

橋のはなし：あれこれ

十七回生 波田 凱夫

はじめに

このたびご縁があつてはじめて千里山会誌に投稿させていただくことになりました。私は大学を卒業してちよつと50年間、橋や建物(いわゆる構造物)を作るための「構造力学」という理論の研究をしてきました。また、一時期民間企業に籍を置いて、関門橋を手始めに、瀬戸大橋、大鳴門橋、明石海峡大橋などの長大つり橋の建設に関わる研究をし、また、橋を架ける現場の経験もしてきました。そんな経験をもとに、この機会に「橋」(技術用語では「橋梁」)について少しお話しをさせていただきたいと思ひます。

昭和63年に瀬戸大橋が開通し、本州と四国がはじめて陸続きになりました。そのときに、自分もこの橋を作った一人であることを自慢しようとして、親戚の男に「一度瀬戸大橋を見て来いよ」と言いました。彼が瀬戸大橋をドライブして帰ってきたときに言った言葉は「まあ大きいと言っただけで、橋は橋やな」でした。

これにはかなりショックを受けました。あの上を走る人にとつては、橋は道路のほんの一部という感覚しかないのか、大きかろうが小さかろうが橋は橋という感慨だけか、とちよつとがっかりしました。

それ以来、私は人に橋の話をする時は必ず「橋の上を素通りするだけでなく、車を降りて下から横から眺めて欲しい。そうすれば橋についてきつと新しい発見があるはずだから」と言う事になっています。

皆様方にも一度これまでとは違った目で橋を見ていただきたいと思います、橋がどのような構造物であるかをお話しさせていただきます。こうと思ひます。

1. 橋の規模は「スパン」で

ご承知のように橋と言ってもいろいろの種類があります。それらは皆それぞれの理由があつてそれぞれの形態をとつています。その理由をお話する前に、先ず「スパン」という専門用語を記憶にとどめていただきます。と思ひます。

スパンと言うのは、橋桁(けた)が架け渡されている橋脚と橋脚の間の距離を言ひます。たとえば「明石海峡大橋は世界一大きい橋である」ということは、

2本の巨大な橋脚（つり橋の場合は特に「主塔」と言います）の間の距離が2000mあって、これが世界最長であるということです。橋の大きさを表すのはスパンであって、橋の端から端までの「全長」（明石大橋では約4000m）ではありません。

スパンの大きい橋を作ることは橋梁技術者の夢です。しかしそれは単に技術的な興味だけによるものではありません。川の中に橋脚を何十本も立てると水の流れを阻害し、それが河川氾濫の遠因になりますし、航行する船舶の邪魔になり、事故のもとにもなります。川にとって橋脚は邪魔者でしかないのです。

ですから、橋を設計するときにはスパンを何メートルにするかがまず大切な要因になります。もちろん、単にスパンが長ければよいと言うだけではなく、技術的な問題はもちろん経済的な制約もあります。

2. スパンを大きくするには

橋のスパンを大きくするにはどうするかをちょっと考えて見ます。図1の（A）と（B）のように長短2つの橋桁があり、これと同じ大きさの荷重（自動車や列車など）これを「活荷重」と言います）が載ったと

