

KOGEI 東京工芸大学
The 21st Century COE Program
Wind Effects on Buildings and Urban Environment
Tokyo Polytechnic University
Wind Engineering Research Center



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 平成19年1月23日
わが国の竜巻研究の今後の課題と方向性

東京工芸大学
田村幸雄

話題

- 突風被害の事例
- 突風の物理的シミュレーションと工学的モデル化
- 竜巻等の突風に対する建築物等の設計
— 設計での考え方 —
- 最近の突風被害からの教訓
- 気象分野への期待
- 改めて「日本風工学会からの提言」

2006年に発生した竜巻等の突風

1. 2006.01.19 鹿児島県瀬戸内町 海上竜巻
2. 2006.02.06 沖縄県西表島沖 竜巻
3. 2006.03.28 和歌山県串本町潮岬 竜巻
4. 2006.04.20 神奈川県藤沢市 竜巻
5. 2006.05.20 埼玉県坂戸市 竜巻
6. 2006.06.12 熊本県阿蘇市 竜巻
7. 2006.06.14 高知県高知市南海上 竜巻
8. 2006.07.05 高知県香美市土佐山田町 竜巻
9. 2006.08.13 佐賀市諸富町 竜巻
10. 2006.09.17 宮崎県延岡市 竜巻
11. 2006.09.17 宮崎県日向市 竜巻
12. 2006.09.17 宮崎県日南市 竜巻
13. 2006.09.17 高知県安芸市 竜巻
14. 2006.09.19 高知県沖 竜巻
15. 2006.10.11 北海道日高支庁平取町新ひだか町 竜巻
16. 2006.10.20 石川県志賀町 竜巻
17. 2006.11.06 和歌山県田辺市沖 竜巻
18. 2006.11.07 北海道佐呂間町 竜巻
19. 2006.11.07 北海道日高支庁 竜巻
20. 2006.11.09 北海道奥尻島 突風 竜巻
21. 2006.11.11 山口市名田島 突風 竜巻
22. 2006.11.12 松前町沖 竜巻
23. 2006.11.18 沖縄県名護市辺野古 米軍キャンプ 竜巻
24. 2006.11.26 高知県土佐清水市 竜巻

2006年11月29日
現在，竜巻と思わ
れる突風が24個
確認されている。

2004年6月27日の佐賀での竜巻



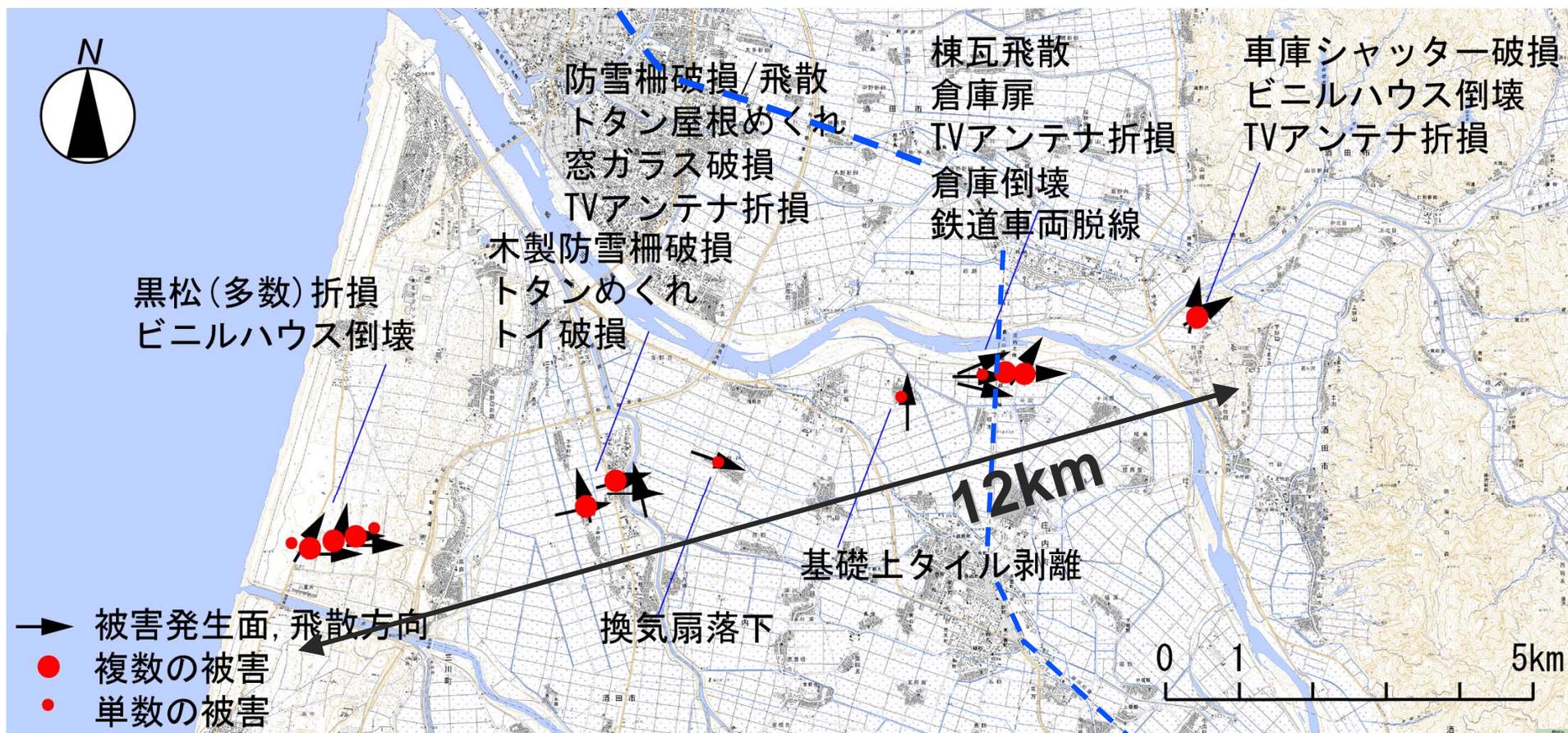
2005年12月25日酒田周辺での 突風被害

羽越本線いなほ14号脱線: 死者 5名, 負傷者32名



(庄内日報)

