

宇宙用機器を支える接着技術 —性能への挑戦—

(株)原賀接着技術コンサルタント
首席コンサルタント 原賀康介

1. まえがき

接着剤による接合組立はさまざまな産業分野でさまざまな機器に使用されており、現在では、組立の重要な要素技術となっている。

ここでは、性能の極限に挑戦する宇宙用機器における接着技術を紹介する。また、日本における構造接着接合技術の現状と今後接着が期待される分野、新たに接着管理士になられた方々への提言なども述べる。

なお、本稿は、2015年4月16日に開催された接着管理士認証式での講演内容をまとめたものである。

2. 宇宙用機器における接着の適用事例

2.1 HII-B ロケット

図1¹⁾は、HII-B ロケットの外観である。ロケットの先端部には人工衛星や宇宙ステーション輸送機「こうのとりのり」などが収納されており、そのカバーはフェアリングと呼ばれる（図2²⁾）。フェアリングは、打ち上げ220秒後に高度約120km³⁾で二つに分割して切り離される。その間、速度は最高マッハ5程度⁴⁾で、約55秒後の空気抵抗による圧力（動圧）は最大5トン/m²⁴⁾、衝撃波と空気の渦による音響は約200デシベル³⁾にも達し、フェアリングの表面温度は約300℃³⁾まで上昇する。このため、フェアリング

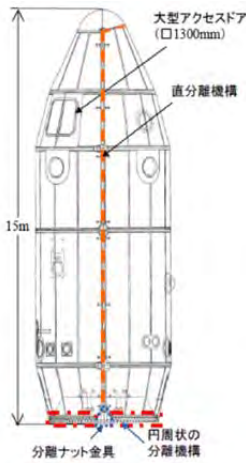


図2. フェアリング

には、一般に、フィルム状のエポキシ系接着剤が使用される。フェアリングでは、高さ40mm⁴⁾のアルミハニカムコアの両面に、表面材として0.4~0.6mmのアルミ板³⁾が接着されている。

このほかにHII-Bロケットでは、図1の段間部¹⁾やフェアリング内部の人工衛星搭載アダプ



図1.HII-Bロケットの外観

は高強度・高剛性、耐熱性、軽量性が必要で、ハニカムサンドイッチ構造（図3⁵⁾）となっている。心材のアルミハニカムコアは、2/100mm~8/100mm程度の薄いアルミ箔に筋状に接着剤を印刷塗布して、アルミ箔を切断して一枚ごとに接着剤が塗布されている部分と塗布されていない部分を交互にずらして重ね合わせて、まとめて熱プレスをして接着剤を硬化させる。その後、切断して拵げると蜂の巣のようなハニカムコアが得られる。コアと表面材の接着

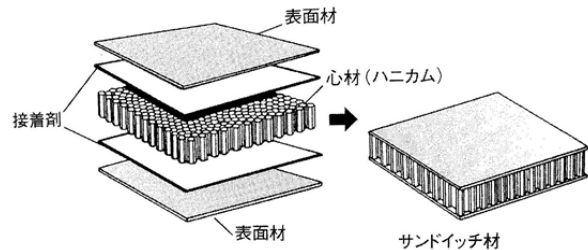


図3. ハニカムサンドイッチパネルの構造

ター⁴⁾に CFRP アルミハニカムパネルが使用されている。

2.2 人工衛星、宇宙ステーション輸送機

軽量化が要求される人工衛星や宇宙ステーション輸送機でもハニカムパネルは多用されている。

図 4⁶⁾は、気象衛星「ひまわり 8 号、9 号」、図 5⁷⁾は、ISS 国際宇宙ステーション輸送機「こうのとり」の外観である。太陽電池パネル、アンテナ、各種の機器が搭載される構体のパネルに軽量で高剛性のハニカムサンドイッチパネルが使用されている。人工衛星は、 -150°C から $+200^{\circ}\text{C}$ のヒートサイクルが加わる状態で 15 年間性能を維持しなければならない、温度変化による変形や熱応力を回避するために、表面材には線膨張係数がほぼゼロの CFRP が用いられている。

