

# DENCHUKEN REVIEW

送電設備の風荷重・風応答評価技術

電中研レビュー No.48 2003.2



財団法人 電力中央研究所

巻頭言	神奈川大学工学部教授 大熊 武司	2
「耐風設計研究」のあゆみ		5
はじめに	常務理事 鈴木 俊男	6
第1章 研究の変遷		7
1-1 送電鉄塔・架渉線の耐風設計		9
1-2 ギャロッピングの数値解析技術		12
コラム1：UHV 赤城実規模試験線		14
第2章 合理的な風荷重評価技術の確立に向けて		17
2-1 現在の設計手法の概要と合理化研究の方向性		19
2-2 風向別基本風速の評価		19
2-3 設計風速の評価		27
2-4 等価静的風荷重の評価		29
第3章 耐風設計に関する解析評価ツールの整備に向けて		37
3-1 3次元気流解析コード「L-WIND」		39
3-2 増速率の簡易評価ツール「k1-adviser」		44
3-3 ガスト応答解析コード		47
3-4 等価静的風荷重評価ツール		51
コラム2：やまじ風		55
第4章 観測・実験結果を設計に生かす		57
4-1 九州試験線・四国試験線における風および風応答観測		59
4-2 地形周りの気流場に関する風洞実験		65
4-3 架渉線の風応答に関する風洞実験・フィールド実験		70
コラム3：気象ドップラーレーダーを用いた風速場の測定		74
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		75
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

第6章 今後の展開 .....	89
6-1 当所における耐風設計研究 .....	91
6-2 当所におけるギャロッピング研究 .....	91
おわりに ===== 理事 我孫子研究所長 加藤 正進	93
引用文献・資料等 .....	94

---

表紙絵：四国試験線における風および風応答観測風景

## 合理的対風設計法の確立をめざして



平成3年の台風19号は日本列島を縦断し、自然災害の一事象に対して支払われた損害保険金額としては世界最高額（当時）である5675億円にのぼる甚大な被害を建築物等にもたらしましたが、電力設備もまた、西日本地域において、送配電設備を中心に甚大な被害を被りました。このため、ただちに資源エネルギー庁公益事業部内に電力設備台風被害対策特別委員会が、また電気事業連合会内に流通設備風害対策特別委員会が設置され、送電用設備については次の3課題について電気事業

大で研究を実施せよとの提言がなされました。

- (1) 台風に伴う地形影響による局地的強風（以下、局地風という）の実態を現地観測により把握し、その発生機構と時間・空間構造を解明する
- (2) 台風により著しく風の強まる特殊地形を対象に、風況を推定する実用的解析予測手法を確立する
- (3) 現地観測・動的解析により、鉄塔・架渉線連成系の応答特性を把握し、設備設計に反映する

電気事業連合会はこの提言の実施を(財)電力中央研究所に依頼し、平成4年4月、局地風対策研究推進委員会が設置されました。委員長は微力ながら筆者が務めさせていただきました。委員会は精力的に活動を続け、平成11年3月、研究成果を「特殊地形における送電用鉄塔の風荷重指針（案）」（略称、局地風指針（案））として纏めました。報告書を「指針」形式にしましたのは、「風力は変動する外力である。従って、構造

---

物の設計用風荷重としては、風力の大きさだけでなく、風が構造物に与える動的効果も考慮に入れた等価静的風荷重を用いるのが妥当である」という考え方が世界的に広まっているなかであって、残念ながら我が国の送電用設備に関しては下地も出来ていないという状況を考慮したためです。局地風指針（案）の作成にあたって基本とした方針は次の通りです。

- (1) 技術基準の性能規定化、国際化ならびに技術環境におけるコンピューターリゼーションの進展に配慮する
- (2) 風荷重は確率・統計的応答解析による等価静的荷重として定めるが、動的応答解析により動的効果を評価する手法も用意する
- (3) 設計用風荷重の定式化および定量化については、実況を伝えることを旨として、不明確な数値の割増しや低減あるいは無理な設定を避ける
- (4) 設計風速の評価は、今後の研究に待つところが大きいですが、原則として計算流体解析手法によることとする

この局地風対策研究推進委員会の研究成果を送電用支持物設計標準 JEC-127-1979 の改訂に活かすべく、平成 11 年 4 月、同委員会を引継ぐかたちで耐風設計合理化委員会が設置され、平成 14 年 6 月、改めて、適用範囲を一般地形にまで広げた「送電用鉄塔の風荷重指針（案）・同解説」を作成しました。新指針（案）で改善・強化した主な点は次の通りです。

- (1) 設計風速に風向特性を反映させるために「風向別基本風速」を導入した
- (2) 小地形の影響評価について、簡易増速率算定法と気流解析コードを整備した
- (3) 風荷重の非同時性低減係数について、風洞実験およびフィールド実験結果をもとに算定式を定めた

中でも、(1)の「風向別に設計風速を定める」という概念は、風向の影響を強く受ける送電用設備の設計用風荷重を合理的に定めるうえで不可欠なものですので、現時点では問題点を残しますが、今後の研究の展開に期待をこめて指針の柱の一つとして具

---

体化しました。

本レビューでは、以上のような経緯で誕生した風荷重指針（案）の策定作業のために展開された送電用設備の風荷重・風応答評価技術の研究成果が紹介されています。ただ、慣行として、この種の指針・技術基準では「架渉線のギャロッピング（跳躍振動）」に係わる問題は扱わないことになっています。理由は、「送電鉄塔の耐風設計では、適切な対策によってギャロッピングの発生は防止されているということを前提としているから」のようです。しかし、この分業が「風外乱に対する送電用設備の使用性、安全性確保」という本来の目的に照らすと果たして適当なのかどうか考え直してみる必要がありそうです。幸い本レビューでは、平成10年度～12年度の3年間にわたり電気学会で実施された「架空送電線のギャロッピング現象解析技術の研究」において中心的役割を果たした<sup>(財)</sup>電力中央研究所の成果が併せ紹介されております。

いずれに致しましても、今日、送電用設備の耐風設計においても「性能設計」、「設計性能の明確化」、「性能の検証法」への認識が高まりつつあり、それに伴って、実現象の的確な把握、設計荷重の意味・信頼性への関心も高まっています。他方、既存設備の安全性診断・補強・再利用等も重要なテーマとなりつつあり、ここでも風の影響についての高精度の評価法が強く求められています。風外乱に係わる問題は多様です。これに適切に対応するためには、「耐風設計」から「対風設計」へのパラダイムシフトも大切です。本レビューはこのような要請に応える良いテキストにもなると確信致しております。

神奈川大学工学部教授

大 熊 武 司

## 電中研「耐風設計研究」のあゆみ

西 暦	電 中 研 の 状 況	設備被害を出した 主な台風	国内の状況 (関連基準、規定の改定、これらに関する主な委員会)
1959 1961 1965		伊勢湾台風 第2室戸台風	<ul style="list-style-type: none"> <li>送電用大型鉄塔専門委員会（電気共同研究会）発足</li> <li>JEC-127改訂（大型鉄塔、斜風、多導体、基礎）</li> <li>通産省令第61号制定</li> </ul>
1968 1969 1972	<ul style="list-style-type: none"> <li>500kV 武山試験線での観測</li> <li>送電用鉄塔標準特別委員会（電気学会）参加</li> <li>台風研究委員会（中電協）参加</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>JEAC6001-1969（日本電気協会）制定</li> <li>送電用鉄塔標準特別委員会（電気学会）発足</li> <li>台風研究委員会（中電協）発足、多良間島における台風の実態観測研究、観測開始</li> </ul>
1975	<ul style="list-style-type: none"> <li>海外調査参加</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>送電用鉄塔標準特別委員会（電気学会）海外調査団派遣</li> </ul>
1977 1978	<ul style="list-style-type: none"> <li>多良間島における台風観測研究中電協から研究依頼</li> <li>UHV 送電特別委員会参加</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>多良間島での台風観測終了</li> <li>UHV 送電特別委員会設置</li> </ul>
1979 1980 1984 1991	<ul style="list-style-type: none"> <li>UHV 赤城実規模試験線での耐震、耐風性に関する実証試験開始</li> <li>UHV 赤城実規模試験線完成</li> <li>UHV 赤城実規模試験線での実証試験終了</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>JEC-127（現行）改訂（地域別速度圧、実荷重の導入</li> </ul>
1992	<ul style="list-style-type: none"> <li>局地風対策研究推進委員会（電事連依頼研究）設置、局地風に対する動的効果を考慮した合理的耐風設計手法の開発に着手</li> </ul>	台風 9117 号 台風 9118 号	<ul style="list-style-type: none"> <li>電力設備台風被害対策検討委員会（エネ庁）設置</li> <li>流通設備風害対策特別委員会（電事連）設置</li> </ul>
1993 1994	<ul style="list-style-type: none"> <li>九州試験線観測開始</li> <li>電線異常振動調査研究小委員会参加、ギャロッピングシミュレーションコードの開発開始</li> <li>四国試験線単体試験、連成系観測開始</li> </ul>	台風 9313 号	<ul style="list-style-type: none"> <li>JEAC6001-1993（日電協）改訂</li> <li>電線異常振動調査研究小委員会（中地域発変電・送電分科会）発足</li> </ul>
1997 1998	<ul style="list-style-type: none"> <li>局地風対策研究推進委員会の成果として、「特殊地形における送電用鉄塔の風荷重指針（案）」を作成</li> <li>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参加</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>通産省令第52号改正、同解釈制定</li> <li>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発足</li> </ul>
1999	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐風設計合理化委員会（電事連依頼研究）設置、局地風対策研究推進委員会での成果の拡張、精緻化検討に着手</li> <li>送電線台風対策検討委員会（九州電力）参加</li> </ul>	台風 9918 号	<ul style="list-style-type: none"> <li>送電線台風対策検討委員会（九州電力）設置</li> </ul>
2000 2001	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐風設計合理化委員会の成果として、「送電用鉄塔の風荷重指針（案）」・同解説」を作成</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>JEAC6001-2000（日電協）改訂</li> </ul>
2002		台風 0221 号	

# はじめに

常務理事 鈴木 俊男



電力自由化に伴う価格競争、社会の安全性に対する要求の高まりといった近年の社会情勢の中で、電力設備を自然の災害から守り、合理的な設計、保守・管理することは、従来にも増して重要となってきた。電力中央研究所では、このような時代の要請に応えるべく、これまでに培ってきた研究力をベースに最新の技術を導入し、地震、台風、津波、雪および雷などによる自然災害の軽減を目指した研究を鋭意実施中である。

電力施設の中でも架空送電線は自然の脅威を諸に受け、その電力供給支障の70%は自然現象に起因するものである。特に、台風は、1991年の19号台風を初めとして、送電用鉄塔やその他の電力施設に大きな被害をもたらしてきた。

そのため、電力中央研究所は、電気事業連合会の要請により、最新の知見に基づく耐風設計評価手法を開発することを目的として、1992年から全国大の「局地風対策研究推進委員会」、1999年から「耐風設計合理化委員会」を設置し、送電線への風荷重の観測、水風洞などのモデル実験、理論解析技術の開発など耐風設計法の研究を推進した。本レビューは、これらの研究成果としてまとめられた「送電用鉄塔の風荷重指針（案）・同解説」に関連するものであり、2章で合理的風荷重評価手法を、3章で新しく開発した気流解析技術、動的応答を考慮した風荷重の解析評価技術を、4章に観測、実験結果を紹介するものである。また、5章では近年の可視化技術を駆使したギャロッピングのシミュレーションコードを紹介する。

これらの研究成果は、今後、実際の設計に簡便に利用できるようなツールの拡充、送電用支持物設計標準（JEC-127-<sup>1979</sup>）の改訂検討、将来的な信頼性評価手法の構築、ギャロッピングに対する合理的対策法の構築などに反映する予定である。本レビューが、架空送電線の耐風設計における安全性の向上と合理化に役立つことができれば幸いである。

第 1 章

1

研究の変遷

## 第1章 研究の変遷 目次

電力中央研究所 研究顧問 中村 秀治  
電力中央研究所 名誉研究顧問 坂本 雄吉  
我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 清水 幹夫  
前我孫子研究所 研究コーディネーター 上席研究員 前野 陽治

1 - 1 送電鉄塔・架渉線の耐風設計 .....	9
1 - 2 ギャロッピングの数値解析技術 .....	12
コラム1：UHV 赤城実規模試験線 .....	14



中村 秀治（1971 年入所、2002 年 3 月退職）  
電力鋼構造物の耐震、耐風、維持管理等に関する諸問題を中心に、現場実測、室内試験、解析コードの開発、耐震座屈設計指針案や風荷重指針案の取りまとめなどを行ってきた。現在は、広島大学で土木構造工学講座を担当して指導に当たる一方、経年鋼構造物の残存耐力評価法の確立に向けた研究を行っている。2002 年 4 月から、広島大学大学院教授。  
(1-1 執筆)



坂本 雄吉（1952 年東北電力(株)入社、1965 年より出向、1988 年 3 月退職）  
架空および地中送電線路の電氣的、熱的および機械的問題の研究に、UHV 送電線路建設技術部長として赤城および塩原実験場の試験設備の建設に、また電線路雪害対策プロジェクト・チーム主査として架渉線の着雪およびその防止対策の研究に従事。現在、(株)工学気象研究所最高顧問。  
(1-1 執筆)



清水 幹夫 1991 年入所）  
耐震部で地盤の液状化を研究する予定であったが、直後に発生した台風 9119 号を機に、以降今日まで送電線の振動解析に携わる。この間に開発した解析コード「CAFSS」は、広く一般に普及している。  
(1-2 執筆)



前野 陽治（1968 年入所、1999 年 6 月退職）  
入所以来、送電鉄塔の耐風設計研究等、電力施設の構造力学的諸問題に従事。1980 年頃に UHV 送電鉄塔の動的安定性の研究に従事した後、1992 から数年間局地風研究の推進役を担当。現在、(株)シー・アール・エス取締役。  
(コラム1 執筆)

# 1 - 1 送電鉄塔・架渉線の耐風設計

## 1-1-1 国内・国外の動向

送電線路の耐風設計は送電線路が建設されるようになって以来の課題であるが、なお課題を抱えつつ現在に至っている。それは単に強風に対してばかりでなく、風によって引き起こされる種々の現象、例えば、

- ① カルマン渦によって生ずる架渉線の振動（微風振動とも呼ばれる）
- ② 架渉線の撚線構成や着氷雪によって水平方向の風速成分によって揚力が生じてしまうことによる自励振動（ギャロッピングと呼ばれる）
- ③ 多導体のような場合に風下側の素導体が風上側のものの後流域に入って、位置によって抗力および揚力が異なることに起因する振動（サブ・スパン振動またはウェーク振動と呼ばれる）
- ④ 山の風下側での強風や強風のもとでの鉄塔と架渉線の連成系の共振

等々が生じ得るからである。

このため送電技術者は、設備が大型化するとともに、条件の厳しい箇所に建設を余儀なくされるため、実に多岐に亘る問題を経験することとなった。一方で、これらに対する対応策の検討が技術を進歩させたことも確かである。

一般には送電鉄塔の耐風設計は、各国でそれぞれの規程または基準として制定されており、一部の国では構造物一般についての規程・基準に準拠しつつ、送電線路の特性を詳細に加味したものとなっている。すなわち、

- i ) その長い巨長に亘って強風に曝される地域を通過し、
  - ii ) 比較的張力が大きく、
  - iii ) その張力が風圧力や着氷雪の重量のような外力によって敏感に大きく変化し、
  - iv ) 1基あたりでは比較的重量の小さい多数の鉄塔が設計、建設されなければならない、
  - v ) 4脚を有する四角鉄塔の場合は、不同沈下により下部の部材に大きな2次応力が発生すること
- 等々の理由で、送電鉄塔自体のための別の規程・基準を定めている例が多い。

例えば、ASCE（米国）ではビルディングおよびその他の構造物についての荷重基準 [ ASCE 7-98 ]<sup>(1)</sup>とは別に、送電線路についての荷重指針 [ ASCE No.74 ]<sup>(2)</sup>を制定しており、また鉄塔設計の指針 [ ASCE No. 52 ] も制定している。カナダでも CSA 標準 CAN/CSA-C22.3, No. 1-01 “ 架空システム ”<sup>(3)</sup>を制定している。これらには各国の風速マップが示されており、多くは10分間またはその他の平均時間を有する平均風速に基づいたものである。ただし、ASCEでは最近の上記の2つの標準の改訂案では突風風速に改めている。またドイツではその Hornisgrinde における長期の観測結果に基づいて、独特の径間長の関数としての架渉線風圧の低減率を導き、その設計標準 DIN-VDE<sup>(4)</sup>で使用している。

また、世界の電気事業の標準化機関である IEC では、英国、フランスおよびイタリアでの長年の共同研究、および、その後の CIGRE (SC22) の研究に基づいて、技術報告書 “ 架空線路の荷重と強度 ” ( IEC60826-1991 )<sup>(5)</sup>を刊行している。本報告書は、荷重および強度を共に確率論的に扱い、信頼性理論に基づく設計法の立場をとっており、風荷重決定の基盤になるデータは10分間平均風速であるが、平均時間3～5秒の突風風速に変換するのに、主に Engineering Science Data Unit (英国) でまとめられた方法を使用していて、1より小さい突風応答係数を採用している。さらに、EPRIでも同様な趣旨で送電線路の信頼性設計に関する報告書を刊行しているが、ここでは風速を極値統計で求めるのではなく風荷重を極値統計で求めることを提唱し、荷重・強度係数設計法を IEC より強く提唱している。<sup>(6)</sup>

なお、これらの標準・基準類では大気境界層の中での強風現象（例えば大竜巻、ダウン・バースト、サイクロン、ハリケーン、台風、カタバ風等々）およびそれらへの対処法が十分に反映されていないことから、最近 CIGRE の SC22 はその下部に WG16 “ Meteorology for over head lines ” を編成し、特に High Intensity Winds に関する報告書の作成に着手している。これらは主に不安定大気条件に関連する現象および特異地形に関連する渦現象に伴うものである。

翻って我が国における技術の変遷を振り返って見ると、

古くは逓信省制定の電気工作物規定があり、これが多少の改訂を経て今の「電気設備の技術基準」<sup>(7)</sup>に引き継がれている。本技術基準は純粹に決定論的手法に基づくものであって、ほとんど全国一律に同じ風荷重および被氷荷重を使用し、破壊強度に対して一律の安全率をとった強度と比較して部材断面を決定するように定めている。しかし、わが国は国土が北から南に長く伸び、気象条件が著しく異なることから、送電線路に発生する条件が地域によって大きく異なる。そこで、これに合理的に対処するため、電気共同研究会に大型鉄塔研究委員会（電気共同研究会、大型鉄塔研究委員会：送電用大型鉄塔、1964）が設立され、その成果を踏まえて1972年に送電用鉄塔設計標準特別委員会が設立した。この委員会における7年間の議論の結果として、荷重を統計に基づいて定める準確率的方法に基づく送電用支持物設計標準（以下、JEC-127）<sup>(8)</sup>が制定された。これが現在も基本的には使用されているが、制定後20年以上を経過し、当時としては新しいもので正しいと考えられていた事項にも、最近の知見に基づいて見直しの必要が論じられている。

### 1-1-2 当所の取り組み

以下に、当所の送電線路の耐風設計に対する取り組みを年代順に述べる。

#### < 500kV 武山試験線での観測 ><sup>(9)(10)</sup>

500kV 武山試験線の2号鉄塔において、強風時の挙動の観測が1968年～1969年にかけて実施され、1969年8月の台風9号通過時の震動観測結果がスペクトル解析され、報告されている。

#### < 多良間島における台風観測 ><sup>(11)</sup>

これは当所が、故七里義男大阪大学名誉教授の提唱によって関西電力が京都大学防災研究所と共同で開始したものを引き継いだものである。この観測は台風の接近の頻度が比較的大きい沖縄県の、しかも地形が平坦で、風に対する地形の影響が小さい多良間島を選定して、多数の風車型風速計を配置して7年間に亘り行われたもので、その成果は当所報告書として発表され、JEC-127（1979）にも反映されている。

#### < 海外プラクティスの調査およびデータの机上解析 ><sup>(12)</sup>

上述の電気学会の送電用鉄塔設計標準の審議の一環として海外調査が実施され、当所もそれに参加するとともに過去の気象データの机上解析を行って、その結果を報告し、その成果がJEC-127（1979）に反映された。

#### < UHV 赤城試験線の動的試験 ><sup>(13)～(19)</sup>

当所赤城試験センターにUHV試験線が建設されることに伴って、その2号鉄塔を中心として動的試験が実施された。同試験線が建設される過程において、

- i) 基礎が完成した段階
  - ii) 2号鉄塔の建設が終了し、架渉線が架設されていない段階
  - iii) およびすべての架渉線が架設された後の段階
- のそれぞれにおいて、種々の振動試験が行われ、その結果が報告されると共に、その結果が動的応答の数値シミュレーション・モデルの構築に反映され、実線路の風応答および地震応答の検討に使用された。また同試験線の強風時の応答観測結果も報告されている。

#### < 耐局地風設計研究 ><sup>(20)～(23)</sup>

1991年9月の台風19号により、九州、四国地方を中心に、基幹送電線を含む送電設備に重大な被害が生じ、社会的に大きな影響を与えた。電気事業連合会の委員会が被害分析した結果、地形影響により風速などが著しく強められる局地風の実態把握と予測手法の開発、ならびに局地風に対する送電設備の合理的設計法の確立が必要なが判明した。

本研究は、上記背景の下に電気事業連合会の依頼を受けて、将来、地形条件や気象条件の苛酷な場所を通過することが多くなると予想される基幹送電線の、信頼度確保と設計合理化を目指して、1992年度下期から6力年半の計画で実施された。電力会社側はこれと並行して全社の共同研究を設定し、九州・四国試験線の建設と観測を行い、当所はそのデータ解析にあたった。また、当所は所内に学識経験者と全電力が参加する局地風対策研究推進委員会（委員長：大熊武司神奈川大学教授）及び3つの分科会（風観測分科会、風解析予測分科会、風応答特性分科会）を設置して、全電力大での研究の総合的推進を図った。

1999年3月をもって本研究は予定通り終了して、研

究成果を電気事業連合会に報告すると同時に、「特殊地形における送電用鉄塔の風荷重指針（案）」を明らかにしたが、技術的に特筆すべき点は次の通りである。

1. 等価静的風荷重に基づく鉄塔設計法の体系化
2. 最新のコンピュータシミュレーション技術の活用
3. 地形影響を受けた風に関する観測結果の活用

#### < 苓北火力線の耐風対策検討 >

1999年9月24日、台風18号の通過により九州地方中部で鉄塔損壊事故発生した。被害規模は、人吉新水俣新線（110kV）、日奈久分岐線（66kV）、人吉八代線（110kV）、苓北火力線（500kV設計）における倒壊、断線、碍子破損などであった。

直ちに九州電力(株)内に送電線耐風対策検討委員会が設けられ、10月21日に第1回委員会が開催された。各分野の専門家が、事故時の気象状況、損壊鉄塔箇所の風速、被害設備の設計、製作、施工、保守管理状況を調査し、設備被害に至った原因を詳細に解明し、復旧対策を明らかにすることとなった。第3回委員会をもって結審したが、当所は本委員会に以下のように寄与し、結論を導くのに貢献した。

1. 気流解析で現地の風速推定に寄与
2. 風応答解析で苓北火力線のトリガー鉄塔と最弱部材の特定に寄与
3. 耐荷力解析で限界風速の推定に寄与
4. 溶接継手部の低サイクル疲労試験で、苓北火力線 No.162 の倒壊が疲労破壊ではないことを確認

#### < 耐風設計合理化研究 > <sup>(24)~(28)</sup>

耐局地風設計研究の成果に基づいて、一般地形を対象に従来の耐風設計を合理化できる可能性が明らかになってきたので、1999年4月から3年間計画で、当所は新たに耐風設計合理化委員会（委員長：大熊武司神奈川大学教授）を設置して既往の設計基準類の見直しを視野に入れた検討を開始し、設計風速算定と設計風荷重算定の合理化を2本柱として研究開発を進めた。

本研究の最終成果は、「送電用鉄塔の風荷重指針（案）・同解説」にまとめられているが、概要は次の通りであった。

1. 風向別基本風速の策定  
風向別基本風速の策定にあたり、気象官署における

観測値を成因別（台風と非台風）に整理するとともに、台風データについては、台風モデルを用いたモンテカルロシミュレーションによる値を、気象官署観測値でキャリブレーションする方法を新たに提案した。

また、基本風速の再現期間は、風向特性と構造物の荷重効果を考慮し、設計軸力に対する年超過確率0.02を目標として150年と定めた。この方法により、気象官署位置の風向別基本風速を求めた後、大領域の気流解析結果（日本列島を北海道、東北、関東・中部・近畿、中国・四国・九州の4領域で解析）を官署間の内挿に用いて8風向の基本風速マップを作成した。

#### 2. 設計風速算定法の合理化

一般地形を含む設計風速は、8風向の風向別基本風速に対象地点の地表面粗度、小地形の影響および気象学的増速効果を考慮して定めることとした。また、小地形の影響を考慮するための簡易増速率算定法および気流解析コードなど評価に必要なツールを整備した。さらに、2山地形に関する風洞実験を行い、気流解析との比較により解析コードの妥当性を示すとともに、多数の実地形シミュレーションにより気流解析コードを利用する際の留意点を明らかにした。

#### 3. 設計用風荷重算定法の合理化

等価静的風荷重の基本的考え方は、「特殊地形における送電用鉄塔の風荷重指針（案）」に準じているが、風荷重の非同時性低減係数を新たに提示し、荷重の精緻化を図った。また、架渉線風応答に関する風洞実験および赤城試験センターにおけるフィールド実験を行い、風荷重算定式、非同時性低減係数の妥当性を確認するとともに、信頼性の向上を図った。

#### 4. 試設計

本風荷重評価法の合理化効果を確認するため、日本全国の任意の地点をランダムに抽出し、従来法（JEC-127および電技）と新手法による試設計を行った。その結果、過去に鉄塔被害が発生したような、海岸周辺における特殊地形箇所では従来法より設計軸力が大きく評価されたものの、その他の地域については、約7割程度が従来法よりも小さくなることがわかった。本手法では、風向特性、地形効果、地表面粗度、構造物の動的特性を考慮できることにより、実況に応じた設計を可能としたことが主な理由と考えられる。

## 1-2 ギャロッピングの数値解析技術

### 1-2-1 国内外の動向

着氷雪した架空送電線の風による自励振動現象は、慣例的に送電線のギャロッピングと呼ばれている。送電線のギャロッピングは、電線の混触による短絡事故、スパーサ、碍子、さらには鉄塔部材などの周辺設備の疲労破壊の原因となり得る。したがって従来から、発生条件の解明<sup>(29)(30)</sup>や、観測による挙動評価<sup>(31)</sup>、および経験的な振幅予測法に基づく設計式の提案<sup>(32)</sup>など、ギャロッピングを対象とした種々の検討がなされてきた。

ところで、こうした自然現象を把握し、対策を提案する上で、現象の再現や予測、および対策の効果検証を数値的に可能とする解析的検討、特にシミュレーションは、極めて強力な手段といえることができる。シミュレーションによれば、現象の再現や、関係する要因をパラメータとした感度解析ができる他、実験と比較して安価で容易に対策の効果を確認することができる。このため、ギャロッピングの振動特性評価、応答予測およびシミュレーションなどの解析的検討も、少なからずなされてきた。

国内では、古くは五藤ら<sup>(33)</sup>、あるいは大月ら<sup>(34)</sup>の研究をシミュレーションの試みとして挙げることができ、特に前者を基本とした応用例<sup>(35)</sup>もみられる。これらは、はじめてシミュレーションによりギャロッピング現象を再現した例として評価できる。しかし、いずれも対象構造物である送電線の基本的な振動特性を十分に考慮していないことから、現実的なシミュレーションをなし得ず、現象の本質的な解明や実用化には至らなかった。送電線の基本的な性質を、ケーブル構造物の厳密な運動方程式に基づいて考慮した解析的検討は、国内では山口ら、大熊ら、そして筆者が行っている。

山口らによるケーブル構造物を対象とした精緻な解析例は列挙に暇がないが、送電線のギャロッピングに関するものとしては、多導体送電線を対象とした解析<sup>(36)</sup>を挙げることができる。ここでは、等価単導体に簡略化した4あるいは6導体の有限要素モデルを用い、平均風速の作用下にある静的な横振れ状態について複素固有値解析を行い、ギャロッピングの発生モードと振動数を求めて

いる。また、大熊ら<sup>(37)</sup>は、等価単導体に置き換えた4導体の有限要素モデルに対し、一様流および乱流中で、大変形を考慮したギャロッピングシミュレーションを行い、応答特性を評価している。

国外では、Richardson<sup>(38)</sup>が、空気抵抗係数をFourier級数で記述し、1周期の振動におけるエネルギーの収支から、1自由度ギャロッピングの振幅予測式を導出した。また、正方形断面および着氷雪電線断面に対し、Raynold's数の影響を考慮したギャロッピングの振幅予測を行った。Desai et al.<sup>(39)</sup>、Yu et al.<sup>(40)(41)</sup>は、1質点系を対象とした鉛直およびねじれの2自由度、あるいは電線を対象とした鉛直、水平およびねじれの3自由度の連成振動を考慮したギャロッピングの運動方程式を導き、ギャロッピングの発生条件、リミットサイクルとその安定性の評価を解析的に行っている。また、Lilienら<sup>(42)</sup>は、有限要素法に基づくシミュレーション手法を、試験線や風洞実験で得られたデータを用いて検証している。

### 1-2-2 当所における取り組み

当所における電線挙動のシミュレーション技術の開発は、台風9119号による送配電設備の甚大な被害に端を発する。台風9119号により鉄塔の倒壊、折損事故が生じたことから、その後の対策に資することを目的として、電事連大の要請の下、電力各社が所有できる鉄塔および架渉線の解析プログラムを、当所が開発することとなった。開発に際しては、高精度で高速の計算を可能とすることはもちろん、全国の多種多様な架線形態の送電線路が解析対象となること、強風時における電線振動を大変形問題として扱うこと、および電力各社の計算環境で動作することが条件となった。したがって、解法には、複雑な形状を有する連続体構造物のシステムティックな解析に適した有限要素法を採用し、大変形解析のために幾何学的非線形性を考慮することとした。また、プログラム自体は、計算機のOSに無関係に動作する基本設計とした。

こうして、強風時における鉄塔-架渉線連成系の解析プログラムの開発が始まったが、その一方で、従来から

ギャロッピングの実用的な解析手法および決定的な対策法の確立が課題となっていた背景の下、1994年に中地域発電・送電分科会に電線異常振動調査研究小委員会が発足（活動期間は約1年半）し、当所もこれに参加することとなった。この小委員会において、当所にはギャロッピングのシミュレーション手法の開発が要求されたことから、上記の鉄塔-架渉線連成系の解析プログラムに、着氷雪電線の空力特性を考慮して、ギャロッピングを再現できる機能を追加することとなった。

以上の経緯で、強風振動やギャロッピングなど、送電線路の振動解析手法の開発が進められたが、その過程で、高分子碍子の開発研究や依頼研究への適用により、段階的にプログラムの機能が検証された。まず、1995年には、高分子碍子型の絶縁アームおよび相間スペーサの開発研究<sup>(43)</sup>の一環として、ポリマー相間スペーサを含む電線のスリートジャンプの解析を行い、試験線で得られた現場実験結果との比較により、機械的外力に対する応答解析機能を検証した<sup>(44)</sup>。また、1997年には、鉄塔を含めてスリートジャンプの解析を行い、同じく試験線における実験結果から、連成系の解析機能を検証する<sup>(45)(46)</sup>とともに、中国電力殿の依頼により、実際の配電線を対象としたパフティング解析を行い、現場観測結果との比較から、風応答解析機能を検証した<sup>(47)(48)</sup>。なお、この段階で解析プログラムは暫定的に「FU-SIN」と命名された。1998年には、ギャロッピングの解析機能が完成し、一部北海道電力殿の要請の下、一定風および変動風の下で着雪電線に自励振動が発生すること、および相間スペーサが機能することを確認した<sup>(49)~(51)</sup>。ここで、解析プログラムには「CAFSS」というコードネームがつけられ、広く一般公開されるに至った。

こうして、ギャロッピングを含む電線の風応答解析が

概ね可能となったことから、当初予定されていた強風時における鉄塔-架渉線連成系の解析以外に、各電力からの依頼研究として、ギャロッピング事故や相間スペーサの効果検証、および低風圧電線の開発研究<sup>(52)</sup>など、CAFSSを実務に適用する機会が急増した。

また、当時、それまでに蓄積されたギャロッピングに関する知見や、新たに開発された技術を総合的に評価することを目的として、電気学会の電力技術委員会の下に、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が設置され、CAFSSの評価と、これを用いたパラメトリックスタディによる、ギャロッピングの要因分析がなされた<sup>(53)</sup>。評価の過程で、最上試験線を対象としたギャロッピングのシミュレーションを行い、観測結果との比較から、CAFSSが現実的にギャロッピング現象を再現し得ることを確認した<sup>(54)(55)</sup>。

以上のように、送電関係の開発研究、実務レベルの依頼研究、および委員会活動を通じ、現場実験、観測結果など実現象との比較、検証を踏まえて、当所におけるギャロッピングのシミュレーション技術は進化してきた。これまでにCAFSSは、電力各社の他、10社を超える電線メーカー等民間企業に配付され、150人以上のユーザーに使用されている。このことから、CAFSSが広く認知され、事実上、ギャロッピングシミュレーションの標準プログラムに成り得たと認識できる。

当所では現在、CAFSSの精緻化を進めるとともに、利用技術向上のための周辺プログラムの開発、総合マニュアルの編纂および講習会を行っている。また、合理的なギャロッピング対策の確立を目的として、所内研究および依頼研究において数値解析的検討を実施している。

## コラム1：UHV 赤城実規模試験線

### 試験線の概要

群馬県赤城山の南面裾野斜面にある電中研赤城試験センターには、3基2径間（巨長600m）の大型送電線路が構内を東西方向に横断するように建っている。

鉄塔高さは100mに近く、重量は1基当たり300tに達する実規模のUHV（100万ボルト級）送電用試験線である（写真1）。

わが国におけるUHV送電研究のモニュメントとも言うべきこの試験線と、この試験線の建設時に行われた動的試験について簡単に紹介しよう。

わが国初の50万ボルト送電が始まった昭和40年代の後半には、電中研は既に次期UHV送電の調査・研究を行っていた。昭和53年に中央電力協議会の依頼により「UHV送電特別委員会」が設置され、100万ボルト級送電の実現に向けた本格的研究が開始された。

赤城実規模試験線は、UHV送電線路の①地震・強風に対する動的安定性、②環境対策、③建設・保守技術、の実証を行うことを目的として、昭和54年に着工し、昭和55年12月に架線工事が終了した。

設計は改定されたばかりの電気調査規格会標準規格「送電用支持物設計標準（JEC-127-1979）」に従っている。基礎の工事開始から架線終了まで1年以上かかっているが、その理由は工事途中で以下に述べる動的試験を実施し、基礎工事 試験 鉄塔組立工事 試験 架線工事 試験という手順で建設したからである。

### 動的試験

送電線路は静的に置きかえられた風・冰雪荷重に対して設計され、通常の場合、地震に対しては十分安全であるとされている。

しかしUHV鉄塔は大容量送電を行う基幹線としての重要性和、従来の鉄塔に比べて塔高や腕金の長大化、電線・碍子連の重量化などの構造的特徴を有しているため、その実用化に際しては特に地震荷重に対する安全性を実証する必要があると判断された。当時、大型の鉄塔の振動特性に関するデータは少なく、また数値モデル化手法も十分な検証を経たものは無かった。そこで図1に示すようなフローに従って、実規模試験線の動的安定性の実証を行うこととなった。

基礎や鉄塔の振動特性（固有振動数と振動形、減衰定数、等）を求めるための方法としては、常時微動観測やワイヤーを用いた自由振動試験など

も併用したが、なんと言っても起振機による起振試験が中心であった。

起振機（最大起振力10Hzで10t）は基礎の場合はコンクリート床版上に設置したが、鉄塔単体と連成系の起振試験では鉄塔を大きく揺すため、中央の2号鉄塔最上段パネル（地上高さ90m）に設置した。線路方向と線路直角方向、および捻りの3種類の振動を、起振機の平面内の位置を変えることによって生じさせた。

鉄塔の減衰定数は小さく（観測の結果、曲げ1次振動で0.3%程度）、共振領域での共振曲線は急激に立ちあがるため共振ピークを捉えることが難しく、0.01Hz刻みで振動数を変化させた。少ない計測回数では応答ピークを正しく捉えられないおそれもあったため、低次のピークでは計測を20回も繰り返すなど、綿密な計測が行われた。試験期間中起振機にトラブルが生じたり、赤城地方特有の雷に襲われて計測用センサーが壊れたりしたこともあって、起振試験期間は合計7ヶ月の長期に及んだ。実験従事者の間では、鉄塔が壊れるか起振機が壊れるか、人間が壊れるかという冗談が飛び出すほどであった。

とにもかくにも、一連の試験の結果、基礎と鉄塔単体、ならびに3基2径間連成系の振動特性と、構成要素間の相互作用が明らかにされると共に、それぞれの力学モデル化とそれに基づく数値シミュレーションによって、種々の知見が得られた。

地震応答観測も行い、委員会での討議も経て、総合的な結論として、「100万ボルト級の大型鉄塔を従来手法で設計しても、十分な耐震性能を有する」が得られ、UHV送電の実現に向けた大きな第一歩が踏み出された。

