

H - A ロケット 6 号機 打上げ失敗の
原因究明状況について（その 6）

平成 16 年 1 月 27 日
宇宙航空研究開発機構

目次

1. 表面後退量増大現象の整理	…	1
2. 試験結果	…	7
3. 今後の進め方	…	16

1. 表面後退量増大現象の整理

『SRB - A (R側)ノズル開口部の断熱材(ライナアフトB2)に想定を超えた板厚減少が発生し、ホルダBに燃焼ガスが達し、熔融、破孔した。』

この事象を引き起こす要因として、以下が考えられる。(図1 - 1参照)

- 化学的、熱・機械的要因等の重畳による局所エロージョン増大
- ライナアフトB2前端部付近などの欠け・剥離
 - ・ライナアフトB2(CFRP製断熱材)前端部の欠け・剥離
 - ・スロートインサート(C/C製耐熱材)後端部の欠け

(1)化学的、熱・機械的要因等の重畳による局所エロージョン増大

【現象の概要】

断熱材の表面後退は主として、化学的腐食と機械的侵食によって起き、燃焼ガスの気流特性(動圧、渦等)や材料特性(物性、積層角等)が寄与すると考えられる。

局所的な表面後退はノズル壁の不均一な形状等に伴う気流特性の変動(衝撃波や渦の発生など)や材料特性の不均一等により影響を受け増大することが考えられる。

これらの要因が複合的に重畳することにより想定を超えた局所エロージョンが発生しホルダBに燃焼ガスが達し、熔融、破孔に至ることが考えられる。

【寄与する要因】

CFRP断熱材の表面後退の主な要因は、水性ガス反応や高温アルミナと炭素の反応などによる化学的腐食と燃焼ガス流の動圧、アルミナ液滴粒子衝突およびCFRP熱分解ガスによる内部圧力等による熱・機械的侵食が考えられる。これらは固体モータの諸特性であるモータ燃焼圧、ノズル(局所)膨張比、ノズル形状と密接な関係があると考えられる。

局所エロージョンは、燃焼ガスの気流特性(動圧、静圧、渦など)や材料特性(物性、積層角など)の不均一が複合的に重畳したり、ある要因が局所的に強調されて発生することが考えられる。

これまでの開発で実施した実機サイズの地上燃焼試験(5回)において発生したノズル開口部断熱材の表面後退量およびその結果に基づく断熱材の板厚設計の経緯と考え方を再整理した。

これらの整理結果を踏まえ、ノズル開口部の断熱材(ライナアフトB2)の想

定を超えた表面後退量増大に関し、以下の詳細検討を実施する計画である。これらの結果を踏まえ、原因の推定及び対策を検討する。

局所エロージョンメカニズムの検討

表面後退率が周囲に比べ顕著に増大する現象(局所エロージョン)のメカニズムを検討するために、表面後退の主な要因と考えられる『化学的腐食』と『機械的侵食』に影響を及ぼす因子(気流特性や材料特性)の変動規模を評価し、各因子の変動量の表面後退への影響度を評価する。

サブサイズモータ燃焼試験

表面後退率増大の寄与要因を模擬した供試体を用いたサブサイズモータ燃焼試験を実施する。(2項参照)

(2)ライナアフトB2(CFRP製断熱材)前端部の欠け・剥離

【現象の概要】

ライナアフトB2製造時の欠陥或いは、熱膨張によるライナアフトB2(CFRP)とスロートインサート(C/C)の干渉により、ライナアフトB2前端部が欠損しライナアフトB2とスロートインサートに過大な段差が発生した。

燃焼初期にライナアフトB2の板厚が減少するとともに段差による気流特性が変動(衝撃波や渦の発生)することにより表面後退発生位置の変化、表面後退量の増大が発生する。さらに気流特性の変動等の影響により局所エロージョンが発生しうる。これらにより燃焼ガスがホルダBに達し、溶融、破孔に至ることが考えられる。

【寄与する要因】

ライナアフトB2前端部付近などの欠け・剥離については、熱分解ガスによる層間剥離、部品間干渉、異物混入、欠陥などが考えられる。

これまでの開発で実施した実機サイズの地上燃焼試験(5回)において発生したライナアフトB2に関する不具合およびその結果に基づく設計の経緯と考え方を再整理するとともに製造時の寸法検査及び非破壊検査記録及び既存の実機大ノズルの寸法検査について確認した。

その結果、部品間干渉、異物混入、欠陥の可能性は低いと考えられる。

層間剥離については層間剥離評価試験(2項参照)を行うとともに、引き続き検討を行い原因の推定及び対策を検討する。

(3) スロートインサート(C/C 製耐熱材) 後端部の欠け

【現象の概要】

スロートインサート製造時の欠陥、圧力や熱膨張によるスロートインサートの応力過大により、スロートインサートが欠損し過大な段差が発生した。

燃焼初期にライナアフトB 2前部の段差発生および気流特性の変動(衝撃波や渦の発生)により表面後退発生位置の変化、表面後退量の増大が発生する。さらに気流特性の変動等の影響により局所エロージョンが発生しうる。これらにより燃焼ガスがホルダBに達し、溶融、破孔に至ることが考えられる。

