

ロケットの信頼性を守る 材料試験・評価方法

宇宙という特殊な空間で、使用される材料の信頼性向上が求められている。そのために重要なのが、材料特性を正しく試験し、評価する技術であり、新たな材料試験・評価方法の開発が進められてきた。日本の科学技術の最先端を行く宇宙ロケットを支える材料試験について紹介する。

現在の日本の主力大型ロケットであるH-IIAロケット。多様な人工衛星・探査機の打ち上げを高い信頼性と低コストで行うコストパフォーマンスに優れたロケットとして評価が高い。(写真は2014年2月の23号機の打ち上げの様子) ©JAXA

宇宙ロケットエンジンの中の過酷な環境

轟音とともに、空へ向かって打ち上げられる宇宙ロケット。その重量は約289 tである(H-IIAロケットの場合)。巨大なロケットを重力に逆らって打ち上げるため、宇宙ロケットのエンジンには大きな推力を生み出すことが求められる。外からは見えないエンジンの中は壮絶な高温と高圧の世界であり、使用される材料にとっては実に過酷な環境である。

例えば温度に注目すると、燃料である液体水素の温度は-253℃である。この極低温の燃料はターボポンプで約28MPaに昇圧され、エンジン内のプリバーナで燃焼され、550℃のガスになる(図1)。このガスはターボポンプを回した後再び燃焼室で燃焼される。燃焼室の中では、液体酸素が多数のノズルから噴射され、一気に燃焼される。その様は燃焼というより爆発に近い。こうして発生した燃焼ガスは約3,000℃で、これをノズルスカートから下方に噴射して膨大な推力を得る。この燃焼時に使用される燃料は、液体水素と液体酸素を合わせて毎秒ドラム缶3.5本分(一般的なドラム缶1本は200ℓ)に及ぶ。

これほどの温度変化と圧力に耐えるエンジンだが、その作動時間は高々400秒程度に過ぎない。第一段エンジンは、打ち上げ後に重量低減のためにすぐに切り離されるからである。

このような特殊な作動条件で、設計どおりの性能と信頼性

を実現するため、宇宙ロケットエンジンの開発には、日本の科学技術の粋が投入されてきたのである。

ロケットエンジンで何が起こったのか

1999年11月、当時の宇宙開発事業団(NASDA、現宇宙航空開発機構(JAXA))種子島宇宙センターにおいてH-IIロケット8号機が打ち上げられた。発射から239秒後、突然、第1段エンジンの燃焼が停止した。これは、計画よりも約107秒も早い停止であった。その後、第2段エンジンが燃焼を開始したが、姿勢異常のため高度は低下し、さらにロケットから送られる各種データが受信不能となった。この事態を受け、発射の459秒後、管制室ではロケットに破壊コマンドを送信し、ロケットは太平洋上で強制的に破壊された。この時に搭載されていたエンジンはLE-7エンジンであり、1994年のH-IIロケット試験機1号機打ち上げ以来実績のあるエンジンであった。

事故後に行ったテレメトリデータ(ロケットから発信される数値データ)の解析によれば、エンジンは打ち上げ後238.5秒から約0.2秒の間に、燃料である液体水素の漏れ、ターボポンプの停止、プリバーナの燃焼温度上昇などの異常が起っていたことが明らかになった。

この事故の原因を調査するため、NASDAは、落下した第1段

エンジンの探索を行った。その結果、太平洋の小笠原沖の海底に第1段エンジンがあることがわかり、深さ3,000 mの深海からこのエンジンを引き上げることに成功した。調べたところ、エンジンのターボポンプ内部にある、インデューサという部品が破損していることがわかった。

インデューサは、ターボポンプの中で毎秒700回的高速回転をして燃料の液体水素を毎秒500 lの勢いで流し込む役割を持つ、プロペラ形の部品である(図2)。軽量かつ高強度が要求されるため、材料には高強度チタン合金Ti-5Al-2.5Sn ELI*が使われていた。回収したインデューサでは、プロペラの羽根の部分がちぎれたような破損状態であった。

この材料の調査が、当時の金属材料技術研究所(NRIM、現物質・材料研究機構(NIMS))に委託された。インデューサの破損した部位の破面を走査型電子顕微鏡(SEM)などで詳細に観察したところ、疲労破壊時に現れるストライエーション(すじ状のしま模様)が見られた(図3)。観察結果を元に、インデューサに何が起って疲労破壊につながったのか、以下のような推測がなされた。インデューサは高速回転してターボポンプ内に極低温の液体水素を吸い込む役割を果たすが、減圧制御時に発生するキャビテーション(流れの中で圧力差により泡が発生する現象)による変動応力と、流れの乱れと羽根との共振により定常的に生じていた変動応力があり、この2つの応力が複合して加わったことで疲労破壊が生じたのではないかと、いうのである。