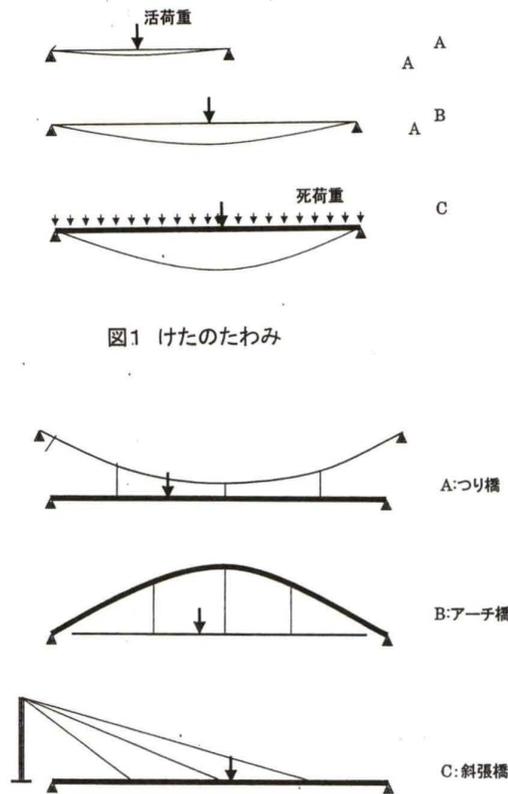


図1 けたのたわみ

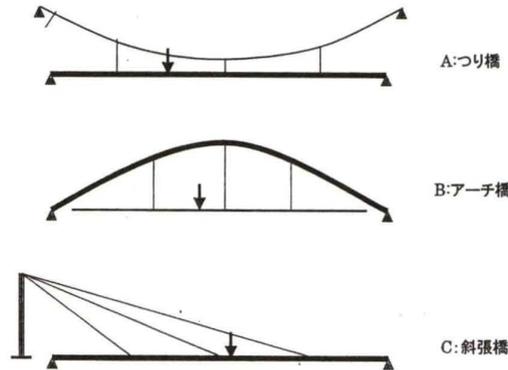


図2 死荷重に耐える

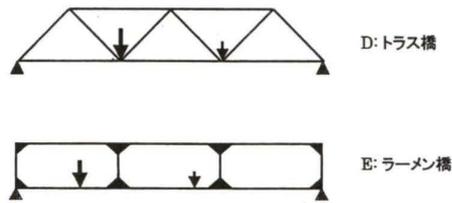


図3 死荷重の軽減

します。するとスパンの長い（B）の方が大きくなつて危険な状態になりますから（B）の桁をもっと太くて頑丈なものにすればよいと思われまふ。しかしこれは解決策にはなりません。何故なら、桁を太くすればそれだけ桁の自重（これを「死荷重」といいます）が増えるわけで、その分だけ桁はより大きくなつてまふ。桁を太くするにも限界があるわけだ。

スパンを大きくすればするほどこの死荷重の影響が大きくなります。スパンを大きくすることは死荷重との戦いであると言つてもよいでしょう。

この死荷重に耐えて橋のスパンを大きくするのにいろいろの方法が考えられます。図2の（A）はいわゆる「つり橋」の原理で、空中で両端を固定されたケーブルで桁を吊り上げるもの、（B）はアーチ状にして荷重を支えるもの（うすっぺらな塩ビの定規でもこれを曲げて両端をしっかりと止めるとかなり大きい荷重に耐えるという経験がとおりでしょう）、（C）は空中から斜めに張り渡されたケーブルで桁を支えているもので「斜張橋」というタイプの橋の原理です。また、死荷重を軽減するために図3（D）のように細い棒を三角形の骨組みに組み立てたものがあります。これを「ト

ラス橋」といいますが、電車の鉄橋などでおなじみのものです。さらに、(E)のように長方形状の骨組みの隅の部分をしつかりと補強したものをラーメン構造と言います(この構造に限り伝統的にドイツ語で呼びます。「枠」と言う意味です)。

3. 橋を設計するための前提条件

このように橋にはいろいろの種類がありますが、どのような形式の橋を架けるかについて考慮すべき二つの重要なポイントがあります。

まず「安全性と経済性」の兼ね合いです。橋の「安全性」を確保するには橋の各部位が大きく変形したり、壊れたりしないようしつかりと計算や実験で確かめておく必要があります。一言で言うなら、十分な大きさを持った強い「部材」(橋の構成要素のこと)で「メンバ」と言います)を使うことです。一方、「経済性」という点からは、出来るだけ少ない材料と労力で橋を作らねばならず、そのためにはぎりぎりの大きさの「部材」を用いるということになります。安全性を確保するには出来るだけ大きくて頑丈な部材が、経済性を満たすには必要最小限の大きさの部材が要求されるわけ

