

特別講演Ⅱ

構造物、構造体の空気力学挙動とそのメカニズム—事故・トラブルに学ぶ

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 松本 勝

1. まえがき

「プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム」の原稿としては、少々、違和感のある題目であるが、関連技術・研究の発展とともに、材料が、コンクリートであれ、鋼であれ、よりスレンダーで規模の大きな橋梁などの種々の大規模構造物や、今後の新しい構造形式の構造物にとっても、このような空気力学に関連した事故、トラブルも考えられ、一つ的话题を提供する意味で、表記のような題目で、原稿をとりまとめた。我々を取り巻く環境の中で、様々な事故やトラブルが発生する。その原因を究明することは、その後の同様の事故を防ぐと同時に、そこから新しい発見と多くの知見が得られることも多い。このような事故、トラブルのなかで、流体が深く関係するものも少なくない。そのような場合、流体力学あるいは風工学の基礎知識を基礎に、事故原因を究明し、今後の事故防止に役立てることが必要である。本稿では、橋梁、列車、その他の構造物に、風あるいは流体に静的作用、動的作用により生じたいくつかのトラブルや事故を紹介し、その原因究明とそれらから得られた教訓や知見を紹介する。

2. テイ橋の落橋

テイ橋(写真1)は、トーマス・パウチにより設計され、1878年6月に、スコットランドのテイ川河口に完成をみた。当時、英国では、産業革命後の鉄利用の一環として、鉄製特に、錬鉄、銑鉄を用いた橋梁が、積極的に建設される時を迎えていた。この中で、テイ橋は、桁部

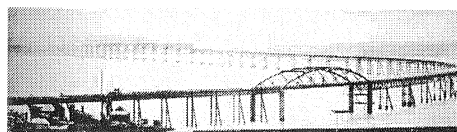


写真1 テイ橋

銑鉄製の3.2kmにおよぶ単線鉄道橋である。このうち、一部は、背の高い13連の下路トラス橋(支間75m、橋脚は鋳鉄製)からなっていたが、このトラスの部分が、完成からわずか1年7ヶ月後の1879年12月28日に、強風の中を通過中の列車とともに河口水中に没し、乗客、乗員75名全員が死亡するという痛ましい事故が発生した。風速は40m/sを超えると推定された。事故の原因は、橋の設計に、水平荷重としての風荷重を考慮されなかったため[1]、あるいは十分な風荷重を考えなかったため[2,3]とされているが、このほかにも、橋脚部支承での桁の浮き上がりや、橋脚の製作精度の悪さ[1]、あるいは、列車とトラス両者に作用する風荷重作用に対する配慮がなかったことなどいくつかの要因が指摘されている。何れにせよ、強風により事故が誘発されたことは間違いのないところである。事故後8ヶ月たって、設計者のパウチは、心労と風邪をこじらしたことにより死亡した。この事故は、その後の規模の大きな構造物の風荷重の重要性を認識させた。なお、このテイ橋に落橋から10年後の1889年にギュスタフ・アイフルにより完成されたエッフェル塔(高さ321m:当時世界一高い塔)は、水平風荷重を塔脚にそう軸力に変換するという独特の方法で、水平風荷重に対し全体の安定を保ち完成させ、今なおパリの名所となってその勇姿を見せていることとはあまりにも対照的といえよう。(このアイフルにしても、1884年に、彼が設計し、建設を進めていたフランスのタルド橋も、その架設途中で、強風(事故当時パリで162km/h)により落橋した[4]。)

3. 余部橋からの列車転落事故

一方、テイ橋の事故からちょうど107年後の同じ日の1986年12月28日に、山陰線余部橋(地上およそ40mをわたる、トレスルタイプの桁橋の単線鉄橋、1912年完成)(写真2)から、通過中のお座席列車「みやび」が強風により約40m下方の地上に転落するという痛ましい事故が起きた。地上の蟹加工工場を押しつぶし、工場内で作業していた5名と列車に乗務していた車掌1名が死亡した(たまたま本列車は、隣の香住

駅で乗客を降ろし、空車で戻ってくる途中であった。)。事故の直接の原因は、もちろん強風であり、列車が転落したときには、橋梁の桁に取り付けられていた風速計から、そのときの風速はおよそ34m/sと推定された。(なお、当時の国鉄の列車走行安全規則では、全国一律、風速30m/s以上では、列車の運行を規制することとなっていた)しかしながら、事故原因を流体力学的にみると、本来、障害を超えて列車を安全に渡すはずの橋梁(余部橋)そのものが、皮肉にも、列車に対して空気力学的に、より不安定にし、列車を転覆させたことが明らかとなった。つまり、列車が単体であるときに比べ、列車が、桁と一体になったとき、断面の辺長比(断面の、流れ直角方向の長さ(D)の、流れ方向長さ(B)に対する比)が大きくなり、そのため、列車断面背面の圧力が、列車単体に比べ、より低下し、結果的に、列車に作用する抗力が大きくなった。この特性は、2次元矩形断面の抗力係数は、その断面辺長比(B/D)により変化し、カルマン渦が強くかつ断面背面のもっとも近いところに形成される B/D=0.6 近辺で、抗力係数あるいは背圧係数の絶対値が最大となる[5]特性と基本的には同じといえる(図1参照)。お座席列車「みやび」(通常車両より背が高く、風荷重は、通常車両よりもやや大きくなる)の模型を用いて実験すると、地上、空中で単体、空中で橋梁の桁と一体の順で抗力(係数)が、順次大きくなり、従って、それぞれの列車転覆限界風速は、順に小さくなる。このように、橋梁の桁と列車を組み合わせたときの列車の抗力係数を基に転覆限界風速を求めると、34m/s程度となり、事故時、橋梁桁部で計測された風速値とほぼ一致する。つまり、34m/sの強風が、地上を走行する列車に作用しても、転覆しなかったし、また、仮に、空中にある列車(もちろん実際にはあり得ないが)にこの風が作用しても転覆しなかったことになる。つまり、余部橋の桁の存在そのものが、今回の事故に大きな役割を果たしたともいえる。この事故は、橋梁上の列車に作用する風荷重評価のみならず、構造物、構造体に作用する風荷重、空気力を評価する場合、その周辺の構造物や構造体の影響を十分に把握する必要があることを示している。

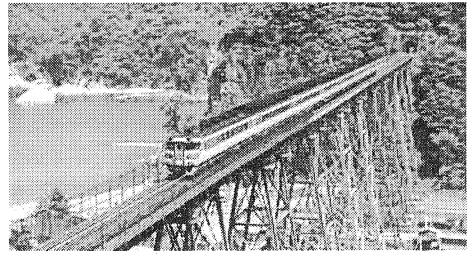
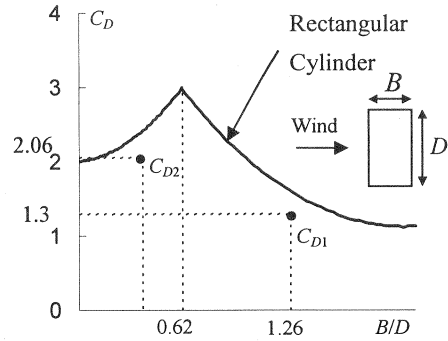
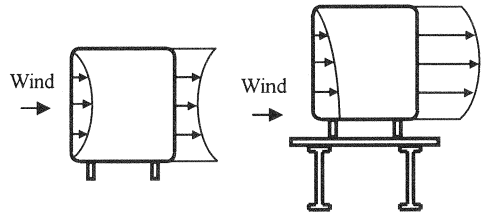