太陽電池パネルの寸法は、人工衛星の場合、約 $2.5\text{m} \times$ 約 3m /枚、厚さ 25mm である。人工衛星用太陽電池パネルは世界的に高いシェアを有しており、三菱電機の世界シェアは約 50%にも上っている⁸⁾。図 6^{9,10)}に、ソーラーアレーパネルの構成の一例を示した。接着剤には、フィルム状のエポキシ系接着剤が使用されるが、接着剤も面密度が小さい軽量なものが使用されている。パネルの表面には高効率シリコン太陽電池 (約 $4\text{cm} \times 6\text{cm}$ 、厚さ $200\ \mu\text{m}$) が接着されている。個々の太陽電池の表面には低エネルギープロトンによる放射線劣化を低減させる目的でカバーガラス (厚さ $100\ \mu\text{m}$) が透明な接着剤で接着されている。カバーガラスおよび太陽電池の接着には、低温から高温域で特性が変化せず、温度変化による熱応力を低減するために柔軟な二液付加型シリコン系接着剤とプライマーが使用されている¹¹⁾。

構体パネルには発熱量の大きい電子機器が多く搭載されているため、図 7^{9,12)}、図 8¹³⁾に示すように、ハニカムパネルに放熱のためのヒートパイプを埋め込んだヒートパイプ埋込み型パネルが使用されている。ヒートパイプ間及びヒートパイプとパネル表皮の接合はフィルム状接着剤が使用され

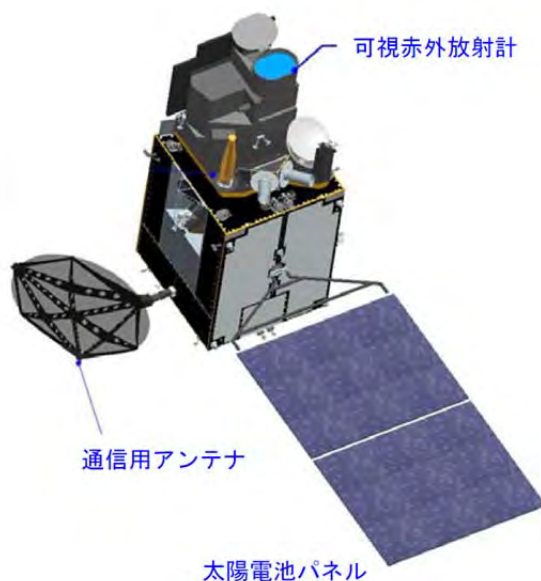


図 4. ひまわり 8 号及び 9 号の概念図

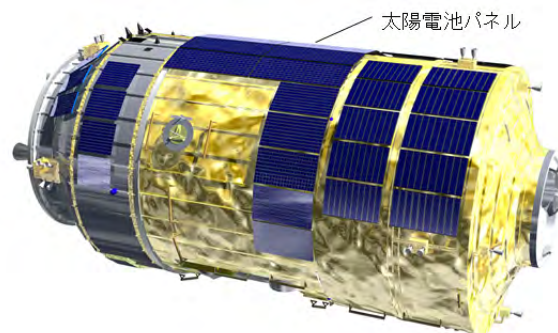


図 5. ISS 国際宇宙ステーション輸送機「こうのとり」の外観

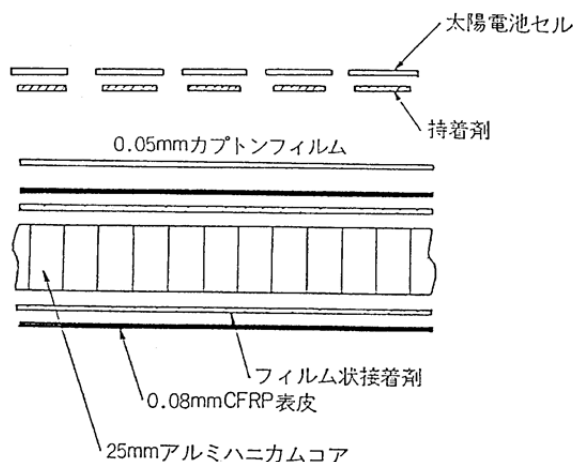


図 6. 人工衛星のソーラーアレーパネルの構成の一例

ている。また、機器搭載面と反対側のパネル表面には、太陽光による吸熱量を抑え搭載機器からの発熱を宇宙空間に逃げやすくするために、ガラスに銀を蒸着したオプティカルソーラリフレクタ（40mm×43mm）と呼ばれる熱制御材が1枚のパネルに約2500枚接着されている。接着の方法は太陽電池とほとんど同じである。

人工衛星は極めて高い信頼性が要求され、実機での熱真空試験、打ち上げ時の振動試験、衝撃波音響試験などが実施されるが、接着の耐久性試験（耐ヒートサイクル性、耐放射線性）と信頼性評価も徹底的に実施されている。

