

令和元年度産業保安等技術基準策定研究開発等事業

（令和元年台風 15 号による送配電設備の事故原因の調査・分析等
に係る調査）

報告書

令和 2 年 2 月



みずほ情報総研株式会社

(空白ページ)

<目次>

1	事業の目的・内容	1
1.1	事業目的	1
1.2	事業内容	1
1.2.1	送配電設備の技術基準等の現状調査	1
1.2.2	鉄塔及び電柱の事故原因調査	2
1.2.3	ワーキンググループに係る対応	2
1.2.4	送配電設備の技術基準のあり方の検討	2
2	送配電設備の技術基準等の現状調査	3
2.1	国内における鉄塔及び電柱に係る技術基準の調査	3
2.1.1	電気事業法第 39 条に基づく電気設備の技術基準	3
2.1.2	鉄塔及び電柱に係る風圧荷重の技術基準の変遷	5
2.1.3	送電用鉄塔設計標準の解説 JEC-TR00007-2015	8
2.2	電力各社における取組	9
2.3	国内の他制度における地域風速の適用事例	10
2.4	国外の鉄塔及び電柱に係る風圧荷重の技術基準	11
2.4.1	国外の鉄塔に係る風圧荷重の技術基準	11
2.4.2	国外の電柱に係る風圧荷重の技術基準	20
2.5	風速の荷重変換に係る係数について（安全率、ガスト影響係数）	25
3	鉄塔及び電柱の事故の原因調査	29
3.1	台風 15 号の概要	29
3.1.1	概要	29
3.1.2	千葉県内の最大風速・風向分布	30
3.1.3	倒壊した鉄塔近傍のアメダス観測点の風速データ	31
3.2	鉄塔及び電柱の損壊事故の概要	34
3.2.1	鉄塔の損壊事故の概要	34
3.2.2	電柱の損壊事故の概要	36
3.3	鉄塔及び電柱の損壊事故の原因調査	38
3.3.1	調査の概要	38
3.3.2	鉄塔の損壊事故の原因調査	38
3.3.3	電柱の損壊事故の原因調査	51
3.4	損壊原因の現状分析結果について	58
3.4.1	鉄塔	58
3.4.2	電柱	58
3.5	現地調査の実施について	59
3.6	東京電力 P G による事故原因調査について	61
3.6.1	鉄塔	61

3.6.2	電柱.....	63
4	ワーキンググループに係る対応.....	67
4.1	ワーキンググループの概要.....	67
4.2	ワーキンググループに係る対応	69
4.3	有識者・事業者ヒアリングの実施.....	69
4.4	鉄塔補強工法の検討.....	69
4.5	風況計測事例の調査.....	74
4.6	台風のこれまでの変化と将来予測について	77
5	送配電設備の技術基準のあり方の検討.....	79
5.1	鉄塔の技術基準のあり方	79
5.1.1	現行の技術基準の適切性.....	79
5.1.2	地域の実情を踏まえた基準風速（地域風速）の適用	79
5.1.3	今般の倒壊事故に係る特殊地形について	79
5.2	電柱の事故対策及び技術基準のあり方	80
5.2.1	事故対策のあり方	80
5.2.2	現行の技術基準の見直しについて	81
5.3	ロードマップ案.....	84

＜表目次＞

表 2-1	電気設備の技術基準（抄）	3
表 2-2	電気設備の技術基準の解釈（抄）	3
表 2-3	電気設備の技術基準の解釈における風圧荷重の例（電気設備の技術基準の解釈 58-1 表）	4
表 2-4	電気設備の技術基準の解釈における組合せによる荷重の例（電気設備の技術基準の解釈 58-4 表）	5
表 2-5	鉄塔及び電柱に係る風圧荷重の技術基準の変遷.....	6
表 2-6	技術基準の解釈 57 条解説.....	6
表 2-7	電気学会電気規格調査会標準規格 JEC-127-1965「送電用鉄塔設計標準」説明書.....	7
表 2-8	基準風速の個別設定（鉄塔）	9
表 2-9	支線の設置や基準風速の個別設定（電柱）	9
表 2-10	国外の規格における設計風速（鉄塔）	12
表 2-11	国外の規格における設計風速（電柱）	21
表 2-12	電気設備の技術基準の解釈（抄）	25
表 2-13	許容引張応力、許容圧縮応力、許容曲げ応力、許容せん断応力及び許容支圧応力の規定（電気設備の技術基準の解釈の 57-1 表）	26
表 2-14	地表面粗度区分.....	27
表 2-15	ガスト影響係数の算出.....	27

表 2-16	電気設備の技術基準と建築基準法の風圧荷重の規定	28
表 3-1	期間最大風速（9月7日から9日）	30
表 3-2	期間最大瞬間風速（9月7日から9日）	30
表 3-3	倒壊した鉄塔近くのアメダス観測点（木更津、坂畑、牛久）の最大風速、最大瞬間風速.....	32
表 3-4	鉄塔の被害状況.....	34
表 3-5	66kV 木内線設備概要	35
表 3-6	電柱の被害状況.....	36
表 3-7	鉄塔の損壊事故の原因調査の調査項目と調査対象	38
表 3-8	保安規程（鉄塔）	40
表 3-9	倒壊した No.78、No.79 の巡視点検記録.....	40
表 3-10	倒壊した鉄塔に隣接する No.77、No.80 の巡視点検記録	40
表 3-11	電柱の損壊事故の原因調査の調査項目と調査対象	51
表 3-12	保安規程（電柱）	53
表 3-13	電柱の巡視点検記録	54
表 3-14	電柱の損壊原因の判定の内訳	54
表 3-15	改修管理表の一例	55
表 3-16	現場作業員からの報告の一例.....	55
表 3-17	風況シミュレーション結果における有識者からの指摘等	58
表 3-18	倒壊メカニズムのシミュレーション結果における有識者からの指摘等	58
表 3-19	現地調査概要	59
表 3-20	現地調査における委員からのご意見等（鉄塔）	60
表 3-21	現地調査における委員からのご意見等（電柱）	61
表 3-22	東電委員会の開催状況.....	62
表 3-23	東電委員会における調査検討事項.....	63
表 3-24	調査検討チームにおける検討事項.....	64
表 3-25	調査検討チームにおける実施項目及び内容	65
表 4-1	ワーキンググループの設置趣旨（2019年（令和元年）11月）	67
表 4-2	ワーキンググループ委員等構成	67
表 4-3	ワーキンググループの開催実績	68
表 4-4	強度の増強方法とその特徴.....	70
表 5-1	経済産業省による総点検指示事項.....	80
表 5-2	各電力会社による二次被害対策	81
表 5-3	コンクリート柱、鉄柱、木柱について	82
表 5-4	台風 15 号による各電柱の損壊状況	83
表 5-5	電気設備の技術基準（抄）【再掲】	84

＜図目次＞

図 2-1	風速分布図（4月～11月（高温季））	7
図 2-2	市町村別の基準風速マップ（平成12年建設省告示第1454号）	10
図 2-3	米国における地域風速マップ	13
図 2-4	オーストラリアにおける地域風速マップ	15
図 2-5	フィリピンにおける地域風速マップ	18
図 2-6	米国における地域風速マップ	22
図 2-7	オーストラリアにおける地域風速マップ	24
図 2-8	許容応力度設計法のイメージ	26
図 2-9	鉛直分布係数の算出のイメージ	28
図 3-1	気象レーダー（上陸時）	29
図 3-2	千葉県内の最大風速・風向分布図	31
図 3-3	倒壊した鉄塔近くのアメダス観測点（木更津、坂畑、牛久）	32
図 3-4	木更津の風速時系列データ（9月9日午前0時から午前8時）	33
図 3-5	坂畑の風速時系列データ（9月9日午前0時から午前8時）	33
図 3-6	牛久の風速時系列データ（9月9日午前0時から午前8時）	33
図 3-7	倒壊した鉄塔の位置と倒壊方向	35
図 3-8	倒壊した鉄塔（No.78）	36
図 3-9	電柱の被害発生状況分布図	37
図 3-10	倒木・飛来物による電柱損壊現場の様子	37
図 3-11	鉄塔設計条件・設計図面・設計計算書（No.78）	39
図 3-12	鉄塔設計条件・設計図面・設計計算書（No.79）	39
図 3-13	鉄塔の倒壊の様子	41
図 3-14	倒壊鉄塔下部の座屈状況（No.78 鉄塔）	42
図 3-15	倒壊鉄塔下部の座屈状況（No.79 鉄塔）	42
図 3-16	柱体部の損傷状況	43
図 3-17	基礎体・地中部の損傷状況	43
図 3-18	送電線の状況	44
図 3-19	周辺の倒木の分布と方向	45
図 3-20	現地風速の推定	47
図 3-21	観測所における風速・風向の観測結果とシミュレーション結果の比較	48
図 3-22	現地風速の推定結果	49
図 3-23	損壊事故現場周辺の地形	49
図 3-24	動的解析と等価静的解析の比較	50
図 3-25	鉄塔の応力シミュレーション	50
図 3-26	強度計算の例（千葉県千葉市若葉区川井町）	52
図 3-27	電柱配置図面の例（千葉県千葉市若葉区川井町）	53
図 3-28	図面・写真の一例	55

図 3-29	現場調査表の一例	55
図 3-30	電柱の損壊事故で二次被害が原因と断定できない例	56
図 3-31	再調査により原因の特定に至った例	57
図 3-32	原因の特定に至っていない電柱（2 本）	57
図 3-33	現地調査の様子	60
図 4-1	鉄塔の建て替え工法の事例	70
図 4-2	鉄塔の改修工法の事例（1/2）	71
図 4-3	鉄塔の改修工法の事例（2/2）	72
図 4-4	補強による改修の検討例	73
図 4-5	既存の風速計の事例	74
図 4-6	風況・風向の測定の事例	75
図 4-7	風速測定の事例	76
図 4-8	1977 年（昭和 52 年）以降の「強い」以上の台風の発生数、発生割合の推移	77
図 4-9	2000～2019 年と 2081～2100 年の熱帯低気圧の指標の変化率	78
図 4-10	すべての台風と猛烈な台風の存在頻度変化の将来予測	78
図 5-1	電柱の連鎖倒壊と支線の事例	83
図 5-2	ロードマップ案	84

(空白ページ)

1 事業の目的・内容

1.1 事業目的

令和元年台風 15 号では、一般送配電事業者の送配電設備に多数の設備被害が及び、千葉県内の広域で約 16 日間の長期間、停電が続く事態となった¹。特に、鉄塔の倒壊や多数の電柱の折損・損壊の事故が発生したが、こうした設備被害の事故原因を究明し、今後の送配電設備の被害軽減を図ることが重要である。

本調査では、鉄塔の倒壊事故や多数の電柱の折損・損壊事故の原因調査を行うとともに、最近の自然災害の頻発化・激甚化を踏まえ、鉄塔及び電柱に係る電気設備の技術基準のあり方についても検討した。

なお、本調査の対象となる送配電設備は鉄塔及び電柱とし、以下、特に断りのない限り「送配電設備」とは鉄塔及び電柱をいう。

1.2 事業内容

本事業では、台風 15 号による鉄塔の倒壊事故や多数の電柱の折損・損壊事故の原因調査や分析を行うとともに、今後の自然災害に備えた対策について検討した。また、近年の自然災害の頻発化・激甚化を踏まえた技術基準のあり方について検討した。

本事業の実施に当たり、経済産業省電力安全課（以下「電安課殿」）が提供するデータに加えて、受託者であるみずほ情報総研の調査員により検討に必要な文献やデータ等を入手の上、分析・評価等の検討を行った。この際、関係者（関連分野の有識者、業務従事者、研究機関、メーカー、電気事業者）からのヒアリング調査等を活用して分析・評価を行った。

1.2.1 送配電設備の技術基準等の現状調査

電気事業法第 39 条に基づく電気設備の技術基準（電気設備に関する技術基準を定める省令。以下、特に断りのない限り「技術基準」とは同省令をいう。）に関して、今後のあり方検討に資するため、下記の内容について調査を行った。調査にあたり、「電力安全小委員会送電線鉄塔倒壊事故調査ワーキンググループ報告書（平成 14 年 11 月 27 日）²」及び「平成 25 年度災害に強い電気設備検討調査（送電鉄塔）報告書（平成 26 年 2 月）³」を参考とした。

(1) 鉄塔及び電柱に係る技術基準

これまでの鉄塔及び電柱に係る技術基準の改正内容や設定根拠等について、背景事情を

¹ <http://www.tepco.co.jp/press/release/2019/pdf4/191031j0201.pdf> （2020 年（令和 2 年）2 月閲覧）

²

<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/285403/www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g21128bj.pdf> （2019 年（令和元年）11 月閲覧）

³

http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11241027/www.meti.go.jp/meti_lib/report/2014fy/E003790.pdf （2019 年（令和元年）11 月閲覧）

踏まえて関連法令・規格等を整理するとともに、近年の自然災害の頻発化・激甚化を踏まえた送配電設備の技術基準のあり方について調査した。

(2) 各電力会社の設計に関する基準の調査

各電力会社における送配電設備の設計に関する基準の考え方について調査した。

(3) その他関連する基準・規格の調査

洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説、建築基準法といった国内の関連する基準・規格、国外の送配電設備の設計に関する技術基準の考え方について調査した。

1.2.2 鉄塔及び電柱の事故原因調査

千葉県内で発生した台風 15 号による鉄塔（2 基）の倒壊事故や電柱（対象 1,996 本）の折損・倒壊事故の原因を調査するとともに、その原因の分析を行った。原因の分析にあたっては、必要に応じて、関連文献調査、有識者・業務従事者等に対するヒアリング調査等も実施した。また、有識者等と共に鉄塔（住所：千葉県君津市長石）に係る現地調査を実施し、鉄塔の倒壊事故現地の状況把握、保全・復旧工事等を行った事業者、鉄塔及び電柱の損壊に関する写真・記録データの確認を行った。

1.2.3 ワーキンググループに係る対応

本事業で調査・分析した内容については、電安課殿が本事業とは別に開催する学識経験者や研究者の委員 7 名から成る「令和元年台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ」（以下、「ワーキンググループ」）（2019 年（令和元年）11 月～2020 年（令和 2 年）1 月までの期間に 5 回開催）における検討にあたり、ワーキンググループでの議論に資するよう以下①～②を実施した。

- ① 1.2.1 及び 1.2.2 の調査内容に関して、ワーキンググループでの検討に活用できるよう、情報を整理し資料の案を作成。
- ② ワーキンググループの傍聴、並びにワーキンググループ速記録案及び議事要旨案を作成。

1.2.4 送配電設備の技術基準のあり方の検討

1.2.1～1.2.3 の実施結果及びその他の電安課殿から提供されるデータ等を踏まえて、送配電設備の技術基準のあり方や今後の対応方針について検討を行った。

2 送配電設備の技術基準等の現状調査

2.1 国内における鉄塔及び電柱に係る技術基準の調査

2.1.1 電気事業法第 39 条に基づく電気設備の技術基準

電気事業法第 39 条に基づく電気設備の技術基準において、鉄塔及び電柱（架空電線路の支持物）の材料及び構造は、以下のとおり、引張荷重や風圧荷重等を考慮し、倒壊のおそれがないよう安全なものであることが求められている。

表 2-1 電気設備の技術基準（抄）

【支持物の倒壊の防止】

第 32 条 架空電線路又は架空電車線路の支持物の材料及び構造（支線を施設する場合は、当該支線に係るものを含む。）は、その支持物が支持する電線等による引張荷重、風速四十メートル毎秒の風圧荷重及び当該設置場所において通常想定される気象の変化、振動、衝撃その他の外部環境の影響を考慮し、倒壊のおそれがないよう、安全なものでなければならない。ただし、人家が多く連なっている場所に施設する架空電線路にあっては、その施設場所を考慮して施設する場合は、風速四十メートル毎秒の風圧荷重の二分の一の風圧荷重を考慮して施設することができる。

2 特別高圧架空電線路の支持物は、構造上安全なものとする等により連鎖的に倒壊のおそれがないように施設しなければならない。

表 2-2 電気設備の技術基準の解釈（抄）

【架空電線路の強度検討に用いる荷重】（省令第 32 条第 1 項）

第 58 条 架空電線路の強度検討に用いる荷重は、次の各号によること。

一 風圧荷重 架空電線路の構成材に加わる風圧による荷重であって、次の規定によるもの

イ 風圧荷重の種類は、次によること。

（イ） 甲種風圧荷重 58-1 表に規定する構成材の垂直投影面に加わる圧力を基礎として計算したもの、又は風速 40m/s 以上を想定した風洞実験に基づく値より計算したもの（例鉄塔 2,840Pa 等）

（略）

五 常時想定荷重 架渉線の切断を考慮しない場合の荷重であって、風圧が電線路に直角の方向に加わる場合と電線路に平行な方法に加わる場合とについて、それぞれ 58-4 表に示す組合せによる荷重が同時に加わるものとして荷重を計算し、各部材について、その部材に大きい応力を生じさせる方の荷重

表 2-3 電気設備の技術基準の解釈における風圧荷重の例（電気設備の技術基準の解釈
58-1 表）

風圧を受けるものの区分				構成材の垂直投影面 に加わる圧力	
支持物	木柱			780Pa	
	鉄筋コンクリート柱		丸形のもの	780Pa	
			その他のもの	1,180Pa	
	鉄柱	丸形のもの			780Pa
		三角形又はひし形のもの			1,860Pa
		鋼管により構成される四角形のもの			1,470Pa
		その他のもの	腹材が前後面で重なる場合		2,160Pa
			その他の場合		2,350Pa
		鉄塔	単柱	丸形のもの	
	六角形又は八角形のもの			1,470Pa	
	鋼管により構成されるもの（単柱を除く。）			1,670Pa	
	その他のもの（腕金類を含む。）			2,840Pa	
架渉線	多導体（構成する電線が 2 条ごとに水平に配列され、かつ、当該電線相互間の距離が電線の外径の 20 倍以下のものに限る。以下この条において同じ。）を構成する電線			880Pa	
	その他のもの			980Pa	
	がいし装置（特別高圧電線路用のものに限る。）			1,370Pa	
腕金類（木柱、鉄筋コンクリート柱及び鉄柱（丸形のものに限る。）に取り付けるものであって、特別高圧電線路用のものに限る。）			単一材として使用する場合	1,570Pa	
			その他の場合	2,160Pa	

表 2-4 電気設備の技術基準の解釈における組合せによる荷重の例（電気設備の技術基準の解釈 58-4 表）

荷重の種類	風圧の方向	垂直荷重							水平横荷重			水平縦荷重		
		架渉線重量	がいし装置重量	支持物部材重量※1	垂直角度荷重※2	支線荷重※3	被氷荷重※4	着雪荷重	風圧荷重	水平角度荷重	ねじり力荷重	風圧荷重	不平均張力荷重	ねじり力荷重
常時 想定 荷重	電線路に直角	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○※5	—	○※6	○※5
	電線路に平行	○	○	○	○	○	○	—		○	○※5	○	○※6	○※5
異常時 想定 荷重	電線路に直角	○	○	○	○	—	○	—	○	○	○	—	○	○
	電線路に平行	○	○	○	○	—	○	—		○	○	○	○	○
異常 着雪時 想定 荷重	電線路に直角	○	○	○	○	—	—	○	○	○	○※5	—	○	○※5
	電線路に平行	○	○	○	○	—	—	○		○	○※5	○	○	○※5

※：○は該当、—は該当なし、であることを示す。

赤枠：架渉線（電線、地線、がいし等）の荷重。

青枠：鉄塔の荷重。

※1：鉄筋コンクリート柱については、腕金類を含む。

※2：電線路に著しい垂直角度がある場合に限る。

※3：鉄筋コンクリート柱又は鉄柱で支線を用いる場合に限る。

※4：乙種風圧荷重を用いる場合に限る。

※5：引留め型又は耐張型の鉄筋コンクリート柱、鉄柱又は鉄塔において、架渉線の配置が対称でない場合に限る。

※6：引留め型、耐張型又は補強型の鉄筋コンクリート柱、鉄柱又は鉄塔の場合に限る。

2.1.2 鉄塔及び電柱に係る風圧荷重の技術基準の変遷

鉄塔及び電柱に係る風圧荷重の技術基準に関しては、1911年（明治44年）に制定された電気工事規程において、「風圧荷重」の概念が初めて導入された。その後、1932年（昭和7

年)に改正された電気工作物規程の解説において、風速について記載があり、「基準風速を40m/秒」と定めていることが確認されている。

その後、1965年(昭和40年)の電気事業法の制定と同時に、電気設備の技術基準の解説を策定する際に、当時の民間規程(JEC-127-1965「送電用鉄塔設計標準」)を参考に「40m/秒の風圧荷重」を規定したと推察される。

さらに、1997年(平成9年)の電気設備の技術基準の改正において、「風速40m/秒の風圧荷重」が技術基準の本体に明記された。

表 2-5 鉄塔及び電柱に係る風圧荷重の技術基準の変遷⁴

年	1911年 (明治44年)	1919年 (大正8年)	1932年 (昭和7年)	1965年 (昭和40年)	1997年 (平成9年)
規程名	電気工事規程	電気工作物規程	電気工作物規程	電気設備の 技術基準	電気設備の 技術基準
主な改正内容	手等風圧の規定	着氷荷重の規定等	鉄塔種類の規定 鉄塔風圧の増加	風圧荷重の種別 と適用標準 JEC- 127 の改訂に伴 う改正	技術基準の性能 規定化(省令で 風速40m/sと 規定)
鉄塔風圧(山形 鋼・高温季)	4貫800匁/平方尺 (196.02kg/m ²)	40ポンド/平方尺 (197.6kg/m ²)	300kg/m ²	290kg/m ²	2,840Pa
風速の規定の 詳細	—	—	規程の解説に 「風圧荷重(基 準風速を40m/秒 とした場合の 値)」と記載	基準の解説に 「風速40m/秒の 風があるものと 仮定した場合に 生ずる荷重」と 記載	技術基準に「風 速40m/秒の風 圧荷重」と記載

(参考) 1928年(昭和3年)11月、我が国初の耐風構造に関する規則が警視庁令第27条(強度計算に適用する風圧力)として発布された。

技術基準の設計風速、鋼材の許容応力度は、電気学会の標準規格である JEC-127-1965「送電用鉄塔設計標準」に基づいている。

表 2-6 技術基準の解釈 57 条解説

本条の規定は、鋼材の許容応力、細長比などについては、電気学会電気規格調査会標準規格 JEC-128-1965「送電用鉄柱設計標準」及び電気学会電気規格調査会標準規格 JEC-127-1965「送電用鉄塔設計標準」に基づくものである。

⁴ 経済産業省からの提供資料を基に作成。

JEC-127-1965「送電用鉄塔設計標準」では、鉄塔の耐用年数から考えて、再現期間を 50 年に設定し、4 月～11 月（高温季）、12 月～3 月（低温季）に分けて、地上 15m における各地の風速の等値線をもって図示した風速分布図を参照し、一般地域の基準風速を 40m/s と定めた。



図 2-1 風速分布図（4 月～11 月（高温季））⁵

また、JEC-127-1965「送電用鉄塔設計標準」では、10 分間最大平均風速と鉄塔の構造安全率を採用することで、最大瞬間風速の荷重に対応している。

表 2-7 電気学会電気規格調査会標準規格 JEC-127-1965「送電用鉄塔設計標準」説明書

18.設計風速

ある規模をもつ構造物に対して、最大の荷重を与える瞬間風速は、どの程度の継続時間をもつものであるか、いいかえれば何秒間の平均風速に相当するものであるかは、なお明らかでない。したがって、鉄塔の設計風速としては、わが国の気象観測記録より、最も長い歴史をもち、データの豊富な 10 分間最大平均風速に相当するものを取り、現段階では判然としない最大瞬間風速の荷重の増加には、鉄塔の構造安全率で対応させることとした。

⁵ 平成 16 年技術基準適合評価委員会 報告書（社団法人日本電気協会適合評価委員会）

31.鋼材の許容応力度

諸外国の規定あるいは、国内他学会の動向も参照して、常時設計応力に対して安全率を 1.5 に定めた。～略～ここでいう安全率の値は、鋼材の下限降伏点をもった個材の降伏点応力度ないし座屈応力度に対して許容応力度が有すべき安全率の値を示すものであり、大半の部材の降伏点がその下限規格値を大幅に上まわり（一般構造用鋼材では 20%程度）、しかも、骨組みとして構成された鉄塔の構造安全率は、ここで定めた安全率の値よりかなり大きいことが期待され、JEC-127 によって設計された鉄塔について、これまでに実施された実大実験の結果では、その破壊荷重は、常時設計荷重の 1.8～2.0 倍またはそれ以上を示している。

2.1.3 送電用鉄塔設計標準の解説 JEC-TR00007-2015⁶

JEC-TR00007-2015（以下、「JEC-TR」）は、JEC-127-1979「送電用支持物設計標準」の改定版として、電気学会に設置された、送電用鉄塔設計標準特別委員会（大熊名誉教授、電力事業者、電力中央研究所等による）にて、2009 年（平成 21 年）8 月に制定作業に着手され、2015 年（平成 27 年）2 月に、テクニカルレポートとして公表されたものである。

JEC-TR は、JEC-127-1979 の制定後 30 年を経過したため、新規材料の開発、基礎の多様化、自然災害を契機とした新たな設計手法の開発、技術進展等が盛り込まれたものである。

上記と合わせて、2003 年（平成 15 年）に送電線路に係る国際規格である（国際電気標準会議：IEC-60826）が制定され、IEC との整合も図られた。

⁶ 電気学会 電気規格調査会だより 送電用鉄塔設計標準[制定]（JEC-TR-00007-2015）等の公刊情報を基に作成。

2.2 電力各社における取組

台風の襲来頻度が多い地域の電力会社では、鉄塔の風圧荷重の算定においては過去の台風による被害を踏まえた基準風速の個別設定を行っている。また電柱についてはJEAC7001-2017「配電規程」に基づき、連鎖倒壊防止のための支線の設置を行っている。

表 2-8 基準風速の個別設定（鉄塔）⁷

電力会社	対応内容	基準風速への反映
沖縄	台風の襲来頻度が多いことから、基準風速を個別設定。	全エリアで風速 60m/s [※]
九州	JEC-127-1965 における再現期間 50 年の前年最大平均風速（m/s）を参考にして、基準風速を個別設定。その後、1993 年（平成 5 年）の台風 13 号での設備被害を受けて、基準風速を個別設定。（再設定）	大隅半島北部並びに薩摩半島北部：風速 45m/s [※] 大隅半島南部並びに薩摩半島南部：風速 50m/s [※] 北緯 30° 以南（奄美大島など）：風速 55m/s [※]
四国	JEC-127-1965 における再現期間 50 年の前年最大平均風速（m/s）を参考にして、基準風速を個別設定。	室戸岬：50m/s 足摺岬：45m/s [※]