なお、中央の2号鉄塔での風応答観測や、2号と3号の径間において架渉線を地上からロープで引っ張る人工ギャロッピング模擬試験を行って、それぞれ有用な知見を得た。

このUHV試験線も間もなく架渉線が撤去され、その四半世紀にわたる歴史に幕を閉じようとしている。

### 参考文献

- 1) 電気学会雑誌「特集UHV交流送電、送電線」pp. 1003～1011、昭和57年11月号
- 2) 電力中央研究所報告「UHV赤城実規模試験線の動的試験」；7分冊 380053、381039、382051、382052、385051、183038、T86008



写真1 UHV 赤城実規模試験線

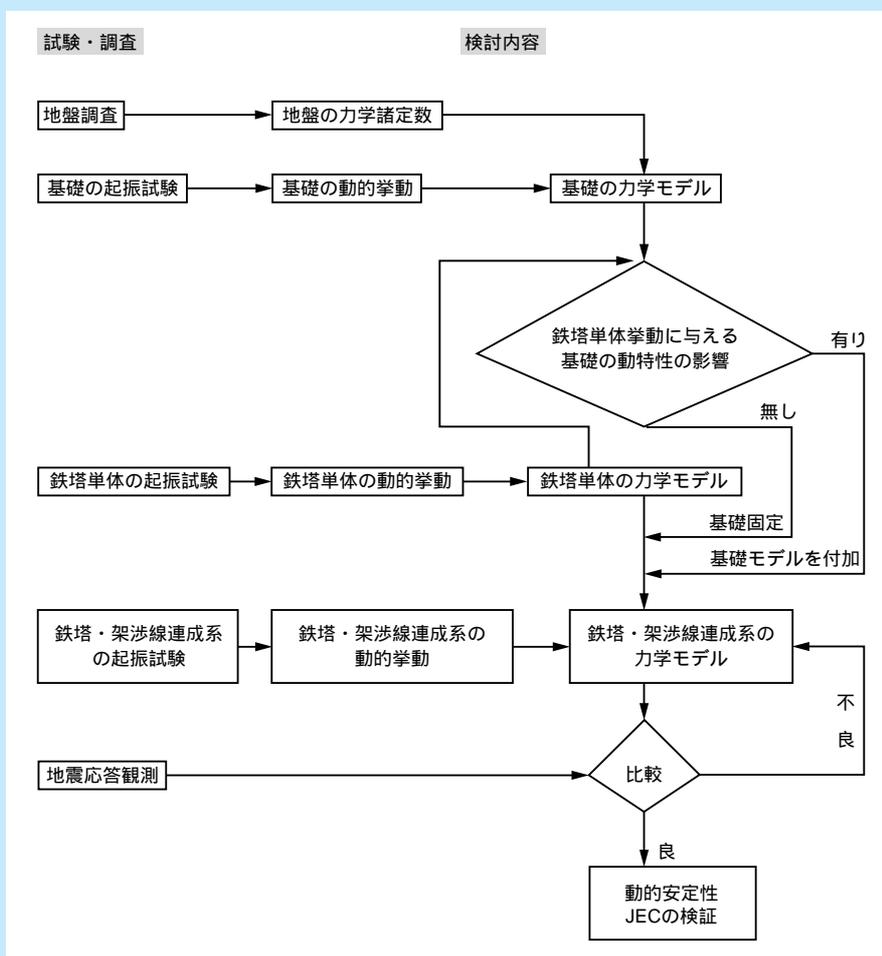


図1 動的安定性検討のフロー図



第 2 章

2

合理的な風荷重評価  
技術の確立にむけて

## 第2章 合理的な風荷重評価技術の確立に向けて 目次

我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 山崎 智之  
我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 石川 智巳

2 - 1	現在の設計手法の概要と合理化研究の方向性 .....	19
2 - 2	風向別基本風速の評価 .....	19
2 - 3	設計風速の評価 .....	27
2 - 4	等価静的風荷重の評価 .....	29



山崎 智之（1993年東京電力㈱入社、2000年より出向）

これまで、基幹送電線の鉄塔設計および技術開発業務に従事。当所に出向以来、送電用鉄塔の耐風設計合理化研究のうち、主に基本風速に関する研究に従事。現在は、合理化手法の設計への反映を考慮した実用化研究に取り組んでいる。

（2-1、2-2、2-3執筆）



石川 智巳（1994年入所）

入所以来、送配電設備の耐風、耐震問題に従事。特に架空送電線路の耐局地風設計、耐風設計合理化研究において、鉄塔あるいはケーブルの荷重評価、応答解析を中心に指針（案）の取りまとめを実施してきた。現在、開発した荷重評価法の実用化や信頼性評価手法の開発に取り組んでいる。

（2-4執筆）

## 2 - 1 現在の設計手法の概要と 合理化研究の方向性

現状の送電用鉄塔の耐風設計では、電気設備に関する技術基準を定める省令<sup>(1)</sup>に基づき、風速40m/s(10分間平均風速)の風圧荷重に耐える強度を有するようにしている。一方、補強設計の意味合いで主に大型送電線の設計に用いられている送電用支持物設計標準(以下、JEC-127)<sup>(2)</sup>においては、最大瞬間風速の50年再現期間値に基づいて設定した地域別の風圧値が、基準速度圧地域区分として日本全国のマップの形で示されている。送電用鉄塔は、架渉線を支持する構造であるため、これに作用する風荷重は、風向の影響を大きく受けることから、いずれも、送電線路の走行に対して風向を考慮した荷重算定が行われているものの、風圧値はすべての風向で一律の値としているのが現状である。

鉄塔に作用する年最大風速は、対象地点の地理的位置、周辺地形および粗度の状況、台風の通過経路、季節的な風向頻度分布等により、風向によって大きく異なるのは明らかである。風向を考慮しない(以下、全風向という)年最大風速から求めた設計風速が全ての風向から作用するという条件は、構造物の最も不利な方向から作用してもこれに耐え得るように設計するというものであり、構造物にとって安全側であるが、必ずしも合理的とは言えない。

このようなことからASCE7-98<sup>(3)</sup>では風向係数という概念を導入し、全風向風速に対する低減効果を構造形式別に反映している。またAustralian Standard<sup>(4)</sup>では、観測データの豊富な主要都市周辺を対象に風向別基本風速が与えられ、それ以外の地域では全風向風速に対する

低減係数を適用できる領域を定め、風向別風速適用の効果を反映できるようにしている。

一方、日本においても建築、土木分野では風向別設計に関する研究が積極的に行われている状況である。

このような状況を踏まえ、耐風設計合理化研究では、風向別基本風速の評価方法を検討し、気象官署(以下、単に官署という)の観測データ、台風シミュレーション、気流解析などを用いて送電用鉄塔の風荷重評価に用いる風向別基本風速マップの作成を試みた。

また、風は地形に敏感な気象現象であり、風向、風速ともに、地形の影響を大きく受ける。従来、地形の影響を明確な根拠に基づいて設計風速に考慮することはほとんど行われていなかったが、近年、強い台風の襲来時に、崖状地形により増速された風により送電線が被害を受ける事例が見られ、風の地形影響を考慮することの重要性が認識されるに至った。したがって、風洞実験や気流シミュレーションを活用することにより風の地形影響を定量的に評価し、設計風速への反映手法について検討を実施した。

さらに、風荷重による送電用鉄塔の応答評価手法は、従来は設計風速に基づく静的な風圧荷重が作用するものとしていたが、より精緻な応答評価を実現するために、実規模送電線路における風応答観測、動的応答解析、架渉線風応答実験などを通じて、風の乱れによって生じる規模効果、共振効果を考慮した等価静的風荷重算定法の確立を図った。

## 2 - 2 風向別基本風速の評価<sup>(5)(6)</sup>

### 2-2-1 風向別風速による設計合理化の可能性

風向別風速による設計合理化の可能性について評価するため、風向別風速の極値統計解析と送電用鉄塔の荷重効果の観点から検討を行った。

全風向の年最大風速 $v$ に対する非超過確率 $F(v)$ は、

各風向間に相関が無く年最大風速の発生が独立と仮定するならば、各風向における年最大風速 $v$ に対する非超過確率 $F_i(v)$ を用いて

$$F(v) = \prod_{i=1}^n F_i(v) \quad (2-2-1)$$

と表される。ただし $n$ は風向分割数である。ここで、各

風向の年最大風速の非超過確率が同一の場合、

$$F(v) = \{F_i(v)\}^n \quad (2-2-2)$$

と表される。

一方、年最大風速  $v$  に対応する再現期間  $R$  は  $F=1 - 1/R$  として表されるので、

$$1 - 1/R = (1 - 1/R_i)^n \approx 1 - n/R_i \quad (2-2-3)$$

$$R_i \approx nR \quad (2-2-4)$$

となる。したがって、風向を分割して評価する場合、年最大風速  $v$  に対して全風向と同一の非超過確率を満足するためには、風向別の再現期間を  $n$  倍とする必要がある。しかし、送電用鉄塔のような風向に敏感な構造物の場合、風向によって荷重効果が大きく影響を受けると考えられることから、風向別に風速と荷重効果を考慮することにより、送電用鉄塔の合理的な荷重評価と、精緻な信頼性評価が期待できる。

そこで、送電用鉄塔の風向による荷重効果特性を把握するため、まず全ての風向の設計風速を同一値と仮定したときの、各風向における最下節主柱材に作用する圧縮軸力を検討した。検討にあたっての計算条件は以下の通りである。なお、粗度区分、乱れのスケールは日本建築学会・建築物荷重指針<sup>(7)</sup>（以下、建築物荷重指針という）に示されている値に準じ、検討に用いた鉄塔モデルを図2-2-1に示すとおりである。

- ・対象鉄塔：500kV、2回線、耐張型、鋼管鉄塔
- ・鉄塔高さ：77.5m
- ・架渉線種類：架空地線 OPGW290mm<sup>2</sup>、単導体  
電力線 ACSR810mm<sup>2</sup>、4導体
- ・架渉線張力：架空地線 33.3 kN/条  
電力線 49.0 kN/条
- ・10m高さ風速（粗度区分Ⅱ）：40m/s（全風向一定）
- ・ディケイファクタ：水平横方向：10、鉛直横方向：10

最下節主柱材の軸力算定手法は、2-4で述べる等価静的荷重算定法<sup>(8)</sup>によるものとした。架線状態は、図2-2-2に示すように、径間長、架渉線水平角度の組み合わせによる6ケースとした。なお、風向は北を0度とし時計回りに定義した。

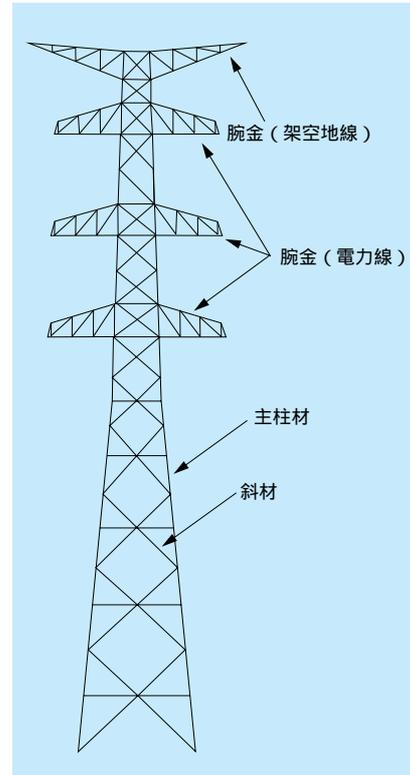


図2-2-1 送電用鉄塔

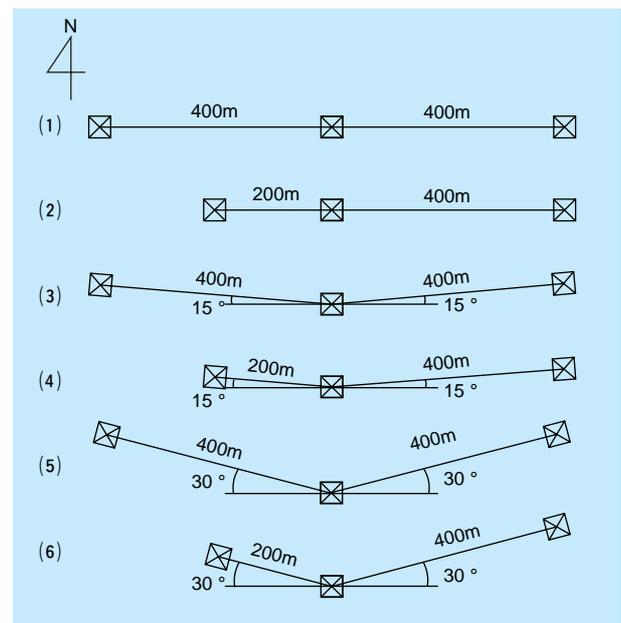


図2-2-2 架渉線状態ケース

図2-2-3は最下節圧縮軸力の最大値に対する軸力比率を示したものである。軸力比の最小値は、ケースにより異なるが、0.35～0.55程度の値となり、最下節主柱材軸力は風向角に対する感度が非常に大きくなっている。また、架線状態、特に水平角度によっても大きく影響を受

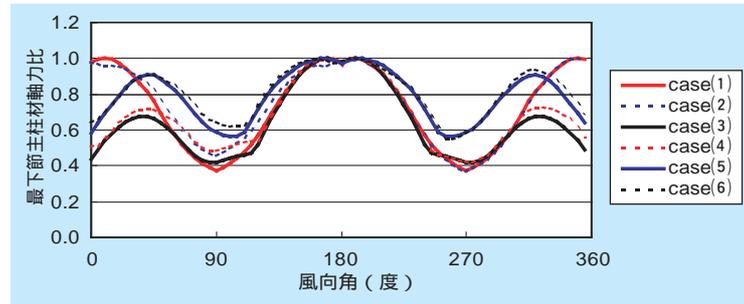


図2-2-3 風向角による最下節主柱材軸力比

ける。

以上の結果から、風向別に設計風速を評価することにより、合理的な荷重評価が可能となることが示唆された。

## 2-2-2 風向別基本風速の再現期間

現状の送電用鉄塔の耐風設計では、風速40m/sの風圧荷重に耐える強度を有するようにしているが、この風速40m/sの再現期間は不明である。一方、JEC-127においては、全風向年最大瞬間風速の50年再現期間値に基づいて設定した地域別の風圧値が示されている。本研究では、再現期間50年から想定される安全性のレベルが、送電用鉄塔の設計軸力に対する年超過確率0.02に相当するものとし、この安全性と同等の安全性を確保するための風向別再現期間について、風向別風速分布と送電用鉄塔の荷重効果を考慮して検討した。なお、この再現期間50年の意味する安全性のレベルについては、設備重要度、建設コスト等の観点から別途十分な議論が必要である。

風向別基本風速の検討にあたり風向の分割数を設定する必要があるが、ここでは8風向で検討を行うこととした。これは、現在想定している実務設計へ適用する場合の設計の煩雑さ、ならびに観測データその他から基本風速を設定する際の精度の問題を考慮したものである。

前項に示す鉄塔モデルを対象に、架渉線、水平角度、風配とその組み合わせをパラメータに、風向別再現期間の検討を実施した。実際に作用する外力を、長期間のデータで模擬して最下節主柱材の年超過確率を求め、目標としている年超過確率0.02を満足する風向別の再現期間を求めた。その結果、8風向別の再現期間として150年が妥当であることを見出した。なお、このとき部材の軸力の再現期間は、モデル化した年最大風速のGumbel分

布の傾きが3.0の場合50年～350年程度、傾きが4.0の場合50年～250年程度となっている。また、全風向50年再現期間値風速を超える風向については、この風速を上限値とすることにより、再現期間のばらつきが小さくなった。このため、全風向50年再現期間値の上限値を設けることとした。

## 2-2-3 風向別基本風速の算定

風向別基本風速は、建設地点における台風の襲来頻度や季節風の発生頻度、緯度・経度や、山脈・半島あるいは海からの距離などの大規模な地形影響のみを反映するものとし、対象地点周辺10km程度を代表する、地表面粗度区分Ⅱ、地上10mにおける10分間平均風速（8風向）と定義した。

また、送電線は鉄塔と架渉線からなる構造物であり、架渉線張力荷重は温度の影響を強く受けることから、従来より季節別の条件を考慮した設計がなされている。したがって、夏から秋にかけての季節に発生する強風（主として台風を想定）を考慮した高温季、冬から春にかけての季節に発生する強風（主として冬季季節風を想定）を考慮した低温季として分類することとした。

風向別基本風速の算定にあたり、高々50年程度の官署における台風の観測データのみでは、風向別とすることによるデータ不足とそれによるサンプリングエラーのため、信頼性の高い統計値を算出することは難しい。このため例えばASCE7-98<sup>(3)</sup>では、地域によっては基本風速を定める時のハリケーンの観測データは使用しないこととし、シミュレーションによって定めるよう提唱している。一方で、観測データは、実測値であるため一般社会に対する説得力を有していることも確かである。また、

極値統計解析上の問題点として、実際の官署における観測記録が、理論上漸近するはずの極値の漸近線に従わないことがしばしばみられ、再現期間の外挿に疑問がもたれている。これは、複数の成因からなる年最大風速の確率分布は複数の極値分布の合成になるためであり、従来の一つの極値分布を用いた場合に再現期間の大きな範囲では、過小評価になる可能性が指摘されている<sup>(9)(10)</sup>。

本研究では、以上に述べた課題に対処するため、高温季については、官署観測データを成因別（台風と非台風）に整理することにした。その結果、データの統計解析上の問題点を排除するとともに、台風データについては、台風モデルによるモンテカルロシミュレーション（以下、台風シミュレーション）によって得られた風速値を、観測値でキャリブレーションするという併用方法を提案した。これにより、地域的な風速レベルは観測データに、風向別風速の分布形は台風シミュレーションに基づいた設定となり、観測データと台風シミュレーションの長所を取り入れた設定が可能であると考えた。また、官署の風向によっては支配的要因が異なり、非台風データの方が上回る場合もあることから、いずれか大きい方を採用することで危険側になることを回避した。一方、低温季については、官署の観測データにより風向別基本風速を算定することとした。

観測データの統計処理にあたっては、測器の変遷に伴う測器補正、風速測定高さ補正、地表面粗度補正を行い、地表面粗度Ⅱ、地上10m位置の風車型風速計への基準化を図った。また観測データは、直近の小地形影響を受けている場合、官署周辺地域を代表する風速となっていない可能性がある。そこで風向別に算定した小地形による

風速の割り増し係数  $k_1$  ( $k_1 > 1.0$ ) により風速を割り戻すことにより、直近の小地形による増速影響を除去し、危険側評価になる可能性を排除した。観測データの処理結果例を図2-2-4、図2-2-5に示す。<sup>(11)(12)</sup>

また、高温季の風向別再現期風速は、文献による台風シミュレーションにより十分長い期間の台風資料を作成し、これを統計処理して算定した。具体的には以下のとおりである。

- ① 検討領域を定め、過去50年間の台風観測データから、台風の年間発生数、台風移動速度、移動方向、気圧分布などを設定した領域毎に確率モデルで表現する
- ② このデータを用いてモンテカルロ法により台風を発生させ、台風が対象地点に接近した時の傾度風を求める
- ③ あらかじめ求めておいた傾度風と地上風の風向相関、風速比相関を用いて地上風の風向、風速を計算する
- ④ このシミュレーションを長期間にわたって実施することにより、対象地点における長期間の風向別年最大風速のデータが生成され、これを統計処理することで風向別再現期間風速を求める

台風シミュレーションの検討イメージを図2-2-6に示す。台風シミュレーションの計算条件は、シミュレーション期間10000年とし、官署と台風中心間の距離が500km以内に接近したものを対象に風向、風速を算定することとした。

台風シミュレーションの計算結果として、台風経路図の一例を図2-2-7に、Gumbel確率紙上の年最大風速のプロットの例を図2-2-8に示す。

以上の手順により求めた風向別基本風速の一例として、高温季の宮崎地方気象台の結果を図2-2-9に示す。

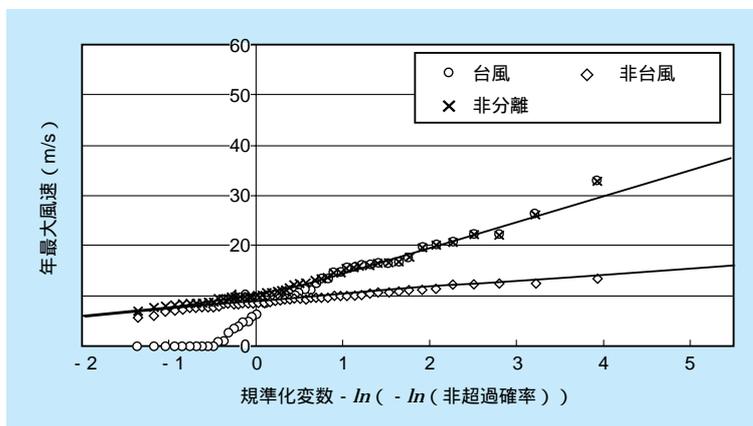


図2-2-4 高温季の例（宮崎）

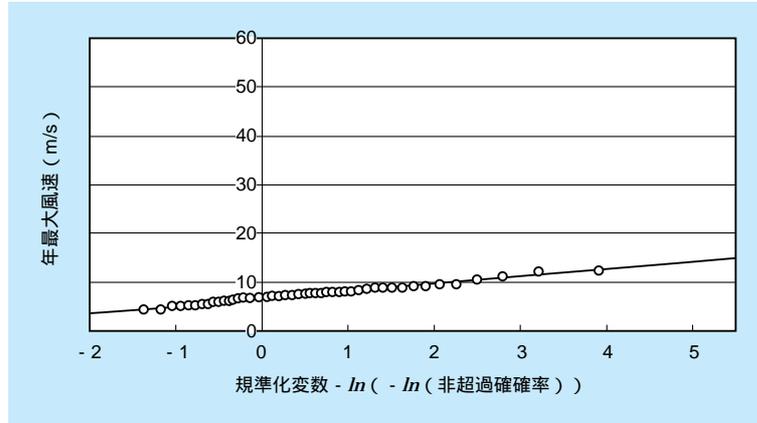


図2-2-5 低温季の例(宮崎)

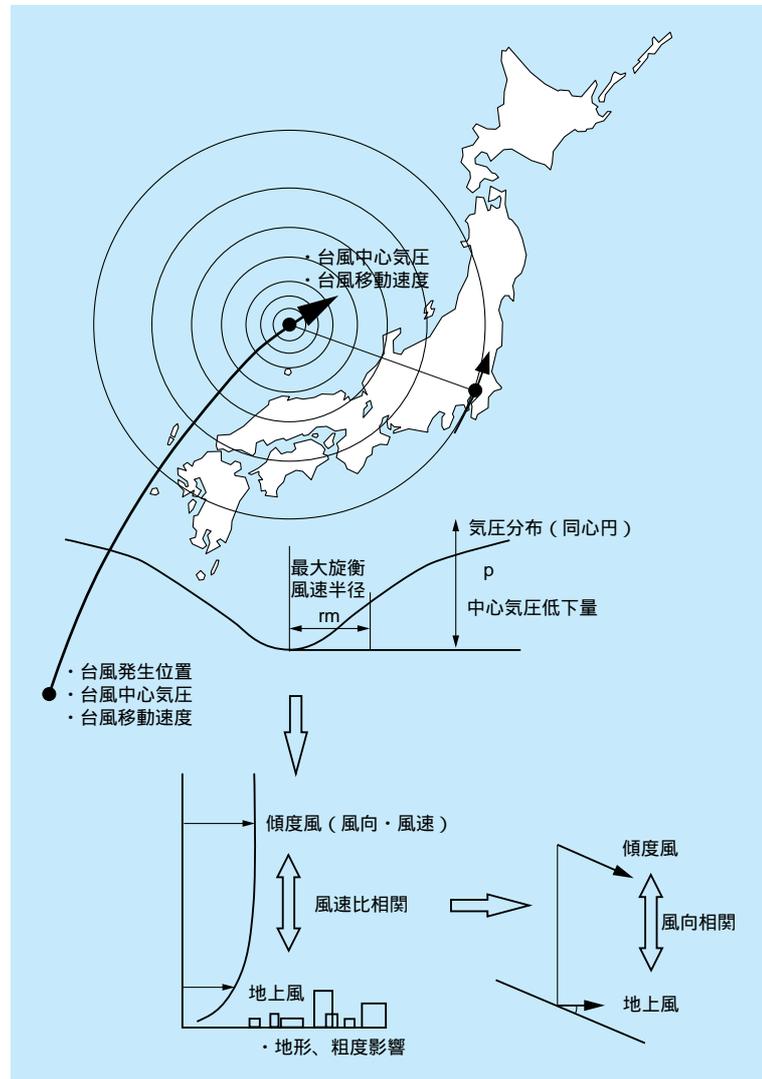


図2-2-6 台風シミュレーションによる風向別風速の検討イメージ

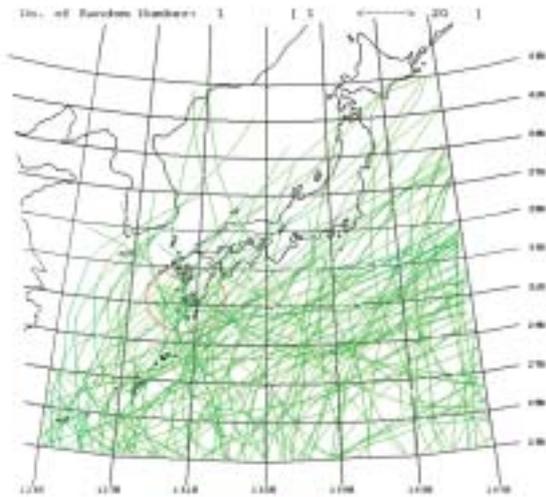


図2-2-7 台風シミュレーション経路図

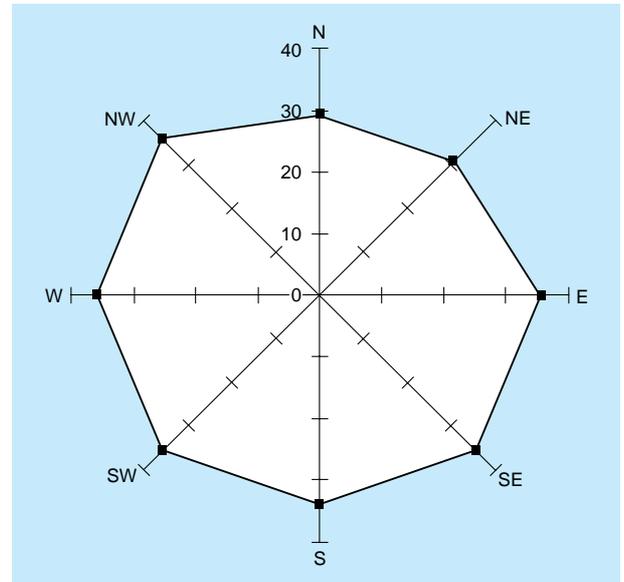


図2-2-9 風向別基本風速の例（高温期・宮崎）

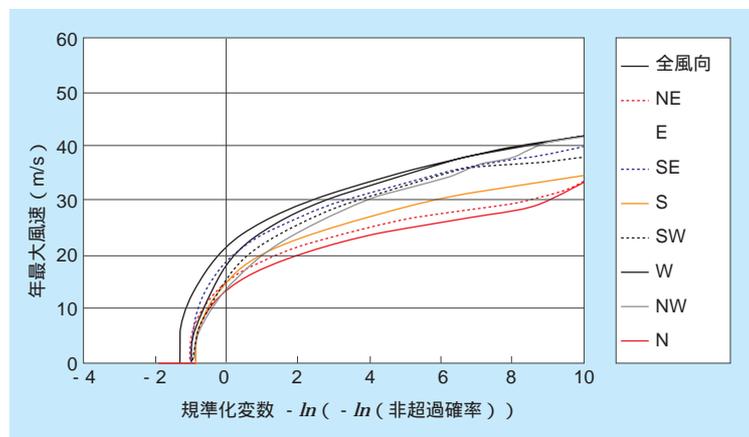


図2-2-8 年最大風速プロットの例（宮崎）

#### 2-2-4 風向別基本風速マップ作成の試み<sup>(6)</sup>

風向別基本風速マップを作成するため、官署間の風向別基本風速を定める必要がある。建築物荷重指針では、日本全土をメッシュ分割し、その各メッシュ点に最も近い官署の風速値を設定した後に、空間的な平滑化を行うことでマップを作成している。これに対し、今回対象としているのは風向別基本風速マップであることから、単なる空間的な平滑化によるのではなく、風向を考慮した地形影響を反映することが必要であると考えられる。そこで、風向を考慮した大規模な地形影響による増速効果、減速効果をより積極的に風向別基本風速マップに反映するために、気流解析コードL-WIND<sup>(6)</sup>による気流解析結

果の風速の水平方向分布から官署間の基本風速の内挿関数を求め、適切なスムージングを施すことにより、風向別基本風速マップを作成する手法を提案した。

##### (1) マップ作成方法

###### ① L-WINDによる気流解析（官署間の内挿関数導出）

日本全土を4つの領域（北海道、東北、関東・中部・近畿、中国・四国・九州）に分割し、入口風速を適当に定めて、水平格子間隔2 km、下層鉛直格子間隔100m、地表面粗度は海：Ⅰ、陸地：Ⅲの解析条件で、L-WINDによる気流解析を8風向分実施し、官署間の内挿関数を導出した。なお、4つの領域間は50km～70km程度ラップさせた。

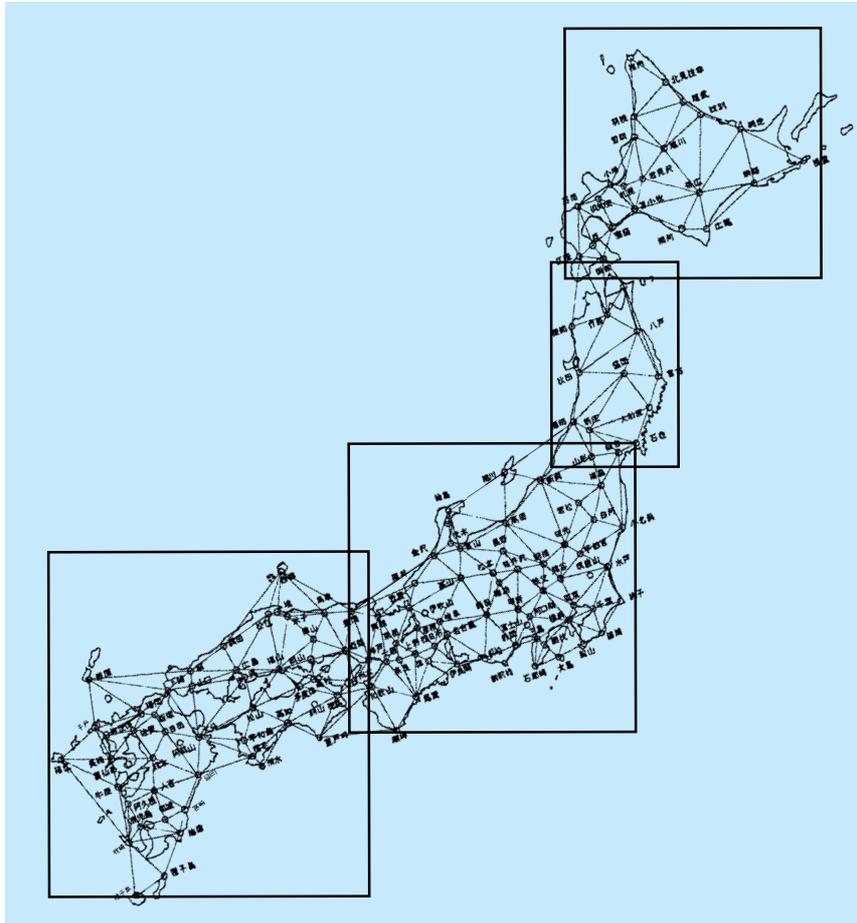


図2-2-10 官署間を内挿するためのメッシュおよび領域のラップ図

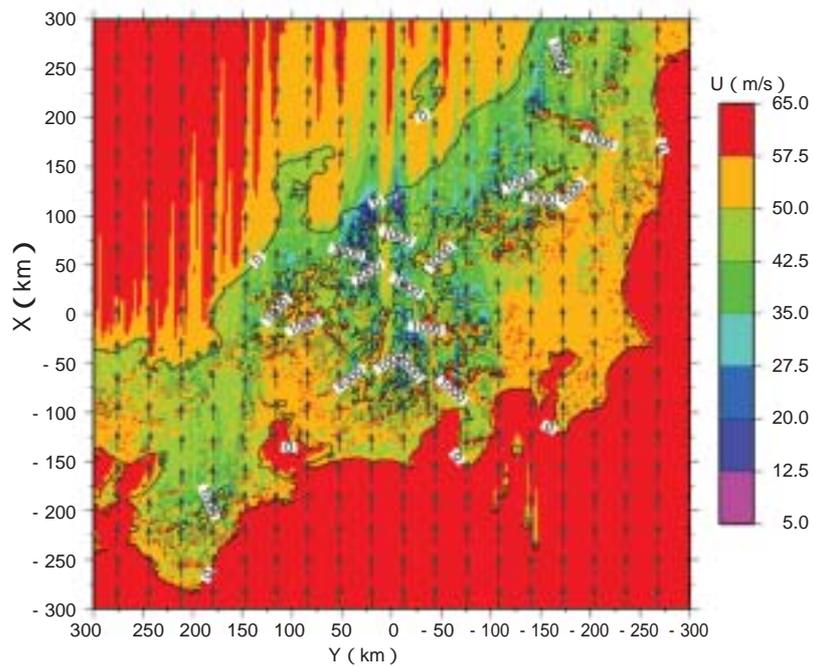


図2-2-11 L-WINDによる気流解析結果（関東・中部・近畿：南風）

## ② 官署における減速地形影響の除去

官署から見た周辺地形の仰角が特に大きい官署・風向は、減速地形の影響を受けているため、その官署・風向の基本風速は、周辺官署の基本風速と気流解析の結果を利用した内挿により算出することとした。

なお、一般的に地形影響を受けて減速しているといわれている長崎海洋気象台のSE風向の仰角が平均0.2程度であることから、1風向の仰角が平均0.2以上の官署・風向を補正の対象とした。補正の対象とした官署・風向は、大船渡(W)、宮古(W、NW)、網代(SE、S)、日光(N、S、NW)、尾鷲(SW)、舞鶴(S)、長崎(SE)である。

## ③ 各領域における風向別基本風速の算出

官署間における風向別基本風速は、①の気流解析結果の平均風速の水平方向分布を官署間の風速の内挿関数とし、適切なスムージングを施すことにより

算出した。

## (2) 風向別基本風速マップ

上で述べた方法により作成した、関東、中部、近畿地方の高温季・南風の基本風速マップを図2-2-12に例示する。

## (3) マップ使用上の留意点

今回作成した風向別基本風速マップは、大規模な地形影響を風向別に取り込んだ従来にないより合理的なマップであるが、その妥当性については十分な検証ができていないのが現状である。特に問題を有している(実態と乖離している)個所として、大型山地の周辺が挙げられている。今後、官署以外の地点での観測値との比較等により、マップの妥当性を評価していくとともに、大気安定度をパラメータにした検討も必要と考えている。

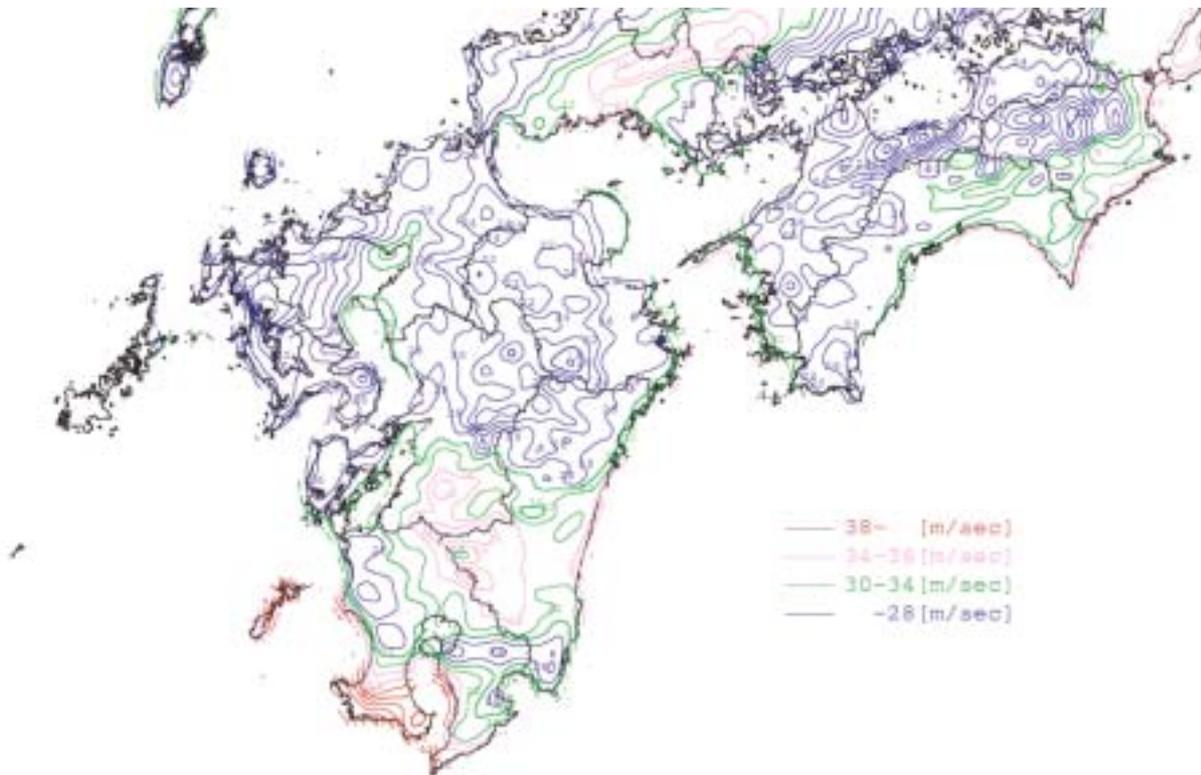


図2-2-12 風向別基本風速マップ(高温季・南風)

