

高温衝撃風洞を用いた空力加熱に対する壁面触媒効果の研究

植田修一、佐藤和雄、小室智幸、丹野英幸、伊藤勝宏
 (航空宇宙技術研究所角田宇宙推進技術研究センター)
 黒滝卓司、白水正男 (航空宇宙技術研究所)
 辻本健士、三保和之(宇宙開発事業団)

Effect of Surface Catalysis on Aerodynamic heating in High Enthalpy Shock Tunnel

Shuichi UEDA, Kazuo SATO, Tomoyuki KOMURO, Hideyuki TANNO,
 Katsuhiko ITOH(NAL-KRC)
 Takuji KUROTAKE, Masao SHIROUZU(NAL)
 Takeshi TSUJIMOTO, Kazuyuki MIHO(NASDA)

概要

宇宙往還機の大気圏再突入時には、機体まわりの強い衝撃波により窒素、酸素分子の解離が起こる。解離原子の再結合特性は機体表面の触媒性に大きく依存し、機体への熱伝達に大きく影響する。しかしながら、表面触媒効果による流れ場や空力加熱への影響についての実験的研究は少なく、触媒効果のモデル化およびその検証も進んでいない。

本報告では、高温衝撃風洞における平板模型の空力加熱に対する触媒性の影響の研究について述べる。風洞試験には金属および SiO_2 をコーティングした平板模型を使用し、供試体表面温度の触媒効果に対する影響を調べるため、ヒーターによる予熱機構を採用した。

1. はじめに

宇宙往還機が高速で大気圏に再突入する際の高い空力加熱から機体を守るため、TPS (熱防御システム) が使用されるが、TPS は宇宙往還機の機体重量に大きく影響するため、機体の受ける空力加熱特性を高精度に予測し最適な設計を行うことが不可欠である。大気圏再突入時の高温大気では、酸素・窒素分子の解離、電離等による実在気体効果が顕著となる。特に解離原子の再結合による高熱負荷は機体表面の触媒性により大きく影響を受けるため、できるだけ触媒性の低い材料を用いることが、空力加熱設計上必要となる。宇宙往還機の TPS に広く使われている SiO_2 をベースとした表面コーティングは触媒性が低いことが知られている。しかしながら非触媒を仮定した

場合と比べればわずかな触媒性であっても高い熱負荷を生じることになるため、材料の触媒性の高精度な算出が重要である。

航空宇宙技術研究所(NAL)と宇宙開発事業団(NASDA)が共同で開発した自由ピストン型高温衝撃風洞(HIEST)¹⁾は、大気圏に再突入する宇宙往還機まわりの約1万度にも達する高温・高圧の流れを模擬可能な地上試験設備であり、触媒性研究への適用が期待されている。

本研究は、触媒性の異なる表面コーティングを施した平板を HIEST において空力加熱し、触媒性による空力加熱率の差を測定するものである。本報告では HIEST での触媒試験の概要及び、HIEST 用に設計された触媒試験装置を用いた試験結果について述べる。

2. CFD 解析

HIEST の標準的気流条件を表 2.1 に示す。ノズル出口での気流条件および化学種組成は準一次元化学非平衡コード (NENZF) ²⁾ によるものである。ノズル出口近傍の流れはほぼ凍結流であり、高エンタルピ条件 (B、C) では一様流中にも多量の解離酸素原子が含まれる。この気流中に平板を曝した場合について CFD 解析をおこなった結果を図 2.1 に示す。

表 2.1 HIEST 気流条件

Condition	A	B	C
Nozzle reservoir			
Pressure (MPa)	21.6	18.9	18.0
Enthalpy (MJ/kg)	8.3	14.1	22.0
Nozzle exit (AR:256 contour)			
Pressure (kPa)	2.769	2.789	2.825
Temperature (K)	845	1379	1925
Velocity (m/s)	3728	4621	5596
Free stream mass fraction			
N ₂	0.724	0.732	0.746
O ₂	0.187	0.119	0.022
O	0.011	0.085	0.200
NO	0.062	0.051	0.019

