

H-II B ロケットタンク構造の高信頼性化

Tank Structure of H-II B Launch Vehicle with High Reliability



後藤 智彦*1
Tomohiko Goto

坂口 秀明*2
Hideaki Sakaguchi

佐藤 広明*3
Hiroaki Sato

山田 毅*4
Takeshi Yamada

田中大助*5
Daisuke Tanaka

原 英統*6
Hidenori Hara

H-II B ロケットは、推進薬タンク構造の高信頼性化を図るために、社内研究で新たに開発された2つの製造技術を採用する。1つ目は、タンク構造組立に摩擦攪拌接合 (FSW) を適用し、ポピンツールと呼ばれる接合工具で機軸方向並びに円周方向に接合を行い、タンク全体の高信頼性化を図る。2つ目は、スピニング成形による大型一体成形ドームの採用であり、H-II A ロケットの海外調達依存から脱却し、自律性確保を図る。本稿では、上記技術開発の成果、及び実機適用に向けた今後の開発計画を報告する。

1. はじめに

ロケット推進薬タンクは、当社宇宙事業のコアコンピタンスの1つであり、日本の基幹ロケットであるH-II A ロケット用だけでなく、米国Boeing社のDelta IVロケット用として輸出を行っている。また、当該技術を活用して国際宇宙ステーションの与圧モジュールの開発も行っている。

この推進薬タンクの高信頼性化を図るために、当社では次の2つの製造技術を開発してきた。

- (1) 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, 以下 FSW)
- (2) スピニング成形による大型一体成形ドーム

これらの技術はH-II B ロケットに適用すべく、実機製造設備・プロセスの開発を進めている。H-II B ロケットの開発は官民合同で進められ、民間が主体性を持って行う開発であり、当社は社内試験研究により培われた上記技術を核とした開発計画を(独)宇宙航空研究開発機構 (JAXA) に提案し採用された。

本稿では、上記技術開発の成果、及び今後の開発計画について報告する。

2. H-II B ロケット推進薬タンクの概要

H-II B ロケットは、H-II A ロケットの打上能力向上を図り、国際宇宙ステーション軌道へのHTV (H-II A Transfer Vehicle) の打上げや、商業打上げにおける国際競争力の向上を主目的としたロケットである (図1)。現行のH-II A ロケットからの主要な変更点を以下に示す。

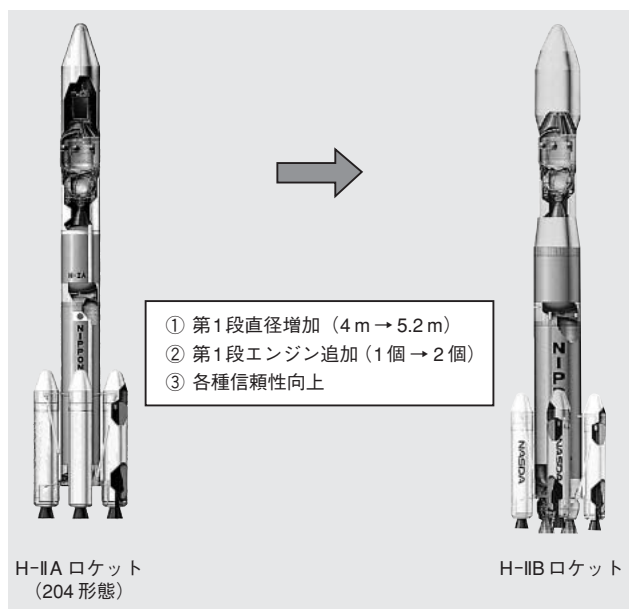


図1 H-II B ロケットにおける主な変更点 現行のH-II A 204形態からH-II Bへの主要変更点を示す。

- ① 第1段コア機体の大型化(直径を4 mから5.2 mへ)
- ② 第1段エンジンLE-7Aのクラスター化 (1機から2機搭載へ)
- ③ 各種信頼性向上対策の採用

上記変更に対応して推進薬タンクを新規に開発する。推進薬タンクは極低温の推進薬 (-253℃の液体水素, -183℃の液体酸素) が充填・加圧され、内圧荷重だけでなく飛行中や射点起立時の空気力及び自重により負荷される全機荷重に耐荷することが要求される構造体である (図2)。第1段タンクは直径5.2 m, 全長は各々約7 m (液体酸素タンク) と約20 m (液