## 2 - 3 設計風速の評価

風は上空では摩擦のない一定風速と扱うことができるが、地表に近い風は、地表面の粗度による摩擦のため風速が低減しており、その度合いは地表面粗度の状況によって大きく影響を受ける。また、送電用鉄塔は、山の斜面や頂部に建設されることも多く、送電線に作用する風は直近の地形の影響を強く受けることが多い。過去の送電鉄塔の被害事例でも、斜面により、増速された風が山の斜面頂部に建設された鉄塔に作用し被害を与えた事例が見られている。日本は山岳地帯が多く、送電線もそのようなルートをとらざるを得なくなっている。したがって、地表面粗度の影響と直近の風の影響を考慮して設計風速を評価することは、風荷重評価の合理化につながるため、耐風設計上非常に重要である。ここでは、設計風速の算定方法に必要な風の統計量について述べる。

### 2-3-1 設計風速

#### (1) 設計風速の算定式

設計風速は、基準高さ  $z_R$  における 10 分間平均風速で、風向別基本風速を定めた 8 風向について算定することとしており、地表面粗度の影響、直近の小地形の影響、気象学的影響を考慮して求める。

$$U_R = k_1 k_2 E U_0 \quad (2-3-1)$$

ここで、 $U_0$  は、建設地点から 10km 程度風上の風向別基本風速 [m/s] で、風向別基本風速マップから設定する。 $k_1$  は、鉄塔の基準高さ位置における小地形による風速の割り増し係数、 $k_2$  は気象学的影響による風速の割り増し係数、 $E$  は、風速の鉛直分布係数で、対象とする風向の粗度区分に応じて定めるものである。

#### (2) 地表面粗度の影響

地表面粗度は、建築物荷重指針に示されている粗度の分類を参考に 5 区分とした (表 2-3-1)。粗度区分に応じて上空風高さ  $Z_G$  と、べき指数  $\alpha$  が示されている (表 2-3-2)。

上空風速は粗度によらず一定と考え、基本風速は地上

表2-3-1 地表面粗度区分

粗度区分	周辺地域の地表面の状況
I	・海上のようなほとんど障害物のない平坦地
II	・農作物程度の障害物のある田園地帯、草原等 ・樹木が散在している丘陵地 ・低層建築物が散在している平坦地
III	・山岳地と樹木が密集する丘陵地 ・低層建築物が密集する平坦地 ・中層建築物 (4 ~ 9 階) が散在している平坦地
IV	・中層建築物 (4 ~ 9 階) が主となる市街地
V	・高層建築物 (10 階以上) が密集する市街地

表2-3-2 上空風高さ  $Z_G$ 、べき指数 の値

粗度区分	I	II	III	IV	V
$Z_G$ (m)	250	350	450	550	650
	0.10	0.15	0.20	0.27	0.35

10m、粗度 II を基準としているので、式 (2-3-2) により対象地点の粗度に応じた風速を求める。なお、粗度区分は、建設地点より前方 1 ~ 2 km 程度の風上側の状況を考慮して判断する。

$$E = 1.7 \left( \frac{z_R}{Z_G} \right) \quad (2-3-2)$$

ただし、 $z_R$  : 基準高さ [m]

$Z_G$  : 上空風高さ [m]

$\alpha$  : 平均風速の鉛直分布を表すべき指数

粗度は現地の状況を見て判断するため、主観的な評価になることがある。粗度の判定により、設計風速が大きく影響を受けることから、より客観的な手法が望まれており、今後の研究に期待される。

#### (3) 小地形による風速の割り増し係数 $k_1$

風向別基本風速マップに反映されていない数 km スケールの小地形による風速の割り増し係数  $k_1$  は、風上側 10km 程度前方から建設地点までの地形の状況から、斜面の高さ  $L_z$ 、斜面の水平距離  $L_x$ 、算定高さ  $z$  を読みとり、増速率図を用いて算定する。斜面が 10、20、30 度の増速率図の例を図 2-3-1 ~ 図 2-3-3 に示す。この増速率図は、風洞実験により精度が検証された気流解析コード L-WIND による解析結果である。

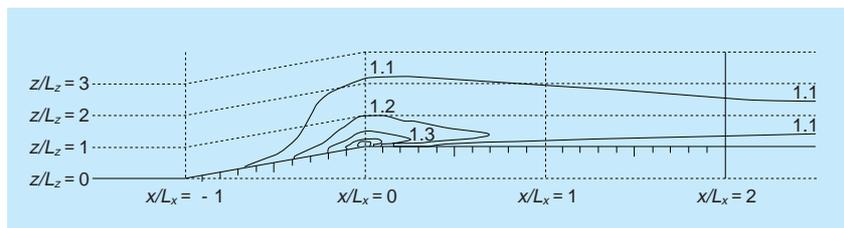


図2-3-1 増速率図（崖状地形、斜面勾配10°）

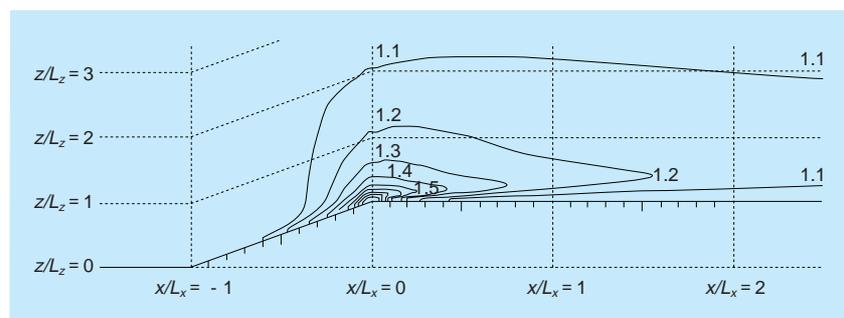


図2-3-2 増速率図（崖状地形、斜面勾配20°）

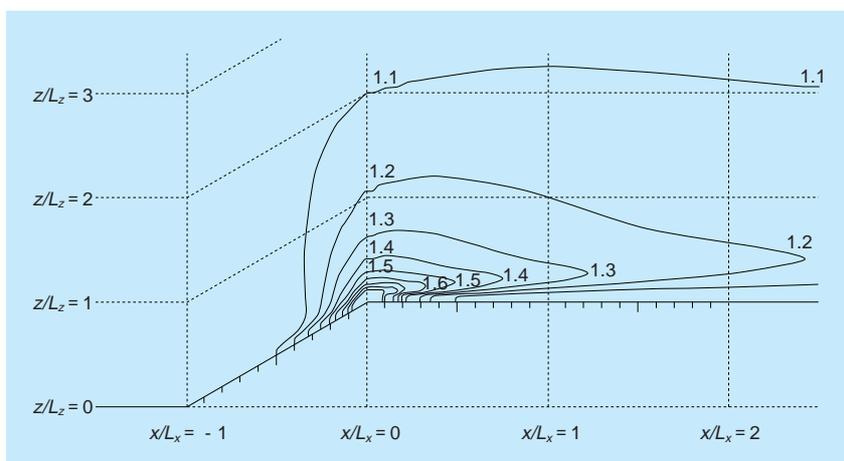


図2-3-3 増速率図（崖状地形、斜面勾配30°）

また、建設地点周辺の地形の状況が複雑で、かつ重要度、経済性等の観点から精緻な検討を要すると判断した場合には、数値シミュレーションによる設計風速の算定を行うことができる。ただし、十分実績を有するか、または設計者が精度を検証した気流解析コードを使用し、解析条件を適切に設定して実施する必要がある。気流解析は、膨大な解析時間が必要になるため、アルゴリズムの改良など計算の高速化が今後の課題として挙げられている。

#### (4) 気象学的影響による割り増し係数 $k_2$

基本風速マップは、大規模な地形影響のみを考慮したそ

の地域を代表する風速を示しているため、気象学的影響によって発生する局地風の類は反映していない。したがって、気象学的影響により耐風設計上配慮すべき強風の発生が知られている地域については、風速の割り増し係数  $k_2$  を設計風速に考慮することとした。しかし、現在取得可能なデータから、具体的な数値あるいは評価手順を明示することは困難であったため、このような地域に建設する場合には、実状に応じた適切な調査研究に基づき、成因、風向、発生時期、風速レベルを分析し、 $k_2$  を定める必要がある。なお、現在、このような気象学的に顕著な増速効果が知られている局地風として、以下を提示した。

- 1) やまじ風  
愛媛県東部の伊予三島市周辺の南風
- 2) 広戸風  
岡山県北東部の奈義町、勝北町周辺の北風
- 3) 日高しも風  
北海道日高山脈南西側一帯の北東風
- 4) 羅臼風  
北海道知床半島南東側一帯の北西風
- 5) 寿都だし風  
北海道寿都町周辺に位置する地峡帯の南風および南東風

2) ディケイファクタ (水平横方向:  $k_x$ 、鉛直横方向:  $k_z$ )

3) 乱れのスケール ( $L_{ur}$ )

は、文献調査や九州・四国試験線の風・風応答観測結果に基づき表2-3-3で与えることとした。なお、これら乱流統計量設定のもととなったデータは、4-1で述べる。

表2-3-3 風の乱流統計量

$I_{ur}$	$k_x$	$k_z$	$L_{ur}$
$0.1 \left( \frac{Z_R}{Z_G} \right)^{-0.05}$	10	10	$100 \sqrt{\frac{Z_R}{30}}$

## 2-3-2 風荷重評価に必要な風の乱流統計量

風荷重評価に必要な風の乱流統計量

- 1) 乱れの強さ ( $I_{ur}$ )

## 2 - 4 等価静的風荷重の評価

架空送電線路の設計にあたっては、台風等の風荷重で設計荷重が決められることが多く、また、近年の台風による損壊例の発生<sup>13)</sup>、大規模化、基数の増大などにより、送電設備の有事の際の社会的影響度の観点から、合理性を兼ね備えた高い信頼性が求められるようになってきている。

我が国の送電鉄塔の設計では、基本的に電気設備技術基準<sup>1)</sup>に基づき、地表面粗度によらず全国一律の平均風速をベースに、鉄塔部材の規格降伏点応力度の1/1.5に対応させることとしている。またJEC-127<sup>2)</sup>は、最新の学術的知見を反映したものとして、電気事業者の自主判断のもと、主に大型の架空送電線路における補強設計用の資料として利用されている。JEC-127は、地域性を考慮して定められた基準速度圧(瞬間最大風速に対応)による部材応力度を、降伏点応力度の規格値に対応させるものであり、一部架渉線については径間長によって規模による低減係数を考慮している。なお、地表面粗度の区別はない。

いずれの設計法においても、簡便でかつある程度の合理性を備えているものの、静的に風荷重を評価しているため、動的な応答特性に関して、実態に応じて評価する

ことは難しい。

このような現状に鑑み、世界的に動的効果を考慮した耐風設計法が主流となっている現在、我が国においても架空送電線路の動的効果を考慮した設計法を確立する必要性が高まっている<sup>14)</sup>。また、2-2で紹介したように、風向別設計風速の検討も進められている。風荷重についても、任意の風向に対して、十分な精度で評価できることが必要である。

動的効果を考慮した風荷重評価法としては、建築物や橋梁の設計で一般的に用いられているガスト影響係数法<sup>3)(4)、15)~17)</sup>がよく知られている。また、送電鉄塔に限ってみても、同様の考え方に基づくいくつかの評価法が提案されておりASCE Guidelines<sup>18)</sup>、EPRI report<sup>19)</sup>、あるいはIEC60826<sup>20)</sup>、などにまとめられている。ASCE GuidelinesあるいはEPRI reportでは、Davenport<sup>21)</sup>が提案した送電鉄塔および架渉線の風圧荷重のガスト影響係数を共振成分を無視した形で採用している。またIEC60826では、送電鉄塔については鉄塔高と地表面粗度、架渉線については平均径間長、地表面粗度および導体の平均地上高の関数としてガスト影響係数を図示

している。

ここでガスト影響係数を用いた等価静的風荷重とは、風に対する最大応答と同じ荷重効果をもたらす静的な風荷重であり、この風荷重を構造物に作用させることにより各部材の最大発生応力度、変形を計算することができる。すなわち等価静的風荷重には、構造物の規模（塔高あるいは径間長）が大きくなる程、相対的に風が同時には作用しなくなる効果（規模効果）と構造物の最も揺れやすい周波数（1次固有振動数）に対する動的な増幅を表す効果（共振効果）が含まれる。このため、構造物の動的な特性を考慮できる合理的な風荷重算定法といえる。

このような荷重の考え方は、1960年代に Davenport によってはじめて体系化されたもので、外力となる風の乱れを定常正規確率過程と仮定し、不規則振動論と確率統計的手法を適用して、振動応答の最大値を理論的に予測するものである。先に示した ASCE Guidelines<sup>(18)</sup>、IEC60826<sup>(20)</sup>。はいずれも同様の考え方による。

ただし、上述の文献では、風荷重評価の点で架渉線の張力変動の影響や各風荷重の組み合わせについては十分には考慮されていない。特に、送電鉄塔は、多数の架渉線が付属し、かつ各々の支持点反力は同時に最大になることはない。このため、これらの非同時性を考慮してその組み合わせを考えるべきであろう。

我が国は、山岳部で複雑なルートを採らざるを得ない状況から耐張型鉄塔が多く用いられる。耐張型鉄塔では、特に組み合わせの影響を受けやすいため、合理的荷重評価手法の確立のためには、この点に十分配慮しておく必要がある。

このような現状を踏まえ、当所では電力各社とともにガスト影響係数法に基づく鉄塔と架渉線の等価風荷重評価法を提案した。さらに、これらの連成効果を考慮するために、非同時性低減係数を考案し、任意風向に適用できる風荷重評価体系とした。

ただし、本荷重評価法で対象としている風荷重は、強風中において鉄塔骨組や架渉線等が弾性的挙動をするものとして検討したものである。つまり許容応力度設計を前提としている。また、風の乱れ（風向、風速の時間的・空間的变化）に起因する変動風力を扱ったものであり、さらに大部分の鉄塔がラチス構造であるため、風方向の風荷重のみを対象としている。架渉線にみられる風上側電線の後流側の渦発生が原因とされるサブスパン振動や、物体の振動と

周囲の流れの相互作用により発生するギャロッピングなどの不安定振動については、対象としていない。ギャロッピング現象に関する当所の取り組みについては、第5章に紹介しているので、併せて参照頂きたい。

## 2-4-1 風荷重の分類

新たに提案した風荷重評価法では、風荷重を鉄塔風圧荷重、架渉線風圧荷重、碍子および架線金具風圧荷重、架渉線張力荷重に分類している。さらに、これらの荷重から、水平角、高低差の補正を行い鉄塔軸に対する鉛直方向荷重、線路直交方向荷重、線路方向荷重を算定することにより、鉄塔設計に適用するものとした。したがって、特に架渉線については架線方向に対する風向を考慮することになり、多少の煩雑さは増すものの、架空送電線路の実挙動に即した荷重算定法となっている。なお、これらの風荷重算定に関連して、3-4に等価静的風荷重評価ツールを紹介している。

## 2-4-2 各種風荷重

ここでは、鉄塔風圧荷重、架渉線風圧荷重、架渉線張力荷重算定式の概要を、ガスト影響係数法の特徴とともに述べる。

### (1) 風圧荷重の考え方

風圧荷重は、基準高さにおける設計用速度圧に、風力係数、受風面積、応力分担率、ガスト影響係数を乗じて算定される。ここに用いるガスト影響係数は、変動風速に起因する風力の影響を評価するもので、次式で定義される。

$$(\text{ガスト影響係数}) = \frac{(\text{最大応答値})}{(\text{平均風力による応答値})}$$

ガスト影響係数は、風によって生じる最大応答値と等価な応答値を与えるように平均風力を補正する係数である。ガスト影響係数を適切に定めれば、風の時間空間特性だけでなく、構造物の振動特性（固有振動数、減衰定数）を考慮した風圧荷重の算定が可能となる。

なお、風圧荷重算定に必要な風力係数と応力分担率に

については、いまのところ合理化できる程度の有効なデータがないため、既存の設計法に準じるものとした。これらについては、荷重評価に与える影響が大きいと、適切な試験によりデータを蓄積することが望ましい。

(2) 風荷重評価式

提案した風荷重評価式は、図2-4-1に示す各風荷重の算定方法であり、結果のみを以下に示す。なお誘導に用いた仮定および誘導方法については、文献(8)、(22)~(25)に詳しい。

- 1) 鉄塔風圧荷重 (線路方向平均値:  $\bar{P}_T^L$ 、変動成分の最大値:  $P_T^L$ 、線路直交方向平均値:  $\bar{P}_T^T$ 、変動成分の最大値:  $P_T^T$ )

< 平均成分 >

$$\bar{P}_T^T, \bar{P}_T^L = q_R \left( \frac{z_i}{z_R} \right)^{2\alpha} C_T A_T n_T \quad (2-4-1)$$

< 変動成分の最大値 >

$$P_T^T, P_T^L = q_R \left( \frac{z_i}{z_R} \right)^{2\alpha} C_T A_T n_T (G_{RT} - 1) \quad (2-4-2)$$

ここに、

- $q_R$  : 鉄塔の設計用速度圧 [ N/m<sup>2</sup> ]
- $z_i$  :  $i$ パネル中心の地表面からの高さ [ m ]
- $z_R$  : 基準高さ [ m ] (鉄塔高さの2/3)
- $\alpha$  : 平均風速の鉛直分布を表すべき指数

- $C_T$  : 塔体 (各パネル) および腕金の風力係数を表し、JEC-127に準拠し、充実率に応じて求める
- $A_T$  : 塔体 (各パネル) および腕金の受風面積 [ m<sup>2</sup> ]
- $n_T$  : 鉄塔風圧荷重の線路方向、線路直行方向の応力分担率を表し、JEC-127による
- $G_{RT}$  : 鉄塔のガスト影響係数で、次式により算定する

$$G_{RT} = 1 + 2g_T I_{UR} \frac{2+2\alpha}{2+\alpha} \left( \frac{2}{3} \right)^\alpha \sqrt{B_T + R_T} \quad (2-4-3)$$

ただし、

$$B_T = \frac{1}{1 + 0.163 \left( \frac{k_z H}{L_{UR}} \right)^{0.709}} \quad (\text{非共振係数})$$

$$R_T = \frac{\pi}{4h_T} S_T F_T \quad (\text{共振係数})$$

$$S_T = \frac{1}{1 + 0.334 \left( \frac{k_z H f_1}{U_R} \right)} \quad (\text{規模係数})$$

$$F_T = \frac{4(f_1 L_{UR} / U_R)}{\left\{ 1 + 70.8 (f_1 L_{UR} / U_R)^2 \right\}^{5/6}}$$

$f_1 = 100/H$  (鉄塔の1次固有振動数 [ Hz ])

$$g_T = \sqrt{21n(600v_T) + 1.2} \quad (\text{ピークファクタ})$$

$$v_T = f_1 \sqrt{\frac{R_T}{B_T + R_T}} \quad (\text{期待振動数 [ Hz ]})$$

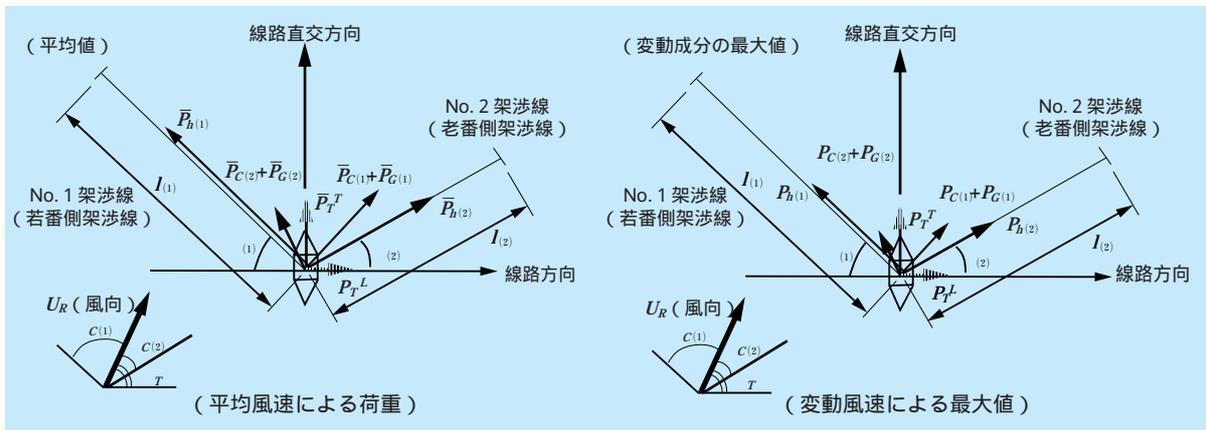


図2-4-1 任意の架線状態に対する風荷重の定義

ここに、

- $H$  : 鉄塔高さ [ m ]
- $I_{uR}$  : 基準高さにおける乱れの強さ
- $L_{uR}$  : 基準高さにおける乱れのスケール [ m ]
- $k_z$  : 鉛直横方向のディケイファクタ
- $h_f$  : 鉄塔の1次減衰定数 ( 臨界減衰比 )  
( 鋼管鉄塔 : 0.01、山形鋼鉄塔 : 0.02、コンクリート充填鋼管鉄塔 ( MC鉄塔 ) : 0.01 )

2) 架渉線風圧荷重 ( 平均値 :  $P_c$ 、変動成分の最大値 :  $P_c$  )

< 平均成分 >

$$\bar{P}_C = q_R C_C A_C k_C n_C \quad (2-4-4)$$

< 変動成分の最大値 >

$$P_C = q_R C_C A_C k_C n_C (G_{RC} - 1) \quad (2-4-5)$$

ここに、

- $C_C$  : 架渉線の風力係数を表し、JEC-127による
- $A_C$  : 架渉線の受風面積 [  $m^2$  ]
- $l$  : 径間長 [ m ] ただし支持点高低差を有する場合は、支持点距離とする
- $n_C$  : 架渉線風圧荷重の応力分担率を表し、JEC-127による
- $k_C$  : 架渉線に対する吹き上げ風の効果を考慮する係数を表し、次式で与える

$$k_C = \frac{1}{\cos \varphi}$$

ここに、 $\varphi$ は吹き上げ角 [  $^\circ$  ] ( $\varphi \geq 0$ )

$G_{RC}$  : ガスト影響係数で、次式により算定する

$$G_{RC} = 1 + 2g_c I_{uR} \sqrt{B_C} \quad (2-4-6)$$

ただし、

$$B_C = \frac{1}{1 + 0.140 \left( \frac{k_x l}{L_{uR}} \right)^{0.707}} \quad (非共振係数)$$

ここに、

- $g_c$  : 架渉線風圧荷重のピークファクタを表し、 $g_c=3.5$ とする。
- $k_x$  : 水平横方向のディケイファクタ

3) 架渉線張力荷重 ( 平均値 :  $\bar{P}_h$ 、変動成分の最大値 :  $P_h$  )

< 平均成分 >

$$\bar{P}_h = \bar{h} \quad (2-4-7)$$

< 変動成分の最大値 >

$$P_h = 2g_h q_R C_C d n_C \frac{\sin(\psi - \varphi)}{\cos^2 \varphi} \frac{E_c A}{L_e} \frac{pl^2}{2(H + \bar{h})^2} - I_{uR} \sqrt{B_h} \quad (2-4-8)$$

ただし、

$$p = \sqrt{\left( q_R n_C C_C d \frac{1}{\cos \varphi} \right)^2 + \left( w_C - q_R n_C C_C d \frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi} \right)^2}$$

( 平均風速作用時の単位長さあたりの面内方向分布力 )

$$B_h = \frac{1}{1 + 0.136 \left( \frac{k_x l}{L_{uR}} \right)^{0.719}} \quad (非共振係数)$$

$$\lambda^2 = \left( \frac{pl}{H_0 + \bar{h}} \right)^2 \frac{E_c A}{H_0 + \bar{h}}$$

ここに、

$$: \text{架渉線の横振れ角 } \left( = \sin^{-1} \left( \frac{q_R n_C C_C d}{p \cos \varphi} \right) \right)$$

$E_c$  : 架渉線の弾性係数 [  $N/m^2$  ]

$w_C$  : 架渉線単位長重量 [  $N/m$  ]

$H_0$  : 無風時水平張力 [  $N$  ]

$\bar{h}$  : 平均風速による水平張力増分 [  $N$  ]

$g_h$  : 架渉線張力荷重のピークファクタを表し、 $g_h = 3.5$ とする。

(2-4-10)

### 2-4-3 各風荷重の組み合わせ

以上により求められた各風荷重について、鉄塔軸に関する座標変換を行い、平均成分についてはベクトル和、変動成分については絶対値和を求め、両者を足しあわせることにより、応力計算に対応した鉛直荷重、線路直交方向荷重、線路方向荷重が算定される。これら個別に評価された風荷重を組み合わせる際の考え方の模式図を図2-4-2に示す。

各風荷重の変動成分は、それらが同時に最大値にはならないため、非同時性の影響を低減係数により考慮している。ただし、風上側と風下側の回線間には、非同時性に関する低減は考慮しないものとする。この時、鉛直荷重、線路直交方向荷重、線路方向荷重は、それぞれ次式により求められる。

< 垂直荷重  $H^Z$  >

$$H^Z = (\bar{P}_{h(1)} + P_{h(1)}) \tan \delta_{(1)} + (\bar{P}_{h(2)} + P_{h(2)}) \tan \delta_{(2)} \quad (2-4-9)$$

< 線路直交方向荷重  $H^T$  >

$$H^T = |\bar{P}_T^T + \bar{P}_{C(1)}^T + \bar{P}_{C(2)}^T| + \varepsilon_4 |P_T^T| + \varepsilon_1^T \varepsilon_2^T \varepsilon_3 \varepsilon_4 (|P_{C(1)}^T| + |P_{C(2)}^T|)$$

ただし、

平均成分：

$$\bar{P}_{(1)}^T = (\bar{P}_{C(1)} + \bar{P}_{G(1)}) \cos \theta_{(1)} + \bar{P}_{h(1)} \sin \theta_{(1)} \quad (2-4-11)$$

$$\bar{P}_{(2)}^T = (\bar{P}_{C(2)} + \bar{P}_{G(2)}) \cos \theta_{(2)} + \bar{P}_{h(2)} \sin \theta_{(2)} \quad (2-4-12)$$

変動成分の最大値：

$$P_{(1)}^T = \left| (P_{C(1)} + P_{G(1)}) \cos \theta_{(1)} + P_{h(1)} \sin \theta_{(1)} \right| \quad (2-4-13)$$

$$P_{(2)}^T = \left| (P_{C(2)} + P_{G(2)}) \cos \theta_{(2)} + P_{h(2)} \sin \theta_{(2)} \right| \quad (2-4-14)$$

< 線路方向荷重  $H^L$  >

$$H^L = |\bar{P}_T^L + \bar{P}_{C(1)}^L + \bar{P}_{C(2)}^L| + \varepsilon_4 |P_T^L| + \varepsilon_1^L \varepsilon_2^L \varepsilon_3 \varepsilon_4 (|P_{C(1)}^L| + |P_{C(2)}^L|) \quad (2-4-15)$$

ただし、

平均成分：

$$\bar{P}_{(1)}^L = (\bar{P}_{C(1)} + \bar{P}_{G(1)}) \sin \theta_{(1)} - \bar{P}_{h(1)} \cos \theta_{(1)} \quad (2-4-16)$$

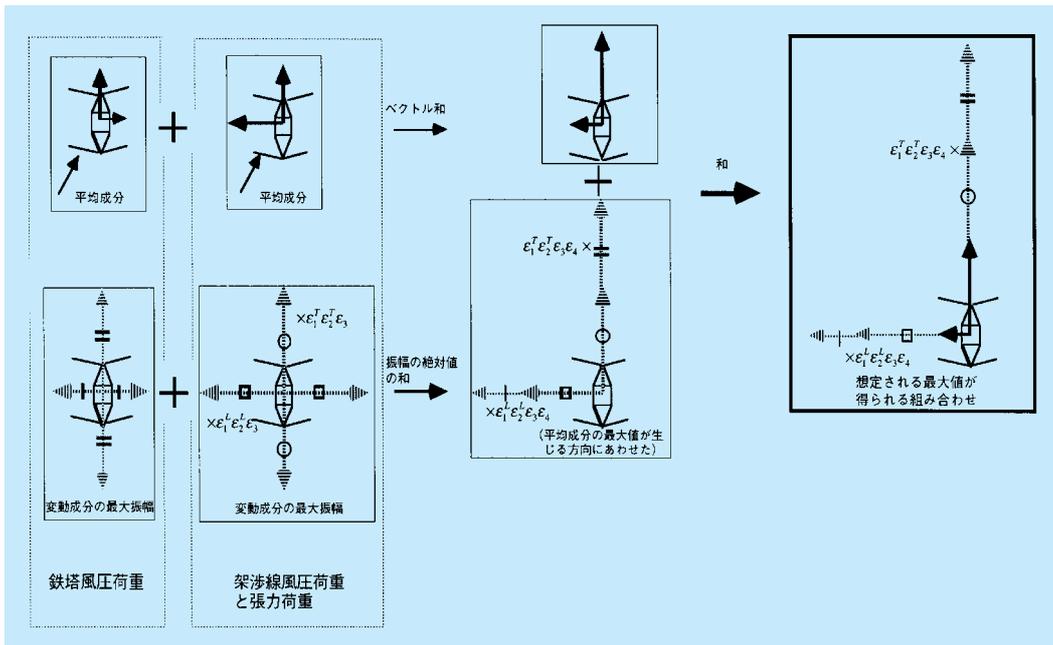


図2-4-2 風荷重の組み合わせ法の模式図

$$\bar{P}_{(2)}^L = -(\bar{P}_{C(2)} + \bar{P}_{G(2)})\sin\theta_{(2)} - \bar{P}_{h(2)}\cos\theta_{(2)} \quad (2-4-17)$$

変動成分の最大値

$$P_{(1)}^L = \left| (P_{C(1)} + P_{G(1)})\sin\theta_{(1)} - P_{h(1)}\cos\theta_{(1)} \right| \quad (2-4-18)$$

$$P_{(2)}^L = \left| -(P_{C(2)} + P_{G(2)})\sin\theta_{(2)} + P_{h(2)}\cos\theta_{(2)} \right| \quad (2-4-19)$$

ここに、 $\bar{P}_C^T$ ：架渉線風荷重（線路直交方向）の平均値、 $P_C^T$ ：架渉線風荷重（線路直交方向）の変動成分の最大値、 $\bar{P}_C^L$ ：架渉線風荷重（線路方向）の平均値、 $P_C^L$ ：架渉線風荷重（線路方向）の変動成分の最大値、 $\gamma$ ：垂直角である。また下付括弧用の数字は架渉線番号を表す。さらに、非同時性低減係数は、それぞれ以下の通りである。

$\gamma_1, \lambda_1$ ：架渉線風圧荷重、がいしおよび架線金具風圧荷重、架渉線張力荷重による線路直交方向荷重および線路方向荷重の若老間の非同時性低減係数

$\gamma_2, \lambda_2$ ：架渉線風圧荷重、がいしおよび架線金具風圧荷重、架渉線張力荷重による線路直交方向荷重の上下間の非同時性低減係数

$\gamma_3$ ：架渉線風圧荷重、がいしおよび架線金具風圧荷重、架渉線張力荷重による線路直交方向荷重と線路方向荷重間の非同時性低減係数

$\gamma_4$ ：鉄塔風圧荷重と架渉線風荷重（架渉線風圧荷重、がいしおよび架線金具風圧荷重、架渉線張力荷重）間の非同時性低減係数

上記、非同時性低減係数は設計上考慮すべき強風時には空力減衰の効果が大きいことを前提として、非共振成分のみを考慮するものとして、理論的に与えている。具体的な算定方法、計算式は文献(8)、(26)を参照いただきたい。

#### 2-4-4 等価静的風荷重の妥当性確認

等価静的風荷重算定法の精度検証を目的に、第3章で紹介する動的応答解析（周波数領域）による3基2径間立体骨組モデルの発生軸力の計算結果と、等価静的風荷重による発生軸力を比較した。特に風向別設計を可能と

するには、任意の風向に対しても一定の精度で評価ができなければならない。そこで主として風向をパラメータとして、等価静的風荷重の適用性を評価した。

ここでは、以下の2ケースにおける比較結果を紹介する。

解析モデル①：500kV 鋼管耐張型（塔高77.5m、水平角15度、径間長450m、等径間）

解析モデル②：500kV 鋼管耐張型（塔高77.5m、水平角15度、径間長600m、300m、径間比2：1）

また入力としては、地上高10m位置の平均風速を40m/s、粗度区分Ⅱ（表2-2-1参照）とし、図2-4-3に示すように風向30度ピッチとした。上記解析モデル①のモデル図を図2-4-4に示す。

主要パネル（4、7、10、15パネル、図2-4-4参照）の発生軸力の比較図を図2-4-5、図2-4-6に示す。凡例中の数字は、パネル番号を表す。ただし、ここに示す発生軸力は、風荷重のみによって生ずる軸力であり、自重、無風時張力による水平角度荷重は含まない。

これらの図より等価静的風荷重による発生軸力は、各風向とも動的反応解析結果と概ね一致を示していることがわかる。なお、いずれのケースにおいても240度、300度風向については、誤差が若干大きい結果となっている。これは、詳細な考察により鉄塔の変位に伴う架渉線の支持点移動が起因しているためであり、鉄塔・架渉線連成系として扱わない限りさけることのできない問題である。このようなケースに対して精度良く発生応力を算定したい場合は、動的応答解析を実施するなど別の対応が必要と考えられる。したがって等価静的風荷重の適用範囲の明確化が重要であり、今後の課題である。

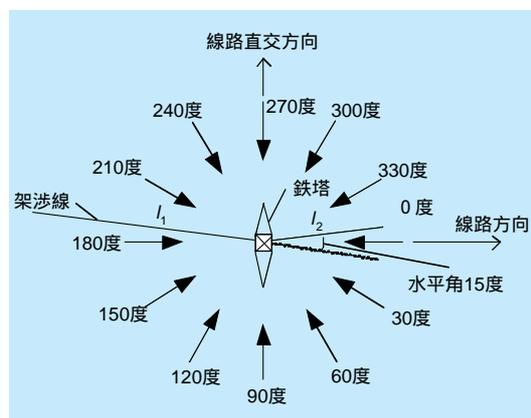


図2-4-3 風向の定義

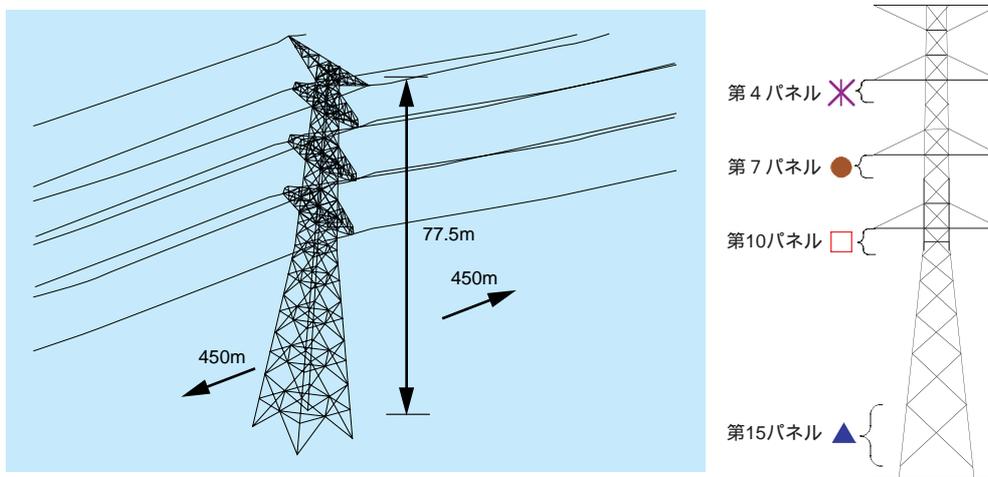


図2-4-4 検討用モデル図（解析モデル①）

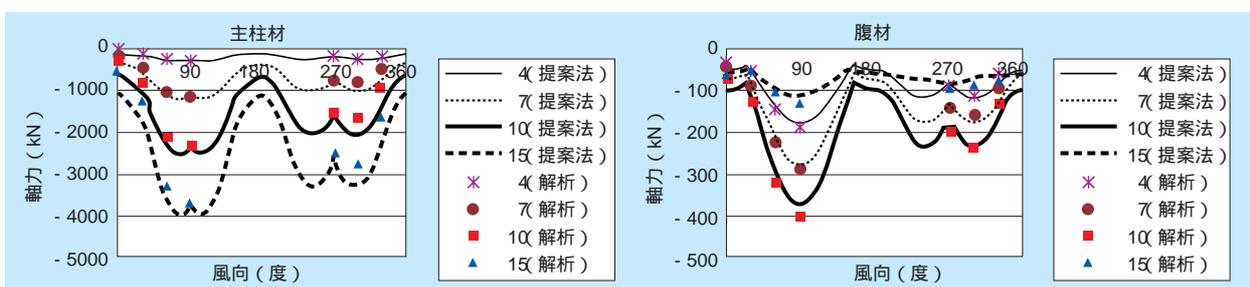


図2-4-5 主要パネル（4、7、10、15パネル）の風向別発生軸力の比較（解析モデル①）

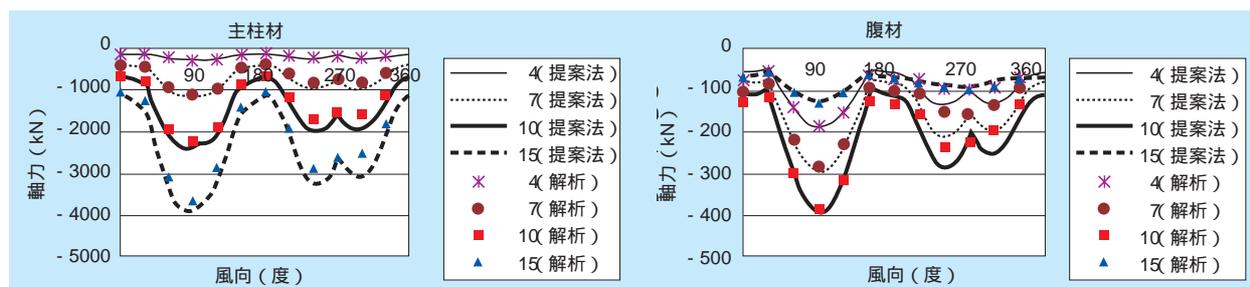


図2-4-6 主要パネル（4、7、10、15パネル）の風向別発生軸力の比較（ケース②）

## 2-4-5 ま と め

送電鉄塔の耐風設計に活用することを目的として、動的効果を考慮した等価静的風荷重評価法を提案した。本手法では、鉄塔風圧荷重、架渉線風圧荷重、がいしおよび架線金具風圧荷重さらに架渉線張力荷重の算定式を誘導するとともに、これまでに特に風荷重として規定され

