いた. n-dodecaneの主な物性値を表2に示す.

表2 n-dodecaneの物性値[2]

構造式	分子量	沸点 (1 atm) [K]	臨界温度 [K]	臨界圧力 [MPa]	粘性係数 (25 °C) [$\times 10^{-3}$ Pa.s]
C ₁₂ H ₂₆	170.340	489.5	658.3	1.82	1.37

その他の物性値(定圧比熱, 密度, 熱伝導率, 粘度)の推算には, 様々な圧力, 温度条件下における物性値推算が可能なNIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database (SUPERTRAPP) version3.1[3]を用いた.

3.3. 解析条件

解析を行なうにあたって, 次のように解析条件を定めた. ただし, 燃料圧力はn-dodecaneの臨界圧力を超える値とした.

• 燃料に負荷する圧力	30 atm, 50 atm
• 質量流量	1.0×10^{-3} kg/s
• 燃料の流入温度	573.15 K (300 °C)
• 熱源温度	973.15 K (700 °C)
• 加熱器材料の安全率	4
• 初期条件	$T_f = 573.15$ K ; $x = 0$

3.4. 解析結果

3.3 節で示した条件下で、加熱器に必要な長さは、燃料の温度が 973.0 K となる長さを必要長さとして定め、加熱管に作用する応力の解析には図 2 (b)のモデルを用いた。その結果を図 3 (a)~(b)および図 4 (a)~(f)に示す。

図 3 は、各圧力条件下、加熱器軸方向に対する燃料の温度分布および加熱器必要長さの計算結果である。図 4 (a)~(b)は、加熱管の断面に作用する内圧による弾性応力を示したもので、加熱管の軸方向に一定の値である。図 4 (c)~(f)は、加熱管に作用する熱応力を示したもので、加熱管の軸方向の断面を見たものである。また、図 4 に示す応力は正値を引張り、負値を圧縮としている。

3.5. 検討と考察

図 3 (a), (b)から、熱源温度を 973.15 K (700 °C) とした場合、加熱器の必要長さは約 3.3 m という結果が得られた。この場合、内圧による弾性応力と熱応力は設定した許容応力 (51.25 MPa) の範囲内に収まるという結果が得られた。しかし、加熱器のみで約 3.3 m の長さが必要であれば実験装置の大型化が避けられない。そのため、熱源温度を 1173.15 K (900 °C) として解析を行った結果、約 0.54 m の加熱器を用いることで、燃料を目標の温度 (973.0 K) まで加熱することが出来るという結果が得られた。しかし、熱源温度を 1173.15 K (900 °C) とした場合、30 atm の圧力条件下で、熱応力が設定した許容応力を超えるという結果も得られた。そのため、同応力を許容応力の範囲内に収めるためには、加熱管の材料として SUS304 よりも更に耐力の大きな材料を用いる必要がある。また、加熱器の長さを短縮する方法としてコイル型の加熱器を採用するという方法もある。

