

平成 18 年 11 月 北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査

報 告 書

社団法人 土木学会
北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査団

【目 次】

1. はじめに	1
2. 発生した竜巻について	3
【2章の参考文献】	5
3. 被害状況	6
3.1 被害の概要と対応状況	6
3.1.1 被害の概要	6
3.1.2 被災後の対応状況	14
3.2 土木施設への被害	16
3.2.1 道路標識柱の被害	16
3.2.2 電力・通信施設の被害	19
3.3 建築物の被害	25
3.3.1 建築物の被害	25
3.3.2 住民への聞き取り	39
3.4 飛散物	41
【3章の参考文献】	46
4. 標識柱の倒壊メカニズムの推定	47
4.1 概 要	47
4.1.1 竜巻による影響評価の難しさ	47
4.1.2 道路標識の断面諸元	48
4.1.3 道路標識材料の強度、弾性係数	49
4.1.4 道路標識の破壊状況	50
4.2 道路標識柱に作用したと思われる応力の推定	52
4.3 倒壊メカニズムに関する三次元弾塑性有限要素解析	54
4.3.1 解析モデル	54
4.3.2 材料物性値	55
4.3.3 解析方法	57

4.3.4	数値解析結果	58
4.3.5	まとめ	63
4.4	断面分析	64
4.4.1	供試材料	64
4.4.2	調査鋼管の概要と破断概況	65
4.4.3	破断面のマクロ観察	68
4.4.4	破断面のミクロ観察	73
4.4.5	調査鋼管の特性	77
4.4.6	破断の様相	80
4.4.7	まとめ	82
4.5	解析結果のまとめ	83
	【4章の参考文献】	83
5.	今回の災害から得られた教訓	84
5.1	日本の竜巻被害	84
5.2	竜巻対策の現状	92
5.2.1	構造物における竜巻対策	92
5.2.2	竜巻の発生予測	93
5.3	竜巻に対する防災対策に関する学術情報	95
5.4	米国における竜巻対策	97
5.4.1	トルネード・プロジェクト (THE TORNADO PROJECT)	97
5.4.2	事例 –イリノイ大学における竜巻に対する防災対策–	104
5.5	まとめ	106
	【5章の参考文献】	107
6.	おわりに	110

1. はじめに

本報告書は2006（平成18）年11月7日午後1時20分頃、北海道佐呂間町若佐地区に発生した大型の竜巻に関する調査報告書である。

土木学会では竜巻の発生直後、直ちに被害調査団派遣に関する検討に入り、土木学会災害緊急対応部門と協議の上、北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査団の派遣を決定した。

災害調査団では直ちに、11月8日から現地調査や関係者への聞き取り、資料収集などを数度に渡り実施するとともに、災害の全体像の把握や被害に関わる可能な範囲の数値解析などの検討、さらにはこれまでの竜巻に関連する資料の調査などに、多くの時間を費やした。

表-1.1に調査団のメンバーを示しているが、メンバーの皆様には多くのご苦勞をおかけした。またこれらの方々の他に、本災害調査及び結果の検討作業、さらには調査報告書の取りまとめ等において、さらに多くの方々のご支援をいただいた。これらの方々に深く感謝申し上げる次第である。

表-1.1 土木学会竜巻緊急災害調査団

職区分名	氏名	勤務先名称
団長	大島 俊之	北見工業大学
団員	藤野 陽三	東京大学
	岸 徳光	室蘭工業大学
	木村 吉郎	九州工業大学
	佐藤 昌志	国土交通省北海道開発局
	石川 博之	土木研究所寒地土木研究所
	横辻 宰	北海道電力(株)
	近藤 宏二	鹿島建設(株)
	安江 哲	(株)ドーコン
	三上 修一	北見工業大学
	宮森 保紀	北見工業大学

この竜巻により国道333号の新佐呂間トンネル工事（長さ4.1km）を施工していた工事事務所兼作業員宿舎2棟が吹き飛ばされ、工事関係者の9人が死亡、31人が重軽傷を負った。また、家屋の被害は全壊が43棟、半壊11棟、一部損壊55棟等で、さらに電柱が7本倒れ、約7時間にわたって停電し、約630戸が影響を受けた。

この日（11月7日）、私は関西空港から出張の帰りで、午前12時頃女満別空港に降り立った。この時の女満別空港周辺の温度は、ほとんど関西空港周辺の温度と変わらず、非常に生暖かく異常な温度（20℃くらい）であったことを記憶している。この日は終日忙しく、帰宅したのが午後7時であったが、この時初めてこの竜巻の被害を知った。翌日早朝、現地に出かけ、調査を開始したが、この時通過した佐呂間町と北見市の境界にあるルクシ峠から吹き下ろしている強い季節風の温度は前日経験した女満別空港の温度より10℃近く低いものだった。このような

局所的な温度差の自然環境はこの30年間近く経験したことのないものであった。

亡くなられた9名のトンネル現場の関係者の方々は、私ども土木業界関係の技術者の方々に、現場の第一線で現場を動かしておられた優秀な方々ばかりであり、ご家族の悲しみは察するに余りある。

私どもがこの竜巻の被害を調査し、報告書としてとりまとめをすることができ、今後への教訓として、少しでも将来への教訓を学び取ることができれば、亡くなられた9名の技術者の方々へのせめてもの慰みになるのではないかと考えている。ご家族に対しても本報告書をお届けしたいと考えている。

本報告書の作成過程において、これまでの竜巻についての調査研究資料を収集したが、竜巻の原因、構造物へ作用する状況など、竜巻については疑問が増加するばかりだった。今後のこの分野の研究の進展が、これを契機として進められるよう期待するものである。

2007年4月

北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査団

団長 大島俊之

2. 発生した竜巻について

竜巻の発生した2006年11月7日には、図-2.1の天気図に示すように、北海道の北の海上で猛烈に発達しつつある低気圧から南北にのびる寒冷前線が、西から東に通過していた。この低気圧は、7日03時からの24時間の間に、24hPaも発達し、いわゆる「爆弾低気圧」と呼ばれるものであった。また、当日09時500hPa面での高層天気図を見ると、 -30°C 以下の寒気を持つ気圧の谷が通過中であった²⁾。

北海道北東部はフェーン現象の影響で暖かく、寒冷前線の東側の暖域内において、雲頂の高い発達した積乱雲が発生した。図-2.2の13:30の降雨量を示すレーダー画像をみると、強い降雨域（丸印で囲った部分）が佐呂間町付近を通過しているのがわかる。

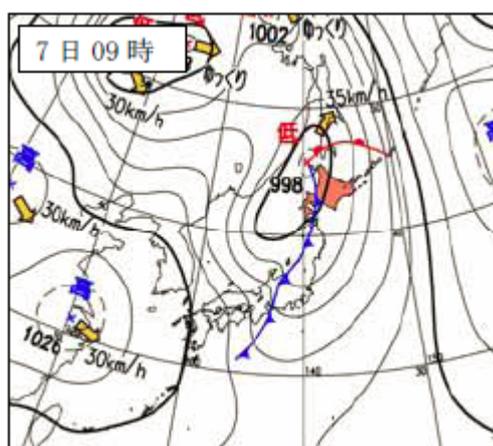


図-2.1 11月7日の地上気象図¹⁾

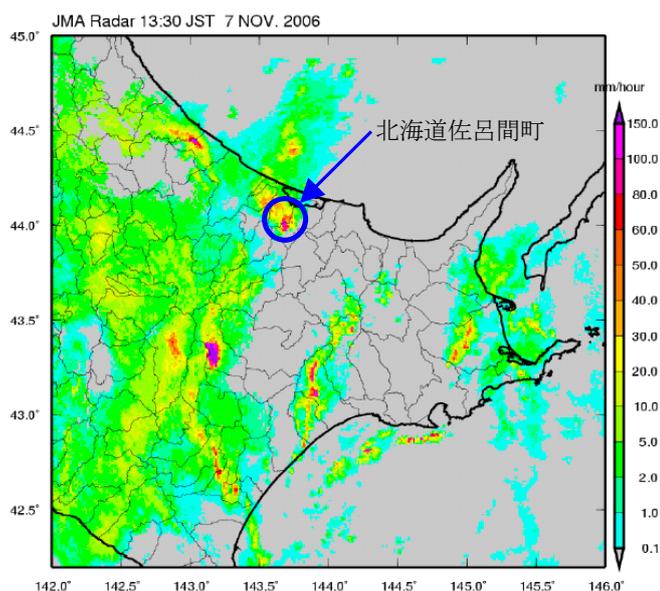


図-2.2 レーダー図（気象庁、11月7日13:30）

この降雨をもたらした、竜巻を生じさせた積乱雲は、7日10時50分頃に日高地方で発生し、北北東に進み、13時30分頃に佐呂間町に達した。通常の積乱雲の寿命は1時間程度であるが、この積乱雲は3時間程度の長い時間に渡って持続していた。またレーダーによる解析では、竜巻の発生前後では、雲の移動速度は70~90km/hであったと推定されている¹⁾。

また、竜巻発生時の気象状況を水平解像度250mの雲解像モデルを用いて数値解析により再現実験した結果では³⁾、竜巻をもたらした積乱雲は、スーパーセルという、巨大で強い上昇流を持ち、数時間と長寿命なタイプの積乱雲だったと推定されている。ただし観測データが少なかったことから、スーパーセルであったという確証は、今のところ得られていないようである。

気象庁は、2006年12月15日、この竜巻の強度はF3スケール（約5秒間の平均風速で70~92m/sの風速にほぼ対応する）であったと推定されると発表した。しかし、強度がF3スケールと推定される根拠となった被害状況は、1) 住家1軒が原形をとどめず倒壊した、2) 非住家（プレハブの工事事務所）が飛散し、瓦礫状態となった、3) 1台の車が持ち上げられて飛ばされた可能性がある、の3点であり¹⁾、多くの被害状況がF3スケールの強度を持つ竜巻に対応しているわけではないことに、留意が必要である。

F3スケールの竜巻は、1990(平成2)年の茂原竜巻（長さ6.5km、幅500m、移動速度16m/s）、1999(平成11)年の豊橋竜巻（長さ19km、幅550m、移動速度13m/s）に次いで⁴⁾、3個目の記録である。これらの竜巻と比べて、佐呂間の竜巻の被害範囲は、長さ1.4km、幅は最大で300m程度と小さいが、一部では非常に強い風が吹いたものと推定される。竜巻の移動速度が21m/s程度と大きく^{1)、2)}、竜巻が生じさせる風速に竜巻自身の移動速度が加えられたことも、強い風速が作用した原因と考えられる。

なお、竜巻発生地点付近の農地には、直径10~20m程度の吸い上げ渦の跡（写真-2.1）のようなものが見られたことから、地上付近の上昇気流の大きい、強い竜巻であったことが推測される。また、被害を受けた領域が複数あることや目撃証言から、2~3個の竜巻が同時に発生していたものと考えられ、竜巻の上空にある親雲の規模は、大きかったことが示唆される。



（写真提供：防衛大学校 小林文明助教授）

写真-2.1 吸い上げ渦の痕跡

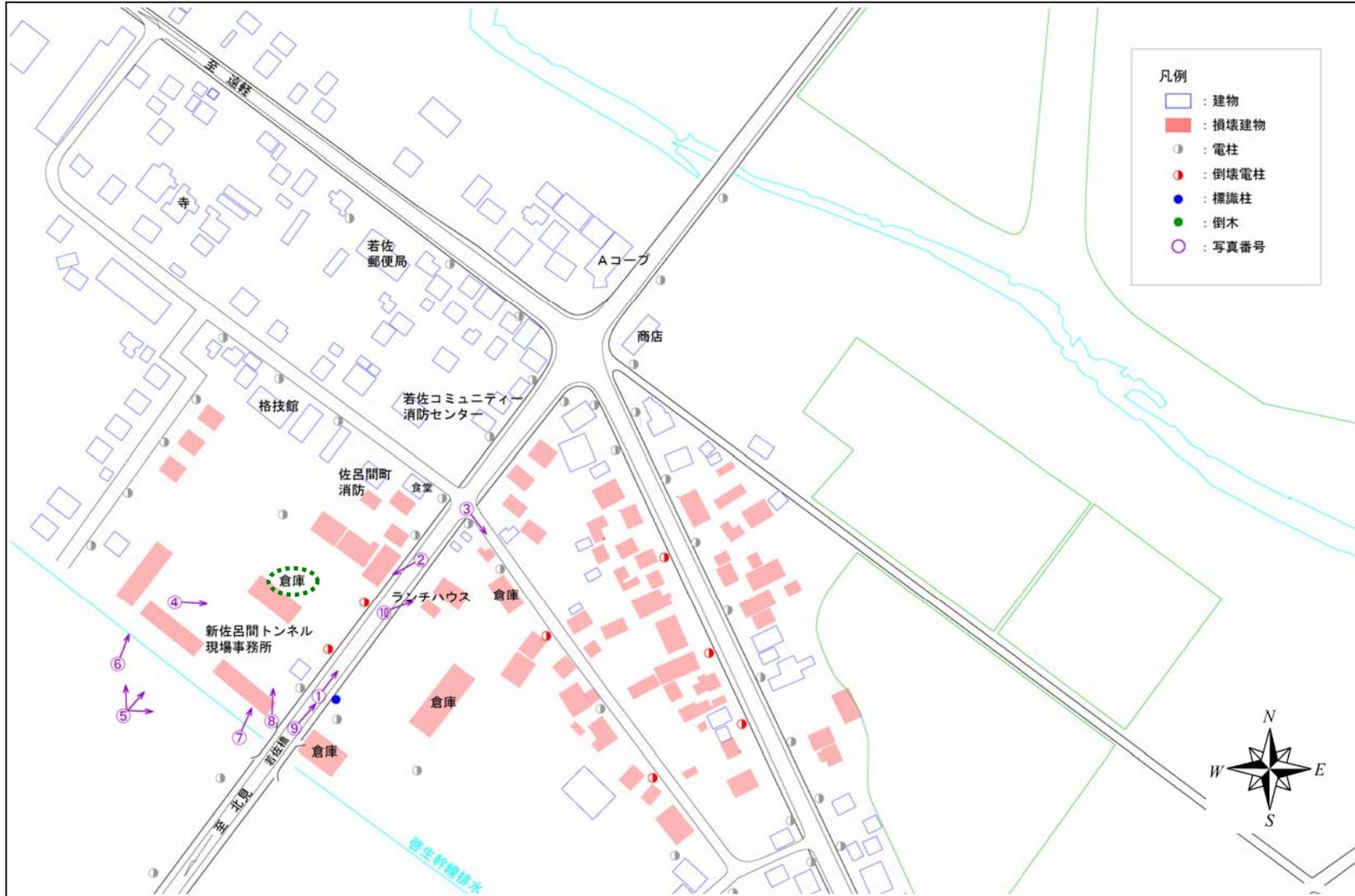
【2章の参考文献】

- 1) 札幌管区气象台：災害時気象調査報告、平成 18 年 11 月 7 日から 9 日に北海道（佐呂間町他）で発生した竜巻等の突風、災害時自然現象報告書 2006 年第 1 号, 2006.
- 2) 鈴木修：2006 年 11 月 7 日佐呂間町の竜巻の現地調査報告と今後の観測的研究の課題、竜巻シンポジウム講演用資料、2007 年 1 月 23 日、気象庁気象研究所、
http://www.mri-jma.go.jp/Topics/tornado_sympo/tornado_sympo.html
- 3) 気象庁：気象庁ホームページ、
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0611/17a/mri20061117.html>
- 4) 小林文明：竜巻の多様性 —2006 年 9 月 17 日台風 13 号に伴う竜巻を中心として—、竜巻シンポジウム講演用資料、2007 年 1 月 23 日、気象庁気象研究所、
http://www.mri-jma.go.jp/Topics/tornado_sympo/tornado_sympo.html



(写真提供：㈱シン技術コンサル)

写真-3.1 竜巻による被害状況



(注：損壊建物は写真-3.1の被災前後の航空写真から調査団が判断したもので、他機関による損壊とは必ずしも一致しない。)

図-3.2 被災平面図

次に、被災直後の状況写真を示す。写真は、本調査団撮影と北海道開発局網走開発建設部（以下、開発局と称する）提供による。被災直後、あらゆる物が飛散し、撒き散らかされた様子が見える。



写真-3.2 若佐地区被災直後の状況（図-3.2 位置①）



写真-3.3 若佐地区被災直後の状況（図-3.2 位置②）

電柱上部に飛来物が引っかかった様子がうかがえる（写真-3.4）。



写真-3.4 若佐地区被災直後の状況（図-3.2 位置③）



写真-3.5 吹き飛ばされた大型トラック（図-3.2 位置④）



写真-3.6 死者のあった新佐呂間トンネル現場事務所付近 (図-3.2 位置⑤)



写真-3.7 吹き飛ばされた現場事務所のプレハブ棟 (図-3.2 位置⑥)



写真-3.8 現場事務所のプレハブ棟の基礎 (図-3.2 位置⑦)



写真-3.9 現場事務所付近の被災直後 (図-3.2 位置⑧)

写真-3.10 は、電柱に飛来物が引っかかっている様子。また、写真-3.11 の矢印のものは、倉庫（図-3.2 中の \odot ）のフレームと思われ、国道向かいの食堂まで飛ばされたと考えられる。



写真-3.10 道路周辺の被災状況（図-3.2 位置⑨）



写真-3.11 新佐呂間トンネル現場事務所向かいの家屋の被災状況（図-3.2 位置⑩）

3.1.2 被災後の対応状況

竜巻による被災直後より、各機関において救助活動や復旧が行われた。各機関における対応状況については、表-3.2 に取りまとめ、本項では、主に復旧に向けて最前線で活動した網走開発建設部北見道路事務所（以下、北見道路事務所と称する）の対応をヒアリングすることができたので、以下に報告する。

【交通規制】

13時25分、停電により佐呂間トンネルの伝送異常を示すブザーが鳴った。各種センサーが設置されており、非常装置が作動するのは珍しくないが、事実関係を確認するため情報収集を開始した。13時30分頃、警察より連絡を受け、職員5名が現場に出動した。

現地に到着すると、警察により既に交通規制（通行止め）がなされていた。以後、翌朝6時までの間は開発局にて通行規制を行い、その後8日、9日は現場検証、遺留品捜索のため、遠軽警察署にて通行規制がなされた。

被災現場で被害を受け、自走できなくなった自動車は9日に33台、10日に16台の約50台を2日間で撤去した。

【情報収集】

情報が錯綜するのを避けるため、北見道路事務所の連絡窓口を工事課長に1本化し、30分毎に定期連絡を取り合った。また、消防、レスキュー隊との連絡も工事課長が行い、情報の一元化を図った。

現場では、情報が輻輳あるいは情報が入らないなどがあり災害対策本部がどこにあるのかわからなかったが、北見道路事務所としては、警察、消防と連携を密にした。竜巻災害直後は、災害に関連した視察が多く、この対応に時間を要した。開発局関連の視察への対応は開発局の職員が当たるため、一度に複数の視察があった時は現場が混乱した。また、これらの現場視察に関して、北見道路事務所と警察では視察の有無、到着時刻等、連絡事項に食い違いがみられた。

【復旧支援】

北見道路事務所管内には、27箇所の工事現場があり、年間維持業者などから構成される安全連絡協議会を設立し、日頃から各現場の安全対策に努めてきた。10月に発生した長雨による土砂災害の経験があり、当日の天気予報が良くなかったため、各現場で警戒体制がとられていた。安全連絡協議会が直ちに行動できる体制にあったので、投光器などを提供し、救助・復旧を円滑に支援することが出来た。（投光器などは開発局が安全連絡協議会に要請したものである）

開発局としては、住宅撤去のため、11月21日から26日まで投光器、ジェットヒーターを提供した。

【飛散物】

11月10日と11日には、北見道路事務所の職員と地元業者で連携して、若佐地区周辺から広域に渡り飛散物の回収にあたった。道路沿いは被災直後に飛散物が回収されてしまったので大きなものは無かったが、牧場内では数多くの飛散物が見つかった。

表-3.2 各機関における対応状況

機関 月 日	道路関連（通行止め）	政 府	国土交通省	北海道開発局	北海道
11 7	13:30 ●333号佐呂間町啓生～北見市仁頃 全止め延長 25.1 km 17:10 ●333号佐呂間町若佐～佐呂間町若佐 全止め延長 0.6 km(11/8 6:00まで) ●留辺蘂浜佐呂間線2区間全止め (第1区間 13:30～17:00) (第2区間 13:30～24:00)	14:00 ●総理官邸内危機管理センターに情報連絡室設置 ●内閣官房に情報連絡室設置 ●内閣府情報対策室設置 16:30 ●北海道における突風災害に関する災害対策 関係省庁連絡会議(内閣府開催) ●防災担当大臣を団長とする政府調査団(22名) 現地調査(20:51現地着)	14:30 ●佐呂間町突風災害対策本部を設置 ●照明車8台、対策本部車1台、衛星通信車1台 佐呂間町に派遣 (11/7～11/9) ●気象庁突風機動調査班を佐呂間町に派遣 現地調査を実施 (11/7～11/9)	13:30 ●北海道開発局平成18年11月7日発生の竜巻による 災害警戒本部を設置 ●道路部門 警戒態勢 17:30 ●北海道開発局平成18年11月7日発生の竜巻による 災害対策本部に移行 ●道路部門 非常態勢	13:30 ●知覚時間(北海道警察からの情報による) 14:07 ●佐呂間町竜巻災害北海道災害対策連絡本部 16:40 ●佐呂間町竜巻災害北海道災害対策本部に移行 ●災害救助法を適用、避難所の設置等を実施 ●被災者生活再建支援法を適用 ●知事 現地調査 被災地現場等調査(11/7～8) ●知事 自衛隊に物資(毛布)の貸付に関する 災害派遣要請 17:30
8	8:00 ●333号佐呂間町若佐～佐呂間町若佐 全止め延長 1.0 km (飛散物搬出のため)		15:30 ●国土交通大臣が現地視察(15:30現地着) ●政府調査団に国土交通省担当官参加 ●国土交通政務官が現地視察(11/9～11/19)	20:00 ●道路部門 警戒態勢に移行	9:45 ●知事 自衛隊に倒壊家屋等の撤去に関する追加要請
9	7:00 ●333号佐呂間町若佐～佐呂間町若佐 全止め延長 1.0 km (飛散物搬出のため)	17:30 ●北海道佐呂間町における竜巻災害の復旧に関する 関係省庁連絡会議(内閣府開催)		10:00 ●道路部門 注意体制に移行	
10		17:00 ●北海道佐呂間町における竜巻災害の復旧相談室会 合	●住宅金融公庫において、災害復興住宅融資 募集開始		
11					●知事 自衛隊に撤収要請
12					
13					
14		12:00 ●内閣府情報対策室閉鎖			
15		●竜巻等突風対策検討会(第1回)開催 ●衆議院災害対策特別委員会現地調査 被災地 現場等調査(20名)			
16					
17			●佐呂間町突風災害対策本部を廃止 ●佐呂間町竜巻災害復旧支援省内連絡調整 会議に改組	●北海道開発局平成18年11月7日発生の竜巻による 災害対策本部を廃止 ●北海道開発局佐呂間町竜巻災害復旧支援室に改組 ●道路部門 体制解除	
28					

機関 月 日	自衛隊	復 旧	佐呂間町	その他
11 7	17:30 ●北海道知事から物資(毛布)の貸付に関する 災害派遣要請(人員2名、車両1台)		13:40 ●佐呂間町竜巻災害対策本部 竜巻災害対策本部設置、災害救助法適用 15:30 ●被害調査(4班編成) 被災住民収容(武道館、温水プール) 16:30 ●遺体安置所設置(町民センター)	14:00 ●警察 災害警備室設置 17:30 ●消防庁 消防庁職員2名を現地災害調査のため派遣
8	9:45 ●北海道知事から倒壊家屋等の撤去に関する 追加要請(人員約100名)	●町職員、ボランティアによる災害廃棄物の 回収開始(11/8～11/18)	7:30 ●被害調査(9班編成) [11/8以降随時] ●遠軽駐屯地へ災害救助活動要請(12日まで活動) ●農地、住宅地の瓦礫等撤去(9日～11日) ●瓦礫処理のための仮集積所設置(若佐小学校跡) ●公・教員住宅への入居支援 ●町税の減免措置決定 ●医療チーム派遣要請、保健相談、法律相談実施	
9	●佐呂間町において活動実施 (人員約100名、車両約20台)	●農地や農業用施設に飛散した散乱物の除去 (開発局、支庁、佐呂間町職員によるものも含む) ●2世帯帯4名佐呂間町内の教職員住宅に入居	●被災者生活再建支援法適用	
10	●佐呂間町において活動実施 (人員約110名、車両約20台)	●トンネル工事関係者56名の自主避難解消	●住民説明会開催	
11	●佐呂間町において活動実施 (人員約20名、車両5台)			
12	●北海道知事から撤収要請			
13			●若佐支所に住民相談窓口開設	
14				
15				
16				
17			●住民説明会開催	
18		●町職員、ボランティアによる災害廃棄物の 回収終了(11/8～11/18) ●1世帯帯2名佐呂間町内の教職員住宅に入居		
28			9:00 ●佐呂間町竜巻災害対策本部、 佐呂間町竜巻災害復旧対策本部に名称変更	

3.2 土木施設への被害

土木施設の被害は、道路標識が1基倒壊、電柱は7基が倒壊、12基が傾斜した。ここでは、道路標識および電柱の被害について、被害状況を取りまとめる。

3.2.1 道路標識柱の被害

写真-3.12、図-3.4 に示す道路標識が支柱基部で破断した。破断状況は、写真-3.13～写真-3.16 に示すようであった。



図-3.3 破断した標識の位置



写真-3.12 倒壊前の標識（実物）

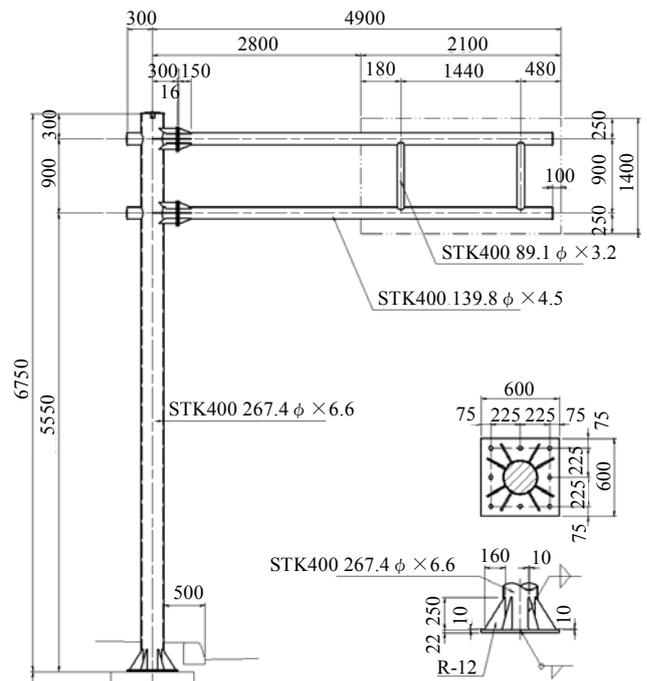


図-3.4 倒壊した標識概要図

標識柱は、基部の補強リブ直上で破断した。写真-3.13 に示すように標識柱にはこすり跡が見られ、飛散物が衝突したことも考えられる。標識板取り付け用の横梁は上側に折れ曲がった状況で（写真-3.14）、水平材が上側に折れていることは、風圧以外の要因も考えられる。



写真-3.13 基部で破断した標識柱



写真-3.14 破断した標識柱

標識板は飛ばされ、50mほど離れた位置（図-3.3）に住宅等の飛散物の瓦礫とともに堆積していた（写真-3.15）。



写真-3.15 破断した標識柱の表示板



写真-3.16 破断した標識柱の破断面

3.2.2 電力・通信施設の被害

(1) 被害状況

北海道電力遠軽営業所の記録では13時25分31秒に佐呂間変電所管内で地絡事故による停電が発生している。直後に自動検出装置により若佐市街地で発生したことが特定されているが、検出は配電線の区間ごとに行われているため、電柱が倒壊した時間差などの詳細な情報は得られなかった。また、竜巻発生に先立つ12時37分ごろから13時17分ごろまで、雷と思われる地絡電圧の上昇が頻繁に記録されている。