写真2 余部橋



a) 矩形断面の効力係数



b) 橋梁の存在によって変化する車両まわりの圧力分布

図1 車両の効力係数に対する橋梁桁断面の影響

4. 竜巻による列車の浮上

竜巻によって風災害がしばしば発生する。我が国では、年間に約30個弱の竜巻が発生し、そのいくつかは、台風接近時に生じることがあるが、それ以外にも生じることがあり、詳しい発生メカニズムはわかっていない。米国では、年間700個弱のトルネードが生じ、大きな被害をもたらす。特に最近(2003年5月には、米国で約400個のトルネードが生じ、大きな被害が生じた。)トルネードは、日本の竜巻に比べ、遥かに規模が大きく、またそれにより生じる強風も、すさまじいものである。これら竜巻やトルネードは、60km/hから100km/hという猛スピードで移動し、母雲と呼ばれる擾乱雲からのびたロート雲(象の鼻のような雲状のもの)が、地上に接地(タッチダウン)したときに、その接地したきわめて限定された場所に猛烈な強風が吹

く。従って、強風が突然に吹き、短時間のうちに、その強風は終わることになる。このロート雲は、また母雲に引っ込んだり、また、のびて接地したりを繰り返すことから、このような現象は、スキッピングと呼ばれ、そのため、地上での強風被害は、連続的にならないことが多い。また、サクション・ボルテックスと呼ばれるように、上空側が低圧となり、地上の物体を吸い上げる力を有する。

1978年2月28日に、地下鉄東西線が、荒川の中川橋梁（開床式トラス下路橋）を通過中に、最後尾の2両（列車はアルミニウム製の比較的軽い車両であった）が、たまたま通過中の竜巻に襲われ、脱線転覆した（写真3）。そのとき、たまたま乗客は少なく、死者はなく、8名のけが人を出した。その後の調査の結果、列車脱線事故調査専門家によるレールの傷跡、および乗客、車掌などの体験談から、列車が浮上し、その後横転したと考えられた[6]。つまり、列車2両が、浮上したわけである。では、なぜ、列車が浮上したのか。サクション・ボルテックスによる吸い上げのみで説明できるのか、強風が、きわめて短時間に急に吹き出す効果はそれにどのような影響をもたらしたのか、などの疑問が残った。特殊な風洞（図2）をもちいて、急に風が吹くようにし、地下鉄東西線の縮尺模型に対して、風が車両にある吹き上げ角（ここでは約 8° 程度と設定:米国のトルネードによる飛散物体の奇跡から地上付近では、 8° から 10° 程度の吹き上げ角があるとされている。）を与え実験を行ったところ、次のようなきわめて不思議な現象が確認された。つまり、地下鉄車両の断面は、定常的に、 8° の吹き上げ風を受けた場合には、その揚力は、下方に作用するいわゆる down lift となる。つまり、列車重量が増す方向であり、決して列車を浮上させることはできない。ところが、ステップ関数に近い非定常性の強い風を作用させると、風が作用した直後に、定常的な down lift に漸近する前に、非定常過渡特性として上向きの揚力 (up lift) が作用する（図3）。

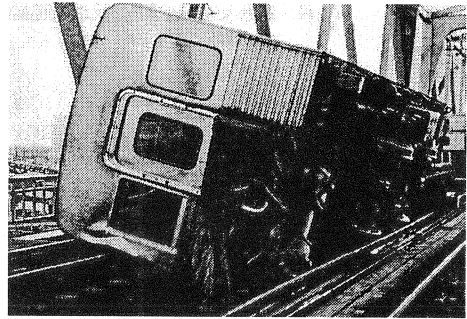


写真3 中川橋梁における鉄道脱線事故[6]

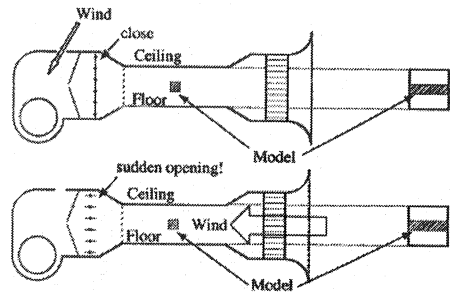


図2 弁の開閉により突風を作り出すことが可能な特殊風洞 [7]

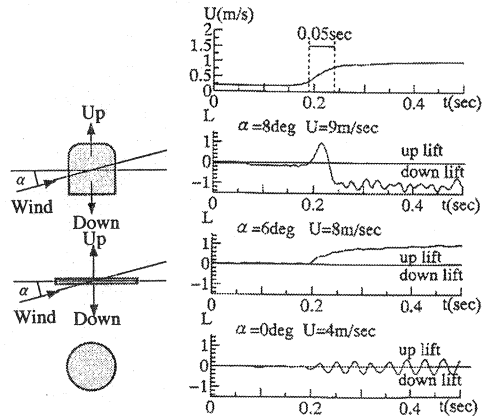


図3 上記の風洞によって作り出された非定常風中における車両断面、平板断面及び円柱に作用する揚力比 $F_L(t)/F_L(\infty)$ [7]

完全なステップ状の風の場合には、揚力は、定常状態の down lift の10倍程度の up lift が生じる。(風速の二乗値が、ステップ関数的に変化するとして得られる揚力に関するインディシャル関数は、風の傾斜角がステップ的に変化した特に得られる等価 Wagner 関数と類似な変化特性を示すものの、その過渡特性はさらに大きくなる。(図4参照)) この結果および、竜巻の移動速度を考慮した強風の吹き出し時間を考慮した試算によれば、今回の地下鉄車両浮上のためには、65m/s 程度の風速であれば可能であることが明らかとなった。実際には、竜巻のサクション・ボルテックス効果も加味すると、この風速よりさらに低い風速であっても、地下鉄車両を浮上させることが可能であったものと考えられる。このような揚力の特異な現象は、この比較的角張った車両断面や、正方形断面のように、静的には、揚力係数勾配が、風の迎角に対し負勾配となり、ま

動的には流れと直角方向に、ギャロッピング(galloping)と呼ばれる、発散型の空力不安定振動の生じる断面固有のものである[7]。同様に、ねじれフラッターの生じる断面(タコマ橋のようはH型断面など)にいても、急変する風速下では、ピッチングモーメントが、逆符号で絶対値の大きな値を示すという過渡現象がみられる[8]。従って、このような特有の構造断面を有する構造物や構造物は、変動する気流や流体中では、思わぬ大きな空気力や流体力を受けることがあり、十分に注意する必要がある。