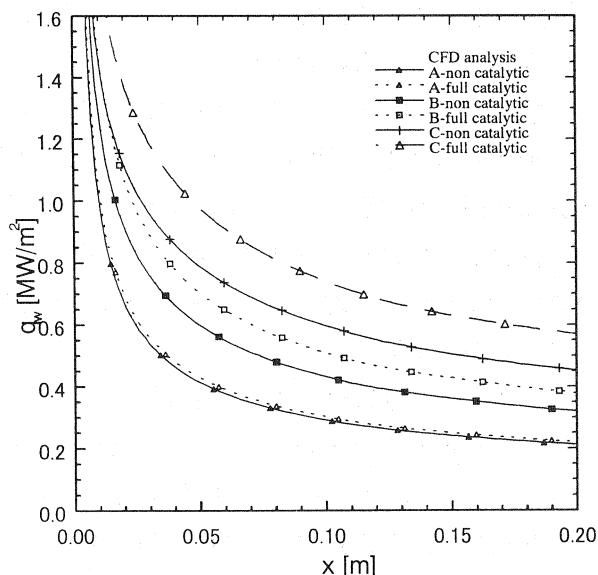


図 2.1 CFD 解析による HIEST 気流中に置かれた平板の空力加熱率分布

図は完全触媒・非触媒の場合の空力加熱率分布の比較である。図より、低エンタルピ条件 (A) では一様流中の解離酸素原子が少ないため壁面の触媒性の影響による空力加熱率の差はほとんど無い。一方、高エンタルピ条件 (B、C) では、完全触媒・非触媒で約 20% 程度の加熱率の違いが見られる。

3. 試験装置

HIEST 用触媒試験装置を図 3.1 に示す。試験装置はコーティングを施した供試体 2 枚を設置可能な鈍等平板形状であり、供試体にはそれぞれ 10 点ずつの同軸型熱電対が熱流束センサ ³⁾ として 30mm 間隔で埋め込まれている。

試験装置は架台およびスティングの交換により迎角を変更可能である。また、試験装置に埋め込まれたヒーターにより供試体表面温度を制御することが可能である。

本試験装置は鈍頭平板であるため、鈍頭部に発生する衝撃波により、低エンタルピ条件 (A) においても気流中の酸素分子のほとんどは解離するため、触媒性の違いによる空力加熱率の差は鋭角平板の場合よりも大きくなる。また、高エンタルピ条件においては窒素の解離も顕著となる。

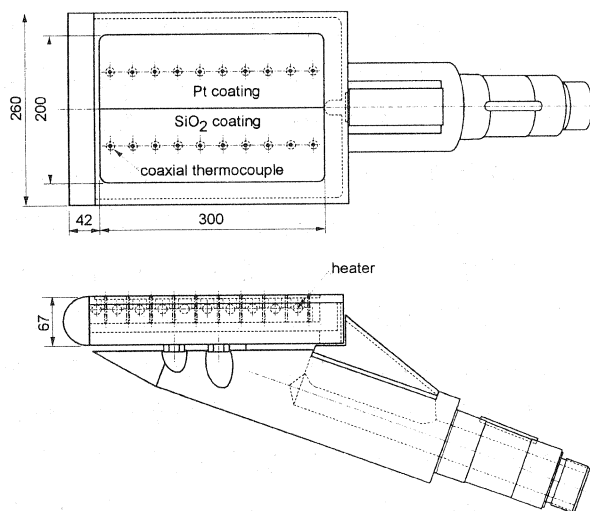


図 3.1 HIEST 用触媒試験装置

表面コーティング材としては、低触媒性材料として SiO_2 、高触媒性材料として Pt を選定した。触媒性の高い材料としては Ag や Cu があげられるが、今回の試験では、

(ア) 酸化等による表面状態の変化がない。

(イ) 母材との接着性が良い。

ことを重視して Pt を選定した。コーティングは SUS の母材の上に、中間材として Al_2O_3 を $0.5\mu\text{m}$ 施し、その上に SiO_2 または Pt を $0.5\mu\text{m}$ コーティングした。同軸型熱電対はコーティング層の下側の温度を測定することになるが、コーティング層の厚みは約 $1\mu\text{m}$ であり、熱流束計測への影響はほとんど無い。

4. 試験結果

HIRST の試験条件を表 4.1 に示す。今回の試験ではノズル開口比約 600 のコニカルノズルを使用した。

表 4.1 HIRST 試験条件

Condition	A40	B40	C40
Nozzle reservoir			
Pressure (MPa)	40	40	40
Enthalpy (MJ/kg)	8	14	22
Nozzle exit (AR:600 conical)			
Pressure (kPa)	1.631	2.085	2.156
Temperature (K)	611	1176	1606
Velocity (m/s)	3763	4779	5782
Free stream mass fraction			
N2	0.725	0.730	0.741
O2	0.196	0.149	0.052
O	0.004	0.054	0.162
NO	0.060	0.054	0.032

