

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-659

液体酸素／高密度炭化水素／金属系 ロケットエンジンの理論性能

佐藤和雄・毛呂明夫
八柳信之・坂本博

1993年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. まえがき	1
2. 添加金属の選択	2
2-1. 比推力	2
2-2. 推進薬平均密度	3
3. 計算方法と仮定	3
4. 計算結果	4
4-1. 真空比推力	4
4-2. 密度・真空比推力	5
4-3. 特性速度	6
4-4. 燃焼ガス温度	6
4-5. その他の主な燃焼ガスの物性値	7
5. まとめ	9
6. 参考文献	9

液体酸素／高密度炭化水素／金属系

ロケットエンジンの理論性能*

佐藤和雄*¹ 毛呂明夫*²
八柳信之*¹ 坂本博*²

Theoretical Performance of Rocket Engine for Liquid Oxygen/ High Density Hydrocarbon/Metal System

Kazuo SATO, Akio MORO, Nobuyuki YATSUYANAGI
and Hiroshi SAKAMOTO

ABSTRACT

The theoretical performance of a rocket engine using liquid oxygen (LO₂)/hydrocarbon (HC)/metal propellant was calculated by the one-dimensional chemical equilibrium flow method. The hydrocarbon fuel used was the petroleum-derived RJ-1J with a density of 851 kg/m³ at 25°C. Beryllium, boron, aluminum and magnesium were selected as the additive metals to the LO₂/HC propellant to improve the specific impulse and increase bulk density of the propellant. The results indicate that only beryllium, among the four metals, could improve the specific impulse. The effect of the propellant density was evaluated in $\rho \cdot I_{sp}$ (bulk density \times specific impulse). Enhancement of performance with aluminum was equal to beryllium at a metal weight fraction of 50%. At 50% metal addition, the performance was improved about 14% compared with no metal addition.

Keywords: Propulsion, Liquid rocket, Dual fuel, Metalized fuel

概要

液体酸素・炭化水素燃料に金属を添加したロケット推進薬の理論性能計算を一次元化学平衡流の手法を用いて行った。炭化水素には密度 $\rho=851\text{kg/m}^3$ の石油系炭化水素燃料RJ-1Jを用いた。ここでは添加する金属の選択を比推力の向上並びに推進薬の高密度化という観点から検討し、Be、B、Al及びMgを添加金属として選んだ。計算結果から、4種類の添加金属の中で比推力が向上するのはBe添加のみであった。密度効果を考慮して性能を評価する $\rho \cdot I_{sp}$ (推進薬平均密度 \times 比推力)では、総燃料中の金属添加量50*%においてAlもBeと同等の性能を示し、無添加の場合に比べ約14%性能が向上することが分かった。

1. まえがき

液体酸素／炭化水素(LO₂/HC)は推進薬平均密度 ρ が液体酸素／液体水素に比べかなり高く、比推力との積 $\rho \cdot I_{sp}$ も大きいことからビークルの小型化やペイロードの増加を目的とするブースタロケットの推進薬として注目されている。炭化水素燃料の高密度化はラムジェット分野での開発

*平成5年7月9日受付

(received 9 July 1993)

*1 ラムジェット推進研究部
(RAMJET PROPULSION RESEARCH DIVISION)

*2 ロケット推進研究部
(ROCKET PROPULSION RESEARCH DIVISION)

が先行してきたが¹⁾、ロケット分野への適用の検討及び開発も進みつつある²⁾。一般に炭化水素を燃料とするロケットエンジンは不安定燃焼を起こし易く燃焼効率が低いため、水素添加等による燃焼特性の改善も試みられている^{3),4)}。

著者らは炭化水素に比較的密度の大きい金属を添加して ρ 及び $\rho \cdot I_{sp}$ を更に向上させ、炭化水素燃料の燃焼性を改善することを目的に液体酸素/高密度炭化水素/金属系ロケット推進薬の燃焼特性の検討を進めている。ここでは、金属添加時の性能比較、燃焼特性等の理論性能値について得られた知見を述べる。

2. 添加金属の選択

2-1. 比推力

ロケットエンジンの比推力 I_{sp} は次式で示すように燃焼室とノズル出口のエネルギー落差によって求められ、燃焼生成物の平均分子量 M と燃焼温度 T_c に依存する。

$$I_{sp} = \sqrt{[2(H_c - H_e)] / g}$$

$$I_{sp} \propto \sqrt{[T_c / M]}$$

液体ロケットの酸化剤として性能・価格・非毒性の面で酸素の優位性は今後とも保持される。よって添加金属の選択も金属の特性とともに酸素酸化物の特性で決定できる。

金属を添加して I_{sp} を向上させるには金属酸化物の分子量及び比熱が小さく、生成熱が高い金属が望ましい。図1に金属酸化物及び幾つかの非金属並びに水の単位重量当りの生成熱を分子量とともに示す。Be, Li, Al, Si及びMg酸化物は高い生成熱を示すことが分かる。 I_{sp} の向上だけを目的とするには生成熱が高く、低分子量のBe及びLiが添加金属として望ましく、酸素/水素へのLi添加は実験的研究も進められた⁵⁾。しかし、表1に示す通りLiは密度が 0.534 g/cm^3 と小さく液体酸素/高密度炭化水素に添加した場合、推進薬平均密度 ρ を高められない。一方、Beは密度が 1.85 g/cm^3 と高く、代表的な石油系炭化水素RJ-1Jの密度より約2

倍大きいため ρ への寄与は大きい。推進薬平均密度 ρ を大きくし、 T_c を上昇させるという観点からすれば、単位体積当りの酸化熱が高い金属が LO_2/HC に添加する金属として選択される。図2に単位体積当りの酸化熱を示す。Beは単位体積当りの酸化熱が最も高く、又低分子量の金属酸化物を生成するためピークルの小型化並びに高性能化を図る添加金属として有望と言える。しかし、現実的な取扱いでは毒性を有するという点で問題がある。ピークルの小型化を重視すれば密度の大きいAl及びBの添加が有望であり、特にBは単位体積当りの酸化熱がAlよりも高く、Alに比べ低分子量の金属酸化物を生成するためAlに代る添加金属として注目される。MgはAlよりも分子量が小さく比較的生成熱も高いので検討対象として残した。以上の観点から LO_2/HC に添加する金属としてBe, Al, B, Mgを選んだ。

従来、ロケット用燃料として検討対象となってきた炭化水素にはメタン、プロパン、液化天然ガス、液化石油ガス

表1 金属及び非金属の密度

物質名	密度(g/cm^3 , 25°C)	状態
H ₂	0.07 (-253°C)	液体
Li	0.534	固体
Be	1.85	固体
B	2.43	固体(結晶)
C	2.25	固体(黒鉛)
Na	0.971 (20°C)	固体
Mg	1.74	固体
Al	2.70 (20°C)	固体
Si	2.35	固体
P	2.70	固体(黄リン, β)
S	2.07	固体(α)