※10 分間平均風速

表 2-9 支線の設置や基準風速の個別設定（電柱）⁷

電力会社	対応内容	備考
全国	「配電規程（JEAC7001-2017）第 2 章第 210 節 2.支線の取付が望ましい支持物」に基づき、連続倒壊防止として支線を設置。 ^{※2}	電柱の連鎖倒壊を防止するため、設備施設環境や支線施設可否を考慮し直線部が連続する線路は十数径間毎に電線路方向両縦支線を極力取付し、数径間毎に線路直角方向にその両側に振留支線（支柱）を極力取付けている。
九州	1985 年（昭和 60 年）の台風 13 号被害を踏まえ、JEC-127-1965 における再現期間 50 年の年最大平均風速（m/s）を参考にして、基本風速を見直し。 その後、1991 年の台風 19 号による甚大な被害等を踏まえ、一部地域の基準風速を個別設定。	九州南部離島、鹿児島南部一部地域：風速 50m/s ^{※1} 九州の西海岸、山岳部一部地域：風速 45m/s ^{※1}
中国	1991 年（平成 3 年）の台風 19 号による甚大な被害を踏まえ、一部地域の基準風速を個別設定。	地形的特徴により強風が吹きやすい以下の一部地域 ：風速 45m/s ^{※1} a. 湾、入江等で両側に高い山や島のある地域 b. 山の尾根付近

⁷ 電気事業連合会からの提供資料を基に作成。

電力会社	対応内容	備考
		c. 海から風が吹き上げる場所
沖縄	2003 年（平成 15 年）の台風 14 号による一部離島における連続倒壊被害を踏まえ、JEC-127-1965 における再現期間 50 年の全年最大平均風速（m/s）を参考にして、基本風速を個別設定。	宮古島列島の一部地域：風速 50m/s ^{※1}

※1 10 分間平均風速。

※2 使用電圧が 35,000V を超える特別高圧架空電線路については、電気設備の技術基準解釈第 92 条で規定されている内容だが、低圧及び高圧の架空電線路では規定されておらず、配電規程に基づき自主的に実施しているもの。

2.3 国内の他制度における地域風速の適用事例

「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（平成 30 年 3 月版）」においては、「基準風速は、平坦で地表面粗度区分Ⅱの地上高さ 10m における再現期間 50 年の 10 分間平均風速とし、平成 12 年建設省告示第 1454 号に示す市町村別の基準風速を用いる。」と記載があり、地域の実態に応じた風の強さを用いることができる。

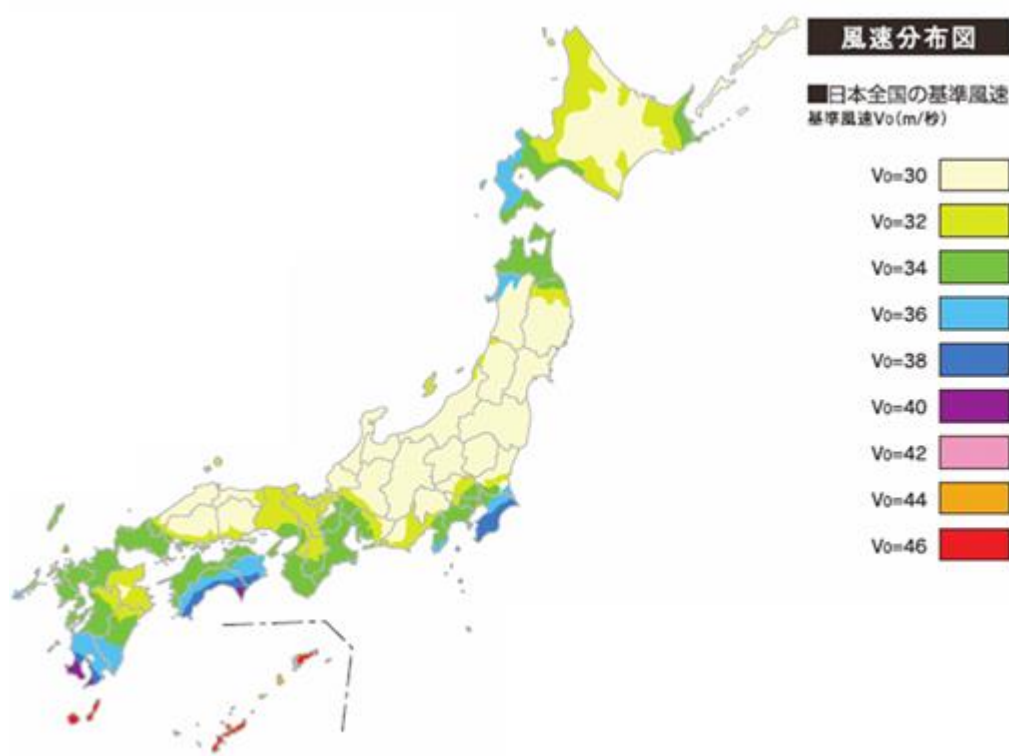


図 2-2 市町村別の基準風速マップ（平成 12 年建設省告示第 1454 号）⁸

⁸ <http://www.j-exterior-ia.jp/7/11.html> （2019 年（令和元年）11 月閲覧）

2.4 国外の鉄塔及び電柱に係る風圧荷重の技術基準

諸外国においては、いくつかの国において、鉄塔については基準風速の設定に地域別の基準風速や観測値、電柱については地域別の基準風圧を適用していることが調査で判明した。

2.4.1 国外の鉄塔に係る風圧荷重の技術基準

表 2-10 に主に強風の影響がある国、国際標準を対象に鉄塔の設計風速の設定方法を示す。表 2-10 に示すように、米国、オーストラリア、台湾、フィリピンとも地域別の風速が規定されており、国際標準である IEC においても地域別の風速を適用することを推奨しており、一律 40m/s を設定している日本の技術基準とは異なる考え方を適用している。また、安全率も 1.0～1.1 を適用していることから、限界荷重を用いた設計手法となっており、日本の技術基準の許容応力度法を適用した手法とも異なる手法を用いていることが分かった。

表 2-10 国外の規格における設計風速（鉄塔）

対象国 /規格	規格番号/発行	タイトル	基準風速の設定方法	再現期間/地形の考慮	安全率※
米国	ASCE／2009／米国 土木学会（連邦法で 引用） ＊基準風速は 2005 年に制定	Guidelines for Electrical Transmission Loading	地域別の基準風速を適用 ・ 3 秒瞬間風速で規定 ・ 特にメキシコ湾～フロリダ～東海岸ではハリケーンの影響が考慮され、フロリダ半島先端で最大瞬間風速 67m/s ・ 最小風速：内陸部で最大瞬間風速 38m/s	50 年／地形の考慮なし	1.0
オースト ラリア	AS3995／1994／オ ーストラリア標準 （建築基準法に準 拠）	Design of steel lattice towers and masts	地域別の基準風速を適用 ・ 最大瞬間風速で規定 ・ 最大風速：インド洋側で最大瞬間風速 85m/s(海岸線約 100 ～200km の地域で基準風速が高い) ・ 最小風速：内陸部で最大瞬間風速 50m/s	50 年／崖・尾根・丘	1.1
台湾	PG9502-0782/2006/ 内政部建築研究所	建物附属施設及 臨時構造物耐風 設計準則之探討	地域別の基準風速を適用 ・ 10 分平均風速から最大瞬間風速に換算 ・ 最大風速：島嶼部で 10 分平均 65m/s ・ 最小風速：内陸部で 10 分平均 22.5m/s	50 年／地形の考慮なし	1.1
フィリピン	NSCP-2001/2001/ フィリピンの構造エ ンジニア協会（国家 建築コードに相当）	National Structure Code Of The Philippines	地域別の基準風速を適用 ・ 3 秒瞬間風速で規定 ・ 最大風速：東海岸で 70m/s ・ 最小風速：西海岸で 35m/s	50 年／崖・尾根・丘	1.0
国際規格	IEC60826/2017	Design criteria of overhead transmission lines	地域別の基準風速を適用 ・ 観測値（10 分平均）から最大瞬間風速に換算 ・ 通常は気象観測所のデータを用いる	50 年、150 年、500 年（50 年以上の 場合は、荷重係数の割増あり）／崖・ 尾根・丘（ただし、規定ではなく参 考）	1.0
日本	電気事業法	電気設備の技術 基準を定める省 令／技術基準の 解釈	一律：40m/s ・ 10 分平均風速で規定	規定なし	1.5

※諸外国では、最大瞬間風速から風圧を算定し、安全率約 1.0 で設計を行うことが一般的（基準風速が 10 分平均で求められている場合においても、最大瞬間風速に換算後、風圧に換算）。日本では、最大瞬間風速に対する安全性については、安全率を 1.5 で包含している。

(1) 米国における地域風速と荷重設定方法の概要

(a) 規定されている基準の概要

規格基準名：Guidelines for Electrical Transmission Loading

発行機関：米国土木学会（ASCE）

発行年：2009 年

同規格は、連邦法にて引用されており、国家の基準として適用されている。

(b) 地域風速マップ

米国における地域風速マップを図 2-3 に示す。地域風速は、3 秒瞬間最大風速、50 年再現値にて規定されている。おおむね海岸付近が大きな値となっている。またハリケーンが多く襲来すると考えられるメキシコ湾岸から東海岸南部までの海岸沿い・プエルトリコ・ヴァージン諸島、台風が多く襲来すると考えられるグアム島であり、これらの地域では、大きな地域風速の値が規定されている。

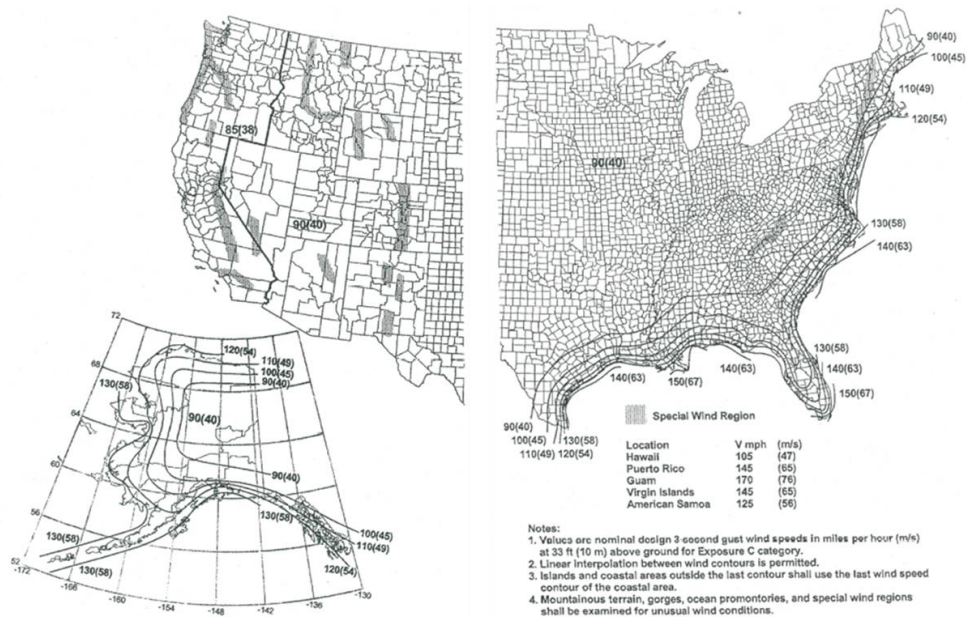


図 2-3 米国における地域風速マップ⁹

(c) 特殊地形の考慮

丘や崖を上る風の増速について規定している。丘の高さや頂上から風上側の丘の中腹までの水平距離等をパラメーターとした算定式により、増速の倍率を算出している。

⁹ Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading, Third Edition, ASCE (American Society of Civil Engineers)

(d) 風速から風圧荷重への換算式

$$F = \gamma_w Q K_z K_{zt} (V_{50})^2 G C A \quad [\text{N}]$$

ここで、 F ：風圧荷重[N]、 γ_w ：信頼性係数 (=1)、 Q ：運動エネルギーを圧力に変換する際に用いる変換定数、 K_z ：高さの補正係数、 K_{zt} ：地形の補正係数、 V_{50} ：基準風速[m/s]、 G ：ガスト影響係数、 C ：抵抗係数、 A ：面積[m²]、である。

なお、風圧荷重の換算に用いる高さの補正係数は、以下の式が適用される。

$$K_{zt} = 2.01 (Z_h / Z_g)^{2/\alpha} \quad \text{for } 33\text{ft} \leq Z_h \leq Z_g$$

ここで、 α ：地表面粗度に応じて決定するパラメーター、である。

日本とは異なり、瞬間最大風速を用い、ガスト影響係数を考慮した風圧荷重となっている。

(e) 応力評価の際の安全率について

応力評価は限界状態設計法が適用され、標準的なパラメータ（5%信頼度等）が適用された場合は、安全率が 1.0 となる。

(2) オーストラリアにおける地域風速と荷重設定方法の概要

(a) 規定されている基準の概要

規格基準名：Design of steel lattice towers and masts

発行機関：オーストラリア国家標準（AS 規格）

発行年：1993 年

AS 規格はオーストラリア国家標準であり、同国国防省インフラ部門が制定する塔（ラチス構造の塔、支線塔、単柱等）に関する規制法の技術基準として適用されている。なお、同規格はオーストラリアの建築基準法に準じている。

(b) 地域風速マップ

オーストラリアにおける地域風速マップを図 2-4 に示す。地域風速は 3 秒瞬間最大風速、50 年再現値にて規定されている。おおむね海岸付近が大きな値となっており、サイクロンが襲来すると考えられる地域に最も大きな地域風速の値が規定されている。

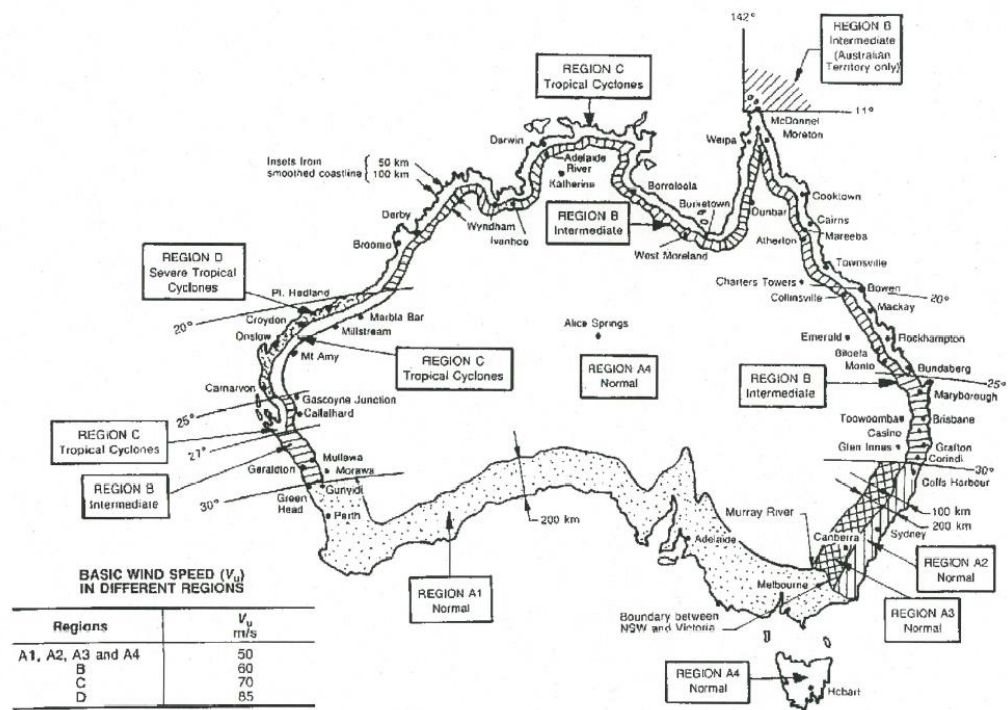


図 2-4 オーストラリアにおける地域風速マップ¹⁰

(c) 特殊地形の考慮

丘や崖を上る風の増速について規定している。丘の高さや頂上から風上側の丘の中腹までの水平距離等をパラメーターとした算定式により、増速の倍率を算出している。

(d) 風速から風圧荷重への換算式

任意の高さにおける風速 V_z は、以下の式により算定する。

$$V_z = V M_{(z, cat)} M_t M_d \quad [\text{m/s}]$$

ここで、 V_z ：設計風速[m/s]、 V ：基本風速[m/s]、 $M_{(z, cat)}$ ：粗度係数を考慮したガスト影響係数、 M_t ：地形の補正、 M_d ：風向の補正、である。

なお、任意の高さにおける風圧 q_z [Pa]は、以下の式により算定する。

$$q_z = 0.6 \times 10^{-3} \times V_z^2 \quad [\text{Pa}]$$

ここで、 α ：地表面粗度に応じて決定するパラメーター、である。

なお、風圧荷重の算出にあたっては、風圧に抵抗係数 C 及び面積 A [m²]を乗じ算定する。

¹⁰ AS 3995-1994. Australian Standard, Design of steel lattice towers and masts

オーストラリアも米国と同様であり、瞬間最大風速を用い、ガスト影響係数を考慮した風圧荷重となっている。

(e) 応力評価の際の安全率について

応力評価は限界状態設計法が適用されているが、材料の裕度として標準的に $1/0.9 (\approx 1.1)$ が適用されている。

(3) 台湾における地域風速と荷重設定方法の概要

(a) 規定されている基準の概要

規格基準名：建築物耐風設計規範及解説

発行機関：台湾内政部營建署

発行年：不明

台湾内政部營建署が所管しており、国の基準として適用されている。

(b) 地域風速

基本設計風速は、地区ごとに、平坦な地面、草原、海岸あるいは湖岸であって周辺障害物の高さ 10 メートル未満の区域（地況種類 C）における高さ 10m の 10 分平均風速、50 年再現値にて規定されている。

台湾本島では地区ごとに、27.5m/s から 47m/s の数値で基本設計風速を設定している。

台湾本島以外の外島地区は、33m/s から 65m/s の数値で基本設計風速を設定している。

(c) 特殊地形の考慮

丘や崖を上る風の増速について規定している。丘の高さや頂上から風上側の丘の中腹までの水平距離等をパラメーターとした算定式により、増速の倍率を算出しており、約 1.98 ～約 2.30 という値が例示されている。

(d) 風速から風圧荷重への換算式

$$F=q(z_{Af})GC_fA_f \quad [N]$$

ここで、 F ：風圧荷重[N]、 $q(z_{Af})$ ：速度圧[Pa]、 G ：ガスト影響係数、 C_f ：抵抗係数、 A_f ：受風面積[m²]、である。

基本設計風速 $V_{10}(C)$ から速度圧 $q(z_{Af})$ の算出には、以下の式が適用される。

$$q(z_{Af})=0.06 K(z)K_{zt}[I V_{10}(C)]^2 \quad [Pa]$$

ここで、 $K(z)$ ：高さの補正係数、 K_{zt} ：地形の補正係数、 $V_{10}(C)$ ：地況種類 C における高さ 10m の基本設計風速[m/s]、 I ：用途係数、である。

なお、速度圧の算出に用いる高さの補正係数は、以下の式が適用される。

$$K(z)=2.774(z/z_g)^{2\alpha} \quad z>5\text{m}$$
$$K(z)=2.774(5/z_g)^{2\alpha} \quad z\leq 5\text{m}$$

ここで、 α 、 z_g ：地況種類に応じて決定するパラメーター、である。

日本と同様に 10 分間平均風速を用いているが、ガスト影響係数を考慮した風圧荷重となっている。

(e) 応力評価の際の安全率について

応力評価は限界状態設計法が適用され、安全率は 1.0 としている。

(4) フィリピンにおける地域風速と荷重設定方法の概要

(a) 規定されている基準の概要

規格基準名：National Structural Code of the Philippines 2001

発行機関：フィリピン構造技術者協会（Association of Structural Engineers of the Philippines）

発行年：2001 年

National Structural Code of the Philippines はフィリピンの国家基準であり、建設物全般について定めた共和国法 No.6541（Republic Act No. 6541）として適用されている。

(b) 地域風速マップ

フィリピンにおける地域風速マップを図 2-5 に示す。地域風速は 3 秒瞬間最大風速、50 年再現値にて規定されている。台風が多く襲来すると考えられる東側の値が、おおむね大きな値となっている。

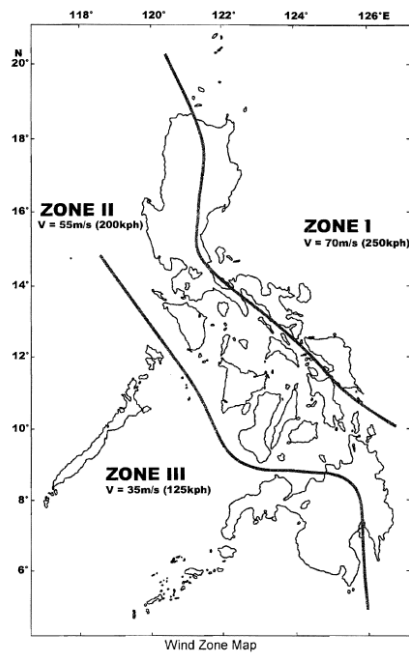


図 2-5 フィリピンにおける地域風速マップ¹¹

(c) 特殊地形の考慮

丘や崖を上る風の増速について規定している。丘の高さや頂上から風上側の丘の中腹までの水平距離等をパラメーターとした算定式により、増速の倍率を算出している。

(d) 風速から風圧荷重への換算式

$$F = q_z G C_f A_f \quad [N]$$

ここで、 q_z : 速度圧[Pa]、 G : ガスト影響係数、 C_f : 抵抗係数、 A_f : 受風面積[m²]、である。

基準速度 V から速度圧 q_z の算出には、以下の式が適用される。

$$q_z = 47.3 \times 10^{-6} K_z K_{zt} V^2 I_w \quad [Pa]$$

ここで、 K_z : 高さの補正係数、 K_{zt} : 地形の補正係数、 V : 基準風速[m/s]、 I_w : 重要度係数、である。

なお、速度圧の算出に用いる高さの補正係数は、以下の式が適用される。

$$K_z = 2.01 (z_h / z_g)^{2/\alpha}$$

ここで、 α 、 z_g : 地表面の状況に応じて決定するパラメーター、である。

¹¹ National Structural Code of the Philippines 2001

日本とは異なり、瞬間最大風速を用い、ガスト影響係数を考慮した風圧荷重となっている。

(e) 応力評価の際の安全率について

応力評価は限界状態設計法が適用され、安全率が 1.0 となる。

(5) 国際電気標準会議（IEC60826）における地域風速と荷重設定方法の概要

(a) 地域風速

国際標準であり、一般的には、鉄塔建設予定地域の風速の観測データを活用することを推奨しているが、各国での規定による地域風速マップがある場合には、これを適用することが可能としている。ただし、風速は 10 分間平均風速で規定されていることから、瞬間最大風速でマップを規定している国においては、適用されていない手法であるものと推察される。また、再現期間は 50 年を基本とし、設計荷重の算定方法を示している。

また、供用期間や再現期間の考え方は、各国で異なる可能性があることも考慮し、再現期間を 150 年とした場合は、再現期間を 50 年とした場合の風圧荷重に対して 1.1 倍、再現期間を 500 年とした場合は 1.2 倍となることを示している。

(b) 特殊地形の考慮

丘や崖を上る風の増速について規定している。丘の高さや頂上から風上側の丘の中腹までの水平距離等をパラメーターとした算定式により、増速の倍率を算出している。

(c) 風速から風圧への換算式

基準風速 V_R [m/s]は以下の式で与える。

$$V_R = K_R V_{RB} \quad [\text{m/s}]$$

ここで、 V_{RB} ：地表面粗度区分（terrian type）B についての基準風速[m/s]、 K_R ：地表面粗度区分（terrian type）に応じて与える係数、である。

なお、任意の高さにおける風速 V_z は、以下の式により算定する。

$$V_z = V_R \times (z/10)^\alpha \quad [\text{m/s}]$$

ここで、 α ：地表面粗度に応じて決定するパラメーター、である。

基準風速 V_R に対応する速度圧 q_0 は以下の式で与えられる。

$$q_0 = 0.5 \times 1.225 \tau \times (K_R V_{RB})^2 \quad [\text{Pa}]$$

ここで、 τ ：空気密度補正係数、である。

風圧荷重 A_t は以下の式で与えられる。

$$A_t = q_0 (1 + 0.2 \sin^2 \theta) (S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta) G_t \quad [\text{N}]$$

ここで、 θ : 風向と線路直角方向とのなす角度[°]、 S_{t1} : 線路方向に平行な面の受風面積[m²]、 S_{t2} : 線路方向に垂直な面の受風面積[m²]、 C_{xt1} : 線路方向に平行な面の風力係数、 C_{xt2} : 線路方向に垂直な面の風力係数、 G_t : 合成風係数、である。

日本とは異なり、瞬間最大風速を用い、ガスト影響係数を考慮した風圧荷重となっている。

(d) 応力評価の際の安全率について

応力評価は限界状態設計法が適用されており、標準的に 1.0 が適用されている。

2.4.2 国外の電柱に係る風圧荷重の技術基準

表 2-11 に主に強風の影響がある国を対象に電柱の設計風速の設定方法を示す。表 2-11 に示すように、米国、オーストラリア、台湾、フィリピンとも地域別の風速が規定されており、一律 40m/s を設定している日本の技術基準とは異なる考え方を適用している。また、安全率について、米国、オーストラリア、フィリピンは 1.0（鉄柱、プレストレス・コンクリート）を適用していることから、限界荷重を用いた設計手法となっており、日本の技術基準の許容応力度法を適用した手法とも異なる手法を用いていることが分かった。台湾は、安全率 1.33～2.0 を適用し、日本と同様の許容応力度法を適用した手法を用いている。

