

都市環境・地域環境の予測・評価・分析 —境界領域での試行錯誤と領域拡張—

東北大学工学研究科 都市・建築学専攻
地域環境計画学分野

持田 灯

1958. 12 東京都国分寺市に生まれる

1974. 4 早稲田大学高等学院高校入学

1981. 3 早稲田大学理工学部建築学科卒業（尾島研究室）

1981. 4 東京大学大学院工学系研究科修士課程入学（村上研究室）

1983. 4 同 博士課程進学

1985. 11 東京大学生産技術研究所・計測技術開発センター 助手

1989年 工学博士（東京大学）
「建物周辺の気流分布とガス拡散に関する予測手法の研究」

1993. 5 東京大学生産技術研究所・環境制御物理学部門 講師

1995. 4 新潟工科大学工学部・建築学科 助教授

1999. 4 東北大学大学院工学研究科・都市建築学専攻 助教授（環境工学分野）

2005. 4 組織改編に伴い環境工学分野から分離独立して「地域環境分野新設」（准教授）

2006. 8 東北大学大学院工学研究科・都市建築学専攻 教授

1) 早稲田での
放し飼いの7年間

2) 東大生研での
14年の修業時代

3) 地域（非都市圏）の
テーマを知った新潟時代

4) 東北大学での25年
・ 地域環境計画分野設立前/設立後
・ 助教授時代/准教授時代/教授昇進後

内容

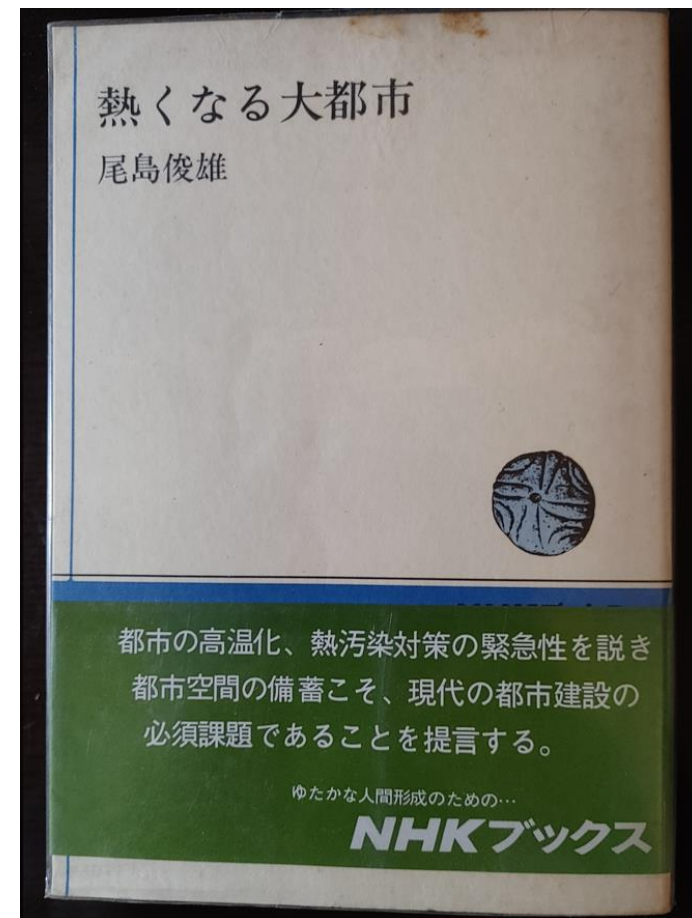
1. 早稲田での放し飼いの7年（高校・大学時代）

- 2. 村上周三先生の下での14年の修業時代（東大生研）
- 3. 新設大学で非大都市圏における環境問題に触れた4年
（新潟時代工科大学）
- 4. 東北大学での25年
 - 4.1 環境工学分野の助教授時代
 - 4.2 地域環境計画学分野の教授時代
- 5. おわりに

●本講義では、2分弱/年で過去50年を振り返ってみたいと思います。
研究の始まったきつね、その時々考えたこと、拘ったこと等々

1. 早稲田での放し飼いの7年（1）：高校時代

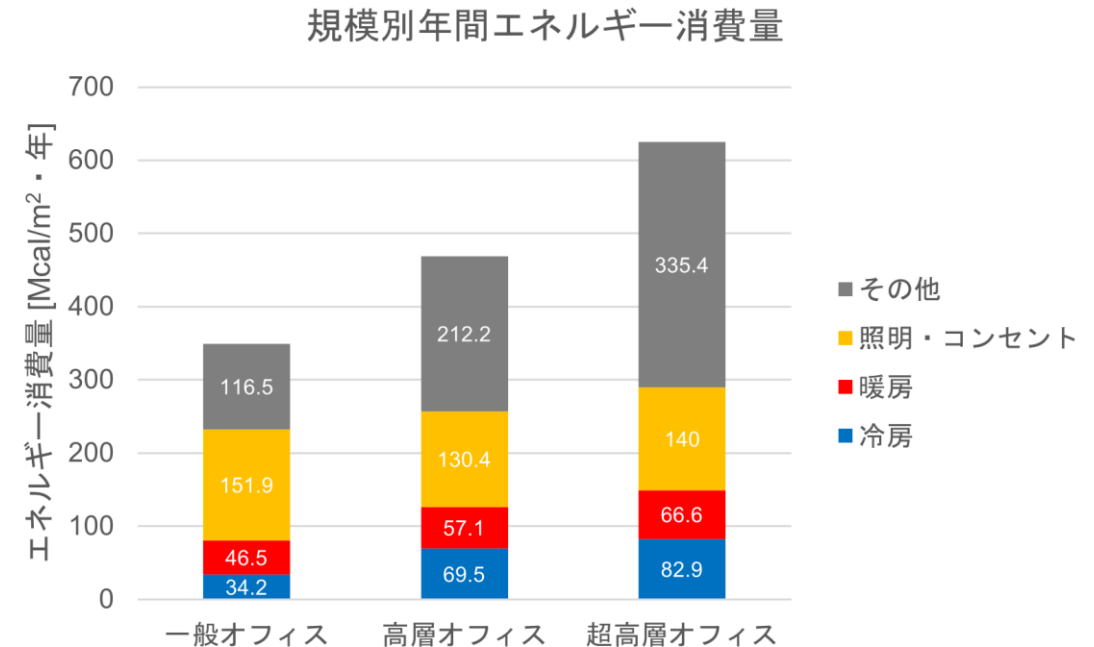
- 1974年4月に早稲田大学付属の早稲田大学高等学院に入学。
- 早稲田の完全付属で全員無試験で早稲田大学に進学できる。
非常に自由な雰囲気放し飼いにして貰えた
- 自分が文系向きか理系向きか分からず、進路は悩んだ。
- 都市計画は何となく面白そうだなと思っていた。
- そんな時に、朝日新聞で尾島俊雄先生の研究紹介の記事を読んだ。ヒートアイランドという言葉がこの時はじめて知り、興味を持った。
- とは言っても決心はつかず、最後まで悩んだ。
確か候補として、考えていたのは、
 - 1) 政経学部の政治、 2) 政経学部の経済
 - 3) 文学部の独文 4) 理工学部の建築



1. 早稲田での放し飼いの7年（2）：学部時代

- 1977年4月に早稲田大学理工学部建築学科に進学。
- 同じ高校から同じ学科への進学者多数（伊香賀先生も同期）。
- 都市計画に興味はあったが、吉阪隆正先生の都市計画の授業は理解が難しかった。もう少し合理的に都市計画を考えたいと思い、都市環境・都市設備がご専門の尾島俊雄先生の研究室へ。

- 卒業論文は、事務所建築のエネルギー消費量の調査。



内容

1. 早稲田での放し飼いの7年（高校・大学時代）
2. 村上周三先生の下での14年の修業時代（東大生研）
3. 新設大学で非大都市圏における環境問題に触れた4年
（新潟時代工科大学）
4. 東北大学での25年
 - 4.1 環境工学分野の助教授時代
 - 4.2 地域環境計画学分野の教授時代
5. おわりに

2. 東大生研での14年（1）M1時代

- 尾島先生に、当時、都市の風環境の風洞実験で有名だった東大生研の村上周三先生の研究室を紹介して頂き、1981年4月に東大大学院の修士課程に入学し、村上研究室のメンバーになる。
- 1981年度の村上研のメンバー（敬称略）
 - 助教授 村上周三（未だ38歳！）
 - 助手 小峯 裕己→加藤信介（1981年後期から）
 - 技官 高橋岳生
 - 博士学生 田中俊彦（D3）、出口清孝（D2）、森川泰成（D2）
 - 修士学生 持田灯（M1）

⇒ただ一人の修士の学生。一番年齢に近いのがD2の森川先輩。
M1の時はいろいろな研究のお手伝い（集合住宅の熱負荷計、共用排気塔の実測、室内気流の実測等）。

2. 東大生研での14年 (2) 修士研究で風洞実験を経験

- 空気と密度差（浮力）のあるガスの建物周辺における拡散現象に関する風洞実験法と数値解析法についての研究に取り組む。

- 風洞実験では、排出されるガスの浮力調整のためにC2H4にHeやSF6を混ぜならず、いくつもポンペを並べて、流量調整してと複雑な系統。
- また、浮力効果を再現するためには、非常に低風速（35cm/s）で実験する必要があり、この制御も大変。
- 計測器の出力をA/D変換して計算機に取り込み、統計処理するプログラムもチンプンカンプン。

⇒技官の高橋さんに大変お世話になった。

- また風洞実験の相似則を検討する必要があり、当時助手だった加藤信介先生にも大変お世話になった。

⇒風洞実験の相似則を考えるのは面白いと思った。

- M1の冬休みに相似則関係の英文文献を勉強し、それから実験計画を立て、実験し、M2の4月に建築学会大会梗概に。今、考えると非常にハイペース。これが生研のタイムスケール⇒数値解析については次項でまとめて説明します。

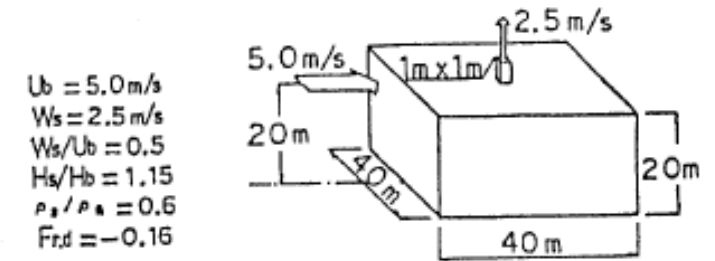


図2 プロトタイプとして想定したモデルの寸法, 吹出, 気流条件

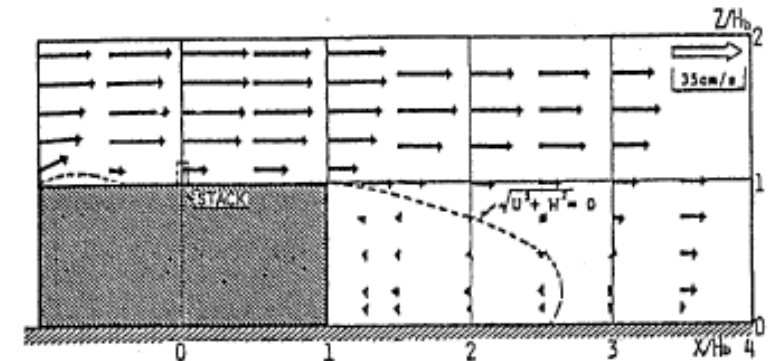


図3 平均風速ベクトル $\sqrt{U^2 + W^2}$ ($U_b = 0.35 \text{ m/s}$, $Re = 2.5 \times 10^4$)

修論で検討した相似則のその後の展開

(後楽園エアドームの排煙拡散、赤坂アークヒルズの厨房排気(臭い)の拡散他)

空気膜構造物からの排煙の拡散に関する風洞実験

○正会員 高橋 岳生^{*1} 同 村上 周三^{*2}
同 持田 灯^{*3}

1. 目的 建設が予定されている空気膜構造のドーム内で火災が発生した場合を想定し、屋根面や外周壁面の排気口から排煙された場合、煙がどのように拡散するかを風洞実験により調べ、排煙の外気取り入れ口に対する影響等を検討した。

2. 相似条件 ① 模型の幾何学的相似。② アプローチ・ウィンドの相似。③ 排出速度比、吸引速度比の相似 (V_E/U_T)_m = (V_E/U_T)_p

3. 実験概要 3.1 実験装置 1) 風洞 境界層型で測定部断面1.2×1.8m、長さ9.8m。
2) 模型 ドームを中心に、半径400mの範囲を含む縮尺1/500の市街地模型(写真1参照)。屋根面の排気口は計画では33.所あるが、1個当りの開口面積が小さいため、模型ではそれらを3~9個づつにまとめて9ヶ所(E1~E9)とした。外周壁面の排気口は内・外野に各1.所(E10, E11) 但し、2.所同時に排気することはない。給気口も小さいものはまとめて合計8ヶ所(S1~S8)とした(図1参照)。屋根面の排気口からの排煙は屋根面に吹き付けられる形になる(図2参照)。図3に外周壁面の排気口と給気口の位置関係を示す。

3.2 実験条件 1) 境界層 $U \propto Z^{1/4}$ 。2) 実験風向 東京地方の代

記号
U: 平均風速 m/s
U_T: 上空風速、ここでは地上50m(ドーム頂層の高さ)における風速とする
本実験では、 $(U_T)_p = 1m/s$
V_E: 排出速度または吸引速度 m/s
A: 排気口、給気口の開口面積 m²
Q: 排気口、給気口の排気量または給気量 l/分
C: 各測定点におけるエサレン濃度。 ppm
C₀: 排気口におけるエサレン濃度。 ppm
C = 濃度率 = C/C₀ × 100 %
Z: 高さ m
Suffix m: 模型 p: 実物



写真1 エアドーム外観

市街地における高層建物の地表付近の排気口からの排気の拡散に関する風洞実験 その1 実験概要並びに個々の排気口からの排気の拡散状況について

○正会員 高橋 岳生^{*1} 同 村上 周三^{*2}
同 持田 灯^{*3}

3.3 実験の条件 境界層は $U \propto Z^{1/4}$ (図3参照)。排気速度(V_E)_m、排気量 Q_{m12}

次式より求められる。

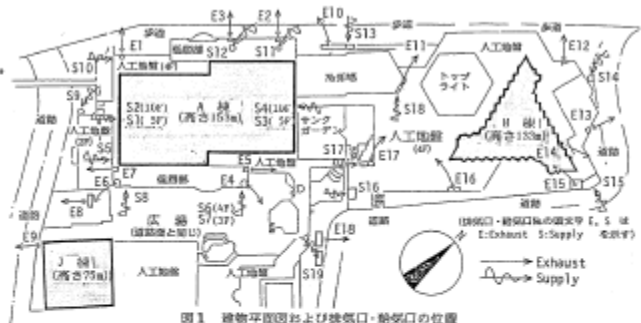


表1 排気口、給気口の位置
(又は人工地形)からの高さ

排気口・給気口の位置	高さ	排気口・給気口の位置	高さ
E1	17m	S1	6.5m(3F)
E2	21m	S2	25m(10F)
E3	23m	S3	6.5m(3F)
E4	15m	S4	25m(10F)
E5	15m	S5	6m
E6	15m	S6	13m
E7	15m	S7	7m
E8	4m	S8	13m
E9	4m	S9	10m
E10	4m	S10	7m
E11	5m	S11	11m
E12	6.5m	S12	3.5F 出
E13	8.5m	S13	3.5F 出
E14	3.5m	S14	3m
E15	6m	S15	6m
E16	5m	S16	4m
E17	3m	S17	4m
E18	3.5m	S18	4m
E19	12.5m	S19	12.5m



写真1 広場、低層型人工地形上



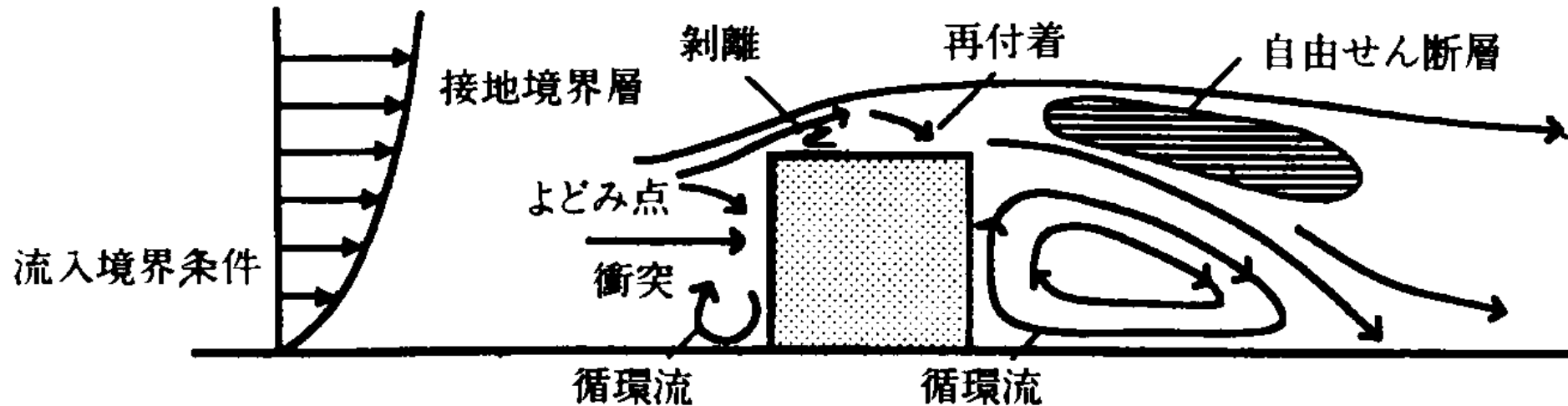
写真2 A棟南側



写真3 A棟西側

2. 東大生研での14年 (3)

建物周辺の乱流場を対象とするCFD解析手法の開発と
新しい研究領域 Computational Wind Engineering の誕生
(CFD : Computational Fluid Dynamics (数値流体力学))



建物周辺におけるさまざまな特徴を持った気流性状

CWE国際会議開催に至る試行錯誤の時期：1980年代

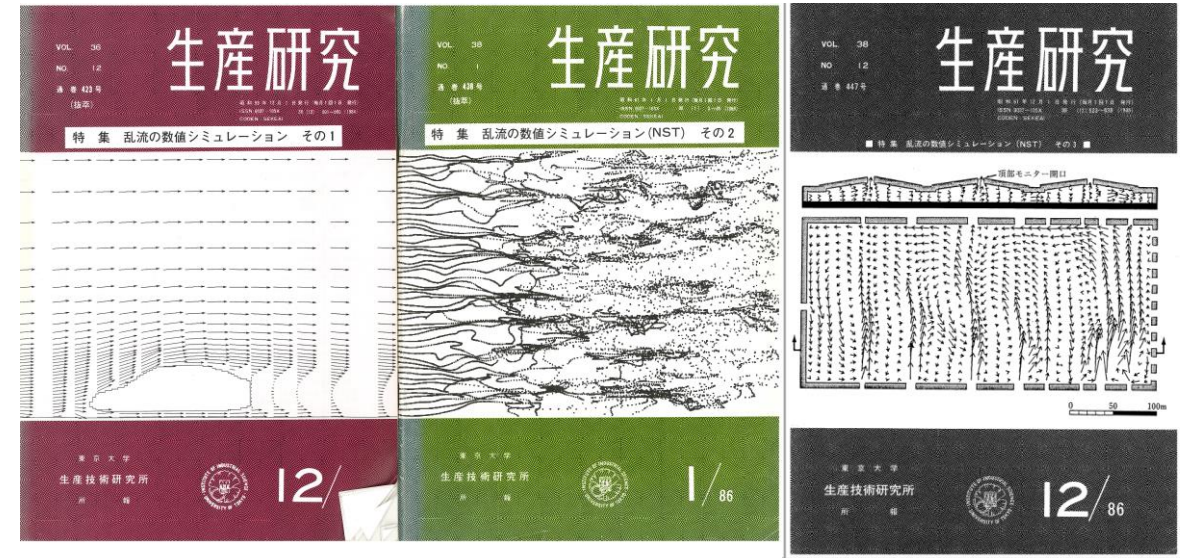
- 建築環境工学の分野では、70年代後半から空調関係でCFD利用が進んでいた（ $k-\varepsilon$ モデルが中心）。
- 村上先生は、風洞実験で著名だったが、屋外の問題へのCFD展開を図りたいと考えておられた。
- ⇒まさにその時、（CFDへの興味も知識も全くない）持田が（偶々）村上研に進学（1981）。
- 村上研に研究員として来られていた清水建設の日比さんのご指導を受けながら、見様見真似で数値計算をすることになった。

生研NST研究グループ (Numerical Simulation for Turbulence)

