

# アーク加熱風洞によるREVアブレータの研究開発

奥山 圭一<sup>1</sup>・加藤 純郎<sup>1</sup>・山田 哲哉<sup>2</sup>

## Research and Development of REV Ablator in Arc Windtunnel

By

Keiichi OKUYAMA<sup>1</sup>, Sumio KATO<sup>1</sup>, Tetsuya YAMADA<sup>2</sup>

**Abstract :** REV was the first reentry capsule developed through pure domestic technology and successfully recovered. REV is thermally protected against the severe aerodynamic heating by carbon-phenolic ablator material. The present paper describes the feature of the heating test in the arc windtunnel and the ablator characteristics clarified during the research and development process of the REV heatshield. Because the heat flux anticipated on the stagnation surface is about 2 MW/m<sup>2</sup>, the dominant surface recession mechanism is identified to be in the reaction control region. The thermochemical reaction data have been acquired through three arc-heater facilities with different enthalpy level for calibration and tuning of the ablation analysis code. The thermomechanical behavior of the ablator under the high heat flux environment such as delamination, or spallation also has been investigated for functional safety of the heatshield.

### 1. はじめに

アブレータは、材料のアブレーション現象を利用して空力加熱の機内浸入を抑制できる代表的な熱防御材料である。炭素繊維にフェノール樹脂等を含浸させた耐熱複合材料（以下、フェノールCFRP：Carbon fiber reinforced plastic）は炭化型アブレータと呼ばれ、USERS (Unmanned Space Experiment Recovery System) 宇宙機のREV (Reentry Vehicle) カプセルの熱防御材に採用された[1]。REVの熱防御材設計の主眼は、その表面損耗と内部の温度分布を正確に予測し、適切な厚さを設定することであり、またその成型品の飛行環境における機能保証を行うことである。炭化型アブレータは、そのマトリックスが高加熱によって熱分解し表面に強固な炭化層を形成するため、比較的高加熱・高動圧環境下でも耐性がある[2]とされており、1960年代以降盛んに研究され、多くの実飛行に供されている。

一般に地球大気圏再突入環境を、エンタルピ、加熱率、衝撃圧、化学種組成、分圧等、その熱化学的な観点から完全に模擬する地上飛行環境模擬装置は存在しない[3]。したがって、地上試験で取得した計測値のみを用いて、再突入環境におけるアブレータの表面後退、ならびに材料内部の温度変化の挙動を予測することは困難である。し

<sup>1</sup>川崎重工業（株）航空宇宙カンパニー（KHI）

<sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部（ISAS/JAXA）

かしながら、炭化型アブレータのアブレーション効果、酸化・昇華を基本とする表面損耗メカニズムは、エンタルピや、酸素分圧等の関数として比較的その詳細が解明されている[4]ため、こうした理論に基づくアブレーション解析コードを作成し、飛行環境でのアブレータの熱化学的振るまいを予測する手法がとられる。ただし、熱防衛材設計に用いるための、より高精度な予測には個別の材料独特の熱化学反応データを取得し、それに基づいたアブレーション解析コードの校正、もしくはチューニングが必要である。例えば、アブレータの熱物性値は準定常昇温状態で別途取得されたものであり、再突入のような高加熱率環境下では、その値は実効的に準定常値と異なる非定常値を示し、理論とは合わなくなる現象等が挙げられる。また、後述するが、2層式のREVアブレータの第1層は短冊アブレータとよばれ、短冊状プリプレグを高圧成型したものであり、こうした成型方法に起因する熱機械学的な損耗の増大・減少があるとすれば、それらは現存の理論に基づくアブレーション解析では予測困難であり、加熱試験を行う以外に方法がない。REVカプセルのノーズ部用、コーン部用のフェノールCFRPそれぞれは、大型の成型体である。REVアブレータの開発当初、大気圏再突入のような高エンタルピ環境において、このような大きなフェノールCFRP表面が剥離することなく十分に耐荷できるか判っていないかった。

以上の課題を鑑み、REVカプセル用のフェノールCFRP開発におけるアーク加熱試験を以下のように位置付けた。

a) フェノールCFRPの温度変動挙動の取得

REVカプセルが遭遇する加熱率はアーク風洞で模擬できるものの、淀み点圧力(衝撃圧)およびエンタルピの模擬は困難である。このため、様々なエンタルピや衝撃圧を模擬したアーク気流中に、フェノールCFRPを置いて加熱することで、エンタルピや衝撃圧変化に伴う材料内部の温度変動挙動を取得する。これらの加熱試験条件下で取得した測定値からフェノールCFRPの温度変動挙動を把握すると共に、測定値をアブレーション解析コードのためのチューニングデータとして利用する。

アーク加熱された供試体は正面の他に側面からも加熱される。このため、供試体内部の温度は、正面のみの加熱と比較して大きめとなる。実際の再突入環境において、カプセルは側面からの加熱を受けない。したがって、アーク試験で取得した温度計測値が、どの程度側面加熱の影響を受けているかを把握しなければならない。このためには、側面加熱の影響をできる限り抑制できる大型供試体を用いて、温度変動挙動を取得する必要がある。

b) フェノールCFRP表面の熱化学反応の取得

上項と同様に、様々な加熱率、衝撃圧およびエンタルピを模擬したアーク気流中にフェノールCFRPをおき、炭化表面と気流中酸素との熱化学的反応による損耗量を計測する。この計測値と解析値とを比較し、解析手法の妥当性を検証する。特に、REVカプセルの場合は、材料表面が約1500K以下の反応律速領域に在る時間が長いと考えられる。REVカプセル開発にあたり、拡散律速領域はもちろん反応律速領域におけるフェノールCFRPの酸化損耗特性を把握することは重要である。

c) 高エンタルピせん断気流に対する熱機械的耐性の取得

アブレータ損耗は、b)項に示した熱化学的な損耗に加え、スポレーションなどの熱機械的な損耗がある。スポレーションは、加熱により多孔化したアブレータの中に高圧の熱分解ガスが滞留し、そのことなどが起因となってアブレータの一部が破壊する現象である。さらに、熱分解ガスがアブレータ内部の層間に滞留した場合、そのガス圧が材料の層間引張強度以上の値であれば、アブレータは剥離する。REV開発の当初、大気圏再突入環境において、短冊アブレータが層間剥離やスポレーションを起こすか否かについて十分な知見がなかった。高エンタルピのせん断気流中に、大型の短冊状フェノールCFRPをおき、表面や内部層間に剥離、またスポレーションなどの欠陥が生じないことを確認する。

## 2. REVカプセルのアブレータ

### 2.1. アブレータに対する要求

USERS宇宙機は、高温超電導材料試験とその回収、民生部品・技術の宇宙機への適用実証などを目的としたREVカプセルとSEM宇宙機などからなるシステムで、2002年9月10日にHⅡAロケット3号機で高度500kmの軌道に運ばれた[5]。その後、REVカプセルは予定通りのミッションを行ない、2003年5月30日に大気圏再突入飛行の後、小笠原沖に着水し無事回収された[5]。大気圏再突入環境下のREVカプセルの外表面は、地球周回時の7.8km/sという運動エネルギーが極短時間に熱エネルギーに変化することによる厳しい空力加熱に曝された。この空力加熱の機内浸入を防ぐため、REVカプセルの外表面は、フェノールCFRP製のアブレータ、多孔質断熱材から成る熱防御システムとアルミ合金製の金属構体で覆われた[1]。アブレータ、多孔質断熱材および金属構体は、それぞれ接着剤で装着される。REVカプセルの熱防御システムの概観を図1[1]に示す。

迎角 $0^{\circ}$ のREVカプセル淀み点の設計用再突入環境[6]を図2および図3に示す。空力加熱率は淀み点のあるノーズ部が大きく、風下側のコーン部が小さいので、REVカプセルの熱防御システムはノーズ部が厚く、コーン部が薄くなるよう最適化が図られている。

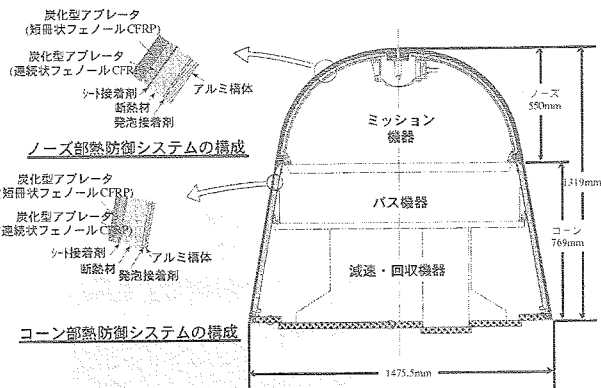


図1 REVカプセルの構造・熱防御システムの外観

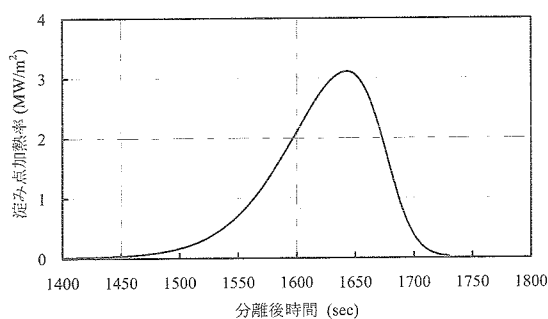


図2 REV淀み点の空力加熱率時間履歴（設計用）

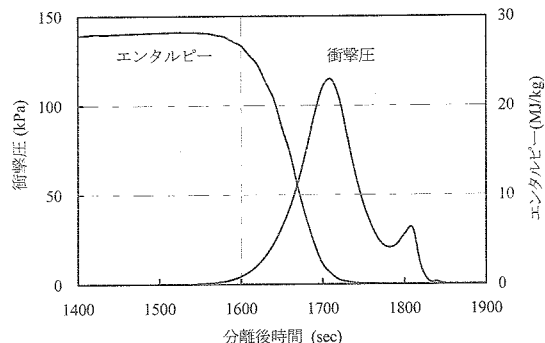


図3 REV淀み点の空力加熱率時間履歴（設計用）

### 2.2. REVのアブレータ

図2および図3からREVカプセルは、地球大気圏再突入時に淀み点最大加熱率 $3.1\text{MW/m}^2$ 、淀み点最大衝撃圧 $0.1\text{MPa}$ 、気流最大エンタルピー $28\text{MJ/kg}$ の空力加熱に遭遇するとして設計されたことが判る。これらは、後述するように設計のため余裕を含んだ値である。このREVカプセルは、非常に厳しい軽量化要求も受ける[1]。通常のアブレータは、空力加熱を受けたとしても、強度設計の信頼度確保のため、母材層を残す設計が採用される[6]。この設計手法を採用したアブレータは、高強度を維持できるものの、母材層が炭化材層と比較して高密度であるため重い[6]。REVカプセルのアブレータは、抜本的な軽量化を実現するため、CFRP全てを炭化させて熱防御できるもので[1]、この方法は全炭化法と呼ばれる。REVカプセルのアブレータは2層式のフェノールCFRP[1]で、その外観を図3に示す。