4. 1 試験条件 A40

試験条件 A40 での熱流束分布および、熱流束比を図 4.1、4.2 に示す。図より、

- (1) Shot 毎に熱流束比のばらつきがある。
- (2) Channel 毎に熱流束比のばらつきがある。

- (3) Pt コーティング側と比較して SiO_2 コーティング側の熱流束が低い。

ことがあきらかとなった。

今回の試験では Shot 毎のばらつきについて考察するには Shot 回数が不十分であった。また、Channel 毎のばらつきについては、同軸型熱電対の接点製作のばらつきが原因のひとつと推定される。このばらつきについては図 4.4、4.6 等にも同様な傾向で表れているため、触媒性の影響を受けない気流条件において校正試験をおこなうことにより除去可能である。

Pt コーティングと SiO_2 コーティングとの熱流束の差は 5~10% 程度であった。

4. 2 試験条件 B40

試験条件 B40 での熱流束分布および、熱流束比を図 4.3、4.4 に示す。図より、

- (1) Pt コーティング側と SiO_2 コーティング側の熱流束はほぼ同程度である。

エンタルピの上昇により、解離原子の割合は増えることから、試験条件 A40 に比べて熱流束の差は大きくなるものと予想されたが逆の傾向となった。本条件での 2 回の試験結果は良く一致している。

4. 3 試験条件 C40

試験条件 C40 での熱流束分布および、熱流束比を図 4.5、4.6 に示す。図より、

- (1) Pt コーティング側と SiO_2 コーティング側の熱流束はほぼ同程度である。

試験条件 C40 は高エンタルピ条件であることから、熱流束の差は大きくなるものと予想されたが、中エンタルピ条件 B40 とほぼ同様の結果となった。ただし、本条件では試験回数は 1 回のみであるため、再現性については未確認である。

Channel 毎のばらつきが Shot 毎に比較的安定している、Channel1~5 についての平均値を図 4.7 に示す。

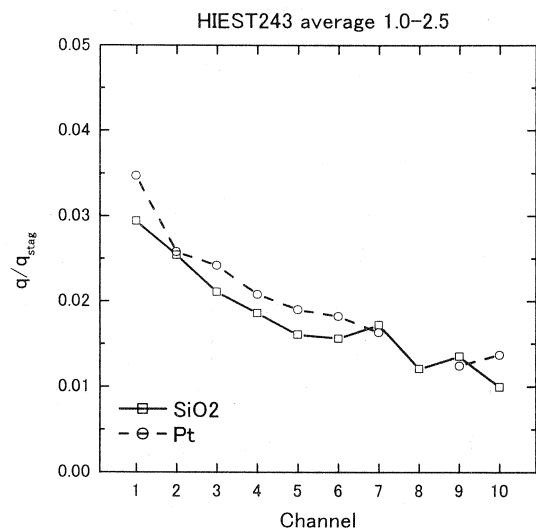


図 4.1 熱流束分布 (試験条件 A40、室温)

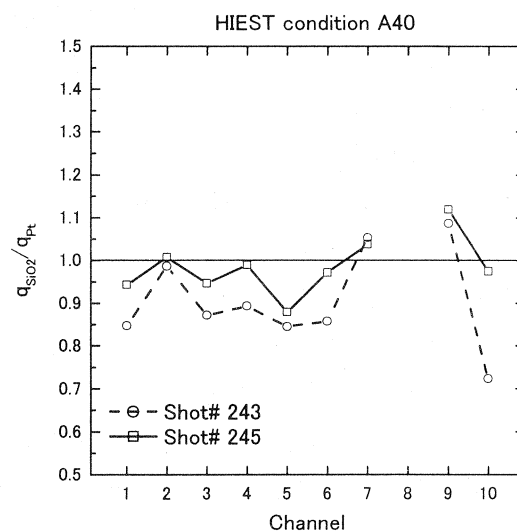
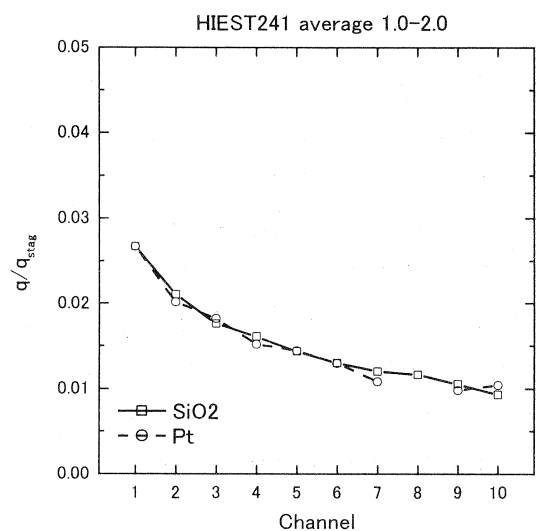
図 4.2 熱流束比 (SiO₂/Pt)