1970年代の終り頃に乱流のシミュレーションに興味を持っていた
3人の助教授が作った研究グループ。

- 1部 吉澤 徴 先生（理論物理）、
- 2部 小林敏雄先生（流体機械）、
- 5部 村上周三先生（建築・都市）

- ・各研究室持ち回りで話題提供する月例会
- ・生産研究の特集号（年1回）
- ・3月に開催するシンポジウム
を継続的に開催。



その後、3先生とも教授に昇進し、国内外に知られる研究グループに成長。
若い頃、学際的雰囲気を味合えたことは、後々、役に立った。

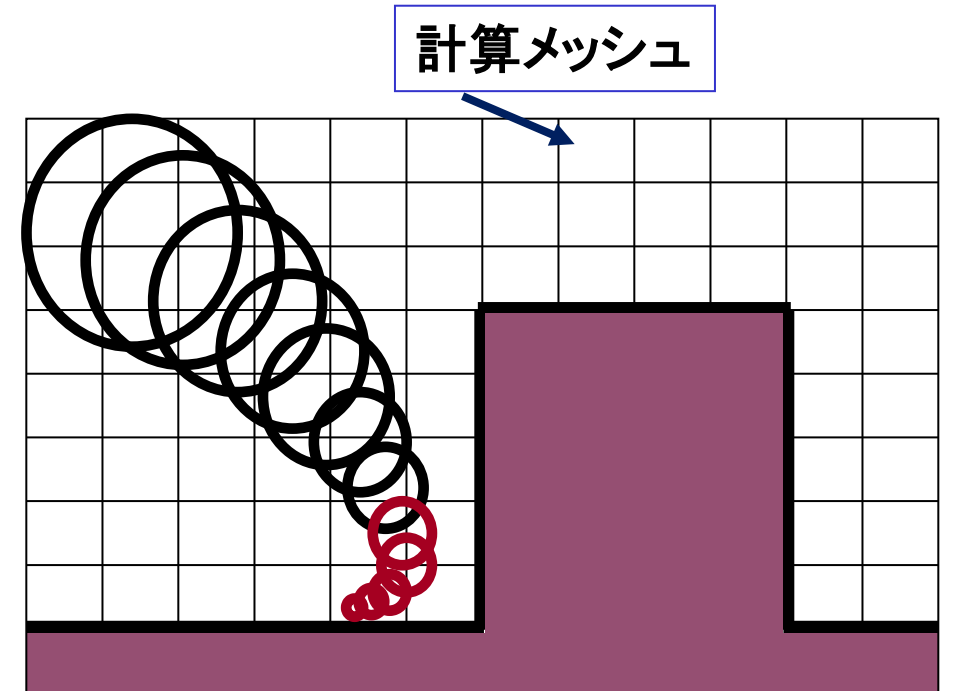
乱流シミュレーションの2つの方法LESとRANS

LES: Large Eddy Simulation

RANS: Reynolds Averaged Navier–Stokes equations

乱流の特徴：大小、様々なスケールの渦 (Eddy) が存在すること。

- LES：計算メッシュより小さい乱流渦の働きのみモデル化
- RANS：全スケールの乱流渦の働きをモデル化
($k-\epsilon$, ASM, DSM)
- LESの方が計算時間がかかる。
- RANS系の中で、 $k-\epsilon$ モデルが当時
(今でも) 実務で最も一般的なモデル。
- DSMはより精緻で複雑なモデル。
- ASMはその中間。



建物周辺に存在する様々なスケールの乱流渦と計算メッシュ

(3)–1 LESによる建物周辺の流れ場・圧力場・拡散場の予測手法の開発

この当時の状況:

LESの適用⇒チャンネル流(平行平板流)や境界層流等の基礎的な流れに限定されていた。
⇒我々が、これを3次元性が強く複雑な建物周辺の流れにはじめて適用。

同時期、建築構造の分野でも田村哲郎先生(当時、清水建設、その後東工大)
が2次元角柱まわりの流れの解析をはじめていた。

(風工学でのLESについては、環境、構造ともに日本がリードしていた)

1984年～1985年、いろいろLESの結果が出始める。

1985年の11月 加藤信介先生の昇任に伴い、博士課程を中退して東大生研の助手になる。非常に優秀で有能な加藤先生の後任というのは大変なプレッシャーだった。

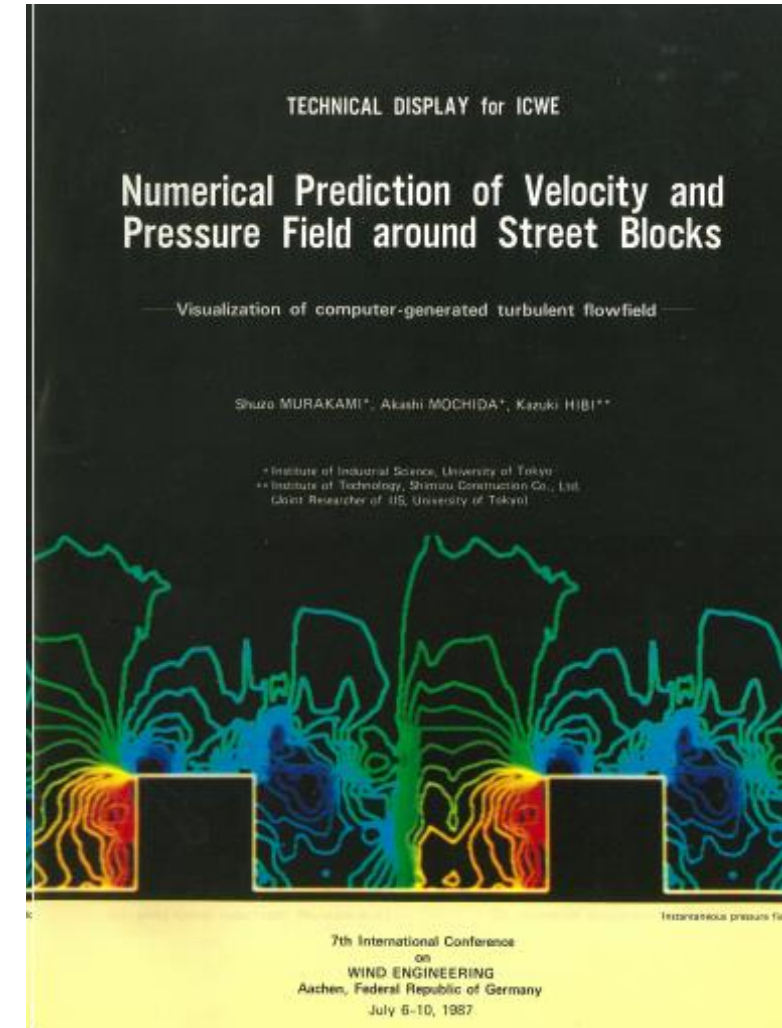


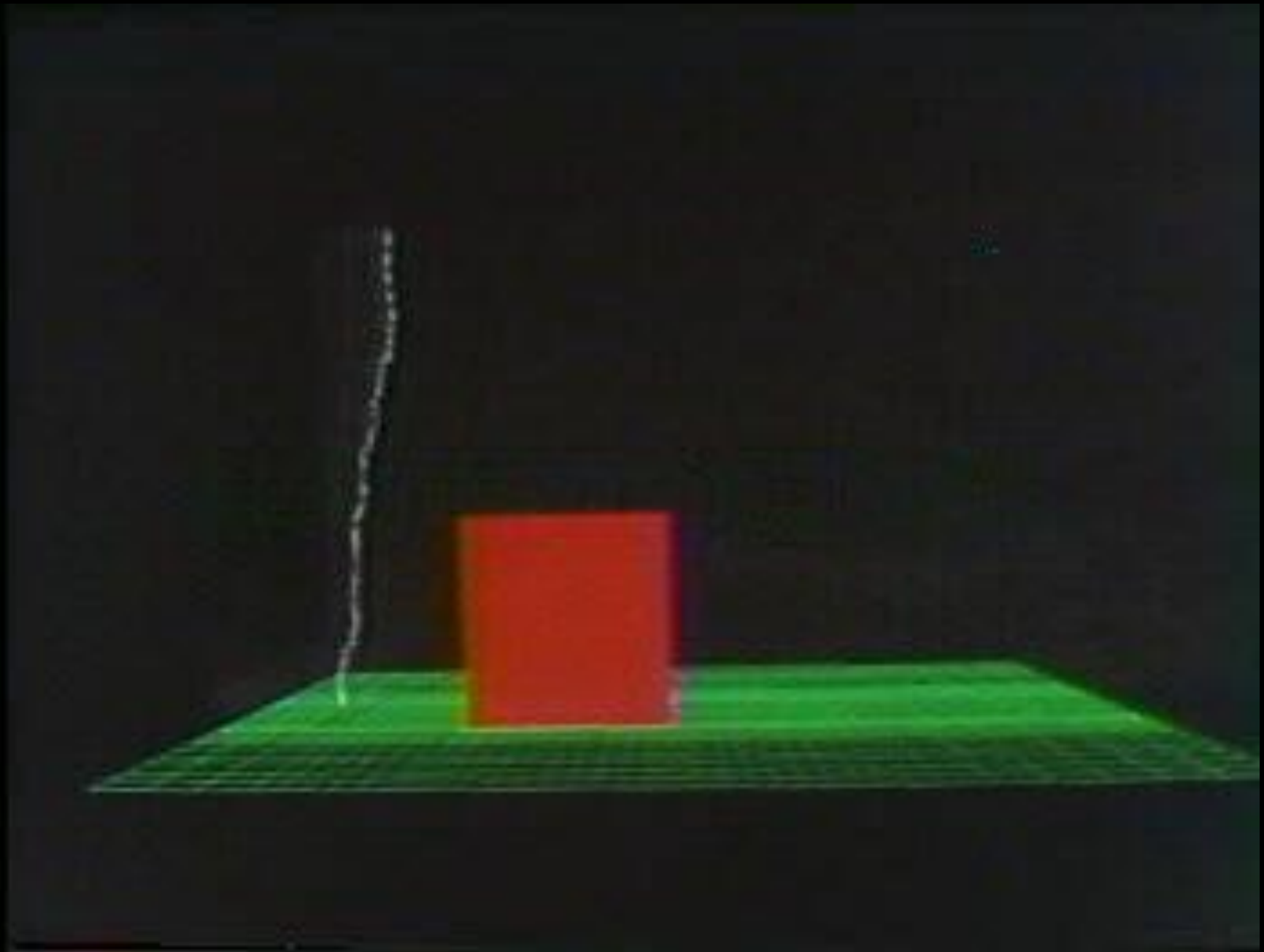
J. Ferziger 先生 (Stanford大学, 1986年夏 東大生研にて)

- 1986年の夏に村上先生がLESの大御所のStanford大学のFerziger教授を生研に招聘。
- 何度もゼミを開き、我々の計算結果を紹介し、いろいろとアドバイスを貰う。

7th International Conference on Wind Engineering (1987, Aachen, Germany)ではじめてCFD×風工学の成果を発表

- Ferziger教授とのゼミの成果も踏まえて満を持して、第7回風工学国際会議に論文投稿（発表者：村上先生）するも、ポスターセッションに廻されてしまう。
- 当時の風工学は風洞実験ベースで、CFDに対する扱いは冷たかった。
- それでもめげずに（会場で上映できるか不明なまま）日比さんにCG画像から16mmムービーを作成して頂き、カラーパンフも作成して現地入り（100万円以上の投資だったと思う）。
⇒記念冊子15頁～の日比さんの原稿ご覧ください。
- 村上先生が現地で組織委員に交渉し、上映して貰えることになった。
- ここで風工学の世界でCFDが認知され、以降、村上先生に国際会議の招待講演の依頼が舞い込むようになった。
⇒この時に得た教訓：やる時には徹底的にやれ！





日比一喜氏作成

建物周辺の風速

LESの特徴

①非定常現象の再現が可能

- ・ 日比一喜 氏 博士論文, 1990

②平均流に対してもRANSモデルよりも高精度の予測が可能

- ・ 持田 博士論文, 1989
- ・ 林吉彦 氏 博士論文, 1990

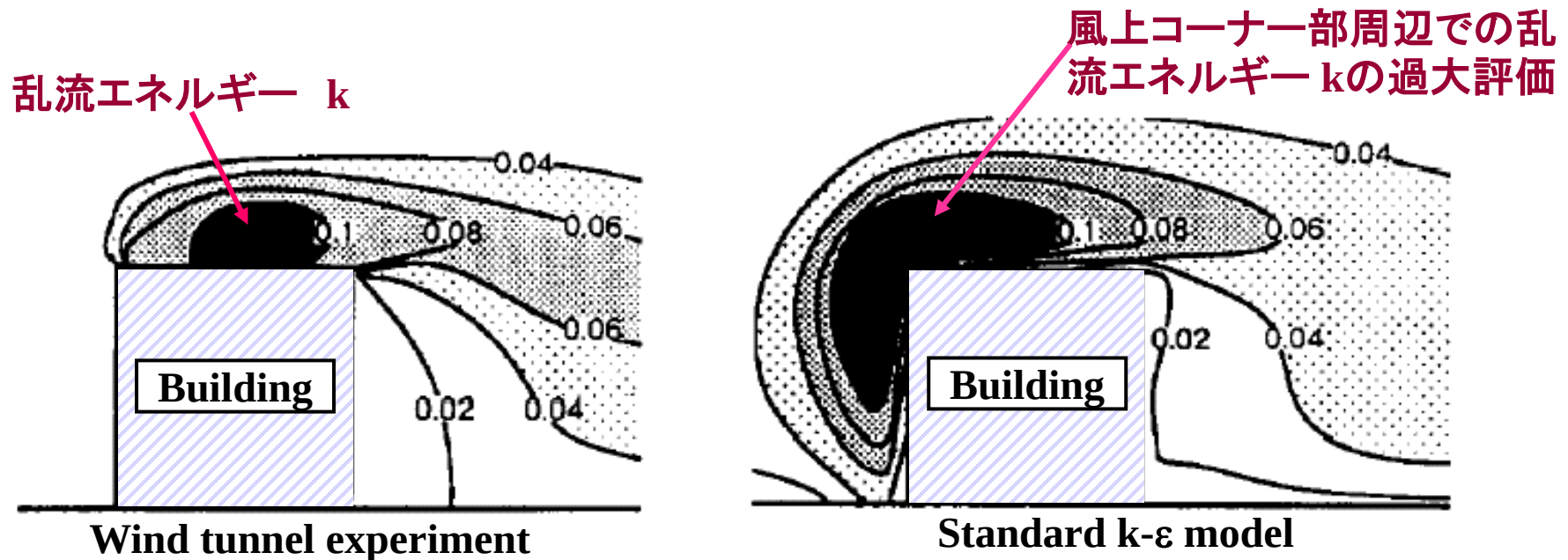
清水建設の日比さんとの共同研究期間が終了した際、その後のことを考えた。

①の非定常現象の可視化で日比さんに追いつくのは非常に難しいと思えたので、
②の方向を発展させることを考えた。

⇒LESの高精度な結果をデータベースとしてRANSモデルを評価して改良する！

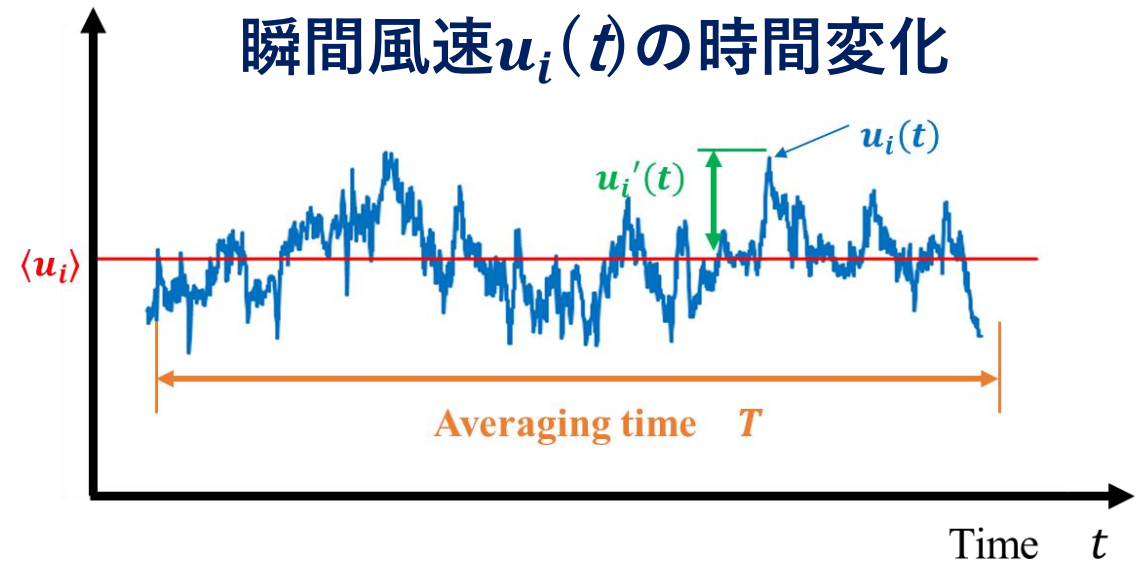
(3)-2 建物周辺の流れに適用した場合の 標準k-εモデルの問題点の原因解明 (1986～1991年)

- k-εモデルが当時（今でも）実務で最も一般的なモデル。



乱流エネルギー k とは？

$$k = \frac{1}{2} \langle u_1' u_1' + u_2' u_2' + u_3' u_3' \rangle$$



u_i : 風速ベクトルの3成分（瞬間風速）

（ $i = 1$ が主流方向, $i = 2$ が主流に対して横方向, $i = 3$ が鉛直方向の風速成分）

$\langle u_i \rangle$: 平均化時間 T の間の時間平均値

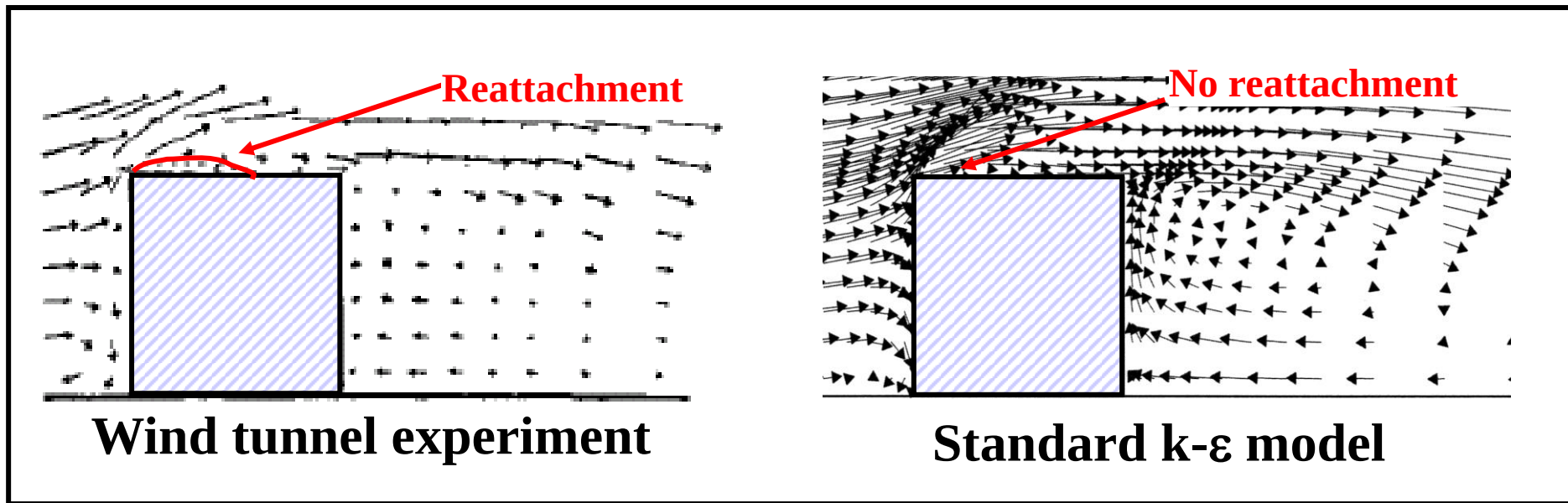
u_i' : 瞬間風速 u_i と時間平均風速 $\langle u_i \rangle$ の差

$(u_i' = u_i - \langle u_i \rangle) \Rightarrow$ 変動風速、風速の変動成分と呼ぶ。

乱流エネルギー k : 変動風速の各成分（ u_i' ）の2乗値の和の平均を2で割った値

$\Rightarrow$ 乱流（渦の運動）による風速変動の大きさを表す。

$\Rightarrow$ 乱流エネルギー k が大きくなると流れが拡散的（かき混ぜりやすくなる）。



- ①風上コーナーで乱流エネルギー k がtoo large
- ②乱流拡散の効果がtoo large
- ③屋根面の逆流が再現されない
- ④風圧分布に関する予測精度にも大きな問題生じる

- この問題に突き当たり、しばらく悩み続けることとなった。
⇒そんな時に村上先生がk- ϵ モデルの開発者のBrian Launder 教授を
1987年の夏に生研に招いてくれた。

