


竜巻等突風対策, 情報利用の問題点
風工学 Wind Engineering の立場から




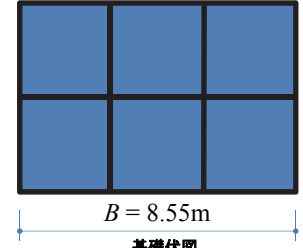
竜巻等突風分布 (気象庁)

田村幸雄
 東京工芸大学・風工学研究センター

1

基礎ごと転倒建物

建物高さ $H=6\text{m}$

基礎伏図

$B = 8.55\text{m}$

$D = 5.85\text{m}$

話 題

- 「つくばの竜巻, 2012年5月6日」における木造被害住宅の転倒限界風速
- 過去の竜巻被害事例からの風工学的教訓: 飛散物対策の重要性
- 通常の建築物等の突風に対する設計の考え方
- 高危険度施設, 高重要度施設等の竜巻に対する設計ガイドライン
- 人命確保の上での予測, 予報の重要性
- 今後の検討, 対策の必要性

2

基礎ごと転倒建物



日経BP社

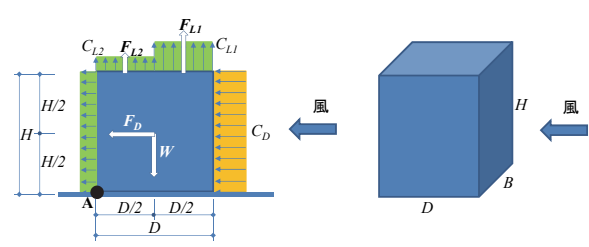
基礎ごと転倒建物と2階屋根飛散建物



日経BP

3

限界風速の算出



建物幅 B , 奥行 D , 高さ H : (m)
 瞬間風速 V (m/s)
 建物重量 W (N)
 平均風力係数 C_D, C_{L1}, C_{L2}

6

転倒限界

$$\sum M_A = 0: F_D \frac{H}{2} + F_{L1} \frac{3D}{4} + F_{L2} \frac{D}{4} = W \frac{D}{2}$$

$$F_D = 0.6V^2 C_D B H$$

$$F_{L1} = 0.6V^2 C_{L1} \frac{BD}{2}$$

$$F_{L2} = 0.6V^2 C_{L2} \frac{BD}{2}$$

転倒限界風速 (m/s)

$$V_{OT} = \sqrt{\frac{W \frac{D}{2}}{0.6 \left(C_D \frac{BH^2}{2} + C_{L1} \frac{3BD^2}{8} + C_{L2} \frac{BD^2}{8} \right)}}$$

転倒限界風速

転倒建物(寄棟屋根)

基礎含む建物重量 $W=525\text{kN} \sim 650\text{kN}$
 $V_{OT} = 108\text{m/s} \sim 120\text{m/s}$

注) 風速急変による非定常な空気力(仮)
 抗力係数 C_D を2倍, 屋根風力係数 C_{L1} , C_{L2} を3倍の極端な場合を想定
 (オーバーシュート係数)

$V_{OT} = 71\text{m/s} \sim 79\text{m/s}$
 ($t_r' \approx 3$, 立ち上がり時間0.25s程度)

(松本, 白土)

浮き上がり限界

$$\sum F_z = 0: F_{L1} + F_{L2} = W$$

浮き上がり限界風速(m/s): 転倒前

$$F_{L1} = 0.6V^2 C_{L1} \frac{BD}{2}$$

$$F_{L2} = 0.6V^2 C_{L2} \frac{BD}{2}$$

$$V_{LU} = \sqrt{\frac{W}{0.3(C_{L1} + C_{L2})BD}}$$

浮き上がり限界風速(m/s): 転倒後

$$F_{L1} = 0.6V^2 C_{L1} \frac{BH}{2}$$

$$F_{L2} = 0.6V^2 C_{L2} \frac{BH}{2}$$

$$V_{LU} = \sqrt{\frac{W}{0.3(C_{L1} + C_{L2})BH}}$$

転倒限界風速

転倒建物(寄棟屋根)

基礎含む建物重量 $W=525\text{kN} \sim 650\text{kN}$
 $V_{OT} = 108\text{m/s} \sim 120\text{m/s}$ **F3レベル以上!**

注) 風速急変による非定常な空気力(仮)
 抗力係数 C_D を2倍, 屋根風力係数 C_{L1} , C_{L2} を3倍の極端な場合を想定
 (オーバーシュート係数)