ですから、互いに相反する性格を持つわけです。

もう一つの要因は「合理性と美観(景観)」ということです。橋の構造は構造力学の原理を忠実に具現化するものです。橋は構造力学の理論の固まりと考えていただいでよいでしょう。一方において、橋が架けられる周辺の環境との調和も必要です。ここで、我われ「橋屋」が頑なに信じ込んでいる一つの命題があります。それは「美は合理性の近傍にあり」ということで、これを手前味噌に解釈して「構造的に合理的なものを作れば、それが美そのものだ」と信じているのです。

もちろん橋の形や色をどうするかなど、周辺環境との調和への配慮を忘れるわけにはいきませんが、橋の設計では、自動車・鉄道車両などの荷重や、台風や地震の及ぼす力に耐えて、力学的に合理的に構造物としての機能を発揮することが第一要件であり、「かつ」よさのデザインは後回し」と言う事になるのが普通のことです。この点、建築物の設計とはかなりおもしろく異にするのではないのでしょうか。

4. スパンの大きさに応じて橋の種類を選ぶ

橋を設計するには、まず橋のスパンが設定され、そ

のスパンを実現するのにどのようなタイプの橋を作ればよいか、ということになりますが、スパンの長さと橋の形式との間には大きな関係があります。代表的な形式の橋について、それがどの程度の長さのスパンに用いられるかを見てみます。

① 桁橋(写真1) 新龍門橋(和歌山県紀ノ川)

もつとも単純な形式で、桁をずらりと橋脚上に並べたものです。桁橋にもいろんな種類がありますが、写真1は細長いようかんの箱のような桁を架け渡したもので、「箱桁」と言われます。桁橋が用いられるスパンは、戦前は30mぐらいが限度でしたが、今では技術の進歩によって50m〜150m以上のものもたくさん見られます。200mを超える桁橋もあります。

② トラス橋(写真2) 与島橋(瀬戸大橋)

新淀川を渡っている阪急電車の鉄橋は戦前の典型的なトラス橋で、スパン約30mのものが何本も連なっています。昔は30mを超えるスパンではトラス橋がよく用いられました。現在では200mを超える長大トラス橋がたくさん建設されています。写真2の与島橋のスパンは245mです。大阪南港の「みなと大橋」の中央のスパンは512mで、世界有数の規模を誇っています。こ

の「みなと大橋」を新淀川に持ってくれば、ほとんど途中に橋脚を設けることなく、川を一跨ぎできますから、いかに巨大な橋であるかがお分かりいただけることでしょう。



写真1 新龍門橋(和歌山県紀ノ川)