2.3 大型宇宙電波望遠鏡

図9¹⁴⁾は、宇宙の起源を探る口径45mの大型宇宙電波望遠鏡（国立天文台野辺山電波観測所）である。この電波望遠鏡は、遠い宇宙から来る微弱なミリ波領域の電波を観測するため、反射面にはきわめて高い鏡面精度が要求され、反射面全体で0.1mm(RMS)以下の精度が必要である。この反射鏡は、図9に見られるように、径方向と円周方向に分割された扇形のパネル（図10）

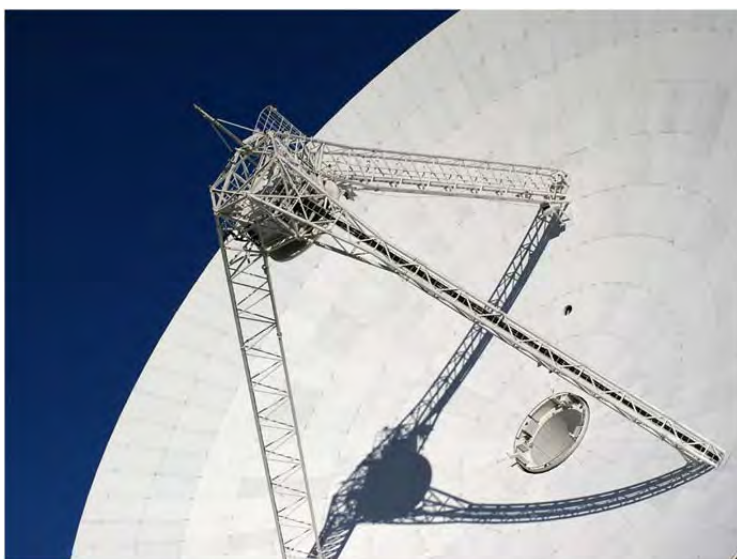


図9. 口径45mの大型宇宙電波望遠鏡(国立天文台野辺山電波観測所) 600枚に分割された扇形の形状が見えている

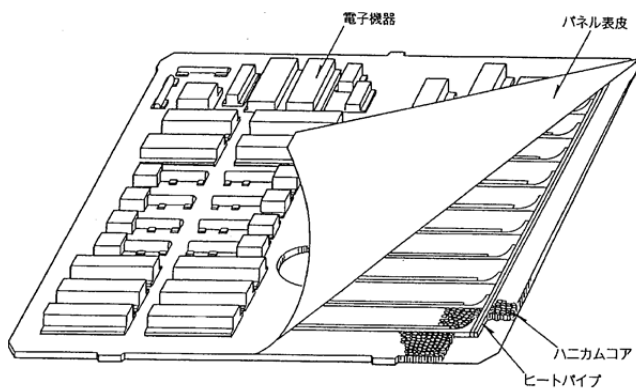


図7. ヒートパイプ埋め込み型パネルの構成

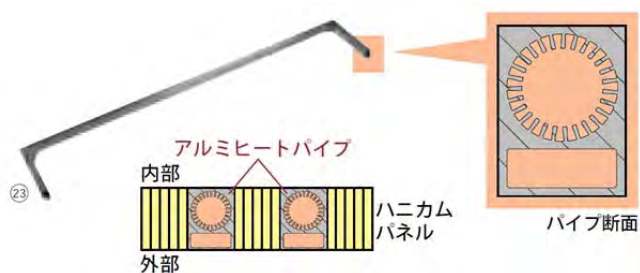


図8. ヒートパイプの形状例



図10. 1枚の扇型パネル

600 枚で構成されている。パネル一枚の大きさは約 $2.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ で、厚さは 100mm で、反射面の精度は 0.05mm (RMS) 以下が必要である。個々の反射パネルには、気温の変化 ($-30 \sim +60^\circ\text{C}$) に伴う熱変形を抑えるために、線膨張係数が小さな CFRP とアルミハニカムコアを用いた 3 次元の曲面サンドイッチパネルが採用されている¹⁵⁾。アルミハニカムコアと CFRP スキンが基材にエポキシ樹脂を含浸させたプリプレグにより接着接合されている。硬化は、一旦接着部の空気を抜いて、その後加圧加熱するオートクレーブという装置を用いて行われるが、パネルの変形を極小に抑え、接着硬化反応を正確にコントロールするために、専用に開発されたプログラムにより制御されている¹⁵⁾。1981 年に完成して既に 35 年が経過しているが、現在も高精度を維持して活躍している。

図 11¹⁶⁾は、水沢、入来、父島、石垣島に設置されている 4 基の宇宙電波望遠鏡の配置図である。この 4 台を連携して観測すると、日本列島の直径に相当する口径 2300km の電波望遠鏡 1 台の精度を得ることができ、国立天文台の VERA

