

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^{(1)~(4)}。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⁽⁵⁾。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

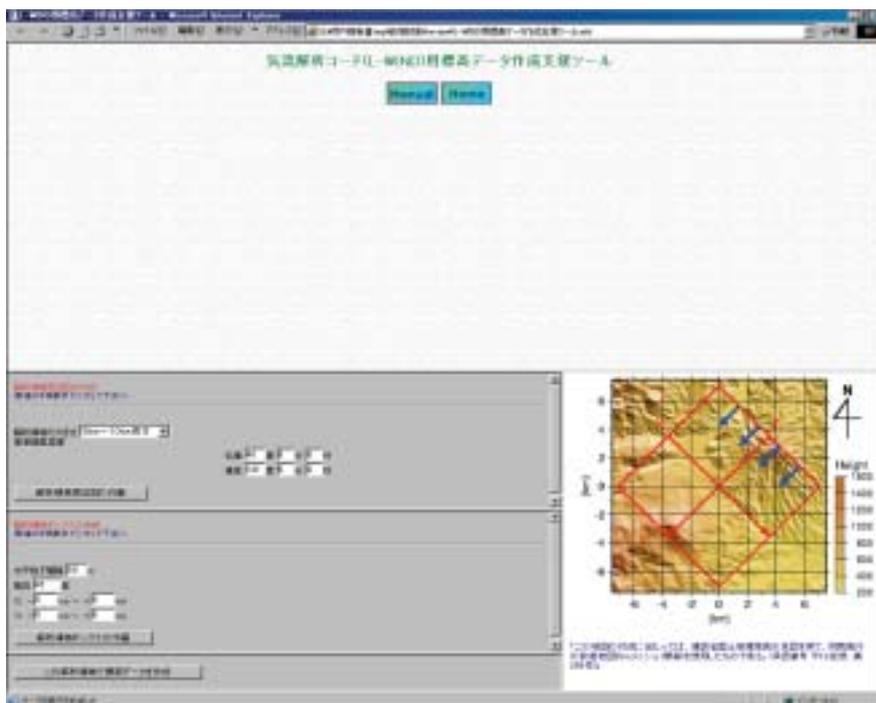


図3-1-1 L-WIND用地形データ作成のためのプリプロセッサ

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。

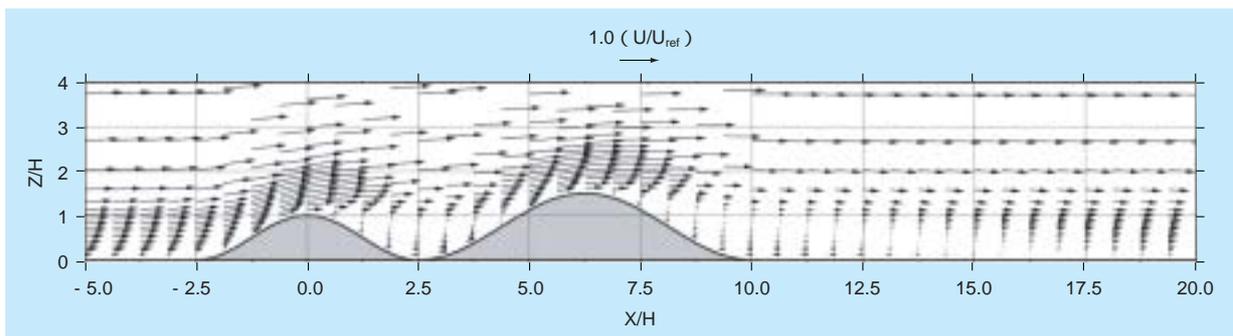


図3-1-2 地形周りの平均風速ベクトル

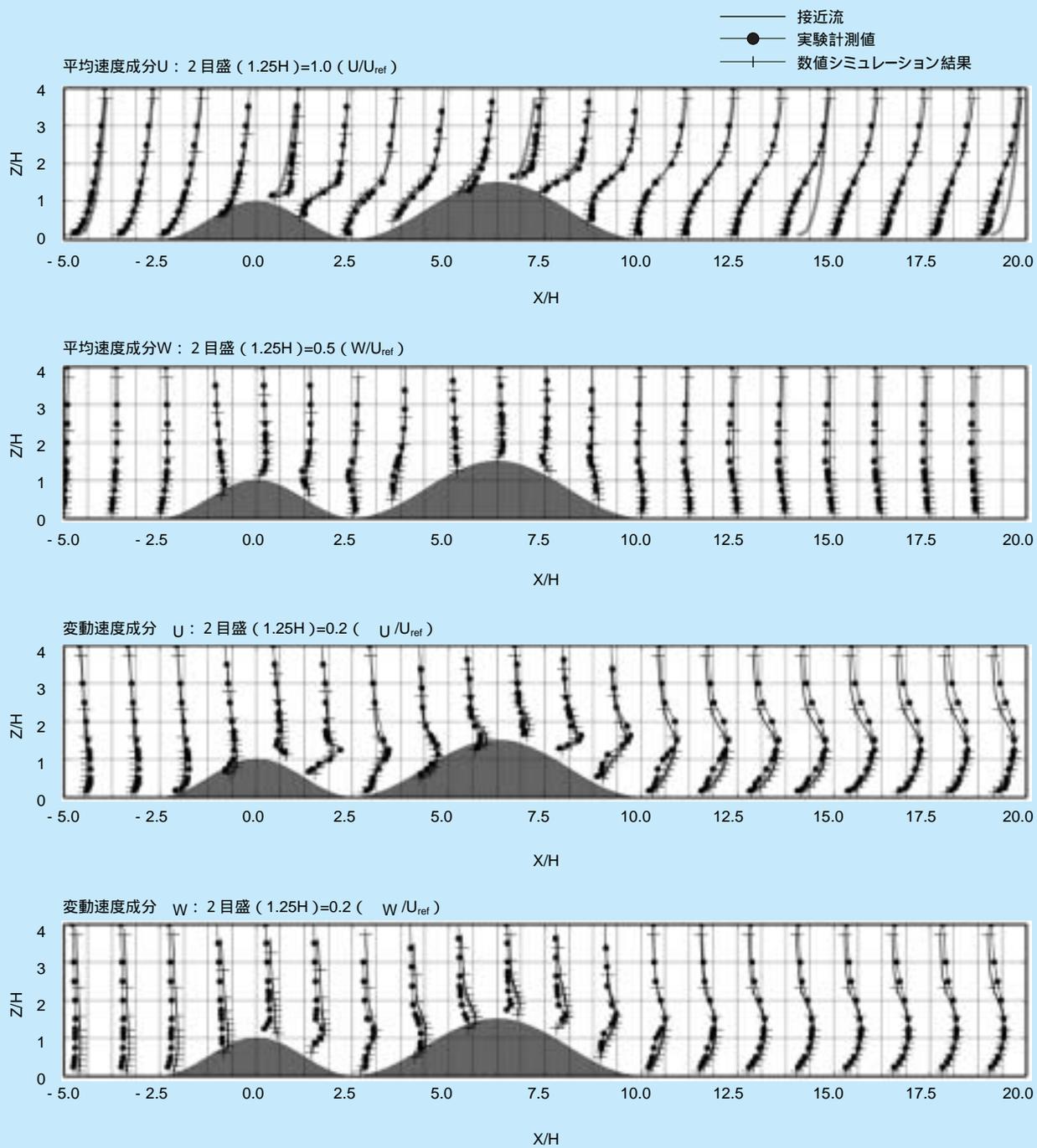


図3-1-3 解析結果と風洞実験結果との比較



図3-1-4 風洞実験の地形模型

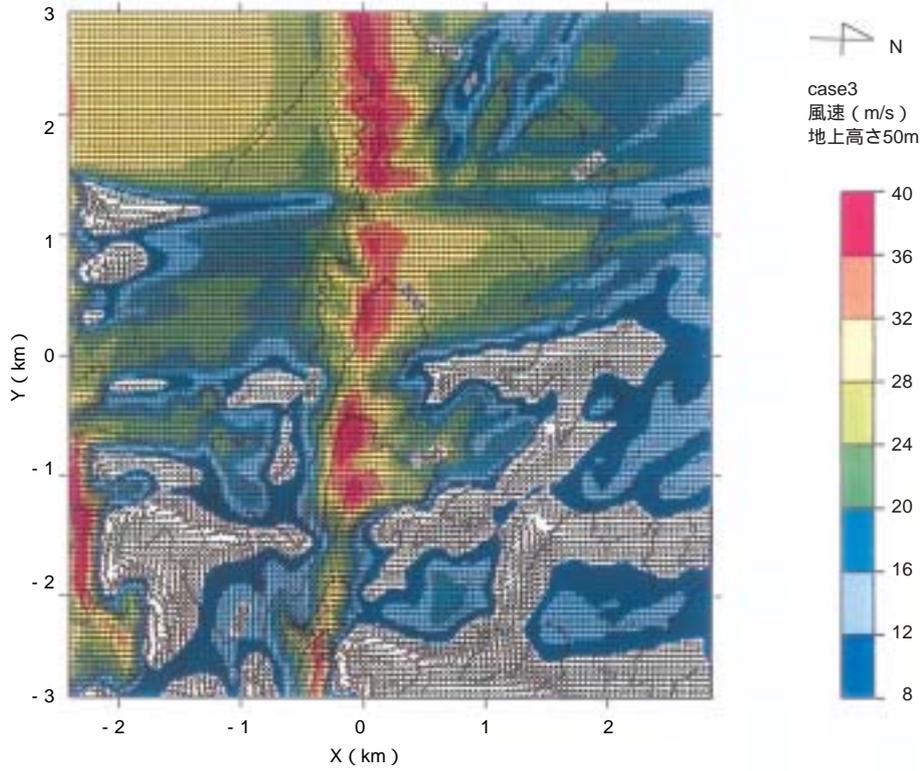


図3-1-5 解析結果