竜巻による電力関係の被害はインフラ・ライフラインでは比較的顕著で、表-3.3のように電柱7本の折損と電線の断線などの被害が発生した。これにより表-3.4のように佐呂間変電所系内でF-2と呼ばれる系統内の631戸が停電となったが7.5時間後までに復旧した。F-2系統でも比較の変電所に近い箇所が被災したため一時的に停電戸数が多くなったが、通常の風水害よりも容易に被災箇所が特定され、また強風がすぐに収まったため復旧作業が可能となった。このため、通常の災害対応と同程度の体制であったが、表-3.5のように人員や資材を集中的に投入することで比較的早期に復旧できた。なお、通常の災害では、電線は切れたものをその場で再度繋いで復旧するが、今回の竜巻災害では切れた電線が飛散してしまい、新しい電線を架設する必要があった。飛散した電線は復旧後に工事会社などで回収した。なお、総務省¹⁾によればNTT東日本の加入者系ケーブルで若干の被害があったとされるが、折損した電柱にNTTケーブルも添架されていたことも影響していると考えられる。

表-3.3 電力関連施設の被災件数

支持物 (基)			電線 (条)		変圧器 (台)	
折損	傾斜	計	高圧	低圧	損傷	傾斜
7	12	19	8	20	4	—

表-3.4 配電線事故状況

配電線	発生	全送	停電時間	停電個数 (戸)	主な停電地域
佐呂間 F-2	13:25	20:56	7:31	631	佐呂間 (若佐、共立、武士)、 留辺蘂町 (丸山、瑞穂、花園)

表-3.5 復旧体制

事業所	北海道電力		ほくでん営配		工事会社			
	社員	車両	社員	車両	作業員	作業車	建柱車	高所作業車
遠軽営業所	7	4	3	1	24(4班)	4	3	8
北見支店	2	1			22(4班)	4	5	8
紋別営業所					8(1班)	3	2	1
計	9	5	3	1	54(9班)	11	10	17

被害施設の位置図を図-3.5 に示す。図-3.5 および表-3.3 のように、電力施設は電柱の倒壊や傾斜、電線の断線および電柱上の変圧器の損傷などの被害を受けた。倒壊した電柱は新佐呂間トンネル工事事務所に隣接した国道 333 号線沿いの 2 本、そこから北東に進んだ町道沿いの 2 本と、さらに北北東に進んだ道道留辺薬浜佐呂間線沿いの 3 本である。これらの被災位置は推定された竜巻の通過位置とおおむね一致しており、倒壊方向は電線の軸直角方向であるため、電線及び電柱が大きな風圧を受けたり飛来物が衝突したりしたことによって倒壊したと考えられる。竜巻の通過位置からはずれた場所で電線の軸方向に倒壊した 1 本は、電線路の端部にあったために、他の電柱が倒壊したことでその方向に引っ張られて倒壊したものと推定される。



図-3.5 被害のあった電柱の位置



写真-3.17 中間部での破壊



写真-3.18 電柱基部の破壊



写真-3.19 電柱基部の破壊状況

(2) 電柱の強度と破壊性状

被災した電柱はいずれも北海道電力配電用品規格(HDS)²⁾で定められた遠心力プレストレストコンクリートポールかそれ以前に製造されていた遠心力鉄筋コンクリートポールであり、曲げ破壊の性状を示していた。被災したものの寸法および設計荷重は表-3.6 のようになっている。ここで、設計荷重とは電柱の末口から 0.25m の位置に水平に作用する荷重の大きさとし、破壊荷重は設計荷重に対する割増率で規定され、O型では2.5倍、それ以外では2.0倍となっている。なお、電柱の性能は設計荷重あるいは破壊荷重で規定され、写真-3.20 のようなサンプルに対する載荷試験で確認を行うため PC 製でも RC 製でもその性能に違いはない。強風を受けた場合の電柱の損傷について、復旧を担当した北海道電力北見支店の担当者に聞き取りを行ったところ、北海道では強風地帯で曲げを受けてひび割れが発生することはあるが、通常の風災害で倒壊にいたることはないとのことである。このため、極めて強い風が吹いたほかに、飛来物が電線や電柱に衝突したり撒きついたりしたことで電柱の基部に大きな曲げモーメントが作用して倒壊したと考えられる。

このように、今回の竜巻による倒壊メカニズムは風荷重の他に、飛来物による衝撃や付加荷重、架空配電線の影響など様々な要因が考えられるものの、破壊時の状況が不明であることから、それを考察することは困難である。

表-3.6 被災した電柱の諸元

種別	地上高 (m)	末口径 (m)	地際径 (m)	設計荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	抵抗モーメント (kN m)
A 型 12m	11.23*	0.19	0.32	3.43	6.86	66.9
A 型 12m	10	0.19	0.32	3.43	6.86	66.9
O 型 9m	7.5	0.12	0.22	1.96	4.90	35.5
B 型 15m	12.5	0.19	0.36	4.90	9.80	120.1

*国道 333 号線沿いで被災した電柱は A 型柱に継柱鋼管 (1.88m) を接続している。

一般的な電柱の曲げ破壊試験の状況を写真-3.20 に示す。



写真-3.20 曲げ破壊事例

3.3 建築物の被害

3.3.1 建築物の被害

建物被害調査と気象記録収集は、竜巻発生翌日の2006年11月8日から10日にかけての3日間、鹿島技術研究所 都市防災・風環境グループの山本主任研究員、大窪研究員が実施した。

竜巻の移動経路から東側に1.5km離れた佐呂間地域気象観測所（アメダス：常呂郡佐呂間町 武士 北緯43度59.1分、東経143度43.4分、標高59m、観測高さ地上8.5m、**図-3.6**、**写真-3.21**）の観測記録³⁾（10分間平均値）によれば、竜巻発生前の13時頃は風速2~3m/secの南風であるが、竜巻発生時の13時30分には風速8m/secの東南東の風に変化し、竜巻通過後は風速が急激に減少して西南西の風に急変している（**図-3.7**、**図-3.8**）。このことから、竜巻は反時計回りに回転していたと推定される（**図-3.9**）。これは、樹木や看板等の倒壊方向から推定される風向と対応している（**図-3.10**）。

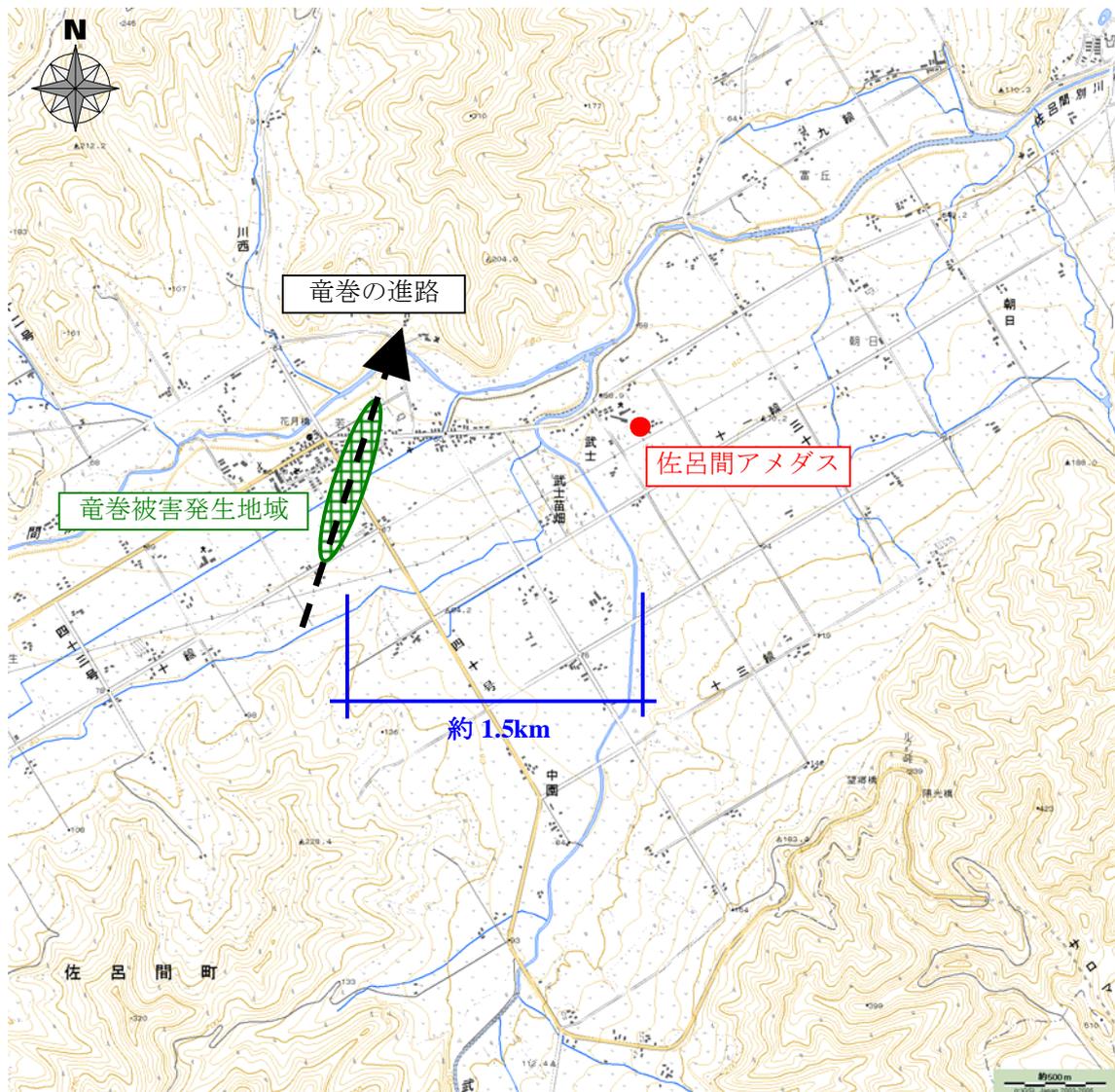


図-3.6 佐呂間アメダスの設置場所



(a) 測風塔（風観測装置の地上高さは8.5m）



(b) 風観測装置

写真-3.21 佐呂間アメダスの風観測装置

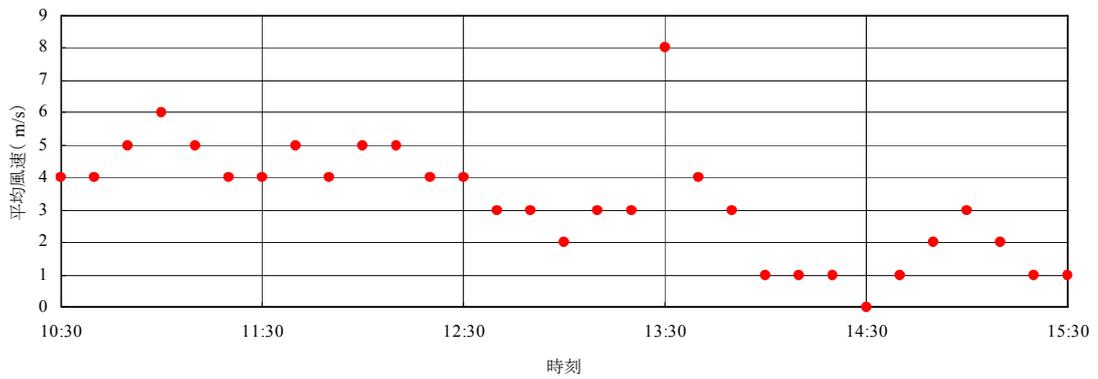


図-3.7 佐呂間アメダスでの10分平均風速の変化（2006年11月7日）³⁾

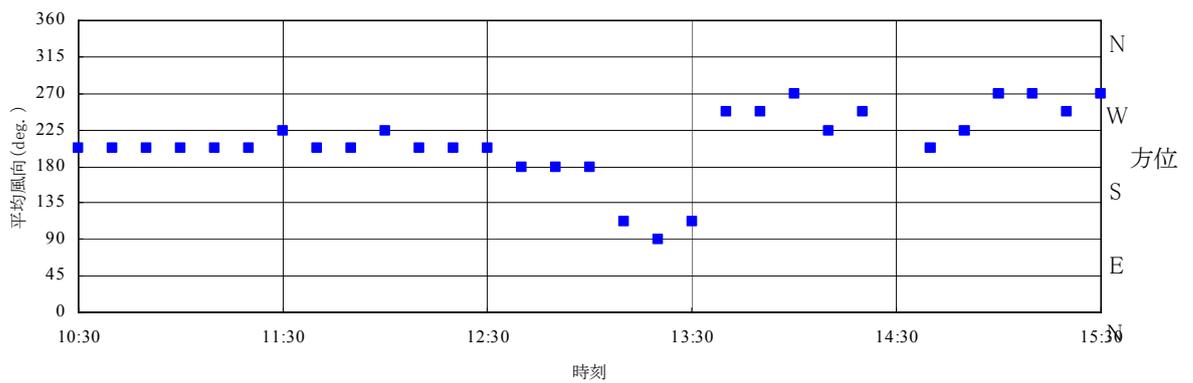
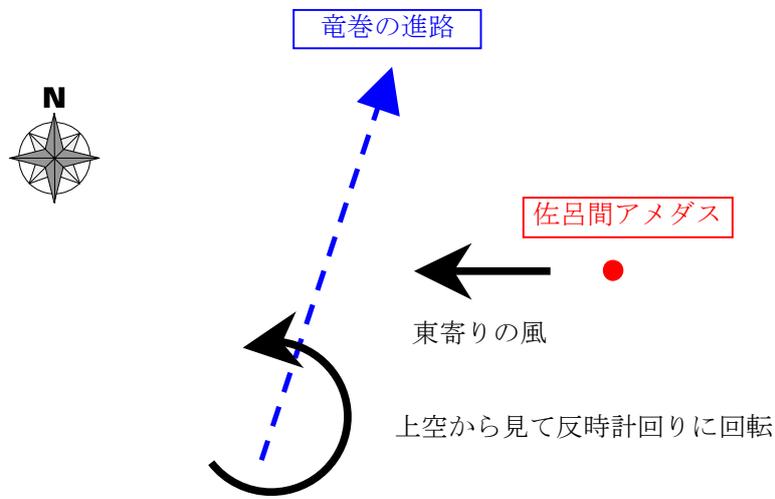
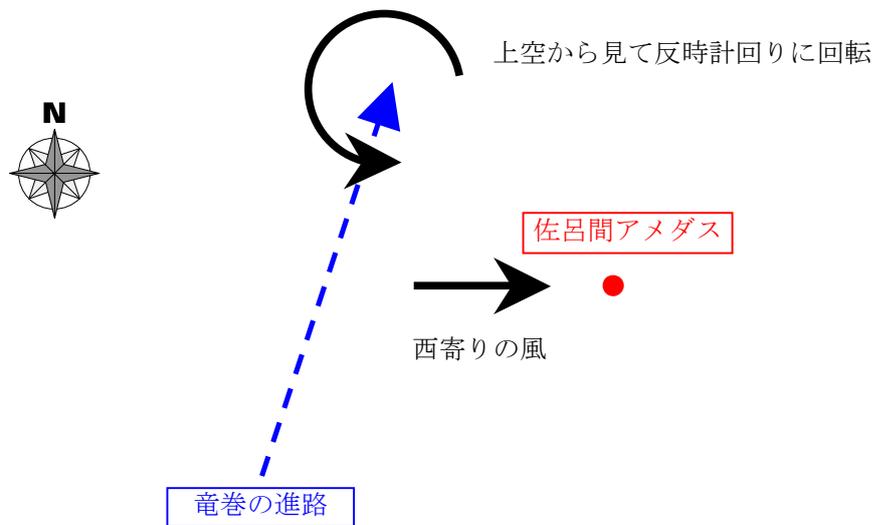


図-3.8 佐呂間アメダスでの10分平均風向の変化（2006年11月7日）³⁾



(a) 佐呂間アメダスの西側を竜巻が通過する前



(b) 佐呂間アメダスの西側を竜巻が通過した後

図-3.9 竜巻の回転方向の推定

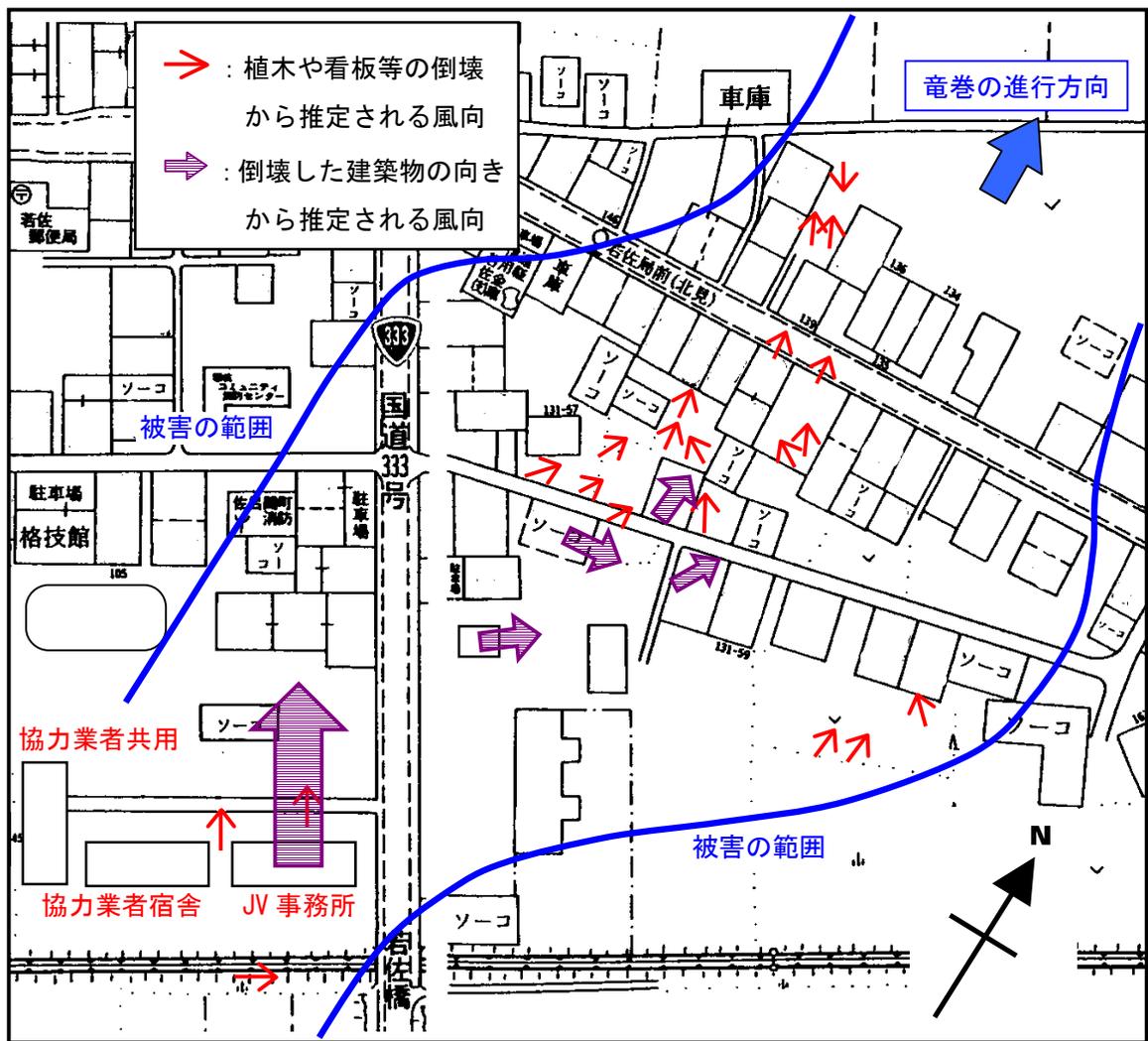
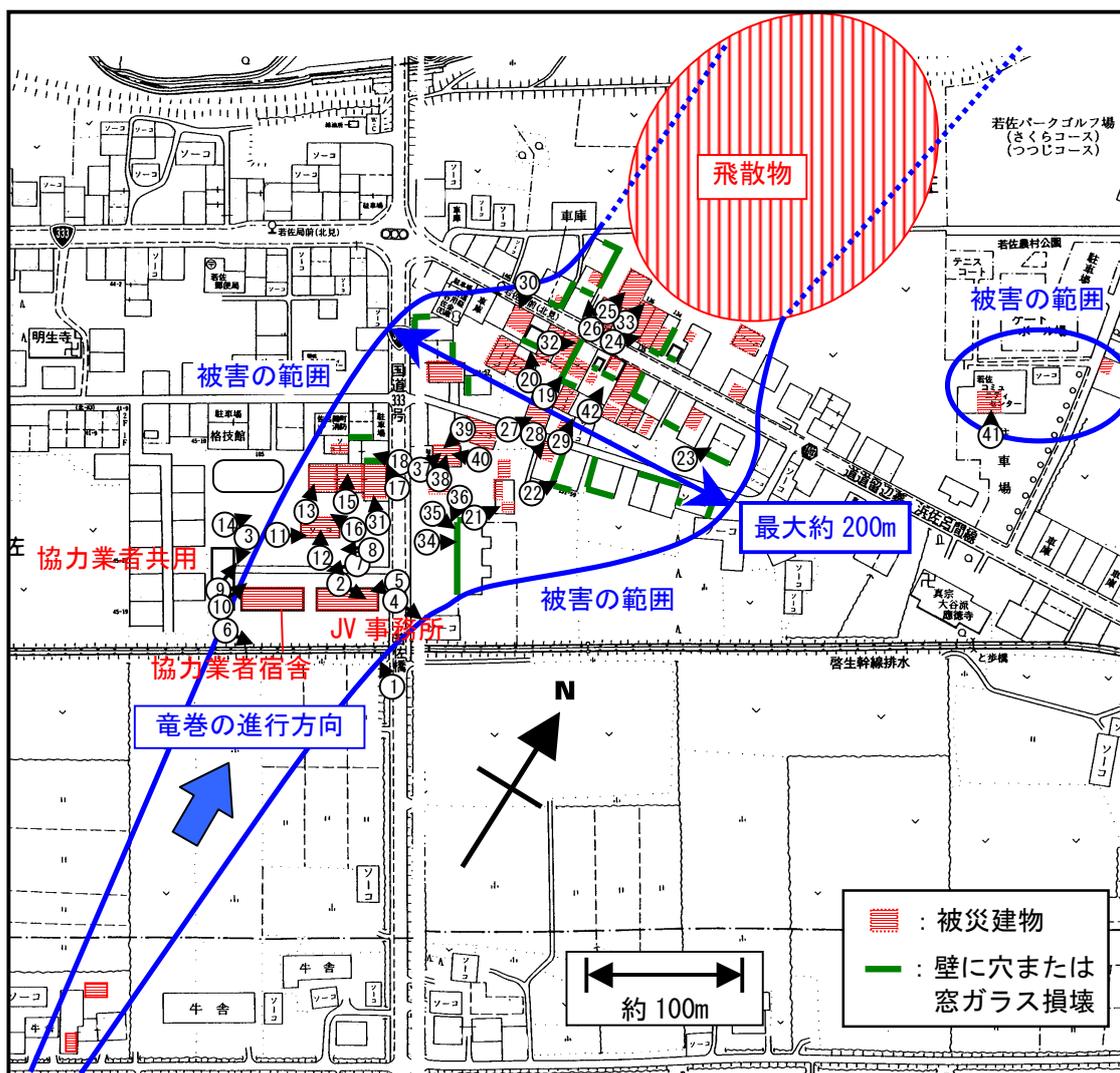


図-3.10 竜巻通過時の風向分布の推定

写真-3.22～写真-3.53 に被害写真を示す。写真タイトル右側の[番号]は写真番号を表す。また、図-3.11 に竜巻の移動経路と被災建物の分布を示す。図中の番号と矢印は、写真番号とその撮影方向を示したものである。また、太線は被害の範囲を表す。なお、被災建物の判定は、表-3.7 の内閣府の災害被害判定基準を参考に鹿島技術研究所が行ったものである。

竜巻による主要な被害範囲は、長さ約 1km の帯状で、最大幅は建物が密集している地域で約 200m であり、竜巻の進行方向右側の方が広がっている。これは、竜巻が反時計回りであったこと、移動速度が速かったことから、風速が進行方向右側では増加し、左側では減少したことが一因と考えられる。また、竜巻の移動範囲から約 100m 東側に離れた若佐コミュニティーセンター付近にも局所的な被害（写真[41]）が見られるが、複数の竜巻が同時に発生したとの目撃証言があり、その竜巻による被害と推定される。



(被災建物の判定は、鹿島技術研究所調査による。○数字は写真-3.22～写真-3.53の撮影位置を表す。)

図-3.11 竜巻の移動経路と被害状況

表-3.7 内閣府の災害被害判定基準^{注)}

住家全壊 (全焼・全流失)	住家はその居住のための基本的機能を喪失したもの、すなわち、住家全部が倒壊、流失、埋没、焼失したもの、または住家の損壊が甚だしく、補修により元通りに再使用することが困難なもので、具体的には、住家の損壊、焼失若しくは流失した部分の床面積がその住家の延床面積の70%以上に達した程度のも、または住家の主要な構成要素の経済的被害を住家全体に占める損害割合で表し、その住家の損害割合の50%以上に達した程度のもとする。
住家半壊(半焼)	住家はその居住のための基本的機能の一部を喪失したもの、すなわち、住家の損壊が甚だしいが、補修すれば元通りに再使用できる程度のも、具体的には、損壊部分はその住家の延床面積の20%以上70%未満のも、または住家の主要な構成要素の経済的被害を住家全体に占める損害割合で表し、その住家の損害割合が20%以上50%未満のもとする。

注) 平成13年6月28日府政防第518号内閣府政策担当官(防災担当)通知

新佐呂間トンネルJV工事事務所は、JV事務所棟が全壊し2階部分が北北西に約60m飛散し、協力業者宿舎棟は倒壊した。これに対して、隣接する協力業者共用棟や道路向かい側の倉庫では、ほとんど被害が見られなかった(写真[1]～[5])。このように隣接する建物で大きく被害状況が異なる傾向は他の建物でも見られ(写真[13]～[20]、[24]～[26])、竜巻の半径方向に急激な風速勾配が存在していたことをうかがわせる。

佐呂間町若佐地区では、1997年に道路の拡幅工事が行われており、今回の竜巻の被災地域には、その際の用地買収に併せて新築された建物とそれ以前からある築年数の経った建物とが混在していた。被災した建物のうち、新しい建物は窓ガラスや屋根葺き材に被害が見られるものの骨組の被害は少ない(写真[20]～[24])。これに対して、築年数の経った建物では、全壊して飛散したものや骨組が大きく損傷を受けたものが数多く見られた(例えば、写真[28])。

また、2階建に比べて1階建の被害が軽い傾向が見られた(写真[20])。この理由としては、隣接建物による遮風効果や地表面付近における高さ方向の風速勾配の影響等が考えられる。

竜巻の強風による風圧で損傷した建物に加えて、飛散物の衝突によって損傷した建物が多く見られた(写真[31]～[35])。このことは、図-3.11や写真[37]～[40]に示すように同じ建物でも壁面によって被害状況が異なることからもうかがえる。飛散物には木材、ガラス、トタン、石等の他にプロパンガスボンベのような重量物も確認されている(写真[33])。このような飛散物によって風上側の窓ガラスが破損して建物内部に風が吹き込み、それによって室内の正圧が上昇して、屋根面上の負圧と相まって屋根が崩壊するという強風災害が発生するので注意が必要である(図-3.12)。したがって、これらの飛散物による被害の連鎖的な拡大を防ぐことは、強風災害を防ぐ上で重要な課題といえる。飛散物は被災地域とその北側に広がっているが、一部の飛散物は佐呂間町から北側に約14km離れた湧別町計呂地で発見されている。

建物被害以外にも乗用車、トラック、重機等の横転、飛散が数多く見られた(写真[7]～[11]、[16]、[35]、[36])。写真[16]のトラックは、数十m飛ばされ横転したとのことである。

2章で報告した竜巻の強度がF3スケールと推定された根拠に対応する写真は、以下のとおりである。

- 1) 住家1軒が原形をとどめず倒壊した →写真[25]、[26]
- 2) 非住家(プレハブの工事事務所)が飛散し、瓦礫状態となった →写真[1]、[2]、[5]
- 3) 1台の車が持ち上げられて飛ばされた可能性がある →写真[7]

