

非接触超音波探傷検査による複合材構造のはく離評価

Delamination Evaluation of Composite Material Structures by Non-Contact Ultrasonic Inspection

佐藤 明 良 株式会社 IHI エアロスペース 品質保証部 技師長

航空機や宇宙用ロケットの複合材には、超音波探傷検査が多用されている。一般的に、超音波探傷検査は、複合材に直接に探触子を接触する方法か、探触子を水浸させる方法になる。近年、超音波探傷器や探触子の性能の向上とパルス圧縮技術によって、空气中に超音波を伝搬させて、非接触で超音波探傷検査ができるようになった。本稿では、こうした非接触超音波探傷検査の適用事例を紹介する。

The ultrasonic inspection method has well used for the composite material structure of airplane or space vehicles. The ultrasonic inspection generally includes the direct contact method of the probe to an object, or the non-contact method, the latter of which uses the probe in water without contacting the object. Recently, the performance of ultrasonic devices and probes have improved using the pulse compression technology, making it possible to apply the non-contact method in the air. This report introduces application examples of non-contact ultrasonic inspection method.

1. 緒 言

軽量で力学的特性や断熱特性に優れた CFRP（炭素繊維強化プラスチック）は、航空機や宇宙機の構造用部材として広く使われ、その用途はますます広がっている。この CFRP 構造体内部の健全性を確認する手段として、従来は、CFRP 構造体を水に浸す水浸法や、局部水浸法などの超音波探傷検査が主流であった。

しかし、電子技術や解析技術の最近のめざましい発展によって、水などの接触媒質を使わず、空気層を介して超音波を CFRP 内部に伝搬させる非接触空中伝搬超音波探傷検査（以下、非接触超音波探傷検査と呼ぶ）が可能になってきた。CFRP を非接触で検査できると、水浸のための水槽や付帯設備が不要になり、自動化が容易になる。また、検査後の水分乾燥の工程も不要になる。さらに、CFRP の接着後や組立後の検査で水浸できない場合にも適用できるなど、メリットが多く、CFRP の用途の拡大とともに、非接触超音波探傷検査の適用も拡大している。

本稿では、この非接触超音波探傷検査の現状と、そのなかで、特に、性能が高いと考えられているパルス圧縮を行う手法について、原理と CFRP 内部のはく離などを検出する事例を報告する。

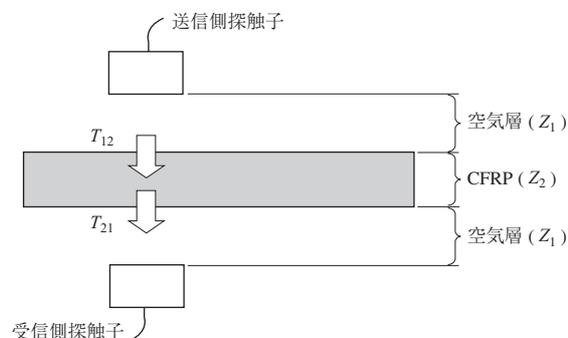
2. 非接触超音波探傷検査

市販の超音波距離計にみられるように、空气中に超音波を伝搬させることは容易であるが、その超音波を空気

層を介して CFRP などの材料中に伝搬させようとする、界面での大きな伝達損失が障害となる。第 1 図に CFRP の超音波の伝搬を示す。探触子の間に空気層を介して、CFRP に超音波を透過させて送受信する場合、界面での損失量 T は、空気層から CFRP への超音波の音圧透過率 T_{12} と CFRP から空気層への音圧透過率 T_{21} の積となり、空気層の音響インピーダンスを Z_1 、CFRP の音響インピーダンスを Z_2 とすると、次式のように表される。

$$T = T_{12} \times T_{21} = 4(Z_2 \cdot Z_1) / (Z_1 + Z_2)^2$$

空気の音響インピーダンスは $0.0004 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、CFRP の音響インピーダンスは $5.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 程度なので、空気層および CFRP 中での超音波の減衰を無視して、界面での音圧透過率による損失だけに注目すると、損失量 T は 3.2×10^{-4}



(注) Z_1 : 空気層の音響インピーダンス
 Z_2 : CFRP の音響インピーダンス
 T_{12} : 空気層から CFRP への超音波の音圧透過率
 T_{21} : CFRP から空気層への超音波の音圧透過率