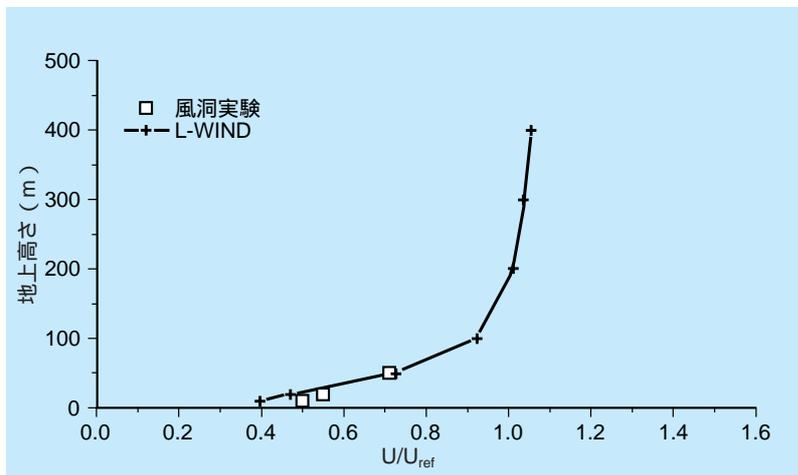


図3-1-6 平均風速の鉛直分布

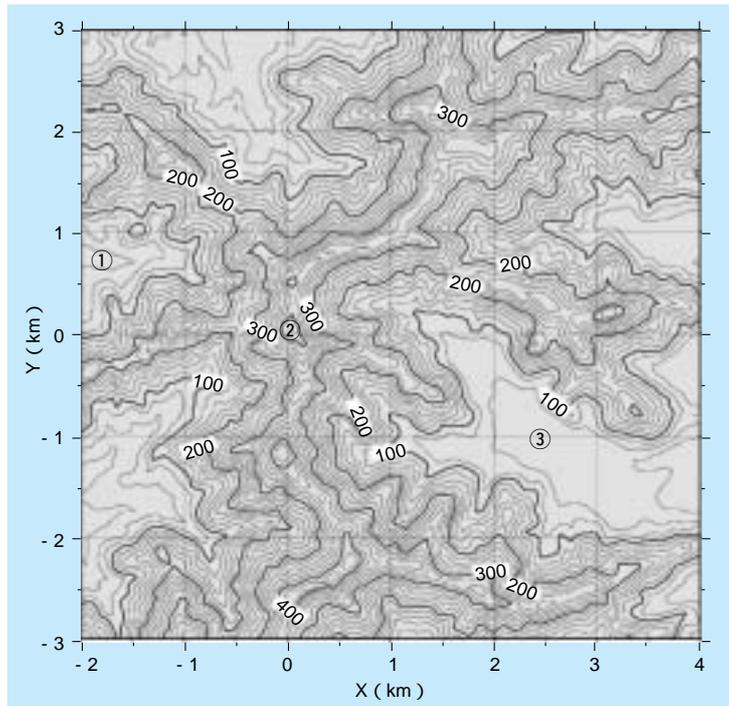


図3-1-7 検討対象地点（中部地方山岳部）

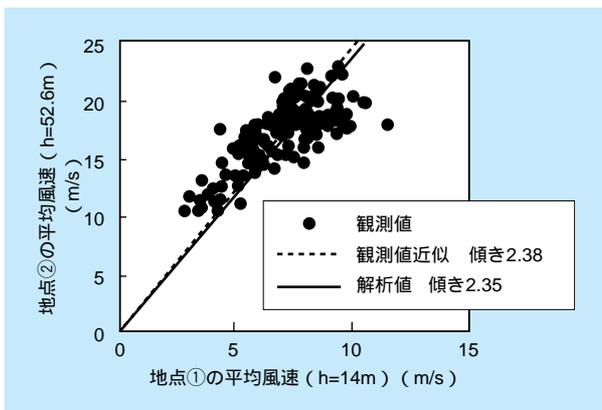


図3-1-8 地点①—②間の平均風速の関係

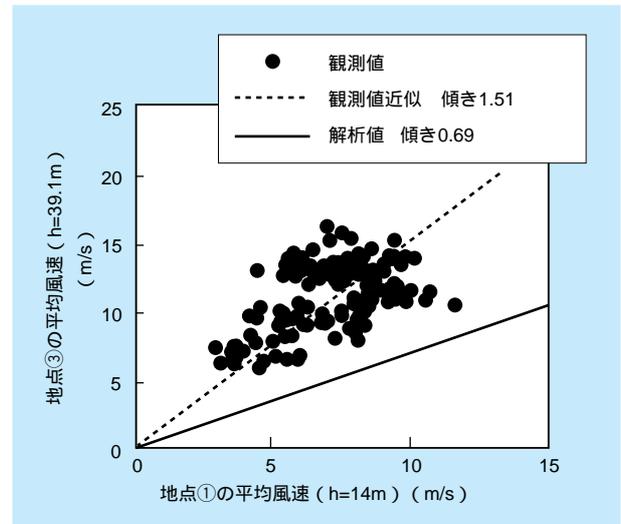


図3-1-9 地点①—③間の平均風速の関係

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	角度	K1値	角度	K1値	角度	K1値	角度	平均K1値
0	1.88	1	2.00	2	2.00	3	2.00	4	2.00
5	2.00	6	2.00	7	2.00	8	2.00	9	2.00
10	2.00	11	2.00	12	2.00	13	1.87	14	1.87
15	2.21	16	2.20	17	2.29	18	1.90	19	1.90
20	1.81	21	1.90	22	1.90	23	1.89	24	1.89