$V_{OT} = 71\text{m/s} \sim 79\text{m/s}$
 ($t_r' \approx 3$, 立ち上がり時間0.25s程度)

(松本, 白土)

風力係数

(東京工芸大学・空力データベースより)
<http://wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/contents/code/tpu>

基礎ごと転倒建物の場合
 $D:B:H = 5.85\text{m} : 8.55\text{m} : 6.0\text{m}$
 $C_D = 1.0$ (風上0.8, 風下-0.2)
 寄棟屋根
 $C_{L1} = -0.49, C_{L2} = -0.31$

(陸屋根の場合は
 $C_{L1} = -1.1, C_{L2} = -0.50$)

2階屋根飛散建物

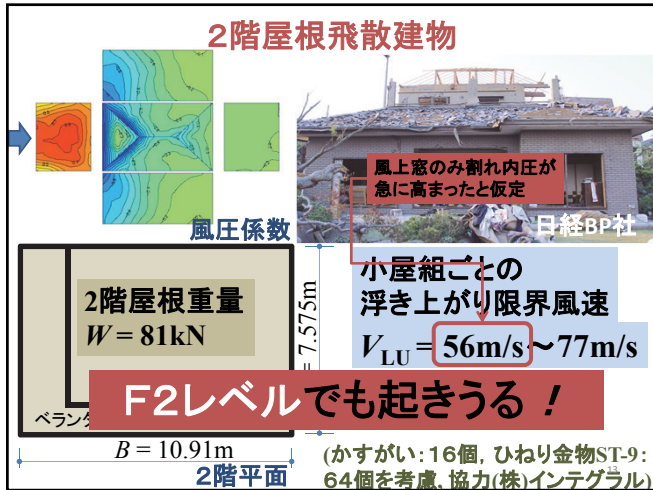
風圧係数

2階屋根重量
 $W = 81\text{kN}$

風上窓のみ割れ内圧が急に高まったと仮定
 $V_{LU} = 56\text{m/s}$

2階平面
 $B = 10.91\text{m}$
 $D = 7.575\text{m}$

(かすがい: 16個, ひねり金物ST-9: 64個を考慮, 協力(株)インテグラル)



米国のフジタスケール (Fスケール) と改良フジタスケール (EFスケール)

McDonald, Mehta and TTU WISE (2006)

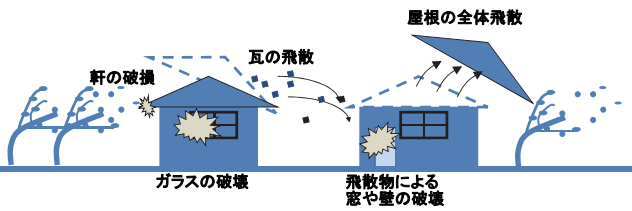
EF-Scale	EFスケール 瞬間風速 (m/s)	F-Scale	Fスケール 瞬間風速 (m/s)
EF0	29 - 38	F0	20 - 35
EF1	39 - 49	F1	36 - 52
EF2	50 - 60	F2	53 - 72
EF3	61 - 74	F3	73 - 93
EF4	75 - 89	F4	94 - 117
EF5	90 -	F5	118 - 142



- ### 話題
- 「つくばの竜巻, 2012年5月6日」における木造被害住宅の転倒限界風速
 - 過去の竜巻被害事例からの風工学的教訓: 飛散物対策の重要性
 - 通常の建築物等の突風に対する設計の考え方
 - 高危険度施設, 高重要度施設等の竜巻に対する設計ガイドライン
 - 人命確保の上での予測, 予報の重要性
 - 今後の検討, 対策の必要性の課題



飛散物による被害の連鎖



竜巻の場合は上昇気流の影響もあり、飛散物の影響する範囲は拡大

19

竜巻等の突風を対象とした各種構造物等の設計の基本的考え方

個々の建築物が竜巻被害に遭遇する確率

- 観測された竜巻の年間平均個数: 20.5 (Niino et al., 1997)
- これらが可住地(123,200km²)に一様分布
- 1竜巻の被害領域: 0.16km² (Niino et al., 1997)
- 日本の建築物は可住地に一様分布

■ 建築物が1年間に竜巻被害に遭遇する確率
 $= 2.6 \times 10^{-5}$
 ≈ 4 万年に1回

平成19年度・科学技術振興調整費・研究成果報告書(田村ほか, 2008)