図 4.3 熱流束分布 (試験条件 B40、室温)

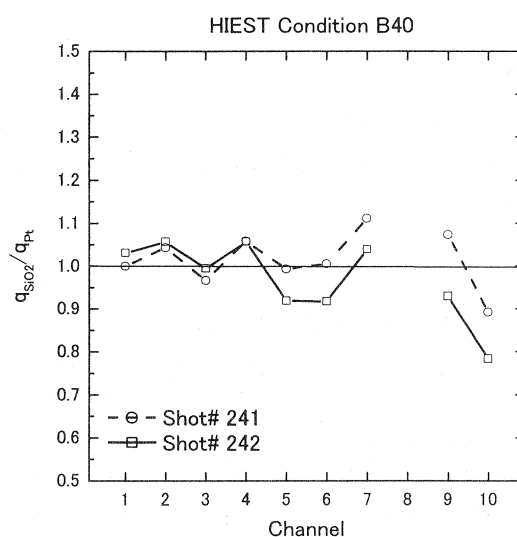
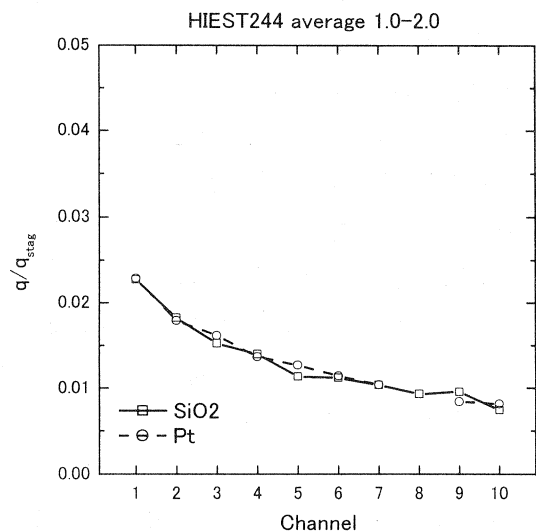
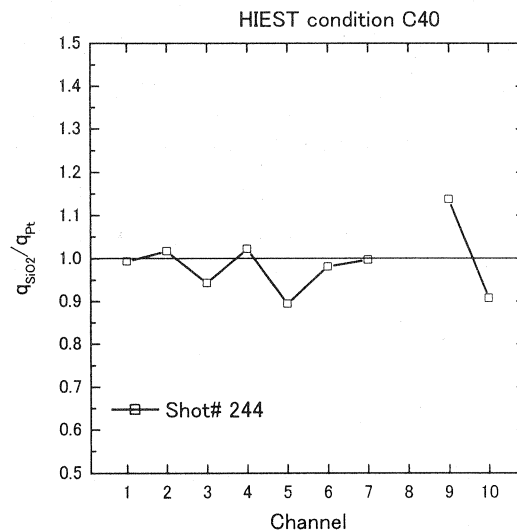
図 4.4 熱流束比 (SiO₂/Pt)

図 4.5 熱流束分布 (試験条件 C40、室温)

図 4.6 熱流束比 (SiO₂/Pt)

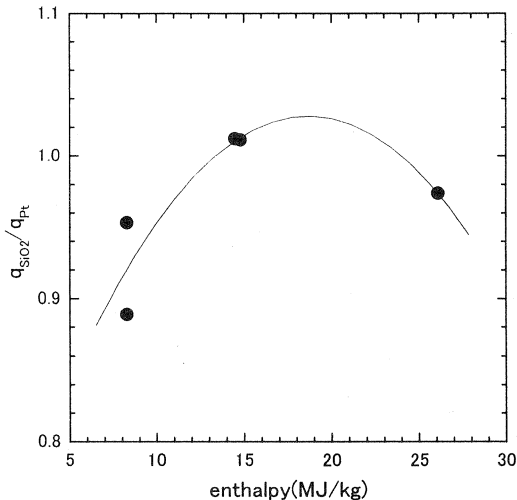


図 4.7 平均熱流束比 (Channel 1-5)

