

資料

台風 0221 による送電鉄塔の被害と水郷地区の強風分布特性

Damage of Power Transmission Towers Due to Typhoon 0221 and Characteristics of Strong Wind in the Suigo Area

石原 孟*¹ 山口 敦*² 由田秀俊*² 藤野陽三*³

Takeshi ISHIHARA, Atsushi YAMAGUCHI, Hidetoshi YOSHIDA, Yoza FUJINO

1. はじめに

2002年10月1日の夜、強い勢力を維持したまま関東地方を直撃した台風21号は大規模停電、交通機関の混乱、農作物への被害など、各地に大きな被害をもたらした。

消防庁の発表によると、台風21号による死者は5人、負傷者は88人、全壊(7棟)、半壊(11棟)と一部損壊の住宅は383棟、床上と床下浸水の被害を受けた住宅は1555棟に上った¹⁾。非常に強い風の影響で、送電鉄塔の倒壊や自動車運搬船の座礁も発生した。また大雨の影響で、関東地方および静岡県を中心に土砂災害や浸水害が発生し、避難勧告や自主避難が行われた。

台風21号の上陸に伴い、最も深刻な被害を受けたのは東京電力管内の送配電設備である。東京電力が10月2日発表した台風21号の設備被害状況によると、送電設備被害は茨城県鹿嶋市と潮来市周辺に集中し、275kVの香取線の鉄塔6基が倒壊、1基が折損したほか、66kVの湖南線の鉄塔1基が倒壊、1基が折損した。供給エリア内の配電設備では電柱倒壊または折損が38基、高圧線断線が135ヵ所に上った。2日午前8時までに停電した延べ軒数は608,130軒に達し、その内訳は千葉県が298,800軒、茨城県は252,700軒であった²⁾。

筆者らは台風が上陸した翌日10月2日午前には茨城県潮来市に向かい、送電鉄塔の被害調査を行った。その後、鉄塔倒壊現場周辺の風観測データの収集(10月3日)、

鉄塔倒壊原因の調査(10月6日)、鉄塔倒壊方向の測定(10月7日)など、計4回の現場調査を実施したと共に、台風シミュレーションや3次元気流解析による災害発生時の強風分布の推定も行った。

以下、これらの調査資料に基づき、送電鉄塔の被害状況、倒壊原因及び鉄塔倒壊時の現場周辺の強風分布について報告する。第2章では台風21号の気象条件を概説し、第3章では現地調査の概要及び主要な調査結果を報告する。そして、第4章では送電鉄塔被害の全容及び鉄塔倒壊のシナリオを説明する。最後に、第5章では台風21号による水郷地区の強風特性及び鉄塔倒壊現場周辺の強風分布を明らかにする。

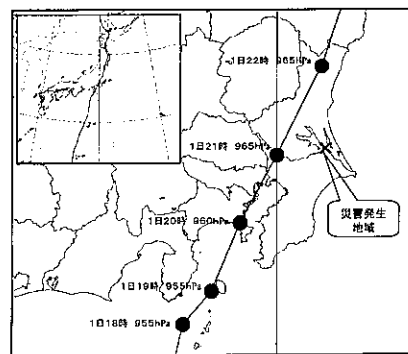


Fig. 1 台風経路図
(Path of Typhoon 0221)

*¹ 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 助教授 工博
Associate Professor, Dr. Eng., Department of Civil Engineering, University of Tokyo
*² 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 大学院生
Graduate Student, Department of Civil Engineering, University of Tokyo
*³ 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 教授 Ph. D
Professor, Ph. D., Department of Civil Engineering, University of Tokyo

2. 気象概況

台風21号は9月27日15時マリアナ諸島付近で発生し、9月30日には沖ノ島島付近で中心気圧935hPaの非常に強い台風となった³⁾。台風は強い勢力を保ちながら北上し、10月1日20時半頃に神奈川県川崎市付近に上陸した。Fig.1には台風の経路を示し、図中の数字は日時と台風の中心気圧を表す⁴⁾。送電鉄塔が倒壊した10月1日夜9時27分ごろには台風21号の中心は災害発生地点の左側に位置し、またその約10分前に災害発生地点に最も接近していることが分かる。

台風21号は関東地方に上陸した台風としては戦後最大級と言われ、上陸した時の中心気圧960hPaであった。台風が上陸した後も、強い勢力を保ったまま、茨城県を縦断した。Fig.2には10月1日21時に気象衛星「ひまわり」が撮影した赤外画像を示し、同時刻の地上天気図をFig.3に示した⁵⁾。

台風21号の接近通過に伴い関東地方では非常に強い風が吹き、千葉県の銚子地方気象台では21時10分

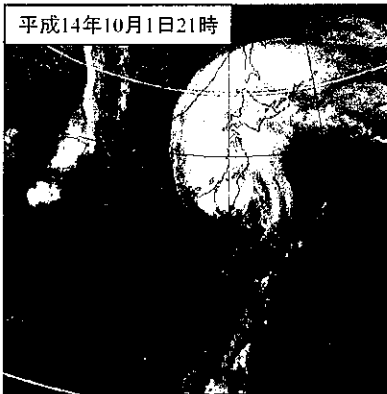


Fig. 2 気象衛星の赤外画像
(Infrared photography by the weather satellite)

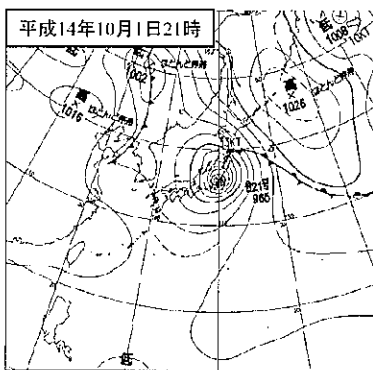


Fig. 3 10月1日21時の地上天気図
(Weather chart at 21:00, Oct. 1)

Table 1 従来の極値を更新した気象官署と最大瞬間風速
(Gust recorded at the Meteorological stations where the gusts exceeded the past extreme value)

官署名	極値更新値 (m/s)	従来の年極値 (m/s)	統計 開始年
大島	南南東 45.7	北北東 43.9	1991
銚子	南 52.2	北北西 51.9	1937
勝浦	南西 50.5	南南西 43.0	1941

