

機械屋が知らなきゃモグリの重大事故

Severe Accidents which Mechanical Engineers should Learn

執筆者プロフィール



中尾 政之
Masayuki NAKAO

■1981年東京大学工学部産業機械工学科卒業、
1983年東京大学工学系研究科産業機械工
学専攻修士課程修了、1992年東京大学助教授、
2001年より教授

■主として行っている業務・研究

- ・ナノ・マイクロ加工
- ・加工の知能化
- ・科学器械の微細化
- ・失敗学

■所属学会および主な活動

日本機械学会

■勤務先

正員、東京大学教授 大学院工学系研究科
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 /
E-mail : nakao@hnl.t.u-tokyo.ac.jp)

1. 機械屋を賢くさせた三大事故

初めて作った機械は、最初、うまく動かないのが普通である。事故を分析して直すのも、機械屋の仕事のうちである。その分析は、将来、別の機械を設計するときにも役に立つ。筆者の師匠の畑村洋太郎先生は「機械屋が知らなきゃモグリの重大事故」と呼んで、タコマ橋、リバティ船、コメット号の三つの事故を教えてくれた(図1)。それぞれ、機械力学や生産技術の講義中に、教授が必ず紹介している有名な事故である(していなければ教授がモグリ?)。

1.1 タコマ橋

タコマ橋は、アメリカのワシントン州タコマ市の海峡に架けられた吊り橋である。1940年に完成してから4箇月後、風速19m/sと弱い横風で上下に自励振動し始め、次いで毎分14サ

イクルのねじれ振動で橋桁が共振し、最後には落橋してしまった。つまり、まず、横風が橋桁の周りに流れて揚力を生み、橋桁は曲げモードで揺れた。さらに渦が舐めるように橋桁の上下面に交互に発生しては流れ、橋桁はねじれモードで共振した[図1(a)]。ワシントン大学の教授が揺れの一部始終を16mmフィルム映像(機械屋必見!)で残してくれた。

事故後に流体振動の学問は大いに発展し、以後、機械屋は流体振動の周波数と構造体の固有振動数を一致させないように機械を設計するようになった。また、瀬戸大橋のような大形つり橋に対して、横風の橋桁内の通りをよくして、風速80m/sの大型台風にも耐えられるように設計した。

1.2 リバティ船

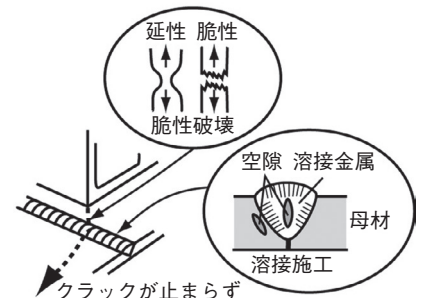
次のリバティ船は、1万トンクラスの戦時標準船である。第二次世界大戦中、ドイツのUボートに沈められる貨物船を補充するために、アメリカが同形式で2700隻も生産した。この船は製造方法が画期的であった。それまでは航空機のように、鉄板をリベットで接していたが、それを直接に溶接する方式に変えた。さらにブロックを工場ですべてに溶接し、最後にそれらの数ブロックをドックで溶接して、工期を短縮した。要は、現在の生産方式とまったく同じなのである。

当時は溶接が未熟だった[図1(b)]。溶接部分に空洞が残ってクラックの起点を作り、さらに溶接部分に残留引張応力が生じてクラックを伸展させた。リベットと違って溶接は鉄板を連続的につなげるので、接続部でクラックは止まらず、400隻が重大な損害を被った。加えて、鉄板の製鋼も未熟だった。溶接部起点のクラックはガラスが割れるように約1000m/sと高速に伸展するので、10隻が停泊中、アツという間に輪切りに切断された。

低炭素鋼は、鑄鉄に酸素を吹き込んで炭素量を3%から0.2%に減らす。このとき、鋼の中に酸素が残っていると、鑄造塊時の引け巣は小さくなって生産歩留は高くなるのだが、酸素の