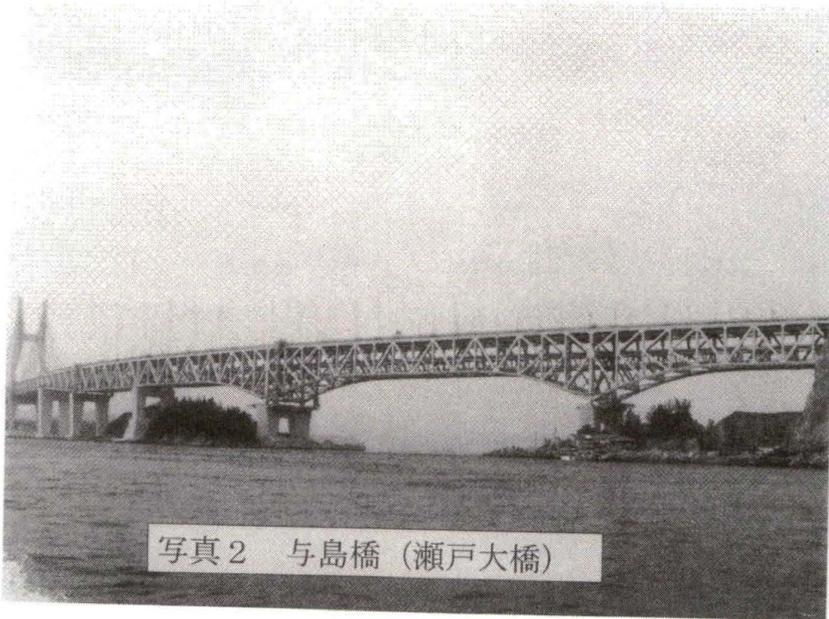


写真2 与島橋 (瀬戸大橋)



写真3 大三島橋 (しまなみ海道)

③ アーチ橋 (写真3) 大三島橋 (しまなみ海道)

トラス橋よりもっと大きいスパンに良く使われるのがアーチ橋です。大阪にはアーチ橋がたくさんあります。淀川に架かっている十三大橋はスパンが60mを超え、造幣局「桜の通り抜け道」のすぐ横にある桜ノ宮橋は100mを超えています。写真3の大三島橋はスパンが約300mで、優美な姿を瀬戸内海に映しています。

④ つり橋 (写真4) 明石海峡大橋

長大橋の代表選手はなんと言ってもつり橋です。サンフランシスコのゴールデンゲート橋は長らく世界一のスパン (1280m) を誇ってきました。この橋がすでに1937年に作られたというのは驚きです。アメリカは長らく長大橋王国を誇ってきましたが、日本の技術者はこれに追いつき追い越すことを目指して、とうとう明石海峡大橋 (スパン1991m) という世界一のつり橋を作りあげました。なお、つり橋とアーチは構造力学的には親戚関係にあります (ちよっと意外かもしれませんが――)。

⑤ 斜張橋 (写真5) 多田羅大橋 (しまなみ海道)

戦後のドイツは日本と同じようにほとんどの都市が廃墟となっていました。その復興のためにドイツの研

究者・技術者は持ち前の勤勉さを發揮して独自の技術開発を進めました。その中で生まれたのが「斜張橋」

で、きわめて力学的合理性に富んだ構造といわれています。日本の技術者もこれに目をつけ、これまた追いつき追い越すことを目指して技術開発を進めました。多田羅大橋はスパンが890mの世界最長の斜張橋です。斜張橋は今後もますますその適用スパンを広げて行く可能性のある構造物です。なお、斜張橋はつり橋ではありません。桁橋の仲間です (これも意外かも――)。

5. 日本における戦後の橋梁技術発展の歴史

戦争で廃墟と化した日本中の都市を復興するのに、橋を架ける技術の開発は不可欠でした。今では世界一のレベルにあると言われる日本の橋梁技術が、過去60有余年の間にどのような進歩の過程をたどって来たかを簡単に見てみます。

① 乏しい資源の有効活用を目指した時代

敗戦直後の極度に貧しかった日本で橋を作るのに、資源の有効活用は至上命令でした。そのためには、構造物の各部位から徹底的にぜい肉を落とした合理的な設計をせねばなりませんでした。そのための理論や計

