

ヒドラジン／四酸化二窒素の縮小反応機構の構築

大南香織^{*†}, 小川博之^{**}, 林 光一^{***}

^{*}総合研究大学院大学物理科学科宇宙科学専攻 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1

[†]Corresponding address: ohminami@isas.jaxa.jp

^{**}宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1

^{***}青山学院大学理工学部 〒229-8558 神奈川県相模原市淵野辺5-10-1

2007年11月30日 受付 2008年1月18日 受理

要旨

宇宙機の二液式推進薬として用いられるヒドラジンと四酸化二窒素について、気相の燃焼反応機構を縮小し新たな反応機構を構築した。大南と小川による30化学種245素反応式から構成される詳細反応モデルに対し、感度解析を用いて23化学種61素反応式まで反応規模の低減を行った。二液式スラスタの動作の範囲である酸化剤・燃料比(O/F)が0.82から1.84の間で、縮小された反応機構の解析値は、燃焼ガス温度と組成について詳細反応機構における解析値および断熱火炎温度と平衡計算による値によく一致する結果となった。また着火おくれ時間は $O/F = 1.2$ で0.96 msecと文献値と合致する結果を得た。温度、組成、着火おくれに対して、縮小しても有用な反応モデルを構築できたことから、スラスタCFD解析への適用性を示したと考える。

1. 緒言

近年、科学ミッションをもつ探査機が多くなり、宇宙機の推進薬として、ターゲット天体へのスラスタ排気による汚染防止の観点からヒドラジン(N_2H_4)と四酸化二窒素(N_2O_4 , 以下「NTO」と略記)の炭素基を持たない燃料/酸化剤の組み合わせが求められるようになった。宇宙航空研究開発機構では、2003年打上げのHAYABUSAに、ヒドラジン-NTOを推進薬とした20N二液式スラスタを開発したが、推進薬の燃焼反応を含んだ理論モデルは構築されていない。そこで筆者らは、スラスタの設計ツールとなる数値モデルの構築の一環として、燃焼流体の数値シミュレーションのためのヒドラジン/NTOの反応機構の構築を行っている。

ヒドラジンとNTOの燃焼反応モデルの構築はこれまでなされてなかった。そこで、筆者らは2007年に詳細な燃焼反応モデルの構築を行った¹⁾(以降、「大南・小川のヒドラジン-NTO詳細反応モデル」と記す)。大南・小川のヒドラジン-NTOの詳細反応モデルは、N, H, Oの化学種を含む、気体燃焼反応について検証された素反応モデルより構成したもので、16文献による文献調査によって得たものである。16文献のうち基本としたのはN/O系, N/H系, N/H/O系に分けて112の反応について調査、記述したHansonらの報告²⁾とし、それに1976年までの文献から1008の気体燃焼反応を調査したWestleyの論文³⁾、窒素中のメタンの燃焼を扱ったSongらの論文^{4), 5)}、酸素及び酸素と水素雰囲気

中でのバーナー火炎内のアンモニアの燃焼を扱ったMillerらの論文^{6), 7)}、ヒドラジンの熱分解反応について記述したKonnovとRuyckの論文⁸⁾、NISTのデータベース⁹⁾より素反応式を追加及び追加検討をし、基本となる反応モデルを組み立てた。それに比較的新しい文献であるBaulchらの論文¹⁰⁾を中心に、ParkとLin¹¹⁾、Davidsonら¹²⁾、Atkinsonら¹³⁾、Glarborgら¹⁴⁾、CohenとWestberg¹⁵⁾、Bozzelii¹⁶⁾、TsangとHampson¹⁷⁾の論文にある素反応モデルを追加し、N, H, Oを含む素反応式に対して追加および再検討をして構築したものである。

本報告では、構築された詳細反応モデルから、スラスタ解析に適合するように素反応の絞込みを行い、反応規模(含まれる素反応数)の縮小を行う。縮小化した反応モデルに対して0次元の燃焼計算を行い、実験値、理論値との比較をすることで構築したモデルの検証をし、また、詳細反応モデルとの比較により、縮小化の妥当性を検証した。

2. 解析手法

大南・小川のヒドラジン-NTO詳細反応モデル¹⁾は、245素反応30化学種を含む。この反応機構は流体解析には規模が大きすぎることから、温度による感度解析により反応を絞り込み、縮小反応機構の構築をはかった。尚、本文中の反応番号は文献1)に示されている反応番号と同じものを用いている。

スラスタ燃焼室内部では燃焼は高温になること、圧力は

Table 1 Simulation conditions.

case No.	17	20	22	23	21	19	16
Pc[MPa]	0.581	0.654	0.715	0.764	0.720	0.671	0.643
<i>O/F</i>	1.84	1.57	1.36	1.21	1.09	0.96	0.82

Table 2 Gas temperatures (Case 23: *O/F* = 1.2).