この2層式フェノールCFRPは、表層と裏層から成る。表層は、フェノール樹脂を含浸させた炭素繊維製のプリ

プレグシートを小さな短冊状に裁断し、それを混ぜ合わせ高温環境下で圧縮成形したもので、短冊状フェノールCFRPと呼ばれる[6]。裏層は、プリプレグシートの積層配向角を変えて複数プライ積み重ねて、オートクレーブ成形したもので、連続状フェノールCFRPと呼ばれる[6]。短冊状フェノールCFRPの主な機能は空力加熱の機内浸入を抑制する熱防御である[6]。また、連続状フェノールCFRPの主な機能は、仮に全炭化しても適切な強度を維持すると共に、熱防御材として短冊状フェノールCFRPを補助することである[6]。この2層式のフェノールCFRPは、材料全体が全炭化しても熱防御材として機能し、大幅な軽量化が期待できる[6]。

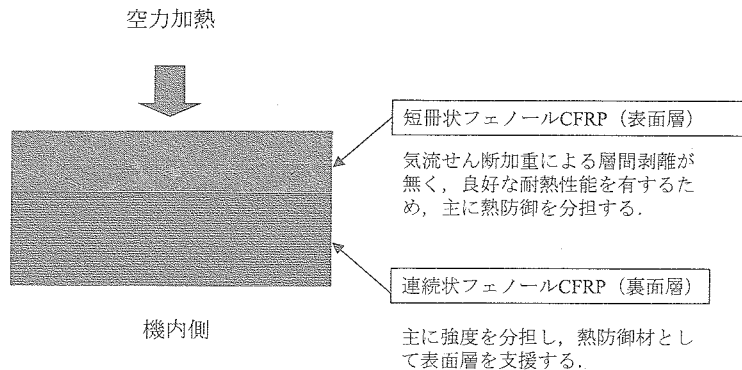


図4 全炭化型の2層式フェノールCFRPの概要

### 2.3. アーク加熱風洞とそれを用いたアブレータ開発

アブレータの熱防御効果は、気流エンタルピの違いの影響を強く受けることから、試験装置は、温度だけを模擬する電気炉のようなものでなく、同時に適切な気体の圧力(動圧)の模擬が可能な装置でなければならない[3]。アーク加熱試験装置は、地上にて再突入飛行環境を模擬し耐熱材料の評価に好適である。

アーク加熱試験装置は、空気などの作動ガスを高エンタルピ状態に加熱するアークヒータ、その高エンタルピガスを高速度に加速する加圧装置とノズル、供試体駆動装置および気流排気装置から構成される。このアーク加熱試験装置は、アーク放電により放電室内の作動ガスを加熱し、ノズルによって超音速気流として真空チャンバーに噴出するものである。供試体は高温気体中に射出されることにより種々の耐熱試験が行われる。

2層式フェノールCFRPと繊維系多孔質断熱材などから成る熱防御システムの基本特性は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の宇宙科学研究本部(ISAS)、ドイツ国立航空宇宙研究所(DLR)および超高温材料研究センター(JUTEM)のアーク加熱試験装置[7-9]で取得された。アーク加熱試験装置の最大放電電力は、DLR装置が約6MW[8]、ISAS装置が約1MW[7]、JUTEM装置が約20kW[9]であり、特にISASとDLRの装置は作動ガスを20MJ/kg程度まで加熱できる。アーク風洞における加熱試験状況の概要を図5に示す。また、REVカプセル用フェノールCFRP開発にあたり、ISAS、DLRおよびJUTEMの各試験装置が模擬した試験条件の最大値を表1に示す。

REVカプセルのように地球周回軌道から再突入する鈍頭型カプセルの気流エンタルピは30MJ/kg程度となる[3]。この気流エンタルピは、ISASやDLRなどいかなる地上設備でも模擬できない。地球周回軌道からの再突入飛行エンタルピを地上にて実現するためには数10MWにもおよぶ巨大な電力設備を有するシステム規模が必要となり現実的ではない[3]。そこ

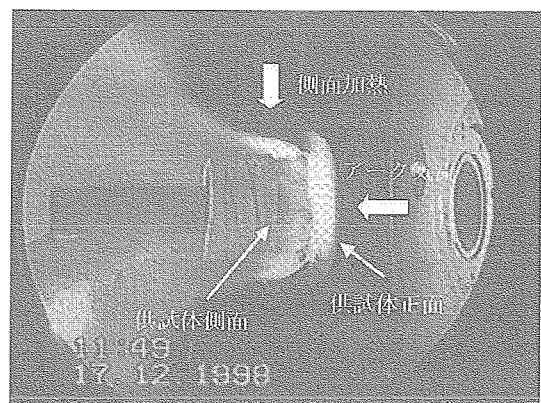


図5 DLRのアーク加熱試験装置で加熱される供試体

表1 REV用アブレータ開発のためのアーク加熱試験条件と主たる試験目的

アーク加熱試験装置	最大加熱試験条件 <sup>1), 2)</sup>				主たる試験目的					
	空力加熱率	衝撃圧	エンタルピ	供試体径 <sup>3)</sup>	温度変動挙動取得			熱化学反応特性取得		熱機械的耐性データ取得
					低加熱率条件	高加熱率条件	側面加熱効果	反応律速領域	拡散律速領域	
MW/m <sup>2</sup>	kPa	MJ/kg	mm							
ISAS	3.7	25	15	60		○			○	
DLR	3.8	32	15	100			○			○
JUTEM	1.6	1.2	-	40	○			○		

1) REVカプセル開発のためのアーク加熱試験条件(最大値)

2) REVカプセル設計のための空力加熱条件(最大値)は、加熱率3.1MW/m<sup>2</sup>、流み点圧力0.1MPa、気流エンタルピ28MJ/kg

3) 供試体の最大径

で飛行試験を行う以外の方法で、アブレータ材料の熱空力的振る舞いを定量的に議論するためには、熱伝導率などの熱物性値取得に加え、地上試験装置による加熱試験データを取得した上で、数値的な熱解析に頼ることになる[3]。このため、加藤らはアブレーション現象を1次元非定常的に解析できるアブレーション解析コードを作成した[10]。このアブレーション解析コードの妥当性は、フェノールCFRPを様々な条件下で加熱し、取得した各種データ(表面温度上昇、内部温度上昇、表面損耗速度など)と比較し検証された[10]。

アーク加熱試験装置で模擬した加熱率は、主にガードンゲージで計測されたコールドウォール加熱率である。ガードンゲージの加熱率計測部は、完全触媒性の銅薄板製で、その銅薄板の端部は循環冷却水でほぼ一定温度に維持されている。銅薄板の中心部は、加熱により温度上昇する。このガードンゲージは、加熱された銅薄板の中心部と端部との間の温度差を熱電対で測定し、予め測定した温度差(熱電対の熱起電力差)と加熱率との関係からコールドウォール加熱率を計測するセンサである。

アーク風洞が作り出した高エンタルピ気流の圧力は、ピトー管で測定した。ピトー管は、気流をせき止めた流み点圧力(全圧)を計測できる。

表面温度は、放射温度計を用いて測定した。放射温度計は、材料表面から放射される1つもしくは2つの波長の赤外線エネルギーから表面温度を計測するセンサである。

また、ISAS装置の気流エンタルピは、投入電力から装置冷却水の温度上昇測定値を差し引いたエネルギーが作動ガスのエンタルピとして計算されたものであり、バルクエンタルピと呼ばれる。また、DLR装置の気流エンタルピは、気流の質量流率、全温度、速度、密度および圧力の計測値に基づいて解析で求められた値である。

#### 2.4. アーク加熱試験用供試体と試験条件

供試体は、A型、B型およびC型の3種類があり、その概要を表2および、図6から図8に示す。

A型供試体は、外径が100mmφから40mmφの円筒形状で、評価部と支持構造部から構成され、表面加熱を直接受ける評価部の表面は、フェノールCFRPである[11]。A型供試体の評価部は、REVカプセルの熱防御システムを模擬したもので、2層式のフェノールCFRP、繊維質系多孔質断熱材およびアルミ合金構体から構成され、それぞれは接着剤で装着されている[11]。A型供試体の支持構造部は、側面からの加熱の内部浸入を抑制し、評価部熱流の1次元化をできる限り実現できるものである[11]。DLRで用いた供試体は100mmφであり、ISASやJUTEMで使用した供試体より大きい。このDLR用の供試体は、側面加熱の評価部への浸入が抑制されており、評価部熱流の1次元化がさらに強化されている。支持構造部は、外側チューブと内側チューブから構成され、その間には熱拡散率が小さい多孔質断熱材を挿入した[11]。外側チューブと内側チューブの材質は、CFRPとガラス繊維強化プラスチックである[11]。評価部は、この内側チューブの内部に隠装される。支持構造部および評価部には、R

型、およびK型熱電対を挿入した[11]。これら熱電対は、内部の温度勾配の時間履歴を取得するため、供試体の中心軸上の、加熱表面からの距離が異なる複数の位置に装着された[11]。

また、B型供試体も評価部と支持構造部から構成される。評価部は直径10mm  $\phi$  のフェノールCFRP円筒で、支持構造部は、直径10  $\mu$ mのアルミナ・シリカ繊維で約400本のストランドを用いたクロスを2巻きしたもので厚さは1mmである[11]。

C型供試体は、再突入時における超高温・高速気流によるせん断荷重に対し、短冊状フェノールCFRPが表面剥離しないことを確認できる100mm幅のモデルで、楔型供試体と呼ばれる[12]。

これらA型、B型およびC型供試体は、以下のように使い分けられた。また、これら供試体を用いたISAS、DLRおよびJUTEMにおけるアーク加熱試験の主たる目的を表1に示した。

- (1) JUTEM装置： 40mm  $\phi$  のA型とB型供試体を用いて、主に反応律速領域におけるフェノールCFRPの熱防御基本特性（表面・内部温度上昇、表面・質量損耗速度など）を取得した。
- (2) ISAS装置： 60mm  $\phi$  のA型供試体を用いて、主に拡散律速領域におけるフェノールCFRPの熱防御特性を取得し、それらを用いてアブレーション解析コード[10]をチューニングすると共に、フェノールCFRPの健全性（表面・内部層間剥離発生のないこと）を確認した。ISAS装置を用いた試験で評価されたアブレーション解析コードは、REVカプセルの熱防御システム設計に適用された。
- (3) DLR-L3K装置： 短冊状アブレタを形成する一つの短冊クロスサイズより大きな寸法を持つ100mm  $\phi$  のA型供試体を用いて、REVカプセル再突入環境におけるフェノールCFRPの熱防御特性とアブレタ健全性を最終確認すると共に、100mm<sup>2</sup>のC型供試体を用いて超高温・高速気流下のせん断荷重に対する耐性（耐表面せん断剥離特性）などを確認した。