⇒Launder先生が
「bluff body（建物のよう
なsharp なコーナーのあ
る物体）前方では勾配拡
散近似に基づく k の輸送
方程式の生産項の定式化
は問題が生じ得る。」
と言ってくれた。



B.E.Launder先生（UMIST）
（1987年夏、東大生研にて）

乱流エネルギー k の輸送方程式と生産項 P_k

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \underbrace{-\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}}_{P_k} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \langle u'_i u'_i u'_j \rangle + \frac{1}{\rho} \langle p' u'_i \rangle \right)}_{D_k} + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2}}_{G_k} - \underbrace{\beta g_i \langle u'_i \theta' \rangle}_{G_k} - \underbrace{\nu \left\langle \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right\rangle}_{\varepsilon}$$

(g_i : 重力加速度ベクトル, $g_i = (0, 0, -9.8\text{m/s}^2)$)

P_k : 生産項(乱流エネルギーを生成する項)

⇒家計に例えると給与所得(基本的にいつもプラス)

ε : 粘性散逸率 (乱流エネルギーが単位時間当たりに熱に変換される割合)

⇒家計に例えると支出(基本的にいつもマイナス)

G_k : 浮力生産項(浮力で乱流エネルギーを増減させる項)

⇒その場所の大気の状態でプラス/マイナスが変化

(不安定状態だとマイナス、安定状態だとマイナス)

⇒家計に例えると投機やギャンブルによる収入・損失

(弱風条件では重要だが、強風条件では浮力の影響は小さいので、重要度は低くなる。)

勾配拡散近似に基づく生産項Pkのモデル化

$$P_k = -\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \approx \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}$$

標準 k-ε モデル
の場合の生産項Pk
の表現

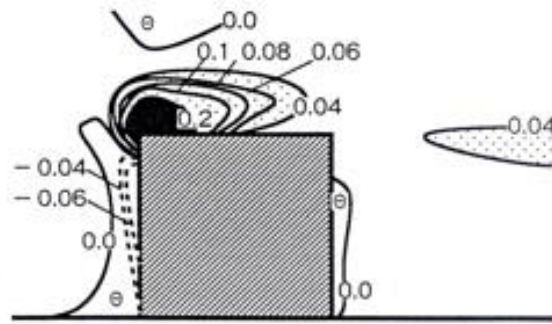
$-\langle u'_i u'_j \rangle$: レイノルズ・ストレス
(乱流渦の運動による運動量の輸送量)

$$-\langle u'_i u'_j \rangle = \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

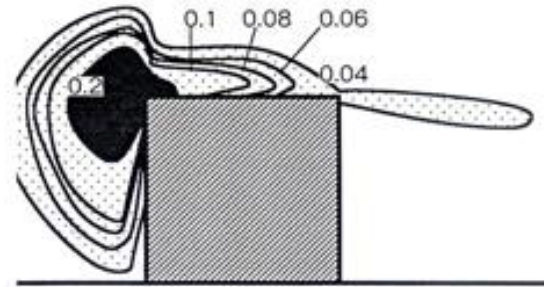
標準 k-ε モデルで用いてるレイノルズストレスのモデル化（勾配拡散近似）

(ν_t : 渦動粘性係数⇒乱流渦の回転による混合拡散能力の大きさを示すパラメーター)

持田の博士論文の最大の成果



(1) LESの結果から求めた正確な表現の Pk の分布



(2) k - ϵ モデルの場合の Pk (勾配拡散近似を用いた表現)の分布

乱流エネルギー k の輸送方程式中の生産項 Pk の比較

- 「建物風上コーナー周辺での k の過大評価は k の生産項 Pk を勾配拡散近似を用いて表現することにより生じる」ことを、LESより得られたデータとの比較により確認。
- この問題が生じる原因を、LESより得られたデータを用いて、 k - ϵ モデル推進派の先生方も納得する形で明快に説明。

- この一連の成果で、2編の博士論文が生まれる。
(持田灯 (1989年)、林吉彦氏 (1990年)の一部)
- 英文Journalと黄色表紙に論文を投稿し採択され、
(自分の評価では、この2編がこれまでの自分のベストの論文)

Shuzo Murakami, Akashi Mochida, Yoshihiko Hayashi, EXAMINING THE $k-\epsilon$ MODEL BY MEANS OF A WIND TUNNEL TEST AND LARGE-EDDY SIMULATION OF THE TURBULENCE STRUCTURE AROUND A CUBE, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 35, (1990), 87-100

持田灯, 村上周三, 林吉彦, 立方体モデル周辺の非等方乱流場に関する $k-\epsilon$ モデルとLES の比較—乱流エネルギー生産の構造とノルマルストレスの非等方性の再現に関して, 日本建築学会計画系論文報告集, (423), (1991), 23-31

(3)-3 DSM・ASMの適用と評価（1988～1995）

⇒次の興味は、勾配拡散近似を用いない精緻なモデル



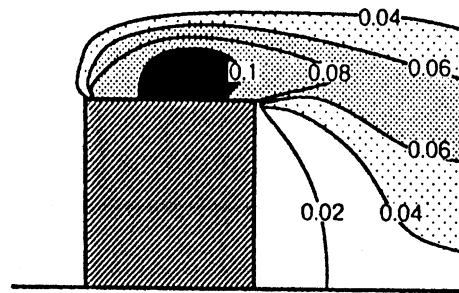
1988年の夏には、ASMの開発者の
カールスルーエ大学のW. Rodi教授
を招聘。

W.Rodi先生(カールスルーエ大学(中央)), M. Leschziner先生(UMIST(左))
と村上先生(右)(1988年夏、東大生研にて)

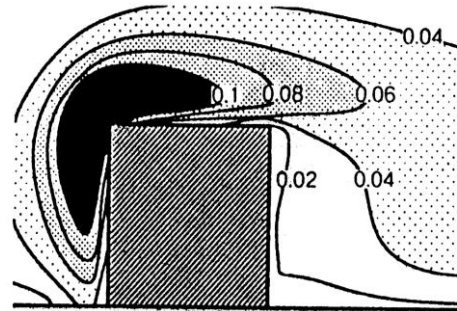
DSM・ASMの適用と評価（1991～1997）

（大岡龍三 氏 博士論文，1997）

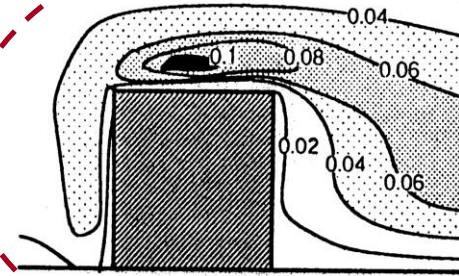
ASM, DSM では k の過大評価は発生しなかった。
但し、 k が少し小さめになった。



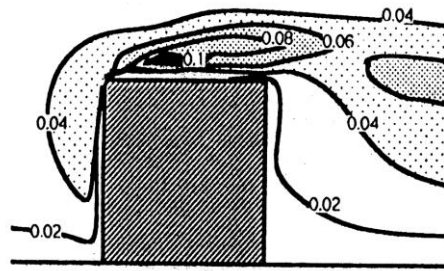
(1) 風洞実験



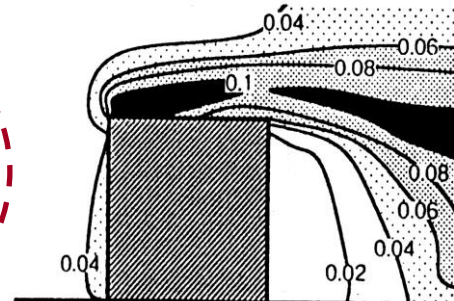
(2) 標準 k - ε モデル



(3) ASM



(4) DSM



(5) LES

DSM: Differential Stress Model
（RANSの中で最も精緻（複雑）なモデル）

ASM: Algebraic Stress Model
（DSMを簡略化（代数化）したモデル。 k - ε モデルとDSMの中間的位置づけ）

各種乱流モデルによる乱流エネルギー k の分布の比較
（立方体モデル、建物中心断面）

DSM・ASMの結果

- ・ 標準k- ϵ モデルの乱流エネルギーkの過大評価の問題は改善。
しかし、なお問題もいろいろ確認された。

S. Murakami, A. Mochida, R. Ooka, Numerical Simulation of Flowfield over Surface-mounted Cube with Various Second-moment Closure Models, Ninth Symposium on Turbulent Shear Flows, Kyoto, Japan, August 16-18, 1993

(大岡先生の本いたドラフトをチェックしただけだけど、これまで関わった中で最も難しい内容の論文)

- ・ 非常に多くの項のモデル化、モデル係数の最適化が必要。3次元では極めて複雑。
 - ・ 持田は90年代半ばにGive Up。
- ⇒k- ϵ モデルの改良へ移行。

最近思うこと：

RANSと言っても、標準k- ϵ モデル、改良k- ϵ モデル、ASM、DSMで精度は様々。
最近の”RANS VS LES”の議論で、これらを十把一絡げにしているのが大変気になる。

(3)-4 改良型 k-εモデルの開発

1)Standard k-ε

$$P_k = \nu_t S S \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2}$$

2)LK model(Launder-Kato)(1993)

$$P_k = \nu_t S \Omega \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2}$$

渦度スケール Ω を導入し、kの生産項 P_k を改良

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \underline{P_k} - \varepsilon$$

S : 歪速度スケール
 Ω : 渦度スケール

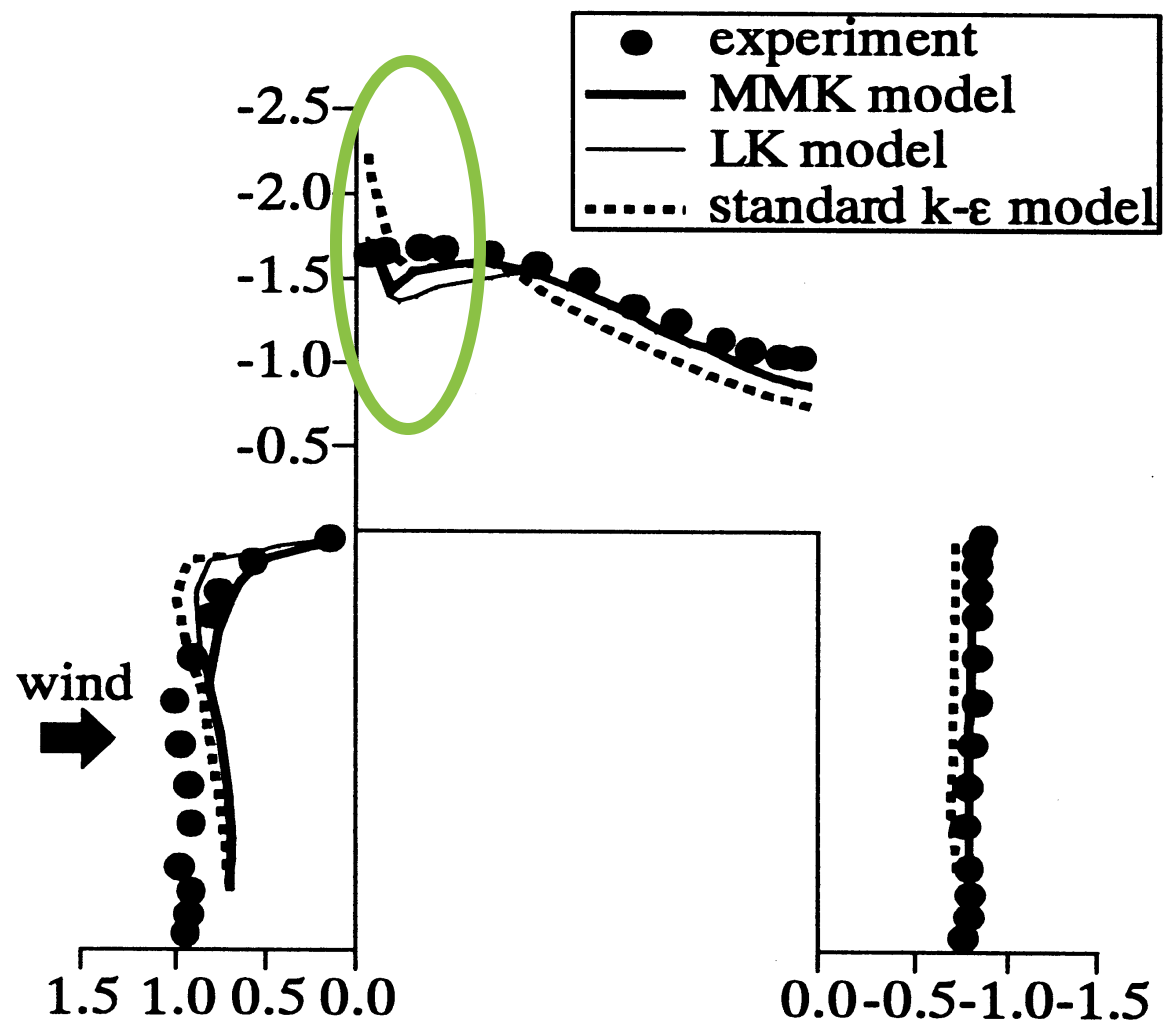
3) MMK model(Murakami · Mochida · Kondoh) (1995)

$$\underline{\nu_t = C_{\mu}^* k^2 / \varepsilon} \quad C_{\mu}^* = C_{\mu} \Omega / S \quad (\Omega / S < 1)$$
$$C_{\mu}^* = C_{\mu} \quad (\Omega / S \geq 1)$$

$$-\langle u_i' u_j' \rangle = \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

$$P_k = -\langle u_i' u_j' \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \approx \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}$$

LKモデルはPkに改良を加えたが、MMKモデルでは渦度スケール Ω を用いて、渦動粘性係数 ν_t (レイノルズ・ストレス- $\langle u_i' u_j' \rangle$)を改良。



風圧係数の比較

一連のRANSモデルの評価・改良を通じて得た教訓

一番大切なのは、拙速に表面的な解決策を打ち出すことなく、
問題の発生する所以をじっくりと考えて、明快に説明すること。

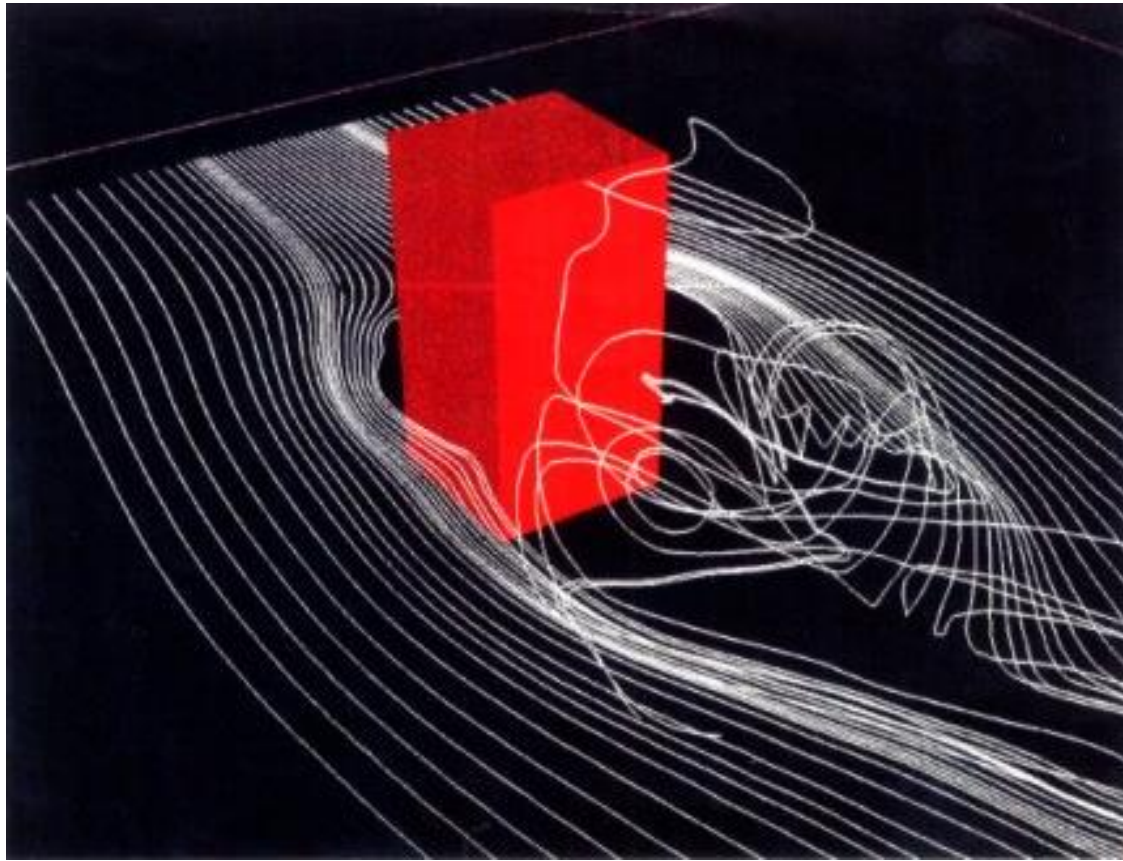
⇒明快な説明が出来れば、いろいろな人がいろいろな解決策を考える。
(LKモデル以外にも、建物風上コナ一部での標準 $k-\epsilon$ の欠陥に対処するためのモデルが出て来た)。

⇒この実感が、その後の研究・教育のスタイルを決めた気がする。

(3)-5 乱流渦放出流れに関する国際共同研究

-2次元角柱を対象としたLESと $k-\varepsilon$, DMSの比較-

(カールスルーエ大学のRodi先生との共同研究, 1991年~1995年)



坂本成弘 氏 博士論文, 1994 (の一部に)

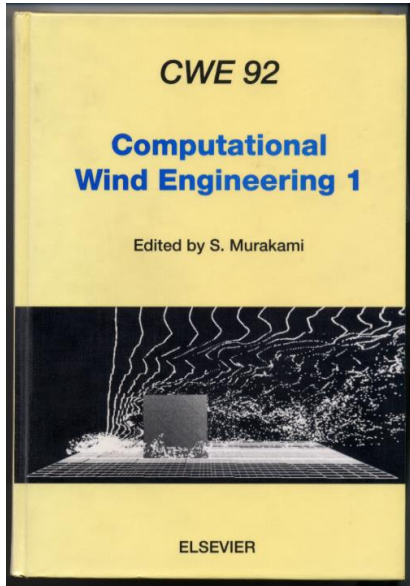
「カルマン渦の放出に伴う周期的変動は乱流変動ではないので、RANSでも再現可能だ！」というのが Rodi先生の主張。

変動成分を周期的変動と乱流変動に分離し、各々についてLES とDSM、 $k-\varepsilon$ の結果を詳しく比較。

⇒その後の非定常RANSの研究に先鞭をつけたと思う。

坂本成弘, 持田灯, 村上周三, Wolfgang Rodi, 2次元角柱まわりの乱流渦放出流れに関するLES とDSM、 $k-\varepsilon$ 、実験の比較, 日本建築学会構造系論文集, 59 (459), (1994), 49-56

(3)-6 Computational Wind Engineering に関する国際会議の開催 (CWE92)



1992年に東京で最初のComputational Wind Engineering の国際会議を開催（Chair: 村上先生, Secretary : 持田）

⇒新しい学問分野 **Computational Wind Engineering (CWE)** の誕生

- Keynote 講演者が、当時の数値流体のBig Names +風工学から Davenport, Stathpolos のAll Star 興行。
- このSecretary をしたおかげで国内外のいろいろな先生の知己を得た。

CWE92のKeynote 講演者

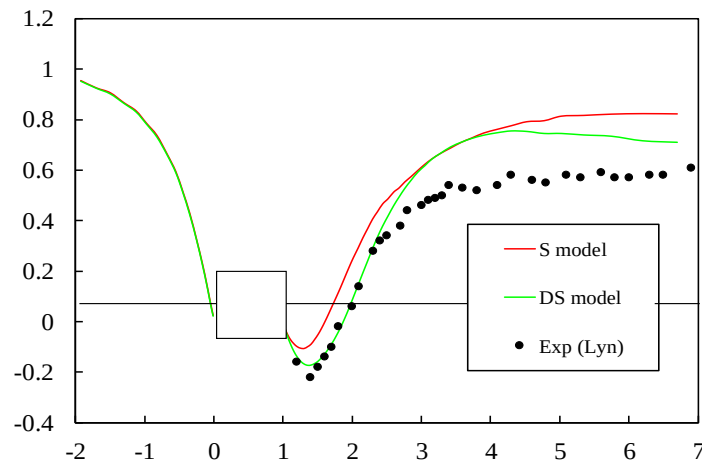
1 st day	2 nd day	3 rd day	
J. H. Ferziger	S. Murakami	C. W. Hirt	A. D. Gosman
W. Rodi	M. A. Leschner	A. Leonard	D. Laurence
A.G. Davenport	A. Toshizawa	T. J. Hughes	T. Stathpolos