5. 渦と高速増殖炉「もんじゅ」の温度計鞘管破損

1995年12月8日に起こった、高速増殖炉「もんじゅ」の、温度計の鞘管(円断面)が、流体振動により、破損し、内部のナトリウムが漏れるという、大変深刻な事故が発生した。現在、図5にそのイラストが示されているように、円柱の空力振動・流力振動は、次の3種類のものが知られている。すなわち、通常構造物の固有振動数と、カルマン渦の放出周波数が一致する無次元流速域(1/St)近辺での、流れ直角方向の渦励振、さらにその(1/2)の無次元流速域(1/2St)付近でのカルマン渦放出による流れ方向の渦励振、さらには、更にその(1/2)の無次元流速域(1/4St)付近での、同時対称渦放出に世路流れ方向振動による流れ方向渦励振が明らかにされている。

この「もんじゅ」の温度計鞘管の振動は、この3種類の振動の内でもっとも低風速で生じる、流れ直角方向のカルマン渦振動の生じる共振流速(無次元流速で5付近)のほぼ1/4の低流速で生じた流れ方向振動であった[9]。無次元流速(1/St)およびその半分の(1/2St)でのカルマン渦による流れ直角方向、流れ方向振動が生じない様に、ナトリウムの流速を制御していたが、この最も低流速で生じる振動には、十分な注意が払われなかったか、過小評価されたためと考えられる。しかし、このような低流速(1/(4St)付近)での、円柱断面周りの同時対称渦放出は、海底油田からの石油掘削用stageの交換周りに認められることと、実験室での同様の流れパターンの可視化結果が、Kingにより報告されており[10]、また、断面辺長比(B/D, B:物体の流れ方向長さ、D:流れ直角方向長さ)が、0.5の静止した2次元矩形断面において、流れに、カルマン渦放出周波数の4倍の周波数を持つ、わずかの正弦的な主流方向刺激を与えると、きわめて増幅されたカルマン渦放出という流れと、カルマン渦の4倍の周波数(つまり脈流周波数)を持つ同時対称渦放出という異なった2つの流れパターン(写真4)が、間欠的に出現することも、

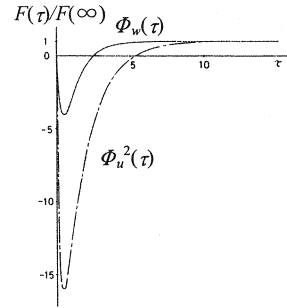


図4 車両断面に作用する揚力の過渡特性—風速の2乗値がステップ関数状に変化すると仮定した場合のインディシャル関数 [7]

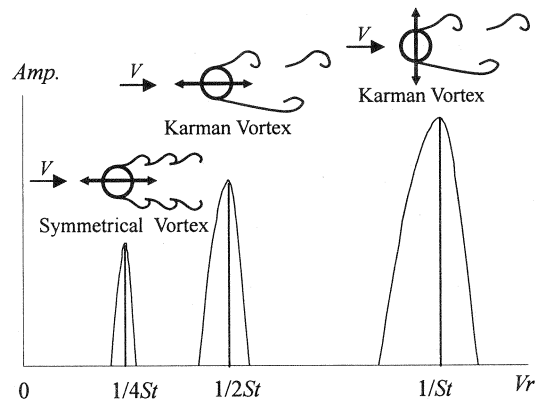
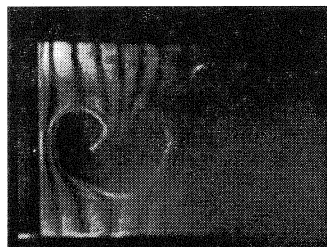
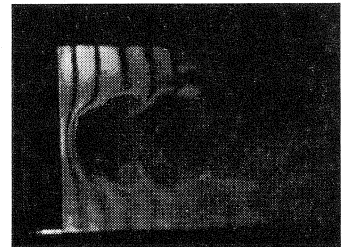


図5 円柱断面の風速(V)-応答振幅(A)図



(a)ストローハル数の4倍の周波数で刺激を与えた場合に現れるカルマン渦



(b)ストローハル数の4倍の周波数で刺激を与えた場合に現れる同時対称渦

写真4 脈流中におけるB/D=0.5矩形断面周りの流れ場 [11]

報告されている[11]。この事故は、関連分野の知識、情報の収集の重要性をまさしく物語るものといえよう。次の渦の所でもふれるが、このような、同時対称渦の発生機構およびカルマン渦の関連性は、未だ十分に明らかにされておらず、今後の研究に待たれる。

6. 渦の話

「もんじゅ」の温度計鞘管の振動で、渦のことにふれた。ここで少し渦について紹介したい。

構造物や構造体などは、一般に、流線形状をしておらず、ずんぐりしたあるいは角張った断面で、流体力学的には Bluff Body と呼ばれる。このとき、流れは、物体からはがれ（剥離し）、その結果、物体周りに非定常な渦が形成される。又、いったんはがれた流れが、物体表面に再付着することで、剥離バブルが形成されることもある。このような、複雑な流れ場が、物体に作用する流体力、空気力を決定し、時には、物体に振動を誘起する。特に、断面の振動によって新たな流れ場が形成され、それに対応した流体力が生じ、振動そのものが変化する。この繰り返しにより、時として振動がどんどん大きくなり、ついには構造物を破壊させたり（発散振動）、あるいは、定常振動を発生させたりすることもある。このように、自分の振動そのものが、流体力を生み、feed back 系により振動が生じるものを自励振動と呼ぶ。一般に、渦による振動もこの自励振動の要素を多分に持っている。また、渦は、フラッター、ギャロッピングなどの多くの Bluff Body の流体（空気）力学的特性に、直接あるいは間接的に深く関わり、フラッター、ギャロッピングの限界風速のトリガーとなる場合や、後に述べるこれらに対する空力干渉として、少なからぬ影響を与える。しかし渦そのものに未解明な点があり、従って、これらフラッターやギャロッピングとの関わりについては、現在においても未解明の点も多く残されている。

