

巻 頭 言

超長大橋梁時代の展望と 暴風時質量付加型吊橋の提案

Perspective for the Coming Era of Ultra Long Span Bridges
and a Proposal of Temporary Additional Mass Method against
Violent Storm

川田工業(株) 取締役社長
President

川 田 忠 樹
Tadaki KAWADA



1. ここまで来た日本の長大橋梁技術

日本橋梁建設協会の編集による「日本の橋」が、10年ぶりに増補改訂されて、再版された¹⁾。

旧著1984年版と、新著1994年版と、いずれも巻末には各橋種別に内外長大橋のランキング10位までが掲載されている。その中でも斜張橋と吊橋の二部門につき比較してみると、この10年間に於ける日本の橋梁技術の進歩の跡をよく示していて、興味深いものがある。

たとえば斜張橋を対比させた表-1であるが、'84年の

調査では世界ランキング第1位は横浜ベイブリッジであり、当時としてはまだスパン500mを超えるものは存在しなかった。それにしても本四連絡橋の岩黒島橋、櫃石島橋、それに名港西大橋と、上位5位までのうち日本が4ランクも占めていて、戦後西ドイツから始まった斜張橋ブームのお株を、当時すでに我が国が奪いつつあったことがよくわかる。

そしてその結果は10年後の今日、支間長890mの多々羅大橋を筆頭に、10位までの世界ランキングの中に実に6橋という、圧倒的な数字となって示されている。日本は

表-1 世界の斜張橋ランキング¹⁾

1984年調べ					1994年調べ				
順位	橋 名	国 名	完成年	支間長(m)	順位	橋 名	国 名	完成年	支間長(m)
1	横浜ベイブリッジ	日 本	施工中	460	1	多々羅大橋	日 本	施工中	890
2	Second Hooghly橋	イ ン ド	施工中	457	2	Normandy橋	フ ラ ン ス	施工中	856
3	岩黒島橋	日 本	施工中	420	3	楊浦大橋	中 国	1993	602
4	櫃石島橋	日 本	施工中	420	4	名港中央大橋	日 本	施工中	590
5	名港西大橋	日 本	施工中	405	5	鶴見航路橋 (仮称)	日 本	施工中	510
6	St. Nazaire橋	フ ラ ン ス	1975	404	6	生口橋	日 本	1991	490
7	Rande橋	ス ペ イ ン	1978	401	7	東神戸大橋	日 本	1993	485
8	Luling橋	ア メ リ カ	1982	373	8	Alex Fraser橋	カ ナ ダ	1986	465
9	Düsseldorf-Flehe橋	西 ド イ ツ	1979	368	9	横浜ベイブリッジ	日 本	1989	460
10	Askeröfjord橋	スウェーデン	1981	366	10	Vidyasagar Setu橋	イ ン ド	1992	457

表-2 世界の長大吊橋ランキング¹⁾

1984年調べ					1994年調べ				
順位	橋 名	国 名	完成年	支間長(m)	順位	橋 名	国 名	完成年	支間長(m)
1	Humber橋	イ ギ リ ス	1981	1 410	1	明石海峡大橋	日 本	施工中	1 990
2	Verrazano Narrows橋	ア メ リ カ	1964	1 298	2	Great Belt East橋	デンマーク	施工中	1 624
3	Golden Gate橋	ア メ リ カ	1937	1 280	3	Humber橋	イ ギ リ ス	1981	1 410
4	Mackinac Straits橋	ア メ リ カ	1957	1 158	4	青馬大橋	香 港	施工中	1 377
5	南備讃瀬戸大橋	日 本	施工中	1 100	5	Verrazano Narrows橋	ア メ リ カ	1964	1 298
6	Bosporus橋	ト ル コ	1973	1 074	6	Golden Gate橋	ア メ リ カ	1937	1 280
7	George Washington橋	ア メ リ カ	1931	1 067	7	Mackinac Straits橋	ア メ リ カ	1957	1 158
8	De Vinte E E Cinco	ポルトガル	1966	1 013	8	南備讃瀬戸大橋	日 本	1988	1 100
9	Forth Road橋	イ ギ リ ス	1964	1 006	9	Fatih Sultan Mehmet橋	ト ル コ	1988	1 090
10	北備讃瀬戸大橋	日 本	施工中	990	10	Bosporus橋	ト ル コ	1973	1 074