ていなかった架渉線張力荷重の評価式を提示した。また、架空送電線路は鉄塔および多数の架渉線で構成されることから、これらの動的な連成効果を考慮するために非同時性低減係数を新たに提案することにより、風荷重評価法を体系化した。また、ここに提案した風荷重評価法と動的応答解析による鉄塔・架渉線連成系の発生軸力を比較した結果、任意の風向、架線条件に対しても、概ね一致する結果となり、本評価法の妥当性を明らかにした。



第 3 章

# 3

**耐風設計に関する解析評価ツールの整備に向けて**

### 第3章 耐風設計に関する解析評価ツールの整備に向けて 目次

我孫子研究所 流体科学部 主任研究員 服部 康男  
 我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 奥田 慎也  
 我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 石川 智巳  
 狛江研究所 大気科学部 上席研究員 加藤 央之

3 - 1	3次元気流解析コード「L-WIND」	39
3 - 2	増速率の簡易評価ツール「k1-adviser」	44
3 - 3	ガスト応答解析コード	47
3 - 4	等価静的風荷重評価ツール	51
コラム2	やまじ風	55



服部 康男（1993年入所）

入所以来、複雑体系場の乱流現象に着目した研究を進めてきた。数値計算や風洞実験により、送電設備の耐風設計に関連した局所風況予測手法の開発や原子力発電所からの使用済燃料中間貯蔵施設の除熱設計法の高度化に携わってきた。今後は、局地風況予測に関連する数値シミュレーション手法の一般化を進め、風力発電設備の立地・運用等に役立てていきたい。  
 （3-1執筆）



奥田 慎也（1995年四国電力(株)入社，2001年より出向）

入所以来、耐風設計の合理化に関する研究に従事。主に四国試験線の観測データの解析に携わり、最近では送電線の各風荷重の非同時性を検証するため、赤城試験センターでフィールド実験を実施、そのデータ整理・分析を行っている。  
 （3-2執筆）

石川 智巳（18ページに掲載）

（3-3、3-4執筆）



加藤 央之（1983年入所）

入所以来、大気環境問題に関連した気象メカニズム解析等に従事。1990年代から温暖化問題に携わり、ERPI共同研究等を経て気候トレンド解析、地域気候モデルの開発に取り組む。局地風研究では強風観測データの解析を担当。

（コラム2執筆）

## 3-1 3 次元気流解析コード「L-WIND」

送電鉄塔や架渉線に作用する風荷重を評価する上で、山岳部などに見られる複雑地形の凹凸や地表面粗度の影響を受けた風況場を正確に把握することが重要となる。これまでの風況把握は、主に、現地観測や風洞実験によりおこなわれてきた。しかし、近年の計算機の飛躍的な能力向上に伴い、数値流体計算（CFD）が新たなツールとして注目されるようになった<sup>(1)~(4)</sup>。電力中央研究所においても、電事連依頼研究「局地風ならびに送電鉄塔の耐風設計に関する研究」および「送電用鉄塔の耐風設計合理化に関する研究」の中で、局所風況評価に資するべく3次元気流解析コード「L-WIND」の開発を進めることとなった<sup>(5)</sup>。ここでは、本コードの概要および解析事例を紹介する。

### 3-1-1 L-WINDの概要

L-WINDでは、複雑地形周りに形成される風況場の平均風速、風速変動強度、圧力等の3次元分布を求めることができる。とくに、解析領域の地形データの作成や計

算結果の可視化等のプリ・ポストを含む一連の作業について、パソコンでの実行を可能とするための入出力環境が構築されつつある。図3-1-1に、地形データ作業中のウィンド画像の一例を示す。地形データを視覚的にわかりやすく作成でき、一般のユーザーでも簡便に作業を行うことができる。

L-WINDの特徴として、高次有限差分法と座標変換法を適用していることが挙げられる。台風時などに生じる強風場を対象とした場合、密度および温度が一定と仮定することができる。このとき、風況場の運動は、質量保存則の式と運動量保存則の式により表現される。L-WINDでは、各式の対流項には3次、拡散項には4次精度の差分法を用いることで、複雑な地形に起因する流れ場の急変を定量的に捉えることに成功した。また、地表面の凹凸を精度良く表現するために、基礎方程式を直交座標系から地表面に沿った曲線座標系に変換した方程式を基にプログラム化した。地表面粗度については、完全粗面の仮定による粗度高さで基準化した速度分布から地表面での摩擦応力を定め、その値に見合う流速勾配を地

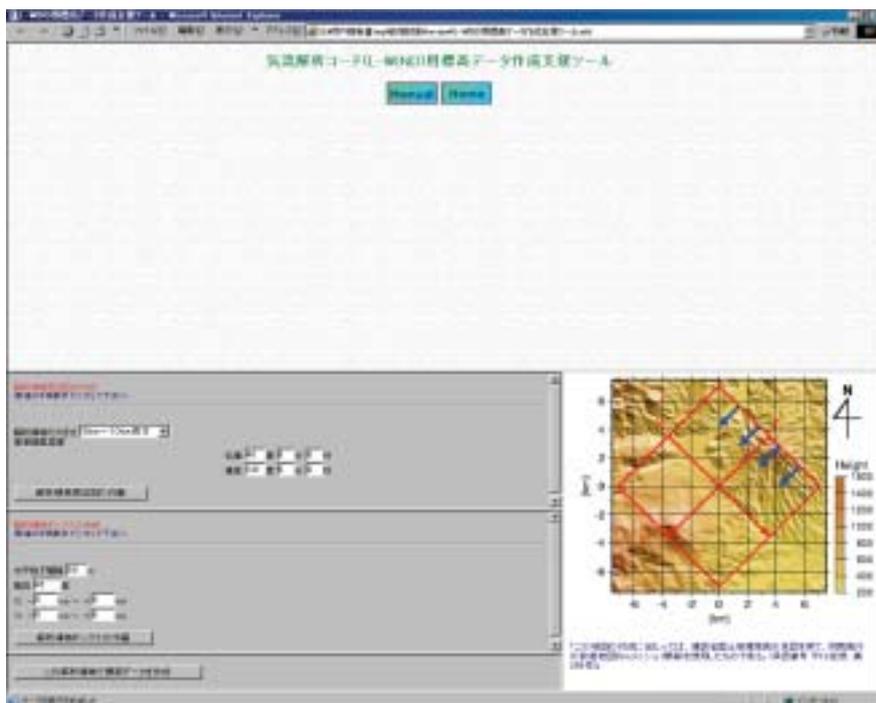


図3-1-1 L-WIND用地形データ作成のためのプリプロセッサ

表面で与えることで考慮した。

また、地表面近傍には乱流境界層が発達することから、乱流拡散を精度よく予測することが重要となる。当所では、風況場予測に対し、境界条件の設定方法等を工夫した改良型のk-ε乱流モデルを新たに開発し、L-WINDに組み込んだ。本乱流モデルの特長として、地表面近傍における乱流統計量の挙動を精度よく再現できることや計算負荷が小さいことが挙げられる。

### 3-1-2 L-WIND による気流解析例

L-WINDの解析精度を確かめるために、風洞実験や観測結果との比較検討例を蓄積してきた。まず、2次元尾根や3次元孤立峰により形成される理想的な地形を対象とした風洞試験との比較からL-WINDの基本的な特性を把握し、実地形を対象とした風洞試験から複雑地形に対する予測精度を検証した。

ここでは、理想形状を対象とした風洞実験との比較の一例として、二つの尾根状地形から形成される局所風況場を対象とした風洞実験との比較結果を以下に示す。なお、風洞試験の内容については第4章を参照されたい。L-WINDで得られた地形周りの平均風速ベクトルを図3-1-2に示す。ここで $U_{ref}$ は、流入部上空風速を示す。解析において、地形の起伏に伴い、急変する流動場が得られている。風速分布および変動速度の標準偏差を、風洞実験結果と比較して図3-1-3に示す。図から明らかなように、境界層のはく離、尾根と尾根の間に形成される逆流領域、さらに尾根の後流域を含む解析領域全体において、解析結果と風洞試験結果は良い一致を示す。とくに、変動速度についても、L-WINDの現象再現性は良好であることが確認できる。これらの結果から、本解析コードが、風洞

試験での局所風況を高い精度で再現していることがわかる。実地形を模擬した模型を対象とした風洞試験との比較の一例として、平均風速の鉛直分布に関する、九州試験線（愛野橋線、詳細は第4章）の風洞試験との比較について述べる。図3-1-4に風洞試験の地形模型を示す。解析で得られた風況を図3-1-5に、鉛直風速分布の比較を図3-1-6に示す。地表面近傍を含む境界層全域において、定量的にも良い一致が見られ、L-WINDが、実際に存在する複雑な地形においても、風洞試験での風況場をよく再現することがわかる。

L-WINDを実設計に用いる際には、内陸の山岳部などでは、解析領域の流入部を起伏の大きな箇所に配置せざるを得ない状況になる。そこで、電力各社や気象官署などの風観測地点に対する気流解析を行い、解析結果と実測値の比較から実地形での解析精度、適用性および課題を検討した。内陸部での解析の一例として、中部地方山岳部（図3-1-7参照）を対象に行った観測値と解析結果との比較を図3-1-8、図3-1-9に示す。図から明らかなように、地点①と地点②で得られる平均風速の相関に着目すると、L-WINDで得られた増速率2.35と観測で得られた増速率2.38との差は、僅か1%程度であり、内陸部であっても、流入部が比較的平坦でかつ増速する地形では解析と実測が良く一致することがわかる。しかし、地点①と地点③の相関に見られるように、内陸部で流入部が平坦でも減速する地形の場合あるいは平坦な地形の箇所に流入部を設定できない場合には、L-WINDと実測との間に有意な差が生じる。実測値自体に風向、風速比に激しい日変化が現れ、解析においても流入風向、解析領域の取り方により、結果が急変することから、このような条件下での風速の定量的な評価は難しく、L-WINDの適用性を検討する上で留意する必要があるといえる。

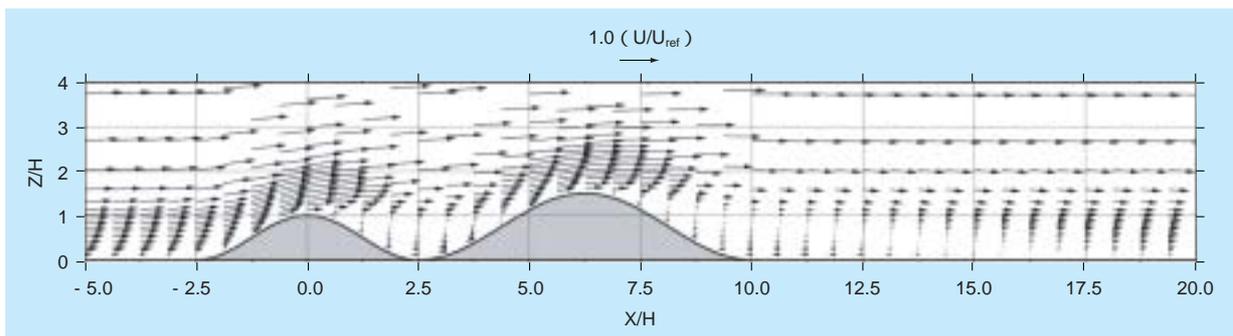


図3-1-2 地形周りの平均風速ベクトル

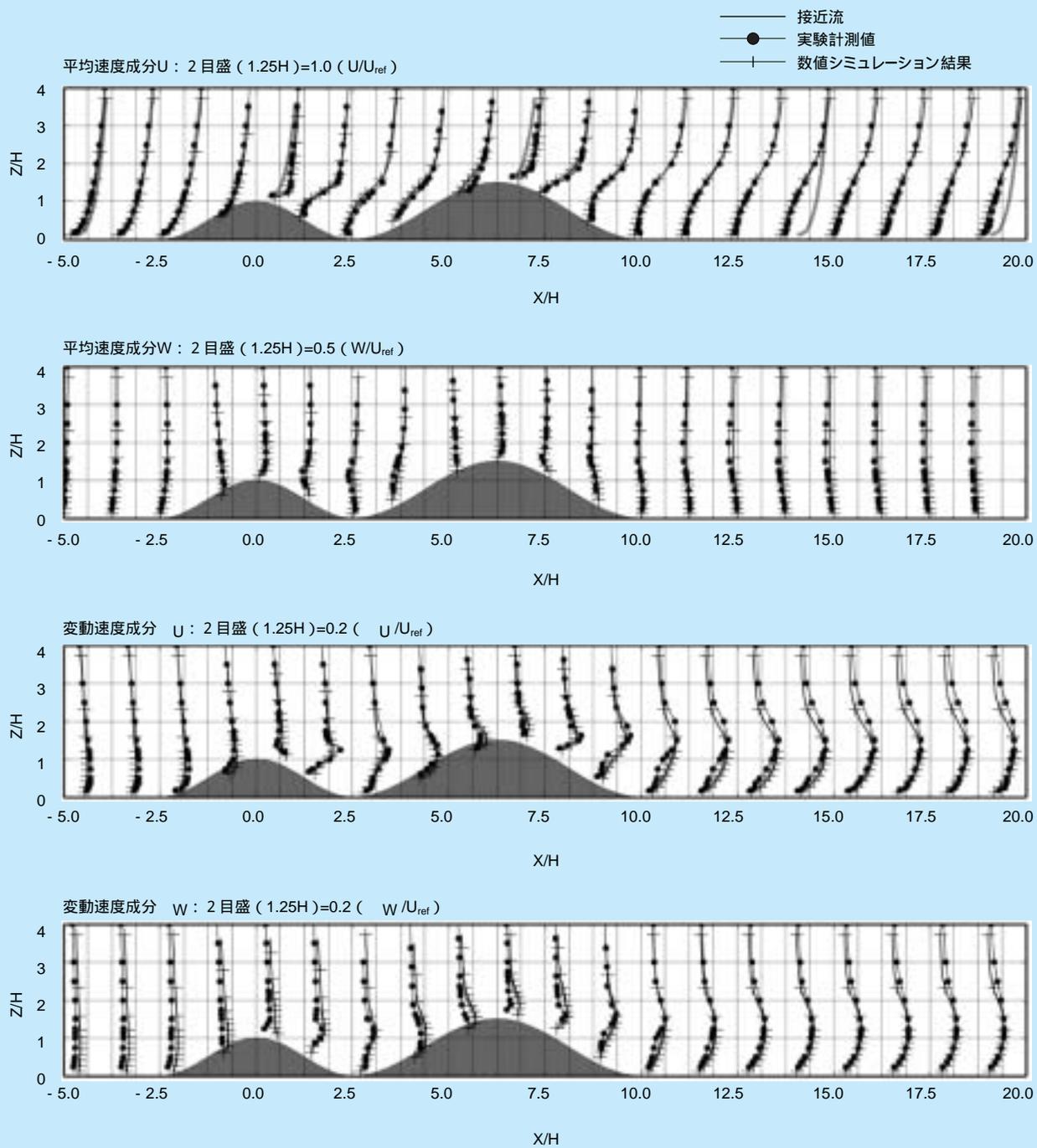


図3-1-3 解析結果と風洞実験結果との比較



図3-1-4 風洞実験の地形模型

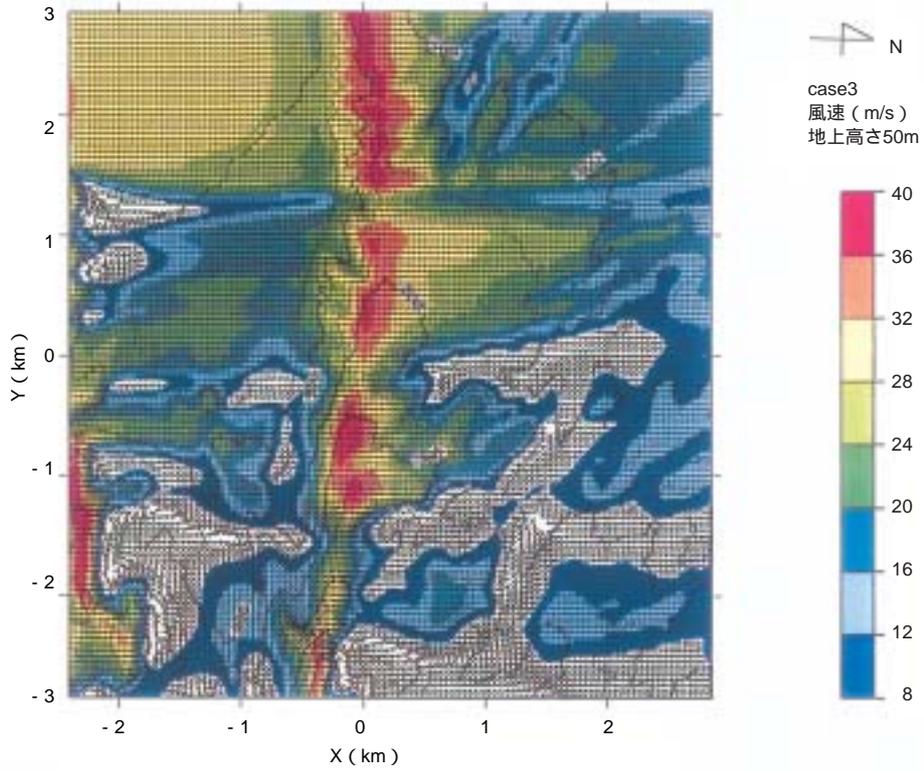


図3-1-5 解析結果

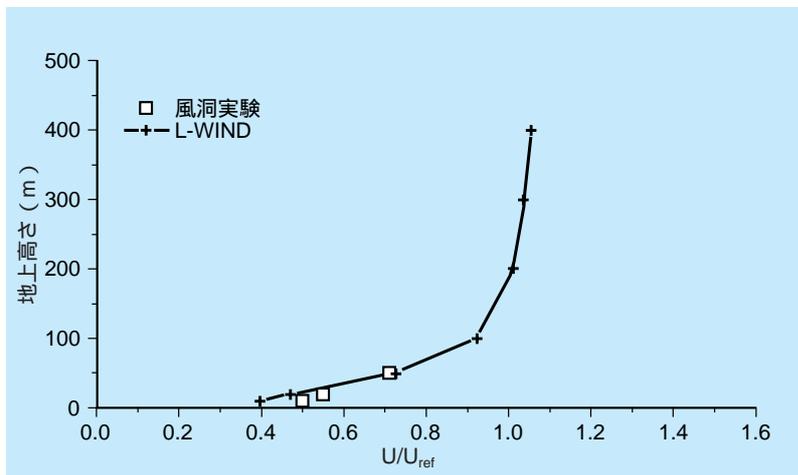


図3-1-6 平均風速の鉛直分布

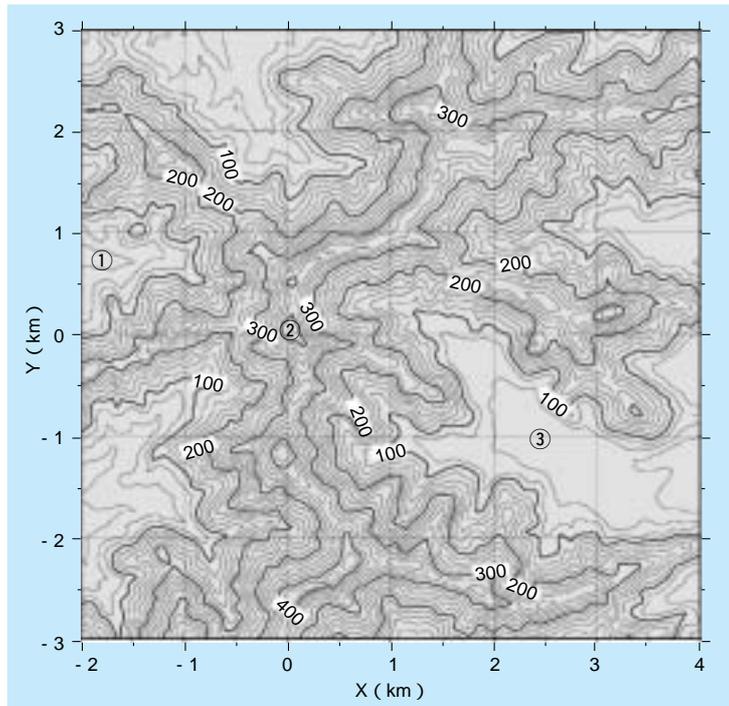


図3-1-7 検討対象地点（中部地方山岳部）

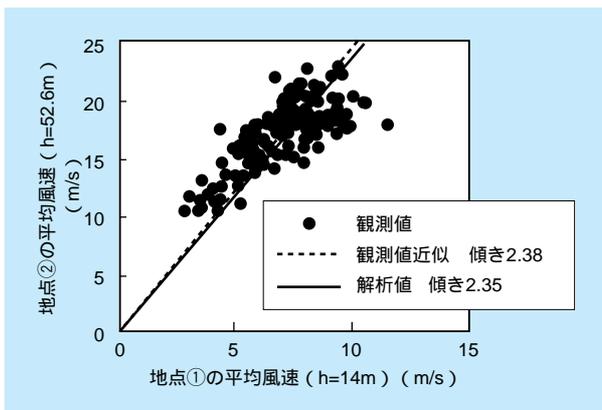


図3-1-8 地点①—②間の平均風速の関係

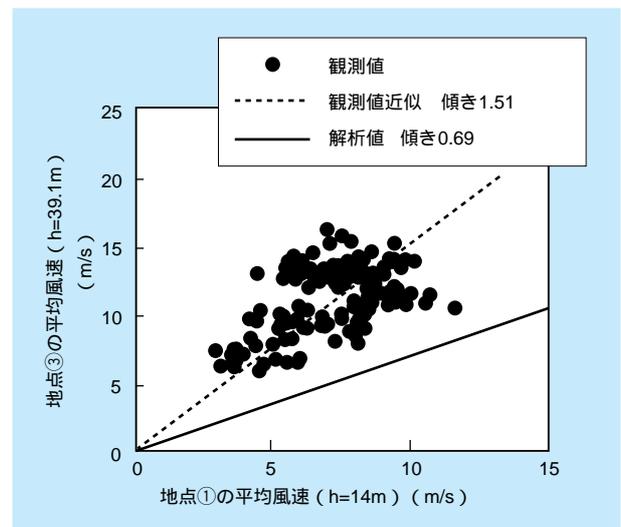


図3-1-9 地点①—③間の平均風速の関係

### 3-1-3 まとめ

3-1では、3次元気流解析コード「L-WIND」の概要を紹介した。風洞実験や観測結果との比較検討例から、L-WINDが、通常の風洞実験に代わり、複雑地形上での局地風の平均風速と変動量の予測が十分可能な『数値風洞』であることを示した。

ただし、定量的に満足する結果を得るためには、かなり細かな格子が必要であり、実設計への応用を踏まえ、今後は計算の効率化を進めていく予定である。

また、観測値との比較において、山や尾根の後ろなどの下り勾配斜面では、計算結果と観測値とのかい離が見られるケースがあった。これは、気圧や気温の分布に伴う空気密度の効果によるものと考えられ、強風時を想定した密度、温度一定の解析と実際の気象現象下で見られるおろし風等の特性との違いが現れたためと考えられる。当所では、このような風況場の再現などに向けた空気密度、雲や雨モデルあるいは地表面の熱収支などを導入した局地的な気象現象の解明のためのシミュレーションコードの開発にも着手している。

## 3 - 2 増速率の簡易評価ツール k1-adviser

以下、k1-adviserの算出概要を簡単に紹介する。

### 3-2-1 はじめに

地表面付近を吹く風は、地形の凹凸や地表面粗度の影響を受けて、増速したり減速したりする。地形による風の増減速効果を定量的に評価するツールとして、前節で紹介したL-WINDがあるが、解析に長時間を要するため、現時点では実用的とは言い難い。そこで、地形による風の増減速効果のうち、増速に絞って、増速率を簡易に評価できるツールとして、k1-adviserを開発した。ここでは本ツールの概要および評価事例を紹介する。

### 3-2-2 k1-adviserの概要

k1-adviserは、10km四方程度の領域内にある小地形による風の増速率を算定するツールである。図3-2-1のように、対象地点の緯度、経度を入力するだけで、北方向を0度とし359度まで1度ピッチで各方向の増速率が図3-2-2のように算定できる。また、10度ピッチで各方向の地形の縦断図が図3-2-3のように作成される。

#### (1) 増速率データベース

斜面による増速率は、2次元崖状地形（斜面勾配5度～60度、5度ピッチ）におけるL-WINDの解析結果を採用し、データベースとしている。増速率の図は、第2章の図2-3-1～図2-3-3を参照していただきたい。

#### (2) 地形データ

国土地理院発行の50mメッシュ数値地図より、対象地点の北方向を0度として0度から359度まで1度ピッチで求めた半径方向10km範囲の標高を、内挿により半径方向に50mピッチで求め直す。さらに、細かな地形の凹凸をならし水平距離が数百m規模の斜面を評価できるように、スムージング操作を30回行ったものを地形データとして、斜面の決定に用いている。

#### (3) 斜面の分類

(2)で求めた地形データから、勾配1/10000を基本として上り斜面、下り斜面、平坦地を判定する。

K1-Adviser (Ver. 3.0) への入力

(1)対象地点の緯度 北緯  度  分  秒  
東経  度  分  秒

(2)K1v3.0のフォルダ

(3)数値地図データを収めたフォルダ

(4)あらかじめ設定された定数  
鉄塔高さ =  m  
鉄塔の基準高さ/鉄塔高さ =

電力中央研究所

図3-2-1 k1-adviser入力画面

K1-adviser Ver. 3.1からの出力

電力中央研究所

図3出力用のファイル-caloss.ncが作られています。ポストスクリプト・ファイルの図3専用ソフトを用いて、対象地点の地形を出力し、参照することができます。

角度	K1値	平均K1値									
0	1.88	1	2.00	2	2.00	3	2.00	4	2.00	004- 2	1.87
5	2.00	6	2.00	7	2.00	8	2.00	9	2.00	3- 7	2.00
10	2.00	11	2.00	12	2.00	13	1.87	14	1.87	8- 12	2.00
15	2.21	16	2.20	17	2.29	18	1.90	19	1.90	13- 17	2.09
20	1.81	21	1.90	22	1.90	23	1.89	24	1.89	18- 22	1.90
25	1.88	26	1.87	27	1.86	28	1.95	29	1.98	23- 27	1.88
30	1.85	31	1.81	32	1.80	33	1.80	34	1.79	28- 32	1.82
35	1.76	36	1.76	37	1.77	38	1.76	39	1.56	33- 37	1.79
40	1.95	41	1.94	42	1.93	43	1.93	44	1.49	38- 42	1.90
45	1.71	46	1.71	47	1.63	48	1.90	49	1.59	43- 47	1.68
50	1.37	51	1.36	52	1.21	53	1.21	54	1.59	48- 52	1.35
55	1.54	56	1.52	57	1.54	58	1.81	59	1.64	53- 57	1.46
60	1.82	61	1.82	62	1.80	63	1.81	64	1.50	58- 62	1.80
65	1.90	66	1.90	67	1.45	68	1.44	69	1.44	63- 67	1.57
70	1.44	71	1.00	72	1.00	73	1.00	74	1.00	68- 72	1.28
75	1.00	76	1.00	77	1.00	78	1.00	79	1.00	73- 77	1.00
80	1.00	81	1.00	82	1.00	83	1.00	84	1.00	78- 82	1.00
85	1.00	86	1.00	87	1.00	88	1.00	89	1.00	83- 87	1.00
90	1.00	91	1.00	92	1.00	93	1.00	94	1.00	88- 92	1.00
95	1.00	96	1.00	97	1.00	98	1.00	99	1.00	93- 97	1.00
100	1.00	101	1.00	102	1.00	103	1.00	104	1.00	98- 102	1.00
105	1.00	106	1.00	107	1.00	108	1.00	109	1.00	103- 107	1.00
110	1.00	111	1.00	112	1.00	113	1.00	114	1.00	108- 112	1.00
115	1.00	116	1.00	117	1.00	118	1.00	119	1.00	113- 117	1.00
120	1.00	121	1.00	122	1.00	123	1.00	124	1.39	118- 122	1.00
125	1.29	126	1.30	127	1.30	128	1.30	129	1.30	123- 127	1.34
130	1.52	131	1.52	132	1.52	133	1.34	134	1.34	128- 132	1.37
135	1.34	136	1.34	137	1.57	138	1.57	139	1.58	133- 137	1.39
140	1.58	141	1.59	142	1.59	143	1.59	144	1.79	138- 142	1.58

図3-2-2 k1-adviser出力画面 1

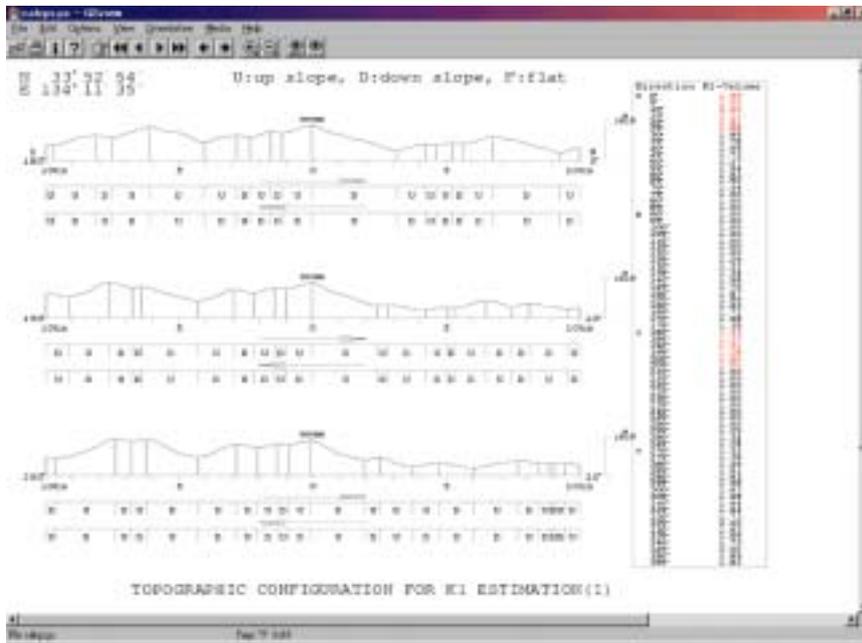


図3-2-3 k1-adviser出力画面 2

(4)  $k_1$ の決定

a)  $k_1$ を単一斜面で評価する場合

建設地点の風上側の地形を、図3-2-4に示すような2次元崖状地形に置き換え、次に示す値を読み取る。

- 1)  $L_z$ : 斜面の高さ [m]
  - 2)  $L_x$ : 斜面の水平距離 [m]
  - 3)  $x$ : 斜面頂部から建設地点までの水平距離 [m]
- ただし、建設地点が斜面頂部より風上側にある場

合は、マイナスとする。

4)  $z$ :  $x < 0$ では、基準高さ  $Z_R$  [m]

$x \geq 0$ では、稜線から基準高さ位置までの高さ [m] 読み取った値から、上り斜面の勾配  $\nu$  [°] および、 $x/L_x$ 、 $z/L_z$ を算出し、増速率図から  $k_1$ を算定する。

ただし、建設地点が斜面頂部より風下側に位置し、基準高さ位置が稜線より低い場合には  $k_1=1.0$ とする。

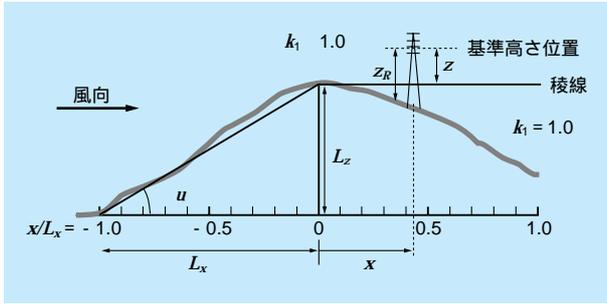


図3-2-4 斜面形状を表す記号

b)  $k_1$ を複数の斜面で評価する場合

図3-2-5に示すとおり斜面の間を谷埋めし、複数の崖状地形に置き換え、原則として直近の2つの斜面の増速率の積により $k_1$ を算定する。

c) その他

風上側平均標高が高い場合や風上側地形が鉄塔の基準高さ位置よりも高い場合(図3-2-6参照)は、遮蔽効果

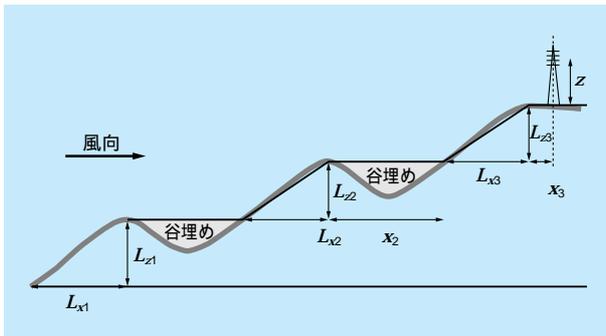


図3-2-5 谷埋めによる崖状地形への置き換え

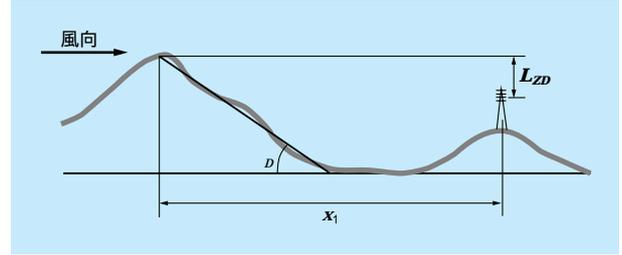


図3-2-6 風上側地形の遮蔽効果

などにより直近の地形の増速効果を受けないものとして $k_1=1.0$ としている。

### 3-2-3 $k_1$ 評価事例

図3-2-7に日光の気象官署の地点で、 $k_1$ -adviserとL-WINDの解析結果を比較したものを示す。前述のように $k_1$ -adviserを用いると、1度ピッチの増速率が算定されるが、図3-2-7のように方位による増速率の変動が大きく、1度ピッチの $k_1$ をそのまま設計風速算定に用いるのは適当でないと考えられる。実際の風は3次元的な地形の影響を受けており、設計風速算定に用いる $k_1$ としては対象とする方位1度の $k_1$ だけでなく、隣接する方位の $k_1$ も考慮するようにした。具体的には

- ・  $k_1$ -adviserにより算出された $k_1$ を、両隣の値との移動平均によるスムージングを5回行う。
- ・ 対象方位 $\pm 2$ 度(計5度)からスムージング後 $k_1$ の最大値をとり、更に0.05単位に切り上げた値を $k_1$ とする。

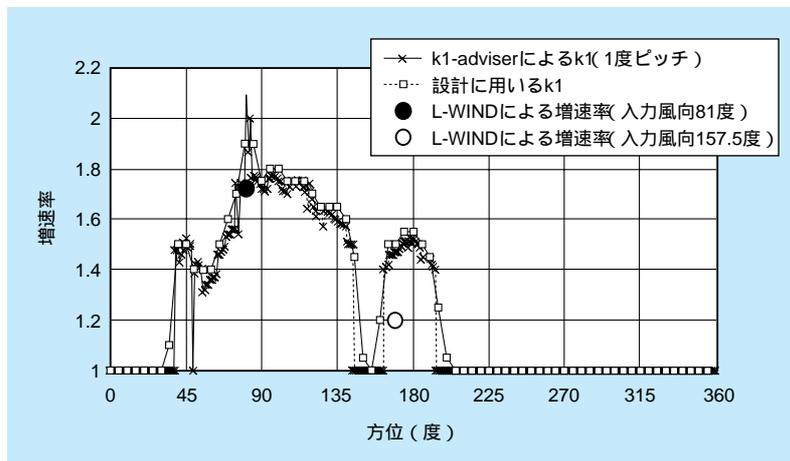


図3-2-7  $k_1$ とL-WINDによる解析結果(官署日光)