2005年12月25日の羽越本線 いなほ14号脱線事故



2005年12月25日酒田周辺での 突風被害



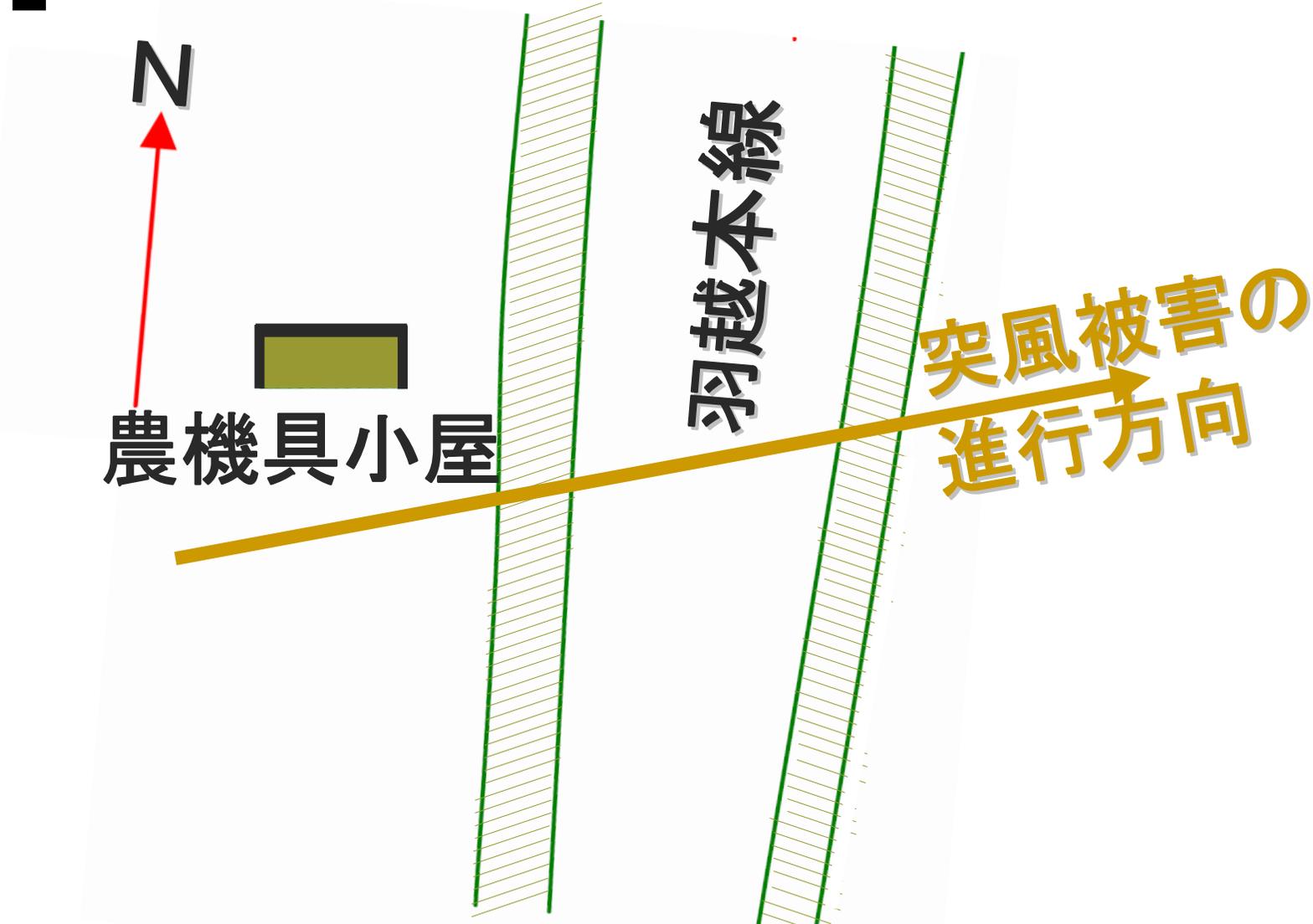
酒田河川国道管理事務所提供

防雪柵の直撃によるコンビニ玄関の
被害

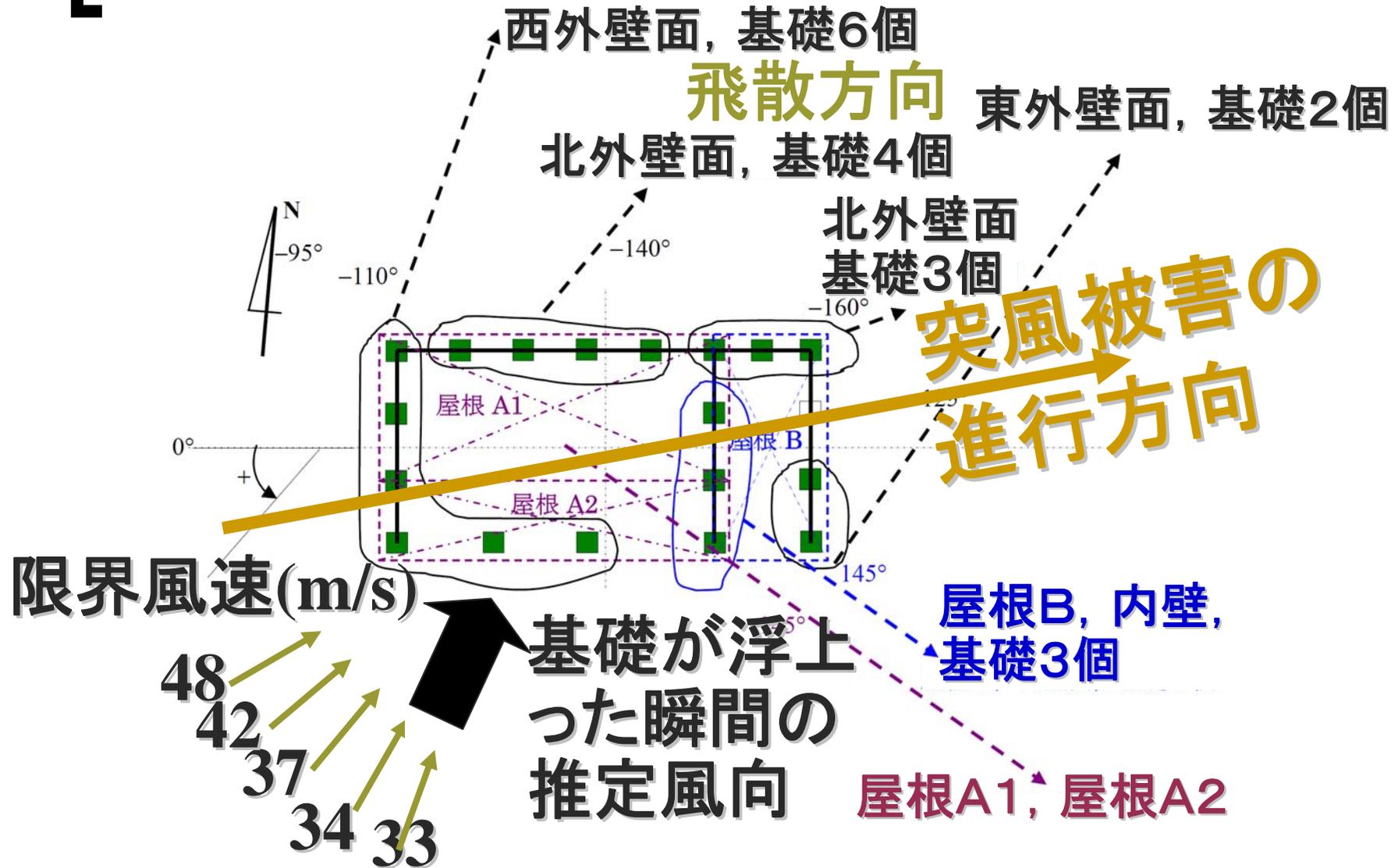


防雪柵の被害

2005年12月25日羽越本線いなほ 脱線現場付近で何が起きたか？



農機具小屋が基礎を引き抜いて 浮き上がった瞬間の推定風向



農機具小屋飛散のシナリオ

重い物は破壊の瞬間の風況にほぼ追従

• 南南西からの突風で瞬間的に浮き上がる

• 重量物はそのまま北北東へ移動

• 軽量物は舞い上がって、東寄りへ飛散

限界風速(m/s)