今やまさに、世界一の斜張橋大国となったのである。

表-2として掲げた吊橋の方でも、日本の躍進振りは目覚ましい。10年前にはなんといっても英国のハンバー橋がナンバーワンで、続いて米国のヴェラザノナローズ、ゴールデンゲイト、マキナックの三橋が続き、我が日本では南備讃瀬戸大橋が第5位、北備讃瀬戸大橋が第10位と、半ば以降によく顔を出すにすぎなかった。

ところが1994年ともなると、支間2キロメートルに近い日本の明石海峡大橋が断頭の1位であり、デンマークのグレートベルトイースト橋も支間1624mと、ハンバー橋の1410mを大きく抜いている。

こうした斜張橋や吊橋といった、いわゆるケーブルを利用したタイプの支間長の伸び方は、まことに目をみはらせるものがある。参考までに表-3として、1970年代の標準的な橋梁工学の教科書に載せられていた、橋種別の適用スパンを掲げたが²⁾、当時斜張橋では支間330mぐらいいまで、また吊橋でも1350mぐらいいまで跳ばすのが、精一杯だと考えられていた。

結果からすれば斜張橋では約3倍に、吊橋でも5割ばかり、当時の常識より支間長を伸ばしたことになる。そしてその先頭を切って、現在は日本の橋梁技術が走っているという、頼もしい姿なのである。

表-3 Prof. O'Connorの橋種別適用スパン²⁾

構 造	材 料	適用スパン(m)	実橋の例
スラブ	コンクリート	0~12	
ガーダー	コンクリート	12~210	205, Bendorf
	スチール	30~260	257, Sava I
斜張橋	コンクリート	≤240	231, Maracaibo
	スチール	90~330	315, Knie
トラス	スチール	90~540	540, Quebec(鉄道橋) 470, Greater New Orleans (道路橋)
アーチ	コンクリート	90~300	300, Gladesville
	スチール(リブ)	120~360	360, Port Mann
	スチール(トラス)	240~510	503, Bayonne
吊橋	スチール	300~1350	1298, Verrazano Narrows

さてここで、このような今日の長大橋梁時代に、我が川田グループとしてはどのようにかわってきたかをみていただくために、表-4を掲げておく。

これは前掲の表-1、表-2の国内版であって、いわば斜張橋、吊橋の日本ランキングを示したものである。ちなみに表中でその橋名が太字で示されているものは、川田工業および川田建設が直接その施工に参画したもので、斜張橋で5橋、吊橋で7橋を数えることができる³⁾。

2. 次世代の超長大橋プロジェクト

以上に見てきたように、最近の我が国における橋梁技術の進歩は、まことに目覚ましいものがある。第二次大戦前は、ワンスパンで200mを超すまともな橋はなく、戦後も200mを超えるのに10年、300mを超えるのにはさらに7年と遅々たる歩みを続けてきたことを思えば、まことに夢のような話である⁴⁾。

ところがこうして技術が進歩し、問題が克服されて、かつての夢のような架橋計画が現実のものとなってくると、またさらなる大橋梁プロジェクトへの夢ははぐまれてくる⁵⁾。

現在我が国で話題になり始めている、海洋架橋計画の主なものを拾い上げると図-1のようになる。

この中には明石海峡大橋よりもさらに規模の大きい、最大スパン2500mから3000mを必要とするものもあり、建設省や本四公団の意を受けて、海洋横断道路プロジェクト技術調査委員会(委員長吉田巖博士)が設置され、すでに活動が開始されている。夢から現実へ向かって、歩みが始められているわけである。

もちろん世界的にみても、幾多の海洋架橋計画が提案されている。そのうち主なものを図-2に掲げたが、中にはヨーロッパとアフリカを結んで地続きにしようという、ジブラルタル海峡架橋計画とか、ユーラシア大陸とアメリカ大陸を結んでしまおうという、ベーリング海峡連絡橋梁といった、雄大な構想もある。

まだ夢物語としか言えぬものもあるようだが、メッシ

表-4 日本の長大橋梁ランキング(1994年調べ)

(表中下線は川田工業、川田建設が施工に参画したもの)