表 2-11 国外の規格における設計風速（電柱）

対象国	規格番号/発行	タイトル	基準風速の設定方法	荷重係数	安全率※
米国	IEEE/2009/米国土木学会 (連邦法で引用) *基準風速は 2005 年に制定	National Electrical Safety Code	気温/着氷を考慮し、6 つの地域の基準風 圧を適用 ・標準：Light（基準風圧：430Pa） *気温が 0° を超える地域を想定	Grade B：高速道路へのアクセス 水平風圧：2.5 送電線：1.65	鉄柱、プレストレス・コンクリ ート：1.0 木柱、鉄筋コンクリート：1.53
				Grade C：交差点付近 水平風圧：2.2 送電線：1.3	鉄柱、プレストレス・コンクリ ート：1.0 木柱、鉄筋コンクリート：1.17
				Grade C：その他 水平風圧：1.75 送電線：1.3	
			ハリケーンが想定される基準風速が高い メキシコ湾～フロリダ州～東海岸沿い Extreme クラス：基準風圧を適用し、風 圧に換算（パラメーターあり）	Grade B： 水平風圧：1.0 送電線：1.0 Grade C： 水平風圧：0.87 送電線：1.00	鉄柱、プレストレス・コンクリ ート：1.0 木柱、鉄筋コンクリート：1.33
オースト ラリア	AS4676／2000／オースト ラリア標準	Structural design requirements for utility services poles	・標準：A 地域（基準風圧：1,500Pa） ・中間：B 地域（基準風圧：2,200Pa） ・風速の大きい C、D 地域については地域 風速を適用	周辺構造物係数：0.56～1.25 地形係数：1.0～2.0 抵抗係数：0.6～1.9（円柱は 1.2） *電柱高さ等によって異なる	標準 1.0
台湾	電業法	電業供電線路装置 規則	地域別の基準風速を適用 ・標準 鉄柱：240kgf/m ² （2,352Pa） 木柱、プレストレス・コンクリート： 80kgf/m ² （784Pa）	標準 1.0	鉄柱：1.33 または 1.65 プレストレス・コンクリート： 1.33 または 2.0 木柱：1.33 または 2.0 ※支持物の等級によって異なる
フィリピン	NSCP-2001/2001/フィリピ ンの構造エンジニア協会 (国家建築コードに相当)	National Structure Code Of The Philippines	地域別の基準風速を適用 ・3 秒瞬間風速で規定 ・最大風速：東海岸で 70m/s ・最小風速：西海岸で 35m/s	周辺構造物係数：0.32～1.89 抵抗係数：0.5～2.0（円柱は 1.2） *電柱高さ等によって異なる	標準 1.0

※諸外国では、最大瞬間風速から風圧を算定し、安全率約 1.0 で設計を行うことが一般的（基準風速が 10 分平均で求められている場合においても、最大瞬間風速に換算後、風圧に換算）。日本では、最大瞬間風速に対する安全性については、安全率を 1.3～2.0 で包含している。

(1) 米国における地域風速と荷重設定方法の概要

(a) 規定されている基準の概要

規格基準名：National Electrical Safety Code

発行機関：米国土木学会（ASCE）

発行年：2009 年

同規格は、連邦法にて引用されており、国家の基準として適用されている。

(b) 地域風速マップ

米国において、風速の低い地域や着氷が支配的な地域では、電柱に対しては一律の風圧荷重（表 2-11）が適用されている。しかし一方で、ハリケーンが来襲する特に風が強い地域では、電柱の設計荷重の設定においても、地域風速マップが適用されている。

米国における強風地域を含む地域風速マップを図 2-6 に示す。地域風速は、3 秒瞬間最大風速、50 年再現値にて規定されている。おおむね海岸付近が大きな値となっている。またハリケーンが多く襲来すると考えられる地域は、メキシコ湾岸から東海岸南部までの海岸沿い・プエルトリコ・ヴァージン諸島、台風が多く襲来する地域はグアム島であり、これらの地域では、大きな地域風速の値が規定されている。

以下、(c)及び(d)に、ハリケーンが想定される強風地域の風圧荷重への換算式及び応力照査の際の安全率をそれぞれ示す。

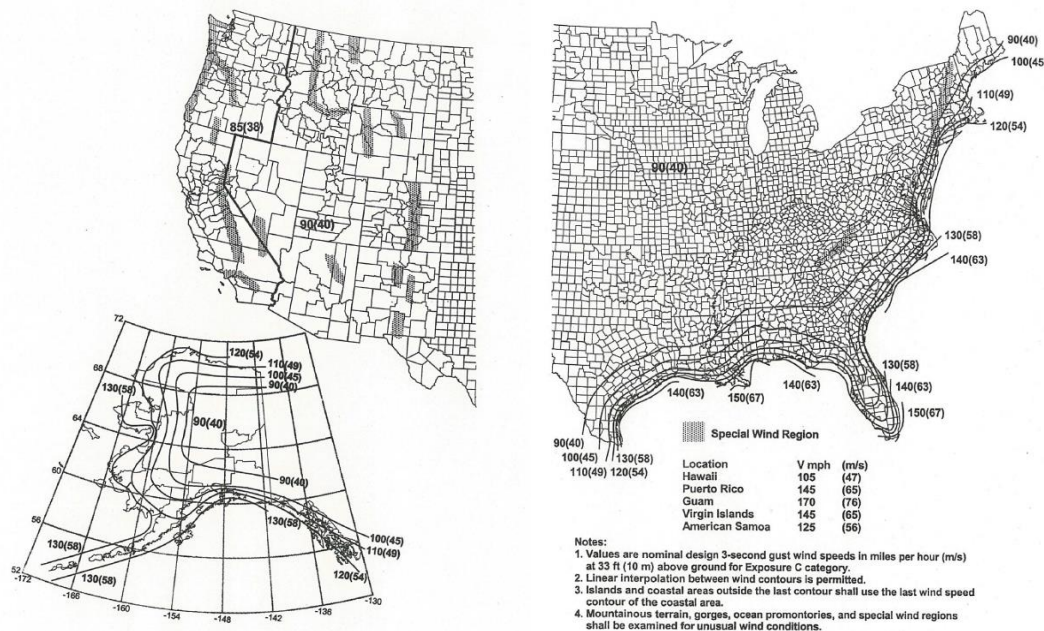


図 2-6 米国における地域風速マップ¹²

¹² National Electrical Safety Code (NESC) , IEEE

(c) 風速から風圧荷重への換算式

$$F=Q(V)^2K_zGICA \quad [N]$$

ここで、 Q ：運動エネルギーを圧力に変換する際に用いる変換定数、 K_z ：高さの補正係数、 V ：基準風速[m/s]、 G ：ガスト影響係数、 I ：重要度係数、 C ：抵抗係数、 A 面積[m²]、である。

なお、風圧荷重の換算に用いる高さの補正係数は、以下の式が適用される。

$$K_z=2.01(0.67 Z_h/275)^{2/9.5} \quad \text{for } Z_h \leq 275\text{m}$$
$$K_z=1.85 \quad \text{for } Z_h > 275\text{m}$$

(d) 応力評価の際の安全率について

応力評価は限界状態設計法が適用され、鉄柱、プレストレス・コンクリートの安全率は 1.0、木柱、鉄筋コンクリートは 1.17～1.53 となっている。

(2) オーストラリアにおける地域風速と荷重設定方法の概要

(a) 規定されている基準の概要

規格基準名：Structural design requirements for utility services poles

発行機関：オーストラリア国家標準（AS 規格）

発行年：2000 年

AS 規格はオーストラリア国家標準であり、各州で定める電力設備の技術基準として適用されている。なお、同規格はオーストラリアの建築基準法に準じている。

(b) 地域風速マップ

オーストラリアにおいて、米国と同様に地域風速が小さい地域（標準：A 地域、中間：B 地域）では、電柱に対しては一律の風圧荷重が適用されている。しかし一方で、サイクロンが来襲する風が強い海岸線では、電柱の設計荷重の設定においても、地域風速マップが適用されている。

オーストラリアにおける地域風速マップを図 2-7 に示す。地域風速は 3 秒瞬間最大風速、50 年再現値にて規定されている。

以下、(c)及び(d)に、サイクロンが想定される強風地域の風圧荷重への換算式及び応力照査の際の安全率をそれぞれ示す。

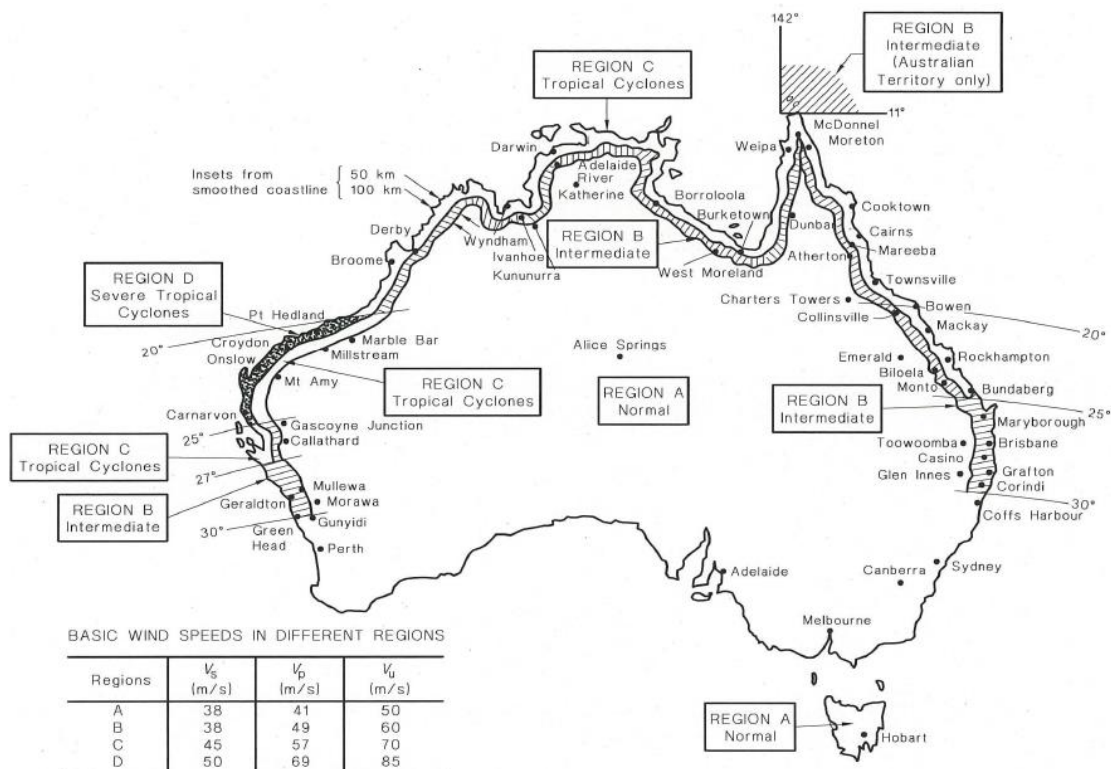


図 2-7 オーストラリアにおける地域風速マップ¹³

(c) 風速から風圧荷重への換算式

$$p_d = p_b K_z K_T C \quad [\text{Pa}]$$

ここで、 p_d : 風圧荷重[Pa]、 p_b : 基準風圧[Pa]、 K_z : 高さの補正係数、 K_T : 地形の補正係数、 C : 抵抗係数、である。

なお、風圧荷重の算出にあたっては、風圧に抵抗係数 C 及び面積 $A[\text{m}^2]$ を乗じ算定する。

(d) 応力評価の際の安全率について

応力評価は限界状態設計法が適用され、安全率は 1.0 となっている。

(3) 台湾における地域風速と荷重設定方法の概要

(a) 規定されている基準の概要

規格基準名 : 電業供電線路装置規則

発行機関 : 台湾經濟部

発行年 : 1931 年

¹³ AS/NZS 4676:2000 Structural design requirements for utility services poles, Standards Australia

同規則は、台湾經濟部が所管しており、国の基準として適用されている。

(b) 地域風速

基本設計風速は、10 分平均風速で 40m/s を基本としている。地区によって値を変更する必要がある。

(c) 風速から風圧への換算式

基準の風圧荷重は、10 分間平均風速 40m/s に基づき算出されており、鉄柱は 240kgf/m² (2,352Pa)、木柱、プレストレス・コンクリート：80kgf/m² (784Pa) である。

日本と同様に、一定の風圧荷重として規定されている。

(d) 応力評価の際の安全率について

安全率 1.33～2.0 を適用し、日本と同様の許容応力度法を適用した手法を用いている。

(4) フィリピンにおける地域風速と荷重設定方法の概要

2.4.1(4)に示した鉄塔の荷重設定方法と同じである。

2.5 風速の荷重変換に係る係数について（安全率、ガスト影響係数）

電気設備の技術基準における鉄塔の設計に関する規定は、許容応力度設計法¹⁴が採用されており、設備に作用する荷重に対する裕度として、安全率 1.5 が確保されている。

表 2-12 電気設備の技術基準の解釈（抄）

【鉄柱及び鉄塔の構成等】（省令第 32 条第 1 項）

第 57 条 架空電線路の支持物として使用する鉄柱又は鉄塔は、次の各号に適合するもの又は第 2 項の規定に適合する鋼管柱であること。

一 鉄柱又は鉄塔を構成する鋼板、形鋼、平鋼、棒鋼、鋼管（コンクリート又はモルタルを充てんしたものを含む。）及びボルトの許容応力は、次によること。

イ 許容引張応力、許容圧縮応力、許容曲げ応力、許容せん断応力及び許容支圧応力は、57-1 表に規定する値

¹⁴ 部材の各断面に作用する応力が、部材を構成する材料の許容応力以下となるように設計する方法。

表 2-13 許容引張応力、許容圧縮応力、許容曲げ応力、許容せん断応力及び許容支圧
 応力の規定（電気設備の技術基準の解釈の 57-1 表）

許容応力の種類		許容応力 (N/mm ²)	
許容引張応力	$\sigma_Y \leq 0.7\sigma_B$ の場合	$\frac{1}{1.5}\sigma_Y$	鋼板組立柱を構成する鋼板にあつては $\frac{1}{2.0}\sigma_Y$
	$\sigma_Y > 0.7\sigma_B$ の場合	$\frac{0.7}{1.5}\sigma_B$	
許容圧縮応力		$\frac{1}{1.5}\sigma_Y$	
許容曲げ応力		$\frac{1}{1.5}\sigma_Y$	
許容せん断応力	$\sigma_Y \leq 0.7\sigma_B$ の場合	$\frac{1}{1.5\sqrt{3}}\sigma_Y$	
	$\sigma_Y > 0.7\sigma_B$ の場合	$\frac{0.7}{1.5\sqrt{3}}\sigma_B$	
許容支圧応力	板厚 4mm 以上の場合	$1.25\sigma_Y$	
	その他の場合	$1.1\sigma_Y$	

ここで、 σ_Y ：材料の降伏点または耐力 (N/mm²)、 σ_B ：材料の引張強さ (N/mm²)

許容応力度設計法では、部材の各断面に作用する応力が、許容応力以下となるように設計する。許容応力は降伏点応力を安全率で除算することにより求められる（図 2-8）。

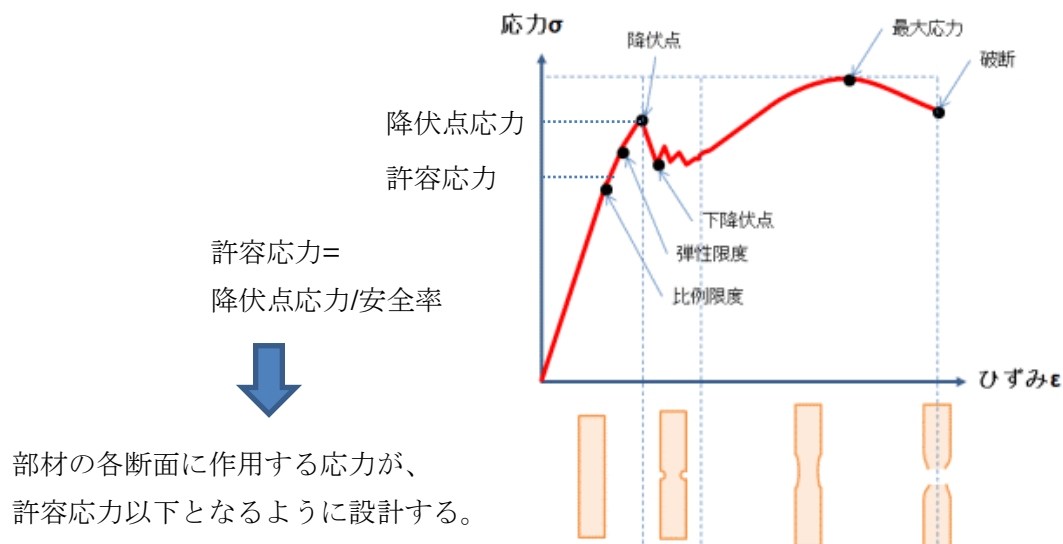


図 2-8 許容応力度設計法のイメージ

電気設備の技術基準における鉄塔への荷重は、風圧荷重を含む組合せによる荷重が同時に加わるものとして荷重を計算し、各部材について、その部材に大きい応力を生じさせる方の荷重が規定されている（表 2-2 及び表 2-4）。この規定により、鉄塔の設計においては、風圧荷重を含む組合せによる荷重が生じさせる応力が許容応力以下となるように設計する。ここで、安全率は荷重の種類によらず一律のため、安全率で局所地形や周辺構造物の影響を考慮した風圧荷重を想定することはできない。

一方、日本の建築基準法や、米国やフィリピンにおける鉄塔に係る風圧荷重の技術基準では、限界状態設計法¹⁵が採用されており、風圧荷重には、ガスト影響係数が考慮されている。例として、建築基準法では、風圧荷重を以下のように求めている。

$$p=1/2 \rho C E_r^2 G_f V_o^2$$

ここで、 p ：風圧荷重、 ρ ：空気密度、 C ：風力係数、 E_r ：鉛直分布係数、 G_f ：ガスト影響係数、 V_o ：基準風速、である。風力係数 C は、風を受ける度合いを表すもので、風向きと建築物の形状、屋根勾配、風上・風下などに関係する係数で、建築基準法等において詳細に算出方法が定められている。ガスト影響係数と鉛直分布係数は、地表面粗度区分と建物高さの最高点の値から計算される（表 2-14、表 2-15 及び図 2-9）。

表 2-14 地表面粗度区分

地表面 粗度区分	説明
I	都市計画区域外にあって、極めて平坦で障害物がないものとして特定行政庁が規則で定める区域
II	都市計画区域外にあって地表面粗度区分 I の区域以外の区域（建築物の高さが 13m 以下の場合を除く。） 又は都市計画区域内にあって地表面粗度区分Ⅳの区域以外の区域のうち、海岸線又は湖岸線までの距離が 500m 以内の地域（ただし、建築物の高さが 13m 以下の場合を除く。）
III	地表面粗度区分 I、II 又はⅣ以外の区域
IV	都市計画区域内にあって、都市化が極めて著しいものとして特定行政庁が規則で定める区域

表 2-15 ガスト影響係数の算出

地表面 粗度区分	ガスト影響係数		
	① $H \leq 10m$	② $10m < H < 40m$	③ $H \geq 40m$
I	2.0	①と③の数値を直線補間	1.8
II	2.2		2.0
III	2.5		2.1
IV	3.1		2.3

H：建物高さの最高点

¹⁵ 構造物に生じてはならない種々の限界状態を想定し、それぞれの状態に対する安全性を個々に照査する方法。

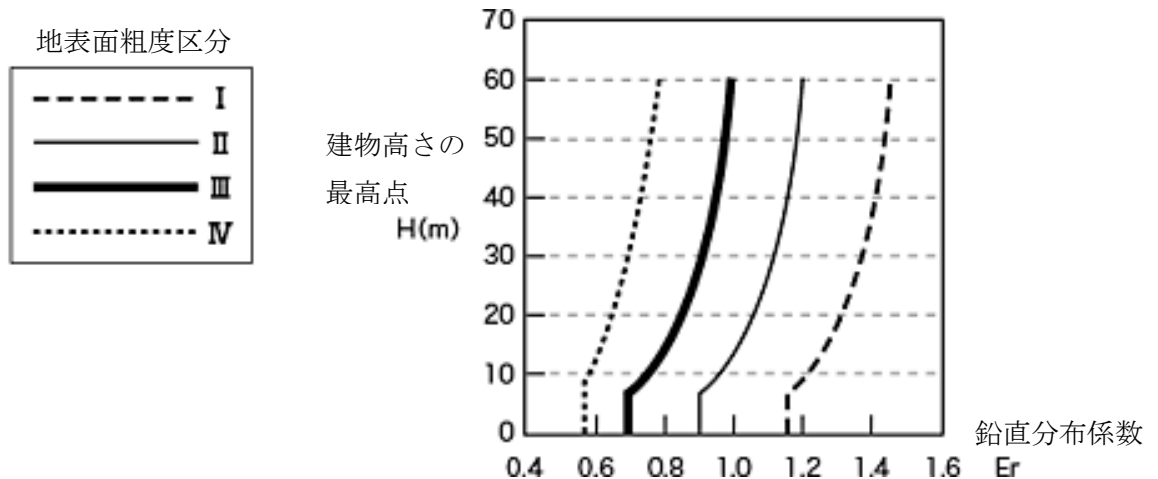


図 2-9 鉛直分布係数の算出のイメージ

以上、電気設備の技術基準と建築基準法の風圧荷重の規定において考慮されている要素について、表 2-16 に示す。

表 2-16 電気設備の技術基準と建築基準法の風圧荷重の規定

	基準風速		構造物に作用する 最大の力を算定す ための係数	安全率	上空逋増	部材の選定 方法
		地域補正				
電気設備の 技術基準	40m/s	○ (沖縄、九 州の強風地 域等)	—	○ (1.5)	○*	許容応力度 設計法
建築基準法	地域別の基準風速 (10m 高さにおけ る 10 分間平均)	—	○ (ガスト影響係 数)	—	○ (鉛直分 布係数)	限界状態 設計法

※上空逋増に関して解説した、電気設備の技術基準の解釈の解説（抄）

第 58 条【架空電線路の強度検討に用いる荷重】

〔解 説〕 本条は、架空電線路の強度検討に用いる荷重について示している。

(略)

基準風速 40m/sec に上空における風速の逋増を考慮して算定した風圧により、地表面を支点に生じるモーメントと同じモーメントを生じるような鉄塔主体全体に対して一様な等価風圧を求めた風圧値を与えている。

3 鉄塔及び電柱の事故の原因調査

3.1 台風 15 号の概要

3.1.1 概要

2019 年（令和元年）9 月 9 日に上陸した台風 15 号は、記録的な暴風となり、関東地方においても建物被害（全・半壊）やがけ崩れ等、甚大な被害が発生した。

最大風速は神津島村で 43.4m/s を観測するなど伊豆諸島と関東地方南部の 6 地点で最大風速 30m/s 以上の猛烈な風を観測し、関東地方を中心に 19 地点で最大風速の観測史上 1 位の記録を更新した。最大瞬間風速は神津島村で、58.1m/s を観測するなど伊豆諸島と関東地方南部の 3 地点で最大瞬間風速 50m/s 以上を観測し、関東地方を中心に 19 地点で最大瞬間風速の観測史上 1 位の記録を更新した（図 3-1、表 3-1 及び表 3-2）。

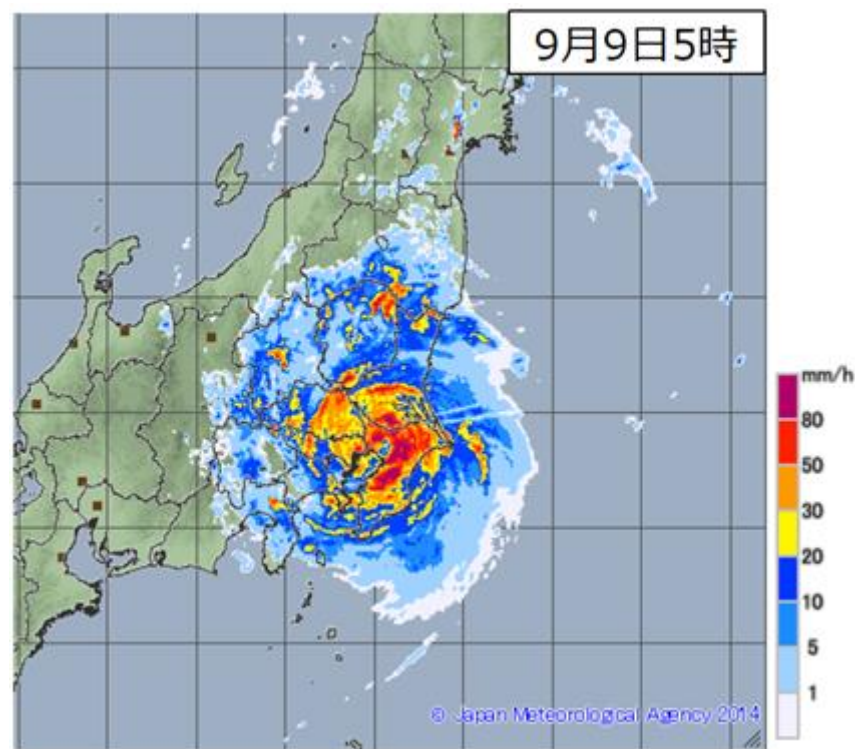


図 3-1 気象レーダー（上陸時）¹⁶

¹⁶ 令和元年台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ＜中間報告書＞

表 3-1 期間最大風速（9月7日から9日）¹⁶

順位	都道府県	市町村	地点	期間最大値			備考	風速計の高さ (m)
				m/s	風向	年月日 時分(まで)		
1	東京都	神津島村	神津島(コウジシマ)	43.4	東南東	2019/09/08 21:13	観測史上1位の値を更新	10
2	東京都	新島村	新島(ニイシマ)	39.0	東南東	2019/09/08 21:59	観測史上1位の値を更新	10
3	東京都	三宅村	三宅坪田(ミヤケツボタ)	37.4	南	2019/09/08 21:27	観測史上1位の値を更新	6.5
4	千葉県	千葉市中央区	千葉(チバ)*	35.9	南東	2019/09/09 04:28	観測史上1位の値を更新	47.9
5	東京都	大田区	羽田(ハネダ)	32.4	東北東	2019/09/09 03:32	観測史上1位の値を更新	10
6	東京都	大島町	大島(オオシマ)*	30.2	西南西	2019/09/09 01:16		27.1
7	千葉県	成田市	成田(ナリタ)	29.6	南南東	2019/09/09 05:36	観測史上1位の値を更新	10
8	千葉県	勝浦市	勝浦(カツウラ)*	29.5	南	2019/09/09 03:35		15.2
9	千葉県	館山市	館山(タデヤマ)*	28.4	南	2019/09/09 02:14	観測史上1位の値を更新	21.8
10	静岡県	賀茂郡東伊豆町	稲取(イナトリ)	27.9	北北東	2019/09/08 23:21	観測史上1位の値を更新	8.5