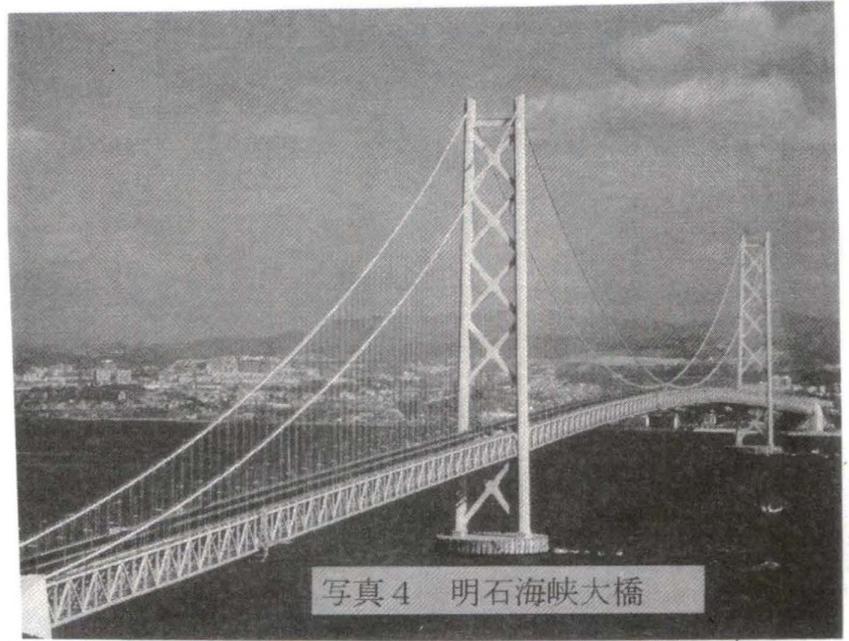


写真4 明石海峡大橋



写真5 多田羅大橋

算手法を研究することが戦後の橋梁工学の第一の課題でした。

② 技術導入の時代

アメリカは長大橋王国として君臨し、ドイツは伝統的に構造力学の理論大国でした。日本はこれら両先輩国に学び、優れた理論や技術を導入しました。また、橋を工場で作したり、現場で架設したりするのに機械化や自動化の技術が進められました。

③ 設計・解析理論の高度化

構造力学の理論が極めて精緻なものとなり、次々と新しい設計理論や計算手法が開発されました。

④ 材料強度の向上

製鉄・製鋼技術が飛躍的に発展し、強度・品質に優れた材料が続々と開発され、名実ともに世界一の技術が確立されました。

⑤ コンピューターの出現と進歩

昭和30年初頭によく実用化されたコンピユーターは、現在の電卓より少しましと言っ程度の性能しか持っていませんでしたが、驚異的な進歩を遂げ、現代の科学技術にはなくてはならないものとなりました。③の解析理論の発展もコンピューターの進歩によ

るところが極めて大きいのです。

⑥ 固有技術の開発

技術先進国のドイツやアメリカに追いつき追い越す時代がやってきました。日本固有の技術が確立され、理論と実践の両面で世界の水準に達しました。

⑦ 長大橋時代の到来

日本列島改造論に端を発した本州四国連絡橋建設の時代へ突入し、世界に誇る長大つり橋・斜張橋・アーチ橋・トラス橋が続々と建設されました。石油ショック等の社会経済情勢の変化で中断することはありましたが、瀬戸大橋・しまなみ海道・明石鳴門ルートの大橋群が完成しました。

⑧ 斜張橋全盛時代を経て多様化の時代へ

ドイツから学んだ斜張橋の技術は日本で完成の域に達したといえます。各地でたくさん斜張橋が建設されました。力学的な合理性と美観と経済性を兼ね備えた橋梁構造として斜張橋は全盛時代を迎えました。

そして現在、日本固有の技術を駆使して、多様な種類の橋が出現しています。

6. 熾烈なスパン争い

技術の進歩は次々と長いスパンの橋(長大橋)を生み出してきました。ここでは、長大橋の代表選手のつり橋について、簡単にスパンの変遷をたどって見ます。

かつてのアメリカはつり橋王国でした。1883年にはニューヨークにブルックリン橋が完成、スパンは当時世界最長の486 mでした。現在すでに100年以上を経過しているこの橋は一時期ずいぶん損傷が目立ちましたが、アメリカ人は自分たちの誇りとも言えるこの橋に徹底的なリハビリテーションを施し、さらにもう100年間維持して行くこうとしています。そして1931年には同じくニューヨークにジョージ・ワシントン橋が完成しました。この時すでにそのスパンは1067 mに達していました。ついで1937年、かのゴールデンゲート橋(スパン1280 m)がサンフランシスコに完成、「スーパー・スパン」と呼ばれました。1930年代にこのような長大つり橋が出現したというのはまことに驚くべきことで、当時のアメリカの技術力、国力の高さが偲べれます。ゴールデンゲート橋は1964年ニューヨークにヴェラザノ橋(スパン1298 m)が完成するまで世界の王者として君臨してきました。アメリカにはこれらの他にもたくさん長大つり橋が作られています。