25	1.88	26	1.87	27	1.86	28	1.95	29	1.98
30	1.85	31	1.81	32	1.80	33	1.80	34	1.79
35	1.76	36	1.76	37	1.77	38	1.76	39	1.56
40	1.95	41	1.54	42	1.53	43	1.53	44	1.49
45	1.71	46	1.71	47	1.53	48	1.50	49	1.50
50	1.37	51	1.36	52	1.21	53	1.21	54	1.50
55	1.54	56	1.52	57	1.54	58	1.51	59	1.64
60	1.82	61	1.82	62	1.80	63	1.81	64	1.50
65	1.50	66	1.50	67	1.45	68	1.44	69	1.44
70	1.44	71	1.00	72	1.00	73	1.00	74	1.00
75	1.00	76	1.00	77	1.00	78	1.00	79	1.00
80	1.00	81	1.00	82	1.00	83	1.00	84	1.00
85	1.00	86	1.00	87	1.00	88	1.00	89	1.00
90	1.00	91	1.00	92	1.00	93	1.00	94	1.00
95	1.00	96	1.00	97	1.00	98	1.00	99	1.00
100	1.00	101	1.00	102	1.00	103	1.00	104	1.00
105	1.00	106	1.00	107	1.00	108	1.00	109	1.00
110	1.00	111	1.00	112	1.00	113	1.00	114	1.00
115	1.00	116	1.00	117	1.00	118	1.00	119	1.00
120	1.00	121	1.00	122	1.00	123	1.00	124	1.39
125	1.29	126	1.30	127	1.30	128	1.30	129	1.30
130	1.32	131	1.32	132	1.32	133	1.34	134	1.34
135	1.34	136	1.34	137	1.37	138	1.37	139	1.58
140	1.58	141	1.59	142	1.59	143	1.59	144	1.79
								139-142	1.58