に10分間の平均風速29.8m/s、21時20分に最大瞬間風速52.2m/s、1937年統計開始以来の最大瞬間風速を記録した。また東京都の大島測候所では18時26分、千葉県の勝浦測候所では21時34分に過去最大の最大瞬間風速を記録した。Table1には従来の極値を更新した気象官署とその最大瞬間風速を示す。

茨城県でも、台風の接近に伴い19時頃から南よりの風が強くなり、台風の通過後は西よりの風になり24時頃まで風の強い状態が続いた。災害発生地域に近い鹿島南部地区消防事務組合・消防本部の屋上に設置された風速計(地上22mの高さ)では21時に10分間の平均風速28.1m/s(南風向)と最大瞬間風速40.8m/s(南風向)を記録した。また鉄塔が倒壊した時刻と見られる9時27分前後では現場付近の風が最も強かった。国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦工事事務所の観測によると、北浦釜谷沖観測所(地上11.5mの高さ)では9時20分に10分間の平均風速29.5m/s(南南東風向)、霞ヶ浦湖心観測所(地上10mの高さ)では9時40分に10分間の平均風速28.5m/s(南南西風向)を観測している。最大瞬間風速は、一般的に10分間平均風速の1.4~2倍と言われていることから、災害発生時の現場付近の最大瞬間風速は50m/sを超えていたと推定される。実際、香取線19号鉄塔の隣にある鹿島線鉄塔上に設置された東京電力の風速計では9時20分までの10分間に最大瞬間風速56.7m/s(南南東風向)を観測した(NHK、特報首都圏10月11日)。

台風21号による水郷地区の強風特性及び鉄塔倒壊現場周辺の強風分布は第5章で詳しく説明する。

3. 被害調査の概要

第1章でも述べたように、筆者らは台風が上陸した翌日10月2日から10月7日までに計4回の現場調査を実施した。Table2にはこれらの現地調査の目的、調査項目及び現地調査から得られた主要な結果をまとめている。

第1回目の現地調査では鉄塔被害全容の把握に重点を置き、ヒアリング調査などを通じて、鉄塔倒壊の時刻や倒壊時の風向の把握に努めた。第2回目の現地調査では災害発生地点周辺の市町村役場や消防事務組合

Table 2 現地調査の概要
(Summary of field surveys)

	第1回目 (10月2日)	第2回目 (10月3日)	第3回目 (10月6日)	第4回目 (10月7日)
メンバー	石原, 山口, フック	嶋田	石原, フック	山口, 由田, ホム, フック
調査目的	鉄塔被害全容の把握とヒアリング調査	現場周辺の地図と風観測データの収集	鉄塔の構造及び鉄塔の倒壊原因の調査	香取線と湖南線の鉄塔転倒方向の調査
調査内容	<ul style="list-style-type: none"> 香取線 20号～25号鉄塔と湖南線 23号鉄塔の写真撮影と目視調査 香取線 23号と26号鉄塔付近にてヒアリングと建物被害調査 行方南部消防事務組合と鹿島南部地区消防事務組合を訪問 	<ul style="list-style-type: none"> 現場周辺市町村役場にて地図を購入 国土交通省霞ヶ浦工事事務所から風観測データを収集 現場周辺市町村の消防本部からの風観測データを収集 	<ul style="list-style-type: none"> 香取線 22号鉄塔の調査と写真撮影, 支柱材と基礎の調査 香取線 20号, 21号, 23号～26号鉄塔の基礎と支柱材の調査 	<ul style="list-style-type: none"> 香取線 26号と19号鉄塔の調査 香取線 20号～25号鉄塔の転倒方向の調査 湖南線 23号鉄塔の転倒方向の調査 湖南線 22号鉄塔の調査
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> 鉄塔被害の全容を把握 香取線 22号鉄塔基礎の浮き上がりを発見 倒壊時刻と倒壊時の風向を判明 	<ul style="list-style-type: none"> 潮来市, 鹿島市, 神栖町から都市計画図を入手 国土交通省関東整備局霞ヶ浦工事事務所から風観測データを入手 鹿島南部地区消防本部から風観測データを入手 	<ul style="list-style-type: none"> 各鉄塔の基礎, 支柱材を判明 鉄塔倒壊の直接の原因は香取線 22号鉄塔であると推定 	<ul style="list-style-type: none"> 香取線と湖南線の各鉄塔の転倒方向を判明

を訪ね、都市計画図の入手や風観測データの収集を行った。また国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦工事事務所を訪ね、風観測データを収集した。第3回目の現地調査では鉄塔構造や鉄塔倒壊原因を調べ、鉄塔倒壊の直接の原因は22号鉄塔にあると推定した。そして、最終回の現地調査では、鉄塔の転倒方向の測定を行った。

以上の4回の現地調査により、下記の資料を収集することができた。1番目、鉄塔倒壊地点を含むその周辺地域における11箇所の風観測データを入手できた。2番目、香取線及び湖南線で倒壊または折損した9基の鉄塔の被害写真、転倒方向、鉄塔の上部構造と基礎に関するデータを収集できた。3番目、潮来市、鹿島市、神栖町の都市計画図を入手し、鉄塔倒壊現場の風上側に湖や一級河川など地表面粗度の小さい地域があることが分かった。

4. 送電鉄塔被害調査の結果

4.1 送電鉄塔の被害状況

以上の調査資料に基づき、送電鉄塔被害の全容を明らかにした。Fig.4には台風21号により倒壊または折損した送電鉄塔の位置、転倒方向及び各鉄塔の写真を示す。香取線20号鉄塔～25号鉄塔の6基と湖南線の23号鉄塔の計7基が倒壊し、香取線の19号鉄塔と湖南線の22号鉄塔の計2基が折損した。香取線21号鉄塔～24号鉄塔は風向きと同じ方向に転倒しているのに対して、香取線

20号鉄塔と25号鉄塔はその反対方向に倒れている。また香取線20号鉄塔～25号鉄塔の中では22号鉄塔だけが根元から折れた。

第1回目の現地調査及びその後の分析から、台風21号による鉄塔倒壊の直接の原因は香取線の鉄塔にあると推定されたため、本資料は香取線を中心にまとめた。

Table 3には香取線20号～25号鉄塔の構造概要を示す。香取線鉄塔の6基の高さは58mから94mまで(朝日新聞10月11日)変化するほか、各鉄塔の支柱材の本数と基礎についても違いがある。例えば、曲がり角に位置する20号と25号鉄塔の支柱材の部材数が2本であるのに対して、残りの4基の鉄塔では1本である。また鉄塔倒壊の直接の原因と推定された22号鉄塔の基礎は井筒型基礎(読売新聞10月19日)であるのに対して、その隣の23号鉄塔はマット型基礎となっている。一般に、マット型基礎は不等沈下が発生しやすい場所に使用される。