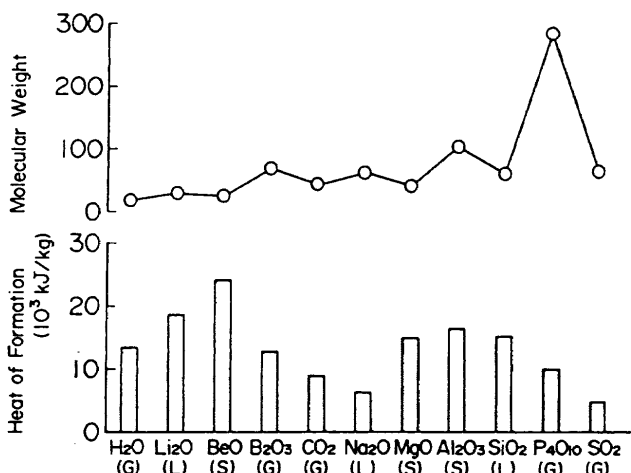


図1 金属・非金属酸化物の分子量と生成熱

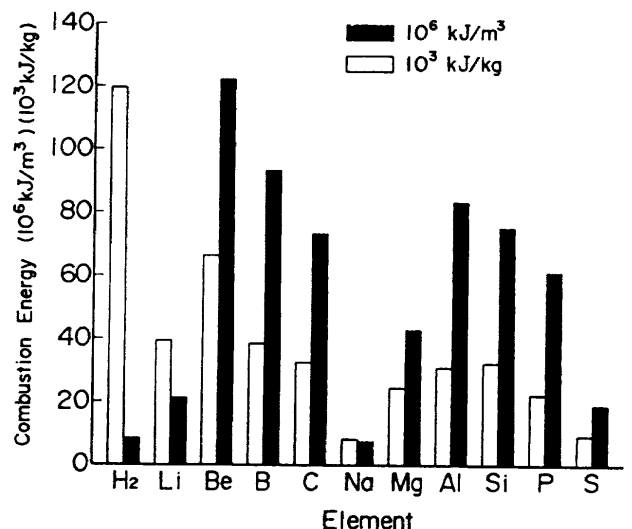


図2 金属及び非金属の酸化熱

等の低温で使用されるもの、及びRP-1, RJ-1等の常温で使用されるもの、及びこれらを高密度化したJP-10等各種のものがある。金属添加による密度効果は当然炭化水素の密度が小さいもの程大きいですが、ここでは燃焼特性試験を実施しているRJ-1J($\rho=0.851\text{g/cm}^3$)を比較基準燃料として選んだ。

炭化水素燃料に金属を添加する方法としては金属を微粒子として混入させスラリー状燃料として取扱うことが一般的である。しかし、スラリー状燃料は粘性が高く燃焼特性に影響をおよぼす微粒化特性を低下させる。この場合、水素ガスを添加すれば炭化水素燃料のみにおける不安定燃焼を抑制する効果^{3),4)}とともに、添加方法の工夫によっては微粒化特性の改善並びに燃焼特性の向上をも促進する手段として有望といえる。又、比推力の向上も期待できる。しかし、ある程度以上の水素を必要とする場合には次節で定義される推進薬の平均密度を低下させるため本報告の目的とは一致しない。よって、ここでは水素の添加を考慮しないこととした。

2-2. 推進薬平均密度 ρ

金属を添加した場合の推進薬平均密度 ρ は次式で示される。

$$\rho = (1+O/F) / [(O/F)/\rho_o + (1-ML)/\rho_{HC} + ML/\rho_{Metal}]$$

ここで、O/Fは混合比(酸化剤 / [炭化水素燃料 + 金

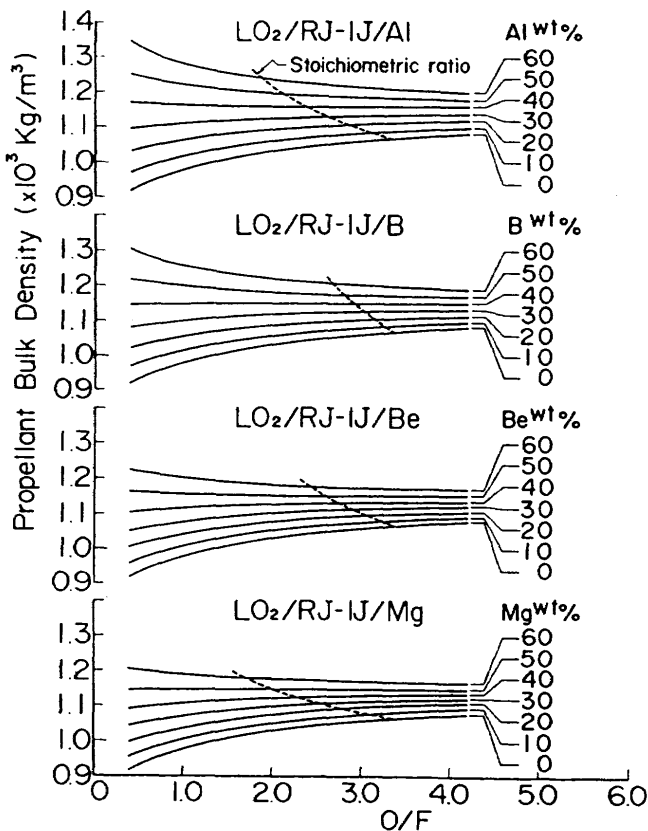


図3 金属添加による推進薬平均密度の変化

属]), ρ は密度, MLは金属添加率(金属/(炭化水素燃料+金属))である。添字O, HCおよびMetalはそれぞれ酸化剤, 炭化水素燃料及び金属を意味する。

図3に液体酸素/RJ-1Jに金属を添加した場合の ρ の変化を混合比O/Fに対して示す。燃料平均密度が液体酸素密度より大きい小さいかによって傾向が異なる。燃料平均密度が液体酸素密度より大きい領域では ρ を大きくするためにはO/Fが小さい方が良い。燃料平均密度が液体酸素密度に達するまではO/Fが大きい方が ρ は大きくなる。金属添加率が増加すると燃料平均密度は大きくなる。O/Fに対する ρ の傾向が逆転する金属の添加率はAlの場合約40wt%, B及びBeで約50wt%, Mgで約60wt%で金属密度に逆比例する。混合比で示す化学量論比の値は金属添加率の増加に伴い小さくなる。変化の割合はMg, Alでは他に比し大きい。図3では化学量論比での ρ を金属添加率をパラメータとして比較できる。各金属について金属添加率60wt%での化学量論比における ρ を無添加(0wt%)の場合と比較すると、Al添加で約17%, Bで約13%, Beで約11%, Mgで約10%増加する。

