



研究ノート

LE-7エンジンはなぜ止まったか？

辻 本 良 信*

Why the LE-7 Engine Stopped?

Key Words : Rocket Engine, Turbopump, Rotating Cavitation

HIIロケット8号機打ち上げ

HIIロケット8号機は1999年11月15日16時29分00秒に垂直に打ち上げられ、機軸を初期飛行方位角97.5度に向けた後、太平洋上の飛行を開始した。固体ロケットブースター(SRB)の燃焼は正常で、リフトオフ後(X+)96秒にSRBの切り離しが行われた。第一段エンジン(LE-7)も正常に燃焼を行っていたが、X+約239秒において、計画よりも約107秒早く燃焼を停止した。同時に、姿勢制御が不能となり、姿勢異常状態となった。X+437秒でテレメータ受信が完全に不能に、またX+439秒においてレーダー追尾が完全に不能となった。安全処置として、X+459秒において指令破壊コマンドをロケットに対して送信した。(平成11年11月24日, “HIIロケット8号機の打ち上げ失敗の原因究明について(その1)”, 宇宙開発事業団(NASDA)より)

エンジンの回収

地上で得られたデータに基づく原因究明と並行して海洋科学技術センター所有の深海探査船“かいれい”を使用し海底調査が始められ、12月24日にはメインエンジン部が小笠原沖の海中で発見された。調査に引き続きエンジン本体などが回収船“新日丸”および潜水作業艇を用いて1月23日に回収された。回収されたLE-7エンジンは、航空宇宙技術研究所(NAL)調布飛行分室に搬入され、即日より調査が

開始された。液体ロケットエンジンであるLE-7は液体水素ターボポンプ(Fuel TurboPump, FTP), 液体酸素ターボポンプ(Oxygen TurboPump, OTP)と燃焼器, ノズルから構成される。2段燃焼サイクルを採用したLE-7では280気圧もの高圧の予燃焼室に推進剤を送り込まねばならず, FTPでは42,000rpm, OTPでは18,000rpmもの高い回転数が用いられている。このため高速の翼面上で圧力が飽和蒸気圧以下となりキャビテーションと呼ばれる気相部分が発生する。これに対応するためFTP, OTPとも第一段目にはインデューサと呼ぶ特殊な軸流ポンプが用いられる。引き上げられたターボポンプを調べるとFTPのインデューサ羽根3枚のうち1枚のみが大きく欠損しており, その破面に疲労破壊の様相が確認された(図参照)。その後の調査から, エンジン停止のもっとも可能性が高い1次要因はインデューサ羽根の疲労破壊であると判定された。

旋回キャビテーション

OTPはNALで、現東北大学教授上條謙二郎らによって開発された。OTPでは軸振動によって回転

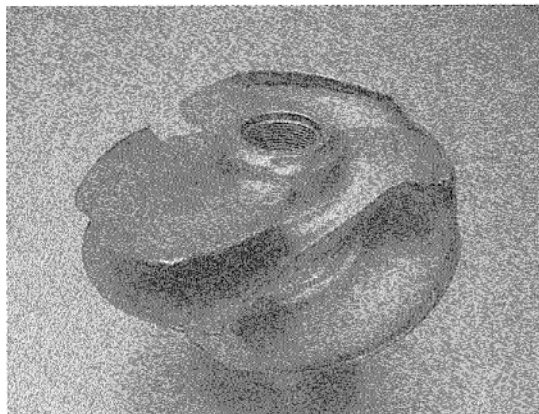


図 回収されたFTPインデューサ(NASDA提供)。右下の部分が大きく欠損している。



* Yoshinobu TSUJIMOTO
1949年2月1日生
大阪大学工学研究科博士課程修了
現在、大阪大学・基礎工学研究科・
機械科学分野、教授、工博、流体力学
TEL 06-6850-6165
FAX 06-6850-6212
E-Mail tujimoto@me.es.osaka-
u.ac.jp