48

基礎が浮上

屋根B, 内壁,
基礎3個

軽い物は事後の風況に影響される

34 33

農機具小屋飛散のシナリオ

西外壁面, 基礎6個

飛散方向

東外壁面, 基礎2個

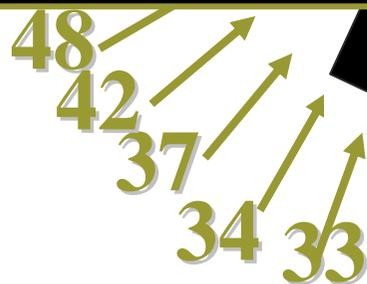
北外壁面, 基礎4個

• 南南西からの突風で瞬間的に浮き上がる

• 重量物はそのまま北北東へ移動

• 軽量物は舞い上がって, 東寄りへ飛散

• 旋回性の強い突風, “竜巻”, と推定される



基礎が停止した瞬間の
推定風向

基礎3個

屋根A1, 屋根A2

話題

- 突風被害の事例
- **突風の物理的シミュレーションと工学的モデル化**
- 竜巻等の突風に対する建築物等の設計
— 設計での考え方 —
- 最近の突風被害からの教訓
- 気象分野への期待
- 改めて「日本風工学会からの提言」

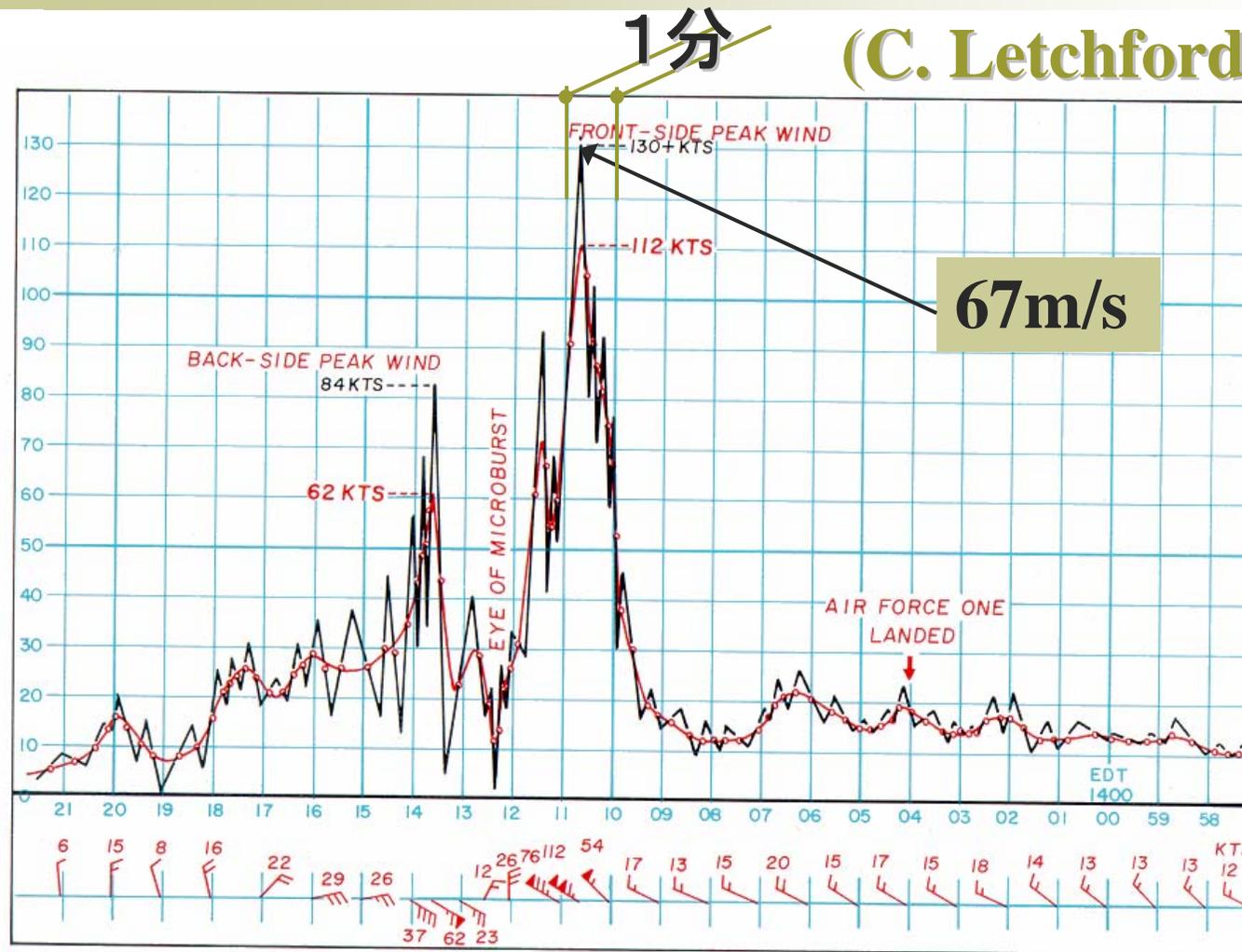
竜巻の物理的シミュレーション



(松井正宏, 東京工芸大学)

竜巻等の突風は極めて小規模

(C. Letchford, TTU)



Andrews AFB Microburst, August 1, 1983

ダウンバーストの 物理的シミュレーション

実験の例



→
1次渦

→
2次渦

実際の例



(C. Letchford, TTU)

ダウンバーストでの風速鉛直分布

Holmes (2001)

$$U = \left(\frac{\lambda R^2}{2r} \right) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \right\} \left[\exp \left(- \frac{z}{z^*} \right) - \exp \left(- \frac{z}{\varepsilon} \right) \right]$$

r : 壁面噴流の中心からの法線方向座標 [m]

R : 噴流筒の特性半径 [m]

z : 地上高さ [m]

