



わが回転体の強度研究を振り返って*

白 鳥 英 亮**
Eiryō SHIRATORI**Key Words:** High-Speed Rotating Body, Strength, Fracture, Low Cycle Fatigue, Strength Design

論文集編修関係の先生から、研究随想を書くことについて非公式に打診されたとき、そのようなものは老大家が書かれるのがふさわしいと辞退したのであるが、私のような停年ほやほやの小者——先生が小者と申されたのではない——が書く方が話題も身近だろうし印象も生々しいだろうからと、強いてすすめられるままに筆を執るに至った次第である。

私が回転体の強度研究を始めたのは昭和26年ごろであった。これより先22年ごろから超遠心機の試作研究が佐々木重雄、谷口修両先生らを中心に進められ、ロータの強度は鶴戸口英善先生が分担し、双極座標を巧みに応用して試験管挿入孔の最適位置を解析するとともに、石こう円板、黒鉛円板を用いて破壊試験を行い回転体の遠心破壊強度が平均応力説に従うことを確認されていたが、金属円板を用いての本格的実験はわが国ではまだなされていなかった。金属円板による遠心強度の研究がテーマとして佐々木先生から与えられたわけである。金属回転体の破壊については当時わが国では超遠心機ロータの破壊例と植村の電気火花による回転破壊瞬間写真撮影例があるだけだったが、アメリカにおいてはジェットエンジンの開発に関連して円板の回転破壊試験がすでに活発に行われていた。しかし、金属円板は破壊する前に一般に塑性変形を伴うが、(等方性)塑性理論も確立後まだあまりたっていない事もある。回転円板の塑性変形の研究及びこれに基づく破壊条件の研究は進んでいなかった。そこでこの問題をとり上げることにした。先生からは金属円板を用いて回転強度の研究をせよという指示はされたが、これをどのように研究するかは私の自由であった。この点が現在われわれが若い助手あるいは博士課程の学生に対する指導の仕方と違って思っている(現在のていねいな指導は若い連中にとって

研究業績を早く挙げるには役立つであろうが、乳離れできる時期は遅れるのではなかろうか)。

円板はたわみ軸に取付け、同じくこの軸に取付けた空気タービンで高速回転するようにしたが、初めて円板の回転破壊に成功するまでに約1年かかった。苦勞した点は軸の限界速度を越えやすくするための対策と円板取付け具であった。ロータをたわみ軸によって高速回転させる装置では、ロータ重量の影響を受ける一次の限界速度はできるだけ低く、空気タービン部の影響を受ける二次の限界速度はできればロータの破壊速度よりも高くするのが望ましいこと、また破壊速度に達する前に二次の限界速度があるものでは、ダンパ軸受を設け、そのこわさとロータに対する位置を適当にして限界速度を容易に通過できるような構造にすることが重要なことを痛感した。円板取付け具については、破壊するまでに円板中心孔が大きく広がる場合はチューリップの花びら状のもの(ただし軽い円板では振動によって円板がはずれるので押さえが必要)が有効であり、後述する繊維強化複合材料製円板のように、延性は低いがつりあいのないものを得ることが難しい場合は、円板のつりあいの影響が効かないように、取付け具の重量を増すとよいことがわかった。

回転円板の塑性変形を直接計算し得る式を解析的に導くことはできない。当時は計算機としてタイガーの手回しの計算機しか利用できなかった。円板の塑性変形を計算するため夏の3箇月の間朝から晩まで昼食の時間以外計算機を回し続けたものであった。計算の手間を省くため、計算結果を基に、変形を直接求め得る近似計算法も考えた。近年は、計算機及び数値計算法が非常に進歩し、解析解が見い出せない問題も(労力を要さず)簡単に数値計算できるようになったため、やや数値計算に頼り過ぎる嫌いがあるが、個々の例の数値を得て満足するのにとどまらずに、数値計算結果からその問題の解析解が可能になるような、応力分布や変形様式に関する適当な仮定を見出し、その仮定を使ってその問題の近似理論を導くことも、構造物の強度や変形に及ぼす寸法や形状など種々の因子