反応モデル	反応数	最終到達温度 (K)	最終到達温度 ×10 ⁻⁴ (sec)
全反応モデル	245	3307	9.62
上位50反応モデル	64	3316	6.14
上位47反応モデル	59	3348	6.14
上位45反応モデル	55	3163	6.14
断熱火炎温度	—	3317	—

1 MPa以下であることを考え、詳細反応モデルのうち低温(500 K以下)で定義されている反応は除き、圧力依存は考慮せず修正Arrhenius型による素反応の定義を行った。その反応機構に対し、SENKIN (CHEMKIN-II, Ver.4.5に含まれる)を用いて温度についての感度解析を行った。

素反応で構成される反応機構において、化学種 j 個、反応数 i 個からなる、ある均一化学反応系における支配方程式は

$$Y_j = F_j(Y_j, t; k_i); \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (1)$$

の連立一階常微分方程式からなる。 Y_j は第 j 種の化学種質量分率を、 k_i は第 i 番目の反応の反応速度定数を表す。 k_i を系のパラメータと見た場合、第 i 番目の反応の第 j 種の化学種質量分率に対する1次の規格化された感度係数(第 i 番目の反応が第 j 種の生成・消費に及ぼす影響)は下記のように定義することができる。

$$S_{ij} = \frac{k_i}{Y_j} \frac{\partial Y_j}{\partial k_i} = \frac{\partial \ln Y_j}{\partial \ln k_i} \quad (2)$$

感度係数が大きいほど第 i 番目の反応が第 j 種の生成・消費に及ぼす影響が大きいということであり、その時点で第 i 番目の反応が律速であることを示す。第 j 種の化学種の質量分率に対してだけではなく、系の温度 T に関しても同様に感度係数を定義することができる。

$$S_{iT} = \frac{k_i}{T} \frac{\partial T}{\partial k_i} = \frac{\partial \ln T}{\partial \ln k_i} \quad (3)$$

本研究では、スラスタ内部での燃焼温度の予測が重要とるため、温度に対する感度解析を実施し、解析時間を通じた感度係数の積分値を用いて縮小化を進めた。

解析は試験と同条件とするため、*O/F*のほかに燃焼圧をあわせた。解析条件をTable 1に示す。

3. 結果

3.1 反応モデルの縮小規模の検討

詳細反応モデルに対し、*O/F*をパラメータとした感度解析を行った。計算時間を通して、各*O/F*のケースで感度係数の積分値が高い上位1-50位の反応を抽出すると、全64反応式となった。Case23(*O/F* = 1.2での感度係数積分値が、上位50位、47位、45位までの反応機構における、系の最終到達温度、着火おくれ時間を、断熱火炎温度の計算と共にTable 2に示す。

Table 2の温度比較より、最適解が上位50-47反応モデルの間にあると考え、その間にある反応式を上位47反応モデルに1反応ずつ当てはめて最終到達温度を確認したところ、反応223のみ温度に対する影響を確認した。反応223の追加により上位47モデルの最終到達温度は、Case23(*O/F* = 1.2)で3348 Kから3316 Kとなり、断熱火炎温度3317 Kとほぼ同等の結果を得ることができた。

一方、着火おくれ時間は上位50反応モデルに縮小した時点で既に着火おくれ時間は詳細反応における解析値と比較すると36%小さくなっている。そこで次に、詳細反応機構の反応のうち、上位50反応モデルに組み込まれていない反応を検討することで着火おくれ時間に影響のある反応を調べた。結果、反応84を検出した。反応84は反応88の逆反応で、Konnovらによる値⁸⁾を参照していたが、反応88から逆反応の反応84の値を見積もるだけでは不十分であり、反応84の参照値であるHanson²⁾の値を入れることで、着火おくれ時間が0.92 msecとなり詳細反応モデルと一致させることができた。23化学種61反応式からなる縮小した反応機構を、反応式と反応速度定数の式におけるArrheniusパラメータとしてTable 3に示す。

3.2 着火おくれ時間に関する結果

O/F = 0.82-1.84ケースでの着火おくれ時間結果をFig. 1に示す。

O/F = 0.82-1.84で、着火おくれ時間は、縮小反応機構は詳細反応機構における結果によく一致した。また、*O/F* = 0.82-1.84の間で、着火おくれ時間は0.4-6.8 msecと1オーダーの違いを生じていること、*O/F*の減少、即ち

Table 3 Reactions and rate constants* used in the reduced hydrazine-NTO chemical reaction mechanism.