分子の解離によるエンタルピから推算すると、熱流束比は右下がりの曲線になると予測されたが、今回の試験では、データ数が少ないものの、中エンタルピ条件付近で Pt コーティング側と SiO₂ コーティング側の熱流束がほぼ同程度となっている。

この熱流束比のエンタルピ変化が触媒性以外の影響により生じたとすると、その原因として、Pt コーティングと SiO₂ コーティングの輻射率の違いが考えられる。文献値及び赤外線温度計による測定結果より、Pt の輻射率は 0.1~0.2 程度、SiO₂ の輻射率は 0.6~0.7 程度と見積もられる。輻射熱源、輻射加熱量を正確に測定することは困難であるが、手始めに APD による試験部の発光計測を試みた。(図 4.8) 試験条件は A40 であるから、もっとも発光の弱い条件である。ピトー圧力履歴と比較すると、気流到達とほぼ同時に強い発光が見られる。

4. 4 予熱試験結果

HIRST 用触媒試験装置の特徴的な機能として予熱機構がある。これは、装置に埋め込まれたヒータにより供試体を加熱し、触媒性に対する温度の影響を測定するためのものである。

試験は表面温度 300℃及び 600℃でおこなった。試験結果を図 4.9、4.10、4.11、4.12 に示す。気

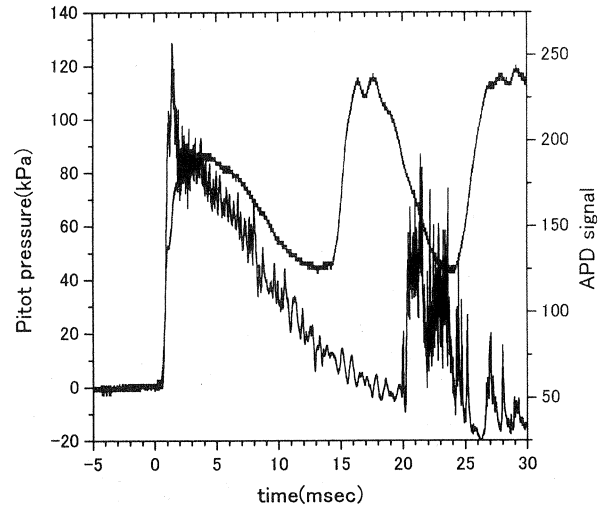


図 4.8 APD による試験部発光計測 (A40)

流到達前の表面温度分布 (図 4.12) より、600℃の場合、Pt と SiO₂ の輻射率の差により約 80℃の温度差が生じた。

表面温度 300℃の場合、Pt コーティング側の熱流束にばらつきが見られ、全体的には SiO₂ コーティング側と同程度となった。表面温度 600℃の場合には信頼できる熱流束計測は出来なかった。試験後の表面分析より、熱流束センサ部の Pt コーティングは剥がれており、変色が見られた。また、SiO₂ コーティングには亀裂が見られ、SiO₂ 層は残存しているものの、熱電対接点は破損していた。これらの損傷は高温試験後の急冷時に発生したものと推定される。

5. まとめ

HIRST を用いて空力加熱における表面触媒性効果についての実験を行った。供試体としては鈍等平板を用い、SiO₂ および Pt をコーティングした供試体を同時に加熱し、触媒性効果による加熱率の差を測定した。試験の結果、

- (1) 低エンタルピ条件 A40 において SiO₂ コーティング側の熱流束が Pt コーティング側に比べて約 10%低かった。
- (2) 高エンタルピ条件では熱流束差はほとんど観測されなかった。輻射率の差による輻射加熱の影響の可能性がある。

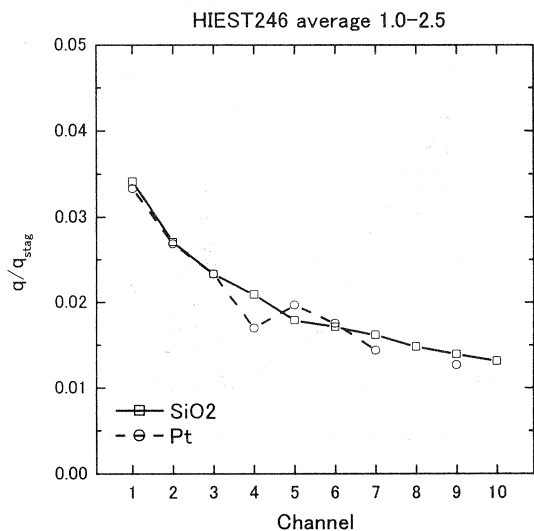


図 4.9 熱流束分布 (試験条件 A40、300℃)

