

第 5 章

5

ギャロッピングのシミュレーション手法の開発と対策に向けて

第5章 ギャロッピングのシミュレーション手法の開発と対策に向けて 目次

我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 清水 幹夫

5 - 1 シミュレーションコード「CAFSS」の概要	77
5 - 2 シミュレーションを実務に役立てる	84
コラム4：送電線の素線切れを解析する	86

清水 幹夫（8ページに掲載）

5-1 シミュレーションコード「CAFSS」の概要

5-1-1 CAFSSの開発理念と基本的な性質

送電線のギャロッピング現象をシミュレーションする際、何が問題になるであろうか？

そもそも、一口に送電線と言っても、その架線形態は実に様々であり、導体数は単、複、4～8導体まであり、径間長や弛度、支持点高低差は、径間ごとに異なるのが普通である。また、支持点には耐張碍子あるいは懸垂碍子が存在し、これらは境界条件として電線挙動に影響を及ぼす。さらに、ギャロッピングシミュレーションの本来の目的として、対策法の効き目の検証が挙げられるが、その場合、相間スペーサ、ルーズスペーサなどの対策品を含めた挙動評価が当然要求される。つまり、送電線のギャロッピングシミュレーションでは、様々な架線形態の送電線に加え、碍子装置などの周辺設備や対策品が対象構造物になると言うことができる。

送電線のギャロッピングは、着氷雪した送電線の風による自励振動現象であることから、着氷雪と風、特に自然風を考慮する必要がある。つまり、着氷雪した送電線の空気抵抗（係数）と風速に基づいて、送電線に作用する空気力が現実的に換算されなくてはならない。

以上のように、送電線のギャロッピングシミュレーションコードには、解析できる構造形態が多様であること、および実現象に即した入力機能を有することが要求される。数値シミュレーションに用いる構造解析手法に関しては、1950年代に有限要素法という強力な解法を得て以来、航空、建造物をはじめ工学の多分野で、既に実用化されている。有限要素法は、物体を仮想的に有限の大きさに分割した要素の集合として扱う離散化解析手法であり、コンピュータの発展に伴うマトリクス代数の導入により、線形および非線形問題の組織的な大規模計算を可能にしている。ここに、離散化とは、解析解の得難い連続体の問題を、有限個の自由度で近似する方法をいう。有限要素法の利点の幾つかを挙げれば、次のようになる。

1) 構造物を適当な数の要素に分割することにより、

任意の数の一般化座標を導入できる。

- 2) 各要素に対して同一の変位関数を選ぶことが可能で、これにより計算を簡略化できる。
- 3) 要素ごとに運動方程式が成立し、各節点変位は隣接する要素にのみ影響を与えるため、連成する範囲が狭く解法が簡略化される。
- 4) 形状関数の選び方および要素分割の方法により、あらゆる形状の構造物をモデル化できる。

つまり、有限要素法は、運動方程式で記述できる現象であれば、基本的に変形の適合条件、境界条件を満足する解を与えることができ、多様な架線形態を有する送電線路の解析に適していると考えられる。したがって、送電線のギャロッピングシミュレーションコード「CAFSS」は、着氷雪電線に作用する空気力の換算機能を有する有限要素法解析コードとして開発された。表5-1-1に、CAFSSの基本的な性質を示し、図5-1-1には、CAFSSで解析可能な構造物モデルの代表例を示した。

表より、CAFSSの解析機能は、一般的な有限要素法解析コードのそれと同様である。ただし、空気力の換算機能は、ギャロッピングシミュレーションに特化したものである。これについては次項に示した。

5-1-2 空気力のモデル化

風を受けて振動する物体には、どのような力が作用しているのだろうか？

厳密には、振動する物体自身が、周囲の風の流れに干渉し、その干渉された流れがまた、物体に力を及ぼす。した

表5-1-1 CAFSSの基本的な性質

積分法	直接積分、Newmark-法
使用要素	線形トラス要素（軸回りの回転自由度の考慮可） 線形はり要素（任意方向に回転するヒンジ結合可）
未知量	変位（全節点の変位、全要素の応力、ひずみを算出可）
参照座標系	updated Lagrange系
大変形	要素の幾何学的非線形性を考慮
収束計算法	Newton-Raphson法
外乱	風速、空気力係数を基に準定常的に空気力を換算
構造減衰	Rayleigh減衰