Table 4には香取線20号～25号鉄塔間の設備概要を示す。香取線20号～25号鉄塔間の径間長は370mから525mまで変化している。これらの径間長は1万分の1潮来都市計画図³⁾により求めた。また香取線20号と25号鉄塔のがいし装置は耐張型であるのに対して、20号と25号鉄塔の間の4基はすべて懸垂型である。一般に、耐張型のがいし装置は線路の方向が変化する場所に使われ、懸垂型のがいし装置は直線の部分に使用される。

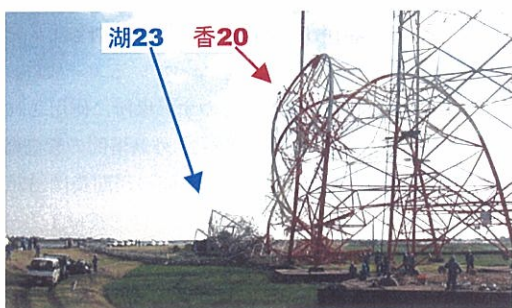
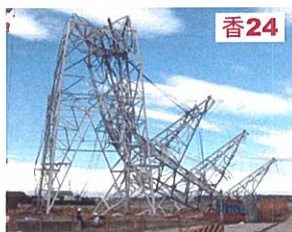
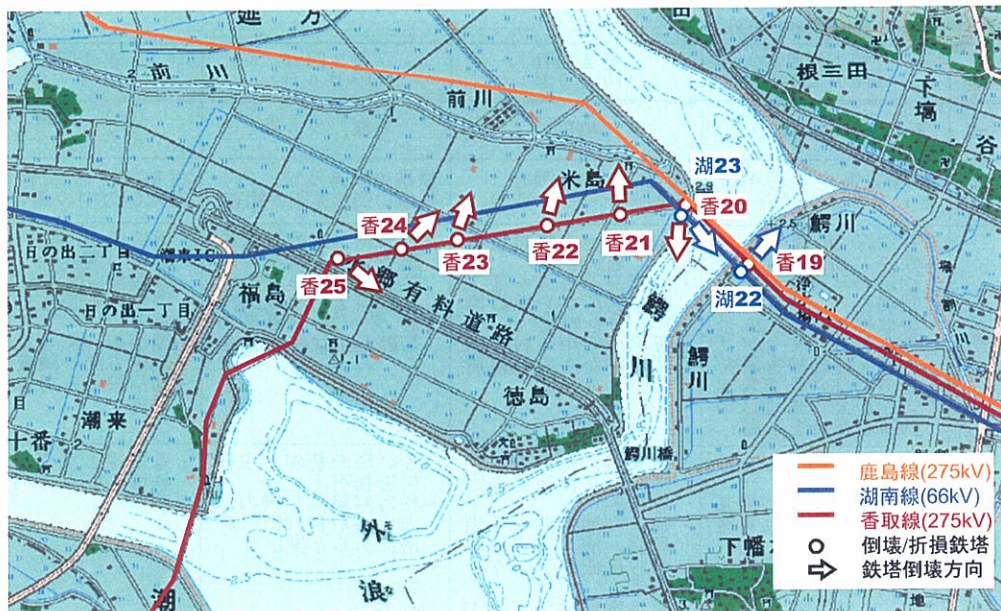


Fig. 4 倒壊した送電鉄塔の分布とその被害状況
(Distribution and damage of collapsed power transmission towers)

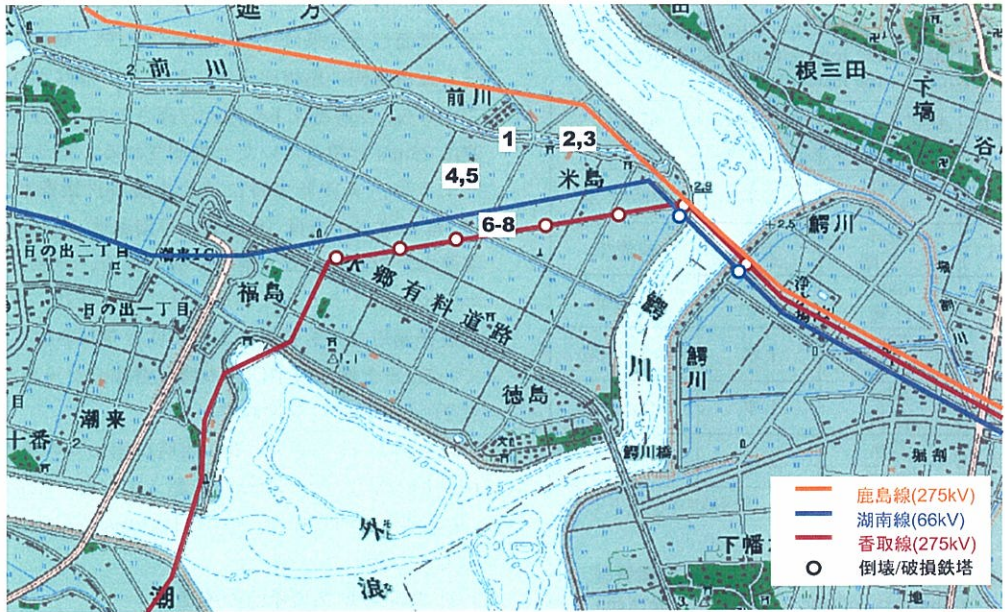


Fig. 5 送電鉄塔の倒壊現場に近い場所での建屋と樹木の被害状況
(Damage of houses and trees near the site of collapsed power transmission towers)

Table 3 香取線 20 号～25 号鉄塔の構造概要
(Summary of the structures of power transmission towers from No.20 through No.25 of the Katori Line)

項目 番号	鉄塔の高さと 転倒方向	主柱材の 部 材 数	基礎の タイプ
No.20	94m 183 度	2 本	マット型
No.21	62m -1 度	1 本	井筒型
No.22	68m 15 度	1 本	井筒型
No.23	73m 19 度	1 本	マット型
No.24	58m 45 度	1 本	マット型
No.25	72m 129 度	2 本	-

注：転倒方向の定義は北を 0 度，時計回りを正とした。

Table 4 香取線 20 号～25 号鉄塔間の設備概要
(Summary of the equipments between power transmission towers from No.20 through No.25 of the Katori Line)