表 3-2 期間最大瞬間風速（9月7日から9日）¹⁶

順位	都道府県	市町村	地点	期間最大値			備考	風速計の高さ (m)
				m/s	風向	年月日 時分(まで)		
1	東京都	神津島村	神津島(コウジシマ)	58.1	東南東	2019/09/08 21:03	観測史上1位の値を更新	10
2	千葉県	千葉市中央区	千葉(チバ)*	57.5	南東	2019/09/09 04:28	観測史上1位の値を更新	47.9
3	東京都	新島村	新島(ニイシマ)	52.0	西	2019/09/08 23:38	観測史上1位の値を更新	10
4	千葉県	木更津市	木更津(キサラジ)	49.0	東南東	2019/09/09 02:48	観測史上1位の値を更新	10.1
5	千葉県	館山市	館山(タデヤマ)*	48.8	南南西	2019/09/09 02:31	これまでの9月の1位の値以上	21.8
6	東京都	三宅村	三宅坪田(ミヤケツボタ)	48.4	南	2019/09/08 22:12	観測史上1位の値を更新	6.5
7	静岡県	賀茂郡東伊豆町	稲取(イナトリ)	48.3	北北東	2019/09/08 23:17	観測史上1位の値を更新	8.5
8	東京都	大島町	大島(オオシマ)*	47.1	西南西	2019/09/09 01:11		27.1
9	千葉県	成田市	成田(ナリタ)	45.8	南南東	2019/09/09 05:36	観測史上1位の値を更新	10
10	東京都	大田区	羽田(ハネダ)	43.7	東北東	2019/09/09 03:27	観測史上1位の値を更新	10

3.1.2 千葉県内の最大風速・風向分布

台風15号が接近した期間（2019年（令和元年）9月8日10時から2019年（令和元年）9月9日24時まで）における、千葉県内の最大風速・風向分布図を以下に示す。

最大風速は、千葉で35.9m/s、成田で29.6m/s、勝浦で29.5m/s、館山で28.4m/s、銚子で25.9m/sなどを記録している。

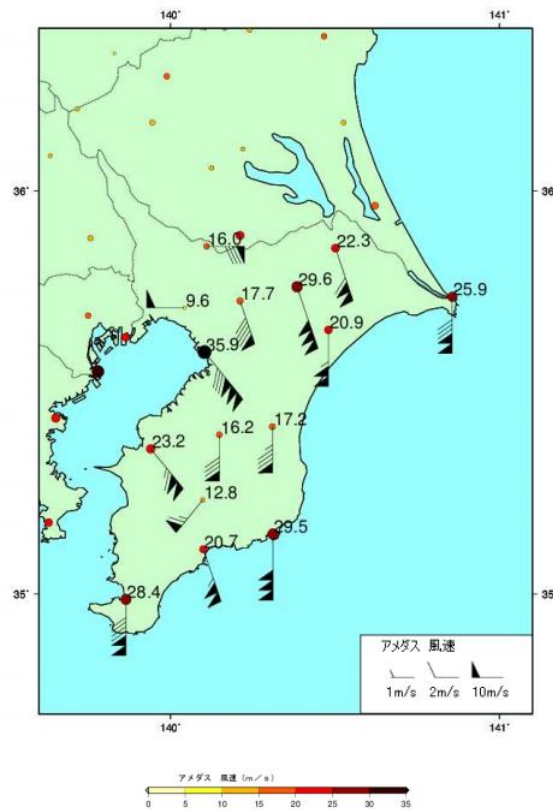


図 3-2 千葉県内の最大風速・風向分布図¹⁷

3.1.3 倒壊した鉄塔近傍のアメダス観測点の風速データ

倒壊した鉄塔近傍のアメダス観測点（木更津、坂畑、牛久）について、台風が接近した時間帯（2019 年（令和元年）9 月 9 日 0 時から 8 時まで）の風速の観測データを以下に示す。

平均風速及び最大瞬間風速は 2 時頃から 6 時頃までの時間帯で強まった。風向については、0 時頃は東南東の風向であったものが、3 時頃には南の風向に、6 時頃には南西の風向に変化した。

¹⁷ https://www.jma-net.go.jp/choshi/sokuhou/2019_15_taifuu.pdf （2019 年（令和元年）11 月閲覧）

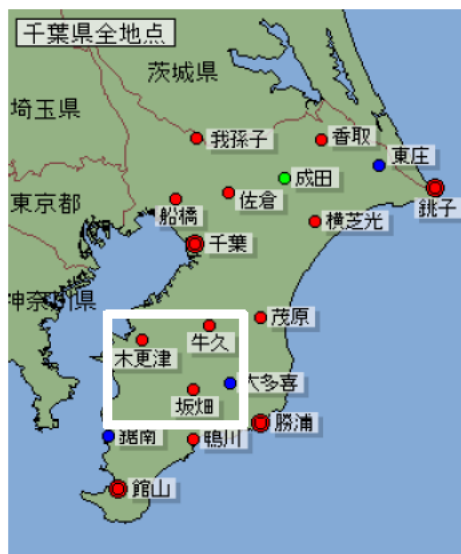


図 3-3 倒壊した鉄塔近くのアメダス観測点（木更津、坂畑、牛久）¹⁸

表 3-3 倒壊した鉄塔近くのアメダス観測点（木更津、坂畑、牛久）の最大風速、最大瞬間風速¹⁷

項目	木更津	坂畑	牛久
標高[m]	60	120	30
風速計の設置高さ[m]	10.1	10.0	9.4
最大風速[m/s]	23.2	12.8	16.2
最大風速の風向	南東	南西	南
最大風速の観測時刻	2 時 53 分	3 時 39 分	4 時 29 分
最大瞬間風速[m/s]	49.0	33.6	33.9
最大瞬間風速の風向	東南東	南	南南西
最大瞬間風速の観測時刻	2 時 48 分	3 時 17 分	4 時 23 分

¹⁸

https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/select/prefecture.php?prec_no=45&block_no=&year=&month=&day=&view= (2019 年（令和元年）11 月閲覧)

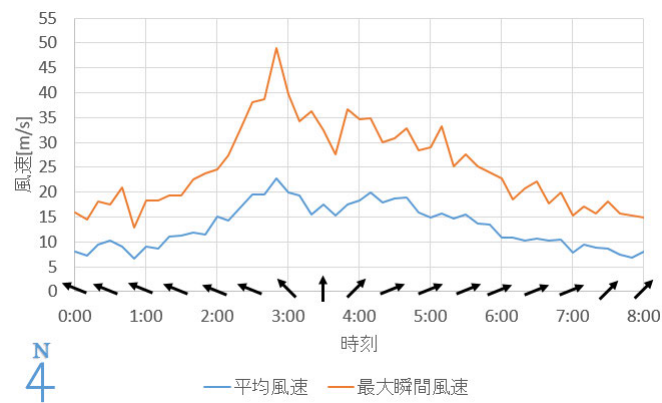


図 3-4 木更津の風速時系列データ（9月9日午前0時から午前8時）¹⁹

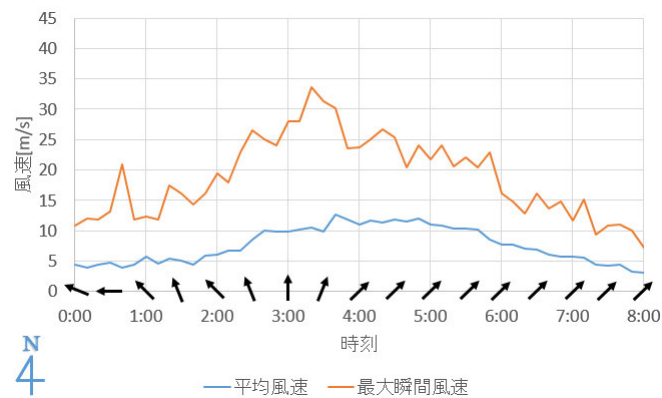


図 3-5 坂畑の風速時系列データ（9月9日午前0時から午前8時）¹⁹

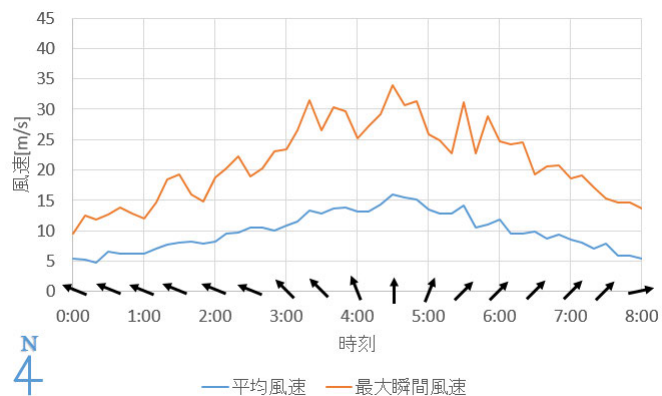


図 3-6 牛久の風速時系列データ（9月9日午前0時から午前8時）¹⁹

3.2 鉄塔及び電柱の損壊事故の概要

3.2.1 鉄塔の損壊事故の概要

2019 年（令和元年）9 月 9 日 2 時 55 分に、千葉県君津市にある東京電力パワーグリッド株式会社（以下、「東京電力 P G」）の鉄塔 2 基が倒壊する事故が発生した。この事故により、内房線系統及び小糸線・木内線系統がルートダウンし、約 11 万軒の停電が発生した（表 3-4）。

表 3-4 鉄塔の被害状況²⁰

事故発生場所	■千葉県君津市かずさ小糸、長石		
鉄塔被害状況	■鉄塔倒壊：2 基（66kV 木内線 No78,No79） ■部材変形：1 基（66kV 木内線 No80）		
事故系統	■内房線系	2019 年（令和元年）9 月 9 日 22 時 38 分	
仮復旧日時	■小糸川線・木内線系統	2019 年（令和元年）9 月 10 日 16 時 17 分	

送電設備				変電設備
鉄塔		電線	がいし	がいし
倒壊	腕金・部材変形	素線切れ	破損	破断
2 基	2 基	2 条	1 連	1 相

倒壊した 2 基の鉄塔の特徴としては、いずれも 1972 年（昭和 47 年）に建設されたもので、技術基準に基づき、平均風速 40m/s の風圧荷重で設計された。また、建設当初より 6 回線（6 つの 3 相回路を支持）しており、今回の倒壊事故においては、いずれも北北西の方向に倒壊した（表 3-5、図 3-7 及び図 3-8）。

²⁰ 東京電力 P G からの提供資料を基に作成。

表 3-5 66kV 木内線設備概要²⁰

鉄塔番号	鉄塔型	吊型	建設年月	製造者	鉄塔重量 (t)	鉄塔高さ (m)	標高 (m)	若雷側鉄塔との高低差 (m)	基礎型	片腿脚寸法 (m)			
										a脚	b脚	c脚	d脚
77	6QCSUK	耐張	1995	那須電機鉄工(株)	146.5	77.7	163.2	12.2	Ⅵ型	—	1.0	2.0	1.0
78	6 B	耐張	1972	三和鋼器(株)	21.0	45.0	163.5	0.3	甲	—	—	—	—
79	6 G	耐張	1972	那須電機鉄工(株)	38.0	57.0	154.4	-9.1	甲	—	2.0	3.0	2.0
80	6 F	耐張	1972	(株)サクラダ	27.5	57.0	165.6	11.2	甲	—	—	—	—

鉄塔番号	鉄塔型	吊型	建設年月	水平角度			径間長 (m)	電力線架線年 (内房線)	地線架線年	電力線	架空地線
				方向	度	分					
77	6QCSUK	耐張	1995	R	46	6	159	1995	2016	(木内線) TACSR610mm2 1条×3相 2回線	AC 70mm2 2条
78	6 B	耐張	1972	L	10	25				(小糸川線 併架) ACSR610mm2 1条×3相 2回線	
79	6 G	耐張	1972	L	36	42	260	1985 (1972)	2016	(内房線 併架) ACSR610mm2 1条×3相 2回線	
80	6 F	耐張	1972	L	17	52				(内房線 併架) ACSR610mm2 1条×3相 2回線	



図 3-7 倒壊した鉄塔の位置と倒壊方向²⁰



図 3-8 倒壊した鉄塔（No.78）²⁰

3.2.2 電柱の損壊事故の概要

台風 15 号の影響により、東京電力管内で、計 1,996 本の電柱が折損・倒壊・傾斜等の被害を受けた（被害の多くは、台風の進路の東側に集中。）。

表 3-6 電柱の被害状況²⁰

架空線			地中線		
電柱 (折損・倒壊等)	電線 (断線・混戦等)	変圧器 (損傷・傾斜等)	地上機器 (浸水等)	地上機器 (損傷・傾斜等)	ケーブル (損傷等)
1,996 本	5,529 経間	431 台	0 台	1 台	0m

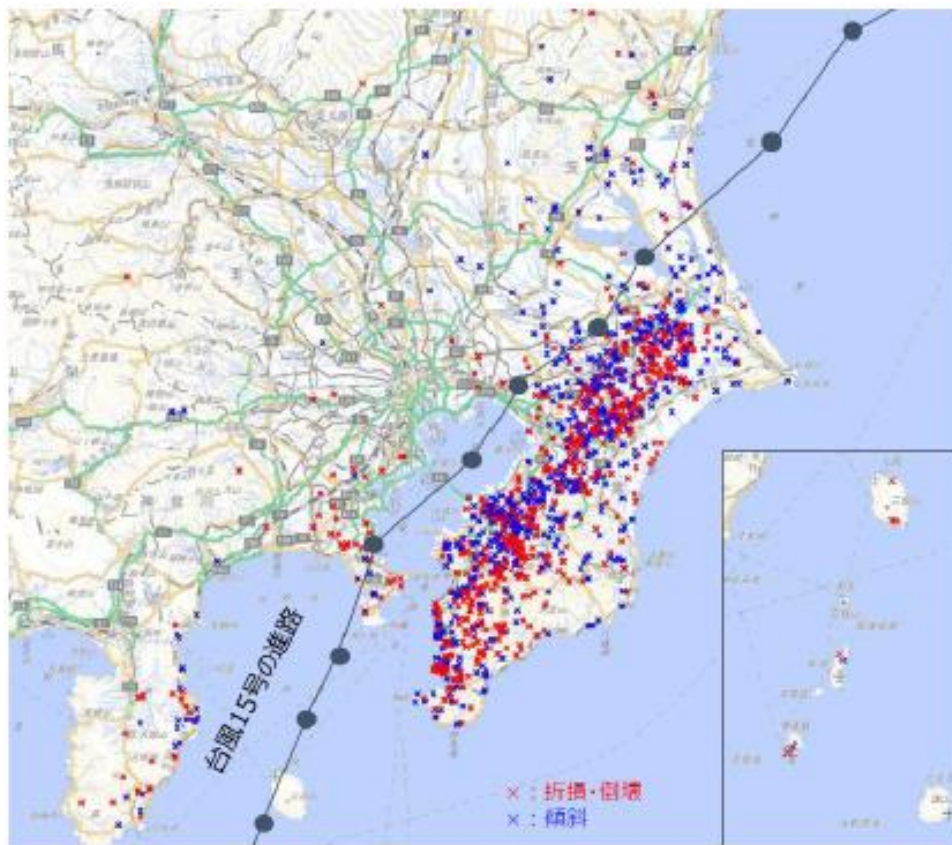


図 3-9 電柱の被害発生状況分布図²⁰



図 3-10 倒木・飛来物による電柱損壊現場の様子²⁰

3.3 鉄塔及び電柱の損壊事故の原因調査

3.3.1 調査の概要

東京電力 P G による事故原因の調査や解析作業、これまでの本ワーキンググループにおける議論等を踏まえ、外部専門家の意見も聞きつつ、事故原因の調査を実施した。

3.3.2 鉄塔の損壊事故の原因調査

弊社は鉄塔の設計及び東京電力 P G が実施している点検の妥当性を確認するとともに、倒壊後の写真やシミュレーション等のデータを確認した（表 3-7）。

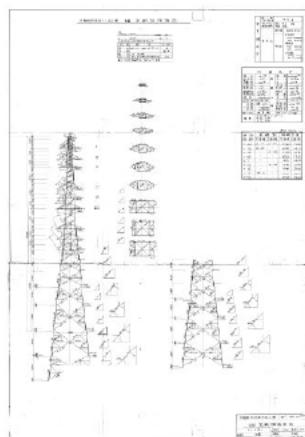
表 3-7 鉄塔の損壊事故の原因調査の調査項目と調査対象

調査項目	調査対象
①設計	■設計図面・計算書
②巡視点検	■マニュアル・保安規程等 ■巡視点検記録
③損壊状況、メカニズム	■鉄塔基礎、本体の損壊状況 ■架渉線の状況確認 ■鉄塔の倒壊方向と倒木の方向状況 ■風況シミュレーション ■倒壊メカニズムシミュレーション 等

(1) 設計

弊社は、鉄塔の設計条件及び設計計算書を確認し、倒壊した鉄塔 2 基が建設された当時の技術基準及び JEC-127-1965 に基づき、40m/s 相当の設計風圧（鉄塔：330kgf/m²、架渉線：100kgf/m²）が設定され、各部材の応力計算値について十分な許容応力を満たしていたことを確認した（図 3-11 及び図 3-12）。

設計条件			
電圧	66 kV	種類	ACSR 610 ^{mm²}
国線数	6 CC	自重	2.32 ^{kg/m}
荷重方向	300°	外径	342 ^{mm}
水平角度	10°	断面積	691.8 ^{mm²}
垂直角度	0.2°	最大径高	4090 ^{mm}
鉄塔風圧	330 ^{kg/m²}	用張力	低 5000 ^{kg}
架渉風圧	100 ^{kg/m²}	種類	AS 70 ^{mm²}
水	6 ^{mm} (正風圧)	自重	0.4377 ^{kg/m}
種類	200 ^{mm} 3連	外径	105 ^{mm}
口径	1連 810	断面積	67.05 ^{mm²}
重量	255 ^{kg/3連}	最大径高	1460 ^{mm}
風圧	20 ^{kg/3連}	用張力	低 1750 ^{kg}
設計方法	電算機	使用プログラム	TGB
備考	支持脚子 SL-0019.2 重量 = 60 ^{kg} 風圧 = 30 ^{kg}		



STC	SF	STU	SF
3370	1.76	-5653	7.81
1232	*****	-3100	2.36
2760	*****	-4585	*****
1232	*****	-3100	41.09
1453	1.02	-4585	22.16

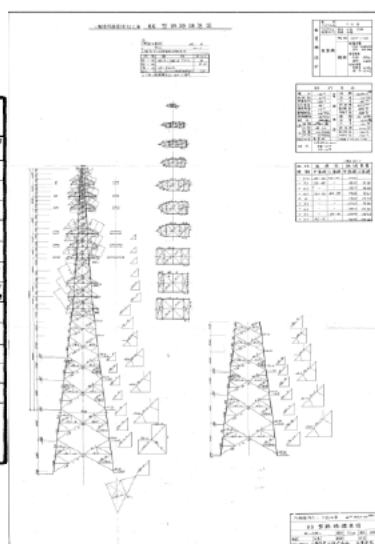
STC	SF	STU	SF
5570	1.73	-6520	4.44
1106	*****	-3100	1.60
3887	1.46	-7483	2.01
4170	*****	-8950	1.79

※全部材について安全率 (SF) 1.0 以上を確認

【*****】の表記は安全率 100 以上

図 3-11 鉄塔設計条件・設計図面・設計計算書 (No.78) 20

設計条件			
電圧	66 kV	種類	ACSR 610 ^{mm²}
国線数	6 CC	自重	2.32 ^{kg/m}
荷重方向	300°	外径	342 ^{mm}
水平角度	40°	断面積	691.8 ^{mm²}
垂直角度	0.2°	最大径高	4090 ^{mm}
鉄塔風圧	330 ^{kg/m²}	用張力	低 5000 ^{kg}
架渉風圧	100 ^{kg/m²}	種類	AS 70 ^{mm²}
水	6 ^{mm} (正風圧)	自重	0.4377 ^{kg/m}
種類	200 ^{mm} 3連	外径	105 ^{mm}
口径	1連 810	断面積	67.05 ^{mm²}
重量	255 ^{kg/3連}	最大径高	1460 ^{mm}
風圧	20 ^{kg/3連}	用張力	低 1750 ^{kg}
設計方法	電算機	使用プログラム	TGB
備考	支持脚子 SL-0019.2 重量 = 60 ^{kg} 風圧 = 30 ^{kg}		



STC	SF	STU	SF
6085	1.76	-8225	5.37
2040	*****	-3100	1.25
2924	2.12	-4585	1.07
2040	1.44	-3100	*****
1014	2.69	-3100	9.22

STC	SF	STU	SF
6503	1.77	-9740	5.29
1077	*****	-3595	1.56
2835	1.00	-5653	2.01
5140	*****	-8960	1.79

※全部材について安全率 (SF) 1.0 以上を確認

【*****】の表記は安全率 100 以上

図 3-12 鉄塔設計条件・設計図面・設計計算書 (No.79) 20

(2) 巡視点検

弊社は、表 3-8 に示した鉄塔を対象とした保安規程に定められた巡視・点検方法（表中の赤下線部）に示された手順と、表 3-9 及び表 3-10 にそれぞれ示した倒壊した鉄塔 (No.78,79) 及び隣接する鉄塔 (No.77,80) の巡視点検記録に記載された点検回数・点検内容・点検方法（表中の赤下線部）を突合し、保安規程に則り巡視点検が実施されていたことを確認した。

表 3-8 保安規程（鉄塔）²⁰

設備 種別	巡視		点検（検査を含む）				備考
	機器設備	頻度	機器設備	項目		頻度	
送 電	架空送電設備全般	1回／年 (※1)	電線・支持物	外観点検	鉄塔・鉄柱線路・木柱・コン柱 パンザ線路	1回／5年	(※1) 次の条件を考慮し、必要により個々の設備毎に1回／年に加え、実施頻度を増加させる。 ①電気事故・設備異常の発生状況と発生件数の推移 ②重機接近が懸念される市街地などの地域特性、鳥獣が営巣する特定期間などの季節性・設備の重要度・設備の経年適合 (注)開閉所（監視を要するもの）については、変電設備に準ずる。
			がいし	不良懸垂 がいし検出	昭和24年以前取付けのがいし	1回／3年	
					昭和25年以降取付けの280mm以下がいし	1回／30年	
					昭和25年以降取付けの320mm以上がいし	1回／20年	

表 3-9 倒壊した No.78、No.79 の巡視点検記録²⁰

【木内線No.78】
住 所：千葉県木君津市長石96-3
建設年月：1972年 7月
損壊原因：調査中

巡 視			点 検		
No.	年 月 日	結 果	No.	年 月 日	結 果
①	2014年 4月22日	良	①	2013年 8月26日	良
②	2014年10月 3日	良	②	2014年 4月22日	良
③	2015年 4月27日	良	③	2018年11月13日	良
④	2015年10月 8日	良			
⑤	2016年 4月19日	良			
⑥	2016年10月 7日	良			
⑦	2017年 4月 4日	良			
⑧	2017年10月 6日	良			
⑨	2018年 4月 3日	良			
⑩	2018年10月 3日	良			
⑪	2019年 4月 3日	良			

【木内線No.79】
住 所：千葉県木君津市長石230-2
建設年月：1972年 7月
損壊原因：調査中

巡 視			点 検		
No.	年 月 日	結 果	No.	年 月 日	結 果
①	2014年 4月22日	良	①	2013年 8月26日	良
②	2014年10月 3日	良	②	2014年 4月22日	良
③	2015年 4月27日	良	③	2018年11月13日	良
④	2015年10月 8日	良			
⑤	2016年 4月19日	良			
⑥	2016年10月 7日	良			
⑦	2017年 4月 4日	良			
⑧	2017年10月 6日	良			
⑨	2018年 4月 3日	良			
⑩	2018年10月 3日	良			
⑪	2019年 4月 3日	良			

表 3-10 倒壊した鉄塔に隣接する No.77、No.80 の巡視点検記録²⁰

【木内線No.77】

巡 視		点 検	
年月日	結 果	年月日	結 果
2014年4月22日	良：巡視時の着眼点に基づき実施	2013年8月26日	良：点検時の着眼点に基づき実施
2014年10月3日	良：巡視時の着眼点に基づき実施	2014年4月22日	良：点検時の着眼点に基づき実施
2015年4月27日	良：巡視時の着眼点に基づき実施	2018年11月13日	良：点検時の着眼点に基づき実施
2015年10月15日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2016年4月19日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2016年10月20日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2017年4月4日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2017年10月27日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2018年4月3日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2018年10月3日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2019年4月3日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		

※過去5年以内において、保安規程で定めるがいし（不良懸垂がいし）検出 点検の実施はなし。

【木内線No.80】

巡 視		点 検	
年月日	結 果	年月日	結 果
2014年4月22日	良：巡視時の着眼点に基づき実施	2013年8月26日	良：点検時の着眼点に基づき実施
2014年10月3日	良：巡視時の着眼点に基づき実施	2014年4月22日	良：点検時の着眼点に基づき実施
2015年4月27日	良：巡視時の着眼点に基づき実施	2018年12月12日	良：点検時の着眼点に基づき実施
2015年10月15日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2016年4月19日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2016年10月20日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2017年4月4日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2017年10月27日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2018年4月3日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2018年10月3日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		
2019年4月3日	良：巡視時の着眼点に基づき実施		

※過去5年以内において、保安規程で定めるがいし（不良懸垂がいし）検出 点検の実施はなし。

(3) 損壊状況・メカニズム

① 鉄塔の損傷状況

弊社は、関連する写真を確認し、鉄塔全体の状態を確認したところ、ボルトの破断等の他

の倒壊要因は確認されなかった。

また、倒壊した鉄塔下部の損傷形態を示す写真から、No.78、No.79 の鉄塔下部の座屈が生じていることが確認された（図 3-14 及び図 3-15）ことから、鉄塔下部の座屈が倒壊を引き起こした要因である可能性が高いことを、弊社は確認した（図 3-13）。