【寄与する要因】

これまでの開発で実施した実機サイズの地上燃焼試験(5回)においてはスロートインサートの欠けは発生していないこと、異常発生までの飛行データにおいてスロート背面構造部材(ホルダ A)の歪や燃焼圧力に異常が認められないこと、熱構造解析上の適切な強度余裕を有していることから、スロートインサートの欠けの可能性は小さいと考えられる。

製造欠陥に対しては、引き続き検討を行い改善事項を検討する。

……………ここまで、前回(1 / 19)の報告範囲……………

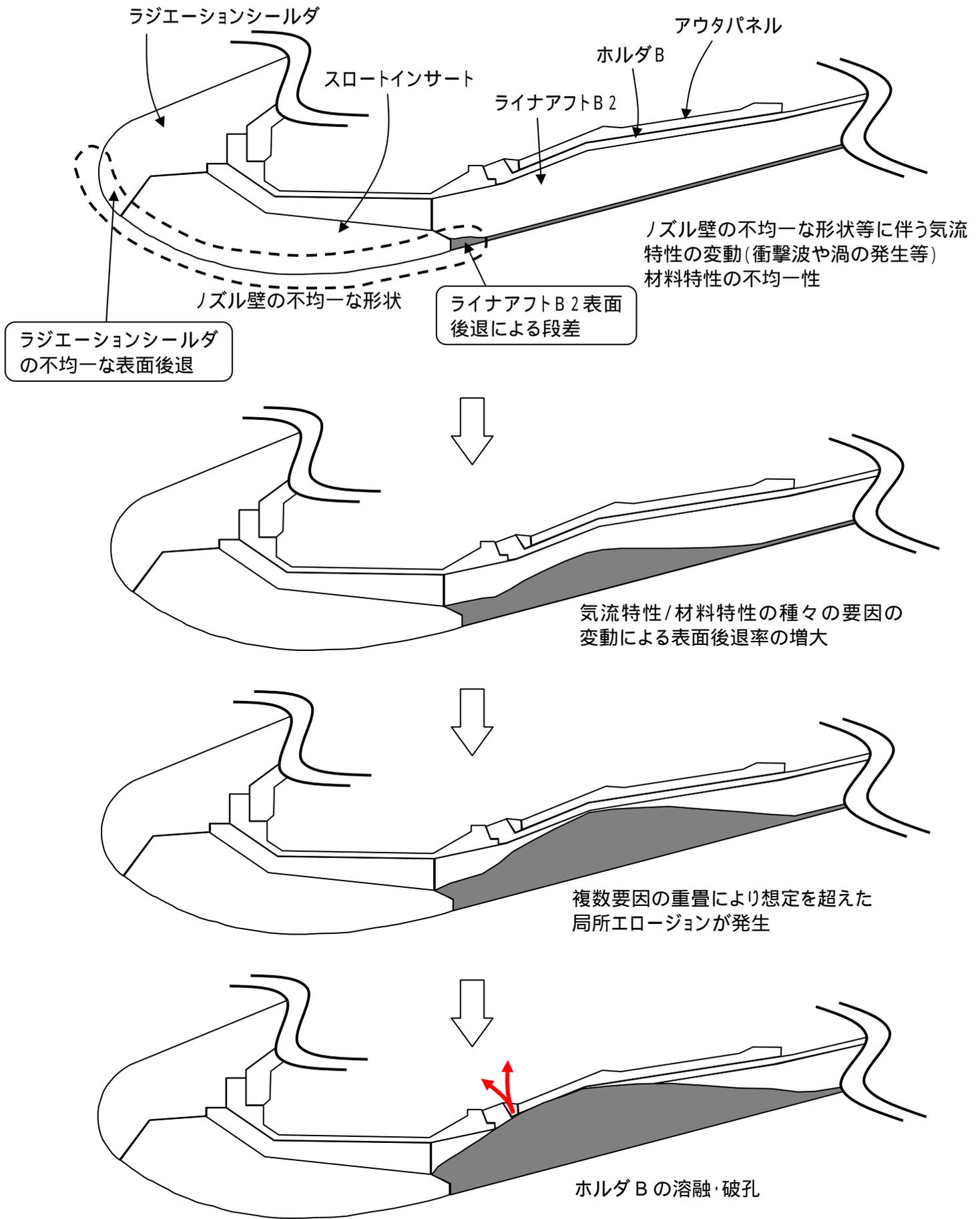


図1 - 1(1 / 3) 化学的、熱・機械的要因の重畳による局所エロージョン増大 (概念図)