No.		Temp. range (K)	A	B	E / R
N / O reaction					
7	$N_2O_4 + M = NO_2 + NO_2 + M$ (M = N ₂)	300-500	2.03E + 28	-3.8	6400
24	$NO + NO + O_2 = NO_2 + NO_2 + NO_2$	273-660	1.20E + 09	0.0	-530
26	$NO_2 + NO + O_2 = NO_2 + NO_2 + NO_3$	300-500	2.90E + 07	0.0	-400
28	$NO_3 + NO = NO_2 + NO_2$	298-547	1.50E + 14	0.0	1163
32	$NO_2 + NO_2 = NO + NO + O_2$	600-2000	2.00E + 12	0.0	13500
33	$NO_2 + NO_2 + M = N_2O_4 + M$ (M = N ₂)	300-500	4.31E + 15	-3.8	0
34	$NO_2 + NO_3 = NO + NO_2 + O_2$	300-850	1.40E + 11	0.0	1600
N / H reaction					
35	$NNH = N_2 + H$		3.00E + 08	0.0	0
36	$N_2H_4 + M = NH_2 + NH_2 + M$ (M = Ar)		3.98E + 15	0.0	20600
38	$N_2H_3 + M = N_2H_2 + H + M$ (M = Ar)		1.00E + 17	0.0	16617
39	$N_2H_3 + M = NH_2 + NH + M$ (M = Ar)		5.00E + 16	0.0	30214
40	$N_2H_2 + M = NNH + H + M$ (M = Ar)		5.00E + 16	0.0	25178
49	$N_2H_4 + H = N_2H_3 + H_2$		7.00E + 12	0.0	1259
54	$N_2H_2 + H = NNH + H_2$		5.00E + 13	0.0	504
62	$N_2H_4 + NH = NH_2 + N_2H_3$		1.00E + 09	1.5	1007
71	$N_2H_4 + NH_2 = N_2H_3 + NH_3$	300-2000	1.80E + 06	1.7	-706
72	$N_2H_3 + NH_2 = N_2H_2 + NH_3$		1.00E + 11	0.5	0
73	$N_2H_2 + NH_2 = NNH + NH_3$		1.00E + 13	0.0	504
75	$NH_2 + NH_2 + M = N_2H_4 + M$ (M = Ar)		3.00E + 20	-1.0	0
84	$N_2H_4 + N_2H_2 = N_2H_3 + N_2H_3$		2.51E + 10	0.5	15000
85	$N_2H_3 + N_2H_2 = N_2H_4 + NNH$		1.00E + 13	0.0	3021
86	$N_2H_2 + N_2H_2 = NNH + N_2H_3$		1.00E + 13	0.0	5000
87	$N_2H_3 + N_2H_3 = NH_3 + NH_3 + N_2$		3.00E + 12	0.0	0
88	$N_2H_3 + N_2H_3 = N_2H_4 + N_2H_2$		1.20E + 13	0.0	0
N / H / O reaction					
96	$HONO = OH + NO$	300-2500	3.01E + 30	-3.8	25340
97	$HNO + M = H + NO + M$ (M = H ₂)	230-750	2.29E + 17	-0.3	23180
98	$HNO_3 + M = NO_2 + OH + M$ (M = Ar)	800-1200	1.60E + 15	0.0	15400
126	$N_2H_4 + OH = N_2H_3 + H_2O$		5.00E + 12	0.0	504
127	$N_2H_3 + OH = N_2H_2 + H_2O$		1.00E + 13	0.0	1000
129	$N_2H_2 + OH = NNH + H_2O$		1.00E + 13	0.0	504
131	$NH_3 + OH = NH_2 + H_2O$	225-3000	5.00E + 07	1.6	480
137	$NH + OH = NO + H_2$		1.60E + 12	0.6	755
138	$N_2O + OH = N_2 + HO_2$		2.00E + 12	0.0	5036
143	$NO + OH + M = HONO + M$ (M = N ₂)		1.00E + 28	-2.5	-34
145	$HONO + OH = NO_2 + H_2O$		4.00E + 12	0.0	0
147	$N_2H_4 + HO_2 = N_2H_3 + H_2O_2$		3.98E + 13	0.0	1000
160	$NO + HO_2 = NO_2 + OH$	200-2000	2.05E + 12	0.0	-250
164	$NO + H + M = HNO + M$ (M = H ₂)	230-750	1.53E + 18	-0.8	0
165	$NO_2 + H = NO + OH$		3.47E + 14	0.0	740
166	$NO_2 + H = HONO$	1500-2500	3.20E + 14	0.0	750
168	$N_2O + H = N_2 + OH$		2.20E + 14	0.0	8430
176	$NO + NH = N_2O + H$		4.33E + 14	-0.5	0
177	$NO + NH = N_2 + OH$		2.40E + 12	0.0	0
179	$NO_2 + NH = HNO + NO$		1.00E + 11	0.5	2000
180	$NO_2 + NH = N_2O + OH$		1.00E + 13	0.0	0
182	$HONO + NH = NH_2 + NO_2$		1.00E + 13	0.0	0
183	$NO + NH_2 = N_2 + H_2O$	300-1000	8.28E + 14	-0.9	-192
184	$NO + NH_2 = N_2 + H + OH$	1000-2000	3.40E + 14	-1.0	-1334
185	$NO + NH_2 = NNH + OH$	294-1200	6.31E + 19	-2.5	950
188	$NO_2 + NH_2 = N_2O + H_2O$	1000-2000	9.19E + 22	-3.0	4829
203	$NO_2 + HNO = HONO + NO$	300-1600	1.66E + 14	-0.7	0
206	$NO_2 + HNO = HONO + NO$		6.00E + 11	0.0	1007
207	$N_2H_2 + NO = N_2O + NH_2$		3.00E + 12	0.0	0
213	$NNH + NO = N_2 + HNO$		5.00E + 13	0.0	0
213	$HONO + HONO = NO + NO_2 + H_2O$		2.30E + 12	0.0	4230
H / O reaction					
223	$O_2 + H + M = HO_2 + M$ (M = N ₂)	298-2000	2.65E + 19	-1.3	0
229	$H + OH + M = H_2O + M$ (M = N ₂)	300-3000	2.21E + 22	-2.0	0
233	$H + H_2O = OH + H_2$	800-2500	4.52E + 08	1.6	9030
237	$H_2 + OH = H + H_2O$	250-2500	2.17E + 08	1.5	1740
241	$OH + H_2O_2 = HO_2 + H_2O$	300-800	1.00E + 13	0.0	910
244	$H_2O + M = H + OH + M$ (M = N ₂)	2000-6000	4.82E + 15	0.0	52920
245	$H_2O_2 + M = OH + OH + M$ (M = N ₂) (M = Ar)	700-1500 1000-1500	1.20E + 17 2.29E + 16	0.0	22900 21960

