

# 論 説 報 告

第 28 卷 第 12 號 昭和 12 年 12 月

## 送電用鉄塔の風圧に就て

会員 工学博士 太刀川 平治\*

准員 大迫 貞治\*\*

Wind Pressure on Electric Transmission Tower

By Heizi Tatikawa, Dr. Eng., Member,  
Teizi Ōsako, Assoc. Member.

**要旨** 風圧に関する鉄塔設計に對し、其の基準となるべき風速を定め、暴風雨時に於ける雨の影響を吟味し、鉄塔に使用せらるゝ各種素材、鉄塔機構模型、電線、碍子等に就き行ひたる前後 2 回の風洞実験の結果に基き、鉄塔、電線、碍子等の風圧に関する設計標準を定め、現行日本電氣工藝委員會制定の鉄塔設計標準に對し新案を提供し、新舊兩標準案に依る鉄塔強度を比較して居る。本篇は電氣學會雜誌第 54 卷第 556 號及本會誌第 21 卷第 3 號 413 頁（昭和 10 年 3 月）所載「送電用鉄塔に對する風圧に就て」の続篇として、風圧の標準に關する從來のプラクチスに對し是正を施したものである。

### 目 次

- |                 |            |                |
|-----------------|------------|----------------|
| 1. 緒 言          | 2. 基準風圧    | 3. 風洞実験と風圧との關係 |
| 4. 暴風雨時に於ける雨の影響 | 5. 電線の風圧   | 6. 碾子の風圧       |
| 7. 鉄塔素材の空氣抵抗    | 8. 鉄塔機構の風圧 | 9. 鉄塔の風圧倍數     |
| 10. 鉄塔の風圧       | 11. 鉄塔の強度  | 12. 用語の意義      |

### 1. 緒 言

義に東京帝國大学航空研究所發動機部に依屬して行ひたる風洞実験（第 1 回風洞実験と稱す）の結果に基き、送電用鉄塔に對する風圧に就き述べたが（昭和 9 年 11 月發行電氣學會雜誌第 54 卷第 556 號參照）昭和 9 年 9 月驚異的記録を残し、大阪方面に甚大な損害を與へた所謂室戸颶風と稱する颶風の結果に鑑み、現行鉄塔設計標準を再検討する必要があると云ふ聲が關西方面に起り、電氣協會及日本電氣工藝委員會聯合して調査委員會が設立せらるゝに至つた。此の委員會の關東部會の主催として更に東京帝國大学航空研究所風洞部に依屬して、鉄塔材料、電線、碍子等に就き風洞実験（第 2 回風洞実験と稱す）が行はれた。其の實驗の要旨、方法並に測定結果等に就きては別に詳細な報告をする積であるが、茲には唯其の結果のみを述ぶることとする。此の機會に於て此の實驗に關して執られたる航空研究所員河田三治、岡本哲史兩氏の勞を多謝するものである。前記第 1 回、第 2 回の風洞實驗の結果を綜合し、又前記委員會委員諸氏並に特に委員會に參加せられたる諸氏の所説又は講話を參照し、茲に再び送電用鉄塔の風圧に就て述べる。其の前提として先づ二三の注意事項を次に附記する。

（イ） 風圧なる語は正確に其の實際の意義を表はして居らない。風圧といふと、水圧、土圧、氣圧などと同種の圧力

\* 東信電氣、關東水力電氣、大井川電力各會社取締役

\*\* 東京電燈會社技師

であるかの如く聞ゆるが、風圧は決して斯かる静的圧力ではない。又假令動的圧力であるとしても、風に直面する面だけに作用するものでもない。風圧は動的且つ立体的抵抗力であつて、受風物体の形狀寸法は勿論、其の四圍の狀態に依つて種々に異なるものである。されど多年の習慣もあること故、實用上の鉄塔設計に關する限りは風圧なる語を存して置く。併し風圧なる語を用ふる場合には前記の如き風の性質に關する認識を誤らないよう注意することが肝要である。

(ロ) 第1回風洞實驗に於ては諸種の風速に依り實測した供試体の空氣抵抗を基礎とし、風圧風速換算公式に依り一定の風速に於ける空氣抵抗を算出したのであるが、第2回風洞實驗に於ては、風速5~45m/sの間に於てレーノルズ數に依る $C_x$ の値の変化を求め、それから次式に依り一定の風速に於ける空氣抵抗を算出したのである(昭和11年11月河田三治、岡本哲史兩氏報文“等邊山形鋼の空氣抵抗並に電線の空氣抵抗”、參照)。

$$R = \frac{v \rho D}{\mu}$$

$$F_x = C_x \frac{1}{2} \rho v^2 S$$

$R$ : レーノルズ數,

$F_x$ : 抗力,

$C_x$ : 抗力係数,

$D$ : 供試体の正面幅(外郭の投影幅員),  $S$ : 供試体の正面々積(外郭の投影面積),

$\rho$ : 空氣の粘性係数

$v$ : 風速

$\rho$ : 空氣の密度、但し氣圧 740 mm、氣溫

15°C を暴風時の基準とす。

(ハ) 受風物体には風の方向と、之に直角の方向と、二つの方向に働く力が同時に起る。通常吾々が風圧と唱へて居るのは前式の $F_x$ のことである。之は風の方向の力のみであるから、之に直角の方向の力は考へて居らない。併し物体の形狀並に風の受け方に依りては此の直角の方向の力が頗る大きくなるのであるから之に注意を要する。電線のような円形断面を持つものにありては、風の方向に對して對稱的であるから、理論上直角分力は起らない譯である。併し相當張力を持つて居る電線に對して風が吹くときは、風と直角の方向即ち電線の上下の方向に振動が起る場合がある。之は風圧に關する鉄塔の設計に就ては度外視し得るが鉄塔上の電線の配列並に送電線の保守に就ては大に注意を要することである。又鉄塔部材なる山形鋼にありては、前記の直角分力が頗る著しいのである。之は帆船の帆に働く風の力を考ふれば直に首肯さることである。併し此の事を正方形基面を有する鉄塔にありては殆ど度外視しても差支ないが、可撓鉄塔又は之に近い形狀の矩形基面を有する鉄塔にありては此の直角分力は頗る著しい影響を與ふるものであるから、此等の鉄塔に對しては此の直角分力を講究して置く必要がある。又正方形基面の鉄塔であつても、部材の取付方法に注意し、直角分力のために鉄塔に浮力を生ずるような取付方法は出来る丈け避けるがよろしい。

(ニ) 送電線に用ふる電線は大抵7本撲とか19本撲とか稱する撲線であるが、空氣抵抗の問題にありては、電線の直徑は其の電線の断面が内側する円の直徑を探る。換言すれば撲線を構成する各素線は互に全く密接するものとし、7本撲ならば素線の直徑の3倍、19本撲線ならば素線の直徑の5倍を探る。

(ホ) 鉄塔機構の單位面積風圧を決定する場合には、機構面が傾斜して居る場合でも、風の方向が偏移する場合でも、部材の受風面積は常に正面受風の場合の投影面積を探る。従つて鉄塔の風圧を計算する場合には、機構の正面受風の場合の投影面積に定められたる単位面積風圧を乗ずればよろしい。

## 2. 基 準 風 圧

吾邦の送電用鉄塔の設計に於ては、風速40m/sを基準として居る。此の基準風速は吾邦本土を通じて適用して差支ないと思ふ。室戸颶風のときには風速45m/s位に達したと云はれ居るが、之は何十年に一度来るかどうか判らぬ程稀有のものであるから、之がため基準風速を高める必要はない。併し九州及四國の南岸等の特殊地點並に高山特に太平洋岸に近く孤立して居る高山の頂上のような場所に建設する局部的鉄塔に對しては、其の地方の測候所の記録に基き基準風速を相當高める必要がある。一例を擧ぐれば室戸颶風の際各地に於ける觀測結果を調査すると、颶風の中心地から遠く離れたる箱根山頂上に於ては9月21日午前11時に風速44.8m/sに達し、又富士山頂

に於ては同日時風速實に  $60 \text{ m/s}$  に達し、しかも 1 時間に付  $23.4 \text{ mm}$  と云ふ雨量をも伴ふて居る。斯かる特殊地點は論外とし、吾邦一般地方の中でも、本州中部及東北地方等に於ける奥地にありては颶風の進行につれて風力が次第に弱まるのを常とするから、基準風速を相當引下げても差支ないのである。併し送電線路は廣き地域に亘り、且つ主として平野地帶及丘陵地帶を通ずるものとして計畫されるので、場所に依り種々の基準風速を設くことは實行上不便がある。それ故に、大同に従ひ小異を捨て、全國を通じ  $40 \text{ m/s}$  の基準風速に統一されてある譯である。或る會社の送電線路に於ては、鉄塔の設計を山岳地帶用と平野地帶用とに區別し、前者に對しては特に雪の影響を考慮するものもある。斯かる場合には山岳地帶にして降雪多き所は風力は弱いものを常とするから、山岳地帶用鉄塔に對しては基準風速を  $35 \sim 30 \text{ m/s}$  位まで低下するも差支ないのである。併し之とても問題になるのは、山岳地帶用と平野地帶用との接壤點を如何にすべきかである。此の點附近にありて兩種の鉄塔の何れを探つても不安心である。されば此の不安を除き且つ風圧の採り方を合理的にするには、此の接壤點附近相當長さの地域に於ける鉄塔は平野地帶用の風圧と山岳地帶用の降雪と併せ考慮する必要がある。如斯種々の地帶別設計基準を設くることは合理的ではあるが、實用上不便である。結局基準風圧は統一して置く方がよろしい。以下本文に於て、設計標準に關する毎平方米の風圧を云々する場合には別に表示なくとも風速  $40 \text{ m/s}$  のときの風圧を云ふのである。