図 3-13 鉄塔の倒壊の様子²⁰

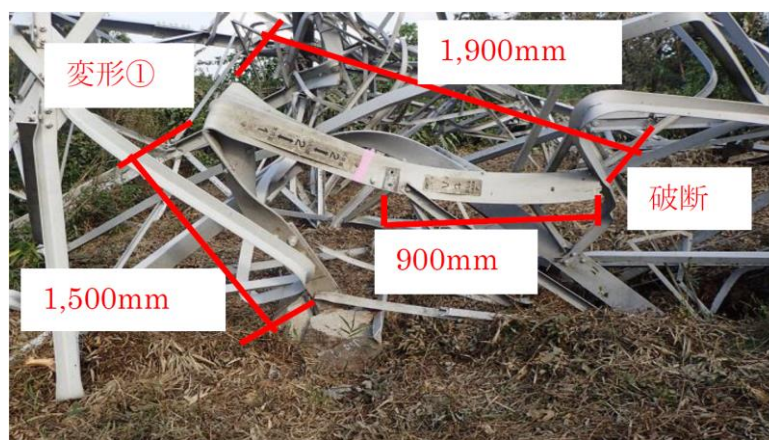
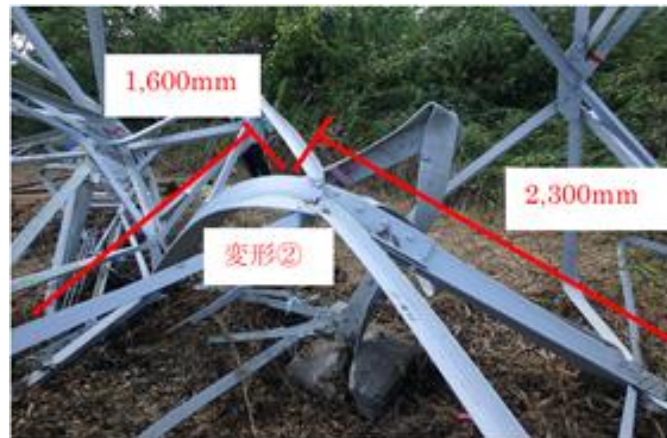


図 3-14 倒壊鉄塔下部の座屈状況 (No.78 鉄塔) ²⁰



図 3-15 倒壊鉄塔下部の座屈状況 (No.79 鉄塔) ²⁰

② 基礎部の状況

弊社は、倒壊後の基礎部の写真を確認し、柱体部の浮き上がりが少ないこと、基礎底面のコンクリート及びいかり型ボルトが破損していないことから、倒壊した鉄塔の基礎が事故当時は健全であり、鉄塔倒壊を引き起こした要因ではない可能性が高いことを確認した（図 3-16 及び図 3-17）。



図 3-16 柱体部の損傷状況²⁰



図 3-17 基礎体・地中部の損傷状況²⁰

③ 送電線の状況

弊社は、倒壊後の送電線の写真を確認し、展望台との接触により No.78 鉄塔の一部で切断が認められたものの、その他の送電線は事故当時、健全であったことを確認した（図 3-18）。

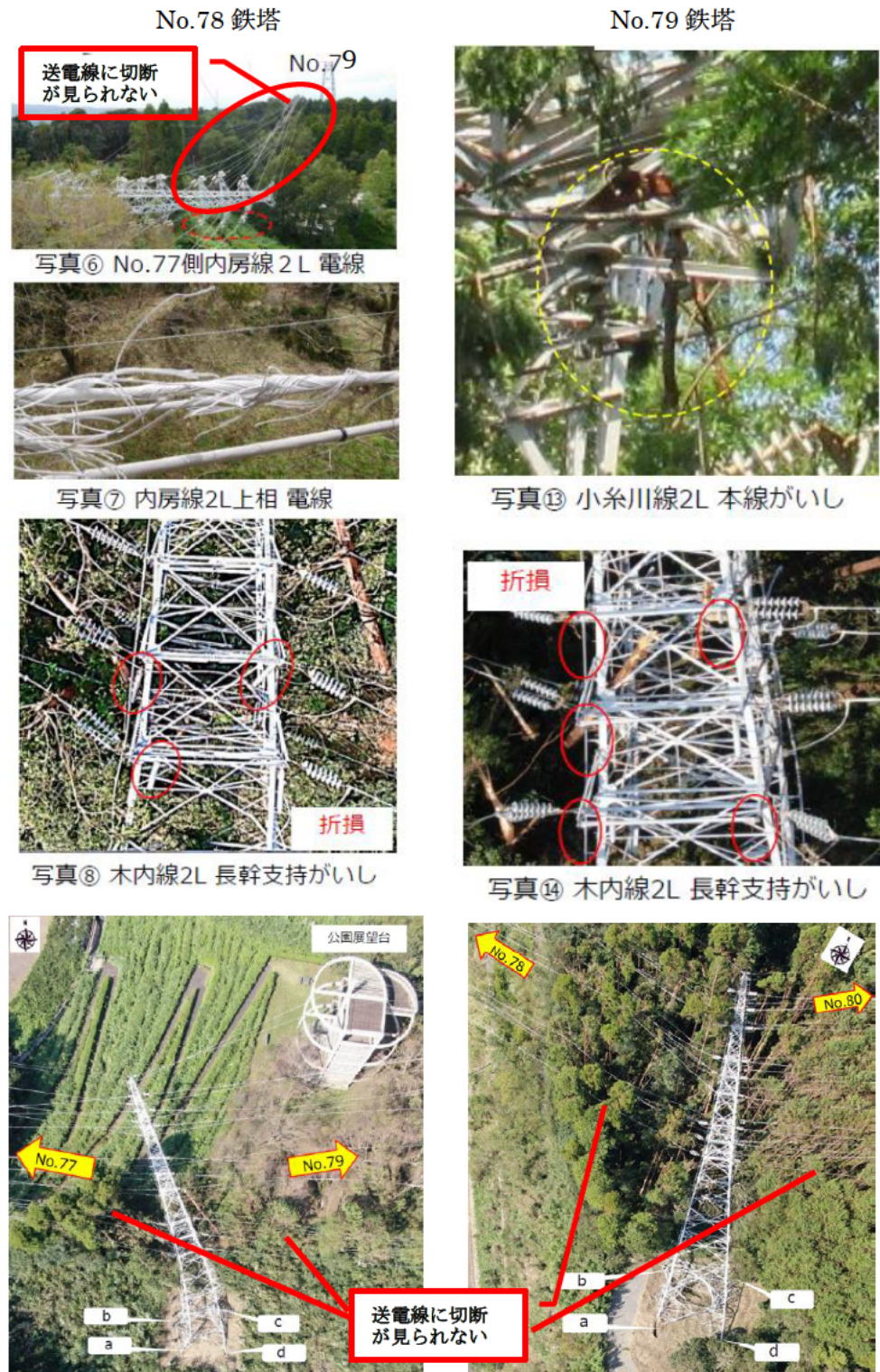


図 3-18 送電線の状況 20

④ 周辺倒木の状況

弊社は、航空写真を確認し、鉄塔の倒壊方向と周辺倒木の方向が一致していることから、鉄塔倒壊時に局所的な竜巻等の渦は発生していないことを確認した（図 3-19）。

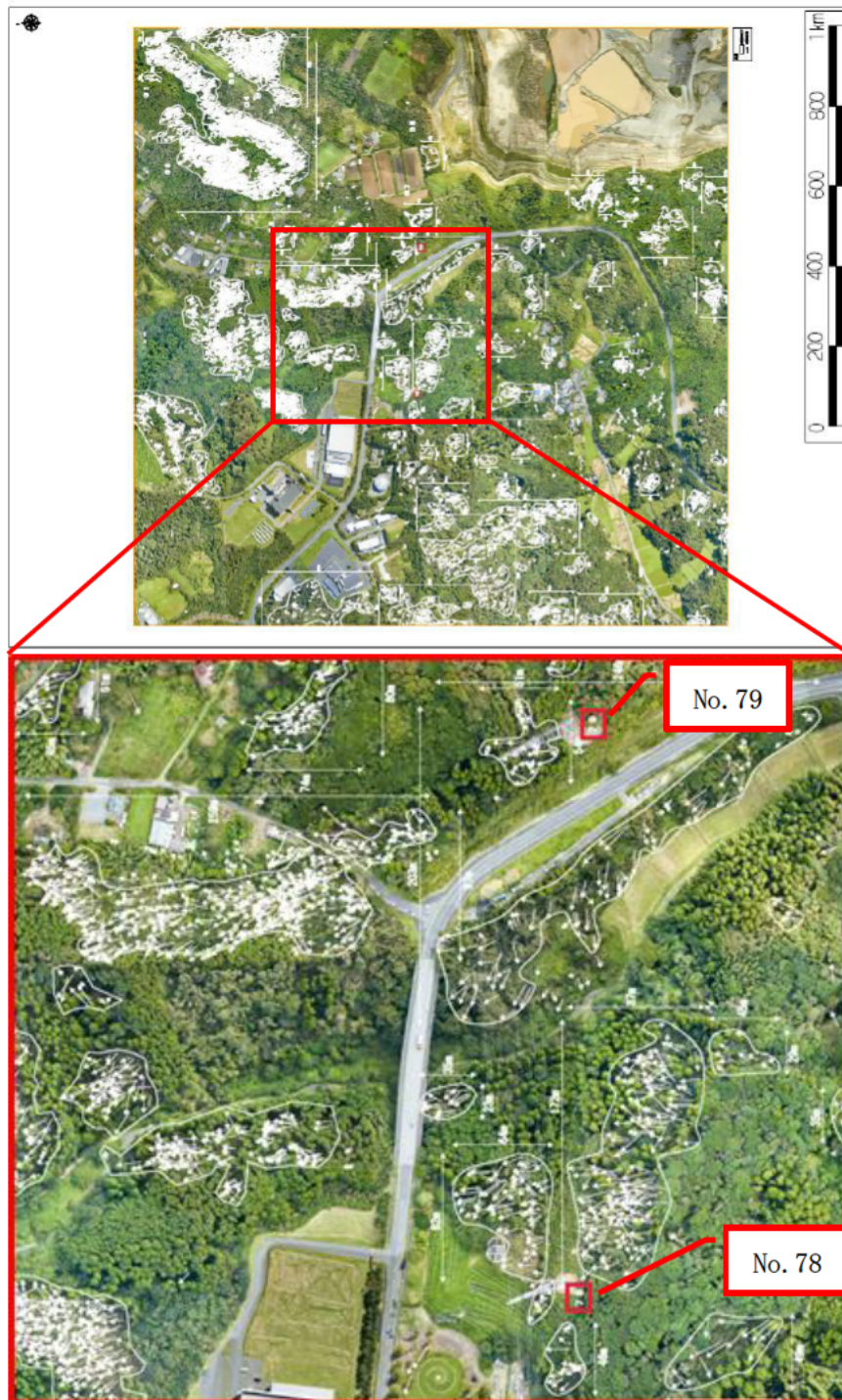


図 3-19 周辺の倒木の分布と方向 ²⁰

⑤ 風況シミュレーション（気象シミュレーションの結果を基にした気流シミュレーション）

東京電力 P G は、鉄塔 No.77～78 付近の風況シミュレーションとして、気象庁のメソ数値予報モデルの結果を境界値として気象シミュレーションを実施し、気象シミュレーションで得られた結果を基に、気流シミュレーションを実施した。

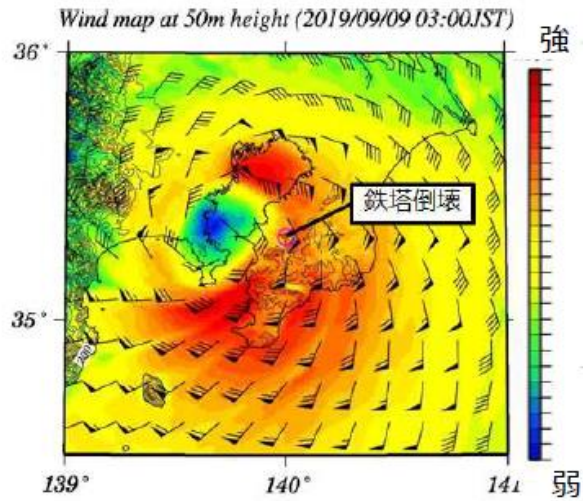
具体的には、気象庁の数値予報モデルの結果を境界値として、電力中央研究所開発の気象予測・解析システム NuWFAS（Numerical Weather Forecasting and Analysis System）を用いて、台風 15 号の再現気象シミュレーションを実施した。NuWFAS は、米国大気研究センター（NCAR）等が開発した数値領域気象モデル WRF（Weather Research and Forecasting）を基にした気象予測・解析システムである。地表から上空 16.5km までの大気を 3 次元の格子網で覆ったモデルを構築し、全ての格子点上での風速・気温・湿度・気圧・雲等の時間変化を、物理法則に基づいて計算機により数値的に求めた。

NuWFAS を用いた気象シミュレーションで得られた結果を基に、電力中央研究所開発の 3 次元局所風況解析コード NuWiCC（Numerical Wind simulation Code in CRIEPI）を用いて、倒壊場所から風上側 6km を領域とした気流シミュレーションを実施し、局地的な地形の影響を計算した。NuWiCC は、地形の起伏に沿った座標変換や高次精度差分、高レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデル等を導入した局地的な地形の起伏が風況に与える影響を精緻に評価できる 3 次元局所風況解析コードである。安定成層の効果を加味した計算も可能で、観測値や風洞実験との比較を通じた複雑地形上での風速の局所変化への再現性も検証されている。

気流シミュレーションの結果として、南南東の風において鉄塔 No.77～78 付近で顕著な増速が発生した（図 3-20）。

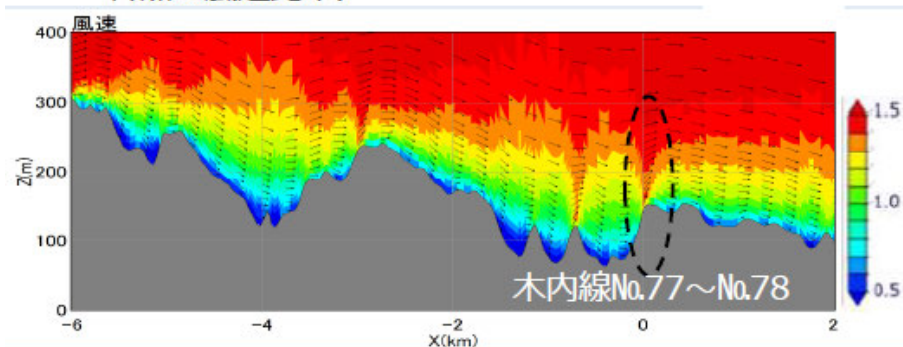
気象シミュレーション結果

9/9 3時の風向・風速分布図



気流シミュレーション結果

鉄塔倒壊箇所から南南東の風の鉛直分布図
(風上-8km、地上50mの流入風を1.0とした時の
各点の風速比率)

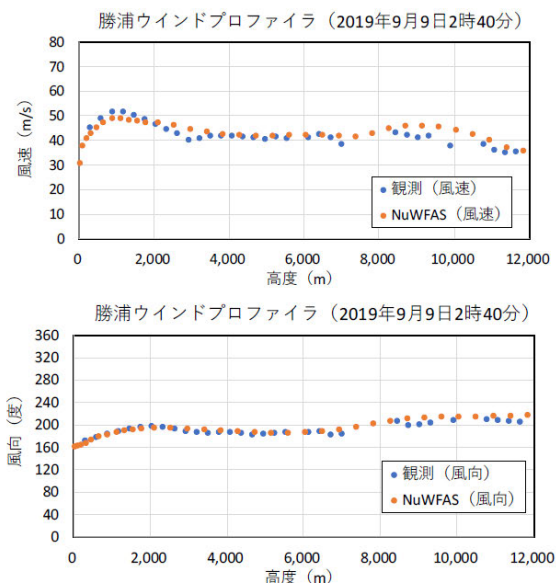


- ※ X=0はNo.77~No.78径間の中央
- ※ グレー部分は南南東方向に切り出した断面地形
(P18参照)
- ※ 南南東以外の風向では顕著な増速は無かった。

図 3-20 現地風速の推定²⁰

また、計算結果の再現について、NuWFAS による鉄塔倒壊想定時刻付近の計算結果は、勝浦ウィンドプロファイラの風向・風速の観測結果を再現していることを、弊社は確認した（図 3-21）。ここでウィンドプロファイラとは、地上から上空に向けて電波を発射し、大気中の風の乱れなどによって散乱され戻ってくる電波を受信・処理することで、上空の風向・風速を測定するものである。勝浦ウィンドプロファイラは、全国に 33 箇所あるウィンドプロファイラの一つで、今回の鉄塔の損壊事故現場に最も近いウィンドプロファイラである²¹。

2019.9.9 2時40分データ



2019.9.9 3時20分データ

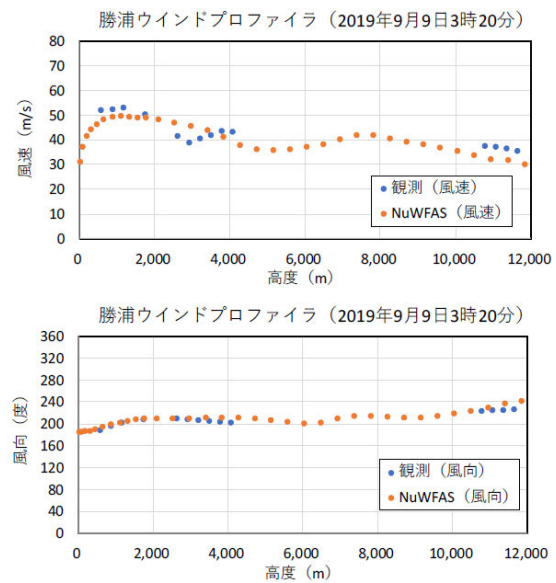


図 3-21 観測所における風速・風向の観測結果とシミュレーション結果の比較²⁰

²¹ <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/windpro/kaisetsu.html>（2020 年（令和 2 年）2 月閲覧）を基に作成。

また、気象シミュレーションで得られた結果を基に、流入境界条件として高さ方向に分布させた風速を設定し、気流シミュレーションを東京電力P Gが実施した。結果として、倒壊した No.78 鉄塔付近で局地的に風が強められた可能性を示唆する結果となったことを、確認した（図 3-22）。

さらに、東京電力P Gが倒壊した鉄塔の周辺の地形を分析した結果、台風による強い風が風上側にある標高の高い丘で増速され、送電線手前の急斜面によりさらに増速した可能性を示唆する結果となったことを、弊社は確認した（図 3-23）。

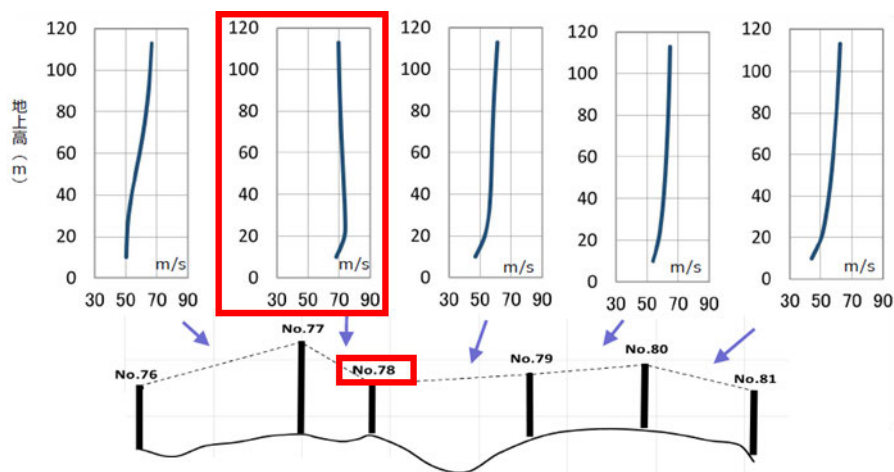


図 3-22 現地風速の推定結果²⁰

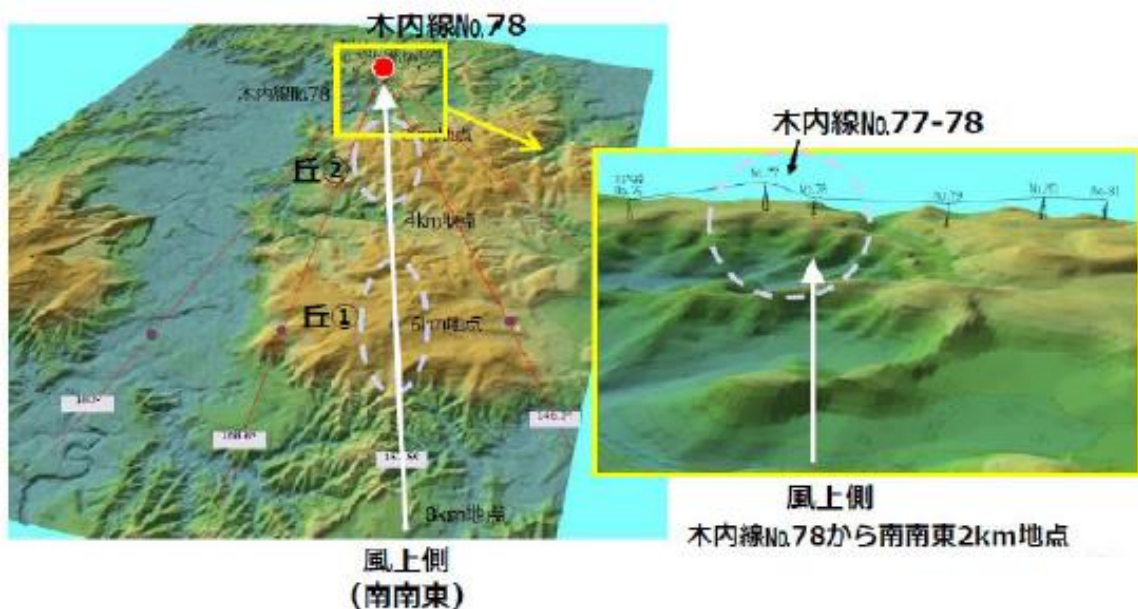


図 3-23 損壊事故現場周辺の地形²⁰

⑥ 倒壊メカニズム

倒壊メカニズムのシミュレーションに先立ち、送電線の動的な最大応答を静的に求める方法（等価静的解析）と動的解析との比較を東京電力P Gが実施した。その結果、No.79 鉄塔は、等価静的解析の応力が動的解析による応力とほぼ同等で包含していること、No.78 鉄塔下部の応力は、動的解析の方が等価静的解析より応力 5%程度大きい結果となったことを確認した（図 3-24）。

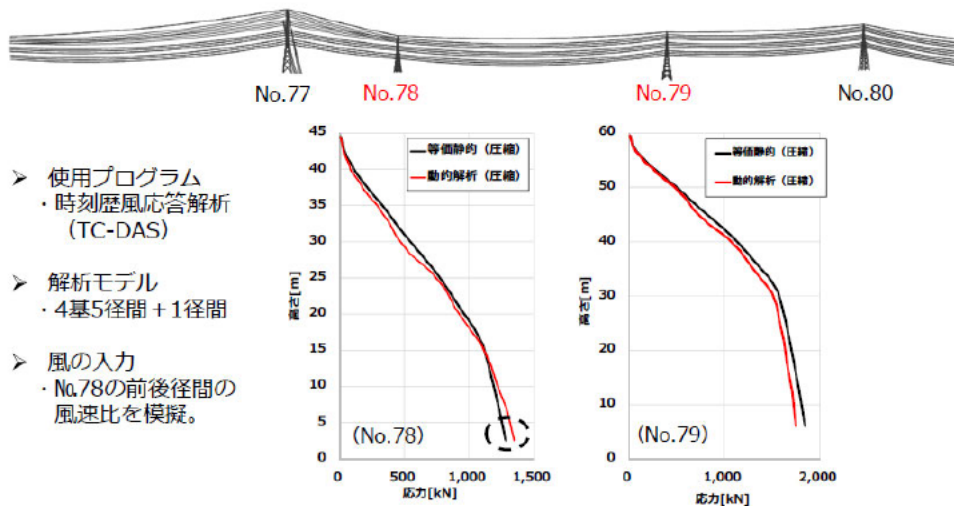
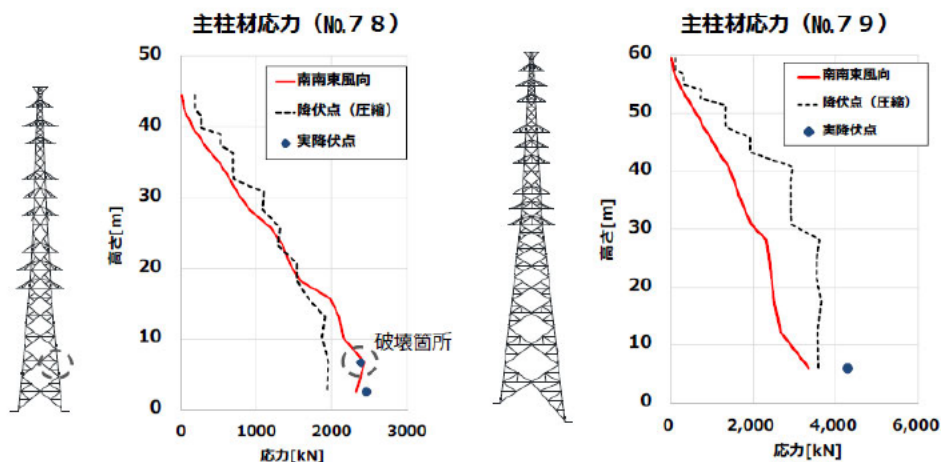


図 3-24 動的解析と等価静的解析の比較²⁰

動的解析と等価静的解析の比較結果を踏まえ、No.78 は動的解析結果を踏まえ応力を 5% 割増し、東京電力P Gは応力計算を実施した。No.78 鉄塔の下部の支柱材について、圧縮脚応力と風向の変化との相関、さらに実座屈強度との比較結果を弊社が確認した結果、風圧により下部の支柱材応力が降伏点を上回り座屈が生じる可能性があることを確認した（図 3-25）。