(3)-7 その後の生研でのLESの研究

1993年6月、講師になる。

① Dynamic 型LESの導入

- Germanoが1991に提案した dynamic 型LESを建築分野で初めて導入（1993）



S model : 従来型の Smagorinsky モデル,
DS model : Dynamic 型のSmagorinsky
モデル

Dynamic型LES（Germano(1991)）

各時刻の各場所のモデル係数 $C(x,y,z,t)$ の最適値を計算を進めながら同定して、これを与えて解析を進めるモデル。

建築分野へのDynamic モデル展開 —計算安定化と新しいモデルの性能評価— (1993年～1998年)

- Dynamic Mixedモデルの導入
- Lagrangian Dynamicモデルの導入

富永禎秀 氏 博士論文, 1994
(Dynamic モデルを用いたガス拡散の解析)

飯塚 悟 氏 博士論文 (の一部) , 1999
(博士論文のテーマは別だが、小林光氏も参戦)

Dynamic LES 関係で3編の論文を建築学会の論文報告集に投稿し、掲載された(1996, 1997, 1998)。

⇒ 2 編目(dynamic mixed) は何の査読意見もなく、一発で採用だった。

② LESによる非定常解析のための 流入境界として必要な 非定常な境界条件（流入変動風）の生成 (1994年～1999年)

⇒非常に先駆的で難易度の高い研究。

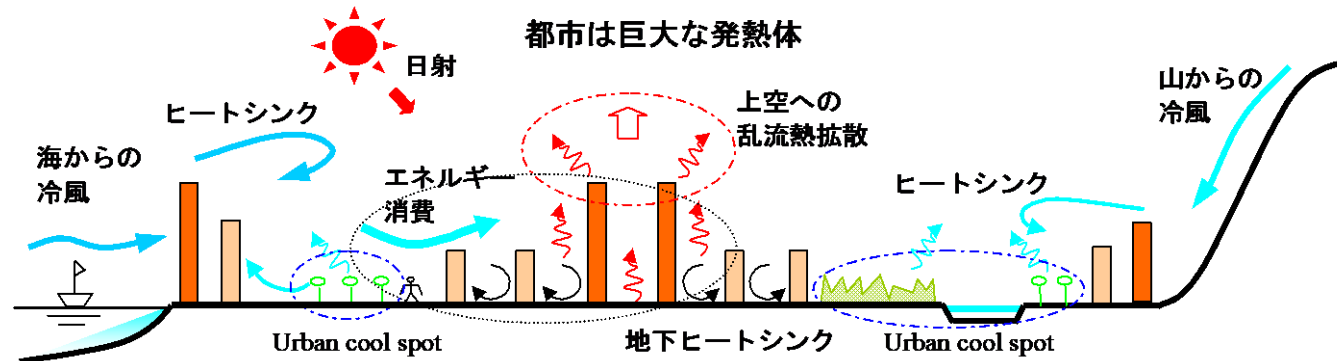
単なる乱数ではすぐ減衰し、意味をなさない。
乱流変動の空間相関やスペクトル形の考慮が必要。

①周波数空間のパワースペクトル・クロススペクトルから生成する手法の開発
(近藤宏二氏 博士論文, 1999)

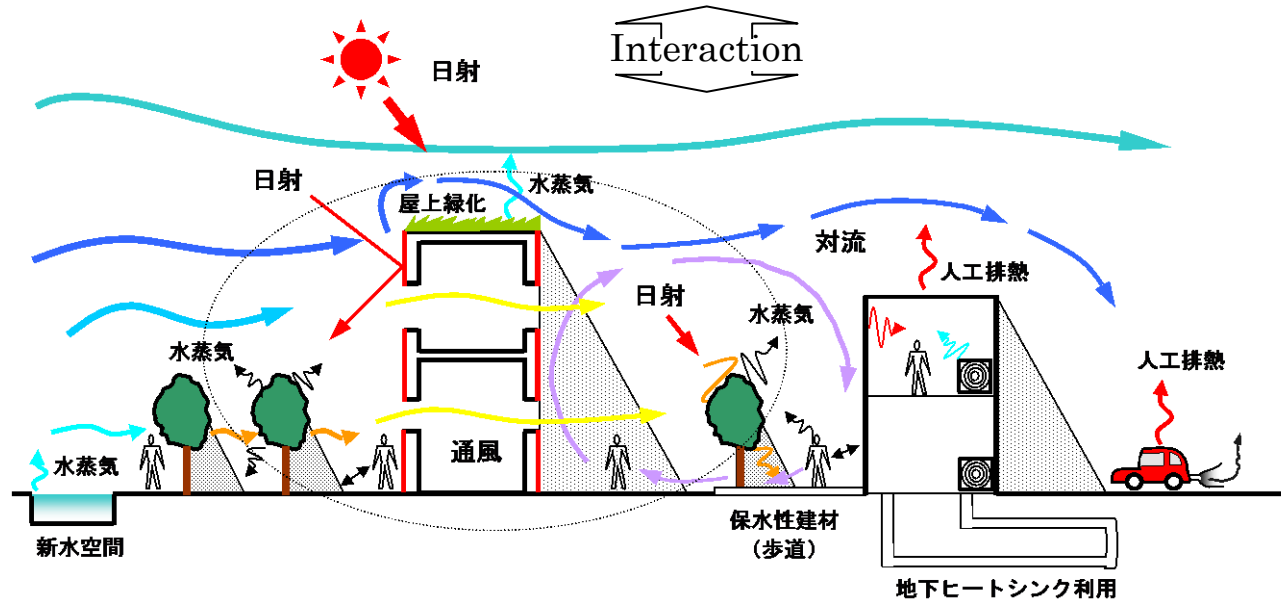
②波数空間の3次元エネルギースペクトルから生成する手法の開発
(飯塚悟氏 博士論文の一部, 1999)

(3)-8 都市気候解析への展開（CWEの領土拡張）（1994～）

⇒ CFD × 風工学 × 都市気候学



都市 (Meso) スケールの解析 (気象モデル)



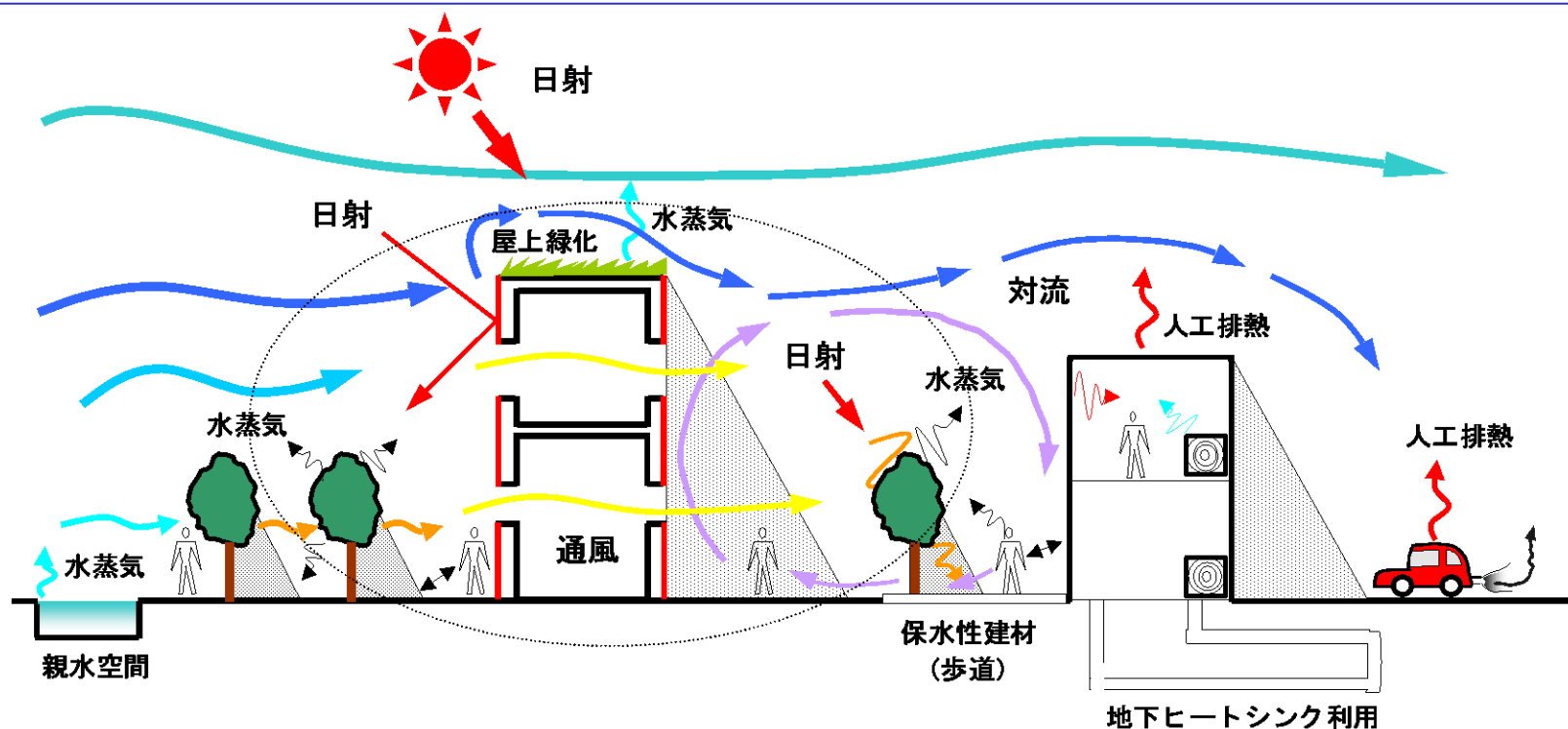
建物・街区(Micro) スケールの解析 (工学モデル)

- 漸く、高校時代に興味のあったヒートアイランド・都市気候の研究に辿り着く。
- 自分の専門をヒートアイランドの研究に移したのではなく、CWEの領土を拡張して、攻め込んだつもり。

(3)-8-1 CFD解析と放射解析を連成させた市街地内のミクロ気候の解析手法の開発(1994～)

・生研時代の1番最後に少し手掛ける。

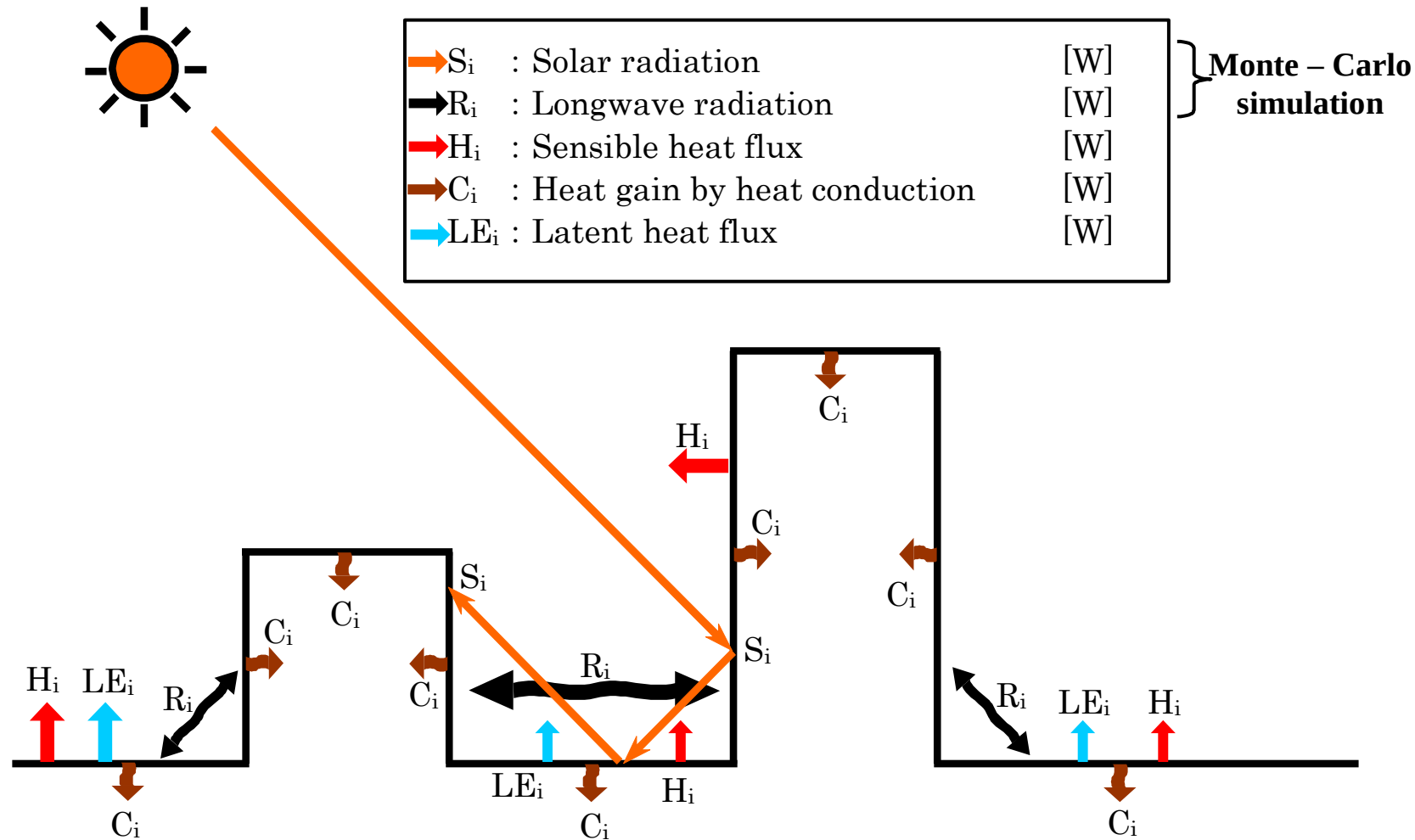
⇒その後、助手だった大岡先生の指導の下、
吉田伸治 氏 博士論文, 2000、原山和也 氏 博士論文, 2004



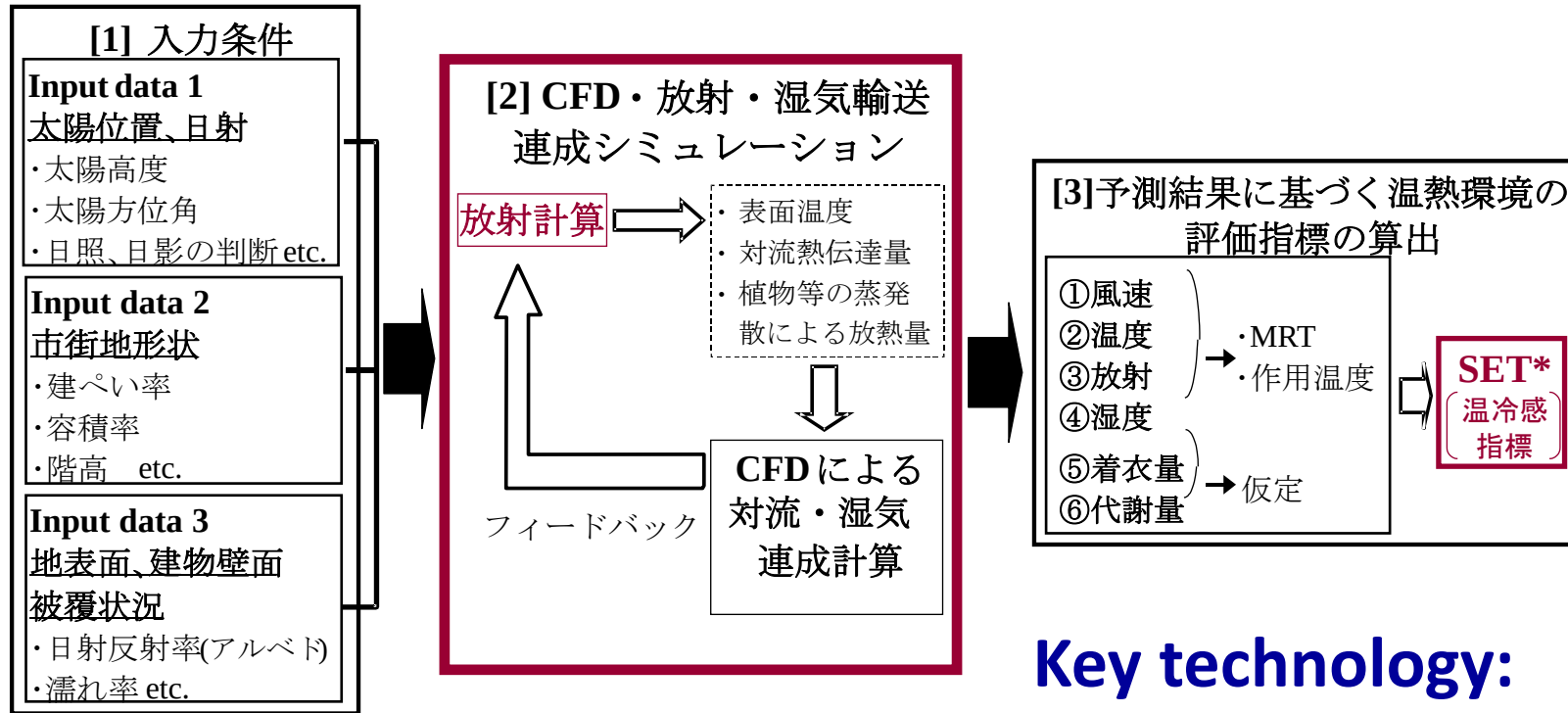
都市表面の熱収支解析とCFDの連成

key technology

⇒都市空間内の多重反射を含む屋外の3次元放射場の解析



屋外温熱環境予測手法のフロー



Key technology:

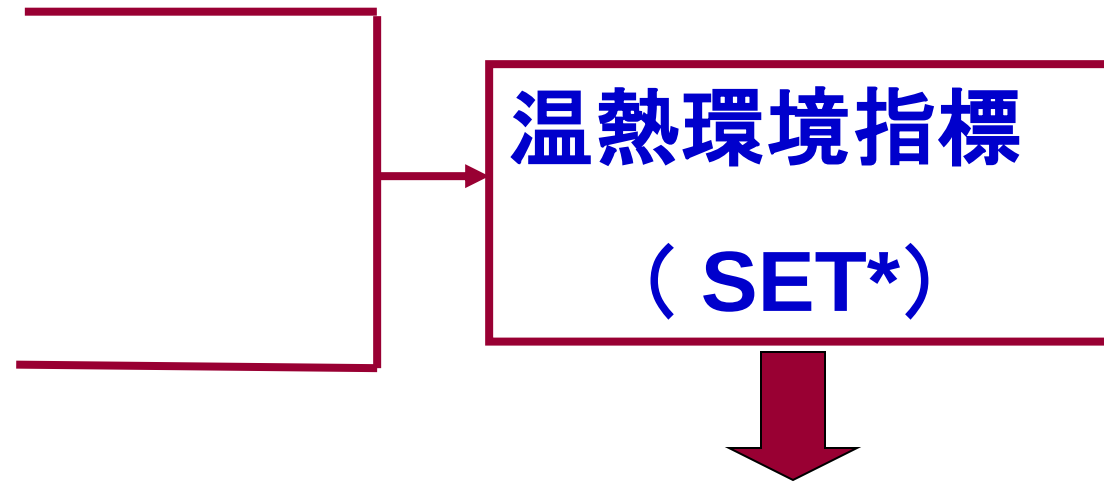
Coupling of 3D CFD and

3D radiation computations

=>室内環境のシミュレーション技術を利用
(放射暖房 (冷房) の評価)

温熱環境指標SET*（新標準有効温度）による環境の総合的評価

- ・ 風速
- ・ 温度
- ・ 湿度
- ・ 放射 (MRT)