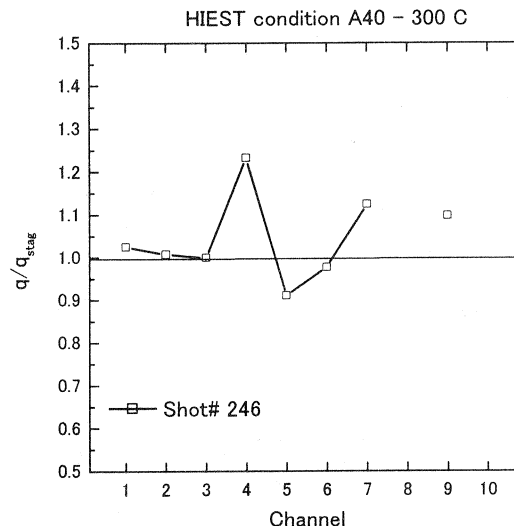
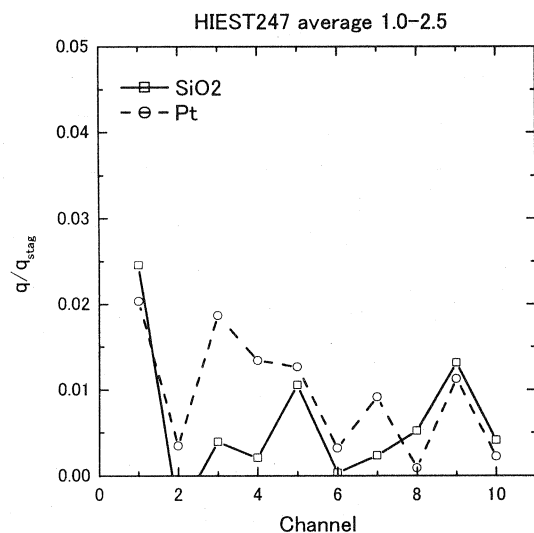
図 4.10 熱流束比 (SiO₂/Pt)

図 4.11 熱流束分布 (試験条件 A40、600℃)

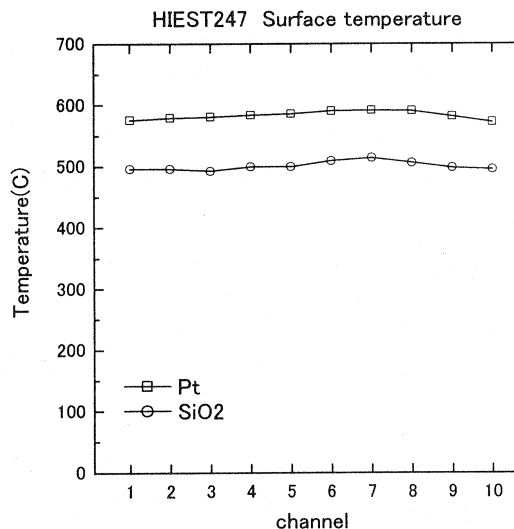


図 4.12 試験前温度分布

(3) 予熱試験ではコーティング層の亀裂、剥がれが発生したため、信頼性のあるデータは得られなかった。

今後は、

- (1) コーティング方法の改良および試験法の見直しによる予熱試験時の損傷防止。
- (2) 輻射加熱の影響低減および輻射源、輻射加熱率の解明。

等の対策を施してデータの信頼性を向上させ、触媒性の影響を明らかにする予定である。

- [1] Itoh K, Ueda S, Komuro T, Sato K, Takahashi M, Miyajima H, Koga K, Design and construction of HIEST (High Enthalpy Shock Tunnel). Proc. International Conference on Fluid Engineering, vol.I, pp353-358, 1997
- [2] Lordi J.A., Mates R.E., Mossele J.R., Computer program for numerical solution of nonequilibrium expansions of reacting gas mixtures, NASA CR-472, 1966
- [3] Schultz D.L., Jones T.V., Heat transfer measurements in short duration hypersonic facilities, AGARDograph 165, 1973