3. 計算方法と仮定

液体酸素／高密度炭化水素／金属系ロケット推進薬の理論性能計算はS. Gordon等⁶⁾の計算方法を基本にして著者等が整備したCEC 82プログラム⁷⁾を用いて、化学平衡組成と熱化学物性及び比推力等の特性値を計算した。その仮定は以下の通りである。

- ①燃焼室内での燃焼過程は定圧・断熱的で燃焼生成物は熱化学的に平衡状態にある。その平衡組成はGibbsの自由エネルギーが最小となる条件を満足する。
- ②燃焼生成ガスは理想気体とする。
- ③凝縮物(液体及び固体)の体積は無視し、気体と凝縮物との間には熱力学的に平衡状態が達成され温度差及び速度差もない。
- ④ノズル内の膨張過程は等エントロピーで、熱損失のない一次元流れである。
- ⑤燃焼生成物は液体酸素／高密度炭化水素において表2に示すC・H・O化合物30種を考慮し、更に金属を添加することにより燃焼生成物は増加しAl, B, Be及びMgではそれぞれ43種, 46種, 43種及び39種を考慮した。

ロケットの性能を示す真空比推力 $I_{sp, vac}(s)$ 及び特性速度 $C^*(m/s)$ の式を以下に示す。

$$Ue = \sqrt{2 \cdot (Hc - He)}$$

$$I_{sp, vac} = [Ue + Pe / (\rho \cdot Ue)] / g$$

$$C^* = Pc / (\rho \cdot U)$$

ここで、Uは燃焼ガス速度(m/s), Hはエンタルピ(J/kg), gは重力加速度(m/s²), Pは圧力(Pa), そして ρ は燃焼ガス密度(kg/m³)である。添字c, t及びeはそれぞれ燃焼室, スロー

表2 化学平衡計算で考慮した燃焼生成物

添加金属	金属及び金属化合物	C・H・O化合物	トータル数
Al	Al, AlH, AlO, AlOH, AlO ₂ , AlO ₂ H, Al ₂ O, Al ₂ O ₃ , HAIO, Al(s), Al(l), Al ₂ O ₃ (s), Al ₂ O ₃ (l)		=43
B	B, BH, BH ₂ , BH ₃ , BO, BO ₂ , HBO, HBO ₂ , B ₂ , B ₂ O, B ₂ O ₂ , B ₂ O ₃ , H ₃ B ₃ O ₆ , B(s), B(l), B ₂ O ₃ (l)	C, CH, CH ₂ , CH ₂ O, CH ₃ , CH ₄ , CO, CO ₂ , C ₂ , C ₂ H, C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₂ O, C ₃ , C ₃ O ₂ , C ₄ , C ₅ , H, HCO, HO ₂ , H ₂ , H ₂ O, H ₂ O ₂ , O, OH, O ₂ , O ₃ , C(s), H ₂ O(s), H ₂ O(l)	=46
Be	Be, BeH, BeO, BeOH, BeO ₂ H ₂ , Be ₂ O, Be ₂ O ₂ , Be ₃ O ₃ , Be ₄ O ₄ , Be(s), Be(l), BeO(s), BeO(l)		=43
Mg	Mg, MgH, MgO, MgOH, MgO ₂ H ₂ , Mg(s), Mg(l), MgO(s), MgO(l)		=39

ト及び出口を意味する。

4. 計算結果

ここでは、選定した金属の添加に伴う真空比推力、密度・真空比推力、特性速度、燃焼温度及び燃焼ガスの平均分子量、定圧比熱、燃焼ガス密度について計算結果を示すとともにその特徴を論ずる。比較に用いた計算条件は燃焼圧力 $P_c=10\text{MPa}$ 、ノズル開口比 $A_e/A_t=50$ でRJ-1Jと金属の状態は常温、 LO_2 は沸騰温度状態を仮定した。真空比推力、特性速度等は平衡流の値を用いた。金属添加量が多くなると当然燃焼生成物中の凝縮種の割合が増加する。一般に凝縮種の割合が多くなると計算の諸仮定の吟味が必要であるが、ここで示した計算では推進薬中の金属添加率が高々30wt%程度 ($W_{\text{Metal}}/W_{\text{HC}}=6/4$, $O/F=1$) であるため補正等は行っていない。又、燃焼生成物のノズル膨張仮定における二相流損失もここでは考慮しない。

4-1. 真空比推力 $I_{sp,vac}$

図4に金属添加率を補助変数とした真空比推力 $I_{sp,vac}$ を混合比に対して示す。金属添加に伴い $I_{sp,vac}$ が向上するのはBeのみである。Beは約30wt%の添加で無添加の場合に比較して約24秒高くなり更に添加率を増やすと比推力は低下する。Alの場合は $I_{sp,vac}$ のピークは添加率50wt%までは添加率によらず無添加の場合とほぼ同じ値を示し、更に添加率を増やすと $I_{sp,vac}$ のピーク値は低下する。Bの場合も添加率30wt%までは無添加の場合とほぼ同じ値を示す。Mgの場合は添加率の増加に伴い $I_{sp,vac}$ のピーク値は低下する。金属の添加に伴い化学量論比が混合比の小的側に移動するのに対応して、 $I_{sp,vac}$ のピーク値も混合比の小的側に

移動する。このピーク値を示す混合比の移動はMgとAlで大きく添加率約60wt%では無添加の場合に比較して混合比が約1/3となり推進薬中の酸素の割合が低下する。燃料平均密度が液体酸素密度よりも大きい場合はピークルの小型化に寄与することになる。選択した金属では先に指摘したBe

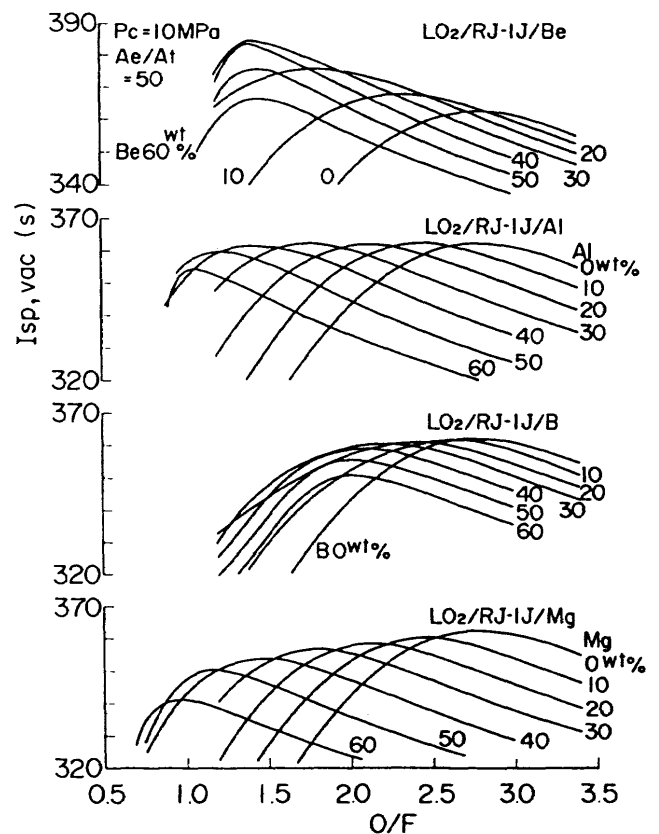


図4 金属添加による真空比推力の変化

以外でIsp,vacの向上は期待できずAL, B, Mg等では本論の目的とする密度効果の見積が重要となる。

4-2. 密度・真空比推力($\rho \cdot I_{sp,vac}$)