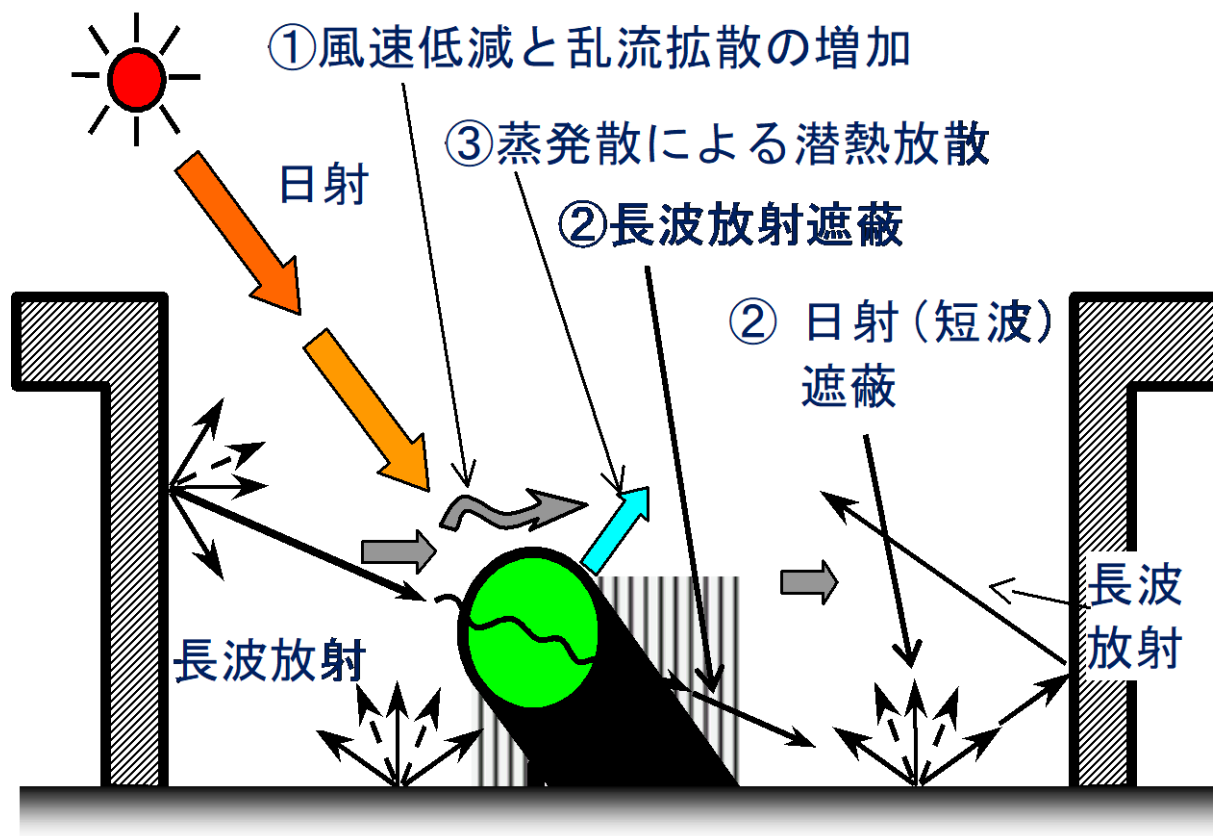
SET*: 温度だけでなく風速, 湿度, 放射環境等を総合的に考慮した体感温度を示す指標

⇒いわゆる体感温度

樹木の多様な効果を再現するための 樹木キャノピーモデルの開発

(1990年代後半～、吉田伸治氏 博士論文, 2000)

樹木の流体力学的効果と熱的效果のモデル化

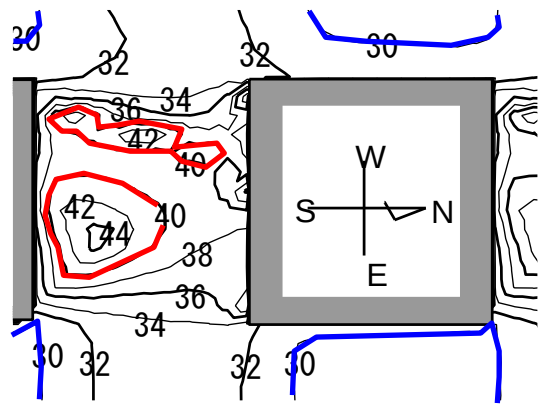


①の流体力学的効果と
③の蒸発散の部分は、
東北大赴任後、改良を
加えた。

温熱環境指標SET*の算出例

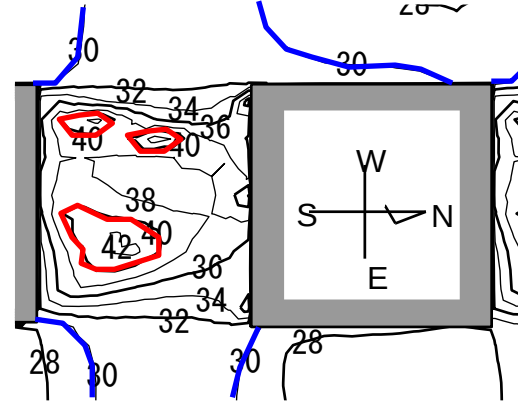
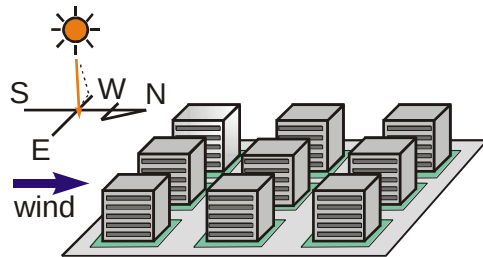
緑化の条件を変化させた場合のSET*の水平分布の変化（高さ1.5m）

[unit: °C]



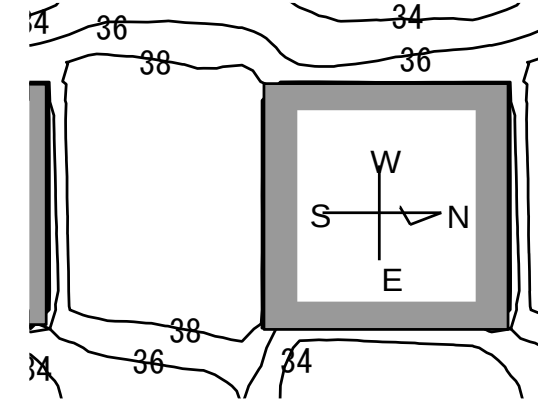
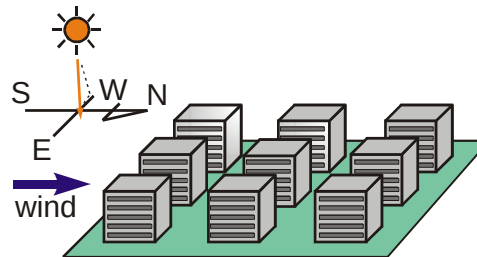
(1) case 1

（地表面芝地率：10%，
樹木はなし）



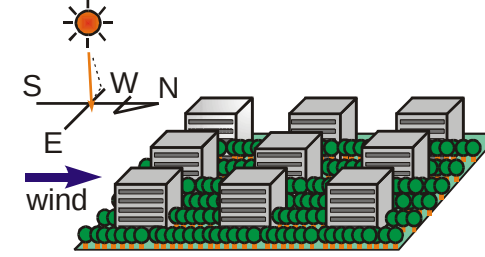
(2) case 2

（地表面芝地率：100%，
樹木はなし）



(3) case 3

（地表面芝地率：100%，
全面樹木有り）

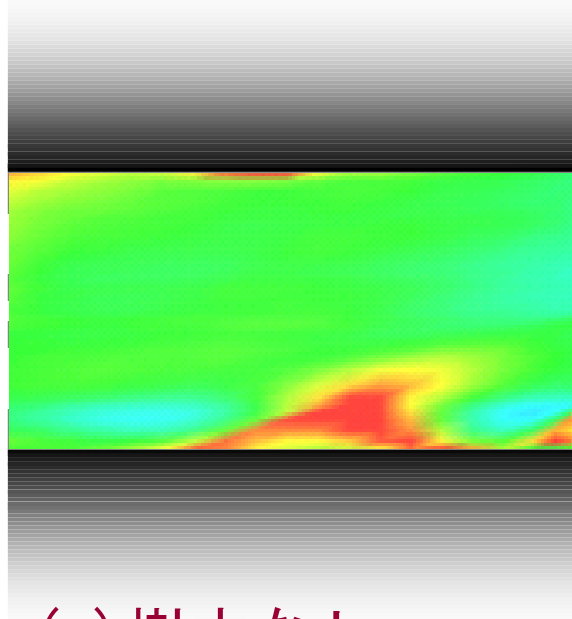
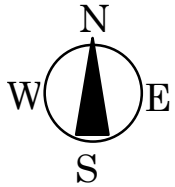


温熱環境指標SET*の算出例-定禅寺通の街路樹の効果-

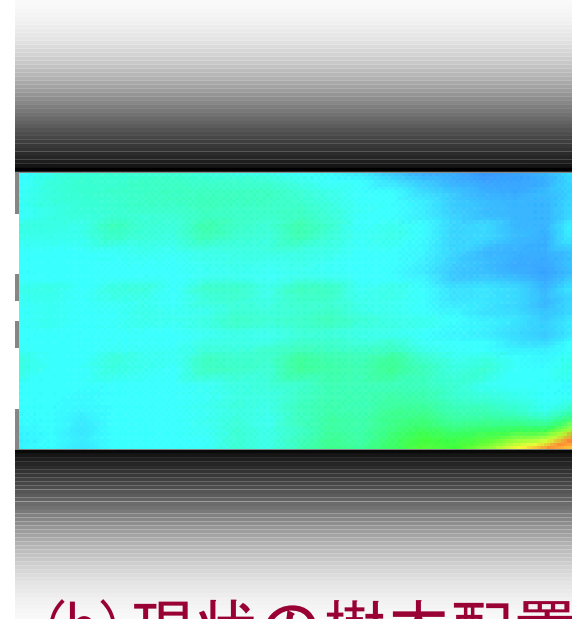
25.0 30.0 35.0[°C]



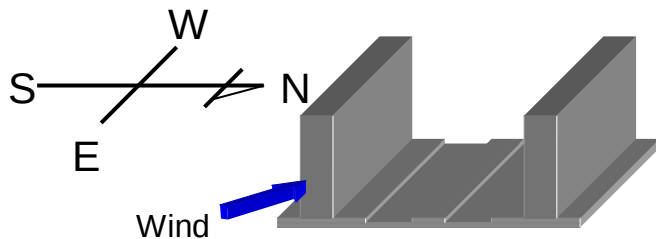
2004年8月4日、13時の気象条件での比較（歩行者高さの水平分布）



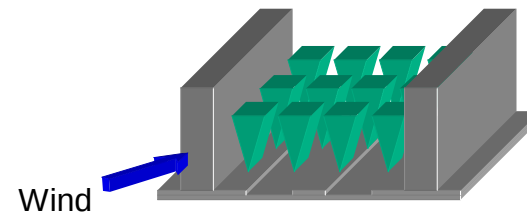
(a) 樹木なし



(b) 現状の樹木配置



SET*[°C]



(3)-8-2 メソ気象モデルを用いた 都市気候解析手法の開発 (1994～)

〔Sangin KIM 氏 博士論文, 1997〕
〔佐々木澄 氏 博士論文, 2004〕

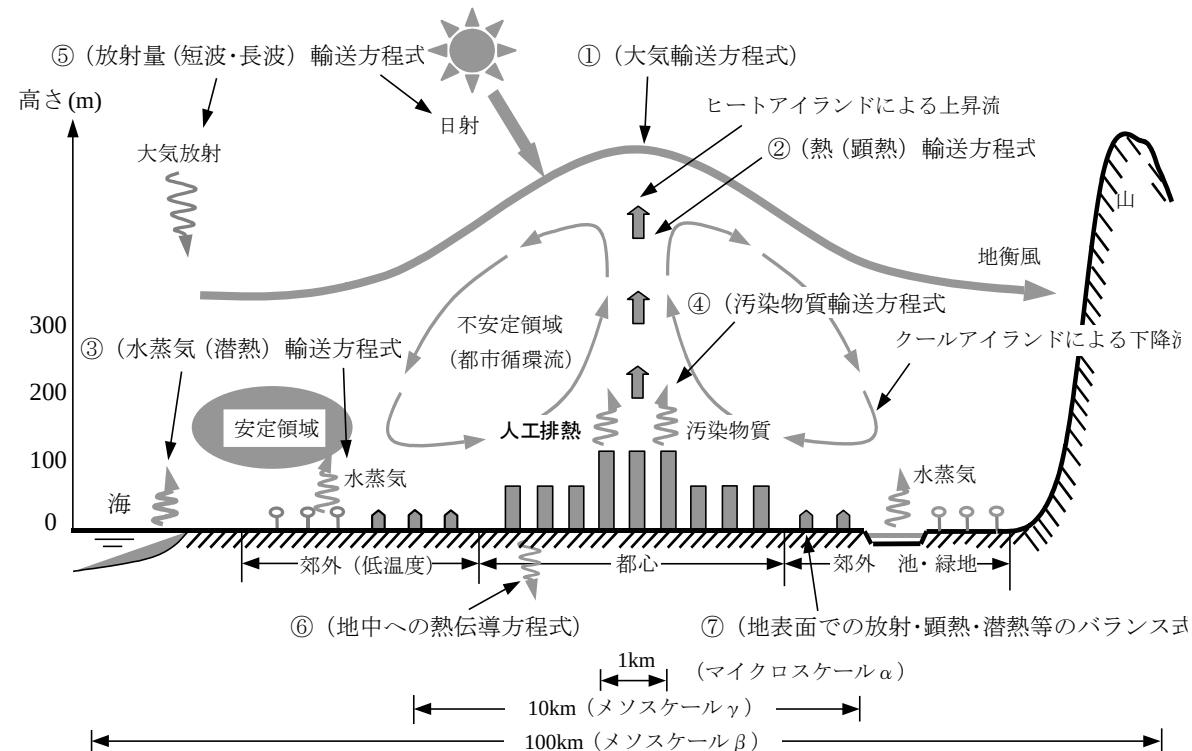
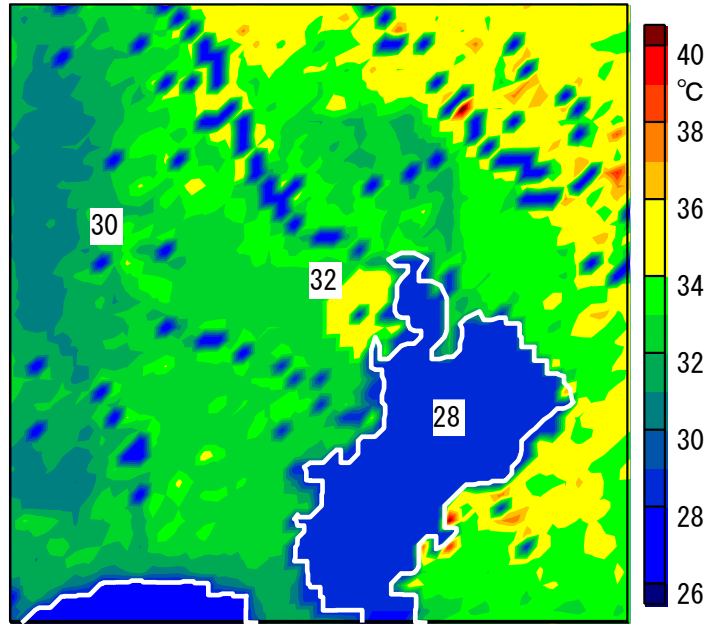
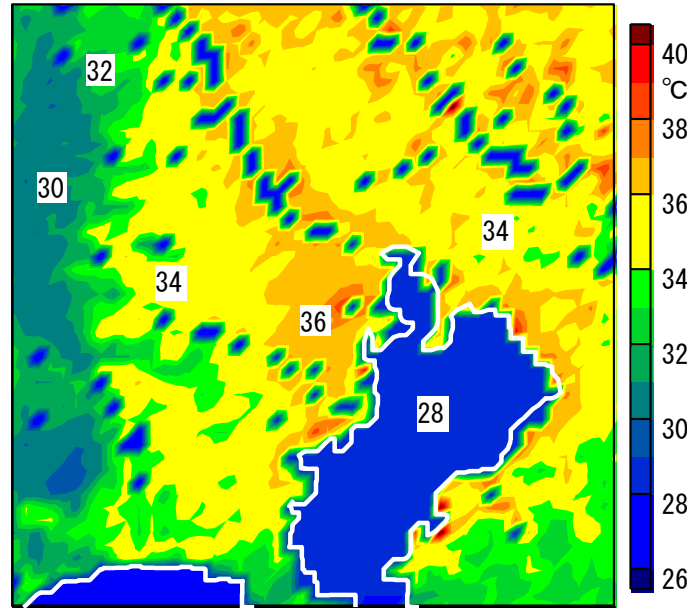


図1 都市気候に関連する様々な現象と空間スケール

1990年代後半に行っていたメソスケールの気候解析の例： 江戸時代から現在に至る都市化に伴う東京の気候変化



(1) 江戸時代 (天保年間)



(2) 現状

土地利用シナリオを色々
変えたケーススタディを
実施

- 東京の建物用地を全面緑化したら？
- 東京の建物用地の日射反射率を上げたら？
- 新潟の水田（からの蒸発散）がなくなったら？
していた。

地表面付近の温度分布の比較（夏季、15時）

(3)-9 生研での14年の修業期間の総括

- CWEという新しい学問分野の立ち上げに参画し、誕生の過程をつぶさに体験できたことは、大変エキサイティングで幸せなことだった。
- 村上先生には、研究だけでなく、生活態度、仕事に向き合う姿勢等、多くのことを教えて頂いた。

内容

1. 早稲田での放し飼いの7年（高校・大学時代）
2. 村上周三先生の下での14年の修業時代（東大生研）
3. 新設大学で非大都市圏における環境問題に触れた4年
（新潟時代工科大学 1995～1999）
4. 東北大学での25年
 - 4.1 環境工学分野の助教授時代
 - 4.2 地域環境計画学分野の教授時代
5. おわりに

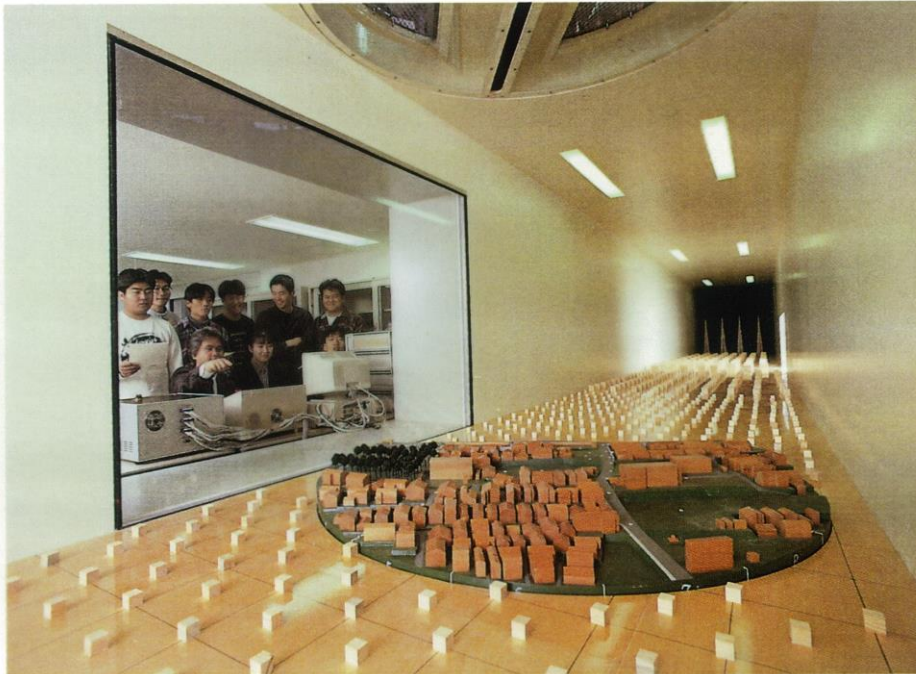
3. 新潟工科大学での4年（1）大学・学科の様子

- 1995年4月に新潟県柏崎市に新設された新潟工科大学の建築学科に助教授として赴任。ドクター取得直後の富永先生も助手として赴任。
- 環境・設備系の全ての授業＋防災の一部の授業を担当した。
“雪と環境”とか”雪国環境工学”とか、担当科目に軒並み”雪”がついていた。
- 新潟赴任後もしばらく生研との共同研究が続く（飯塚先生とのLES, Kim Sangjin先生とのメソ気候、吉田伸治先生とのミクロ気候）。
- 日本一古い大学から⇒その当時日本一新しい大学へ
- 大学の付置研にいて、日頃付き合っていたのが博士課程の学生や企業から派遣された研究員方々だったのが、1年生（未成年）だけの新設大学へ。
- 職場が六本木から水田が広がる田園地帯へ。
- はじめての雪国での生活、そして冬の日本海から吹く強い季節風。
- 充実した道路網と道路委除雪。完全な車社会。

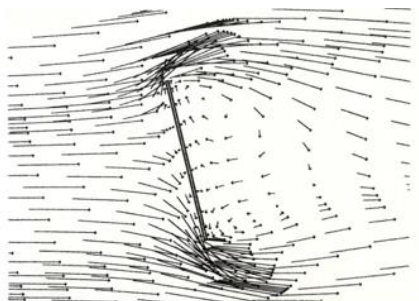


3. 新潟工科大学での4年（2）：目玉施設の風洞を担当

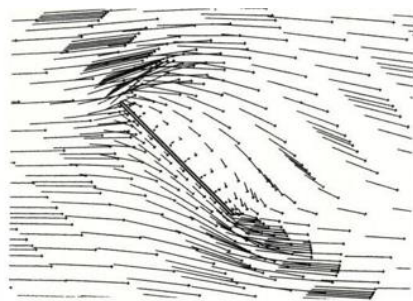
- 開学時の目玉施設として、新潟大学の赤林先生が設計した立派な風洞が建設されていた。
- ①これを立ち上げ、②成果を出し、③地元貢献する、ことが私と富永先生に託された。
- 地元での認知度を上げるために宣伝、営業に努力した。
- 学長先生も心配してくれて、最初に来た仕事が、大風合戦で有名な白根の大風が何故飛ぶのかを説明する資料作成。