項目 番号	径間長と 電線直径	導 体 数 と回線数	がいし装置
No.20～ No.21	450m 34.2mm	4 導 体 2 回線	耐張型－懸垂型
No.21～ No.22	440m 34.2mm	4 導 体 2 回線	懸垂型－懸垂型
No.22～ No.23	525m 34.2mm	4 導 体 2 回線	懸垂型－懸垂型
No.23～ No.24	400m 34.2mm	4 導 体 2 回線	懸垂型－懸垂型
No.24～ No.25	370m 34.2mm	4 導 体 2 回線	懸垂型－耐張型

4.2 建物と樹木の被害状況

送電鉄塔の倒壊原因を述べる前に、まず現地調査から得られた鉄塔倒壊地点周辺での建物や樹木などの被害を調べ、災害発生当日の風向と風の強さを明らかにする。

Fig.5 には建物と樹木などの被害状況と位置を示す。被害状況から、鉄塔倒壊の当日にこの地域では非常に強い風が吹いていたことが分かる。

まず、地点 1 で樹木，地点 6 で生垣が北方向に倒れていることから、災害発生当時の風向が南よりであったと推測される。これは地点 5 で農機具倉庫の東側の壁が剥がされていることに対応している。すなわち、南よりの強風によって建物の側面に強い負圧領域が生

じ、壁が剥がされると説明できる。更に、地点 4 で本瓦が妻面付近で飛ばされていることや、地点 7 でスレート瓦が南側の屋根面全体にわたって飛ばされていることから、当時地上 6m 付近の高さでの 10 分間平均風速は 25m/s を超えていたと推測される。第 2 章に述べたように、災害発生時には北浦釜谷沖観測所（地上 11.5m の高さ）では 10 分間の平均風速 29.5m/s（南南東風向）を記録した。建物や樹木の他、地点 8 ではビニールハウスのビニールが完全に飛ばされ、地点 3 では農作業用倉庫も強風によって吹き飛ばされて転倒している。また潮来町消防団の機材倉庫のシャッター（地点 2）も強風により壊れている。

以上のことから、災害発生当時は南よりの風が吹き、10 分間の平均風速は 25m/s を超えていたと推定される。この結果は 5.1 節に述べる災害発生時の風観測データとよく一致している。

4.3 送電鉄塔倒壊原因の推定

4.1 節でも説明したように、香取線 20 号鉄塔～25 号鉄塔の中では 22 号鉄塔の倒壊様子が明らかに他の鉄塔と異なる。22 号鉄塔以外の 5 基は、鉄塔の中程（腕金の下の部分）から折れていたのに対して、22 号鉄塔だけは根元から折れ、塔部は直線上に横倒しになっていた（Fig.4）。また今回の調査では、香取線 22 号鉄塔にのみ、基礎に損害が見られた。現地調査の結果によると、22 号鉄塔の風上側の 2 脚が数 10cm（C 脚）と（B 脚）持ち上がっていた。このことから、まず 22 号鉄塔が強い風荷重を受けた際に、風上側の基礎が強い引張力に耐え切れずに浮き上がり、それにより鉄塔自身の重さと風荷重が風下側の 2 脚に集中し、鉄塔が倒壊したと推定され、また 22 号鉄塔の倒壊に伴い、それに引きずられる形で他の 5 基の鉄塔が倒れたと推測される。Fig.6 には香取線 22 号鉄塔の主柱材の倒壊方向を示し、風上側の基礎が浮いた際に風下側の 2 脚が非常に強い圧縮力を受け、根元から折れ、風上側に倒れている。

次に、倒壊した 6 基の鉄塔の転倒方向に着目する。香

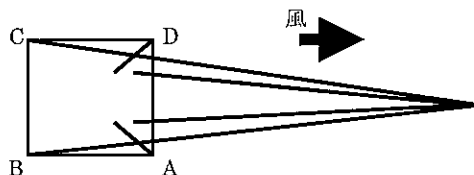


Fig. 6 香取線 22 号鉄塔の倒壊メカニズム
(Collapse mechanism of the transmission tower No. 22)

Table 5 台風シミュレーションに使用したパラメータの一覧表
(Summary of parameters used in typhoon simulations)

日本時間 (hour)	緯度 (deg)	経度 (deg)	進行方向 (deg)	移動速度 (m/s)	中心気圧 (hPa)	中心気圧差 (hPa)	最大旋衡風速半径 (km)
19	34.7	139.3	61.49	15.28	955	52.8	72.92
20	35.3	139.6	64.74	15.28	960	47.4	77.57
21	35.9	140.0	62.79	16.67	965	41.8	85.41
22	36.7	140.5	67.07	18.06	965	39.9	78.54
23	37.4	140.8	78.17	19.44	970	37.0	107.85
24	38.2	140.9	75.47	20.83	970	36.7	103.59

取線 21 号鉄塔～24 号鉄塔の 4 基は北～北東に向かって倒れていたのに対し、その両端に位置する 25 号鉄塔は南東、20 号鉄塔は南に向かって倒れている。鉄塔倒壊時の風向が南よりであったことを考えると、香取線 20 号鉄塔と 25 号鉄塔の倒壊は鉄塔自身が受ける風圧力以外の力によるものと推測される。香取線 21 号鉄塔～24 号鉄塔が一直線上にあるのに対して、20 号鉄塔と 25 号鉄塔は曲がり角に位置する。21 号鉄塔～24 号鉄塔の倒壊に伴い、20 号鉄塔と 25 号鉄塔は送電線を通して伝わる引張力により倒壊したと推測される。そのメカニズムは香取線 20 号鉄塔を例にして Fig.7 で説明する。香取線 20 号鉄塔は図に示すように、強い風による風圧力を受けるほか、送電線を通して 19 号鉄塔と 21 号鉄塔からくる強い引張力も受けている。今回のような 4 導体の場合に送電線からくる張力は非常に大きいため、22 号鉄塔が倒壊すると、送電線を通して伝わってくる引張力が更に大きくなり、20 号鉄塔は図に示すような合力の方向に倒壊したと考えられる。従って、香取線 20 号鉄塔の転倒方向は風向ではなく、鉄塔の両側にある送電線がなす角度によって決定されている。香取線 25 号鉄塔の転倒方向についても同様なメカニズムで説明できる。