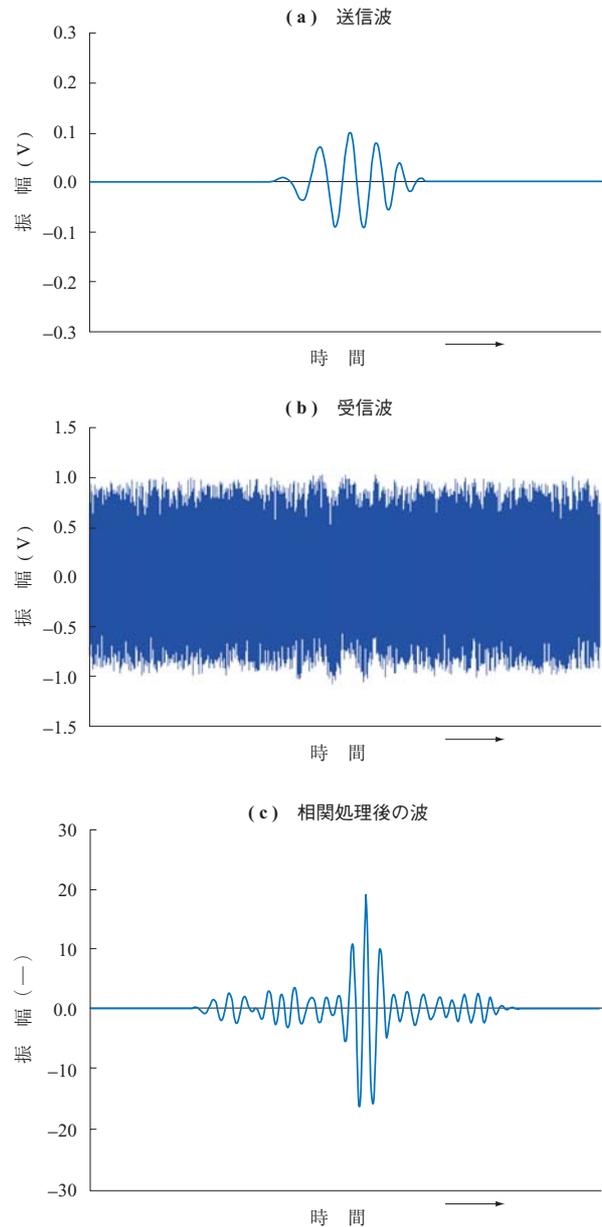
第 1 図 CFRP の超音波の伝搬
Fig. 1 Wave propagation in CFRP

(約 -70 dB) となる。ここで空気を水に変えて水浸法で行う場合には、損失量 T は 0.7 (約 -3 dB) となり、水浸法などの超音波探傷検査に比べ、非接触超音波探傷検査では、約 2 000 倍の高い検出感度が必要になる。

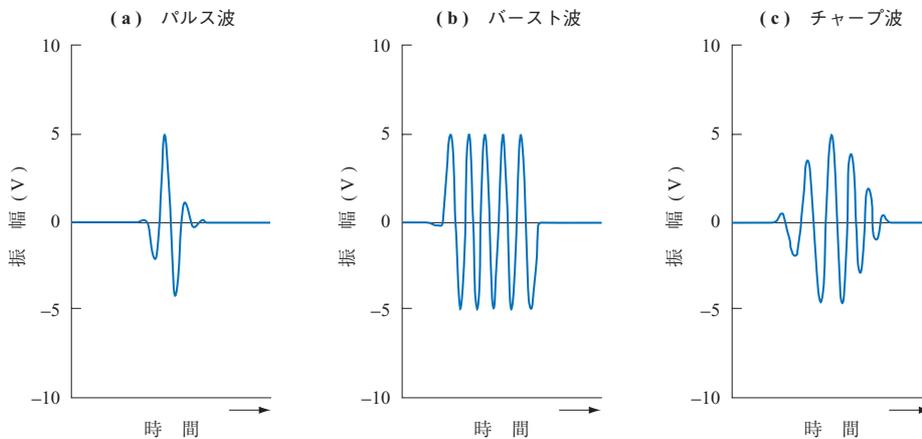
以上のように、空気層を接触媒質とする超音波探傷検査は、空気と CFRP の界面での著しい伝達損失を克服することが課題となる。近年、非接触超音波探傷検査に用いる探触子の性能が向上し、さらに超音波装置の増幅性能も格段に向上しており、CFRP 製造のインライン検査に使えるような非接触超音波探傷検査装置が開発されるようになった。