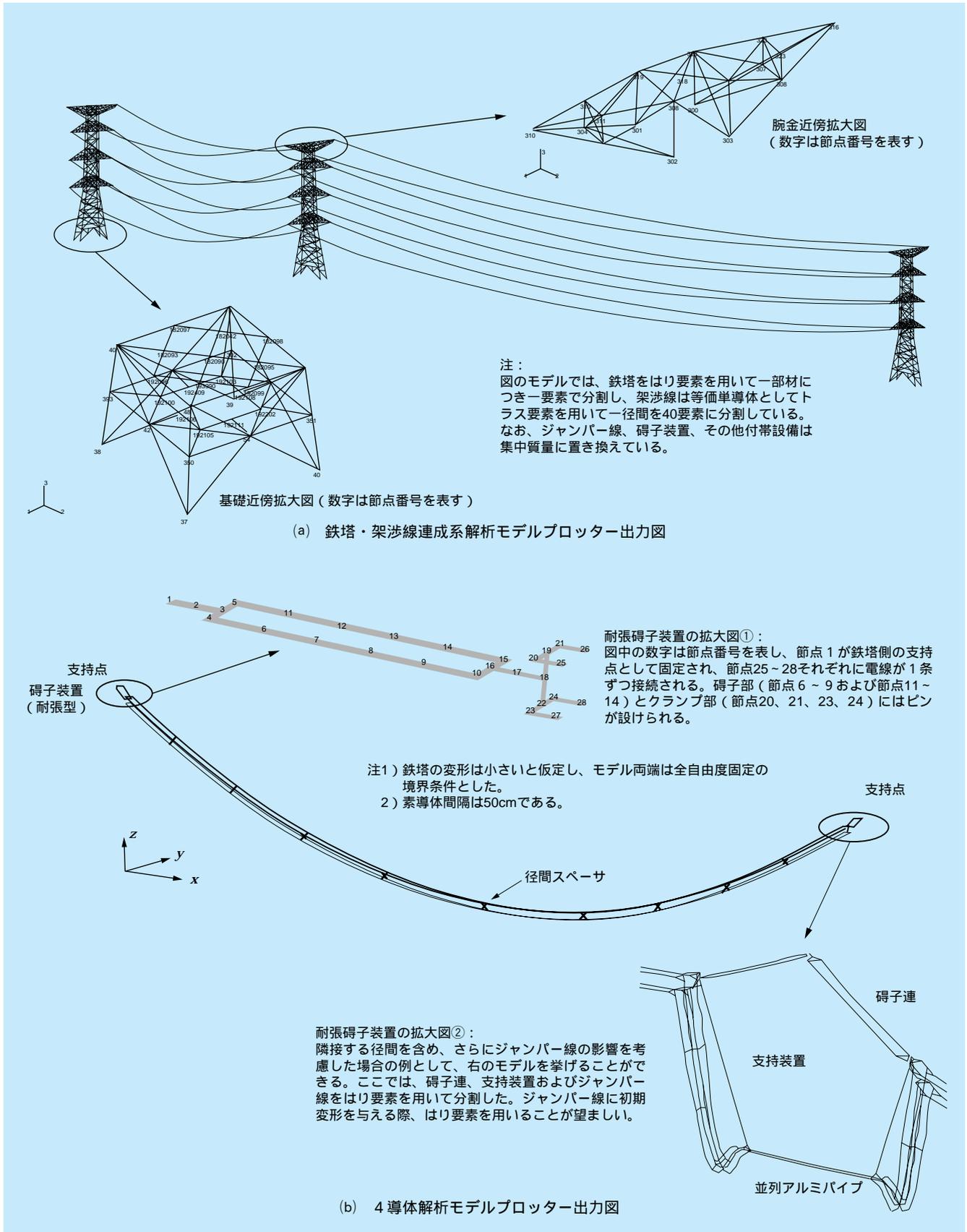


図5-1-1 CAFSSで解析可能な構造モデルの例

がって、風の場合における物体の振動解析は、流体関連振動、すなわち風と物体の相互作用の解析とすることができる。ただし、風の乱れの規模（渦の大きさ）と物体の規模との関係から、場合によっては、風は既知の外乱とみなし、それ自体を解析モデルに含める必要がないこともある。CAFSSについては、振動中の着氷雪電線の空気抵抗係数に関する既往の情報が少ないこと、また、これまでの解析例¹⁾により、その妥当性が確認されていることから、風速は既知の外乱として与え、時間断面ごとに風と電線との相対速度に基づいて空気力を換算、すなわち空気力を準定常的に近似している。CAFSSが採用する準定常空気力の換算式を示せば、以下のとおりとなる。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_a d C_D(\theta) v_r^2 \quad (5-1-1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_a d C_L(\theta) v_r^2 \quad (5-1-2)$$

$$F_M = \frac{1}{2} \rho_a d^2 C_M(\theta) v_r^2 \quad (5-1-3)$$

ここに、 F_D ：抗力、 F_L ：揚力、 F_M ：空力モーメント、 ρ_a ：空気密度、 d ：電線断面の代表径、 $C_D(\theta)$ ：抗力係数、 $C_L(\theta)$ ：揚力係数、 $C_M(\theta)$ ：空力モーメント係数、 θ ：迎え角、 v_r ：相対風速である。

図5-1-2に示すように、電線には相対風速の方向に抗力、これと直交する方向に揚力、そして電線軸軸回りに空力モーメントが作用し、これらはいずれも、 $C_D(\theta)$ 、 $C_L(\theta)$ および $C_M(\theta)$ などの空気力係数と、相対風速の2乗に比例する。

解析上、相対風速は、時々刻々計算される電線の数

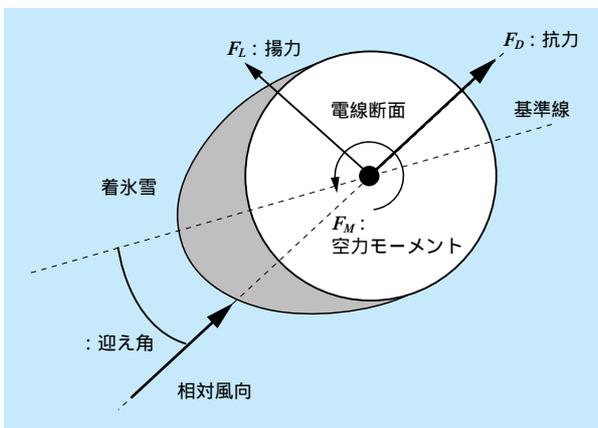


図5-1-2 着氷雪電線断面に作用する空気力

と、予め用意したファイルから読み込む風速との差から算出され、空気力係数も時々刻々計算される電線の迎え角に応じて、データファイルから読み込まれる。このデータは、既往の風洞実験において、一様流中で人工的に着氷雪させた電線の部分模型を、電線軸回りに徐々に回転、すなわち迎え角を徐々に変化させながら測定されるものである。

以上のように、CAFSSでは時系列的に外力が決定され、ステップ・バイ・ステップで解析が進行し、応答の時刻歴が出力される。

5-1-3 CAFSS の検証例

シミュレーションコードは、これが実務に耐え得るものか、必ず検証しなくてはならない。そのため先ず、採用している運動方程式や解法が間違いなくコーディングされ、正しく機能することの検証、次に、シミュレーション結果が現実的なもので、実用上十分な精度が得られることの検証が必要である。