最後に、湖南線 23 号鉄塔は香取線 20 号鉄塔が倒壊した際に下敷きになり、倒壊したと推測される。鰯川対岸の湖南線 22 号鉄塔は湖南線 23 号鉄塔の倒壊によ

り、送電線を通して強い引張力を受け、北方向に倒れ、その際に隣の香取線 19 号鉄塔に接触し、香取線 19 号が損傷を受けた。恐らく香取線 19 号鉄塔が近くになければ、湖南線 23 号鉄塔も倒壊したと思われた。

以上、現地調査から推測された香取線と湖南線の鉄塔倒壊のシナリオである。このシナリオは現時点ではまだ推測に過ぎない。今後、数値解析などを行うことにより鉄塔倒壊の原因を明らかにしたい。

5. 台風 0221 による水郷地区の強風特性

5.1 台風シミュレーションによる水郷地区の強風予測

第 2 章でも説明したように、水郷地区には台風の接近に伴い、南よりの風が強く吹いていた。Fig.8 には 21 時 00 分と 21 時 30 分における風速分布を示す。図中の実線は台風の経路、黒丸は台風の本心を表す。風は渦巻きながら、台風の本心に向かって吹き込んでいる様子が見える。鉄塔倒壊地点付近では南よりの風が吹いている。

台風 21 号が接近時における水郷地区の強風特性を詳しく調べるために、台風シミュレーションにより地上風を求めた。Table 5 には台風シミュレーションに使用したパラメータの一覧を示し、台風の本心位置、中心気圧、移動速度に関しては気象庁が発表した値をそのまま使用した。最大旋衡風速半径と中心気圧差は Schloemer の式を用いて、気象官署で観測された気圧データから非線形

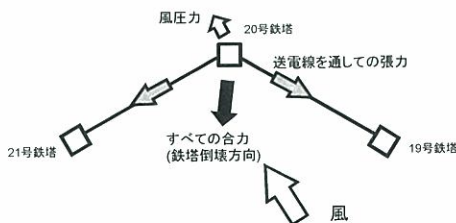


Fig. 7 香取線 20 号鉄塔の倒壊メカニズム
(Collapse mechanism of the transmission tower No. 20)

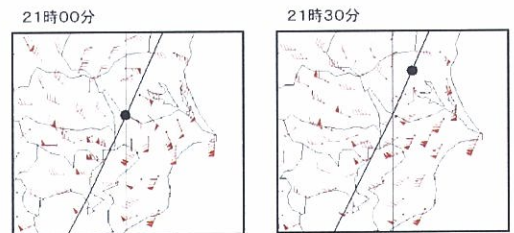


Fig. 8 台風 21 号時の風速分布
(Distribution of mean wind speed during Typhoon 0221)

Table 6 風観測地点の一覧表
(Summary of observation sites)

	緯度	経度	観測高さ
掛馬沖	36° 03' 00"	140° 15' 00"	10.5m
湖心	36° 02' 04"	140° 24' 26"	10.0m
鱒川	35° 55' 58"	140° 37' 37"	約 70m
神栖	35° 53' 07"	140° 40' 12"	22.0m

最小二乗法により同定した。その際には台風の中心から半径 500km 以内の気象官署の観測値を使用した⁶⁾。

Table 6 には風観測地点の位置と観測高さを示す。ここで、掛馬沖と湖心は国道交通省関東地方整備局霞ヶ浦工事事務所の風観測地点、鱒川は東京電力の風観測地点(鹿島線鉄塔)、神栖は鹿島南部地区消防本部の風観測地点を表す。各観測地点における風向別粗度は国土数値情報の 100m メッシュ土地利用データにより粗

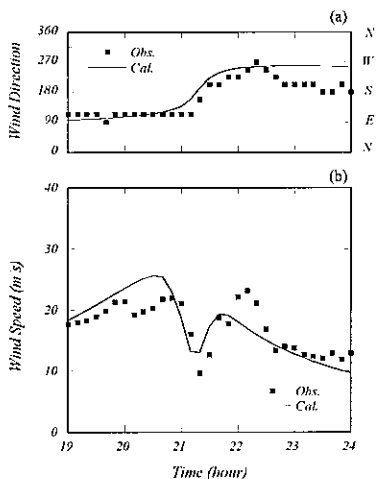


Fig. 9 掛馬沖観測点での風向・風速の時間変化
(Time variation of the computed and observed wind direction and velocity at the Kakeuma observation site)

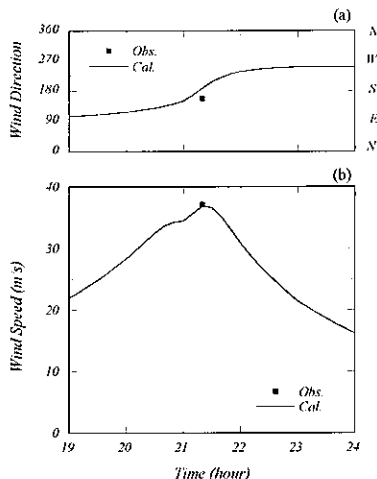


Fig. 11 鱒川観測点での風向・風速の時間変化
(Time variation of the computed and observed wind direction and velocity at the Wanikawa observation site)

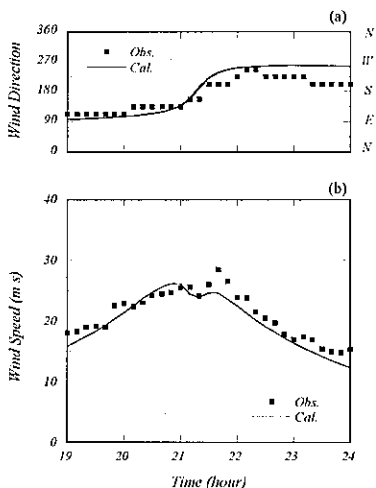


Fig. 10 湖心観測点での風向・風速の時間変化
(Time variation of the computed and observed wind direction and velocity at the Koshin observation site)

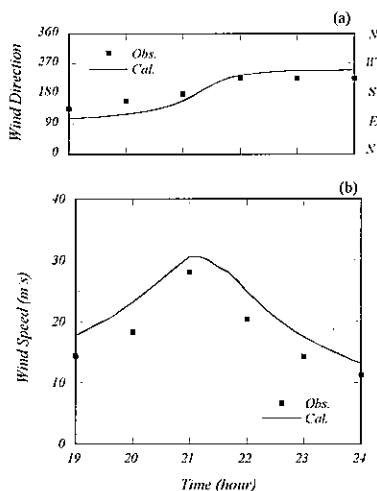


Fig. 12 神栖観測点での風向・風速の時間変化
(Time variation of the computed and observed wind direction and velocity at the Kamisu observation site)

