

UME-331	資料の出典（資料名、著者、巻、号、頁など） 破壊事故—失敗知識の活用— 小林英男 編著 共立出版（2007年）p.75～		本資料の作成者名 梅村文夫
整理番号	資料のタイトル H-II ロケット8号機打ち上げ失敗（1999年）		
失敗事例のタイトル 応力の発生に関する評価ミスと加工痕の存在に起因する破壊		一次原因（材料要素） 疲労破壊	
機種 ロケットのエンジン	部品 ターボポンプ インデューサ羽根	材料 チタン合金	使用環境 液体水素 (極低温環境)
損傷発生時の状況 1999年11月15日に、H-IIロケット8号機が種子島宇宙センターから打ち上げられた。打ち上げの約4分後第1段エンジン（LE-7）が計画より早く燃焼を急停止し、ロケットは姿勢制御不能となり、墜落した。			
調査内容とその結果 2000年1月に小笠原沖の深さ約3,000mの海底からサルベージ作業によりLE-7エンジンを回収し、文部科学省宇宙開発委員会が調査を行い、事故原因を解明した。その結果、設計想定外の振動によって、液体水素ポンプのインデューサ羽根の1枚が疲労破壊し、連鎖反動的な破壊によって、ポンプが急停止したことが判明した。 LE-7エンジンは液体水素ターボポンプと液体酸素ターボポンプを持ち、液体水素ポンプは3枚のインデューサを持ち、羽根の材料はチタン合金製であった。 3枚のインデューサ羽根のうちの1枚が、根元近くで大きく欠損していた。このインデューサには、深さ15 μ mの加工痕が残っていた。破面解析の結果、液体水素環境において、深さ15 μ mの加工痕を起点として、繰り返し応力によって疲労き裂が半楕円状に進展し、急速破壊に至ったと結論された。 半楕円状の疲労破面に続く破壊（急速破壊）の破面模様は延性破壊特有のディンプル模様（微小空間の成長と合体）であり、ディンプルの形態から急速破壊は極低温環境（液体水素環境）で生じたと判明した。すなわち、急速破壊は墜落後ではなく、墜落前に生じた。 インデューサの羽根には、遠心力による膜応力（ σ_t 、備考1参照）と流れによる曲げ応力（ σ_b 、備考2参照）が平均応力（ σ_m ）として作用している。破壊解析の結果、加工痕（深さ15 μ m）の応力集中係数Kを1.5として解析すると、疲労による推定進展寿命は178～349秒となり、打ち上げからエンジン停止に至るまでの時間である4分（240秒）はこの範囲に入る。			
損傷発生のシナリオ 液体水素ポンプの3枚のインデューサ羽根のうちの1枚が、深さ15 μ mの加工痕を起点として、根元近くで大きく欠損した。その結果、設計想定外の振動によって、他のインデューサ羽根が、連鎖反動的に破壊し、ポンプが急停止した。 なお、疲労破壊を生じさせた振動応力と変動応力は、以下の2つが考えられるが、その他の応力の存在も推定される。 （1）液体水素タンクの減圧制御に起因する巡回キャビテーションによる変動応力（解析と実験の結果 $\Delta\sigma = 270\text{Mpa}$ が得られた）。 （2）入口圧力変動に伴う羽根の共振による変動応力（解析と実験の結果 $\Delta\sigma = 130\text{Mpa}$ が得られた）。 なお、この値、および両者の和（400MPa）は、ストライエーション間隔の表面解析からの推定値（ $\Delta\sigma = 517\text{Mpa}$ ）より小さく、定量的な完全な解明には至っていない。			
対策（損傷発生時にとられた対策あるいは現在とるべきと考えられる対策） 改良型LE-7Aエンジンでは、巡回キャビテーションの防止を図ると同時に、エンジン燃焼試験による実作動状態を含む広い範囲での変動応力データを取得し、またインデューサの水流し試験(備考3参照)による変動応力と振動データを取得し、事故の防止に役立てる。 なお、深さ15 μ mの加工痕は、LE-7エンジンの設計基準では許容範囲であったが、疲労破壊の起点となったことから、設計基準の見直しが必要である。			
教訓 発生する応力の見積もり甘さが起因した破壊			

備考

- (1) 膜応力：外力（遠心力）によって断面に発生する平均応力
- (2) 曲げ応力：モーメントによって断面内で引張から圧縮に変化する応力
- (3) 水流し試験：水を作動流体に用いた試験で、ロケットエンジンの燃料噴射器の性能を確認し、推進剤の供給圧力を決定する。

主要因		教訓とすべき対象者	
チェックボックス		チェックボックス	
<input type="checkbox"/>	当時の技術レベルでは不可抗力	<input type="checkbox"/>	設計者
<input type="checkbox"/>	情報伝達不備・不足	<input type="checkbox"/>	製作者 / 建設担当者
<input type="checkbox"/>	担当者不勉強/教育不十分/意識不測	<input type="checkbox"/>	検査者
<input type="checkbox"/>	指示ミス	<input type="checkbox"/>	使用者
<input type="checkbox"/>	うっかり、ぼんやり	<input type="checkbox"/>	メンテナンス者
<input type="checkbox"/>	その他	<input type="checkbox"/>	その他