表2 A型およびB型供試体の概要

		A型			B型	
支持構造部	直径 $\times 10^{-3}$ (m)	100	60	40	12	
	外側チューブ材質	CFRP			—	
	多孔質断熱材種類	アルミナ・シリカ繊維			—	
	内側チューブ材質	GFRP			—	
	その他	—			アルミナ・シリカ繊維製クロス	
評価部	直径 $\times 10^{-3}$ (m)	78	38	25	10	
	フェノールCFRP	母材密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1470			1470
		炭化材密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1180			1180
		母材熱伝導率 (W/(m·K))	0.67			0.67
		母材定圧比熱 (J/(kg·K))	950			950
	多孔質断熱材種類	アルミナ・シリカ繊維			—	
	構体材質	アルミ合金			—	

炭化したフェノールCFRP表面の損耗特性は、反応律速酸化領域において主に表面温度と圧力に依存し、拡散律速酸化領域においては主に圧力に依存して変化すると考えられる。

アーク加熱試験では、反応律速から拡散律速の酸化領域までの様々な表面温度、圧力条件で供試体を加熱し、その表面損耗速度を取得した。加熱条件を表3[11]に示す。

また、加熱パターンは、アーク風洞で供試体を瞬時に加熱し、その後一定の加熱率で加熱を続けた後、瞬時に加熱を終了するものとした。加熱時間は、表面温度がほぼ平衡温度に達する時間、および大気圏再突入時の総加熱量J/m<sup>2</sup>を最大加熱率W/m<sup>2</sup>で除した値を目安に設定した。すなわち、加藤らの試験結果によれば、表面温度は加熱開始後、約30sで急激な温度上昇が無くなり[10]、熱的平衡に近づくとしており、試験時間は30s以上とした。

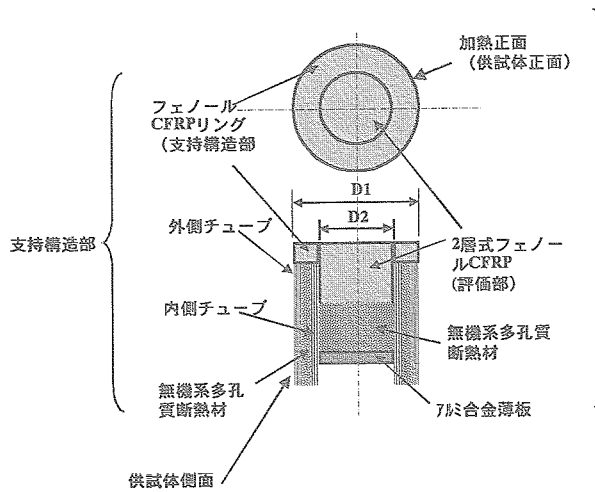


図6 A型供試体の概要<sup>[13]</sup>

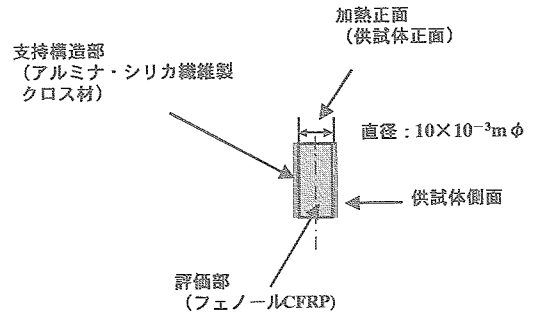


図7 B型供試体の概要<sup>[13]</sup>

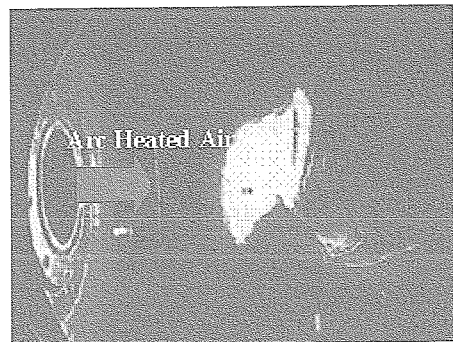
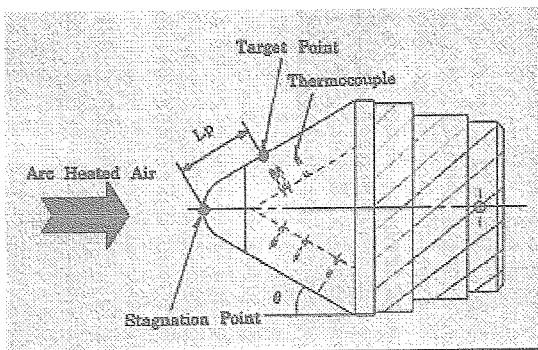


図8 C型供試体の概要<sup>[14]</sup>

表3 アーク風洞を用いた加熱試験条件

試験条件	供試体				加熱時間 sec	加熱率 MW/m <sup>2</sup>	淀み点圧力 kPa	酸素質量 分率
	種類	支持構造 部直径	評価部直 径 (CFRP 直径)	CFRP厚さ				
		×10 <sup>-3</sup> m φ	×10 <sup>-3</sup> m φ	×10 <sup>-3</sup> m				
1 <sup>1)</sup>	A	100	78	19	100~110	3.6~3.7	29.4	0.21
2 <sup>1)</sup>	A	100	78	9	80~110	1.9~2.1	9.0~9.3	0.21
3 <sup>1)</sup>	A	60	38	19	60~110	1.9~3.7	9.3~25.0	0.21
4 <sup>2)</sup>	A	60	38	19	30~110	3.0~3.8	6.8~14.7	0.21
5 <sup>2)</sup>	A	60	38	9	110	1.4	2.8	0.21
6 <sup>3)</sup>	A	40	25	20	180~240	0.8~1.6	0.2~1.2	0.25
7 <sup>3)</sup>	B	12	10	20	60~300	0.4~0.7	0.02~0.04	0.25
8 <sup>3)</sup>	B	12	10	20	60~180	0.8~1.4	0.01~0.11	0.25

- 1) ドイツ国立航空宇宙研究所 (DLR) のアーク加熱試験装置L3Kを使用
- 2) 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 (ISAS) のアーク加熱試験装置を使用
- 3) 超高温材料研究センター (JUTEM) のアーク加熱試験装置を使用

本試験は、REVカプセルの運用条件<sup>[6]</sup>、<sup>[12]</sup>に基づいて、淀み点最大加熱量320MJ/m<sup>2</sup>を淀み点最大加熱率3.1MW/m<sup>2</sup>で除した値103sに余裕7sを加えた110s<sup>[10]</sup>を加熱時間の目安とした。以上より、本試験の加熱時間の基本値は110s、下限値を30sとした<sup>[11]</sup>。また、供試体支持構造や設備が能力限界を越え、破壊する可能性があるため、加熱時間の上限値を300sとした<sup>[11]</sup>。コールドウォール加熱率は、REVが再突入時に曝される空力加熱環境における最大値をベースに設定した。また、淀み点圧力及び気流エンタルピは、設備が達成できる最大値とした<sup>[11]</sup>。

### 3. アーク加熱試験結果

#### 3.1. フェノールCFRPの温度変動挙動

##### 3.1.1 表面温度および内部温度

アブレータ開発にあたり、高い精度で温度予測が可能なアブレーション解析コードを整備することは重要である。アーク風洞を用いた加熱試験の目的の一つは、このチューニング用の各種データを取得することである。チューニングは、アブレーション解析コードで予測した温度などがアーク試験による測定値に対して、あらかじめ設定した範囲から外れた場合に実施される。チューニングは、適切な一つまたは複数個の調整パラメータについて、温度計算値が所定の範囲に入るようその入力データ値を修正・調整するかたちで実施される。フェノールCFRP温度のチューニングに効果的な調整パラメータは、炭化材の熱伝導率や吸熱に関するエンタルピである。

多孔質物の熱伝導率は、雰囲気温度や圧力に依存して変化する。この熱伝導率の温度や圧力依存特性は、ガス分子の熱力学的な挙動、構成物の材質や大きさ、また材料の成形法や厚さなどの違いによって異なるため複雑である。低温から超高温、極低圧から大気圧まで急激に変化する再突入環境における多孔物の熱伝導率を高い精度で測定できる技術は未だ確立できていない。再突入環境において、多孔化した炭化材の正確な熱伝導率予測は困難である。そこで、調整パラメータの一つを多孔化した炭化材の熱伝導率とした。チューニング解析の結果の一例を図9に示す。

一方、フェノールCFRPの熱分解反応は、含浸樹脂の成分や比率、加熱の仕方(加熱温度や時間)などに依存して変化する。実際の再突入環境におけるフェノールCFRPの熱分解吸熱量を測定することは、やはり困難である。そこで、このフェノールCFRPの吸熱に関わるエンタルピも重要な調整パラメータとした。チューニング解析の結果の一例を図10に示す。

図9および図10から、アーク試験で取得した温度計測値と、解析値とをチューニングにより精度良く一致させることが可能と判る。チューニングによって熱伝導率、吸熱エンタルピなどが定められ、それらはREVアブレータ設計に使用された(詳細は文献13参照)。