度長に変換し求めた (Table 7)。その際には観測地点を中心に半径 8km までの上流側の地表面粗度を考慮した。また台風に伴う風速場は石原ら⁷⁾により提案された台風モデルを用いて求めた。

Fig.9～Fig.12 には各観測地点での風向・風速の時間変化を示し、図中の四角は観測値、実線はシミュレーション結果を表す。また各観測地点の位置を Fig.13 に示した。

まず台風の経路に近い掛馬沖観測点では台風の接近に伴い風速が増大し、21 時を過ぎた時点で一度小さくなり、その後再び増大する。台風シミュレーションはこの傾向を捕らえている (Fig.9)。一方、湖心観測点では台風の経路からすこし離れているため、台風の接近に伴う風速の減少は殆ど見られず、シミュレーションの結果も観測値とよく一致している (Fig.10)。

次に、災害発生地点に最も近い鱒川観測点では鉄塔倒壊時刻の前後に風速が最大となり、その値は 37m/s を超えている。台風シミュレーションの結果はこの観測値 (乱れの強さ 15%、ピークファクタ 3.5 を仮定して最大瞬間風速から推定した値) とよく一致している (Fig.11)。最後に、神栖観測点では台風の接近に伴う平均風速が 21 時ごろに最大となり、台風シミュレーションもこの傾向を再現している。しかし、風速の値は観測より少し高めである (Fig.12)。その理由としては神栖町の粗度が近年の都市化により大きくなっていることが挙げられる。

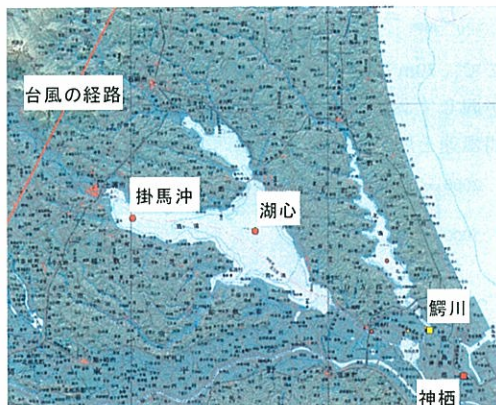


Fig. 13 観測点の位置
(Locations of observation sites)

5.2 3次元気流解析による現場周辺の強風分布の推定

5.1 節でも述べたように鉄塔倒壊地点が台風進路の右側に位置するため、鉄塔倒壊時の現場周辺には強い風が吹いていた。しかし、災害発生地点に非常に強い風が吹いた理由は台風の性質のほか、地点周辺の地形

や地表面粗度にも関係している可能性がある。今回の災害発生地点は関東平野に位置するため、地形による風速の増加は小さいと予測される。しかし、Fig.14 に示すように、地点周辺の土地利用は湖、河川、市街地、農地などが複雑に入り組んでいるため、地表面粗度の違いによる局所的な風速の増大が予想される。そこで、本調査では3次元気流解析を行い、災害発生時の現場周辺の強風分布を詳しく調べた。解析は3次元風況予測プログラム MASCOT を用いた^{8)・9)}。

Table 7 土地利用と粗度長との関係
(Relationship between land use and roughness length)

	土地利用区分	粗度長(m)
1	田	0.01
2	畑	0.01
3	果樹園	0.1
4	その他の樹木畑	0.1
5	森林	1.0
6	荒地	0.01
7	建物用地[A]	1.0
8	建物用地[B]	0.4
9	幹線交通用地	0.01
10	その他の用地	0.01
11	湖沼	0.001
12	河川敷[A]	0.001
13	河川敷[B]	0.001
14	海浜	0.01
15	海水域	0.001

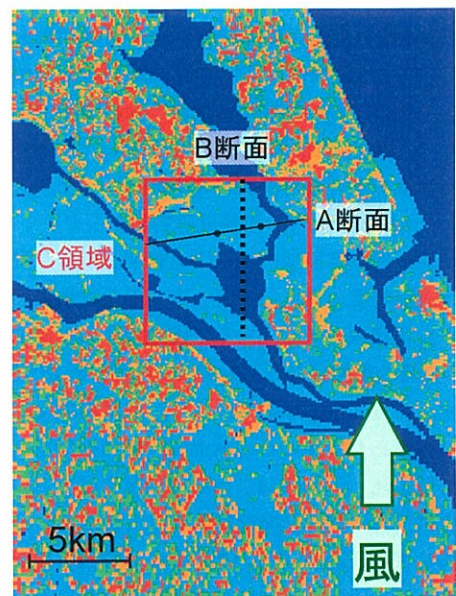


Fig. 14 解析領域内の地表面粗度
(Roughness length in the computational domain)

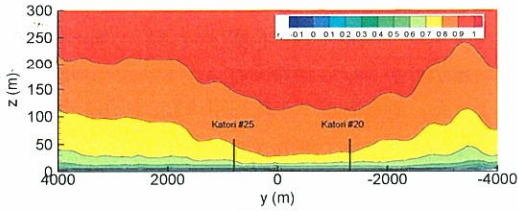


Fig. 15 A 断面内の平均風速の分布
(Mean wind speed contours in the A section)

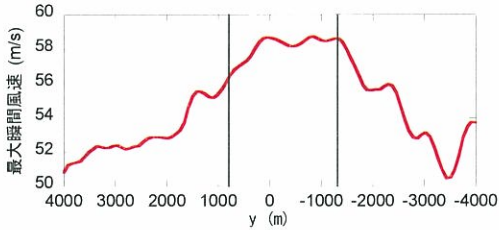


Fig. 16 A 断面内における高さ 70m での最大瞬間風速
(Maximum gust at the height of 70m in the A section)

災害発生地点を含む現場周辺の地表面粗度を求めるために、国土数値情報の 100m メッシュ土地利用データを用いた。土地利用から地表面粗度への変換は Table 7 に従って行った。また標高は国土地理院の 50m メッシュの数値標高データを用いた。