(a) タコマ橋の崩壊



(b) リバティ号の沈没



(c) コメット号の墜落

図1 機械屋を賢くさせた三つの重大事故⁽¹⁾

空洞が起点になって衝撃には弱くなる。とくに低温では伸びて切れる延性破壊から、砕けて割れる脆性破壊に移移するのだが、その当時の鉄板の脆性への移移温度は20℃と高く、シベリアのような極寒地ではリバティ船も「ガラスの船」だった。その後、製鋼と溶接の技術が進歩し、残存酸素と不純物は減った。

筆者の大学では、学生実験でシャルピー試験を課しているが、低炭素鋼でも移移温度は-60℃程度と低くなり、うまく割れる試験片の入手が難しくなるくらい、もはやこのリスクは激減した。溶接も不純物混入を除くために溶湯部を不活性ガスで覆い、引張残留応力を除去するために熱処理やブラスト加工で後処理した。あれやこれやで鉄板を溶接する方法は、今ではどの機械にも採用されるほど進歩したのである。

1.3 コメット号

最後のコメット号は、イギリスのデハビラント社のジェット旅客機であ

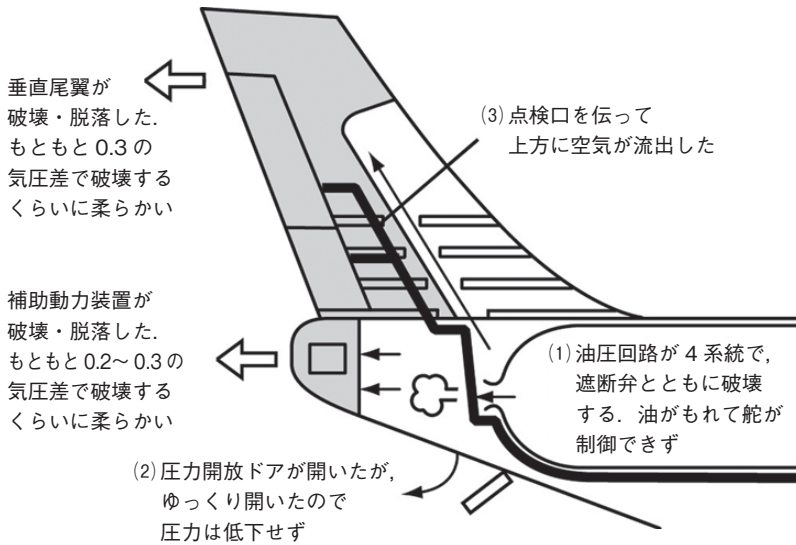


図2 御巣鷹山の日航ジャンボ機の墜落(設計上の問題点:フェイルセーフの不備)⁽²⁾

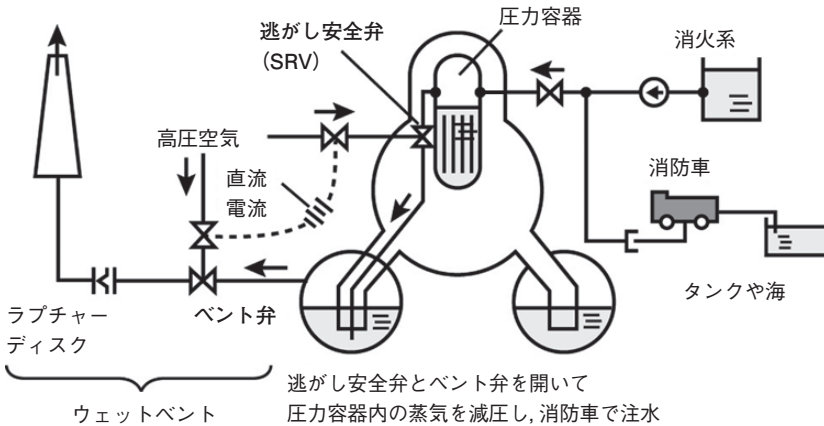


図3 福島第一原発の減災方法⁽³⁾

る。1952年に就航してから、1954年までに3機墜落した。チャーチル首相は「イングランド銀行が空になってもいいから原因説明せよ」と鼓舞したが、その結果、金属疲労という現象が体系的に解明された。飛行機は0.19気圧の高度12000mでも、乗客に高度2100mの0.79気圧を感じさせるように、フライトごとに客室を0.6気圧分、加圧する。それを模擬して一機まるごとをプールに沈めて繰り返し内圧試験を行った。事故前の内圧試験では18000回の加圧に耐えることは実証済みだったが、実際は1290回目と900回目のフライトで墜落した。しかし、事故後の内圧試験では、墜落を裏づけるかのように、1830回目の加圧で、四角い窓枠の角からクラックが伸展した〔図1(c)〕。

実は、事故前の内圧試験は耐圧試験を兼ねており、0.56気圧の1000回の加圧ごとに1.12気圧の過圧を加えていた。この過圧によって、胴体全体が

膨らむが、剛性の低い窓付近はさらに大きく塑性変形した。そして過圧の除荷後に全体が弾性変形して縮んだが、大きく塑性変形した部分は周りから締められるように拘束され、圧縮応力が生じる。この圧縮応力で、伸展しようとして開いていたクラックは潰れて閉じてしまい、疲労破壊を免れた。つまり、試験方法が間違っていた。