### 3. 風洞實驗と風圧との關係

風洞實驗に於て或る實物を代表する供試体に對して得たる空氣抵抗は、直に之を實物に適用することが出來ないことは勿論である。併し供試体が代表する夫々の實物の比較には適用し得る。實物と供試体と一致して居る場合でも、風洞實驗に於ける風と自然風と違つて居る點があるから、風洞實驗に依りて得たる空氣抵抗を其の體鉄塔設計の風圧に適用することは少しく妥當を缺いて居る。何となれば、測候所に於て記録され、一般に稱せられて居る風速何  $\text{m/s}$  と云ふのは或る時間内の平均風速に該當するのであつて、恰も或る時間内の積算電力量  $\text{kWH}$  を測りて其の時間内の平均に依りて電力何  $\text{kW}$  と云ふのと似て居る。從つて記録され且つ發表される風速  $40 \text{ m/s}$  と云ふても、其の記録風速の時間内に於て或る瞬間に  $50 \text{ m/s}$  又は  $60 \text{ m/s}$  位にも上り、或る瞬間に  $30 \text{ m/s}$  又はそれ以下にも下ると云ふ譯である。それに反して、風洞實驗に於て或風速の読みを探る場合には、大体に於て風速が不変である。それであるから風洞實驗に於て測定された風速何  $\text{m/s}$  ? 空氣抵抗と之と同じ記録風速の自然風に於ける風圧とは多少相違することは明かである。然らば鉄塔設計に於ける風速の基準を定むるに於て、記録風速に依る代に瞬時最大風速に依ることをせば最も安全である。併し之を一般送電用鉄塔に適用するのは安全に過ぎる。何となれば、假令瞬時に大きな力が加はつても、電線の移動、鉄塔間中風速の不均一等のため、瞬時圧力は相當吸収緩和されるから其の圧力を其の體採用する必要はない。併し風の瞬時的變化に従ひ鉄塔がオッシレーションを起こすことになれば危険であるが、風の瞬時的變化の周期並に電線路の構造は斯かる現象を起こすような性質を持つて居るとは認められない。兎に角、瞬時最大風速は記録に依る最大風速に比し頗る大きいものであるから、風洞實驗の實測値を記録最大風速に當て候めて實用的風圧を定めるには、多少の裕度を持たせることが妥當である。若しバリスチックガルヴァノメーターの様な理論を應用した風圧計にて自然風圧を測定すれば、衝撃性風圧をも包含した圧力を測定し得るかも知れぬが、それは目下望み得ないことであるから、風洞實驗に依る實測値に對し大体  $10\%$  位の餘裕を持たせることが妥當である。此の  $10\%$  と云ふことは次に述ぶる考案の結果と一致して居るので、全く根據のないことでは無い。

瞬時風速と平均風速との間の関係、例へば交流電氣に於ける波形のようなものが明確且つ一定のものと認めらるべき資料があらば、それから實效平均を算出する事が出来るが、其の資料に乏しいのは遺憾である。此の機會に氣象臺に註文したいのは斯かる實效値を記録するやうな風速計又は既述のバリストックガルヴァノメーターに依り、瞬時最大風速の衝撃をも含みたる風圧を記録し得る装置を案出し、之を設置されん事を望むのである。猶風速計の設置場所も市街地（多くの測候所は市街地に在る）の屋上の様な場所でなく、遮蔽物なき郊外に於て、而も地上20 m, 40 m, 60 m の3ヶ所位の風速を同時観測し得る施設とせられんことを望むのである。

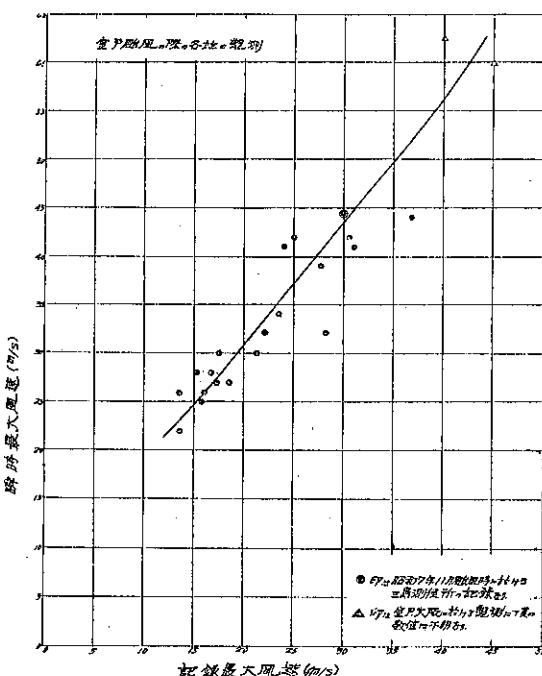
昭和9年9月の室戸颶風に就ては中央氣象臺から詳細な報告書の出たのは大に感謝する所である。此の颶風の際各地で観測した記録最大風速（即ち平均風速である）と瞬時最大風速との関係を摘録すれば表-1並に図-1に示す通りである。

表-1. 室戸颶風の際の記録最大風速と瞬時最大風速との関係

測候所名	記録最大風速(m/s)	瞬時最大風速(m/s)	測候所名	記録最大風速(m/s)	瞬時最大風速(m/s)	測候所名	記録最大風速(m/s)	瞬時最大風速(m/s)
高 知	15.30	28.00	和 歌 山	25.10	42.00	御 前 崎	28.20	32.00
新 居 濱	17.30	27.00	敦 賀	13.40	26.00	甲 府	13.40	22.00
徳 島	36.70	44.00	彦 根	31.20	41.00	船 津	24.10	41.00
下 關	15.80	25.00	春 照	23.50	34.00	前 橋	18.40	27.00
吳	17.40	30.00	京 都	30.50	42.00	水 戸	16.00	26.00
岡 山	16.70	28.00	龜 山	21.20	30.00	大 阪	40.00以上	60.00
神 戸	21.90	33.00	岐 阜	27.70	39.00	室 戸 崎	45.00	60.00以上

此の結果に依りても、記録最大風速と瞬時最大風速との関係を精確に觀取することは出来ないが、大凡の見當に於ては、記録最大風速 10 m/s のとき瞬時最大風速は約 20 m/s、記録最大風速 20 m/s のとき瞬時最大風速は約 30 m/s、記録最大風速 30 m/s のとき瞬時最大風速は約 40 m/s、記録最大風速 40 m/s のとき瞬時最大風速は約 50 m/s、記録最大風速 50 m/s のとき瞬時最大風速は約 60 m/s、なるものゝ様である。又昭和7年11月14, 15日に亘り東海及房總地方に暴威を振つた颶風の際、11月14日18時30分三島測候所の観測する所に依れば、風速 30 m/s のとき瞬時最大風速は約 44.5 m/s であつたといふ。今假に風速 40 m/s のとき瞬時最大風速は 60 m/s に達するものとする。此の瞬時風速が、最大、最小、平均と変化し行く状態が不明であるが、今假に瞬時最大風速 60 m/s、平均風速 40 m/s、瞬時最小風速 20 m/s とし、最大、平均、最小の間を一直線にて変化するものとすれば、其の算術的平均値は 40 m/s であり、其の實效平均値

図-1. 記録最大風速と瞬時最大風速との関係



(瞬時値の自乗の平均の平方根)は約 42 m/s となる。即ち風速の実効値は平均値約 5% 増しとなり、従つて風圧の実効値は約 10% 増しとなる。之が先きに述べた 1 割増しの根據として多少役立つものと信ぜられる。

中央気象臺荒川秀俊氏の“Gustiness と風圧”と稱する研究(昭和 12 年 6 月鉄塔調査委員關東部會に提示された資料)に従へば、實効風速は平均風速の自乗に 54 を加へたるものゝ平方根に等しく、平均風速 40 m/s のとき實効風速は 41 m/s となる。若し瞬時最大風速が觀測される確率を 1/10 とすれば、前記 41 m/s の實効風速は 42 m/s となる、と云はれて居る。又高橋浩一郎氏の所説(氣象集誌第 2 輯第 15 卷第 7 號、昭和 12 年)に従へば實効風速は平均風速の自乗と平均風速の 1/3 の自乗との和の平方根に等しく、換言すれば平均風速の 1.05 倍に等しい、と云ふ。此等の諸説を參照して、實効風速は平均風速の 5% 増しとし、風洞實驗に依りて得たる 40 m/s の風速に對する空氣抵抗の 110% を以て自然風に於ける風速 40 m/s に對する風圧となす。但し電線に對しては 106% とす。何となれば電線は鉄塔径間數百米の長さに及び且つ弛度のため移動性を有する故、瞬時最大風速に依る衝撃性圧力は餘程緩和せらるゝからである。

#### 4. 暴風雨時に於ける雨の影響

次に風洞實驗の實測値を實際に適用する場合に於て、問題となし得るものは暴風雨時に於ける雨の影響である。相當の質量を有する雨滴が暴風の速度を以て鉄塔其の他に衝突する際、如何なる影響を與ふるかは一應考へて見る必要がある。併し殘念なことには、此の影響を體かむるため風洞中に雨滴を混入して試験する事は、目下の所では實現することは望まれない。それであるから此の影響は色々の資料から之を推測し、或は計算で出して見るより他に方法はない。實際の場合には、吾々が考へるような風速 40 m/s の場合に豪雨を伴ふことは稀有の現象であるから、鉄塔設計の標準に雨の影響を取り入れなくとも差支ない程である。併し風速 40 m/s 以下の相當大きな風速のとき豪雨を伴ふ場合は數多ある。試みに室戸颶風の際各地に於ける氣象觀測中、富士山頂の如き特殊地點を除き、雨を伴ひたる場合の記録最大風速と雨量(1 時間雨量)との關係を示せば図-2 の通りである。

之に依れば風速と雨量との關係は確然たるものはないが、大体に於て風速の大なるときは雨量の少ないと見取られる。又風速 40 m/s 附近に於て雨を伴ひたることもあるが、それは 1 時間 20 mm 未満の微量のものである。図-2 観測點の内、風速 20 m/s 以上にて且つ相當の雨を伴ひたる場合を摘錄すれば表-2 の通りである。