解析の対象領域は鉄塔倒壊地点を中心に 20km 四方の範囲とした。上流の地形と粗度の影響を考慮するため、対象領域の上流側には長さ 5km の付加領域を設けた。また解析対象領域の外側に幅 1km の緩衝領域を設置し、上流と下流側の緩衝領域内の地表面粗度を一定とした¹⁰⁾。水平方向の格子は 100m とし、鉛直方向は地表面に最も近い格子の高さを 5m とし、それより上は 1.1 倍の拡大率をもつ不等間隔格子とした。

Fig.14 には計算領域内の地表面粗度を示し、青い部分は地表面粗度の小さい水面、赤い部分は地表面粗度の大きい都市域を表している。図中の黒丸は倒壊した 6 基の鉄塔の両端にある香取線 20 号鉄塔と 25 号鉄塔を示す。この図から分かるように、鉄塔倒壊地点の南側には湖があり、更にはその風上側には利根川がある。周辺地域に比べ、災害発生地点での粗度は小さい。災害発生地点での風速分布を詳しく見るために、倒壊した鉄塔を含む断面内 (Fig. 14 の中の A 断面) の風速分布を Fig. 15 に示した。図中の風速は上空風より無次元化されており、色が赤い程風速が高い。周辺地域に比べ、鉄塔倒壊地点での風は、風上側に湖が存在することによって、1 割程度強くなっていることが分かる。

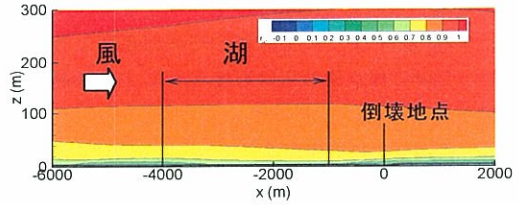


Fig. 17 B 断面内の平均風速の分布
(Mean wind speed contours in the B section)

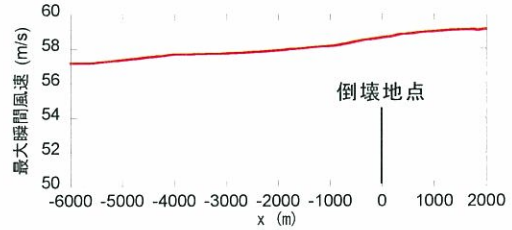


Fig. 18 B 断面内における高さ 70m での最大瞬間風速
(Maximum gust at the height of 70m in the B section)

第 2 章でも述べたように、現場付近にある東京電力鹿島線鉄塔上の風速計 (高さ約 70m) は災害発生直前までに最大瞬間風速 56.7m/s を観測した。この風速値を用いて、鉄塔高さ 70m での最大瞬間風速を推測してみた。最大瞬間風速の値は平均風速、ピークファクタと乱れの強さから式 (1) により求められる。

$$U_{\max} = \bar{U} (1 + gI_U) \quad (1)$$

ここで、70m 高さ付近でのピークファクタと乱れの強さが同じであると仮定すれば、鉄塔倒壊地点での最大瞬間風速と鹿島線鉄塔上の風速計から観測された最大

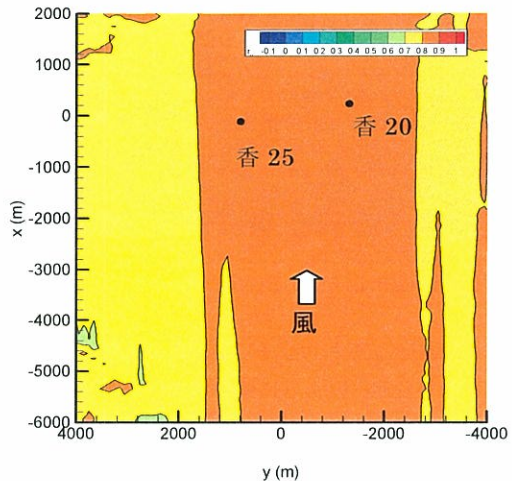


Fig. 19 C 領域内の平均風速の平面分布
(Mean wind speed contours in C domain)

瞬間風速の比は両地点での平均風速の比と等しくなる。

$$U_{\max}^{\text{site}} / U_{\max}^{\text{ref}} = \bar{U}^{\text{site}} / \bar{U}^{\text{ref}} \quad (2)$$

この関係を用いれば、鉄塔倒壊地点での最大瞬間風速は3次元気流解析から求められた平均風速の比と風速計により観測された最大瞬間風速から求めることができる。Fig.16にはA断面における高さ70mでの最大瞬間風速を示す。周辺地域に比べ、鉄塔倒壊地点では局所的に風速が大きく、最大瞬間風速は58.8m/sに達したことが分かる。

鉄塔倒壊地点の風上側にある湖の影響を詳しく見るために、Fig.14に点線で示したB断面内の風速分布を求め、Fig.17に示した。Fig.15と同様に風速は上空風により無次元化されている。地表面付近での風速は湖上で徐々に大きくなり、湖の背後で再び減少していることがわかる。しかし、高さ70mでの風速は湖の背後においても増大し続けている。Fig.18にはB断面内における70m高さでの最大瞬間風速を示す。湖上より、湖の背後での風速の増大が大きいことが分かる。すなわち、鉄塔倒壊当時にはこの地域の風が地上よりも鉄塔頂部の高さでより強く吹いていたと推定される。

鉄塔倒壊地点付近での増速の様子を面的に見るために、地上高さ70mの面内における風速分布を求め、Fig.19に示した。領域はFig.14の赤色の正方形で示したC領域に対応している。平均風速の変化は風方向には小さく、風直角方向に大きいことが分かる。また、鉄塔倒壊地点は風速の高い領域に位置する。Fig.14からも分かるように、災害発生地点の風上側には湖のほか、河川や水田など地表面粗度の小さい領域が広がっている。その結果、周辺地域に比べ、災害発生地点での風速が高くなり、風の通り道が形成されていると考えられる。

6. まとめ

関東地方に上陸した台風として戦後最大級と言われた台風21号により、送電鉄塔が9基倒壊または折損した。関東地方ではこのような大規模な大型鉄塔の倒壊は初めてで、その原因究明と再発防止は急務と言える。今回初めて台風災害に関する現地調査を実施した著者らは送電鉄塔の被害状況の把握及び鉄塔倒壊原因の解明に努めた。

今回の送電鉄塔の倒壊は幾つかの要因が重なって発生したと思われる。気象的には台風21号が関東地方に上陸した台風として戦後最大級であり、しかも移動速度は非常に速かった。また地理的には今回の災害発生地点は台風進路の右側に位置するため、鉄塔倒壊地点での風は非常に強かった。4回にわたる現地調査及び