かし、ヴェラザノ橋を最後にアメリカはつり橋のスパン争いから退きます。

続いて登場するのはイギリスです。イギリスでは、1964年にフォース橋(スパン1006 m)が、1966年にセヴァーン橋(スパン988 m)が完成し、次代の長大橋王国を狙ってきました。そしてついに1981年にハンバー橋(スパン1410 m)を完成させ、一挙に世界ランキング1位に躍り出ました。この橋は1998年に明石海峡大橋が出来るまで世界一の座を守ります。

さて日本では、長年の夢であった本州四国連絡橋が実現へ向って動き出します。それまでは1962年に開通した若戸大橋(北九州)がスパン367 mをもって東洋一と称していましたが、まだまだアメリカなどの長大橋に比べると幼児的なものでありました。日本の本格的な長大橋は関門橋に始まり、1973年に完成したこの橋はスパンが712 mで、日本の技術者はアメリカ、イギリスの技術を十分に学んでその建設を成功に導きました。この橋はいわば本四架橋の最初の練習台であったと言えるでしょう。続いて建設されたのが、本四架橋の第一陣である因島大橋(しまなみ海道—スパン770 m)です。当時の社会経済情勢の激変(石油

ショックなど)のため、本四架橋工事は一時凍結されたこともありましたが、その後逐次完成へ向けて動き出します。続いて大鳴門橋(スパン876 m)が1985年に開通します。(関門橋から徐々にスパンが長くなっていることに注目下さい。)

ついでいよいよ本州と四国を直結する「瀬戸大橋」の建設が始まり、1988年に完成しました。瀬戸大橋の中には、下津井瀬戸大橋、北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋という三つの長大つり橋がありますが、一番スパンの長いのは南備讃瀬戸大橋(1100 m)で、これによつて日本もはじめて1000 mクラスの長大橋時代に入りました。この橋はスパンが1000 mを超えたということだけでなく、その上に道路と鉄道を一緒に走らせているというところに世界にも類を見ない特長があります。このようにして着々と技術を蓄えてきた日本の橋梁技術陣はとうとう世界一のスパンへ挑みます。それが明石海峡大橋で1991 mのスパンを実現しました。これでお分かりのように、明石海峡大橋を実現するために、日本の橋梁技術者は関門橋を手始めに、因島大橋、大鳴門橋、下津井瀬戸大橋、北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋と徐々にスパンを延していき、いわば

これらを練習台として、それらの建設の都度、技術と経験を積み上げて、ついにそれを明石海峡大橋に結晶させたのです。

しかし近い将来この世界一の座は明け渡さねばなりません。イタリアのメッシナ海峡ではスパン3000 mの橋を建設中です。

これからますます熾烈なスパン争いは世界中で繰り広げられることでしょう。

7. おわりに——本四架橋は20世紀最大の暴挙か？
橋の技術について出来るだけ専門用語を使わずに説明させていただきましたが、これで皆様方の橋を見る目が少しでも変わっていただければ幸いです。これからは、珍しい橋、大きな橋にさしかかったときにはちよつと足を止めて、橋をじっくりと横から下から眺めていただきたいと思います。特に、下から見上げていただくのがお勧めです。明石海峡大橋を下から眺めていただくと、改めてその巨大さに気付かれ、これを作った20世紀の技術者の心意気の一端を感じ取っていただけではないでしょうか。