## 3-3 ガスト応答解析コード

風に対する鉄塔および架渉線の動的挙動の把握、等価静的風荷重の精度検証および動的応答解析を用いた設計法の確立を目的として、有限要素法<sup>(6)</sup>に基づく鉄塔・架渉線連成系の周波数応答解析および時刻歴応答解析コードを開発した<sup>(6)~(10)</sup>。ここでは、動的風応答解析コードの理論的な背景、周波数応答解析と時刻歴応答解析の特徴および計算アルゴリズム、解析における留意点などを述べる。さらにその適用例として、四国試験線での観測結果に対するシミュレーション結果<sup>(3)</sup>を示す。

### 3-3-1 各種解析手法の特徴

#### (1) 周波数応答解析

周波数領域における動的風応答解析の特徴は以下のとおりである。

- ① 風荷重の入力は、平均風速、変動風速のパワースペクトル密度、変動風速のクロススペクトル密度のみ（クロススペクトル密度は、ココヒーレンスとパワースペクトル密度を用いて作成しても良い）
- ② 変位、断面力、応力などの出力は、パワースペクトル密度あるいはクロススペクトル密度であり、それらより応答の分散、共分散、相関係数を求めることができる。また、応答が狭帯域の定常ガウス過程に従うとすれば、応答の分散値とピークファクタにより最大応答値の期待値が算出できる
- ③ 変動風速に対する応答は線形解析である。したがって、乱れの強さが大きい場合には誤差を生じる可能性がある
- ④ 定常応答のみ計算可能である
- ⑤ 風のように入力不規則変動する場合に対して、その応答特性の統計的性質を明らかにする場合に有利である

#### (2) 時刻歴応答解析

時間領域における動的風応答解析の特徴は、以下のとおりである。

- ① 風荷重は、時刻歴波形であり、解析モデルの各節点あるいは領域毎に、検討すべき風の特徴を有する波形

を作成する必要がある

- ② 各節点の変位および部材の断面力、応力は時刻歴波形として出力される
- ③ 線形解析・非線形解析（幾何学的非線形、材料非線形）のいずれも計算可能である
- ④ 非定常性を有する外力に対しても計算可能である（波形がわかっている場合のみ）
- ⑤ 風荷重条件のわかっている特定の解析条件下で、少数の解析ケースを実施するのに適しているが、統計的性質を明らかにするためには多くの解析ケースが必要である

### 3-3-2 動的応答解析手法の理論的背景

#### (1) 周波数応答解析手法の概要

風力を準定常仮定を用いてモデル化すれば、解くべき運動方程式は次式で与えられる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{X+x\} = \left\{ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} C_D A U + u - \dot{x} \right\} \quad (3-3-1)$$

ここに、 $[M]$ ：質量マトリックス

$[C]$ ：減衰係数マトリックス

$[K]\{X+x\}$ ：変位 $\{X+x\}$ における接線剛性マトリックス

$$\left\{ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} C_D A U + u - \dot{x} \right\} : \text{風力ベクトル}$$

なお、 $\rho$ ：空気密度、 $C_D$ ：風力係数、 $A$ ：受風面積、 $U$ ：平均風速、 $u$ ：変動風速、 $X$ ：平均風速による変位、 $x$ ：変動風速による変位である。

周波数応答解析は、通常線形性を前提としているため、外力を線形化する必要がある。したがって式(3-3-1)の右辺を展開し2次の微小項を省略することにより、平均成分に対するつり合い方程式と変動成分に対するつり合い方程式に分けて解析を行うことになる。ただし、架渉線は可とう性にとむ構造物であるため、工学的に十分な精度で解を得るために、平均風速による架渉線変位は大変形を考慮し、変動風速による動的荷重作用時は微小変

位として解析することとしている。

式(3-3-1)から変動成分に対するつり合い方程式に変形し、フーリエ変換により周波数領域に変換すると以下のように表される。

$$[S_x(f)] = [H(f)]^* I(f) [S_u(f)] I(f) [H(f)]^T \quad (3-3-2)$$

ここに、

$[S_x(f)]$ : 変動変位のクロススペクトルマトリックス

$[S_u(f)]$ : 変動風速のクロススペクトルマトリックス。ただし、非対角項は指数型のコヒーレンスを用いて設定。

$[H(f)]$ : 周波数応答関数

$I(f)$ : 風速から風力への変換を表すマトリックス  
 $f$ : 周波数[Hz]

なお、式中の上付き\*は共役複素数、上付きTは転置を表す。

次に最大応答値の期待値を算出する。 $j$ 自由度における最大応答値は次式で算定することができる。

$$X_{\max,j} = X + g_j \quad (3-3-3)$$

ここに、 $g_j$ はピークファクターを表し、応答が定常確率過程に従うものとするれば、次式で与えられる。

$$g_j = \sqrt{2 \ln \left( \frac{0.577}{T} \right) + \frac{0.577}{2 \ln \left( \frac{0.577}{T} \right)}} \quad (3-3-4)$$

$$j = \frac{\int_0^T S_{xj}(f) df}{\int_0^T S_{xj}(f) df} \quad (\text{期待振動数}) \quad (3-3-5)$$

$$T (=600\text{sec}) \quad (\text{評価時間})$$

## (2) 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析では、外力項を線形化せず振動解析においても幾何学的非線形性を考慮するものとした。本解析コードでは、平均風速に対する応答は周波数応答解析と同様に事前に計算されるものとしたため、解くべきつり合い方程式は式(3-3-6)で与えられる。本方程式の解法として、これを増分形式に書き改め、積分にNewmarkの法、収束計算にはNewton-Raphson法を用いた<sup>(1)</sup>。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K](X+x) = \left\{ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} C_D A (U+u - \dot{x})^2 - U^2 \right\} \quad (3-3-6)$$

## 3-3-3 解析評価の手順

鉄塔・架渉線連成系の風に対する動的風応答解析は、

- ① 自重によるつり合い解析
- ② 平均風速による静的解析
- ③ 変動風速に対する周波数応答解析あるいは時刻歴応答解析

の手順で行われる。このうち①、②については、幾何学的非線形性が考慮される。ここではこれら一連の解析を実施するにあたって、十分な精度を確保するためのモデル化法について述べる。

### (1) 要素の選択

送電鉄塔・架渉線連成系の解析モデルは、鉄塔には立体はり要素、架渉線には立体トラス要素を用いて作成する。大変形解析となるため、幾何学的非線形性を考慮できる要素を選択する。

### (2) 要素分割・解析モデルの作成

解析モデルの作成にあたっては、適切な解が得られるよう、十分な数の要素を配置するなどの配慮が必要である。なお、これまでの鉄塔・架渉線連成系における解析実績から、解析モデル作成、要素分割の目安として以下の点が挙げられる。

鉄塔：解析目的が個々の部材強度の評価であれば、図面に忠実な立体骨組モデルを用いる必要がある。立体骨組モデルは、1部材1要素として、はり要素、トラス要素を用いて作成する。解析目的が動的特性の把握であれば等価ビームモデルを用いてもよい。等価ビームモデルの作成法については、文献<sup>(12)(13)</sup>を参照されたい。

架渉線：1径間あたり20以上のトラス要素が必要である。初期の節点座標および水平張力はケーブル理論式によりある程度の精度であらかじめ設定しておかなければならない。

がいしおよび架線金具：がいしについては、架渉線と同

様に、幾何学的非線形性が考慮できるトラス要素を用い、3要素程度の分割数とする。また架線金具、ジャンパー線等は、はり要素またはトラス要素としてモデル化するが、取り付け点付近の要素や節点に、重量や受風面積による効果を適切に付加して、それらを省略してもよい。

### (3) 境界条件・荷重条件

境界条件と荷重条件については、構造物の力学的特性、数値解析法の特性を念頭におき、各節点ごとに設定するのが基本である。また、対象部位が柔らかな荷重伝達経路を有する場合、収束が悪くなり、精度低下の原因となるので注意が必要である。さらに、境界条件は剛体変位や不安定な状態を発生しないように配慮するものとする。

### (4) 風荷重の設定

#### 1) 周波数応答解析

入力は、気流シミュレーション（あるいは風洞実験、現地観測）で得られた平均風速と変動風速の乱流統計量に基づくパワースペクトル密度およびコヒーレンスである。なお、スペクトル密度の設定において乱れのスケールおよびディケイファクタが必要な場合は、周辺地形の状況を考慮して「送電用鉄塔の風荷重指針（案）・同解説」<sup>(4)</sup>あるいは「日本建築学会荷重指針・同解説」<sup>(5)</sup>を参考にするとよい。

#### 2) 時刻歴応答解析

入力は、気流シミュレーション（あるいは風洞実験、現地観測）で得られた平均風速と変動風速の乱流統計量を十分考慮した風速の時刻歴波形である。風速の時刻歴波形の作成には、多次元自己回帰モデルを基礎とした手法<sup>(6)</sup>などを利用することができる。本手法においても、基本的に周波数応答解析と同様の風に関する乱流統計量が必要である。

### (5) 解析の手順

鉄塔・架渉線連成系の風応答解析は、幾何学的非線形性を考慮した自重解析を実施して初期つり合い状態を定めた後、平均風速による静的解析と変動風速による動的解析を行い、それらの和から変位、断面力、応力、ひずみを評価する。

#### 1) 自重解析

架渉線のモデル化においては、無風時水平張力、架渉線長あるいは弛度から放物線近似（カテナリー近似でもよい）して定めた座標を設定し、幾何学的非線形性を考慮した自重解析により正確なつり合い位置を定める。

#### 2) 平均風速による静的解析

平均風速による静的解析は、自重解析により求められる座標および剛性を用いて幾何学的非線形性を考慮して実施する。

#### 3) 変動風速による動的解析

変動風速による動的解析は、時刻歴応答解析、周波数応答解析のいずれかの手法で実施する。ただし、周波数応答解析は、線形挙動のみを対象とするため、乱れの強さが大きい場合に、外力における変動風速の2乗項を無視した影響が表れ、精度が低下する恐れがあるので注意を要する。

### 3-3-4 四国試験線における風応答シミュレーション

上記2種類の解析手法を用いて、四国試験線の観測結果に基づく風応答シミュレーションを実施し、精度の確認を行った。今回シミュレーションの対象とした観測データは、周波数応答解析では台風9426号（12:50-13:00、南風）、台風9514号（5:33-5:43、南風）、台風9810号（20:29-20:39、南風）の3台風、時刻歴応答解析では、9810号（20:29-20:39、南風）とした。このうち台風9810号のデータは、四国試験線において最大風速（No.1鉄塔塔頂ベーン型風速計において平均風速33.0m/s、最大瞬間風速53.0m/sを記録）を記録したデータである。

入力風については、各鉄塔に設置されているベーン型風速計の観測データから平均風速、平均風向、乱れの強さ、乱れのスケールを算定し、径間内はそれらの線形内挿とした。また変動風速のパワースペクトル密度にはカルマン型を仮定した。

解析は、いずれの解析コードにおいても、重力のみが作用する初期のつり合い解析、平均風速が作用する静的解析（幾何学的非線形性を考慮）、変動風速が作用する動的解析（時刻歴応答解析のみ幾何学的非線形性を考慮）の3段階で行った。なお減衰定数は鉄塔については、観測結果に基づき1次固有振動数に対して0.015（剛性比例型）、架渉線については0.2Hzに対して0.004（剛性比

例)とした。また時刻歴応答解析では、時間刻み0.05秒、6000ステップとし、変動風速の発生には岩谷の方法<sup>(6)</sup>を用いた。

周波数応答解析結果の一例として、図3-3-1に台風9810号支柱材A脚基部のパワースペクトル密度の観測結果との比較図を示す。同図よりスペクトルのピーク周波数あるいは各ピークの大きさの傾向は観測値とよく対応しており、四国試験線の振動特性を再現している。

また、基部支柱材軸力の計算値と観測値との比較図を図3-3-2、図3-3-3に示す。これらの図より径間内の風の情報が不明なこと、付帯設備の風圧荷重を無視したことなどを考慮すれば、シミュレーション結果は概ね観測結果を再現しているものと考えられ、工学的に十分な精度を有していることを確認した。

なお、「送電用鉄塔の風荷重指針(案)・同解説」<sup>(4)</sup>では、より精緻な設計ができるように、動的応答解析によって設計応力度を定めることができるものとした。ここでは、風荷重に対する応答解析に、十分実績を有するか、または設計者が精度を検証した解析コードを用いることとしており、その一つの実績として上述した解析コードを付録として示している。

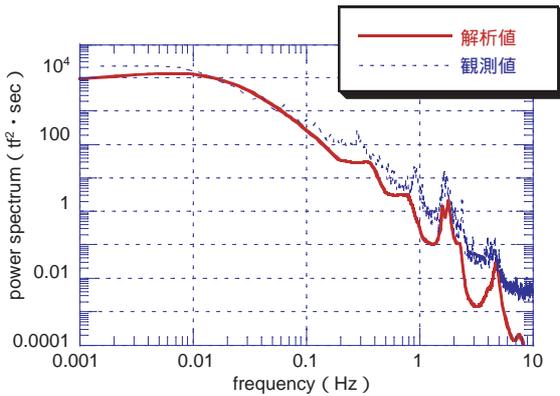


図3-3-1 支柱材基部軸力のパワースペクトル密度

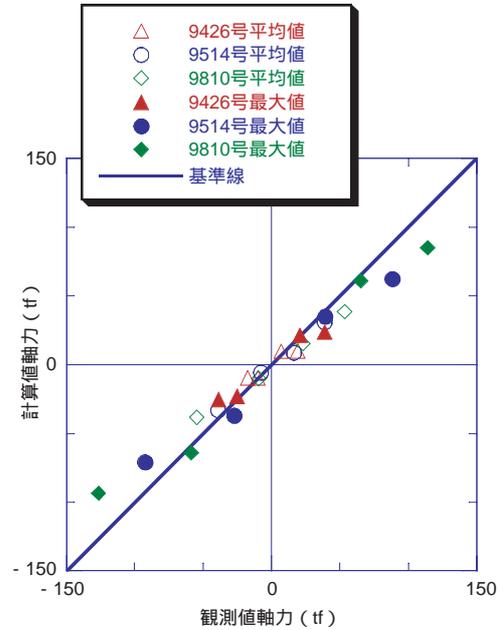


図3-3-2 周波数応答解析結果と観測値との比較

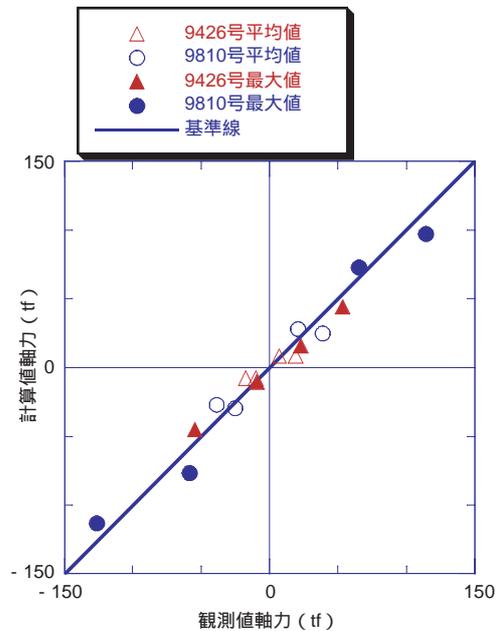


図3-3-3 時刻歴応答解析結果と観測値との比較

## 3 - 4 等価静的風荷重評価ツール

等価静的風荷重はガスト影響係数により、変動風速に起因する風力の影響を考慮するもので、平均風速による風力による応答値にガスト影響係数を乗じることで最大応答値が求められる。風の時間空間特性と鉄塔あるいは架渉線の振動特性をもとにガスト影響係数を適切に定めれば、鉄塔の共振効果と規模効果を同時に考慮した合理的な風荷重評価が可能となる。ただし、新たに乱れ強さや乱れのスケールのような乱流統計量や鉄塔の固有振動数等を入力項目として加えた等価静的風荷重の算定は、既往の静的風荷重算定<sup>17)18)</sup>に比べて煩雑である。さらにはその荷重に対する3次元立体骨組解析を実施することは、実務担当者にとって容易ではない。

そこで、鉄塔の応力計算がパソコンで十分処理可能な現状に鑑み、解析モデルの生成から、等価静的風荷重の算定、部材応力の算定までの一連の作業を可能にする3次元応力評価支援ツールを開発した<sup>19)</sup>。本プログラムは、ユーザー・インターフェイスをよくするための入力画面がVisual Basicで書かれており、読み込んだ数値データにもとづく鉄塔モデル生成部分、等価静的風荷重算定部分、応力解析部分、および図化出力部分はFORTRANで書かれている。

本ツールで実際の鉄塔設計が可能というわけではないが、鉄塔設計を支援するツール開発へ向けた一つのプロトタイプを提示するものである。以下にその概要を述べる。

### 3-4-1 等価静的風荷重評価ツールの概要

#### (1) 本ツールの特徴と手順

本ツールの特徴は以下のとおりである。

- 1) 典型的な塔体や腕金の結構をデータベース化しているため、ユーザーはこのデータベースから選択するのみで、様々な鉄塔の3次元モデルを容易に作成することができる。また結構データベースを追加することで、ユーザーのニーズに対応可能である。ここで作成した解析モデルは、動的応答解析にも活用できる。
- 2) 手計算レベルでは、多少の煩雑さが伴う等価静的風荷重を、鉄塔規模、径間長、電線線種あるいは水平角

などの架線形態、風向に応じて容易に計算することができる。

- 3) 有限要素法を用いた立体骨組解析を行うため、精度のよい応力評価が可能である。

本プログラムは、当初、耐風設計合理化研究の試設計などに活用し、鉄塔に作用する荷重、部材応力を評価することを目的として開発された。このため、基本的に入力項目は設計条件が決まっていることを前提としている。したがって、現状では既設送電線の耐風性の確認に活用できるものの、設計に活用できる汎用的なツールとするためには、結構データベースの充実と部材決定ルーチンの付加が不可欠である。

図3-4-1に本ツールの表紙を、図3-4-2に入力画面の一例を示す。使用方法としては、まず同図に示された「入力データ作成」をクリックし、入力データを作成する。入力データ作成が完了した後に、「解析モデル作成」、「風荷重計算」、「応力計算」を順次実行することにより、一連の構造解析が実行することができる。

#### (2) 入力データ作成および解析モデルの作成

入力画面は以下の16種類であり、図3-4-3に16種類の入力画面の相互関係を示す。

- ① 送電鉄塔の等価静的風荷重算定プログラム表紙
- ② 初期画面
- ③ 各種設計条件入力・基本条件入力画面
- ④ 塔体詳細入力・塔体セクション条件入力画面
- ⑤ セクション編集画面
- ⑥ パネル編集画面
- ⑦ パネル結構編集画面
- ⑧ 曲点結構編集画面
- ⑨ 腕金詳細入力・腕金パネル編集画面
- ⑩ 腕金編集画面
- ⑪ 塔体内結構編集画面
- ⑫ 塔体外結構編集画面
- ⑬ 架渉線・碍子・金具詳細入力
- ⑭ その他係数詳細入力・風力係数、応力分担率
- ⑮ 各係数、定数
- ⑯ 外力(風)編集画面



図3-4-1 送電鉄塔の等価静的風荷重算定プログラムの表紙

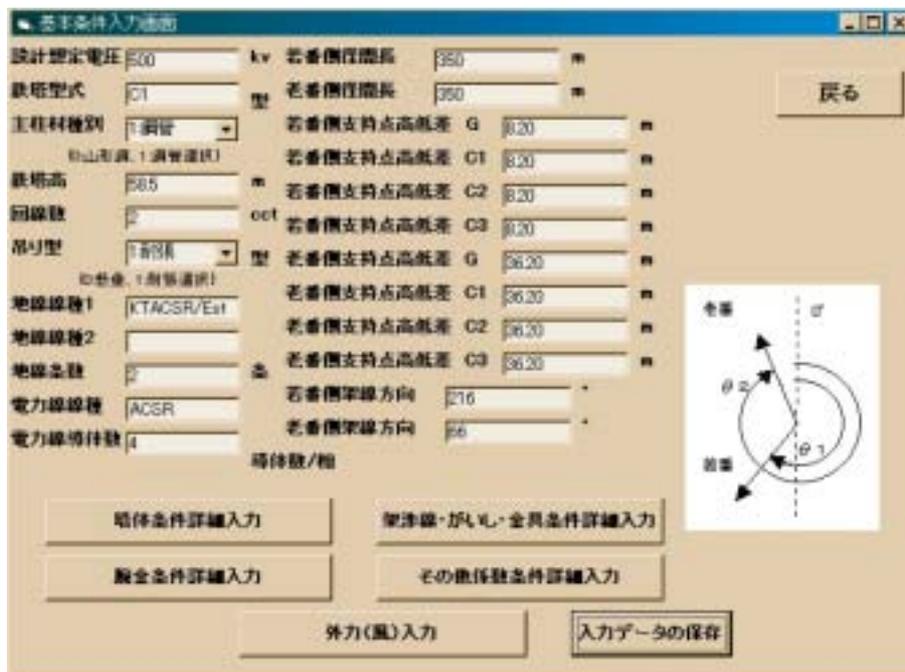


図3-4-2 入力画面の一例（各種設計条件入力・基本条件入力画面）

なお、③の基本入力画面から、  
 ( i ) 塔体、  
 ( ii ) 腕金、  
 ( iii ) 架渉線・がいし・金具、  
 ( iv ) 風力係数等、  
 ( v ) 外力（風）

の入力に分岐するようになっており、各々の入力を終了して他へ移る時は、②の画面へ戻る。

ユーザーは、各画面に示された入力項目について、数値を直接入力するか選択入力する。入力データの作成後、「解析モデル作成」をクリックすることにより、有限要素フォーマットとして解析モデルが構築される。出力フ

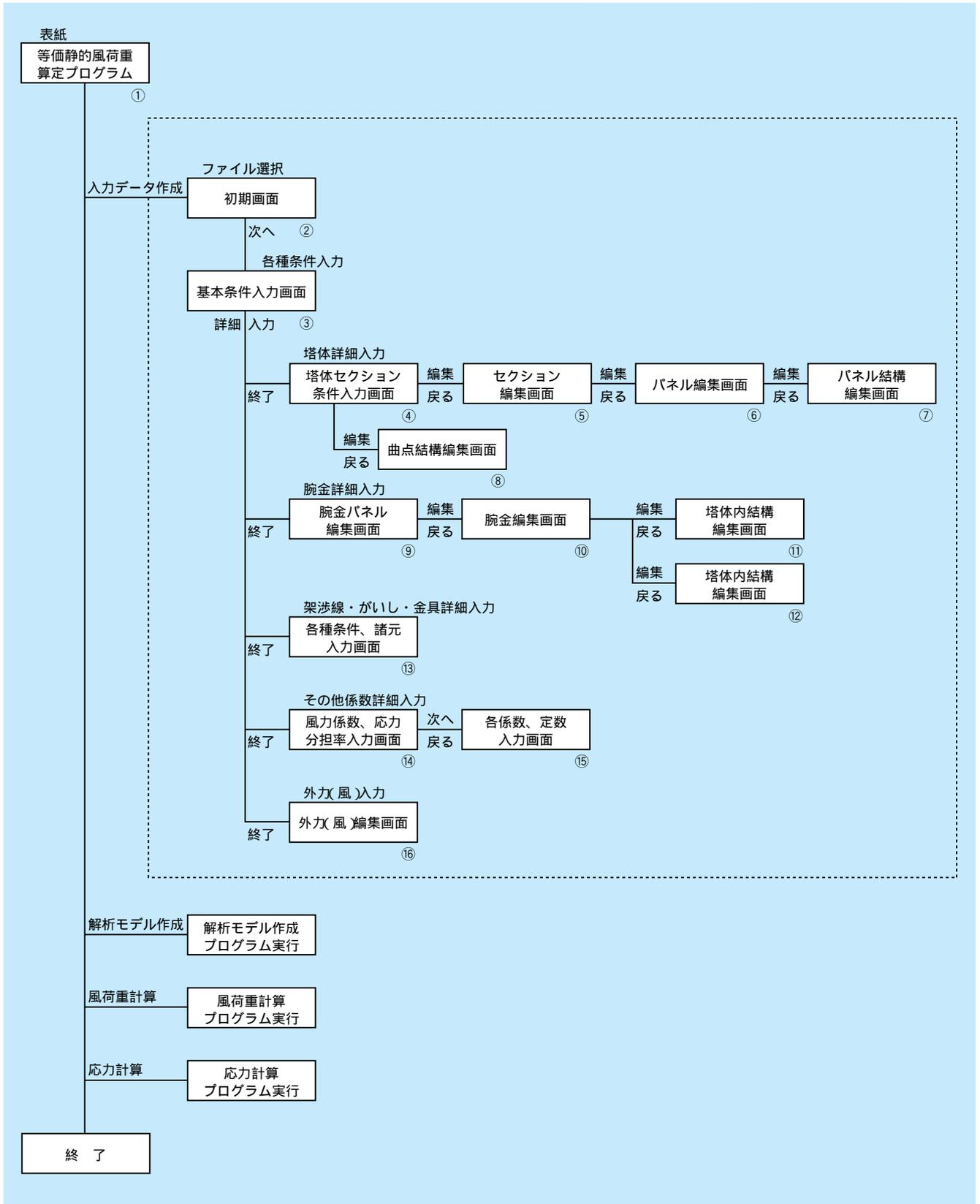


図3-4-3 入力画面相互の関係

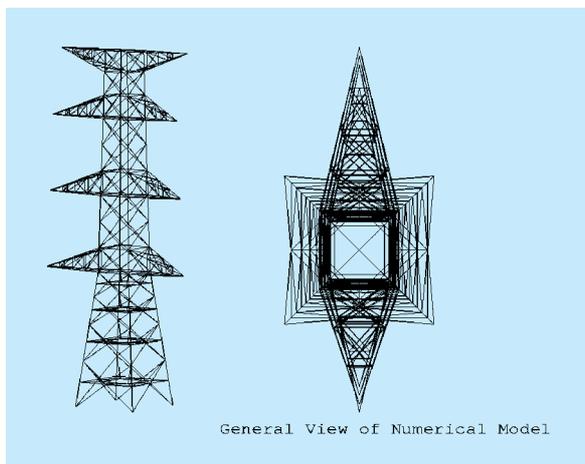


図3-4-4 解析モデルの作成例

ファイルは、model.txtである。解析モデルの作成例を図3-4-4に示す。

### (3) 等価静的風荷重の算定

「解析モデル作成」を実行した後、「風荷重計算」ボタンをクリックすることにより2-4で述べた等価静的風荷重が計算される。また、これらの荷重は構造計算に適用できるよう解析モデルに応じて適切に節点荷重として設定される。入力ファイルは、「解析モデル作成」で作成したmodel.txtである。出力ファイルは、wload.txtである。wload.txtには、節点情報と各節点に作用する荷重値が出力されており、次の応力計算の入力データファイルとなる。

### (4) 応力計算

「風荷重計算」を実行した後、「応力計算」ボタンをクリックすることにより各要素の発生応力、節点の変位が計算される。入力ファイルは、「風荷重計算」で作成したwload.txtである。出力ファイルは、stress.txt、calcps02.psである。stress.txtには各節点の変位、各要素の発生応力が出力され、calcps02.psには、鉄塔モデルの変位図、色分けした応力図が示されている。これにより鉄塔モデルの変位状況と発生応力を確認することが可能である。鉄塔モデルの変位図の例を図3-4-5に示す。

## 3-4-2 ま と め

以上、等価静的風荷重に基づく送電用鉄塔設計支援ツ

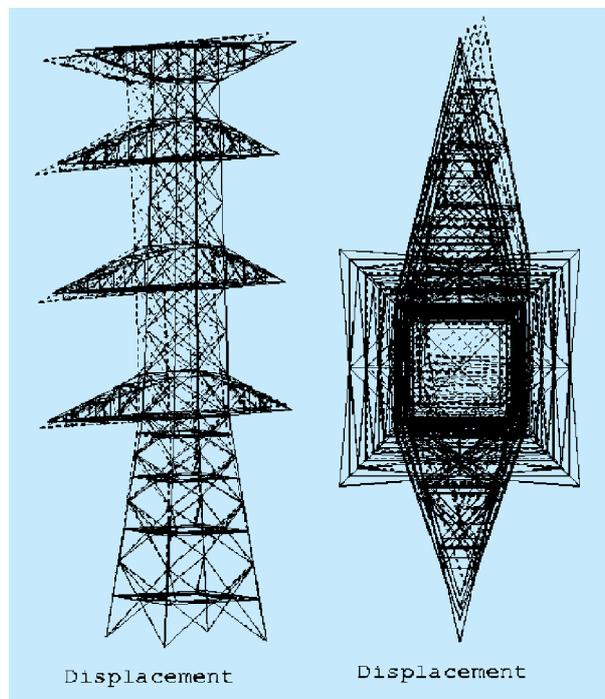


図3-4-5 塔体全体の変形図

ールとして開発したコンピュータプログラムの概要について述べた。本ツールの特徴を以下にまとめておく。

- 1) 3次元トラス構造の解析モデルの作成には労力を要するが、塔体のパネル結構、腕金の塔体内・外結構を分類し、適用例の多い結構パターンについて、自動生成機能をツールに付与することで、ツールの適用性を向上させることができる。本ツールにより作成したモデルは、そのまま動的応答解析にも利用できる。
- 2) 等価静的風荷重については、構造物の共振効果と規模効果を考慮したガスト影響係数法に基づき、鉄塔規模、径間長、電線線種あるいは水平角などの架線形態に応じて、自動的に荷重算定ができるツールを付属した。これにより手計算レベルでは、煩雑となる風荷重を容易に適切に設定することを可能とした。
- 3) 応力解析については、3次元解析であるが、極めて高速に処理可能である。解析時間は個人で使用する通常のパソコン（メモリー128MB、CPUクロック500MHz程度）の処理能力で十分であり、数10秒程度で図化出力まで終了することができる。

なお、今後の課題としては、適用事例を増やししながら、設計実務への適用可能なように、細部にわたり改良を加えていくことが挙げられる。

## コラム2：やまじ風

やまじ風は四国法皇山脈の北麓、愛媛県東部の三島市、川之江市、土居町一帯に、2月から10月にわたって出現する局地的な南よりの強風であり、岡山県の広戸風、山形県の清川だしと並んで日本3大局地風（または3大悪風）と呼ばれている。やまじ風は低気圧が朝鮮半島を横切って日本海に入った場合か、台風が四国西部を通過して日本海へ抜けた場合に発生し、低圧部へ吹き込む気流が法皇山脈を越え、平野部へ吹き降ろして局地的な強風となる。吉野（1975）によれば、10m/秒以上の強いものは4、5、6月には前者を原因とし、また、9、10月には後者を原因として生じることが多い。最大風速15m/秒のものは年に2～5回ある。

やまじ風の呼び名については、関口（1985）によりまとめられている。それによれば、南よりの強い風の呼び名にヤマジ、ヤマゼがあるが、この言葉が使われているのは、中国・四国・九州の西日本と大阪・和歌山以東、千葉・茨城までの太平洋岸の地帯である。分布の中心は使用例数から見て、広島・山口・愛媛の瀬戸内中西部を中心とする西日本であるとされている。やまじ風の強い伊予三島市では、市の北側にある豊受山頂の豊受神社西側に風穴があって、昔の人は、ここからやまじ風が吹き出すと考え、風穴神社として風神を祭った（吉野、1975）。この強い南風は、家屋の倒壊や農作物の風害など、各方面に被害を発生させる。このため、やまじ風の強い地域では耐風性の強い作物として、サトイモ、カンショ、シウウガなどが栽培されている（林、1985）。

やまじ風の特徴は秋山（1956）などによりモデル化されている。北側に瀬戸内海が開けた愛媛県東部の例で見ると、山脈の風下側（北側）でははじめ、北～北西の風で気温は低いですが、やまじ風が現れると、フェーン現象のために気温は上昇し、最後は全般に西よりの風になり、気温は下がること報告されている。

やまじ風は山脈の風下波動によるものと考えられている。吉野（1995）によれば、やまじ風、おろしなどの生じる地形条件と気象条件は以下のようにまとめられる（図1）。

- ・風上側の山脈（A）は、山頂が2～3並んでいるような山脈で、高さは1000mくらい、風下の斜面の傾斜は急（3/10）である。強風はこの山脈に直角に吹く。
- ・Aの山脈の風上側は平野ではなく、いわゆる山岳地帯（B）でそこに谷（C）が入っている。谷は山脈にほぼ直角に走る。風上側では、この谷の中を風が吹いて来て加速され、山脈を越す。
- ・風下は広い平野か、または水面（海面・湖面）である（D）。最大風速が起るのは山脈風下の山寄りの部分（E）である。
- ・気流はAの山脈の山頂で傘雲を生じる。土地の人は、これを風枕と呼ぶ（F）。
- ・山脈の風下では地表面からはね返る気流（G）（ハイドロリックジャンプ）を生じる。
- ・山越え気流は風下側で定常波（H）を生じる。これを風下波動または山岳波と呼ぶ。波頭の部分にはレンズ雲（J、K）ができてることが多い。
- ・天気は中層雲による曇天である（I）。

### 参考文献

- 秋山敏夫（1956）：やまじ風の機構に対する考察(2) 研究時報、8、627-641p.  
関口 武（1985）：風の辞典、原書房、958p.  
林 陽生（1985）：気候学・気象学辞典、二宮書店、532p.  
吉野正敏（1975）：小気候、地人書館、274p.  
吉野正敏（1995）：気候学、自然地理学講座2、大明堂、350p.  
Yoshino, M. (1975) : Climate in a small area, 東大出版会.