機能の検証は、コードの開発段階で簡単な例題による入出力のチェックや、解析解あるいは汎用コードを用いたベンチマークを行えば良い。CAFSSの機能検証の結果は、文献²⁾に示されている。一方、実用性の検証については、実験あるいは観測により、入出力が明らかにされている実現象を対象とすべきである。以下には、実規模試験送電線で観測されたギャロッピングの結果を用いた、CAFSSの実用性検証のプロセスを示した¹⁾。

(1) 検証対象の選定

シミュレーションの対象は、図5-1-3のように最上試験線³⁾（山形県立川町、以下、試験線と称する）に架線された実規模4導体送電線1径間とした。図に示すとおり、試験線には各種センサーが配置されており、4導体を構成する4条の素導体それぞれには、プラスチック製の人工着雪が取り付けられている。したがって、夏場でもギャロッピングの発生がみられ、この時の風速（入力）と電線応答（出力）の同時観測が可能であることから、検証の対象に適している。ここでは、ギャロッピングと判断できる振動が10分間継続して観測された2ケースのデータを、シミュレーションとの比較対象に選んだ。風向、風速の観測データとしては、電線の地上高と等し

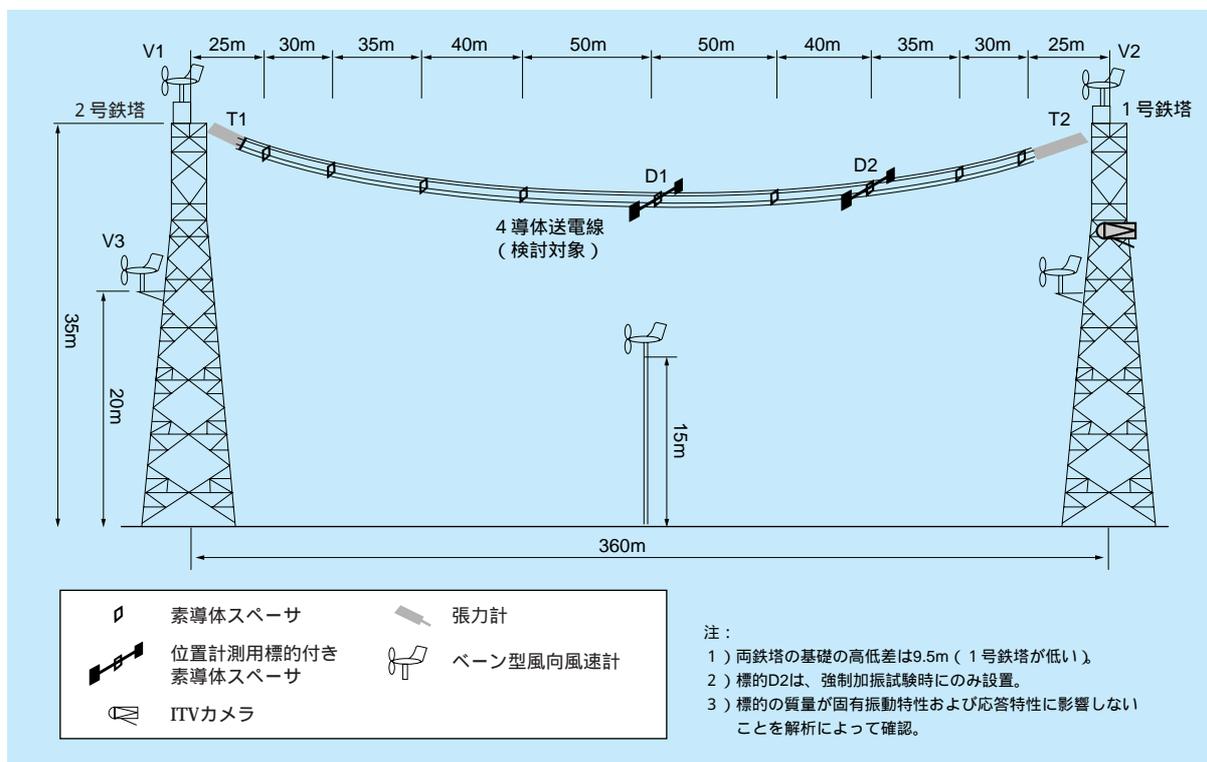


図5-1-3 試験線略図

い高さに位置するベーン型風向風速計 V1、V2 あるいは V3 で得られた時刻歴を用いた。電線応答の観測データとしては、ITV カメラで撮影された径間中央の振動軌跡および回転角、2号鉄塔側支持点の張力計 T1 で得られた張力時刻歴を用いることとした。電線の振動軌跡は、径間中央の径間スパーサ D1 に取り付けられた 2 つの標的の midpoint の座標であり、ITV の映像をビデオトラッカーにより数値化した値である。また、これら 2 つの標的の位置関係から、4 導体の捻回角、すなわち径間方向軸回りの回転角が換算できるため、これも検証に用いることとした。

(2) 構造解析モデルの作成

CAFSS は、対象構造物を要素分割された離散化解析モデルとして扱う。ユーザーは、どのような要素を用い、どのように分割するかを決めなくてはならない。ここでは、導体は軸回りの自由度を有する線形トラス要素で、碍子装置と径間スパーサは線形はり要素で分割した。鉄塔については、その振動がギャロッピングに及ぼす影響は少ないと仮定できるため、剛体とみなして解析モデルから省き、支持点を空間に固定する境界条件とした。

以上のようにして作製した構造解析モデルの見取図を 図 5-1-4 に、その諸元を表 5-1-2 に示した。表中の計算上考慮されるヤング率や密度などの情報は実物の値であることから、図 5-1-4 は電線の剛さや重さを現実的に模擬した構造解析モデルということができる。