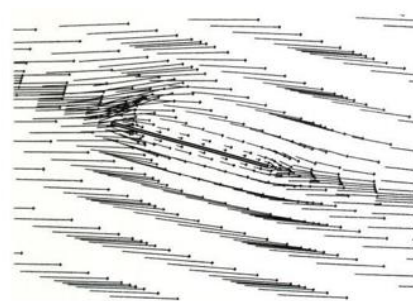
CFD解析結果の一部



(1) 75° の場合

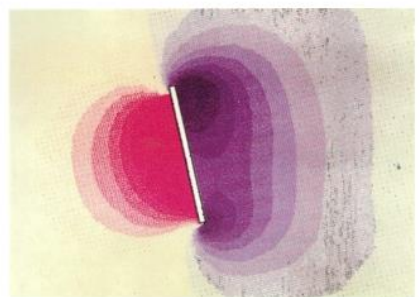


(2) 45° の場合

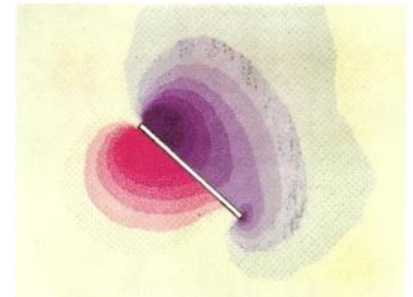


(3) 15° の場合

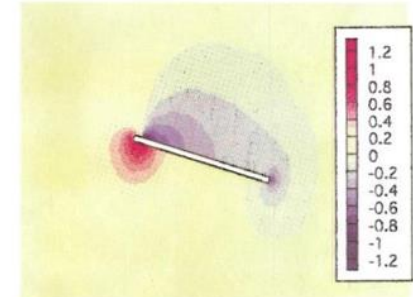
風の流れ（横からみたところ）



(1) 75° の場合



(2) 45° の場合



(3) 15° の場合

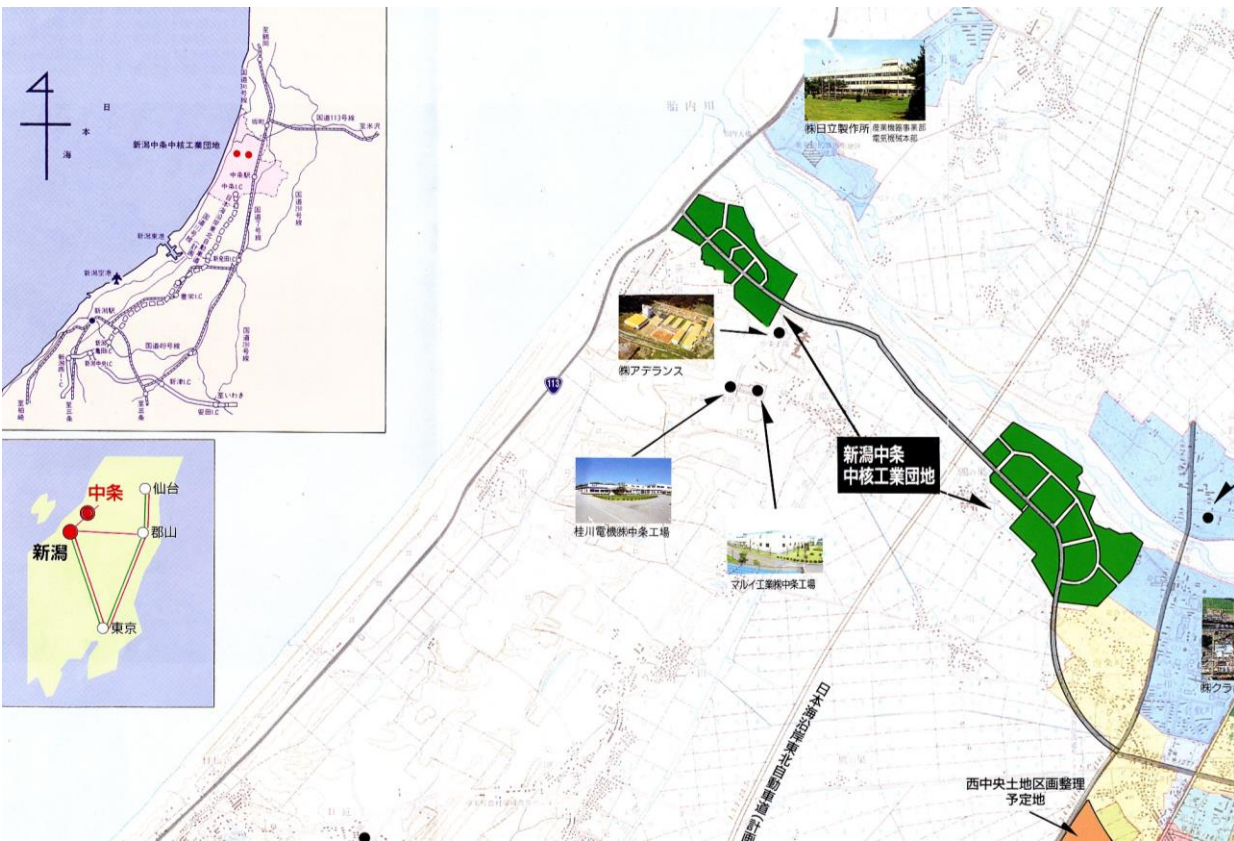
圧力の分布（横からみたところ）



解析結果は、しろね大風と歴史の館に展示されていた。

しろね大風と歴史の館

3. 新潟工科大学での4年（3）：はじめて来た本格的な委託研究 地域振興整備公団の新潟中条中核工業団地の飛砂防止対策

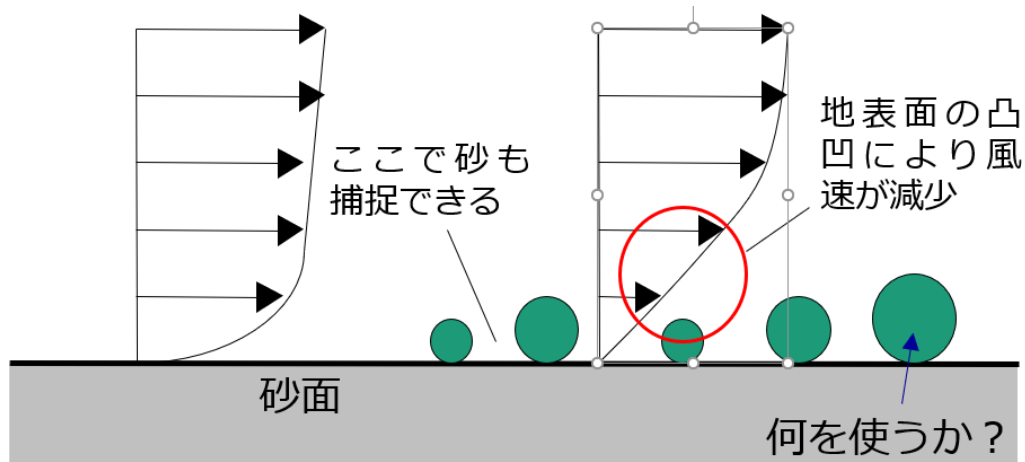


造成工事の状況

地表面粗度調整型の新たな飛砂防止工法

現場近くにある水澤化学工業（株）より産出される産業廃棄物（酸性白土やゼオライトなどの副産物である含水シリカアルミナ複合化合物：通称ガレオナイト）を地表に散布して、地表付近の風速を低減。

⇒風洞を使ったこの効果の検証を依頼された。



ガレオナイト散布の状況

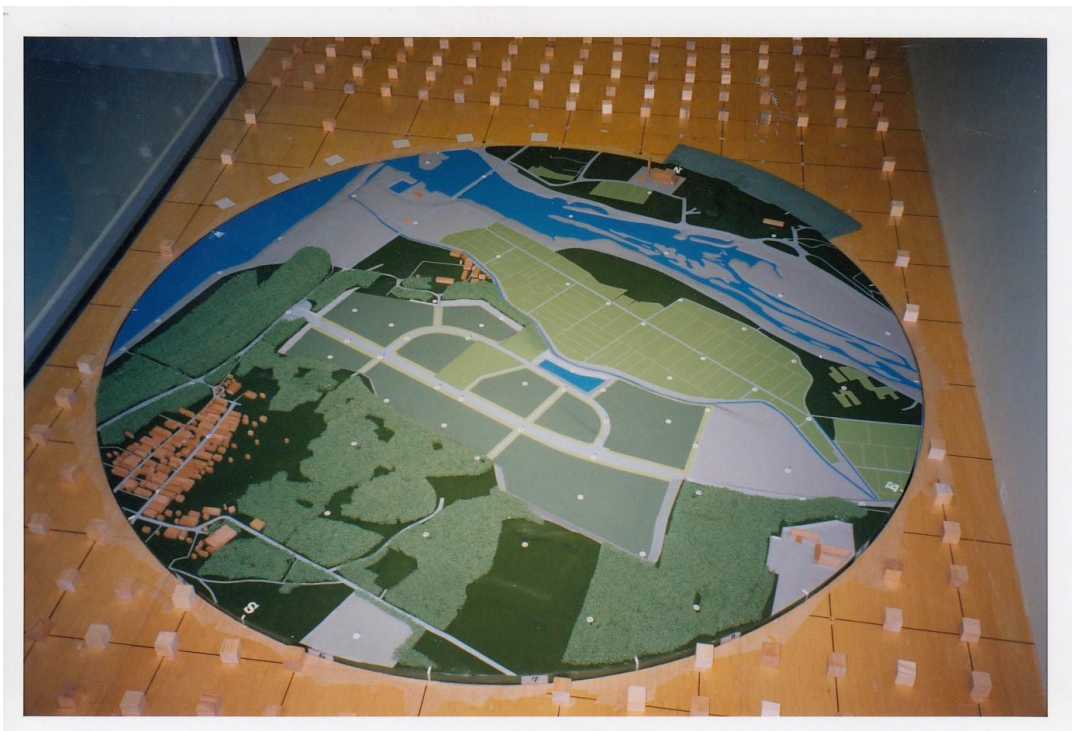


新潟工科大学の風洞で効果を確認



クローラダンプによる散布状況

その後、多くの施工実績（新潟県内各地、秋田県、愛知県など）
ベンチャー企業の設立（水澤化学工業→エコ・プロジェクト）



別途、風環境の風洞実験も実施

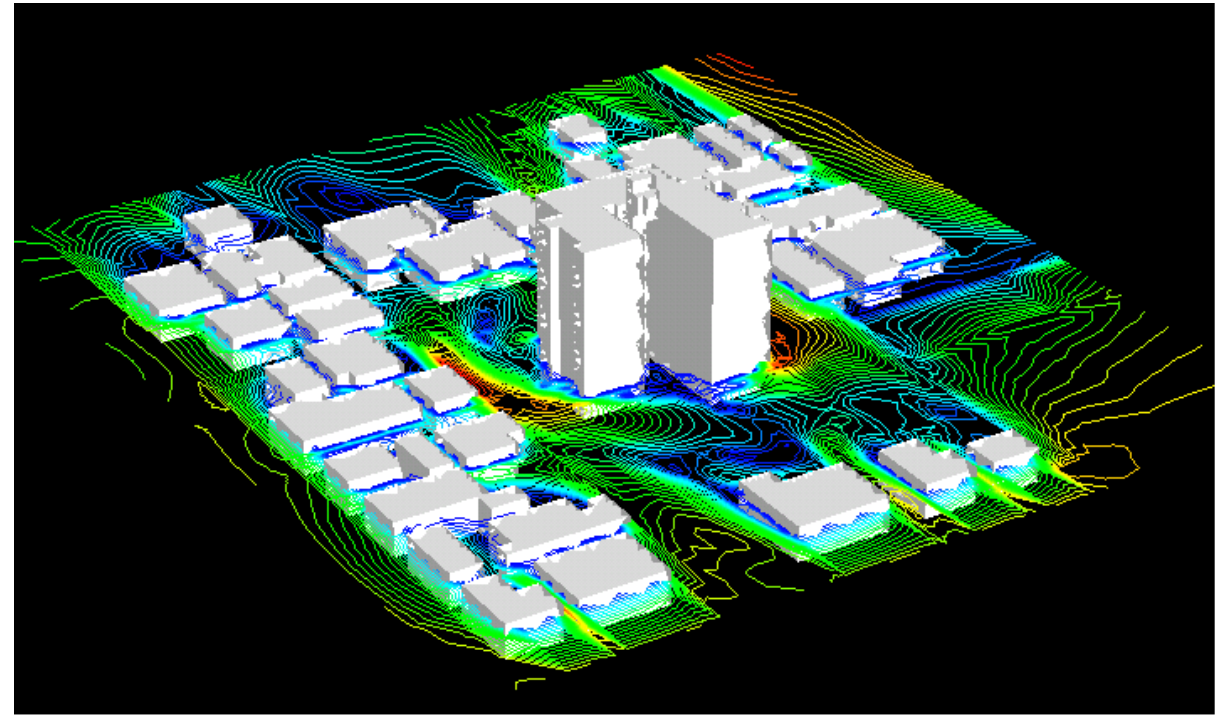
その後

- 多くの施工実績（県内各地、秋田県、愛知県など）
- 「にいがた新技術研究会」の結成
（地域振興整備公団、新潟工科大学、福田組、
水澤化学工業、グリーン産業）
- ベンチャー企業の設立
（水澤化学工業→エコ・プロジェクト）
- 日本建築学会技術報告集に論文掲載
- 平成11年度リサイクル推進協議会会長賞
- 国土交通省の技術登録

3. 新潟工科大学での4年（4）： 長岡市の県営団地の飛雪解析

次に、新潟県長岡市の稽古町県営団地のエレベータホールへの雪の吹込み対策の効果の検証の依頼が来た。

- 私も富永先生も博士論文がガス拡散だったので、
 ガス拡散→飛砂（中条）→飛雪
 と段階的に進められたのが良かった。
- 先ず、①団地周辺の広い範囲の風環境を予測し（右の図）、
- 次に、②団地の近傍の狭い領域を対象に飛雪解析を実施（次のスライドの図）。



CFDによる稽古町団地周辺の風環境の予測結果

この段階では、通常の濃度の輸送方程式（移流・拡散方程式）に雪粒子の落下速度の項を加えてただけのものだが、CWEの領土を雪工学に拡張した記念すべき第一歩。

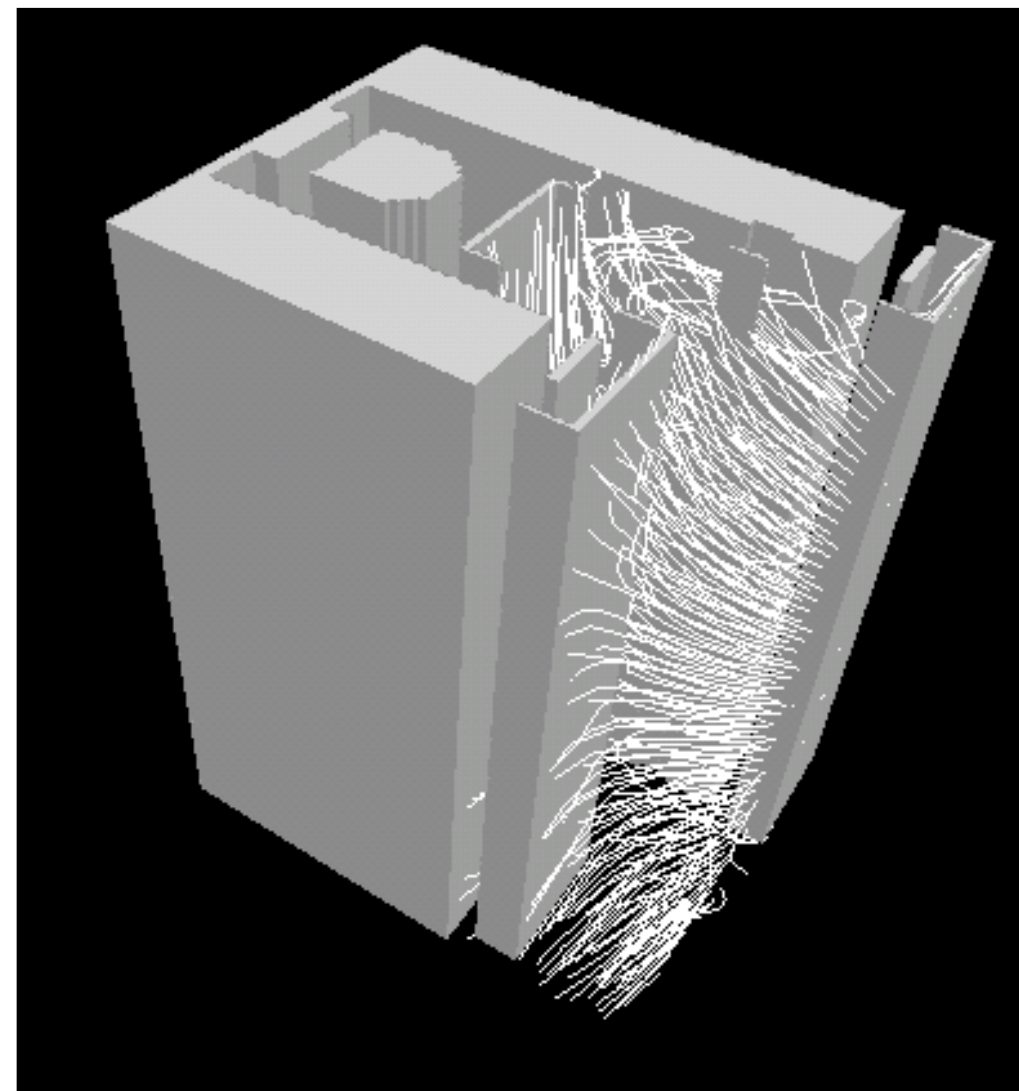
CWE × 雪工学 = CFD × 風工学 × 雪工学

$$\frac{\partial \langle \Phi \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \Phi \rangle \langle u_i \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial \langle \Phi \rangle \langle wf \rangle}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_s} \left(\frac{\partial \langle \Phi \rangle}{\partial x_i} \right) \right]$$

Φ : 飛雪空間密度 [kg/m³]

=> 単位体積当たりの雪粒子の質量

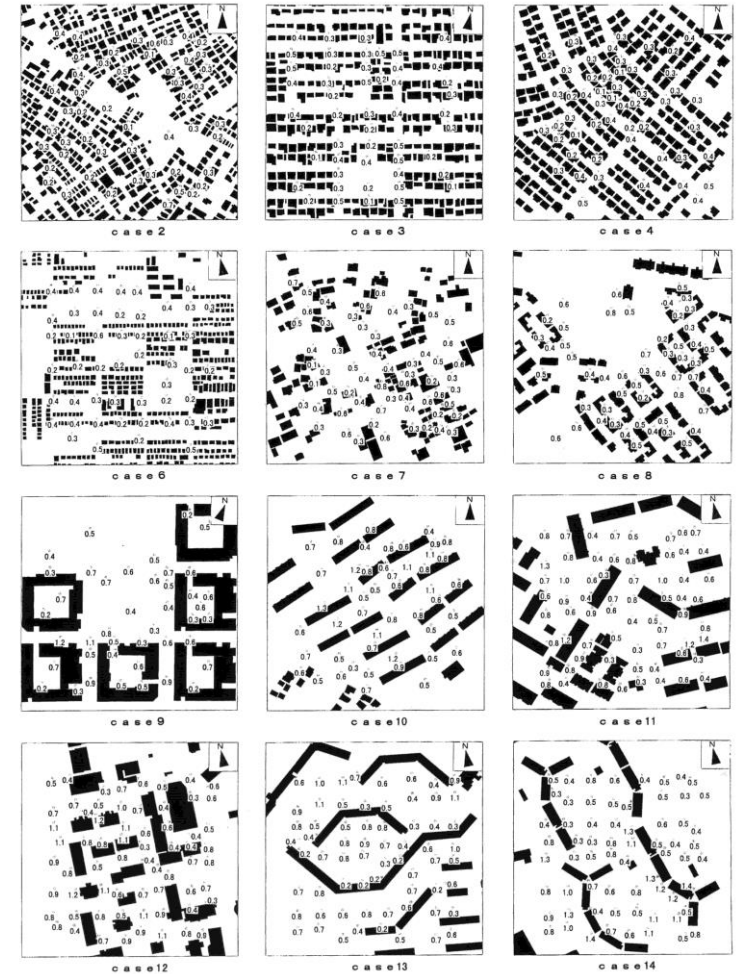
wf : 雪粒子の落下速度 [m/s]