* 原稿受付 昭和57年2月23日。

** 正員、埼玉大学工学部(〒338 浦和市下大久保255)。

〔著者略歴〕大正10年1月13日生。

主として材料力学、特に高速回転体の強度、塑性理論の研究に従事。

昭和56年4月1日まで東京工業大学精密工学研究所、現在埼玉大学工学部。

の影響を考える上で必要ではないかと思っている。

円板の変形状態の測定は回転停止後行ったが、塑性変形量が小さい場合は回転中の変形状態との差が無視できなくなる。円板の回転中の変形状態を知るためにクセノンランプによる瞬間写真撮影方式を使ってみたが、あまり精度のよい結果は得られなかった。顕微鏡瞬間写真撮影方式の採用も考えたが、これに適する光源が入手できなかったので実際に試すには至らなかった。繊維強化複合材料製円板では、円板の最終的破壊が起こる前のいろんな速度段階でいろんな半径距離の所にき裂が発生する。したがってき裂の発生位置とそのときの回転速度を測定することが、この種円板の強度を知る上で重要である。回転中に円板の変形状態やき裂の発生状況の精密測定ができるような方式の開発が望まれる。

超遠心機ロータのような高速回転体では発停に伴う低サイクル疲労強度が過速破壊強度に劣らず重要である。この強度の研究は昭和 35 年ごろから始めた。そのころ、鶴戸口先生はこの研究の必要性を強調されており、又すでに三菱電機会社の菰原 智氏は活発な研究を進めていた。初めは過速破壊強度研究に用いた空気タービン駆動の回転試験機によって行ったので、圧縮機の発生する騒音、二次の限界速度以上で回転軸が発生する金属音がうるさく、私の勤務していた研究所の先生方には大変なご迷惑をかけた。人家も割合に近かったので、あのような試験はいまでは許されないうら。その後、スピンドル形超遠心機を改造した電気駆動式の発停疲労試験機を入手でき、静かな環境で研究を続けるようになった。

この研究の初期には、材料の繰返し塑性変形挙動も荷重制御下でしかわかっておらず、計算技術も十分ではなかった。疲労強度のおおよその推定しかできなかったが、最近では真応力制御下での変形挙動もわかるようになり、計算技術も進歩したので、円板の繰返し変形及び疲労強度をかなり正確に予想できるようになった。しかし何分にも円板の発停疲労の試験結果が少ないので、その充実を希望している。

回転体の破壊ではぜい性（低応力不安定）破壊の問題も、特に大形回転体の場合、極めて重要である。昭和 33 年に Winne らの回転円板のぜい性破壊に関する

論文に接し、非常な興味を覚えたが、この研究は大形円板の低温での破壊試験を必要とし、大学の研究室でこれを行うことは困難であった。昭和 46 年ごろまでの間に、アメリカでは G. E. 及びウェスチングハウス社を中心にこの研究は活発に行われていたが、わが国での研究発表は東京芝浦電気会社で行った桂 伊津美先生ら、及び木原 博先生らのものがあるに過ぎなかった。幸い昭和 47 年 4 月から 3 箇年にわたり日本機械学会内に「回転体の強さ試験研究分科会」を設置することが認められ、大学、会社などのこの分野の研究者をほとんど網羅したこの分科会の活動によって、わが国の回転体のぜい性破壊の研究は大いに進んだ。分科会での委員の先生方の活発な討議は今でも強く印象に残っている。

繊維強化複合材料を利用して回転体の高速化を計ろうとする研究は昭和 40 年代の後半から始めた。高速化達成のためには、遠心荷重を小さくするように材料、形状、構造を選ぶことと、強度自身が高い材料を使用することが必要であるが、繊維強化複合材料は比強度が高く、強度の異方性が大きく、また繊維とマトリックスの混合比によって比重も変えられるので、これらの特徴をうまく利用すれば任意形状の回転体についても近似的に等強度設計をすることができ回転体の高速化が達成できるのではないかと考えたからであった。しかし、現在使われている FRP では、繊維に直角な方向の強度があまりにも低いこと、比重を変えられる範囲も狭いことなどのため（エネルギー貯蔵用はみ車などに適する、半径方向に）、厚肉の構造のものに対しては、種々の繊維配列の円板について研究して来たが、まだ所期の高速化を達成していない。達成への鍵は、現在よりはるかに強くかつ対繊維接着性のよい樹脂の開発と、繊維を円周方向のみ及び半径方向のみに配列した極めて薄い円板を製作し、これらを交互に積層して、板厚方向には巨視的に均質とみなせる円板を作る技術の確立にあると考えている。

昨今は、重量は二次的で高速化だけが重要である超遠心機ロータを、繊維に直角方向の荷重がかからないように、円周応力のみを負担させる薄肉円輪と半径応力のみを負担させる放射状棒とを適当に組み合わせて作る夢を抱いている。