飛散物に対する雨戸やシャッターの必要性



竜巻フジタスケール毎の発生頻度

	相対頻度(%)	超過頻度(%)
■ F0	25	100
■ F1	58	75
■ F2	15	17
■ F3	2	2

小林文明(2007)

話題

- 「つくばの竜巻, 2012年5月6日」における木造被害住宅の転倒限界風速
- 過去の竜巻被害事例からの風工学的教訓: 飛散物対策の重要性
- 通常の建築物等の突風に対する設計の考え方
- 高危険度施設, 高重要度施設等の竜巻に対する設計ガイドライン
- 人命確保の上での予測, 予報の重要性
- 今後の検討, 対策の必要性

21

竜巻等の突風を対象とした各種構造物等の設計の基本的考え方

個々の建築物が竜巻被害に遭遇する確率

- 観測された竜巻の年間平均個数: 20.5 (Niino et al., 1997)
- これらが可住地(123,200km²)に一様分布
- 1竜巻の被害領域: 0.16km² (Niino et al., 1997)
- 日本の建築物は可住地に一様分布

■ 建築物が1年間に竜巻被害に遭遇する確率
F2以上であれば,
 $= 4.4 \times 10^{-6}$
 ≈ 23 万年に1回

平成19年度・科学技術振興調整費・研究成果報告書(田村ほか, 2008)

個々の建築物の極めて低い竜巻遭遇確率

- 建築基準法での建築物設計は再現期間50年および500年を基本

→ 再現期間が数万年程度の竜巻は設計対象から除外

- 建築物や構造物の設計対象として考えるにはあまりにも遭遇確率が低い

→ これに耐えるように設計するのは極めて不経済

→ **人命の確保**

25

竜巻等の突風を対象とした各種構造物等の設計の基本的考え方

市町村が竜巻等の被害に遭遇する確率

- 年平均20.5個(Niino et al., 1997)の竜巻被害が全国一様に分布
- 1822の市町村が全国一様に分布

- 1市町村が1年間に竜巻被害に遭遇する確率
= 0.011
= 90年に1回
- 1市町村の住宅地が1年間に竜巻被害に遭遇する確率
= 0.00143
= 700年に1回

◆ 都市防災、地域防災のターゲットとすべき

平成19年度・科学技術振興調整費・研究成果報告書(田村ほか, 2008)

諸外国の風荷重基準類での竜巻等の突風の位置づけ

- SEI ASCE7-05 (2005) 米国
- AS/NZS 1170.2 (2002) オーストラリア・ニュージーランド

竜巻は耐風設計の対象外

- 国際標準ISO4354 (2009) Wind acts

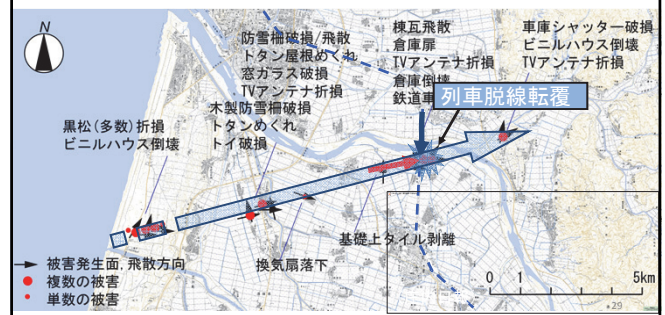
→ サンダーstorm(ダウンバースト等)を設計の対象と考えた3秒ガストでの設計体系

→ 空気力の非定常性等は取り込まれていない
竜巻は耐風設計の対象外

26

鉄道線路を横切る竜巻被害

2005年12月25日羽越本線いなほ14号脱線



鉄道線路を横切る竜巻被害

2006年9月17日日豊本線にちりん9号脱線(延岡)



建築基準法で設計された建築物

基準風速	瞬間風速換算	
・最低風速 30m/s	→ 45m/s ~ 60m/s	F1 ~ F2
・東京 34m/s	→ 50m/s ~ 70m/s	F2
・沖縄県 46m/s	→ 70m/s ~ 90m/s	F3

- 竜巻の風速 (Fujitaスケール)