ところで、Bluff Body から剥離したいわゆる剥離剪断層流れに存在する不安定な要素が、何らかの刺激によりある周波数が増幅し、安定な渦として生成される。カルマン渦は、2 剪断層間の干渉が刺激になり、その安定な渦配列してと、交差的にある空間配列を満足するように渦を放出する。一方、1 剪断層の持つ不安定性がある刺激によりある特定の周波数の成分が安定化し、渦を生成する。後述するタコマ橋にみられた鉛直撓み渦励振はまさしくこの渦によるものである。タコマ橋のみならず、橋梁の桁に生じるほとんどの渦励振は、実はこの 1 剪断層に関連した渦であり、カルマン渦によるものでない。ところで、カルマン渦放出周波数は、断面のサイズと風速に比例し、その無次元比例定数は、ストロハル数と呼ばれる。この渦が、カルマン渦と呼ばれるのは、Theodore von Karman が、1911 年に、交番渦配列が安定となる条件を、ポテンシャル理論より導いた功績にちなんでつけられた。実は、Karman が、自叙伝で、この安定条件を導くきっかけになった理由を次のように述べている。以下は、溝田の寄稿文[12]からの抜粋である。「自分 (Karman) が、若いとき (21-23 歳頃)、イタリアに一人旅をしたとき、ボローニア市の博物館で、あるフレスコ画に引きつけられた。それは、聖クリストファーが、肩に幼いキリストをいだし、流れにたたずむ姿が描かれていた。多くの人は、聖クリストファーとキリストに興味を示すのであるが、自分は、聖クリストファーの足下に描かれた実に奇妙な水模様であったという。そのような流れのパターンが、長い間気になっていたそうである。その後色々考え、ついに、1911 年に先述の安定条件式を誘導したという。」その後、多くの人たちが、その自伝にあるフレスコ画を探し続けたが、似た絵は見つかったものの、今ひとつこれであるというものではなかった。しかし、前出の、溝田が、ドイツに研究滞在の時、ボローニア市の聖ドミニク教会で、ついにそれらしいフレスコ画 (写真 5) を見つけ、その絵の写真は、2000 年 3 月号の科学雑誌

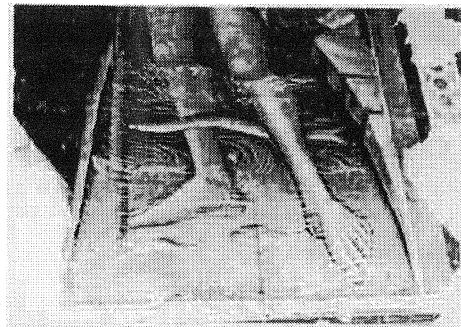


写真 5 カルマンが渦の安定条件を導くきっかけになったとされるフレスコ画 (溝田 [12] による)

「Nature」[13]にも紹介された。多くの Bluff Body 背後にはこのカルマン渦が放出されるが、余部橋の節でもふれたように、Bluff Body の抗力の大きさは、その放出強さとその生成される位置に大きく関係されることから、決して渦励振のみに関連して論じられるべきものではない。カルマン渦のみならず、各種の渦について、未解明の部分が多く、現在も研究が進められているのが実情である。

7. 橋梁の桁の渦による振動

上述したように、多くの橋桁に見られる渦励振は、カルマン渦によるものでなく、実は、桁前縁部から生じる渦によるもので、この渦が桁断面側面を流下することで、励振力が生じる。この渦は、剥離剪断層の不安定性が、ある刺激により、特定の風速域（無次元風速域）において、安定化され渦を形成する。その刺激としては、後流域での edge の存在による上流への刺激であったり（edge tone あるいは impinging flow）、断面の振動そのもの（振動による剥離点への刺激）が考えられる[14, 15]。この渦励振の特徴は、断面の後流に、2剪断層の相互干渉を阻害するためのスプリッター板を設置（すなわち、カルマン渦の生成を阻害）しても、渦励振が消滅せずほとんどその影響を受けないことで、カルマン渦励振と明確に区別することができる。1982年に完成した、英国スコットランドのケソック橋（中央径間 240m のΠ断面桁を有する斜張橋、写真 6 参照）が、鉛直撓み及びねじれの渦励振を起こし、急速、桁下に、TMD が設置された。しかしながら、数年後に、再び振動が生じ始め、桁下の TMD に用いられたオイルダンパーのピストンが抜けているのが明らかとなった。また、東京湾のアクアライン橋（桁橋）（写真 7）においても、完成間近（1994年12月）に、この種の鉛直撓み渦励振が生じ、そのため、桁内部に TMD を設置し、構造減衰を高めることにより、制振された[16]。

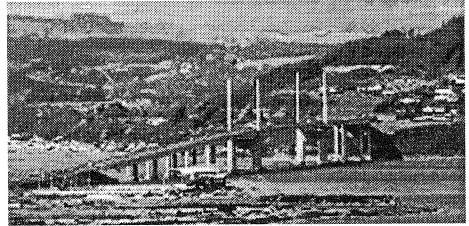


写真 6 ケソック橋

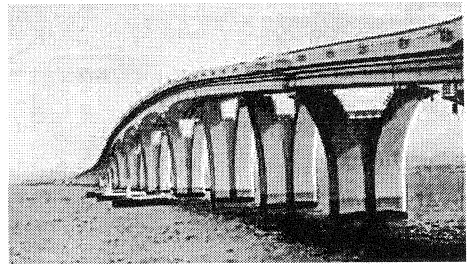


写真 7 東京湾アクアライン橋

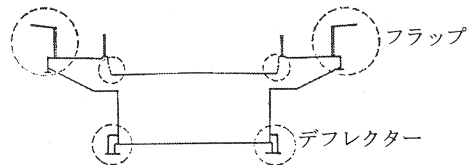


図 6 渦励振抑制のためのフラップ及びデフレクター（永歳橋）

このような剥離剪断層に関係して生じる渦励振は、基本的には、断面前縁部より剥離した流れが、断面側面に定常的あるいは非定常に再付着する断面に生じる。従って、構造物の角部からの剥離をできるだけ押さえることが、振動の抑制に有効であり、橋梁の場合、桁端部にフラップや、デフレクターと呼ばれる剥離を押さえる整流装置が取り付けられることがある（図 6）。又、流れに乱れ成分があると渦励振振幅が減少する傾向がみられるが、桁断面形状が、六角断面の場合、ほとんど影響されないか、むしろ大きくなることのあることがあり、一概に、風の乱れが、渦励振を安定化すると考えてしまうのは危険といえる。何れにしても、渦そのものの生成および振る舞いは、複雑で、非定常、非線形性の強いものであり、渦励振の抑制、他の空力現象へ与える影響など、今後に残されている課題も多い。

8. 斜張橋のケーブル振動

斜張橋ケーブルの空力振動、とりわけレインパイブレーションが、近年、世界各国で問題となっている。この振動は、風速が 10m/s から 15m/s 程度で、かつ降雨時にケーブルが激しく振動する現象であり、人間に対する不安感、ケーブル定着点への構造的課題など、多くの課題、問題をもたらす。この振動は、名古屋の

名港西大橋 (写真 8) のケーブルでの振動に対し、樋上 [17] が、はじめて雨が大きな振動要因であることを指摘し、風洞試験においても、人工降雨のもとでケーブル模型に類似の振動を再現した。現在もなお、その詳細は研究途中にあるが、ケーブル表面での上部水路形式、傾斜ケーブル背後のケーブル軸に沿った流れ (軸方向流)、カルマン渦の3次元性などがその要因と考えられている (写真 9) [18]。その振動を、準定常空気力理論により説明、あるいは、ケーブル振動と上部水路を連成させた連成振動として説明する報告もなされている [19]。しかしながら、レインバイブレーションがある特定の無次元風速域付近において生じる風速限定型の振動であることから、高風速渦励振として、カルマン渦の3次元性が大きく寄与している可能性が大きい [18]。特に傾斜ケーブルの場合、その周りの流れは強い3次元性を示し、極めて複雑な流れ場となり、多くに未解明な課題が残されている。