*. Rate constants are defined by $k = AT^B \exp(-E/RT)$ and in units cm, mole, s, and K.

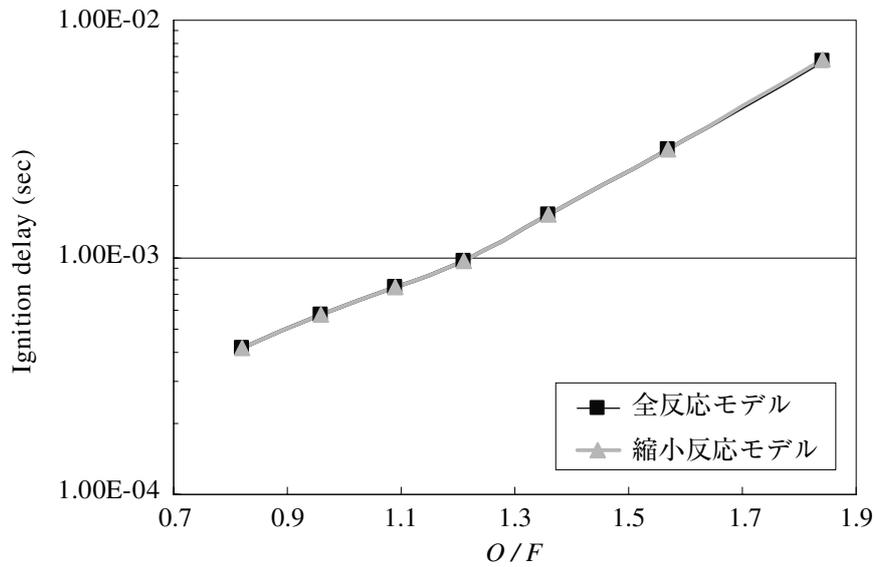


Fig. 1 Ignition delay time ($O/F = 0.82\text{--}1.84$).