図-2. 暴風雨時に於ける風速と雨量との關係

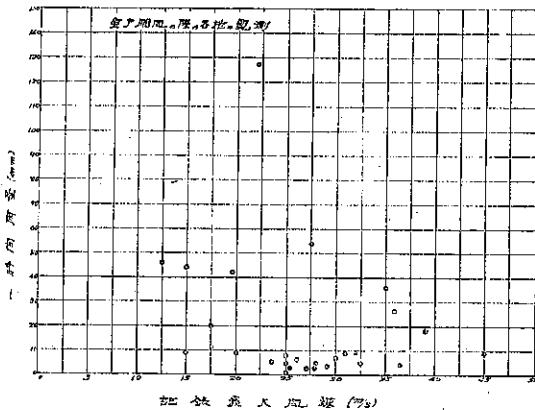


表-2. 室戸颶風の際の暴風雨記録

測候所名	月日時	風速(m/s)	1時間雨量(mm)
室戸測候所	9 21 5 <sup>00</sup>	45.00	9.40
住友四阪島氣象觀測所	9 21 6 <sup>00</sup>	38.90	18.20
兵庫縣神戸測候所豊岡出張所	9 21 10 <sup>00</sup>	21.90	127.00
中央氣象臺附屬箱根山測候所	9 21 10 <sup>00</sup>	27.60	54.00
伊吹山測候所	9 21 12 <sup>00</sup>	36.20	27.00
大台ヶ原山測候所	9 21 6 <sup>00</sup>	35.00	35.45
	9 21 7 <sup>00</sup>	30.00	21.60
	9 21 8 <sup>00</sup>	30.00	15.15

之に依れば、豊岡に於ける風速約 22 m/s のとき 1 時間雨量 127 mm を伴ひたるものが著しい暴風雨で、他は何れも風は相當強いが雨は豪雨と稱すべきものはない。併し萬一の場合を考慮し、風速 40 m/s のとき前記豊岡の如き豪雨があつたと假定する。此の雨量は 1 時間内の總降水量であるから、數分間位の短時間には此の約 3 倍位の降雨強度があるものと假定する。即ち 1 時間に 360 mm、換言すれば 0.1 mm/s の降雨強度があると假定する（此の降雨強度は碍子の注水試験の降水量に匹敵する）。此の際に雨滴の落下する速度を 6 m/s とすれば、1 cm<sup>2</sup> の底面を有し、6 m 即ち 600 cm の長を有する柱体の空氣中に存在する雨水の量は  $\frac{1}{100}$  cm<sup>3</sup> である。従つて前記柱状空氣中に含まる雨水の量は空氣の約  $\frac{1}{60000}$  に過ぎない。而して空氣の重量は 1 cm<sup>3</sup> に付約 0.0013 gr なる故、1 cm<sup>3</sup> の空氣の中に  $\frac{1}{60000}$  の水分（1 cm<sup>3</sup> の重量を 1 gr とする）が混入するとせば、其の水分の重量は約 0.00017 gr である。此の水分含有のため空氣の密度が 0.0013 から 0.001317 に増したこと考へ得られる。物体の空氣抵抗は空氣の密度に正比例するものとすれば、雨のために空氣抵抗即ち風圧の増すのは僅かに約 1.3 % であり、毎 m<sup>2</sup> の風圧を 150 kg と見て此の風圧増量は約 2 kg に過ぎない。

次に別の考へ方として、雨滴の衝撃力を計算して見れば、前記の通りの假定の下に、1 m<sup>3</sup> の空氣の中に存在する雨滴の重量は約 17 g であり、それが 40 m/s の風速に乗つて動くとせば、1 m<sup>2</sup> の面を通過する雨滴の重量は毎秒 約 680 g である。之が 1 m<sup>2</sup> の面上に衝突する力は  $\frac{680}{980} \times 40 \times 100 \div 1000 = 2.8 \text{ kg}$  となる。如斯風速 40 m/s の如き強風に於て毎秒 0.1 mm の如き降雨強度を想像しても、雨に依る影響としての毎 m<sup>2</sup> の風圧の増加は 2~3 kg に過ぎないのであるから、大局に影響なきことは勿論である。

## 5. 電線の風圧

電線類の風圧計算に於ては、現行設計標準は電線の直径に対する係数を 0.5 と採つてある。然るに第 2 回風洞實驗に於て、通信用 4 mm 亜鉛鍍銅線、電車用 12 mm 硬銅線、送電用硬銅撚線 7 種に就き空氣抵抗を測定し、此の測定値に對し風速 40 m/s の場合の平面の風圧を 200 kg/m<sup>2</sup> と假定し、各電線の直径係数を算出すれば表-3 の如き結果を得た。

之に依ると、直径係数は 0.5 に一定せず、各電線に依り種々変化し、大体に於て 0.5~0.6 の間に納まつて居る。而して代表的送電用電線とも看做さるべき 12.6 mm 7 本撚硬銅線に就いては直径係数は約 0.6 である。第 1 回風洞實驗に於ては 50 mm 鋼管に對して試験したる結果此の係数は約 0.7 であると發表したが、之は 50 mm 平鋼板の風圧 130 kg/m<sup>2</sup> に對して云ふのである。若しそれを 200 kg/m<sup>2</sup> に對する係数に直せば約 0.47 となるのである。

表-3. 電線の直径係数

電線の種類用途	直 径 (mm)	電線の直径係数		
		風速 40 m/s	風速 50 m/s	風速 60 m/s
通信用亜鉛鍍銅線	4	0.515	0.526	0.534
電車用硬銅線	12	0.569	0.572	0.573
送電用硬銅 7 本撚線	6	0.544	0.550	0.563
" " "	9.6	0.568	0.579	0.590
" " "	12.6	0.583	0.591	0.598
" " 19 本撚線	10	0.549	0.525	0.522
" " "	16	0.524	0.540	0.575
" " "	20.5	0.469	0.477	0.486
" " 37 本撚線	20.6	0.478	0.511	0.529

翻つて考ふるに此の直径係数なるもの、出所は、円筒形物体に對する風圧を計算する際、直面に對する風圧を 1 と

し、曲面の受ける風圧を微分積分法に依りて計算したものにて、其の方法に依り或は $1/2$ となり或は $2/3$ となり、何れが眞なるか判明せず。併し現行鉄塔設計標準に於ては、毎 $m^2$ の風圧を相當大きく採つてあるから、此の数字は $1/2$ でも宜ろしからうと云ふので、直径係数は $0.5$ となつた次第である。如斯直径係数の計算に於ては風圧は正面の受風面の形狀のみに依りて変化するものとしての話であるから、全く風圧の性質に關する認識を過つて居るのである。加へて基準の風圧 $200\text{ kg/m}^2$ と云ふのが根據薄弱である。依つて斯かる信頼すべからざる性質の係数は之を度外視し、結局實物に對して行ひたる空氣抵抗の實測値を重點として、其の物特有の風圧を規定すれば足るものである。

前述の如き趣旨に従ひ、電線特有の風圧を決定するため、第2回風洞實驗に依り得たる各種電線の空氣抵抗を列舉すれば表-4並に図-3の通りである。

此の結果に依れば、電線の空氣抵抗は直徑 $12\text{ mm}$ 附近に於て最大で

あり、單線、撚線の別並に撚線を構成する素線の數等に就きては格別著しき差違を見出さず。但し原則として細小なる物体は其の單位面積の空氣抵抗が比較的大きいのを常とするが、 $6\text{ mm}$ 及 $4\text{ mm}$ の直徑の電線が比較的少き空氣抵抗を與へたるは疑問とする所である。

図-3の趨勢を見れば、直徑 $10\sim 12\text{ mm}$ のもの附近の實測値は互に接

近して居り、比較的信頼するに足る。而して實際に送電線に最も多く使用せらるゝ電線の直徑は概して此の邊に存在するのであるから、図-3の趨勢より判断して風速 $40\text{ m/s}$ に於ける毎 $\text{m}^2$ の空氣抵抗 $113\text{ kg}$ (之は直徑 $9.6\text{ mm}$ の電線の實測値と一致す)を以て電線の空氣抵抗を代表するものと認める。猶此の上に既述の如く風洞實驗値を自然風に適用するため、其の $106\%$ を採りて $120\text{ kg}$ となし、之を以て電線投影面積毎 $\text{m}^2$ の風圧となす。之は偶然の場合ではあるが、毎 $\text{m}^2$ の風圧を $200\text{ kg}$ として、直徑係数を $0.6$ に採りたる場合と一致す。

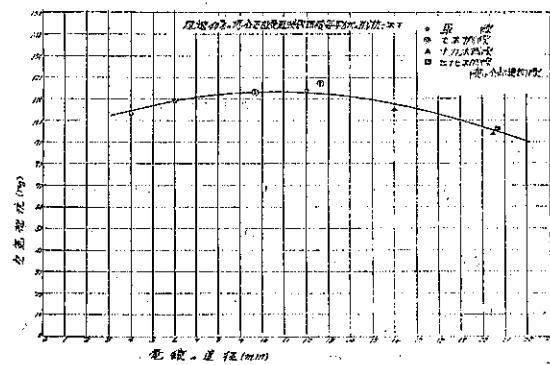
## 6. 碁子の風圧

第2回風洞實驗に於ては、直徑 $.254\text{ mm}$ (俗稱10吋)標準懸垂型碁子3個を連結して1連となせるものにつき、其の空氣抵抗を測定したが、其の結果は風速 $40\text{ m/s}$ に於て約 $3.63\text{ kg}$ であつた。之を受風投影面積に割り當

表-4. 電線の空氣抵抗

電線の種類用途 (mm)	直徑 (mm)	投影面積毎 $\text{m}^2$ の空氣抵抗(kg)		
		風速 $40\text{ m/s}$	風速 $50\text{ m/s}$	風速 $60\text{ m/s}$
通信用亜鉛鍍鉄線	4	103	165	240
電車用硬銅線	12	114	179	258
送電用硬銅7本撚線	6	109	172	254
" " "	9.6	113	181	265
" " "	12.6	117	185	269
" " 19本撚線	10	110	164	235
" " "	16	105	169	259
" " "	20.5	94	149	218
" " 37本撚線	20.6	96	160	238