第 2 図 に超音波の信号波形を示す。これまでの金属材料などに用いられる超音波探傷検査では、送信される超音波の波形は、数波長のパルス波 (**第 2 図 - (a)**) を用いるのが一般的である。しかし、非接触超音波探傷検査では、バースト波 (**第 2 図 - (b)**) またはチャープ波 (**第 2 図 - (c)**) を用いる。後述するように、チャープ波を使う場合には、パルス圧縮と組み合わせることによって、SN (信号と雑音との比率) の改善が期待でき、CFRP が厚肉の場合であっても検査が可能になる。なお、これまで、非接触超音波探傷検査の装置は、欧米メーカーが中心であったが、最近、我が国のメーカーでも装置の開発が進んでおり、今後の性能向上が期待できる⁽¹⁾。

第 3 図 にチャープ波からパルス圧縮によって得られる波形を簡単な例で示す。送信波には、線形周波数変調を用いたチャープ波 (**第 3 図 - (a)**) を用いる。CFRP を透過して受信される受信波は、前述の説明で界面での損失が大きいため、ノイズの多い波形となっている (**第 3 図 - (b)**)。この中に、送信波であるチャープ波が含まれているので、送信波と受信波に相関処理を行い、この結果、受信波に含まれる送信波を検出することができる (**第 3 図 - (c)**)。



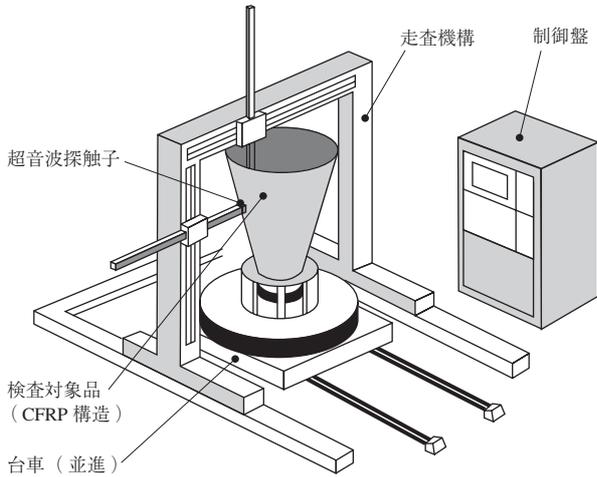
第 3 図 パルス圧縮による波形
Fig. 3 Wave by pulse compression



第 2 図 信号波形
Fig. 2 Signal waveform

非接触超音波探傷検査は、CFRP 中にはく離などの超音波を遮る部位があれば、透過超音波の振幅強度は大きく低下するため、きずを評価できる。

株式会社 IHI エアロスペース富岡事業所では、インライン検査用を含め、非接触超音波探傷検査装置が数台稼働している。第 4 図に、宇宙用ロケットの CFRP 構造専用の非接触超音波探傷検査装置を示す。ロケット部品の CFRP