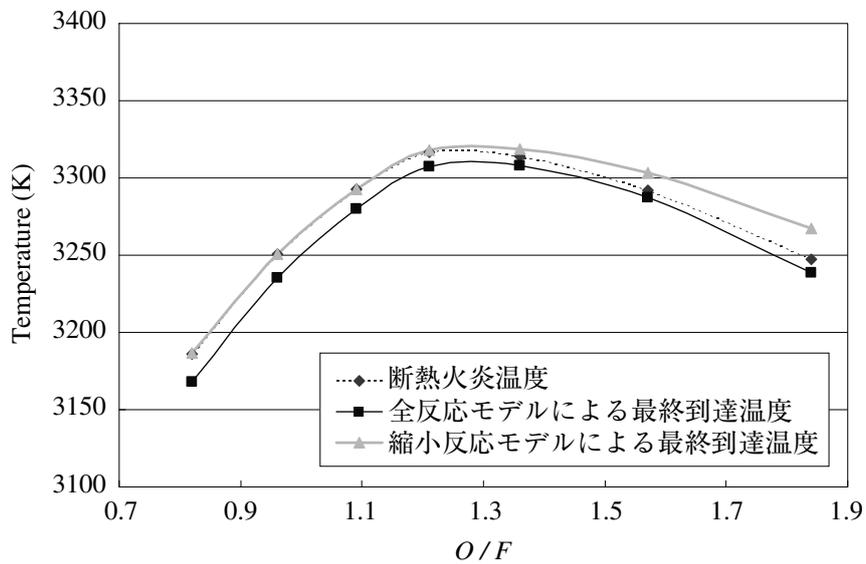


Fig. 2 Gas temperatures and adiabatic flame temperatures ($O/F = 0.82\text{--}1.84$).

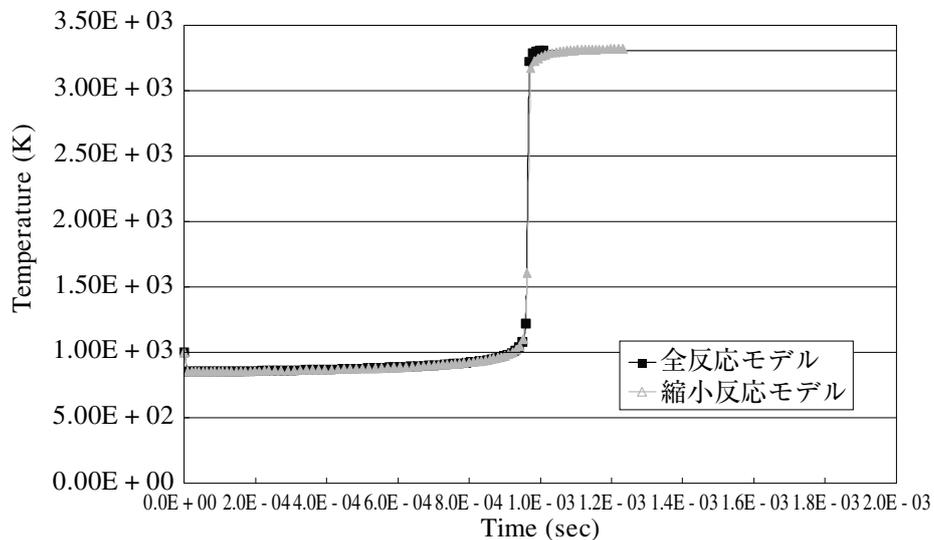


Fig. 3 Gas temperatures ($O/F = 1.21$).