計画で天の河銀河の立体地図作りが進んでいる¹⁶⁾。位置測定精度は、月面上の 1 円玉を観測できるほどの非常に高い精度を有している¹⁶⁾。4 台のパラボラ電波望遠鏡は、それぞれ口径 20m で、鏡面精度は、反射鏡全体で 0.25mm (RMS) 以下が必要である¹⁶⁾。口径 20m の反射鏡は、図 12 に示すように、円周方向と径方向に約 $1.5\text{m} \times 約 3\text{m}$ の扇型パネル 120 枚に分割されている。1 枚のパネルの鏡面精度は、 0.15mm (RMS) 以下が必要である¹⁶⁾。この反射パネルでは、ハニカムパネルは使用されておらず、図 12 に見られるように、アルミ製の反射板の裏面にアルミの形材を溶接で組んだ頑丈なストレッチと呼ばれる補強枠が接合される構造となっている。アルミの溶接でストレッチに高度な寸法精度を出すのはきわめて困難であるため、反射板とストレッチの間には数ミリメートルの隙間が生じる。この隙間を埋めると同時に反射板とストレッチを接合するために接着接合が用いられている¹⁷⁾。秒速 90m (時速 334km) の台風

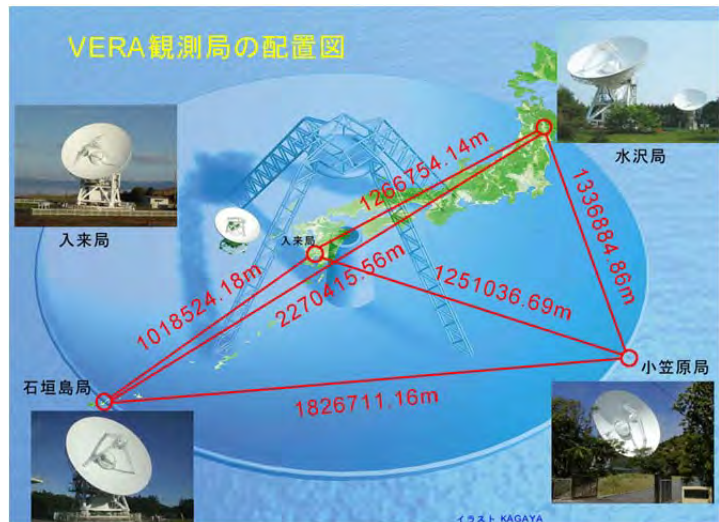


図 11. VERA 観測局の配置図



図 12. 1 枚の反射パネルの構造 (撮影: 国立天文台 宮地竹史氏)

着強度と 30 年以上の屋外耐久性が要求され、接着剤としては二液室温硬化型変性アクリル系が用いられている。接着剤の隙間充填性、低歪み接合性、薄板の高強度接合性などの機能が活かされている。接着剤は低歪み接合が可能であるとはいえ、硬化収縮に伴う内部応力の発生は避けることができない。そのため、硬化後に内部応力を除去するアニールが重要なポイントである。従来は、反射板と補強枠の隙間をエポキシ樹脂で埋めて硬化した後に多数のリベットで固定し、反射面を仕上げるといった方法で製造されていた。直接接着法が採用されてからすでに 15 年近くが経過し、その間多数の大型台風も到来したが、接着部に問題は生じていない。

2.4 大型光学赤外線望遠鏡「すばる」

図 13¹⁸⁾は、1999 年に完成した日本の大型光学赤外線望遠鏡「すばる」(国立天文台ハワイ観測所)で、ハワイ島の標高 4200m のマウナケア山の山頂にある。光を集める凹面鏡は、一枚物としては世界最大級の直径 8.3 メートル(有効口径 8.2m)という大きなもので、超低熱膨張ガラス(線膨張係数： 10^{-8})でできている。しかし、軽量化のためにその厚さはわずか 20cm しかなく、ぺらぺらの状態である。それでも主鏡の重さは 22.8 トンもある。



図 13. 大型光学赤外線望遠鏡「すばる」
(国立天文台ハワイ観測所)

図 14¹⁹⁾の円形の透明の物が主鏡である。反射面はアルミ蒸着前なので透明である。この薄くて重い主鏡を種々の観測方向に向けると主鏡は自重による変形で歪んで観測ができなくなってしまう。そこで、「すばる」では、図 14 に示すように、261 本のアクチュエーターによって常に鏡を理想的な形に保つ能動制御方式がとられている。アクチュエーターは 10g の分解能で力制御可能である。もし、アクチュエーターを使用する能動制御方式でなければ 1.4m