図1 強いおろしが吹くときの地形条件と気象状態



第 4 章

4

観測・実験結果を設計に  
生かす

## 第4章 観測・実験結果を設計に生かす 目次

我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 奥田 慎也  
我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 石川 智巳  
我孫子研究所 流体科学部 主任研究員 杉本聡一郎

4 - 1 九州試験線・四国試験線における風および風応答観測 .....	59
4 - 2 地形周りの気流場に関する風洞実験 .....	65
4 - 3 架渉線の風応答に関する風洞実験・フィールド実験 .....	70
コラム3：気象ドップラーレーダーを用いた風速場の測定 .....	74

---

奥田 慎也（38ページに掲載）  
（4-1、4-2執筆）

石川 智巳（18ページに掲載）  
（4-3執筆）



杉本聡一郎（1997年入所）  
気象レーダー情報を用いた大気の3次元風速場の推定手法、および短時間降雨予測手法の開発に従事してきた。現在、メソ気象モデルの入力としてレーダー情報を利用するというデータ同化に着目し、降雨予測手法の高度化に関する研究に取り組んでいる。  
（コラム3執筆）

## 4 - 1 九州試験線・四国試験線における風および風応答観測

### 4-1-1 観測の概要<sup>(1)(2)</sup>

局地風対策研究推進委員会における研究計画に基づき、風および鉄塔・架渉線連成系の風応答観測を目的として、試験設備が設置された。試験設備は電力会社10社の共同研究設備とし、九州電力管内の既設66kV送電線（以下、九州試験線）および四国電力管内に新規に建設した500kV規模の試験送電線（以下、四国試験線）が用いられた。図4-1-1に九州・四国試験線の位置を示す。

なお、取得されたデータは当所において解析を行い、とりまとめを実施した。

#### (1) 九州試験線

九州試験線は、長崎県の島原半島の付け根に位置する愛野橋線 No.20 ~ No.22 鉄塔が用いられた。

試験線は南側の崖と北側の牧草地に挟まれた尾根上（標高240m ~ 300m）に位置し、海上からの風が送電線路直交方向に吹く。南側の崖斜面は樹高約10m程度の雑木に覆われ、南よりの風向では海上から直接崖斜面（勾配約20°）を駆け上がる比較的増速の大きい風が期待できる。一方、北側は緩やかな勾配の牧草地（勾配約10°）が広がっており、北よりの風向では比較的粗度の

小さい平坦な地形を通過した風となるため、南よりの風向の風との対比が可能である。

観測期間は、平成5年12月から平成10年3月までの約4年間である。

風観測は、既設の3基の鉄塔（愛野橋線：No.20 ~ No.22）と各径間に設置される8本の観測ポール（P1 ~ P8）が用いられた。図4-1-2に風観測設備の測器位置図を示す。鉄塔の測点としては、No.20、No.22鉄塔が各1箇所、No.21鉄塔では風速の鉛直分布の評価のために高さ方向に3箇所設けた（写真4-1-1参照）。また、観測ポールは、No.20 ~ No.21径間には地上高を同一高さ（20m）として不等間隔に5本、No.21 ~ No.22径間にはほぼ最下段（C3）の電力線の高さ（地上高：24.4 ~ 32.1m）で等間隔に3本をそれぞれ設けた。前者は変動風速の横方向の空間相関の評価を行い、後者は架渉線へ作用する風速の評価を行うことを主な目的としている。

風観測で用いた風速計は基本的にペーン型風速計であるが、鉛直成分を含めた測定が可能なギル型風速計も各径間に1台ずつとNo.21鉄塔の高さ方向に2台を設置した。さらに周波数特性の良好な超音波風速計をNo.21鉄塔頂部に1台設置した。

応答観測は、鉄塔の応答性状の把握のための加速度計を設置した。図4-1-3に応答観測設備の測器位置図を示



図4-1-1 九州・四国試験線の位置



写真4-1-1 No.21号鉄塔

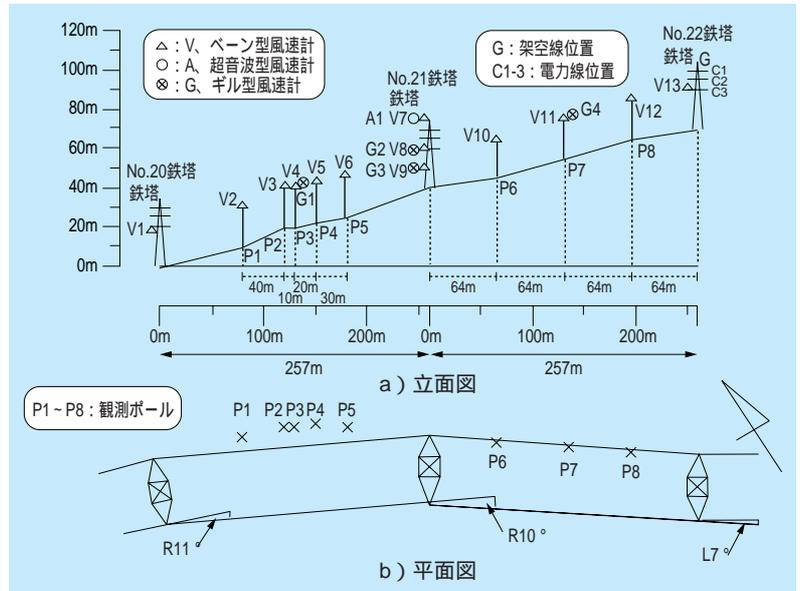


図4-1-2 九州試験線 風観測設備の測器位置図

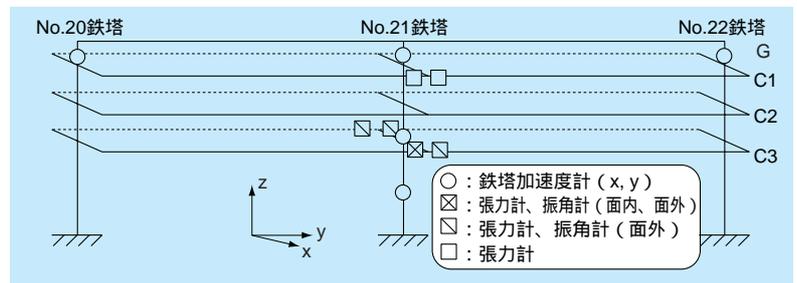


図4-1-3 九州試験線 応答観測設備の測器位置図

す。鉄塔の測点としては、No.20、No.22鉄塔が各1箇所、No.21鉄塔は高さ方向に3箇所設けた。また、架渉線の支持点張力および応答性状の把握のため、No.21鉄塔の架渉線支持点は張力計および振角計を配置した。

その他の気象観測は、No.20鉄塔付近において気温・気圧の測定を行った。

## (2) 四国試験線

四国試験線は、徳島県の四国山地系・剣山（標高1955m）に連なる東約15kmの川成峠近傍に位置し、概ね東西に伸びた尾根（標高約1500m）のやや南斜面側に建設した。南北の地形はいずれも急勾配の斜面（勾配約30°）で、樹高10～15m程度の雑木に覆われている。特に南側斜面を駆け上がる風は、谷筋の収束効果と相まって強風の期待できる地形である。

観測期間は、平成6年9月より平成13年11月までの

約7年間である。ただし、12月から翌4月（冬季期間）は観測機器への着冰雪により正常な測定が期待できないため、基本的に観測は行っていない。

風観測は、新規に建設した500kV規模の3基の鉄塔（四国試験線：No.1～No.3）と各径間に設置された13本の観測ポール（P1～P13）を用いて行った（表紙写真）。図4-1-4に風観測設備の測器位置図を示す。各鉄塔の測点としては、風速の鉛直分布の評価のために南側の腕金先と塔体で高さ方向に4箇所、さらにNo.2鉄塔には北側の腕金先にも2箇所設けた。また、観測ポールは、No.1～No.2径間にはほぼ最下段（C3）の電力線の高さ（12.6～26.5m）で等間隔に6本、No.2～No.3径間にはNo.2鉄塔付近で線路直交方向に2本（地上高12m）と線路方向に地上高を同一高さ（20m）として不等間隔に5本をそれぞれ設置した。No.1～No.2径間では架渉線へ作用する風速の評価を行い、No.2～No.3径間では、

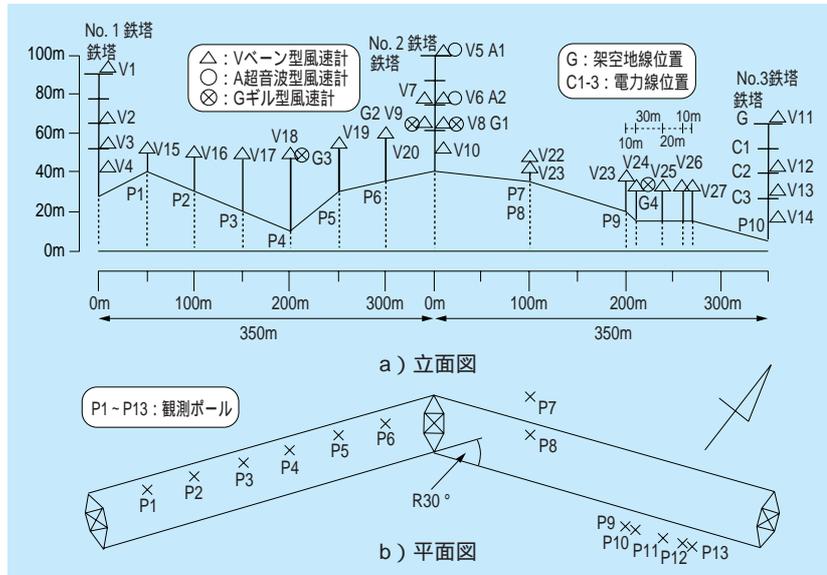


図4-1-4 四国試験線 風観測設備の測器位置図

変動風速の縦・横方向の空間相関の評価を主な目的としている。

風観測で用いた風速計は基本的にベーン型風速計であるが、鉛直成分を含めた測定が可能なギル型風速計も各径間に1台ずつとNo.2鉄塔に2台を設置した。さらに周波数特性の良い超音波風速計をNo.2鉄塔の高さ方向に2台設置した。

応答観測は、鉄塔応答関係と架渉線応答関係でそれぞれ詳細な測定を行った。図4-1-5、図4-1-6に応答観測設備の測器位置図を示す。鉄塔応答観測では、塔体の応答性状の把握のために加速度計を設置しており、各鉄塔の高さ方向に4ないし5箇所の測点と、さらにNo.2鉄塔には詳細な評価のために全ての腕金先にも測点を設けた。また、塔体風荷重の評価のため、No.1、No.3鉄塔の地際の4本の主柱材とNo.2鉄塔の地際、バンド下、C1腕金下における各々4本の主柱材と8本の斜材に軸力計（歪みゲージ）をそれぞれ設置した。架渉線応答観測では、架渉線の応答性

状把握のために加速度計および回転計を設置しており、C1およびC3の南側電力線に各径間で各々3箇所の測点を設けた。さらに、架渉線が鉄塔に与える荷重を評価するため、鉄塔腕金先の架渉線支持点に張力計および振角計（面内および面外）を設置しており、No.1、No.3鉄塔は張力計のみ4箇所、No.2鉄塔では全腕金先の若老番でそれぞれ張力計および振角計の測点を設けた。写真4-1-2に四国試験線No.2鉄塔の腕金先測器取付状況を示す。

その他の気象観測は、No.3鉄塔付近で気温・湿度・雨量・気圧の測定を行った。

#### 4-1-2 風観測結果

九州試験線では、観測終了までの約4年間に2523個（420時間30分）の強風時データを取得し、1995年4月23日の季節風において、No.21鉄塔頂部（高さ36m）にて、最大平均風速37.5m/s、最大瞬間風速52.6m/sを記録

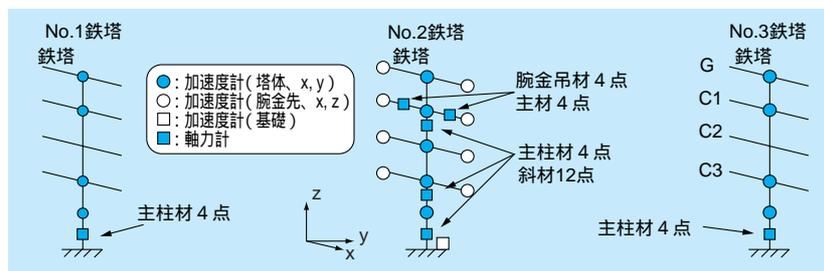


図4-1-5 四国試験線 鉄塔応答観測設備の測器位置図

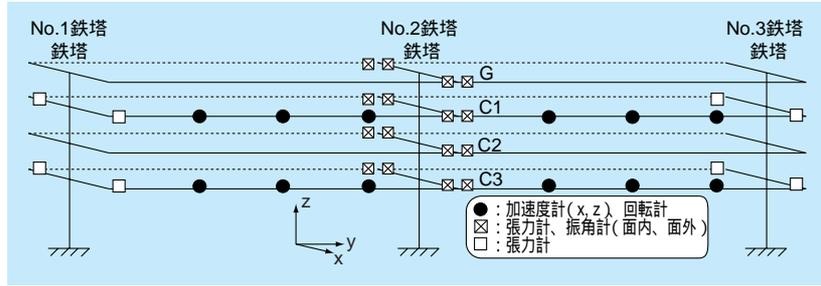


図4-1-6 四国試験線、架渉線応答観測設備の測器位置図



写真4-1-2 四国試験線No.2腕金先測器取付状況

した。四国試験線では、約7年間に1583個(263時間50分)の強風時データを取得し、1998年10月17日の台風9810号において、No.2鉄塔頂部(高さ58.5m)にて、最大平均風速28.2m/s、最大瞬間風速49.5m/sを記録した。

ガスト影響係数法による等価静的風荷重を取り入れた「送電用鉄塔の風荷重指針(案)」(以下、指針(案)と呼ぶ)において、風荷重算定に必要な風のパラメータは平均風速の鉛直分布、乱れの強さ、乱れのスケール、ディケイファクタである。したがって、九州・四国試験線の観測データの指針(案)への反映を念頭に置き、取得した全データを対象に乱流統計解析手法を行い、これら設計に必要なパラメータを評価した。

### (1) 平均風速の鉛直分布

図4-1-7、図4-1-8に九州・四国試験線で観測された平均風速の鉛直分布を風速階級毎に示す。両試験線の鉛直分布とも斜面傾斜や樹木の影響を受け、一般平野部に比べて鉛直方向に一定の風速分布となる。特に四国試験線ではその影響が顕著である。

### (2) 乱れの強さ

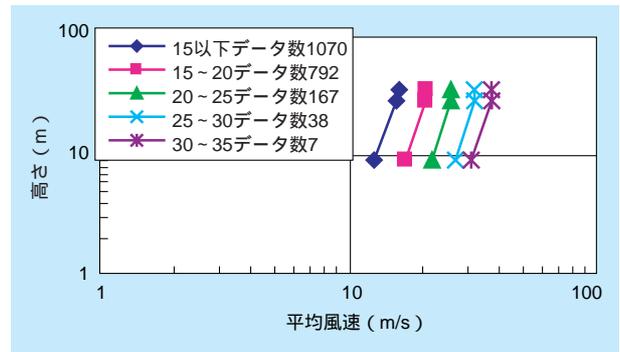


図4-1-7 平均風速の鉛直分布(九州試験線No.21)

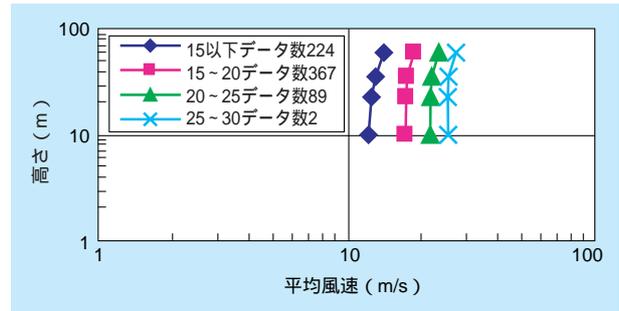


図4-1-8 平均風速の鉛直分布(四国試験線No.2)

乱れの強さは、風速の乱れの度合を表すパラメータで、変動風速の標準偏差を平均風速で除した値で定義される。

乱れの強さは、地表面粗度の影響を大きく受けるため、日本建築学会の「建築物荷重指針<sup>(3)</sup>」では粗度区分毎に乱れの強さを式で与えている。粗度区分Ⅱに相当する九州試験線の観測値(図4-1-9)粗度区分Ⅲに相当する四国試験線の観測値(図4-1-10)は建築物荷重指針の値とほぼ対応しており、指針(案)では建築物荷重指針の式を採用した。

### (3) 乱れのスケール

乱れのスケールは気流の渦の平均的な大きさを表すパラメータである。図4-1-11、図4-1-12に九州・四国試験線で観測された観測値と建築物荷重指針の値を示して

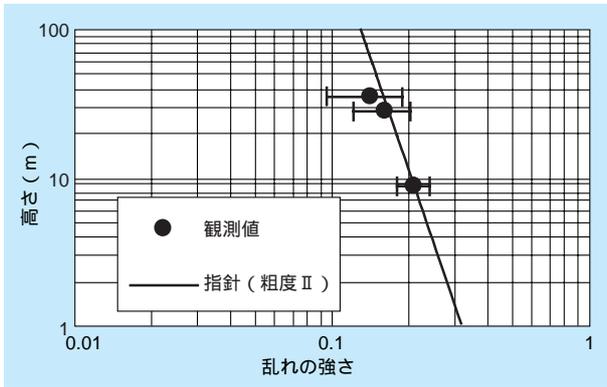


図4-1-9 乱れの強さの鉛直分布（九州試験線NO.21）

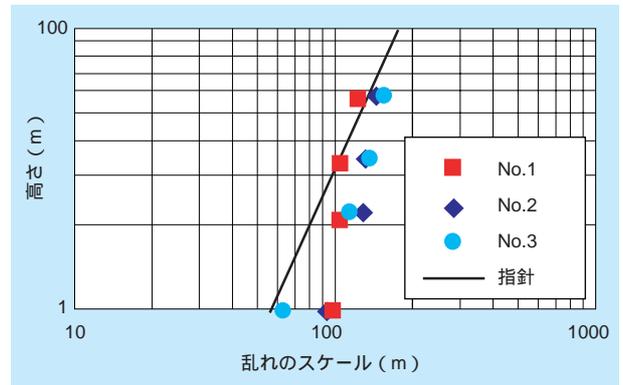


図4-1-12 乱れのスケールの鉛直分布（四国試験線）

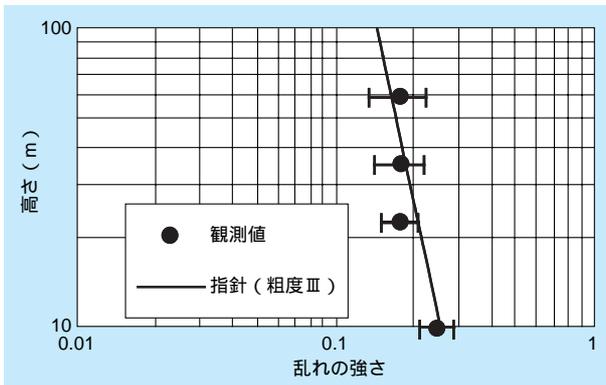


図4-1-10 乱れの強さの鉛直分布（四国試験線No.2）

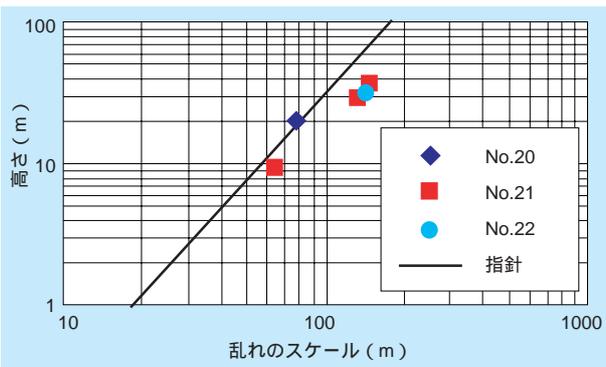


図4-1-11 乱れのスケールの鉛直分布（九州試験線）

いるが、両者は概ね一致することから乱れのスケールにおいても、建築物荷重指針の式を採用することにした。

#### (4) ディケイファクタ

ディケイファクタは、離れた2点の変動風速の周波数領域における相関の減少度合を表すパラメータで、設計では架渉線の規模効果を現すパラメータとして反映される。文献<sup>2)</sup>等では観測条件、解析方法の違いなどにより

様々な値が示されており、一律に比較するのは難しい。九州・四国試験線の観測結果を図4-1-13に示しているが、両試験線で異なる値をとっている。設計ではディケイファクタの値が小さいほど安全側となり、計算上の取り扱いやすさも考慮した上で、指針（案）ではディケイファクタの値を10とした。

#### 4-1-3 風応答観測結果

九州・四国試験線では、前述のように鉄塔および架渉線に加速度計が取り付けられている。これらの加速度計の応答データから、設計に必要な構造パラメータとして、固有周波数（周期）、減衰定数を算出し、評価を行った。

図4-1-14に鉄塔の1次固有周期について、九州・四国試験線の観測結果の他、電力各社より提供していただいた観測結果を示している。この図から、鉄塔の1次固有周期 $T_1$ は、塔高 $H$ の関数としてほぼ $T_1=0.01H$ で近似できることを確認し、指針（案）に反映した。

図4-1-15に鉄塔の減衰定数について、九州・四国試験線およびその他の観測結果を示している。解析手法の明確な九州・四国試験線の観測結果から、概ね山形鋼鉄

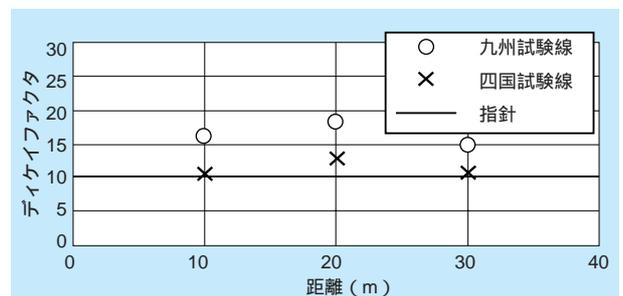


図4-1-13 ディケイファクタ（水平横方向）

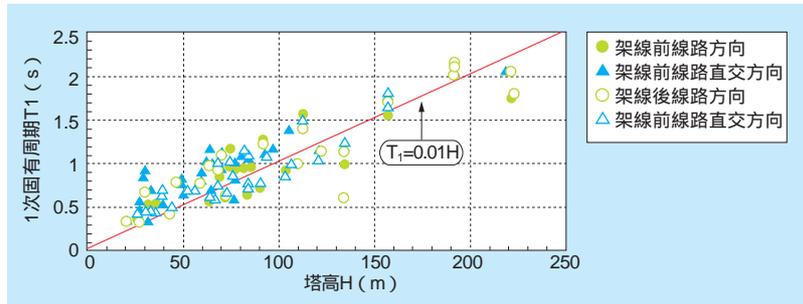


図4-1-14 鉄塔の1次固有周期

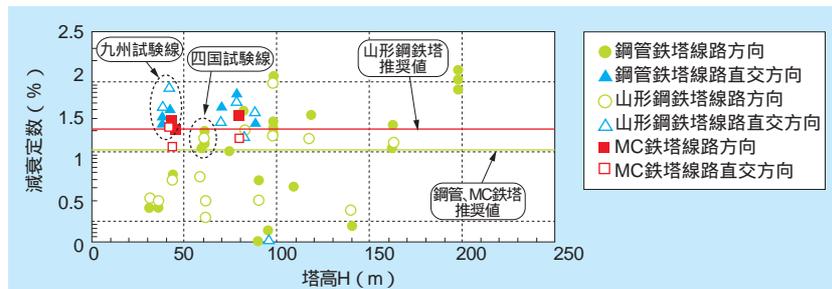


図4-1-15 鉄塔の減衰定数

塔で2%、鋼管鉄塔で1%程度の減衰が見込まれることから、指針(案)では、これらの値を用いることとした。

架渉線に関しては、空力減衰の寄与が大きく、最低次モードで数十%の減衰定数が観測され、設計においては共振効果は無視できることを確認した。

#### 4-1-4 風荷重観測結果

ここでは、四国試験線で観測された風および軸力・張力データ等を用いて、観測値としての風荷重を算出し、

2-4に示された等価静的風荷重と比較を行い、風荷重評価法の妥当性を検証した。

台風9708号時の四国試験線C2左回線若番側架渉線の風圧荷重と張力荷重について、観測値と等価静的風荷重評価式による計算値を比較した。その結果を、それぞれ図4-1-16、図4-1-17に示す。なお、風圧荷重の計算に用いた風のパラメータは、観測値に基づき、乱れの強さを0.2、吹上角を10°とした。

各図より観測値と評価式による計算値は、概ね一致しており、評価式の妥当性が示された。

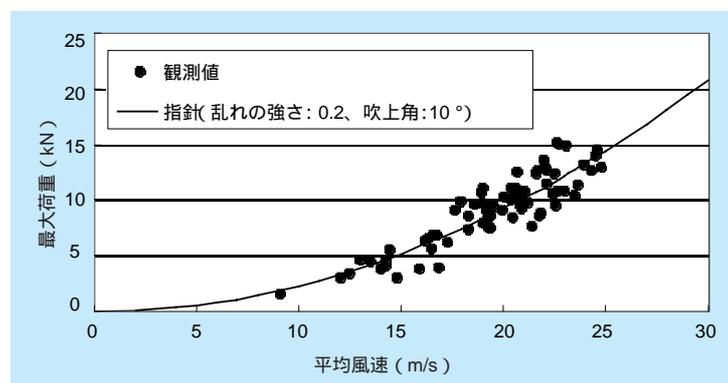


図4-1-16 架渉線風圧荷重(四国試験線C2左回線若番側架渉線、台風9708号)

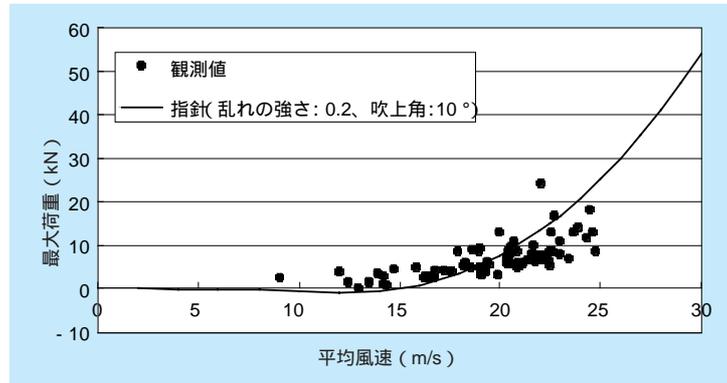


図4-1-17 架渉線張力荷重（四国試験線C2左回線若番側架渉線、台風9708号）

#### 4-1-5 ま と め

九州・四国試験線で観測された風の時系列データを用いて、風荷重算定に必要な風のパラメータ（乱れの強さ、乱れのスケール、ディケイファクタ等）を算出・評価し、

これらの結果を指針（案）に反映した。また、鉄塔・架渉線の応答特性についても、九州・四国試験線の観測結果および電力会社より提供していただいたデータを整理・分析し、指針（案）に反映した。さらに、指針（案）で採用した等価静的風荷重について、実際の観測値と比較を行い、風荷重評価法の妥当性を検証した。

## 4 - 2 地形周りの気流場に関する風洞実験

### 4-2-1 はじめに

送電設備に作用する風荷重を定量的に把握するためには、地形の凹凸や地表面粗度の影響を受けた強風の特徴を把握する必要がある。耐局地風設計研究、耐風設計合理化研究では、地形模型を用いた風洞実験を行い、地形影響を受けた流れ場の特徴を把握するとともに、気流解析コード（L-WIND）と比較・検証を行い、気流解析コードの精度を検証した。

本節では、耐局地風設計研究、耐風設計合理化研究で行った風洞実験の概要とその成果について紹介する。

### 4-2-2 基本地形模型、実地形模型の風洞実験

図4-2-1のような崖、尾根、丘、谷、鞍部などの基本地形における風の特徴を把握するため、山の高さ・斜面の傾斜角・地表面粗度などを変化させたモデル地形を用

いた風洞実験を行った。また、台風9117号及び9119号で送電設備が被害を受けた長崎県愛野地区を対象とした実地形模型の風洞実験を行った。このときの実験状況を写真4-2-1に示す。崖状地形における風洞実験結果およびL-WINDによる解析結果を図4-2-2に示す。また、実地形模型における風洞実験結果およびL-WIND解析結果を図4-2-3に示す。

これらの実験で得られた主な成果は以下のとおりである。

- 1) 崖、尾根、丘、谷、鞍部などの基本的な地形の起伏に対して、地表面付近の平均風速の変化（増速率）、鉛直分布および乱れの増減に関する基礎データを取得した。
- 2) 基本地形モデルにおいて、風洞実験結果とL-WINDの解析結果は定性的によく一致し、定量的には2次元地形（崖、尾根）で数値計算の方が若干大きくなった。
- 3) 実地形を模擬した地形モデルにおいても、風洞実験結果とL-WINDの解析結果は概ね一致した。

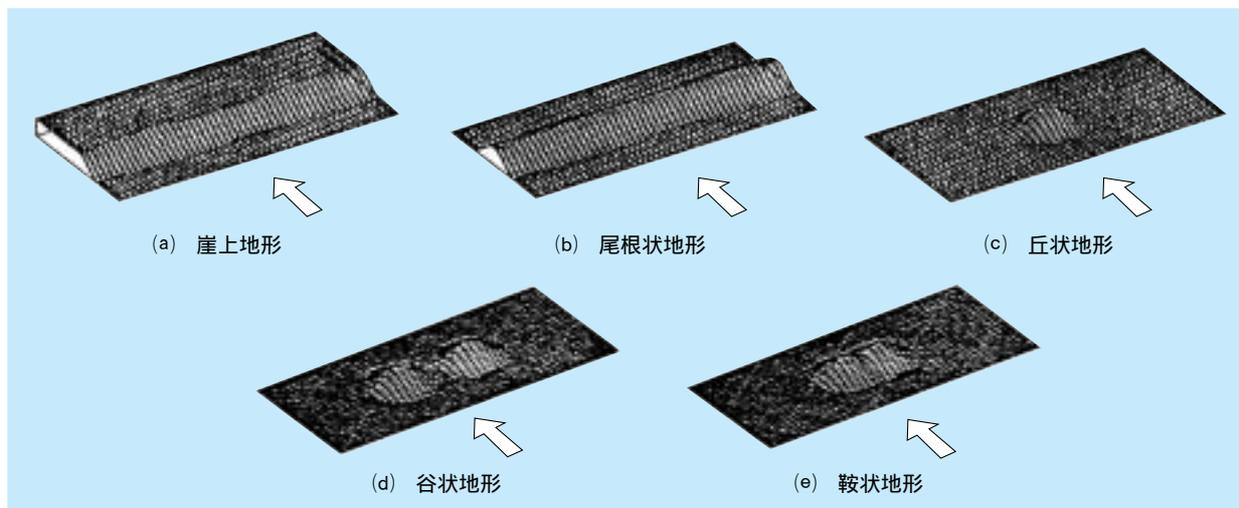


図4-2-1 風洞実験を行った基本地形モデル

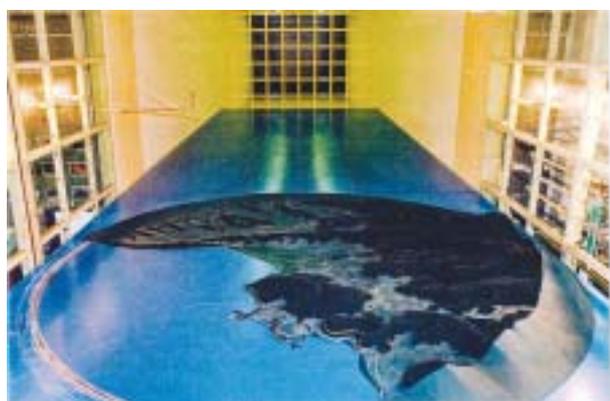


写真4-2-1 愛野地区実地形模型実験状況

#### 4-2-3 2 山地形モデルの風洞実験<sup>5)</sup>

2つ以上の地形がお互いに影響を及ぼしあうような複雑な地形における気流特性を把握するため、2次元及び3次元の2山地形を用いた風洞実験を行った。この実験では、スプリットファイバープローブを用いての地形背後の逆流する流れまで計測した石原ら<sup>6)</sup>と同じ計測方法を採用し、減速領域まで含んだ複雑地形周りの気流計測を行った。写真4-2-2に2次元2山地形の実験状況を、写真4-2-3に3次元2山地形模型の実験状況を示す。図4-2-4、図4-2-5にそれぞれ2次元2山地形、3次元2

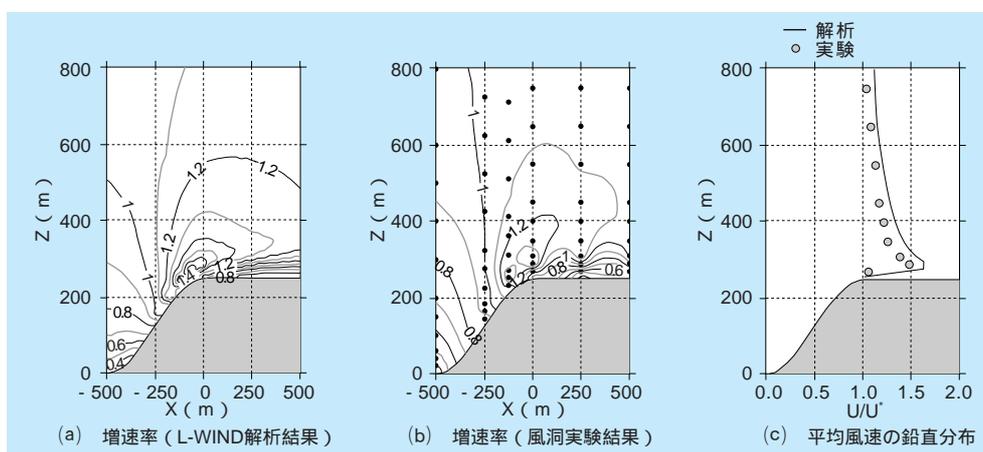


図4-2-2 風速の増速率および平均風速の鉛直分布（崖上地形）

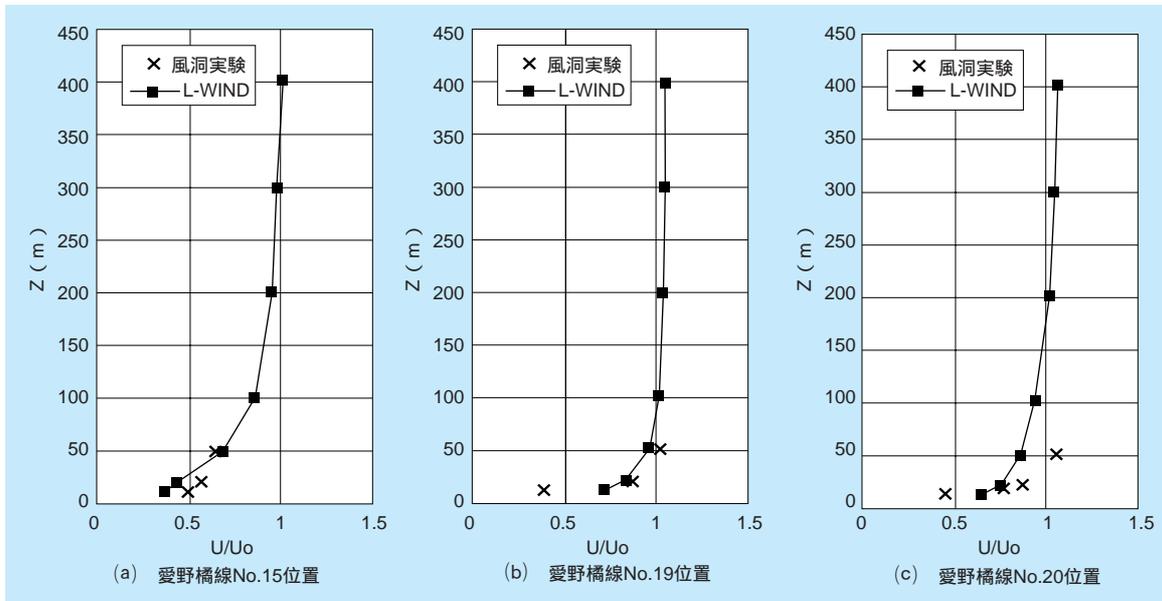


図4-2-3 平均風速の鉛直分布（愛野地区実地形）



写真4-2-2 2次元2山地形模型実験状況



写真4-2-3 3次元2山地形模型実験状況

山地形における風洞実験およびL-WIND解析結果を示す。

この実験で得られた主な成果は以下のとおりである。

- 1) 上流地形周りの流れは、2次元、3次元とも下流地形の影響をあまり受けない。
- 2) 2次元、3次元とも同じ高さの地形が並ぶ場合、下

流側地形周りの流れは、上流地形の影響を受け風上麓から上り斜面の風速が減少し、また、山頂部での増速効果も弱まる。

- 3) 風洞実験で減速地形を含む流れ場を計測することができ、気流解析コードI-windの検証データが取得できた。

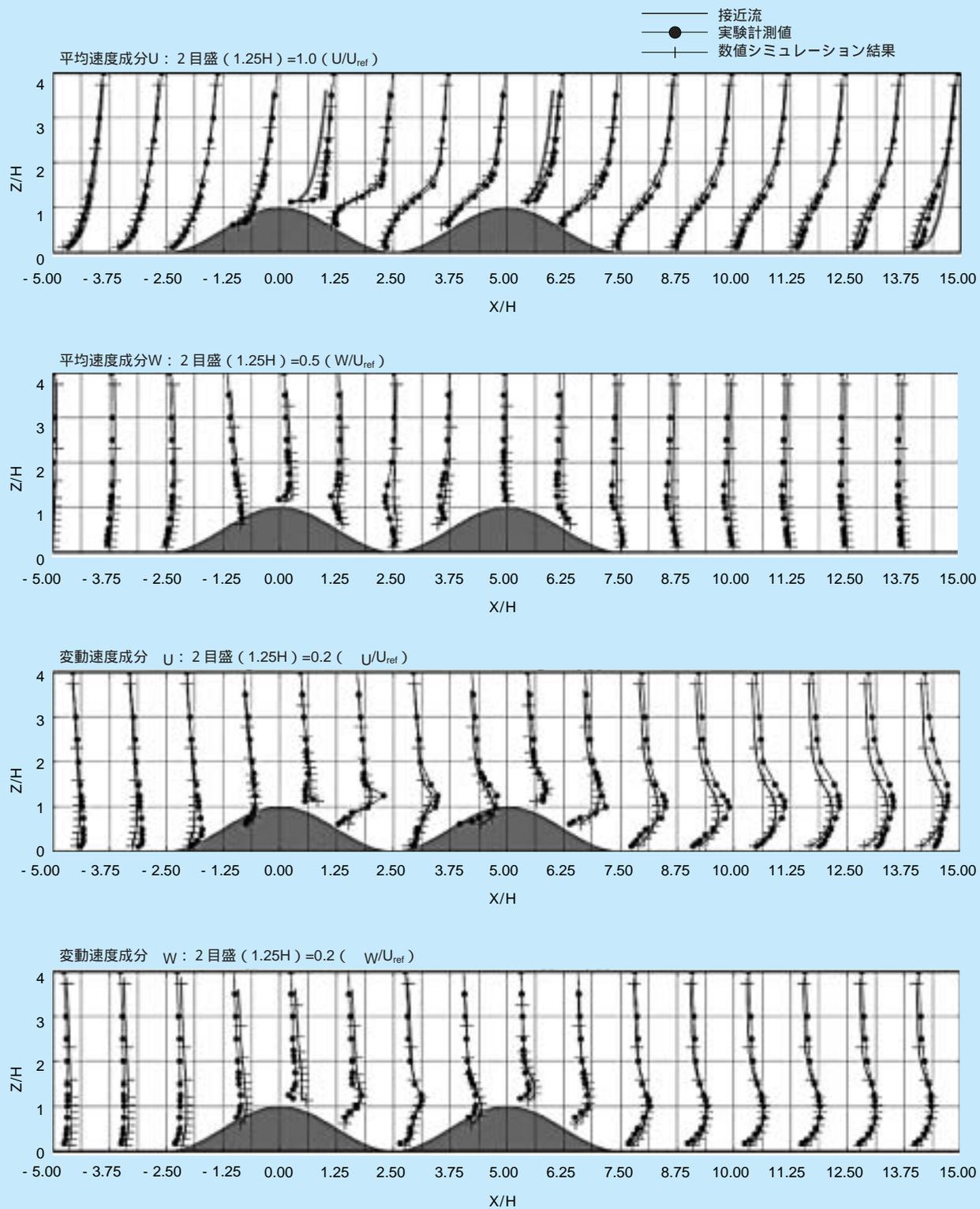


図4-2-4 平均速度および変動速度の鉛直分布 (2次元2山地形)