その後の解析からは、以下の知見が得られた。

- 1) 鉄塔が倒壊した場所での架渉線は東西方向に延びているため、台風接近時の強い南風をまともに受けていた。また本解析により倒壊現場では高さ70mにおける最大瞬間風速が58.8m/sに達したと推定された。
- 2) 今回倒壊した7基の鉄塔の中では香取線22号鉄塔の倒壊だけは明らかに他の鉄塔と異なった。またその倒壊原因は風上側の基礎が浮き上がったことによると推定された。送電鉄塔の被害状況から判断すると、香取線22号鉄塔以外の鉄塔は、22号鉄塔の倒壊に引きずられる形で倒れたと推測された。
- 3) 3次元風況予測プログラムMASCOTを用いた気流解析の結果から、鉄塔倒壊地点での風速は周辺地域に比べ1割以上高く、しかもこの風速の増加は地表面付近よりも鉄塔頂部の高さで大きいことが分かった。鉄塔倒壊地点での風速増大は風上側の地表面粗度が周辺地域に比べ小さいことによるものである。

謝辞

本資料の作成にあたって、東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻修士1年のホ・タイ・ホーム氏と同工学部土木工学科4年のファ・フック・バン氏には現地調査及び資料作成の協力を受けた。また風観測資料の収集にあたって、清水建設(株)技術研究所嶋田健司氏にご協力を頂いた。国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦工事事務所の村岡基晴氏、行方南部消防署の真家正隆氏、鹿島南部地区消防事務組合の細田洋氏には貴重な観測資料を提供して頂いた。最後に、鉄塔被害現場付近に住む米島信次氏、大輪正二氏には災害発生時の状況について貴重な状況説明を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 消防庁：平成14年台風第21号による被害状況について(第7報)、<http://www.fdma.go.jp/>、2002年10月17日。
- 2) 電気新聞：送電鉄塔9基が倒壊、延べ60万軒が停電—東電、台風21号の被害状況、<http://www.shimbun.denki.or.jp/>、2002年10月3日。
- 3) 東京管区気象台：台風第21号に関する気象資料、<http://www.tokyo-jma.go.jp/>、2002年10月。
- 4) 東京管区気象台：平成14年10月1日に茨城県潮来市、鹿嶋市、神栖町で発生した風害について、<http://www.tokyo-jma.go.jp/>、2002年10月1日。
- 5) 潮来市役所建設課：1万分の1潮来都市計画図
- 6) 東京管区気象台：観測・統計データ、<http://www.tokyo-jma.go.jp/>

- 7) 石原孟, 松井正宏, 日比一喜: 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布性質, その2, 台風時の強風, 日本風工学会論文集, No.66, pp. 3-14, 1996.
- 8) 石原孟, 日比一喜: 急峻な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学会論文集, No.83, pp.175-188, 2000.
- 9) 石原孟: 複雑地形における局所風況測定と数値予測, 日本風工学会誌, No.91, pp.3-8, 2002.
- 10) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三: 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集 (投稿中)



(共同通信社の提供により)

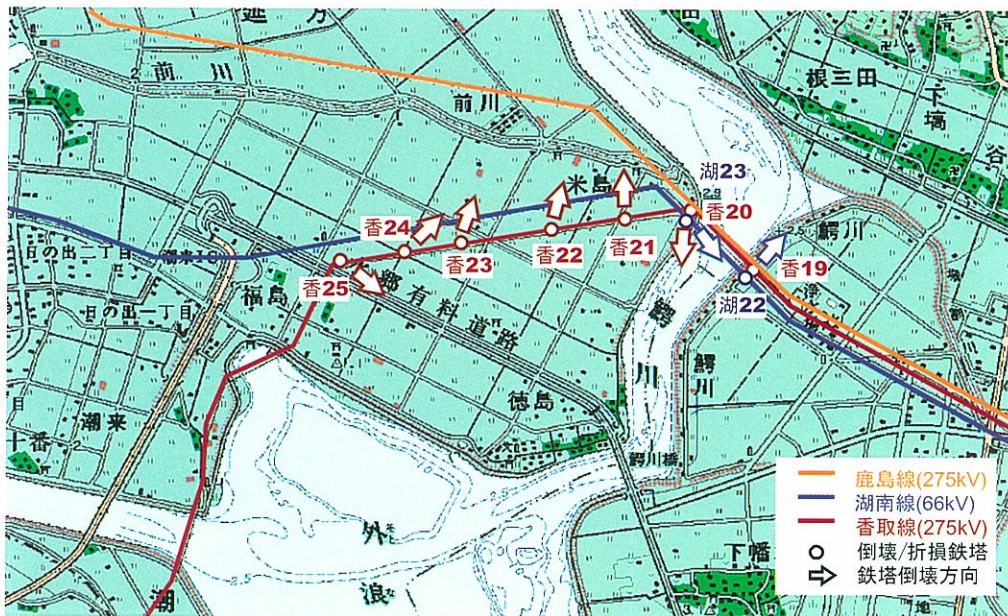
Fig. 1 台風21号の強風で倒壊した送電鉄塔

台風0221の強風による送電鉄塔の被害

2002年10月1日の夜、台風21号が強い勢力を維持したまま関東地方に上陸し、送電鉄塔の倒壊による大規模停電、交通機関の混乱、農作物への被害など、各地に大きな被害をもたらした。台風の接近通過に伴い関東地方では非常に強い風が吹き、千葉県銚子地方気象台では21時20分に最大瞬間風速52.2m/s、1937年統計開始以来の最大瞬間風速を記録した。

Fig.1には台風21号の強風で倒壊した送電鉄塔の現場を示し、潮来市延方丙から神栖町鰯川にかけての約2.5kmに立つ送電鉄塔9基が倒れた。写真は10月2日に午前7時、茨城県潮来市で共同通信社ヘリから撮影されたもので、手前の2基の鉄塔は香取線の20号鉄塔と湖南線の23号鉄塔、奥の5基は香取線の21号～25号鉄塔である。Fig.2には倒壊した送電鉄塔の分布図を示し、図中の矢印は送電鉄塔の転倒方向を表している。詳細については本号の資料「台風0221による送電鉄塔の被害と水郷地区の強風分布特性」を参照されたい。

(石原 孟 記)



(東京大学橋梁研究室の現地調査により)

Fig. 2 倒壊した送電鉄塔の分布図