(3) 構造解析モデルの検証

シミュレーションに先立ち、構造解析モデルができた段階で、これが妥当なものであるかチェックすることが重要である。

チェックの方法として、実物との固有振動数、振動モードの比較がある。構造物は特性として、揺れ易い振動数とたわみ形状を有しており、それぞれ、固有振動数と固有振動モードと称される。実構造物の固有振動数、振動モードは、強制加振試験や自由振動試験などで把握でき、最上試験線においても、これらの試験が実施されている。一方、構造解析モデルについては、外力を与えない状態、すなわち運動方程式の左辺から、固有値解析によって固有振動数とモードが得られる。

強制加振試験、固有値解析によって得られた対象電線の固有振動数およびモードを、表 5-1-3 に比較して示し

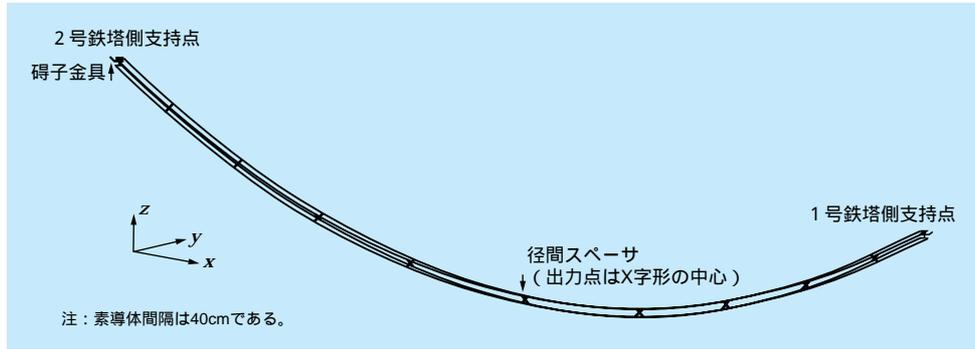


図5-1-4 解析モデル見取図

表5-1-2 解析モデルの諸元

	電線部 (ACSR410) ^{注1}	碍子金具 (碍子部)	碍子金具 (金具部)	径間スペーサ
径間長 (m)	357			
弛度 (m)	8.55			
初期張力 (N)	T1 : 3.227×10^4 , T2 : 3.213×10^4			
ヤング率 (N/m ²)	8.192×10^{10}	2.058×10^{11}		
ねじり剛性 (Nm ²)	156.8 ^{注2}	6.295×10^3	4.886×10^4	
断面積 (m ²)	4.808×10^{-4}	7.069×10^{-4}	1.964×10^{-3}	
代表径 (m)	2.85×10^{-2}	0.03	0.05	
密度 (kg/m ³)	3.48×10^3	0.0 ^{注3}		
使用要素	回転方向の自由度を考慮したトラス	はり		
要素分割数	36要素	1要素/部材	4要素/個	

注1) 素导体1条に対する値を示した。

2) 電線に対する要素試験結果を参照した。

3) 各要素の密度は0とし、実際の碍子金具、素导体スペーサの重量と整合するよう、節点に集中質量を付加した。

た。表より、試験と解析の間で固有振動数は概ね一致しており、構造解析モデルは妥当なものと判断できる。

(4) 空気力係数データ

CAFSSを用いたシミュレーションでは、風洞実験で得られる着氷雪電線の空気力係数データを、予め用意する必要がある。ここで用いた空気力係数データは、図

5-1-5に示す4導体電線の部分模型に対する風洞実験結果であり、これを図示すれば図5-1-6のとおりとなる。図の部分模型は、人工着雪を含めて実物と断面寸法が等しく、試験線の一部を切り出したものとみなすことができる。また、空気力係数は、素导体ごとに取付けられた多点風圧計により、測定されたものである。

表5-1-3 固有振動数の比較

次数	固有振動数 (Hz)		振動モード*2
	解析	試験	
1	0.193	*1	水平方向1ループ
2	0.333	0.350	捻回方向*3ループ
3	0.383	0.350	鉛直方向2ループ
4	0.384	*1	水平方向2ループ
5	0.388	0.375	鉛直方向1ループ