*1 名古屋航空宇宙システム製作所宇宙機器技術部主席

*2 名古屋航空宇宙システム製作所大江工作部生産技術課主席

*3 名古屋航空宇宙システム製作所研究部材料研究課主席

*4 名古屋航空宇宙システム製作所大江工作部生産技術課 エネ博

*5 広島製作所機械工作部生産管理課

*6 名古屋航空宇宙システム製作所宇宙機器技術部構造設計課

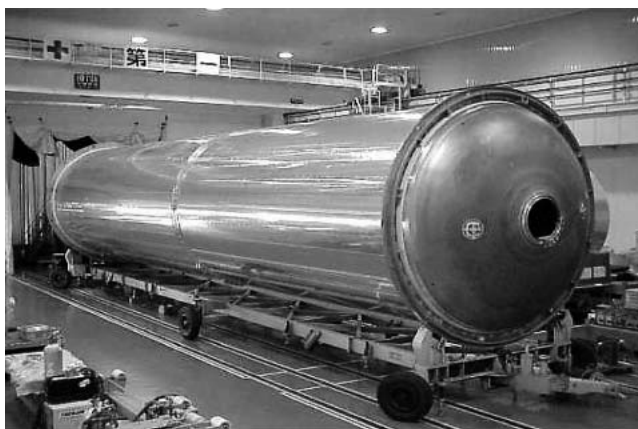


図2 ロケット推進薬タンク外観 ロケットタンクの代表例として、現行のH-IIAロケット1段液体水素タンクの外観を示す。

体水素タンク)であり、合計約170tの推進薬を搭載する。タンクの主構造はアルミ合金製で、アイソグリッドと呼ばれるリブ一体削り出しパネルを曲げ成形したものを機軸方向に溶接したシリンダ部と、スピニング成形一体ドーム(鏡板)を円周方向に溶接して製作される(図3)。

現在は、溶接方法としてTIG(Tungsten Inert Gas)溶接を採用しているが、アルミ合金の熔融溶接に共通する前処理作業に長時間を要すること、及び安定した溶接施工維持の難しさ(特殊認定作業)により、高品質を維持する労力が極めて大きい。したがって、前処理が不要で作業時間短縮が可能、プロセスの安定性が高いFSWを適用することにより、高信頼性化の実現が可能である。

一方、ロケットタンクに適用できる高品質な大型一体成形ドームを製造できるメーカーは海外2社程度であり、現状のH-IIAロケットはこれら2社から海外調達している。ドームという主要部品を国産化すること

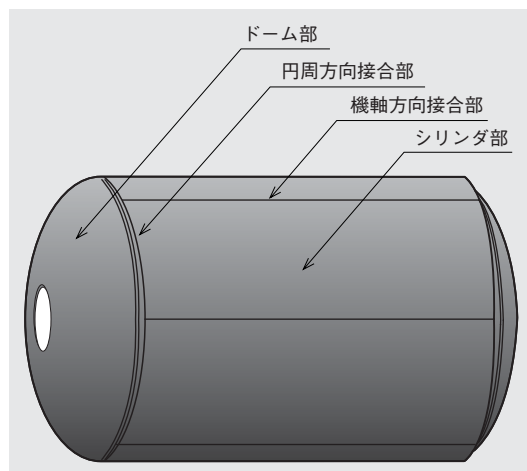


図3 ロケットタンク主構造の構成 ロケットタンク主構造の部品構成、接合部の位置関係を示す。

で、課題であったロケットの自律性確保・品質安定化が可能である。

3. ロケットタンクの製造技術開発

3.1 摩擦攪拌接合

FSW(摩擦攪拌接合)は、1990年代に英国TWI(The Welding Institute)社により発明された接合方法で、突起部を有する工具を回転させながら接合部に押し当て、摩擦による発熱で材料を軟化させながら攪拌して接合する技術である。プロセスの安定性や接合の高速化といった特徴に後押しされ、鉄道や船舶をはじめ産業界に広く適用が進んでいる技術である。

現在のところ主な適用対象は長手方向(ロケットタンクでは機軸方向)の接合部に限定されている。その理由は、上記の摩擦による発熱を生み出すために工具を材料に押し当てることから、工具の裏面側に大規模な当て金を設けて工具の押し当て荷重の反力をとらねばならないからである(図4の従来方式)。円周方向接合部に適用すると、このような当て金をタンク内部に設ける必要があり、すべての接合を完了した後に当て金をタンクの外に運び出す必要がある。特にロケットタンクのような大型の容器では当て金が大きく、非効率で危険な作業となる。