・F0:	17m/s ~ 32m/s
・F1:	33m/s ~ 49m/s
・F2:	50m/s ~ 69m/s

- ◆ きちんとした耐風設計がなされていれば、殆どの竜巻等の突風にも耐えられる
- ◆ 飛散物や開口部への配慮は必要

27

竜巻等の突風を対象とした各種構造物等の設計の基本的考え方

鉄道線路が竜巻被害に遭遇する確率の概算

- 年間平均 20.5 (Niino et al., 1997) の竜巻被害が可住地 123,200km² に一様分布
- 1竜巻の被害領域: 0.16km² (Niino et al., 1997)
- 日本の鉄道総延長27,000kmが可住地に一様分布

■ 1年間に竜巻が線路を横切る平均個数
= 8

平成19年度・科学技術振興調整費・研究成果報告書(田村ほか, 2008)

風速による管理を前提とした施設の突風被害

- 工事中仮設足場, ゴルフ場等ネット支持鉄塔
- 開閉式ドーム, 全天候型開閉式テニスコート, 全天候型港湾荷揚施設
- 工事中クレーン, 荷揚げ用クレーン

強風注意報, 警報, または風速計で管理

- 台風等の強風に関しては対処可
- 竜巻等の突風に対して対処困難

34

ライン状施設の竜巻遭遇確率

■ 鉄道施設

・総延長約27,000km

→ 年間8個程度の竜巻が鉄道線路を横切る?

■ 送電施設

→ ほぼ同様

事故防止のターゲットとすべき

平成19年度・科学技術振興調整費・研究成果報告書(2008)

32

話題

- 「つくばの竜巻, 2012年5月6日」における木造被害住宅の転倒限界風速
- 過去の竜巻被害事例からの風工学的教訓: 飛散物対策の重要性
- 通常の建築物等の突風に対する設計の考え方
- 高危険度施設, 高重要度施設等の竜巻に対する設計ガイドライン
- 人命確保の上での予測, 予報の重要性
- 今後の検討, 対策の必要性

35

風速による管理を前提とした施設の突風被害

- 熊谷での竜巻(2003年8月8日)

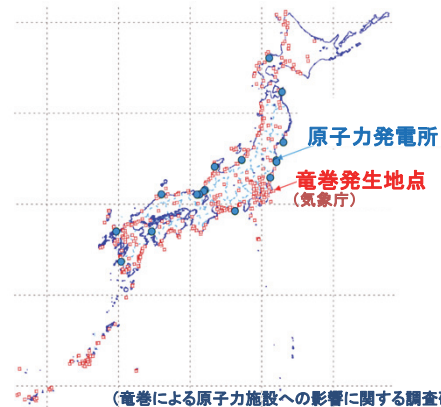


- 茨城県鹿島のダウンバースト(2003年10月13日)



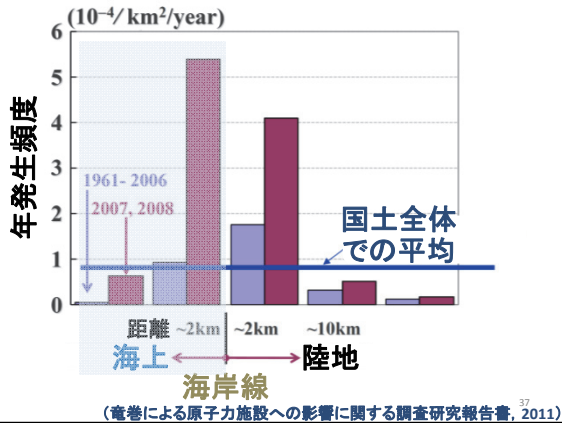
33

原子力発電所と日本の竜巻発生分布



(竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究報告書, 2011)

日本の竜巻発生頻度と海岸線からの距離



竜巻等の突風に対する建築物等の設計ガイドライン案

平成19年度・科学技術振興調整費・重要政策課題への機動的対応の推進
「竜巻等の突風および発生予測と対策」研究成果報告書(2008)

高危険度施設

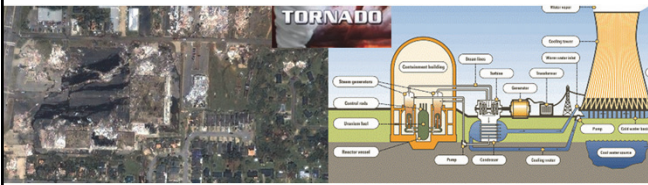
建築物等の種類	危険度・重要度	対応
■ 原子炉施設(核反応炉) 大規模液化天然ガスLNG 貯蔵施設	I-0	F4以上を考慮 危険物漏洩防止 安全停止保証
■ 使用済核燃料再処理施設, 核燃料・放射性物質保管庫, ウランウム濃縮施設	I-1	F4を考慮 危険物漏洩防止
■ 有害産業廃棄物処理施設 毒物保管施設	I-2	F3を考慮 有害物質漏洩防止