注：*1) 試験データの取得なし。

*2) ループ=モードの腹の数。

*3) 4導体全体の電線軸回りの回転方向。

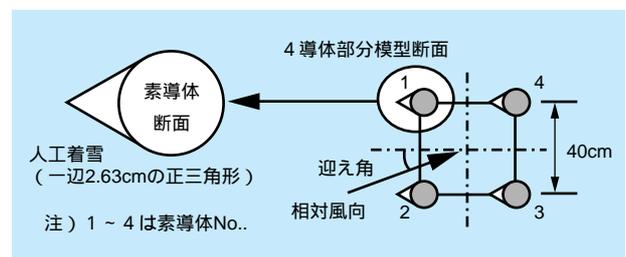


図5-1-5 4導体部分模型の断面図

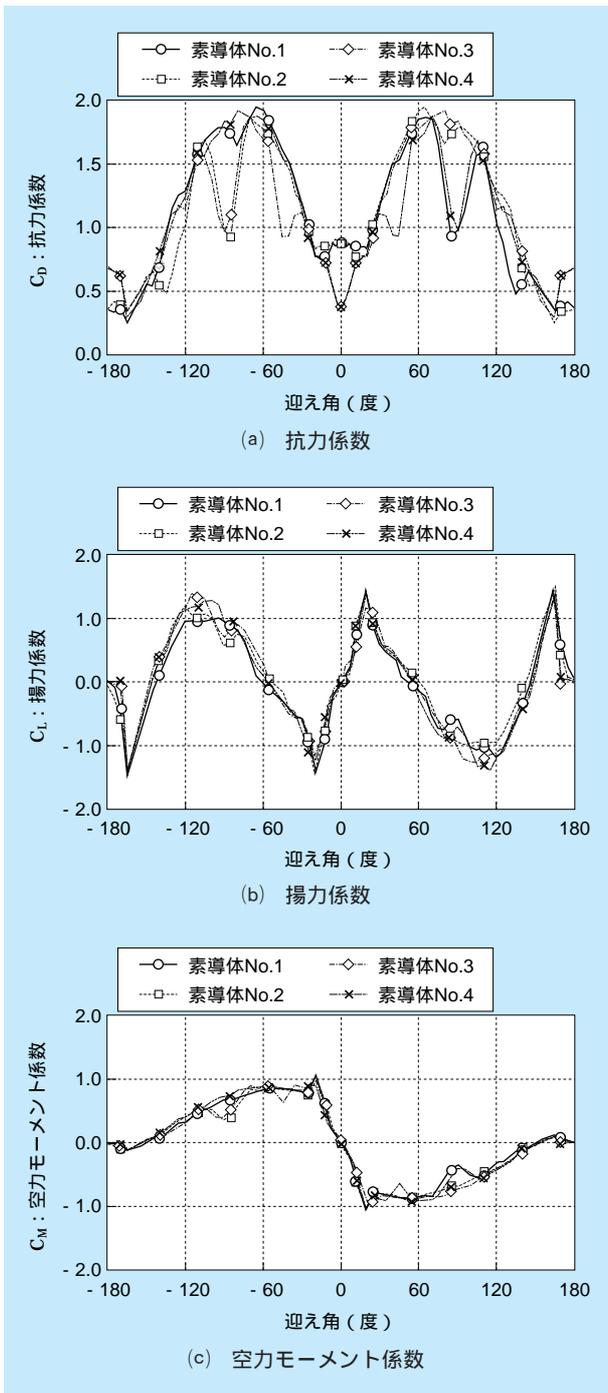


図5-1-6 4 導体部分模型の空気力係数

(5) 風速データ

風速についても、既知のデータを与える必要がある。基本的に風は、構造物全体に分布して作用するものであるが、図5-1-3に示すとおり、試験線ではV1、V2および

V3の観測データしか得られていない。したがって、観測データと10分間統計量および周波数特性が等価な風を人工的に発生させることにより、径間全体の風を補完した。ここでは2ケースの観測事例を検証の対象としたが、各ケースの10分間統計量を表5-1-4に、発生させた風速時刻歴の一部を図5-1-7に示した。

(6) 検証の結果

シミュレーションの結果として、観測項目と同様の情報、すなわち径間中央における変位軌跡と電線軸回りの回転すなわち捻回角、および支持点の張力変動を出力し、観測結果と比較して図5-1-8に示した。図より、各ケースともに、電線の動揺範囲、捻回角および張力変動のいずれも、シミュレーションと観測とが概ね一致しており、CAFSSにより現実的にギャロッピングがシミュレーションされることを確認できる。

表5-1-4 風速の10分間統計量 (V1 ~ V3の平均値)

ケース	観測時の風速 (m/s)		
	平均値	瞬間最大値	標準偏差
1	13.9	20.0	1.7
2	16.5	23.8	3.1

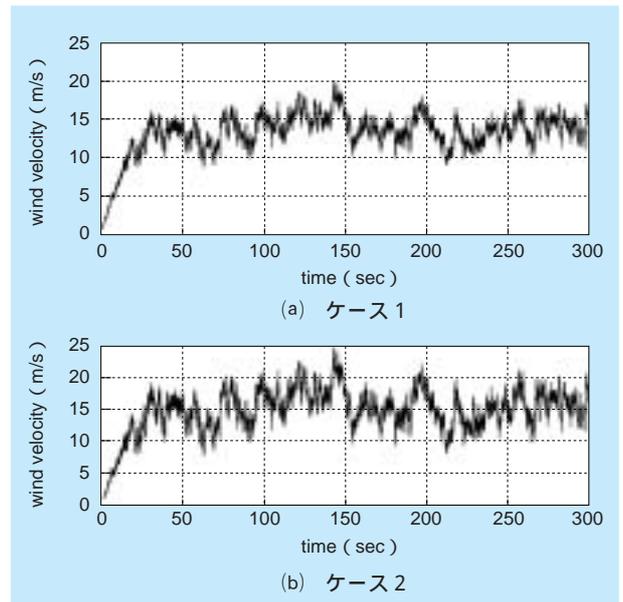


図5-1-7 発生させた風速時刻歴 (径間中央付近)