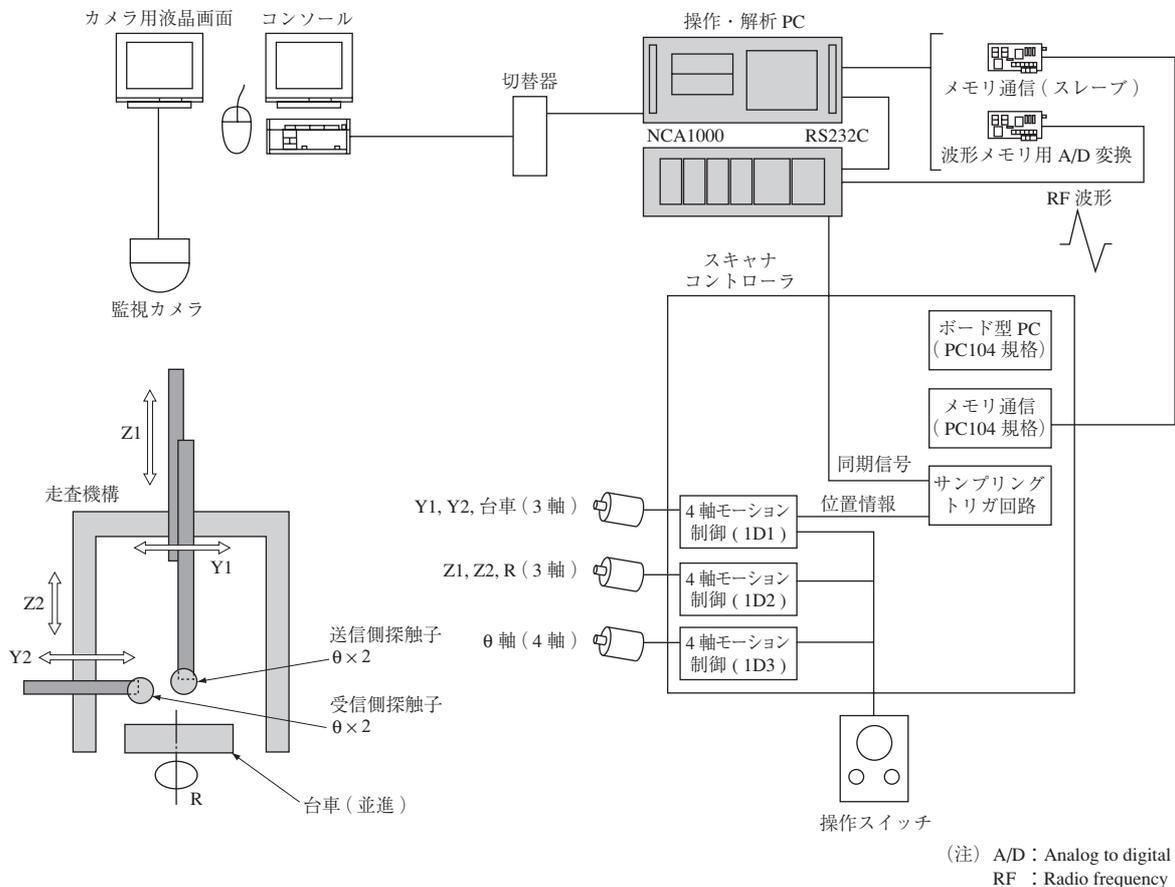
第 4 図 非接触超音波探傷検査装置
Fig. 4 Non-contact ultrasonic inspection equipment

構造の多くは軸対象品であり、その構造形態に対応した検査が可能なシステムになっている。

非接触超音波探傷検査システムは、第 5 図に示すように送信側探触子の 4 軸走査、受信側探触子の 4 軸走査を含む合計 10 軸駆動によって CFRP 構造の検査を可能にしている。非接触超音波探傷検査装置には、探傷器として NCA1000 (Second Wave 社製:アメリカ) を組み込んでいる。NCA1000 の主な仕様を次に示す。

トータルダイナミックゲイン	150 dB 以上
使用周波数帯域	50 kHz ~ 5.0 MHz
サンプリング周波数	30 Hz (2 チャンネル)
ピーク測定時の分解能	± 1 ns
測定モード	2 チャンネル, 4 モード
最大出力電圧	400 Vpp
外部出力インタフェース	RS232C
ネットワークインタフェース	TCP/IP
アナログ出力	BNC アウトプット

金属材料の超音波探傷検査が、数 MHz から数十 MHz の周波数を用いるのに対し、この非接触超音波探傷検査装



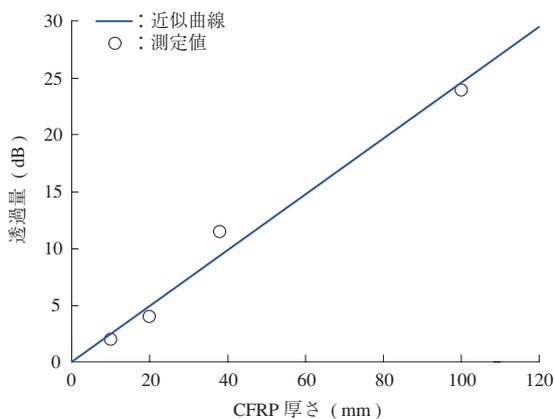
第 5 図 非接触超音波探傷検査システムの構成
Fig. 5 Configuration of non-contact ultrasonic inspection equipment