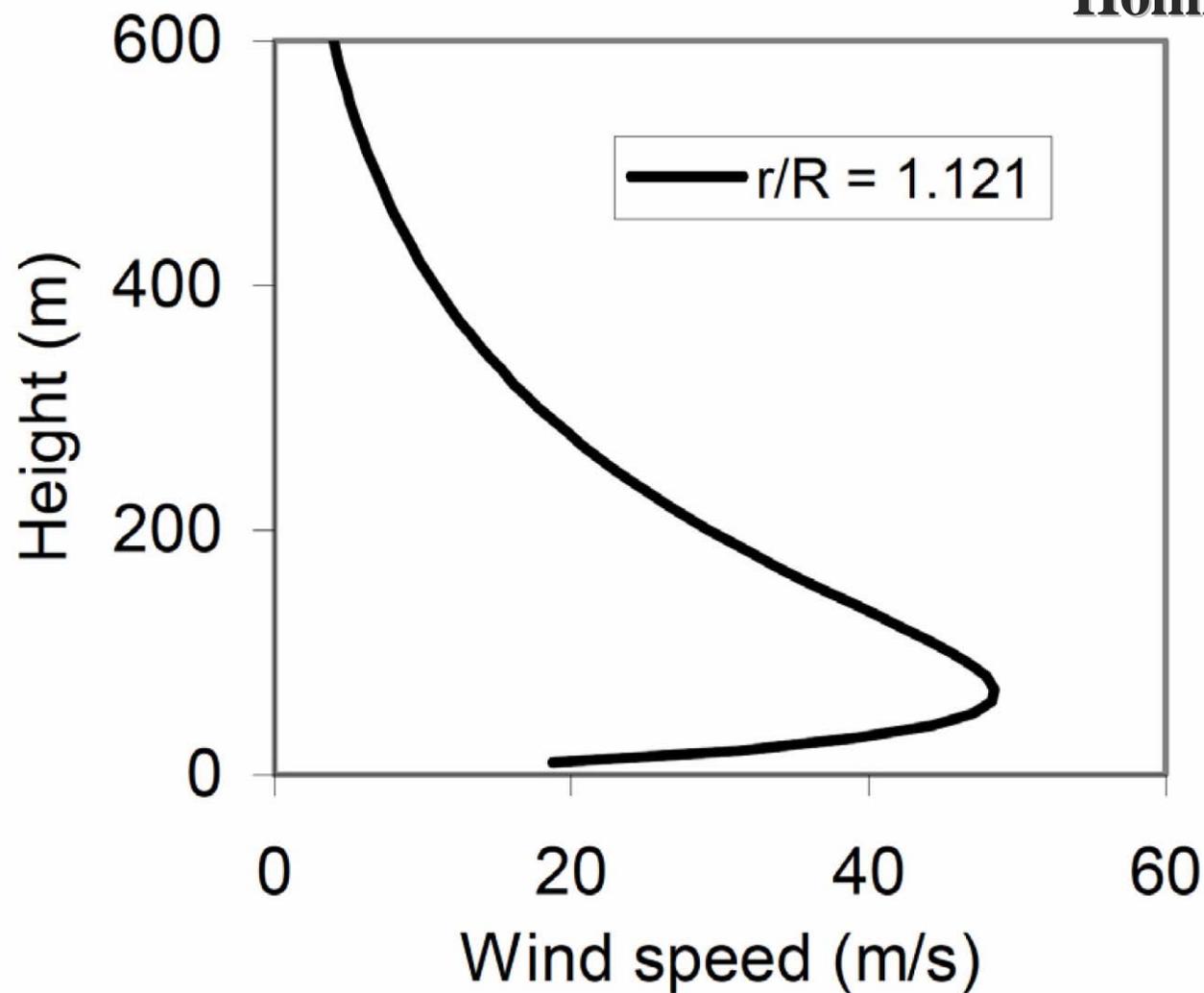
z^* : 境界層外での特性高さ [m]

ε : 境界層内での特性高さ [m]

λ : 増幅係数 [1/s]

ダウンバーストでの風速鉛直分布

Holmes (2001)



竜巻等の突風は極めて小規模 で現象が未知

■ 数十m～数百m幅

- 測器で観測された情報が殆ど無い
- 工学的モデル化は殆どできていない
- 未知の現象で、具体的な対応策を考えるのが難しい

→ 設計対象から除外

話 題

- 突風被害の事例
- 突風の物理的シミュレーションと工学的モデル化
- **竜巻等の突風に対する建築物等の設計
— 設計での考え方 —**
- 最近の突風被害からの教訓
- 気象分野への期待
- 改めて「日本風工学会からの提言」

竜巻等に対する建築物等の設計

- 建築物，構造物を個として捉える考え方
 - ライン状構造物や施設に対する考え方
 - 都市の建築物や構造物を群として捉える考え方
- 従来の考え方
- 原子力発電をはじめとする発電施設，警察や消防署などの災害時重要施設，体育館などの災害時避難場所など社会的
重要度に応じた考え方
 - その他

従来の建築物, 構造物の 竜巻対策

■ 個々の住宅が竜巻に遭遇する確率

→ 数万～数十万年に1回程度
(極めて低い)

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)程度を基本
 - 再現期間数万～数十万年程度の竜巻設計対象から除外
 - 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
- 人命の確保は必要！