CFDによるエレベーターホールへの雪の吹込みの予測結果

3. 新潟工科大学での4年（5）： 芝浦工業大学の三浦研との風通しに関する共同研究

- 新潟に赴任した挨拶の葉書を各方面に送ったら、三浦昌生先生（当時、芝浦工業大学システム工学部教授）からお電話を頂き、共同研究をすることになった。
- 三浦研の学生さんが、システム工学部のある埼玉県内のいろいろな住宅市街地の模型を作成し、柏崎に持ってきて、多点風速計で歩行者レベルの風速測定を行うことを数年繰り返した。
- 学生のリーダー役が若き日の久保田徹先生（現、広島大学教授）。



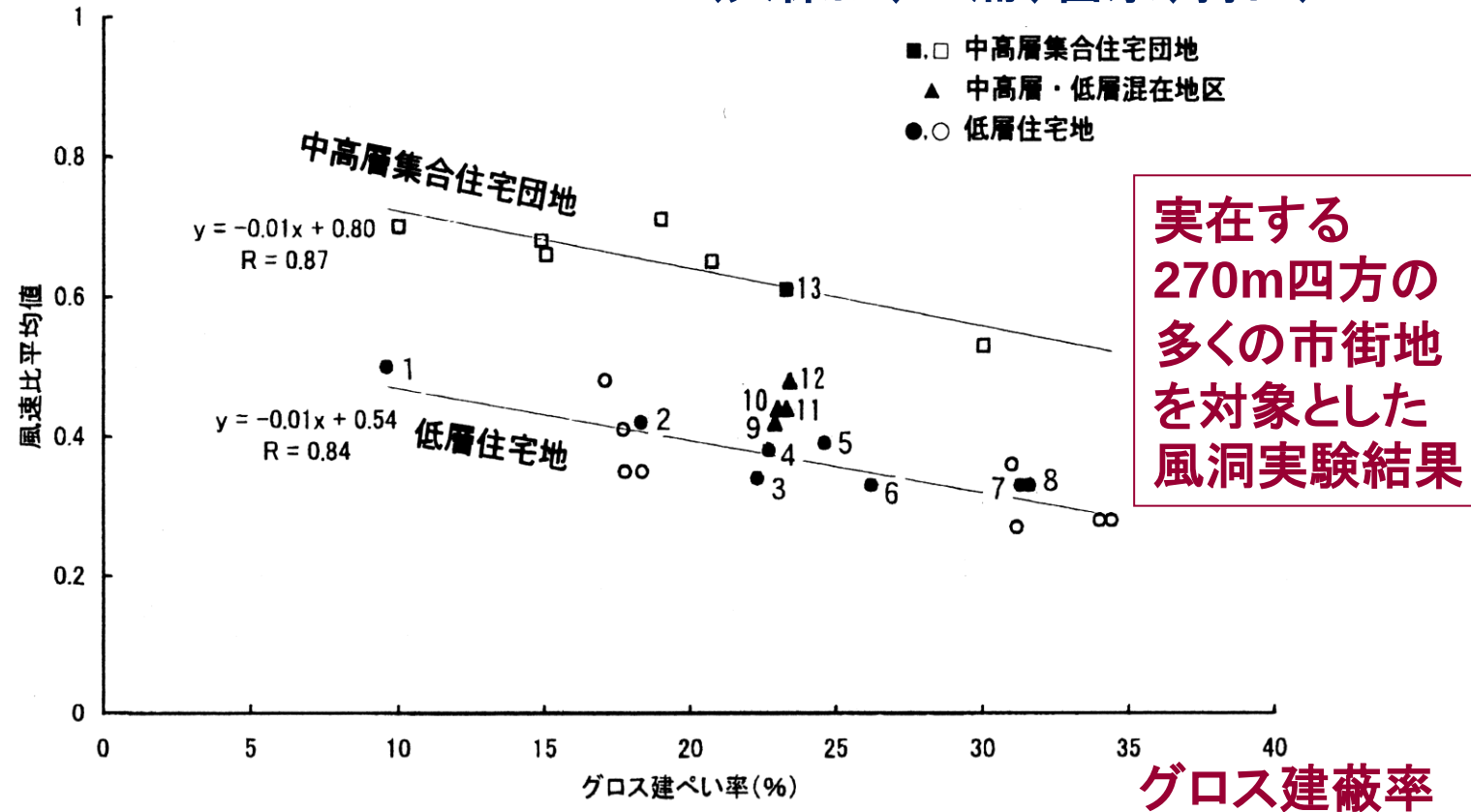
市街地のグロス建蔽率と平均的な風通し

(久保田、三浦、富永、持田)

市街地内の地上
1,5mの風速比
の空間平均値

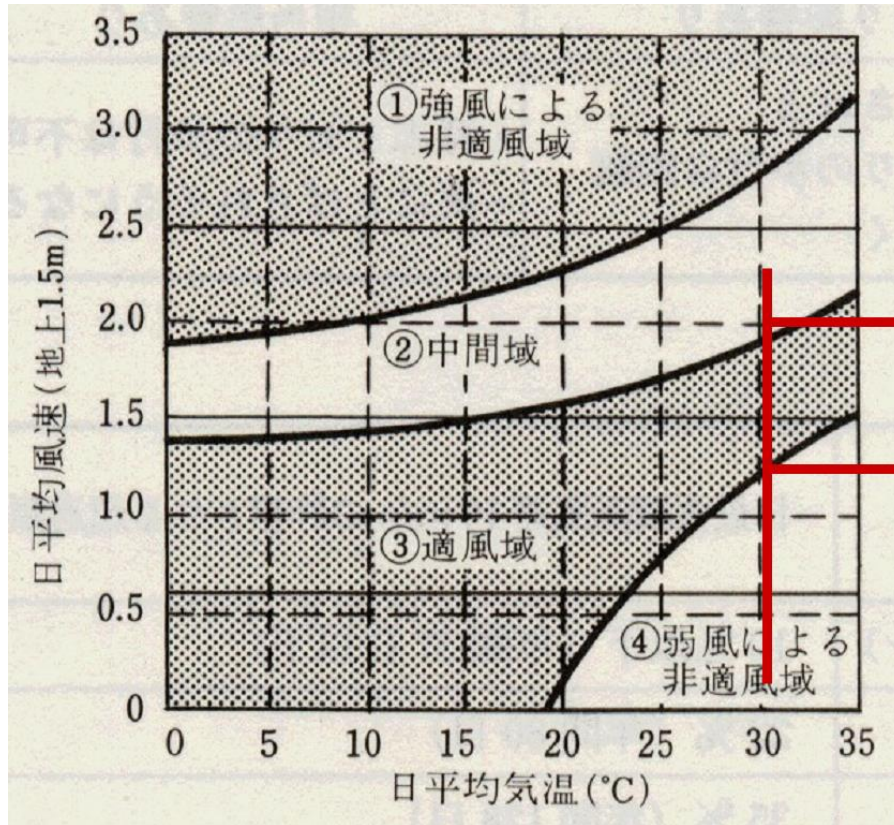
風速比平均値 =

$$\frac{\text{建物のある場合の風速の空間平均値}}{\text{建物がない場合の風速の空間平均値}}$$



- 1) グロス建蔽率と地表付近の風速の空間平均値は明確な負の相関
- 2) 同じグロス建蔽率で比べると、低層市街地より、中高層市街地の方が地表付近の平均風速が高い

全国主要都市の適風範囲の設定（8月と2月）



各都市の8月と2月の平均気温から、各都市の8月と2月の適風範囲が定まる。

「適風」「非適風」に関する風速と気温の関係

村上周三、森川泰成：気温の影響を考慮した風環境評価尺度に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第358号、1985.12

気温を考慮した風環境評価尺度を用いた風通しを考慮した 住宅地計画のための全国主要都市におけるグロス建ぺい率の基準値

(グロス建ぺい率10～35%を対象とした場合、
表中の「－」の場合にはいずれのグロス建ぺい率とも適風となる)

	夏季(8月)		冬季(2月)	
	低層住宅地	中高層集合住宅団地	低層住宅地	中高層集合住宅団地
1 札幌	－	－	－	－
2 仙台	－	－	－	19%以上
3 新潟	29%以下	－	16%以上	不適
4 金沢	不適	－	－	15%以上
5 東京	12%以下	－	－	－
6 大阪	20%以下	－	－	11%以上
7 福岡	22%以下	－	－	20%以上
8 鹿児島	25%以下	－	－	13%以上
9 那覇	－	29%以上	－	不適

- 私にとっては、生研culture とは違う形で生まれた初めての成果。

久保田, 三浦, 富永, 持田：建築群の配置・集合形態が地域的な風 通しに及ぼす影響
(その1)－実在する270m平方の住宅地における地域的な風通しに関する風洞実験－
日本建築学会計画系 論文集, 第529号, pp. 109～116, 2000. 3

久保田, 三浦, 富永, 持田：建築群の配置・集合形態が地域的な風 通しに及ぼす影響
(その2)－風通しを考慮した住宅地計画のための全国主要都市におけるグロス建ぺい率の基準値－
日本建築学会計画系論文集, 第556号, pp. 107～114, 2002. 6

Tetsu Kubota, Masao Miura, Yoshihide Tominaga, Akashi Mochida, Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods, Building and Environment, 43 (10), (2008), 1699-1708

=>この論文は、海外の研究者にも良く知られている。

Scopus上でのScore (2024. 3. 5) は、被引用件数286 (Top 4%), FWC1=4. 72
(データ分析、論文化は全て久保田先生によるもの)

3. 新潟工科大学での4年（6）：総括

⇒地域の生活と地域の環境問題を知ることが出来て、視野が広がった！

- 飛砂、飛雪等のような非大都市圏の環境（地域環境）に関わる問題を知ることが出来て大変勉強になった。
- 新設大学に赴任し、新たに決めるべきいろいろなルールに関して、多くの議論（や喧嘩）を経験し、大学の制度を勉強する良い機会になった。
- 東京生まれ、東京育ちなので、日本海側の気候、雪国の生活はいろいろと新鮮だった。
 - ・ 冬の日本海からの強い季節風と波しぶき、
 - ・ 長岡から柏崎に車で戻る際に、曾地峠を越えた後に遭遇する吹雪（雪による地表付近の乱流構造の可視化そのもの）
 - ・ 田中元首相のお膝元の充実した道路網と車社会
- 1期生の学生の卒業（完成年度終了）とともに東北大に移動。

内容

1. 早稲田での放し飼いの7年（高校・大学時代）
2. 村上周三先生の下での14年の修業時代（東大生研）
3. 新設大学で非大都市圏における環境問題に触れた4年
（新潟時代工科大学 1995～1999）

4. 東北大学での25年

4.1 環境工学分野の助教授時代

4.2 地域環境計画学分野の教授時代

5. おわりに

4.1 環境工学分野の助教授時代（1999～2006頃）（一部、研究終了時期が教授になってからのものも含む）

(1) 赴任当初の様子

＜赴任前から抱えていた対外的commitments＞

- (2) ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合評価のためのSoftware Platformの開発
- (3) 風力発電最適立地選定のための局所風況予測システム LAWEPS の開発
- (4) 流体数値解析（CFD）による風環境評価のためのガイドブックとガイドライン

＜ここからが、東北大での研究＞

- (5) 仙台中心市街地の温熱空気環境実測-定禅寺通りの街路樹の効果-
- (6) 原町環境調和まちづくり研究と市街地温熱環境実測
- (7) 沿岸都市仙台の熱収支分析と熱収支Map の作成（これは、最初は生研グループと共同）
- (8) その他の助教授時代の研究

4.1 環境工学分野助教授の時代（1）赴任当初の様子

- 1999年4月 松本真一先生の後任として、助教授として赴任（40歳）。
建築環境工学分野の構成は、吉野博教授、助教授の持田、佐藤洋助手。
- 隣にLarry G. Berglund教授のHVACシステムデザイン分野があり、一緒に活動していた。後藤先生がBerglund研のM2だった。
- 佐々木澄君が都市環境をテーマとするM1として待っていてくれた。
- 専攻内で自分の専門が浸透せず、一緒に研究してくれる学生の獲得に苦労。
- 幸い佐々木君が博士課程に来てくれて、その後、白澤多一君（東工大の修士から）、加藤（木村）敦子さん（学内から）、さらにIsaac Lun さん（香港から）も博士課程に来てくれて、何とか持ちこたえた。



1999年の夏季ゼミ

この時期抱えていた対外的な仕事と手伝ってくれた博士課程の学生

- ① ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合評価のための
Software Platformの開発
(村上先生が代表のNEDO Projectで幹事役) ⇒ 佐々木
- ② 風力発電最適立地選定のための局所風況予測システムの開発
(村上先生が代表のNEDO Projectの分担者) ⇒ 白澤、加藤（木村）、Isaac Lun
- ③ 流体数値解析（CFD）による風環境評価のためのガイドラインの作成
(建築学会のWGの主査、幹事 富永先生（新潟工科大学）) ⇒ 白澤
- ④ 日本建築学会「都市のヒートアイランド対策に関する提言」のとりまとめ
(小委員会主査、幹事 足永先生（建築研究所）、渡辺先生（東北工業大学）)
⇒ 佐々木
- ⑤ 建築設計に関わるヒートアイランド対策評価システムCASBEE-HIの開発
(村上先生が委員長で理念構築担当) ⇒ 佐々木

⇒その後の研究の流れと関係するので、先ず、①～③を簡単に紹介。

(時間の都合で④、⑤に触れられず、大変残念)

④については、記念冊子の108頁～の渡辺先生の手稿をご覧ください。

4.1 環境工学分野の助教授時代（1999～2006頃）（一部、研究終了時期が教授になってからのものも含む）

(1) 赴任当初の様子

<赴任前から抱えていた対外的commitments>

(2) ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合評価のためのSoftware Platformの開発

(3) 風力発電最適立地選定のための局所風況予測システムLAWEPSの開発

(4) 流体数値解析（CFD）による風環境評価のためのガイドブックとガイドライン

<ここからが、東北大での研究>

(5) 仙台中心市街地の温熱空気環境実測-定禅寺通りの街路樹の効果-

(6) 原町環境調和まちづくり研究と市街地温熱環境実測

(7) 沿岸都市仙台の熱収支分析と熱収支Map の作成（これは、最初は生研グループと共同）

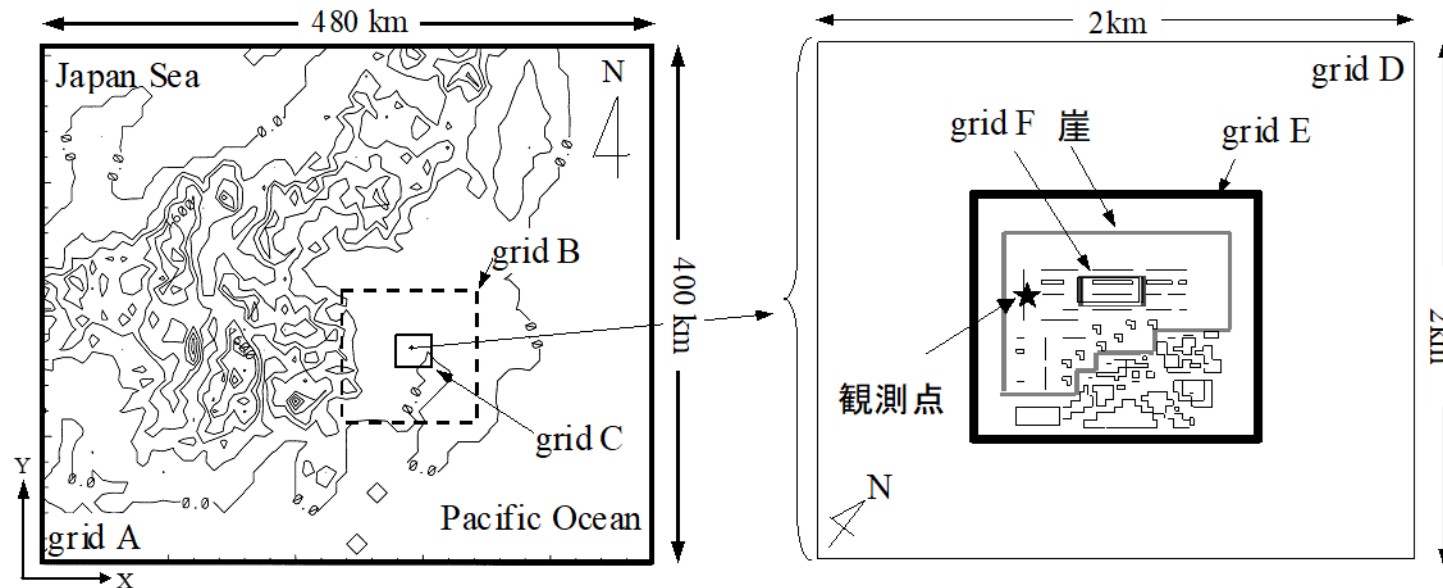
(8) その他の助教授時代の研究

4.1 環境工学分野助教授の時代（2）：

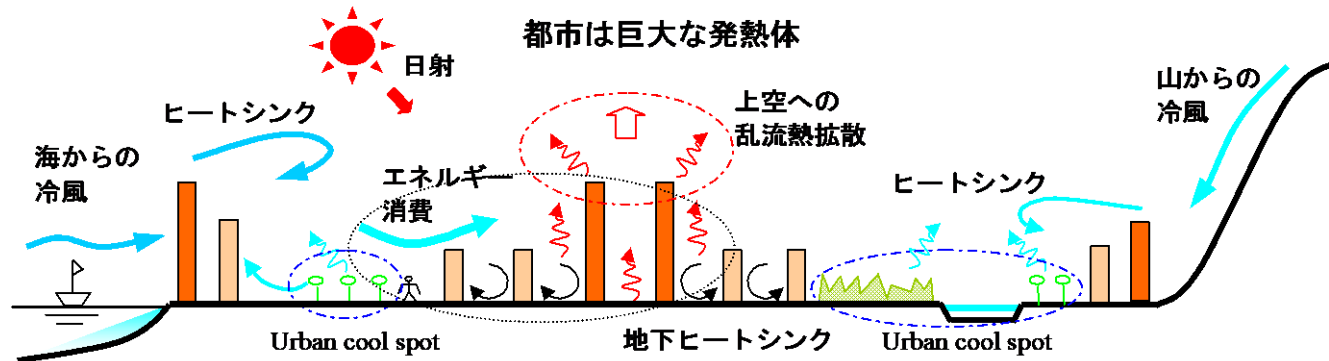
ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の 総合評価のためのSoftware Platformの開発

NEDO 新規産業型提案公募事業

「高効率の熱交換・熱拡散促進型の省エネ都市形成手法の開発」
(1998～2000)

