

着氷雪4導体および単導体送電線部分模型の 風洞内ギャロッピング再現実験

Wind Tunnel Tests on Galloping of Section Models of Ice Accreted
Four bundled or Single Conductor Transmission Lines

清水幹夫*, 石原 孟**, ファバンフック***

Mikio SHIMIZU, Takeshi ISHIHARA and Pham Van PHUC

* 工博 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

** 工博 東京大学大学院 工学系研究科総合研究機構 助教授 (〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

*** 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 大学院生 (同上)

To discuss galloping phenomena deeply, simultaneous observation of aerodynamic force acting on objectives as well as response of them are needed. In this study, wind tunnel tests on artificial ice accreted section models of four conductors bundle or single conductor under steady or turbulent flow conditions were conducted. Aerodynamic coefficients of the models were measured in advance and the models were hung on wires in the wind tunnel. As a result, the trigger condition of galloping by Den Hartog's theory was confirmed and hysteresis loop of wind velocity in which trigger wind velocity was diversified between increase and decrease process, was clearly observed. In addition, oscillation mode in which predominant horizontal, vertical and torsional frequencies coincide, was developed. Further, the fact that wind turbulence promotes galloping was also developed.

Key Words: galloping, transmission line, four bundled conductors, accreted ice, wind tunnel test

キーワード: ギャロッピング, 送電線, 4導体, 着氷雪, 風洞実験

1. はじめに

着氷雪した送電線の風による自励振動現象は、慣例的にギャロッピングと称され、これが大振幅となった場合、水平、鉛直および電線軸回りのねじり方向に振動成分を有し、相間短絡や支持物など周辺設備の損傷の原因となり得ることが知られている¹⁾。このため従来より、応答予測法の提案^{2)~6)}、観測あるいは解析による挙動分析^{7)~9)}などが試みられてきた。

一方、一般的なギャロッピング現象については、古くはDen-Hartog¹⁰⁾により、準定常理論に基づく発生メカニズムの定式化がなされ、Parkinson¹¹⁾、Novak¹²⁾による矩形断面柱の自由振動実験により、風速の増加、減少過程に依存してギャロッピングの発生風速が変化するヒステリシス、および不安定ナリミットサイクルなどの振動特性が明らかにされている。

ところで、上記一般的なギャロッピングの発生メカニズムや振動性状と、送電線のギャロッピングとの関係に

ついては、今なお解明の余地があると思われる。送電線のギャロッピングについては、主に試験線を対象とした現地観測によって現象把握が試みられてきたが、この場合、電線全体に作用する外力、すなわち風速、着氷雪形状と分布、およびその空力特性の測定が極めて困難である。したがって、発生条件や入力と応答との関係は、十分に解明されていないのが現状である。また、上記一般的なギャロッピングの特性は、主に矩形断面柱を対象とした実験結果を根拠とするため、送電線に代表される可撓性に富む構造系の、多自由度かつ大振幅のギャロッピング現象に共通するかについては、確認の必要がある。

以上のことから、筆者らは、空力特性が明らかな着氷雪送電線の部分模型を風洞内に架設し、可撓性に富む構造系のギャロッピングの再現およびデータ取得を試みた。部分模型については、互いに相似形の着氷雪を考慮した4導体および単導体とし、予め三分力天秤実験により定常空気力係数¹³⁾を、大振幅回転加振実験により非定常空気力係数¹⁴⁾を測定している。また、入力は一様流お

よび乱流とし、井上ら¹⁵⁾と同様、可撓性に富むワイヤーで部分模型を架設することにより、水平、鉛直および電線軸回りのねじり振動を可能としている。本文には、実験結果として、ギャロッピング時の変位、振幅と風速値との関係、振動軌跡および卓越振動数を把握した結果を示す。また、ギャロッピングの発生からリミットサイクルに至る過渡応答が測定されたため、Den Hartogの定式化との関係について考察した。

2. 実験方法

2.1 風洞と部分模型

実験には、東京大学風工学実験棟内の全径間風洞を用いた。風洞の諸元を表-1に示す。表のとおり、風洞の測

定部は16mの幅を有し、本検討の対象とした長径間の振動系の架設に適している。

架設した模型の寸法を表-2、図-1、図-2に示す。これら2つの模型は、以前に実施した三分力天秤実験¹³⁾お

表-1 風洞の諸元

名称		全径間風洞
形式		縦置回流型
測定部寸法	長さ	5.8m
	幅	16m
	高さ	1.9m
	縮流比	1/4.2
最大風速		17m/s

表-2 部分模型の諸元

試験体名称	導体数	試験体長さ L(mm)	導体外形 D(mm)	着氷雪高さ* (mm)	質量 (g)
4-1.00D	4	1270	19	19(=1.00D)	4325
1-1.00D	1	1270	30	30(=1.00D)	3647

注*) 着氷雪高さは、着氷雪先端から導体表面までの最短距離を表す。図-2参照。

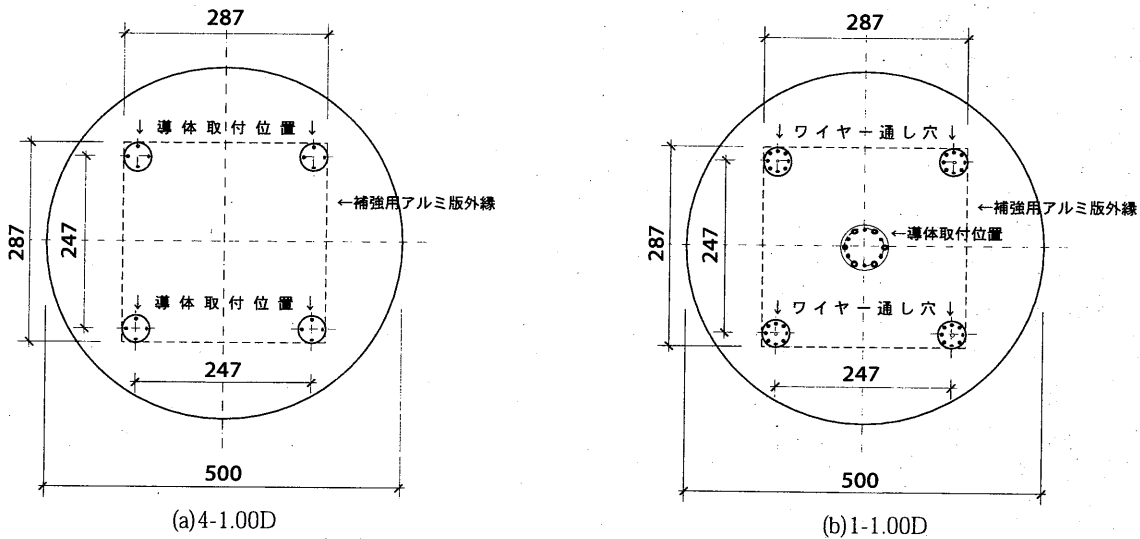


図-1 部分模型の端板寸法 (単位: mm)

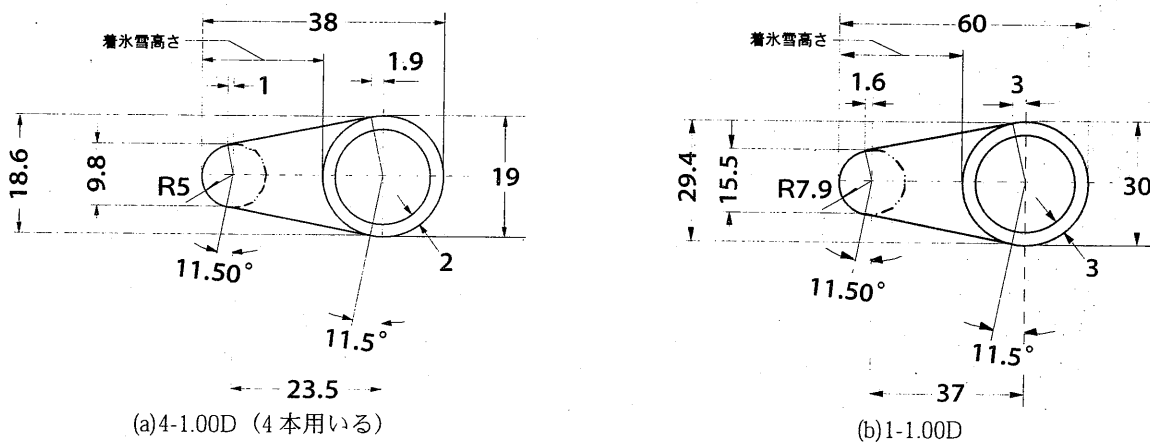


図-2 部分模型導体部と模擬着氷雪の断面寸法 (単位: mm)