建築物や構造物が群として存在する都市の竜巻遭遇確率

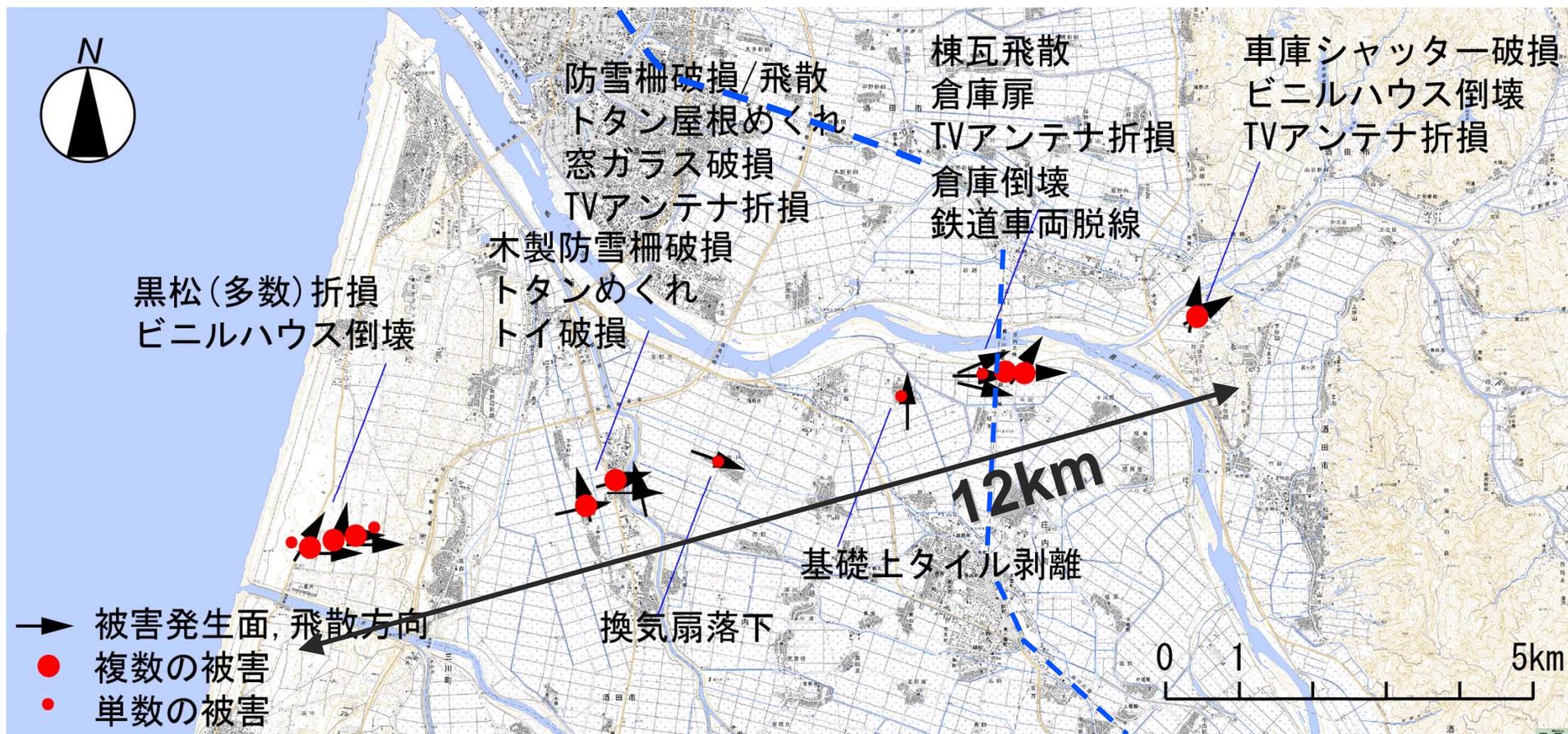
- 市町村が竜巻による住宅被害を受ける全国平均的な確率

→ 数百年～千年に1回程度

- 頻発する地域： より高い遭遇確率
例えば 豊橋市（数年に1回？）

都市防災のターゲットとすべき

2005年12月25日の羽越本線 いなほ14号脱線事故



2005年12月25日酒田周辺での 突風被害

羽越本線いなほ14号脱線: 死者 5名, 負傷者32名



(庄内日報)

2005年12月25日酒田周辺での突風被害

羽越本線いなほ14号脱線: 死者 5名, 負傷者32名



2005年末の北日本・日本海側の突風被害

■ 前兆現象はいくらもあった!

■北海道
・12月26日 大野町(現 北斗市)国道227号

■秋田県
・11月8日 大瀧村, 琴丘町
・12月26日 峰浜村 突風

■山形県
・12月25日 被害

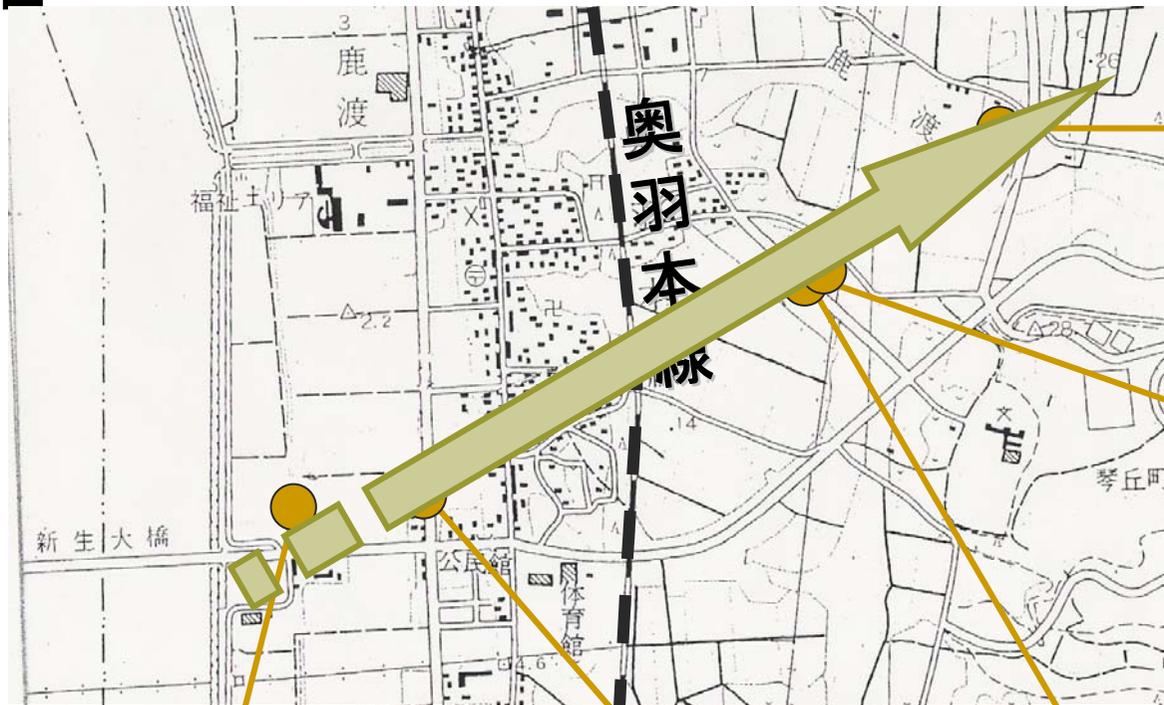
■新潟県
・12月25日 積雪・強風による送電線ギャロッピング→停電
・12月25日 積雪・強風による倒木, 高圧線短絡

■福井県
・12月6日 三国町 竜巻, 落雷
・12月22日 高浜町 送電線ギャロッピング→停電



○ 12月22日～26日
○ それ以外

2005年11月8日の秋田県 大潟村, 琴丘町の突風被害



防雪柵の飛散



2005年11月8日の秋田県 大潟村, 琴丘町の突風被害



■ 羽越本線列車事故の約1年半前の類似被害
■ たまたま列車が遭遇しなかっただけ?



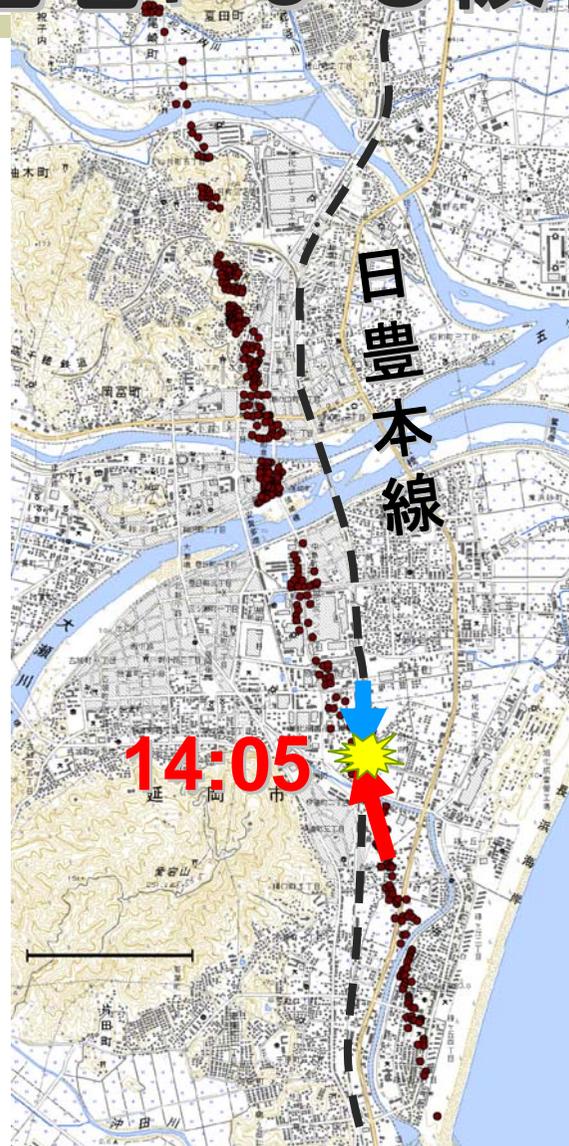
防雪柵の飛散

2006年9月17日の宮崎での 竜巻による被害

日豊本線にちりん9号脱線：軽傷者5名



2006年9月17日の宮崎での 竜巻による被害



列車速度
≈ 0km

推定瞬間風速
55m/s (田村)