図-3. 電線の空氣抵抗



つれば、単位面積の空気抵抗は約 66 kg となる、之に對し偏移風向に於ける空気抵抗の増加に自然風の風圧に換算の場合を考慮して 80 kg となし、之を以て碍子(254 mm 標準碍子)の毎  $m^2$  風圧となす。實用の便に供するため、之を碍子 1 個に割當つれば、約 1.5 kg となる。他種の碍子を使用する場合には、一々實物に付實験をなすべきなれども、碍子の風圧は鉄塔の強弱計算上殆ど無視しても差支なき程度のものであるから、それにも及ばず。唯だ計算を合理的にするため前記の如き碍子の風圧を考へたのである。されば他種の碍子に對しては大約の見當にて其の大小に応じ前記數字を適當に増減すれば足るものと信ず。同種の碍子が 2 連又は 3 連互に密接して風の方向に併立して居る場合には、風上の碍子 1 連丈けの風圧を計上すれば足るものである。之は第 1 回風洞實験に於て發表した通り、同種の物体が密接して風の方向に併立するときは、其の全体の空気抵抗は物体 1 個のみの場合より減ずるものである。併し偏移風向の場合をも考慮し、風圧は 1 個の場合と同一とする可とする。若し 2 連の碍子が何れも風に直面して併立するときは、2 連分の風圧を探るべきことは勿論である。

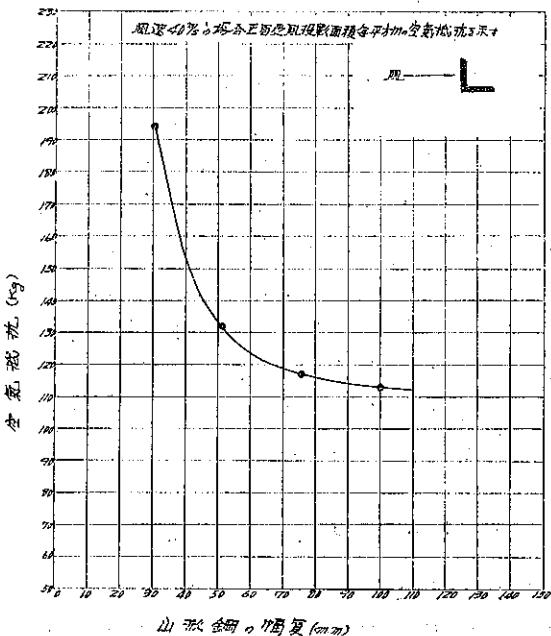
## 7. 鉄塔素材の空気抵抗

- 第 1 回風洞實験に於ては、鉄塔の素材、機構の模型等に就き種々の實験を行ひ、特に風の方向に併立する 2 本の素材の空気抵抗に就き詳細なる實験を行ふた。其の主なる目的は正方形基面を有する鉄塔の風圧に於て、鉄塔全体の風圧は一面機構の風圧の何倍になるか、換言すれば風圧倍數は何程なるかを検討するためであつた。そうして此の實験で殆ど其の所期の目的を達したのであつた。第 2 回の風洞實験に於ては、風圧の設計基準を根據ならしむるため、鉄塔素材たる等邊山形鋼及電線、碍子等の空気抵抗を精確に測定することにした。猶其の目的を完璧ならしむるため、鉄塔に使用する各種の等邊山形鋼の空気抵抗の測定機構の疎密、傾斜面並に物体の大小が空気抵抗に及ぼす影響等を徹底的に調査すべく計畫したのであつたが、航空研究所の都合に依り風洞を吾々の實験のため永く使用することを許されなかつたため、憤慨ながら鉄塔素材の空気抵抗に關しては、30 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm の 4 種の等邊山形鋼を以て鉄塔素材を代表するものとし、此の 4 種の等邊山形鋼に對して實験を行ひ特に 75 mm 山形鋼に對しては、其の受風方向を 360 度回転し、種々の風向に對する空気抵抗を測定するに止めたのである。

先づ此の代表的 4 種の等邊山形鋼に就き實測したる結果に基き、其の幅員の大きさと単位面積上の空気抵抗との關係を示せば 図-4 の通りである。但し之は山形鋼が正面受風  $\alpha = 0$  ( $\rightarrow L$ ) の場合である。

之に依れば、等邊山形鋼の投影面積每  $m^2$  の空気抵抗は其の幅員の大小に依りて著しき相違があり、特に 30 mm 幅員の如き細少なるものにありては、其の単位面積の空気抵抗は殆ど 200 kg に近く、50 mm 幅員のものにありては約 130 kg, 75 mm, 幅員のものにありては約 120 kg, 100 mm 以上の幅員のものに

図-4. 等邊山形鋼の空気抵抗



ありては 110 kg に落ち着くものゝやうである。但し山形鋼の空氣抵抗にありては、其の厚みの影響が相當大きいのであるが、図-4 は實情に即した厚みを有する等邊山形鋼に就きその幅員と単位面積空氣抵抗との關係を示すものである。

如斯鉄塔素材の単位面積空氣抵抗は、其の形状の大少に依り著しき相違があり、其の最大のものは最小のもの約 2 倍大となる程であるから、現行標準の様に素材の細大の區別なく一律に単位面積の風圧を探ることは不合理である。

確なる方法としては斯かる一律の単位面積風圧を設定することなく、各素材毎に其の単位長さの風圧を示すがよろしい。そうすれば鉄塔各部材の長さに応じて風圧を算出し、之を綜合すれば鉄塔全体の風圧となる。此の方法は一面に於て極めて合理的であるが、他面に於て實用的でない所がある。何となれば、部材の取付方が常に一定して居り、鉄塔機構全体を通じ各部材が同一の面を風に曝露する様であれば、此の方法は適切且つ簡単であるが、實際の機構は各部材の露風面が極めて複雑であるから、此等の異りたる種々の露風面に於ける各素材の単位長の風圧を設定し且つ之に依り風圧を算出することは其の煩に堪へないのである。それで實用的方法としては、多少臆断的の嫌はあるが、次に示す方法に依り鉄塔機構としての単位面積風圧を設定するより他に良法はない様である。

### 8. 鉄塔機構の風圧

図-4 は山形鋼が正面受風の場合の空氣抵抗を示したのであるが實際の鉄塔機構にありては、既述の如く部材の取付方法に種々あり、鉄塔の主体は多少錐体のやうな形狀をして居るので機構面が傾斜して居る。又風の方向も水平方向並に垂直に對して多少偏移して吹くことも考へねばならぬ。それで山形鋼の風に對する面を種々に変化せしめて其の空氣抵抗を測定し露風面の變化に關する検討を行ひたる後、適當なる基準空氣抵抗を設定すれば、之を根據として鉄塔機構の風圧を決定しても大なる過誤なく且つ實用的であると考へる。但し此の場合には先きに注意して置いた通り山形鋼の単位面積の空氣抵抗は、風の方向が種々変化する際に一々其の風の方向の投影面積を探らず、常に正面受風の場合の投影面積を探り、空氣抵抗は変化した其の體のものを採るべきである。以下此の方法に依りて単位面積の空氣抵抗又は風圧を示すのである。勿論鉄塔機構の空氣抵抗を實物に依りて測定することが出來れば申分はないが、目下の所では斯かる大規模の風洞設備は無い。さりとて模型では實物の値を知るに由なく、結局前記の如き方法に依るより他に途がないのである。

第 1 回風洞實驗に於ては 50 mm 等邊山形鋼、100 mm 等邊山形鋼、50×100 mm 溝形鋼の 3 種に就き、各其の長軸を中心として回転せしめ、種々の方向より受風せる場合の空氣抵抗を測定したが、第 2 回風洞實驗にありては 6×75×75 mm 等邊山形鋼に就き第 1 回同様の實驗を行ふた。而して 6 萬 V 級の鉄塔にありては 50 mm 等邊山形鋼が最も多く使用せられ、14 萬 V 級鉄塔にありては 75 mm 等邊山形鋼が最も多く使用せられて居り、鉄塔部材の平均幅員としては 75 mm に近いものであるから、75 mm 等邊山形鋼を鉄塔部材の代表的のものとして、それに對して研究した結果に準據して機構の風圧を設定して差支ないと思ふ。如斯代表的な一定の幅員の山形鋼に準據して風圧を設定すれば、之より大きな部材を使用する鉄塔にありては其の単位面積の風圧は此の代表的のものよりも小さくてよい譯であるが、それは重要な鉄塔に對する安全率の増加と考へて其の體として差支ない。之に反して此の代表的のものより少い部材を使用する鉄塔にありては、其の単位面積の風圧は増さなければならぬのであるが、或る程度迄は重要な鉄塔に對して安全率の低下を許すものとして其の體にして置くも亦差支ないことである。勿論既述の如く著しく細小なる部材を使用する場合には相當の修正を施す必要がある。そこで

第2回風洞実験に於て得たる 75 mm 等邊山形鋼の種々の風向に於ける空気抵抗を示せば 図-5 の通りである。第1回風洞実験に於ては 50 mm 等邊山形鋼に對するものゝみが信頼するに足るものと信ずる故、50 mm 等邊山形鋼のものゝみの結果を参考のため 図-5 に添記する。