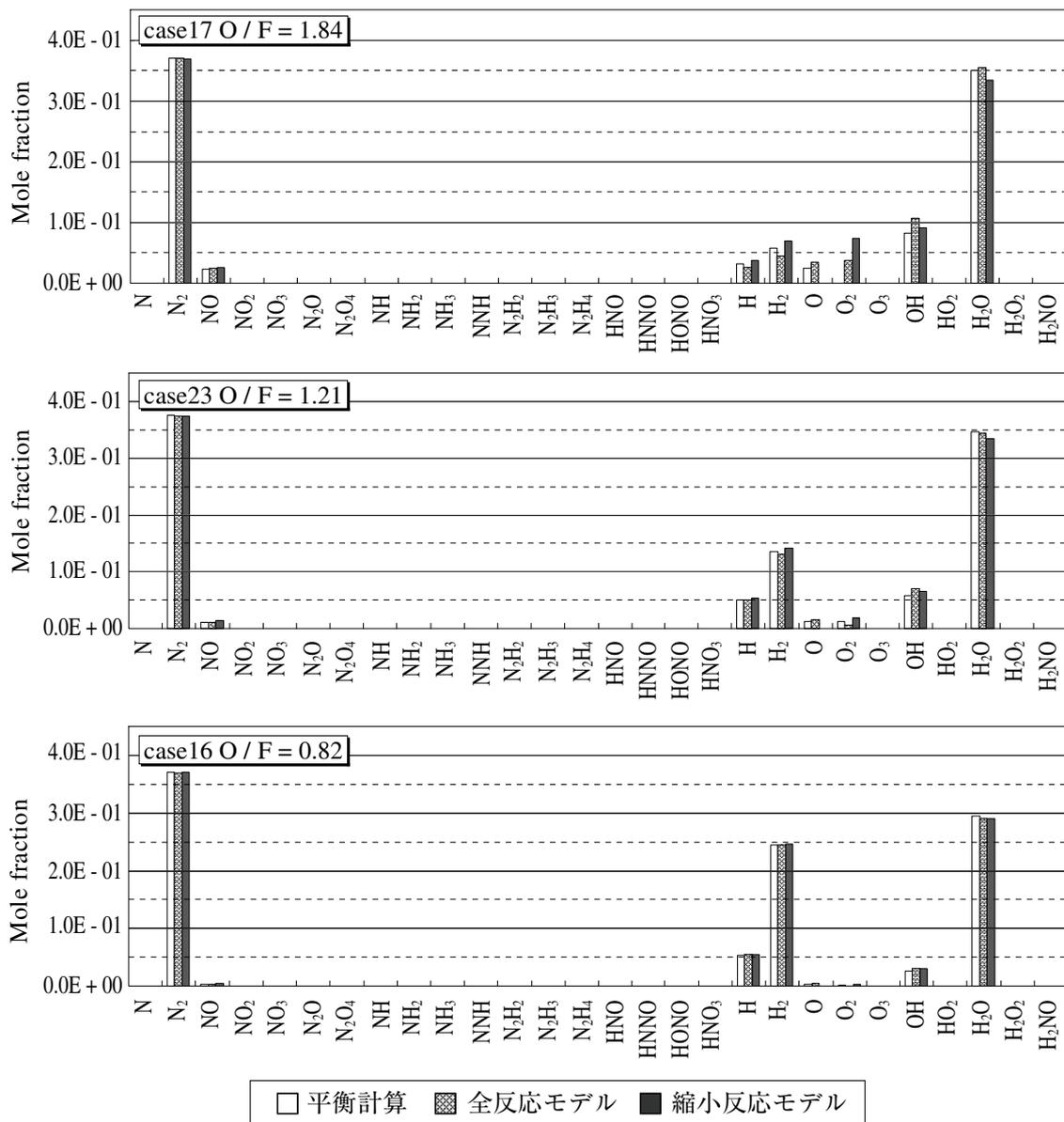


Fig. 4 Gas compositions.

酸化剤量の減少により着火おくれ時間が極端に小さくなっていることがわかる。ヒドラジン-NTOの推薬での燃焼室内の数値シミュレーションをする際、 O/F に応じた着火おくれ時間を考慮できるようなモデルが必要になるため、本縮小反応機構は O/F に応じた着火を表現できスラストのシミュレーションの燃焼モデルに有用であると考えている。WeissとJohnson¹⁸⁾は液体のヒドラジンに1%程度の添加物を混ぜて液体のN₂O₄と反応させ、それぞれの添加物による着火おくれ時間への影響を調べた。 O/F は1.22である。このとき、添加物を加えないヒドラジンとN₂O₄の着火おくれ時間は約3 msecとなっている。また、酸化剤である液体N₂O₄に気化したN₂O₄を混ぜてヒドラジンと反応させた場合の着火遅れ時間は約1 msecとしている。Fig.1より縮小反応/詳細反応機構による $O/F = 1.2$ での着火おくれ時間は0.96 msecであり、解析は気相反応で扱っていることから、実際の現象には後者が近く、同程度となる結果を得たといえる。また、本解析ではヒドラジンも気体として扱っているため液体の状態よりも着火しやすいと考えられるこ