ライン状施設の竜巻遭遇確率

■ 鉄道施設

・総延長約27,000km

→数個に1回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

話題

- 突風被害の事例
- 突風の物理的シミュレーションと工学的モデル化
- 竜巻等の突風に対する建築物等の設計
— 設計での考え方 —
- **最近の突風被害からの教訓**
- 気象分野への期待
- 改めて「日本風工学会からの提言」

最近の突風被害からの教訓

- 飛散物対策の重要性
- 室内圧変化による被害の進展
- 仮設建造物の設計荷重の問題
- 人名確保のための予知, 予報の必要性

2005年9月5日の台風14号 に伴う宮崎の竜巻被害

宮崎市阿波岐原町，宮崎郡佐土原町



宮崎地方気象台提供

2006年9月17日の台風13号 に伴う延岡の竜巻被害

延岡市

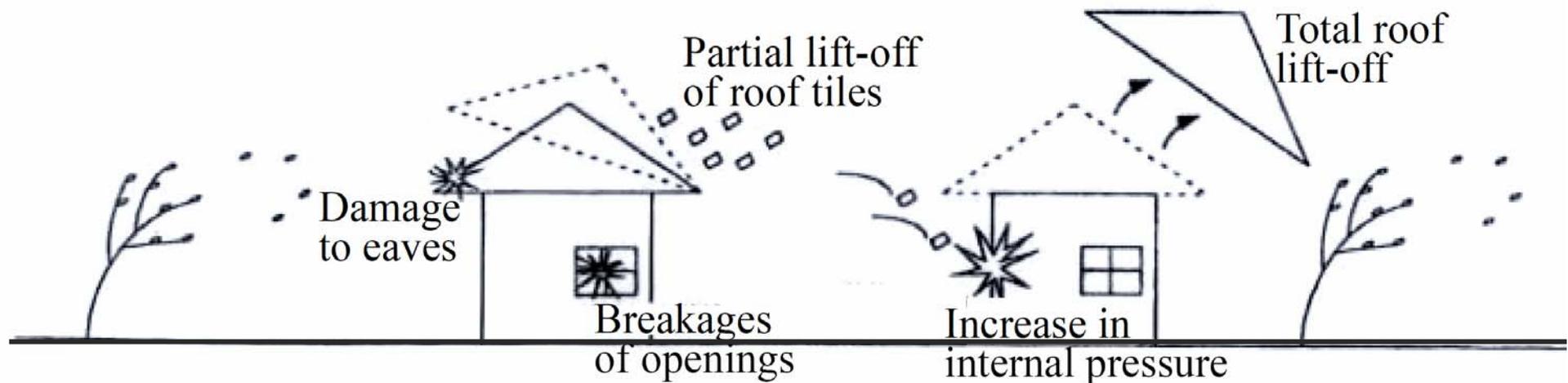


外装仕上材等の被害

- 屋根瓦/金属板
- 庇
- 煙突, 天窗等の屋根突起物
- 雨樋, 破風, けらば
- 防水シート等
- 窓ガラス
- 鋼製シャッター
- 看板類
- 植木鉢等

飛散物となって
被害を拡大

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

飛散物に関する研究

- 立川正夫 (鹿児島大学, 1983, 1988)

J.D. Holmes (2004)

C. Baker (2004)

N. Lin et al. (2005)

- Tachikawa Number (立川数)

$$K = \frac{\rho_a U^2 l^2}{2mg} = \frac{\text{空気力}}{\text{重力}}$$

(JWEIA, No.94, 2006)

飛散物に対する耐力規定

- 海外では飛散物に対する外装仕上材の耐力規定有り

例：South Florida Building Code(米国)
Darwin Area Building Manual
(オーストラリア)