(注) A/D : Analog to digital
RF : Radio frequency

置では、数百 kHz のチャープ波を用いる。超音波の周波数を低くすることは、欠陥に対する検出能力も低下することになるため、人工きずを使った検出能力の確認試験が必要になる。

3. 検出能力

CFRP 試験片を用いて、CFRP の厚さ方向の透過能力を検討した。探触子と CFRP 間距離を一定にして、公称周波数 500 kHz（振動子寸法：25.4 × 25.4 mm）の探触子によって、各種板厚の CFRP に超音波を透過させて音圧（透過量）を測定した。第 6 図に測定結果を示す。第 6 図から CFRP の厚さ 100 mm でも、非接触で十分に超



第 6 図 CFRP 厚さと透過量の関係

Fig. 6 Relationship between CFRP thickness and wave attenuate

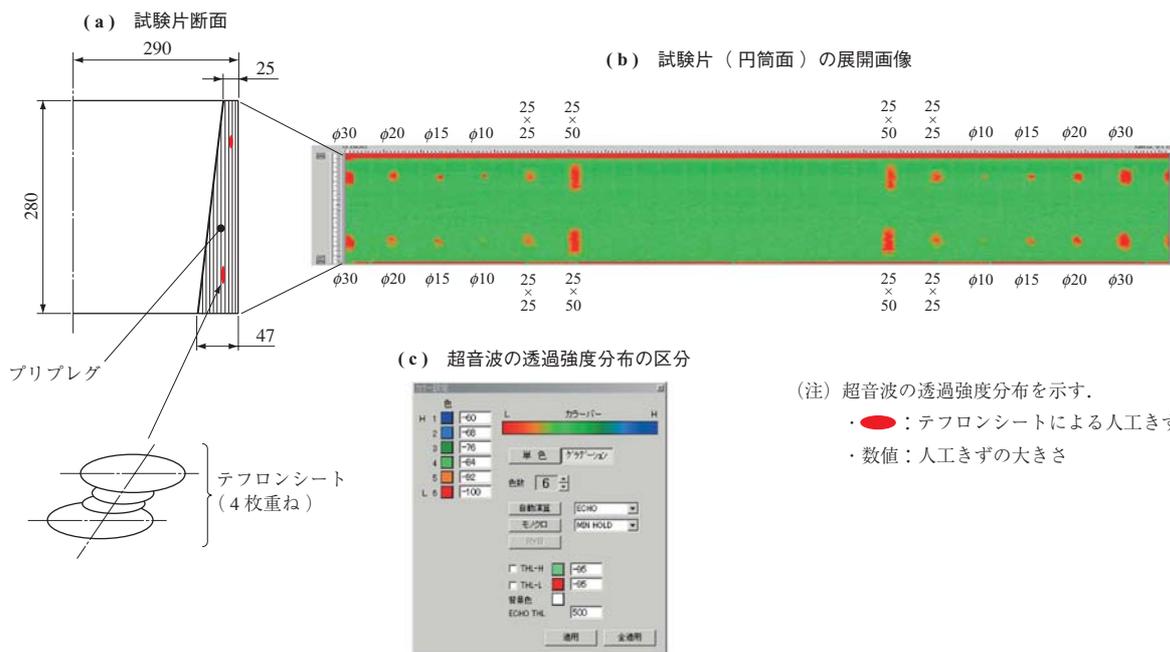
音波を透過できることが分かる。なお、第 6 図は、CFRP の板厚 0 mm の値を 0 dB に補正して（界面における伝達損失量を補正して）表示している。

そこで、CFRP の層間をく離を模擬した人工きずとして、第 7 図に示すようなテフロンシートを重ねて、プリプレグ（炭素繊維に樹脂を含浸させて、中間段階まで硬化させたシート状の材料）の層間に挟み込んで、CFRP を成型した試験片を用いて、その検出能力を確認した。第 7 図 - (b) は、試験片の円筒面における超音波の透過強度分布を、円筒面を平面に展開した画像として示した結果である。人工きずとして挿入したテフロンシートは、いずれも識別できている。