よび大振幅加振実験¹⁴⁾に用いた着氷雪4導体および単導体の部分模型であり、それぞれ4-1.00D、1-1.00Dと称する。材質は、端板がベニヤ板（治具および導体の取付部をアルミプレートで補強）、導体部がアルミパイプ、着氷雪が檜である。

2.2 部分模型の架設による振動系の構築

部分模型の架設によって構成された振動系の全体図を図-3に示す。4-1.00D、1-1.00Dのいずれの架設にも4本のワイヤーを用い、各ワイヤーは、4-1.00Dについては導体部に相当するアルミパイプの内部を、1-1.00Dについては端板上の穴を貫通し、その両端はターンバックルを介して、支持点となるジグ上の滑車に掛けられた。ターンバックルは、各ワイヤーの張力および長さを調節することができ、本検討では、いずれの部分模型についても、絞りが無い状態で、ワイヤー1本当たりの張力を58.8Nに設定した。絞りについては後述する。

部分模型の風洞内の架設状況を図-4に示す。一樣流中の実験では、図-4(a)に示すように振動系の風上側にピトー管を設置し、乱流中の実験では、ピトー管の近傍に熱線プローブを設置して、風速を測定した。また、変位計測のターゲットとなるマーカー2箇所を端板上に貼付けた。これらマーカーの軌跡は、片側のジグ近傍に設置されたCCDカメラによって撮影し、変位に変換した。

図-4(b)に示すワイヤーの絞りは、井上ら¹⁵⁾と同様、系のねじり剛性、固有振動数を低下させ、ギャロッピングを発生させ易くするための措置であり、図-3に示すよう

に、部分模型と支持点の中間付近で、4本のワイヤー相互の間隔を調整した。本検討では、図-4(b)のとおり、4本のワイヤーを完全に絞りに、互いの間隔を0とした場合のギャロッピングを扱う。なお、こうしたギャロッピングの再現実験は、無風時における系の自由振動実験により、絞りの有無と固有振動特性との関係を明らかにした上で実施した。

以上のように架設された振動系は、実構造物の縮小モデルではなく、厳密に相似則を満足するものではない。ただし、既往の実験にみられる、ばね支持あるいは片持ち梁の系^{11),12)}に比較して十分に可撓性に富み、送電線と同様、水平、鉛直およびねじり、すなわち模型軸回りの回転方向に自由度を有する。

2.3 実験条件と計測項目

前述のように、本検討では、予め無風時の自由振動実験を実施した上で、ギャロッピング再現実験を実施している。これら実験ケースと計測項目を表-3にまとめて示す。表には、絞りによって変化する、図-3中にa、bで示した長さの値を併せて示した。

自由振動実験は、2種類の部分模型について、絞りが無い場合と、完全に絞った場合の、合計4ケースを実施した。各ケースでは、部分模型を水平、鉛直、ねじりの各方向に人力で強制変位させ、解放した後の減衰自由振動を、1/30秒のサンプリングタイムで計測した。部分模型の変位は、2箇所のマーカーの水平および鉛直変位から換算された、端板中心の水平、鉛直変位およびねじり

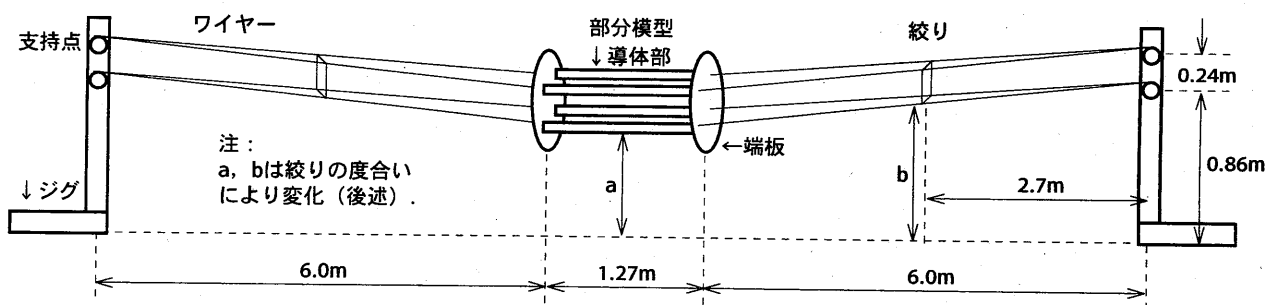
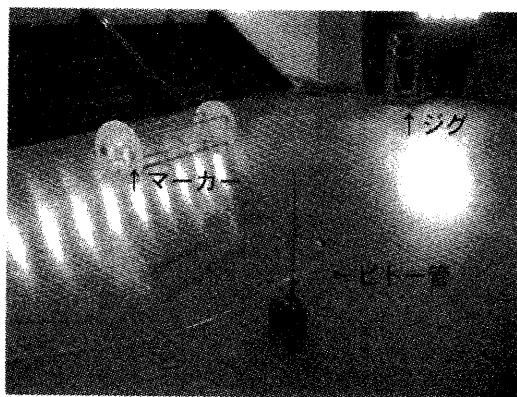
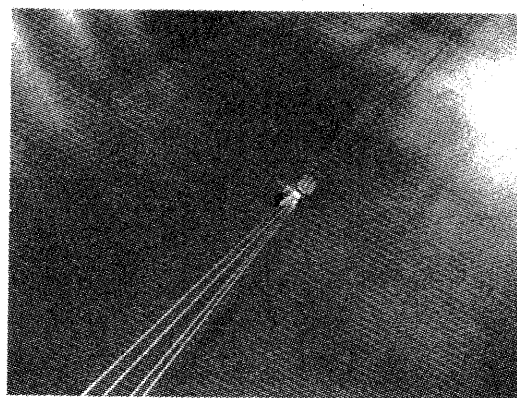


図-3 振動系全体図



(a)部分模型・ジグ・ピトー管



(b)ワイヤーの絞りに

図-4 部分模型の風洞内架設状況

表-3 実験ケースと計測項目一覧

部分模型	架設形態 絞りの有無：(a,b)*1m	計測項目 (○：実施，×：実施せず)				
		自由振動実験	ギャロッピング再現実験			
			一様流		乱流	
		変位	風速*2	変位	風速*2	変位
4-1.00D	無し：(a=0.27)	○	×	×	×	×
	有り：(0.38,0.72)	○	○	○	○	○
1-1.00D	無し：(a=0.50)	○	×	×	×	×
	有り：(0.63,0.81)	○	○	○	○	○

注 *1：絞り無しの場合，aのみ記録。4導体の場合，aは下側導体の高さ。

*2：一様流の計測にはピトー管を使用。乱流の計測には熱線プローブを使用。

角として求めた。この変位の換算は，以降のギャロッピング再現実験においても同様である。

ギャロッピング再現実験は，各部分模型について，一様流あるいは乱流中で実施した，合計4ケースとなる。

一様流中の実験時の風速は，先ず5m/sとし，次に7～10m/sまで1m/sステップで増加させ，以降，送風機の限界に近い15m/sまで0.5m/sステップで増加させた後，同様のステップで7m/sまで減少させた。こうした風速は，ピトー管のモニター出力値をみながら設定し，各ステップにおいて風速を増加させた後，モニター出力値が所定の値近くに安定するのを待って，90秒間，変位と風速を同時計測した。サンプリングタイムは，変位は1/30秒，風速は0.02秒とした。