斜張橋						吊 橋					
順位	橋 名	所在地	完成年	支間長(m)	備 考	順位	橋 名	所在地	完成年	支間長(m)	備 考
1	<u>多々羅大橋</u>	広 島	施工中	890	複合	1	<u>明石海峡大橋</u>	兵 庫	施工中	1990	トラス
2	名港中央大橋	愛 知	施工中	590	鋼箱桁	2	<u>南備讃瀬戸大橋</u>	香 川	1988	1100	トラス、鉄道併用
3	鶴見航路橋(仮称)	神奈川	施工中	510	鋼箱桁	3	米島第三大橋	愛 媛	施工中	1030	鋼箱桁
4	<u>生口橋</u>	広 島	1991	490	複合	4	米島第二大橋	愛 媛	施工中	1020	鋼箱桁
5	東神戸大橋	兵 庫	1993	485	トラス	5	北備讃瀬戸大橋	香 川	1988	990	トラス、鉄道併用
6	<u>横浜ベイブリッジ</u>	神奈川	1989	460	トラス	6	<u>下津井瀬戸大橋</u>	岡 山	1988	940	トラス、鉄道併用
7	岩黒島橋	香 川	1988	420	トラス、鉄道併用	7	<u>大鳴門橋</u>	徳 島	1985	876	トラス、鉄道併用
8	<u>櫃石島橋</u>	香 川	1988	420	トラス、鉄道併用	8	<u>因島大橋</u>	広 島	1983	770	トラス
9	<u>名港東大橋</u>	愛 知	施工中	410	鋼箱桁	9	<u>白鳥大橋</u>	北海道	施工中	720	鋼箱桁
10	名港西大橋	愛 知	1985	405	鋼箱桁	10	<u>関門橋</u>	山 口	1973	712	トラス

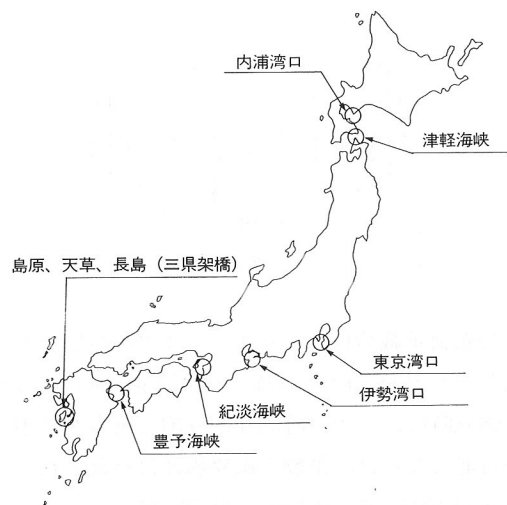


図-1 我が国の海峡架設計画

ナ海峡とかジブラルタル海峡などは、旧くから種々検討が続けられてきた⁶⁾。

実はこうした内外の海洋架橋プロジェクトが、実際に陽の目を見るのか、はたまた単なる夢で終わってしまうのかを決める当面の課題の一つは、人類が支間2 000 mを超える超長大橋梁を架けうるかどうかにかかっている。

もちろん2 000 mを超す大支間をひと跨ぎにする構造物としては、目下のところケーブル構造、それも吊橋しか考えられないが、その吊橋に対して、かつて川田建設の社長でもあられた村上永一博士は、支間2 000 mまでを既往の技術で対処できる範囲とし、それを超えるものとは峻別して考えられていた。

「スパン2 000 mまでの長大吊橋については、現在の材料、設計、架設の延長線上で対処可能とするが、スパン2 000 mを超す吊橋については新しい発想による軽量かつ耐風安定性のすぐれた吊構造物の開発が要請されている」⁷⁾

明石海峡大橋が最大支間1 990 mと、2 000 mより10 mだけ少なく設計されたのも、こうした2 000 mの壁に対する怖れ、技術者としての謙虚さからであったとうかがったことがある。

だが次世代の海洋架橋プロジェクト、来るべき超長大吊橋の時代には、水深100 m以上の海中に基礎を造り、支間3 000 mクラスの吊橋を架けることが、間違いなく要求されることになる。これまでの常識から、大きく踏み出さねばならない。

水中基礎の施工例としては、目下工事中の明石海峡大橋でも水深50 mで、これが国内では深さの記録である。海外ではアメリカのサンフランシスコベイブリッジとかタコマ橋あたりが68 m、ポルトガルの4月25日橋（旧称サラザール）が79 mで、橋梁基礎でまだ水深100 mを超す例はない。ただし北海油田の掘削用足場（ドリリング・リグ）には、水深300 mという施工例もあるだけに⁸⁾、橋