検出能力は CFRP 成型方法、表面状態および検査条件（探触子の周波数、探触子径および走査速度など）にも左右されるが、テフロンシートの大きさを変えて行った検出能力の確認試験では、厚さ 50 mm の CFRP で、φ6 mm 程度の人工きずが確認されている。これは、水浸法で金属材料を超音波探傷検査する場合と比較すると、検出性能が 1 桁程度大きくなっているが、CFRP の許容欠陥寸法に対しては、十分に許容される検出能力である。

4. 成型品の検査

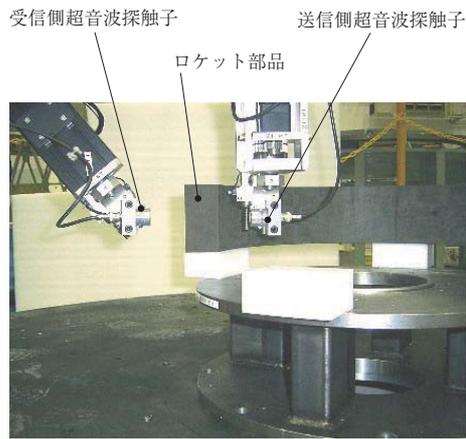
CFRP の成型品は例として、宇宙用ロケットの部品に適用している。この部品の非接触超音波探傷検査の状況を第 8 図に示す。ノズルでは、CFRP 成型後の層間をく離



第 7 図 CFRP 中の人工きずの検出性能（単位：mm）

Fig. 7 Detectability of artificial flaw in CFRP (unit : mm)

(注) 超音波の透過強度分布を示す。
 ・ ● : テフロンシートによる人工きず
 ・ 数値 : 人工きずの大きさ



第 8 図 ロケット部品の非接触超音波探傷検査
Fig. 8 Non-contact ultrasonic inspection for rocket part

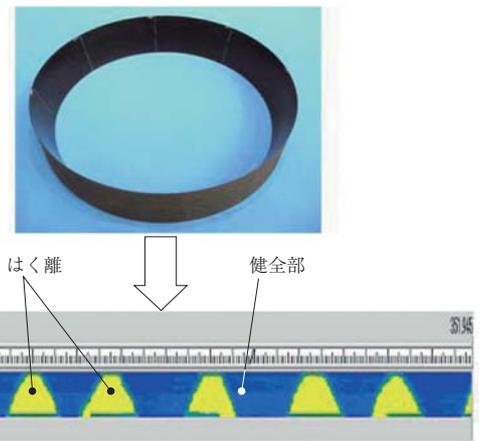
のみならず，組立後に，その外周面に取り付ける厚さが数 mm の金属ホルダとの接着部のはく離も非接触超音波探傷検査を行っている．この場合，空気層から金属，金属と CFRP との接着部および CFRP から空気層を透過することによって，超音波の界面での減衰はさらに大きくなるが，検査が可能な透過性能を確保できている．

第 9 図に CFRP 中の層間のはく離の様子を示す．CFRP 構造は，意図的に層間のはく離が生じるように成型したものである．非接触超音波探傷検査では，健全部が青色の指示で表されるのに対して，はく離部が黄色の指示で表されているのが分かる．

以上の非接触超音波探傷検査によって，水浸することなく，容易に検査を適用することが可能になり，CFRP 製造における信頼性向上や，検査コストの低減につながっている．

5. 結 言

本稿では，航空宇宙分野での適用が始まった非接触超音



第 9 図 CFRP 中の層間のはく離
Fig. 9 Delamination of CFRP

波探傷検査を概説した．非接触超音波探傷検査の技術的な課題としては，検出能力を向上させることと，検査速度を向上させることにある．相反する課題であるが，それぞれ，用途を分けた適用が必要になる．また，適用の方法も透過法のみならず，反射法でも使えるようにすることも課題である．さらに，対象とする材料も，固体推進薬のようなエラストマーへの適用を目指した開発を進めており⁽²⁾，今後，より広範な分野でも非接触超音波探傷検査が使われると考えられる．

参 考 文 献

- (1) 高橋雅和ほか：第 9 回新素材およびその製品の非破壊検査評価シンポジウム論文集 社団法人日本非破壊検査協会 2007 年 2 月 pp. 123 - 128
- (2) 倉林秀幸ほか：第 23 回 宇宙構造・材料シンポジウム講演論文集 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 2007 年 11 月 pp. 9 - 12