図3-2-2 k1-adviser出力画面 1

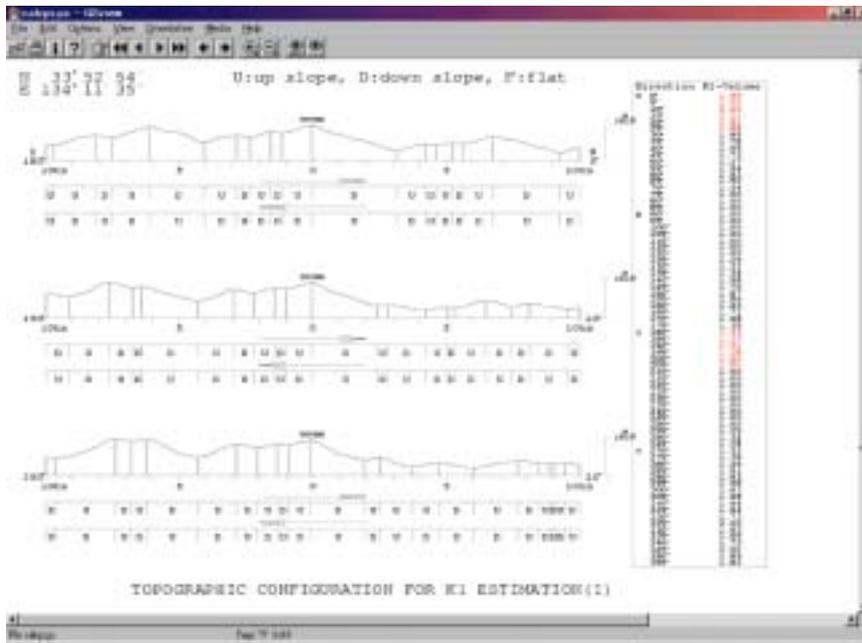


図3-2-3 k1-adviser出力画面 2

(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 ν [°]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。

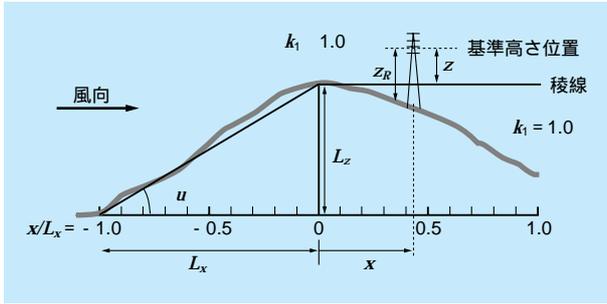


図3-2-4 斜面形状を表す記号

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

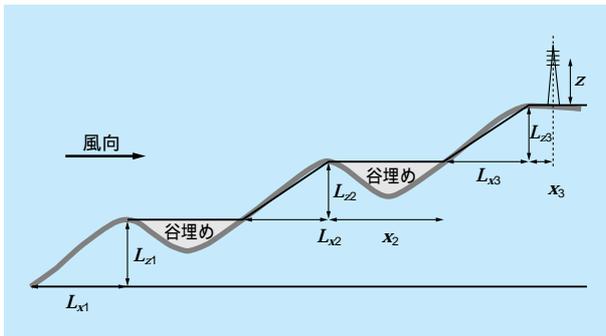


図3-2-5 谷埋めによる崖状地形への置き換え

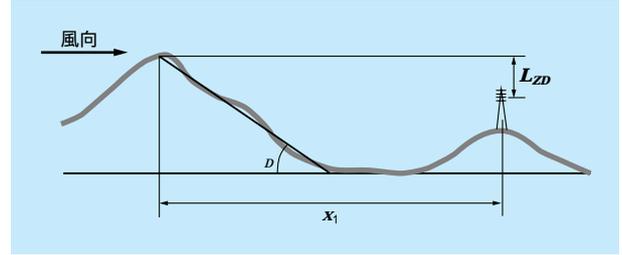


図3-2-6 風上側地形の遮蔽効果

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 ± 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。