第1回風洞実験と第2回風洞実験との結果を比較すれば、図-5 に於て明瞭なる如く、風の角度  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\alpha = 225^\circ$ ,  $\alpha = 315^\circ$  の 4 點附近に於て彼は著しき相違がある。之は第1回実験の際供試体の兩端より風の漏出すること、其の他実験上の不備より来るものであらう。此等の 4 點附近を除けば、兩曲線は常に大約 15 kg の間隔を置いて同種の形狀を探るものゝ様である。此の約 15 kg の差違は等邊山形鋼の幅員の差に歸因するものなることは勿論である。それで 図-5 の第2回風洞実験の結果を基礎とし、之より適當なる基準空気抵抗を設定し様と思ふ。然る所図に示す如く 75 mm 等邊山形鋼の単位面積空気抵抗は風の方向に依り著しく変化し、最低約 95 kg より最大約 160 kg まで頗る廣い範囲に及ぶので、何れを以て基準空気抵抗となすべきか取捨に迷ふ次第である。勿論其の最大値たる 160 kg を採れば最も安全であるが、それでは實際の鉄塔機構に適合するものではない。そこで  $\alpha = 90^\circ$  より  $\alpha = 180^\circ$  に至る間の尖頭部分の内より適當なる値を選定すればよろしい。此の部分は  $\alpha = 135^\circ$  の點を頂點として左右對稱的であるから、 $\alpha = 90^\circ$  乃至  $\alpha = 135^\circ$  の部分の空気抵抗の平均値を概算すれば約 140 kg となる。之を以て 75 mm 等邊山形鋼にて構成したる鉄塔機構の単位面積の空気抵抗と認める。

其の他の幅員の山形鋼に對しても、図-5 に示すが如き各風向の曲線があれば、前記同様の方法で之を算出するのであるが、目下其の資料に乏しいから、止むを得ず之に稍近い結果を得べき便法を講ずる。即ち各種の山形鋼に對し 360 度回転しての各風向に依る空気抵抗を測定する代りに、 $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 110^\circ$  の 3 方向に於て夫々の山形鋼の空気抵抗を測定することにした。其の結果は 表-5 に示す通りである。其の内 100 mm 等邊山形鋼にありては  $\alpha = 110^\circ$  の場合の空気抵抗は 75 mm 等邊山形鋼と同一となり、其の眞偽は疑問とする所なる故、3 風向の平均値 120 kg は認定に依り計上したものである。それで此の 120 kg には括弧を施してある。

表-5 の結果に依れば、75 mm 等邊山形鋼の 3 風向平均空気抵抗は 124.2 kg となり、之に對して 75 mm 等邊山形鋼の代表する鉄塔機構の空気抵抗は既述の如く 140 kg となりし故、他の山形鋼の代表する鉄塔機構の空気抵抗も亦夫々 3 風向平均空気抵抗に正比例するものとして算出すれば 表-6 の如くなる。

図-5. 種々の風向に於ける等邊山形鋼の空気抵抗

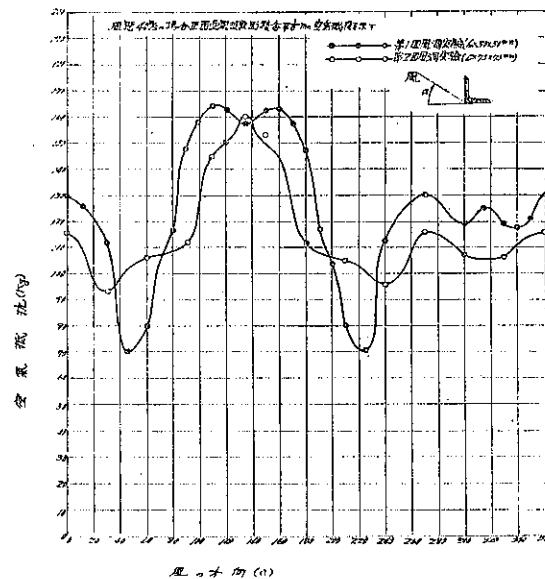


表-5. 代表的風向に於ける等邊山形鋼の空気抵抗

風 向	各種 山 形 鋼 の 每 $m^2$ 空 気 抵 抗 (kg)			
	$3 \times 30 \times 30$	$4 \times 50 \times 50$	$6 \times 75 \times 75$	$7 \times 100 \times 100$
$\alpha = 0$	194.3	131.2	116.0	113.0
$\alpha = 90$	188.3	126.2	112.0	109.5
$\alpha = 100$	204.3	162.6	144.5	144.5?
平 均	195.6	140.0	124.2	(120.0)

此の表の結果に依れば素材の  $\alpha=110$  のときの空気抵抗が代表機構の空気抵抗と近似のものとなる。依りて素材の  $\alpha=110$  附近の空気抵抗を以て代表機構の空気抵抗となすも大なる差違はない。斯くて表-6の結果に對し、既述の如く之を自然風の風圧に換算するため 10% 増となして更に 3 kg を加ふれば大約表-7の如くなる。之を以て等邊山形鋼を以て構成する鉄塔機構一面の単位面積風圧となす。

表-7 に示す如く、鉄塔機構の風圧は代表部材の幅員に依りて大差あり、30 mm 等邊山形鋼の代表する機構にありては 245 kg となり、現行標準たる 200 kg を遙かに超過するも、代表山形鋼の幅員増加するに連れて単位面積風圧は逐次に低下し、100 mm 等邊山形鋼の代表する機構にありては實に 152 kg となる。100 mm 以上の幅員となりても風圧の低下は極めて僅少である。此の代表山形鋼の幅員と稱するは 鉄塔機構を構成する各部材の平均幅員、換言すれば部材の總面積を部材の總長にて除したものと以て表はすものとす。表-7 を基準とし、猶實用上の便に供するため表-8 を作る。

之に依れば、鉄塔機構の每  $m^2$  の風圧は部材の平均幅員が 40~45 mm のときは現行標準の通り 200 kg なるも、平均幅員 40 mm 未満となれば 200 kg より増加するに至る。併し實際の送電用鉄塔には、幅員 30 mm 未満のものは部材として使用せぬことゝなつて居る故、部材の平均幅員が 40 mm 未満になる場合は稀であらう。而して部材の平均幅員の増加するに連れて、此の每  $m^2$  の風圧は逐次に低下し、平均幅員 100 mm 以上の大型鉄塔にありては 150 kg に低下するのである。實際の場合に假令平均幅員が 100 mm を超過する場合があつても、每  $m^2$  の風圧は 150 kg に止めて置くのが望ましい。如斯最も多く使用せらるる平均幅員例

へば 70~80 mm に對して標準風圧を設定して置けば小型の鉄塔に對して安全率が低下すると共に、大型の鉄塔に對しては安全率が向上することゝなる。又同一の鉄塔に於ても主材とその他の部材とを比較すれば、可なり廣い範圍に幅員が変化して居る。それでも鉄塔全体の平均幅員を探つて毎  $m^2$  の風圧を定むれば決して正鶴は失はないと思ふ。併し鉄塔上部特に最下腕金の附け根より上部は其の下部に比して細少の部材を用ひて居るのが常でありそれが鉄塔頂部に近い所に在るので、鉄塔基脚に及ぼすモーメントを考ふれば、鉄塔頂上まで平均幅員の風圧で統一するのは少しく合理的でない様にも考へられる。それであるから精確を期するならば、鉄塔部材の平均幅員は最下腕金を境界として鉄塔上部と鉄塔下部との 2 部分に分ち若し鉄塔下部が相當長い場合にはそれを適當の數に分ちて計算するのがよろしい。

前記鉄塔機構の平均幅員と単位面積風圧との關係に就き、實際の鉄塔の例を擧げて其の適用を試みよう。東京電燈會社にて使用中の 6 萬 V 標準鉄塔 A 型、B 型、C 型、D 型の 4 種並に 14 萬 V 標準鉄塔 A 型、B 型、C 型、D 型の 4 種、併せて 8 種の鉄塔に就き、其の構成部材の材料並に平均幅員を示せば表-9 並に表-10 の通りである。

表-6. 鉄塔機構代表山形鋼の空気抵抗

山形鋼の幅員 (mm)	每 $m^2$ 空気抵抗 (kg)
30	220
50	158
75	140
100	135

表-7. 鉄塔機構の風圧

代表部材の幅員 (mm)	每 $m^2$ 風圧 (kg)
30	245
50	170
75	157
100	152

表-8. 部材平均幅員と風圧

部材の平均幅員 (mm)	每 $m^2$ 風圧 (kg)
40 ~ 45	200
45 " 50	190
50 " 55	180
55 " 60	170
60 " 65	165
65 " 80	160
80 " 100	155
100 以上	150

表-9. 6萬V鉄塔材料表並に平均幅員

部材の幅員 (mm)	A型鉄塔			B型鉄塔			C型鉄塔			D型鉄塔		
	最下腕金より上部	最下腕金より下部	鉄塔全体									
各部材の延長 (m)	150						9.8	9.80		30.40	30.40	
	130		10.40	10.40		32.00	32.00		20.60	20.60		
	100		11.20	11.20			11.60		11.60	11.60		11.60
	90		10.40	10.40								
	75	10.40		10.40	22.00		22.00	11.60		11.60	15.00	
	65	12.60		7.40	20.00	4.80	7.40	12.20	8.20	18.40	26.60	7.40
	50	7.40	32.80	40.20	6.00	37.40	43.40	16.80	28.80	45.10	16.80	32.30
	45	29.20	9.90	39.10	26.80	5.30	32.10	12.00	5.20	17.20	9.40	1.20
部材の総延長(m)		59.60	82.10	141.70	59.60	82.10	141.70	60.20	82.30	142.50	60.20	82.30
部材の平均幅員(mm)		55.10	72.80	65.30	58.20	82.20	72.10	65.50	85.00	76.70	66.90	90.20
												80.40

表-10. 14萬V鉄塔材料表並に平均幅員

部材の幅員 (mm)	A型鉄塔			B型鉄塔			C型鉄塔			D型鉄塔		
	最下腕金より上部	最下腕金より下部	鉄塔全体	最下腕金より上部	最下腕金より下部	鉄塔全体	最下腕金より上部	最下腕金より下部	鉄塔全体	最下腕金より上部	最下腕金より下部	鉄塔全体
各部材の延長 (m)	200										19.40	19.40
	150										12.60	20.60
	130		36.00	36.00	16.60		36.00	36.00		32.00	32.00	8.00
	100	21.80		21.80	23.20		23.20	13.00		13.00	24.00	
	90	18.00		10.00	28.00		10.00	10.00	18.00		18.00	7.00
	75		13.50	13.50			13.50	13.50	11.00	12.90	23.90	11.00
	65	48.60		48.10	96.70	48.60	48.10	96.70	29.20	40.90	70.10	29.20
	50	12.20		2.50	14.70	12.20	2.50	14.70	13.00	2.40	15.40	13.00
部材の総延長(m)		100.60	110.10	210.70	100.60	110.10	210.70	100.70	98.00	198.70	100.70	98.00
部材の平均幅員(mm)		75.20	89.40	82.60	82.00	96.00	89.30	83.80	96.20	89.90	86.50	106.00
												96.20