図-2 世界の海峡架橋計画

梁の基礎が水深100 mを超える日も、そう遠いことではないだろう。

では支間2 000 mを超す、超長大吊橋の可能性についてはどうか。実は村上博士は、前記引用文に引き続いて次のように述べられている。

「スパン3 000 mに近づくと、主ケーブルの有効張力が激減することから、主として自らの重量を支えるケーブルに必要にして最低の安全率の検討を含めて、新しい設計思想への転換が必要となるであろうが、これらを開発し、主ケーブルの残り少ない有効張力が極度に利用されれば、スパン3 000 mの吊橋の設計は可能なりと判断してよい」

またこれとは別の私達の検討結果でも、ケーブルからくる吊橋の限界スパンはほぼ3 000 mあたりであった⁹⁾。

もちろん支間2 000 mを超す超長大吊橋は、人類にとって未だ未知未踏の世界である。しかしながら支間3 000 mぐらいまでなら、今後の研究と開発の成果にまつところはありながらも、実現可能なものと考えてよいだろう。

3. 提案—暴風時質量付加型吊橋

支間2 000 mを超える超長大吊橋を考えると、まず第一に問題になるのは風の影響であろう。支間1 990 mの明石海峡大橋においてすでに、補剛桁断面の決定に支配的だったのは風であった。

しかも具合の悪いことに、支間が大きくなればなるほど、吊橋の破壊的なフラッター振動を誘発する、いわゆる限界風速は低下する傾向にある。

たとえば図-3は、表-5に示すような条件のもとに最大支間2 000 m、2 500 m、3 000 mという3径間吊橋を想定して、試設計したうえで得られたものであるが、ご覧のように主ケーブル応力度82 kgf/mm²（明石海峡大橋で採用されたものに同じ）と比較すると、支間2 000 mで72 m/sを確保していた限界風速が、2 500 mでは66 m/s、3 000 mともなると61 m/sと、確実に低下していることがわか

表-5 計算条件

項 目	2 000 m吊橋	2 500 m吊橋	3 000 m吊橋
スパン割	650+2 000+650 m	850+2 500+850 m	1 000+3 000+1 000 m
サグ	$f=L/10$	同左	同左
幅員構成	第一種第3級4車線	同左	同左
ケーブル間隔	30 m	同左	同左
桁高	7.0 m	8.5 m	10.0 m

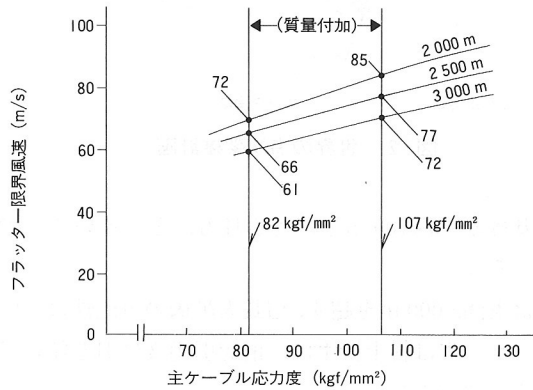
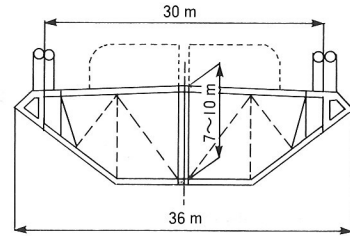


図-3 吊橋の支間と限界風速

る。

ところで図-3が顕著に示しているいま一つのことは、同一支間の吊橋では主ケーブル応力度が増すに従い、ほぼ比例的に限界風速が上がるということである。

当然のことながら主ケーブルの応力度は、そのケーブルの張力により定まるもので、したがってケーブル水平張力の式、

$$\text{ケーブル水平張力：} H = \frac{l^2}{8f} \cdot w$$

l ：支間長、 f ：サグ、 w ：等分布荷重

が成り立つ以上、等分布荷重 w を増加させることは主ケーブルで応力を介して、吊橋の限界風速を改善する（増加させる）ことにもなるのである。

これまで筆者達は、主としてセバーン吊橋のような限定振動による金属疲労が問題になる場合の対策として、コンクリートなどの低価格な材料による恒久的な質量付加方式を提案してきた¹⁰⁾。しかしながら吊橋においては等分布荷重を増加させることが限界風速を高めるといって、上記の結果を踏まえ、さらに限界風速が問題にされる、すなわち風が吊橋に対して危険な状態をもたらすのが強風時に限られることに着目し、暴風時に限って一時的な質量を付加して限界風速をクリアさせて吊橋を安全ならしめようという、全く新しい「暴風時質量付加型吊橋」を提案してみたい（特許申請中）。