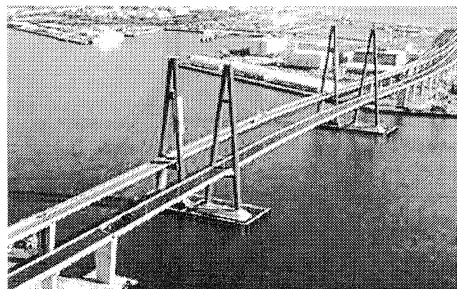


写真 8 名港西大橋

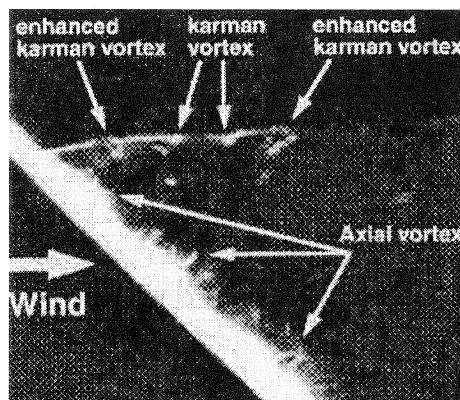


写真 9 傾斜ケーブル周りの流れの可視化

9. タコマ橋落橋の謎と教訓

1940年11月7日の、米国シアトル郊外のタコマ橋の落橋は、当時の橋梁技術者に大きな衝撃を与えた。しかしその反面、吊橋の動的空気安定性照査の重要性を認識させ、その後の長大橋の設計・建設を可能にしたという意味できわめて大きな貢献をしたという意味で、この事故は特筆されるべきものである。なぜこのような事故が生じたのかその時代の背景を振り返り、また、落橋の直接の原因およびその対風挙動に残るいくつかの謎・疑問点を明らかにし、それから得た教訓などを述べる。当時米国は、近代長大橋として、吊橋の建設が押し進められていた。ジョン・ローブリングは、吊橋のケーブルとして、平行線ケーブルの開発を押し進め (当時英国では、銑鉄を用いたアイバーと呼ばれる板やチェーンが吊橋のケーブルとして使われていた)、1855年に中央スパンが251mの鉄道吊橋を完成させた。また、息子のワシントン・ローブリングと共に (実際には、工事が開始されてまもなく、ジョン・ローブリングは、他界し、主として建設は息子により行われた。)、1883年に、ニューヨークのハドソン川に、ブルックリン橋 (中央スパン486m) を完成させた。これらの吊橋の共通しているのは、ケーブルに、平行線ケーブルを用い、また、活荷重による吊り橋の変形を、局所的にならないように、剛性の大きなトラス補剛桁を用いた点であり、またこれ以外に塔から多くのケーブルステイを用いて、全体の剛性を高めた。当時、吊橋の設計は、弾性設計と呼ばれる方法により行われており、力の釣り合いは、変形前の状態で考えられていた。ところが、レオン・モイセーフは、吊橋は元々変形が大きなフレキシブルな構造として、力の釣り合いを、比較的大きな変形の後で考えるという、ジョーゼフ・メランが1888年に発表した、“The More Exact Theory”に着目し、それを改めて撓度理論 (The Deflection Theory) を名付けた [20]。この理論のよれば、本来吊橋の桁は、変形が大きく許されることから、それほど大きな剛性はいらぬ。実際、この方法で、モイセーフは、1909年に、マンハッタン橋 (450m) を完成させた。その後、彼は、アンマンの技術顧問として、ジョージ・ワシントン橋 (1064m) の設計、建設にも携わった。この橋の完成は、1931年で、世界で初めて中央スパンが、1000mを越えた橋であった。撓度理論によると、吊橋の全体剛性は主として、ケーブルによるもので、補剛桁の全体剛性に対する寄与はほとんどなく、また、変形により桁に生じる応力も小さくなることから、桁剛性は小さなものですむというものであった [3]。さらに、1937年完成のゴールデン・ゲート橋 (1280m)

にも、ストラウスの依頼を受けて技術顧問として設計に協力をした。このような米国における長大吊橋建設の流れの中で、彼は、吊橋の補剛桁に、プレート・ガーダーを採用した、タコマ橋を1940年7月に完成させた。中央スパンは、853mであり、当時、ゴールデン・ゲート橋、ジョージ・ワシントン橋に次いで、世界第3位の長大吊橋であり、かつ撓度理論により設計された、きわめてスレンダーで美しい近代吊橋として、当時の世界中の橋梁技術者から注目された。ところが、開通直後から、本橋は風により、上下方向の振動が生じ、利用者から不安感・不満が寄せられた。橋梁管理者は、当初、静的な風荷重に対しては、およそ53m/sの強風にも耐える様に設計されていたために、問題にしていなかったが、その不満が日増しに多くなるにつれ、ついに、ワシントン大学の航空工学の専門であった、ファルカーセン教授にその調査と対策を依頼する事とした。ファルカーセン教授とその