このような調査結果を受け、LE-7の後のLE-7Aエンジンではキャビテーションが発生しないように、液体水素を吸い込むターボポンプの入口配管やインデューサ等の形状の改良が行われた。

*ELI: Extra Low Interstitial elements, 「酸素、窒素、水素及び鉄の含有率を特別に低く抑えている」ことを表している。

宇宙空間の特異性——地球上と何が違うのか

地球の大気は、概ね高度100 kmまでであるが、それより上は空気のない真空の世界である。大気に守られている地球上と異なり、太陽光の当たる側と逆側に大きな温度差が生まれる。例えば月面は、 10^{-8} ~ 10^{-14} Paの超高真空で、 -175°C ~ 125°C という大きな温度変化がある。温度だけでなく、太陽などから届く強い放射線や紫外線が降り注ぐ。宇宙空間で使用される材料は、このような環境の中でも宇宙飛行士や搭載機器を守らなければならず、長期間使用ができる耐久性が求められる。

宇宙ロケットや人工衛星、搭載機器など、宇宙空間で使用するものを開発する際には、スペースチャンバという、模擬的に宇宙空間の



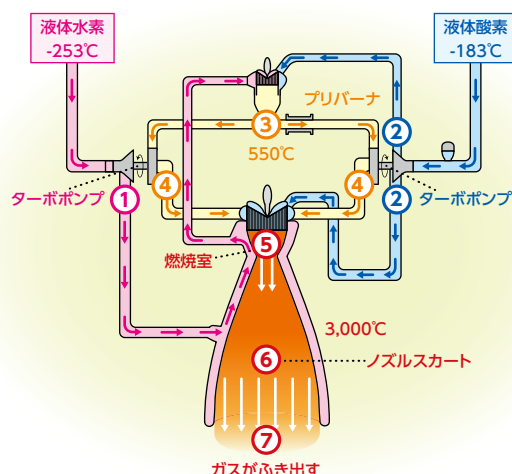
筑波宇宙センターで行われた
月周回衛星「かぐや」の熱真空試験
©JAXA

環境を再現する装置を使い、使用する温度範囲で動作できるかどうかの綿密な試験が行われる。宇宙空間では、単に真空であるというだけでなく、大気がないため対流による熱伝達がなく、どのように熱影響を受けるかを調査するには、スペースチャンバによる試験が重要となる。

日本にはなかった宇宙関連材料データ

当然のことながら、LE-7エンジンでインデューサを設計した当初、疲労強度についての検討も行われていた。しかし、設計の

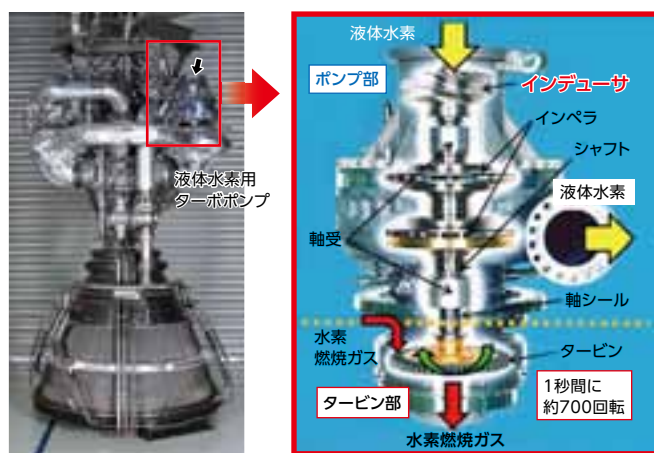
ロケットエンジンの燃焼のしくみ(図1)



- ① 液体水素は、ターボポンプの作動によりノズルスカートと燃焼室を冷却してから、プリバーナへ流れ込む。
- ② 液体酸素は、ターボポンプで体積比90:10に分けられる。
- ③ 液体水素と液体酸素(10%)はプリバーナで燃焼され、550℃のガスを発生し、水蒸気と水素になる。
- ④ 水蒸気と水素が、ターボポンプを回転させる。
- ⑤ 水蒸気と水素は燃焼室に送られ、液体酸素(90%)と混合、燃焼されて3,000℃のガスを発生する。
- ⑥ 3,000℃のガスが、ノズルスカートで急激に膨張する。
- ⑦ 膨張したガスが、4,300 m/秒で噴射する。

(JAXA「ロケットガイドブック」資料を元に作成)

宇宙ロケットエンジン(LE-7A)と液体水素用ターボポンプ(図2)