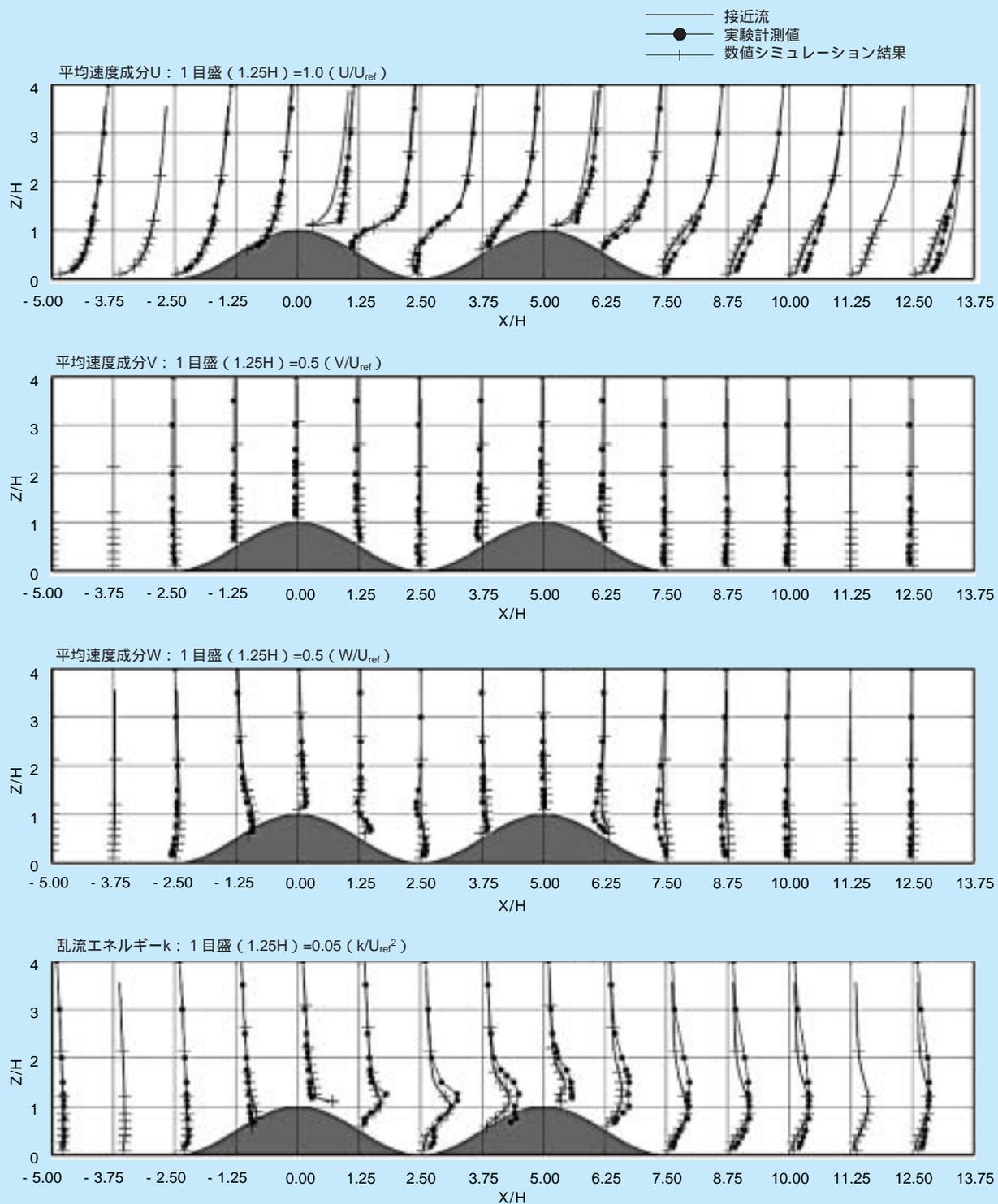


図4-2-5 平均速度および乱流エネルギーの鉛直分布 (3次元2山地形)

## 4-3 架渉線の風応答に関する風洞実験・フィールド実験

### 4-3-1 はじめに

動的応答解析手法や等価静的風荷重を、今後架空送電線路の設計に広く活用していくためには、その精度を様々な角度から実証データに基づき検証し、その信頼性を確認することが必要であろう。これまでの送電線路の耐風性に関する検討においては、多くは四国試験線などの実規模試験鉄塔における観測によって実証データを取得してきた。一方で、実際の送電線路は様々な規模、耐張型や懸垂型などの架線形態、さらには任意の径間長、水平角や高低差などの条件が付加される。このような様々な条件に対して実規模試験線で、ある程度の精度を確保した観測を行うことは、事実上難しい。さらには設計上考慮すべき強風時に恵まれることはごくわずかである。

このような状況から、四国試験線の実規模観測データを補い、種々の条件に対する実証データを取得するため、設計荷重の大きな部分を占める架渉線荷重に着目して風洞実験、縮小模型によるフィールド実験を実施した。このような全径間模型に関する実験がなされた例はきわめて少ない。

なお、当然ながら本風洞実験やフィールド実験では、相似則をすべて満足させることは困難であり、あくまでも実験条件における検証データである。

### 4-3-2 風洞による架渉線の風応答実験

風荷重評価のための基礎データを得ることを目的として、東京大学所有（工学研究科社会基盤工学専攻）の全径間風洞を用いて2径間架渉線に関する風洞試験を実施した。本風洞実験の概要は以下の通りである。

#### (1) 実験概要

ACSR410、径間長350m、4導体の架渉線ケーブルを対象に、1/50スケールの縮小模型（径間長7m）を作成し、架線形態（耐張型、懸垂型、サグ比）および気流

特性（平均風速、乱れの強さ）をパラメータに風洞実験を行った。本実験では、模型に作用する風速と支持点反力（線路直交方向反力と線路方向反力）を主な計測対象とした。この時の実験の様子を写真4-3-1、写真4-3-2に示す。

#### (2) 実験結果

実験結果の一例として、荷重評価として重要な支持点反力のパワースペクトル密度を図4-3-1、図4-3-2に示す。ただし、図中の凡例は、径間中央点の平均風速であり、括弧内は実規模換算時の平均風速を表す。

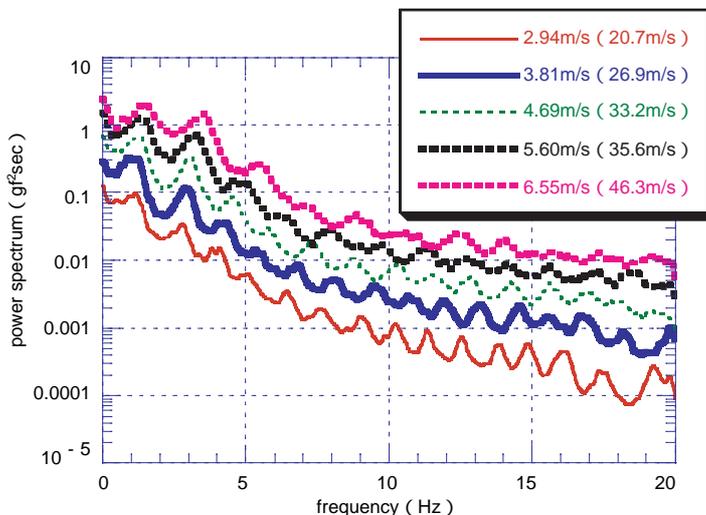
これらの図より、想定した固有振動数に対応したスペクトルピークが表れており、このピークは平均風速が大きくなるにしたがい、徐々に小さくなるのがわかる。空力減衰は、平均風速とともに大きくなると考えられて



写真4-3-1 風洞吹き出し口（乱流格子設置状況）

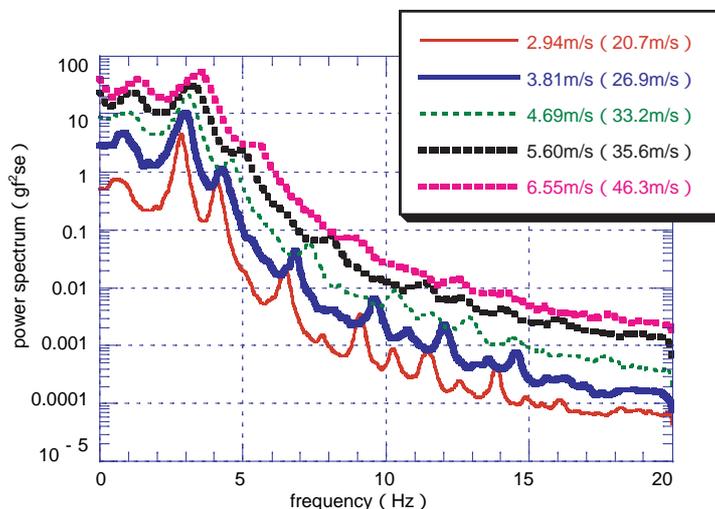


写真4-3-2 架渉線風応答実験の様子（耐長型）



耐張型、サグ比0.028、乱れの強さ0.15

図4-3-1 線路直交方向反力のパワースペクトル密度

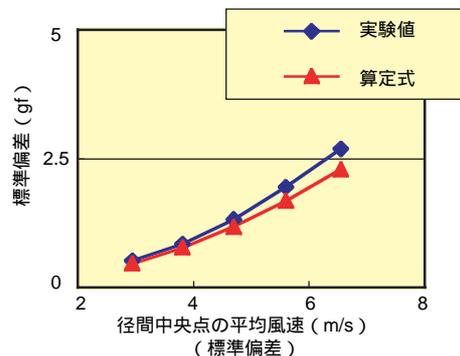


耐張型、サグ比0.028、乱れの強さ0.15

図4-3-2 線路方向反力のパワースペクトル密度

おり、実験結果は、この影響を表している。また、ピーク振動数については、平均風速の上昇とともに、高周波数側へシフトしている。この現象は、平均風速の増加とともに張力が大きくなり、剛性が増加しているためである。本実験では、以上のように、架渉線の物理的な特徴を精度良くとらえており、検証用データとして活用できるものである。

次に、本実験結果と等価静的風荷重による予測値（応答の標準偏差）との比較結果の一例を図4-3-3、図4-3-4に示す。なお、等価静的風荷重の架渉線風圧荷重は、線路直交方向反力に、架渉線張力荷重は、線路方向反力に対応する。



耐張型、サグ比0.028、乱れの強さ0.15

図4-3-3 架渉線風圧荷重の標準偏差

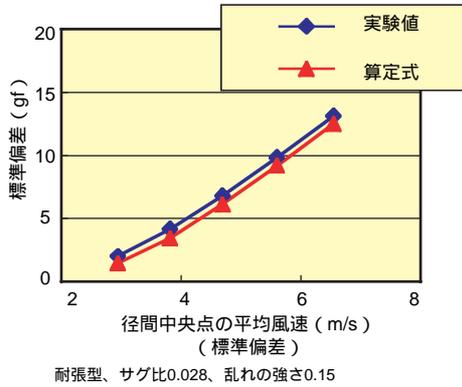


図4-3-4 架渉線張力荷重の標準偏差

これらの図より、等価静的風荷重による標準偏差の予測値は、実験結果とよい対応を示しており、提案した風荷重評価法の信頼性が明らかとなった。

### 4-3-3 赤城試験センターにおける架渉線の風応答実験

4-3-2に紹介した風洞実験では、実験設備の制約もあり変動風速の乱流統計量である乱れのスケールに関して、相似則を満足することはできない。つまり本実験においては、乱れの長さスケール比が実大気に比べて1桁以上小さくなる（（径間長）/（乱れのスケール）：実大気 400/200、風洞：7/0.1）。乱れのスケールは、動的風応答特性に少なからず影響を与えるため、風洞実験結果のみでは、検証データとしては不十分である。特に、若老間の架渉線風荷重の非同時性は、乱れのスケールに大きく依存することが明らかとなっている。

そこで、風洞実験を補完するために当所赤城試験センターにおいて、架渉線縮小模型の自然風に対する風応答観測を実施した。

### (1) 実験概要

ここでは4-3-2の風洞実験と同様に、ACSR410、4導体、径間長400mに相当する1/20スケールの3基2径間架渉線模型（ただし等径間）を対象に、中央ポール位置の支持点反力を観測するものとし、架線形態（耐張型と懸垂型）、サグ比をパラメータとした。また、同時に線路方向に3箇所超音波風速計を設置し、応答観測と同時に風観測を行っている。写真4-3-3に、観測状況の写真を示す。

なお、事前に風のみでの観測を行い、冬季の赤城おろしを対象とすれば、所定の平均風速、乱れのスケールを有する風が観測されることを確認の上、観測サイトを決定した。

### (2) 実験結果

実験結果の一例として、耐張型、サグ比0.028の実測結果を紹介する。後に述べる非同時性に関する検討内容の理解を助けるために、図4-3-5に耐張型架渉線荷重の測定概要図と記号の定義を示す。



写真4-3-3 フィールド実験の様子（懸垂型）

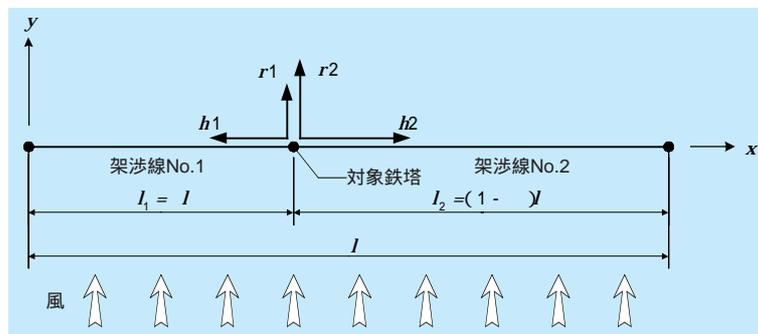


図4-3-5 耐張型の架渉線荷重の概要と記号の定義

ここに、 $l_1$ 、 $l_2$ は各架渉線の径間長（本実験では、 $l_1=l_2=20\text{m}$ ）これらの和を $l$ とする。 $\alpha$ は径間長の比である。また $r_1$ 、 $r_2$ は架渉線No.1、No.2の架渉線風圧荷重、 $h_1$ 、 $h_2$ は架渉線張力荷重を表す。

図4-3-6、図4-3-7に架渉線風圧荷重および架渉線張力荷重の標準偏差の実測結果を示す。また等価静的風荷重算定式の精度検証のため、これによる予測値も併記した。これらの図より、実測値との比較であるため多少のばらつきはあるものの、等価静的風荷重算定式は実測結果とよく対応しており、算定式の有用性が検証できた。

次に、各径間相互の荷重の非同時性に関する検討結果について示す。対象とする鉄塔（図4-3-5における対象鉄塔）へ各々の径間の架渉線から作用する力は、動的な力であるため同時に最大値が作用することはない。このような影響を考慮するため、等価静的風荷重では、非同時性低減係数を導入しており、これは、 $r_1$ と $r_2$ あるいは $h_1$ と $h_2$ の理論的に導いた相関係数に基づいている。ここでは、本実測結果と等価静的風荷重評価法における算定式による相関係数

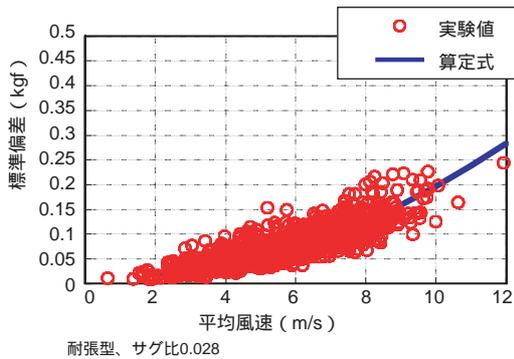


図4-3-6 架渉線風圧荷重の標準偏差

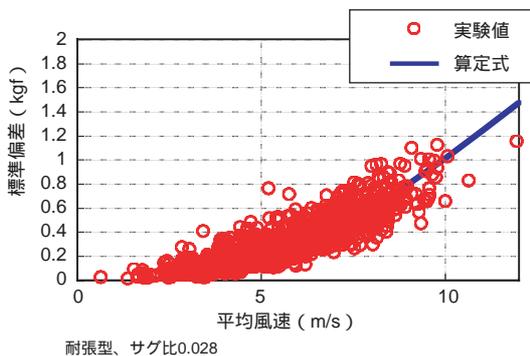


図4-3-7 架渉線張力荷重の標準偏差

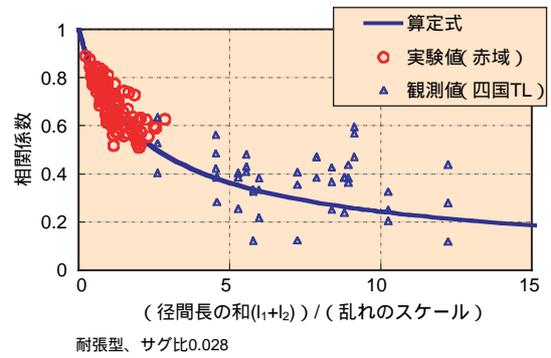


図4-3-8 架渉線風圧荷重の相関係数

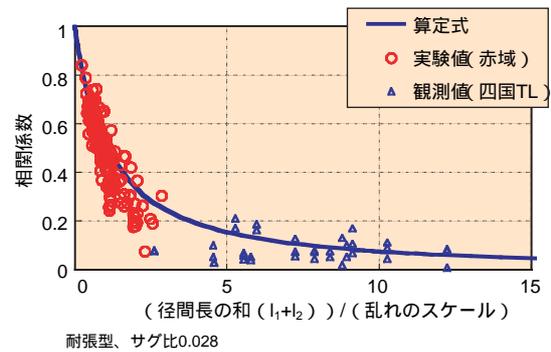


図4-3-9 架渉線張力荷重の相関係数  
(耐張型、サグ比0.028)

を比較する。図4-3-8、図4-3-9にそれぞれ架渉線風圧荷重、架渉線張力荷重の相関係数の比較図を示す。

これらの図には、比較のため四国試験線観測値による相関係数の値も図示した。なお、4-3-2に述べた風洞実験でも相関係数を算定しているが、乱れのスケールが小さいため、ここでは省略した。

これらの図より、実験値と算定式はよく対応しており、径間長の和と乱れのスケールの比が大きくなるにしたがい、急激に相関係数が低下している状況や、架渉線張力荷重の方が低下の度合いが大きいことなど、算定式の特性を裏付ける結果が得られた。

### コラム3：気象ドップラーレーダーを用いた風速場の測定

気象レーダーは、アンテナから電磁波を放射し、大気中に存在する降水粒子（雨、雪、氷など）に代表される目標物から散乱される電磁波を測定することによって、降水の位置と量を推定する測器である。送受信した電磁波の位相差をも測定できるレーダーはドップラーレーダーと呼ばれ、単位体積中の降水粒子群のレーダーの視線方向の平均移動速度（ドップラー速度）は、この位相差から求められる。

降水粒子は大気の流れ場（風速場）と自らの重力によって移動するが、強風時は風速場に支配されるため、ドップラー速度は3次元風速場と密接に関連している。理論的には、3台以上のレーダーが風速場の推定に必要であるが、仮定によっては2台、あるいは1台でも風速場を推定できる。

複雑な地形を有するわが国では、降水過程が地形の影響を受け、時には局地的に集中豪雨がもたらされる。数値シミュレーションを基礎とした多くの研究によって、そのメカニズムが解明されつつある反面、実際に複雑地形下での大気観測をレーダーによって行う研究は少なかった。すなわち、シミュレーションの結果の妥当性を大気側の観測データから述べるには、データが少ないのが現状である。

当所は1995年よりドップラーレーダーを導入し、

複雑な地形を含む領域での観測を行ってきた。レーダー情報を加味した豪雨のリアルタイム予測手法の開発を大目標に、まずは複雑地形下での豪雨のメカニズムを観測値から理解したり、観測で得たレーダー情報を用いて、メソ気象モデルによる再現結果を評価したりしている。

九州山岳域における雨雲周りの水平風速場を、1台のレーダー情報をもとに推定した例を図1に示した。この降雨域は梅雨前線と地形の影響によって形成されたもので、風下側で風速場が強く収束している（図中の円で囲まれた部分）。南方から湿った空気が強制的な上昇流を伴いながら降雨域A、Bに流入して降雨が発達した。図2は、東北会津盆地で生じた雷雲の鉛直構造を2台のドップラーレーダー情報から推定したものである。雷雲の強エコー部とその周辺で強い上昇気流が生じているのが把握できる。

降水のメカニズムを知る上でレーダー情報は有用であるが、この情報をメソ気象モデルに導入して、豪雨を高分解能に再現、あるいは予測しようという研究が最近認識され始めた。当所で観測した山岳域での観測成果は、山岳域にも適用可能な豪雨、あるいは局地風の予測手法の開発に大きく役立つことが期待できる。

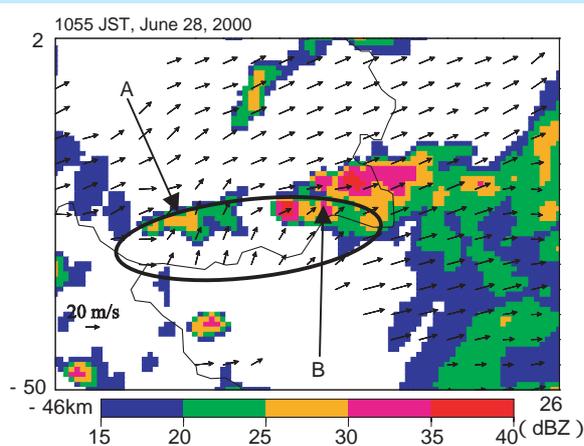


図1 宮崎・熊本県境付近で観測された降雨域周辺の推定水平風速（3 km高度）

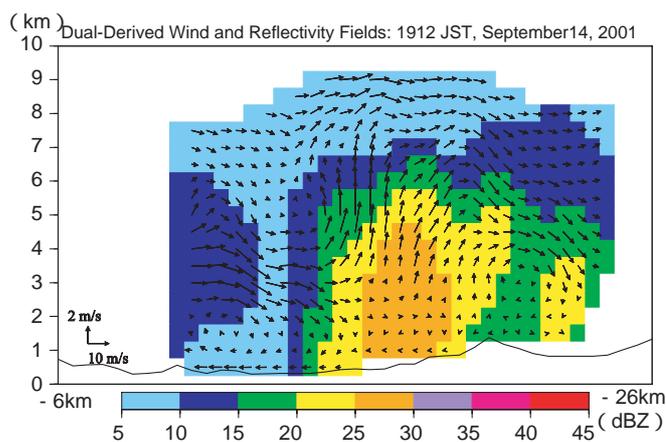


図2 エコー強度と降雨の動きと相対的な3次元風速場の垂直分布

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

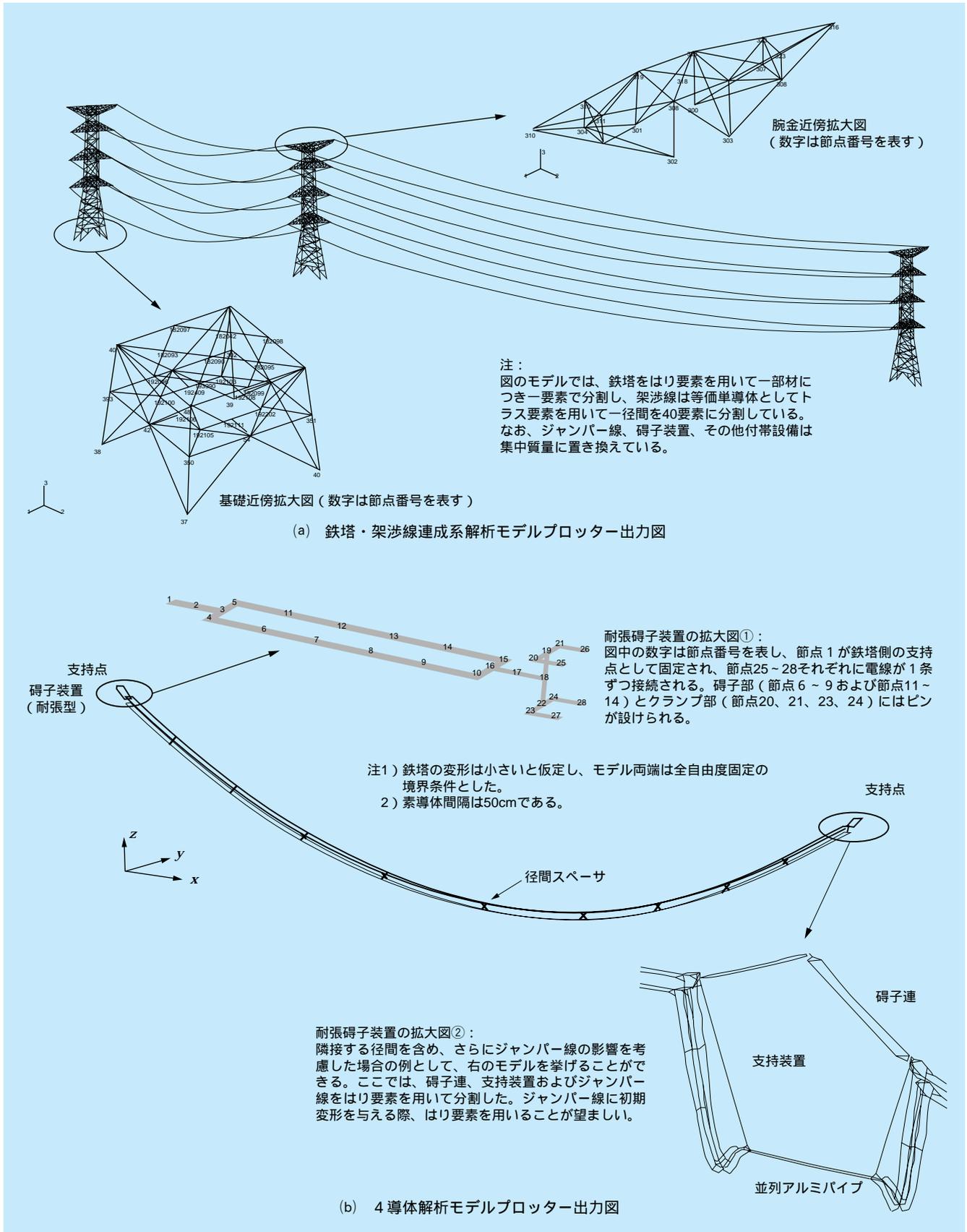


図5-1-1 CAFSSで解析可能な構造モデルの例

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<sup>1)</sup>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、 $\rho_a$ ：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、 $\theta$ ：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速度

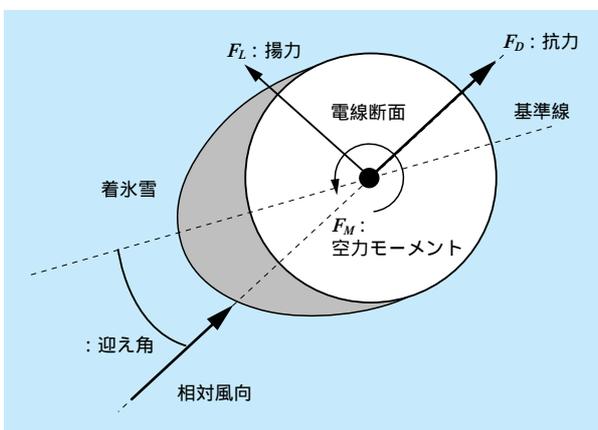


図5-1-2 着氷雪電線断面に作用する空気力

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<sup>2)</sup>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<sup>1)</sup>。

#### (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<sup>3)</sup>（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

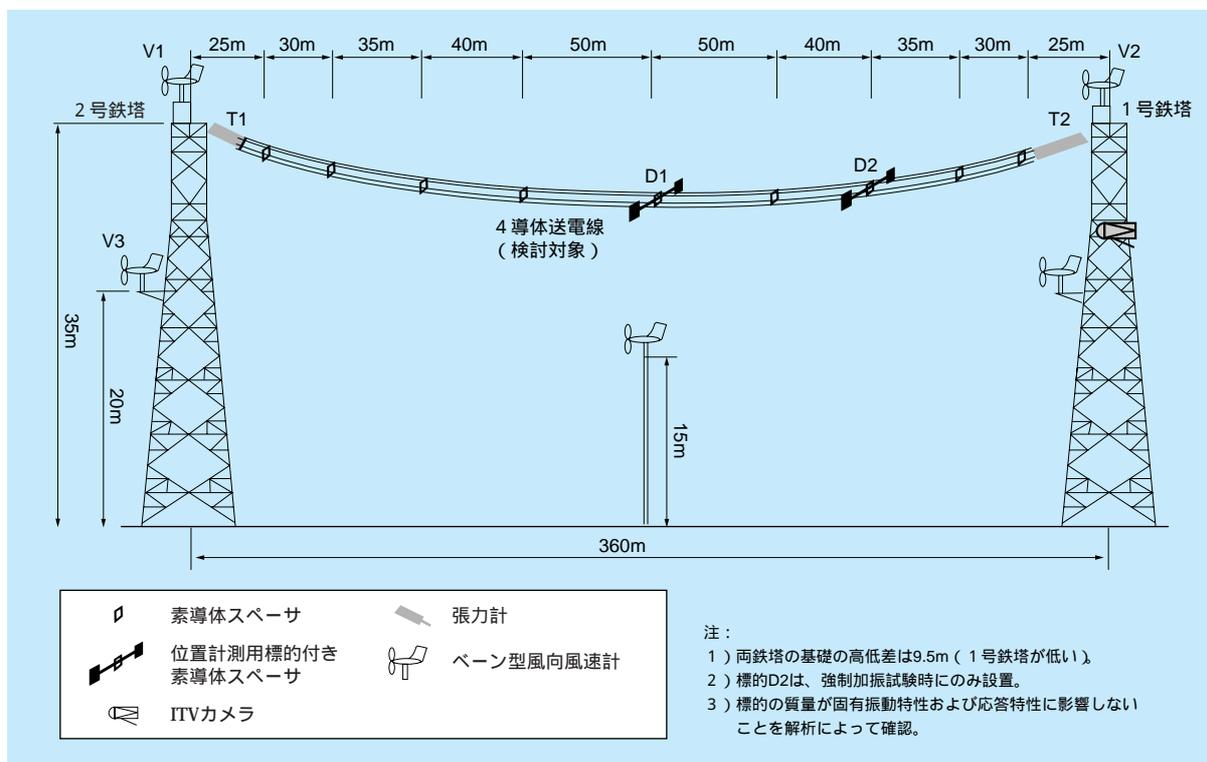


図5-1-3 試験線該略図

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

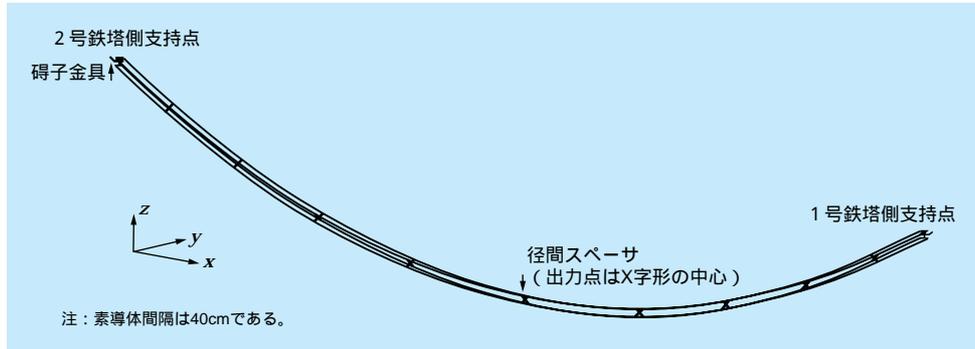


図5-1-4 解析モデル見取図

表5-1-2 解析モデルの諸元

	電線部 (ACSR410) <sup>注1</sup>	碍子金具 (碍子部)	碍子金具 (金具部)	径間スペース
径間長 (m)	357			
弛度 (m)	8.55			
初期張力 (N)	T1 : $3.227 \times 10^4$ , T2 : $3.213 \times 10^4$			
ヤング率 (N/m <sup>2</sup> )	$8.192 \times 10^{10}$	$2.058 \times 10^{11}$		
ねじり剛性 (Nm <sup>2</sup> )	$156.8$ <sup>注2</sup>	$6.295 \times 10^3$	$4.886 \times 10^4$	
断面積 (m <sup>2</sup> )	$4.808 \times 10^{-4}$	$7.069 \times 10^{-4}$	$1.964 \times 10^{-3}$	
代表径 (m)	$2.85 \times 10^{-2}$	0.03	0.05	
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	$3.48 \times 10^3$	0.0 <sup>注3</sup>		
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、素导体スペース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导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导体全体の電線軸回りの回転方向。

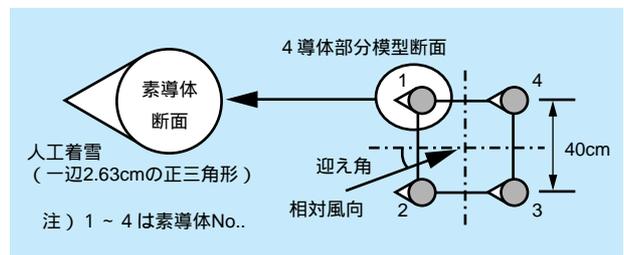


図5-1-5 4导体部分模型の断面図

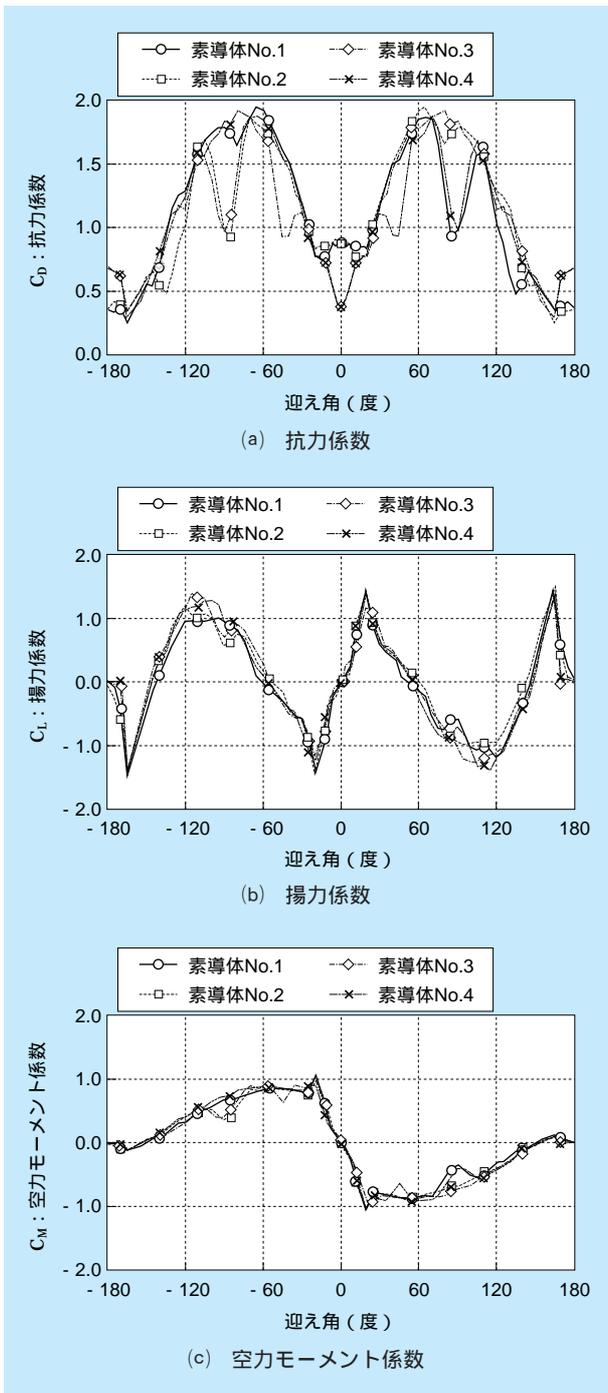


図5-1-6 4 導体部分模型の空気力係数

(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

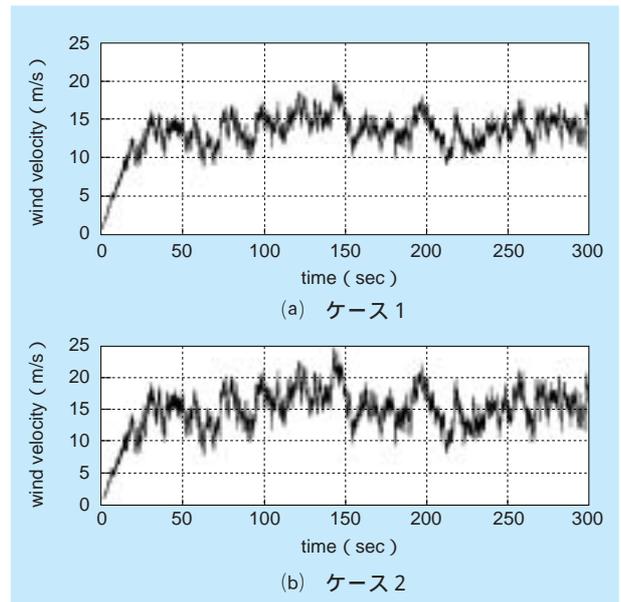


図5-1-7 発生させた風速時刻歴 (径間中央付近)