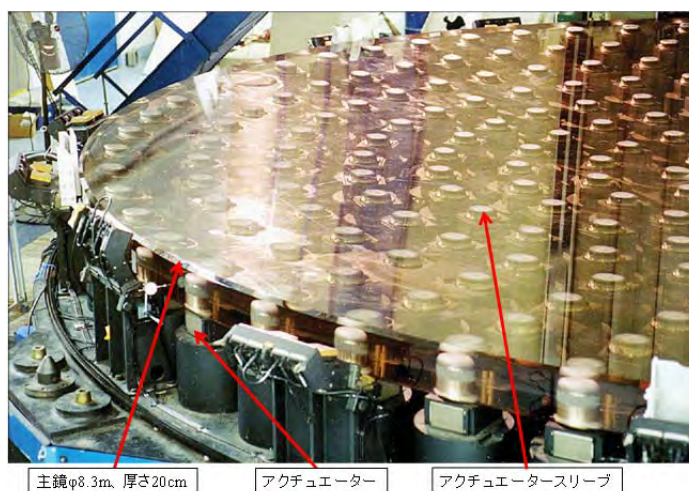


図 14. 主鏡とアクチュエーター

もの厚さが必要となり、重量は 175 トンにもなる¹⁹⁾。図 14 でぽつぽつと見えるのは、主鏡のガラスに彫り込まれてアクチュエーターの首が埋め込まれている部分である。主鏡のガラスに掘られた 261 カ所の深さ 15cm の穴にはスーパーインバーという線膨張係数が小さな金属製のスリーブが接着固定されている。図 15¹⁹⁾は、スリーブとガラスの接着試験体であり、スリーブの形状と分割された接着部が見える。

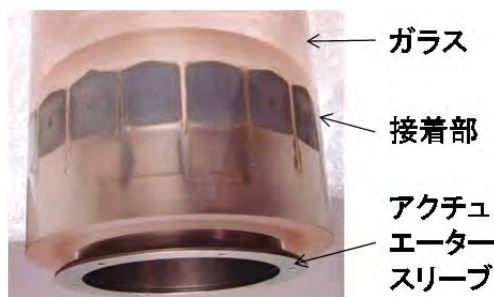


図 15. スリーブとガラスの接着試験体

また、主鏡を支えて動かす部分は、**図 16²⁰⁾**の左側に見える固定点と呼ばれる支持部分で、3カ所の固定点で主鏡全体が支えられている。固定点はやはり線膨張係数が小さいスーパーインバーという金属で作られており、直径は約30cmで、**図 17²¹⁾**に示すように、36カ所の花びら状に並んだ固定点パッドで主鏡と接着されている。

これらのガラスと金属の接合には、まさに接着剤の異種材料接合性が生かされている。温度変化や外力によってガラスの接着部に大きな力が加わると割れる危険性が高くなるので、接着剤には、柔らかい二液室温硬化型エポキシ系接着剤が使用されている。

宇宙の始まりと生命の起源に迫る新しい目として、現在、日、米、加、中、印の国際協力によって、2019年完成を目標に、ハワイ島マウナケア山頂に、**図 18²²⁾**に示す対角1.44m、厚さ4.5cmの正六角形鏡492枚で構成する口径30mの次世代超大型反射型望遠鏡(TMT)の建設が始まっている。TMTでも能動制御方式やミラーの固定パッドへの接着など、「すばる」で培った技術がさらに進化して搭載される予定である。

