論文

斜張橋ケーブルの Rain Vibration Rain vibrations of cables in cable-stayed bridge

樋上 琇一^{*1)}
Yuichi HIKAMI

SUMMARY

At the construction stage of a cable-stayed bridge, large amplitude vibrations of the cables are observed for several times. This observed vibration of single cables is an instability phenomenon caused by the combined influence of rain and wind. A detailed aerodynamic wind-tunnel investigation shows that, pouring rain on the cable tracks down the cable making water rivulets at upper surface and bottom surface of the cable, and with these two rivulets, the cable cross section becomes aerodynamically unstable. Compared with aerolian vibrations, the rain vibration of the cable is a low-frequency high-amplitude vibration.

1. まえがき

マルチ・ケーブル斜張橋である名港西大橋の架設途上において、比較的大きな振幅のケーブル振動が観測された。この振動は降雨を伴う風のもとで発現するのが特徴であり、その振動数、振幅特性から判断して、渦励振又は Buffeting とは異質の現象である。このような特徴を持つ振動は架空送電線にも認められ、雨が原因となって発生することから Rain Vibration と呼ばれている⁽¹⁾。

これまでに斜張橋ケーブルの振動としては、パ

ラレルケーブルで生じた Wake Gallopping に関する報告⁽²⁾はいくつか見うけられるが、本橋に採用されているようなシングルケーブルが風によって振動したという例は Brotonne 橋の報告⁽³⁾のみである。このように今回観測された振動はあまり知られておらず、その発生機構も解明されていない。そこで、実橋ケーブルで認められた挙動をもとにして Rain Vibration の特徴を整理した。また、発生機構解明の第1段階として雨・風を再現した風洞実験を実施し、雨がどのように振動発生

*1) 石川島播磨重工業株式会社 技術研究所, 課長
Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd. Research Institute, Senior Researcher

(本稿受理: 昭和60年11月11日, 討論期限: 昭和61年6月30日)

に結び付いているのか、また実橋で認められた Rain Vibration の特徴がどのように説明付けられるのかを明らかにした。

2. 現象の特徴

名港西大橋の観測結果⁽⁴⁾と Brotonne 橋の報告⁽³⁾をもとにして、斜張橋ケーブルの Rain Vibration について、その特徴を以下にまとめてみる。

2.1 名港西大橋

本橋は3径間マルチケーブル斜張橋であり、12段×4束×2面=96本のケーブルを有する(図-1)。ケーブルは平行素線をポリエチレン管で被覆して、その間の空隙に防錆材を充填したハイアムアンカーケーブルを採用している。ケーブルの代表径140mmである。

Fig.1 観測対象橋（名港西大橋）
(Multistay tow-plan cable-stayed bridge)

架設途上における構造振動特性を把握することを目的とした実橋計測を行なっていたところ、その初期の段階でケーブルの比較的大きな振動を初めて観察した。このような振動は5ヶ月間にわたる観測期間中に数回発生したが、振動と雨を結び付けるに至った経緯は次のとおりである。

初めてケーブル振動を観察した日は風速10m/s程度の風の日であり、風向は橋軸に対して約45°であった。観察したケーブルの挙動は、3径間の全てのケーブルが振動しているのではなく、振動発生は主塔の風下側となる側径間のケーブルと中央径間においても同様に主塔の風下に位置するケ

ーブルに限定されていた。観測された現象を塔後流に起因したパフティングであると仮定して、その応答振幅を計算で当たってみた。計算は塔後流のケーブル軸方向空間相関係数を1.0と考えるなど、振幅を過大評価する条件で行なったにもかかわらず、計算結果は実測値の約1/50程度であった。また、振動発生時の風速とケーブル応答振動数から判断して、現象は渦励振でないことは明らかであった。このように現象の発生原因をつかめないままに2度目、3度目のケーブルが大きく振動する機会を迎えた。しかし、3度目の機会に、これまでに振動が発生した日にはかならず雨が降っていたことに気づき、振動を起こしているケーブルを注意深く観察すると、雨がケーブルの下面に沿って流れ落ちていた(図-2)。気流から見た場合には、この雨の流れの存在によってケーブル断面が空力的に不安定となっている可能性があること、更にその時点までに降雨をとまなわない風速10m/s以上の日が再々あったが、これらの日には振動が認められなかった事実から、ケーブルの大きな振動は雨に起因する現象であると判断した。この判断をもとにして、現象の発生機構を