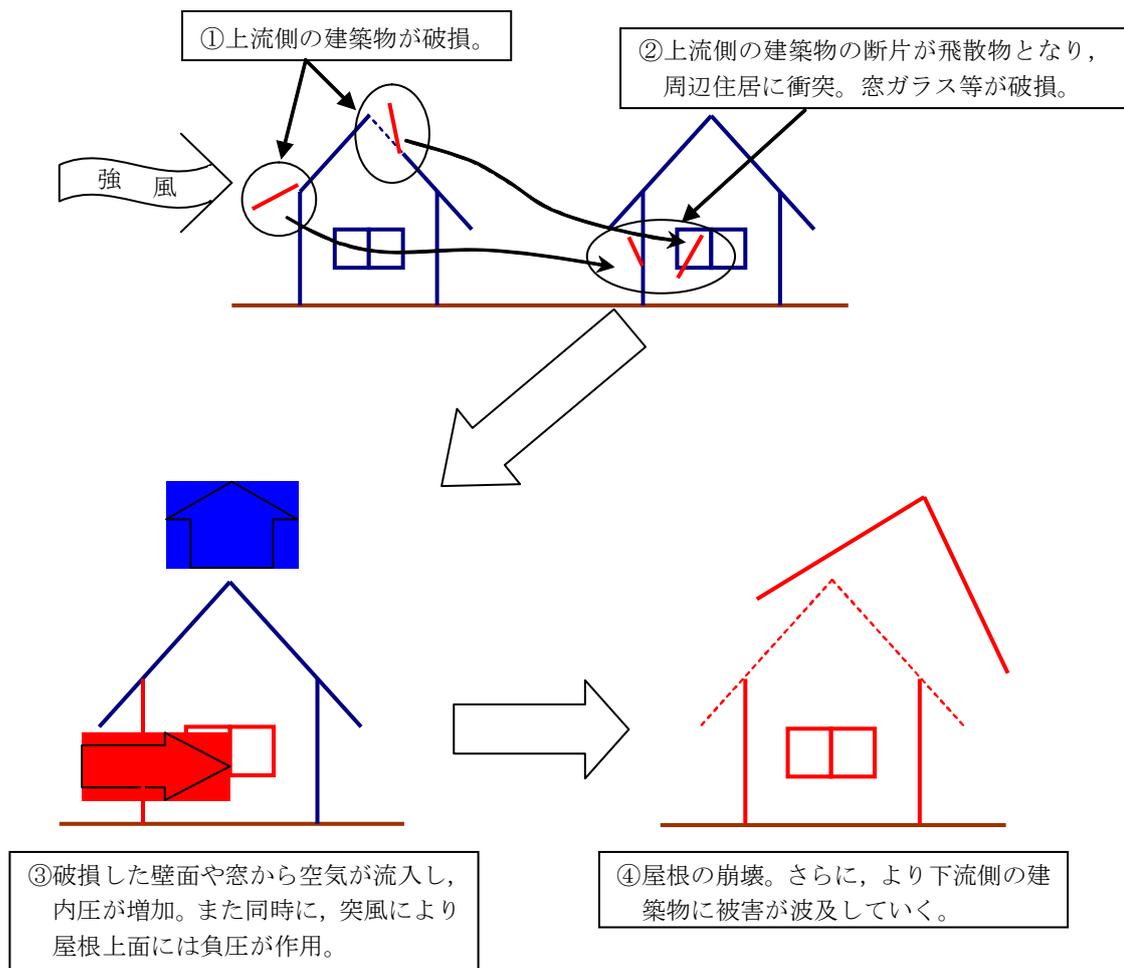


図-3.12 飛散物による被害拡大のメカニズム



写真-3.22 被災したJV工事事務所の遠景[1]



写真-3.23 全壊したJV工事事務所[2]



写真-3.24 無傷の協力業者共用棟[3]



写真-3.25 無傷の道路向かい側の倉庫[4]



写真-3.26 JV事務所棟の基礎[5]



写真-3.27 JV工事事務所南側での風向[6]



写真-3.28 飛散して重なり合った車[7]



写真-3.29 転倒した重機[8]



写真-3.30 JV 工事事務所北側の全壊した倉庫（左[9]、右[10]）



写真-3.31 全壊した倉庫の鉄骨架構[11]



写真-3.32 全壊した倉庫の鉄骨架構の基礎[12]



写真-3.33 全壊した倉庫[13]



写真-3.34 被害がない木材置き場[14]



写真-3.35 全壊した倉庫の屋根[15]



写真-3.36 数10m飛ばされ横転したトラック[16]



写真-3.37 全壊した建物（左：[17]）と隣接しながら被害が軽微な建物（右：[18]）





写真-3.38 散乱した飛散物と建物の壁面、屋根面の被害[19]



写真-3.39 写真[19]に隣接しながら屋根面の被害がない建物[20]



写真-3.40 窓ガラス、屋根葺き材に被害を受けながら骨組の被害はない建物（左[21]、右[22]）



写真-3.41 窓ガラス、屋根葺き材に被害を受けながら骨組の被害はない建物（左[23]、右[24]）





写真-3.42 全壊した住宅（左[25]、右[26]）



写真-3.43 窓ガラス、屋根が飛散し、大破した建物（左[27]、右[28]）



写真-3.44 窓ガラス、屋根が飛散し、大破した建物（左[29]、右[30]）



写真-3.45 建物への飛散物の衝突痕[31]



写真-3.46 住宅の壁面に刺さった木材の飛散物(丸内) [32]



写真-3.47 住家壁面のプロパンガスボンベの衝突痕(丸内) [33]



写真-3.48 倉庫の壁面に刺さった木材の飛散物(丸内) [34]



写真-3.49 倉庫の壁面に刺さった木材の飛散物(右丸内)と転倒した大型トラック(左丸内) [35]



写真-3.50 横転した大型トラック [36]



被害が大きい壁面（左[37]、右[38]）



被害が小さい壁面（左[39]、右[40]）

写真-3.51 建物の壁面位置による被害の違い



写真-3.52 同時に発生したと推定される他の竜巻
による若佐コミュニティセンターの屋根葺き材の
被害[41]



写真-3.53 樹木の倒壊[42]

3.3.2 住民への聞き取り

被災時の状況について、若佐地区の住民 2 名に協力をいただき聞き取り調査を行った（図-3.13 参照）。

倒壊した工事事務所の約 100m 北側で食堂を経営する K さんは、被災時には建物奥の厨房にいた。最初はバラバラという音がしてにわか雨が降ってきたようであったが、その音がどんどん激しくなると証言している。K さんは竜巻そのものを目撃してはいないものの、その激しい音はあっという間に通り過ぎて行った。竜巻の通過後は、店舗と棟続きの住宅の窓ガラスが割れ、ガスボンベが室内に飛び込んでいた。ガスボンベからはガスが漏れ続けていたので、自らバルブを回してガスを止めた。後ほどガス会社がボンベを回収しに来て、工事事務所から飛散したものであると言っていたとのことである。また、店舗では国道に面した側の窓ガラスの一部が円形に破れており、強い風圧が作用したことをうかがわせる。

一方、工事事務所から北東に 200m 程度離れた場所に住む N さん夫妻は被災時に自宅にいた。近所の葬儀から帰宅し外出しようとしていたが、南方の若佐墓地の上空が白く曇ってきて、雨が降りそうになってきたことから外出を取りやめ、N さんは自動車を車庫に戻すため外に、夫人は玄関上がった屋内にいた。N さん夫人がいたところは大きな窓が無く、竜巻も見えず特に音や振動も感じなかったというが、玄関フードにはプラスチック製のソースびんがぶつかり、ガラスが割れるとともにソースが飛び散っていた。また、居間とそれに続く南側の部屋の窓ガラスも割れてしまった。その頃、屋外の自動車の中にいた N さんは、車内から近所の家の物置が北側に飛ばされて家の 2 階に衝突するのを目撃した。上記以外の N さん宅の被害は、飛来した角材がモルタル壁の物置に突き刺さり直径 10cm ほどの穴が開いたほか、車庫の隣にあった電柱が倒壊して車庫の屋根を損傷させた。住宅裏の畑では樹齢約 22 年、樹高約 7m のトドマツ 2 本が北北東および東北東へ、樹高 9m の内地マツ 1 本が北東へ倒れた。倒れたトドマツの直径は約 20cm だった。また、畑からはトンネル工事関係者のものと見られる道具袋や事務用椅子が発見された。

上記の証言や他の研究者や機関が収集した情報^{4),5),6)}を総合すると、13 時 24 分～25 分頃にかけて発生した竜巻は、若佐地区の南西から新佐呂間トンネル工事事務所や一般住宅、そのほかの非住家を破壊しながら北東に進み、破壊した建物の一部を飛散物として巻き上げながら若佐地区北東の若佐神社の周辺で消滅したと考えられる。飛散物は近隣の住宅やインフラ施設に大きな被害をもたらしたほか、一部は農地や牧草地に散乱しながら約 15km 北方のサロマ湖まで到達した。また、建物の被害分布や飛散物の散乱状況、目撃証言などから竜巻は一つではなく、二つあるいはそれ以上が存在したと考えられる。また、多量の飛散物や複雑で激しい空気の流れは、被害状況から構造物に作用する外力を推定するといった被害調査の手法にも極めて難しい課題を与えている。



図-3.13 ヒアリングに協力頂いた2軒の位置

3.4 飛散物

竜巻通過後の飛散物は、若佐地区内およびその北側の農地で大量に発生した。佐呂間町の集計によると飛散物はダンプトラック 410 台分、総重量は推計で約 2,200 トンに及び、そのうち約 900 トンが木くず、130 トンが鉄類であった。また、佐呂間町若佐地区から 20km 以上離れたサロマ湖の砂州でも飛散物が発見されている。若佐地区から 15km 程度離れた位置でも住宅のトタンが見られたが、遠方で発見された飛散物としては、特にグラスウールが多く、そのほか住宅の壁材・トタン・衣類・佐呂間トンネル現場事務所のものと思われる書類等が主なものであった。

飛散物回収は各機関の職員やボランティア、自衛隊遠軽駐屯地の隊員が行った。被災地付近の住宅地では佐呂間町の社会福祉協議会やボランティア連絡協議会がボランティアのとりまとめを行った。また、被災地近隣の農地では佐呂間町や近隣の町、農協、網走支庁、地元自治会などが回収作業を行い、遠方については開発局や湧別町などが飛散物の回収に当たった。被災地から約 3km 北方の武勇峠以遠で開発局および湧別町が回収した飛散物は約 6 トンだった。

回収した飛散物は、遺留品とその他のものに分別して、遺留品以外のものは若佐小学校跡地に設けられた臨時の堆積場に集められた。また、写真アルバムやファイリングされた書類などについては、持ち主を捜索し可能な限り返却した。さらに、堆積場に集められた廃棄物のうち、木くずと鉄類はそれぞれ分別されリサイクルされた。木くずは町内の施設でチップに加工された。これらの廃棄物は産業廃棄物として一括処理することも検討されたが、佐呂間町では廃棄物の量を可能な限り減らすために分別を行った。

ガラス片やグラスウール、壁材が散乱した農地や牧草地では、家畜がそれらを食べる可能性があり危険なため、多数の人員を割いて徹底的に回収に当たった。細かく砕かれたガラス片などを完全に回収することは困難だが、表土を 30cm ほど掘り起こすことで農作業や家畜への悪影響を防いでいる。

瓦礫等が飛散した範囲を図-3.14 に示す。尚、この飛散物が確認された範囲は、聞き取り調査等から作成したものである。回収時の飛散物の状況を写真-3.54～写真-3.57 に示す。また、北見工業大学の伊藤陽司准教授は被災地近傍の航空写真から、建物の柱やはりなどと考えられる柱状の飛散物の分布状況を調査して、写真-3.58 のように示した。写真からは破壊された住宅跡から北方に延びる飛散物の帯が見受けられ、これが竜巻の経路と考えられる。柱状の飛散物は竜巻の進行方向の左側に多く、反時計回りの竜巻の渦によって飛ばされた影響と考えられる。

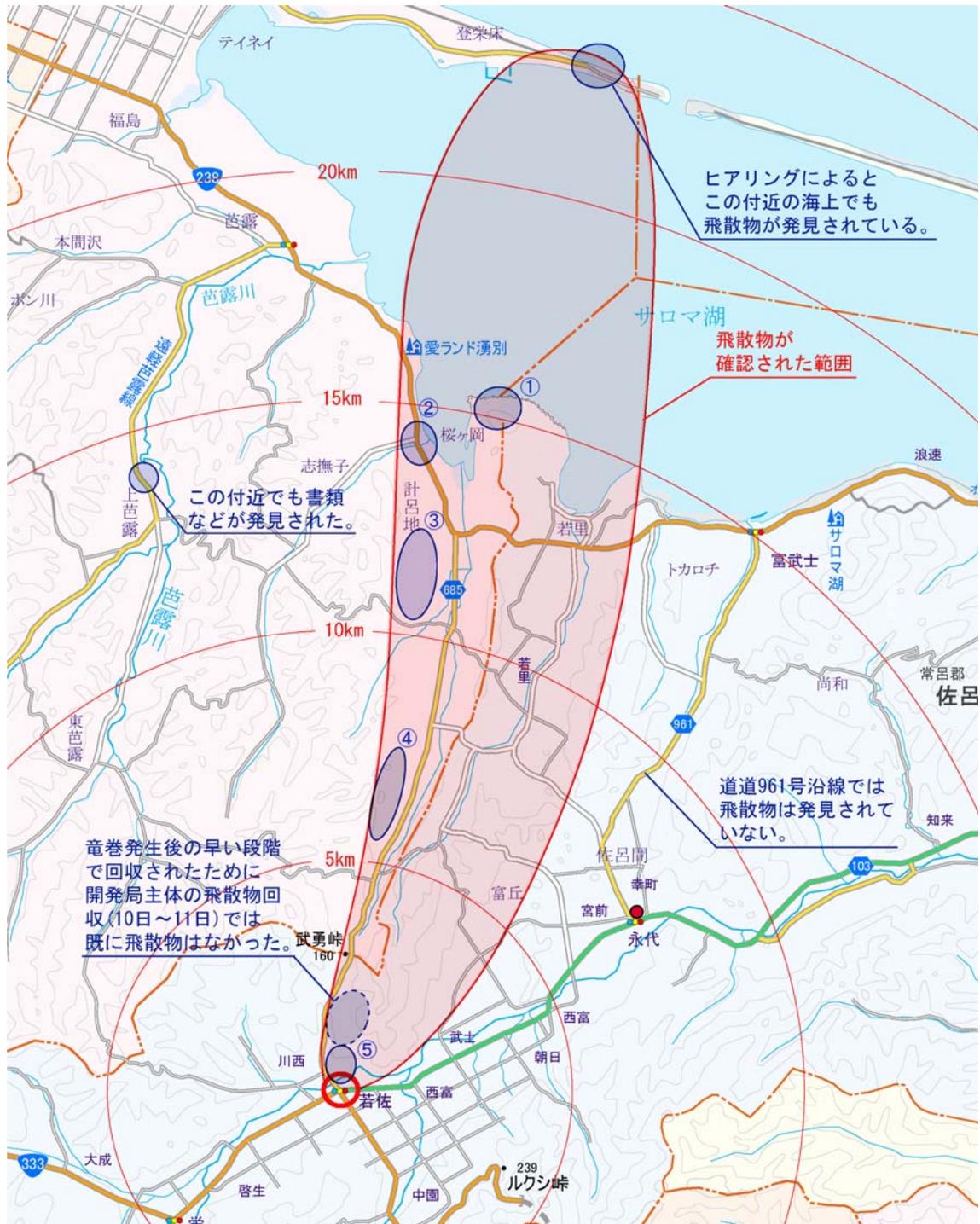


図-3.14 瓦礫等が飛散したと予想される範囲



(写真提供：北見道路事務所)

写真-3.54 木の上に引っかかっているグラスウール（図-3.14 地点①）



(写真提供：北見道路事務所)

写真-3.55 発見されたトタン（図-3.14 地点②）



(写真提供：北見道路事務所)

写真-3.56 佐呂間トンネル現場事務所から飛ばされたと思われるもの (図-3.14 地点③)



(写真提供：北見道路事務所)

写真-3.57 牧草地に散乱するガラスウールなど (図-3.14 地点④)



(写真提供：株式会社シン技術コンサル、加筆：伊藤陽司助教授)

写真-3.58 柱状飛散物の分布状況 (図-3.14 地点⑤)

【3章の参考文献】

- 1) 総務省：北海道佐呂間町における竜巻災害に関する被害状況及び対応について【第5報】、
http://www.soumu.go.jp/menu_00/important/index.html、2007.
- 2) 北海道電力：北海道電力配電用品規格(HDS) A-02 遠心力プレストレストコンクリート
ポール 遠心力鉄筋コンクリートポール、1988.
- 3) 土木学会：土木学会誌 vol.91 no.12 December 2006, pp.2-5
- 4) 札幌管区气象台：災害時気象調査報告、平成18年11月7日から9日に北海道（佐呂間町
他）で発生した竜巻等の突風、災害時自然現象報告書 2006年第1号、2006.
- 5) 佐々浩司、林泰一：現地調査と模擬実験に基づく佐呂間竜巻発生時の大気下層場の推定、
文部科学省科学研究費補助金報告書 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な被害に
関する調査研究、pp.45-56,2007.
- 6) 鈴木 修、中里 真久、山内 洋：現地調査に基づく竜巻の特定と特徴の概要及びレーダー観
測に見られた親雲の特徴について、文部科学省科学研究費補助金報告書 北海道佐呂間町
で発生した竜巻による甚大な被害に関する調査研究、pp.5-18,2007.

4. 標識柱の倒壊メカニズムの推定

4.1 概要

4.1.1 竜巻による影響評価の難しさ

写真-4.1 に現地被害調査の概要から推測した家屋や道路標識などの倒壊、破損方向を示している。家屋は被害を受けた時の竜巻との相対位置や、その構造などの違いが原因となって、様々な方向に倒壊、破損しており、竜巻による影響評価の難しさを示している。竜巻により作用する風は、竜巻の中心周りの回転成分と共に（本竜巻の場合もそう考えられるが北半球では多くの場合が反時計回り）、吹き上げ方向の成分や竜巻本体の移動成分が合成されたものである。また、こうした急激かつ複雑な風速変化だけではなく、竜巻中心部の通過に伴う気圧変化もあり、竜巻により構造物に作用する荷重の特性については、未解明な点が多い。したがって、構造物の被害状況から、竜巻の風速といった特性を逆解析的に評価する際にも多くの仮定を設ける必要がある。本章では、標識柱の倒壊時に風荷重が静的に作用したものと仮定することによって、作用した風速を推定しているが、そうした仮定は実際の現象を大幅に単純化したものであることに留意が必要である。

本報告で対象とする道路標識の標識柱は、ほとんど被害を受けた直後の状態のままで調査でき、竜巻の影響を逆解析検討するためには比較的検討しやすいと思われた。しかし、実際に詳細に検討してみると、竜巻の影響の複雑さがかえって浮き彫りとなった。本章で述べる解析検討結果はこのような限られた制約の中で可能な限り慎重に検討した結果ではあるが、読者のご批判を仰ぎたい。



写真-4.1 被害前の航空写真と被害の方向

4.1.2 道路標識の断面諸元

倒壊した道路標識柱は新佐呂間トンネル工事事務所から国道を挟んだ位置に設置されていた(写真-4.2)。この道路標識は国土交通省標準仕様の道路標識 F252 型で、鋼管に STK400 材が使用されている。表-4.1、図-4.1 に主な構造諸元と各部の寸法を示す。

標識柱基部は高さ 250mm の 8 枚のリブで鋼管柱の外部から補強されており、破壊は補強リブ直上にほぼ水平方向に発生した。補強リブ上端からの柱中央までの鉛直距離は 3.239m、標識板中央まで 5.728m となっている。



(写真提供：開発局)

写真-4.2 被害前の道路標識の設置状況
(竜巻は写真の右前方から標識柱の方向に進行してきた)

表-4.1 標識柱の諸元

標識板	SS400, 1,400×2,100 面積： $A=2.94 \times 10^6 \text{ mm}^2$
柱	STK400, 267.4φ×6.6 $I=4,598 \times 10^4 \text{ mm}^4$, $J=9,190 \times 10^4 \text{ mm}^4$ 肉厚中心までの半径： $r=130.4\text{mm}$, 内半径：127.1mm, 外半径：133.7mm
横梁	STK400, 139.8φ×4.5

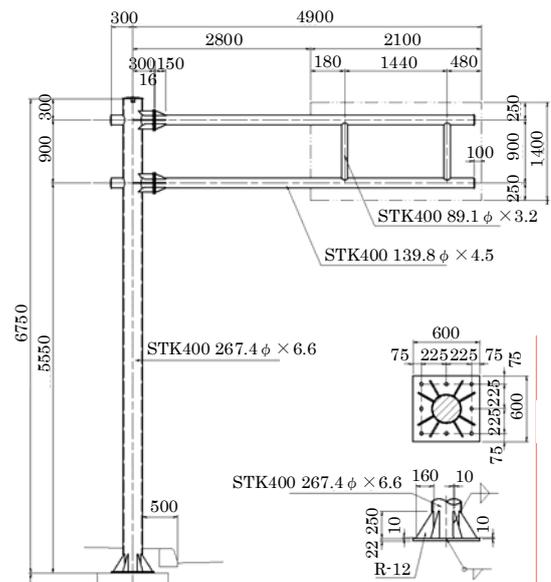


図-4.1 標識柱の寸法

4.1.3 道路標識材料の強度、弾性係数

この倒壊した標識柱の材料強度を把握するために、JIS Z2201 に沿って倒壊した標識柱から写真-4.3のような試験片を作成し引張試験を実施した。得られた降伏点と引張強度を表-4.2に示すが、STK400材としては強度の大きな材料であることがわかる。



写真-4.3 引張試験供試体

表-4.2 引張試験結果

試験片	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
No.1	435	518
No.2	-	523
No.3	441	525
No.4	433	523
No.5	417	522
平均	432	522

4.1.4 道路標識の破壊状況

この道路標識の破壊状況を説明する。**写真-4.4**、**写真-4.5**に示すように道路標識柱は、ほぼ竜巻の進行方向に倒壊している。また、**写真-4.4**の上方に横梁の破壊状況が見られるが、横梁は標識柱の上側に曲げ破壊している。通常的设计では標識板に横から風を受けて、横梁は横方向に曲げ破壊を想定して設計しているが、今回の破壊状況はそれとは違い、竜巻の影響の複雑さを示している。また標識板は横梁から外れて標識柱から50mくらい先まで飛ばされている。これらの状況から、標識板とそれを取り付けている横梁の損傷発生の要因としては、1)吹き上げる方向の風が作用した、2)標識柱が倒壊して傾いている最中に標識柱の軸方向の風が作用した、などが考えられるが、いずれにしても全体の損傷を説明するものとはいえ、現象の理解は困難である。

また、**写真-4.5**に示すように、標識柱基部の局部曲げ座屈変形の詳細状況から、最初標識柱は道路方向（北北西方向）から時計回りに約15°方向に曲げ変形を受けている。またその直後に竜巻の進行（北北東方向から北東方向）につれて、回転（ねじり）の影響を受けて、倒壊したものと推定される。



(写真提供：開発局)

写真-4.4 道路標識柱の破壊状況

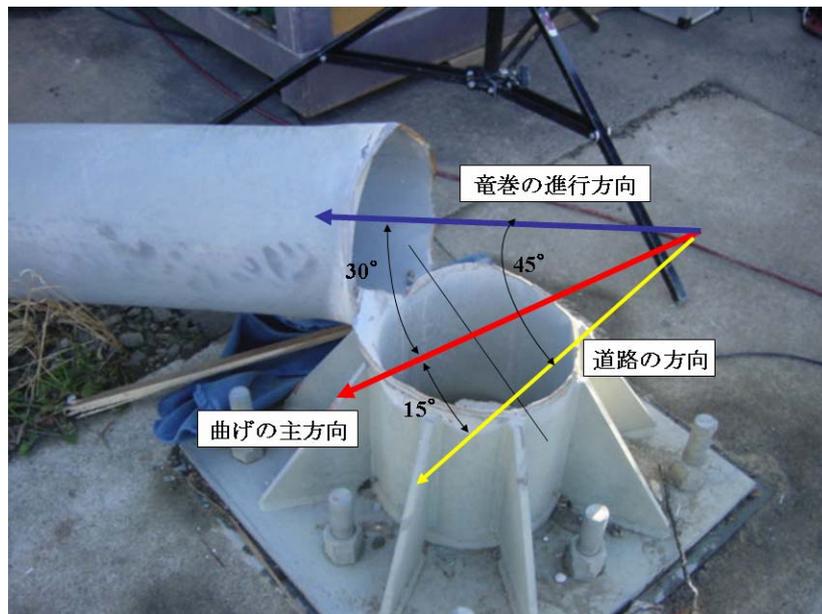


写真-4.5 道路標識柱基部の破壊状況

4.2 道路標識柱に作用したと思われる応力の推定

道路標識柱の設計は道路標識設置基準¹⁾に準拠し、道路標識ハンドブック²⁾に沿って設計・設置されており、本報告の計算はこれらの計算プロセスに沿って計算することとする。また実際の設計計算では構造詳細に忠実に計算するため、かなりの計算分量となるが、ここでは大筋の作用力を概算する目的から、影響の少ない計算項目は省略して計算しているが、実際の設計計算プログラムにより大筋の計算値が一致することを確かめている。

道路標識ハンドブックによれば構造に作用する有効投影面積あたりの風荷重 $p(\text{N/m}^2)$ は、

$$p = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D \quad (1)$$

ただし V : 風速 (m/s)、 ρ : 空気の密度 $1.23(\text{N s}^2/\text{m}^4)$ 、

C_D : 抗力係数

$C_D=0.7$ (円形断面の部材に対して)

$C_D=1.2$ (標識板に対して)

表-4.3 標識柱基部の応力の計算

単位風荷重	柱	$p_1 = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{D0.7} = 0.43V^2$	(N/m^2)
	標識板	$p_2 = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{D1.2} = 0.74V^2$	(N/m^2)
	横梁	$p_3 = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{D0.7} = 0.43V^2$	(N/m^2)
受風面積	柱	$A_1 = 6.75 \times 0.27 = 1.8$	(m^2)
	標識板	$A_2 = 2.1 \times 1.4 \times \cos 15^\circ = 2.8$	(m^2)
	横梁	$A_3 = (2.8 - 0.13) \times 0.14 \times \cos 15^\circ = 0.4$	(m^2)
風荷重	柱	$P_1 = p_1 \cdot A_1 = 0.78V^2$	(N)
	標識板	$P_2 = p_2 \cdot A_2 = 2.1V^2$	(N)
	横梁	$P_3 = p_3 \cdot A_3 = 0.16V^2$	(N)
曲げモーメント	柱	$M_1 = 3.24 \quad P_1 = 2.5V^2$	(Nm)
	標識板	$M_2 = 5.73 \quad P_2 = 12.0 \quad V^2$	(Nm)
	横梁	$M_3 = 6.18 \quad P_3 = 5.28 \quad P_3 = 1.8 \quad V^2$	(Nm)
	合計	$M = M_1 + M_2 + M_3 = 16.3 \quad V^2$	(Nm)
ねじりモーメント	標識板	$T_2 = 3.85 \quad P_2 = 8.1 \quad V^2$	(Nm)
	横梁	$T_3 = 2 \times ((2.8 - 0.13)/2 + 0.13) \quad P_3 = 0.5 \quad V^2$	(Nm)
	合計	$T = T_2 + T_3 = 8.6 \quad V^2$	(Nm)
基部の曲げ応力		$\sigma = \frac{M}{I} r = 4.6 \times 10^4 V^2$	(N/m^2)
ねじり応力		$\tau = \frac{T}{J} r = 1.2 \times 10^4 V^2$	(N/m^2)
合成応力		$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = 2.6 \times 10^4 V^2$	(N/m^2)

表-4.3 に柱基部に発生する応力計算の過程を示す。風速 V を変数として(1)式の単位風荷重と標識柱の各部の寸法から諸数値を求めた。有効投影面積の計算では、曲げの主方向が道路の進行方向から約 15° 偏角していることを考慮して標識板と横梁の有効投影面積を計算した。ねじりモーメントについては標識板と横梁に作用する風圧からねじりモーメント T を計算し、そのねじりモーメントによるせん断応力 τ を単純ねじり問題として円筒断面について計算している。また合成応力に関する照査は、 σ と τ による 2 次元応力状態としての最大せん断応力 τ_{\max} として次式で求めている。

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad (2)$$

通常の標識柱の設計では上記の各応力度が許容応力度を超過しないことを確認することで設計を行うが、ここでは引張試験によって求められた鋼材の強度から破壊時の作用風速の推定を試みる。せん断に対する材料強度は、表-4.2 に示した実際の鋼管柱の引張強度が平均で 522N/mm^2 であることから、せん断耐力 τ_b を次式によって求める。

$$\tau_b = 150 \times 10^6 \times \frac{522 \times 10^6 / 3}{140 \times 10^6} = 186 \times 10^6 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (3)$$

これは STK400 材の許容引張応力度 140N/mm^2 に対して実際の引張強度を（強度に対する許容応力度の）安全率 3 で除した値の比に、標準終局せん断強度（許容せん断応力 $(50\text{N/mm}^2) \times$ 安全率 3.0）を乗じたものである³⁾。以上の計算から次式により推定瞬間風速を求める。

$$\begin{aligned} 2.6 \times 10^4 V^2 &\geq 186 \times 10^6 \\ V &\geq 85 \text{ (m/s)} \end{aligned} \quad (4)$$