液体水素用ターボポンプは、液体水素をロケットの燃焼室へ送る役目を持つ。ターボポンプ内へ液体水素を高速で流し込むのがインデュースである。

(JAXAホームページより)

事故後のインデュースの観察(図3)



疲労破壊したインデュースの破面に残っていたストライエーション(SEM)

(資料提供:物質・材料研究機構)

根拠となった極低温疲労強度データは、材質は同じチタン合金(Ti-5Al-2.5Sn ELI)であったが、材料の形状は異なっていた。参考としたデータは、アメリカ航空宇宙局(NASA)が発表した厚さ2.5 mmの薄板材のデータと、NRIによる90 mm角材のデータであった。

実際に使われたインデュースの材料は、日本国内で作られた、より大きな直径の鍛造材であった。つまり、ブロック状の材料から羽根状のインデュースの形状に削り出して製作したものであり、板材や角材と特性が異なることは十分に考えられる。また、同じ鍛造材であっても、結晶粒径が異なれば疲労強度も異なる。例えば、小さな径の鍛造材と大きな径の鍛造材では平均結晶粒径が異なり、特に極低温下では疲労強度や破壊靱性が大幅に異なることもありうる。

このような経緯により、当時、極低温等の実環境における材料の挙動やその指導則が十分に把握できていないという問題が明らかになり、材料に関する基礎的なデータの充実を図ることが重要であるとの認識が高まった。

これを機に、NIMSでは宇宙関連材料強度特性データ整備委員会を設け、2003年より、宇宙関連材料について極低温・高温下での疲労、破壊靱性、シャルピー衝撃値、引張試験等の結果をまとめ、データシートとして公表することにした(連携記事参照)。ロケットの情報管理に確実に対応しつつ、公表も行うという仕組みの確立は容易ではなかったが、それでも公表に踏み切った理由は、大切なデータを多くの設計者に役立ててもらうためであり、また、もし修正すべき点があれば指摘してもらい、データの信頼性をさらに高められるとの考えからであった。NIMSがまとめた「宇宙関連材料強度データシート」は、現在までに24冊が発表されており、その範囲はチタン、鉄、ニッケル、コバルト、アルミニウム、銅などの宇宙関連材料にわたっている。

宇宙開発のために不可欠な材料データシートへの要望は強く、今後も計画的かつ継続的に実施する予定となっている。

「極低温」を効率よく再現する

宇宙関連材料の極低温下での材料試験は、通常材料試験とは異なり、試験片を極低温に冷やすことが難しい。極低温(-250℃以下を指す)に試験片を冷やすためには、-269℃の液体ヘリウムを使用する必要がある。しかし液体ヘリウムはきわめて高価であり、試験には少量しか使えない。また蒸発しやすい特徴を持ち、光が少しあただけでも蒸発すると言われている。

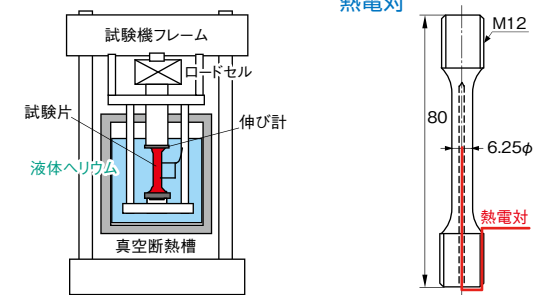
NIMSでは、前身であるNRIの時代から極低温下での材料試験法の開発に取り組んできた。

代表的な成果が、極低温下でのシャルピー衝撃試験である。1981年には、極低温下での簡便なシャルピー衝撃試験方法が開発された(緒形俊夫氏*による)。JIS Z 2242によれば、冷媒中で冷却した試験片を取り出し、5秒以内にハンマーの打撃を加える、とされている。冷媒が液体窒素(-196℃)ならばこの方法でよいが、液体ヘリウムの場合、鉄鋼を始めとする金属材料は極低温下での比熱が小さいため、試験片の温度は数十度も上昇してしまう。そこで、試験片を発泡スチロールカプセルの中に入れ、液体ヘリウムを流しながら冷却し、ハンマーで打撃を加えるという方法が考案された。この方法ならば、低温下で吸収エネルギーの小さい材料である9%Ni鋼やチタン合金の評価には温度上昇も小さく有効であると広く認められている。