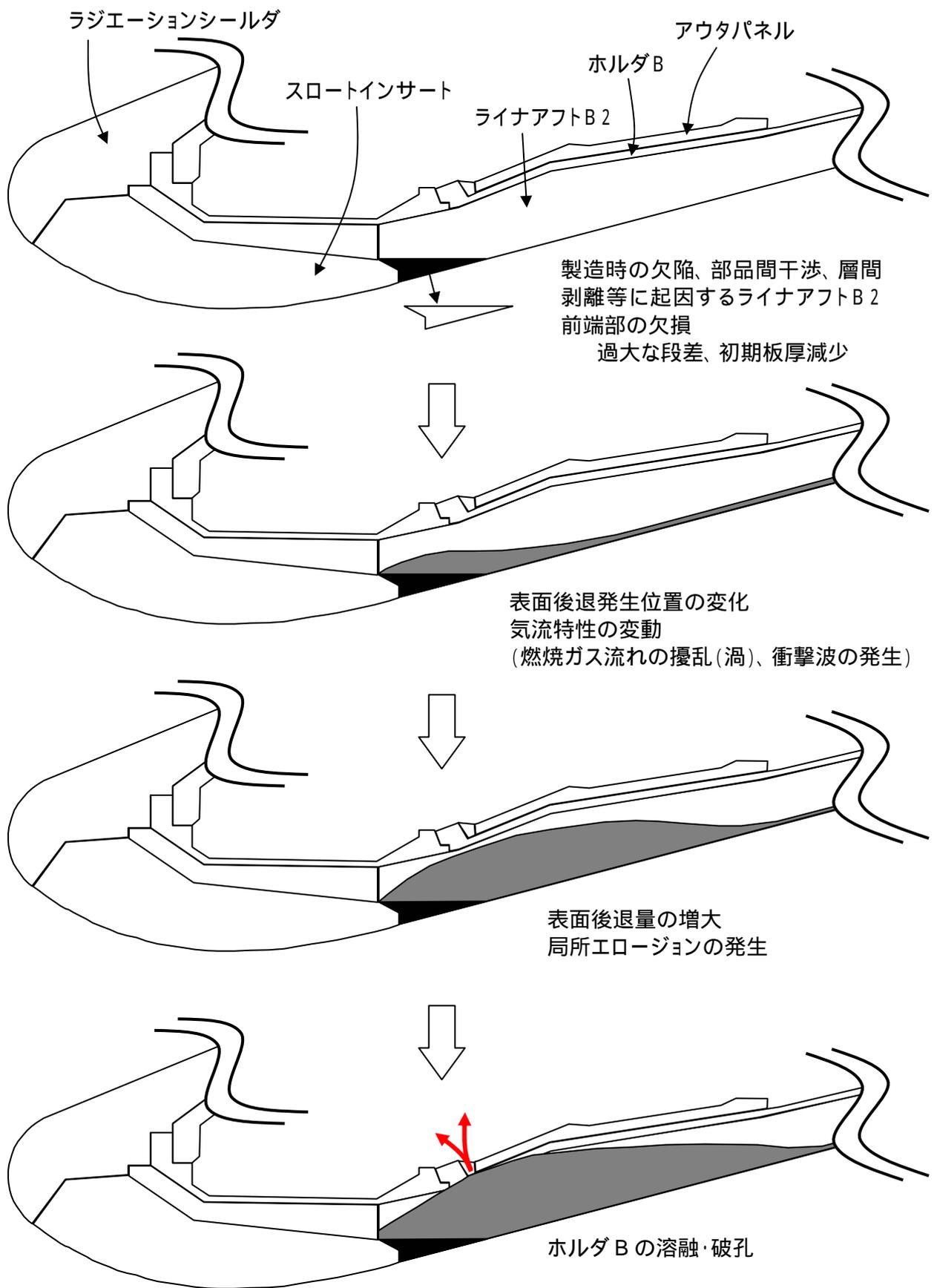


図1 - 1 (2 / 3) ライナアフトB2 (CFRP 製断熱材) 前端部の欠け・剥離 (概念図)