Fig.2 雨によるケーブル下面の流れ
(Water rivulet at bottom of cable
(site observation))

究明するために風洞実験を行なうに至った。

ケーブル振動の観測は、その後も続けられ、前述したとおり5ヶ月間にわたり行なわれたが、これらの観測から得られたRain Vibrationの特徴⁽⁵⁾を以下に述べる。なお、以下の図に示した振幅は、桁路面上2mの位置で検出した振動変位をモードの腹の位置における値へ変換したものである。

(1) 雨との関係

図-3は気象とケーブル振動振幅の観測結果を10時間にわたって整理したもので、風速・風向が同じでも振動は降雨時のみにしか発生していない。この結果から、ケーブル振動は雨と風の共同作用による現象であることが明らかである。

(2) 風向・風速との関係

振動は風向・風速との関係で特定のケーブルにのみ発生する。図-4は塔を中心として中央径間と側径間に張られた全段のケーブルについて、振動振幅を同時記録した結果を示したものである。図-4(a)は風が中央径間から側径間の方向に吹いている時の記録であり、振動は側径間の長いケーブルにのみ認められる。一方、図-4(b)は風が側

径間から中央径間の方向に吹いている場合であるが、この時は中央径間の短いケーブルが振動を起こしている。これらの結果は、振動発生は塔の風下に位置するケーブル、すなわち風向方向に下り勾配を持つケーブルに限定されていることを示している。また図-4は、振動が発生するケーブルは風速によって異なり、高い風速では短い、すなわち勾配の大きいケーブルが、低い風速では勾配の小さい長いケーブルが振動することを示している。

なお、観測記録は無いが、風向が橋軸直角になると、それまで振れていたケーブルの振動が止まったことが一度観察された。

(3) 振動次数

ケーブル振動はケーブル面内の振動であり、面外方向の振動は認められなかった。観測期間中に認められた振動の次数とその振動数を全段ケーブルについて整理すると図-5となる。振動次数は上段のケーブルになるほど高次となっているが、その振動数は1~3 Hzの範囲内におさまっている。これからRain Vibrationは特定の次数で起

Fig.3 気象とケーブル振動振幅の観測結果
(Vibration amplitudes as a function of wind speed, direction and rain (site observation))

Fig.4 風向と全段ケーブルの挙動
(Multistays behavior at different wind speed and direction (site observation))

Fig.5 振動発生時の振動次数と振動数
(Vibration mode and frequency (site observation))

こののではなく、ケーブルの固有振動数が上記の範囲内に入る次数で発現することが判る。なお観測された振動は一つのモードが卓越している場合が多かったが二つのモードが重なり合った現象も認められた。

(4) 振動数・振幅特性

風速と振動数の関係を図-6に、また風速と振幅の関係を図-7に示す。図-6に示す渦励振は橋軸直角方向のおだやかな風によって発生し、その振動数は風速にほぼ比例して大きくなっている。これに対し Rain Vibration の振動数は風速が高くなってもあまり変わらず、その値は同じ風速帯で発生する渦励振の振動数より低い。また図-7にみられるように Rain Vibration の振幅は渦励振の振幅を大幅に上回る。従って Rain Vibration は渦励振と比較して、低い振動数で発現しその振幅が大きいことが特徴である。

尚、名港西大橋では Rain Vibration に対する制振対策として、ケーブル間をワイヤで結ぶ方法が採用された。この方法の採用に当たっては、事前にワイヤ結合によるケーブル面内方向の構造減衰の増加量を実測し、ワイヤ結合が面内方向振動に対して抑制効果を持つことを確認した。

Fig.6 風速と振動数の関係
(Relationship between vibration amplitude and wind speed (site observation))

Fig.7 風速と振幅の関係
(Relationship between vibration amplitude and frequency (sit observation))

2.2 Brotonne 橋

21段の1面吊り3径間斜張橋である。本橋は鋼管で被覆した外径165mmのケーブルを採用しており、文献(3)によると、このケーブルがストーム通過時に大きな振動を起こした。振動挙動は100m程離れたところから観察されたものであるが、観察された現象に関して記述されていることは次の3つである。