実降伏点・・・撤去材の材料試験結果を反映した降伏点。

図 3-25 鉄塔の応力シミュレーション²⁰

倒壊した鉄塔 2 基は、電気事業法に基づき、1971 年（昭和 46 年）10 月に工事計画届出、1972 年（昭和 47 年）7 月に使用前検査に合格した。2019 年（令和元年）9 月に倒壊鉄塔の設計ならびに巡視・点検記録を確認した結果、鉄塔及び基礎ともに技術基準に基づく強度を満足している設計であり、また巡視・点検は保安規程で定めた頻度、方法で実施され、過去 5 年の記録で技術基準に抵触する恐れのある異常は無かったことを、弊社は確認した。

さらに、倒壊した鉄塔の材料調査では規格強度を満足する結果であったこと、基礎の試掘調査では基礎体の損傷が起因となり鉄塔倒壊に至った痕跡は無かったことを、弊社は確認した。

倒壊鉄塔近傍の気象・気流シミュレーションを実施し、現地風速を推定した結果、木内線 No.77～No.78 において南南東の風上地形の影響で著しい増速を、弊社は確認した。この結果を用いて等価静的手法で算出した応力は No.78 において降伏点を上回る結果となった。

以上から、木内線 No.78 鉄塔は No.77～No.78 の急斜面で風が著しく増速したことにより、応力が降伏点を上回り部材が座屈し、その後 No.79 を引き倒しながら倒壊したものと東京電力 P G は結論付けている。

3.3.3 電柱の損壊事故の原因調査

電柱についても、設計及び点検の妥当性を確認するとともに、倒壊後の写真等のデータを、弊社は確認した。

表 3-11 電柱の損壊事故の原因調査の調査項目と調査対象

調査項目	調査対象
①設計	■設計図面・計算書
②巡視点検	■マニュアル・保安規程等 ■巡視点検記録
③損壊状況、メカニズム	■改修工事に当たり作成した図面や写真 ■改修管理表 ■現場調査表

(1) 設計

東京電力 P G では、技術基準における規定の日本産業規格（JIS）準拠の電柱を使用する調達マニュアルを運用している。同マニュアルにおいて、電柱の納入業者に対し納入品の規格名を指定していること、納入事業者において納入品サンプルに対して、日本産業規格に準拠した方法による強度試験により安全率の準拠状況を確認し、成績書と併せて仕入れていることを、弊社は確認した。また、納入業者に対しては数年に 1 度、品質管理の審査を実施していることも、弊社は確認した。さらに、過去においても、その当時の技術基準に準拠した電柱を使用する調達マニュアルを運用してきたことも、弊社は確認した。

また、設計において、安全率（コンクリート柱：2.0、鉄柱：1.5）²²を考慮して設計されていることを、弊社は確認し、施工方法も確立しており、施工状況についても整理されていることを、弊社は確認した（図 3-26 及び図 3-27）。

以上より、風圧荷重の設定方法、並びに根入れ、地盤の補強等の施工により、技術基準における規定の安全率を満たすように設計されていることを、弊社は確認した。

A [支持物の強度検討]

1. [電柱の柱体強度]

- ・電線に加わる風圧による曲げモーメント
- ・電線の不平均張力による曲げモーメント
- ・支持物に加わる風圧による曲げモーメント
- ・変圧器に加わる風圧による曲げモーメント
- ・架空地線支持金物に加わる風圧による曲げモーメント
- ・PHSアンテナに加わる風圧による曲げモーメント
- ・合成モーメント

Mw	=	6,573.8	[N-m]
Ms	=	0.0	[N-m]
Mcp	=	8,054.6	[N-m]
Mt	=	1,026.1	[N-m]
MAGP	=	0.0	[N-m]
MAPHS	=	0.0	[N-m]
M1	=	15,654.5	[N-m]

M1 15,654.5 ≤ Mcr : 電柱の許容モーメント 84,035.0

適

2. [電柱基礎の安全率]

- ・頂部集中換算の総合荷重
- ・支持物基礎の安全率

P=M1/H1	=	1,277.9	[N]
f=F/P	=	14.0	

(判定) f 14.0 ≥ 2

適

3. [支線の強度検討]

- ・支線が分担する不平均張力による曲げモーメント
- ・支線に加わる応力

Mss	=	88,954.6	[N-m]
Ts	=	30,957.2	[N]

(判定) 1.7 ≥ 1.5

適

図 3-26 強度計算の例（千葉県千葉市若葉区川井町）²⁰

²² 東京電力PGにおいて、現在、木製の電柱（木柱）は新設していないため、マニュアル上の規定はない。

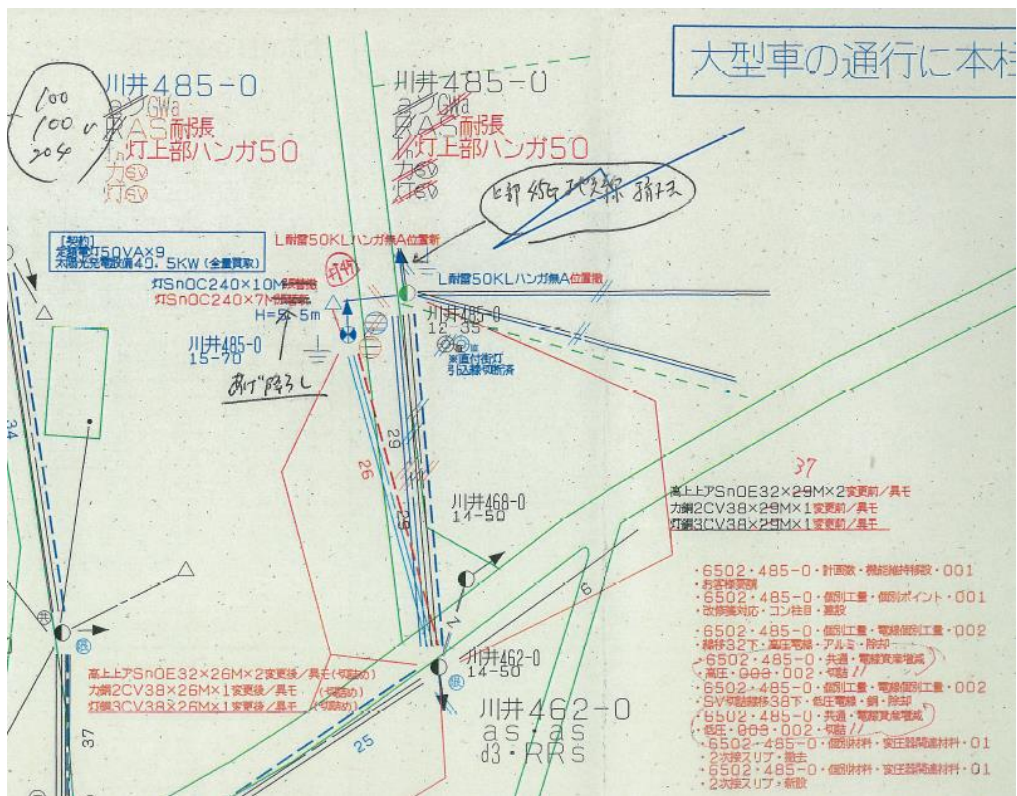


図 3-27 電柱配置図面の例（千葉県千葉市若葉区川井町）²⁰

(2) 巡視点検

表 3-12 に示した電柱を対象とした保安規程に定められた巡視・点検方法（表中の赤下線部）に示された手順と、表 3-13 に例を示した損壊した 1,996 本の電柱の巡視点検記録に記載された点検回数・点検内容・点検方法を突合し、保安規程に則り巡視点検が実施されていたことを、弊社は確認した。

表 3-12 保安規程（電柱）²⁰

設備別	巡視		点検（検査を含む）			備考
	機器設備	頻度	機器設備	項目	頻度	
配電設備	配電設備全般	1回/5年 ^(※1)	接地装置	測定試験 B種接地抵抗	適宜 ^(※2)	(※1) 樹木接近箇所や市街地など施設環境変化が著しい場所に施設している設備は、1回/5年に加え、適宜実施する。 22kV架空設備のうち、6.6kV送電設備と併架している設備及び被覆線以外の設備は、架空送電設備による。 (※2) 施設状態・前回測定結果に応じて接地抵抗値の変動の恐れがある箇所は1回/5年とする。

表 3-13 電柱の巡視点検記録²⁰

No	初点名	支社名	標識名	設備番号	施設年月	【保安情報】巡視記録			支障物点検		【保安情報】点検記録			支障物種 台数
						初巡日	巡視結果 ※支障物有無	対応状況	点検日	対応状況	点検日	点検結果	測定値 (V)	
1	千葉	千葉配	北花輪	0280	197405	2017/10/6	良	-	-	-	2006年1月	良	27	千1
2	千葉	千葉配	北花輪	0750	199909	2017/10/6	良	-	-	-	2002年4月	良	32	千2
3	千葉	千葉配	北花輪	0590	199909	2017/10/6	良	-	-	-	2002年4月	良	16	千3
4	千葉	千葉配	内山	1380	197512	2019/9/22	良	-	-	-	対象外	-	-	千4
5	千葉	千葉配	内山	1440	197709	2019/9/22	良	-	-	-	対象外	-	-	千5
6	千葉	千葉配	内山	1450	201903	2019/9/22	良	-	-	-	対象外	-	-	千6
7	千葉	千葉配	こて中	3860	198511	2014/11/27	良	-	-	-	対象外	-	-	千7
8	千葉	千葉配	千代	4270	198910	2017/7/25	良	-	-	-	2002年11月	良	22	千8
9	千葉	千葉配	栗沢	0420	197307	2017/1/10	良	-	-	-	2005年4月	良	23	千9
10	千葉	千葉配	川井	4850	201901	-	-	-	-	-	2019年1月	良	240	千10
11	千葉	千葉配	川井	4960	199606	2017/3/31	良	-	-	-	1996年6月	良	62	千11
12	千葉	千葉配	大井	0540	197811	2019/9/2	良	-	-	-	対象外	-	-	千12
13	千葉	千葉配	大井	0600	197108	2019/9/3	良	-	-	-	1999年5月	良	9	千13
14	千葉	千葉配	西井	0230	197112	2018/5/21	良	-	-	-	対象外	-	-	千14
15	千葉	千葉配	本行寺	0350	197106	2017/11/16	良	-	-	-	対象外	-	-	千15

(3) 損壊事故の原因

① 損壊時の原因調査

東京電力P Gは、折損・倒壊等した電柱 1,996 本の被害原因について、1,579 本については折損・倒壊時の図面・写真や改修管理表により事故原因（①風による倒木や建物倒壊に伴う二次被害、②飛来物による二次被害、③地盤の影響（崖崩れ等））を整理した。一方、残り 417 本については、東京電力P Gが事後的に現場調査を行い、周辺の状況（倒木の有無等）や、一部については地域の住民へのインタビュー等を基に原因を推定した（表 3-14）。

表 3-14 電柱の損壊原因の判定の内訳²⁰

損壊原因の判定方法			判定の根拠としたもの
損壊した電柱 の全数 1,996 本	原因が明確なも の 1,579 本	停電復旧や巡視等を実施した現地 出向者が損壊の原因を判断	図面・写真 1,182 本 改修管理表 89 本 現場作業員からの報告 308 本 ・[千葉エリア以外]拠点で停電 復旧対応にあたった部署から 被害状況の報告を書面で受領 (246 本) ・[千葉エリア]停電復旧や巡視 等を実施した現地出向者から 口頭で聞き取り (62 本)
	原因を推定した もの 417 本	現地調査により、倒木や損壊した 家屋の有無などの周辺状況から原 因を推定（一部地域の方にインタ ビューした結果も含む）	現場調査結果 417 本

図面・写真、改修管理表、現場作業員からの報告及び現場調査表の各例を図 3-28、表 3-15、表 3-16 及び図 3-29 にそれぞれ示す。



図 3-28 図面・写真の一例²⁰

表 3-15 改修管理表の一例²⁰

No.	エリア	改修要請受付		住所		標識	電柱 No.	電柱 重複	標識	電柱 No.	電柱 重複	設計No.	被害設備	
		月日	時間	市区町村	丁目番地								項目 (リスト選択)	状況詳細
2	船橋	9/9	6:34	船橋市飯山廣	1-839	神明	76	～	大蔵	277		5JK0010A	電柱:折損/倒壊	ビニールハウス飛来4本折損
4	市南	9/9	8:50	市川市東青野	4-18-18	市学	216	～				5JK0010A	電柱:折損/倒壊	飛来物により低圧柱折損
5	市南	9/9	9:34	市川市原木	2-1752-1	信義	97	～				5JK0011A	電柱:折損/倒壊	地中掘り上げ道路 低圧柱折損 屋根が引っかかっている
61	習志野	9/10(現場発見)		八千代市瓦崎	154	寺台	309	～					電柱:折損/倒壊	薪木倒木による低圧柱折損
76	船橋	9/26	10:00	船橋市鈴身町	51-57	すすみ	171	～				5HK0123A	電柱:折損/倒壊	架空ケーブル4本倒木により倒木

表 3-16 現場作業員からの報告の一例²⁰

No.	エリア	支社	新設所	地域	サービス番号	標識名	標識番号	設備区分	倒壊、折損電柱の住所(地先)	被害	倒壊・折損の理由	判定方法	本社が情報を把握した日	調査を行った期間(日)	調査を行った人
千1	千葉	千葉総	千葉	千葉	2052000	北花輪	4510	0280	本社	千葉県千葉市中央区花輪町B2-1	折損・倒壊	倒木、建物倒壊に伴う2次被害	停電確認・道路等へ飛来した現地出向者が判別	10月4日	千葉電気エンジニアリング
千2	千葉	千葉総	千葉	千葉	2052000	北花輪	4510	0750	本社	千葉県千葉市中央区花輪町B2-5	折損・倒壊	倒木、建物倒壊に伴う2次被害	停電確認・道路等へ飛来した現地出向者が判別	10月4日	千葉電気エンジニアリング
千3	千葉	千葉総	千葉	千葉	2052000	北花輪	4510	0590	本社	千葉県千葉市中央区花輪町B2-5	折損・倒壊	倒木、建物倒壊に伴う2次被害	停電確認・道路等へ飛来した現地出向者が判別	10月4日	千葉電気エンジニアリング

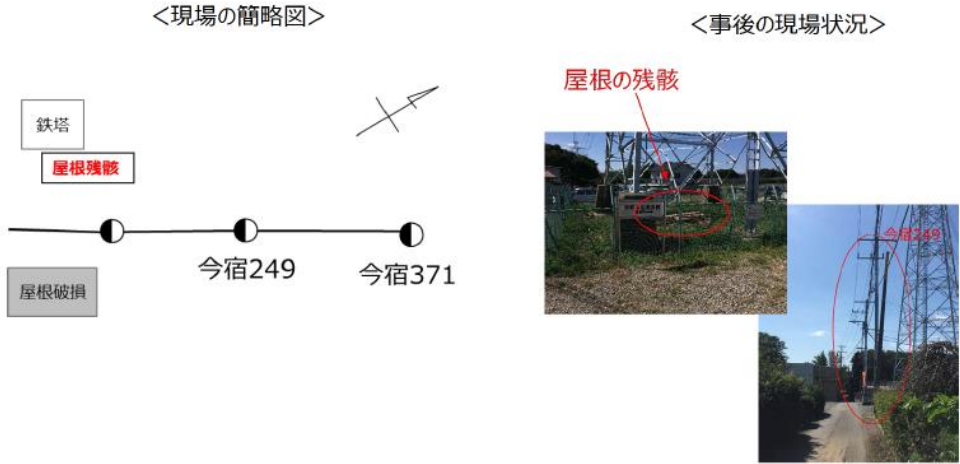


図 3-29 現場調査表の一例²⁰

弊社が改修工事にあたり作成した図面や写真を確認した結果、損壊原因が二次被害（下図は、倒木、飛来物の事例）であることを確認したものが 1,976 本あり、現場調査表によって原因を推定した 20 本の電柱については、現存するエビデンスで原因が特定されていない、あるいは、根拠において原因が弊社は確定できなかった。

電柱の損壊事故で二次被害が原因と断定できない例として、図 3-30 の現場調査表については、隣接する家屋の屋根と壁の破損に由来する「飛来物による折損」とされている。一方、図 3-30 の折損直後の写真では、電柱は根元から完全に破断している。折損の状態から、住宅間の隙間を通過する突風による折損の可能性が考えられるため、二次被害が原因と断定できなかった。

【現場調査表（原因：飛来物による折損）】²⁰

事業所	管理番号	住所	電柱番号		電柱種類	点検者	電柱の状態(調査結果)
			標識	ブロックNo. 番号			
東金	663	八街市大関 112-14	大関	7104 2240	本柱		飛来物による折損。

写真



【折損直後の写真】²³



図 3-30 電柱の損壊事故で二次被害が原因と断定できない例

²³ 関東東北産業保安監督部からの提供資料を基に作成。

② 損壊事故の原因が特定できなかった電柱の追加調査

損壊原因が確定できなかった 20 本の電柱について、東京電力 P G による追加調査が実施された。その結果、現地調査や周辺住民からの情報収集により、18 本の電柱について原因の特定に至り（図 3-31）、2 本については原因の特定に至らなかった（図 3-32）。



図 3-31 再調査により原因の特定に至った例 ¹⁶



図 3-32 原因の特定に至っていない電柱（2 本） ¹⁶

3.4 損壊原因の現状分析結果について

3.4.1 鉄塔

調査の結果、鉄塔で座屈が生じた原因は、基本的には強風が主要因であることが東京電力 P G によって結論付けられた。

一方で、現状は風況シミュレーション、倒壊メカニズムのシミュレーションの前提条件等が明確ではないことが有識者から指摘された（表 3-17 及び表 3-18）。

表 3-17 風況シミュレーション結果における有識者からの指摘等

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">・ 気流シミュレーションの解析領域として、風上から 6km であるが、十分な領域であるか。・ 広域の数値解析からの流入風の特性として、風向の変化、風速の変化や乱れの特性は十分に考慮されているか。・ 鉄塔・送電線に最大瞬間風速をどのように分布させて風圧荷重を評価しているのか（位相差、時間差の設定）。・ 風洞実験等により、シミュレーション結果の実証を行うことが望まれる。 |
|---|

表 3-18 倒壊メカニズムのシミュレーション結果における有識者からの指摘等

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">・ 前後径間で同様の風速条件としているが、どのような場合を想定したのか。・ 乱れ強さが高さ方向にほぼ一定値（約 0.15）であるが、これはどのように設定したのか。・ 鉄塔両端の電線長に 2 倍の差があり、径間風圧荷重がアンバランスとなる可能性もあり、今後シミュレーション結果よりその影響を確認することが望まれる。・ 動的応答を考慮した場合の風圧荷重は、等価静的計算に比べて、大きくなる場合と小さくなる場合があるようだが、これは、不確定性の一種と考えてよいのではないか。そうだとするならば、この不確定性が、どの程度の変動幅を有しているかを評価すべきではないか。今回の原因から動的応答の影響は除かれているが、要因の可能性としては入れておいても良いのではないか。・ 一部の部材の座屈に起因して鉄塔が即座に構造体として倒壊するのか、あるいはある程度の余裕度があるのかを非線形解析を行い確認し、鉄塔の構造体としてのロバスト性・冗長性を確認する必要がある。 |
|--|

3.4.2 電柱

電柱の折損の原因は、倒木、飛来物、土砂の流出による傾斜等の二次被害が大半であると推定される。一方、2 本の電柱については、現存するエビデンスで原因が特定されていない、あるいは、再調査の結果においても原因が確定できなかった。

3.5 現地調査の実施について

台風 15 号により倒壊した千葉県君津市にある東京電力 P G 木内線の鉄塔 (No.78,79) の現場確認、鉄塔及び電柱の保全・復旧工事等を行っている東京電力 P G や工事業者へのヒアリング調査等を実施することにより、鉄塔及び電柱の損壊事故の原因調査の深掘りを行った (表 3-19)。

表 3-19 現地調査概要

項目	内容
調査日時	2019 年 (令和元年) 11 月 10 日 (日) 13 : 45 ~ 16 : 30
参加者	横山座長、石川委員、木本委員、熊田委員、松井委員 ※事務局 (経済産業省電力安全課長)、関東東北産業保安監督部長等が同行
先方対応者	東京電力 P G 技監、工務部、配電部 株式会社 T L C の現場責任者
調査内容	①鉄塔の倒壊事故の現場調査 ②保全・復旧工事等を行った東京電力 P G 等へのヒアリング調査 ③鉄塔及び電柱の損壊に関する写真・記録データの確認

現地調査にあたり、弊社はバスの手配、当日の行程案の作成、参加者への行程の通知、調査において参照する資料案の作成と現地までの運搬を担当した。

現地調査の時点では、保全・復旧工事のため、倒壊した鉄塔及び送電線は除去されていたため、東京電力 P G 及び関東東北産業保安監督部より鉄塔倒壊時の写真等を基に説明を聴取した。現地調査では、局地的な風が吹いた可能性、鉄塔の基礎部分の施工状況等についても東京電力 P G や工事会社等からヒアリングを実施した (図 3-33)。



図 3-33 現地調査の様子¹⁶

現地調査において、委員からは主に、鉄塔の設計内容や局地的な風速上昇の可能性に関する指摘（表 3-20）、電柱の事故記録の保存・共有の方法や損壊原因について指摘があった（表 3-21）。

表 3-20 現地調査における委員からのご意見等（鉄塔）

項目	委員からのご意見等
鉄塔の倒壊について	・鉄塔の上部構造に破損箇所や部材の腐食等はなかったのか。 ・No.79 鉄塔の方が、送電線に角度がついており、張力も大きくなっているのではないか。 ・No.78 鉄塔の下部部分の部材の損傷が激しい。また、No.79 鉄塔も根本から大きく変形している。 ・倒壊した鉄塔付近では、樹木の損壊がひどく、大規模。樹木が倒れた向きの鉄塔の倒壊と同様の方向であり、付近で風がかなり加速されたおそれがある。 ・平成 3 年台風 19 号後に、各電力会社は鉄塔の特殊地形を考慮した対策を講じるようになったが、今回倒壊した鉄塔について何らかのチェックは行ったのか。

項目	委員からのご意見等
確認データ	・事故当時の鉄塔周辺の気象データ（アメダス等）はないのか。 ・設計書に基づき、各部材への負荷も含めた鉄塔の強度検証は行ったのか。

表 3-21 現地調査における委員からのご意見等（電柱）

項目	委員からのご意見等
設計諸元等	・電柱の強度設計で考慮すべき諸元を明確にすべき。 ・他社の通信線も含め電柱の強度設計は考慮しているのか。
損壊原因	・損壊した 1,996 本の事故原因のデータ、特に事故状況を記録した写真は全てそろっているのか。 ・損壊した 1,996 本のうち、現場の写真等がないものも存在。現時点で原因が明確ではないものもあるのではないのか。 ・（電線の近くに）飛来物が落ちていても、それが原因か分らないのではないのか。海から強い風が吹いて、電柱の損壊に影響がなかったか確認すべき。 ・1,996 本の中には、倒木等で停電に直接影響を与えたもの以外に、保安上の観点から取替えを行ったものもあるのではないのか。
気象の影響	・気象条件が時々刻々変化中、配電設備の損壊状況は時系列的に分からないのか。 ・一般的に風速が強い海岸付近で倒壊した電柱は少なく、山間部が多い印象。
停電の原因	・電線の断線や屋根等の飛来物が電線に接触し、短絡を起こして停電したものもあるのではないのか。

3.6 東京電力 P G による事故原因調査について

3.6.1 鉄塔

(1) 検討体制

① 「66kV 木内線鉄塔倒壊事故調査検討委員会」並びに作業会の設置

台風 15 号による 66kV 木内線の鉄塔倒壊事故を受け、事故原因の解明及び再発防止対策を検討するために、東京電力 P G 内に同社技監を委員長とし、社外専門家を顧問とする「66kV 木内線鉄塔倒壊事故調査検討委員会」（以下、「東電委員会」）を設置した。

委員会では、事故原因等の検討内容に応じて、必要によりさらに委員以外の参加を求めることとした。また、委員会下部組織として送電技術担当を主査とする作業会が設置された。

② 東電委員会の構成

顧問	大熊 武司 神奈川大学 名誉教授 加藤 央之 日本大学 文理学部地球科学科教授 高橋 徹 千葉大学 構造安全計画教育研究領域教授
委員長	東京電力 P G 技監
委員	東京電力ホールディングス株式会社経営技術戦略研究所 東京電力 P G 工務部長 東京電力 P G 工務部送変電建設センター所長 東京電力 P G 工務部送電技術担当 東京電力 P G 工務部土木技術担当 東京電力 P G 工務部送電グループ送電設備保全担当 東京電力 P G 木更津支社長
幹事	東京電力 P G 工務部送電グループマネージャー 東京電力 P G 工務部流通土木グループマネージャー

③ 各開催状況・活動状況

東電委員会の開催状況は表 3-22 のとおりである。

表 3-22 東電委員会の開催状況

回	開催日程	主な議題
1	2019 年（令和元年）9 月 30 日	①事故当時の気象 ②事故概要 ③設備及び周辺の被害状況 ④被害鉄塔の施工及び保守管理の確認結果 ⑤倒壊鉄塔の既設計確認結果 ⑥倒壊鉄塔の耐風性能評価結果 ⑦倒壊鉄塔付近の風速推定結果
2	2019 年（令和元年）10 月 29 日	①台風 15 号と 19 号の気象比較結果 ②倒壊鉄塔付近の風速推定結果 ③推定風速による応力解析結果（鉄塔倒壊メカニズムの検討） ④基礎の試掘調査結果 ⑤電線損傷箇所調査結果
3	2019 年（令和元年）11 月 11 日	①台風 15 号と過去の台風との比較 ②鉄塔倒壊メカニズムの解明 ③局所風をもたらした地形的な特徴に関する考察 ④再発防止対策の方向性検討状況

回	開催日程	主な議題
4	2019 年（令和元年）11 月 29 日	①気流解析結果の追加報告 ②倒壊メカニズムの解明 ③鉄塔倒壊原因と対策（中間報告）
5	2019 年（令和元年）12 月 13 日	①再発防止対策案 ②事故報告書案

(2) 検討事項

東電委員会における調査検討事項は表 3-23 のとおりである。

表 3-23 東電委員会における調査検討事項

項目	内容
事故状況の把握	・ 事故当時の気象と事故概要 ・ 設備の被害 ・ 周辺の被害状況（倒木など） ・ 製作、施工及び保守管理状況 ・ 鉄塔の既設設計確認 ・ 基礎の既設設計確認
事故原因の解明	・ 倒壊鉄塔付近の風速の推定 ・ 推定風速による応力解析 ・ 基礎の試掘調査、評価 ・ 倒壊メカニズムの解明
再発防止対策の確立	・ 既設設備の対策方針作成 ・ 新設設備の対策方針作成