前述したように、ここでの検討内容は風が標識柱に静的かつ一様に作用したことを仮定しており、飛来物が標識板や柱に衝突することによる荷重の増大や、飛来物が張り付くあるいは巻き付くことによる受風面積の増大による荷重の増大を考慮していない。さらに、実際の竜巻において風向や風速が動的に変化することなど、実際の現象を忠実に表現しているわけではないことから、あくまでも参考の推定計算であることに留意が必要である。

4.3 倒壊メカニズムに関する三次元弾塑性有限要素解析

倒壊した道路標識柱を対象に三次元有限要素法を用いた弾塑性解析を実施し、その破壊メカニズムに関して数値解析的に検討を行った。なお、数値解析には非線形構造解析用汎用プログラムである ABAQUS⁴⁾を使用した。

4.3.1 解析モデル

図-4.2 には、本数値解析で使用した有限要素モデルを示している。要素モデルは、図-4.1 を参考にして詳細にモデル化を行っている。なお、標識板は、実構造と同様に下端を鉛直方向に対して約 3° 後方に傾斜させている。鋼管部、標識板、補剛リブは4節点シェル要素とし、柱および横梁取り付け部の底板には8節点固体要素を使用した。総要素数および総節点数は、それぞれ 17,492、18,319 である。

境界条件は、柱基部底面を完全固定としている。

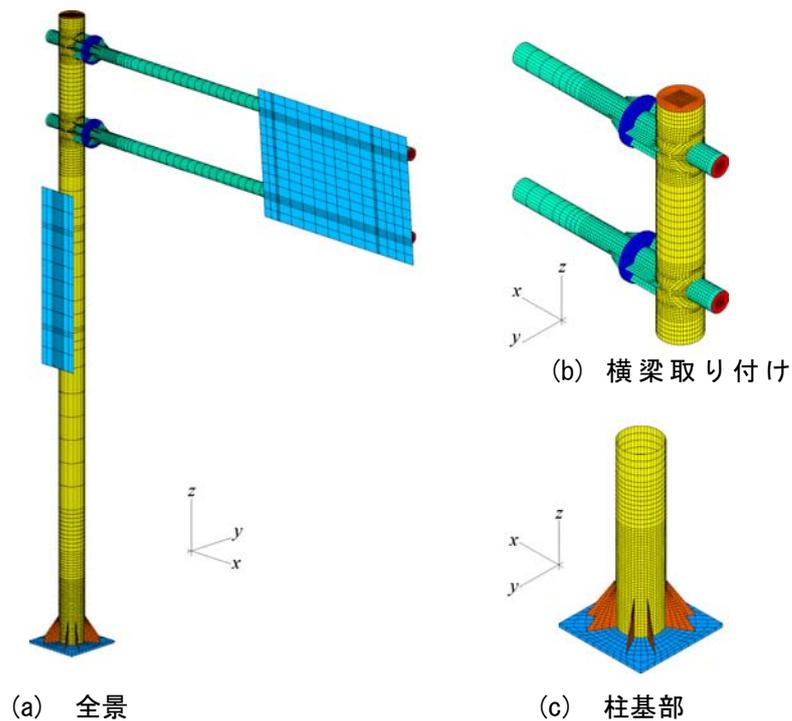


図-4.2 有限要素モデル

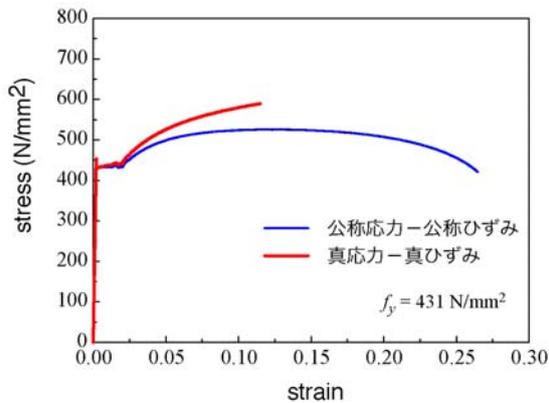
4.3.2 材料物性値

倒壊した標識柱の材料物性値を調べるために、倒壊後の道路標識柱から試験片を切り出し、さらに平板となるように切削加工した後、板引張試験を実施した。実験は日本製鋼所室蘭研究所で実施した。

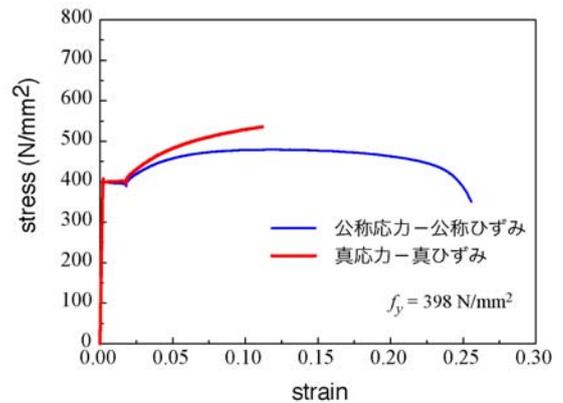
表-4.4 には、板引張試験結果から得られた柱および横梁の材料物性値を示している。また、図-4.3 には、供試体 No.2 (柱) および供試体 No.4 (横梁) における応力-ひずみ関係を示している。図より、いずれの場合も明確な降伏棚が確認できる。また、写真-4.6 には、引張試験終了後の各試験片の破断状況を示している。

表-4.4 倒壊した道路標識柱の材料物性値 (板引張試験による)

供試体	降伏応力 f_y (N/mm ²)	引張強度 f_u (N/mm ²)	弾性係数 E_s (N/mm ²)	ポアソン比 ν_s	硬化開始ひずみ ϵ_{st} (μ)	伸び (%)
(a) 柱材 ($\phi 267.4 \times 6.6$)						
1	442	530	201,245	0.3	19,600	27.2
2	431	526	206,422	0.3	20,100	26.5
(b) 横梁材 ($\phi 139.8 \times 4.5$)						
3	401	473	207,061	0.3	15,600	24.5
4	398	479	205,693	0.3	18,200	25.7



(a) 柱材 (No. 2 供試体)



(b) 横梁材 (No. 4 供試体)

図-4.3 柱および横梁材の応力-ひずみ関係



(a) 柱 (b) 横梁

写真-4.6 引張試験終了後の各試験片の破断状況

図-4.4には、本数値解析で仮定した STK400 材および SS400 材の真応力-真ひずみ関係を示している。STK400 材の応力-ひずみ関係に関しては、前述の板引張試験結果（図-4.3 参照）を多直線で近似して使用することとした。また、最大応力以降については、図に示すように一定値となるように仮定した。なお、補剛プレート（リブ）に関しては、文献 5)を参照に SS400 材の応力-ひずみ関係を使用することとした。表-4.5には SS400 材の材料物性値を示している。

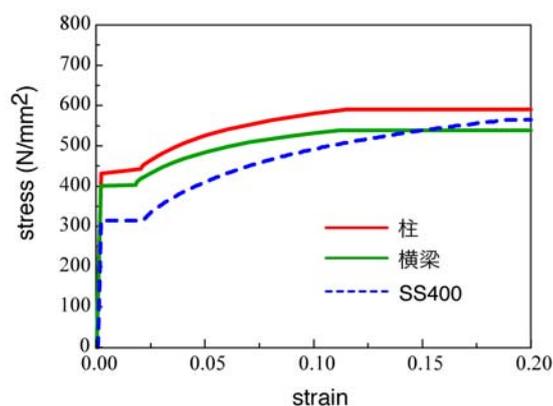


図-4.4 解析に用いた真応力-真ひずみ関係

表-4.5 既往の研究成果による鋼材の材料物性値 (SS400 材) ⁵⁾

	降伏応力 f_y (N/mm ²)	引張強度 f_u (N/mm ²)	弾性係数 E_s (N/mm ²)	ポアソン比 ν_s
SS400	314.7	468.5	206,000	0.3

4.3.3 解析方法

本解析では、道路標識柱の耐荷力を確認するために、**図-4.5**に示す柱部、横梁部および標識板に圧力荷重 p_i を与えることによって実施した。設計書⁶⁾によると、柱および横梁部に作用する風圧 p_2 は、外径に等分布的に作用することと記載されている。しかしながら、ここでは、柱部と横梁部に対して中心角がそれぞれ 75° 、 60° の領域における鋼管表面に等価な圧力荷重 p_{2c} 、 p_{2b} が作用するものと仮定した。また、2つの標識板には圧力荷重 p_1 を作用させた。

解析は、弧長増分法を用いて風圧 p_i を増加させ、柱基部あるいは横梁取り付け部に局部座屈が発生し耐力が低下するまで行うこととした。なお、数値解析には幾何学的非線形を考慮している。

解析ケースは、予備解析結果に基づき下記の2種類を行うこととした。すなわち、

ケース1：全ての部材を弾塑性体でモデル化する場合

ケース2：横梁の座屈を抑制するためにその剛性を向上させ、柱基部で局部座屈が発生するようにモデル化する場合

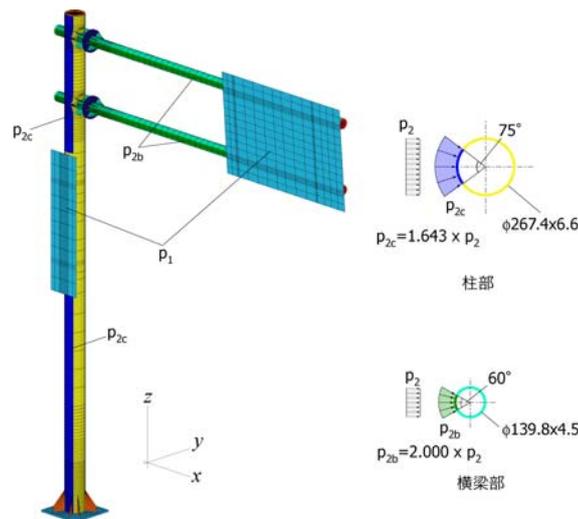


図-4.5 風荷重作用位置

なお、風圧が増大すると、全ての部材を弾塑性体としてモデル化する場合1の場合には、柱基部よりも先に横梁取り付け部近傍に局部座屈が発生し、終局に至ることが明らかになった。これより、柱基部で終局に至る場合の耐荷力を評価するために、ケース2では横梁の剛性を向上させることにより横梁取り付け部近傍の局部座屈を抑制することとした。

4.3.4 数値解析結果

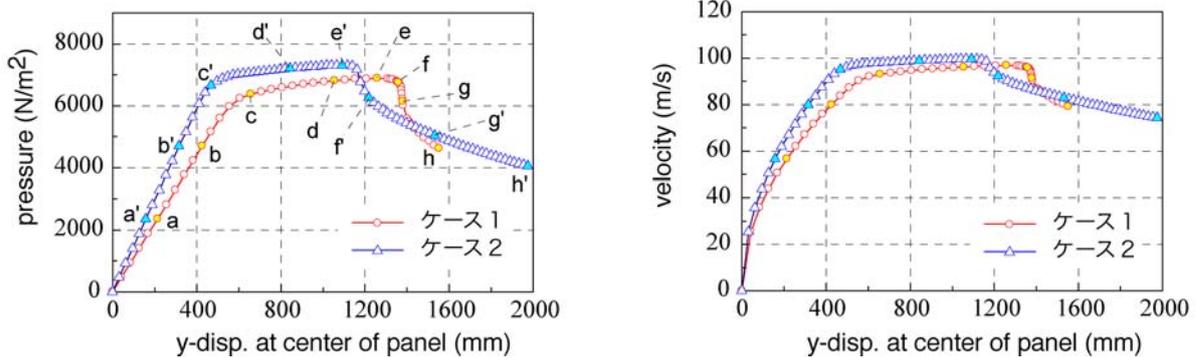
(1) 荷重－変位関係

図-4.6には、解析結果から得られる風圧 p あるいは風速 v と標識板中央部の y 方向変位との関係を示している。ケース1では、変位が約 1,350 mm 付近（図中、f 点近傍）から横梁取り付け部に局部座屈が発生している。

一方、横梁取り付け部の局部座屈を抑制する場合であるケース2では、変位が約 1,150 mm となる近傍から柱基部近傍に局部座屈が発生し終局に至っている。

また、最大耐荷力に着目すると、ケース1では風圧 $p = 6,887 \text{ (N/m}^2\text{)}$ （風速 $v = 96.8 \text{ m/s}$ ）、ケース2では風圧 $p = 7,312 \text{ (N/m}^2\text{)}$ （風速 $v = 99.7 \text{ m/s}$ ）となっており、数値解析上は、風速 $v \approx 95 \text{ m/s}$ 程度の大きな風速に対しても十分に耐えうる構造となっていることが分かる。

なお、図-4.6において、両解析ケースで初期勾配が異なっている。これは、ケース2において横梁取り付け部の局部座屈を抑制するために、横梁の剛性を向上させたことにより標識板中央点の変位が抑制されたことによるものである。



(a) 風圧と変位の関係

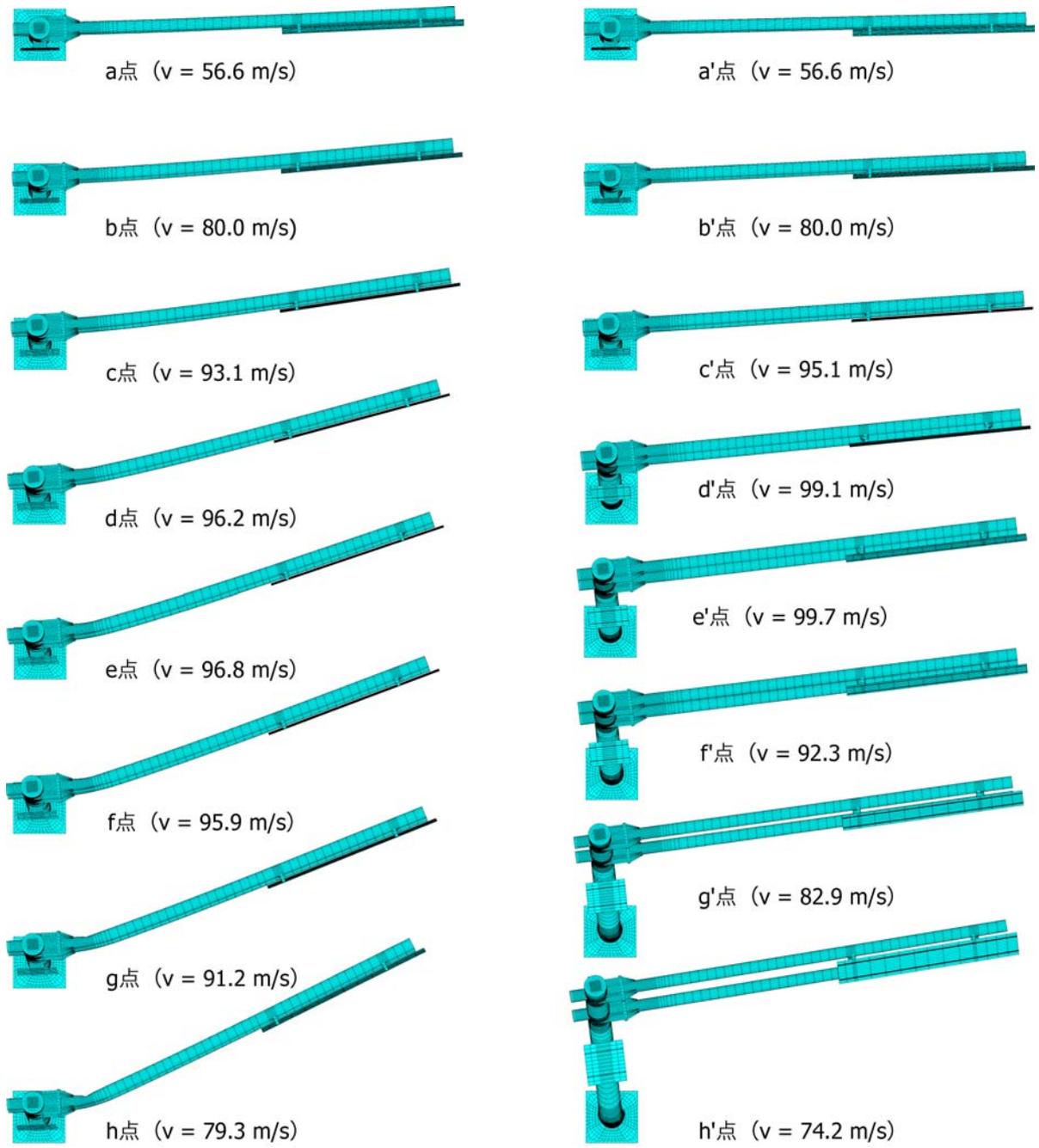
(b) 風速と変位の関係

図-4.6 風圧あるいは風速と標識板中央部の y 方向変位との関係

(2) 横梁の変形状

図-4.7(a)には、全ての部材を弾塑性体と仮定するケース1に対する道路標識柱の変形状を真上から鳥瞰したものである。なお、着目点は図-4.6に示す(a~h)とし、変形倍率は等倍としている。図より、最大圧力あるいは風速(e 図)を示した後、横梁取り付け部に局部座屈が発生していく様子が確認できる。

図-4.7(b)には、横梁を弾性体と仮定して横梁の局部座屈を抑制した場合(ケース2)において、図-4.6に示す着目点(a'~h')に対する道路標識柱の変形状を示している。図より、前述のケース1の場合とは異なり、最大圧力あるいは風速(e' 図)を示した後、横梁取り付け部近傍には局部座屈が発生していないことが確認される。



(a) ケース 1 の場合

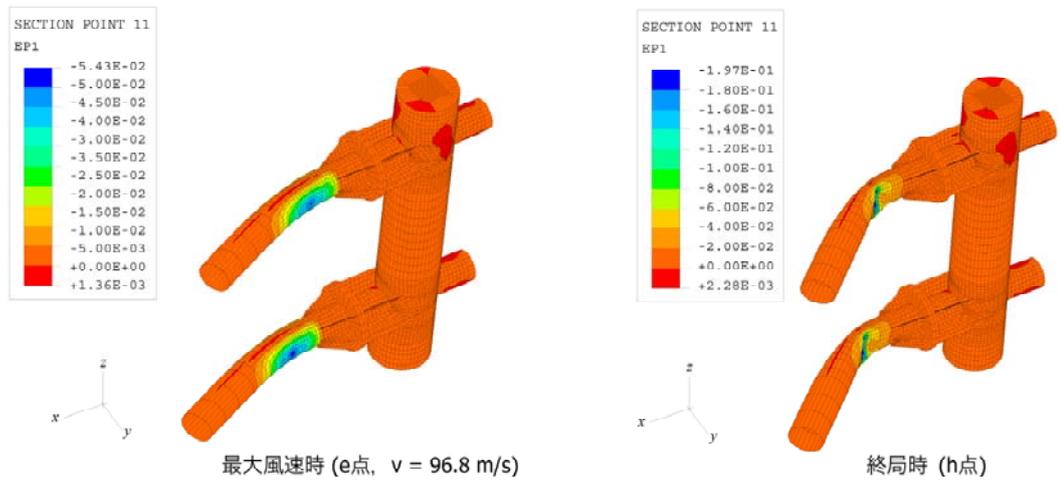
(b) ケース 2 の場合

図-4.7 各風速に対する変形状況

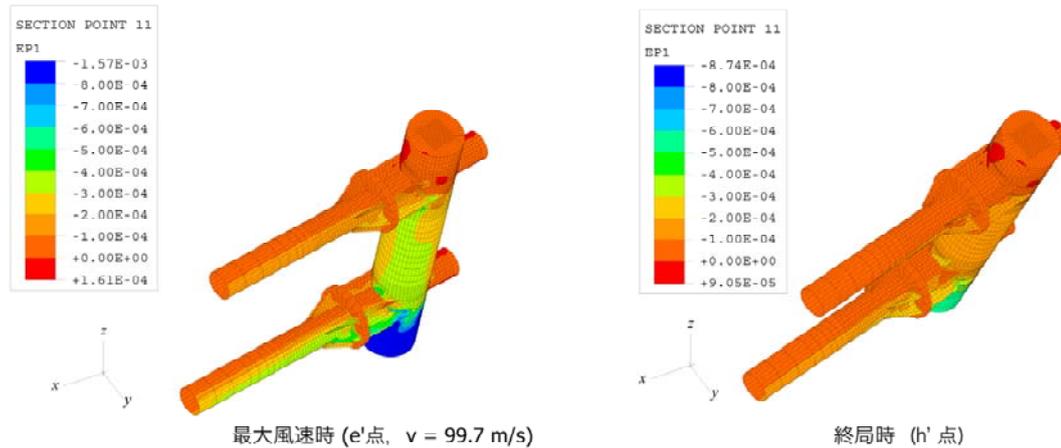
(3) 横梁取り付け部近傍の変形状と最小ひずみ分布

図-4.8には、横梁を弾塑性体としたケース1の場合、および横梁を弾性体と仮定して横梁の局部座屈を抑制したケース2の場合における、最大風速時（図-4.6に示す e, e' 点）および終局時（h, h' 点）に対する横梁取り付け部の変形状と最小ひずみ分布を示している。なお、変形倍率は2倍である。

(a) 図より、ケース1の場合には最大風速を示した後、横梁取り付け部に局部座屈が発生進展していく状況を確認できる。一方、(b) 図のケース2の場合にはケース1の場合とは異なり、最大風速到達から終局に至るまで横梁取り付け部近傍には局部座屈が発生しないことが確認される。



(a) ケース1の場合



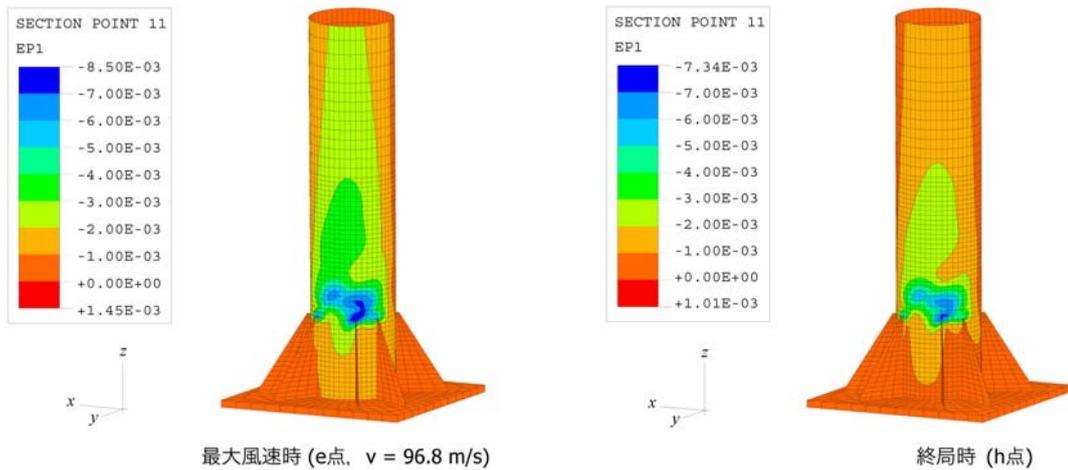
(b) ケース2の場合

図-4.8 横梁取り付け部近傍の変形状と最小主ひずみ

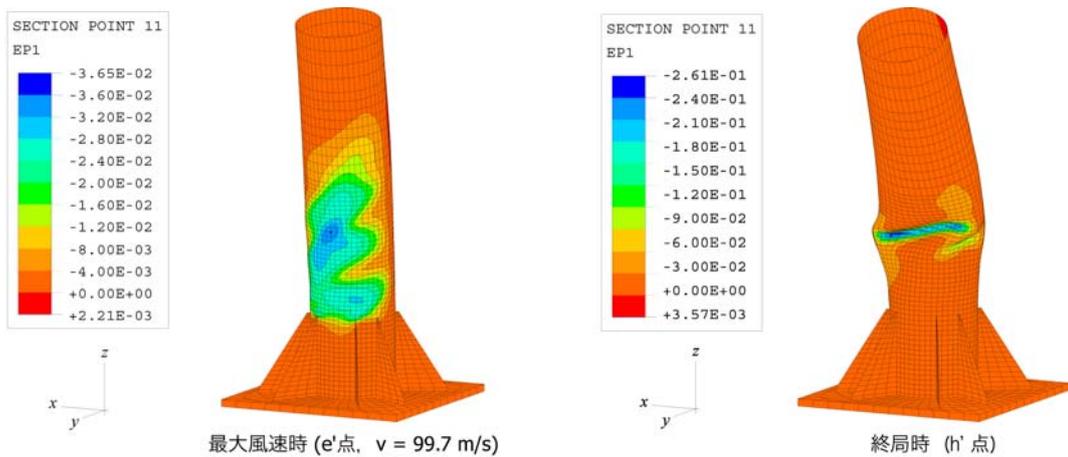
(4) 柱基部近傍の変形状と最小ひずみ分布

図-4.9には、横梁を弾塑性体としたケース1の場合、および横梁を弾性体と仮定して横梁の局部座屈を抑制したケース2の場合における、最大風速時（図-4.6に示すe、e'点）および終局時（h、h'点）における柱基部近傍の変形状と最小ひずみ分布を示している。

図より、ケース1の場合には、前述の図-4.8(a)に示すように横梁取り付け部に局部座屈が発生したため、柱基部には大きな変形が見られないことが分かる。一方、(b)図より、横梁の局部座屈を抑制するケース2の場合にはケース1の場合とは異なり、最大風速（e'点図）を示した後、柱基部の補剛プレート上端より柱直径程度上の領域に曲げとねじりの連成による複雑な局部座屈が発生し、終局に至ることが確認される。



(a) ケース1の場合



(b) ケース2の場合

図-4.9 柱基部近傍の変形状と最小主ひずみ

4.3.5 まとめ

本数値解析範囲内で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- (1) 全ての部材を弾塑性体としてモデル化する場合には、最大風速 $v = 96.8 \text{ m/s}$ で横梁取り付け部近傍に局部座屈が発生する。
- (2) また、横梁を弾性体と仮定して横梁に発生する局部座屈を抑制する場合には、最大風速が $v = 99.7 \text{ m/s}$ 時点で柱基部近傍に座屈が発生して倒壊に至る。
- (3) 一方、実現象では、横梁は上方向に折損しかつ柱は基部から倒壊しており、解析結果と異なる。その要因としては、飛来物が柱に巻き付き柱に作用する荷重が増加したことによる影響や、風速・風向が急激に変化することによる動的効果等が挙げられる。

4.4 断面分析

竜巻がもたらす風がどの程度の強さであったかについては測定が困難な場合が多く、柱状構造物の破壊状況から推定を試みることが多い。佐呂間竜巻においても破壊した道路標識柱を対象として、FEM 解析によって様々な荷重を仮定し、それぞれの破壊形態を検討した。本節では、倒壊した破断面の破壊性状を詳細に分析し、FEM 解析による破壊性状との比較を行い、竜巻によってどのように破壊に至ったのかを推定することを目的として実施した⁷⁾。

4.4.1 供試材料

本調査に用いた鋼管の材質およびサイズを以下に示す。

材 質：一般構造用炭素鋼管 JIS G3444 STK400 一般構造用炭素鋼管
(熱間あるいは冷間加工の種別は不明)

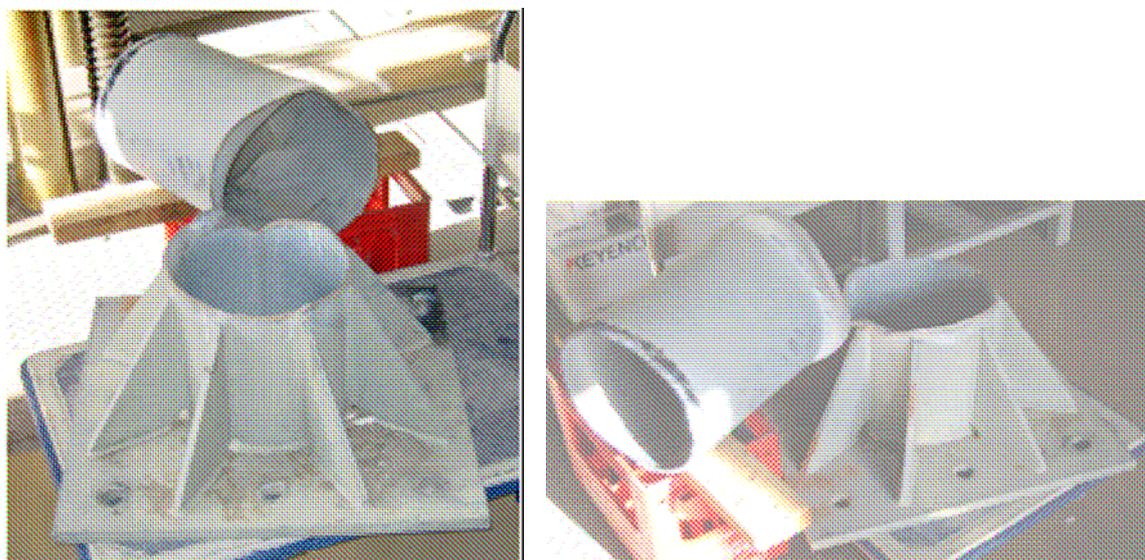
サイズ：外径 267.4mm, 厚さ 6.6mm

4.4.2 調査鋼管の概要と破断概況

(1) 調査鋼管の全景と破断の概況

調査鋼管の全景を写真-4.7に示す。鋼管はほぼ同一面上、すなわち地面からの高さがほぼ一定の円周全域に渡って破断し、一部で繋がった状態となっている。なお本鋼管は、計8本の補強用スティフナーが、外表面に約45度の等間隔ですみ肉溶接により取り付けられている。