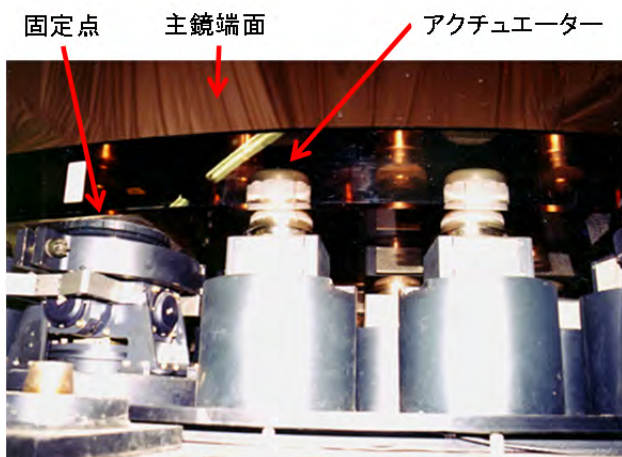


図 16. 主鏡を支える固定点



図 17. 主鏡の表側から見た固定点パッドの接着状態

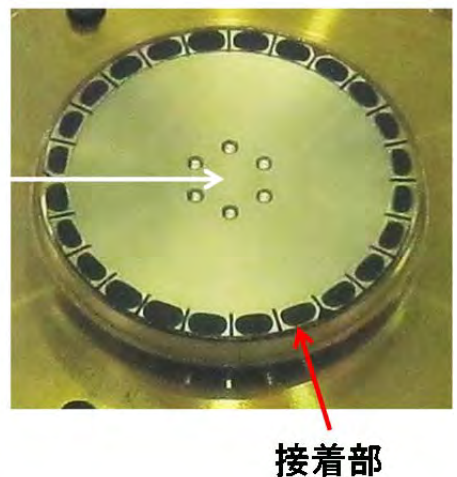
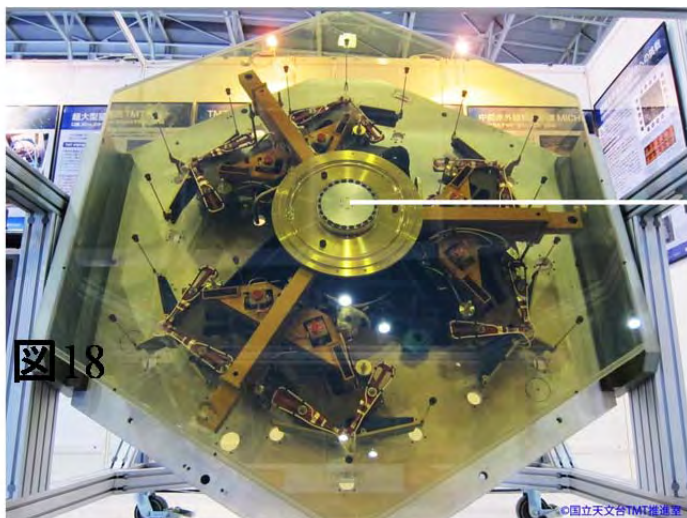


図 18. 支持機構に搭載された分割鏡と固定パッドの接着部の拡大図(試作品)

3. 日本の構造接着技術の現状

ここまで述べてきた適用例を眺めると、日本の構造接着技術は非常に高いレベルであると思われるかもしれない。まえがきで、「接着剤による接合組立はさまざまな産業分野でさまざまな機器に使用されており、現在では、組立の重要な要素技術となっている。」と書いた。しかし、広範な産業分野のさまざまな機器組立において、接着接合が構造組立の要素技術としての位置づけを得ているかとなると、決してそうとは言いがたい状況にある。他の接合方法にはない接着の特徴を活かした積極的適用は限られており、他に適当な接合がないため仕方なく使わざるを得ないというのが正直なところである。

日本の構造接着技術が欧米に遅れた理由としては、戦後の日本には構造接着技術の牽引役となる産業、即ち航空機産業が独自技術として育たなかったためと考えられる。一方、日本では造船業は大きな産業に育ったため、鉄鋼技術や溶接技術は世界一のレベルに達している。構造接着技術の牽引役がなかったことは、研究・開発リソースの少なさ→研究・開発技術者の少なさ→構造体組立への接着採用の発想の少なさ→構造接着適用事例の乏しさという悪循環をもたらす結果となり、高度な適用は、限られた企業や限られた分野に限定されてしまった。

ここに来て、地球環境保護の点から、自動車の車体軽量化やモーターの省エネルギー化が大きな課題となり、車体への軽量金属や軽量高強度複合材料の採用やモーターの永久磁石化が急務となり、異種材料接合の点から構造接着の採用が避けられない状況となっている。先進メーカーの技術を短時間に取り込んで独自の技術に発展させるにも、接着は多くの技術の境界領域の技術であり、非破壊検査や耐久性予測など検証試験の難しさも相まって、短時間での挽回には相当な努力が必要である。ようやく、国の補助金による技術開発支援なども始まり、産業界においても構造接着技術開発の必要性が唱えられ始めたが、技術者の育成と汎用接合技術への到達にはまだ時間を要すると思われる。