- (1) 振動は1次～3次のモードで発生し、1次モードの最大振幅は約30cmであった。
- (2) 振動ストームが接近し風速が15m/sに達した時発生したが、風速が15m/s以上になると振動は一旦止まった。ストームが過ぎ去る際に風速が再び15m/sに落ちると、振動がまた発生したが、風が弱まるに従い、振動は小さくなった。
- (3) ストームは橋軸に対して20°～30°の水平偏角を持つ風であった。

文献には雨に対する記述がなされていないが、ストームは降雨を伴っていた可能性が十分ある。Brotonne 橋で発生した振動が Rain Vibration であると仮定すると、(2)の観察事実より、Rain Vibrationは限定された風速領域で発現する現象であると言える。

2.3 その他の斜張橋

シングルケーブルの斜張橋で、ケーブル振動が報告されている橋は前記の名港西大橋、Brotonne

橋の2橋だけである。これらの2橋と同規模のケーブルを採用している斜張橋⁽⁵⁾は国内外に数多くある(表-1)が、ケーブル振動の報告はなされていない。報告が無いことを振動が発生していないことと解釈すると、Rain Vibrationは条件の微妙な違いによってその発現が左右される現象であると言える。

2.4 Rain Vibration の特徴

以上に述べてきた実橋ケーブルの挙動から、斜張橋ケーブルの Rain Vibration は次の特徴を持つと言える。

- (1) 雨と風の共同作用によって生じる現象である。
- (2) 振動は風向方向に下り勾配を持つケーブルに発生する。
- (3) 高い風速では勾配の大きいケーブルに、また低い風速では小さい勾配を持つケーブルに振動が発生する。
- (4) 振動はケーブル面内方向振動であり、その固有振動数が1～3Hz内にある次数で発現する。
- (5) 渦励振と比較して、振動は低い振動数で生じ、その振幅は大きい。
- (6) 振動は限定された風速範囲で発生するようである。
- (7) 振動の発生はケーブル・風・雨の条件の微妙な違いによって左右されるようである。

2.5 架空送電線に発生する類似な振動

架空送電線に発生する振動のなかに、乱流振動⁽⁶⁾と呼ばれている振動がある。この振動は降雨時または降雨後のもやが激しく動く比較的風の強い時発生しやすい。振動の発生振動数と振幅に関する特徴は斜張橋ケーブルで認められた特徴と似ており、微風振動(前出の渦励振に対応する振動)と比較して低い振動数で発現し、振幅は微風振動の振幅より大きい。微風振動は電線がほぼ縦方向に運動するが、乱流振動は縦方向と横方向の振動を

Table 1 シングルケーブルを採用した斜張橋例
(Cable-stayed bridge of single cable)

橋名	所在地	主径間(m)	ケーブル径(mm)	ケーブル段数	ケーブル防錆
名港西大橋	愛知県(名古屋)	405	140	12段	PE管+bitum187
藤戸橋	兵庫県(相生)	120	140	6段	〃
日ノ瀬橋	〃	127.5	140	〃	〃
Brotonne橋	フランス	320	165	21段	鋼管+bitum187
East Huntington	U.S.A West Virginia	274.3	180	16段	PE管+bitum187
Pasco Kennewick Intercity	U. S. A	299	140	17段	〃

ともなった複雑な運動となる場合が多い。乱流振動という名称は振動が微風振動に比べて風の乱れ強さがやや大きい場合に発生することが多いので、このような名称がつけられたものである。

乱流振動と同じ振動数・振幅特性および電線の運動挙動を有する振動を外国ではRain Vibration⁽¹⁾と呼んでいるようである。Rain Vibrationは雨と風の共同作用によって発生する現象であると文献(1)に明記されている。

3. 現象の発生機構⁽⁷⁾

振動の発生機構の解明は、雨・風を再現した二次元モデルによる風洞実験によって行っている。以下に、雨がどのように振動発生に結び付いているか、また実橋ケーブルの挙動がどのように説明づけられるかについて述べる。

3.1 風洞実験の概要

実験には石川島播磨重工業㈱横浜研究所の構造物安定性風洞（測定洞断面 2.5 m 高 × 1.5 m 幅）

Fig.8 実験状況
(Overall view of laboratory cable set-up))