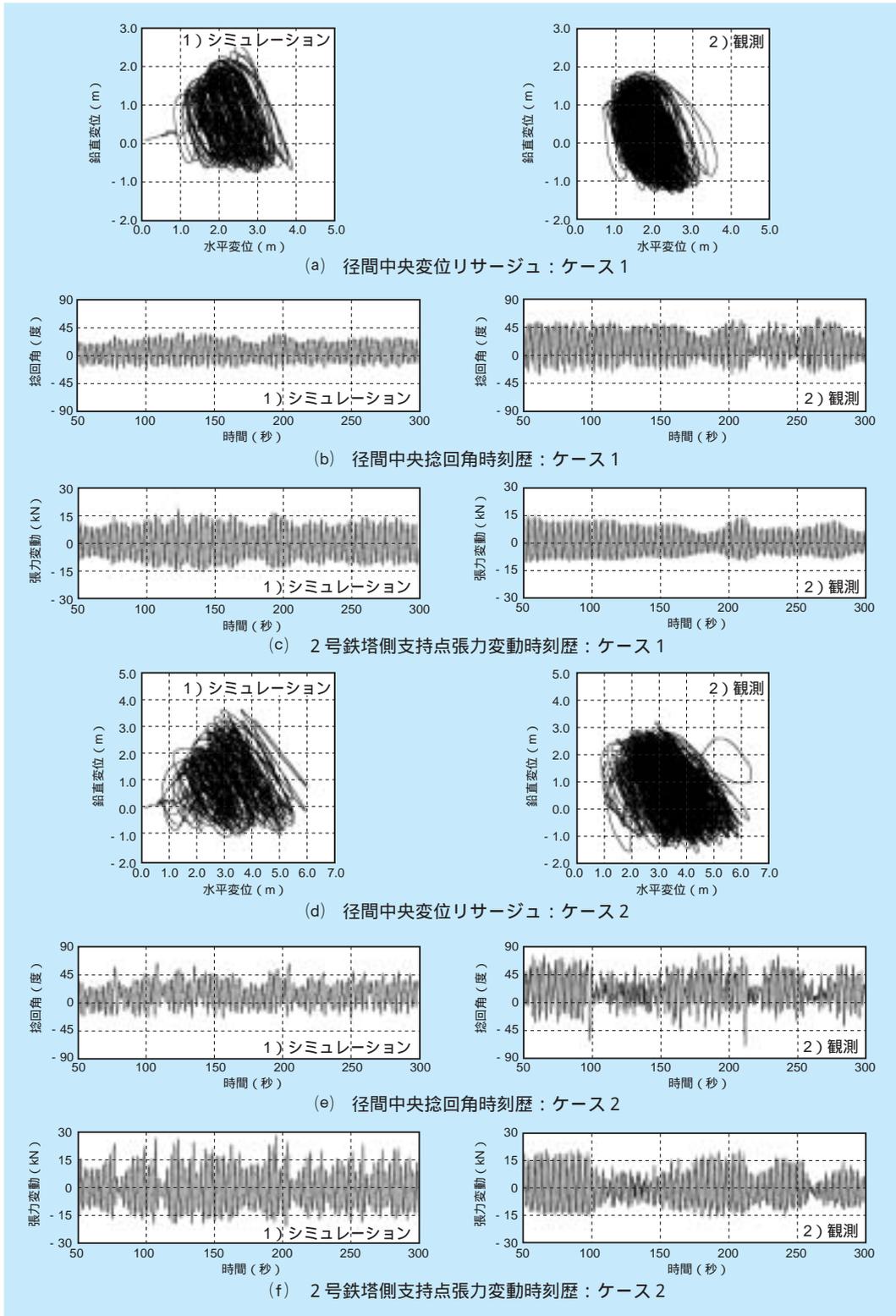


図5-1-8 シミュレーション結果と観測結果との比較

5-2 シミュレーションを実務に役立てる

5-2-1 相間スペーサを含む送電線路の解析

前節に示したとおり、CAFSSは種々の送電線路をモデル化し、現実的にギャロッピングをシミュレーションする機能を有する。このためCAFSSは、風速、架線形態、対策品の有無などの条件を様々に変化させた場合の、ギャロッピング時における送電線路の応答予測に適している。

現在CAFSSは、図5-2-1に示すような、相間スペーサを含む送電線路のギャロッピングシミュレーションに幅広く用いられ、

- 1) 相間スペーサの効果検証
- 2) 相間スペーサの取付け位置の最適化検討
- 3) 相間スペーサの材質、ヒンジの有無などの構造条件の最適化検討
- 4) 相間短絡事故あるいは相間スペーサの機械的強度の検討

などが実施されている。相間スペーサは、文字通りそれ自体が相間間隔を確保することから、ギャロッピングが

発生しても短絡を防止できるとされており、現在最も有効なギャロッピング対策品と考えられている。しかし、その最適な取付け位置、方法は今だ確立されておらず、強度、構造的にも合理化の余地が残されている。

今後、上記の検討の推進により、相間スペーサの機能が向上し、ギャロッピング対策のコストダウン、合理化が期待できる。

5-2-2 ルーズスペーサ付き送電線の解析

多導体電線の径間内には、図5-1-1(b)、5-1-4に示すように、電線を束ねる径間スペーサが設けられている。通常、径間スペーサと電線との連結部（把持部）は固定されているが、この部分にヒンジを設けたルーズスペーサが、最近使われはじめている。ルーズスペーサを取付ければ、ヒンジで把持される素導体は自由回転が可能となり、着氷雪した際に偏心重量によってねじれるため、径間全体に均一な形状で着氷雪し難くなることから、ギャロッピングの発生が抑止できると考えられている。