乱流中の実験は，測定部の風上側入口に図-5の格子を設けて実施した。ここでも，ピトー管のモニター出力値をみながら，上記と同様のステップで，変位と風速の同時計測を行った。ただし，風速は変動しているため，モニター出力値の平均的な値が，目的とする値の近傍で概ね一定になることを，計測開始の目安とした。風速の計測には，ピトー管の近傍に設置した熱線プローブを用い，水平および鉛直方向の変動風速を，1/1000秒のサンプリングタイムで記録した。その他の条件は一様流中の場合と同様である。

3. 振動系の固有振動特性－自由振動実験結果－

自由振動実験では，各振動系の各自由度方向について減衰自由振動波形を測定した。そのパワースペクトル密

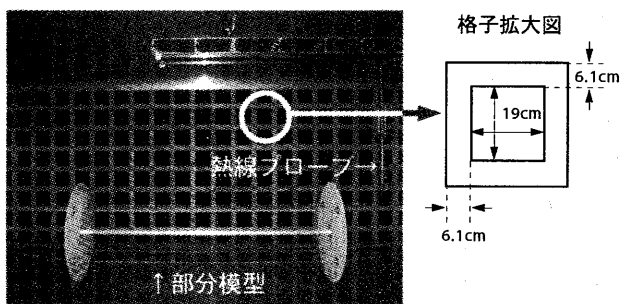
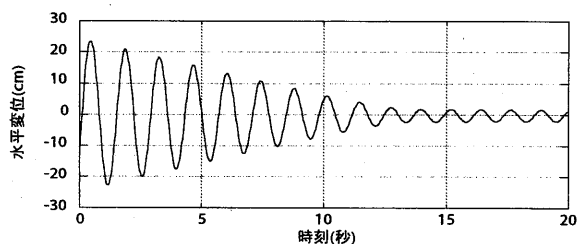
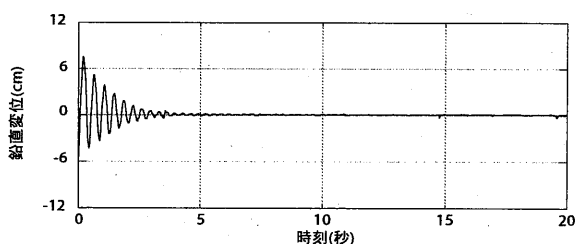


図-5 乱流格子（部分模型の風下側から撮影）

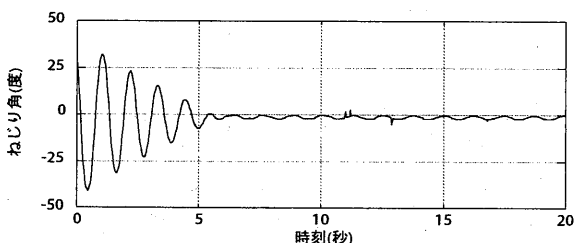
度の卓越振動数として，各自由度の1次固有振動数を求めた。例として，4-1.00Dを絞り有りで架設した場合の減衰自由振動波形を図-6に，そのパワースペクトル密度



(a)水平方向



(b)鉛直方向



(c)ねじり方向

図-6 自由振動実験結果の例：4-1.00D，絞り有り

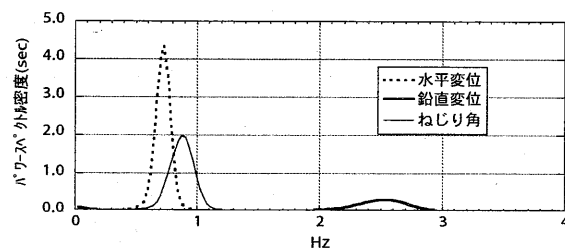


図-7 自由振動実験結果(図-6)のパワースペクトル密度

表-4 自由振動実験の結果

部分模型	架設形態	1次固有振動数(Hz), モード減衰定数(%)			各方向の1次固有振動数の比 (水平:鉛直:ねじり)	
		水平方向	鉛直方向	ねじり方向	左記実験結果	送電線の例 ¹⁶⁾
4-1.00D	無し	0.66(Hz), 0.26(%)	2.56(Hz), 5.60(%)	2.06(Hz), 5.05(%)	1.0 : 3.9 : 3.1	1.0 : 1.9 : 1.8
	有り	0.74(Hz), 2.35(%)	2.54(Hz), 6.44(%)	0.88(Hz), 9.59(%)	1.0 : 3.4 : 1.2	
1-1.00D	無し	0.72(Hz), 0.26(%)	2.56(Hz), 5.34(%)	2.82(Hz), 1.99(%)	1.0 : 3.6 : 3.9	
	有り	0.82(Hz), 1.95(%)	2.28(Hz), 6.01(%)	0.88(Hz), 9.55(%)	1.0 : 2.8 : 1.1	

(分散で除したものを)を図-7に示す。また、表-4に、すべての振動系の1次固有振動数と、その比およびモード減衰定数をまとめて示す。表には、標準的な径間長360mの4導体送電線の固有振動数の比¹⁶⁾を併せて示した。減衰定数は振幅によって変化するが、ここではギャロッピングが大振幅となる可能性を考慮し、比較的振幅が大きい段階の、初期の5波から求めた結果を示した。

表-4より、いずれの架設形態の1次固有振動数も、水平方向が最も小さい結果となった。ただし、絞りによって水平方向の1次固有振動数は上昇、ねじり方向のそれは低下している。特に、ねじり方向については低下が顕著であり、その比は3以上から1に近い値に変化している。鉛直方向における絞りの影響は、1次固有振動数を低下させる傾向として表れ、その比の値は、4-1.00Dと比較して、1-1.00Dが大きく低下している。また、いずれの架設形態においても、絞り有りの1次固有振動数は鉛直方向が最も大きい結果となっている。

モード減衰定数は、いずれの架設形態についても、絞りによって各方向、特に水平とねじり方向の値が増加している。

なお、標準的な送電線では、表に示すとおり、最低次の水平方向と鉛直方向の振動数の比はほぼ1対2となるが、この関係は実験では満足されていない。また、表のモード減衰定数は、一般的な送電線の値¹⁶⁾と比較して大きい結果となっている。

4. ギャロッピング再現実験結果

前章までに示したとおり、本実験の振動系は厳密に相似則を満足するものではなく、各自由度方向の固有振動数の比および減衰特性は実際の送電線と異なる。ただし、絞りが有る架設形態では、一様流あるいは乱流中で、水平、鉛直およびねじり方向に振動成分を有する、多自由度のギャロッピングが再現された。本章にはその結果を示す。

一方、絞りが無い架設形態では、振動系の変位は小さく、ギャロッピングが発生しないことを確認した。この原因としては、表-4に示すとおり、ねじり方向の固有振

動数が大きく、この方向の剛性が過大であったことが考えられる。

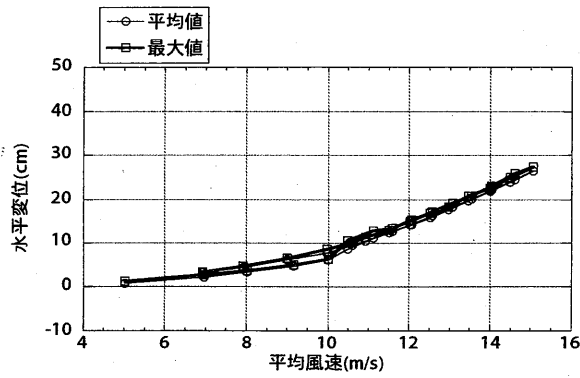
4.1 平均風速と変位の平均値・最大値との関係

ギャロッピング再現実験の結果として、先ず、平均風速と部分模型の変位の平均値および最大値との関係を図-8～11に示す。これらはいずれも絞り有りの架設形態で、図-8が4-1.00Dの一様流、図-9が4-1.00Dの乱流、図-10が1-1.00Dの一様流、図-11が1-1.00Dの乱流のケースである。