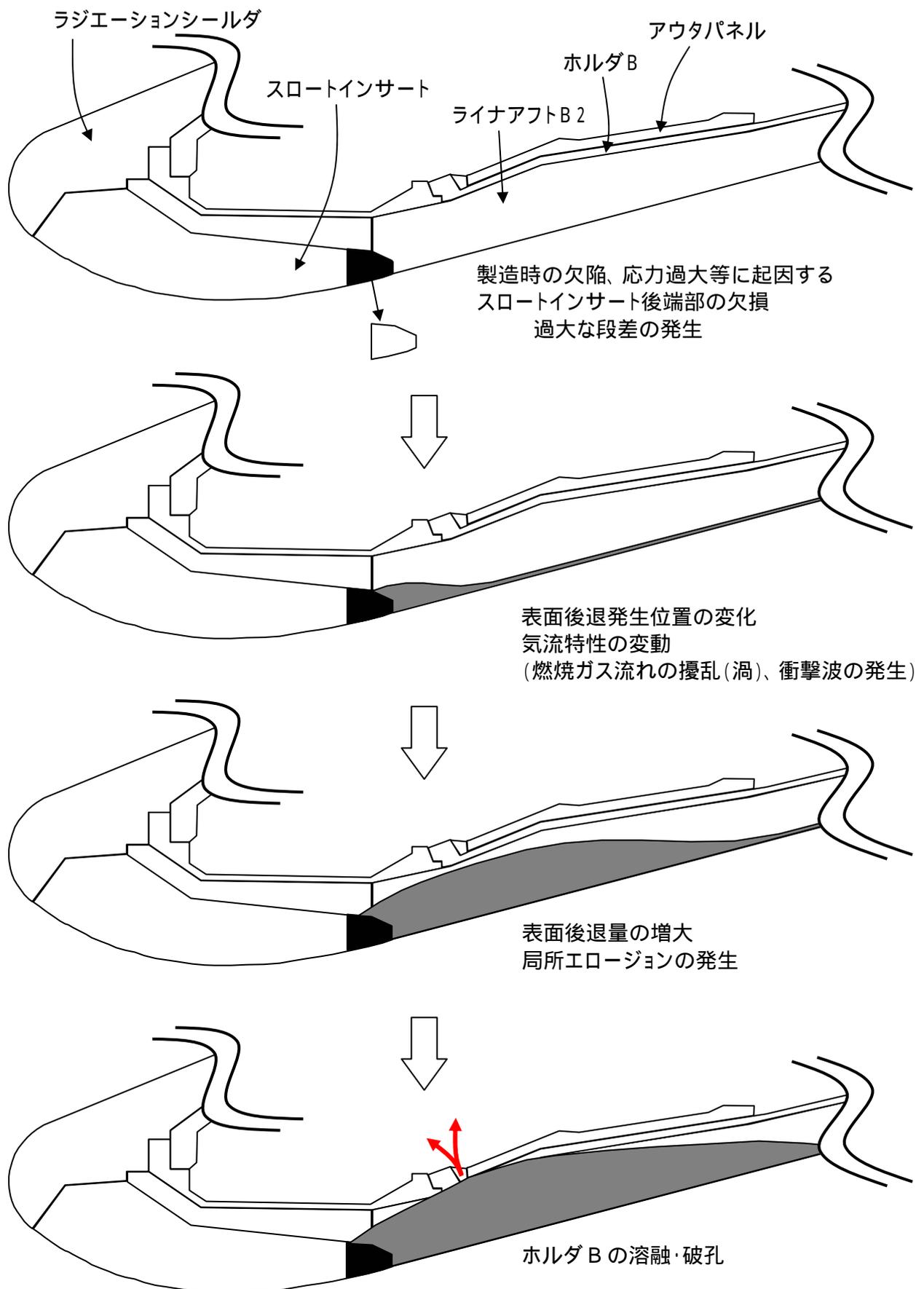


図1 - 1 (3 / 3) スロットインサート(C/C 製耐熱材)後端部の欠け
(概念図)

2. 試験結果

ライナアフトB2表面後退量増大に関する原因究明および対策案の検討に資するため、これまで実施した試験についてまとめる。

2.1 アーク加熱による層間剥離評価試験

2.1.1 概要

ライナアフトB2の層間剥離に対する耐性を評価するため、以下の試験を実施した。

- (1) 6号機(R側)用素材評価試験
- (2) 積層面と加熱面のなす角度の層間剥離に対する影響評価試験
- (3) 加熱を受ける面の幅(加熱幅)の層間剥離に対する影響評価試験

2.1.2 試験目的と結果

(1) 6号機(R側)用素材評価試験

【目的】

ライナアフトB2の余長部(製造時の端材)を用いた加熱試験を行い、6号機(R側)用素材の層間剥離に対する耐性を評価する。

【試験結果】

燃焼初期の積層面と加熱面のなす角度においては、6号機(R側)用素材は、3~6(L側)号機と同様に層間剥離が発生せず、層間剥離に関して他号機素材と有意差がないことを確認した。

(2) 積層面と加熱面のなす角度の層間剥離に対する影響評価試験

【目的】

ライナアフトB2が加熱されると、樹脂が熱分解しガスとなるが、この分解ガスは主に積層面に沿って抜けることから、分解ガスの抜けには積層面と加熱面のなす角度が影響する。また、分解ガスが抜けにくくなると内圧により積層間に剥離を生ずることがある。(図2.1.2-1)

このため、積層面と加熱面のなす角度が、層間剥離に与える影響を加熱試験により評価する。(図2.1.2-2)

【試験結果】

積層面と加熱面のなす角度が一定以上では層間剥離は発生しないが、角度が小さいと層間剥離が発生しやすい結果となった(3~6(L側)号機と同様)。

(3) 加熱幅の層間剥離に対する影響評価試験

【目的】

層間剥離が発生しやすい条件において、層間剥離に至る加熱幅を評価する。(図2.1.2 - 3)