CAFSSでは、図5-1-1(b)、5-1-4に示すように、はり要

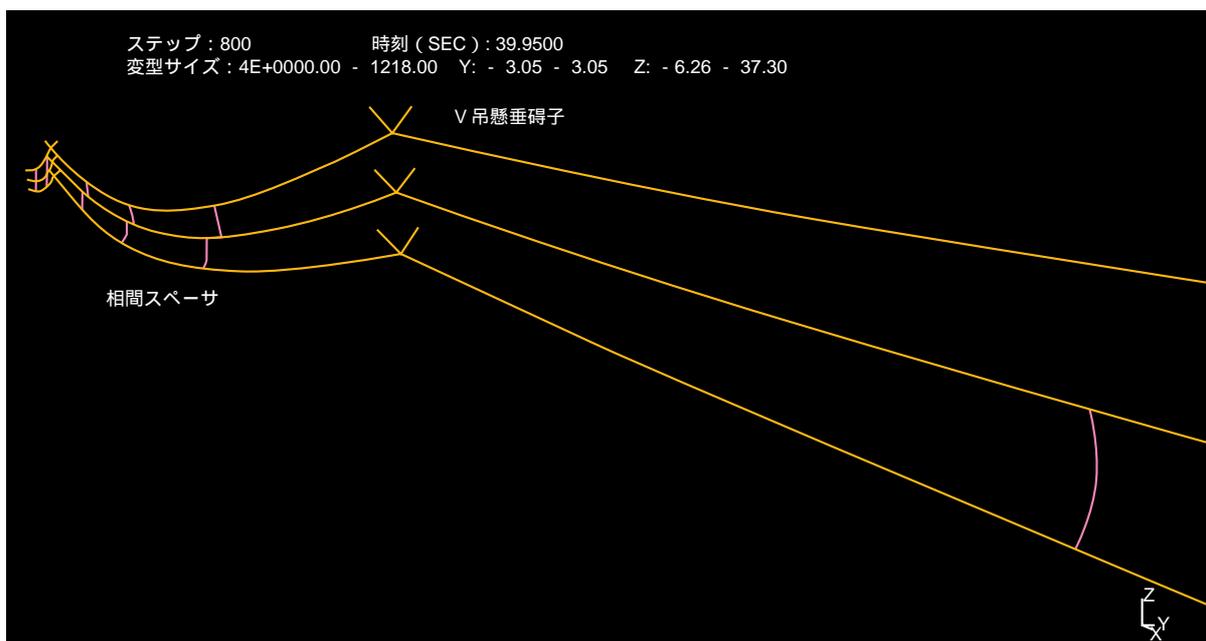


図5-2-1 相間スペーサを含む3相3径間解析モデル

素をX字型に組んで径間スペースを模擬するが、**図5-2-2**に示すように、その端部にヒンジ機構を考慮することが可能であり、ルーズスペースをモデル化できる。これまでに、ルーズスペースの有無をパラメータとして、4 導体電線のギャロッピングシミュレーションを実施し

たところ、**図5-2-3**に示すように、ギャロッピングの抑止効果が確認されている^{(2),(4)}。

ルーズスペースの効果のメカニズムについては、なお解明の余地があり、今後、観測およびシミュレーションによる検討が必要と考えられる。

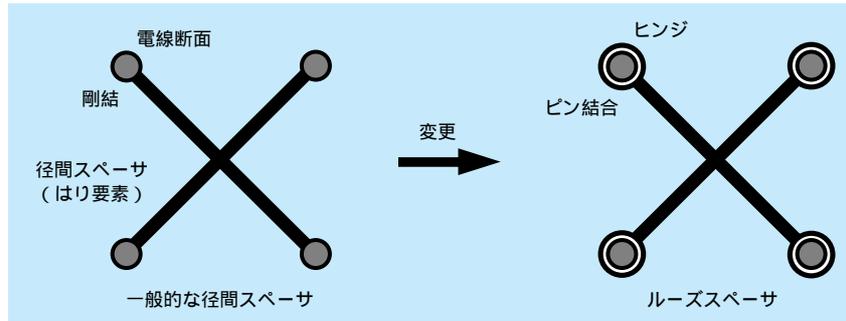


図5-2-2 ルーズスペースのモデル化

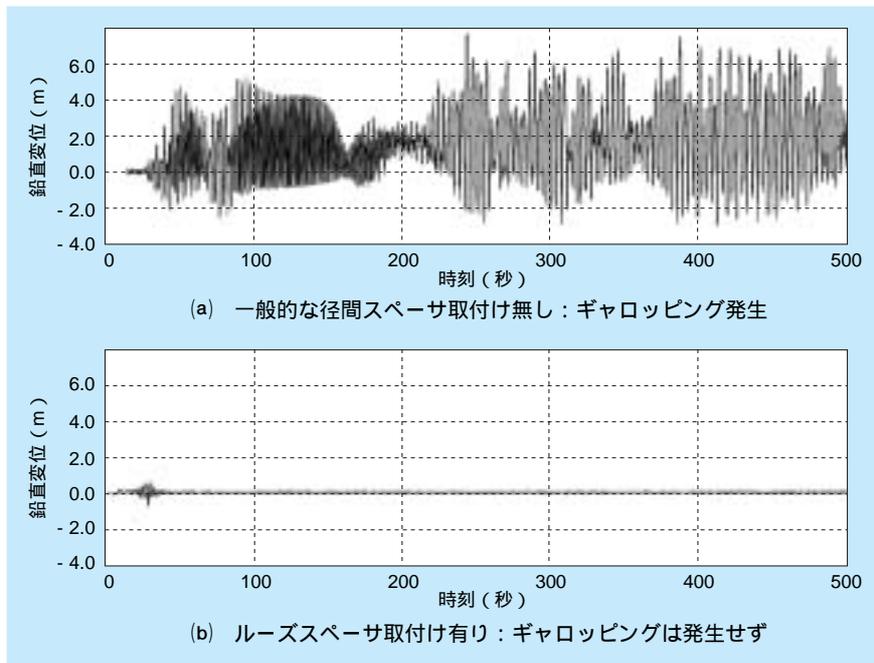


図5-2-3 一定風速20m/s作用下の4 導体送電線の径間中央鉛直変位

コラム4：送電線の素線切れを解析する

送電線は、強度確保のための鋼製の芯線と、これを取り巻く導体部のアルミ製のより線とで構成されており、これら各線は素線と呼ばれている。また、送電線には、碍子との境目をはじめ、多導体を束ねるラインスペーサやギャロッピングの対策品の取り付け部分など、クランプ金具によって把持される箇所が存在する。図1には、ある電線の断面と、ギャロッピング対策の一つであるねじり防止ダンパーの把持部近傍を示した。なお、ねじり防止ダンパーには、実際には減衰効果はないが、慣例的にこの名で呼ばれている。

さて、電線の把持部では、より線の数本が断線する「素線切れ」という被害がみられる場合がある。素線切れは、送電線の電力容量を低下させ、電力の安定供給に支障を来す現象であり、その原因は、定性的には電線振動による疲労と考えられる。ただし、把持部において素線が疲労破断にいたる具体的なプロセスやメカニズムは、十分には解明されていないのが現状である。

そこで、素線切れのメカニズム解明に資する一つの試みとして、当所では、素線断面をモデル化した締め付けのシミュレーションにより、素線間のすべりや摩擦に伴って生じる力、すなわち接触力を分析している。シミュレーションの手法は、

粒状要素法⁽¹⁾と呼ばれるものであり、粒状体すなわち円形要素の集合の変形解析に威力を発揮することから、土の力学特性をミクロ的に評価する際に多く用いられる手法である。ここでは、複数の素線によって構成される電線断面を粒状体に見立てた訳である。

クランプの締め付けに伴って、素線間に発生する接触力は、例えば図2のように表示され、図3のように、その集中の度合いから、素線切れの発生し易い箇所を特定できる可能性が確認されている。

こうした試みは、あくまで計算主体の基本的な考察であり、メカニズム解明のためには、実現象との関係を詳細に考察する必要があることはいうまでもない。ただし、例えば図4のように、アーマロッドの構成を変更して、接触力の集中を回避することにより、素線切れ防止の可能性を示すことは、計算上は可能である⁽²⁾。

参考文献

- (1) 岸野佑次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析、土木学会論文集、Vol. 406/ III-11, pp. 97-106, 1989.
- (2) 清水幹夫、他：架空送電線の素線切れに関する数値的検討、構造工学論文集、Vol. 45A, pp. 19-29, 1999.