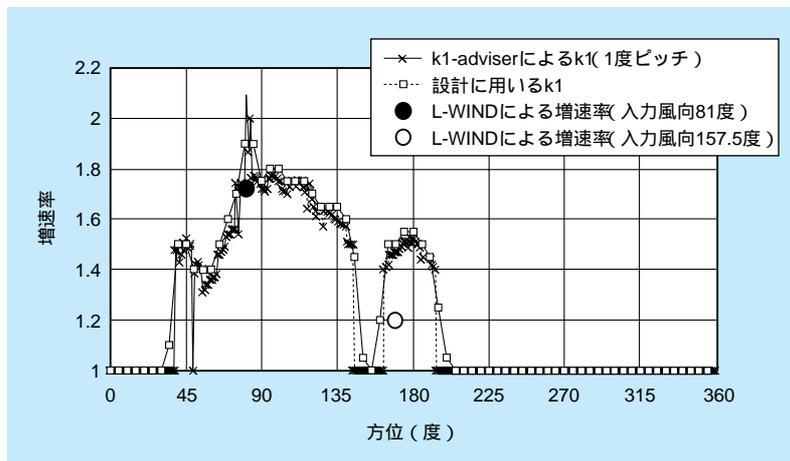


図3-2-7 k_1 とL-WINDによる解析結果(官署日光)

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⁽⁶⁾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^{(6)~(10)}。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⁽³⁾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 風のように入力が入力が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

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

なお、 ρ ：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。

$$g_j = \frac{0.577}{2 \ln \left(\frac{1}{jT} \right) + \frac{0.577}{2 \ln \left(\frac{1}{jT} \right)}} \quad (3-3-4)$$

$$j = \frac{\int_0^T f^2 S_{xj}(f) df}{\int_0^T S_{xj}(f) df} \quad (\text{期待振動数}) \quad (3-3-5)$$

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

(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⁽¹⁾。

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

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⁽¹²⁾⁽¹³⁾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」⁽⁴⁾あるいは「日本建築学会荷重指針・同解説」⁽⁵⁾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⁽⁶⁾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⁽⁶⁾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」⁽⁴⁾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、その一つの選択肢として上述した解析コードを付録として示している。

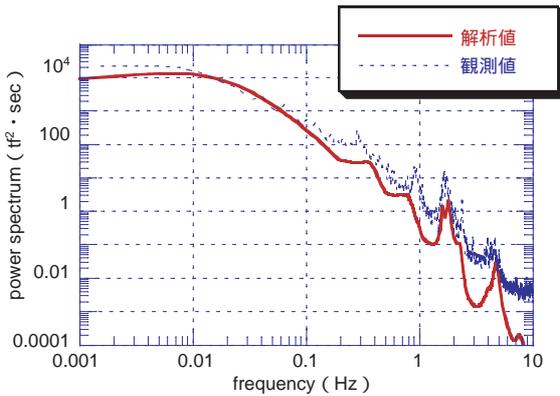


図3-3-1 支柱材基部軸力のパワースペクトル密度

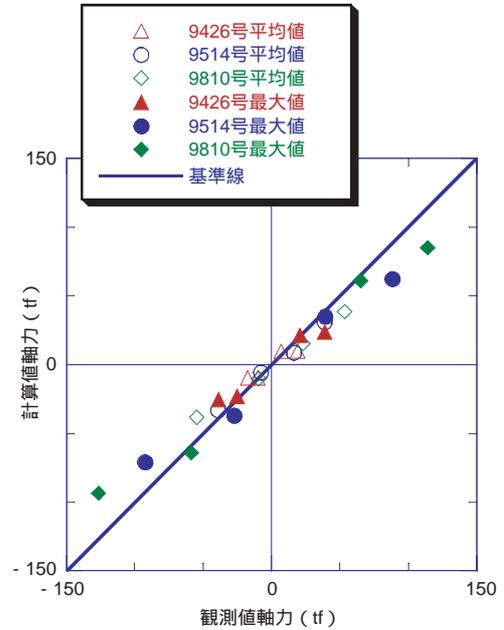


図3-3-2 周波数応答解析結果と観測値との比較

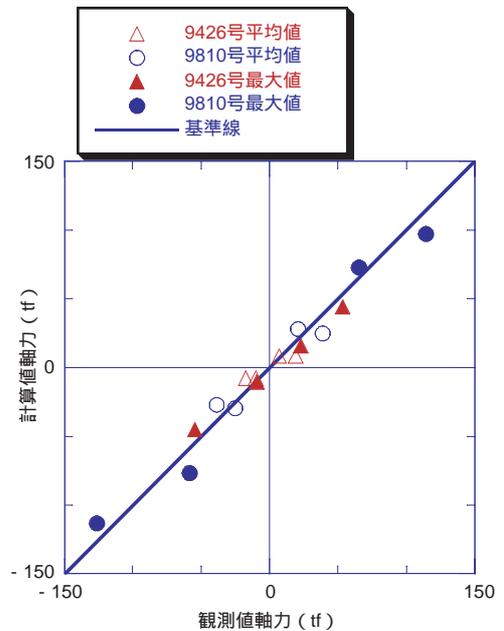


図3-3-3 時刻歴応答解析結果と観測値との比較

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¹⁷⁾¹⁸⁾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¹⁹⁾。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