破面には若干の腐食（赤錆）が見られた。しかし、いずれも新しい腐食であり、鋼管の破断前から存在したような腐食の痕跡は見られていない。また破面全体にわたり、マクロ観察では延性破面を呈し、ぜい性的な破面は観察されていない。また、写真-4.8の左側半分には座屈が生じている。



←若佐交差点 至 北見→
国道333号線側

写真-4.7 調査鋼管全景

(2) 本調査に用いた鋼管の位置定義

図-4.10 に本調査に用いた鋼管の破面形態の定義を模式的に示す。また、写真-4.8 に対応する実際の鋼管の写真を示す。破断しなかった部分、すなわち鋼管の溶接部をほぼ 12 時の位置と定義した。

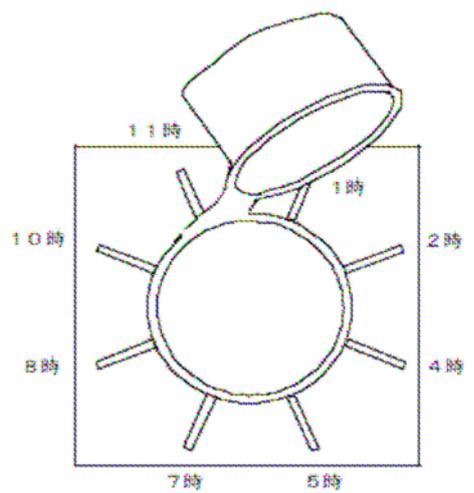


図-4.10 本調査における破面形態の定義の模式図



写真-4.8 調査鋼管破断面全景と位置

(3) 破断の概況

破断は主として写真-4.8の下手から発生し、上手に向かって進展したものと推定される。なお、破断形態については、4.4.6で述べる。

調査鋼管のマクロ観察から、破面には図-4.11に示すような3種類、計4つの破面が見られる。本報告で認められた破面形態を模式的に示す。

タイプⅠ：鋼管内表面上方から外表面下方に向かったほぼ45度の傾斜破面

タイプⅡ：鋼管外表面上方から内表面下方に向かったほぼ45度の傾斜破面

タイプⅢ：鋼管内外表面上方から板の内部に向かったほぼ45度の傾斜破面

(タイプⅢは、凹状態と凸状態が存在)

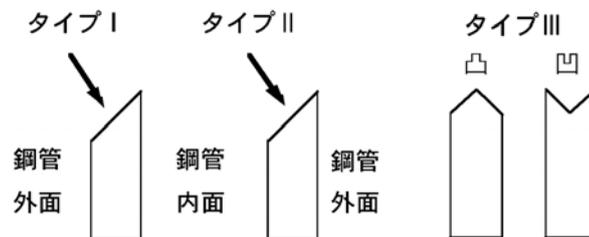


図-4.11 本調査における破面形態の定義の模式図

4.4.3 破断面のマクロ観察

(1) 5時～4時の位置：凹凸破断部

写真-4.9 に、5時～4時の範囲の破面が凹凸状態になっている領域の外観写真を示す。5時の位置の破面はタイプⅠの片側せん断破面になっている。しかし、4時の方向に向かうにつれ、タイプⅢの凸破面（写真-4.10）、さらに凹破面（写真-4.11）と続き、引張延性破断を行ったことを示唆している。



写真-4.9 5時～4時の位置：凹凸部

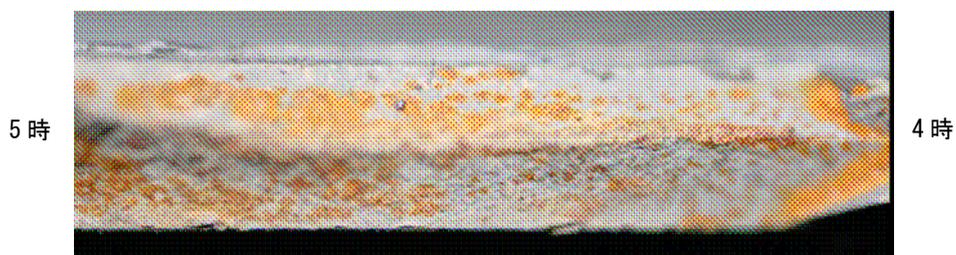


写真-4.10 5時～4時の位置：凸部（拡大）

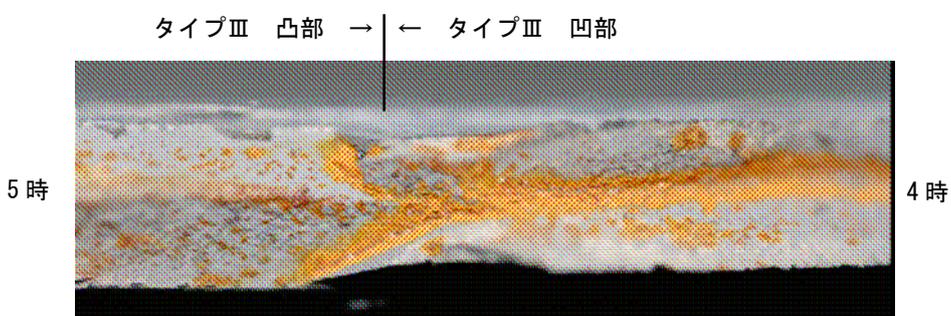


写真-4.11 5時～4時の位置：凹凸部（拡大）

(2) 3時付近の位置：交互せん断破断部

写真-4.12 に交互せん断破断部（3時付近）の外観写真を、写真-4.13 に交互せん断破面の拡大写真示す。ここで、交互せん断とは、タイプⅠタイプⅡの破面が交互に現れていることを示す。いずれにしても、破面状態は延性破壊をしたことを示している。



写真-4.12 3時付近の位置：交互せん断破断部

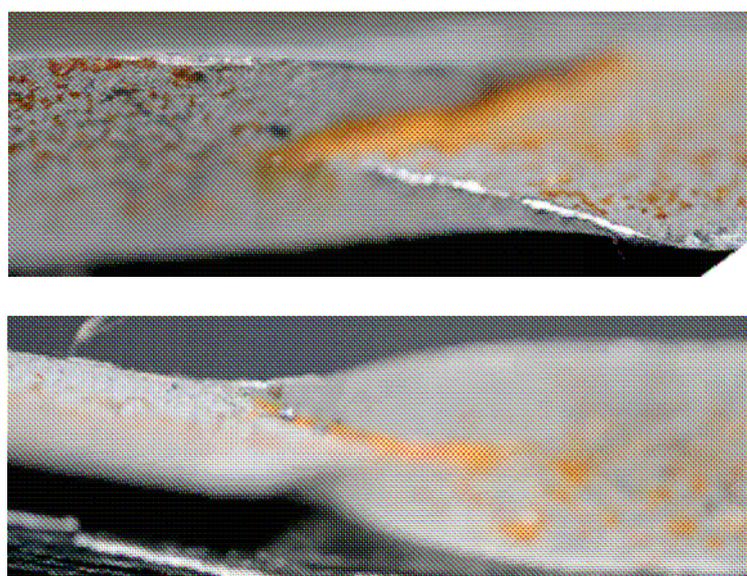


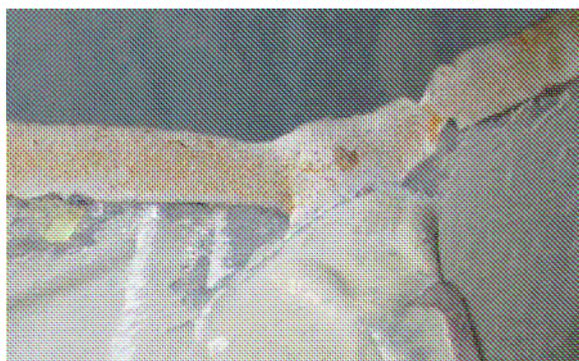
写真-4.13 交互せん断破面部（拡大）

(3) 7時の位置：スティフナー取り付けすみ肉溶接部

写真-4.14に7時の位置の拡大写真を示す。写真-4.15にスティフナー取り付けすみ肉溶接部の拡大写真を示す。若干の腐食(赤錆)が見られるものの、いずれも新しい腐食であり、鋼管の破断前から存在したような腐食の痕跡は見られていない。またマクロ観察からは、溶接線付近も破面はタイプIであり、延性破断をしたことを示している。



全 景



拡 大

写真-4.14 7時の位置の外観写真

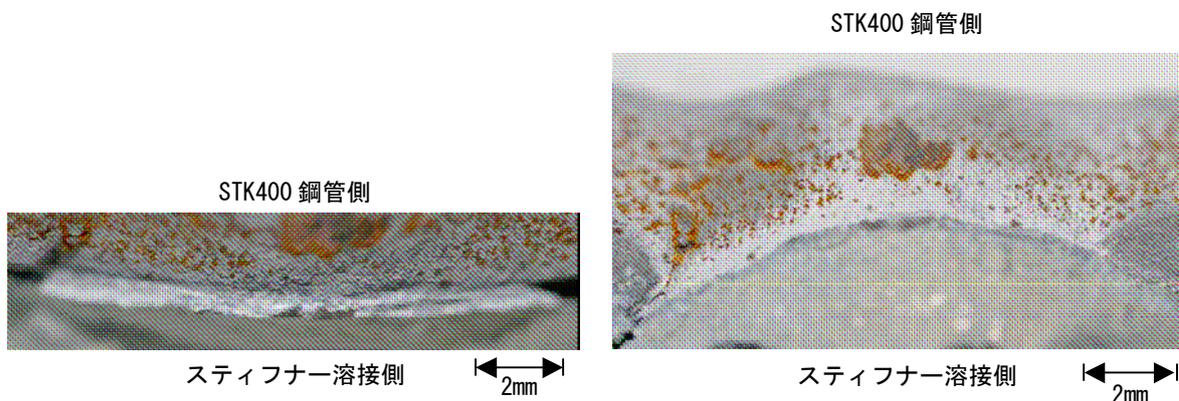


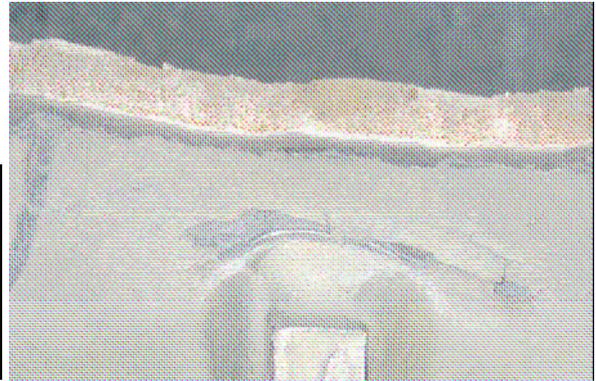
写真-4.15 7時付近の破面：母材－スティフナー溶接金属境界（拡大写真）

(4) 8時の位置

写真-4.16 に8時の位置の外観写真と拡大写真を示す。破面は7時の位置と同様、タイプIの延性的な破面を呈している。



全 景



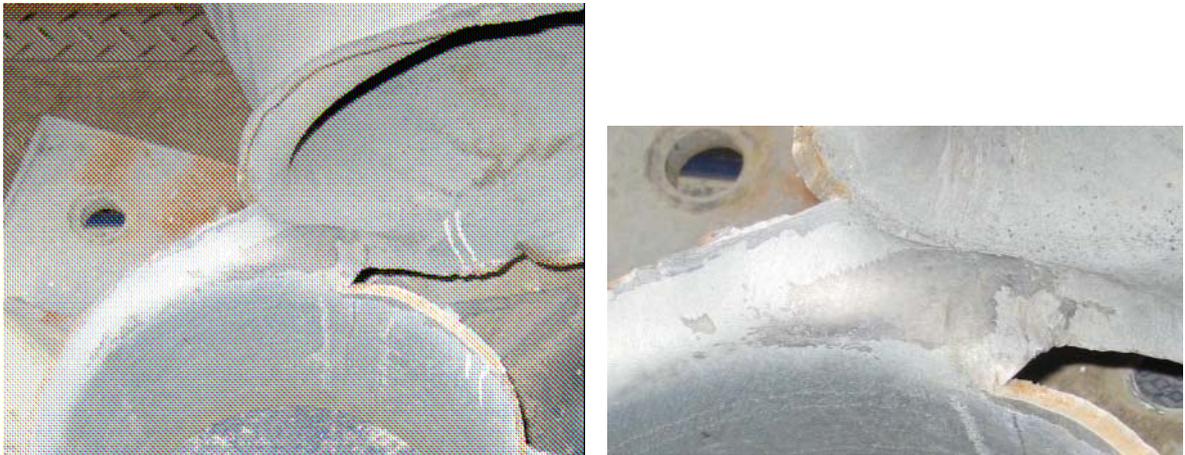
拡 大

写真-4.16 8時の位置の外観写真

(5) 破断最終部付近

写真-4.17 に破断最終位置付近の写真を示す。破断最終部分は鋼管の長手溶接部を含み、幅約 70mm 程度で繋がっている。破断最終部分手前（11 時付近）の破面は、7 時の位置と同様に鋼管内表面上方から外表面下方に向かうタイプ I の延性破面を呈している。写真-4.18 に 1 時付近の破面の拡大写真を示す。1 時の位置は、タイプ II の、鋼管外表面上方から内表面下方に向かう延性破面を示している。

一般に、鉄鋼材料の溶接金属の引張強さは、母材のそれより高くなるように設計・施工される。調査鋼管も同様に製造されたとすると、溶接金属の引張強さは母材のそれよりも高く、最終部分が長手溶接部で繋がったことの原因の一つとなる。



(下側鋼管の中央縦線は、長手溶接部)

写真-4.17 破断最終位置（接続部）

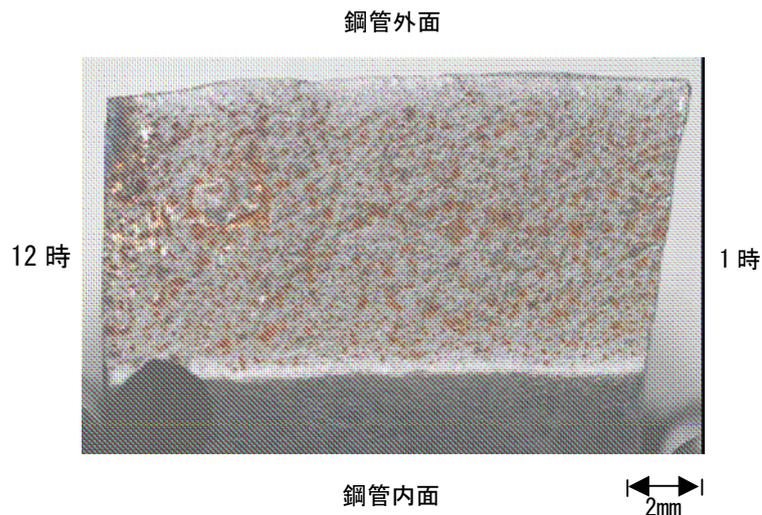


写真-4.18 破断終了 1 時付近の破面マクロ写真 STK400 部（拡大）

4.4.4 破断面のミクロ観察

(1) 7時付近の溶接部

写真-4.19 に7時付近の破面、つまり母材ースティフナー溶接金属境界の、走査電子顕微鏡による破面観察結果を示す。写真-4.20 に写真-4.19 に近い位置における、母材ースティフナー溶接金属境界の破面写真を示す。

いずれも発生部と推定される位置に近いところである。溶接金属は、典型的な柱状晶を示している。一方、母材側熱影響部 (HAZ) の破面は延性破断を示す典型的なディンプルパターンとなっている。つまり、へき開あるいは擬へき開破面が見られないことから、破断時に母材 (鋼管) のじん性は十分あったものと推定される。さらに、ストライエーションが認められないことから、設置開始からの疲労破断はなかったものと推定される。じん性については、4.4.5(3) で述べる。なお、ディンプルパターン底部には介在物は比較的少なく、本鋼管の清浄度は、比較的良好であると推定される。

(2) 7時付近の STK400 原質部 (母材原質部)

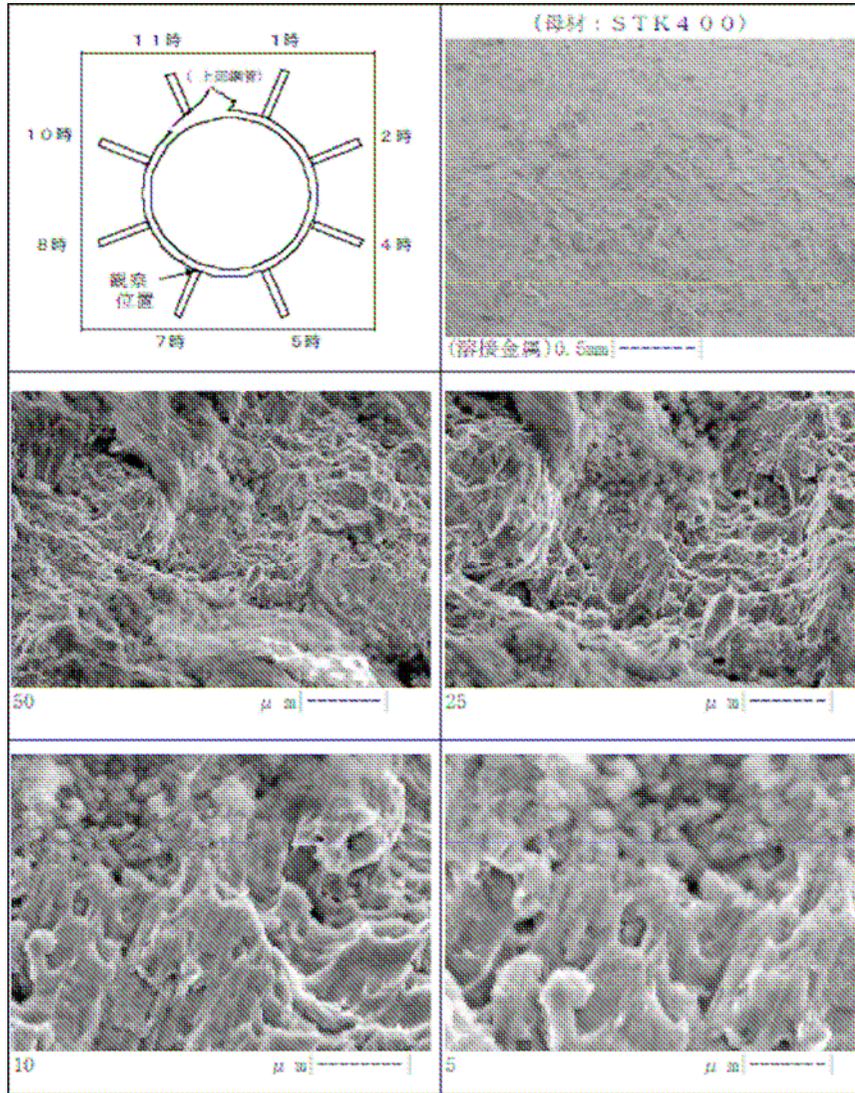
写真-4.21 に7時付近の STK400 原質部の破面を示す。HAZ から離れた母材原質部も同様に延性破面を呈している。

(3) 6時付近の STK400 原質部

写真-4.22 に6時付近の STK400 原質部の破面を示す。破面はディンプルパターンであり、延性破断をしたことを示している。

(4) 破断最終部付近

写真-4.23 に破断終了部に近い1時付近の STK400 の破面を示す。この付近においても破面はディンプルパターンであり、延性破断をしたことを示している。



※母材: STK400; 溶金: 溶接金属

写真-4.19 7時付近の破面
母材-スティフナー-溶接金属境界 SEM写真

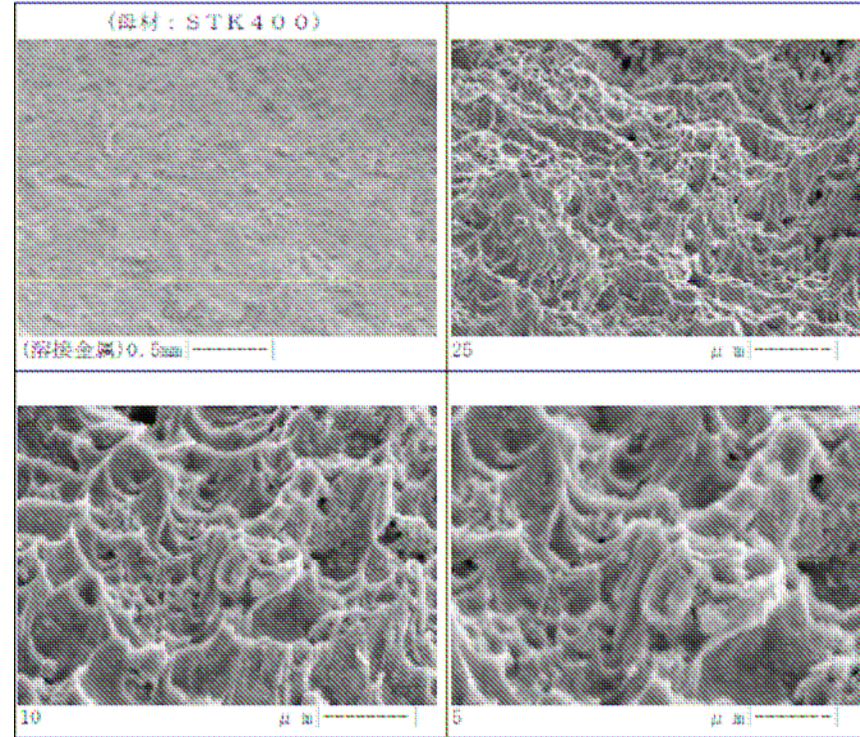


写真-4.20 7時付近の破面
母材-スティフナー-溶接金属境界
(写真-4.7の数ミリ離れた位置)

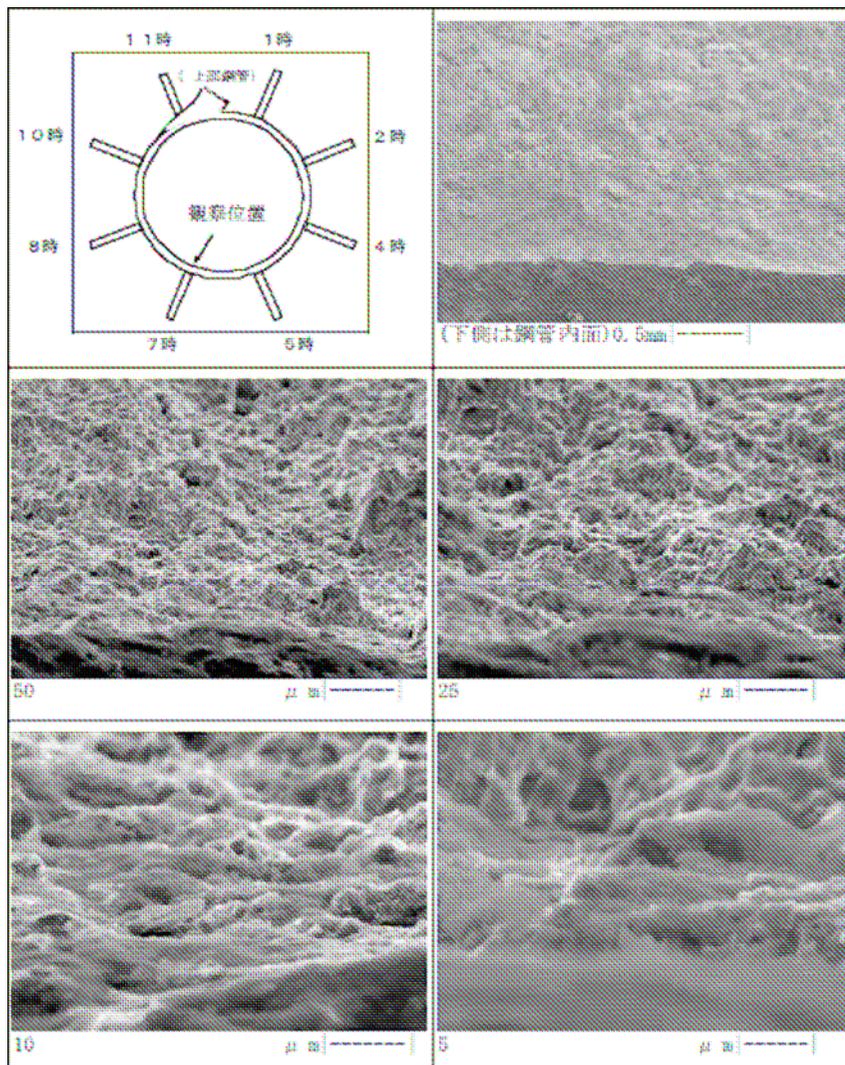


写真-4.21 7時付近の破面：STK400部

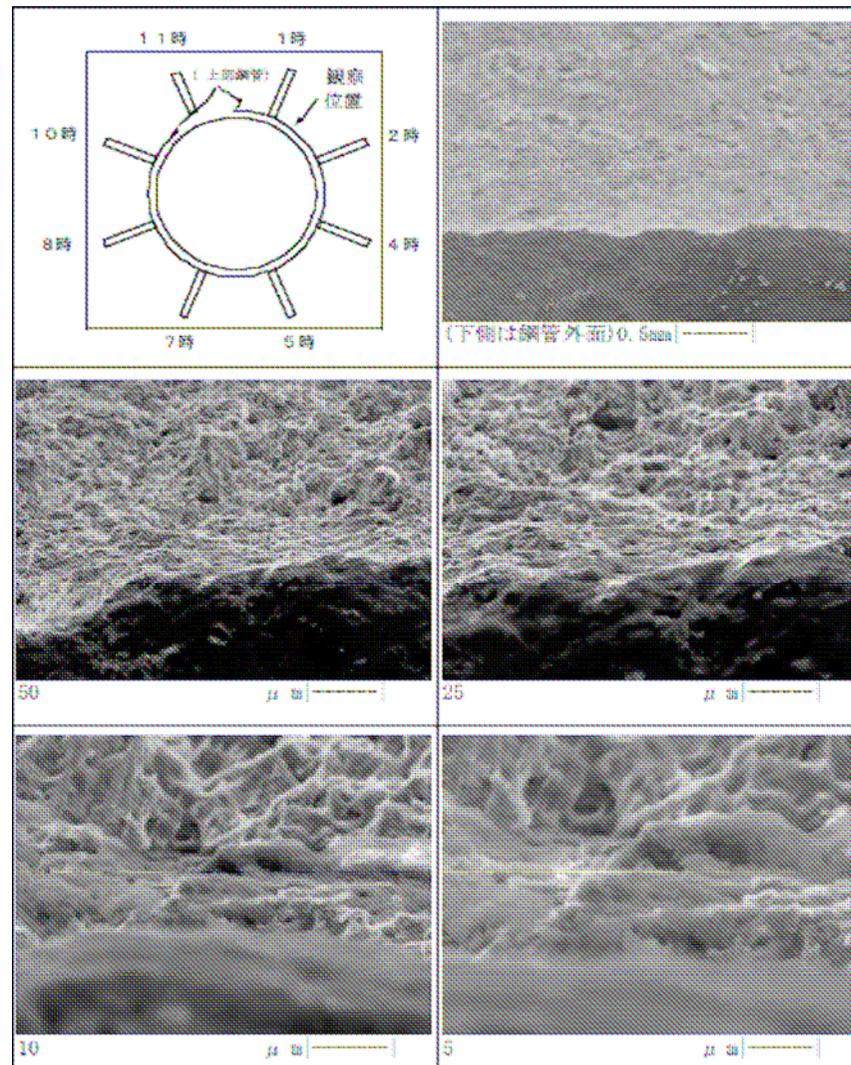


写真-4.22 破断開始6時付近の破面：STK400部

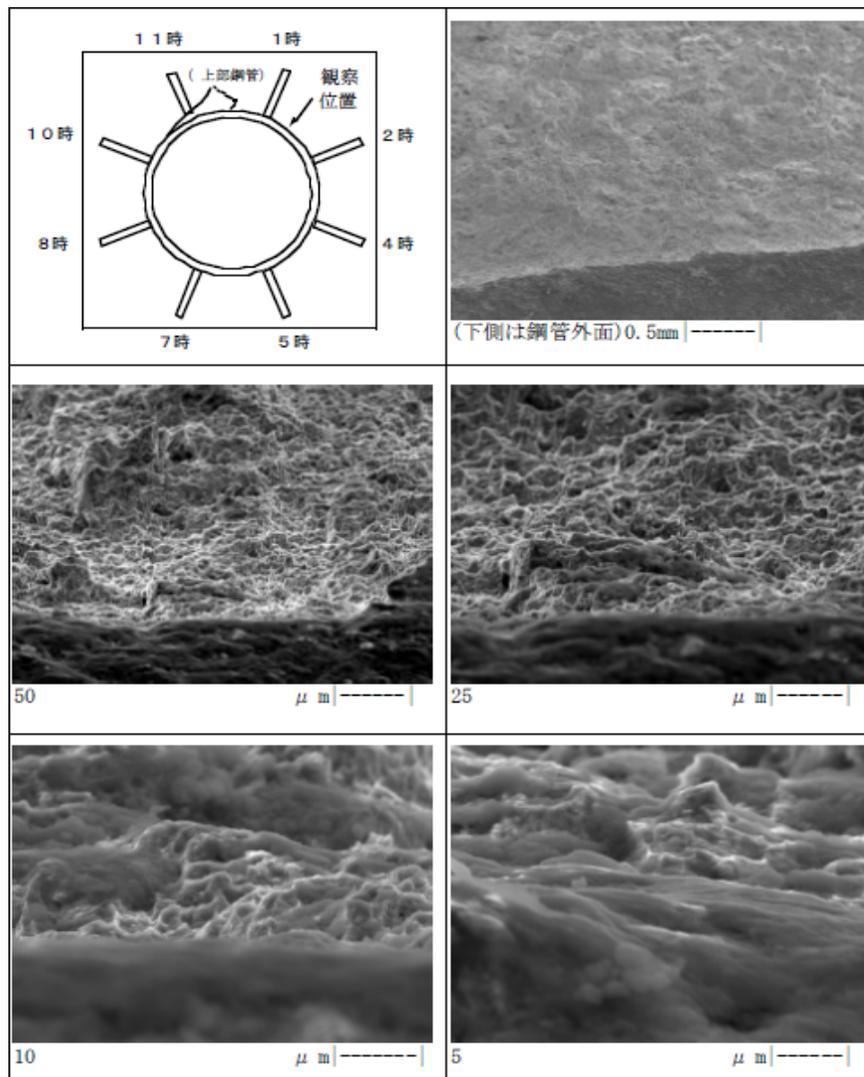


写真-4.23 破断終了1時付近の破面：STK400部

4.4.5 調査鋼管の特性

(1) 調査鋼管の成分分析

表-4.6 は、調査対象となった鋼管のチェック分析結果である。また、JIS G3444 STK400 の規格も併せて示している。分析結果より、本鋼管の C、P および S は日本工業規格の基準を満足している。また、表-4.6 には一般的な低炭素鋼鋼管（JIS G3444 STK400）の成分値を併せて示しているが、分析結果中の他の成分についても問題はないものと判断される。