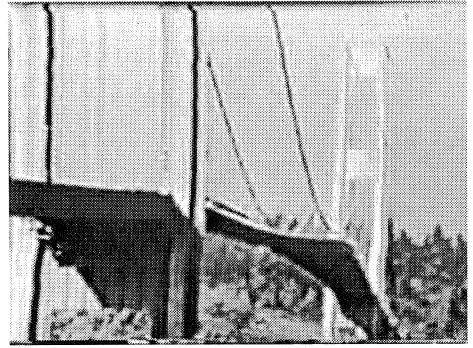


写真 10 旧 Tacoma 橋に発生した
ねじれフラッター

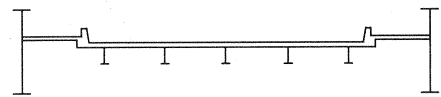


図 7 旧 Tacoma 橋桁断面

グループが、調査していた目前において、1940年11月7日に激しいねじれ振動の後、落橋した。完成後わずか4ヶ月のことであった。その様子は、16mm映画で撮影されており、世界中に大きなショックを与え、大きな話題となった(写真10)。落橋した当日は、いつもより、風が強く、また、上下撓み振動も、いつになく、多くの腹と節のある振動(鉛直対称5次振動)であった。風速は、約17-19m/s程度とされており、その振動が突然に、激しいねじれ振動(ねじれ逆対称1次振動)に変化し、ついに桁の中央スパンから破壊した。事故後、事故調査委員会が構成され、ファルカーセン教授を委員長として、カルマン(Theodore von Karman)教授も参加し、多くに風洞実験が実施され、事故の原因が調べられた。一連の風洞実験により、原因は、桁のねじれ剛性が低く(前述のように撓度理論によれば、桁の大きな剛性は不要)、さらに、桁の幾何学形状(断面辺長比約5のII型断面、図7)から、その動的耐風安定性が極端に悪いことであることが明らかにされた。なお、ねじれ振動の流体力学的な発生機構として、ファルカーセン教授は、この空力ねじれ振動は剥離バブルによって大きな仰角を有する翼などに生じるストールフラッター的なねじれのフラッター振動であるとした。一方、カルマン教授は、その振動に、渦の関与を強く示唆した。この様に、タコマ橋のねじれ振動が、剥離バブルによるねじれフラッターなのか、渦によるフラッターもしくは渦励振なのかという疑問が長年残されてきた。その他にも、タコマ橋の落橋に関し、はっきりしない点が残されてきた。その原因には、事故当時のタコマ橋の桁に作用した風速の大きさが今ひとつ正確に欠けることである。風速値は、橋の側径間の外側にある料金徴収所の小屋の屋根に取り付けられた風速計(温度保証用の風速計)によるものであった。また、なぜ、タコマ橋の桁の振動が、急に、上下撓み振動から、ねじれ振動に変化したのか。また、ねじれのフラッターが、風速18-19m/sで急に生じたのか(ファルカーセンやカルマン[21]、最近の筆者らの実験[22]によれば、もし、ねじれの構造減衰(対数減衰率)が0.05-0.08程度であれば、逆対称ねじれ振動は、もっと低風速(14-16m/s)でも生じると考えられ、逆に、なぜ、18-19m/sまで、ねじれフラッター振動が生じなかったのか疑問に残る)。事故報告書[21]や、川田の著書[3]では、この吊橋のセンターダイアゴナルステイが、上下振動により切断されたために、急にねじれ振動に変化したとされている。これに対し、ねじれ振動が落橋直前に、0.23hzから0.21hzに変化したと報告されており[16]、この時点でセンターダイアゴナルステイが切断されたのではとも考えることができる。(もちろん、他の構造部分が激しいねじれ振動により破損してことによることも考えられる)これは、ダイアゴナルステイのケーブル定着用バンド付近のケーブル素線が多く破断されていること[21]から、鉛直撓み振動(この振動によっては、桁とケーブルの橋軸方向のずれ

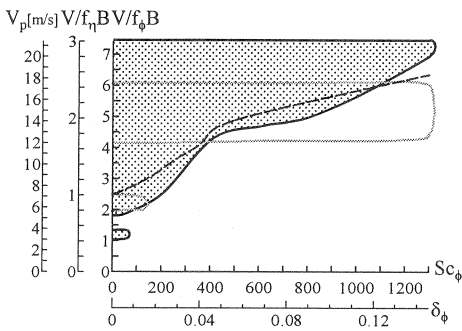
はほとんど発生せず、従って、センターダイアゴナルケーブルバンドがケーブル素線を著しく破断させるとは考えにくい) からねじれ振動に移行したときには、まだ、センターダイアゴナルステイクケーブルは破断していなかったと考えられる。つまり、メインケーブルの素線が、多く傷付けられ、破断したのは、かなりの時間、橋軸方向に、桁とケーブルの相対変位を生じさせるねじれ振動が続いたためと考えられる。さらに、リチャード・スコットによりタコマ橋落橋に関する最近出版された本[23]の表紙のタコマ橋のねじれ振動による最初の桁破壊が発生した瞬間の拡大写真(写真11)を見ると、あまり明確



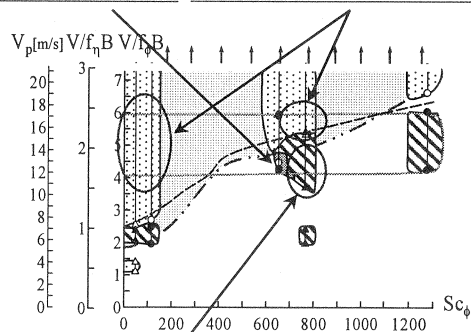
写真11 落橋直後の旧 Tacoma 橋スパン中央部の拡大写真 [23]

ではないものの、ケーブルの素線が多く破損した側のケーブルに、うっすらと、センターダイアゴナルステイクケーブルが破断せずにまだ存在しているようにも見える。従って、急に、風速 18-19m/s で、鉛直振動からねじれフラッターに移行したのは、鉛直振動とねじれ振動の間に、強い空力干渉が存在したためであり、鉛直振動がねじれ振動のある風速まで、抑えていたのではという説明も十分になりつつ。そこで、風洞実験により、鉛直対称 5 次モードとねじれ 1 次逆対称モードの振動数比 ($f_6/f_7=0.25$, f_6, f_7 : ねじれ及び鉛直たわみの固有振動数) とそれぞれの等価質量、質量慣性モーメントを相似させた特殊な (通常は f_6/f_7 は、1 より大きくなるために) 2 次元剛体バネ支持実験を実施し、その 2 自由度系での振動応答特性を、それぞれ 1 自由度系で行われた振動応答と比較することにより、鉛直撓み振動とねじれ振動両者のあいだの、空力干渉特性を調べた。この実験により、両者に強い空力干渉が存在することが明らかにされた[22] (図 8)。つまり、

HEAVING VORTEX-INDUCED VIBRATION TORSIONAL FLUTTER SUPPRESSES
INDUCES TORSIONAL VORTEX-INDUCED HEAVING VORTEX-INDUCED VIBRATION
VIBRATION



a) HEAVING 1DOF + TORSIONAL 1DOF



HEAVING VORTEX-INDUCED VIBRATION
SUPPRESSES TORSIONAL FLUTTER

b) HEAVING & TORSIONAL 2DOF

- : HEAVING VIBRATION
- : TORSIONAL VIBRATION
- : HEAVING & TORSIONAL VIBRATION
- : CRITICAL VELOCITY BY AERODYNAMIC DERIVATIVE

図 8 旧 Tacoma 橋桁断面のスクルーン数(Sc_ϕ)-振動発現無次元風速(V)図 [22]

ねじれフラッターが生じる最初の段階で、鉛直撓み渦励振により、ねじれ振動が抑制され、ある程度、ねじれフラッターの励振力が大きくなった段階で、急に、ねじれフラッターが生じるという実況で観測された振動特性と類似の現象が得られた。なお、このような、振動モードの急な変化は、風速 16m/s-17m/s 前後で生じている。風速が 18-19m/s と報告されているが、タコマ橋が、チャンネルを直角に横断しておらず、やや斜め

に横断 (25° の角度で) していることから、報告されている風速値に、 $\cos(25^\circ)$ をかけるとほぼ実験で観測された風速値に対応する。また、カルマンが、渦の存在を強く指摘したのは、この桁断面のねじれフラッターは、低風速域では、渦の役割により、また、高風速域では、剥離バブルの役割により生じることが、その後の実験で明らかにされており [24]、ファルカーセン、カルマン両者の主張は、共に、それぞれ異なった流れの機構を指摘していたといえる。いずれにしても、このタコマ橋の落橋は、動的な耐風安定性確保の重要性を明らかにし、それ以降の長大橋設計、建設に大きな影響を与えた。