を用いた。実験は図-8に示すように風洞吹き出し口にケーブル模型をバネ支持して、自由振動実験と非定常空気力測定実験を行なった。自由振動実験は長さ3 mのケーブルの応答をケーブル姿勢、すなわち図-9における風軸に対する角度 β と水平角 θ を変えて応答挙動を調べたものであるが、ケーブル姿勢によってはケーブル端が一様流領域からはみ出しているので、実験は完全に2次元性の下で行なわれているとは言えない。一方、非定常空気力実験はケーブル模型の1区間長をアクティブ模型として、これに作用する空気力をケーブル内に内蔵した動的天秤で検出した。アクティブ模型方式を採用したので、実験は2次元的であると考えられる。降雨はケーブルの風上で水道水を散水して再現した。自由振動実験では家庭で 사용되는ようなスプレーを用いたが、非定常空気力実験では降雨状態の一定性を考え、散水は工業用ノズルによった。

両方の実験とも、ケーブルの振動自由度は実橋ケーブルの鉛直振動に対応する1自由度とし、振動数は2 Hzとしている。また、ケーブル模型は、Reynolds数などの影響を考え、実橋で用いられた140 mm ϕ ポリエチレン管を用いている。実験条

Fig.9 ケーブルの姿勢
(β and θ angles of laboratory cable model)

件を実橋値と比較すると、実験風速は実橋値と一致するが、自由振動実験におけるスクルーン数は実橋値の約1/10となっている。(模型質量は実橋ケーブルの約1/5, 実橋ケーブル対数減衰率は0.02程度に対し、模型 δ_s は0.01)

3.2 雨の振動誘起機構

ケーブルの風洞気流中の応答(図-10)は、スプレイ雨を降らすと渦励振発現風速より高い風速で大きな振動が発生する。このときの雨の挙動を観察すると、ケーブルに当たった雨はケーブルに沿って流れ落ちていき、ケーブル表面に水路を形成する。水路の形成状態は風速とケーブル姿勢によって異なるが、大きな振動が発生する際には上面と下面の両方に水路ができる(図-11)。下面の水路はケーブルが傾斜角 θ を持っていると無風状態でも $\alpha = -90^\circ$ に形成されるが、有風時には風圧によってその形成位置が下流側に移動する。一方、上面水路は有風時にしか形成されず、ケーブルに当たった雨は風圧によってケーブル面に沿って押し上げられるが、完全に吹き飛ばされないため、 $\alpha = 80^\circ$ 近傍に水路が形成される。この上面と下面の水路の挙動を細かく観察すると、雨水はケーブルの上下運動にともなう慣性力によって、ケーブル断面円周方向に脈動しながらケーブル面を流れ落ちていく。図-12は、スプレイ雨に牛乳を混ぜて、流れを強調したときの写真である。

このような雨の挙動から判断し、Rain Vibrationは、ケーブルに沿って流れ落ちる雨によって、ケーブル断面形状が空力的に不安定な形状に変化することに起因する現象であると言える。この空力的不安定現象の原因として次のことを考えている。

- (1) 水路形成によって断面揚力曲線が負勾配となり、その結果発生するギャロッピング。ギャロッピングを生じる8字架空通信ケーブルは吊線が $\alpha = 40^\circ \sim 100^\circ$ に位置するとき負勾配を持つと報告⁽⁸⁾されているが、 $\alpha = 80^\circ$ 近傍に形成される上面水路が吊線と同じ効果を

Fig.10 ケーブルの風洞気流中における応答
(Cable model response with and without rain)

Fig.11 上面と下面の水路
(Sketch draw of water rivulet)

(a) 上面水路

(b) 下面水路

Fig.12 ケーブル面上を流れ落ちる雨水の状況
(Rivulets formed on cable model
(a) Upper water rivulet, (b) Bottom water rivulet)

Fig.13 8字断面ケーブルの揚力係数 (8)
(Lift force coefficient of 8-shaped section)

もたらしている可能性がある(図-13)。

(ロ) 雨の流れがケーブル断面円周方向に脈動すること起因する自励振動。接近流から見た場合、雨の脈動は着氷架線が回転運動している状態に対応するが、このような状態に於いて架線は激しい自励振動を起こすと報告⁽⁹⁾されている。

3.3 ケーブルの挙動(自由振動実験結果)

(1) 風向との関係

実橋観測において、振動は風向と同じ方向に勾配を持つケーブルに発生したが、ケーブルの下り勾配が風向と逆方向の場合には発生しなかった。風洞実験では前者が $\beta > 0$ 、後者が $\beta < 0$ の応答に対応するが、それぞれの自由振動実験の結果を図-14と15に示す。 $\beta = 45^\circ$ の場合には零発振動が認められるが、 $\beta = -45^\circ$ ではケーブル応答は正減衰となり、実橋観測と同じ挙動を示すことが知られる。