【試験結果】

層間剥離が発生しやすい条件においても、層間剥離に至るには、ある程度の加熱幅が必要であることを確認した。

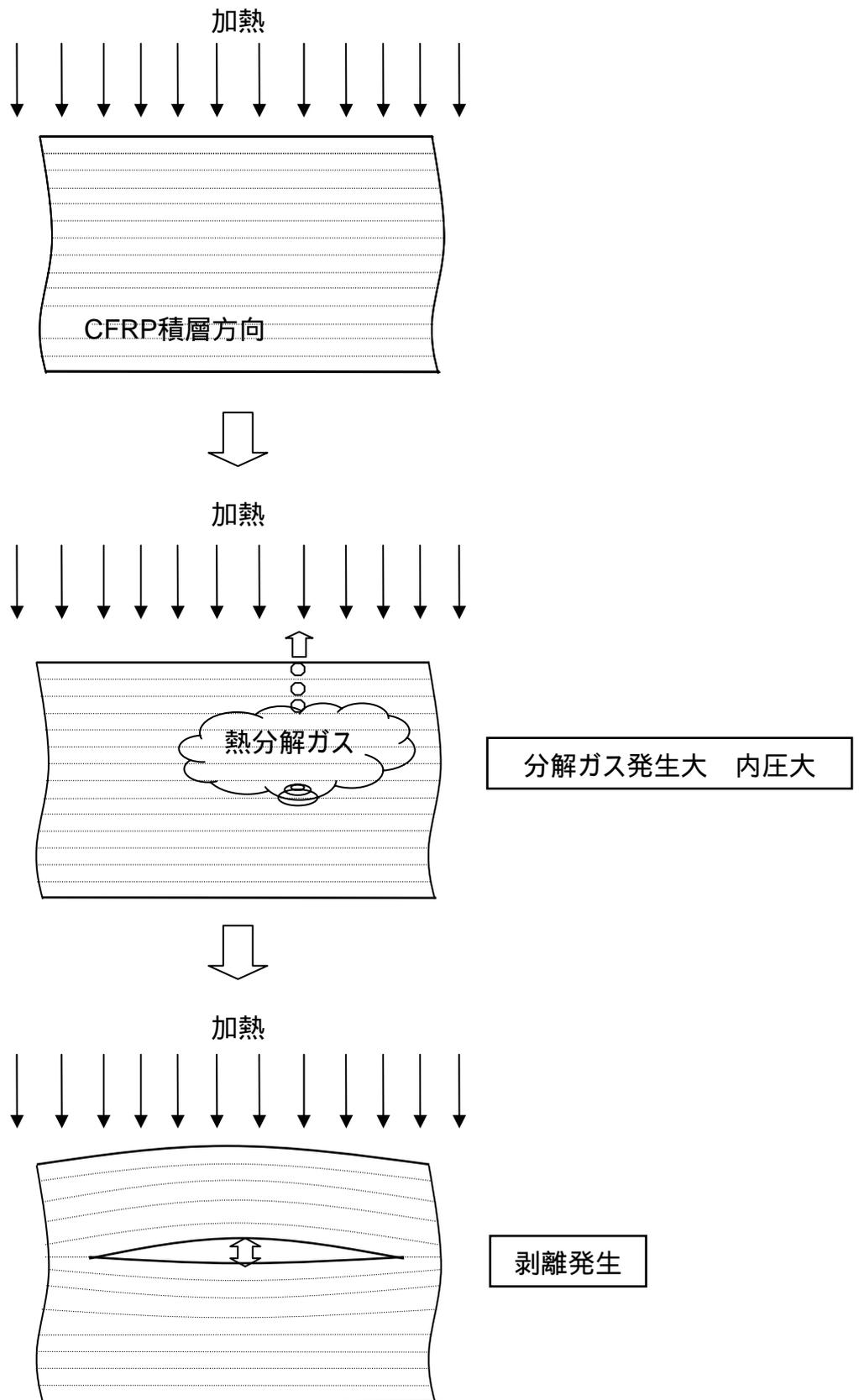


图 2.1.2 - 1 層間剥離現象 (概念图)

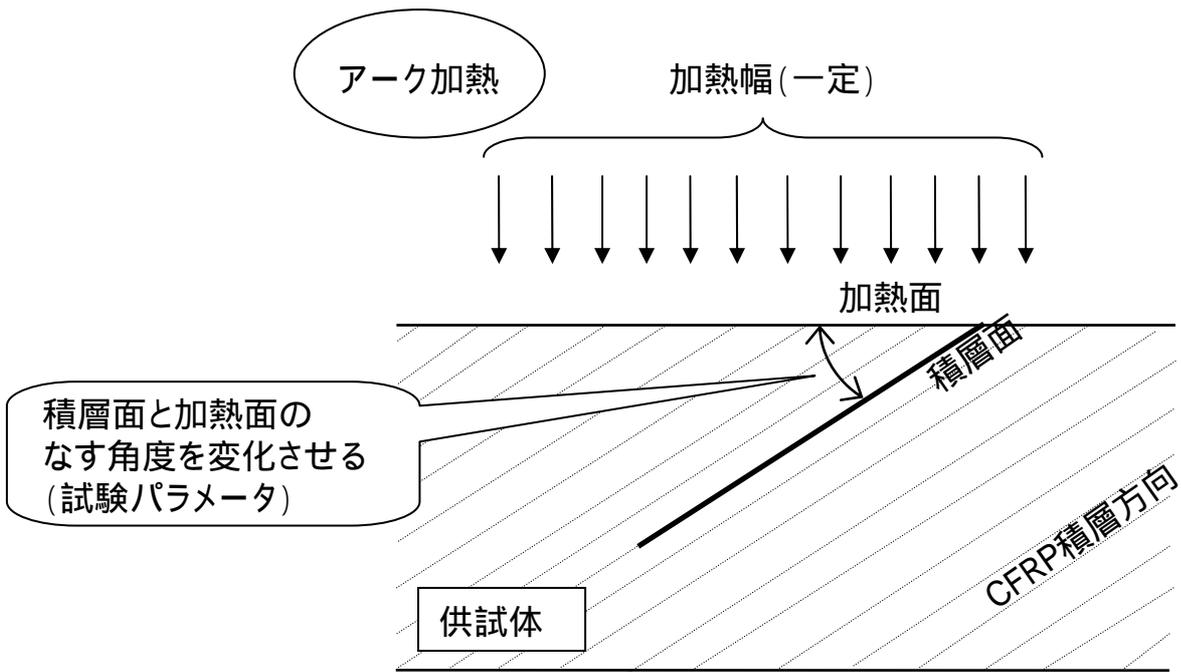


図2.1.2 - 2 積層面と加熱面のなす角度の層間剥離に対する影響評価試験(概念図)