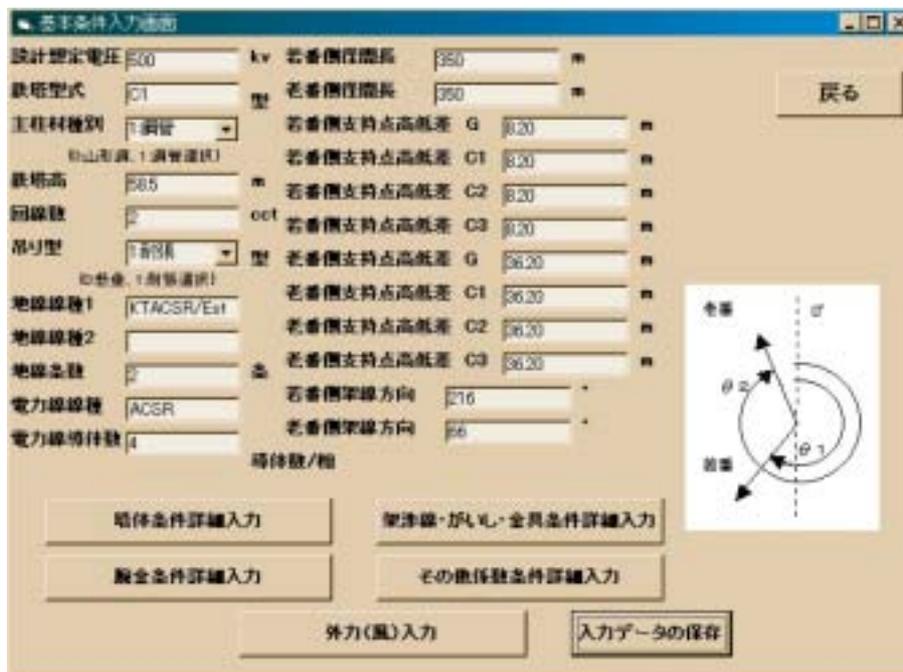


図3-4-2 入力画面の一例（各種設計条件入力・基本条件入力画面）

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

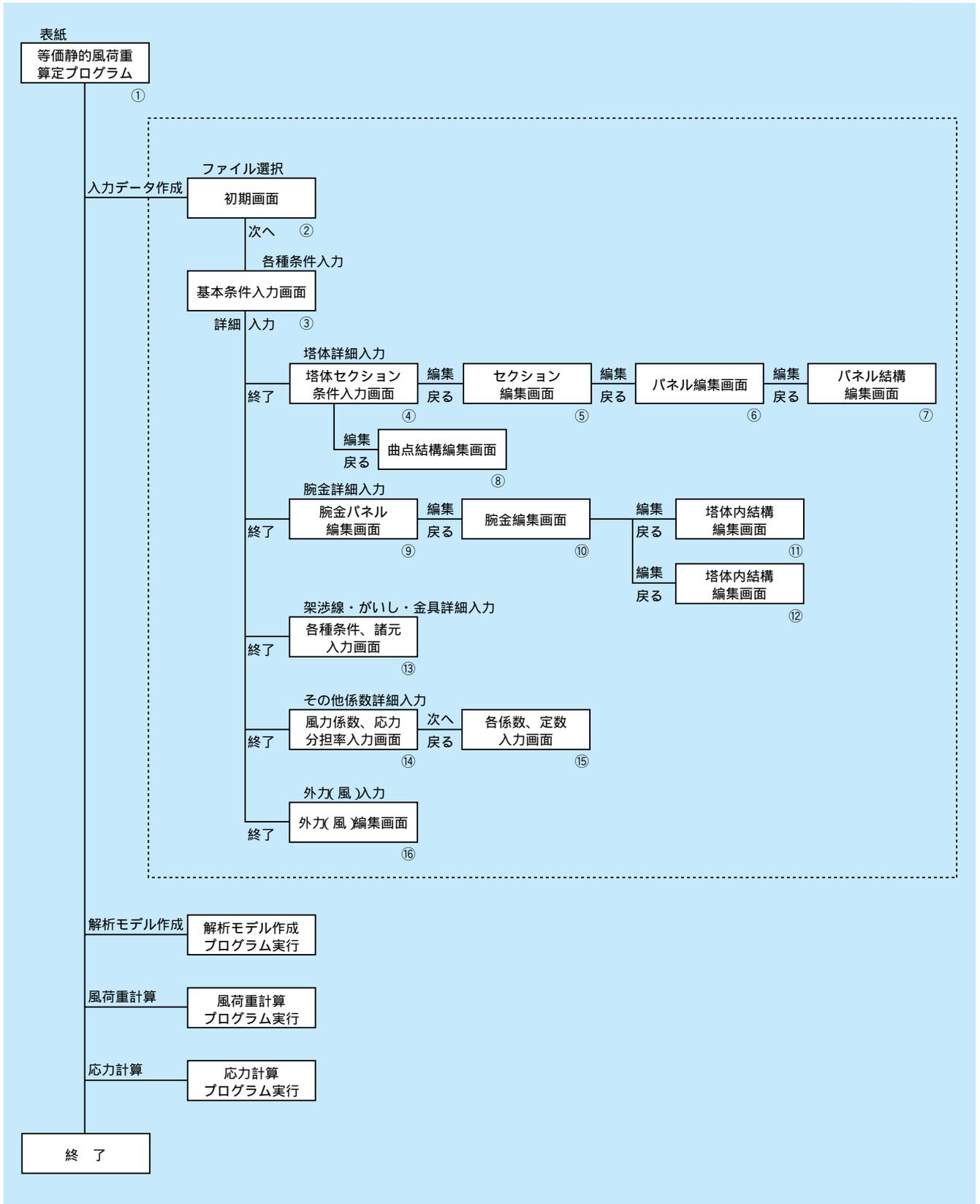


図3-4-3 入力画面相互の関係

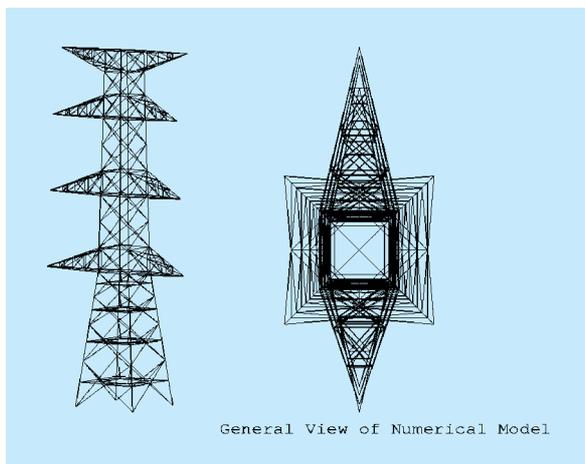


図3-4-4 解析モデルの作成例