発散振動を起す $\beta = 45^\circ$ の姿勢では、3.2で述べたよう上面と下面に水路が形成されるのに対し、 $\beta = -45^\circ$ の姿勢では上面の水路は形成されない。

(2) ケーブル勾配との関係

図-16は $\beta = 45^\circ$ の状態では $\theta = 45^\circ$ の応答と

Fig.14 $\beta > 0$ 時の自由振動実験結果
(Logarithmic decrement of cable model response for $\beta > 0$)

Fig.15 $\beta < 0$ 時の自由振動実験結果
(Logarithmic decrement of cable model response for $\beta < 0$)

Fig.16 ケーブル傾斜角 θ の違いによる応答の相違
(Comparison of cable response for different θ)

$\theta = 25^\circ$ の応答を比較したものである。振動は $\theta = 25^\circ$ のときの方が低い風速から発現している。この結果は、実橋に於いて、低風速時に上段ケーブル、すなわち勾配の小さいケーブルにしか振動が発生しなかった現象を説明していると考えられる。しかし、高風速時に振動発生が勾配の大きいケーブルに限定されていた実橋現象を説明づけるものではない。

3.4 非定常空気力特性

(1) 雨の有無による特性の違い

$\beta = 45^\circ$, $\theta = 45^\circ$ のケーブル姿勢に於いて、雨を降らさないときと降らしたときの非定常空気力特性をそれぞれ図-17(a)と(b)に示す。これらの図は、種々の周波数成分を持つ非定常空気力から、ケーブルの振動を左右するケーブル振動数成分を分離して、その振幅 $|F|$ と位相差 ϕ (ケーブル変位に対する空気力の進み位相) を示したものである。ケーブルに対する励振力 F は $F = |F| \times$

$\sin \phi$ である。また風速 12 m/s における非定常空気力の波形を図-18(a)と(b)に例として示す。

図-17(a), (b)より、雨無しの場合には、位相差 ϕ は全風速領域で負となっており、空気力は減衰力として作用している。雨を降らすと、位相差は風速 $9 \sim 12.5 \text{ m/s}$ の範囲で正となり、この範囲で空気力は励振力として作用する。また空気力のケーブル振動数成分振幅は全風速領域で雨無時より大きくなり、風速 13 m/s 近傍で最大値となる。このような風速に対する位相差、空気力の変化は、構造物断面に発生するギャロッピングには認められないので、風速によって、水路形成状態(形状、位置、脈動挙動)が変化する結果生じていると考えられる。したがって、Rain Vibration は気流から見た断面形状が風速によって変わるという特殊な問題を含んでいる現象である。また Brotonne 橋で認められた振動は限られた風速範囲で発現していたが、風洞実験でも同じ現象が認められたことになる。

Fig.17(a) 雨を降らさない時の非定常空気力特性
(a) Unsteady aerodynamic force characteristic of cable model without rain)

Fig.17(b) 雨を降らせた時の非定常空気力特性
(b) Unsteady aerodynamic force characteristic of cable model with rain)

Fig.18(a) 非定常空気力生波形の一例 ($U = 1.2 \text{ m/s}$) 雨無し

((a) Typical record of unsteady aerodynamic force ($U = 1.2 \text{ m/s}$, without rain))

Fig.18(b) 非定常空気力生波形の一例 ($U = 1.2 \text{ m/s}$) 雨有り

((b) Typical record of unsteady aerodynamic force ($U = 1.2 \text{ m/s}$, with rain))

(2) 上面水路と下面水路の励振力への寄与

前節では上面水路と下面水路が共存する時の非定常空気力特性を述べた。流れ学的には、上面水路の励振力への寄与と下面水路のそれを分離して議論することは不自然であるが、ここではどちらの水路が振動誘起の要因になっているかを知るため、それぞれの水路を単独に形成したときの非定常空気力を求めた。単独の水路はケーブルの上端位置で細い管から水を直接ケーブルに接するように放出して作成した。このような方法によると乾いたケーブル表面に水路が形成されることになる。このため雨を降らして作った水路と比較して、水路の幅は狭く、水路幅内を脈動しながら流れ落ちる水は水路の縁に達したとき表面張力の作用を受け盛り上った形となる(図-19)。