前2表の結果に依れば、6萬V鉄塔にありては、部材の平均幅員は A型上部約 55 mm, 下部約 73 mm, 鉄塔全体約 65 mm, B型上部約 58 mm, 下部約 82 mm, 鉄塔全体約 72 mm, C型上部約 65 mm, 下部約 85 mm, 鉄塔全体約 77 mm, D型上部約 67 mm, 下部約 90 mm, 鉄塔全体約 80 mm である。即ち 6萬V鉄塔の部材平均幅員は鉄塔全体に於て約 65~80 mm である。次に 14萬V鉄塔にありては、A型上部約 75 mm, 下部約 89 mm, 鉄塔全体約 83 mm, B型上部約 82 mm, 下部約 96 mm, 鉄塔全体約 89 mm, C型上部約 84 mm, 下部約 96 mm, 鉄塔全体約 90 mm, D型上部約 86 mm, 下部約 106 mm, 鉄塔全体約 96 mm である。即ち 14萬V鉄塔の部材平均幅員は鉄塔全体に於て約 83~96 mm である。其の内 6萬V, 14萬V 共に A型鉄塔が其の主要を占めて居るのであるから、6萬V鉄塔 A型の平均幅員たる 65 mm 及 14萬V鉄塔 A型の平均幅員たる 83 mm が吾邦主要送電線用鉄塔の部材平均幅員を代表するものと見てよからう。假令 B型, C型, D

型をも考慮に入るゝとも 6 萬 V, 14 萬 V を通じ鉄塔部材の平均幅員は 75 mm に近いものであらう。されば先きに鉄塔機構の空氣抵抗を検討する際 75 mm 等邊山形鋼を以て鉄塔部材の代表的のものとなし、之に關する實測の結果を基礎として出發したことは、偶然の場合ながら大体肯綮に當つたものである。それはそれとして、前記諸鉄塔の部材平均幅員に基き、表-8 を參照して前記諸鉄塔の機構每  $m^2$  の風圧を算出すれば表-11 の通りである。

本表に依りて判明する如く、鉄塔機構每  $m^2$  の風圧は、14 萬 V 諸鉄塔にありては 150~160 kg にて足り、6 萬 V 諸鉄塔にありては 155~170 kg 間に納まる。之は但し鉄塔を上部と下部とに兩分して夫々の風圧を算出したのであるが、鉄塔全体としての部材平均幅員に依れば、14 萬 V 諸鉄塔にありては全部 155 kg, 6 萬 V 諸鉄塔にありては 155~165 kg である。

それで最後の結論としては、鉄塔機構每  $m^2$  の風圧は、一般の設計に於ては 165 kg を以て標準とする。此の風圧は図-6 に徴して機構部材の平均幅員 60 mm に該當するものであるから、若し機構部材の平均幅員が 60 mm 未満なる場合には此の數値を適當に増大するものとす。英國に於ける風洞實験の結果、發表せられたる所に依れば、單位面積の風圧は鉄構の疎密に依り変化するも、一般の目的に對しては時速 50哩の風速に對し呴<sup>2</sup> 當り 10.5 度封として安全であると云はれて居る。之をメートル式に換算すれば、秒速 40 m の風速に對し每  $m^2$  の風圧約 164 kg となる。之も偶然の場合ではあるが、面白い對照である (The Journal of the Institution of Electrical Engineers, Aug. 1935 に發表せられたる The Britist Electrical and Allied Industries の報告書 Wind Pressure on Latticed Towers Tests on Models 參照)。

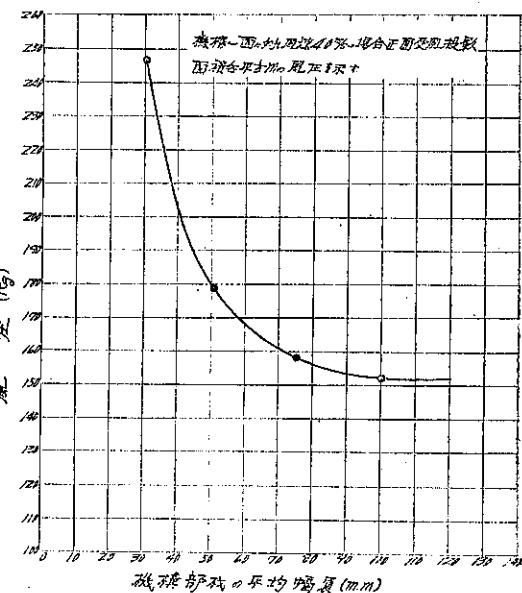
### 9. 鉄塔の風圧倍數

以上は鉄塔機構の一面に就ての風圧であるが、正方

表-11. 鉄塔機構每  $m^2$  の風圧

型式		6 萬 V 鉄塔	14 萬 V 鉄塔
		最下腕金より上部	170.00 kg
A 型	〃 下部	160.00 "	155.00 "
	鉄塔全體	165.00 "	155.00 "
B 型	最下腕金より上部	170.00 "	155.00 "
	〃 下部	155.00 "	155.00 "
	鉄塔全體	160.00 "	155.00 "
C 型	最下腕金より上部	165.00 "	155.00 "
	〃 下部	155.00 "	155.00 "
	鉄塔全體	160.00 "	155.00 "
D 型	最下腕金より上部	160.00 "	155.00 "
	〃 下部	155.00 "	150.00 "
	鉄塔全體	155.00 "	155.00 "

図-6.



形基面を有する鉄塔にありては、風の方向に於ける前後両面の機構の風圧は如何になるかが問題である。風下機構の受くる風圧は風上機構の遮蔽作用に依り幾分減退することは勿論である。現行鉄塔設計標準に於ては此の減率を 0.5 とし、機構一面の風圧の 1.5 倍を以て鉄塔の風圧としてある。併し鉄塔機構の疎密に依り此の減率又は倍数は一定なるべきものでないことは、獨逸のゲッチングン航空研究所の風洞實驗に依りて明かである。猶第 1 回風洞實驗に於ても之を確めたのである。之に就きては航空研究所員黒川重義氏が鉄塔調査委員會席上に於て詳細に述べられた所である。此の風の方向に併立する 2 個の物体の風圧は研究すると餘程面白いものである、之に關する第 1 回風洞實驗の結果は既に公表した所であるが、茲に之を略述すれば 2 個の物体を探り、始め 1 個のみの空氣抵抗を測定し、次に他の 1 個を前の 1 個に密接して風下に置けば、2 個の空氣抵抗は 1 個の場合より減少する。次に風下の 1 個を逐次風の方向に従つて動かせば、2 個の空氣抵抗は 1 個の場合に近づき、一定の距離に於て全く 1 個の場合と同一となる。その距離を過ぐれば、或る距離で急激の変化があり、それから先は緩漫ながら次第に 1 個の場合の 2 倍に近づき行くのである。之と同様に風の方向に併立する 2 個の機構の受くる風圧は機構の疎密の程度、換言すれば機構部材の幅員と兩機構の間隔との間の關係に依り大に差違があるのである。精确に云へば、風下機構の減率は問題にするべきものではない。前後の兩機構が如何に風圧を分擔するとも、結局兩方合せた風圧が一面機構の場合の何倍になるかが實用上大切のことである。之を風圧倍數と名付ける、或は倍率と云ふ人もあるが、率なる語は此の場合面白くないから倍數と呼ぶ方がよろしい。

風圧倍數は機構の疎密の程度に依りて變化するとしてあるが機構の疎密の程度は數字的に如何に表はすべきかが問題である。機構又は構區の部材の實面積と其の外郭面積との比率を充實率と名づけ、此の充實率を以て機構疎密の程度を數字的に表はすのも一つの方法である。又機構又は構區中の主材の間隔(主材の内側の縫端から縫端までの空間部分の距離を示す)を主材の幅員にて除した數を主材の間隔倍數と名づけ、之を以て機構疎密の程度を數字的に表はすも一つの方法である。何れの方法がよろしきか直ちに判断は出来ぬが、茲に注意すべき點は、機構の充實率が同じであつても、細い部材が少數あるのとでは、機構自身の単位面積風圧に差違あるのみならず、風圧倍數にも相當の差違を生ずるものである。其の極端な一例を擧ぐれば、充實率が 0.5 なる 2 個の機構があつたとする。其の一つは空間と實質と同面積の細い格子の様なものであり、他の一つは構區の真中に外部面積の 1/2 に該當する面積の一つの大きな空間を残した網線のようなものであるとする。此の 2 個の機構は風圧の見地からして著しく異なる性質のものであることは明かである。第 2 回風洞實驗の際如斯充實率が同一で機構の構成の異つた供試体につきて實驗をする用意をして置いたが、既述の事由で此の實驗を行ふ事が出来なかつたのは甚だ遺憾である。此の意味に於て充實率よりも間隔倍數の方が簡明である様に思はれる、唯間隔倍數に就いて注意すべきことは、或る間隔に於て風圧倍數の変化が甚しく、或る間隔以上になると其の変化が極めて緩漫であることである。それであるから安全のためには充實率と間隔倍數と兩方面から検討して、彼は參照の上適當なる結論に到達することが望ましい。

表-12. 充實率、間隔倍數、風圧倍數の關係

それで第 1 回風洞實驗の結果を簡単に摘録して見よう。實驗の供

供試体番號	充 � 實 率	間隔倍數	風 圧 倍 數	
			正面受風の場合	偏移風向の場合
1	0.58	6.00	1.35	1.37
2	0.35	9.45	1.50	1.67
3	0.20	24.60	1.63	1.72
4	0.12	38.00	1.73	1.81