とから、解析値が1 msecより小さいのは妥当であると考えられる。

3.3 燃焼温度の結果

詳細/縮小反応機構における系の最終到達温度の結果を、断熱火炎温度と共にFig.2に示す。

Fig.2より、縮小反応機構の結果は0.3-0.9%高くなったがほぼ一致しているといえる。また最終到達温度と O/F の関係では、両モデルとも $O/F = 1.2\sim 1.3$ の付近で最高温度となる。つまり、反応モデルの縮小を行っても系の温度計算はほぼ同じに保たれており、反応のメカニズムも保たれていると推測される。Fig.3はCase23 ($O/F = 1.2$)における、詳細/縮小反応機構における系の温度の時間変化を表したものである。

詳細/縮小反応機構とも着火は0.96 msecで生じており、系の温度は10 μsec間の非常に短い間に、2000 Kもの急激な上昇をしている。詳細反応機構と比較し、縮小反応機構での温度上昇のほうが、定常に達する燃焼温度となるあたり

でやや緩やかな変化を見せるものの、ほとんど変わらない温度カーブを示している。このことから、反応モデルの縮小を行っても、温度的な観点からは元の詳細反応機構の反応メカニズムが保たれているといえる。

またFig. 2から、縮小反応機構による最終到達温度は断熱火炎温度と非常によく一致しているといえる。特に O/F が小さい領域からから O/F の当量付近において差はなく、 O/F が大きいケースでも差は0.6%と非常に小さい。すなわち、この縮小反応機構は温度の算出においては、 $O/F = 0.82 - 1.84$ の間で理論計算と合致し、燃焼温度を解析するのに有用であるといえる。

3.4 平衡状態での燃焼ガスの化学組成の結果

十分に長い時間がたち平衡とみなせる状態での系の化学種のモル分率をCase16 ($O/F = 1.84$), 17 ($O/F = 0.82$), 23 ($O/F = 1.21$)について理論平衡計算によるモル分率とともにFig. 4に示す。

縮小反応機構による系の最終化学組成は詳細反応機構及び平衡計算とほぼ一致していることがわかる。ただ、縮小反応機構には、Table 3に示すように、反応を低減する過程で酸素原子Oに関する反応が取り除かれたことから、化学種Oの生成はない。一方平衡計算、詳細反応による計算では化学種Oが存在する。この化学種Oの差は O/F が大きいケースでは大きくなる傾向にあり、これがFig. 2における O/F が高いケースにおいて、燃焼温度の差が多少開いている要因と考えられる。しかしながら、平衡計算においても全体の組成のうち化学種Oのモル分率は最大で0.02で非常に小さいことから、 $O/F = 0.82 - 1.84$ の間ではその影響は小さいと考えられる。

4. 結果

ヒドラジン-NTOの燃焼反応について、スラスタの数値シミュレーションに取り込むために温度に関する感度解析を用いて縮小化を図った。縮小されたモデルは61反応23化学種より構成され、

- 1) 着火おくれ時間は0.96 msecで、詳細反応機構におけるものと一致し、また実験結果と比較しても妥当な範囲である、
 - 2) 系の温度上昇は詳細反応機構におけるものと一致し、系の最終到達温度は $O/F = 0.82 - 1.84$ の間で断熱火炎温度とよく一致をする、
 - 3) 系の最終化学組成は、平衡計算による組成とほぼ一致をする、
- といえた。

また、反応規模を245から61反応に縮小できたことで、スラスタのCFD解析における計算負荷を減らし有用な反応モデルを構築できたと考える。燃料が徐々に燃焼反応ガスに取り込まれるようなフィルムクーリングのシミュレーションには、この縮小反応機構を用いることで、時間的な変化、酸化剤/燃料の濃度比に応じた反応を表現することが可能となるであろう。