表-4.6 調査鋼管のチェック分析結果

(単位：重量%)

分類	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
分析値	0.18	0.19	0.38	0.021	0.008	0.01	0.01
規格 ¹⁾	0.25 以下	—	—	0.04 以下	0.04 以下	—	—
参考値 ²⁾	0.14	0.19	0.99	0.015	0.006	0.03	0.04

1) JIS G3444 STK400 規格

2) 参考値：一般的な低炭素鋼鋼管

(2) 調査鋼管の硬さ

調査鋼管（母材原質部）のビッカース硬さ試験結果と、それから換算した推定の引張強さを表-4.7 に示す。硬さはおよそ HV174 であり、一般的な低炭素鋼（管）の値であり、問題はないものと判断される。

表-4.7 調査鋼管のビッカース硬さ(HV)測定結果

位 置	ビッカース硬さ：HV 荷重 98N(10kgf)	推定引張強さ N/mm ²
破断開始部 付近の母材	173,173,173,174,176 (平均：174)	570

(3) 調査鋼管の延性およびじん性

(a) STK400 の延性とじん性

前述(2)の硬さより、調査鋼管の延性は、一般的な低炭素鋼の伸びである、ほぼ20%以上の値を有するものと推定される。絞りについても50%以上は保有していたものと考えられる。本調査対象となったSTK400は、JISによるシャルピー衝撃試験は規定されていない。特に当該鋼管は厚さが6.6mmであるので、JIS Z2202の4号試験片(10mmサイズ)によるシャルピー衝撃試験の実施は事実上不可能である。また、ハーフサイズ(5mmサイズ)の適用も難しいと判断される。

表-4.8は、調査鋼管とほぼ同種類で、厚さ12.5mmの低炭素鋼管の-10℃におけるシャルピー衝撃試験の結果である。竜巻が発生した時の気温は数℃と言われており、発生時に0℃近くに下がったと仮定しても、吸収エネルギーは100J(約10kgf-m)以上あり、じん性は確保されていたものと判断される。

表-4.8 参考：調査鋼管とほぼ同種鋼管のシャルピー衝撃試験結果[試験温度：-10℃]

試験片： 2mmV ノッチ	吸収エネルギー (J)	平均 J (kgf-m)
10×7.5mm	(6本) 75.5~97.0	88.3 (9.0)
10×10mm 試験片換算	101~129	118 (12.0)

(b) 溶接部のじん性

一般に、鋼溶接部においては、溶接金属（溶接線）に隣接する母材熱影響部（HAZ）のじん性が低下することが知られている。表-4.9は、(a)で述べた低炭素鋼管溶接部のシャルピー衝撃試験結果を示したものである。溶接条件は下記の通りである。

溶接方法：被覆アーク溶接（手溶接）

溶接棒径：4.0mm. 4.8mm

溶接入熱：15.1 ～ 27.1 kJ/cm

調査鋼管は、支えるための補強用スティフナーが炭酸ガス溶接法で接合されている。ただ、詳細な溶接条件は不明である。一般的な条件で考えると、炭酸ガス溶接法の溶接入熱は、棒径4mmの被覆アーク溶接（手溶接）のそれよりも高くなる。しかし、棒径4.8mmの場合は、比較的値が近くなることを考慮すると、表-4.9の数値は参考になるものと考えられる。

ところで、第二次大戦中の戦時標準船に発生したぜい性破断の研究から得られ、ぜい性破断を防止する基準となったシャルピー衝撃試験における吸収エネルギーは、35ft-lb（47.5J；4.8kgf-m）となっている。これらのことを考え合わせると、当該スティフナー溶接部のじん性は、十分あったものと推定される。

表-4.9 参考：調査鋼管とほぼ同種鋼管溶接部のシャルピー衝撃試験結果；
10×10mm-2mmV ノッチ試験片[温度：-10℃]

ノッチ位置		吸収エネルギー (3本), J	平均, J (kgf-m)
溶接金属		99.1~111	106 (10.8)
溶接線 (母材-溶接金属)		148~205	178 (18.2)
母材	溶融線から 2mm	199~272	225 (22.9)
	溶融線から 5mm	201~220	209 (21.3)

4.4.6 破断の様相

以上の検討結果より、調査鋼管の破断に関し、以下のように考えられる。

- ①調査鋼管は成分としては規格に合致している。また、硬さ、並びにそれから推定される引張強さ、延性およびじん性ともに、一般的な低炭素鋼管として問題ない鋼管であったものと判断される。
- ②破面の調査から、竜巻によって破断する前に、調査鋼管に疲労破壊が生じていた様相は見られない。また、破面観察、竜巻発生時の気温並びに鋼管のじん性を考え合わせると、ぜい性破壊は生じなかったものと判断される。破面観察からも延性破壊を生じたことを示された。
- ③図-4.12 に、基礎側破面についての形態分類と破面の分布状況を、図-4.13 に「6 時-12 時」に相当する右側半分の破面形態をまとめている。鋼管位置と破面の関係は以下のとおりである。

左半分 ; 5 時 → (7 時, 8 時) → 10 時 : タイプ I

右半分 ; 5 時 → 4 時 : タイプ III 凸部 → 凹部

4 時 → 2 時 : タイプ I → タイプ II → タイプ I

2 時 → 12 時 : タイプ I → タイプ II

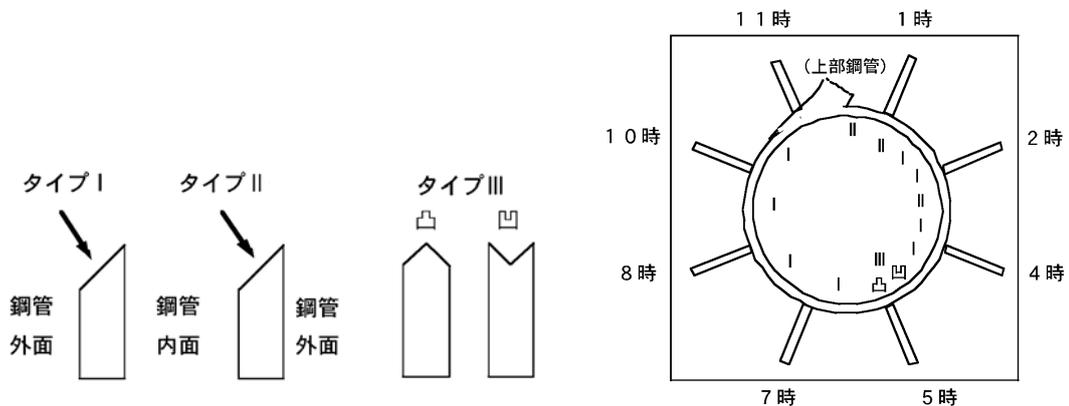


図-4.12 基礎側破面の形態分類と破面の分布状況

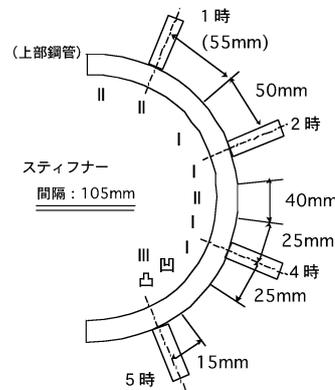


図-4.13 6 時-3 時-12 時の破面形態

主要な破面はタイプⅠとタイプⅡであり、これらはねじり負荷を受けたことによるせん断破断したことを示唆している。しかし、5時～4時付近の位置では一部凸状と凹状のタイプⅢの破面であり、引張負荷で破断したことを示唆している。また、4時付近から→2時→12時までの範囲は、タイプⅠとタイプⅡのせん断破面が交互に現われる複雑な様相を呈している。

これらのことと、以下、写真-4.24 および写真-4.25 から、竜巻は5時の方向から11時の方向に通り過ぎたことを考え合わせると、調査鋼管は、

- (1) 竜巻よる風で生じた設計以上の応力によって、竜巻の当たり始めた5時方向で引張破断が生じ、
- (2) その後、4時→2時の方向へと主として（複雑な）せん断破断で12時付近まで破断が進んだ後、
- (3) 6時→9時→11時の方向に一気に座屈し、その後せん断で破断したものと推定される。



(写真提供：開発局)

写真-4.24 被害前の道路標識の設置状況

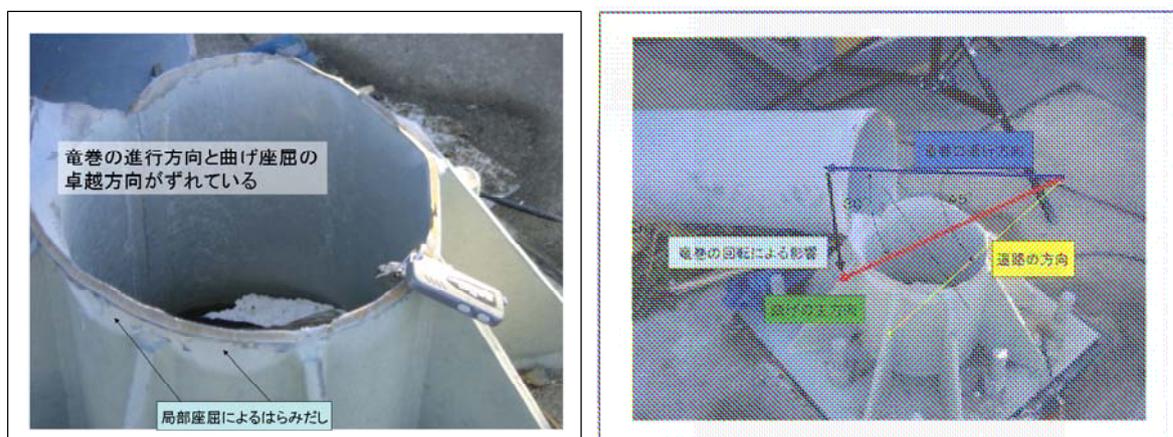


写真-4.25 道路標識柱基部の破壊状況

4.4.7 まとめ

2006年11月7日に、佐呂間町若佐地区で発生した竜巻によって破断した道路標識鋼管（STK400 溶接鋼管）の破断面について、以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 破断は、調査鋼管の長手溶接部のほぼ 180 度反対側から発生し、溶接部付近で止まったものと考えられる。
- (2) 破断面全体に若干の錆は認められたが、破断前から生じた錆は認められない。
- (3) 破断面全体に渡り、マクロ観察では延性破断を生じた破面を呈している。
- (4) 破面観察の結果；
 - 1) スティフナー端部のすみ肉溶接部において、溶接線に相当する位置には、疲労破断を示す破面（ストライエーション）は認められていない。
 - 2) 溶接線に隣接する母材熱影響部（HAZ）、並びに HAZ から離れた母材原質部の破面は典型的なディンプルパターンを示し、延性破断を生じたことを示している。
- (5) 調査鋼管の特性
 - 1) 調査鋼管のチェック分析結果は、JIS の当該規格範囲内におさまり、問題はない。
 - 2) 調査鋼管の硬さは、ビッカース（HV）硬さで約 174 であり、一般的な低炭素鋼（管）の値を示し、これから推定される引張強さも問題ないものと推定される。
 - 3) 他のデータ、並びに破面観察等を考慮した結果、竜巻発生時に調査鋼管のじん性は十分にあったものと考えられる。
- (6) 結論として、調査鋼管には材料的に問題はなく、竜巻よる風で生じた設計応力以上の応力によって主として引張破断が生じ、その後せん断破断をしたものと考えられる。

4.5 解析結果のまとめ

倒壊した状況がほぼそのまま保存されていた道路標識柱を対象として、破壊状況や構造、材料の特性を詳細に調査し、それに基づいて、竜巻による風荷重が静的な荷重として作用したと仮定して、倒壊時の作用風速を推定することを試みた。ただし、本章の最初でも述べたように、竜巻により作用する実際の荷重の特性が明らかではない以上、推定値については、誤差が大きいことに留意が必要である。また、竜巻によって生じる被害には、飛来物の衝突や飛来物が付着することによる受風面積の増大が原因となるものも多いが、本章での検討では、こうした飛来物の影響もなかったものと仮定している。このように荷重については精度の高い推定は困難であったが、標識柱の倒壊に関わる構造・材料特性については、明確に把握できたと考えており、同様の問題に対して今後検討する際の参考になるものと思われる。

なお、今回の倒壊した道路標識柱には構造上の問題や設計上の問題は見られず、設計で想定した以上の風速、風の動的な影響や飛来物など設計で想定していない現象によって倒壊したと考えられる。

【4章の参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路標識設置基準・同解説、1987.
- 2) 全国道路標識・標示業協会編：道路標識ハンドブック 2004年版、2004.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編、2002.
- 4) ABAQUS：Standard user's manual, Ver. 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998.
- 5) 岡田慎哉、岸 徳光、石川博之、鈴木健太郎：曲げとねじりを受ける道路標識柱等の終局耐力に関する解析的検討、土木学会北海道支部論文報告集、61 (CD-ROM)、2005.
- 6) 北海道開発局：道路設計要領 第6集 標準設計図集、北海道開発局建設部道路建設課 監修、2004.
- 7) 富士明良：佐呂間町竜巻により倒壊した道路標示鋼柱の破断面調査結果、2006.
- 8) 溶接学会編：溶接・接合便覧—第2版—、丸善、pp.764,2003.

5. 今回の災害から得られた教訓

5.1 日本の竜巻被害

日本における竜巻に関する統計的な研究はこれまでいくつかあるが、新野ら¹⁾は1961年から1993年の33年間について詳細な分析を行っている²⁾。それによると33年間で陸上の竜巻が677個、水上の竜巻が151個発生しており、陸上の竜巻に関しては年平均20.5個発生している。竜巻を陸上と水上で分けているのは、英語では陸上の竜巻をtornado、水上のものをwaterspoutと呼ぶことに対応させている。

竜巻は年間を通して発生するが、台風が増加する8~9月に多く3月は少ない。また、1日のうちの発生時刻は積乱雲が活発になる午後に多くなる傾向があるが、深夜や未明に発生することもまれではない。

竜巻の発生する場所には地理的傾向があり、75%以上は太平洋側で発生するが、冬季には日本海側での発生数も増加する。また、100km四方を単位面積として年間の発生数を求めると、全国平均は0.54個/年/10⁴km²となるが、都道府県別では沖縄県が9.09と圧倒的に多く、次いで東京都(2.69)、千葉県(1.92)、宮崎県(1.65)、鹿児島県(1.61)、茨城県(1.49)、静岡県(1.45)、長崎県(1.40)、埼玉県(1.36)、高知県(1.28)となっている。これは米国の各州の発生率と比較してもそれほど低い数値ではない。一方、ある地点が竜巻の被害を受ける確率からその地点の竜巻の再現期間を求めると、全国平均は1.2×10⁵年すなわち12万年となる。再現期間がもっとも短いのは東京都の4000年だが、これは後述する1978年の東京竜巻の被害域が特に長かったことによる。その他に再現期間が短い都道府県は千葉県(7000年)、沖縄県(1万年)である。なお、北海道では1993年までに39個の竜巻が観測され、総発生数は4位だが単位面積当たりの発生数は0.14個/年/10⁴km²、再現期間は110万年と比較的竜巻が少ない地域であったことがわかる。

竜巻の規模と被害について、新野らの研究では、日本における竜巻の平均移動速度は時速34.6kmで、長さ3.2km、幅98mの被害域を伴いその寿命は12分間となっている。人的被害は竜巻1個につきそれぞれ平均で死者0.032人と負傷者1.67人と少ないが、年間ではそれぞれ0.58人/年、29.7人/年となる。家屋の被害は全壊が17棟/年、半壊が39棟/年、一部損壊が290棟/年となり竜巻による被害そのものは毎年多く発生していることがわかる。1971年に気象庁が竜巻の観測を始めて以降の特に住家被害(全壊・半壊)が大きかった過去の竜巻を表-5.1に示している³⁾。また、正式な記録がない1971年以前においても表-5.2のような竜巻が発生している¹⁾。

表-5.1 主な竜巻による被害状況（1971年～2006年）^{3), 4), 5), 6)}

	発生年月日	発生時刻	発生地	被害状況					竜巻の規模・特徴					概況（総観的気象状況など）
				死者 (人)	負傷者 (人)	全壊 (棟)	半壊 (棟)	備考	幅 (m)	長さ (km)	方向	速度 (km/h)	特徴	
1	1999.9.24	11:05 頃	愛知県豊橋市～一宮町	0	384	41	2619	非住家被害 276 棟、農業被害 138,900 万、電柱傾斜 510 本、停電 9,700 戸	550m	19km	北北東	45km/h	F3 反時計回り	台風 18 号に伴うアウターバンドにより 4 個(11:05,12:10,11:50,12:50)の竜巻が発生
2	1990.12.11	19:15 頃	千葉県茂原市	1	73	80	1645	非住家被害 14 棟	1,000m	3.5km	北北東	58km/h (16m/s)	F3	寒冷前線、暖気の移流により千葉県内の各地で強風が吹き、 6 個（17:50, 18:00,18:50,19:15,19:45,不明）の竜巻が発生
3	2006.9.17	14:00 頃	宮崎県延岡市	3	143	71	916	住家屋根飛散、 自動車横転	150~250m	7.5km	北	60km/h	F2 反時計回り	台風 13 号に伴い竜巻が 3 個（12:10, 13:30,14:00）発生
4	1979.9.4	13:27 頃	愛知県名古屋市中白区 野並地区	1	4	0	456	非住家被害 4 棟	数 10m	18km	北	47km/h	23 分間	台風 12 号により竜巻が発生 台風東側で南から暖かく湿った南風が流れ込んでいた
5	1990.2.19	15:15 頃	鹿児島県枕崎市塩屋地区	1	18	29	354	非住家 69 棟、 車 25 台横転	100~200m	4km	北東		海上で発生	局地性じょう乱、暖気の移流 寒冷前線東側の低気圧の暖域内
6	2004.6.27	07:17 頃	佐賀県佐賀市与賀町今津 ～北川副町～巨勢町	0	15	13	331	非住家被害 46 棟、 通信被害、送電線切断	200m 最大 250m	8km	北東	65km/h	F2	梅雨前線に伴う発達した雨雲により、佐賀県内で 2 個の 竜巻が発生（07:17,07:50）
7	1978.2.28	21:20~ 22:00 頃	神奈川県川崎市～東京都 ～千葉県鎌ヶ谷市	0	36	8	280	東西線脱線	200m	40km	北北東	126km/h (35m/s)		日本海低気圧、寒冷前線、局地性じょう乱、季節風 低気圧の暖域内で寒冷前線から少し離れたところを 線状対流雲群が東京湾の湾奥に達した頃に竜巻が発生
8	1988.9.25	09:40 頃	和歌山県串本町潮岬地区 ～古座町～古座川町高池地区	0	20	1	268		50~100m	10km	北北東	60km/h		熱帯低気圧、雷雨、暖気の移流
9	1985.6.23	14:30 頃	福岡県北九州市小倉南区 蒲生付近	0	3	0	246	停電 5,700 戸		3km				暖気の移流
10	1990.9.19	22:20 頃	栃木県壬生町 ～宇都宮市幕田町	0	25	30	182	被害総額 約 15 億 6 千万円	150m	3.5km	北			台風、雷雨 台風 19 号により竜巻が発生
11	2000.6.19	16:20 頃	愛知県尾西市、一宮市	0	0	0	185	停電 1,400 戸	数百 m 以下	12km				前線帯、暖気の移流
12	1999.9.24	08:00 頃	山口県小野田市	0	13	17	145		100~200m	5km	北北西	20km/h	F2	台風 18 号が宇部市に再上陸する約 1 時間前に 小野田市西沖付近で発生
13	2004.9.29	23:00 頃	愛知県豊橋市大岩町	0	3	0	157	停電	50~150m	2.5km	北		F1	台風
14	2003.9.12	13:00 過ぎ	高知県高知市浦戸地区、 種崎地区	0	1	0	156	非住家被害 22 棟、 飛散物で漁船 1 隻沈没					F1	台風、暖気の移流
	2006.11.7	13:20~ 13:30 頃	北海道佐呂間町若佐	9	26	15	22		200m	1km	北東		F3	寒冷前線の通過に伴い活発な雷雲が通過し、突風が発生

表-5.2 1971年以前の大きな被害をもたらした竜巻¹⁾

発生年月日	発生地	主な被害
1881年9月26日	宮崎市	小学校倒壊、死者16名
1903年9月23日	東京府豊玉郡淀橋町（現東京都新宿区）	小学校倒壊、死者10名、 負傷者14名
1941年11月28日	愛知県豊橋市	死者12名、負傷者177名、 全半壊347棟
1957年11月10日	長崎県富江市（現福江市）	死者6名、負傷者8名

1971年以降に発生した竜巻では、今回の佐呂間町の竜巻以前にも1999年9月24日の愛知県豊橋市、1990年12月11日の千葉県茂原市の竜巻がF3スケールを記録している。最近では、佐呂間竜巻の約2ヶ月の前2006年9月17日に宮崎県延岡市で発生した竜巻では死者3名、家屋全壊71棟や特急電車の横転など大きな被害が発生している。このほかに1978年2月28日には神奈川県川崎市から東京都を通過して千葉県鎌ヶ谷市まで、長さ40kmを移動した竜巻が記録されている。夜間だったため明確な目撃証言は無いものの、地下鉄東西線の横転や高校のプレハブ校舎が隣の校舎を飛び越えて全壊するなど、発生時間によっては甚大な災害を起こす可能性があった。

気象庁が公表している 1971 年から 2006 年までに被害のあった竜巻の発生位置を図-5.1 に、発生数と被害件数を図-5.2 にまとめる³⁾。図-5.1、図-5.2 によれば、1990 年の茂原竜巻、1999 年の豊橋竜巻、そして 2006 年の延岡と佐呂間の竜巻といった、強い竜巻が生じた年に、被害件数（死者、負傷者、住家被害）が突出している。また、被害の大小には、竜巻が発生した場所が、人口密集地であるか否かも影響が大きいと考えられる。