その後、あれやこれやで金属の疲労破壊による事故は激減した。しかし、それでも設計時に振動具合や残留応力がわからないので、「機械の“失敗3兄弟”は、疲労、腐食、摩耗である」と言われるように、今でも使用後に疲労破壊が生じることが多い。

2. 工学者が興味を持つ重大事故

筆者らは、JSTで失敗知識データベースを作ったが、2006年にデータごとの検索回数を調べると、1位は御巣鷹山の日航ジャンボ機の墜落、2位

はタイタニック号の沈没、3位はニューヨークのツインタワーの崩壊であった。タコマ橋、リバティ船、コメット号はいずれもトップ20にさえも入らなかった。機械屋は当然のように知っているからだろうか？

日航ジャンボ機の主原因は、ボーイング社の改修不良である。しかし、設計上の問題点はフェイルセーフ機構の不備である(図2)。圧力隔壁が壊ただけで尾翼が作動できなくなる設計がおかしくこれでは減災できない。たとえば、

- (1) 4回路に多重化していた油圧配管が同じ経路を取っていたので、隔壁破壊ですべてがちぎれた。
- (2) 圧力開放ドアが安全弁のように開くはずだったのに、開放速度が遅いのでその前に尾翼が破壊された。
- (3) 尾翼の中の蓋無しの点検穴を付けたので点検穴を伝って尾翼の先まで破壊した。

事故後、ボーイング社はこれらすべてを改良した。

2011年の福島第一原発事故は、日本の機械屋が今こそ学ぶべき重大事故である。福島第一原発事故は、大津波の襲来による外部電源の喪失が主原因である。しかし、設計基準を超えた(Beyond Design Bases)減災方法を考えていれば、広大な国土を立入禁止区域にはしなかった。つまり、アメリカの原子力規制委員会のテロ対策用の行政命令B.5.b.を看過せずに、それに書いてあったように、自動車バッテリーやエンジン付きコンプレッサを用意しておけばよかった。それさえあれば、圧力容器の安全弁や格納容器のベント弁を開けて圧力容器内を速やかに減圧でき、消防自動車による低压注水を遅滞なく実行できたはずである(図3)。そして、2号機からの放射能物質の飛散さえ防げれば、メルトダウンしても放射能は外部に飛散せず、スリーマイル島事故並みの状況で終わっていたはずである。

脱関心が最もいけない。留学生に説明できるくらいに、この事故を勉強すべきである。さもないと、それこそ日本の機械屋としてモグリである。

文献

- (1) 中尾政之, 失敗百選, (2005), 67・72・131, 森北出版。
- (2) 中尾政之, 続・失敗百選, (2010), 148, 森北出版。
- (3) 中尾政之, 「つい、うっかり」から「まさか」の失敗学へ, (2013), 103, 日科技連。