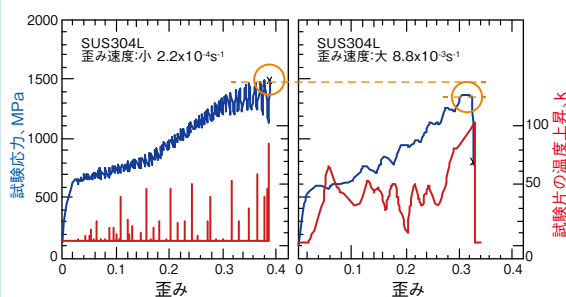
*現 物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット
NIMS特命研究員

極低温下引張試験法の開発(図4)

- 極低温材料試験装置の概略
- 引張試験片と挿入した熱電対



- 液体ヘリウム中での引張試験における応力-歪み曲線と試験片の温度上昇



(資料提供:物質・材料研究機構)

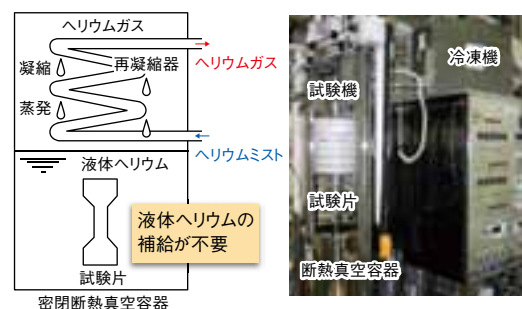
また、極低温下での引張試験についても研究が行われた(図4)。まず、真空断熱容器に入れた液体ヘリウム中で引張試験を行い、その試験片に熱電対を挿入して内部の温度を測定した。その結果、試験片内部温度は、冷媒の液体ヘリウムと同じ-269℃であると予想されたが、歪み速度が速くなると試験片内の温度が100℃以上も上昇し、得られる引張強度が変化してしまうことがわかった。またその後のシミュレーションにより、金属材料の比熱と熱伝導率が20K以下で極めて小さくなること、局所的なわずかな塑性変形によって大きな温度上昇が生じること、などが明らかになった。

同様な方法で、高サイクル疲労試験と低サイクル疲労試験における試験片の温度上昇を測定した(図5)ところ、高サイクル疲労試験では、試験応力のレベルにより試験周波数が4~10 Hzが上限であることがわかった。また、軸歪み制御低サイクル疲労試験では、引張試験と同じく歪み速度0.1%/sが上限であることを示し、この後液体ヘリウム中低サイクル疲労試験法がJIS規格として制定された。

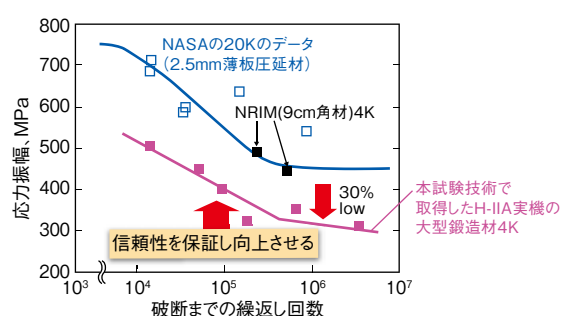
液体ヘリウム中の引張試験法は、米国国立標準局(NBS、現NIST)に注目され、JISやASTMで規格化されている。また、国際標準規格のISOには、VAMAS(新材料と標準に関する国際共同研究)の場で、数年かけて検証してから提案し、ISO19819として制定されている。

極低温下疲労試験法の開発(図5)

- 再凝縮の原理(左)と開発した極低温疲労試験機(右)



- Ti-5Al-2.5Sn ELIの極低温での疲労寿命の比較



(資料提供:物質・材料研究機構)

次世代型ロケットでも重要となる「高信頼性」

現在、H-IIAの次世代を担う新型基幹ロケットの開発が進められている。今後のロケット開発の課題には、人工衛星などの大型化に対応するための打ち上げ能力の増強や、国際競争力を高めるための打ち上げコストの低減などがある。このため材料には、コストを低減し、なおかつ高い信頼性を維持することが求められる。材料の信頼性を向上するには、既存材料の性能を最大限に活用することや、高信頼性材料を使用することなどのアプローチがあるが、いずれにせよ材料性能を適切に取得する試験技術や、材料特性を解明する評価技術が重要であることはいうまでもない。

現在まで、H-IIAロケットの打ち上げは成功を続けているが、材料特性解明の成果がこれに貢献していることは言うまでもない。H-IIAロケットは、日本の国産技術の粋を集めたシンボリックな存在である。そこに使われる材料も、それを生み出すための試験技術及び評価技術も、日本が誇る技術でありたい。信頼性の高い材料が、今後も宇宙開発技術の発展に貢献することを、期待を持って見守りたいものだ。

- 取材協力 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、
国立研究開発法人物質・材料研究機構

- 文 杉山香里