(3) 検討内容の報告

東電委員会における各調査検討により、把握・判明された内容及び再発防止対策が本ワーキンググループにおいて報告された。

3.6.2 電柱

(1) 検討体制

① 「電柱損壊事故調査検討チーム」の設置

台風 15 号による東京電力管内で発生した電柱損壊事故を受け、事故原因の解明、損壊電柱の保全状況確認及び本ワーキンググループへの情報提供等を行うために、東京電力 P G 配電部内に同社配電部長を主査とする「電柱損壊事故調査検討チーム」（以下、「調査検討チーム」）を設置した。

また、配電部内メンバーについては、適宜、調査検討チームの指示に基づき、検討調査に

協働した。

② 調査検討チームの構成

主 査	東京電力 P G 配電部長
副主査	東京電力 P G 配電部長代理
メンバー	東京電力 P G 配電部配電設計グループマネージャー 東京電力 P G 配電部配電技術グループマネージャー 東京電力 P G 配電部配電エンジニアリングセンター保全高度化グループ マネージャー

③ 各開催状況・活動状況

調査検討チームは、2019 年（令和元年）10 月 1 日に設置され、隔日で活動し、必要に応じ随時対応を行った。

(2) 検討事項

調査検討チームの検討事項は以下のとおりである。

表 3-24 調査検討チームにおける検討事項

No.	項目	内容
1	損壊した電柱の保全記録確認	損壊した 1,996 本の電柱について、保安規程に定められている巡視の記録及び点検結果を集約し確認している。
2	損壊原因の記録に関する調査	各事業所から報告された損壊原因を確認するとともに、千葉県域の各事業所及び工事会社へ出向き、保管されている台風通過直後の巡視記録、図面、写真などの書類の確認及び収集を実施している。
3	現地調査	No.2 で損壊原因が特定できなかった 417 本の電柱について、現地に出向き、残された痕跡に関する情報収集及びその情報に基づいた損壊原因を推定している。
4	現地出向者に対する損壊原因に関するヒアリング	No.3 で損壊原因の推定をした 417 本の電柱について、各事業所に対してヒアリングを実施し、現地の被害状況を直接確認した社員から損壊原因に関する情報を収集している。
5	損壊状況及び原因に関する分析	電柱の損壊状況及び損壊原因に関する、以下の分析を行っている（詳細は次項(3)に示す）。

No.	項目	内容
		a.施設年、エリア別の損壊状況の評価 b.倒木や飛来物が電柱に与える影響 c.損壊した撤去柱の調査
6	沿岸部の電柱損壊率の評価	ワーキンググループからの要請により、沿岸部の電柱損壊率の評価を行っている詳細は次項(3)に示す。

また、調査検討チームの活動内容及び調査結果については、経営層へ、適宜報告を実施した。

(3) 検討内容の詳細、結論

調査検討チームの検討内容の詳細、結論は以下のとおりである。

表 3-25 調査検討チームにおける実施項目及び内容

No.	項目	内容
1	損壊した電柱の保全記録確認	損壊した 1,996 本の電柱について、保安規程に基づく保全が適切に実施されていたことを確認した。
2	損壊原因の記録に関する調査	現地出向者が判断した記録を確認、その結果、損壊原因が倒木・建物の損壊や飛来物、地盤の影響による二次被害であることを確認した。
3	現地調査	現場調査を実施した結果、417 本の電柱の事故原因は全て二次被害であると推定した。
4	現地出向者に対する損壊原因に関するヒアリング	各事業所の現地出向者に対するヒアリングにより、138 本の電柱について二次被害の損壊原因（飛来物、倒木、土砂の流出等）が判明した。
5	損壊状況及び原因に関する分析	a.施設年、エリア別の損壊状況の評価 ・ 損壊した電柱に特定の年代に集中するような特異性はなかった。 ・ 沿岸部で損壊した電柱の周囲環境を調査した結果、近隣の同じ環境に施設された電柱には被害が見られなかった。 ・ 風の影響を直接的に受けやすい沿岸部と他のエリアの折損率を比較した結果、有意な差は無かった。 b.倒木や飛来物が電柱に与える影響 ・ 倒木については、目通し 50cm の樹木が電線に 3 本倒れ、かつ風速 30m/s の風が加わると電柱が折損する恐れがあることがわかった。

No.	項目	内容
		・飛来物については、2.25m×15m の飛来物が電線にかかり、かつ風速 30m/s の風が加わると電柱が折損する恐れがあることがわかった。 - c.損壊した撤去柱の調査 ・損壊した電柱の調査において、鉄筋の錆により強度が低下していた電柱はなかった。
6	沿岸部の電柱損壊率の評価	・風圧と電柱の折損の関係を評価するため、風の影響を直接的に受けやすいと考えられる沿岸部（海岸線から約 200m）と、千葉全域における電柱の折損数を農地や森林などの土地利用種別ごとに集計した。さらに、同様に田、農地、荒地、公園緑地、河川湖沼等のエリアについて折損率を比較した。 ・その結果、沿岸部の折損率は 0.17%、千葉県全域の折損率は 0.11%と有意な差は見られなかった。 ・相対的に風が強い沿岸部で折損率が高くないことから、電柱損壊の主な原因は飛来物や倒木などの二次被害であると考えられている。

上記の検討結果に基づき、東京電力 P G においては、損壊した 1,996 本の電柱は、倒木・建物の損壊や飛来物、地盤の影響による二次被害であると判断した。

4 ワーキンググループに係る対応

4.1 ワーキンググループの概要

台風 15 号により発生した鉄塔及び電柱の事故と、事故により発生した大規模停電により国民生活や経済活動に甚大な影響を及ぼしたことを受け、総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会/産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 電力安全小委員会の下に、表 4-1 の趣旨、表 4-2 の委員等構成により、新たにワーキンググループが設置された。

表 4-1 ワーキンググループの設置趣旨（2019 年（令和元年）11 月）²⁴

令和元年 9 月に関東地方に上陸した台風 15 号では、東京電力管内の鉄塔 2 基の倒壊事故や多数の電柱が倒壊・損傷する事故が多数生じた。

これらの事故により、千葉県を中心に最大停電戸数約 93.5 万軒の大規模停電が発生し、全面復旧まで長い時間を要するなど、長期にわたる大規模停電により国民生活や経済活動に甚大な影響を及ぼした。

こうした事態を踏まえ、電力の安定供給の確保の観点から、台風等の自然災害による送配電インフラの事故原因を究明し、強靱な送配電設備を構築していくことが強く求められる。

こうした中で、本年 10 月 31 日に行われた「総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会/産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 電力安全小委員会 合同電力レジリエンスワーキンググループ」にて示された中間論点整理において、鉄塔・電柱の技術基準見直しを含めた検討を実施することとなった。

このため、今般の鉄塔や電柱の倒壊・損傷等の原因究明や現行の技術基準の適切性、再発防止策について、近年の自然災害を踏まえつつ専門的な観点から検討するため、「令和元年台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ（WG）」を設置し、今後検討を行うこととする。

表 4-2 ワーキンググループ委員等構成

区分	氏名（敬称略、五十音順）	所属・役職
座長	横山 明彦	東京大学大学院 工学系研究科 教授
委員	石川 智巳	電力中央研究所 地球工学研究所 上席研究員
	木本 昌秀	東京大学 大気海洋研究所 教授
	熊田 亜紀子	東京大学大学院 工学系研究科 教授
	友清 衣利子	熊本大学大学院 先端科学研究部 准教授
	中村 光	名古屋大学大学院 工学研究科 教授
	松井 正宏	東京工芸大学 工学部 教授
オブザーバー	石田 交広	一般社団法人日本鉄塔協会 技術委員会 委員長

²⁴ 令和元年台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ（第 1 回）

区分	氏名（敬称略、五十音順）	所属・役職
	小寺 満	一般社団法人コンクリートパイル・ポール協会 ポール技術委員長
	佐伯 宜昭	総務省 電気通信技術システム課 安全・信頼性 対策室長
	佐藤 豊	気象庁 予報部業務課 気象防災情報調整室長
	丸山 公明	一般社団法人日本鉄塔協会 専務理事
	渡邊 昌人	一般社団法人送電線建設技術研究会 専務理事
説明者	稲月 勝巳	電気事業連合会 工務部長
	小道 浩也	中部電力株式会社 執行役員 電力ネットワーク カンパニー副社長
	塩川 和幸	東京電力パワーグリッド株式会社 技監
	松浦 康雄	関西電力株式会社 理事 送配電カンパニー 配電 部・情報技術部担任

ワーキンググループの開催実績を表 4-3 に示す。

表 4-3 ワーキンググループの開催実績

回	日程	主な議題
第 1 回	2019 年（令和元年）11 月 5 日	①近年の自然災害に伴う送配電設備の被害状況について ②鉄塔・電柱に係る技術基準をめぐる現状について
第 2 回	2019 年（令和元年）11 月 14 日	①台風 15 号における鉄塔・電柱の損壊事故の原因調査 について ②損壊事故を踏まえた今後の対策の方向性について
第 3 回	2019 年（令和元年）11 月 29 日	①台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故の原因調 査について ②事故原因を踏まえた現行の技術基準の適切性につい て ③中間整理（案）について
第 4 回	2019 年（令和元年）12 月 17 日	①台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故の原因調 査、今後の対応について ②中間報告書（案）について
第 5 回	2020 年（令和 2 年）1 月 20 日	①中間報告書（案）のパブリックコメント結果について ②台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故の原因調 査、今後の対応について

4.2 ワーキンググループに係る対応

ワーキンググループについて、以下の対応を行った。

- ① ワーキンググループでは、第 2 章及び第 3 章に示した調査内容に関して、ワーキンググループでの検討に活用できるよう、情報を整理し資料の案を作成した。
- ② ワーキンググループを傍聴し、委員からの意見等を収集し、ワーキンググループの開催当日を期限に速記録、開催翌日を期限に議事要旨を作成した。
- ③ ワーキンググループでの議論の成果をまとめた資料として、中間報告書の案を作成した。

4.3 有識者・事業者ヒアリングの実施

ワーキンググループにおける検討課題、成果をまとめた資料案の内容、技術基準の見直しについて、風工学の有識者を中心に、電力システム、材料力学等の有識者を含め、10 名の有識者ヒアリングを行った。

また、今後の対策の検討のための情報収集を目的として、鉄塔の補強や監視あるいは風況計測を行う事業者 5 社を対象にヒアリングを行った。

4.4 鉄塔補強工法の検討

ワーキンググループにおける検討結果を踏まえ、2020 年（令和 2 年）1 月 21 日付で、電力会社に対して鉄塔の総点検の指示が出された²⁵。

鉄塔を総点検した結果、改修が必要と判断され、強度を増強する必要がある場合に鉄塔の建て替えが想定されるが、表 4-4 に示すとおり鉄塔の建て替えは長期間の送電停止、高コストが課題であるため、短期間・低コストで済む改修方法も模索すべきと考えられるため、その方法について具体的内容と工期・コストについて調査を行った。

²⁵

https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2020/01/20200121_01.html （2020 年（令和 2 年）2 月閲覧）

表 4-4 強度の増強方法とその特徴¹⁶

分類	工法	対象鉄塔	概要	工期	コスト	備考
建て替え	①建て替え	小～大	- 設計風速の変更に対応が可能 - 用地を確保することにより、既存の系統に影響なく長期施工が可能	長	高	用地取得及び基礎工事に時間を要する可能性あり
鉄塔の補強	②主柱材の部分取替	小～大	- 裕度向上を目指した部位のみ交換が可能であり、効率的 1～2日程度で1部分の取替えが可能	短～長	中	実績は少ないが、確実に裕度向上が可能
	③主柱材の補強	小～大	- 鋼管材、アングル材それぞれに対応 - 溶接、ボルト削孔を必要としない - 通信鉄塔で実績あり	短～中	低	
	④腹材の補強	小～大	- 主柱材の曲がり易さを抑制し、腐食等の取り換え実績が多く、施工方法が確率している - 溶接、ボルト削孔を必要としない - 通信鉄塔で実績あり	短	低	
	⑤支線による補強	小～中	支線を張ることにより、鉄塔にかかる荷重を分散	短	低	技術基準の解釈133条(解説)において、やむを得ない場合に6ヶ月以内の使用を認めている
基礎の補強	⑥基礎部の補強	小～中	- 基礎部を補強し、鉄塔全体の变形を抑制する工法 - 基礎部の劣化や部材のたわみ等の補強に効果的	短～中	低～中	
地盤の補強	⑦地盤改良	小～大	- 地盤を改良し、鉄塔の経年的な变形を抑制する工法 - 地滑りが生じた箇所、地盤が軟弱化した箇所に適用	短～中	低～中	

※ 主柱材：鉄塔を構成する4本の主要な柱
 ※ 腹材：主柱材間を結ぶ斜めの柱
 ※ アングル材：2辺の長さが同じ山形の鋼材。主柱材に用いられる。

鉄塔の建て替えについては、新たに用地を確保し、隣地等に新設する方法に加えて、既設鉄塔の設置場所で建て替え可能な工法も出始めてきている（図 4-1）。



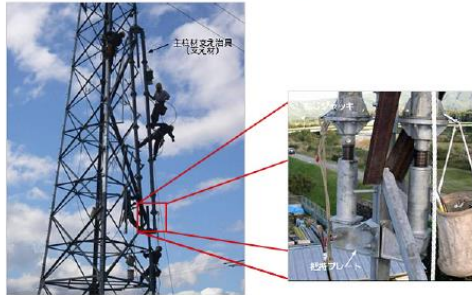
図 4-1 鉄塔の建て替え工法の事例¹⁶

鉄塔の改修については、部材の取り替え・補強のほか、基礎部の補強や地盤改良に係る工事が存在しており、それぞれの特徴に応じ適用、組み合わせる必要がある（図 4-2 及び図 4-3）。

【改修工法の事例①：主柱材の部分取替え】

- 主柱材を部分的に取り替える工法
- 1～2日程度で1部分の取替えが可能
- 裕度不足が懸念される部位の交換に効果的

(部分取替え工事の様子)

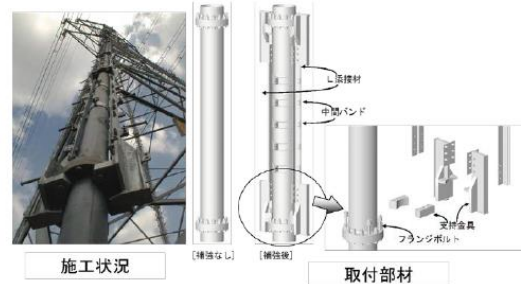


(出所) 愛知金属工業ホームページ

【改修工法の事例②：主柱材の補強】

- 主柱材（中空鋼管）を補強するための工法
- 主柱材に沿って補強材を取り付けることで、主柱材の断面積を増やし、鉄塔全体の耐荷重を向上
- 国内電力会社で導入実績あり
- 鉄塔の裕度を向上させるための補強に活用され、鉄塔の耐荷重が45%向上した事例あり

(補強工事の様子(主柱材に添接材工法))

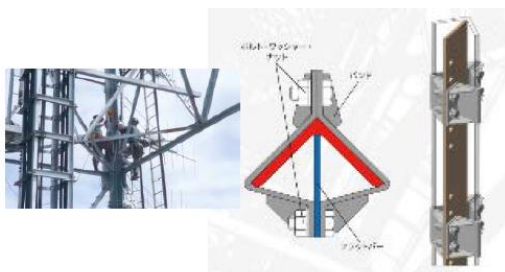


(出所) 日本鉄塔工業提供資料

【改修工法の事例③：主柱材の補強（IMB工法）】

- 主柱材（アングル材）及び腹材に適用可能な補強工法
- 部材に対して、溶接やボルト取付け等の加工をせずに補強する工法であり、主柱材の断面積を増やすことで、鉄塔全体の耐力を向上
- 通信用鉄塔に導入実績あり
- 鉄塔の耐荷重が40%程度向上した事例あり

(主柱材の補強工事の状況（IMB工法）)

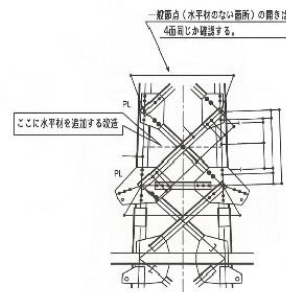


(出所) アイ・ティ・シ・コンサルティング ホームページ

【改修工法の事例④：腹材の補強】

- 部材を追加し主柱材や腹材の固定箇所を増やすことにより、主柱材や腹材をより曲がりにくくする効果が期待
- 施工実績が多く、工期・コスト面で優れている
- 腹材のほか、ボルト交換も同時に実施し、鉄塔の耐荷重が30%向上した事例あり
- (今回の事故原因でもある) 主柱材の座屈に対する補強効果が大きいことが期待される

(腹材の補強工事について)



(出典) 合理的な鉄塔改造事例集 (平成22年 日本鉄塔協会)

図 4-2 鉄塔の改修工法の事例 (1/2) 16

【改修工法の事例⑤：腹材の補強（IMB工法）】

- 部材に対して、溶接やボルト取付け等の加工をせずに補強する工法であり、主柱材の断面積を増やすことで、鉄塔全体の耐力を向上
- 通信用鉄塔に導入実績あり

（腹材の補強工事について（IMB工法））



（出所）アイ・ティ・シ・コンサルティングホームページ

【改修工法の事例⑥：支線による補強】

- 鉄塔に支線を張り強度を分散させる工法
- 基礎の補強工事での活用事例が多く、コスト面で優れている

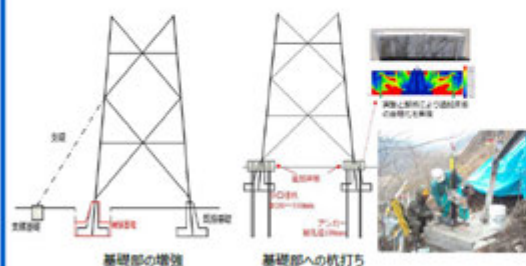
（支線による補強の状況※赤枠内に支線を張っている）



（出所）東京電力PG(株)

【改修工法の事例⑦：基礎部の補強】

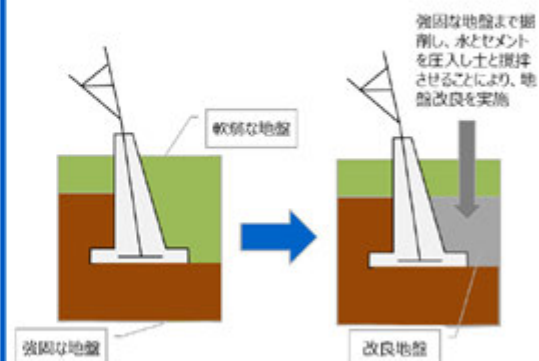
- 基礎部の劣化や部材のたわみによる、鉄塔の沈下抑制対策として有効
- 既設の基礎部分を掘り出し増強する方法の他、基礎部分に杭を打つ方法等が存在



（出所）東京電力ホームページ

【改修工法の事例⑧：地盤改良】

- 鉄塔基礎付近に軟弱な地盤が存在する場合、地盤改良により、基礎を安定させる工法が有効であり、変位抑制効果が期待される。



（出所）経済産業省調べ

図 4-3 鉄塔の改修工法の事例（2/2）¹⁶

例えば、今回倒壊した木内線 No.78 鉄塔の部材はアングル材で構成され、事故発生時に設計風速と比較して約 1.25 倍の風速（約 1.6 倍の風圧荷重）が生じた可能性があることから、図 4-4 に示すようなアングル材への補強に関して耐荷重向上の実績のある工法を採用することにより、事故発生時の風圧荷重への対応が期待できる。また、これまでに発生した鉄塔倒壊事故においても、補強による改修が有効な可能性がある。

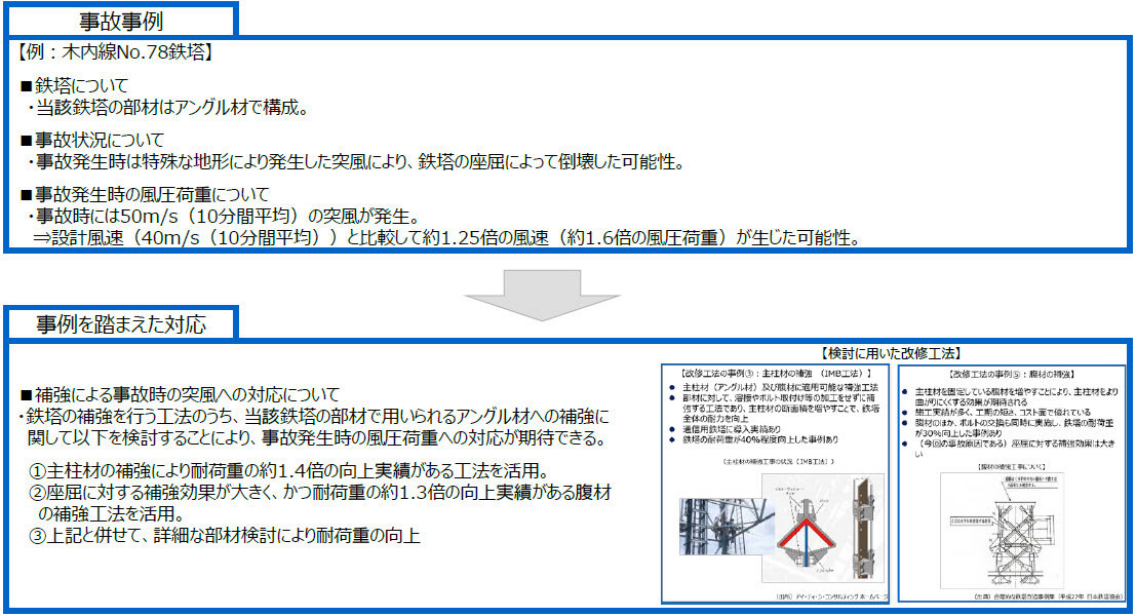


図 4-4 補強による改修の検討例 16

4.5 風況計測事例の調査

今回の倒壊事故や近年の自然災害の頻発化・激甚化を踏まえ、鉄塔周辺の風況や風向などの気象情報をより精緻に把握することが重要と考えられる。

そのために、図 4-5 に示すような既存の気象情報の活用に加えて、鉄塔への計測機器の設置等による高度な気象情報の収集・解析が必要と考えられる。計測機器の設置においては、コスト面やデータ送信のための通信設備の敷設の制約がある。しかし近年、計測機器の低廉化が進んでおり、今後においても技術の進展により、例えばデータの送信において、従前の有線ケーブルでネットワークされたデータ中継基地を介した通信方式から、無線通信やクラウドを利用した通信方式を採用することによって、より低廉かつ効率的なデータ送信及び管理が可能となる等、鉄塔への計測機器の設置におけるコスト面でのハードルは下がりつつあると考えられる。

風速計の種類	測定可能項目	価格	備考
風杯型風速計	・風速(水平方向)	約5～20万円程度	・風向が計測できないため、別に風向計を設置する必要あり
プロベラ式風速計	・風速(水平方向) ・風向	約20～50万円	
超音波式風速計	・風速(水平方向及び上下方向) ・風向	約50～60万円	・風向・風速の変化に対する追従性がよい ・価格:20年間で約1/20のコストダウン

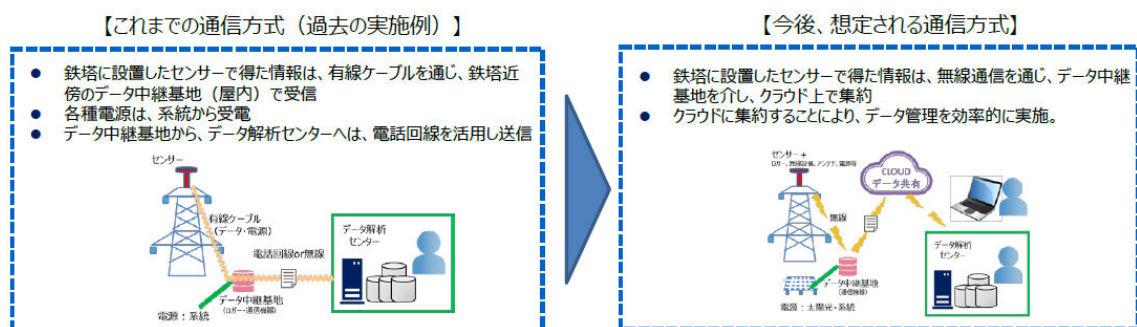


図 4-5 既存の風速計の事例 ¹⁶

風況・風向の測定については、気象観測所では測定しきれない箇所（山岳地等）の風速を測定し、風況シミュレーションの精度を向上させることや、台風通過後の巡視点検の実施可否の判断等を目的として、風速計を設置するような事例が存在する。