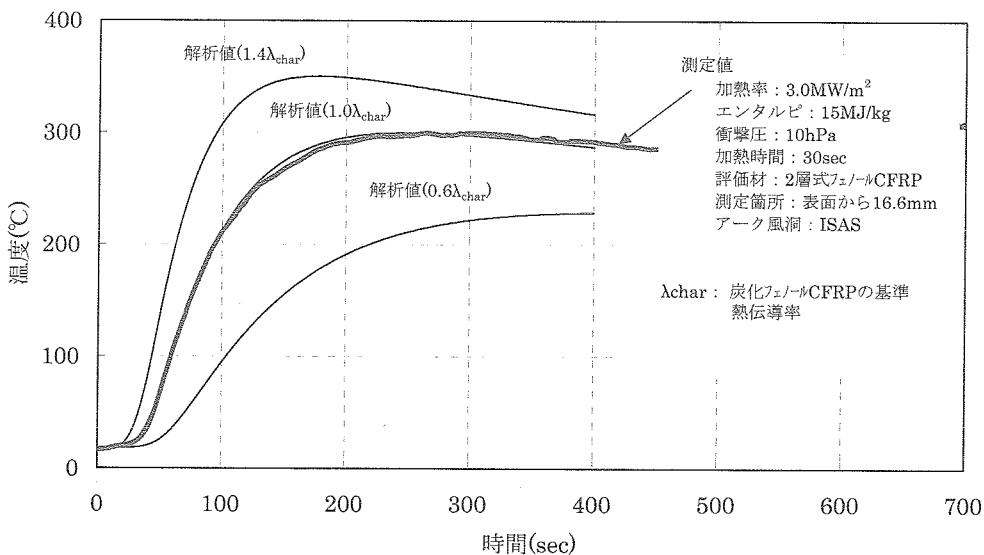


図9 炭化フェノールCFRPの熱伝導率を調整パラメータとしたチューニング解析結果の例



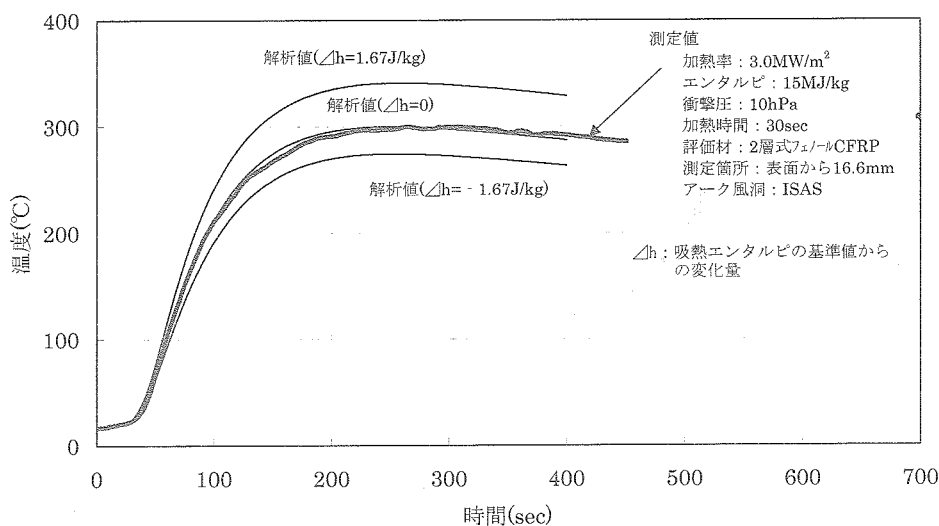


図10 フェノールCFRPの吸熱エンタルピを調整パラメータとしたチューニング解析結果の例

放射温度計で取得したフェノールCFRP表面温度の代表的な計測結果を図11に示す。図11には、チューニングが完了したアブレーション解析コード[11]で予測した表面温度も示す。図11より、解析値は計測値を精度良く模擬できていることが判る。内部温度は、供試体内部に隠装した熱電対(K型及びR型)をアーク加熱試験装置既設の計測装置で取得した。供試体内部における温度履歴の測定結果の一例をアブレーション解析結果とともに図12[10]に示す。内部温度に関しても、解析結果と測定結果とが良く一致しており、これらから、チューニングされたアブレーション解析コードは、非定常加熱されたフェノールCFRP表面や内部温度の正確な表現に成功していることが判る。このチューニングされたアブレーション解析コードは、REVカプセル用のフェノールCFRP設計に提供された。

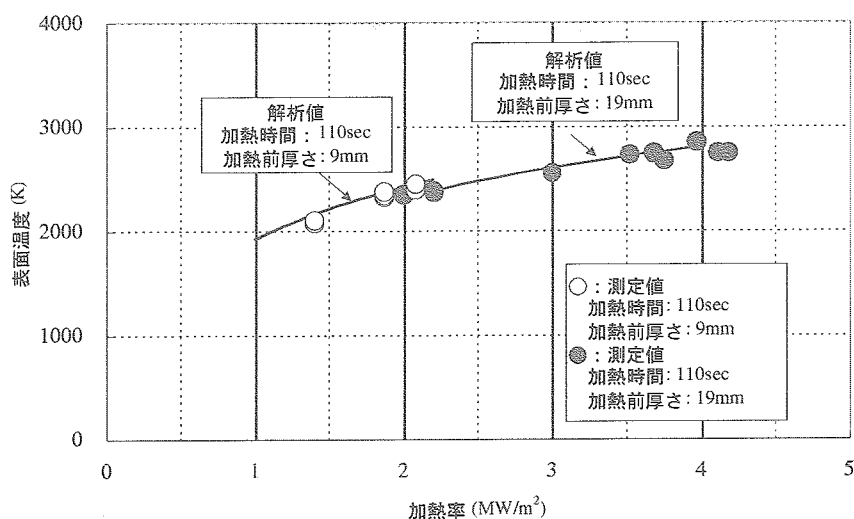


図11 フェノールCFRP表面温度と加熱率との関係

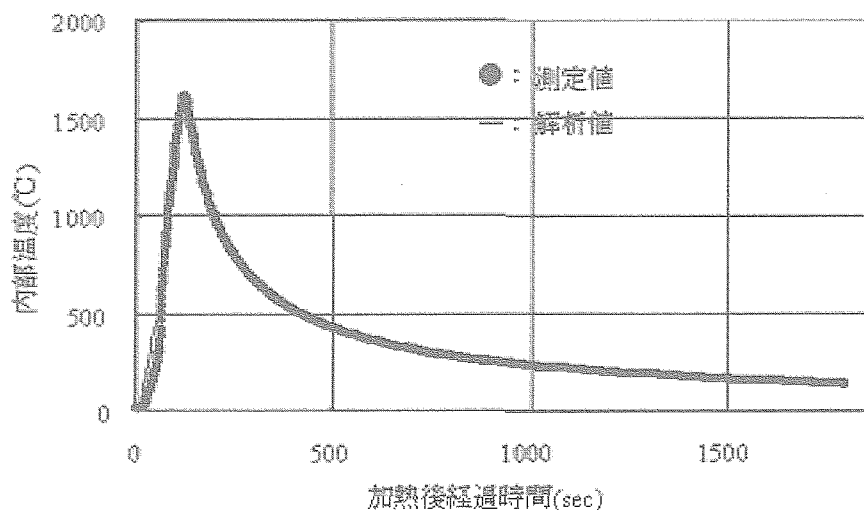


図12 フェノールCFRP内部温度履歴の測定値と解析値比較  
(加熱率3.8MW/m<sup>2</sup>, 加熱時間110s, CFRP厚さ9mm, 評価点は表面から8.2mm)

### 3.1.2 側面加熱が内部温度上昇に与える影響

供試体径が大きいほど、側面から評価部への熱流が抑制される。このため、大型供試体の内部温度は、小さな供試体径の値と比較して小さくなるはずである。供試体大きさの違いによる内部温度の変化を図13に示す。図13は、約3.6MW/m<sup>2</sup>で加熱した100mmφと60mmφのA型供試体の表面中心から深さ約15mmにおける温度履歴である。図13から、100mmφの大型供試体の内部温度は、60mmφの小型供試体より低めとなることが判る。このことから、大型供試体は、小型供試体と比較して側面加熱の内部浸没が抑制できていると判断できる。

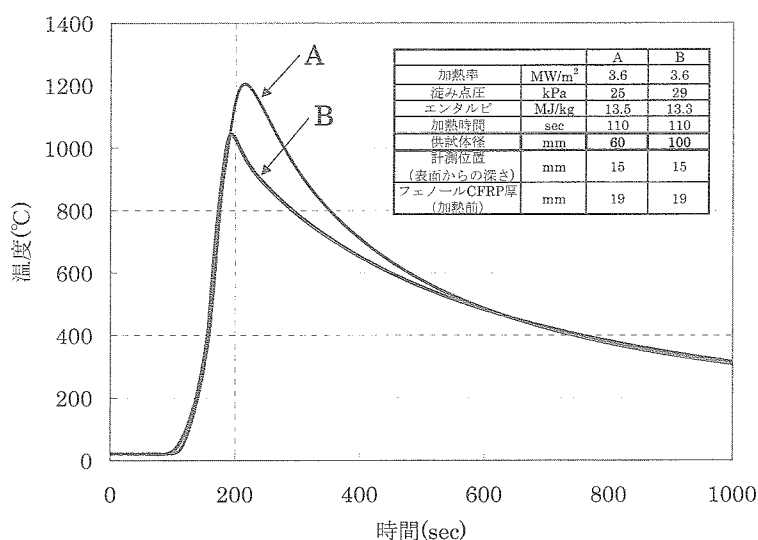


図13 大型および小型供試体を用いて取得したフェノールCFRP内部温度履歴  
(加熱率3.6MW/m<sup>2</sup>, 加熱時間110s, CFRP厚さ19mm, 評価点は表面から15mm)

## 3.2. フェノールCFRP表面の熱化学反応

### 3.2.1 反応律速酸化領域に表面損耗特性<sup>[11]</sup>

反応律速酸化領域における表面損耗速度(m/s)と表面温度 $T_w$ (K)との関係を図14に示す。表面損耗速度は、加

熱前後の供試体厚さ $m$ を加熱時間 $s$ で除した値である。また、表面損耗速度と淀み点圧力 $Pe$ (Pa)との関係を図15に示す。

図14および図15より、炭化フェノールCFRPの表面損耗速度は、表面温度 $T_w$ や表面圧力 $Pe$ の上昇に伴って増加することが判る。

反応律速酸化領域におけるグラファイトの表面質量損耗速度 $m_R$ ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )は、式1で求めることができる。

$$\dot{m}_R = k_0 \sqrt{X_o P_e} e^{-E/RT_w} \quad (1)$$

ここで、 $Pe$ ：試験体の淀み点における圧力(Pa)， $k_0$ ：頻度因子( $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}^{1/2})$ )， $X_o$ ：酸素mol分率， $E$ ：活性化エネルギー(J/mol)， $R$ ：普遍気体定数8.3(J/(mol·K))， $T_w$ ：試験体の表面温度(K)である。

表面質量損耗速度 $m_R$ は、表面損耗速度を用いて式2で表現できる。

$$\dot{m}_R = L \rho_w \quad (2)$$

ここで、 $\rho_w$ は加熱を受けた炭化表面の密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )である。本研究では、フェノールCFRPの炭化材密度を $1180(\text{kg}/\text{m}^3)$ とした。