一般に工学の世界においては、施工途上で発生する一時的な架設応力のようなものについて、その許容応力を完成時のそれより割り増して使用する場合が多い。同様な考えを暴風時にも適用することとして、一時的な質量

付加（等分布荷重載荷）によりケーブルの許容応力を30%割り増したものが、前掲の図-3の107 kgf/mm²の線である。もし強風時に、この一時的な割り増し応力を採用することが可能となれば、吊橋の限界風速はそれぞれ

2 000 m支間で 72→85 m/s (118%アップ)

2 500 m支間で 66→77 m/s (117%アップ)

3 000 m支間で 61→72 m/s (118%アップ)

と確実に改善をみることになる。

一時的な質量付加の方法としては、補剛桁断面の中央部をあらかじめ導水管状に加工しておいて水を注入するとか、または別に通路を確保しておき、長く連なった列車のような具合に、荷重を積んだトレーラーを配置する方法など、いろいろと考えられるであろう。

いずれにしても最近では宇宙衛星のおかげで、気象情報は迅速かつ正確なものとなり、台風などの来襲に備えて必要な荷重を付加するための時間的余裕を見い出すことぐらい、大した問題になるとは考えられない。

最後に、この暴風時質量付加型吊橋の構造的および経済的な効果について、述べておく。前掲の表-5に示したような箱型断面を補剛桁として想定し、桁高を7 mと10 mの二通りとして、1 000+3 000+1 000 (m)という三径間吊橋で試算した結果が、表-6および図-4、図-5に要約されている¹¹⁾。

図-4を一見して明らかのように、横風を受けた時の補剛桁のたわみ量(面外変位)、またその時に桁が受ける曲げ応力等は、質量付加によって顕著に改善されている。すなわち暴風時の一時的な質量付加によって、吊橋の剛度は顕著に増加すると考えられるのだが、それにもかかわらず表-6に示されるように、質量付加型では補剛桁の断面性能は小さなもので済んでおり、そのことが結果的に補剛桁の母材板厚や、主ケーブルの断面積をも小さなものとしている。

いささか筆者の予想に反したことは、桁高10 mのほうが7 mの補剛桁を有する場合よりも経済的になったことだが、これはつまるところ使用する母材の最小板厚の差によるものと思われる。

いずれにしても暴風時の質量付加によって、吊橋の全死荷重を18~20%余り軽減できるという結果が得られた。これは橋軸方向メートルあたり11~16.5トンの軽減に相

表-6 3000m吊橋の諸元

		従来型 桁高10m	質量付加型 桁高10m	従来型桁高7m		質量付加型桁高7m	
				中央径間	側径間	中央径間	側径間
死荷重強度	ケーブル	29.0	24.5	35.0		28.0	
	吊構造	33.5	27.0	41.0	26.5	31.5	23.0
	合計	62.5	51.5	76.0	61.5	59.5	51.0
全死荷重の比率		1.00	0.82	1.00		0.80	
付加質量		付加しない	20.5	付加しない		23.1	
断面性能	ケーブルAc	3.2	2.7	3.9		3.1	
	補剛桁Ix	42	28	32	16	22	13
	補剛桁Iy	230	154	331	168	225	129
	補剛桁J	103	64	90	42	59	30
	母材板厚(mm)	29	18	48	22	31	16
限界風速 m/s		86.0	86.6	85.8		86.6	
照査風速 m/s		85.0	85.0	85.0		85.0	