ロケットの性能におよぼす推進薬平均密度と比推力の効果はピークルの達成目標速度と関係する。しかし、本論では特定の目標速度を仮定せず金属添加の特性を知るとの観点から単に推進薬平均密度×真空比推力($\rho \cdot I_{sp,vac}$)で論ずる事とする。

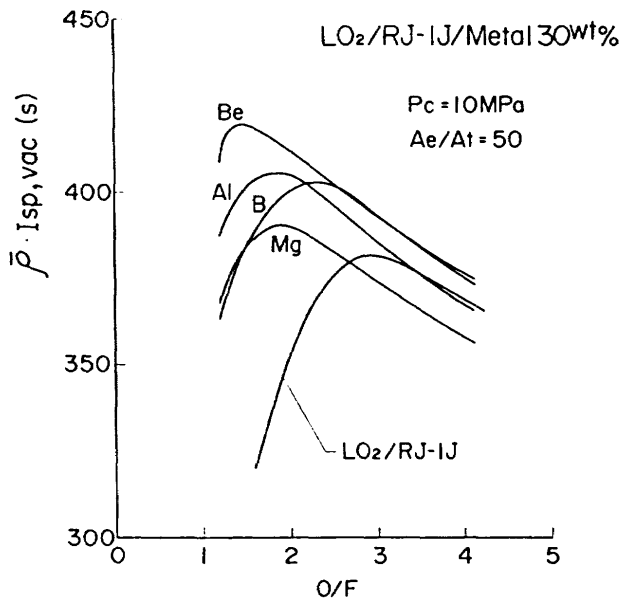


図5-A 金属添加による密度・真空比推力の比較(金属添加率30wt%)

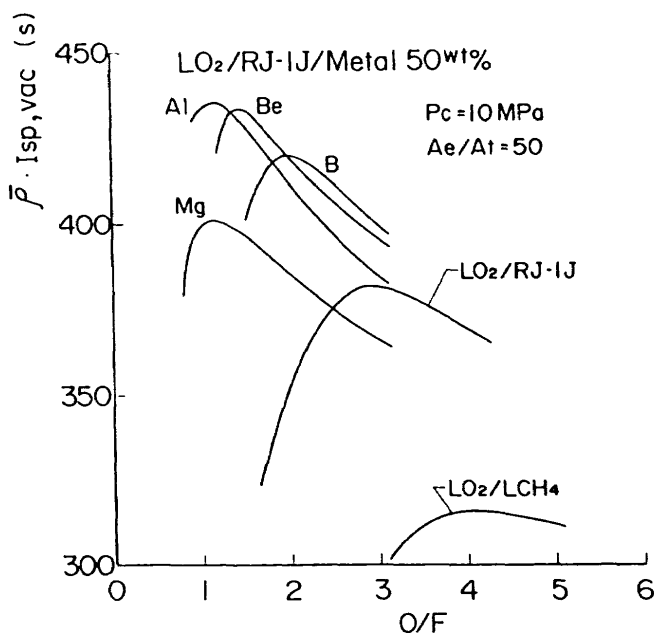


図5-B 金属添加による密度・真空比推力の比較(金属添加率50wt%)

図5-A, -Bに金属添加率30wt%, 50wt%で、金属の種類を補助変数とした推進薬平均密度と真空比推力の積 $\rho \cdot I_{sp,vac}$ 値を混合比に対して示す。ここで ρ は $\rho_{ref}=10^3\text{kg/m}^3$ で割って無次元化して表示した。図5-A, -Bを比較すると、金属添加率によって $\rho \cdot I_{sp,vac}$ 値に対する金属の違いによる影響効果が異なることがわかる。当然ながら添加率の低い時はIsp,vac値の寄与が大きく、添加率が増すと ρ の寄与が大きくなる。ここで選択した金属添加率のレベルでIsp,vac値の影響と ρ 効果は明らかに分かる。すなわち、図5-Aの添加率30wt%ではBe添加のIsp,vacが最大値をとることは先にも述べた。このためBeの添加効果は大きく、 $\rho \cdot I_{sp,vac}$ はBe>Al>B>Mgの順に小さくなる。ピーク値を無添加の場合と比較するとBeで約10%、AlとBで約6%向上する。図5-Bの添加率50wt%ではAl>Be>B>Mgの順に $\rho \cdot I_{sp,vac}$ は小さくなる。BeのIsp,vacが低下している事と ρ 効果が30wt%よりも大きい事とあいまってAlとBeの順位と効果が逆転した。ピーク値は無添加の場合と比較してAl, Beで約14%、Bで約10%、Mgで約5%向上する。LO₂/LCH₄の場合も参考として示したがAl添加のピーク値はこれと比較すると約1.4倍程度大きくなる。図6-A, -BにBeとAlについて金属添加率を補助変数とした $\rho \cdot I_{sp,vac}$ 値を混合比に対して示す。又、図6-Cに $\rho \cdot I_{sp,vac}$ のピーク値を金属添加率に対して示す。BeではIsp,vacのピーク値が最大となる添加率約30wt%を境に添加率の増加に対する $\rho \cdot I_{sp,vac}$ の増分は少ない。AlではIsp,vac値の添加率による変動が小さいため高添加率でも増分は大きい。添加率を多くする事ができればAlも効果的である。