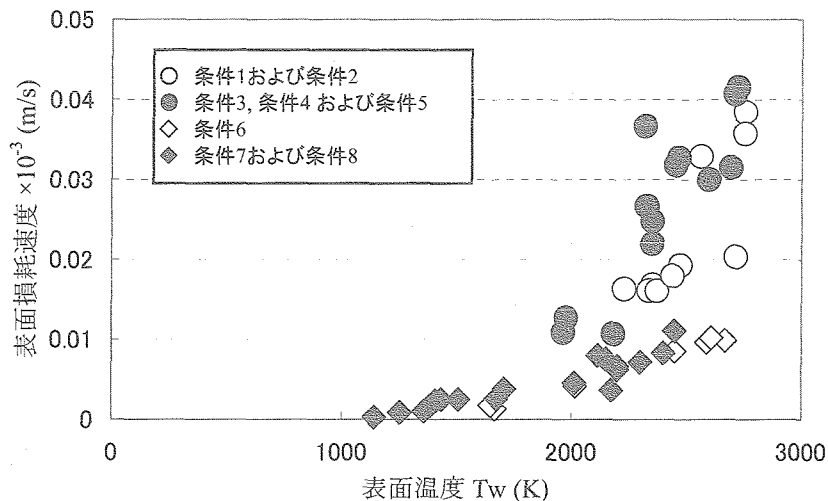


図14 フェノールCFRPの表面温度と表面損耗速度との関係

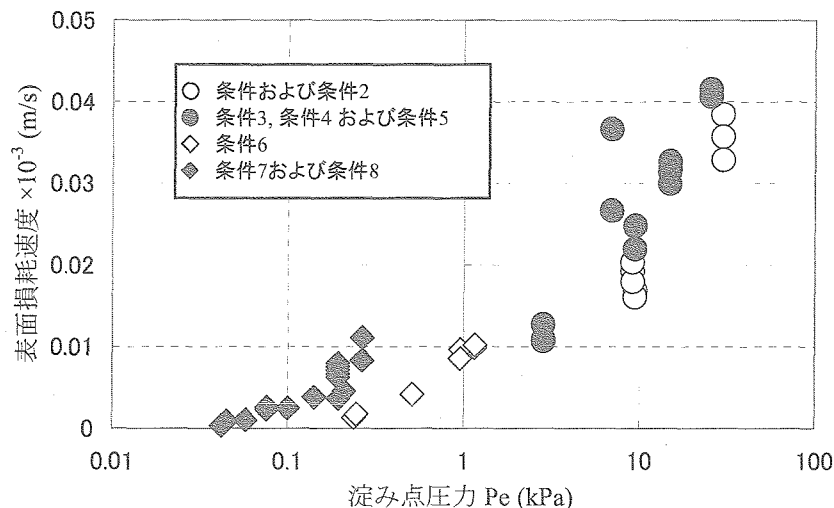


図15 供試体淀み点圧力とフェノールCFRP表面損耗との関係

式2を式1に代入し、両辺の対数をとって式3を得る。

$$\ln(\dot{L}\rho_w) = -\frac{E}{RT_w} + \ln(k_0\sqrt{X_o P_e}) \quad (3)$$

表3の条件7および条件8で取得したフェノールCFRPの表面温度は1143Kから2448Kで、これはフェノールCFRPの反応律速と拡散律速の両酸化領域を評価できる条件である。条件7および条件8の対数表面質量損耗速度 $= \ln(mR) (= \ln(\dot{L}\rho_w))$ と表面温度の逆数との関係を図16に示す。

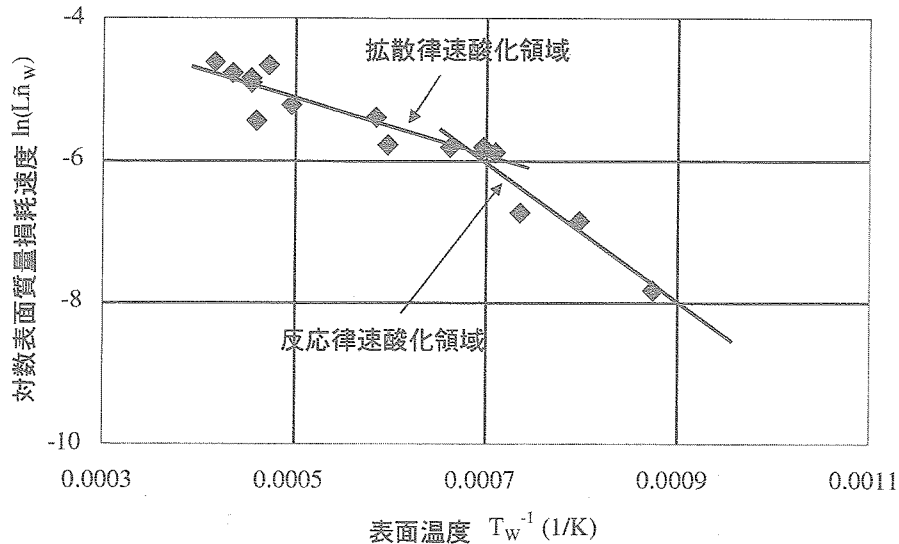


図16 対数処理したフェノールCFRPの表面質量損耗速度と表面温度の逆数との関係

図16より、0.0007 (1/K) を境界に、表面質量損耗速度が2つの領域に分類できることが判る。0.0007 (1/K) 以上の領域は、損耗速度が表面温度の上昇に伴って大きく増加する反応律速酸化領域である。また、0.0007 (1/K) 以下の領域は、損耗速度が表面温度に強く依存しない拡散律速酸化領域である。加熱空気中におけるフェノールCFRPの反応律速と拡散律速の境界温度は、従来グラファイトと同様に約0.0007 (1/K)、即ち約1500Kと考えられてきた。今回の試験により、その仮定が妥当であると判った。また、図16から、反応律速酸化領域における損耗速度の傾き $E/R$ は10013Kであり、活性化エネルギー $E$ が83.3kJ/molであることが判る。この値は、従来炭化フェノールCFRPの質量損耗速度の予測に用いられたグラファイトの184.2kJ/molと比較して約45%である。次に、表3の条件7および条件8における炭化フェノールの表面質量損耗速度、材料表面温度 $T_w$ 、淀み点圧力 $P_e$ の測定値、上記の炭化フェノールCFRPの活性化エネルギー $E$ を式1に代入し、頻度因子 $k_0$ を得た。試験値に基づいて整理した頻度因子 $k_0$ は、平均 $0.721\text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}^{1/2}$ であった。

### 3.2.2 拡散律速領域における表面損耗特性<sup>[13]</sup>

拡散律速酸化領域(約1500Kから約3000K)の表面質量損耗速度 $\dot{m}_D(\text{kg/m}^2 \cdot \text{s})$ は式4で表すことができる。

$$\dot{m}_D = C_0 \sqrt{P_e / R_B} \quad (4)$$

ここで、 $C_0$ : 拡散依存酸化定数( $\text{kg} / \text{m}^{3/2} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}^{1/2}$ )、 $R_B$ : 供試体先端の鈍頭半径(m)である。供試体の先端が半円球形状で無く平板状である場合、 $R_B$ は供試体円筒径を2.463 ( $= 1 / 0.637^2$ )倍した値[4]が用いられる。本研究の供試体先端は半円球形状ではなく平板形状であるため、半径 $R_B$ としてこの値を使用した。

ここで、表面質量損耗速度と $(Pe/R_B)^{0.5}$ との関係を図17に示す。

図17は、条件1から条件8で計測された1500(K)以上のデータ全てを用いて作成した。

ところで、DLR, ISASおよびJUTEMの各設備で作出した加熱率が同じであったとしても、投入電力が異なるため、気流条件は一様でなく、供試体表面の淀み点圧力はそれぞれ異なる。ただし、図17より淀み点圧力 $Pe$ が異なっていたとしても、 $(Pe/R_B)^{0.5}$ は表面質量損耗速度と一次曲線的な関係を持つことが判る。図17の傾きは、フェノールCFRPの拡散依存酸化定数 $C_0$ で、 $8.129 \times 10^5 \text{ kg}/(\text{m}^{3/2} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}^{1/2})$ の値を持つ。

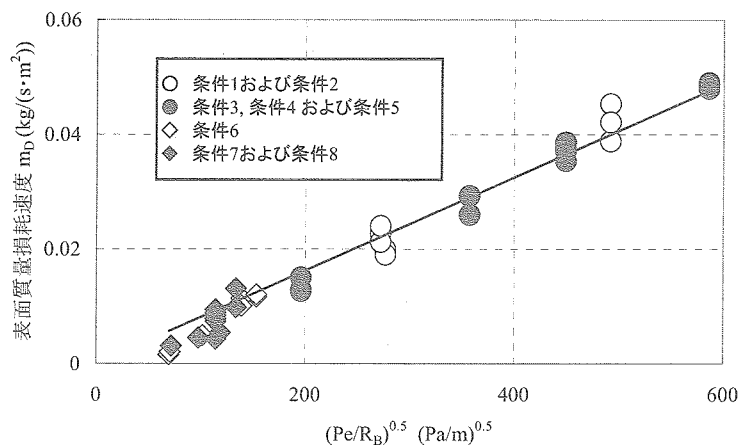


図17 表面質量損耗速度と $(Pe/R_B)^{0.5}$ との関係

### 3.2.3 反応律速、拡散律速領域における表面損耗速度<sup>[11]</sup>

Scalaらは、反応律速と拡散律速の両領域における表面質量損耗速度が試験的に式5で表現できることを明らかにした<sup>[14]</sup>。

本試験では、前節により求めた $m_R$ と $m_D$ を式5に入力し、炭化フェノールCFRPの表面質量損耗速度を予測し

$$\dot{m}^2 = \frac{1}{\frac{1}{m_R} + \frac{1}{m_D}} \quad (5)$$

た。図18は、炭化フェノールCFRPの表面質量損耗速度の解析値と試験値との比較である。図18の予測に用いた炭化フェノールCFRPとグラファイト<sup>[13]</sup>の各係数を表4にまとめる。

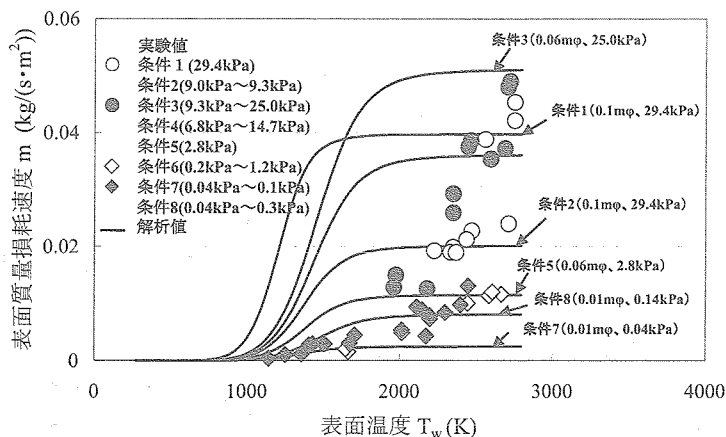


図18 フェノールCFRPの表面質量損耗速度と表面温度との関係

表4 フェノールCFRPのアレニウス反応式の頻度因子 $k_0$ 、活性化エネルギー $E$ および拡散依存酸化定数 $C_0$ 

	フェノールCFRP <sup>1)</sup>	グラファイト <sup>2)</sup>
活性化エネルギー $E$ (kJ/mol)	83.3	184.2
アレニウス反応式の頻度因子 $k_0$ (kg/(s·m <sup>2</sup> ·Pa <sup>1/2</sup> ))	0.721	14.80×10 <sup>3</sup>
拡散酸化依存定数 $C_0$ (kg/(s·m <sup>3/2</sup> ·Pa <sup>1/2</sup> ))	8.129×10 <sup>-5</sup>	5.38×10 <sup>-5</sup>