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

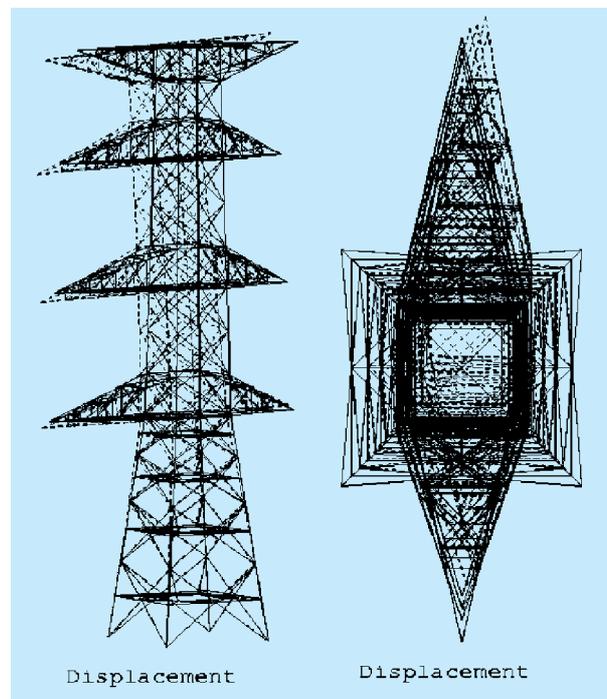


図3-4-5 塔体全体の変形図

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.



出典：Yoshino, 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