- 我が国では，飛散物に関連する規定なし

竜巻だけでなく，台風時も問題！

飛散物に対する雨戸や シャッターの必要性



雨戸やシャッターの無い例



飛散物に対する雨戸や シャッターの必要性



シャッターの有る例



米国でのHurricane Shutter

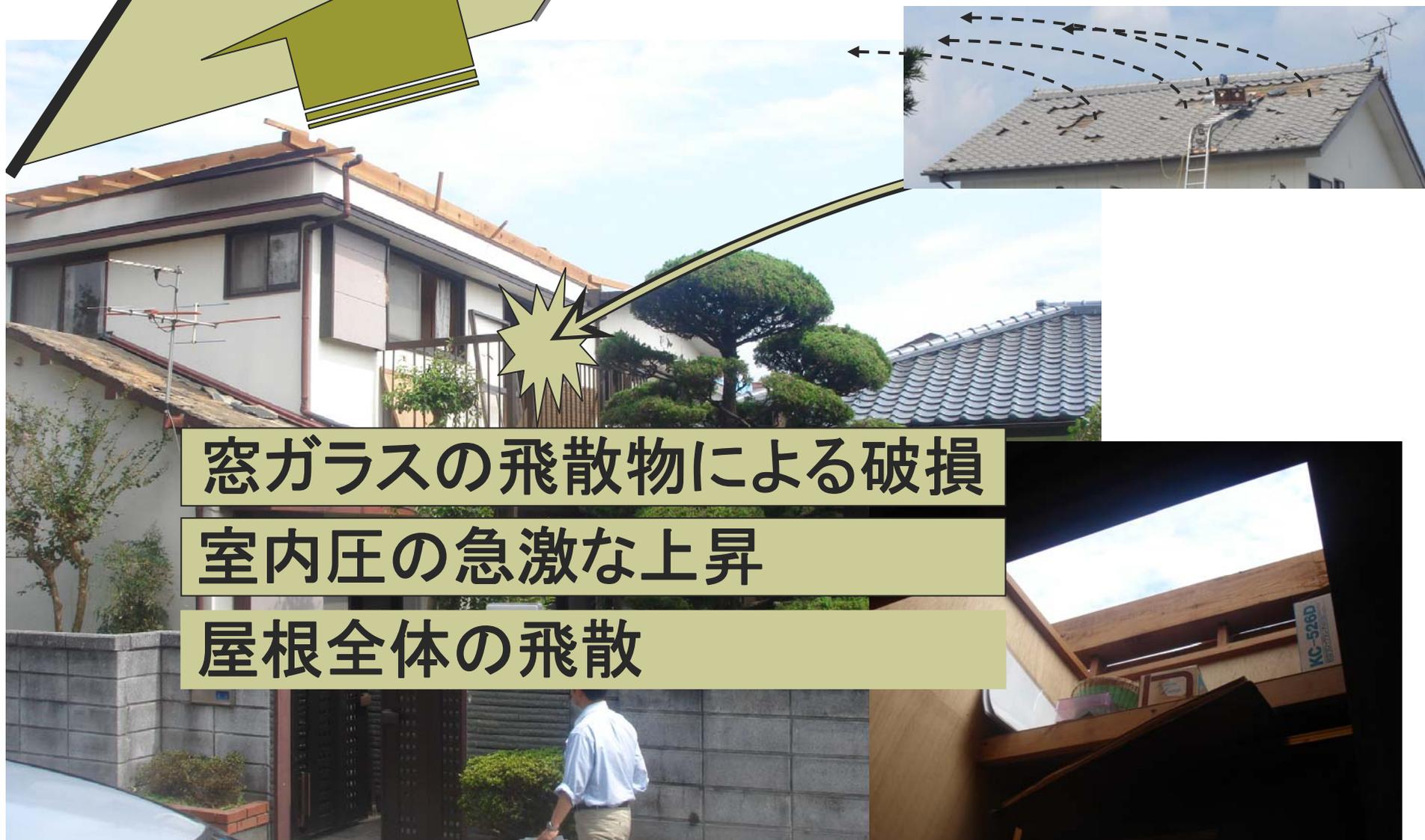


Hurricane Shutterの例

室内圧変化による被害の進展

- 壁面や開口部の破損による室内圧の急上昇, または急低下
 - 屋根の全体飛散あるいは別の壁面や開口部の破損
- 屋根材の破損による室内圧の急低下
 - 壁面や開口部の破損

室内圧変化による被害の進展



室内圧変化による被害の進展

飛散物による屋根材の局部破損

竜巻の風による屋根パネルの大被害

急激な室内圧の低下

出入口サッシの室内側への引き倒れ

延岡市の竜巻(2006年9月17日)

室内圧変化による被害の進展



急激な室内圧の低下



延岡市の竜巻(2006年9月17日)



室内圧変化による被害の進展

(株)ホームインプルーブメントひろせ提供



出入口サッシの室内側への引き倒れ

死者1名

延岡市の竜巻(2006年9月17日)



仮設建造物の設計荷重

9名の死者を出した佐呂間町の仮設作業所



(朝日新聞・島田賢一郎)



(2006年11月7日)

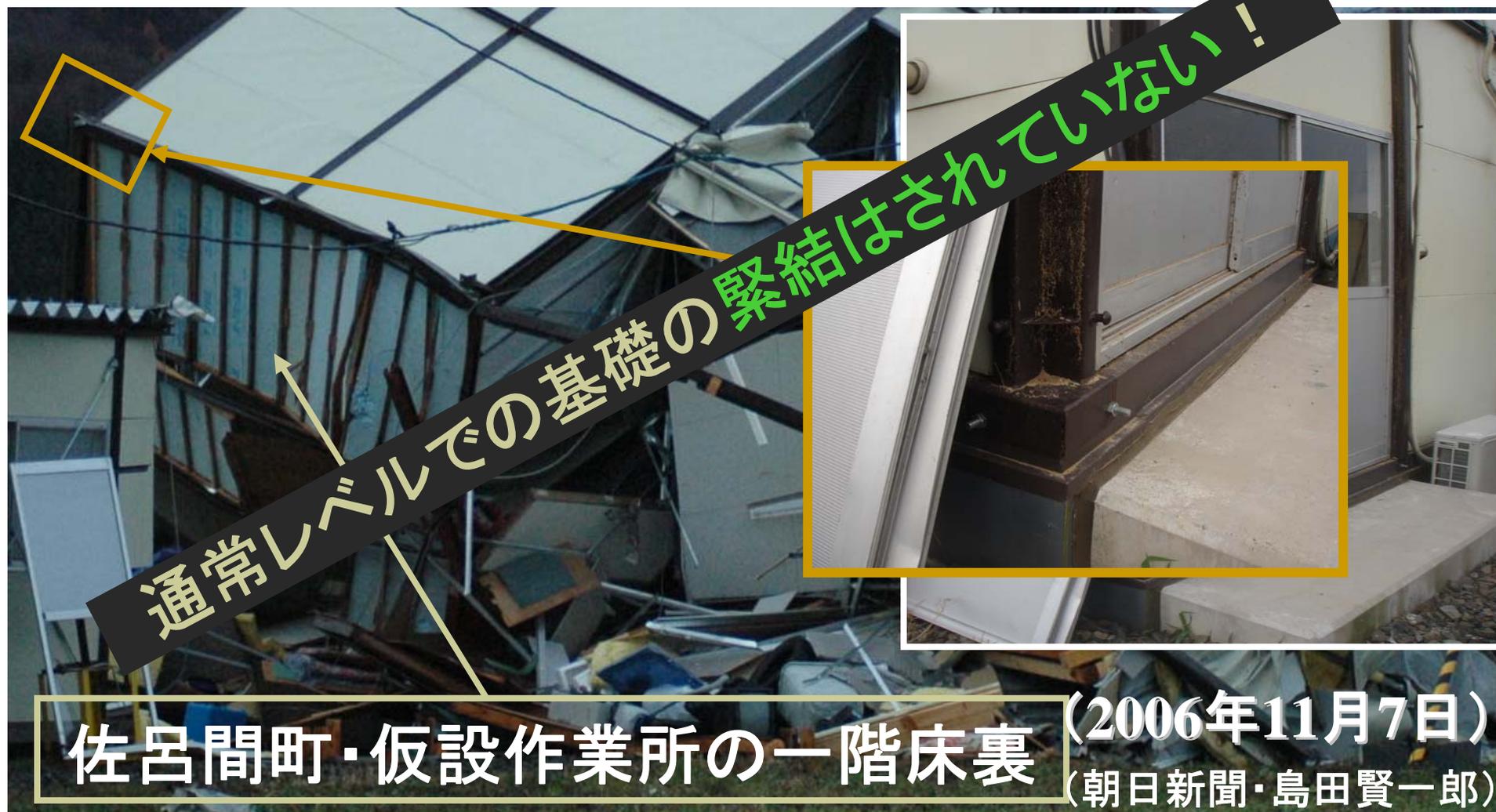
仮設構造物の設計荷重

佐呂間町・仮設作業所の基礎部分



(2006年11月7日)

仮設構造物の設計荷重



通常レベルでの基礎の緊結はされていない!