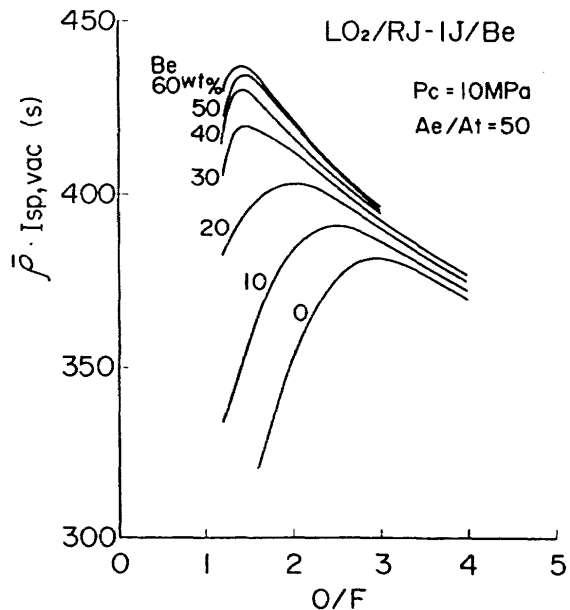


図6-A Be添加率の違いによる密度・真空比推力の変化

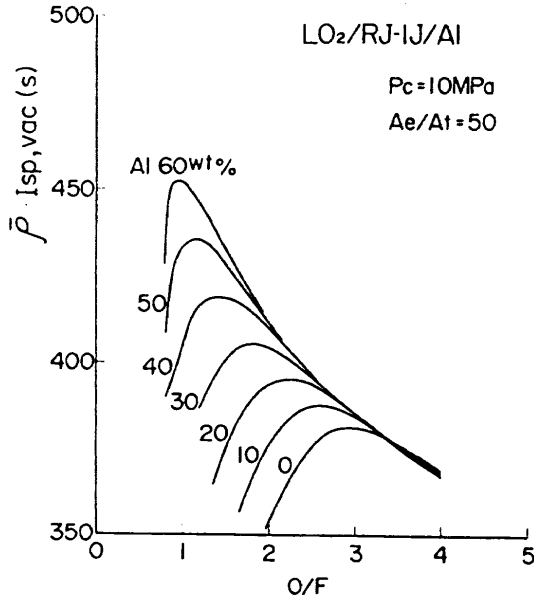


図 6 - B Al添加率の違いによる密度・真空比推力の変化

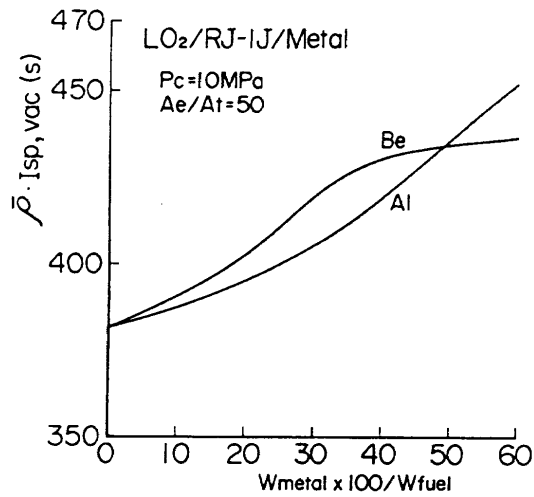


図 6 - C 密度・真空比推力ピーク値の金属添加率に対する変化

4-3. 特性速度 C*

図 7 - A, -B, -C, -D に金属添加率を補助変数とした特性速度 C^* を混合比に対して示す。金属の添加に伴い C^* が高くなるのは Be のみである。Be は添加率約 30 wt% で C^* が最高値となり、更に添加率が増加すると低下し、添加率約 60 wt% で無添加の場合よりも低くなる。Al では添加率 40 wt% までは C^* の低下が小さい。B および Mg では添加率の増加に伴い C^* は低下する。燃焼性能の点では C^* の向上が得られる Be の添加は有益である。又、Be 及び Mg 添加では混合比の小さい領域で燃焼生成物が燃焼室とノズル・スロートの間で液相から固相に変る相変化温度領域に入るため特異な値を示しているものもある。

4-4. 燃焼ガス温度 T_c

図 8 - A, -B に金属添加率を補助変数とした燃焼ガス温度 T_c を混合比に対して示す。金属添加率の増加に伴い T_c は上昇し、ピークを示す混合比は小さくなる。金属添加による T_c の上昇は $Be > Al > B > Mg$ の順となり、Be 60 wt% 添加では無添加に比して約 1100K 上昇し約 4900K の燃焼ガ