- 1) 文献11：奥山圭一，加藤純郎，山田哲哉，座古勝，炭化CFRP表面の酸化損耗に影響を与える熱化学的パラメータ，炭素（炭素材料学会論文集），2004[No.213]，pp.128-133  
 2) 文献14：Sinclair M. Scala and Leon M. Gilbert, Sublimation of Graphite at Hypersonic Speeds, AIAA Journal, Vol.3, No.9, 1965, pp1635-1644

また，式3. 5を用いたフェノールCFRPの解析値と，Metzgerの経験式[ 4]を用いた計算結果の比較を図19に示す。Metzgerの経験式は，高エンタルピー気流下におけるグラファイトらの炭素系材料の表面質量損耗速度を予測できる式として広く知られており，式6に示す。

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{p_e}{R_B}} \frac{1.18 \times 10^5 e^{-\frac{22140}{T_w}}}{\sqrt{\frac{30.5}{R_B} + 4.85 \times 10^{15} \times \left( \frac{e^{-\frac{22140}{T_w}}}{1 + 3.48 \times 10^8 p_e^{-2/3} e^{-\frac{61700}{T_w}}} \right)^2}} \quad (6)$$

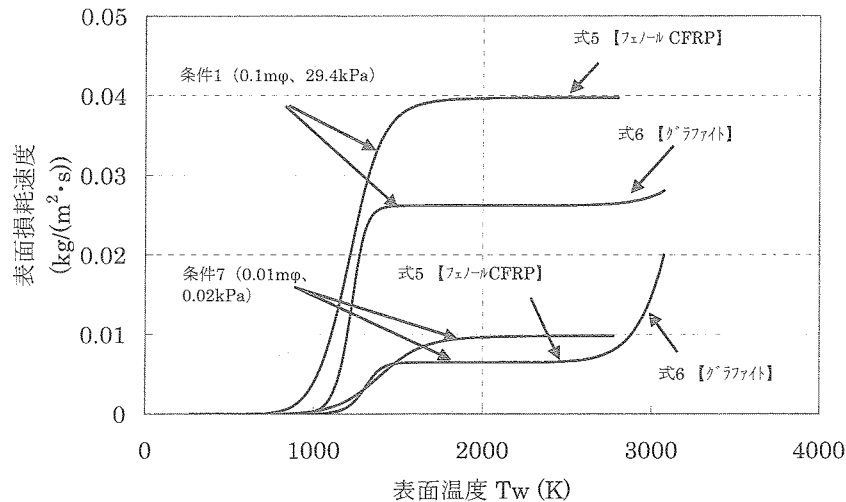


図19 フェノールCFRPとグラファイトの熱化学的特性を用いた表面質量損耗速度の解析値と表面温度との関係

図19から，グラファイトと比較して，フェノールCFRPの表面損耗が低温領域で始まり，また表面質量損耗速度も大きいと判る。これは，グラファイトと比較して，フェノールCFRPの活性化エネルギー $E$ が小さく，また拡散依存酸化定数 $C_0$ が大きいと考えられる。なお，約3000K以上で両者に差が生じた理由は，式5が昇華反応を無視した式であることに対し，式3. 6は昇華反応を考慮した式であることによる。

また、表4より、フェノールCFRPの頻度因子 $k_0$ は、グラファイトと比較して4桁程低い値であることが判る。頻度因子 $k_0$ は、質量損耗開始温度に影響を与える。頻度因子 $k_0$ が大きいほど、反応律速酸化領域における酸化反応が活発となるので、より低い温度で損耗が開始する。仮に、フェノールCFRPの頻度因子 $k_0$ がグラファイトと同じ値であると仮定した場合、フェノールCFRPの質量損耗開始温度は約500Kとなり、この値は試験値に一致しない。質量損耗速度を予測する場合、頻度因子 $k_0$ はその材料の値を用いなければならない。

### 3.3 高エンタルピせん断気流に対する機械的耐性の取得

DLRにおける加熱試験に用いた供試体は100mm $\phi$ であり、これは短冊状フェノールの短冊1枚より大きい。アーク加熱試験後の全ての大型供試体表面を観察した結果、表面剥離やスポレーションなどの欠陥は確認されなかった。また、DLRにおけるアーク加熱試験に供した加熱後アブレータの全て、およびISASにおける加熱後供試体の一部を切断し、内部状態を観察した結果、層間剥離などの欠陥は見られなかった。また、図8の楔型供試体を用いてフェノールCFRPの超高温・高速気流に対する耐せん断荷重特性をDLRのアーク加熱試験装置で確認した。試験条件を表5に示す。

表5 楔型供試体の加熱条件

		Nose section	Cone section
Heat flux rate (MW/m <sup>2</sup> )	Re-entry Condition (Maximum heat flux)	~3.1	~1.3
	Test condition <sup>1)</sup>	1.9~3.7@DLR	1.7~1.9@DLR
Impact Pressure (kPa)	Re-entry Condition (Maximum heat flux)	~115	~50
	Test condition <sup>2)</sup>	~30@DLR	~10@DLR
Stream enthalpy (MJ/kg)	Re-entry Condition (Maximum heat flux)	28	28
	Test condition <sup>2)</sup>	~14@DLR	~13@DLR
Duration (sec)	Test condition	30~110 <sup>3)</sup>	30~110 <sup>3)</sup>

1) 測定値

2) 装置上限値

フェノールCFRP表面における気流せん断荷重 $\tau$ は、式7で表現した[12]。式7から設定された加熱試験時におけるせん断荷重は、REVカプセルの予想最大せん断荷重値よりも大きい。

$$\tau = (q \cdot U_e) / H_s \quad (7)$$

ここで、

$H_s$ : 気流エンタルピ (MJ/kg)

$U_e$ : 気流速度 (m/sec)

$q$ : 評価点における加熱率 (MW/m<sup>2</sup>)

ISAS, DLRおよびJUTEMのアーク加熱試験装置で取得したフェノールCFRPの加熱率と表面温度との関係を図11に示した。この表面温度は、放射温度計で測定されたものである。図8の楔型供試体評価点における加熱率 $q$ は、図11から得られる。

加熱試験に供した全ての楔型供試体の表面は、気流せん断荷重に対して剥がれなどの欠陥が生じていなかった。

## 4. アーク加熱試験結果と実フライト結果比較

全炭化型の2層式フェノールCFRPを採用した熱防御システムの質量は、従来のアブレータ設計手法に基づいた質量と比較して大幅な軽量化が可能である。空力加熱を受けた2層式アブレータの内部応力には、主に短冊状フェ

ノールCFRP収縮による締め付け力と、連続状フェノールCFRP内の温度分布による熱応力がある。フェノールCFRPの締め付け力は、炭化する際の収縮により発生し、その大きさは厚さに依存する。また、連続状フェノールCFRP内に発生する熱応力の上限值は、短冊状フェノールCFRP収縮による締め付け力に依存する。連続状フェノールCFRP内の熱応力を材料の降伏応力以下にするためには、短冊状フェノールCFRPの締め付け力を適切な値に維持する必要があり、短冊状フェノールCFRPの厚さを適切な値に設定しなければならない。

再突入カプセルの熱防御システムの大幅な軽量化のため、全炭化型の2層式フェノールCFRPの厚さ変動挙動を把握することは特に大切である。そこで本章では、主にアブレータ内部温度および表面損耗量の解析値と再突入飛行を経験したREVカプセルの測定値とを比較し、アブレータ設計手法の妥当性を評価する。

#### 4.1 飛行時加熱率環境

REVカプセルに装着された熱電対位置を図20に示す。図中の $AB_n - X$ は熱電対種類とその装着箇所を示し、 $n$ は整理番号で1がノーズ部を、2から3がコーン部を示す。Xは熱電対種類を示し、K、RおよびPTはそれぞれK型、R型、Pt型の熱電対であることを示す。

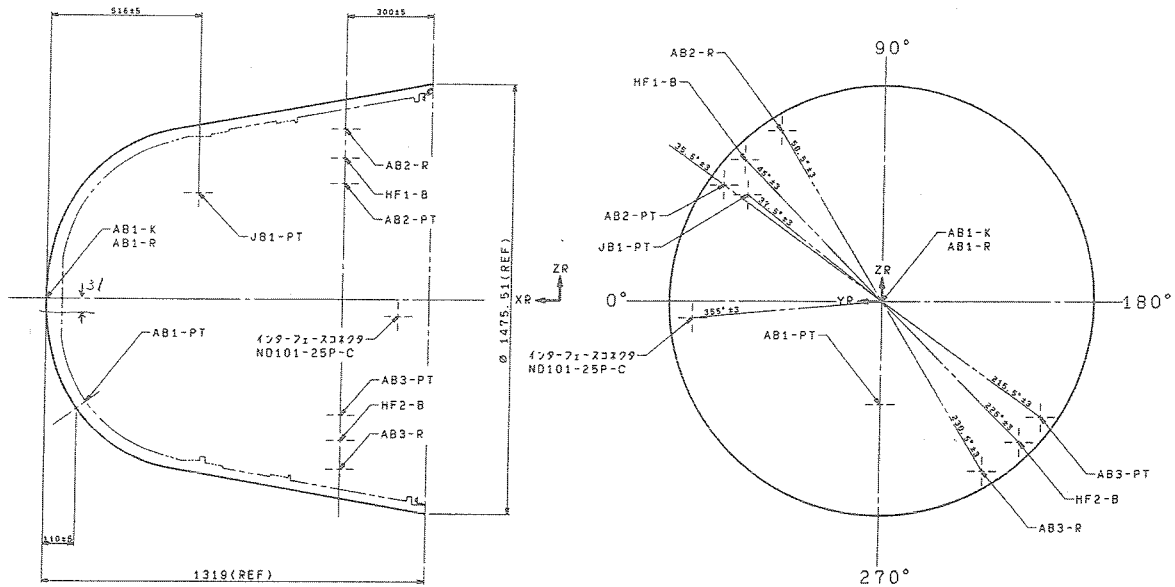


図20 REVカプセルに装着された熱電対の種類と位置

REVカプセルの実再突入飛行時におけるAB1-Rの温度計測結果を図21に、AB2-Rの温度計測結果を図22に示す。なお、AB1-Rはアブレータ外表面から31.5mm、AB2-Rは同じく8.3mmの深さに装着された。