図 4-6 風況・風向の測定の事例 ¹⁶

風速測定については、橋梁、鉄道や建築物や風力発電等でも多く事例が存在する。安全な運用等を目的として、風速計等を設置し常時監視を実施している。

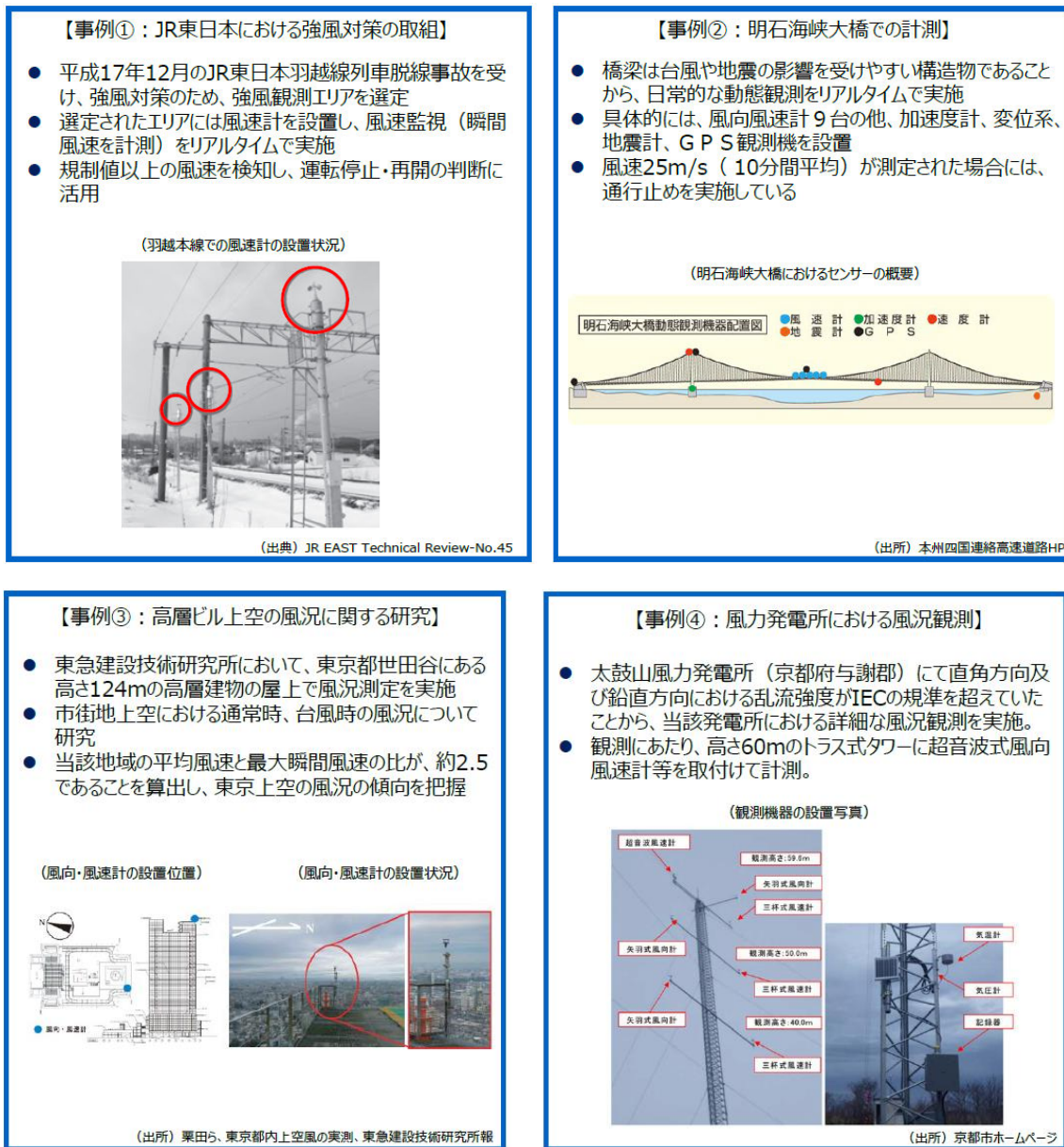


図 4-7 風速測定の事例 ¹⁶

4.6 台風のこれまでの変化と将来予測について

ワーキンググループでの報告及び本調査結果より、台風のこれまでの変化と将来予測について、気象庁の検討、IPCC 第 5 次評価報告書及び我が国の気象モデルを活用した検討により、以下の知見が得られていることを事務局並びに弊社は確認した。

概要を以下に示す。

- ① 気象庁の統計資料によると、「強い」以上の勢力となった台風の発生数は、1990 年代後半以降はそれ以前に比べて発生数が少ない年があるものの、長期変化傾向は見られない（図 4-8）。
- ② IPCC 第 5 次評価報告書では、今世紀末の予測として、台風の発生頻度は低くなるものの、地球温暖化が進むと、大気中の水蒸気量が増えて、カテゴリー4 以上に分類される強い熱帯低気圧に発達しやすくなる可能性があることが示唆されている（図 4-9）。
- ③ IPCC 第 5 次評価報告書の RCP8.5 シナリオで、21 世紀末に相当する気候状態を、気象庁気象研究所の大気大循環モデルによる予測した結果では、全世界での台風の発生総数は 3 割程度減少するものの、日本の南海上などでは猛烈な熱台風の出現頻度が増加する可能性が高いことが示されている（図 4-10）。



（出所）気象庁 気候変動監視レポート 2018

図 4-8 1977 年（昭和 52 年）以降の「強い」以上の台風の発生数、発生割合の推移¹⁶

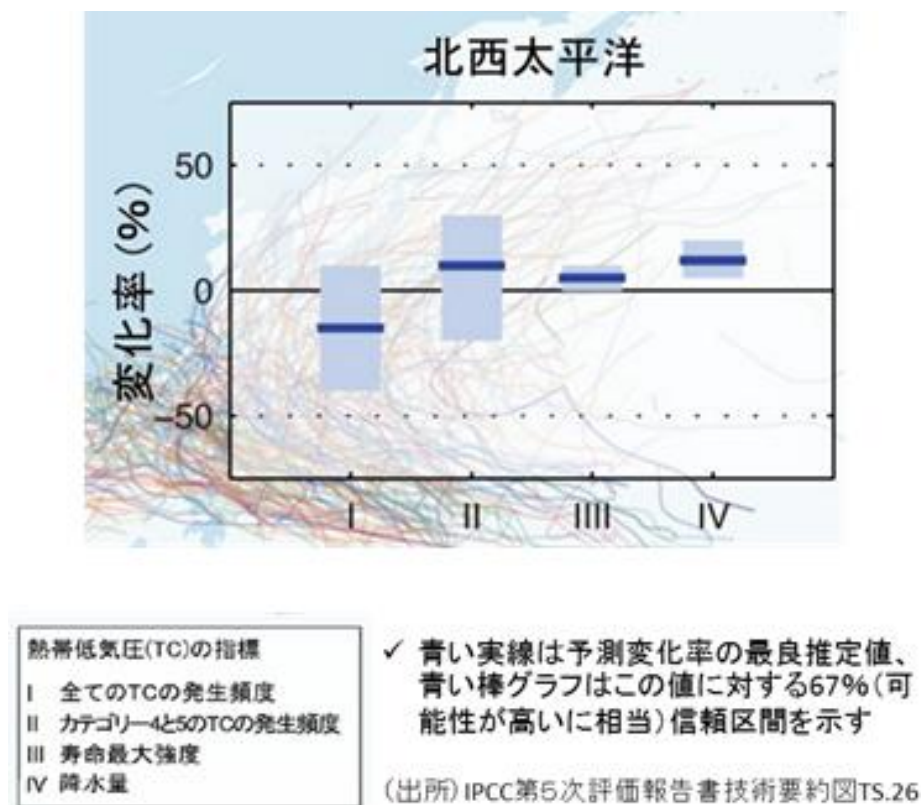


図 4-9 2000～2019 年と 2081～2100 年の熱帯低気圧の指標の変化率¹⁶

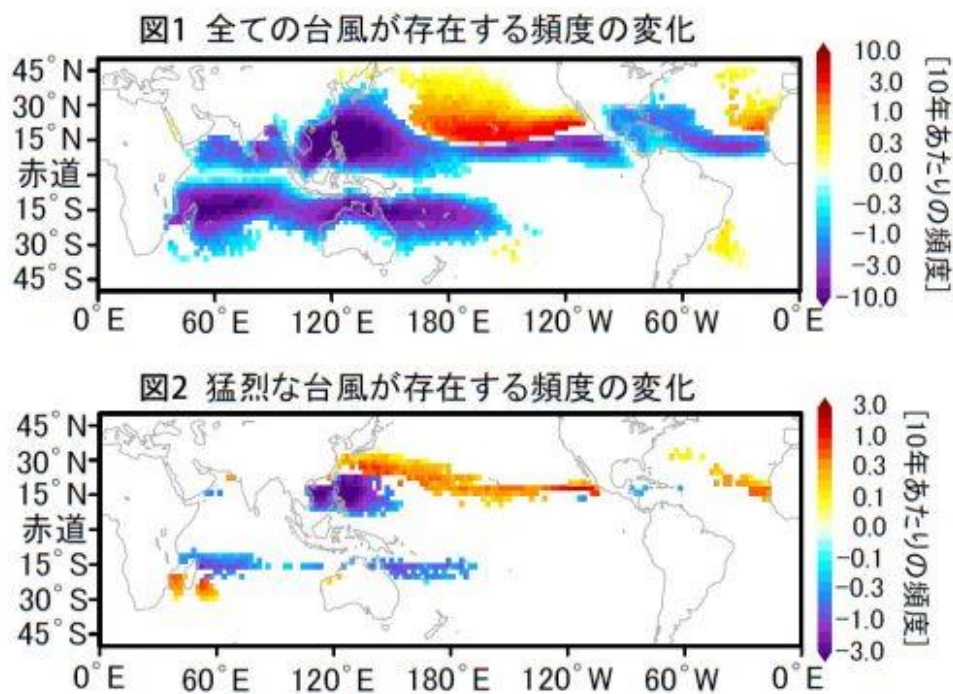


図 4-10 すべての台風と猛烈な台風の存在頻度変化の将来予測²⁶

²⁶ http://www.jmbse.or.jp/tougou/outreach/file/press_release.pdf (2019 年(令和元年) 12 月閲覧)

5 送配電設備の技術基準のあり方の検討

5.1 鉄塔の技術基準のあり方

5.1.1 現行の技術基準の適切性

令和元年台風 15 号により倒壊した鉄塔 2 基は、現行の技術基準で求められる風圧荷重 40m/s（10 分間平均風速）を満たすよう設計されていたものの、特殊な地形による突風（最大瞬間風速 70m/s、10 分間平均風速 50m/s）により、当初の設計強度を大きく上まわる荷重が発生し、先に No.78 鉄塔が倒壊し、それに引っ張られる形で No.79 鉄塔が倒壊したと東京電力 P G において結論付けられた。

ワーキンググループにおいて議論した結果、現行の技術基準について、以下について今後、具体的に検討が行われることとなった。

- ① 現行の基準風速 40m/s を維持するとともに、40m/s について「10 分間平均」を明確化
- ② 地域の実情を踏まえた基準風速を適用すること
- ③ 特殊地形を考慮すること（JEAC6001(JESC E0008)「架空送電規程」に記載の従来の 3 類型に加え、今回の類型を追加）

さらに、鉄塔周辺の風況・風向等について、より精緻に把握するためのセンサーの設置や様々な気象データの収集等について検討される予定となっている。

5.1.2 地域の実情を踏まえた基準風速（地域風速）の適用

地域の実情を踏まえた基準風速（地域風速）を技術基準に適用するため、まずは各地域の地域風速の設定が必要であり、今後、ワーキンググループにおいて具体的に検討していく予定である。

地域の基準風速の設定にあたり検討するポイントとして以下があげられている。

- ・ 設定する地域の粒度（市町村別、メッシュ、鉄塔ごと 等）
- ・ 再現期間（50 年）
- ・ データ集計数
- ・ 計測高さ
- ・ 風速の風圧荷重への変換係数（安全率、ガスト影響係数 等）
- ・ 更新頻度

5.1.3 今般の倒壊事故に係る特殊地形について

東京電力 P G によると、地形を分析した結果、台風による強い風が風上側にある標高の高い丘で増速され、送電線手前の急斜面によりさらに増速した可能性があることが指摘されている。

経済産業省において、今般の倒壊事故の要因となった特殊箇所は、既存鉄塔において、そ

の影響が考慮されておらず対応が必要であるとし、全国の鉄塔の全数点検を行い、同様の特殊箇所による影響がないか確認し、万一問題があれば改修作業などの対応が必要と判断された。

また、東京電力 P G による地形の分析結果を参考に、特殊箇所を新たに類型化・定義化し、経済産業省から各電力会社に、鉄塔が当該の特殊地形に立地していないか、立地している場合は改修計画の作成及び提出の上、計画に基づいた改修工事等の必要な対策の速やかな実施を行う旨の総点検指示が出された（表 5-1）。

表 5-1 経済産業省による総点検指示事項²⁵

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. 全国すべての鉄塔について、これまでの巡視・点検記録により、必要な巡視・点検が行われていること、巡視・点検の結果を踏まえた必要な対策が行われていることを速やかに確認すること。2. 全国すべての鉄塔について、今般の倒壊鉄塔と同様の特殊箇所（山と急斜面地に関する特殊箇所（海岸から 25km 程度以内で、主風向となる 8km 程度以内に、傾斜度 0.2 程度以上標高差 200m 程度以上で鉄塔より標高が高い山等があり、かつ直近に傾斜度 0.2 程度以上標高差 50m 程度以上の急斜面の頂部付近の箇所））に立地していないか、確認すること。3. 2. に該当する鉄塔が存在した場合、速やかに経済産業省に該当する鉄塔の情報を報告するとともに、シミュレーション等により改修の可否を精査し、その結果を踏まえて改修計画を作成して、速やかに提出すること。4. 3. で作成した改修計画に基づいて、改修工事等の必要な対策を速やかに実施すること。 |
|---|

5.2 電柱の事故対策及び技術基準のあり方

5.2.1 事故対策のあり方

東京電力 P G の報告では、今回の台風で損壊した電柱 1,996 本については、倒木や建物の倒壊（約 74%）、看板等の飛来物（約 14%）、土砂崩れ等の地盤影響（約 12%）による二次被害が原因と推定されるものが大半であった。

ワーキンググループにおいて議論した結果、電柱の事故対策について、以下について今後、具体的に検討が行われることとなった。

- ① 電力会社と自治体・自衛隊との連携を通じた倒木処理・伐採の迅速化、自治体と連携した事前伐採の推進
- ② 飛来物の飛散防止に関する注意喚起の徹底
- ③ 無電柱化の推進

特に、損壊原因の大半は二次被害によるものと考えられるため、二次被害対策を強力に進

めることとされた。

参考として、現在各電力会社により実施されている二次被害対策について表 5-2 に示す。各電力会社では、二次被害対策に取り組んでいるものの、取組内容に違いがあるため、好事例を水平展開し、取組を広げていることが重要と考えられる。

表 5-2 各電力会社による二次被害対策²⁷

			北海道	東北	東京	中部	北陸	関西	中国	四国	九州	沖縄	課題
二次被害防止	伐採	事前伐採		○		○	○						・自治体との協定締結、費用負担調整 ・樹木所有者との交渉難航
	飛散防止	マスメディアの活用 (TV・ラジオCM ・新聞・チラシ)			○	○		○	○	○	○	○	・費用、一方向の情報発信
		自社における情報 発信 (SNS・ HP・アプリ)	○			○	○	○	○	○	○	○	・スマートフォン等を所有していない高齢層 への情報発信
	その他	ルート変更	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	・適切なルート確保のための立地上の制 約
設備対策		連続倒壊防止	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	・支線設置スペースの確保

5.2.2 現行の技術基準の見直しについて

台風 15 号における電柱の損壊が広範囲にわたったこと、また鉄塔に関する技術基準の見直しの方向性（地域風速の適用など）を鑑み、今後の被害を最小限に抑えることを目的として、電柱についても以下の対応を取ることにについての検討が、ワーキンググループにおいて行われることとなった。

- ① 鉄塔と同様に、鉄柱にも地域別基準風速を適用
- ② 電柱の中で損壊率が高い木柱の安全率をコンクリート柱並に引き上げ（1.3～1.5⇒2.0 へ）
- ③ 損壊原因をさらに検証した結果、連鎖倒壊が多く発生していたことが判明したため、民間規程で定められている「電柱の連鎖倒壊防止」対策の技術基準への適用

①～③の対応について、詳細を次頁以降に示す。

(1) 鉄柱及び木柱について

電柱には、表 5-3 に示すとおり、主にコンクリート柱、鉄柱、木柱の 3 種類が存在し、主要なものはコンクリート柱であるが、鉄柱、木柱も一定規模存在する。

表 5-3 コンクリート柱、鉄柱、木柱について ¹⁶

	コンクリート柱	鉄柱	木柱
		 	
本数	約 2,097 万本	約 62 万本	約 12 万本
シェア	約 96%	約 3%	約 1%
安全率	2.0 (JIS により規定)	1.5 [※]	1.3~1.5 (電圧により設定)
その他	・ 架空配電線の施設において一般的に活用。	・ 架空配電線路の施設において、コンクリート柱の搬入・施設が困難な箇所へ活用。配電線だけでなく送電線にも活用。	・ 1950 年代までは架空配電線路の支持物として主に活用されていた。

※一部で、2.0 で設計されている製品もある。

鉄柱については、鉄塔に今後、地域風速が適用されることを踏まえ、同様に地域基準風速の適用を図ることが、ワーキンググループにおいて検討された。ただし、その際には、それぞれの構造物の特徴を踏まえた風速の設定方法（計測高さ等）、風圧荷重の計算方法などを考慮する必要とされた。

また、台風 15 号で倒壊した東京電力管内の電柱を分析すると、コンクリート柱、鉄柱が全体の約 0.03% 程度であるのに対して、木柱は約 0.3% であり 10 倍の差があった（表 5-4）。

技術基準における安全率は、木柱は 1.3~1.5 と、鉄柱 1.5、コンクリート柱 2.0 といずれと比較してもかなり下回っており、木柱の安全率をコンクリート柱並の 2.0 に引き上げ、損壊事故防止に向けた底上げを図ることが事務局から提示された。

表 5-4 台風 15 号による各電柱の損壊状況¹⁶

	安全率	倒壊電柱(本) (東電管内割合)		東電管内の電柱(本)		全国の電柱(本)	
コンクリート柱	2.0	1,929 (0.033%)	96.6%	5,824,380	98.0%	20,968,409	96.6%
鉄柱	1.5 ※	32 (0.029%)	1.6%	109,701	1.8%	616,507	2.8%
木柱	1.3～1.5	35 (0.305%)	1.8%	11,475	0.2%	120,892	0.6%
計		1,996 (0.034%)	100.0%	5,945,556	100.0%	21,705,808	100.0%

※一部で2.0で設計されている製品もある。

(2) 連鎖倒壊防止について

今回の事故においても、倒木や飛来物の影響により倒壊した電柱が、他の電柱を引っ張ることで連鎖的に倒壊する現象が約 200 本（全体の約 10%）確認された。

電力会社では、連鎖倒壊防止のため、民間規格（配電規程）に基づき、支線の設置を個別に行っているが、今回の電柱損壊事故現場では設置されていない箇所もあった（図 5-1）。

ワーキンググループにおいて議論した結果、現行の技術基準では、鉄塔（特別高圧架空電線路）において、連鎖倒壊防止に関する規定があるところ、電柱についても同様に、技術基準に連鎖倒壊防止を規定することを検討することとなった（表 5-5）。

<連鎖倒壊の様子>



（出所）国土交通省ホームページ

<支線事例（沖縄電力）>



栗国（アグニ）島

図 5-1 電柱の連鎖倒壊と支線の事例¹⁶

表 5-5 電気設備の技術基準（抄）【再掲】

【支持物の倒壊の防止】

第 32 条 架空電線路又は架空電車線路の支持物の材料及び構造（支線を施設する場合は、当該支線に係るものを含む。）は、その支持物が支持する電線等による引張荷重、風速四十メートル毎秒の風圧荷重及び当該設置場所において通常想定される気象の変化、振動、衝撃その他の外部環境の影響を考慮し、倒壊のおそれがないよう、安全なものでなければならない。ただし、人家が多く連なっている場所に施設する架空電線路にあっては、その施設場所を考慮して施設する場合は、風速四十メートル毎秒の風圧荷重の二分の一の風圧荷重を考慮して施設することができる。

2 特別高圧架空電線路の支持物は、構造上安全なものとする等により連鎖的に倒壊のおそれがないように施設しなければならない。

5.3 ロードマップ案

5.1 及び 5.2 にそれぞれ示したワーキンググループにおける鉄塔及び電柱の技術基準の見直し内容の方向性にしたが、次年度以降、以下を実施することがワーキンググループにおいて確認され、実施時期も含めて図 5-2 に示すロードマップ案として事務局から提示された。

- ・ 電力会社による総点検と並行して、今回の鉄塔事故の要因となった突風が発生する「特殊箇所」の基準化を実施。その後、必要な補強工事等を実施。
- ・ 地域の実情に応じた風速（地域風速）を基準に反映する見直しを実施。
- ・ 電柱（木柱の基準引上げ、鉄柱への地域風速適用、連鎖倒壊防止）についても、鉄塔の基準強化にあわせて、基準の見直しを実施。

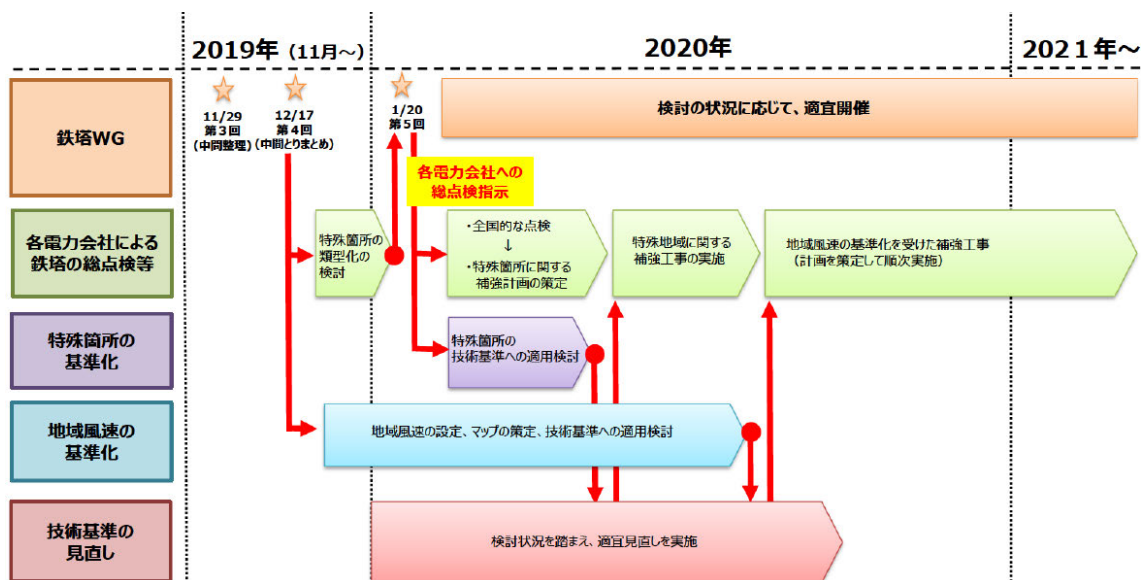


図 5-2 ロードマップ案²⁷

²⁷ 令和元年台風15号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ（第5回）

二次利用未承諾リスト

報告書の題名：令和元年度産業保安等技術基準策定研究開発等事業（令和元年台風15号による送配電設備の事故原因の調査・分析等に係る調査） 調査報告書

委託事業名：令和元年度産業保安等技術基準策定研究開発等事業（令和元年台風15号による送配電設備の事故原因の調査・分析等に係る調査）

受注事業者名：みずほ情報総研株式会社

頁	図表番号	タイトル
7	表2-7	電気学会電気規格調査会標準規格JEC-127-1965「送電用鉄塔設計標準」説明書
7	図2-1	風速分布図（4月～11月（高温季））
10	図2-2	市町村別の基準風速マップ（平成12年建設省告示第1454号）
13	図2-3	米国における地域風速マップ
15	図2-4	オーストラリアにおける地域風速マップ
18	図2-5	フィリピンにおける地域風速マップ
22	図2-6	米国における地域風速マップ
24	図2-7	オーストラリアにおける地域風速マップ
29	図3-1	気象レーダー（上陸時）
30	表3-1	期間最大風速（9月7日から9日）
30	表3-2	期間最大瞬間風速（9月7日から9日）
31	図3-2	千葉県内の最大風速・風向分布図
32	表3-3	倒壊した鉄塔近くのアメダス観測点（木更津、坂畑、牛久）の最大風速、最大瞬間風速
32	図3-3	倒壊した鉄塔近くのアメダス観測点（木更津、坂畑、牛久）
35	表3-5	66kV木内線設備概要
35	図3-7	倒壊した鉄塔の位置と倒壊方向
36	表3-6	電柱の被害状況
36	図3-8	倒壊した鉄塔（No. 78）
37	図3-9	電柱の被害発生状況分布図
37	図3-10	倒木・飛来物による電柱損壊現場の様子
39	図3-11	鉄塔設計条件・設計図面・設計計算書（No. 78）
39	図3-12	鉄塔設計条件・設計図面・設計計算書（No. 79）
40	表3-8	保安規程（鉄塔）
40	表3-9	倒壊したNo. 78、No. 79の巡視点検記録
40	表3-10	倒壊した鉄塔に隣接するNo. 77、No. 80の巡視点検記録
41	図3-13	鉄塔の倒壊の様子
42	図3-14	倒壊鉄塔下部の座屈状況（No. 78鉄塔）
42	図3-15	倒壊鉄塔下部の座屈状況（No. 79鉄塔）
43	図3-16	柱体部の損傷状況
43	図3-17	基礎体・地中部の損傷状況
44	図3-18	送電線の状況
45	図3-19	周辺の倒木の分布と方向
47	図3-20	現地風速の推定

(様式2)

48	図3-21	観測所における風速・風向の観測結果とシミュレーション結果の比較
49	図3-22	現地風速の推定結果
49	図3-23	損壊事故現場周辺の地形
50	図3-24	動的解析と等価静的解析の比較
50	図3-25	鉄塔の応力シミュレーション
52	図3-26	強度計算の例（千葉県千葉市若葉区川井町）
53	表3-12	保安規程（電柱）
53	図3-27	電柱配置図面の例（千葉県千葉市若葉区川井町）
54	表3-13	電柱の巡視点検記録
54	表3-14	電柱の損壊原因の判定の内訳
55	表3-15	改修管理表の一例
55	表3-16	現場作業員からの報告の一例
55	図3-28	図面・写真の一例
55	図3-29	現場調査表の一例
56	図3-30	電柱の損壊事故で二次被害が原因と断定できない例
57	図3-31	再調査により原因の特定に至った例
57	図3-32	原因の特定に至っていない電柱（2本）
62	表3-22	東電委員会の開催状況
63	表3-23	東電委員会における調査検討事項
64	表3-24	調査検討チームにおける検討事項
65	表3-25	調査検討チームにおける実施項目及び内容
70	図4-1	鉄塔の建て替え工法の事例
71	図4-2	鉄塔の改修工法の事例（1/2）
72	図4-3	鉄塔の改修工法の事例（2/2）
73	図4-4	補強による改修の検討例
75	図4-6	風況・風向の測定の事例
76	図4-7	風速測定の事例
77	図4-8	1977年（昭和52年）以降の「強い」以上の台風の発生数、発生割合の推移
78	図4-9	2000～2019年と2081～2100年の熱帯低気圧の指標の変化率
78	図4-10	すべての台風と猛烈な台風の存在頻度変化の将来予測
83	表5-4	台風15号による各電柱の損壊状況
83	図5-1	電柱の連鎖倒壊と支線の事例