10. そして、長大橋建設へ

とにかく、このタコマ橋の事故を契機として、長大吊橋にとって、動的空力安定性の重要性が強く認識され、その安定性をいかに確保するかが、設計のポイントとなった。その後の長大吊橋の耐風設計には、世界的にみて、2つの大きな流れが見られた。タコマ橋の落橋が、その桁の断面形状 (流れが剥離する bluff な断面であり、ねじれフラッターの生じやすい断面) であり、また、そのねじれ剛性が十分でなかったことから、一つは、主として英国を中心とした、セバーン橋 (中央スパン 988m、1966年完成) に見られる流線型状に近い、偏平箱桁の採用であり (図 9)、もう一つは、米国を中心としたトラス桁の採用である。この流れの延長として、1998年に、デンマークにグレートベルトイースト橋 (中央スパン 1624m、偏平六角形箱桁断面) が、又、同年、明石海峡橋 (中央スパン 1991m、トラス桁) が相次いで完成した。明石海峡橋は、現在世界一の長大橋となっている。グレートベルトイースト橋は、英国の、また、明石海峡橋は米国の流れの延長ということになる。又、1997年に香港に完成した、ツシン・マ橋は、中央スパン 1377m であるが、基本的には、桁はトラス構造であるが、このトラス桁をプレートで覆い、一見箱桁のように見える。フラッターに対する安定性確保のために、桁幅中央部の上下面に air gap と呼ばれる風抜き部が設けられているのが特徴といえよう (図 10)。更に、現在、中央 3300m の超長大吊橋が、イタリアのメッシナ海峡に計画されており、近く着工する予定になっている。この橋梁の桁は、耐風安定性確保のために、一部に曲線部を有する 3 分離箱桁が、床リブで離散的に連結された、幅員 60m の巨大な吊橋構造となっている (図 11)。このメッシナ海峡橋は、中央径間長が 3300m という超長大吊橋にも関わらず、そのフラッター限界風速は、100m/s 程度と驚くほどの耐風安定性を示す。これらの長大橋の設計では、その耐風安定性確保が最も重要な要素となっており、いかにして、フラッターに対して安定化するか、多くの実験と解析が行われ、現在に至っている。タコマ橋に空力振動は、ねじれ-自由度のねじれフラッターという現象であったが、近年多くの長大吊橋の桁は、鉛直振動 (上下振動) とねじれ振動が連成する曲げ・ねじれ連成フラッター (具体的には、鉛直振動により生じるピッチングモーメントとねじれ振動により生じる揚力が振動を励起させる) であり、現象自体は異なるものである。これらのフラッターは、桁の振動自体により誘起された流体力により生じることから、自励振動と呼ばれる。明石海峡大橋や、メッシナ海峡橋では、フラッターに対する桁の空力性能とし、平板や、飛行機の薄翼のそれより、より高いものが要求され、そのために、いろいろな工夫、技術革新がなされている。例えば、明石海峡橋の桁では、桁幅中央部と桁端部に、グレーチングと呼ばれる、空気抜け (air gap)

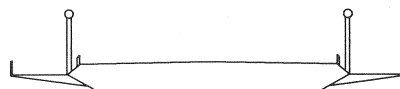


図 9 Severn 橋桁断面

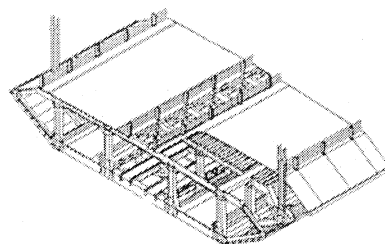


図 10 Tsing Ma 橋桁断面

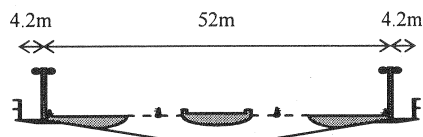


図 11 Messina 海峡橋桁断面

基本的には、桁はトラス構造であるが、このトラス桁をプレートで覆い、一見箱桁のように見える。フラッターに対する安定性確保のために、桁幅中央部の上下面に air gap と呼ばれる風抜き部が設けられているのが特徴といえよう (図 10)。更に、現在、中央 3300m の超長大吊橋が、イタリアのメッシナ海峡に計画されており、近く着工する予定になっている。この橋梁の桁は、耐風安定性確保のために、一部に曲線部を有する 3 分離箱桁が、床リブで離散的に連結された、幅員 60m の巨大な吊橋構造となっている (図 11)。このメッシナ海峡橋は、中央径間長が 3300m という超長大吊橋にも関わらず、そのフラッター限界風速は、100m/s 程度と驚くほどの耐風安定性を示す。これらの長大橋の設計では、その耐風安定性確保が最も重要な要素となっており、いかにして、フラッターに対して安定化するか、多くの実験と解析が行われ、現在に至っている。タコマ橋に空力振動は、ねじれ-自由度のねじれフラッターという現象であったが、近年多くの長大吊橋の桁は、鉛直振動 (上下振動) とねじれ振動が連成する曲げ・ねじれ連成フラッター (具体的には、鉛直振動により生じるピッチングモーメントとねじれ振動により生じる揚力が振動を励起させる) であり、現象自体は異なるものである。これらのフラッターは、桁の振動自体により誘起された流体力により生じることから、自励振動と呼ばれる。明石海峡大橋や、メッシナ海峡橋では、フラッターに対する桁の空力性能とし、平板や、飛行機の薄翼のそれより、より高いものが要求され、そのために、いろいろな工夫、技術革新がなされている。例えば、明石海峡橋の桁では、桁幅中央部と桁端部に、グレーチングと呼ばれる、空気抜け (air gap)

が設けられ、また桁幅中央グレーチング下に鉛直スタビライザーと呼ばれる鉛直板が設置されており、さらにトラス内部の公共添加物配置位置の工夫などがなされた。一方、メッシナ海峡橋では、三つの分離箱桁とそれらの形状、それらの間の air gap の存在、桁端部の形状の工夫などにより、その耐風性確保が図られた。今後、更に経済的かつ耐風性の良い桁断面の開発に関する研究も進められている。

11. 台風による強風と強風に対する文化財などの保存

1991年の台風19号台風は、日本列島ほぼ全域にわたり、多くの強風被害を与えた。特に、九州、四国では、送電鉄塔に倒壊被害、中部地方では、宮島の厳島神社の一部倒壊被害や、送電鉄塔への塩害による長期にわたる停電、又秋田、青森県での多くのリンゴ被害などが特筆される。風も強く、多くのところで最大瞬間風速値を塗り替えた。九州や日本海側のいくつかの地域では、おおよそ200年から900年の再現期間に相当する強風であった。又、日本保険機構が支払った金額は6500億円にのぼり、自然災害に対する支払額として最高の記録となった[25]。このような台風による強風を、重要な建造物の耐風設計にどのように取り入れるか、まさに、重要な問題である。つまり、従来、建造物の耐風設計を行う場合、設計風速の定め方は、その建造物の寿命(耐用年数)の間に、その風速が吹く確率をある値以下にするように定める。つまり、これらの値から、強風の再現期間が決定され、建造物建設地点の強風の確率極値分布より、対象とされる風速値(設計風速に相当する)が決められる。しかしながら、この台風9119号が、ある規模で、今回の経路をたどったという統計的な確率は、ただ一つにも関わらず、この台風による強風の、日本各地での再現期間が大幅に異なるという、従来の強風予測における矛盾点を明らかにした。つまり、台風、ハリケーン、サイクロンなどの熱帯低気圧の影響にある地域では、ほとんどの場合、何年かに一度の強風はこれら熱帯低気圧によって決まる。ところが、建設地点の強風の極値分布は、その地点の長期間の年最大風速値から求められており、台風による強風の確率的な非正常性から、そのある再現期間に期待される強風が正しく評価されていない(上述のように、この台風9119号による強風がその一例)。このため、そのような熱帯低気圧の影響にある地域での、強風予測は、従来の年最大風速により求められる極値分布によらず、直接台風シミュレーションや、ハリケーンシミュレーションを用いて建造物の建設地点の強風予測を行うことが、より合理的であり、世界各国でもそのような方法での強風予測を行うように移行しつつある。