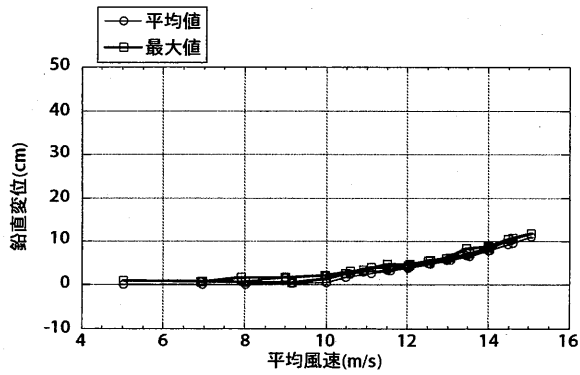
平均風速の増加に伴い、図-8では、水平および鉛直方向の平均値と最大値は、互いにほぼ等しい値で増加している。一方、図-9～11では、ある風速で両方向の平均値と最大値の差（以下、片振幅と称する）が増大する。こうした片振幅は、図-9～11のねじり方向において、特に顕著にみられる。また、図中には矢印によって、風速の増加および減少方向を示したが、上記片振幅は、風速の減少過程のある風速以下でみられなくなる。なお、各ステップの平均風速は、一様流に比較して乱流が小さいが、これは格子の影響によるものである。

実験時には目視により、部分模型の振幅が増大し、定常的な振動に至る過程、すなわちギャロッピングの発生とリミットサイクルを確認している。こうした状況との対応も考慮し、本検討では図-8～11より、片振幅の顕著な増大、特にねじり角の片振幅が10度以上となる振動をもって、ギャロッピングが発生したと判断する。したがって、本検討の実験条件下では、4-1.00Dの一様流のケースを除き、4-1.00Dの乱流、1-1.00Dの一様流および乱流の計3ケースにおいて、ギャロッピングが発生したといえる。また、前述のように、風速の減少過程において片振幅はみられなくなり、ギャロッピングは停止する。以下では、ギャロッピングが発生する、増加過程の風速を発生風速、ギャロッピングが停止する、減少過程の風速を停止風速と称する。

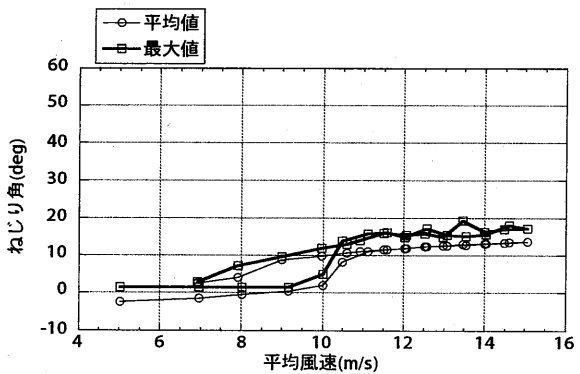
図-9～11では、停止風速は発生風速を下回り、平均風速の増減に伴い、最大値がループ状に遷移している。これは、発生したギャロッピングのヒステリシスを示すものである。



(a) 水平方向

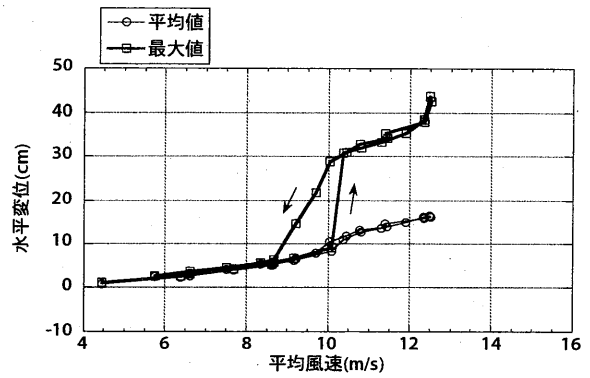


(b) 鉛直方向

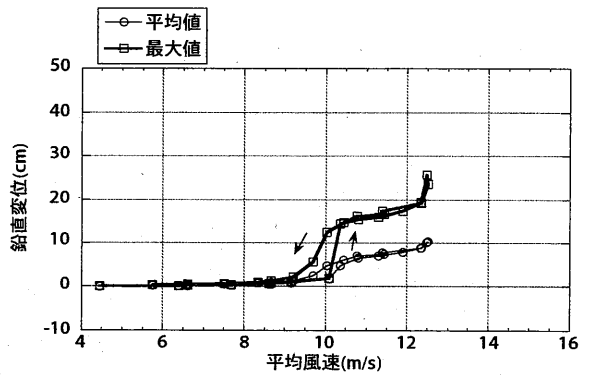


(c) ねじり方向

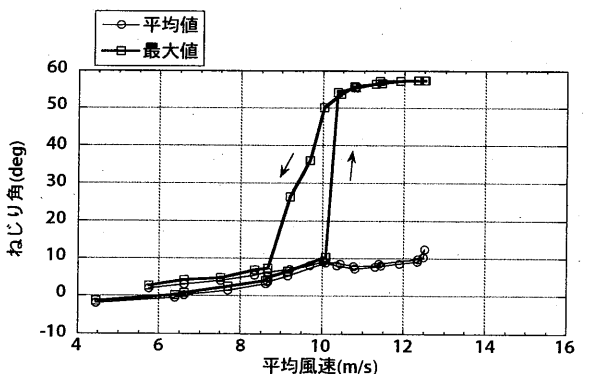
図-8 変位の平均値・最大値：4-1.00D，一様流



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向



(c) ねじり方向

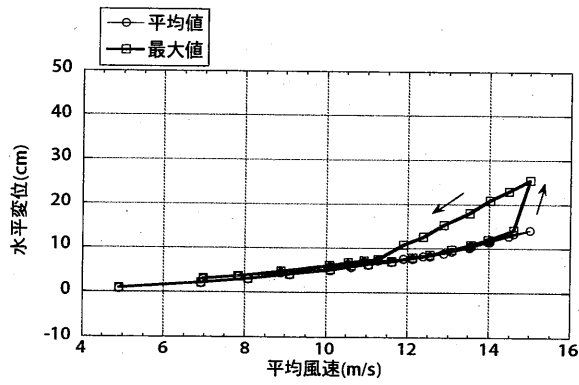
図-9 変位の平均値・最大値：4-1.00D，乱流

表-5には、各架設形態について、発生風速、停止風速および発生時における片振幅を示す。また、表には、平均風速が最大となるステップ（以下、この時の風速を最大風速と称す）における片振幅を併せて示した。

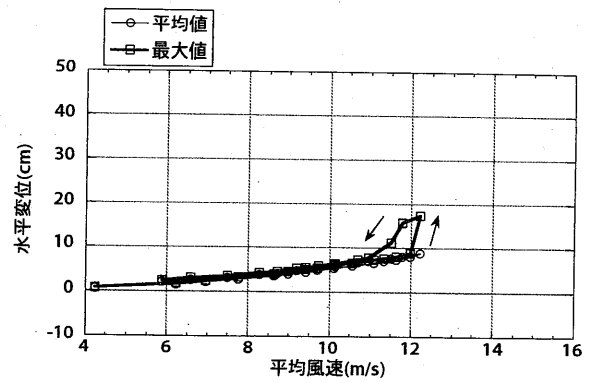
表より、4-1.00Dの一様流のケースでは、最大風速作用時においても、ねじり方向の片振幅は10度を下回り、水平および鉛直方向の片振幅は非常に小さく、ギャロッピングが発生していないことを確認できる。

4-1.00Dの乱流のケースでは、発生風速作用時に比較して、最大風速作用時に、水平および鉛直方向の片振幅が大きい。1-1.00Dの架設時には、一様流、乱流のいずれ

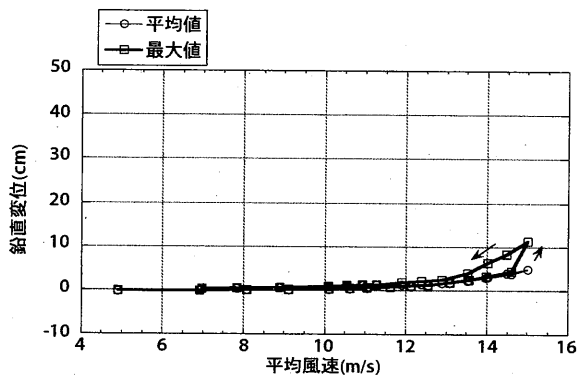
のケースにおいても、平均風速が最大となるステップにおいて、ギャロッピングが発生している。ただし、発生風速は、一様流に比較して、乱流が2.8m/s小さい結果となっている。これは、風の乱れがギャロッピングの発生を助長することを示唆するものである。なお、熱線プローブで測定した水平方向の乱れの強さは、図-12に示すとおり0.10～0.12近傍を推移する値となった。鉛直方向については、乱流時の平均風速と乱れの強さは、それぞれ0.2m/s、0.03を下回り、風速変動は非常に小さいことを確認した。