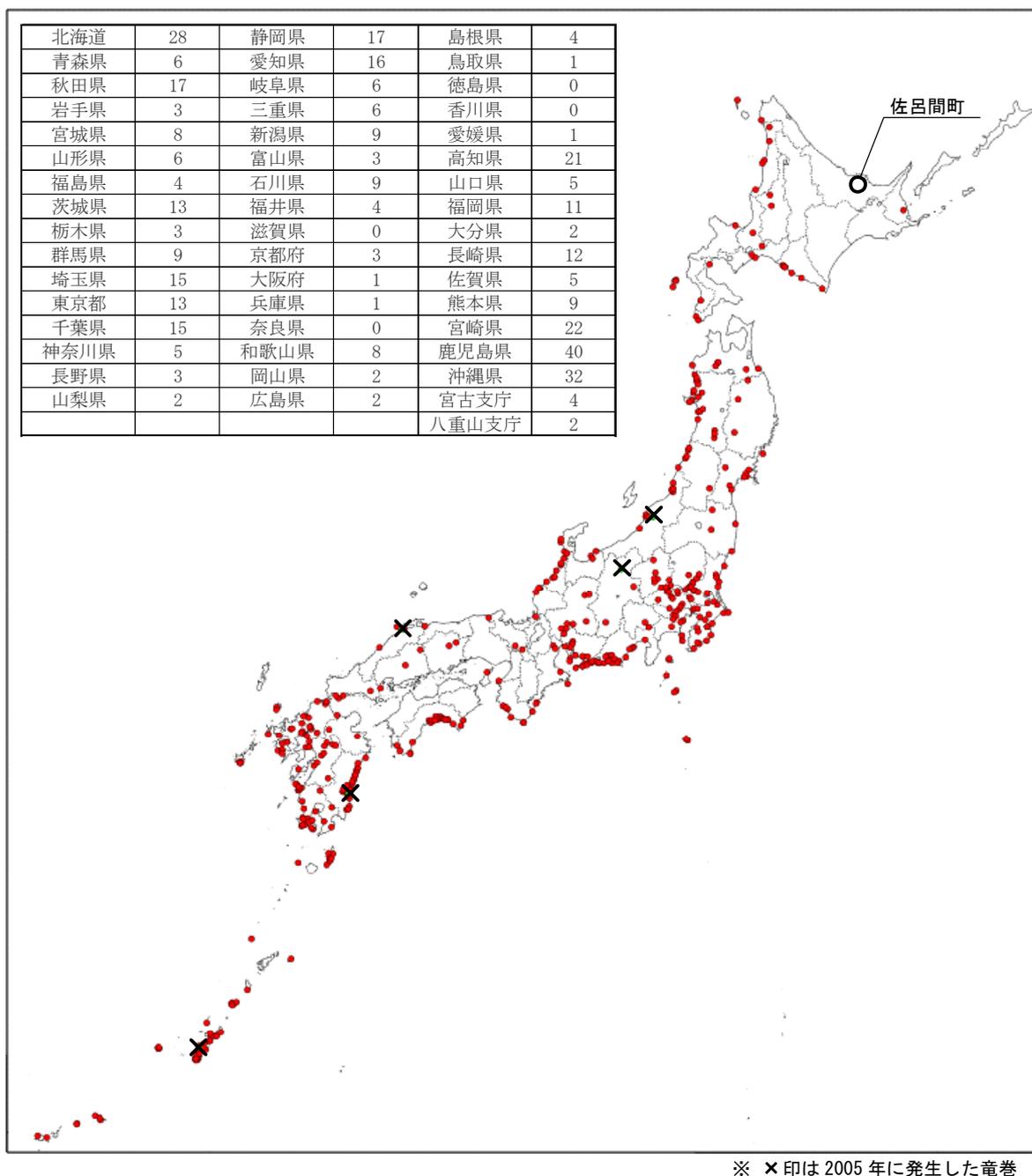
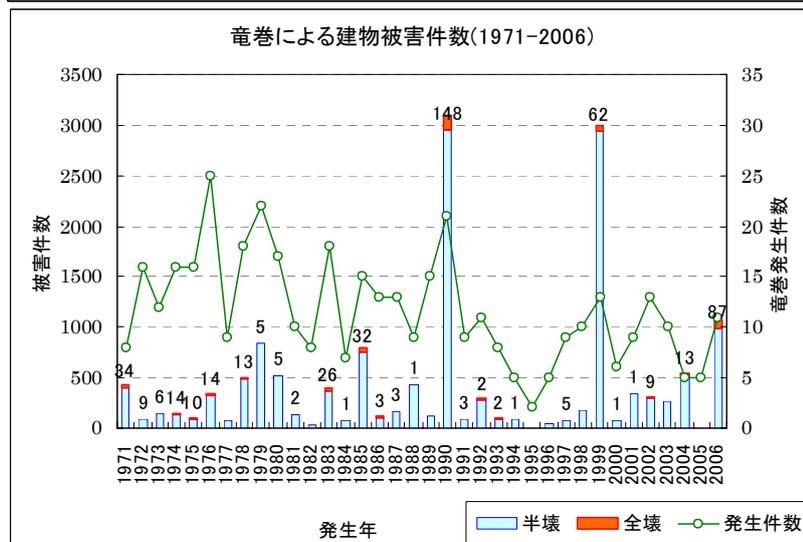
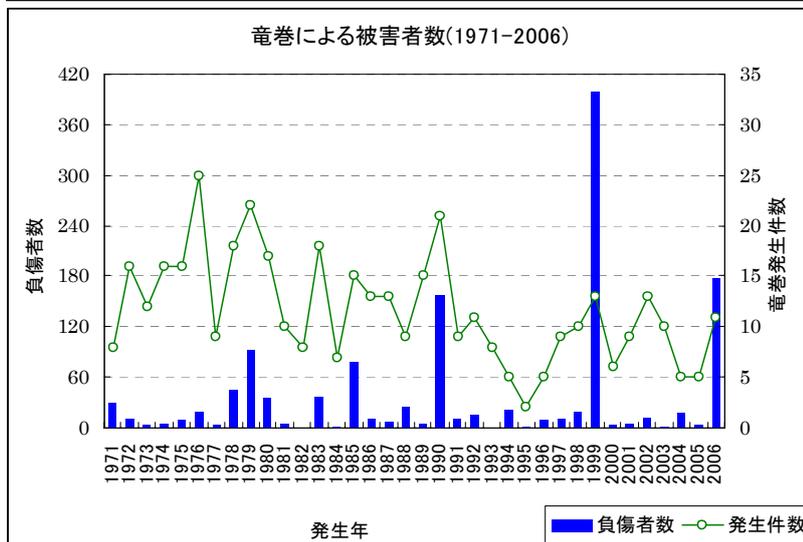
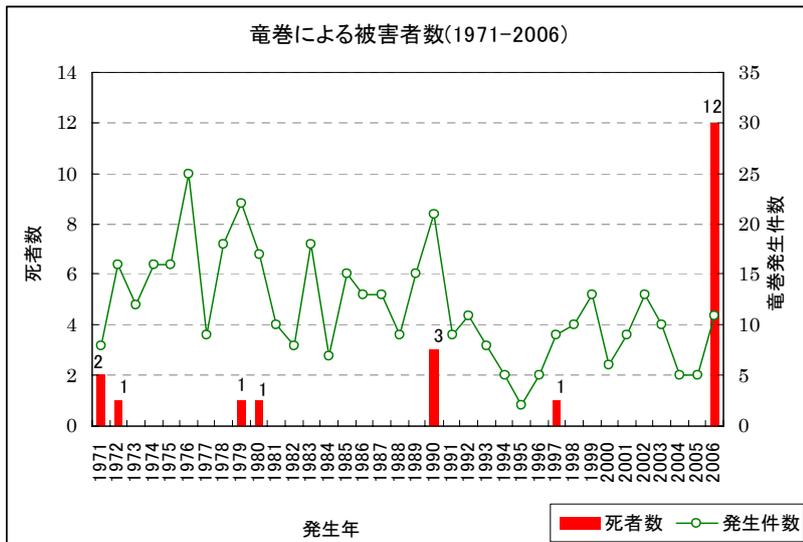


図-5.1 被害のあった竜巻発生位置（1971-2006）³⁾



※左グラフ内の数値は、全壊住家数を示す

図-5.2 被害のあった竜巻発生件数 (1971-2006) ³⁾

北海道においては図-5.3 のように従来は日高山脈より西側に偏って観測されていた。死者を出したものはないが、1992年7月9日に札幌市白石区で発生した竜巻ではゴルフ練習場のネットフェンスが倒壊して5名が負傷し、2001年6月29日に空知管内北竜町で発生した竜巻では乗用車を運転していた女性が車ごと飛ばされるなど3名が負傷している。Fスケールはこの北竜町の竜巻と2004年10月22日に日高管内門別町で発生した竜巻がF2を記録している^{7),8),9)}。



図-5.3 北海道において被害のあった竜巻発生位置 (1971-2005)³⁾

これらの竜巻被害は、被災時には強烈な被害状況により強い印象を与えるものの、その他の風水害や地震、火山噴火などと異なり、被災範囲が極めて限定的であり、期間も短いことから人々の記憶にはとどまらず、防災対策としての対応ができていないと考えられる。日本は台風の多発地帯であり、古くから瓦屋根あるいは防風林などにより風対策を行ってきたが、竜巻に対してはあまり効果がなく瓦屋根やトタン屋根が吹き飛ばされる被害が多い¹⁰⁾。また、プレハブ建物やビニールハウスなど軽量で面積が比較的大きく基礎に緊結されていない建造物の被災例も多く、今回の佐呂間町の竜巻でも工事事務所の被災により大きな被害を出した。

竜巻の被害を受けた住民の状況については、1990年の茂原竜巻に関して足立ら¹¹⁾が、1999年と2004年の豊橋竜巻に関して吉田ら⁴⁾や田村ら¹²⁾がアンケート調査を行っており、さらに小泉¹³⁾は茂原竜巻と99年の豊橋竜巻のアンケート結果の比較を行っている。今回の佐呂間竜巻では東北大学の植松と北海道立北方建築総合研究所の高橋ら¹⁴⁾が若佐地区の住民を対象にアンケート調査を行っている。これらの研究によれば、多くの住民は前触れも無く竜巻の被害に遭い、住宅やその他の家財に大きな被害を受けるとともに、時として割れたガラスや飛来物で怪我をする場合も多いことがわかる。その他の災害にも共通するが、被災後に生活の立て直しや住居の復旧で困窮する場合も多い。また、復旧作業や将来への不安で肉体的、精神的に疲労する中で、報道機関や調査関係者あるいは野次馬が殺到することで強いストレスにさらされる場合もある。

竜巻が発生する前の状況としては、F3スケールの3竜巻とも「雨と雷」「降雹(こうひょう)」「風が強かった」などとの回答が多い。特に佐呂間竜巻では、30分ほど前では「曇」と答えた人が多かったが、直前では「強風」が吹き「雨」や「雨と雷」を感じた人の割合が増えている。また、佐呂間竜巻では前日から当日にかけて「強風注意報」が出ていたが、それを知っていた人は全体の15%程度で、このうち半数の人が「危険だと思わなかったので特に何もしなかった」と答え、「外出を控えた」人の数を大きく上回っている。竜巻が来たときには、茂原竜巻や豊橋竜巻では「何もすることができなかった」と答えた人が約半数に上った。一方で「雨戸を閉め」、「壁やタンスの陰に隠れた」り「布団を被った」りして身を守った人たちも少なく無い。佐呂間竜巻では回答者の約半数が「様子を見に窓の近くへ行っただけ」や「危険を感じなかったので何もしなかった」と答えている。これは茂原竜巻や豊橋竜巻では被害を受けた住宅に住む人たちを調査対象にしたのに対して、佐呂間竜巻では若佐地区全体を調査対象にしたために被災箇所から遠かった人たちの回答が反映されていると思われる。

被災後の活動では、災害情報や安否情報、建物の補修業者や仮住まいに関する情報、住居や生活再建のための支援や融資制度に関する情報など、被災後の時間経過に沿ってさまざまな情報が必要になってくる。一方で、報道機関や調査視察あるいは野次馬が殺到することで住民を困惑させていることも共通した問題となっている。住宅の再建では、保険や共済が利用できる場合が多くなりつつあるが、自己資金で対応した人も多く、保険が適用となっても住宅や家財を元通りにするには必ずしも十分ではない。また、自然災害には火災保険が適用されないと誤解している例もあった。

インフラ施設やライフラインの被災に対するアンケート結果も得られている。いずれの竜巻でも停電の影響が大きく、場合により断水やガスの供給停止が発生している。停電からの復旧は、被災範囲が比較的広い茂原竜巻、豊橋竜巻では1日～3日、佐呂間竜巻では8時間以内であった。アンケートの自由記述意見では予想より短時間で復旧したという意見や、電力会社などの迅速な対応を評価する意見が多い。しかし現代では、例えば灯油ストーブも電気で点火するなど、生活のほぼすべてが電気に依存しており、停電の影響はより大きく感じられると考えられる。電話の不通も影響があったと答えた人が多い。佐呂間竜巻が発生した当時は携帯電話が一般的となっていたが、つながりにくかったり充電が必要だったりした。また、道路については交通規制や交通渋滞による影響を指摘する意見があった。

これらのライフラインへの対策として、電線類の地中化の有効性が指摘されている。通常、電線類の地中化は地域景観への配慮などを主な目的として行われるが、台風による被害が多発する沖縄県の離島部では、防災上の有効性も考慮して電線類地中化事業が進められている¹⁵⁾。一方、電線類の地中化には多額の費用がかかり、万一道路が被災した場合には架空線と比較して復旧に時間がかかることも考えられるため、一般的には防災対策として電線類の地中化を行うことは現実的ではないと考えられる。現状では発生した被害を極小化するために、復旧時に道路管理者との連携により、道路啓開と電力施設の復旧を同時に行うなどの運用上の対策をこれまで以上に進めることが効果的と考えられる。

また、今回の竜巻被害の住民に対する地元自治体の取り組みについて、佐呂間町役場で聞き取り調査を行った。佐呂間町の取り組みとしては、被災後から現在まで住民説明会や専用窓口の開設、法律相談の実施や心のケアのための保健師の巡回などの取り組みが行われている。一方、被災直後では行方不明者の捜索や救出活動に注意が注がれ、独居老人などの災害弱者に対する情報提供などがすぐには開始できなかった。また、天災に対する火災保険の適用の有無とそれに応じた住宅の片付けなど、一般の人々がすぐに必要な情報ではあるが、行政担当者でも即答できない問い合わせが発生した。このように住民の視点からは、被害を軽減し速やかな復旧のために、他の災害と同様に社会システム全般にわたる対策が必要なことがわかる。

5.2 竜巻対策の現状

竜巻による被害を低減させるためには、構造物そのものを竜巻による強風と飛散物の衝突から守る対策と、竜巻の発生を事前に予測して避難などの防災対策を行うことが考えられる。本節ではまず 5.2.1 で構造物を竜巻から守るための対策の現状についてまとめた結果を報告し、5.2.2 で竜巻の発生予測に向けた取り組みを紹介する。

5.2.1 構造物における竜巻対策

構造物レベルでの対策は設計基準において竜巻による強風の影響を考慮することでなされるが、前節で紹介したように竜巻の再現期間は短くても数千年であり、個々の構造物で竜巻を考慮した設計を行うことは経済上の合理性に疑問がある。したがって、わが国の設計基準では竜巻による風の強さについては建築・土木の両分野とも考慮していないし、諸外国においても一部の例外を除き竜巻は考慮されていない。竜巻などの局所的な強風に対応している例としては、米国で原子力発電所に関して原子力規制委員会(USNRC)や原子力学会(ANS)が設計基準を策定している¹⁶⁾。ASCE 7-05¹⁷⁾では竜巻の影響を考慮した設計風速の参考値として過去のANSの基準を引用している。また、電気事業における技術的問題を検討するCIGRE(国際大電力システム会議)のSC B2 WG16では、竜巻やダウンバーストあるいはハリケーンや台風などの強風現象への対応を検討し始めている^{18),19)}。

一方、設計において竜巻を考慮しない理由としては、構造物に作用する風の工学的モデルが竜巻においては十分に確立していないことも挙げられる²⁰⁾。竜巻の工学的モデルとしては、竜巻をRankine渦でモデル化し非定常力について検討した例^{5),21)}があるが、地表面の形状や隣接する構造物の影響などの影響が複雑で、具体的な構造物の設計への適用は今後の課題である。

竜巻による構造物の被害は、強風による風圧だけではなく、外気圧の急激な変化による構造物内外の圧力差や飛来物の衝突の影響なども大きい。飛来物については、主に建築物における対策がこれまで取られてきた。構造物が飛来物の衝突に耐えられる耐飛来物性能について、わが国では建築基準法施行令にて外装材や内装材などが風圧や地震の震動や衝撃で脱落しないように定める規定があり、具体的対策としては日本建築センターが1991年台風19号の被害から住宅の開口部に雨戸や格子戸を設けることを推奨している^{22),6)}。外国ではASCE¹⁷⁾はASTM(American Society for Testing and Materials)の試験法に基づいて、建築物区分・外装材の位置・地域区分に応じて基準を定めているほか、ISOでは窓ガラスの耐飛来物性能の試験法を取りまとめている²³⁾。さらに米国フロリダ州ではSouth Florida Building Codeが、また豪州ではDarwin Area Building Manualが建築物の外装仕上げ材の飛来物に対する耐力規定として知られている²⁰⁾。土木構造物およびインフラ施設では一般的な構造物で考慮している例は無いものの、原子力発電所に関して鋼材や自動車の衝突を想定した基準を上述のUSNRCが定められているほか、Australian/New Zealand StandardのCommentary²⁴⁾において、送電線やパイプラインといった長大な構造物が飛来物による被害を受ける可能性が指摘されている⁶⁾。

以上をまとめると、現状では竜巻の発生確率が極めて少なく、またその影響を土木構造物の設計で適切に考慮するためには相当の学術的知見の蓄積が必要と考えられる。竜巻構造の解明とその成果の設計基準への適用は、将来的な構造物の安全性の向上に大きく寄与するものではあるが、より短期間で実現可能な防災対策としては、竜巻の発生を事前に予測して警戒や避難などの対策をとることが重要であると思われる。そこで次項では竜巻の発生予測に関する現状を報告する。

5.2.2 竜巻の発生予測

米国では第2次世界大戦中に空軍が竜巻の予測を開始し、民間向けの予測は1952年にThe Weather Bureau Analysis (WBAN) Centerが開始した。1950年代以降、故藤田哲也博士の業績²⁵⁾に代表されるような竜巻被害と発生機構に関する研究や、レーダー観測技術の向上と竜巻そのものの追跡観測により知見の蓄積が進み、竜巻の発生予測精度が向上した²⁶⁾。現在では、National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)²⁷⁾がトルネードの予報・警報を発表し、テレビ、ラジオ、インターネットなどを通して市民に周知されている。この予測方法は、主としてスーパーセルと呼ばれる強い積乱雲の発生とその中の雨粒の移動方向をドップラーレーダーで観測し、積乱雲内に渦の発生が認められれば竜巻が発生する可能性があるとするもので、竜巻発生の可能性を予測している。現在米国では約160基のドップラーレーダーが配置されている。

わが国の竜巻予測に関する取り組みとしては、1980年代初期には気象研究所、電波研究所(現、情報通信研究機構)、名古屋大学などが積乱雲の構造を解明するためにドップラーレーダーでの観測を始めている²⁸⁾。通常の気象レーダーは雲の中の雨粒に電波を当て、戻ってきた電波の強度で雨の強さなどを測定しているが、ドップラーレーダーはさらに電波の周波数の変化も測定することで、積乱雲の中の雨粒の移動速度を観測する。積乱雲の中で局所的に雨粒が逆方向に移動している箇所がメソサイクロンと呼ばれる渦で、ドップラーレーダーはこの渦を観測する²⁹⁾。メソサイクロンは直径数km~数十kmの渦で、メソサイクロンの内部に直径数100m程度の竜巻が発生することがある。竜巻の発生予測はこのメソサイクロンを観測することで行われるが、すべてのメソサイクロンが竜巻を伴うわけではない。

わが国では気象レーダーは気象庁が運用しているが、2007年3月現在で20基のレーダーを運用し、そのうち4基がドップラーレーダーである³⁰⁾。気象庁では既存の気象レーダー7基を2008年度末までにドップラーレーダーに変更することに加えて、メソサイクロンの特性が竜巻の発生とどのように関連しているかなどの研究を進め、竜巻実況監視能力の高度化を図っている³¹⁾。しかしながら、ドップラーレーダーを用いた観測を広く行っている米国では、親雲の規模がわが国のそれより大きく観測が比較的容易であることに対して、日本では親雲となる積乱雲が短時間に急速に発生、消滅することが多いため観測が難しいとの指摘もある³²⁾。このような場合には、光波を使って大気中の微粒子を観測するドップラーライダーが有効とされ、北海道大学の藤吉³³⁾は小規模な「水平ロール渦」の観測例を報告している。さらに、このような極めて局地的で短時間に発生・消滅する竜巻については、発生地点の地形の形状が大きな影響を与える

ことが考えられ、高知大学の佐々ら³⁴⁾は若佐地区の地形を再現した模型実験により、谷筋に気流が流入した場合に竜巻が発生する状況を再現し目撃証言との比較を行っている。

竜巻の予測に関しては、これらの気象レーダーやドップラーレーダーの観測結果や地形の情報を入力データとして、数値気象モデルにより数時間程度の近い将来の気象予測（ノウキャスト）を行う研究も行われている。これらの研究では、積乱雲や竜巻が発生する際の大気状態を再現する数値モデルを雲解像モデルと呼ぶが、気象研究所の加藤ら³⁵⁾は気象レーダーとアメダスによる地上観測値を入力値として水平分解能が1kmおよび250mの雲解像モデル(CRM)によって、佐呂間竜巻の発生に関する数値実験を行った。その結果、実際に竜巻が発生した位置とほぼ同じ位置で積乱雲とその内部で渦の発生を再現した。また、名古屋大学の坪木³⁶⁾は CReSS と呼ばれる雲解像モデルを用いて、佐呂間町を発達した積乱雲が通過する状況を再現した。これらの研究は、局地的な竜巻の発生可能性を予測できることが示しているが、現状では採用する計算条件や初期値によって結果が異なり、また膨大な計算時間が必要となるため、実用化には更なる研究の進展が待たれる。なお、計算時間の制約を緩和してドップラーレーダーの観測結果を利用した竜巻発生予測を行うために、防災科学技術研究所の前坂ら³⁷⁾は、観測データを数値モデルに同化させる際にナッジングと呼ばれる比較的簡便な手法を適用して、2001年の台風11号に伴って埼玉県で発生した竜巻に関する数値実験を行っている。

このように、竜巻の発生予測に関する研究は、観測や模型実験、数値実験などにより多面的に進められているが、実用化まではさらに時間を要すると思われる。しかしながら、予測が難しい突発的自然災害に対しても、住民の生命を守るために現状で可能な具体的な対策は不可欠である。このためには、竜巻などの突発的災害の発生が予想される際の住民の対応や避難行動準備などについて取りまとめておく必要があると考えられる。そこで、次節以降では、過去の調査研究で提言されている内容や米国における竜巻対策を紹介しながら、突発的な気象災害に対して取るべき行動を提案する。

5.3 竜巻に対する防災対策に関する学術情報

京都大学の光田寧教授を研究代表者として1983年度に文部省科学研究費による「竜巻など瞬発性気象災害の実態とその対策に関する研究」が実施された³⁸⁾。この研究に際して開催された研究集会の討論の結果が「竜巻など瞬発性気象災害に対する防災対策」として同研究の報告書にまとめられている。現在でも十分に有益な提言と考えられるため、この中から竜巻に対する防災対策に関する部分を以下に引用する³⁹⁾。

このような竜巻を直接受けても破壊されないような対策を考えることは、原子炉や高压ガスタンクのように破壊されたら大きな二次的影響の出るものについては必要であるが、これ以外のものについてはむしろ被害が生じても最小限に止められるように考えることの方が重要である。竜巻に対して安全なものを作るならば、単に水平風速の大きさ（回転風速+移動速度）に耐えるだけでなく、気圧急降下や上昇流によって構造物、特に屋根面に上向きの力が働くことに対して十分考える必要があるとともに、可能性のある飛散物の衝突に対しても安全であるように考える必要がある。風速の変動が大きいところから風圧力の計算を(5.12)式*に示したようなもので与えろと、過渡応答について5.3節に示したような方法で外力を考えるとかする必要がある。また原子炉のように気密性の良い建物では気圧降下量そのまま室内外の圧力差として働くことになるので外壁、屋根面に短時間ではあるが0.8ton/m²以上の外向きの力が作用することを考えねばならない。また、地面に置いただけのものは、かなり大きなものでも風で吹き飛ばされ飛散物となり得る（プレハブ建物、コンテナ、自転車等）ので重要なものの近くにはこのようなものを置かないように考えるべきである。また、気圧降下によっては舗装面が土地と接着が悪い場合浮き上がることさえあるので注意を要する。

また、被害を完全に防げなくても最小限に止めるためには、強風の作用時間が短いところから、構造物の各部を地面に良く固定しておくこと、弾性的な構造とすることによって安全性は向上する。大きく重い鉄筋コンクリートの建物はまず破壊されることはないと思われるが、小住宅や物置などでも屋根や壁面の地面との固定をしっかりとすれば被害はかなり減少できる（空中に飛び上がることはまず無くすることができる）。気圧の急降下に対しては室内外の空気の流通が良ければ影響は小さくなる訳であるが、わざわざ窓を開けて竜巻に備えることは、かえってその窓から風が入って内部が破壊されるということも考えられるので、必ずしも適当な手段とは言えないようである。電車や自転車は地面との固定ができないこともあって、横転してしまうことも多い。従って、少しでも風の影響を受けないようにするため、竜巻を見たら減速、停止するべきである。地上に置いたコンテナも地面との固定が悪いので横転しやすい。また建物の屋上や外壁の付属物の固定は飛散物を防ぐために重要である。しかし、災害の発生確率を考えて経済的な対策を考えるべきである。

一つの竜巻によって被害を受ける範囲は幅が100mぐらいのものであるから、もし破壊されて困るものが複数個あるなら、東西に数百m離して間隔を置いて設置すれば重大な二次的影響を生ぜしめないですむことになる。また、重要な道路、送電線、鉄道などが複数で平行してあるときは数kmぐらい以上離しておけば、やはり一つの竜巻で二つ同時に破壊されることはまずない。

竜巻は地面の粗度の大きい都心部などでは地上に達しないことが多いので、大きなビルの建ち並んでいるような所では、まずその影響を考えなくても良いであろう。

*引用者注：

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho C_D D U |U| + \frac{\pi}{4} \rho C_m D^2 \frac{dU}{dt}$$

F(t): 柱状物体に作用する単位長さ当りの空気抵抗、U: 風速、
D: 物体の代表的寸法、C_D, C_m: 抵抗係数、慣性力に関する係数

竜巻の際の避難法としては鉄筋の建物の中央部または地下室に居ればまず安全である。木造の建物の場合は、地面にしっかりと固定された重い建物なら比較的安全である。窓から離れた1階の中央付近がより安全である。屋外においては竜巻が見えるならその進行方向に直角の方向（多くは東または西）に逃げるのが安全である。

このような研究成果に基づく知見を実際の防災対策に生かすためには、その内容がわかりやすく住民に周知されていなければならない。年間約1,000個の竜巻が発生する米国では、各種の公的機関や民間組織で竜巻に対する啓蒙が行われている。次節では、米国の竜巻に関する情報収集を行いビデオ・書籍販売、情報提供を行っている民間会社「トルネード・プロジェクト（Tornado Project）」の取り組みと、同社が公開している防災対策を紹介する。また、事例として、イリノイ大学における竜巻に対する防災対策について記述する。

5.4 米国における竜巻対策

米国では年間約 1,000 件の竜巻が発生していることから、竜巻に対する様々な防災対策が行われている。ここで、トルネード・プロジェクト (The Tornado Project) を参考として、ホームページに掲載されている竜巻に関する情報や安全対策について調査した⁴⁰⁾。また、事例として、イリノイ大学における竜巻に対する防災対策について記述する。

なお、ここで整理している事項は、米国における竜巻に対するものであり、必ずしも日本の場合と一致するわけではない。

5.4.1 トルネード・プロジェクト (The Tornado Project)

トルネード・プロジェクトとは、米国の竜巻に関する情報収集を行い、ビデオ、書籍販売、情報提供を行っている会社である。

(1) 竜巻に関する情報

米国において発生する竜巻に関して、過去の情報をまとめると以下のように整理される。

- 毎年約 1,000 件の竜巻が記録されている。
- 竜巻の月別の発生件数は 5 月が最も多いが、殺人竜巻 (killer tornado) と呼ばれる危険性の高い竜巻の発生は 4 月に最も多い。その原因として、以下が考えられている。
 - ・ 年初に発生する竜巻は、その後発生する竜巻よりも規模が大きい。
 - ・ 3-4 月は 5-6 月に比べて日が短く、竜巻は暗いうちに発生するため、視覚的に確認が困難である。
- 米国南部の州で被害が大きい傾向がある。以下の原因が考えられる。
 - ・ 南部は天候が温暖なことから、家屋の基礎に非補強セメントや軽量コンクリートブロックが用いられている。
 - ・ 高水位により地下階の建設が不可能である。
 - ・ 貧困地域がある。

参考として、米国における殺人竜巻の Top10 を次ページの表に示す。

表-5.3 米国における殺人竜巻(Killer Tornadoes)のTop10⁴⁰⁾

ランク	発生地区	発生年月日	発生時刻	死者	負傷者	F スケール	概況など
1	ミズーリ州 Ellington	1925.3.18	13:01	695	2,027	F5	ミズーリ州～イリノイ州～インディアナ州 平均速度 62mph、長さ 219mile、N69°E
2	ミシシッピ州 Natchez	1840.5.7	13:45	317	109	F?	ルイジアナ州～ミシシッピ州アダムズ郡ナチェス 北東、被害額\$1,260,000
3	ミズーリ州 St. Louis	1896.5.27	18:30	255	1,000	F4	ミズーリ州セントルイス～イリノイ州マディソン郡 東、被害額\$12,000,000
4	ミシシッピ州 Yalobusha County	1936.4.5	20:55	216	700	F5	ミシシッピ州リー郡 Tupelo～イタワンバ郡 東北東、被害額\$3,000,000
5	ジョージア州 Gainesville	1936.4.6	08:27	203	1,600	F4	ジョージア州ホール郡ゲーンズビル～サウスカロライナ州 東北東、被害額\$13,000,000
6	テキサス州 Pampa	1947.4.9	18:05	181	970	F5	テキサス州グレイ郡～オクラホマ州～カンザス州キングマン郡 北東、北北東
7	ルイジアナ州 Livingston Parish	1908.4.24	11:45	143	770	F4	ルイジアナ州リビングストン郡～ミシシッピ州ウェイン郡 東北東
8	ウィスコンシン州 Hudson	1899.6.12	17:40	117	200	F5	ウィスコンシン州セントクロイス郡 Hudson～New Richmond 北東、被害総額\$300,000
9	ミシガン州 Flint	1953.6.8	20:30	115	844	F5	ミシガン州ジェネシー郡フリント～ラピール郡 東北東、被害総額\$19,000,000
10	テキサス州 Lorena	1953.5.11	16:10	114	597	F5	テキサス州マクレナン郡ウェーコ 北北東、被害総額\$41,000,000

(2) 竜巻における安全対策

ホームページでは、「竜巻による被害を防ぐために最も重要なことは、天候の変化に警戒することである」として、住民が竜巻に対して無知であることや軽視することを危惧し、竜巻防災への意識向上を促している。

ここで書かれている竜巻に関する知識について、一例を以下に示す。

- 竜巻警報と注意報について
 - ・ 竜巻注意報 (tornado “watch”) : 竜巻が発生する可能性がある。
 - ・ 竜巻警報 (tornado “warning”) : 竜巻が実際に発見されているか、またはレーダー上に強く示されており、直ちに安全な場所に避難すべきである。
- 天候が変化 (悪天) してきた場合、地域放送のラジオやテレビで天気予報を確認することが重要である。他にウェザーチャンネル⁴¹⁾や米国海洋気象庁ラジオ (NOAA weather radio) で情報収集が可能である。
- 竜巻は通常、南西から北東へ移動するが、東、西、南西、北、更に北西にさえも移動することもある。
- 様々な場面における自分自身の安全性に関する計画を家族に奨励し、実際に必要となる前に最も安全な場所について意思決定することが重要である。

また、ホームページでは、以下のような場面における安全対策について、それぞれにおける避難場所、避難形態、避難時の注意事項、あるいは事前の準備に関する留意事項 (備考欄) について記述されている (表-5.4)。今後、日本における竜巻防災として役に立つ情報と考えられることから、以下、整理して掲載する。