ところで、1998年の台風7号は、上記の9119台風に比べると、その規模も小さく、和歌山県御坊市付近に上陸したときには、960hPaで、そのまま奈良県、京都府を965-970hPaの強さを保って、縦走した。台風の本目が琵琶湖あたり(大津と彦根の中間部)にあるときに、奈良県中部(奈良盆地南部)に、瞬間風速60m/sの強風が吹き、多くの強風被害がでた。特に、林業と文化財に多くの被害がでた。奈良県の室生寺では、重要文化財の五重塔が、その周辺の樹齢500-700年の杉の大木の倒壊により、深刻な破損(写真12)を受け、大きな話題となった。台風の本目が通りすぎ、琵琶湖の付近にあったときに強風が吹いた原因としては、地形による風の局地的な増速効果[26]と、台風に伴ったあるいは中に含まれる大気の大擾乱によるもの[27]と考えられる。また、台風9119号では、広島県の厳島神社が、強風により被害を受けた。このように、過去に建造された(当然ながら十分なあるいは全く耐風設計が行われていない)重要文化財や価値の高い建造物を、強風に対していかに安全に保存していくかは、今後十分に議論し検討していかなければならない問題といえる。

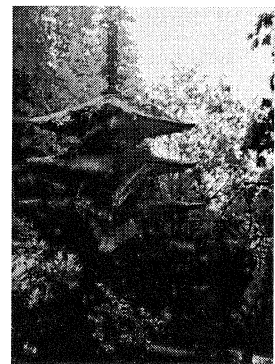


写真12 台風9807号により
損傷した室生寺五
重塔

12. 終わりに

以上、多岐にわたる、流体、風がらみのトラブルと事故の概要、それらから得た教訓を紹介したが、我々

の今日の技術あるいは、研究レベルは、それらから得た知識と反省に基づいているのも事実である。それらから得た知識、教訓、成果をベースに、事故を予見し、また防止することでより安全で快適な生活環境づくりに努力しなければならない。

参考文献

- 1 川田忠樹：誰がタコマを落としたか、建設図書、1975.
- 2 福田武雄：橋梁事故物語、土木学会第20回年次学術講演会総合講演、1965.
- 3 古屋信明：橋をとおして見たアメリカとイギリス—長大橋物語、建設図書、1998.
- 4 中嶋一史：鋼構造の発展に寄与した人々 (13) G エッフェル (その2)、JSSC, No.21, pp.55-59, 1996.
- 5 中口博、橋本貴久裕、武藤真理：矩形断面の柱の抗力に関する一実験、日本航空宇宙学会誌、第16巻、第168号、1968.
- 6 大塚和之：地下鉄東西線の列車脱線事故について、電気車の科学、昭和53年6月.
- 7 白石成人、松本勝、北川雅章：風速が急変する場合の物体に作用する空気力、第7回風工学シンポジウム論文集、1982.
- 8 吉村健、中村泰治：インディシャル応答による構造断面のねじりフラッタの研究、土木学会論文報告集、第264号、1977.
- 9 A. Okajima, T. Iwasaki : Flow-Visualization of Flow-Induced In-Line Oscillation of a Bluff Body, Proc. 16th National Symposium on Wind Engineering, pp.213-218, 2000.
- 10 R. King : A review of vortex shedding research and its application, Ocean Engineering, Vol.4, 1977.
- 11 C. Knisely, M. Matsumoto, F. Menarcher : Rectangular cylinders inflows with harmonic perturbation, J. Hydr. Engineering, ASCE, Vol.112, No.8, 1986.
- 12 溝田武人：カルマン渦の安定配列計算の遠因となった聖クリストファーのプレスコ画はこれか、日本風工学会誌第81号、1999.
- 13 M. Mizota et al.: St Christopher and the vortex A Karman vortex in the wake of St Christopher's heels, Nature, International weekly journal of science, March, 2000.
- 14 Y. Nakamura, M. Nakasima : Vortex excitation of prisms with elongated rectangular, and cross sections, J. of Fluid Mech., Vol.163, 1986.
- 15 N. Shiraishi, M. Matsumoto : On Classification of vortex-induced oscillation and its application for bridge structures, J. of Wind Engng and Ind. Aerody., 14, 1983.
- 16 吉田好孝、藤野陽三ほか：東京湾アクアライン橋梁部鋼箱下桁橋の渦励振の振動制御、土木学会論文集、No.633/I-49、1999.
- 17 樋上琇一：斜張橋ケーブルの Rain Vibration、日本風工学会誌第27号、1986.
- 18 M. Matsumoto : Observed behavior of prototype cable vibration and its generation mechanism, Bridge Aerodynamics, Balkema, 1998.
- 19 Y. L. Xu, L. Y. Wang : Analytical study on wind-rain induced cable vibration: SDOF model, J. of Wind Engng and Ind. Aerody., 27-41, 2003.
- 20 川田忠樹：近代吊橋の歴史—経済性と剛性の相克—、建設図書、2002.
- 21 F. B. Farquharson : Aerodynamic Stability of Suspension Bridges, Part I-IV, 1949.
- 22 松本勝 他：旧タコマ橋における異種空力振動の干渉現象、第17回風工学シンポジウム、2002.
- 23 R. Scott : In The Wake of Tacoma, ASCE Press, 2001.
- 24 M. Matsumoto et al. : Torsional flutter of bluff bodies, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, 1997.

- 25 光田寧 (研究代表者) : 1991 年台風 19 号による強風災害の研究、平成 3 年度文部省科学研究費、総合研究(A)03306022、突発災害調査研究成果報告書、1992.
- 26 松本勝 (研究代表者) : 1998 年 9 月台風 7 号による近畿地方を中心とした強風災害に関する調査研究、課題番号 10600002、平成 10 年度科学研究費補助金 (基盤研究(C) (1)) 研究成果報告書、1999.
- 27 奥田泰雄、石川裕彦、藤井健 : 台風 9807 号の中心後面に発生した強風、第 16 回風工学シンポジウム論文集、2000.