原子力発電所の竜巻による緊急停止

米国バージニア州サリー原子力発電所

2011年4月16日

- 原子炉2基の緊急停止
- 送電設備の被害で外部電力の遮断
- 補助電源による電力供給開始



竜巻等の突風に対する建築物等の設計ガイドライン案

平成19年度・科学技術振興調整費・重要政策課題への機動的対応の推進
「竜巻等の突風および発生予測と対策」研究成果報告書(2008)

高重要度施設

建築物等の種類	危険度・重要度	対応
■ コンピュータセンター 高度研究センター	I-2	F3を考慮 機能確保
■ 発電施設, 変電所	I-2	F3を考慮 機能確保
■ 消防署, 病院, 防災センター	I-2	F3を考慮 機能確保
■ 経済的高重要工場, 行政施設	I-3	F2を考慮 機能保護

原子力発電所の竜巻による緊急停止

米国アラバマ州ブランズフェリー原子力発電所

2011年4月28日

- 原子炉3基の緊急停止
- 送電設備の被害で外部電力の遮断
- 補助電源による電力供給開始

福島第一原発と同じGE製マーク沸騰水型原子炉



竜巻等の突風に対する建築物等の設計ガイドライン案

平成19年度・科学技術振興調整費・重要政策課題への機動的対応の推進
「竜巻等の突風および発生予測と対策」研究成果報告書(2008)

風速による管理が必要な施設

建築物等の種類	危険度・重要度	対応
■ 工事前仮設足場, ゴルフ場等ネット支持鉄塔	I-5	通常の耐風設計 竜巻注意情報等
■ 開閉式ドーム・テニスコート, 全天候型港湾荷揚施設	I-5	通常の耐風設計 竜巻注意情報等
■ 工事前クレーン, 荷揚用クレーン	I-5	通常の耐風設計 竜巻注意情報等
■ 風力発電施設	I-5	通常の耐風設計 竜巻注意情報等

話題

- 「つくばの竜巻, 2012年5月6日」における木造被害住宅の転倒限界風速
- 過去の竜巻被害事例からの風工学的教訓: 飛散物対策の重要性
- 通常の建築物等の突風に対する設計の考え方
- 高危険度施設, 高重要度施設等の竜巻に対する設計ガイドライン
- 人命確保の上での予測, 予報の重要性
- 今後の検討, 対策の必要性

43

2006年11月佐呂間町竜巻による災害発生時およびその後の行動

- 竜巻発生前の「強風注意報」に対して対応行動をとった住民は少ない。
(2006年11月の時点では竜巻注意情報のサービスなし)
→ 事前の警報とそれに基づく対応行動
- 竜巻発生時建物内にいた住民で回避行動を取った住民は少ない。
→ 回避行動と減災との関係
- 「電気被害」の発生数が多い。
→ 事後の住民生活に及ぼす影響大

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(2007)

人命確保の要件

- 列車や航空機の運行回避, 停止, 徐行
- コンクリート建物や壁の多い所への避難
- 雨戸, シャッター, カーテンなどの閉鎖
- その他の必要行動…… ためには
→ 発生の見込みが必要!
→ 予報の確かな伝達!

44

2011年3月11日の東日本大震災からの教訓

適中率の低いレアイベントに対する情報

- 警報は、とるべき行動の強いメッセージとともに発令されなければならない。
 - 警報, 予報の精度の向上
 - 事態の“深刻さ”の“確かな伝達”
 - 防災教育と定期的な避難訓練
 - 可能な避難経路の分かり易く的確な表示
 - 地域の住民組織, 職場, 学校等での詳細な避難行動, 対応の議論
- 行動科学(Behavior Science)の防災対策への積極的な取り込み

47

発生確率, 適中率の低い情報をどう使うか?

- 不確かであっても, 人命を救うには必要
- 予測精度の向上が不可欠

大量輸送機関
電力会社
自治体
建設会社, ほか

45

竜巻注意情報の利用方法は?