そこで、当社はFSWをロケットタンクに適用するに当たり、ポピンツールと呼ばれる接合工具を実用化した。本工具は接合荷重を工具の内力系で釣り合わせることが可能となり、当て金なしでもFSWが可能となる(図4)。これにより、直線方向及び円周方向の接合部にFSWを適用可能とした。世界の他ロケットにおいても、ロケットタンクの円周方向接合部にFSWを適用した事例は未だ報告されていない。FSWをロケットタンクにも適用することで、表1に示す効果が得られる。

平成12年度の社内研究で最適な工具形状・部品保持

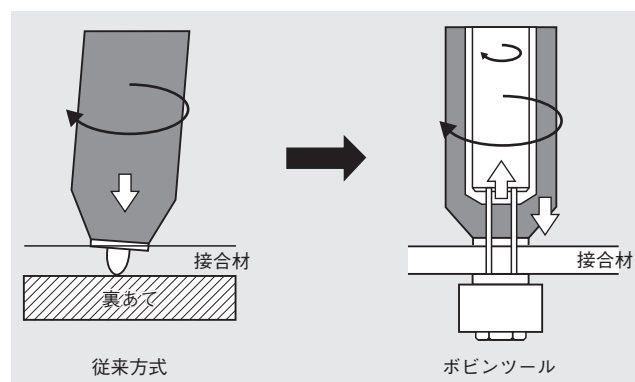


図4 ポピンツール方式接合工具の概念 従来方式の工具とポピンツールの比較。ポピンツールは工具の内力系で接合荷重をとっている。

表1 ロケットタンクへのFSW・ドーム国産化の適用による効果

項目	主な効果
FSW	(1) 信頼性向上 ・機械加工に近いプロセスであり接合の安定性向上 ・材料組織改善（非溶融・攪拌による組織細粒化）による良好な継手特性（強度・靱性の向上） ・継続的に安定して高品質に接合ができる継手板厚の増加（タンク直径大型化への対応） (2) 価格競争力向上 ・接合前処理の簡素化 ・溶接時間の短縮（検査も含む） (3) 発展性 ・軽量なアルミリチウム合金の接合が可能（溶融溶接では不安定）
ドーム国産化	(1) 自律性向上 ・輸出許可取得の制約排除 ・納期管理や緊急対応の改善 ・木目細かい品質管理の実現 (2) 価格競争力向上 ・海外メーカーの半独占状態からの脱却



図5 サブスケールタンクによる加圧試験の様子 スピニング成形で製作したドームをFSWにより接合して組立したサブスケールタンクの加圧試験の様子を示す。

方法・基本接合条件を明確にした。平成13年度にはサブスケールタンク（直径約1 m）の円周接合を行い、加圧試験により実機運用時の1.5倍以上の応力レベルを溶接部に負荷して強度を確認した（図5）。上記をもとにプロトタイプのFSW装置を試作し、H-IIAロケット標準型と同じ直径（4 m）を有する部品を用いた機軸方向溶接（平成14年度、図6）、円周方向溶接にそれぞれ成功し（平成16年度、図7）実用化の目処を得た。また、接合部の継手特性や非破壊検査方法についても併せて確認し、実機適用への準備を整えた。

3. 2 大型スピニング成形ドーム製造技術

スピニング成形とは、回転させた板材に加工工具を押しつけて塑性変形を与えて所望の形状にする成形方法である。比較的小型で精度・強度要求の低い部品では、一般的な成形方法である。ところが、ロケットタンクに使用する熱処理された高強度のアルミ合金製の大型・薄肉・高精度のドームは、製作ができるメーカ