図21および図22には、加藤らが開発したアブレーション解析コード[10]の温度解析結果も合わせて示す。図21および図22から、AB1-RとAB2-Rの空力加熱率をそれぞれ約 $1.5\text{MW/m}^2$ 、約 $0.1\text{MW/m}^2$ とした場合、温度測定値と解析値とが良く一致することが判る。このことから、AB1-RとAB2-Rが装着された付近の空力加熱率は約 $1.5\text{MW/m}^2$ 、約 $0.1\text{MW/m}^2$ と考えられる。

REVカプセルの熱防御システムの設計が、淀み点(AB1-R付近)における加熱率が約 $3.1\text{MW/m}^2$ として実施されたことは前記した。この加熱率は、Detra-Kemp-Riddellの統計式[2],[15]を用いて推算したREVカプセルの空力加熱率約 $1.9\text{MW/m}^2$ に、標準偏差(14%)[2],[15]、安全係数等(約40%)を乗じた値である。実再突入環境における空力加熱率の解析値の約 $1.5\text{MW/m}^2$ は、 $1.9\text{MW/m}^2$ の±14%の下限値付近にある。

再突入前後におけるREVカプセル外観を図23および図24に示す。図23および図24から、再突入後のREVカプセル



ルのコーン部には、地球周回軌道上における熱制御用の白色ペイントが残留していることが判る。このため、コーン部の表面損耗はほぼゼロと考えられ、実際に再突入前後の有意な厚さ差は確認できなかった。また、淀み点周辺の損耗量は、天頂部であるA点が0.5mm、A点から約60mm離れたB点が約1.6mmであった（A点とB点の位置については、図24を参照）。A点の損耗量がBの値と比較して少なくなった理由は、A点に繊装されたジルコニアチューブがヒートシンクとして機能し、A点周辺の表面温度が他と比較して低くなったことにより損耗量が少なくなったと思われる。さらに、再突入後、天頂部の周辺を観察した結果、ジルコニアチューブは周辺と比較して若干であるが飛び出していた（図25参照）。このジルコニアチューブの突出がスパイクとして機能し、材料表面から衝撃層を離し、空力加熱率が低減したことにより表面損耗量が少なくなったとも推測できる。いずれにしても、アプレータの損耗量は、AB1-R繊装箇所である天頂部周辺が約1.6mmであり、AB2-R繊装箇所付近がほぼゼロである。

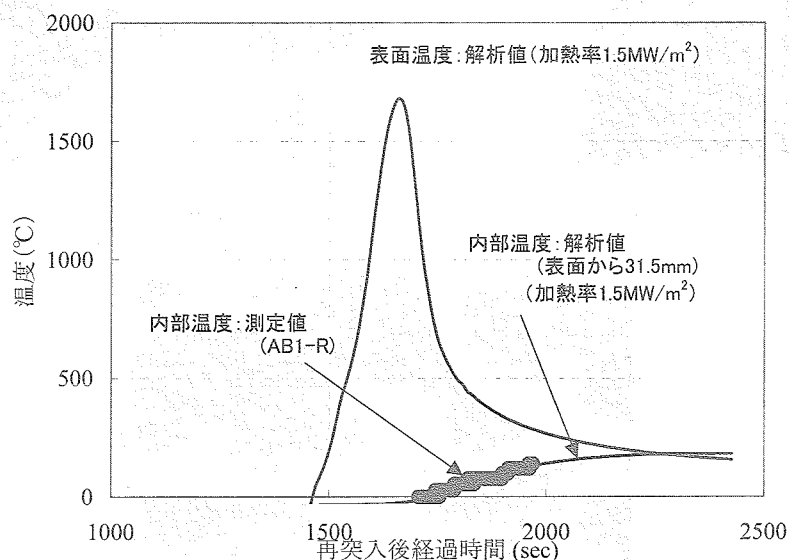


図21 淀み点周辺の温度計測値と解析値比較（熱電対：AB1-R，熱電対繊装位置：表面から31.5mm，熱解析時の空力加熱率：1.5MW/m<sup>2</sup>）

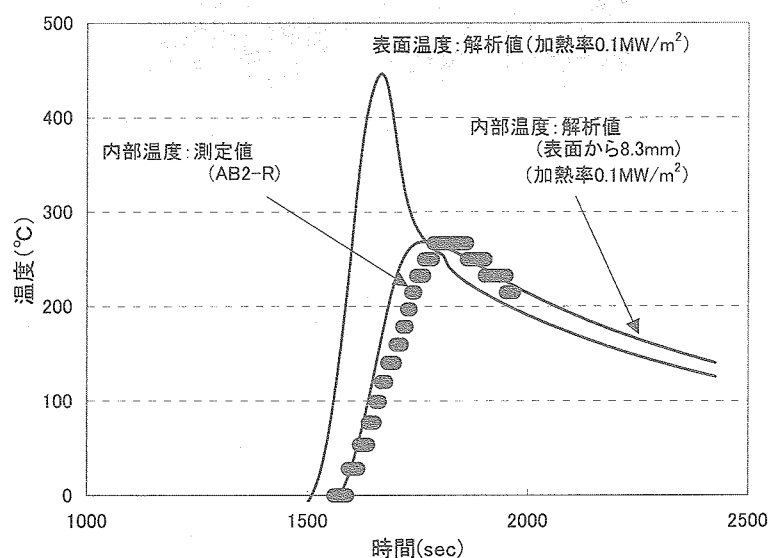


図22 淀み点周辺の温度計測値と解析値比較（熱電対：AB2-R，熱電対繊装位置：表面から8.3mm，熱解析時の空力加熱率：0.1MW/m<sup>2</sup>）



図23 打上げ前(加熱前)のREVカプセル

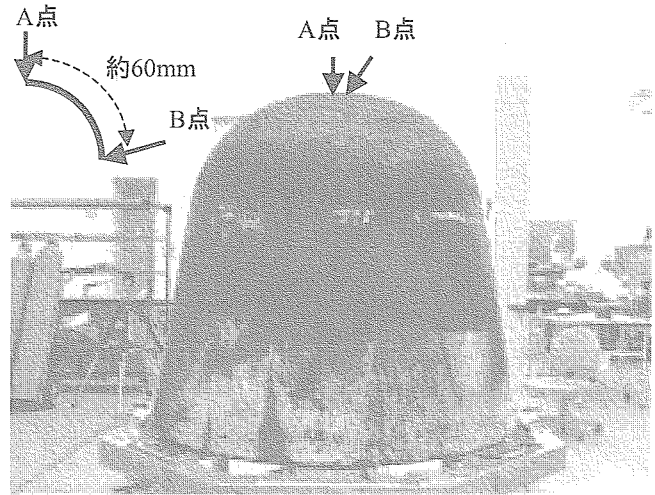


図24 大気圏再突入後(加熱後)のREVカプセル

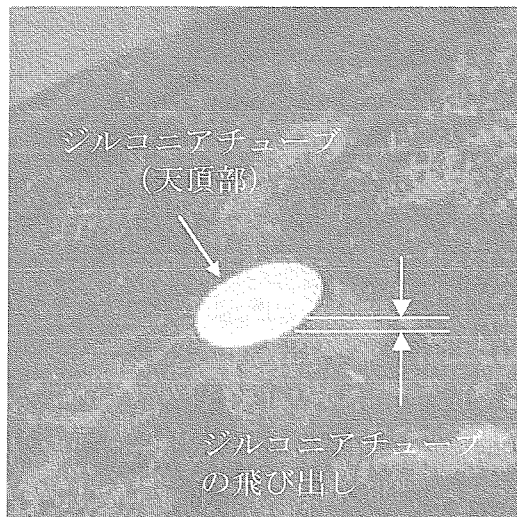


図25 大気圏再突入後(加熱後)のREVカプセル天頂部

#### 4.2. 実再突入環境下における損耗量予測

Detra-Kemp-Riddellの統計式に基づいた空力加熱率は速度の3.15乗に比例し[2],[15]、衝撃圧は速度の2乗に比例[16]することが判っている。Detra-Kemp-Riddell式を用いて推定されたREVカプセルの空力加熱率は $1.9\text{MW/m}^2$ であり、またABI-Rの温度計測値に基づいた空力加熱率の解析値は $1.5\text{MW/m}^2$ であることは前節で述べた。両者の空力加熱率差に基づいた場合、実再突入環境の衝撃圧は、推定時の約86%となる。設計時の安全余裕を含まない衝撃圧 $Pe$ の最大値は約88kPaであるので[13]、実再突入環境の $Pe$ は約76kPaとなる。実再突入環境の衝撃圧 $Pe$ の時間履歴を図26に示す。REVカプセルの淀み点周辺の曲率半径 $R_B$ は0.77mである。この $Pe$ 、 $R_B$ 、および3章で求めた活性化エネルギー $E$ 、アレニウス反応式の頻度因子 $k_0$ 、拡散依存酸化定数 $C_0$ を式1、式4および式5に入れて表面質量損耗速度を求めた。なお、表面質量損耗速度の見積りには、拡散依存酸化定数 $C_0$   $8.129 \times 10^{-5}$  ( $\text{kg} / \text{m}^2 / 2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}^{1/2}$ )をMetzgerらの修正係数 $F_m$ で除した $C_0'$ を使用した[17]。また、計算には図21の表面温度を使用し

た。この表面質量損耗速度を炭化材密度 $1180\text{kg/m}^3$ で除して積分したものがREVカプセルの表面損耗量で、図27に示す。図27より、REVカプセルの表面損耗量の解析値は約 $1.9\text{mm}$ であり、測定値 $1.6\text{mm}$ に良く一致する。

また、図14および図15から、損耗は約 $800\text{K}$ 以上で発生していることが判る。AB2-Rの表面温度は約 $720\text{K}$  ( $447^\circ\text{C}$ )であり、AB2-Rが艤装された領域付近では、表面損耗は発生していない。