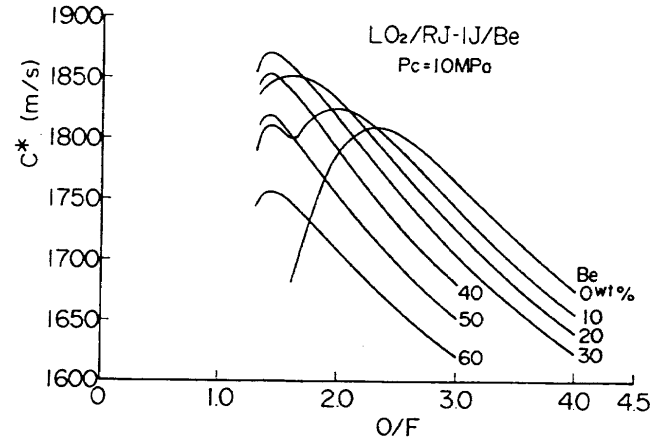


図 7 - A Be添加の特性速度

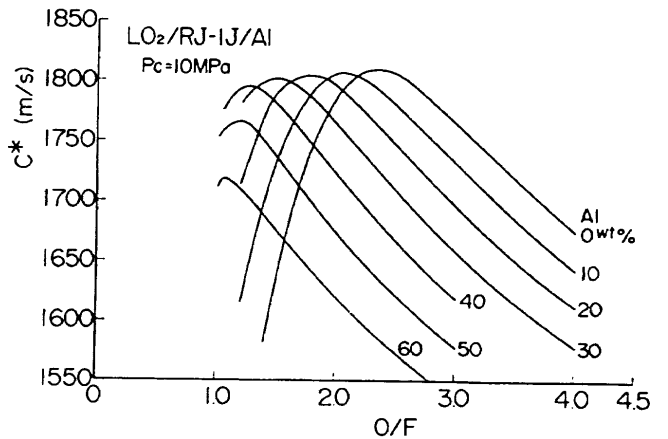


図 7 - B Al添加の特性速度

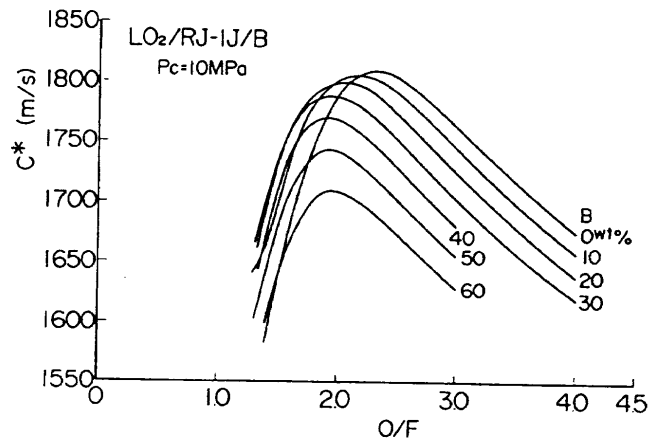


図 7 - C B添加の特性速度

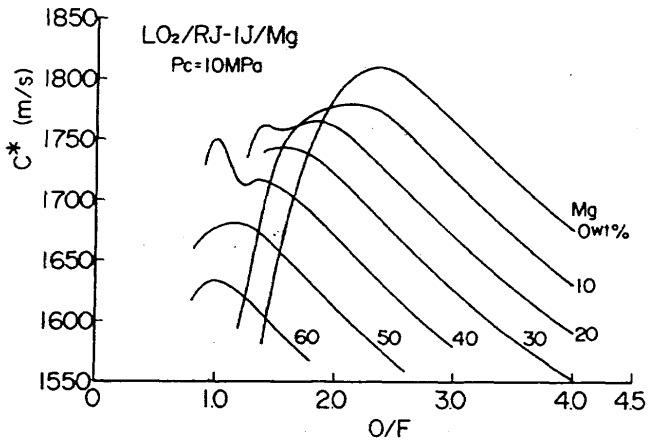


図7-D Mg添加の特性速度

ス温度となる。同様に60wt%の添加率でAl, B, Mgはそれぞれ約4500K, 4300K, 4000Kとなる。燃焼ガス温度がこのように高くなるため、炭化水素の蒸発を促進し燃焼特性を改善するという点からは有益となる一方、ロケットエンジンの観点からは冷却の問題が重要となる。

4-5. その他の主な燃焼ガスの物性値

その他の主な燃焼ガスの物性値として図9-A~Dに平均分子量M, 図10-A~Dに定圧比熱Cp及び図11-A~Dに燃焼ガス密度 ρ_c の変化を混合比に対して示す。但し, Mと ρ_c