4. 今後接着接合技術が期待される分野

安全、安心、健康で持続可能な社会の構築がキーワードである事は間違いないであろう。CO₂削減による地球環境保護では、先にも述べたように、自動車の車体軽量化は喫緊の課題であり、接着接合が随所に適用されるであろう。また、電力の総発電量の60%を消費しているモーターの永久磁石化における接着技術も大きなニーズがある。インフラの老朽化対策や既存建造物の耐震補強への接着の適用も多くニーズがある。また、化学プラントや既存ビルでの補修・改修工事や船舶の擬装工事のような密閉空間での工事においては、溶接のような火気の使用が嫌われており、接着などの火気レス工法への期待が増加している。さらに、電気・電子・光学機器などの精密組立においては、部品加工時の仮固定用接着剤や、分解修理を可能とするリペアラブル接着剤の要求も多い。精密機器では、医療機器の進歩に伴う新たな用途も増加している。生体治療における接着の適用は日々進化しており、大きな分野になるであろう。

5. 安全、安心、健康で持続可能な社会を築くための技術の基本

多くの新技術によって便利な社会が訪れたことは否めない。しかし、その一方で、新技術が新た

な地球環境問題を生み出し、社会のシステムや個人の生活を危険にさらしていることを忘れてはならない。自動車への炭素繊維複合材料の使用は、CO₂削減の切り札のように叫ばれており、関連する種々の技術開発に企業も技術者もしのぎを削っているが、自動車のような大量消費財にまで炭素繊維複合材料が大量に使用されるようになれば、これまでの多くの新技術がそうであったように、気がついた時には取り返しの付かない新たな問題が発生していることは間違いないであろう。新技術の開発、採用、製品化においては、目先の課題解決や経済的メリットばかりでなく、地球、社会、個人へのデメリットも熟考しながら進めることが重要であり、企業や技術者が最低限果たすべき社会的責任である。

接着剤による接合は、被着材料と接着剤という異なる物性の物質が、界面というややこしい部位を有しながらの接合であり、非破壊での強度測定は困難で全数検査は不可能である。このため、ばらつきが少なく不良率が小さい高品質を確保するためには、接着の実力と限界を明確にして、他の接合方法とは異なる設計法や品質管理方法を考える必要がある。接合部の不良で最悪なのは、瞬間的な破断・分離である。接着剤による接合部といえども、接着剤だけにこだわることなく、金属接合など従来から実績のある他の接合法との併用（複合接着接合法）などで破壊に対する冗長性を向上させる事は重要である。接着の技術がいくら進んだとしても、必ず欠点は有るものである。欠点を熟知して、欠点を他の方法でカバーすることは信頼性の観点から必要である。

6. 接着管理士への提言

接着管理士は、シーズとニーズの強力なつなぎ役になっていただきたい。例えば、既存の接着剤そのままではニーズに対応できない、ニーズ側の要求を押しつけても満足する接着剤はすぐには出来ない。ニーズ側とシーズ側の相互理解で最適解を見つけ出すことが大切である。このためには、相互の技術情報を共有できる関係作りが重要であるが、相手側の技術情報を理解できるだけの知識や技術力を身につけることが必要である。欠点のない製品や技術という物はありえないのだから、隠さず積極的に説明して、それをカバーするための方策を共同で検討する事も大切である。

製品や技術の特徴や性能をプレゼンする際の論理性をしっかりと身につけていただきたい。データや理論の羅列では相手に理解してもらうことは困難である。論理的に考えることで、矛盾点や新たな課題の発見も出来る。

解決すべき課題に対しては、挑戦することを喜びとし、とことん考え続けていただきたい。とことん考えていると、身体が別のことをしていても脳は24時間働き続け、ある時に思いもかけない発想が生まれるものである。

疑問点はやってみること。頭の中や理論だけで考えていても問題解決には繋がりにくい。特に、接着のような複雑な系では単純な理論で説明できることはきわめて少ない。疑問点が生じたら、仮説をたてて結果を予測して、労をいとわず、まずはやってみることである。予測した結果と実験結果は大きく異なるかも知れない。異なればそこに潜んでいる新たな課題が見えて来るであろう。

基礎をしっかりと身につけていただきたい。いくら先進技術の知識を多く持っても、基礎ができていなければ砂上の楼閣である。特に接着技術は、学校でほとんど教えられていないため、教科書的な基礎知識を持たないまま、新技術に取り組んでいる技術者を多く見かける。接着の課題は、先進技

術だけで片付く物はほとんどなく、逆に、多くの基礎的な正しい知識の連携で解決出来ることが非常に多い。

外乱に惑わされないで欲しい。日本人はイノベーション欠乏症とよく言われる。筆者は必ずしもそうではないと思っているが、否めない面も多い。海外メーカーが画期的製品を生み出すと、濁流のごとく押し寄せてくる技術情報に踊らされ、取り付かれたようにこぞって類似の開発に邁進している姿をよく目にする。これでは先行例がない独創的、革新的技術や製品が生み出せないのは自明である。画期的技術や製品が発表された時、その開発の目的、背景、メリット、構造・材料・プロセスだけに興味を持つのではなく、そこに潜んでいる課題を見抜くことが大切である。