佐呂間町・仮設作業所の一階床裏 (2006年11月7日)
(朝日新聞・島田賢一郎)

誤った設計荷重の設定例？

- 風荷重に対する足場の安全技術指針
(仮設工業会)

設計風速： 再現期間1年の風速

理由： 足場の平均存置期間

足場	6.2ヶ月
シート	4.5ヶ月

“仮設は本当に期限付きか”？

足場や作業所を含めた 仮設構造物の設計荷重

■ 個々の供用期間の短かさが，設計荷重を小さくする理由となるか？

- 個々の任務が終わっても，場所は変わるだけで都市の中から消え去る訳ではない
- 都市の中に継続して存在する（固有名詞は変わるが，普通名詞としては何ら変化がない）
- 工事関連の構造物は，都市を構成する要素の一つとして，常に存在している
- その中での生活，利用形態などは，通常の建築物等と同じである
- 倒壊すれば，死傷者の出る社会的惨事となる

足場や作業所を含めた 仮設構造物の設計荷重

■ 個々の供用期間の短かさが 設計荷重を小
都市建物群の一要素として仮設構造物を見ると
き、設計荷重を低くする理由はない

都市の中から消え去る訳ではない

作業所だからといって、頻度高く壊れても良い、
頻度高く死んでも良いとは、誰も考えていない！

→ 工事関連の構造物は、都市を構成する要素の

仮設構造物にも設計荷重を低減できるものと、
通常の建築物等と同じとすべきものがある！

物等と同じである

→ 倒壊すれば、死傷者の出る社会的惨事となる

仮設建造物の設計荷重の見直し

- 個の、かつ特定の任務の**供用期間**
→ **荷重の見積もりとは無関係**

(強風時は使用しない、養生するなどの問題は、供用期間とは別途考えるべき！)

- 個ではなく普通名詞の仮設建造物を見るべき
→ 供用期間ではなく、被害によって如何なる**社会的不都合**が生じるか？
→ 故障／被害の**許容頻度**は？

レンタカー：平均貸出期間で性能や強度は**決まらない！**

人名確保の要件 2つの列車事故の比較

■ 羽越本線・特急いなほ14号(485系)

- 6両編成の先頭車両 (43ton)を突風が直撃
- 列車速度: 時速105km
- 夜間: 19時14分, 2005年12月25日
- F1クラスの竜巻が右横から
- 死者5名, 負傷者32名



■ 日豊本線・特急にちりん9号(485系)

- 5両編成の先頭車両 (43ton)を突風が直撃
- 列車速度: ほぼ時速 0km
- 昼間: 14時5分, 2006年9月17日
- F2クラスの竜巻が左前方から
- 死者0名, 軽傷者5名



人名確保の要件 2つの列車事故の比較

- 羽越本線・特急いなほ14号(485系)
 - 6両編成の先頭車両 (43ton)
 - 列車速度: 時速105km
 - 夜間: 19時14分, 2006年9月17日
 - F1クラスの竜巻が左前方から視認できず
 - 死者5名, 軽傷者52名
- 日豊本線・特急いなほ9号(485系)
 - 発生を知った上で適切な対応が人命を確保
 - 6両編成の先頭車両 (43ton)を突風が直撃
 - 列車速度: 時速0km
 - 昼間: 14時5分, 2006年9月17日
 - F1クラスの竜巻が左前方から視認できた
 - 死者0名, 軽傷者5名



話 題

- 突風被害の事例
- 突風の物理的シミュレーションと工学的モデル化
- 竜巻等の突風に対する建築物等の設計
— 設計での考え方 —
- 最近の突風被害からの教訓
- **気象分野への期待**
- 改めて「日本風工学会からの提言」

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

→ 発生の見

気象分野への期待

■ 人命確保には「予見すること」が必要

- (ナウキャスト的な) 予測技術の確立
- 情報の開示と伝達(予報)

気象分野／気象庁への期待

- 「理学の風」と「工学の風」(花房龍男)
- 「業務の風」(藤谷徳之助)
 - ・地上気象観測指針
 - ・通報観測： 日々の天気予報のため
 - 天気予報や警報を通じた災害防止
 - 災害発生の恐れのある諸現象の移動盛衰(総観規模の現象)
 - ・気候観測： 大気の長期変動を監視・把握
 - 観測結果の統計解析し、種々の分野での利用に供する

気象分野と工学分野の分担

■ 気象分野:

竜巻, ダウンバーストの発生メカニズムの解明
と予測, および強風構造の気象学的解明

- ・ 特に, 地表付近での強風構造

■ 工学分野:

竜巻, ダウンバーストの強風構造の工学的モ
デル化

- ・ 風速の鉛直分布, 水平分布のモデル化
- ・ 発生頻度, 地域特性, 乱れ, 非定常性など
- ・ 物理的, 数値的シミュレーション法など

気象分野への期待

■ 風工学で要求されるのは主として地表付近の風

- ・社会生活に密接に関わる地表付近の風により興味を抱いて研究を！
- ・地表付近の風の研究者の増加，研究費の増加を！

気象庁の突風対応への要望

■ 羽越本線事故の原因となった突風（恐らく竜巻）は存在していない？

- ・1年を経過した今でも、気象庁からの公式な見解はない。理由は？
- ・国土交通省・航空鉄道事故調査委員会？

■ 2006年9月17日延岡の竜巻，2006年11月7日佐呂間の竜巻については「災害をもたらした竜巻記録」に既に収録

気象庁の突風対応への要望

- 羽越本線事故の原因となった(竜巻)は存在していたか？

・1年を経過したから国民からの公式な見解を迅速に出すことが重要

- 国民から気象庁へ負託されていることは？
- 気象庁独自の見解を迅速に出すことが重要

● 2006年9月17日延岡の竜巻, 2006年11月7日佐呂間の竜巻については「災害をもたらした竜巻記録」に既に収録

気象庁の突風対応への要望

■ 竜巻等の突風を対象とした防災対策

→ 竜巻等の**確率統計的解析**，**地域特性の把握**等が必要

→ 現状の「災害をもたらした竜巻一覧」では不十分（漏れのない統計）

→ 少なくとも可住地での**突風情報をより緻密に把握し**，**記録に残す必要がある**（情報の質のランク付けも必要？）

話題

- 突風被害の事例
- 突風の物理的シミュレーションと工学的モデル化
- 竜巻等の突風に対する建築物等の設計
— 設計での考え方 —
- 最近の突風被害からの教訓
- 気象分野への期待
- 改めて「日本風工学会からの提言」

国土交通大臣，内閣府防災担当大臣宛 日本風工学会からの「提言」

(2006年4月24日付)

- 今後も，竜巻などの突風による建物や大量輸送機関などへの被害発生の可能性を指摘
- 事前に強風発生を予測し，伝達するシステム構築の必要性
- ドップラーレーダの配備による観測網の充実
- 数分後，数十分後の突風発生を予測するナウキャスト技術の開発
- 過去に頻発している地域での観測機器の優先配備および類似例の詳細な調査研究
- 被害防止のための気象学，風工学，社会学その他の立場から横断的に取り組む研究プロジェクトの立ち上げの必要性

国土交通大臣，内閣府防災担当大臣宛 日本風工学会からの「提言」

(2006年4月24日付)

- 今後も，竜巻などの突風による建物や大量輸送機関などへの被害発生の可能性を指摘
 - 事前に強風発生を予測し，伝達
 - ドップラーレーダー
 - 数分後
- 気象分野と工学分野の密接な連携！**
- 国や自治体の真剣な取り組み！**
- 地域での観測機器の優先配備お
 - 詳細な調査研究
 - 防止のための気象学，風工学，社会学その他の立場から横断的に取り組む研究プロジェクトの立ち上げの必要性

ご清聴有難うございます



(courtesy of A. Goliger, CSIR)