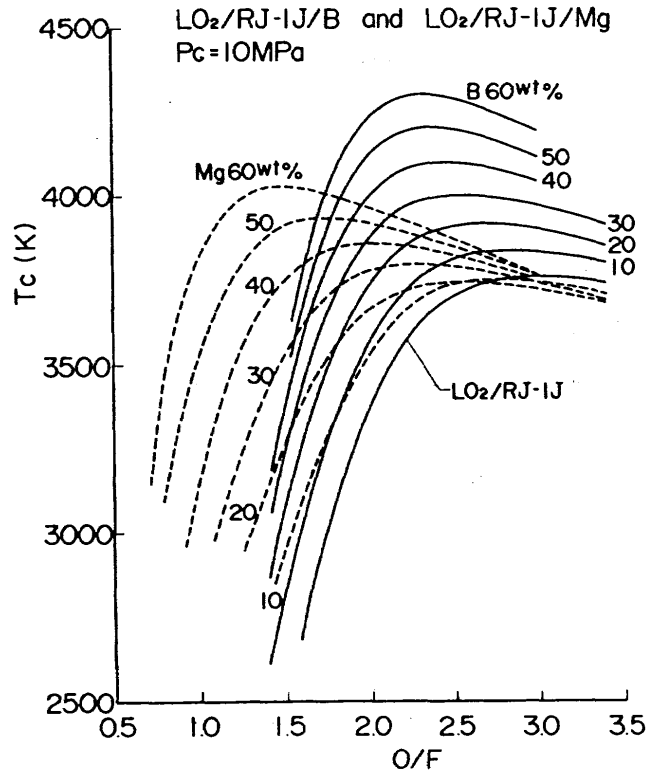


図8-B B及びMg添加の燃焼ガス温度

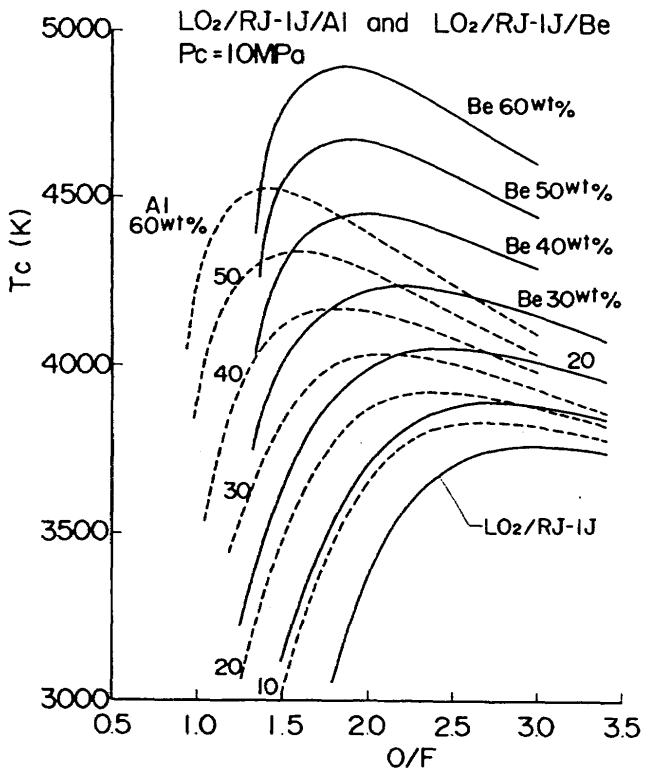


図8-A Be及びAl添加の燃焼ガス温度

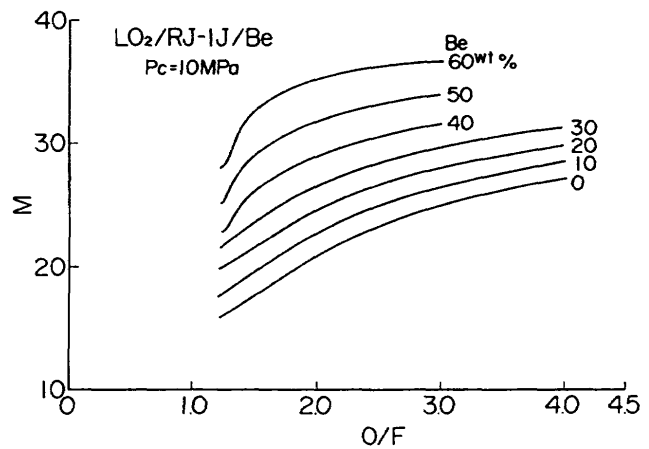


図9-A Be添加の平均分子量

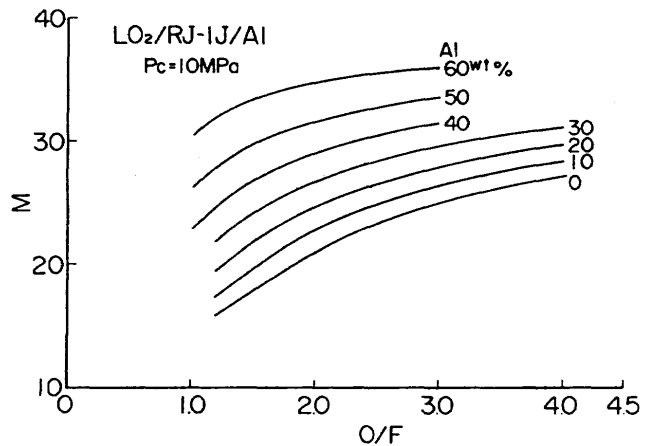


図9-B Al添加の平均分子量

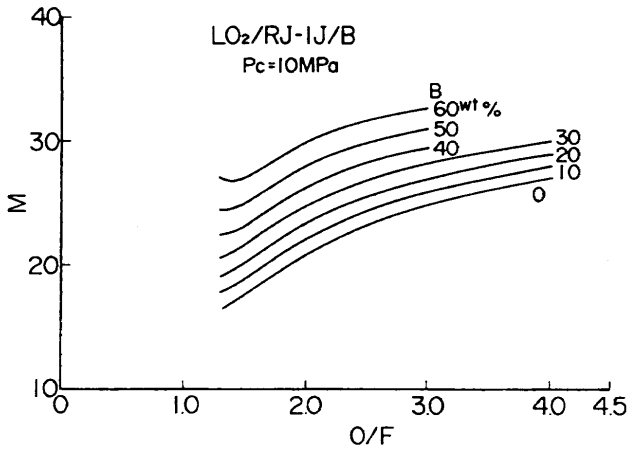


図9-C B添加の平均分子量

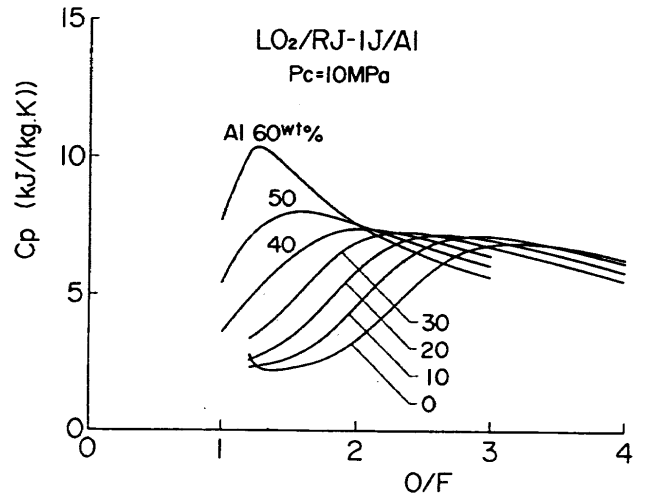


図10-B Al添加の定圧比熱

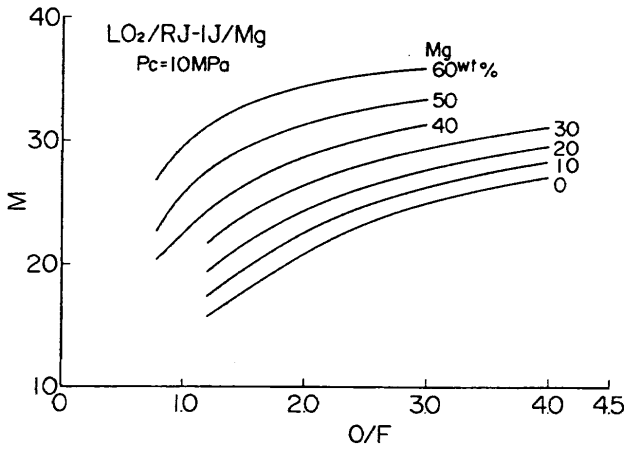


図9-D Mg添加の平均分子量

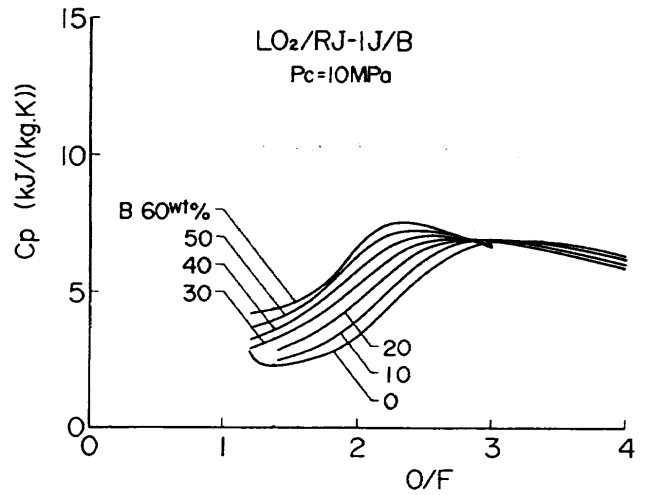


図10-C B添加の定圧比熱

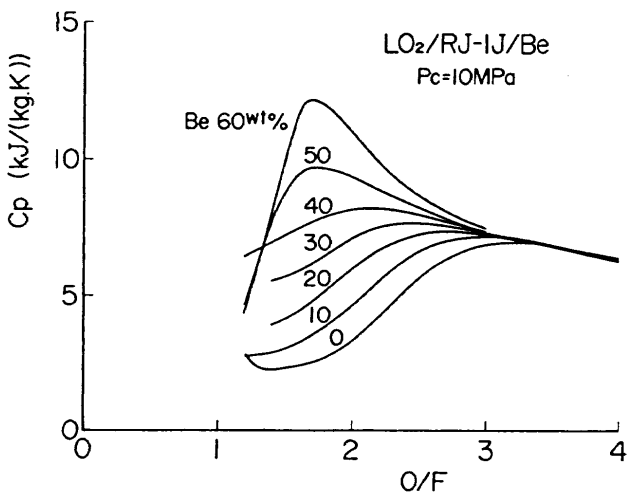


図10-A Be添加の定圧比熱

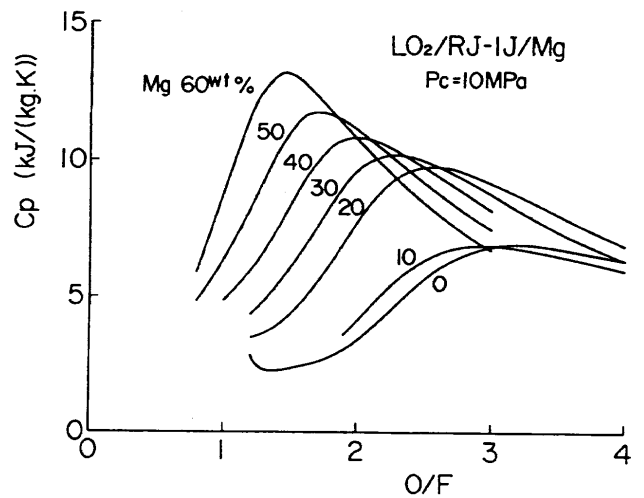


図10-D Mg添加の定圧比熱

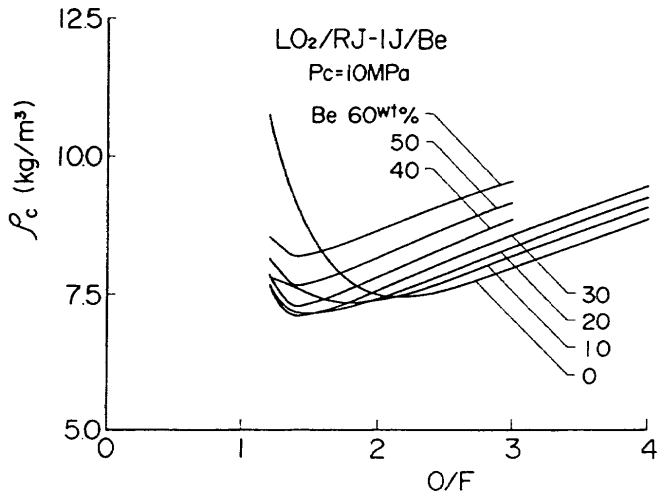


図11-A Be添加の燃焼ガス密度

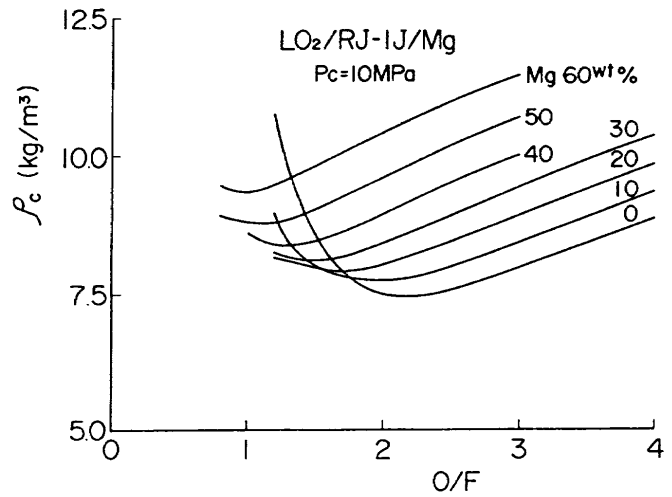


図11-D Mg添加の燃焼ガス密度

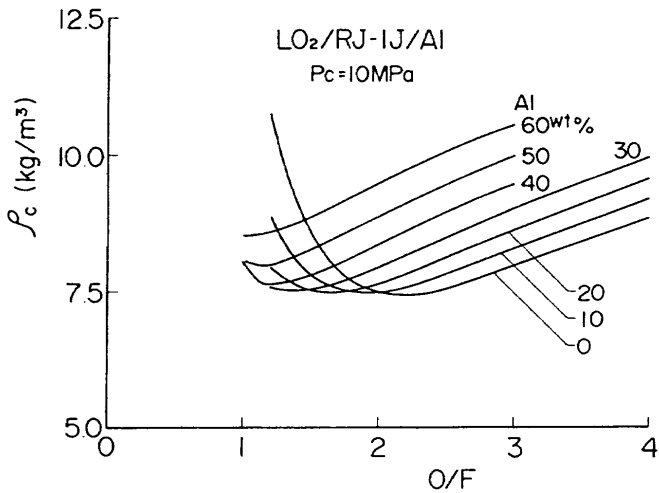


図11-B Al添加の燃焼ガス密度

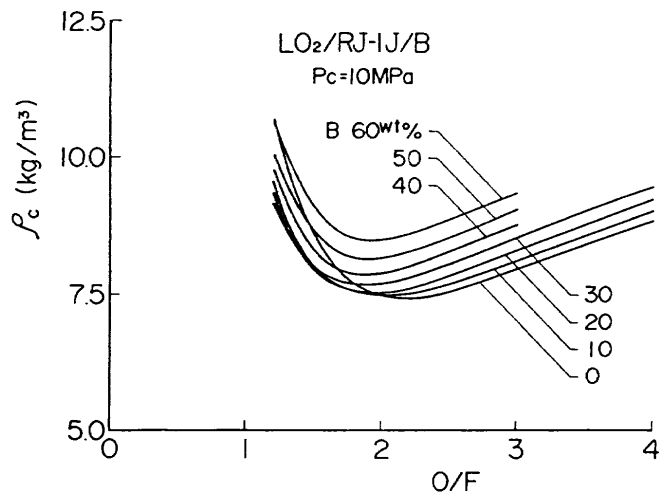


図11-C B添加の燃焼ガス密度

における凝縮種については体積を無視した仮定となっている。

5. まとめ

- 1) 液体酸素/RJ-1Jに金属を添加することによって燃焼ガス温度は上昇する。燃焼ガス温度の上昇はBe及びAl添加において著しく、炭化水素燃料の燃焼性を向上させるのに有効であると期待される。
- 2) 液体酸素/RJ-1JにBeを添加した場合、比推力の絶対値は増加し約30wt%の添加で最大となる。Al及びB添加ではそれぞれ添加率50wt%、30wt%まで無添加での比推力とほぼ同じであり、Mg添加では比推力は向上しない。
- 3) 推進薬平均密度と比推力の積($\bar{\rho} \cdot I_{sp}$)は金属添加率の増加に伴い向上する。添加率50wt%におけるAlの $\bar{\rho} \cdot I_{sp}$ はBeとほぼ同じ値を示し他の金属よりも高く、無添加に比べ約14% $\bar{\rho} \cdot I_{sp}$ が向上する。