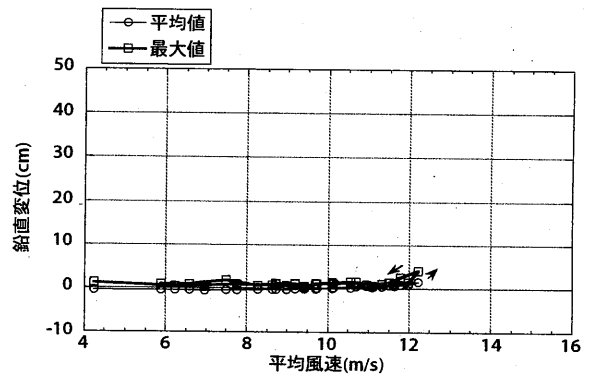
(a) 水平方向



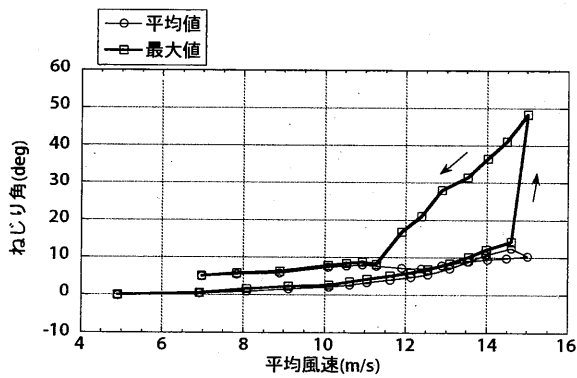
(a) 水平方向



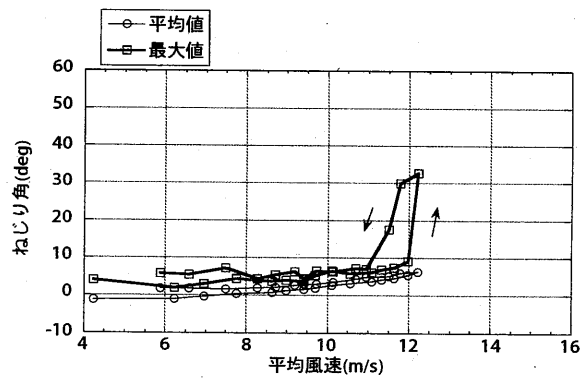
(b) 鉛直方向



(b) 鉛直方向



(c) ねじり方向



(c) ねじり方向

図-10 変位の平均値・最大値：1-1.00D，一樣流

図-11 変位の平均値・最大値：1-1.00D，乱流

表-5 ギャロッピングの発生風速・停止風速および片振幅

部分模型	風速条件	発生風速 (m/s)	停止風速 (m/s)	発生風速時の片振幅			最大風速時の片振幅		
				水平方向 (cm)	鉛直方向 (cm)	ねじり方向 (度)	水平方向 (cm)	鉛直方向 (cm)	ねじり方向 (度)
4-1.00D	一樣流	—*1	—*1	—*1	—*1	—*1	0.9	0.7	3.6
	乱流	10.4	8.7	19.9	9.7	46.1	26.3	13.1	44.8
1-1.00D	一樣流	15.0	11.9	11.5	6.38	37.9	—*2	—*2	—*2
	乱流	12.2	10.9	8.7	2.6	26.2	—*2	—*2	—*2

注 *1：ギャロッピングが発生しない場合に相当。

*2：発生風速と最大風速が等しい場合に相当。ここに最大風速とは、平均風速の最大値を意味する。

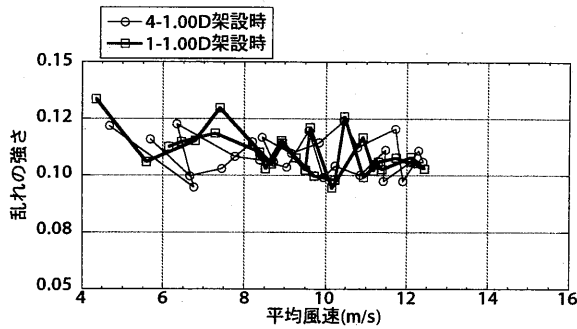
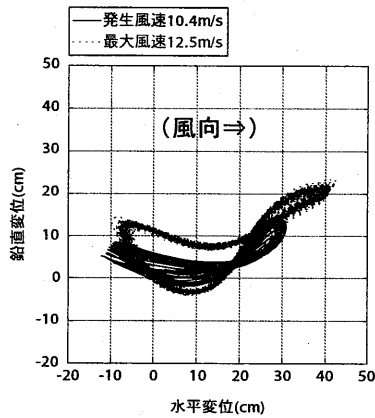
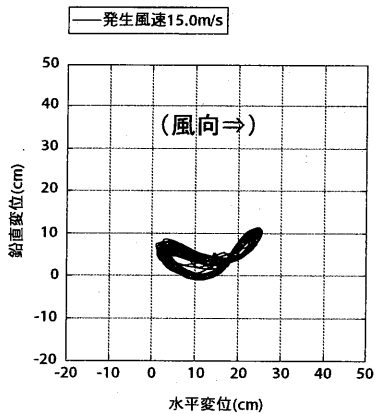


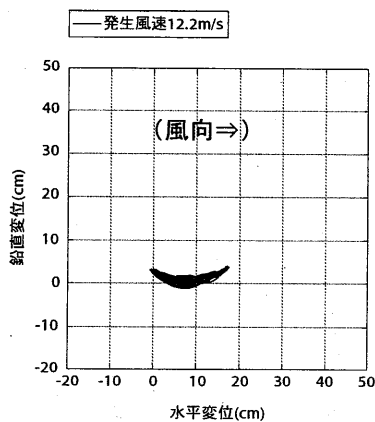
図-12 乱れの強さ



(a)4-1.00D, 乱流



(b)1-1.00D, 一様流



(c)1-1.00D, 乱流

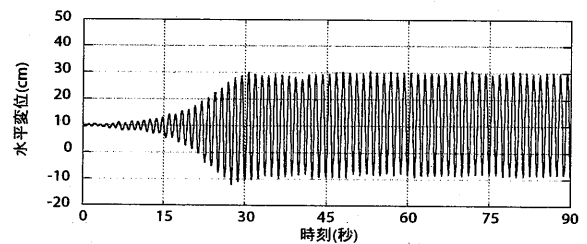
図-13 ギャロッピング時変位リサージュ

4.2 ギャロッピングの振動性状

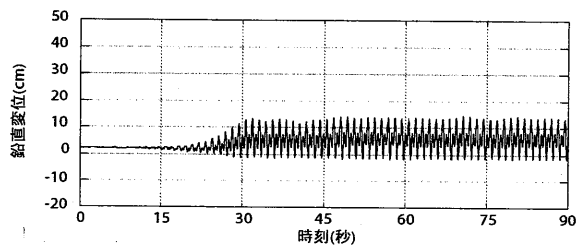
ギャロッピング発生風速時の変位のリサージュを図-13に、時刻歴を図-14～16に示す。図-13(a)の4-1.00D架設時については、最大風速時の結果を併せて示した。

図-13より、いずれのリサージュも円弧に近い軌跡を含むが、特に(a)の4-1.00Dの乱流、(b)の1-1.00Dの一樣流のケースでは、リサージュは円弧上で8の字のループ形状を描くことがわかる。また、4-1.00Dの乱流のケースでは、発生風速から最大風速への風速の増加に伴い、水平および鉛直変位の振幅が増加するが、8の字のループ形状を描くことに変化はない。図-13(c)の1-1.00Dの乱流のケースでは、リサージュのループは顕著ではなく、その他のケースに比較して振幅が小さい結果となっている。上記円弧状の振動軌跡は、架設用のワイヤーの張力により、部分模型の動揺範囲が制限されて現れたと考えられる。