References

- 1) K. Ohminami, and H. Ogawa, Space Technology Japan, The Japan Society for Aeronautical and Space Science, 6, 55 (2007).
- 2) R. K. Hanson and S. Salimian, "Survey of Rate Constants in the N / H / O System, Combustion Chemistry", Chapter 6 (1984), Springer-Verlag.
- 3) F. Westley, NBS Report #NSRDS-NBS 67 (1980).
- 4) Y. H. Song, D. W. Blair, V. J. Siminski, and W. Bartok, Eighteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 53-63 (1981), The Combustion Institute.
- 5) Y. H. Song, and W. Bartok, Nineteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 1291-1299 (1982), The Combustion Institute.
- 6) J. A. Miller, M. D. Sooke, R. M. Green, and R. J. Kee, Combustion Science and Technology, 34, pp. 149-176 (1983).
- 7) J. A. Miller, M. C. Branch, W. J. Mclean, D. W. Chandler, M. D. Sooke, and R. J. Kee, Twentieth Symposium (International) on Combustion, pp. 673-684 (1984), The Combustion Institute.
- 8) A. A. Konnov, and de J. Ruyck, Combustion and Flame, 124, 106, pp. 106-126 (2001).
- 9) W. G. Mallard, J. T. Herron, R. F. Hampson, and D. H. Frizzell, NIST Standard Reference Database17 : Chemical Kinetics Database, ver. 2Q98 for WINDOWS, U. S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program (1988).
- 10) D. L. Baulch, C. T. Bowman, C. J. Cobos, R. A. Cox, Th. Just, J. A. Kerr, M. J. Pilling, D. Stocker, J. Troe, W. Tsang, R. W. Walker, and J. Warnatz, J. Phys. Chem. Ref. Data, 34, pp. 757-1397 (2005).
- 11) J. Park, and M. C. Lin, J. Phys. Chem. A, 101, pp. 5-13 (1997).
- 12) D. F. Davidson, K. Koshe-Hoinghaus, A. Y. Chang, and R. K. Hanson, Int. J. Chem. Kinet., 22, pp. 213-235 (1990).
- 13) A. Atkinson, D. L. Baulch, R. A. Cox, R. F. Hampson, J. A. Kerr, M. J. Rossi, and J. Troe, J. Phys. Chem. Ref. Data, 26, pp. 1329-1499 (1997).
- 14) P. Glarborg, K. Dam-Johansen, J. A. Miller, R. J. Kee, and M. E. Coltrin, Int. J. Chem. Kinet., 26, pp. 421-436 (1994).
- 15) N. Cohen, and K. R. Westberg, J. Phys. Chem. Ref. Data, 20, pp. 1211-1311 (1991).
- 16) J. W. Bozzelli, A. Y. Chang, and A. M. Dean, Twenty-fifth Symposium (International) on Combustion, pp. 965-974 (1994).
- 17) W. Tsang, and R. F. Hampson, J. Phys. Chem. Ref. Data, 15, pp. 1087-1279 (1986).
- 18) H. G. Weiss, B. Johnson, H. G. Fisher, and M. Gerstein, AIAA Journal, 2, 2222 (1964).

Development of a reduced chemical kinetic model of hydrazine and di-nitrogen tetroxide

Kaori Ohminami*[†], Hiroyuki Ogawa**[†], and A. Koichi Hayashi***[†]

Hydrazine (N_2H_4) and NTO (dinitrogen tetroxide: N_2O_4) mixtures are used in spacecraft bipropellant systems, having the advantage, for sampling missions, of having no carbon composition. However, no reasonable hydrazine and NTO combustion model has been developed. To construct a hydrazine and NTO combustion model that is useful for bipropellant thruster CFD simulation, we extracted efficient elementary reactions from detailed kinetic reaction model proposed by Ohminami and Ogawa in 2007. The reduced hydrazine and NTO combustion model was composed of 61 extracted reactions with 23 chemical species and was coincident with the original detailed kinetic reaction model in terms of combustion gas temperatures and ignition delay times over O / F (oxidizer and fuel mass ration) = 0.82-1.84. Also the simulated combustion gas temperatures were good agreed with the adiabatic flame temperatures, and the simulated ignition delay time at $O / F = 1.2$ was consistent with the literature value.

Keywords: Hydrazine, di-Nitrogen tetroxide, NTO, Reaction mechanism.

*Department of Space and Astronautical Science, The Graduate University for Advanced Studies, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229-8510, JAPAN

[†]Corresponding address: ohminami@isas.jaxa.jp

**Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229-8510, JAPAN

***Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Sagamihara, Kanagawa 229-8558, JAPAN