- 4) Al及びBeは液体酸素/炭化水素に添加する金属として有望であるが、Beには毒性があることを考慮すると取り扱い及び入手の容易なAlでの検討が現実的である。
尚、RJ-1JにAlを添加した燃料の燃焼試験を行っており、続報としてその結果を報告する予定である。

参考文献

- 1) F, S. Billig, P, J. Waltrup and L, A. Dale; "Combustor Performance Parameters for Hydrocarbon Fuels", The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory report TG 1246, May 1974
- 2) J. W. Frankenfeld, T. W. Hastings, M. Lieberman and W. F. Taylor; "High Performance, High Density Hydrocarbon Fuels", NASA CR-159480, April 1979

- 3) 小野文衛, 田村洋, 熊川彰長, 坂本博, 佐藤和雄, 佐々木正樹, 八柳信之: “液酸ケロシンロケット燃焼器の燃焼実験(噴射器面より水素を添加した場合の燃焼特性)”, 第32回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp.12-13, 1988
- 4) N. Yatsuyanagi, K. Sato, H. Sakamoto, F. Ono and H. Tamura; “Stabilizing Effect of Hydrogen Injection on LOX/kerosene Unstable Combustion”, Proc. 17th ISTS, 1990
- 5) 毛呂明夫, 鈴木和雄: “高性能推進薬の研究—酸素・リチウム・水素プロペラント—”, NAL TR-635, 1980
- 6) S. Gordon and B. J. McBride; “Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations”, NASA SP-237, 1971
- 7) 毛呂明夫, 鈴木和雄: “ロケットプロペラントの理論性能—多項近似式による表示—”, NAL TM-293, 1976

航空宇宙技術研究所資料659号

平成5年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1-7-8

Printed in Japan