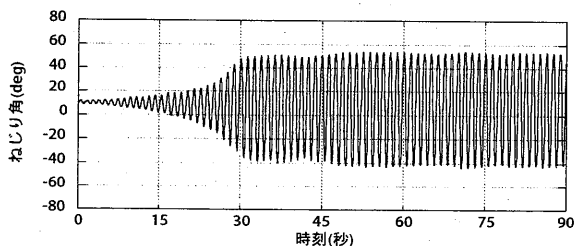
図-14～16の時刻歴波形にはいずれも、ギャロッピングの発生から定常状態すなわちリミットサイクルに至る過程が示されている。図-14と図-16の乱流のケースに比較して、図-15の一樣流のケースでは、発生から定常状態に至る過渡応答の時間が短いといえる。また、いずれのケースについても共通して、定常状態においては、水平変位およびねじり角の振幅、振動数はほぼ一定であり、鉛直変位には2種類の波が混在し、規則的な振幅の



(a)水平方向

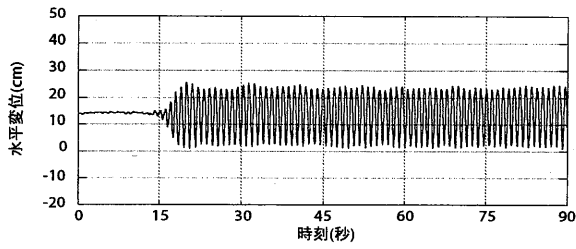


(b)鉛直方向

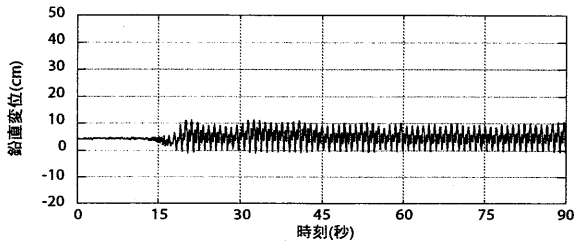


(c)ねじり方向

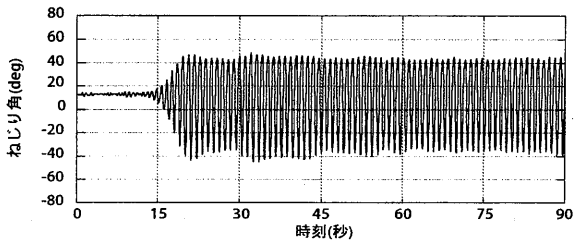
図-14 ギャロッピング発生時変位時刻歴:4-1.00D, 乱流



(a) 水平方向

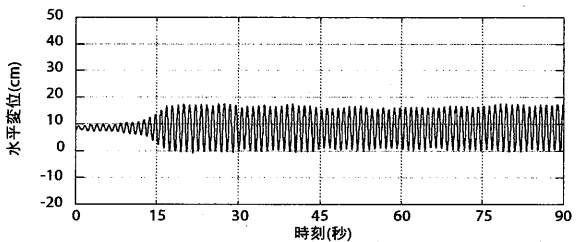


(b) 鉛直方向

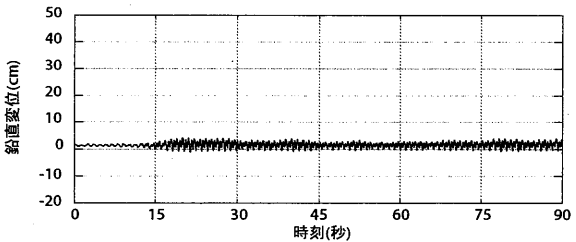


(c) ねじり方向

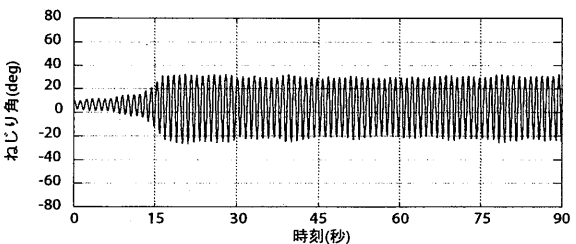
図-15 キャロッピング発生時変位時刻歴:1-1.00D, 一様流



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向



(c) ねじり方向

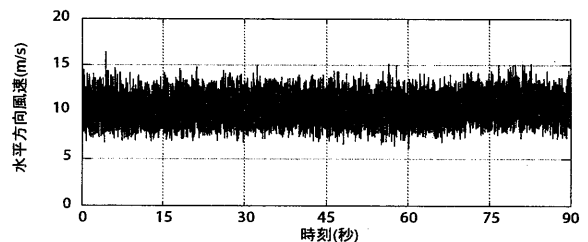
図-16 キャロッピング発生時変位時刻歴:1-1.00D, 乱流

増減がみられる。このことから、本実験の条件下では、定常状態におけるギャロッピングの振幅は、風の乱れによって変化しないと考えられる。

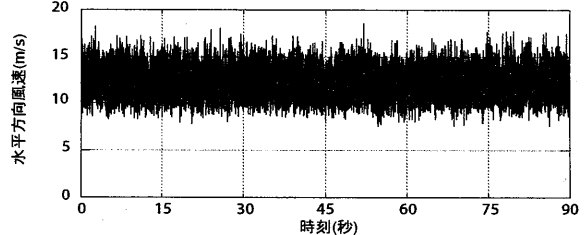
図-14および図-16と同時計測された水平方向の変動風速を図-17に、その無次元化パワースペクトル密度を図-18に示す。ここに、4-1.00D、1-1.00D架設時の乱れのスケールは、それぞれ0.18m、0.16mであり、図-18には、比較のためカルマン型スペクトルを併せて示した。風洞内の乱流のパワースペクトル密度は、カルマン型に近いといえる。

なお、前述のように本検討では、風速を増加させた段階ごとに、風速の安定を待って計測を行った。このため、風速の増加直後の計測開始前にギャロッピングが発生した場合、定常状態に至るまでの過渡的な応答は必ずしも記録されるとは限らない。したがって、図-14~16のとおり過渡的な応答を含めてギャロッピングが観測されたことは、特に意図した結果ではない。

図-19には、図-14~16の時刻歴のパワースペクトル密度を分散で除して示す。また、その卓越振動数を表-6に示す。いずれのケースにおいても、水平、鉛直変位とねじり角の卓越振動数の一致、および鉛直変位の2倍周波数成分の関係がみられる。こうした卓越振動数の一致は、前述の図-13にみられた円弧状の振動軌跡に対応し、2倍周波数成分は、同じく図-13の8の字形状の振



(a) 4-1.00D 架設時



(b) 1-1.00D 架設時

図-17 キャロッピング発生時の変動風速時刻歴

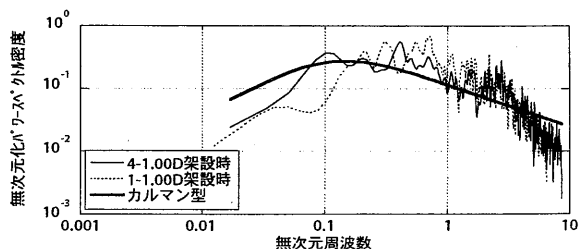
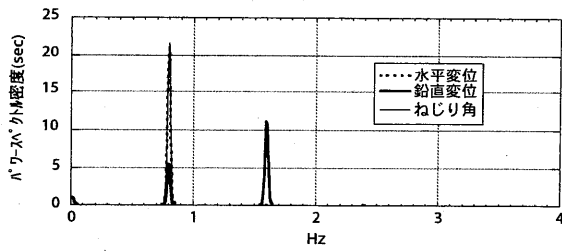
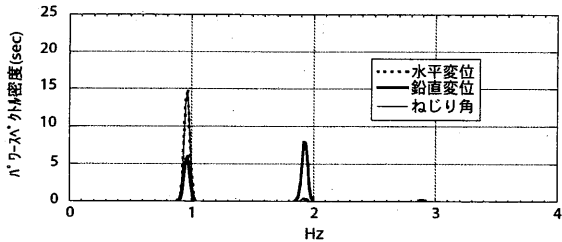