實率と風圧倍數との關係を示せば表-12 及 図-7, 8 の通りである。此の外 50 mm 等邊山形鋼 2 本を用ひて行ひたる實驗値より算出した間隔倍數と風圧倍數との關係は図-7 通りである。

上記第 1 號供試体と稱するは、東京電燈會社に於て使用する鉄柱機構の實物の主體構造であつて、主材幅員 50 mm, 水平材幅員 44 mm 斜材幅員 33 mm のものである。第 2 號供試体と稱するは、同會社使用の 14 萬 V C 型鉄塔の腕金の主體構造を約 1/4 に縮少した模型であつて、主材幅員 35 mm, 水平幅員 19.7 mm, 斜材幅員 15.25 mm のものである。第 3 號供試体と稱するは、第 2 號供試体の代表する鉄塔の錐体部ダブルワーレン型機構をなして居る部分の主體構造を約 1/10 に縮少し且つ直方体に変形した模型であつて、主材幅員 15 mm, 水平材幅員 10 mm, 斜材幅員 7.5 mm のものである。第 4 號供試体と稱するは、同會社使用の 14 萬 V 塔、高 60 m の特殊高塔錐体部の主體構造を約 1/20 に縮少し且つ直方体に変形した模型であつて、主材幅員 10 mm, 水平材幅員 5 mm, 斜材幅員 4.5 mm, 補助材幅員 4 mm のものである。右供試体の空氣抵抗測定方法は、最初に機構の一面だけの空氣抵抗を測定し、次に主體機構に組み立て、空氣抵抗を測定し、後者を前者にて除したる數を風圧倍數として示したのである。

表-12 の示す所に依り明なる如く、風圧倍數は決して 1.5 に一定し居らず、間隔倍數並に充實率と密接の關係を有し、充實に於ては 2.0 に近付くものなることを知る。同じく第 1 回風洞實驗の際風の方向に併立する 2 本の 50 mm 等邊山形鋼に就き實測したる結果に依れば間隔倍數が約 90 附近に於て風圧倍數は 2.0 となるものゝ様である。

表-12 は正面受風の場合、即ち風が機構面に垂直の方向に吹きたる場合と、若し風が少しく斜に偏移して吹くときは、風上風下兩機構夫々の風圧に變化を生ずるのみならず、風上機構の風下機構に對する遮蔽作用にも同時に变化するのであるから、斯かる偏移風向に於ける風圧倍數をも検討する必要があるので、第 1 回風洞實驗に於て同一供試体に就き偏移風向に於ける諸種の實驗を行つた結果をも示した。但し此の場合の風圧は風の方向其の儘の値ではなく之に偏移角  $\alpha$  の  $\cos \alpha$  を乗じて正面受風の方向に換算したものである。

之に依ると、偏移風向の場合には正面受風の場合よりも風圧倍數が少しく大きくなつて来る。それで表-12 の結果を基準とすれば安全であるが、機構の單位面積の風圧を決定する際に、既述の如く種々の風向に於けるものゝ内頗る厳しい條件の下に在るも

図-7. 主材の間隔倍數と鉄塔の風圧倍數との關係

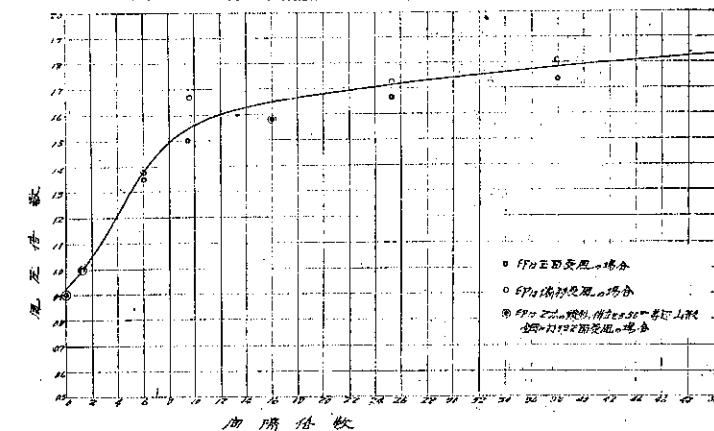
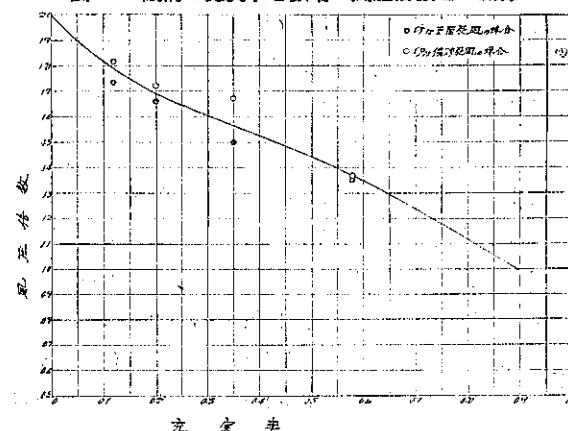


図-8. 機構の充實率と鉄塔の風圧倍數との關係



のを基準としたのであるから、風圧倍数を定むるには、表-12 の結果を参照して適當なる値を探ることが適當である。

今 図-7 並に 図-8 の曲線を基準とし、實際の鉄塔に對する適用例を示さう。東京電燈會社に於て使用する 6 萬 V 及 14 萬 V 兩種の標準鉄塔夫々 A 型、B 型、C 型、D 型の 4 種、合計 8 種の鉄塔に就き、表-9 並に表-10 の材料表に依り、主材の間隔倍数並に機構の充實率を算出すれば表-13 並に表-14 に示す通りである。

表-14 に依れば、機構の充實率は 6 萬 V、14 萬 V 兩種各鉄塔に於て殆ど一致し、鉄塔最下腕金より上部は約 0.35、下部は 0.17、鉄塔全体は約 0.21 である。此の結果を 図-8 に照合すれば、風圧倍数は上部約 1.55、下部約 1.75、全体約 1.7 である。

又間隔倍数は 6 萬 V 鉄塔と 14 萬 V 鉄塔とでは其の間に相當の開きがある。即ち 6 萬 V 鉄塔にありては上部の平均は約 11、下部の平均約 20、鉄塔全体の平均約 17 なるに對し、14 萬 V 鉄塔にありては上部の平均は約 14、下部の平均は約 24、鉄塔全体の平均は約 20 である。併し此の結果を 図-7 に照合すれば、前記の間隔倍数の差違は風圧倍数に對して大なる

差違を生ずる、6 萬 V、14 萬 V 各鉄塔を通じ、上部約 1.55、下部約 1.75、全体約 1.7 なるもの様である。

斯くして鉄塔の風圧倍数は

1.7 を以て標準とし、鉄塔最下腕金の附け根を境界として鉄塔上部と下部と別々に計算する場合には、上部に對して 1.55、下部に對して 1.75 を採る可とす。英國に於ける研究（既述の The Journal of The Institution of Electrical Engineers 参照）に依れば、鉄塔の風圧倍数は 1.5~1.7 を採るべしと發表されてある。獨逸のゲッセンゲン航空研究所に於ては、橋梁機構の模型に依り種々の實驗を發表し居り、其の結果は大に参考となすに足るものであるが、唯之は橋梁の實物にある通り機構は單に兩面に在るのみで、鉄塔の場合の如き四面機構のものには適用し兼ねる所がある。又機構の部材も鉄塔の場合の如き等邊山形鋼ではなく、主として I 形鋼を使用して居るの

表-13. 主材の間隔倍数

電圧	鉄塔型式	鉄塔上部 (最下腕金より)	鉄塔下部 (最下腕金より)	鉄塔全体
六 萬 V	A 型	13.30	22.80	20.40
	B //	10.00	18.00	16.00
	C //	10.00	20.10	17.20
	D //	10.00	18.30	15.90
	平均	10.80	19.80	17.40
十 四 萬 V	A 型	15.50	28.40	21.90
	B //	15.50	24.60	21.60
	C //	13.50	24.60	20.50
	D //	11.50	19.60	16.60
	平均	14.00	24.30	20.20

表-14. 機構の充實率

電圧	鉄塔型式	鉄塔上部 (最下腕金より)	鉄塔下部 (最下腕金より)	鉄塔全体
六 萬 V	A 型	0.31	0.15	0.19
	B //	0.33	0.17	0.20
	C //	0.36	0.17	0.21
	D //	0.36	0.18	0.22
	平均	0.34	0.17	0.21
十 四 萬 V	A 型	0.35	0.15	0.20
	B //	0.39	0.16	0.21
	C //	0.32	0.16	0.21
	D //	0.33	0.18	0.22
	平均	0.35	0.16	0.21

で、実験の結果は直に鉄塔の場合に適用し得ない。それで此の実験の結果は茲に引用しないのである。

## 10. 鉄塔の風圧

前述の如く鉄塔機構毎  $m^2$  の風圧は  $165 \text{ kg}$  を標準とし風圧倍数は 1.7 を標準とするのであるから、正方形基面を有する鉄塔にありては、鉄塔の受くる風圧は機構一面の毎  $m^2$  に對し  $165 \text{ kg}$  の 1.7 倍即ち  $280 \text{ kg}$  となり、之を以て鉄塔の風圧の標準とする。但し先に述べたる通り、鉄塔機構の毎  $m^2$  の風圧は其の部材の大小に依りて差違を生ずるものであり、又風圧倍数は機構の疎密の程度に依り変化するものであるから、鉄塔部材の平均幅員、主材の間隔倍数及機構の充實率に依り風圧並に風圧倍数を検算し、それ等が標準値より著しく相異する場合には、 $280 \text{ kg}$  の標準値に對し相當の修正を加ふべきものである。

以上述べ來れる所を総合すれば、鉄塔自身の風圧、電線の風圧、碍子の風圧等夫々標準値として採用すべき數値を得たる故、之を以て今後の送電用鉄塔設計の標準とすべきことを茲に提言する。即ち現行標準と改訂標準（案）とを對比すれば表-15 の如くなる。但し之は正方形基面を有する鉄塔に對し被氷なき場合の風圧に関するものであつて、被氷ある場合には、表中の數値は兩標準共夫々其の値を半減するものである。