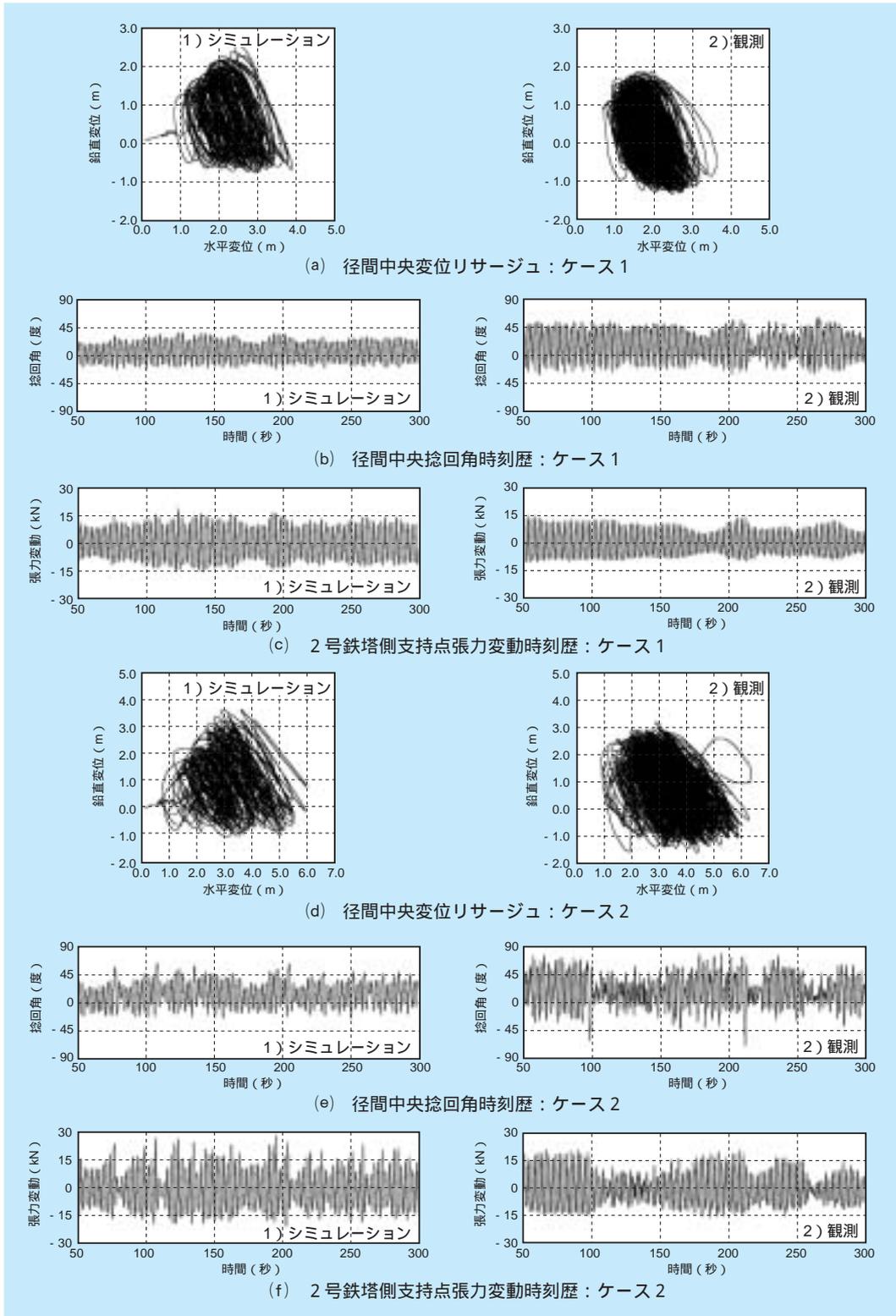


図5-1-8 シミュレーション結果と観測結果との比較

## 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

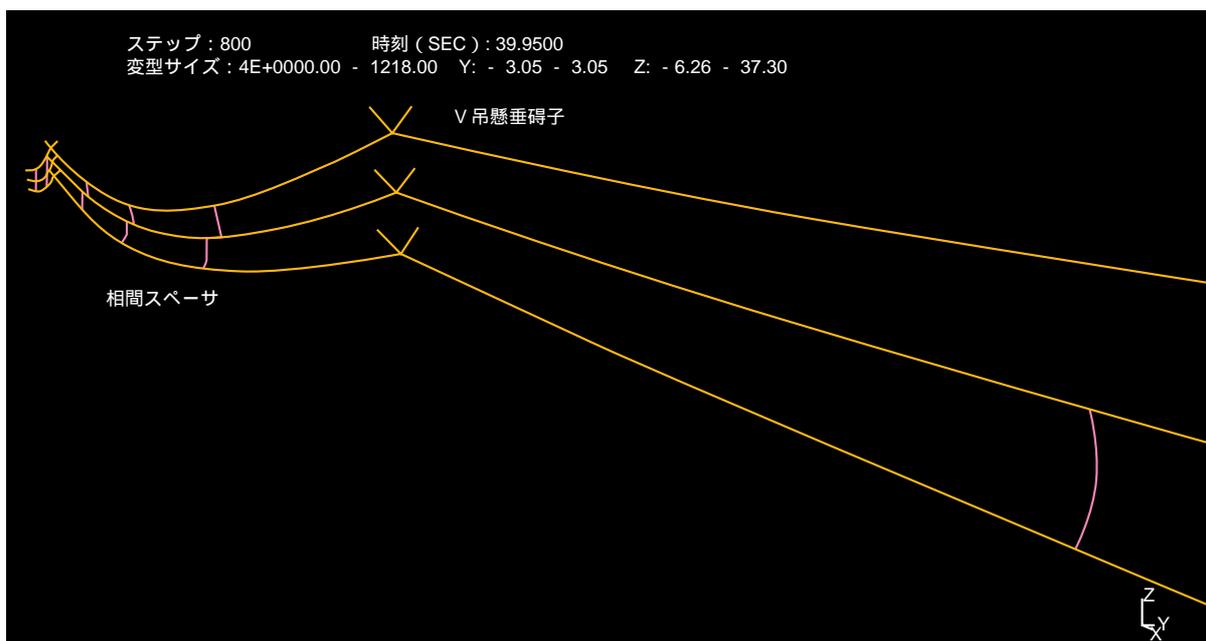
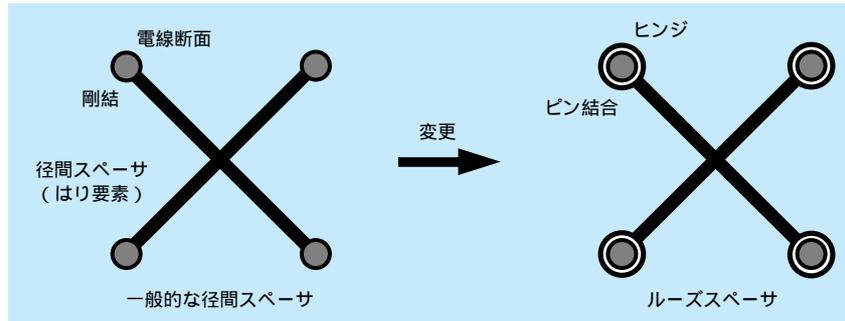


図5-2-1 相間スペーサを含む3相3径間解析モデル

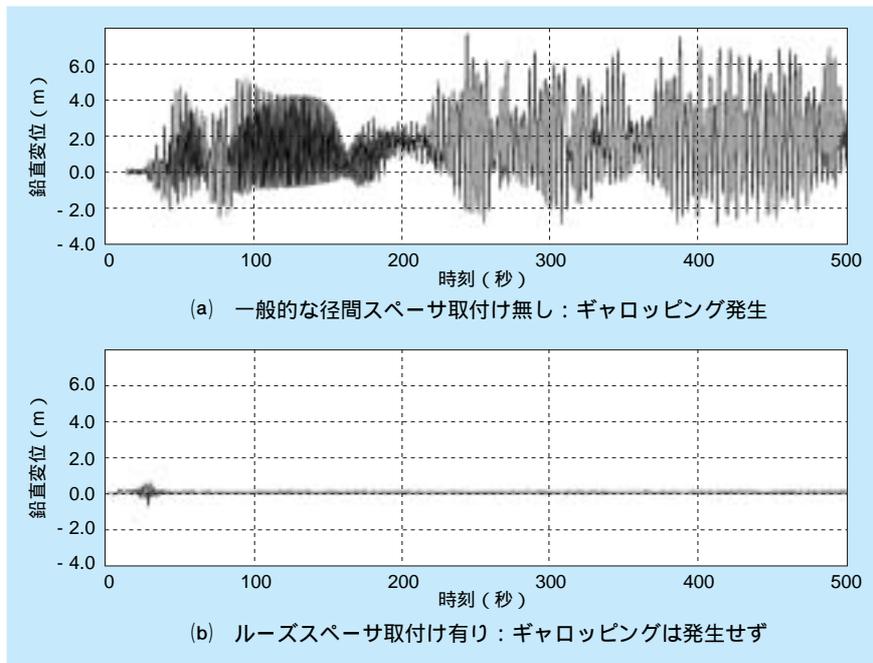
素をX字型に組んで径間スペースを模擬するが、**図5-2-2**に示すように、その端部にヒンジ機構を考慮することが可能であり、ルーズスペースをモデル化できる。これまでに、ルーズスペースの有無をパラメータとして、4 導体電線のギャロッピングシミュレーションを実施し

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<sup>(2),(4)</sup>。

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<sup>(1)</sup>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<sup>(2)</sup>。

### 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.

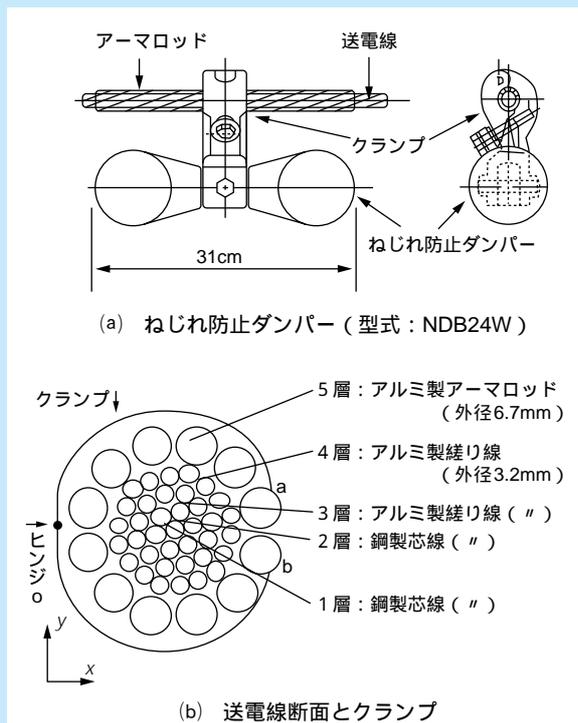


図1 ねじり防止ダンパーと電線断面

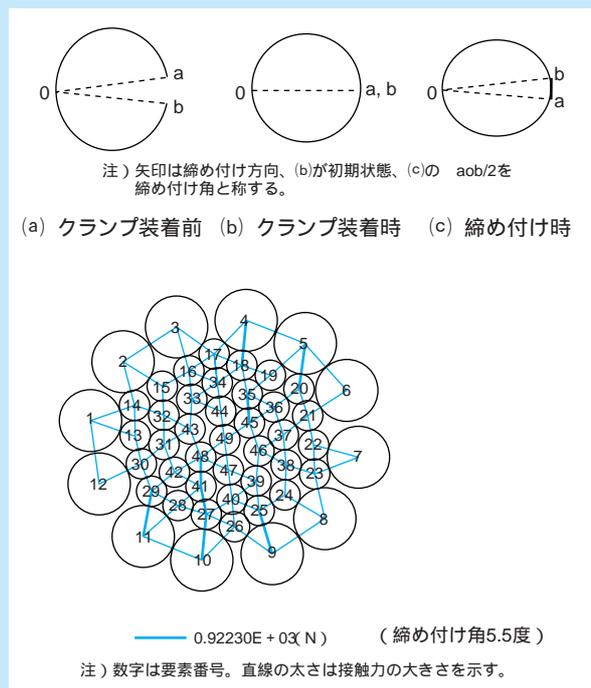
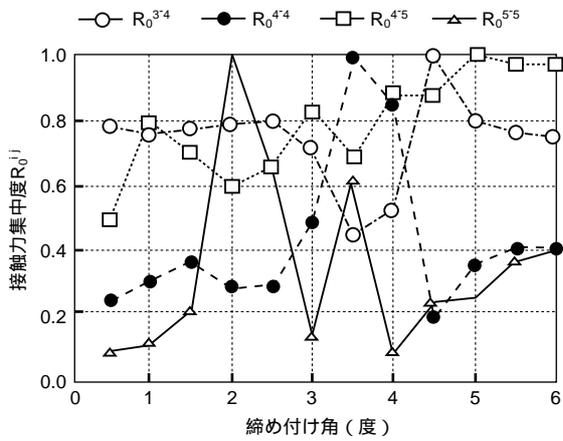
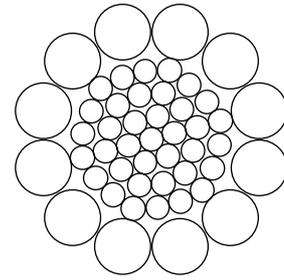


図2 締め付け角の定義と接触力分布図

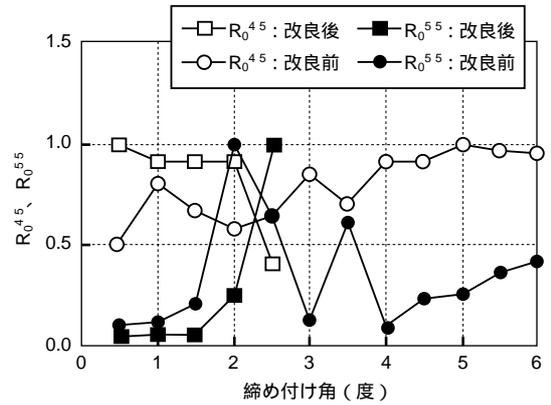


注：R<sub>0</sub>の添字は層を示す。締め付けに伴い実際に素線切れの発生した第4層に接触力が集中することがわかる。

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



第 章

6

今後の展開

第6章 今後の展開 目次

我孫子研究所 材料構造部 上席研究員 松浦 真一  
我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 清水 幹夫

6 - 1 当所における耐風設計研究 ..... 91  
6 - 2 当所におけるギャロッピング研究 ..... 91



松浦 真一（1984年入所）  
これまで、水力鋼構造物の健全性評価、高速増殖炉主容器等の地震時座屈評価技術に関する研究などに携わり、ダムゲート、水圧鉄管の板厚計測、表面腐食形状計測や円筒シェルの弾塑性座屈試験、解析と設計評価手法の検討などを行ってきた。現在は、耐風設計技術に関して、数値解析技術等を生かし安全性を確保した合理的評価法の構築に取り組んでいる。（6-1執筆）

清水 幹夫（8ページに掲載）  
（6-2執筆）

## 6 - 1 当所における耐風設計研究

当所の耐風設計研究は、1991年の猛烈な強風が特徴であった台風19号による送電鉄塔の被害を契機に、従来検討の蓄積に加えて最新の評価、解析技術を取り入れる形で行われ、代表的自然外力の1つである風荷重を適切かつ実際に評価し、鉄塔、架渉線などの応答を考慮した評価法を構築することを目標としてきた。現場観測、試験、解析検討等に基づき、電気事業やわが国の研究者の協力を得て作成した「送電用鉄塔の風荷重指針(案)・同解説」は2001年までの研究成果を取りまとめたものであり、以下の特徴を有している。

- ① 最新の学術的知見を反映した精緻な荷重評価体系
- ② 風向別基本風速の導入
- ③ ガスト影響係数法の導入
- ④ 設計風速、風荷重算定のためのツールの用意
- ⑤ 最近のコンピュータ技術(数値シミュレーション技

術)の活用

構造物の安全性の確保と、経済性の向上の両者が強く望まれている状況下で、従来評価に比較してより実際の状況に即した評価が行える本評価法を利用することにより、局地風を含めた風荷重の厳しい地点での安全性が確保されると同時に、風荷重の小さい地点での設計合理化が可能になると期待される。

今後は、これまでに蓄積された研究ポテンシャルを活用し、提案した評価手法の利便性の向上を図り、広く実務設計に利用できるように整備して、予定される民間設計標準JEC-127の改定への反映を図る。さらに、現段階でも必ずしも十分に解明されていない課題の検討を行い、送電鉄塔の信頼性評価を念頭に置いた安全性評価技術、設計技術の開発を進めていく。

## 6 - 2 当所におけるギャロッピング研究

ギャロッピングのシミュレーション技術については、現状のCAFSSをもって、観測結果と概ね一致する電線変位と張力の再現、および相間スペーサなどの対策の考慮が可能になったといえる。しかし、着氷雪電線に作用する空気力のモデルは、準定常理論を基本としていることから、なお精緻化の必要がある。CAFSSでは、準定常空気力モデルにより、現実的な電線振動を概ね模擬し得てはいるが、風洞実験では、特に捻回振動が卓越するギャロッピングに関しては、準定常理論で近似した空気力の精度の問題点が確認されている<sup>(1)</sup>。振動する物体に作用する空気力は、本来は非定常性を考慮してモデル化すべきであり、そのためには、大振幅で振動する着氷雪電線を供試体とする風洞実験データが必要となる。したがって、今後当所では、共同研究等により、外部機関の風洞を活用したデータ取得と、非定常空気力モデルの構築を踏まえた、CAFSSの精緻化が重要な課題となる。

また、現状のCAFSSの入力情報となる、着氷雪電線の空気力係数データについては、前述の架空送電線の

ギャロッピング現象・解析技術調査専門委員会の活動により、典型的な着氷雪形状に対する既往の風洞実験結果のデータベースが構築されている<sup>(2)</sup>。しかし、事故の再現等、自然着雪した電線のシミュレーションにおいては、データベースの情報は十分とはいえない。空気抵抗係数は風洞実験によって得られるが、模型製作の時間、労力や設備使用の可能性を考えれば、こうしたシミュレーションごとに風洞実験を行うことは非現実的である。理想的には、任意の着氷雪形状に対して、風洞実験を行うことなく、短時間でデータが得られる手段が望まれる。したがって、当所では、任意の断面形状の物体に作用する流体力を数値解析によって算出する計算システムの構築を検討している。これについては現在計画段階であるが、実現すれば、事故解析など実線路を対象とした自然着雪時のギャロッピングシミュレーションの精度が飛躍的に向上すると期待できる。また、電力各社に対する着氷雪電線の空気抵抗係数データの提供をはじめ、前述のデータベースの拡張も可能となる。

さらに、第1章で述べたとおり、現在当所では、多くのCAFSSのユーザーに対して技術協力を行っているが、その内容充実は必要不可欠である。また、ギャロッピングに関しては未解明、未解決の問題が山積みされていることから、これらに迅速に対処していくことが、当所の使命である。

今後、

1) 空気力モデルの精緻化を中心としたCAFSSの機能

向上

2) 空気抵抗係数算出のための流体力解析システムの構築

3) 利用技術向上のためのユーザーサポートおよび依頼研究への適切かつ迅速な対応

を通し、本質的なギャロッピング対策の確立、実現に向けた研究を推進することが重要と考えている。

# お わ り に

理事 我孫子研究所長 加藤 正進



我が国における架空送電線は、平成12年度末現在、巨長約84500km（500kV送電線6800km、187～275kV送電線14200km、154kV以下送電線63500km）で、鉄塔を含めると膨大な量の設備であり、これらは、電力の安定供給の要として稼働しています。これらの送電設備と強風下での安全性に関わる研究は、当所において、昭和50年頃から開始されており、約30年の歴史があります。そして、1991年9月の台風19号による鉄塔倒壊被害を契機に、流体力学や構造力学など当研究所の総合力を発揮して耐風設計に関する研究を本格的に推進

し、この10年の間に目覚ましい技術的進展を遂げています。その内容が、本編に納められた「送電設備の風荷重・風応答評価技術」であります。

21世紀は、これまで建設されてきた社会資本を、長期に亘り安全性を損なわずにいかに効率的に維持していくかということが重要な技術課題となります。全国に亘って広がりを持ち、かつ、地域、地理的特性がその安全性に大きく影響する送電設備では、それらが置かれる地域の特徴に配慮した設計・維持管理方法が求められます。それぞれの地域の自然環境と基準化された構造設計とを調和させた建設・保全技術が必要となります。

本編に収録した風荷重・応答評価技術は、地域、地理的特性を考慮できるようにし、かつ、実務を考慮して使い安さを追求した結果を、成果として取りまとめています。現時点で、最も合理的な評価技術と自負しております。本書が、送電設備の設計・維持管理に係わる電力技術者および耐風工学に関係する技術者のお役に立つことができれば、望外の喜びであります。

## 引用文献・資料等

### 第1章

- (1) ASCE: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE7-98) 2000.
- (2) ASCE: Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 74, 1987.
- (3) CSA: Canadian Electrical Code, Part III - Outside Wiring, C22.3, No. 1, Overhead Systems.
- (4) DIN and VDE: Planning and Design of Overhead Power Lines with Rated Voltages above 1kV, DIN-VDE0210 (Engl.) 1987.
- (5) IEC: Loading and Strength of Overhead Transmission Lines, IEC Technical Report 60826, Second Edition 1991.
- (6) EPRI: Reliability Based Design of Transmission Line Structures, Reserch Project 1352-2, Finel Report, EL-4793, Volume 1; Methods, Volume 2; Appendix, 1987.
- (7) 経済産業省：電気設備技術基準・解釈、オーム社、2002.
- (8) 電気学会：送電用支持物設計標準 JEC-127、1979.
- (9) 若本、五味、吉田：強風時における大型送電線鉄塔の挙動の実測と2, 3の考察、電力中央研究所研究報告、No. 69099、1970.
- (10) 前野、高野：大型送電鉄塔の強風時の挙動、電力中央研究所技術第2研究所報告、70016、1971.
- (11) 電力中央研究所、台風研究委員会：多良間島における台風観測報告、1979.
- (12) 送電用鉄塔標準特別委員会海外調査団：送電用鉄塔設計に関する海外調査報告書、電気学会電気規格調査会、1976.
- (13) 北原、花田：UHV 赤城実規模試験線の動的試験 - 地盤調査および地盤物性試験、電力中央研究所研究報告、380053、1981.
- (14) 花田他：UHV 赤城実規模試験線の動的試験 - 鉄塔基礎の試験結果とその力学モデル、電力中央研究所研究報告、381039、1982.
- (15) 前野、花田：UHV 赤城実規模試験線の動的試験 - その(3)鉄塔単体の試験結果、電力中央研究所研究報告、382051、1983.
- (16) 前野、花田：UHV 赤城実規模試験線の動的試験 - その(4)鉄塔単体の数値モデルと動特性、電力中央研究所研究報告、382052、1983.
- (17) 前野、花田、北原：UHV 赤城実規模試験線の動的試験 - その(5)鉄塔-架渉線連成系の動的挙動と耐震性、電力中央研究所研究報告、385051、1986.
- (18) 島田、水島、前野：UHV 赤城実規模試験線の動的試験 - 強風時の応答観測、電力中央研究所研究報告、T86008、1986.
- (19) UHV 送電特別委員会線路部会：送電鉄塔の動的安定性の検討、1982.
- (20) 大熊武司、他：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究(その1)局地風対策研究成果のとりまとめ、日本風工学論文集、No. 82、2000.
- (21) 中村秀治、他：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究(その2)特殊地形の簡易判定法と気流シミュレーションに基づく設計風速の算定法、日本風工学論文集、No. 82、2000.
- (22) 三上康朗、他：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究(その3)特殊地形における風構造特性、日本風工学論文集、No. 83、2000.
- (23) 漆原育男・石川智巳、他：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究(その4)送電鉄塔・架渉線連成系の風応答特性と風荷重算定法、日本風工学論文集、No. 83、2000.
- (24) 大熊武司、他：風向別風速を用いた送電鉄塔の耐風設計法に関する研究 - 「送電用鉄塔の風荷重指針(案)」の骨子 - 、日本風工学論文集(投稿中)
- (25) 石川智巳：送電鉄塔の動的効果を考慮した風荷重評価法に関する研究、土木学会論文集(投稿中)
- (26) 南浩二、他：複雑地形周りの風乱流場に関する研究 - 風洞実験による2山地形周りの乱流特性に関する検討 - 日本風工学論文集(投稿中)
- (27) 山崎智之、他：送電用鉄塔の耐風設計のための風向別基本風速に関する検討、日本風工学論文集(投稿中)
- (28) 中村秀治、他：風向別基本風速マップ作成の試み、日本風工学論文集(投稿中)
- (29) Den Hartog, J. P., "Mechanical Vibrations," McGraw-Hill, 1956.
- (30) Nigol, O. and G. J. Clarke, "Conductor Galloping and Control Based on Torsional Mechanism," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, N. Y., pp. 1-9, 1974.
- (31) 例えば、Proc. of Int. Seminar on CABLE DYNAMICS, JAWE, Tokyo, 13 Oct. 1997.
- (32) 菊池彬、他：架空送電線の耐ギャロッピング設計について、住友電気、第135号、pp. 113-123、1989.
- (33) 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.
- (34) 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.
- (35) 例えば、山岡勝：多導体送電線のギャロッピング振動の数値計算法、電気学会論文誌B分冊、99巻9号、pp. 569-576、1979.
- (36) 山口宏樹、謝旭、雪野照寛：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.
- (37) 大熊武司、他：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.
- (38) Richardson, A. S., "Predicting Galloping Amplitudes," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 114, No. 4, pp. 716-723, 1988.
- (39) Desai, Y. M., A. H. Shah and N. Popplewell, "Galloping

- Analysis for Two-Degree-of-Freedom Oscillator," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 116, No. 2, pp. 2583-2602, 1990.
- (40) 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.
- (41) Yu, P., Y. M. Desai, A. H. Shan and N. Popplewell, "Three Degree-of-Freedom Model for Galloping Part II: Solutions," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 119, No. 12, pp. 2426-2448, 1992.
- (42) Lilien, J. L., "Galloping of Overhead Electrical Lines: Mechanics, Wind Tunnel Experiments and Field Measurement," Proc. of International Symposium Cable Dynamics in Tokyo, Oct. 13, pp. 381-390, 1997.
- (43) 泉、他：高分子絶縁アームによる60～150kV級架空送電線コンパクト化技術の開発、電力中央研究所総合報告、W10、1996.
- (44) 清水幹夫、他：幾何学的非線形性を考慮した送電線のスリートジャンプの解析、構造工学論文集、Vol. 41B、pp. 305-313、1995.
- (45) 清水幹夫：高分子絶縁アーム式送電線の動的応答解析手法の検証、電力中央研究所研究報告、U96015、1996.
- (46) 清水幹夫、佐藤順一：送電鉄塔-架渉線連成系のスリートジャンプの解析、構造工学論文集、Vol. 43B、pp. 403-413、1997.
- (47) 清水幹夫：強風時における配電線路の挙動の解析(その1) - 電線の風応答解析コードの開発及び検証 -、電力中央研究所研究報告、U95056、1996.
- (48) 清水幹夫、他：強風時における配電線の混触に関する検討、構造工学論文集、Vol. 43A、pp. 919-928、1997.
- (49) 清水幹夫、他：相間スペースによる送電線のギャロッピング制御効果に関する検討、電力土木、No. 272、pp. 68-73、1997.
- (50) 清水幹夫：架渉線の空力弾性振動に関する解析的検討 - FEMを用いた2導体送電線のギャロッピングシミュレーション -、電力中央研究所研究報告、U97079、1998.
- (51) 清水幹夫、他：送電線のギャロッピングの幾何学的非線形解析、構造工学論文集、Vol. 44A、pp. 951-960、1998.
- (52) 清水幹夫、他：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.
- (53) 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.
- (54) 清水幹夫：ギャロッピングのシミュレーション、電力技術研究会資料、PE-00-4、pp. 19-24、2000.
- (55) 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.
- Structures (ASCE7-98) 2000.
- (4) Australian Standard: ASS Loading Code, Part2: Wind loads, AS 1190. 2-1989.
- (5) 第1章文献(27)
- (6) 第1章文献(28)
- (7) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、1993.
- (8) 石川智巳：送電鉄塔の動的効果を考慮した風荷重評価法に関する研究、土木学会論文集(投稿中)
- (9) Gomes, L., Vickery, B. J.: Extreme Wind Speeds in Mixed Wind Climates, Journal of Industrial Aerodynamics and Wind Engineering, 2, 1978.
- (10) 松井正宏：構造物の耐風設計における台風モデルを用いた風速の評価とその応用に関する研究、京都大学博士論文、1999.
- (11) 光田寧、藤井健：日本南方洋上における台風の確率モデルの作成、京都大学防災研究所年報第32号B-1、1989.
- (12) 田村幸雄、後藤周平、渡辺泰志：台風シミュレーションを用いた建築物の設計風速評価 風向相関法に基づく風向係数の算定、構造物の安全性および信頼性、JCOSSAR '95、1995.
- (13) 日本風工学会風災害研究会：強風災害の変遷と教訓、2000.11.6.
- (14) 大熊武司、田村幸雄、山岸啓利、中村秀治、石川智巳、本郷栄次郎、箕田義行：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究(その1) 局地風対策研究成果の取りまとめ、日本風工学会論文集、第82号、pp. 39-48、2000.
- (15) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧、1991.
- (16) 本州四国連絡橋公団：耐風設計基準・同解説、1976.
- (17) 本州四国連絡橋公団：明石海峡大橋耐風設計要領・同解説、1990.
- (18) ASCE: Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 74, 1987.
- (19) EPRI: Reliability Based Design of Transmission Line Structures, Research Project 1352-2, Final Report, EL-4793, Vol. 1; Methods, Vol. 2; Appendix, 1987.
- (20) IEC: Loading and Strength of Overhead Transmission Lines, IEC Technical Report 60826, Second Edition 1991.
- (21) Davenport, A. G.: Gust Response Factors for Transmission Line Loading, Proceedings, International Fifth International Conference on Wind Engineering, Pergamon Press, New York, Vol. 2, pp. 899-909, 1979.
- (22) 漆原育男、石川智巳、清水幹夫、三上康朗、中村秀治、本郷栄次郎、箕田義行：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計法に関する研究(その4) 送電鉄塔・架渉線連成系の風応答特性と風荷重算定法、日本風工学会論文集、第83号、pp. 129-140、2000.
- (23) 石川智巳：送電鉄塔・架渉線連成系のガスト応答解析と風荷重評価法に関する検討、電力土木、No. 272、pp. 74-79、1997.
- (24) 石川智巳、中村秀治：送電鉄塔のガスト影響係数の誘導、電力中央研究所 研究報告U97100、1998.

## 第2章

- (1) 経済産業省：電気設備技術基準・解釈、オーム社、2002.
- (2) 電気学会：送電用支持物設計標準JEC-127、1979.
- (3) ASCE: Minimum Design Loads for Buildings and Other

- (25) 石川智巳、中村秀治：架渉線のガスト影響係数および最大水平張力推定式の誘導、電力中央研究所 研究報告 U98004、1998.
- (26) 石川智巳、中村秀治、大熊武司：鉄塔設計における架渉線風荷重の組み合わせに関する検討、土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集、2002.

### 第 3 章

- (1) 石原孟：複雑地形における局所風況の測定と数値予測、日本風工学論文集、No. 91、pp. 3-8、2002.
- (2) 村上周三、持田灯、加藤信介：風力発電サイト立地選定のための局所風況予測モデルの開発、日本風工学論文集、No. 91、pp. 9-16、2002.
- (3) 内田孝紀、大屋裕二：LESを用いた局所風況予測に関する研究、第 23 回風力エネルギー利用シンポジウム、pp. 195-198、2001.
- (4) 南浩二、他：複雑地形周りの風乱流場に関する研究（その 1）日本風工学会誌（投稿中）
- (5) 第 1 章文献<sup>(21)</sup>
- (6) 鷲津久一郎他：有限要素法ハンドブック I 基礎編；II 応用編、培風館、1983.
- (7) 石川智巳：送電鉄塔・架渉線連成系のガスト応答解析と風荷重評価法に関する検討、電力土木、No. 272、pp. 74-79、1997.
- (8) 漆原育男、石川智巳、清水幹夫、三上康朗、中村秀治、本郷栄次郎、箕田義行：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計法に関する研究（その 4）送電鉄塔・架渉線連成系の風応答特性と風荷重算定法、日本風工学会論文集、第 83 号、pp. 129-140、2000.
- (9) 石川智巳、前野陽治、大友敬三、赤木康之、清水幹雄：風観測結果に基づく鉄塔のガスト応答シミュレーション、土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集、1995.
- (10) 清水幹夫、石川智巳、大友敬三、赤木康之、櫃本充美、前野陽治、佐藤順一：有限要素法を用いた送電線の時刻歴応答解析、土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集、1995.
- (11) Bathe: Finite element procedures in engineering analysis, PRENTICE-HALL, 1982.
- (12) 前野陽治、花田和史：UHV 赤城実規模試験線の動的試験 - その(4)鉄塔単体の数値モデルと動特性 -、電力中央研究所研究報告、1983.
- (13) UHV 送電特別委員会線路部会：送電用鉄塔の動的安定性の検討、1982.
- (14) 大熊武司、他：風向別風速を用いた送電鉄塔の耐風設計法に関する研究 - 「送電用鉄塔の風荷重指針（案）」の骨子 -、日本風工学論文集（投稿中）
- (15) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、1993.
- (16) 岩谷祥美：任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション、日本風工

学会誌、Vol. 11、1982.

- (17) 経済産業省：電気設備技術基準・解釈、オーム社、2002.
- (18) 電気学会：送電用支持物設計標準、1979.
- (19) 中村秀治、石川智巳、山崎智之、奥田慎也、南浩二、漆原育男、山岸啓利：送電用鉄塔の等価静的風荷重算定ツールの開発、日本鉄塔協会鉄塔、No. 109、2002.

### 第 4 章

- (1) 三上康朗、漆原育男、櫃本充美、赤井幸夫、加藤央之、山元康裕、朝山修：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究（その 3）特殊地形における風構造特性、日本風工学論文集、No. 83、pp. 117-128、2000.
- (2) 漆原育男、石川智巳、清水幹夫、三上康朗、中村秀治、本郷栄次郎、箕田義行：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計法に関する研究（その 4）送電鉄塔・架渉線連成系の風応答特性と風荷重算定法、日本風工学会論文集、第 83 号、pp. 129-140、2000.
- (3) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、1993
- (4) 塩谷正雄：強風の性質 - 構造物の耐風設計に関連して -、開発社、1992
- (5) 南浩二、他：複雑地形周りの風乱流場に関する研究 - 風洞実験による 2 山地形周りの乱流特性に関する検討 -、日本風工学論文集（投稿中）
- (6) Ishihara, T., Hibi, K. and Oikawa, S.: A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 83, 1999, pp. 95-107.

### 第 5 章

- (1) 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.
- (2) 清水幹夫：送配電線ケーブルの異常振動現象に関する実証的研究、東北大学博士学位論文、1999.
- (3) 武田浩三：最上試験線の紹介、日本風工学会誌、第 65 号、pp. 51-58、1995.
- (4) 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.

### 第 6 章

- (1) 木村吉郎、他：大振幅加振時に 4 導体送電線に作用する非定常空気力の特性、構造工学論文集、Vol. 46A、pp. 1055-1062、2000.
- (2) 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：架空送電線のギャロッピング現象解析技術、電気学会技術報告、第 844 号、2001.

## 既刊「電中研レビュー」ご案内

- NO. 38 「大気拡散予測手法」2000. 3  
NO. 39 「新時代に向けた電力システム技術」2000. 6  
NO. 40 「原子燃料サイクルバックエンドの確立に向けて」2000. 11  
NO. 41 「需要家と電気事業のエネルギーをトータルで考える  
需要家の特性解明と省エネ技術」2000. 11  
NO. 42 「原子力発電所の人工島式海上立地」2001. 1  
NO. 43 「酸性雨の総合評価」2001. 2  
NO. 44 「石炭ガス化複合発電の実現に向けて  
実証機開発の支援と将来への研究展開」2001. 10  
NO. 45 「地球温暖化の解明と抑制」2001. 11  
NO. 46 「微粉炭火力発電技術の高度化  
環境性の向上と発電コストの低減」2002. 11  
NO. 47 「商用周波磁界の生物影響研究」2002. 11

## 編集後記

電中研レビュー No.48「送電設備の風荷重・風応答評価技術」をお届けいたします。

本レビュー原稿準備時の平成14年10月1日、関東地方を通過した台風21号による暴風雨の影響により東京電力(株)の送電鉄塔倒壊事故が発生、幸いにも倒壊による人的被害はなかったものの、自然の強大な力をあらためて感じさせる事故でした。

電力中央研究所では、発電から送・配電にいたる膨大な電気のライフラインを地震、台風、津波、雷や氷雪などの自然の脅威から守るため、自然災害軽減などの研究を実施しています。当所における耐風設計研究としては、昭和50年頃から行われていますが、特に平成3年9月の台風19号の強風で西日本各地の送配電設備が甚大な被害

を受けて以降、翌年の平成4年から全電力大として取り組んだ新たな耐風設計評価手法の開発研究に参画するなど、研究を加速してきました。

本レビューは、これらの新耐風設計評価手法等に関する開発研究を中心に、当所における最新の研究を紹介するものです。

構造物の風対策に従事される研究者・技術者の方々の参考に資することができれば幸いです。

最後になりましたが、これらの研究の推進に多大なご尽力をいただいたばかりか、本レビューの巻頭言にご執筆を賜りました神奈川大学大熊武志教授に、心より謝意を表します。



---

## 電中研レビュー NO.48

平成15年2月28日

編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部  
〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 [ 大手町ビル7階 ]  
☎ (03) 3201-6601 (代表)  
E-mail : [www-pc-ml@criepi.denken.or.jp](mailto:www-pc-ml@criepi.denken.or.jp)  
<http://criepi.denken.or.jp/>  
印刷・株式会社 電友社

---

本部 / 経済社会研究所 〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 ☎ (03) 3201-6601 我孫子研究所 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎ (04) 7182-1181  
柏江研究所 / 情報研究所 / 原子力情報センター 横須賀研究所 〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎ (0468) 36-2121  
ヒューマンファクター研究センター / 低線量放射線研究センター / 事務センター 赤城試験センター 〒371-0241 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎ (027) 283-2721  
〒201-8511 東京都柏江市岩戸北2-11-1 ☎ (03) 3480-2111 塩原実験場 〒329-2801 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎ (0287) 35-2048

---