7. あとがき

事例で示した高度な適用は、一朝一夕にしてできたものではない。革新的な事へ挑戦する喜びを持って、シーズとニーズのマッチングを図りながら、考えて考えて考え続けながら幾多の苦難を乗り越えて、ようやくと得られた成果である。多くの事例に筆者は直接携わったが、壁にぶち当たりながら試行錯誤を繰り返して解決に至った開発裏話を文字として書けなかったことは残念である。

何度も述べてきたが、接着剤は、ボルト・ナット、リベット、溶接、ろう付け、かしめなどのように、設計者が容易に構造設計に取り入れられる状況にはほど遠い。設計基準や検査方法が不明確な方法を採用することは、大きなリスクと多大な評価試験や開発費が必要であり、設計者は、接着剤を用いない構造を常に模索し続けている。接着「剤」ではなく接着「材」と言える位置付けを得るには、接着技術を接着剤中心に考えるのではなく、「接着工学」として関連技術全体で体系付けて、その中で接着材のあるべき姿を創成することが今後の大きな課題である。

新たに接着管理士になられた皆様も、シーズとニーズのマッチングを図るために、挑戦する喜びと苦しみを自分の物として業務に邁進していただければ幸いである。

参考文献

- 1) JAXA 宇宙航空研究開発機構 HP http://www.jaxa.jp/countdown/h2bf2/overview/h2b_j.html
- 2) JAXA 宇宙航空研究開発機構 HP <http://www.rocket.jaxa.jp/basic/knowledge/fairing.html>
- 3) Kawasaki News, No. 156 (Autumn 2009).
- 4) アルミエージ (日本アルミニウム協会), No. 145 (1999年6月号).
- 5) 先端材料技術協会/野口元監修 ; 「ハニカム構造の応用と機能—ハニカム構造材料からナノハニカム構造まで—」 (シーエムシー出版) P. 26 (2008)
- 6) 気象庁報道発表資料「静止地球環境観測衛星 (ひまわり 8号及び9号) の入札結果について」 (2009年7月17日)
- 7) JAXA デジタルアーカイブス
<http://jda-strm.tksc.jaxa.jp/archive/photo/50P2007000699/a52a726347dba60f6d9ae2db5e970cbe.jpg>
- 8) 「日本の宇宙産業—宇宙を開く、産業を拓く—」 (JAXA 宇宙航空研究開発機構編, 日経 BP コンサルティング刊), V01. 1. 1, P. 82 (2011年1月)

- 9) 原賀康介：“構造接着技術の応用展開と最適化技術の構築”、日本接着学会誌、
Vol. 39, No. 9, 349(2003)。
- 10) 井上登志夫；”宇宙機器に応用されるハニカムサンドイッチ構造”、工業材料、
Vol. 38, No. 9, 39(1990)
- 11) 原賀康介：“反応型接着剤の電機・電子機器での応用”、接着の技術誌、Vol. 17, No. 1, 64(1987)。
- 12) 今谷敏夫、桜井也寸史、小林右治、風神 裕、大村勝敏；三菱電機技報, Vol. 65, No. 10, 34(1991)
- 13) アルミエージ（日本アルミニウム協会）No. 145(1999年6月号)
- 14) 国立天文台 HP
http://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/html/pictures/photo/image6/img201_1600.jpg
- 15) 田嶋尚志ほか；三菱電機技報, Vol. 56, No. 7, 31(1982)。
- 16) VERA10 周年記念事業実行委員会編「VERA10 周年記念誌」（国立天文台）（2012年10月）
- 17) 原賀康介：“構造接着の応用展開と最適化技術の構築”、日本接着学会誌、Vol. 39, No. 9, 349(2003)。
- 18) 国立天文台すばるホームページ
http://subarutelescope.org/Gallery/gallery_images/dome_subaru2_s.jpg
- 19) 中桐正夫：国立天文台天文情報センターアーカイブ室：アーカイブ室新聞 2010年10月4日、第
387号（http://prc.nao.ac.jp/prc_arc/arc_news/arc_news387.pdf）
- 20) 国立天文台すばる望遠鏡 HP http://www.naoj.org/Introduction/j_tech.html
- 21) 国立天文台ニュース No. 245 P. 17 （2013. 12）
- 22) 国立天文台 HP <http://www.nao.ac.jp/news/topics/2013/20130604-tmt.html>