猶序に附記せんに、上記改訂標準（案）は 6

表-15. 新舊標準對照

萬 V 乃至 14 萬 V の主要なる標準鉄塔に適用して安全であるが、特殊高塔又は極めて小型の鉄塔に對しては、其の適用に際し多少の手加減を要するのである。併し大休論としては、大型の鉄塔になれば風圧倍数が増加する代に単位面積の風圧は減少するから、彼是相殺して結局標準値より遠からざる所に落着く

であらう。併し大型なるが故に安全度を重要視するとか、或は地上高が大きいから風速は標準より高めねばならぬとか云ふ方面よりして、風圧標準値を高めると云ふことは尤もであるが、それは別問題として處理さるべきである。小型の鉄塔に對しては之と反対の方向に同様のことが云へる。又從前のプラクチスとしては、鉄塔の風圧作用點を或る點に集中させて略算する向もあるが鉄塔上部になると部材幅員の減少と共に単位面積の風圧は高まり、且つ鉄塔基脚に及ぼすモーメントも増大するのであるから、成るべく數多の構區に分ちて風圧の作用點を設定することが望ましいのである。

## 11. 鉄塔の強度

前述の如き改訂標準（案）に從へば、鉄塔の強度に對し、現行標準と比べて如何なる實質的差違を生ずるかを調べて見よう。東京電燈會社に於て使用する 6 萬 V の A 型標準鉄塔にして  $100 \text{ mm}^2$  の電線 6 條及  $70 \text{ mm}^2$  地線 1 條を架渉する標準塔間距離  $200 \text{ m}$  のもの及 14 萬 V の A 型標準鉄塔にして  $200 \text{ mm}^2$  の電線 6 條及  $70 \text{ mm}^2$  1 條を架渉する標準塔間距離  $250 \text{ m}$  のものゝ 2 種の鉄塔に就き、兩標準に依る鉄塔弛度を比較して見よう。但し此の場合に於ては鉄塔の弛度は大体に於て鉄塔基脚に於ける主材に依りて代表せらるゝものとし、鉄塔基脚に於ける主材の大きさは鉄塔基脚に於て主材に生ずる抗圧応力の大きさに正比例するものであるから、此の応力の大きさが大体に於て鉄塔の強度を決定する尺度であるものと假定する。此の抗圧応力を鉄塔其の他の重量より来る垂直荷重に依るもの、電線の張力（電線路の角度に依る水平分力及電線切斷に依る不平均張力を含む）に依るもの、電

線の風圧に依るもの、鉄塔の風圧に依るものゝ4項目に分類して比較すれば表-16の如くなる。但し此の場合に於てはA型鉄塔の電線路角度は3度とし、電線の切断は最上腕金の導線1條とし、鉄塔部材に及ぼす捻力の影響は無視したものである。此の場合の目的は單に兩標準の大体の比較即ち主として風圧の影響を問題にして居るに過ぎないのであるから、捻力の影響は無視しても差支ない。又電線の張力は被氷ある最低氣温のとき想定最大張力を持つものとし、被氷なき場合には氣温15°Cとし、張力は氣温及荷重の変化に応じて変化するものとして計算してある。

表-16. 新舊標準鉄塔応力比較(鉄塔1基脚分)

		被氷なき場合の応力(kg)		被氷ある場合の応力(kg)	
		現行標準	改訂標準(案)	現行標準	改訂標準(案)
六万V 鉄塔 (A型)	垂直荷重より来るもの	1 110	1 110	1 219	1 219
	電線の張力〃	3 463	3 463	3 941	3 941
	電線の風圧〃	3 857	4 628	3 841	4 610
	鉄塔の風圧〃	3 276	3 060	1 638	1 530
	合 計	11 706	12 251	10 639	11 300
	現行と改訂案との比	1 : 1.05		1 : 1.06	
十四万V 鉄塔 (A型)	垂直荷重より来るもの	2 372	2 372	2 544	2 544
	電線の張力〃	4 455	4 455	4 675	4 675
	電線の風圧〃	4 938	5 926	4 270	5 124
	鉄塔の風圧〃	4 850	4 525	2 425	2 260
	合 計	16 615	17 278	13 914	14 603
	現行と改訂案との比	1 : 1.045		1 : 1.05	

本表に依り兩標準を比較すれば、改訂標準(案)は現行標準に比して鉄塔強度に於て約4.5～6%の増加を要するに過ぎない。之はA型鉄塔の話であるが、B型、C型、D型等直接風圧に依る応力以外の応力が長大なる鉄塔にありては、此の強度増加要求額は殆ど無視して差支ない程微少である。即ち結論として改訂標準(案)は現行標準に依る鉄塔強度には實質的に殆ど影響を及ぼさないのである。但し之は結論に到達した結果に就ての話であるが、此の結論に到達する迄の経緯は、現行標準に比して著しく合理化されたものと信ずる。表-16の比較は既述の如く2回線鉄塔に關するものであり、而して改訂標準(案)は現行標準に比して電線の風圧に於て、鉄塔の風圧に寬なる關係上多回線鉄塔又は長径間鉄塔に對しては改訂標準(案)は現行標準に比して稍著しき鉄塔の強化を要求するであらう。此の傾向は室戸颶風の際の被害状況に鑑み、多回線鉄塔其の他電線の荷重多き鉄塔の強度に對し戒心を要することに幾分對応するものとして望ましきことである。

猶茲に附記したいことは、第1回及び第2回に涉り風洞實験を行つたが、之では未だ不徹底の所がある。何となれば、これ迄の實験に於ては、電線、碍子、鉄塔素材等には實物を用ひたから其の實測値に就ては充分なる信頼を置くことが出来る。唯其の實測値の標點が少いため、曲線を描くには稍不充分であつた丈である。然るに鉄塔機構に對して第1號供試体以外は何れも實物の模型であつて、機構實物の風圧を直接測定することが出来なかつたのである。他日巨大なる風洞設備が完成したる上は、實物大の鉄塔機構に對して充分なる實験をなし、其の他風圧に關する諸種の實験を徹底的に行ひたいと念願するのである。如斯第3回、第4回、と風洞實験を行ふか、若くは其の目的に合した信頼すべき資料を得たならば、本文の風圧に關する提案は或は修正されるかも知れぬ。之を要する

に、室戸颶風に依る鉄塔被害に鑑み、現行標準に依る風圧に關する鉄塔設計を再検討する必要ありと認められ、本文記述の如く種々検討したる結果風圧の根據に就き是正を要する點は認めらるゝも、究極の結論たる鉄塔の強度に關しては、現行標準に依るも何等危惧の念を抱くに及ばないものと信ずる。併し是正すべき點を此の儘現状に放置することは技術上好ましからぬことであるから、實用的價値を損ぜない限り成るべく設計を合理化することが望ましいのである。

## 12. 用語の意義

本文に於て使用した用語の意義を念のため茲に一括して再録する。第1回風洞實驗の際公表せし論文（電氣學會雑誌第54卷第556號参照）中にも此の用語を列舉したが、其の後少しく之を加除修正するを可とし、傍々茲に再録することにした次第である。

素 材： 鉄塔に使用する材料であつて、其の加工前のもの

部 材： 素材に加工し、之を組み立て鉄塔機構を構成するもの

主 材： 部材の主要なる骨幹をなすもの、即ち鉄塔機構の隅柱に用ひらるゝもの

副 材： 主材を除いた部材を總稱するのであつて、主材と組み合はせて機構を完成するもの、而して假令大きな部材でも、それが鉄塔機構の主要なる骨幹をなすものでなければ、主材とは云はない。

水平材： 副材の中で水平の位置に取付けらるゝもの水平材は主として抗圧材となつて居るものであるから、全く水平の位置でなくとも、水平に近い位置に取付けられ且つ抗圧材として使用せらるゝ場合には、之を水平材と稱して差支ない。

斜 材： 副材の中で斜の位置に取付けらるゝもの。斜材は主として機構の對角點を連結し其の性質は抗張材に屬するものであるが、水平材を用ひざる機構にありては抗張材、抗圧材兼用の斜材を用ふる場合もある。

補助材： 長き水平材の彎曲を防ぐため之を支持するもの。補助材は鉄塔機構としての直接作用に關與する部材でないから、之を鉄塔副材の中に入れて置かないで特別の部材として取扱ふ方が合理的である。

機構及構區： 機構とは抗張材及抗圧材を適當に組み合はせ以て機構体の強度を保つべく部材を以て構成せられたるものと云ひ、構區とは機構構成上の1區を云ふ。機構及構區は通常は鉄塔機構の1面に關するものであるが、4面機構即ち立体的機構に關しても適用されるのである。後者の場合には前者の場合と區別するため立体機構のことを鉄塔、立体構區のことを塔區と稱してもよろしい。

外郭面積： 構區又は機構の外郭を限る面積

充實率： 構區又は機構内の部材の實面積（垂直接影面積）と其の外郭面積との比率

間隔倍数： 部材の間隔即ち一つの部材の線端と他の部材の線端との間の空隙部分の長さを其の部材の幅員にて除したるもの。鉄塔機構の場合には各部材の平均幅員を探るべきであるが、實用向には、主材の幅員と其の間隔との關係だけで充分である。それであるから一般に間隔倍数といへば、主材の間隔倍数を云ふのである。主材の幅員及間隔が一定して居ない場合には主材幅員を異にする構區毎に平均間隔倍数を算出し、之に對し各構區の長さの按分に依り全体を平均したるものを探る。

風圧倍数： 正方形基面を有する鉄塔に於て、其の對邊方向の風圧を考ふる場合に鉄塔の風圧を機構一面のみの風圧の倍數にて表はすもの

部材の平均幅員： 鉄塔部材の平均幅員と云ふのは、幅員を異にする各部材の幅員に對し各部材の長さの按分に依り全部の幅員を平均したるものと云ふ。換言すれば部材の總面積を部材の總長にて除したものと云ふ。