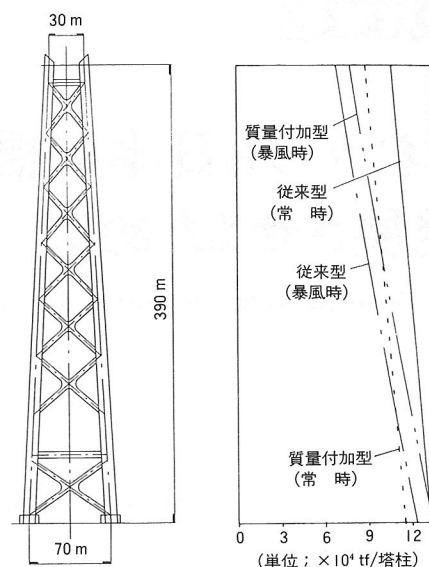
(単位: t/m/Br, m²/Br, m⁴/Br)

図-5 塔柱軸力図

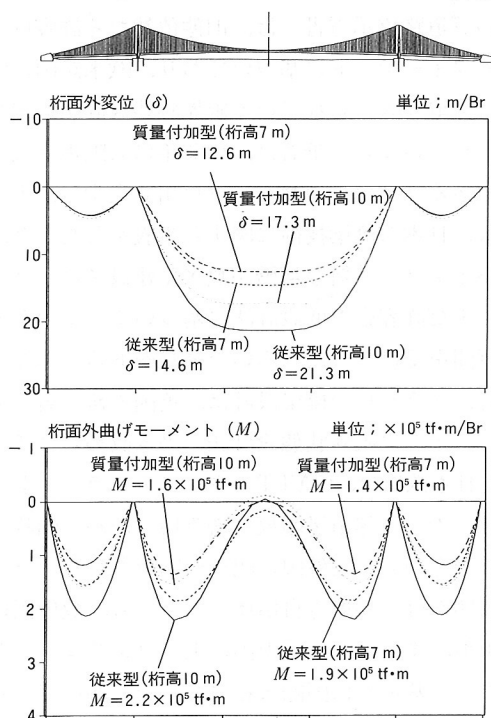


図-4 面外風荷重解析結果

当し、橋全体としては鋼重で6～7万トン（ケーブルを含む）という、大きな節約を可能とするものである。

なお図-5が示しているように、主塔の軸力も従来型の設計による常時荷重の範囲を超えるものではない。言い換えればこの暴風時質量付加型吊橋を採用しても、そのために主塔の断面が増えることはないということである。

参考文献

- 1) 日本の橋—鉄の橋百年のあゆみ—, 1984年
日本の橋—多彩な鋼橋の百余年史—, 1994年
いずれも日本橋梁建設協会編, 朝倉書店刊。
- 2) Colin O'Connor, "Design of Bridge Superstructures", John Wiley and Sons, Inc., 1971.

3) 本稿執筆の時点で、来島第二、第三橋の上部工は未発注。したがってより正確に言えば、当社は日本の吊橋ランキング8位までのうち、7橋の施工に参画してきたことになる。

4) 日本で最初に支間200mを超えたのは昭和30年竣工の西海橋（支間長216m, アーチ橋）。また300mを超えるのは昭和37年竣工の若戸大橋（支間長367m, 吊橋）であった。

5) 夢の橋梁ワーキンググループ：未来に架ける夢の橋梁、橋梁と基礎, 1990年8月。

6) 平井敦監訳：メッシナ海峡横断連絡橋, 本四資料-3, 1972年。

藤原稔ほか：超長大橋梁（ジブラルタル海峡連絡橋）の検討、橋梁と基礎, 1994年7月。

7) 村上永一：海外における長大橋計画の動向（長大橋についての技術論文集, 海洋架橋調査会, 昭和57年6月, 所収）。

8) 吉田巖：海洋連絡プロジェクトと津軽海峡（本州・北海道架橋を考える会編集：津軽海峡に夢かける, 道南建設二世会発行, 平成5年11月, 所収）。

なお1)に挙げた「日本の橋」1994年版のp.202には、この300mの海中基礎の施工中の写真とともに、完成予想図が収録されている。

9) 野村國勝：吊橋の限界支間長（川田忠樹編著：現代の吊橋, 理工図書, 昭和62年12月, 所収）。

10) 川田忠樹：セバーン吊橋の栄光と悲劇——質量付加方式の提案, 橋梁と基礎, 1989年4月。

その他関連する論文の主要なものは、9)に挙げた「現代の吊橋」p.22の参考文献に収録。

11) 中崎俊三・江崎正浩・野村國勝：暴風時質量付加型吊橋の耐風性能について, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, I-553, 1994年9月。