Fig.19 水により形成した上面水路

(Upper water rivulet which is directly created by water)

Fig.20(a) 上面水路のみ形成時の非定常空気力特性

((a) Unsteady aerodynamic force of cable model with upper rivulet)

上面水路のみを作ったときと下面水路のみを作ったときの非定常空気力特性をそれぞれ図-20(a)と(b)に示す。また、上面と下面の水路を同時に作った際の特性を図-20(c)に示す。

上面水路のみの場合、位相差は風速によって変化するが、実験風速範囲では正となっている。この結果、空気力は励振力として働く。一方、下面水路のみの場合は位相差は12 m/s以上で負となり、空気力は減衰力として作用する。この励振力と減衰力の大きさは前者の方が大きい。上面と下面の水路が共存する場合は、位相差は水路を単独に形成した場合と異なり、風速の変化と共に傾向的に変化して、空気力が最大となる16 m/sでは+90°近傍の値となる。これらの結果から、Rain Vibrationは上面水路と下面水路の複合作用によって生じる現象であるが、現象発生には上面水路の形成が不可欠であることが判る。

Fig.20(b) 下面水路のみ形成時の非定常空気力特性

((b) Unsteady aerodynamic force of cable model with bottom rivulet)

Fig.20(c) 上、下面水路形成時の非定常空気力特性

((c) Unsteady aerodynamic force of cable model with both upper and bottom rivulets)

3.5 その他の特徴的なこと

風洞実験で振動の再現性に関して上述以外のことで経験したことは次の2つである。

- (1) 降雨の作り方によって、また雨量によってケーブル応答は微妙に変化する。雨の作り方が異なる自由振動実験と非定常空気力実験ではケーブル挙動が異なる(図-14と図-17(a))。または雨量を極端に増やすと振動は発生しない。
- (2) ケーブル模型の材質によって、ケーブル挙動が異なる。アクリルを用いた場合、上下面の水路は形成されているが、振動は発生しない。又、ケーブル表面の濡れ性を変えるとケーブル挙動も変化する。

以上の経験から判断して、Rain Vibrationは気象条件・風の特性・ケーブル振動特性等の条件の違いにより、微妙に変化する現象であると考えられる。

4. あとがき

以上、雨・風と斜張橋ケーブル挙動の結びつき、ならびに実橋で認められた振動の特徴の一部を明らかに出来たと考えられる。Rain Vibrationは、これまでの形状不変の構造断面に関する空力問題と異なり、空力的断面形状がケーブル姿勢・風速・雨量ならびに振動振幅によって変化するという意味で新しい問題であるといえる。現在もRain Vibrationの研究を続行しており、現象とケーブル振動数の関連性、乱れの影響等を明らかにしていく予定である。最後に、強風時には降雨がともなう場合が多いという自然環境を考えれば、NASAでの降雨時の翼揚力特性の研究のように構造物の耐風安定性問題においても、雨がフラッター特性に及ぼす影響などについて検討を加えてみる必要があることを指摘しておきた。

参考文献

- (1) C. Hardy, P. Bourdon, "The Influence of Spacer Dynamic Properties in the Control of Bundle Conductor Motion", IEEE 79th0064-6-PWR
- (2) オセアニア風工学・橋梁調査団, 風工学国際会議及びオセアニア橋梁調査報告書, 1983年9月
- (3) J. Wraneky, "Cables Wind Excited Vibrations of Cable Stayed Bridge" Proceedings of Fifth International Conference on Wind Engineering, 1979
- (4) 川人, 樋上 "斜張橋ケーブルのRain Vibrationの特徴" 土木学会 第40回年次学術講演会概要集, 1985
- (5) 成瀬 "斜張橋の発展と現況" 石川島播磨技報 別冊第6号 橋梁特集 1982年9月
- (6) 架空送電線の微風振動, 電気学会技術報告, (11部)第129号, 昭和57年4月
- (7) 樋上, 佐々木 "斜張橋ケーブルのRain Vibrationの発生機構" 土木学会 第40回年次学術講演会概要集, 1985
- (8) 藤野, 山口, 伊藤 "8字型断面を有する架空通信ケーブルのギャロッピング振動" 第8回風工学シンポジウム, 1984
- (9) O. Nigol, P. G. Buchan "Conductor Galloping-Part II-Den Hartog Mechanism" IEEE 79Th 0064-6-PWR