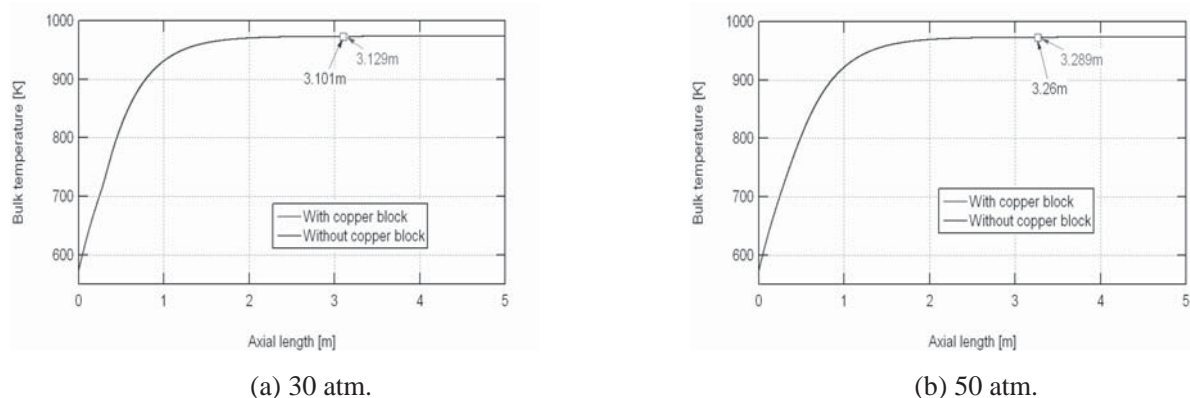


図 3 加熱器軸方向に対する燃料の温度分布と必要長さ。

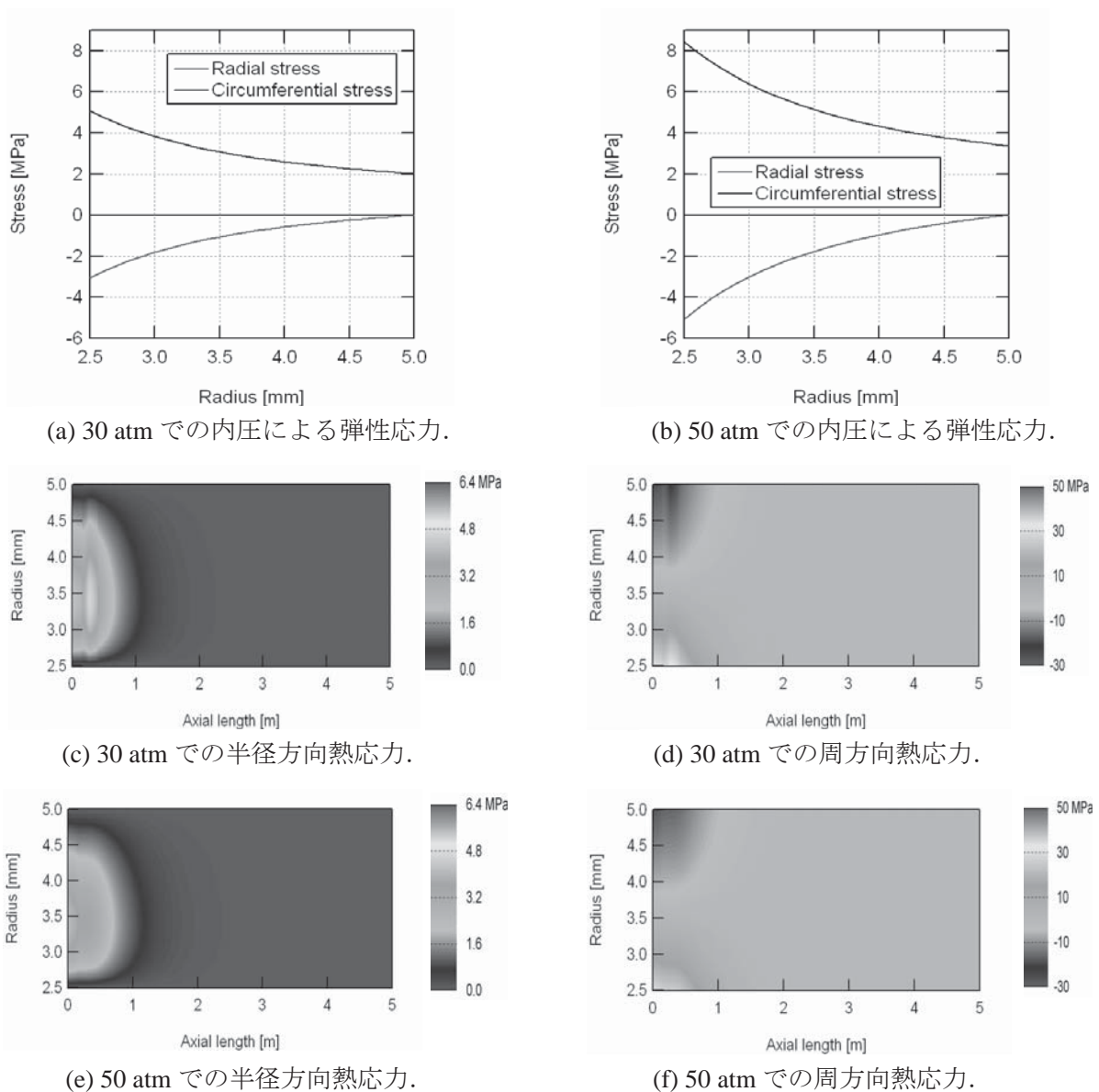


図4 加熱管に作用する内圧による弾性応力と熱応力.

4. まとめ

2005 年度、本研究では、EF の熱分解吸熱反応特性、着火・燃焼特性、炭素析出特性の評価を行なうため、EF を用いた加熱・燃焼実験装置を構想し、そのうち加熱器の設計予備計算として燃料の加熱に必要な加熱区間長と、加熱管に作用する応力の推算を行なった。その結果、熱源の温度を 973.15 K (700 °C) とした場合、加熱器の長さは約 3.3 m 必要であることが示された。また、SUS304 製の加熱管を使用した場合、想定した実験条件の下では、加熱管の破損はないことも示された。

加熱器の長さを短縮するために、熱源の温度を高く設定して解析を行なった結果、熱源が 1173.15 K (900 °C) の場合に、熱応力が設定した許容応力を超えるという結果が得られた。この場合、加熱管の材料として、SUS304 よりも更に耐力の大きい材料を用いる必要があることが示された。

5. 本研究に関する発表論文等

なし

参考文献

- [1] L.S.Ianovski, V.A.Sosounov, Yu.M.ShinkHman, “THE APPLICATION OF ENDOTHERMIC FUEL FOR HIGH SPEED PLOPULSION SYSTEMS”, AIAA paper, ISABE 97-7007, 1997.
- [2] 化学工学会, 改訂第6版 化学工学便覧, 丸善株式会社, p. 42, 1999.
- [3] M.L.Huber, et al., NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database (SUPERTRAPP) Version3.1 Users' Guide, 2003.