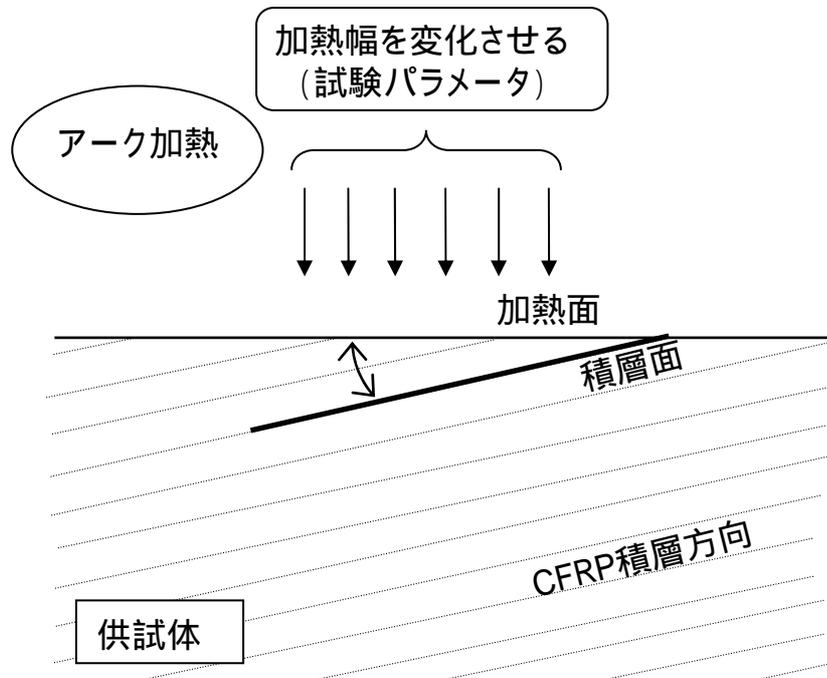


図2.1.2 - 3 加熱幅の層間剥離に対する影響評価試験(概念図)

2.1.3 試験結果から考えられる現象

積層面と加熱面のなす角度が一定以上では層間剥離は発生しないことから、ライナアフトB2(CFRP製断熱材) 前端部の欠け、剥離に層間剥離が影響している可能性は少ないと考えられる。

一方、加熱面とCFRP断熱材の積層面のなす角度が小さくなり、かつ加熱幅がある程度以上あれば、層間剥離が発生する可能性がある。このことから、想定を超えた表面後退量の増大に寄与する一要因として、以下の現象が発生する可能性があることが考えられる。(図2.1.3 - 1)

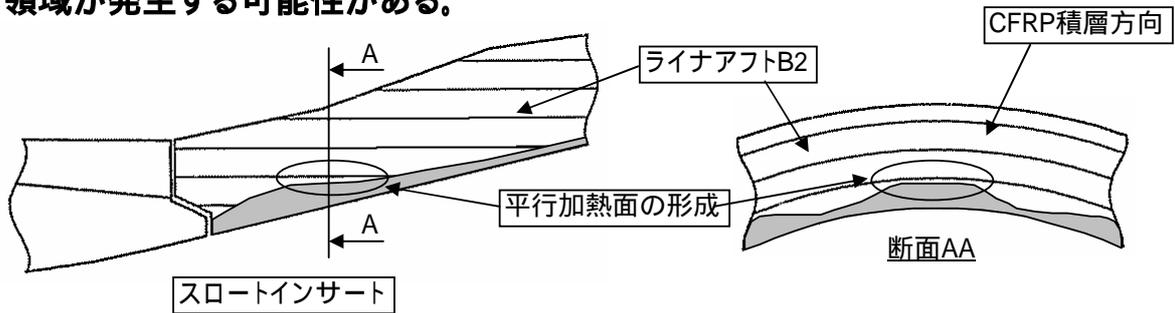
表面後退量が増大すると、部分的に加熱面とCFRP積層面のなす角度が小さくなる領域が発生する可能性がある。

加熱面とCFRP積層面のなす角度が小さくなった領域では、熱分解ガスが層間から抜け難くなり、ある程度幅の広い箇所ができれば、内圧が増加し層間剥離が発生、脱落する。

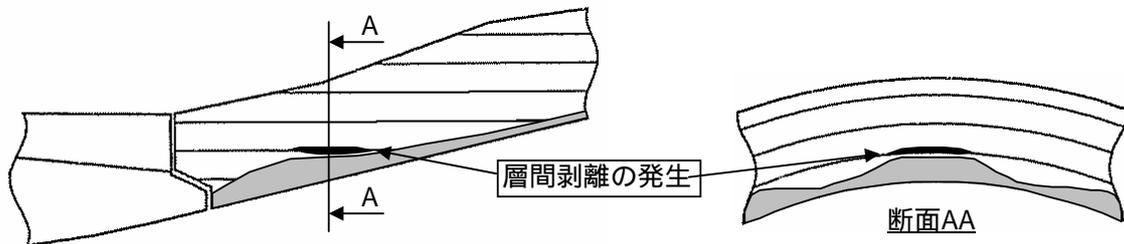
層間剥離と脱落の繰り返しにより、ある程度加熱幅が狭くなるまで、表面後退が進行する。