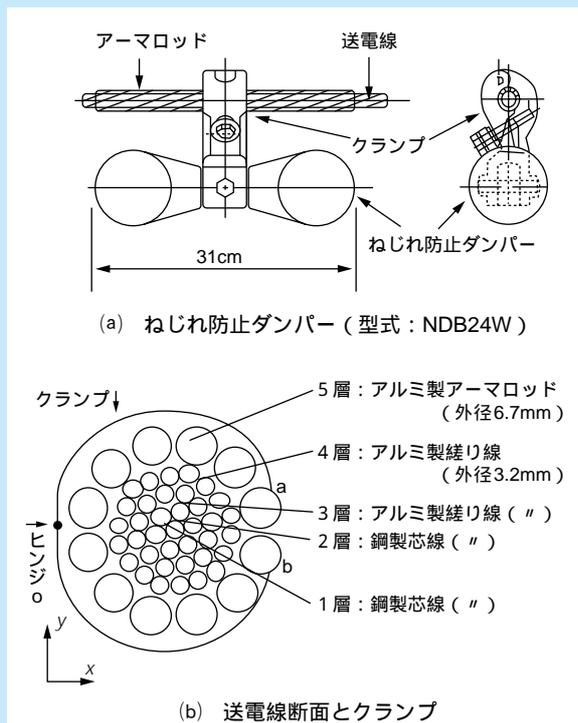


図1 ねじり防止ダンパーと電線断面

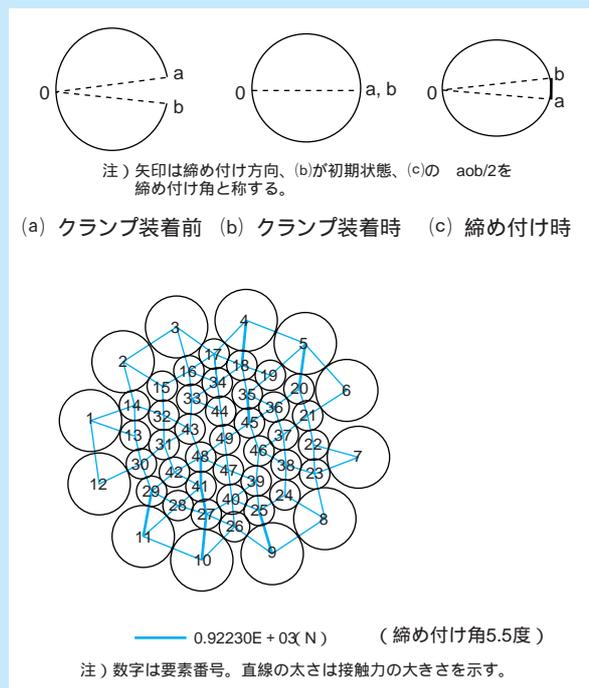
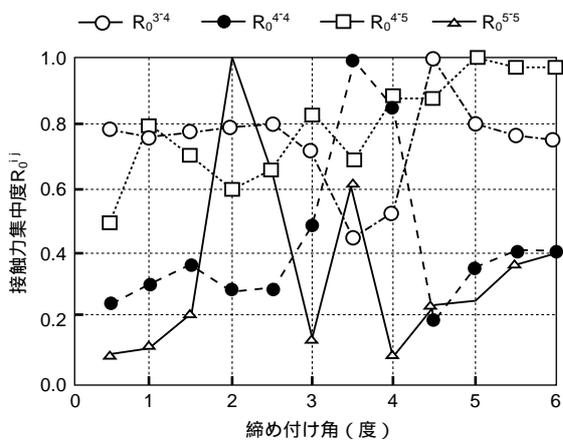
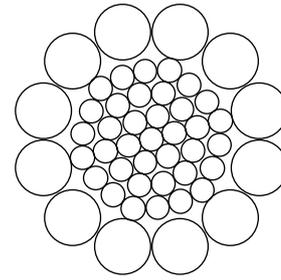


図2 締め付け角の定義と接触力分布図

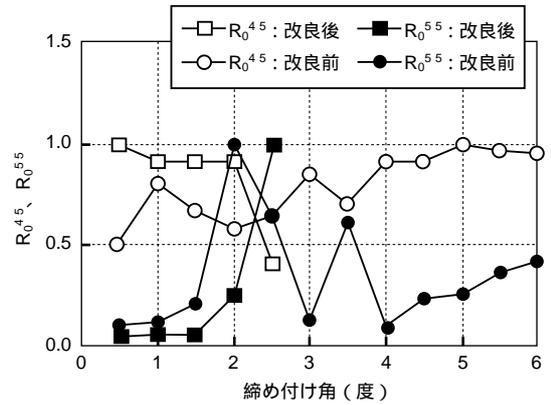


注： R_0 の添字は層を示す。締め付けに伴い実際に素線切れの発生した第4層に接触力が集中することがわかる。

図3 接触力集中度



(a) 改良した電線断面 (アーマロッドの本数を変更)



注：改良後は2.5度で締め付けが完了する。接触力は5層のアーマロッドが受け持ち、4層への集中を防いでいる。

(b) 接触力集中度

図4 改良した電線断面と接触力集中度