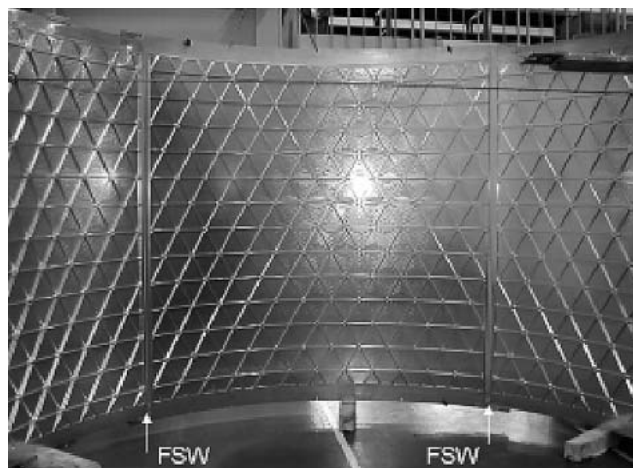


図6 FSWによる機軸方向溶接部 直線方向接合により実機大部分を良好に接合した。

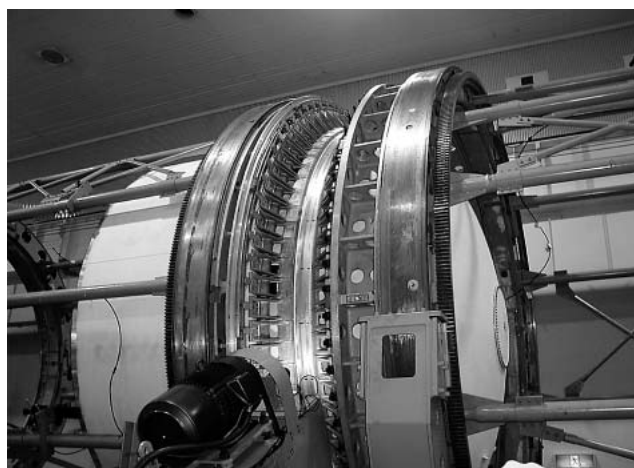


図7 FSWによる円周方向接合試験の様子 円周方向接合試験の様子を示す。

ーは海外に2社程度あるだけで、国内には存在しない。

そこで、平成12年度から社内研究で上記に対する基本的なプロセスを設定し、サブスケールのドーム試作を行った（図8）。当該ドームは前述のとおり、加圧試験により強度を確認している。また、2種類の異なる直径のドームを用いて、スピニング成形において



図8 ドーム試作品（直径900 mm） サブスケールサイズのドームをスピニング成形により試作した。

相似則が成立していることも確認できたため、この相似則に基づき実機サイズのスピニング成形条件を設定した。

ドームの材料は成形後に熱処理を行うことで設計上要求される材料強度を達成することが要求される。一方で、薄肉（最も薄いところで5 mm以下）で変形し易いにもかかわらず高い形状精度が要求されるため、機械加工時の過大な変形を避ける必要がある。したがって、焼入れ時の過大な部品の熱変形を避けつつ要求強度を達成するために、木目細かい冷却速度の管理ができ、ドーム全面で任意の冷却条件を与えることが可能なスプレー方式の焼入れを採用した。

上記成果をベースに、大型機械装置の開発実績が多く、既存工場設備の有効活用が可能な当社・広島製作所において実機ドームの開発を進める計画である。ロケットタンクドームの開発によって得られる効果を表1に示す。

4. H-II Bロケットへの適用計画

次にH-II Bロケット適用に向けた開発状況、及び今後の計画について報告する。現在、FSW及び大型スピニング形成ドームを含むタンク製造設備を製作中である。並行してJAXA契約で要素試験を行い、工作試験の事前検証を進めている。平成16年度には、実機大ドーム（直径約5 m）の1/4周供試体を用いて、焼入れ時の冷却性能確認試験等を行った（図9）。タンク設備が完成する平成18年度には工作試験を行い、生産条件の最終確認・技術要求を満足していることの確認（材料特性確認試験等）を行う。その後、認定試験用タンクを製作して、タンク構造体としての開発を完了する。実機適用は、平成20年度以降の見込みである。



図9 ドーム焼入れ性能確認試験
実機ドームの1/4周を模擬した供試体により、スプレー焼入れ方式の焼入れ装置に関する冷却性能を確認した。

5. ま と め

H-II Bロケットタンクにおける2つの新規製造技術の開発状況と今後の計画について報告した。H-II Bロケットは、従来以上の短期間開発、初の官民合同開発、さらには初号機のペイロードであるHTV打上時期に関する国際的な責任等、従来以上に確実な開発が求められる【Mission】。これまで蓄積してきた成果をベースに、十分にリスクを事前検証し【Prediction】、関係者一丸となって開発目標を達成していく【Commitment】。名古屋航空宇宙システム製作所のスローガンであるM・P・Cを確実に遂行し、信頼性で世界をリードするロケットタンクを開発していきたい。

参 考 文 献

- (1) http://www.JAXA.jp/index_j.html (JAXAホームページ)



後藤智彦



坂口秀明



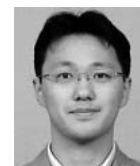
佐藤広明



山田毅



田中大助



原英統