上記部位においてさらに表面後退が進行することにより、表面後退量が想定を超えて増大することが考えられる。

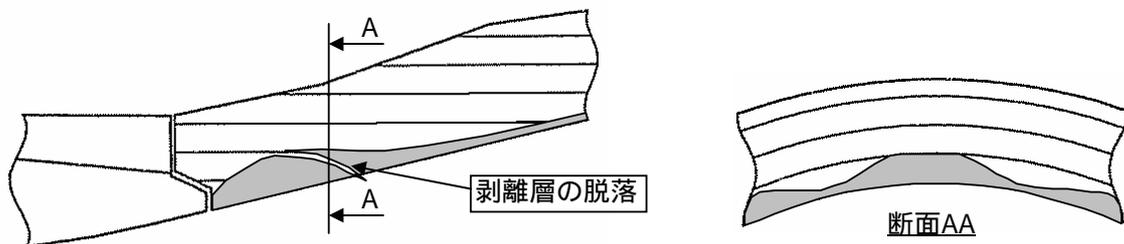
表面後退量が増大すると、部分的に加熱面とCFRP積層面のなす角度が小さくなる領域が発生する可能性がある。



加熱面とCFRP積層面のなす角度が小さくなった領域では、熱分解ガスが層間から抜け難くなり、ある程度幅の広い箇所ができれば、内圧が増加し層間剥離が発生、脱落する。



層間剥離と脱落の繰り返しにより、ある程度加熱幅が狭くなるまで、表面後退が進行する。



上記部位において、さらに表面後退が進行することにより、表面後退量が想定を超えて増大することが考えられる。

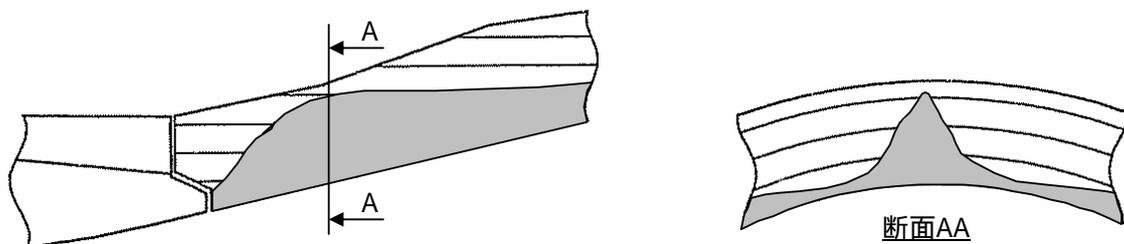


図2.1.3 - 1 表面後退現象と層間剥離の重畳(概念図)

2.2 サブサイズモータ燃焼試験(その1)

2.2.1 概要

【目的】

表面後退率増大の要因として考えられる下記要因の寄与を確認するため、サブサイズモータ(1/5サイズ)燃焼試験を実施する。

化学的、熱・機械的要因等の重畳による局所エロージョン増大

ライナアフトB2前端部付近などの欠け・剥離

- ・ライナアフトB2(CFRP製断熱材)前端部などの欠け・剥離
- ・スロートインサート(C/C製耐熱材)後端部の欠け

表面後退率への影響を顕在化させるため、モータ燃焼圧力をSRB-Aより高くし燃焼ガスのエネルギーを増加させるとともに、寄与要因として以下の要因の重畳について検証データを取得する。

要因 :ノズルスロート上流部の形状不均一(凹凸)から生ずる燃焼ガス流れの擾乱(渦)が招く加熱率の増大によるライナアフトB2表面後退率の増大

要因 :ライナアフトB2前端部の過大な段差(注)から生ずる加熱率増大が招く表面後退率の増大

(注)過大な段差は欠け、剥離だけではなく、燃焼による形状不均一としても発生しうる。

要因 :スロートインサート後端の欠けによる過大な段差から生ずる加熱率増大が招く表面後退率の増大

【供試体の概要】

項目	サブサイズモータ	SRB-A
モータ代表直径(m)	0.5(1/5サイズ)	2.5
平均燃焼圧力(MPa)	11.8	9.8
燃焼時間(秒)	16	100

(図2.2.1-1参照)

【試験条件】

試験No.	試験条件
1	要因 として、ノズルスロート上流部に形状不均一(凹凸)を設ける。 要因 として、ライナアフトB2前端に段差を設ける。 上記要因 及び を同一位相に設けることにより、重畳効果の確認も行う。
2	要因 は上記試験No.1と同じ 要因 として、スロートインサート後端部に欠けを設ける。 上記要因 及び を同一位相に設けることにより、重畳効果の確認も行う。

(図2.2.1-1参照)

【試験実施時期および場所】

実施時期：平成16年1月20日及び23日

実施場所：(株)IHIエアロスペース 武豊試験場(愛知県知多郡武豊町)