今回の試験により、REVカプセルの損耗量測定結果 $1.6\text{mm}$ は、解析値 $1.9\text{mm}$ に良く一致することが判った。

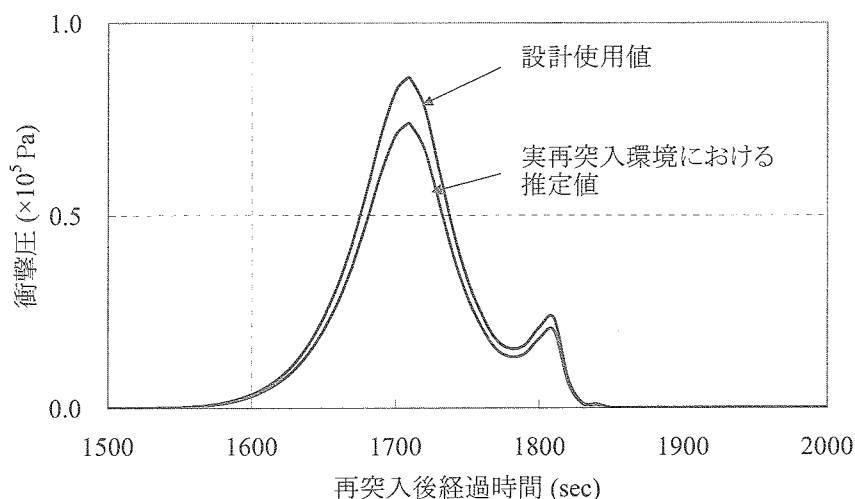


図26 損耗量予測に使用した衝撃圧の時間履歴

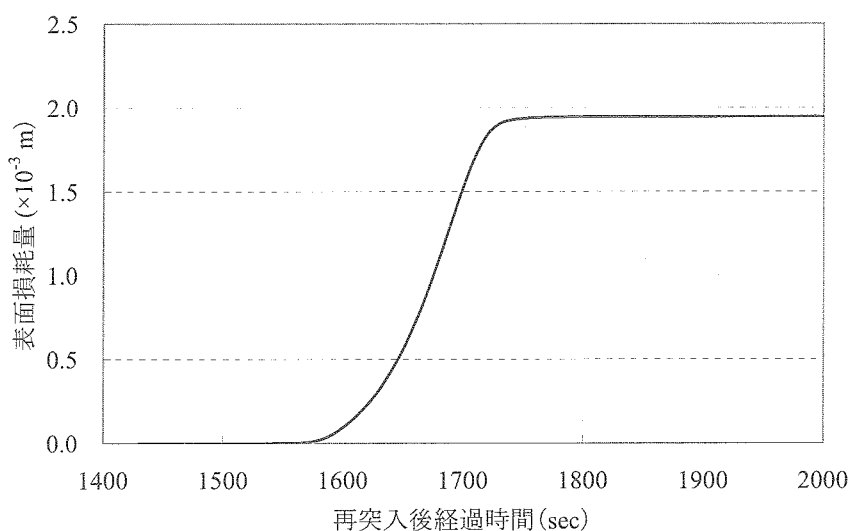


図27 実再突入環境下における淀み点周辺の損耗量解析値

## 5. まとめ

アーク風洞を用いて実施したREVカプセル用の2層式フェノールCFRP開発の主な成果を以下に示す。

### a) フェノールCFRPの温度変動挙動

JUTEM装置で低加熱領域(反応律速領域)、ISAS装置で高加熱領域(拡散律速領域)の加熱環境を模擬し、フェノールCFRP表面および内部の温度変動挙動を取得し、アブレーション解析コードのチューニングを完

了した。

また、アーク気流中の供試体は、正面に加えて側面からも加熱される。大きな直径を有する供試体は、側面から評価部(供試体中央部)までの距離が小型供試体と比較して大きい。このため、大型供試体は側面加熱の内部浸入が抑制されており、評価部における熱流の1次元化が強化されていると考えられる。この大型供試体はDLR装置で加熱され、その内部温度の測定値は、ISAS装置で加熱された小型供試体の内部温度と比較して低めであることが確認された。

アブレーション解析コードは、主にISAS装置およびDLR装置で加熱された供試体の測定温度などを用いて検証、チューニングされた。このアブレーション解析コードは、REVカプセルの熱防御システムの設計に適用され、フェノールCFRP厚さが設定された。

#### b) フェノールCFRP表面の熱化学反応

上項と同様に様々な加熱環境をISAS、DLRおよびJUTEMのアーク風洞で模擬し、炭化したフェノールCFRP表面と気流中酸素との酸化損耗特性を取得した。特に、フェノールCFRPの酸化領域がグラファイトと同様に反応律速と拡散律速に分類できること、さらに両酸化領域の境界温度を確認した。また、フェノールCFRPの酸化損耗量の予測を可能とするアレニウス反応式の頻度因子 $k_0$ 、活性化エネルギー $E$ 、ならびに拡散依存酸化定数 $C_0$ を同定した。これにより、反応律速および拡散律速の両領域におけるフェノールCFRPの酸化損耗量の予測が可能となった。

#### c) 高エンタルピせん断気流に対する熱機械的耐性

高エンタルピのせん断気流をDLR装置で模擬し、大型のフェノールCFRPを加熱した。加熱試験後の全ての供試体表面および内部を観察した結果、表面剥離やスポレーション、また層間剥離などの欠陥が無いことが確認された。

全炭化型の2層式フェノールCFRPを採用した熱防御システムは、従来のアブレータ設計手法と比較して軽量化が可能である。ISAS、DLRおよびJUTEMのアーク風洞を用いて、REV用アブレータとして採用された全炭化型の2層式フェノールCFRPの熱防御特性をアーク加熱試験で取得した。この試験結果を用いてアブレーション熱解析コードがチューニングされた[13]。このアブレーション解析コードを用いて設計されたREVカプセルは、2003年5月30日に大気圏再突入飛行の後、小笠原沖に着水し無事回収された[5]。再突入中におけるREVカプセル・アブレータの温度計測値はアブレーション解析コードで予測した値に良く一致し[13]、また再突入後の表面損耗量の計測値は解析値にも良く一致した。これらにより、アーク試験でチューニングされたアブレーション解析コードなどを用いることで、REVカプセルのような鈍頭カプセル型往還機の熱防御システムの設計がほぼ確立されたと考えられる。また、再突入後のREVカプセルのアブレータ表面は、DLR試験と同様に、高エンタルピ気流のせん断力に対しても剥がれることなく、またスポレーションの発生もなく、熱機械的な荷重に十分に耐荷したことが観察により確認できた。

ただし、再突入後のREVカプセルを観察した結果、2層式フェノールCFRPの表面の一部に亀裂が、内部の一部に剥離が観察された[13]。この亀裂と剥離は、再突入時、あるいは着水時の熱応力や熱分解ガスの圧力で発生したと考えられ[13]、ガスの透過率測定など発生原因特定のための検討を継続する。

## 謝 辞

USERS宇宙機は、経済産業省および新エネルギー・産業開発機構(NEDO)の委託を受けて、財団法人無人宇宙試験システム研究開発機構(USEF)が開発を進めた宇宙試験システムであり、ここに伊知地幸一氏および浜一守氏をはじめとするUSEFの方々に対し感謝いたします。また、REVカプセルのシステム開発を担当したIHIエアロスペースの方々にも感謝いたします。

本研究は、ISAS、JUTEMおよびDLRの設備を用いた加熱試験結果に基づくものであり、ここにISAS、JUTEMおよびDLRの関係者の方々に感謝致します。特に、REV用アブレータの加熱試験の殆どは、ISASのアーク加熱試験装置で実施されました。REV用アブレータは、籾田名誉教授、稲谷教授、安部教授を始めとするISASの方々の懇切なご指導の賜物であり、ここにISASに対し深く感謝を申し上げます。

### 参考文献

- [ 1 ] 加藤純郎, 坂田隆司, 菅野義就, 宇都雅弘, 奥山圭一, 上垣栄一, 伊地智幸一, 浜 一守, 新宮正三, 回収カプセルUSERSに適用のヒートインシュレーション, 第2回傾斜機能材料実用化に関するワークショップ資料, 工学院大学, 2003年9月12日, pp.85-93
- [ 2 ] R. L. Potts, Application of Integral Methods to Ablation Charring Erosion, A Review, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.32, No. 2, 1995, pp200-209
- [ 3 ] Tetsuya YAMADA, Ablation Thermal Protection of a Reentry Vehicle, Netsu Bussei 12(3) (1998) pp.135-141  
【in Japanese】
- [ 4 ] J. W. Metzger, M. J. Engel and N. S. Diaconis, Oxidation and Sublimation of Graphite, AIAA. J., Vol. 5, No.3, March, 1967, pp.451-460
- [ 5 ] <http://www.usef.or.jp/>
- [ 6 ] Yoshitsugu Kanno, Ryuji Sakata, Seitaro Ogiso, Shun-ichi Bandoh, Masahiko Sugawara and Kazumori Hama, USERS/REV Heat Shield Design Concept and Strength Analysis, Proceedings of the 22nd ISTS, Morioka, Japan, May 28- June 4, 2000, pp. 577-581, 2000-c-28
- [ 7 ] M. Hinada, Y. Inatani, T. Yamada and K. Hiraki, An Arc-heated High Enthalpy Test Facility for Thermal Protection Studies, 1996, The Institute of Space and Astronautical Science Report No.664
- [ 8 ] A. Guelhan, Arc Heated Facility LBK as a tool to Study High Temperature Phenomena at Re-entry Conditions, 1997, IB-39113-97A05
- [ 9 ] Kichinosuke Hanawa, Masahiro Ishii, Masashi Matsumoto, Development of Erosion Testing Machine as High Enthalpy Arc-Heated Wind Tunnel, The Symposium on Ultra-High Temperature Materials, Tajimi, Japan, 1992  
【in Japanese】
- [ 10 ] 加藤純郎, 奥山圭一, 西尾誠司, 坂田隆司, 浜一守, 稲谷芳文, 再突入回収カプセル用アブレータ材の炭化アブレーション数値解析, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.50, No.582, 2002, pp.255-263
- [ 11 ] 奥山圭一, 加藤純郎, 山田哲哉, 座古勝, 炭化CFRP表面の酸化損耗に影響を与える熱化学的パラメータ, 炭素(炭素材料学会論文集), 2004[No.213], pp.128-133
- [ 12 ] Keiichi Okuyama, Sumio Kato, Ryuji Sakata, Masahiro Uto, Kazumori Hama and Yoshifumi Inatani, The Arc-Heated Test Results for USERS/REV Heat Shield System Development, Proceedings of the 22nd ISTS, Morioka, Japan, May 28-June 4, 2000, pp. 1402-1407, 2000-q-25
- [ 13 ] 加藤純郎, 奥山圭一, 山田哲哉, アブレーション解析コードと飛行後解析, 平成16年度JAXA報告, RR-04-045, pp.77-103
- [ 14 ] Sinclair, M. and Leon M. Gilbert, Sublimation of Graphite at Hypersonic Speeds, AIAA Journal, Vol.3, No.9, 1965, pp1635-1644
- [ 15 ] 日本航空宇宙学会編, 航空宇宙工学便覧, 1983年(初版), 丸善
- [ 16 ] 近藤次郎, 高速空気力学, 1977年, コロナ社
- [ 17 ] 奥山圭一, 加藤純郎, 山田哲哉, 地球大気圏再突入環境におけるCFRPの熱化学的損耗, 炭素(炭素材料学会論文集), 2005[No.219], 印刷中