部分が静止部分と接触するとポンプ自体が燃料となって跡形もなく燃え尽きる。このため開発には細心の注意が払われた。開発の初期に回転数より少し高い周波数の軸振動が発生した。これはポンプ入り口でキャビテーションが羽根車よりも少し高い速度で回る“旋回キャビテーション”と呼ばれる現象によるもので、すでにこれを経験していた上條らは試行錯誤によりその防止策を見いだした。開発が一段落した1990年、“発生機構を明らかにしない限り真の対策とはなり得ない”という信念の下に上條は辻本を客員研究員としてNALに招聘しその理論解析にあたらせた。当時旋回失速とよばれる“類似の”現象は経験していたもののキャビテーションを見たこともなかった辻本にとって“その職責は重要でない”という併任申請時の但し書きはありがたいものであった。

教室主任としての就職指導から開放されたころから毎日のごとく上條に電話し、発生状況を聞いた。これを通じて上條の何が何でも発生原因を知らねばという熱意が伝わった。当初旋回失速との類似性に着目したがどうしてもこれはという結果が出ない。苦しんだあげく類似性でなく相違点に着目すると運良く固有値問題に帰着し、旋回キャビテーションだけでなく旋回失速も別の特性根として表され、これらが全く別の現象であることも明らかとなった。

この理論を発表したのと同じ頃、スペースシャトルの改良型エンジンやヨーロッパのアリアンロケット用エンジンでも問題になっていることがわかった。このころある社会から“現実の機械に興味を持つ学生が減っている。これでは困るので実験設備を提供するので研究を続けてほしい”というありがたいお申し出をうけ、実機サイズの設備を提供いただいた。この装置ではキャビテーションによって見事な流れ構造が可視化される。最初に自分で流れを見ていたならば詳細にとらわれ、理論構築は不可能であったであろう。キャビテーション自体は古典的な問題であるにも関わらず、基本的な流れについてもその非定常特性はほとんどわかっていない。その後優秀な2名のドクターの学生他によってインデューサのみならず、基本的なキャビテーション流れの非定常特性も明らかにされた。また、アリアンロケットを製作しているフランスのSNECMA社からこれまでに2名の研究生を受け入れ、3人目の受け入れの計画が進んでいる。日本の大学では人件費を研究費に含

めないで、彼らにとってコストパフォーマンスが高いようである。

非定常流体力

FTPインデューサ羽根の疲労破壊の原因として旋回キャビテーションが急浮上した。問題は疲労破壊の原因となるような大きな流体力が作用するかどうかである。前年度SNECMA社との共同研究として入り口流れの不均一による非定常流体力を計測していたので装置がそのまま使える。すでに春休みに入っていたがスタッフと学生に事情を話すべく計測を引き受けてくれた。数日後“これでは折れても無理はないでしょう”というコメントと共にデータが返ってきた。ところが回転数と密度の補正を行うと0.07という液体水素の小さな比重とチタン材料の高い強度のために、疲労破壊の原因となる応力の1/4程度の応力にしかならない。早速原因調査委員会で報告したが、このことは後ほどメーカーによる実機を用いた計測でも確認された。

疲労破壊の原因として入り口ガイドベーンとの干渉や共振、逆流なども考えられている。しかしいずれも単独では応力変動は小さく、これらが複合した結果疲労破壊したと推定されている(詳しくは <http://www.nasda.go.jp/> にある発表文参照のこと)。理論解析によると旋回キャビテーションが発生するような条件下ではこれ以外にも種々のモードの不安定現象が発生し得る。個人的にはこれをもっとも心配している。他の予測されたモードの一つはNALにより確認されたが、それ以外はこれまでは実験的に現れていない事が頼りである。実際に使われるあらゆる条件下で実験し、これらが発生しないことを確認しておく必要がある。幸いにもNASDAではできる限り多くの条件下での実証試験が計画されている。

将来に向けて

NASDAでは2001年2月打ち上げを目指して新しいエンジンLE7Aの確認試験が急ピッチで進められている。その一環としてLE7A用OTP, FTPの試験を本学の設備を用いて行っている。旋回キャビテーション防止機構の解明や未知の不安定現象の可能性、キャビテーション発生下の干渉機構、逆流渦キャビテーションなど、今回種々の面白いチャレンジングな問題が提示された。優秀なスタッフ、学生とともにこれらの解決にあたりたい。