2.2.2 試験結果(一次評価)

計画どおり試験を実施した。一次評価を下記に示す。

ノズルスロート上流の凹凸によるライナアフトB2表面後退率への顕著な影響は確認されなかった。

ライナアフトB2前端部の過大な段差は、ライナアフトB2表面後退率へ影響を与えた。

スロートインサート後端の欠けによる過大な段差は、ライナアフトB2表面後退率へ影響を与えた。

モータ燃焼圧力の増加は、ライナアフトB2表面後退率の増大に寄与した。

2.2.3 今後の予定

今後、詳細な寸法計測等を行い、表面後退量の分布等の詳細評価を実施する。

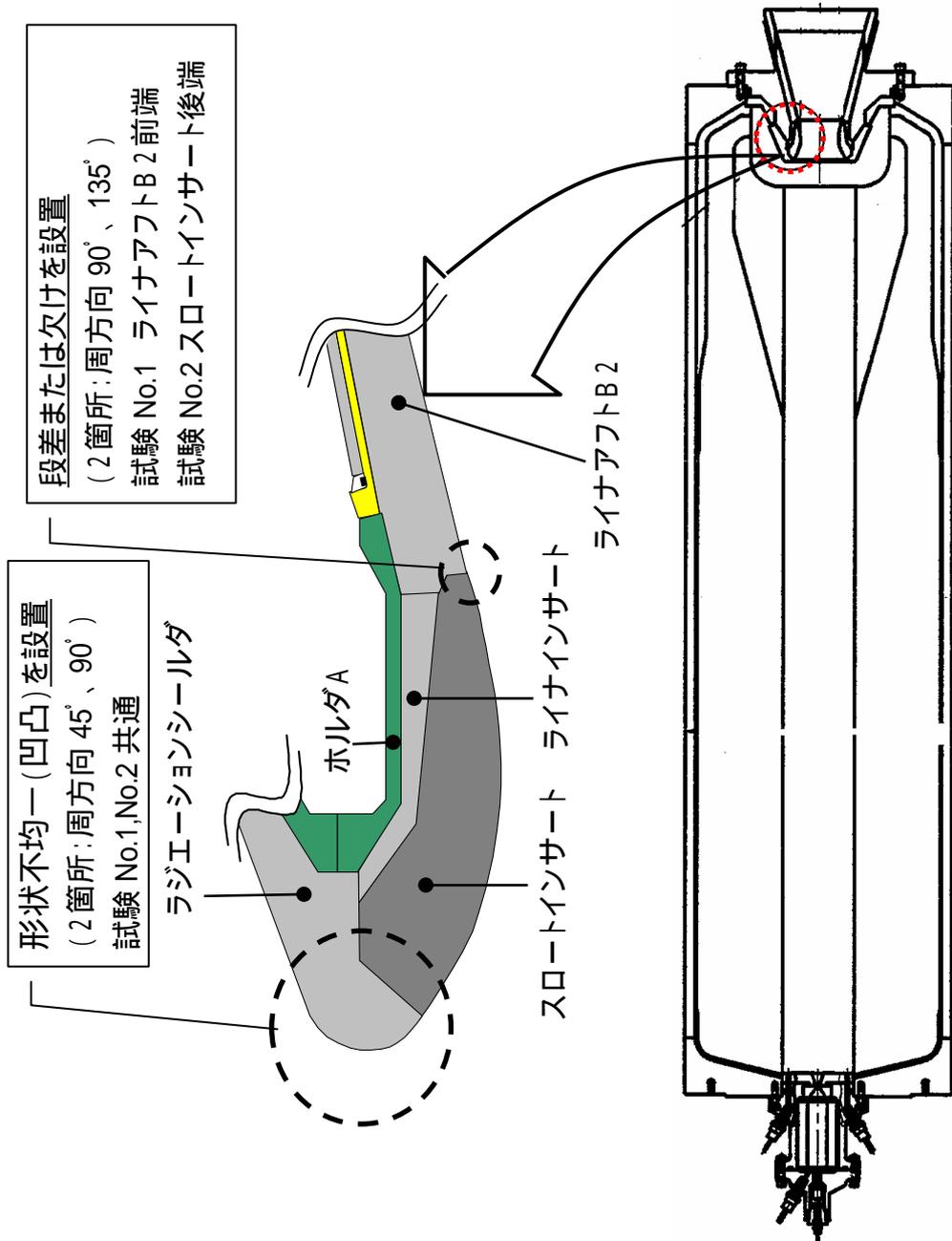


図2.2.1-1 サブサイズモータ試験(その1) 供試体の概要

3. 今後の進め方

(1) 対処すべき事項

想定を超えた表面後退量の増大を引き起こした要因については、これまで設計経緯等の整理、サブサイズモータ燃焼試験結果の一次評価等を行っている。引き続きこれらの詳細評価及び表面後退率の感度解析結果に基づき、対処すべき事項について整理を行っていく。

(2) 今後の試験計画

表面後退量増大を引き起こした要因分析等に資するデータを取得するため、今後、引き続きサブサイズモータ(1 / 5スケール)の燃焼試験計画を検討していくとともに、実機大モータによる燃焼試験について2月中旬を目途に準備を進めていく。