- (a) 家や小建築物
- (b) 学校
- (c) 学校や仕事の行き帰り、放課後活動
- (d) 車の中
- (e) 高層の建物
- (f) 移動住宅
- (g) ショッピングセンター、病院、工場

なお、このまとめに当たっては、以下のことに留意が必要である。

- ※ 米国ではシェルター設置が義務付けられている州もあり、竜巻防災に対する意識はかなり高い。
- ※ ここに示す安全対策は、あくまでも米国における竜巻に対するものであり、気象状況や住居環境などが日本と異なることから、必ずしも日本で適用できるとは限らない。

表-5.4 米国における竜巻に対する安全対策の整理（ホームページ⁴⁰⁾より再編成）

	避難場所	避難形態	備考
(a)家や小建築物	①ストームシェルター（地階または屋外） ②地下階の丈夫な作業台や階段の下 ③1階内部の窓がない小さな部屋やホール（浴室、クローゼットなど）	・古い毛布やキルト、未使用のマットレスで覆う ・浴槽に入りクッション等で覆う	・地下では、西側と南側の壁から離れること ・避難所に古い毛布やキルト、未使用のマットレスを用意しておくこと ・災害時供給用品を準備しておくが良い
(b)学校	①最下階にある内部の部屋やホール	・うずくまり、小さくなる ・手などで頭を覆う	・長いスパンの屋根、フリースパンの壁から離れること（体育館や講堂、カフェテリアなど） ・窓やドアなどのガラスから離れること ・外に通じるホールは避けること ・避難経路で南西、南、西側の外に通じる廊下は避けること
(c)学校や仕事の行き帰り、放課後活動	①直ちに帰宅し、それぞれの避難場所に避難	・(a)と同様	・(a)と同様
	②帰宅不可の場合、頑丈な建物の地下、溝や低地	・溝や低地では横ばいになる	・倒れてくる木や電線、街灯に注意すること ・降雨時の排水溝は避けること
(d)車の中	①車を置き、(c)と同様に避難	・(c)と同様	・(c)と同様 ・車で逃げるのは避けること ・地下道の安全性は不明であるため、推奨しない
(e)高層建築物	①建物内部の部屋やホール	・(a)と同様	・(a)と同様 ・エレベータの使用は避けること ・壁や窓などのガラスから離れること
(f)移動住宅	①移動住宅公園内の指定避難場所 ②丈夫な構造物（鉄筋コンクリートのパトリーなど）	・(a)や(b)と同様	・予め移動住宅公園の避難場所を確認しておくこと
(g)ショッピングセンター、病院、工場	①最下階の内部の部屋やホール（浴室、クローゼット、オフィス、メンテナンスルームなど）。 建物の北側や東側の部屋、壁の隅がより安全	・(b)と同様	・ガラスの多い場所、広いスパンの屋根がある場所から離れること（講堂、映画館、倉庫など）

(a) 家、小建築物において

最も安全な場所は以下である。

- 竜巻のために設計されたストームシェルター（地階または屋外）。
- 地下にある丈夫な作業台や階段の下（ただし、西側と南側の壁からは離れること）。古い毛布やキルト、未使用のマットレスを用意しておくこと。
- 1階内部にある窓がない小さな部屋（例えば、浴室やクローゼット）、またはホール。浴槽に入りクッションで覆うと良い。
- 竜巻と自分自身の間にできるだけ壁を多くすること。

避難所がどこであったとしても、家族のそれぞれが熟知しているべきである。年に1度、家族で防災訓練（火事や竜巻など）を行っている時、竜巻が近づいてきた時、何をするか、どこへ行くのか、慌てずに思い出すことができる。また、家族が離れ離れになるようであれば、街の他地区などで連絡窓口（contact person）となる友人か家族を選んでおく必要がある。

赤十字社⁴²⁾では、避難所に下記のものを含む災害時供給用品（disaster supplies kit）を備えておくことを提案している。

- ・ 通常時の救急箱に加えて、実質的な医薬品を含む応急処置用品
- ・ ラジオや懐中電灯のバッテリーと予備バッテリー
- ・ 缶詰や腐敗しにくい食品と手動缶切り
- ・ ボトルの水
- ・ 丈夫な靴と作業用手袋
- ・ 家の設備を停止させる方法が書かれた説明書

(b) 学校において

学校における避難手順は以下の通りである。

- ① 講堂や体育館、フリースパンの部屋から離れ、最下階にある内部の部屋やホールへ向かう。
- ② うずくまり、できるだけ小さくなって、頭を覆う（覆うもの何か、もしくは手）。

避難の際の注意事項としては、以下の4点である。

- ・ 体育館や講堂、カフェテリアなど長いスパンの屋根、フリースパンの壁から離れること。
- ・ 窓やドアなどのガラスから離れること。
- ・ どの方向でも外に通じるホールは避けること。
- ・ 避難経路に内部の廊下が無い場合、南西、南、西側の外に通じる廊下は避けること。

竜巻のピーク時間は地域によって異なる。例えば、南東部の州では、早朝と午後遅くに竜巻が発生しやすいが、西部や北部の州の竜巻ピーク時間は午後3時～午後7時で、学校終了時間と重なる。

生徒は教師や大人の指示に従うべきだが、何をするか、どこへ行くかについては生徒自身も知っておくことが必要である。学校における竜巻や火災訓練は、どんなに退屈で無益であるように思えたとしても、生か死の差を生むかもしれない。生徒自身が無意識に反応できれば、慌てずに適切な意思決定ができるだろう。

(c) 学校や仕事の行き帰り、放課後活動において

歩行中、または自転車に乗っている場合は、直ちに帰宅することが最重要である。

帰宅できない場合の避難時の注意事項は以下の通りである。

- ・ 直ちに安全な場所を探すべきである。その際、倒れてくる木や電線、街灯に注意すること。
- ・ 避難に適している場所は、頑丈な建物の地下、あるいは溝や低地（横ばいになる）である。ただし、降雨の際の排水溝では、鉄砲水が発生する可能性もあるので注意する。

(d) 車の中において

車中で竜巻に遭遇した場合は、車で逃げるのではなく、直ちに車を置いて避難所に向かうべきである。特に、風に当たる面積が大きい車両（特にバンやスクールバスなど）は被害を受けやすい。

避難の際の注意事項としては以下がある。

- ・ 地下道の避難場所としての安全性は未知であるため、推奨できない。

(e) 高層建築の建物

避難に最適な場所は、建物内部の部屋やホールである。

避難の際は、以下のことに注意する。

- ・ エレベータの使用は避けること。
- ・ 壁や窓などのガラスから離れること

(f) 移動住宅

トレーラーハウスは 80mph(36m/s)以下の風で簡単に投げ飛ばされ、100mph(44m/s)では崩壊し始める可能性がある。移動住宅公園内に住んでいる場合では、先ず管理人に避難場所を確認することが重要である。避難場所としては、移動住宅公園内にある指定避難所、鉄筋コンクリートのランドリーなど頑丈な構造物などである。

(g) ショッピングセンター、病院、工場

避難に最適な場所は以下に示す通りで、避難所に着いたら、うずくまり頭を覆うことが必要である。

- 最下階の内部の部屋やホールである。
- 壁の中央となる付近より、隅の方が安全である。
- 浴室、クローゼット、オフィス、狭い壁のメンテナンスルームは最も安全である（北側または東側の部屋はより安全）。

また、避難の際は、ガラスの多い場所や、広いスパンの屋根がある場所（例えば、講堂、映画館、倉庫など）から離れること。

5.4.2 事例 –イリノイ大学における竜巻に対する防災対策–

もう一つの事例として、米国中西部のイリノイ州・イリノイ大学アーバナシャンペイン校で実施されているシェルターサインの掲出と、配布されているリーフレットを図-5.4 と図-5.5 に紹介する。イリノイ州は竜巻の発生数が多いいわゆる「トルネードアレイ」の一隅にあり、同校は州中東部の穀倉地域にある。大学の校舎には図-5.4 のようなサインが掲出されており、竜巻の発生時に安全な避難場所であることを表わしている。また、図-5.5 のリーフレットは、客員研究員の着任時などに配布される書類に含まれており、当地での生活を始めるに際して一読を勧められる。内容はトルネード・プロジェクトで紹介したものと同様だが、大学での警報システムや警報を聞いた場合の対処方法などを説明している。



(撮影：北見工業大学 宮森保紀助教授)

図-5.4 イリノイ大学にあるシェルターサイン

TORNADO PROCEDURES

The Twin Cities, County, and the University of Illinois are prepared to keep a watchful eye on weather conditions and to warn the populace of impending tornadoes. This will be done by sounding the civil defense sirens, located in strategic positions throughout the campus, for a continuous three minute unwavering blast. The sirens will be sounded only if: a tornado is actually sighted or if the University is mentioned as being in the path of an approaching tornado (tornado warning sirens are tested on the first Tuesday of the month at 10:00 a.m.). The Public Safety Division, consisting of both the Police and Fire Departments, will also receive the warning.

If you are outside when you hear the warning siren, seek inside shelter, preferable in a steel framed or concrete building or in a building that is marked with tornado shelter placards. Stay away from all windows.

If you are inside a building, go to the interior hallway or other enclosed area that is away from windows and on a lower floor of the building. Avoid going into auditoriums, gymnasiums, or other such large rooms where roof collapse may be likely. In wooden buildings, such as houses, the least hazardous place is in the basement or under heavy furniture in the center of the building and away from all windows.

In the event of casualties, give first aid to the best of your ability and notify the Fire Department as soon as possible at 911.

The report of a tornado or funnel cloud threatening the U of I complex has been received from the Champaign County ESDA emergency operations center.

The siren warning signal is intended to advise all who hear it to take cover for a period of 30 minutes. Should the dangers outlined in the above continue to be in existence, the warning signal will be repeated every 30 minutes for as long as those conditions continue to exist or if new similar situations develop.

TORNADO QUESTIONS AND ANSWERS

March through October is "tornado season" in Central Illinois, but a tornado can occur at any time of the year, day or night. Two of the most asked questions about tornadoes are:

Q. What is the difference between a funnel cloud and a tornado?

A. A funnel cloud is just what its name implies. It is a funnel-shaped cloud that does not touch the ground. When a funnel cloud does touch the ground, it is then referred to as a tornado.

Q. Where does Illinois rank in tornado frequency?

A. The Central United States is the area of maximum tornado frequency. Of the central states, Illinois ranks eighth in frequency. Although Illinois has a high rate, the probability of a tornado striking twice in exactly the same place once in 500 years.

TORNADO WARNING GUIDELINES

All staff and students should read these tornado guidelines. A tornado warning alert is provided by sirens located throughout the campus. A continual siren at any time, except for the emergency test conducted the first Tuesday of each month at 10:00 a.m., indicates an emergency condition. It is presumed to be a tornado warning unless informed by officials to the contrary.

Tornadoes are unpredictable, therefore you should avoid exterior windows, walls, and ceilings whenever possible. Statistics state that the northeast corner of the building is the safest. Caution and common sense by each individual is of utmost importance, and, in particular, actions that may cause panic should be avoided.

General Guidelines:

- Staff and students will be advised when a tornado warning is in effect and are encouraged to comply with these guidelines.
- All persons should be encouraged to remain inside a safe area until the warning is canceled.
- Stay away from all glass windows and exterior doors at all times.
- Any evacuation should be done in an orderly fashion and insofar as possible along the north side of the building to a safety area.

The following terms are used by the media and emergency agencies when referring to a tornado:

Tornado Watch: Weather conditions are ripe to produce these storms. You should be alert to changing weather conditions and a "tornado warning" being announced.

Tornado Warning: A tornado has been sighted in the area.

The "tornado warning" signal is a long blast from the emergency siren which is repeated every 30 minutes while the warning is in effect.

If you are in a University building, there are signs showing where safe areas in the building are located. Make sure you are familiar with these areas.

If you are at home, take shelter in the basement, crawl space, or the smallest room in the center of your house.

If you are in a car or open area, take shelter in a ditch, ravine, or ground depression.

For more information contact the University of Illinois Fire Department at 333-2428.

- Northeast stairwells should be used, if available, since tornadoes generally follow a southwest to northwest path.

- **DO NOT USE THE ELEVATORS.**

- Doors to all rooms should be kept closed.

For All Buildings:

- Evacuate any rooms that are on the top floor or that have an exterior wall at ground level or above.

- Floors below ground level, hallways, and rooms in the center of a building that are not on the top floor may be used as shelters.

TORNADO WARNING SIREN PROCEDURES

The decision to activate the sirens will be based upon the following situations:

- A funnel cloud or tornado has been sighted by or has been confirmed by law enforcement or Fire Department personnel which is threatening the U of I complex.
- A tornado has touched down within any of the three jurisdictions.
- A report of a tornado radar echo threatening the U of I complex has been received from the U. S. Weather Service.

TORNADO PREPAREDNESS

University of Illinois



Urbana-Champaign

University of Illinois Fire Department
1306 West Green Street
Urbana, Illinois
333-2428

Call 911 in the event of an emergency

5.5 まとめ

日本において竜巻は決して希な事象とは言えず、大きな被害をもたらした竜巻も多く発生している。佐呂間竜巻の2ヶ月前の2006年9月に延岡市で台風に伴って発生した竜巻により40トンもある鉄道車両が横転したり、転倒物や飛来物などで3名が死亡したりした被害も記憶に新しいところである。佐呂間竜巻以降でも、高知県や沖縄県で被害を伴う竜巻が発生した。2006年以降の竜巻による死者は17名に上り、あたかも竜巻が多発しているような印象もあるが、例年と比較してもその数が特に増加している訳ではない。佐呂間竜巻で被災した工事事務所のように偶然にも被害が大きくなる場所で発生したということであり、過度に竜巻に対して家屋や構造物の強度を増したり、設計基準を変更するなどの対策は、被害に遭遇する確率を考えると、必ずしも必要とは考えられない。

しかし、竜巻被害を最小限にするための対策は講じておくべきである。今後、気象庁などで竜巻警報を発信するシステム開発が行われるようであり、このシステムに期待するとともに、テレビやラジオによる気象情報の伝達のほか、テレビやラジオを常時使用しない職場、学校、店舗などの施設利用者への警報伝達方法（例えば、危険地域に居る人にメール配信するなど）を検討する必要があると思われる。また、警報後の住民の対応として、米国の例に見られるように、各種施設において安全と思われる場所、避難に適した施設など、避難訓練などを通じて利用者に周知することや、避難場所への誘導標識などを設置し被害を少なくしていくよう対応が重要と考えられる。

もっとも竜巻警報システムが整う前にも住民の自助、共助で可能な取り組みは多いと考えられる。通常の高風注意報や警報などに対しても不要な外出を避けて、通常とは異なる気象の状況に注意を払うことは可能である。また異常な強風などを感じた場合は、自宅でも窓の少ない頑丈な壁のある部屋に避難したり、布団や毛布を被ったりして身を守ることができる。可能であれば周囲のお年寄りや体の不自由な人、子供など災害弱者となりうる人たちにも注意や対応を促すことができれば、人的被害をかなり軽減することが期待できる。被災後でも、散乱したガラスや飛散物、切れた電線やガス漏れなどに注意することで2次的災害を防ぐと同時に、近隣で声を掛け合うことで安否を確認することが重要である。佐呂間竜巻では地域の多くが顔見知りであるといった要因から、住民の共助がよく機能したとも考えられる。これらの取り組みは都市部でも新しい施設や制度などに頼らず地域の防災力を底上げすることにつながり、竜巻に限らず突発的自然災害全体への対策としても有効であると考えられる。

竜巻のような局所的かつ強度の大きい自然災害に対しては、予測精度を向上させるための観測態勢の整備、学術的研究の促進が期待される一方、予測が難しい状況でも住民が個別に異変を察知し、被災後の初期対応ができる自助、共助に対する意識を高めることも重要であろう。

【5章の参考文献】

- 1) Hiroshi Niino and Tokunosuke Fujitani: A Statistical Study of Tornadoes and Waterspouts in Japan from 1961 to 1993, *Journal of climate*, Vol. 10, pp.1730-1752, 1997.
- 2) 大野久雄：雷雨とメソ気象、東京堂出版、2001.
- 3) 気象庁：災害をもたらした竜巻資料、気象庁ホームページ、
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/tatsumaki/index.html>
- 4) 吉田昭仁、田村幸雄：愛知県豊橋市で発生した竜巻の被害調査およびアンケート調査、2004年の強風災害に関する調査報告書、日本風工学会風災害研究会、pp.65-79, 2005.
- 5) 谷池義人：竜巻時に物体に作用する非定常力、文部省科学研究費(No.02306029)突発災害調査研究成果 1990年12月11日千葉県に発生した竜巻による暴風災害の調査研究（研究代表者 桂順治）、pp.111-120, 1991.
- 6) 奥田泰雄、喜々津仁密：2006年台風13号被害調査報告-延岡市の竜巻被害と飯塚市文化施設の屋根被害-、建築研究所災害調査、
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>
- 7) 札幌管区气象台網走地方气象台：平成18年11月7日佐呂間町で発生した竜巻に関する気象速報、2006.
- 8) 北海道新聞：2001年（平成13年）6月30日（土曜日）、2001.
- 9) 河井宏允、丸山敬、石川裕彦、荒木時彦：2001年6月から7月にかけて発生した強風被害について、日本風工学会論文集、第94号、pp.99-105, 2003.
- 10) 例えば、石崎潑雄、光田寧、林泰一：1978年9月16日に潮岬を襲った竜巻について、京大防災研究所年報、第22号B-1、pp.371-384, 1979.
- 11) 足立一郎、羽倉弘人、小泉俊雄：1990年12月11日、千葉県に発生した竜巻による被害調査報告—特に茂原市の被害に関して—、瞬発性気象災害の実態とその対策に関する研究報告書、pp.25-68, 1983.
- 12) 田村幸雄、石原競、大熊武司、下村祥一：1999年9月24日に豊橋市を襲った竜巻被害に関するアンケート調査、損害保険料率算出機構、RISK, No.56, pp.1-11, 2000.
- 13) 小泉俊雄：茂原市と豊橋市の竜巻の比較をもとにした竜巻災害に関する研究—その2 復旧、保険の対応—、自然災害科学 23-2, pp.199-213, 2004.
- 14) 植松康、高橋章弘、堤拓哉、松井正宏：北海道佐呂間町で発生した竜巻による被害に関するアンケート調査、文部科学省科学研究費 特別研究促進費 (No.18900003) 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な災害に関する調査研究、pp.149-186, 2007.
- 15) 八重山毎日新聞：八重山毎日オンライン 2006年12月11日、
http://www.y-mainichi.co.jp/?action_article_show=true&article_id=6619
- 16) 科学技術振興機構：原子力百科事典, http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/02020507_1.html
- 17) ASCE: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-05, 2006.
- 18) 中村秀治、坂本雄吉、清水幹夫、前野陽治：送電鉄塔・架渉線の耐風設計、電中研レビュー、

- Vol.48, pp.9-11, 2003.
- 19) CIGRE: Action Plan of CIGRE Study Committee B2: "Overhead Lines" 2006-2007-2008,
http://www.cigre-b2.org/Site/Technical/pa_ap.asp, 2006.
 - 20) 田村幸雄：竜巻に対する構造物等の設計上の問題点と気象分野への期待、竜巻シンポジウム－わが国の竜巻研究の今後の課題と方向性－講演スライド、気象研究所ホームページ、
http://www.mri-jma.go.jp/Topics/tornado_sympo/tornado_sympo.html
 - 21) 河井宏允：竜巻時の物体の飛散と構造物に作用する風力について－佐呂間町の竜巻を例にとつて－、文部科学省科学研究費 特別研究促進費 (No.18900003) 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な災害に関する調査研究、pp.219-232, 2007.
 - 22) 日本建築センター：飛来物に対する計画、住宅の台風設計施工点検指針、1993.
 - 23) 丸山敬、西村宏昭：合衆国における外装材の飛散物による耐衝撃試験法に関する調査、文部科学省科学研究費 特別研究促進費 (No.18900003) 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な災害に関する調査研究、pp.197-218, 2007.
 - 24) Australian / New Zealand Standard 1170.2 –Wind Actions, 2002.
 - 25) T. Marshall: A Tribute to Dr. Ted Fujita, Stormtrack,
<http://www.stormtrack.org/library/people/fujita.htm>
 - 26) C. A. Doswell, I. J. Weiss and R. H. Johns: Tornado Forecasting: A Review, The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophysical Monograph 79, Amer. Geophys. Union, pp. 557-571, 1993.
 - 27) National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA's All-Hazard Monitor,
<http://www.noaawatch.gov/>
 - 28) 武田喬男、田中浩、高瀬邦夫、夏木尚平、横山辰夫、赤枝健治：3.1 積乱雲および積乱雲群の構造に関するレーダー観測、文部省科学研究費研究成果 竜巻など瞬発性気象災害の実態とその対策に関する研究（研究代表者 光田寧）, pp.39-57, 1983
 - 29) 小林文明：竜巻の多様性－2006年9月17日台風13号に伴う竜巻を中心として－、竜巻シンポジウム－わが国の竜巻研究の今後の課題と方向性－講演スライド、気象研究所ホームページ、
http://www.mri-jma.go.jp/Topics/tornado_sympo/tornado_sympo.html
 - 30) 気象庁：気象レーダー観測、<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>
 - 31) 赤枝健治：竜巻実況把握に向けたドップラーレーダー観測の現状と課題、竜巻シンポジウム－わが国の竜巻研究の今後の課題と方向性－講演スライド、気象研究所ホームページ、
http://www.mri-jma.go.jp/Topics/tornado_sympo/tornado_sympo.html
 - 32) 藤吉康志：竜巻が北海道佐呂間町に発生した要因に関する考察、文部科学省科学研究費補助金報告書 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な被害に関する調査研究、pp. 65-72, 2007.
 - 33) 藤吉康志、山下和也、藤原忠誠：3次元走査型コヒーレントドップラーライダーによる大気境界層の流れの可視化、天気（カラーページ）、52, pp.665-666, 2005.

- 34) 佐々浩司、林泰一：現地調査と模擬実験に基づく佐呂間竜巻発生時の大気下層場の推定、文部科学省科学研究費補助金報告書 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な被害に関する調査研究、pp. 45-56, 2007.
- 35) 加藤輝之、新野宏：佐呂間の竜巻の発生環境に関する研究、文部科学省科学研究費補助金報告書 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な被害に関する調査研究、pp. 19-36, 2007.
- 36) 坪木和久：北海道佐呂間町で発生した竜巻の雲解像モデルを用いたシミュレーション実験、文部科学省科学研究費補助金報告書 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な被害に関する調査研究、pp. 57-64, 2007.
- 37) 前坂剛、清水慎吾、真木雅之、岩波越、三隅良平：ドップラーレーダー情報を利用した竜巻発生予測に関する研究－台風 0111 に伴って発生した竜巻の事例－、文部科学省科学研究費補助金報告書 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な被害に関する調査研究、pp. 83-98, 2007.
- 38) 文部省科学研究費自然災害特別研究 研究成果 自然災害科学総合研究班、竜巻など瞬発性気象災害の実態とその対策に関する研究（研究代表者 光田寧）, 1983.
- 39) 光田寧：竜巻など瞬発性気象災害に対する防災対策、瞬発性気象災害の実態とその対策に関する研究報告書、pp.121-124, 1983.
- 40) The Tornado Project : <http://www.tornadoproject.com/index.html#top>
- 41) The Weather Channel : <http://www.weather.com/>
- 42) American Red Cross : <http://www.redcross.org/>
- 43) University of Illinois Fire Department : Tornado Treparedness,発行年不詳

6. おわりに

本報告書は2006年11月7日に北海道佐呂間町若佐地区で発生した竜巻災害について、土木学会が派遣した北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査団の調査結果をまとめたものである。

被災翌日の11月8日から、土木施設、インフラ施設を中心に被害状況の調査を行った。特に倒壊した道路標識柱について、破壊時に作用したと考えられる応力の算定や3次元有限要素法による解析などにより、破壊状況の解明や作用風速の推定を行った。調査結果から道路標識柱には構造上の問題や設計上の問題はなく、設計で想定した以上の風速により倒壊したものと推定された。しかしながら、回転しかつ上昇流を伴いながら高速に移動する竜巻については、風の動的な影響や作用状況等が不明で、また破壊された建物などから発生する飛来物が衝突することの影響を考慮することも困難だった。現状では上記のような理由と調査の時間的制約から実現象を十分に説明する結論を得るには至らなかったが、今後の研究の進展において本調査団の取り組みが参考になることを願うものである。

調査団では、佐呂間竜巻以外にも2006年9月に発生した延岡竜巻など、社会的な注目を集める竜巻災害が連続したことを考慮し、住民や防災関係者が竜巻の被害を軽減するためにどのような対策を取り得るかについても調査を行った。再現期間が非常に長く力学的特性も完全には明らかになっていない竜巻に対しては、一般的には構造物の強度を増す方法よりも、異常な天候の急変を予知し身を守る行動を取ることと、被害発生時の対応を強化することが有効だと考えられる。ドップラーレーダーなど気象観測体制が強化される見込みだが、現状では竜巻の発生を完全に検知することは難しい。しかし、気象注意報・警報や天候の急変に注意を向けることで、竜巻のような異常気象の前触れを察知することはある程度可能と思われる。そして異常を感じた場合には、ガラスや固定されていない重量物などの危険物から離れ、机の下にもぐったり布団を被ったりすることで怪我を防止することが期待できる。怪我をしないことは、万が一被災した場合の復旧活動や避難生活においても重要な意味を持つだろう。

竜巻などの突風被害はわが国においても稀な現象ではなく、それによる被害も小さなものではない。一方、竜巻の発生を事前に知ることは、地震ほどでは無いとしても、他の気象災害と比較して難しい。したがって、被害を小さくするためには身の回りの天候の異常に気をつけることと、適切に身を守ることが現在取り得る有効な対策と考えられる。地域防災や住民の自助・共助においても本調査団の成果が社会に貢献できることを期待するものである。

謝 辞

本調査団の活動のうち、竜巻に関する文献調査ではこれまでに気象学や風工学分野で行われた多くの研究を参考にさせていただきました。また、本調査団の活動と同時期に行われた文部科学省科学研究費補助金（特別研究促進費）「北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な災害に関する調査研究」（研究代表者：田村幸雄東京工芸大学教授）の研究成果についてもたいへん参考にさせていただきました。特にアンケート調査の結果については、東北大学の植松康教授に特別に便宜をおはかりいただきました。当該分野における今後の更なる研究の進展に期待いたします。

本調査団の活動全般に対しては、関係機関の皆様にも多大な協力をいただきました。以下に特記し感謝の意を表します。（所属は平成19年3月時点）

国土交通省北海道開発局 網走開発建設部 道路第2課長 西村敦史氏
国土交通省北海道開発局 網走開発建設部 道路第2課 道路維持専門官 小田嶋正之氏
国土交通省北海道開発局 網走開発建設部 道路第2課 道路防災係長 相馬信哉氏
国土交通省北海道開発局 網走開発建設部 道路第1課 舗装係長 松本朋也氏
国土交通省北海道開発局 網走開発建設部 北見道路事務所長 鈴木勝美氏
国土交通省北海道開発局 網走開発建設部 北見道路事務所 維持補修係長 金田尚氏
国土交通省北海道開発局 網走開発建設部 北見道路事務所 交通管理係長 野上敦氏
独立行政法人 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 岡田慎哉氏
佐呂間町役場 総務課長 香川健一氏
佐呂間町役場 保険福祉課長 山本英人氏
佐呂間町役場 企画財政課長補佐 斉藤裕美氏
国立大学法人 北見工業大学 機械システム工学科 富士明良教授
国立大学法人 北見工業大学 土木開発工学科 伊藤陽司助教授
北海道電力株式会社 土木部 土木エンジニアリンググループ 副主幹 峯田稔氏
北海道電力株式会社 北見支店 配電グループリーダー 松岡秀樹氏
鹿島建設株式会社 札幌支店 土木部 担当部長 北村政幸氏
鹿島建設株式会社 札幌支店 土木部 技術設計グループ長 吉田英司氏
鹿島建設株式会社 技術研究所 都市防災・風環境グループ 主任研究員 山本学氏
鹿島建設株式会社 技術研究所 都市防災・風環境グループ 研究員 大窪一正氏
株式会社ドーコン 構造部 副技師長 加藤静雄氏
株式会社ドーコン 構造部 主任技師 熊谷清貴氏
株式会社ドーコン 構造部 主任技師 丹波郁恵氏

若佐地区の住民の皆様には、被災後のたいへんな状況で調査やヒアリングにご協力いただいたことを感謝いたします。

後 記

佐呂間竜巻で犠牲となった9名の土木技術者の方々のご冥福をお祈りするとともに、ご家族の皆様の本報告書を謹呈致します。