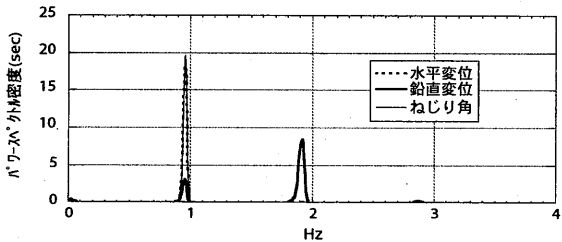
図-18 キャロッピング発生時の変動風速パワースペクトル密度



(a) 4-1.00D, 乱流



(b) 1-1.00D, 一様流



(c) 1-1.00D, 乱流

図-19 ギャロッピング発生時のパワースペクトル密度

表-6 ギャロッピング発生時の卓越振動数

部分 模型	風速条件	卓越振動数(Hz)		
		水平方向	鉛直方向	ねじり方向
4-1.00D	乱流	0.80	1.60, 0.80	0.80
1-1.00D	一様流	0.96	1.92, 0.96	0.96
	乱流	0.96	1.92, 0.96	0.96

動軌跡および図-14～16にみられた鉛直変位における2種類の波の混在に対応する。

水平、鉛直およびねじり方向で一致する卓越振動数は、表-6より、4-1.00Dでは0.80Hz、1-1.00Dでは0.96Hzである。一方、表-4の水平およびねじりの1次固有振動数は、4-1.00Dで0.74Hzおよび0.88Hz、1-1.00Dで0.82Hzおよび0.88Hzであり、上記卓越振動数と、架線形態ごとに互いに近い値となっている。したがって、本実験で再現されたギャロッピングは、振動系の固有振動が励起されたものであり、振幅の増加に伴い、動揺範囲が架設用のワイヤーの張力によって制限された結果、各自由度方向の振動数が一致すなわち連成するに至った現象と考えられる。

上述のギャロッピングの振動形態は、本実験における

振動系の固有振動特性および風速条件が支配的となって生じた現象に他ならない。ただし、実際の送電線においても、図-19、表-6と同様、水平とねじり方向の振動数がほぼ一致し、鉛直方向が水平、ねじり方向の約2倍の振動数となった場合、図-13のような8の字の振動軌跡が観測された例がある¹⁷⁾。本実験では、こうした現象が再現された可能性があると考えられる。

4.3 ギャロッピングの発生に関する考察

本実験により、図-14～16に示すとおり、ギャロッピングの発生からリミットサイクルに至る過渡応答が測定された。また、ここで用いた部分模型の定常空気力係数は、予め三分力天秤実験によって得られている¹³⁾。本節ではこうしたデータを基に、再現されたギャロッピングと、Den Hartogの定式化¹⁰⁾との関係を考察する。前述のとおり、本実験のギャロッピングは、振幅の増加によって架設条件の影響を受けたものであるため、振幅の小さい、発生の初期段階においては、Den Hartogが扱った一般的なギャロッピングと共通の特性を有する可能性が考えられ、これを確認する必要がある。

Den Hartogの定式化は、準定常理論に基づいて、ギャロッピングの発生条件を次式で表したものである。

$$\frac{dC_L}{d\theta} + C_D < 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

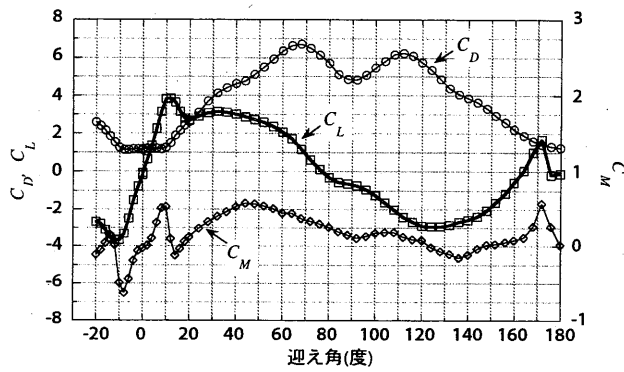
ここに、 C_D : 抗力係数、 C_L : 揚力係数、 θ : 迎え角である。4-1.00D、1-1.00Dの定常空気力係数すなわち C_D 、 C_L および空力モーメント係数 C_M は図-20のとおり得られており、図中の C_D 、 C_L に上式(1)の左辺を適用した結果は図-21となる。

また、図-14～16に示した、ギャロッピング発生風速時のねじり角の時刻歴に対し、初期の15秒間を拡大して示せば、図-22となる。図-22には、図-21に示された、式(1)を満足する迎え角の範囲を併せて示した。

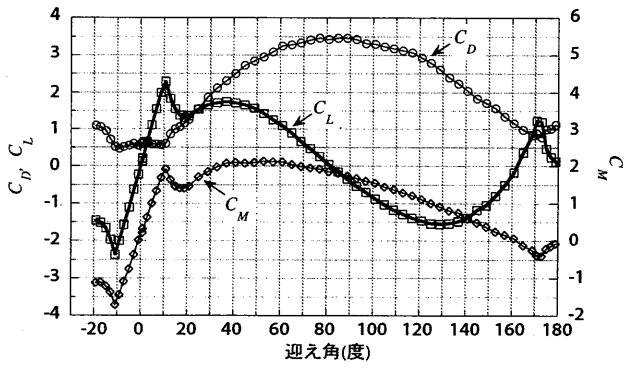
図-22(a)、(c)の乱流のケースでは、ねじり角が式(1)の範囲を下回る段階で、ギャロッピングが発生したことがわかる。図-22(b)の一様流のケースでは、ギャロッピングが発生した時点のねじり角は、式(1)の範囲内にあることがわかる。ギャロッピングの発生過程では、部分模型の振幅が小さく、同時に速度も非常に小さいと考えられる。このため、本実験における風向が水平の条件下では、図-22のねじり角は、迎え角と等価とみなし得る。

以上のことから、一様流中では、迎え角が増加し、Den Hartogの条件が満足された段階でギャロッピングが発生するが、乱流中では、迎え角がDen Hartogの条件を満足する以前の段階で、ギャロッピングが発生し得ると考えられる。このことは、表-5に示した結果、すなわち、1-1.00Dの架設時には一様流に比較して乱流中のギャロッピングの発生風速が低いことと同様、風の乱れがギャロッピングの発生を助長することを示唆する。

4-1.00Dの一様流のケースでは、前述のとおり、ねじ



(a)4-1.00D



(b)1-1.00D

図-20 三分力天秤実験の結果¹³⁾

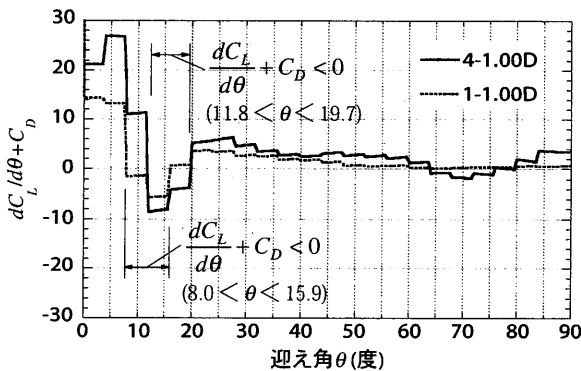
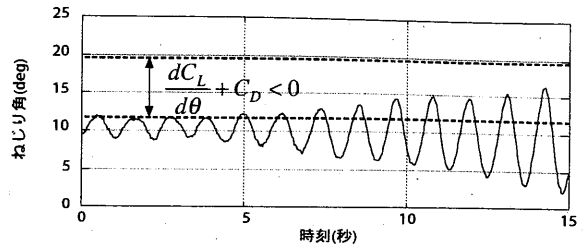
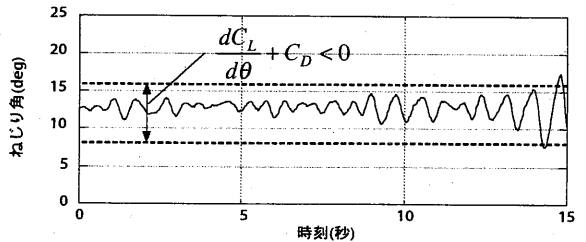