ところで、本州四国連絡橋は税金の無駄遣いの権化

のようにマスコミなどで喧伝され、これに携わった技術者や研究者たちを口惜しがらせています。

本四架橋パッシングの根拠は、建設費が3兆円、(その60%が借金)、維持管理費が50年間で2兆円、利息が6兆円などということにあり、これだけの大金をドブに投げ捨てたかのような印象を与えているのですが、本当にそうなのでしょうか？

心ある人は、このような短絡的な発想には惑わされたいと思います。本州と四国が陸続きになるということだけを単純に考えても、その経済的、社会的なメリットは計り知れないものがあり、歴史的にもそれは本常に日本人の長年の夢ではなかったでしょうか？

作家の峯崎淳氏はある雑誌で、「同時代人は同時代の真に偉大なものを理解しない」と喝破し、本四連絡橋を「20世紀の日本人が作った世界に冠たるモニュメント」であると言っています。それは単に、「瀬戸内海に橋をかけた」という歴史的快挙(峯崎氏)にとどまらず、未来の新しい国土づくりに不可欠の技術を開発するのにも大きく貢献しているのです。地球温暖化で海面がどんどん上昇する近未来には、我われはいやでも水と関わる技術が必要とします。本四架橋の技術はその

示されました。図4は画伯の描かれた大三島橋です(写真3と比べて下さい)。先日この美術館を訪れたときには、もう本四架橋の絵は20点ほどしか展示されていませんでしたが、それでもひとときわ燦然と輝いて訪れた人の目を引いていました。本四架橋は大芸術家の魂をも揺さぶり、後世に残るすばらしい作品を数多く生み出したのです。

こんな本四架橋が、毎年新聞などに絶えることなく報じられる政治家や高級官僚たちの税金無駄遣いと同列に扱われて、マスコミの無知なニュース・キャスターなどから悪罵を浴びせられるなんて本当に耐え難いことです。

最後は一人の橋梁技術者のボヤキになってしまいました。一人でも多くの方が本四架橋の値打ちを再認識してくださるために、もう一度この橋たちを訪れて、じっくりと眺めて見ようという気になっていただければ筆者の幸いこれに過ぎるものはありません。

波田 凱夫様 紹介(萩原記・後輩且つ教え子)

波田様は千二小の十七回生。阪大工学部に進まれ、そのまま卒業後も大学に残られ、橋梁・構造力学の

ような未来技術に直接つながるものです。

また、「モニュメント」という言葉にも少しこだわってみますと、世界の各地にはその地を代表するモニュメントがたくさんあり、それらがその国の歴史的、文化的、知的水準を誇示しています。エッフェル塔が出来上がったとき、文豪モーパッサンはパリに怪物が出現したとき下ろしたそうですが、今エッフェル塔のないパリなんて想像できるでしょうか？ゴールデンゲート橋のないサンフランシスコ、自由の女神のいないニューヨーク、ビッグベンのないロンドンなど、考えただけでも味気なさを覚えます。本四架橋は、今から30年、50年先には必ず瀬戸内海の新しい風土として定着するに違いありません。橋のない瀬戸内海なんて想像することも出来ない、と我われの子供や孫が言ってくれる日がきつと来ると思うのです。

瀬戸内海・生口島の瀬戸田町に「平山郁夫美術館」(写真6)があります。この地で生まれた平山画伯は「しまなみ海道」の橋たちをこよなく愛し、その建設中には毎日のようにスケッチをしに行かれたそうです。この美術館には画伯の描かれた橋の絵がたくさん所蔵されており、しまなみ海道開通の時は多くの作品が展

研究を続けられた後、工学博士の学位を取得され、助教授として後輩の育成に励まれました。私もその一人として教えを受けました。

その後、神戸製鋼所の首席研究員・機械研究所技術担当部長等を経て、神戸市立工業高等学校教授・摂南大学工学部土木工学科教授且つ工学部長を歴任され、06年に定年退官されました。この間、橋梁に関する技術の進歩、発展に顕著な業績を挙げられ、土木学会賞を受賞されています。