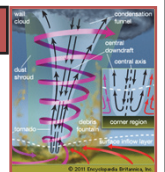
竜巻等の前兆



- 黒く厚い雲
- 雷鳴, 雷光
- 強い雨, 雹
- 冷たい風

竜巻の接近

- 漏斗状の雲
- 異様な音
- 飛散物



45

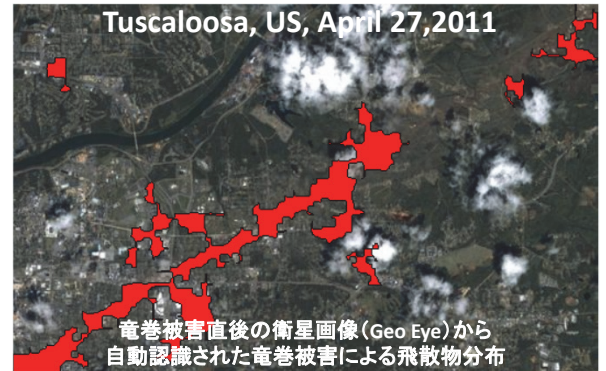
竜巻注意情報が出て前兆現象があったら

- 不要不急の外出は避ける
- 大勢の集まっているイベントの中止
- なるべく頑丈な建物内に避難
- なるべく建物の奥にとどまる
- 雨戸やシャッター、カーテンを閉める

天気情報等や外の様子に注意!
竜巻注意情報の有効期間!

49

迅速な被害領域、程度の把握



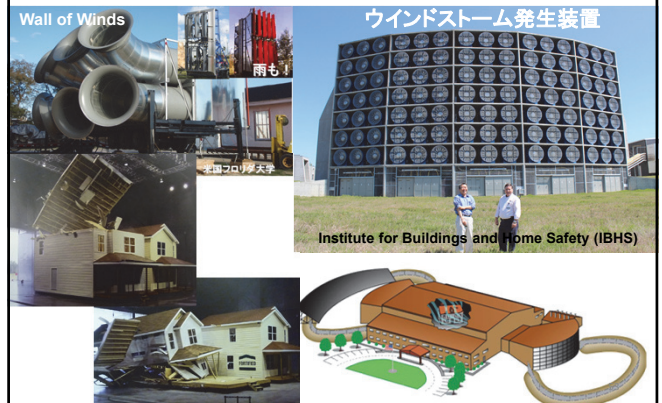
(R. Sabareesh, 2011東京工芸大学)

竜巻に遭遇したり、接近に気がついたら

- 急いで鉄筋コンクリート等の頑丈な建物内に避難する
- 木造建物しかない場合でも、建物の奥に逃げ込む
- 建物の奥の壁の多い部分で頭を防護してうづくまる
- 車の中にいる場合でも、他に避難建物がないときは、外に出ず、姿勢を低くして頭を防護する
- 屋外で周りに飛散物を遮る建物等がない場合、窪み、溝などにうづくまる、あるいは地面に這いつくばって頭を防護する



住宅等の耐風性、飛散物耐衝撃性の把握



話題

- 「つくばの竜巻, 2012年5月6日」における木造被害住宅の転倒限界風速
- 過去の竜巻被害事例からの風工学的教訓: 飛散物対策の重要性
- 通常の建築物等の突風に対する設計の考え方
- 高危険度施設, 高重要度施設等の竜巻に対する設計ガイドライン
- 人命確保の上での予測, 予報の重要性
- 今後の検討, 対策の必要性

51

今後の検討, 対策の必要性

- 適切な日本の住宅や建築物の構工法に応じた日本型フジタスケールの検討
 - 気象分野, 風工学分野の協力
- 迅速な被害範囲特定, 被災度認定のための評価手法の検討
 - 衛星画像・航空写真の活用, 風被害の特徴
- 高危険度施設, 高重要度施設, 風速管理の必要な施設の耐風, 対飛散物性能, 運用方法の見直し
 - 原子力発電関連施設, LNGタンク, クレーン等々
- 人命確保のための予知, 予報の精度向上
 - 観測網, 観測技術の整備と向上
- 情報伝達, 利用に関する検討, 改善
 - 行動科学, 社会科学, 自治体, 報道, 大量輸送機関
- 前兆現象, とるべき行動に関する啓発活動
 - 個人, 自治体, 行動マニュアル, 学校教育

54