図-21 Den Hartog の式の適用結果

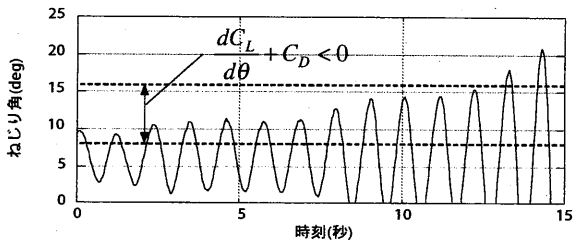
り角の片振幅が10度以上となるギャロッピングは発生していないが、図-8(c)のねじり角の平均値は、平均風速12.0m/s以上で式(1)を満足する。また、平均風速12.0m/sおよび15.0m/s(最大風速)の段階について、図-22と同様、ねじり角の時刻歴を示せば図-23となり、ねじり角は式(1)を満足する範囲内にあることがわかる。一方、図-10(c)に示すとおり、1-1.00Dの一樣流のケースでは、平均風速13.5m/sで、ねじり角の平均値は式(1)を満足する値に達しているが、この段階ではギャロッピングは発生していない。したがって、4-1.00Dの一樣流のケースにおいても、風速を15.0m/sを上回る、より高い値に設定できれば、ギャロッピングが再現された可能性があると考えられる。



(a)4-1.00D, 乱流:発生風速10.4m/s, 平均値8.1deg



(b)1-1.00D, 一樣流:発生風速15.0m/s, 平均値10.4deg



(c)1-1.00D, 乱流:発生風速12.2m/s, 平均値6.4deg

図-22 ギャロッピング発生時のねじり角時刻歴

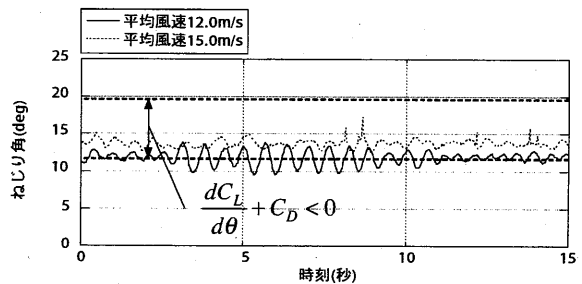


図-23 ねじり角時刻歴:4-1.00D, 一樣流

なお、本実験では、理想的な一樣流を実現するため、風洞の測定部の側面をアクリル板で塞いだ。以前、この措置をしない状態で実験を行っている。その際、4-1.00Dの一樣流のケースで大振幅のギャロッピングが発生している¹⁸⁾。アクリル板の有無と乱れの定量的な関係は、現時点では把握していないが、この措置がギャロッピングの発生に関与する可能性があると考えられる。

5. まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- ① 着氷雪4導体および単導体の部分模型をワイヤーで風洞内に架設した振動系に対して、一定風あるいは変動

風を作用させ、その風速を徐々に増加、現象させた結果、ギャロッピングが発生し、定常状態すなわちリミットサイクルに至ることを確認した。また、ギャロッピングが発生する、増加過程の風速が、ギャロッピングが停止する、減少過程の風速を下回る、ヒステリシスの存在を示した。

② 上記のギャロッピングは、振動系の固有振動が励起された後、振幅の増加に伴い、動揺範囲がワイヤーの張力によって制限された結果、各自由度方向の振動数が一致すなわち連成するに至った現象と考えられる。また、鉛直変位には、2倍周波数成分の関係がみられた。各自由度方向の振動数の一致は円弧状の振動軌跡に、鉛直変位の2倍周波数成分は8の字のループ形状の振動軌跡にそれぞれ対応し、こうした振動形態は、実際の送電線のギャロッピングにおいても観測例がある。

③ 本検討の条件下においては、一様流中では、迎え角が増加し、Den Hartogの条件が満足された段階でギャロッピングが発生したが、乱流中では、迎え角がDen Hartogの条件を満足する以前の段階で、ギャロッピングが発生した。ここに、Den Hartogの条件には、一様流中で測定された空気力係数を適用した。以上のことは、一様流に比較して乱流中のギャロッピングの発生風速が低いことと同様、風の乱れがギャロッピングの発生を助長することを示唆する。

本実験により、入出力に一貫性のあるデータとして、可撓性に富む構造系のギャロッピング現象が測定された。このデータは、ギャロッピングの応答シミュレーション手法の検証にも活用できる。また、実際の送電線のギャロッピングは、架線条件によって様々に変化するため、その現象解明を進める上で、実験条件の変更と改善により、さらなるデータの取得が必要である。

謝辞

本検討における風洞実験の実施にあたり、貴重な助言を頂きました、九州工業大学工学部建設社会工学科の木村吉郎先生に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 架空送電線のギャロッピング現象・解析技術調査専門委員会：電気学会技術報告，第844号，2001。
- 2) 五藤員雄，小池東一郎：架空送電線のギャロッピング振動の数値計算法と一防止方法，電気学会論文誌B，97巻，7号，pp. 23-30，1977。
- 3) 大月晃：架空送電線のギャロッピングに関する研究，日本機械学会論文集（C集），57巻，536号，pp. 100-107，1991。
- 4) Yu, P., Y. M. Desai, A. H. Shan and N. Popplewell :

Three Degree-of-Freedom Model for Galloping Part I: Formulation, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 119, No. 12, pp. 2404-2425, 1992.

- 5) 大熊武司，加々見淳，中内一志，菊池武彦，武田浩三，丸川比佐夫：風の乱れを考慮した架空送電線のギャロッピング解析，電気学会論文誌B，Vol. 118-B, No. 12, pp. 1386-1397，1998。
- 6) 清水幹夫，佐藤順一：4導体送電線のギャロッピング観測およびシミュレーション，構造工学論文集，Vol. 47A, pp. 479-488，2001。
- 7) 例えば，Proc. of Int. Seminar on CABLE DYNAMICS, JAWE, Tokyo, 13 Oct. 1997。
- 8) 山口宏樹，謝旭，雪野昭寛：多導体送電線のギャロッピング特性に関する考察，第15回風工学シンポジウム論文集，pp. 563-568，1998。
- 9) 清水幹夫：時間-周波数分析によるギャロッピング時における送電線の応答特性評価，電力中央研究所研究報告，U98058，1999。
- 10) Den Hartog, J. P. : Mechanical Vibrations, McGraw-Hill, 1956。
- 11) Parkinson, G. V. : Aeroelastic Galloping in one Degree of Freedom, Proc. Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures (Teddington), Her Majesty's Stationary Office, 1963。
- 12) Novak, M. : Galloping Oscillations of Prismatic Structure, Proc. ASCE, Vol. 98, No. EM 1, 1972。
- 13) 清水幹夫，石原孟，ファックパン：3分力天秤実験に基づく着氷雪多導体および単導体送電線の定常空気力特性に関する検討，構造工学論文集，Vol. 50A, pp. 647-656，2004。
- 14) 清水幹夫，石原孟，ファバンフック：風洞実験による着氷雪送電線の定常および非定常空気力特性に関する研究，第18回風工学シンポジウム論文集，pp. 245-250，2004。
- 15) 井上学，木村吉郎，藤野陽三，雪野昭寛，井上浩男：着氷4導体送電線に作用する動的空気力の特性に関する一考察，土木学会第54回年次学術講演概要集第1部，pp. 742-743，1999。
- 16) 清水幹夫，佐藤順一，武田浩三，雪野昭寛：4導体送電線の動的挙動に関する検討，構造工学論文集，Vol. 46A, pp. 491-500，2000。
- 17) Tsujimoto, K., H. Iisaka, K. Shimojima, H. Kubokawa, T. Okumura and K. Fujii : Report on Experimental Observation of Galloping Behaviour in 8 - Bundled Conductors, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, NO. 5, pp. 1193-1201, 1983。
- 18) 清水幹夫，石原孟，ファバンフック：土木学会第60回年次学術講演概要集I-335，pp. 667-668，2005。

(2005年9月10日受付)