中学時代から始められたヴァイオリンはその後もずっと続けられ、阪大時代のオーケストラ部の仲間と室内弦楽合奏団を結成。あるアマチュアのオーケストラでコンサートマスターを務められたこともあります。今も若い美人の先生に付き、時に発表会にも参加。

この紹介文を書くに当たり、私は多くの大学時代の仲間(波田先生の教え子)からエピソードを募りましたところ次々と寄せられました。中には学生時代に橋梁実験等のお手伝いをし、ミナミの洒落た店「ZERRO」に連れて行ってもらい、そこで波田先生がピアノを弾かれたとありました。紙面の関係でここに多くを披露できないのが残念です。

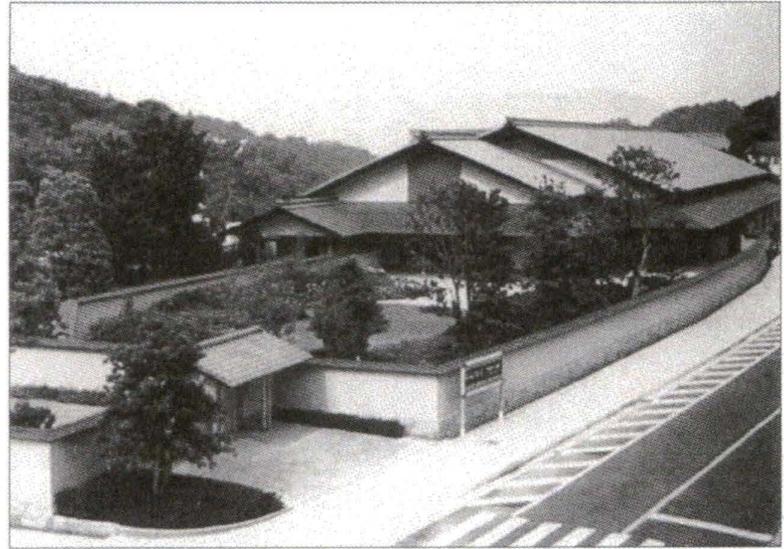


写真6 平山郁夫美術館

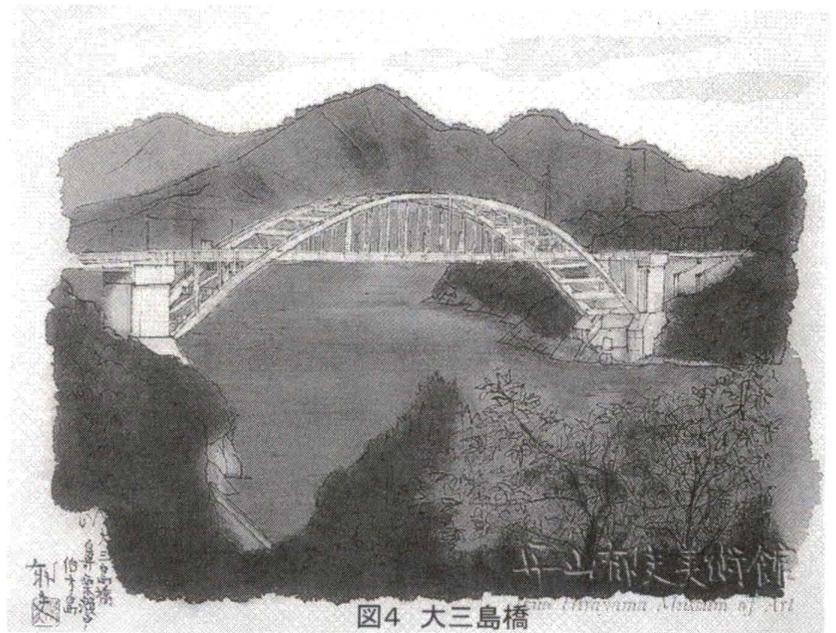


図4 大三島橋