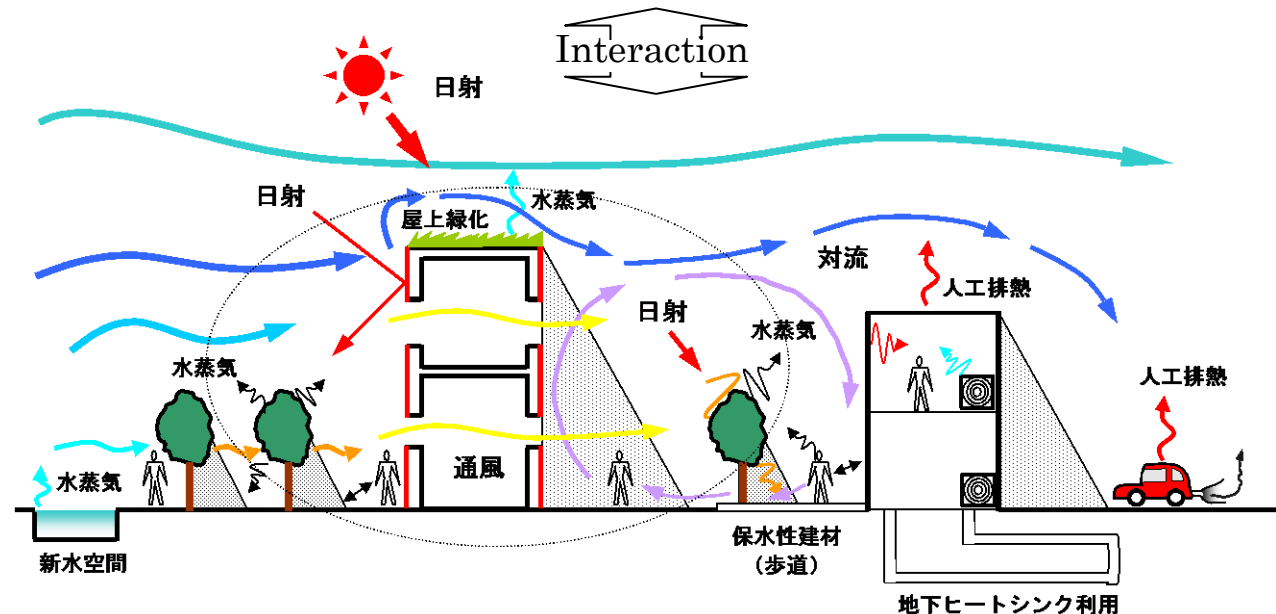


Meso (気象モデル) ・ Micro (工学モデル) の統合によるMeso・Micro気候の一貫解析



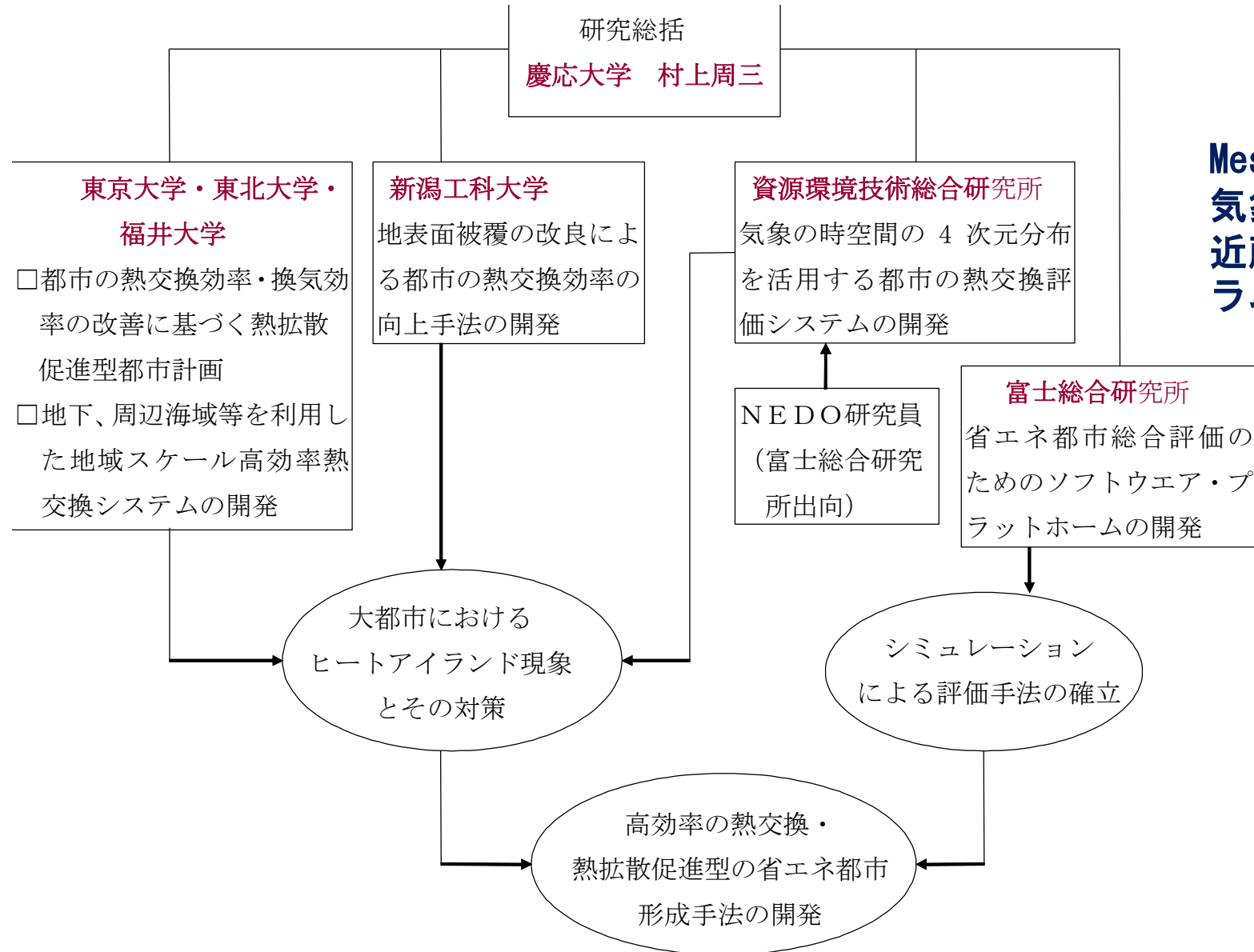
都市 (Meso) スケールの解析 (気象モデル)

Mesoスケールのための
気象モデルは産総
研の近藤裕昭先生の
プログラムを使用



建物・街区 (Micro) スケールの解析 (工学モデル)

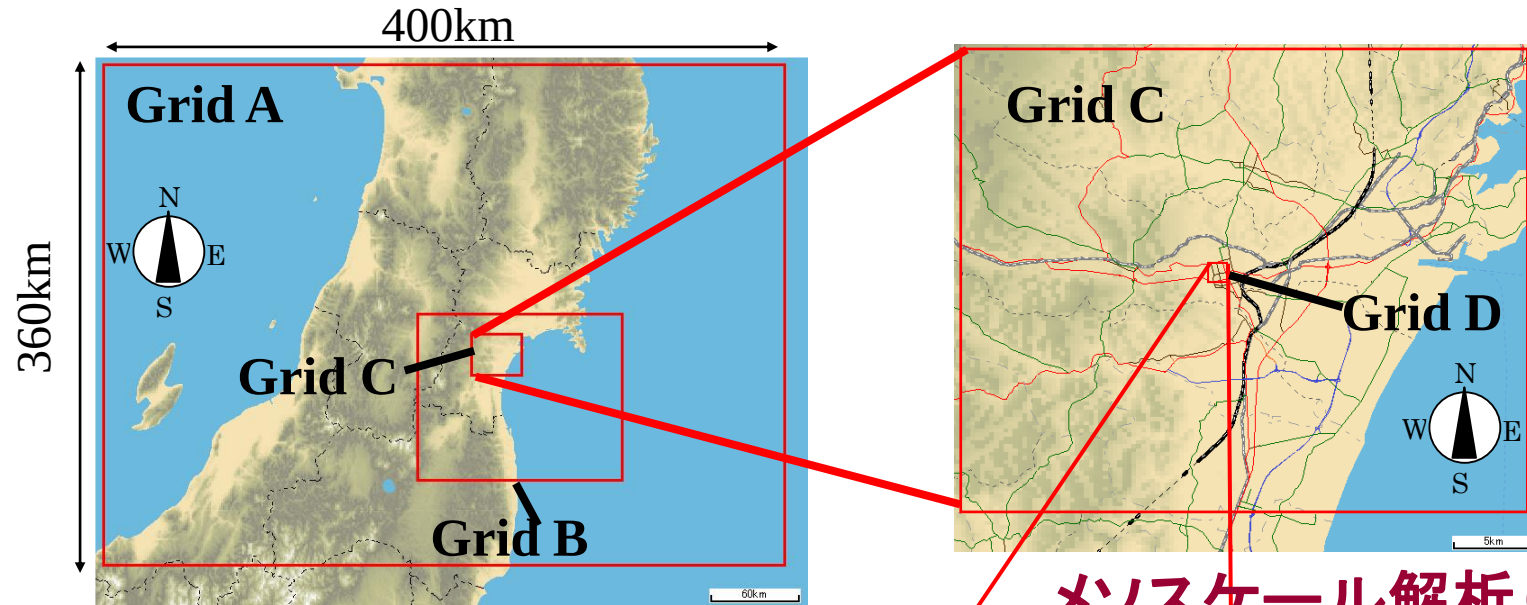
Platformの作成のための共同研究体実施体制



Mesoスケールのための
気象モデルは産総研の
近藤裕昭先生のプログラ
ムを使用

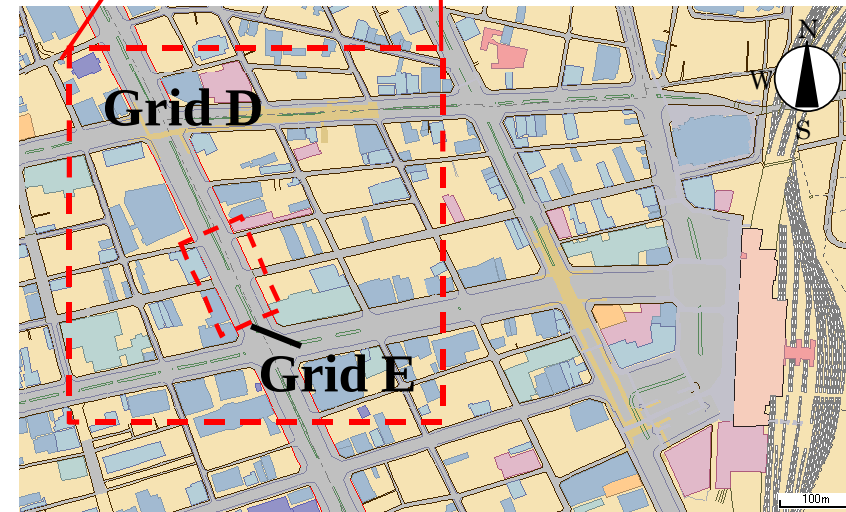
気候モデルとネスティング手法

仙台を対象とする多段階ネスティングの解析領域例（佐々木君のD論の一部）



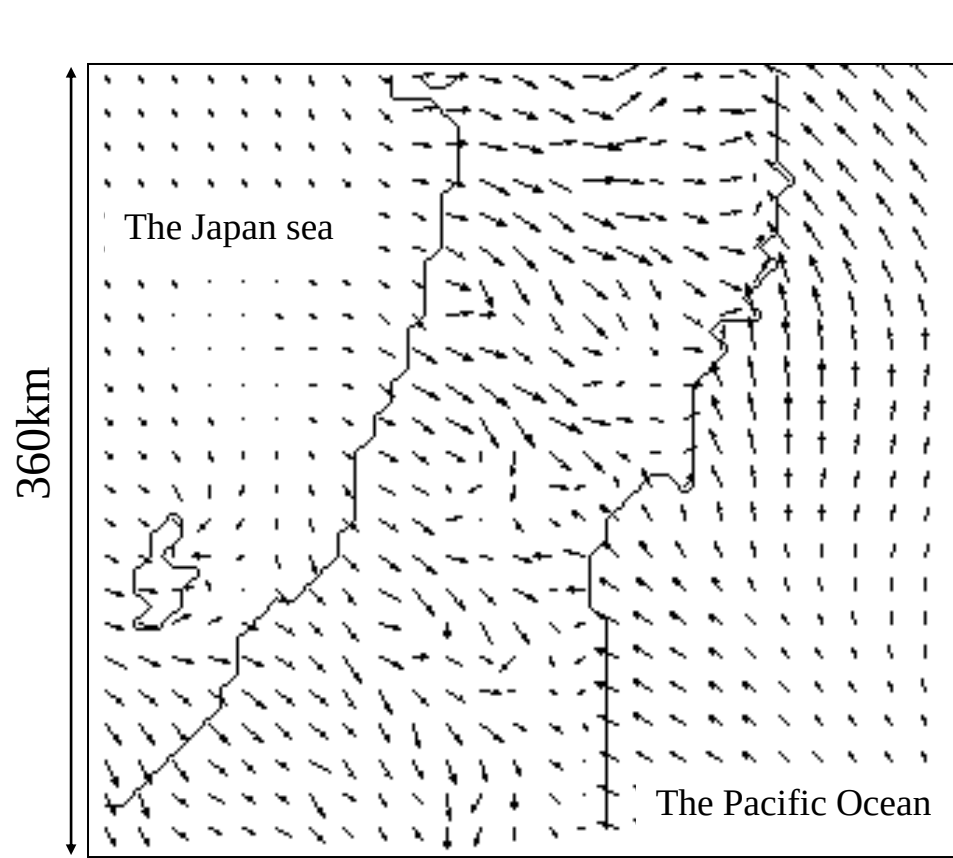
メソスケール解析(気象モデル)
ミクروسケール解析(工学モデル)

Grid	計算領域 (X (東西) × Y (南北) × Z (鉛直))	Grid 数 (X (東西) × Y (南北) × Z (鉛直))	乱流モデル
Grid A	400km × 360km × 9.6km	50 × 45 × 49	Mellor-Yamada level 2.5 (都市スケール解析)
Grid B	120km × 120km × 9.6km	60 × 60 × 49	
Grid C	30km × 30km × 9.6km	60 × 60 × 49	
Grid D	500m × 500m × 380m	106 × 106 × 48	改良 k-ε (街区スケール解析)
Grid E	90m × 100m × 380m	49 × 26 × 30	

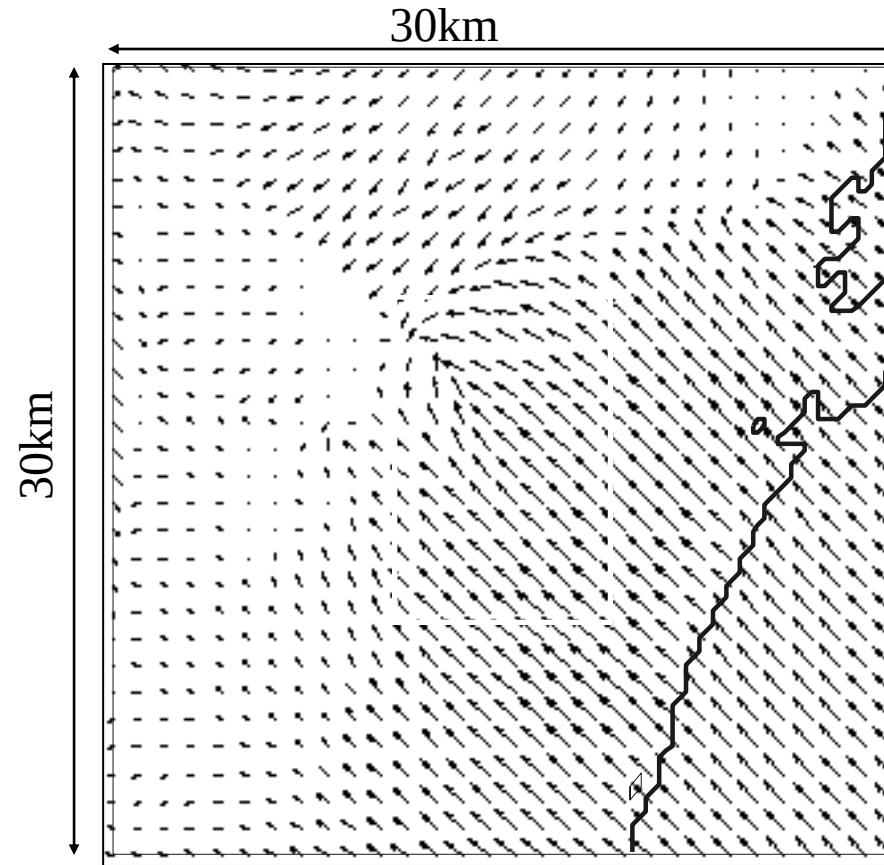


多段階ネスティングの解析結果の例

風速ベクトルの水平分布（メソスケール、高さ10m）



(1)Grid Aの結果



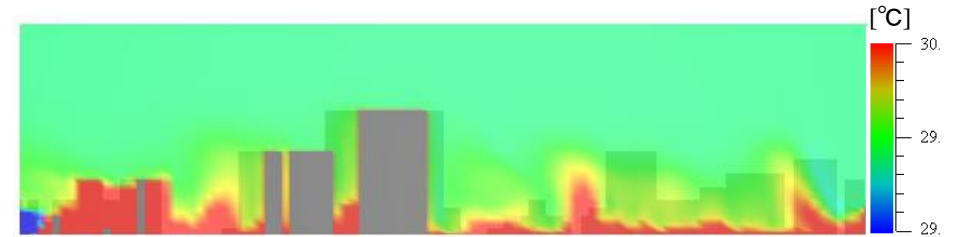
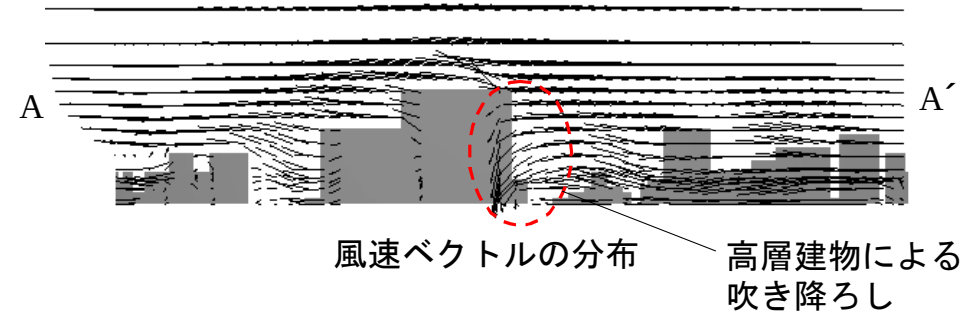
(2)Grid Cの結果

多段階ネスティングの解析結果の例

ミクロスケール (Grid D)



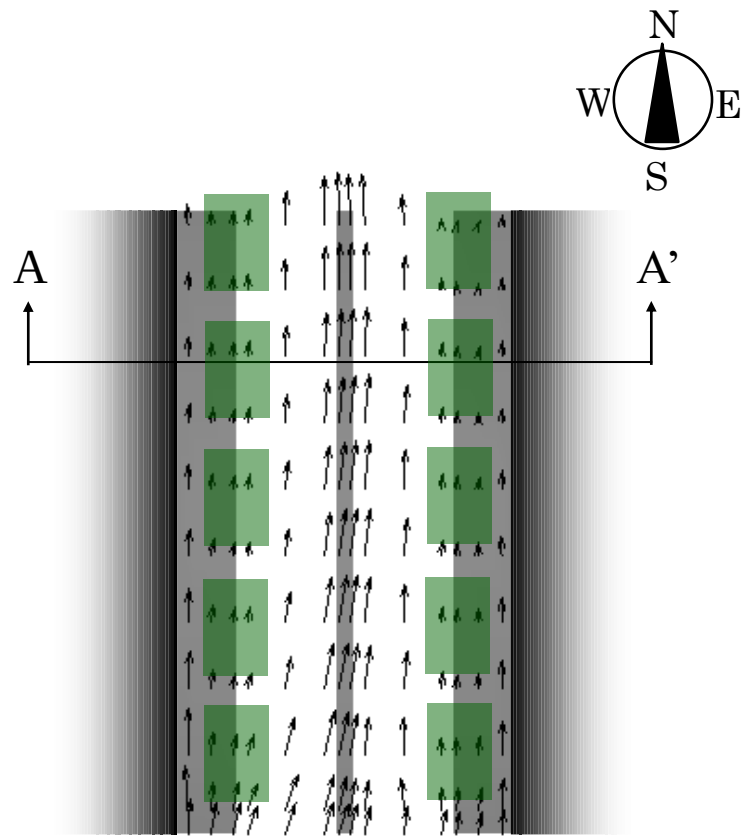
(1) 風速ベクトルの水平分布(高さ1.5m)



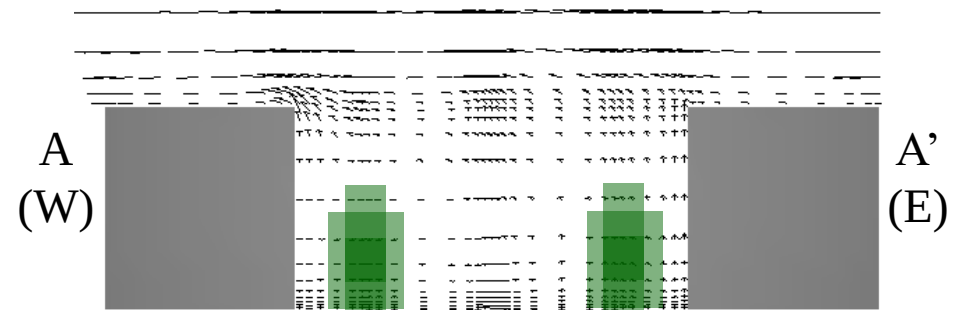
(2) 鉛直分布

多段階ネスティングの解析結果の例

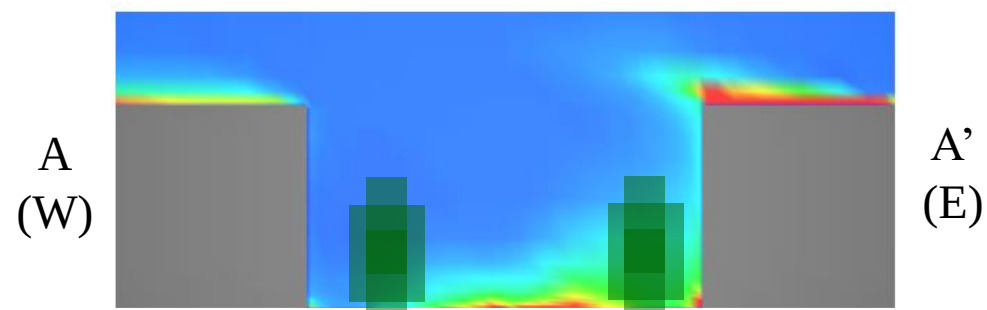
ミクروسケール (Grid E)



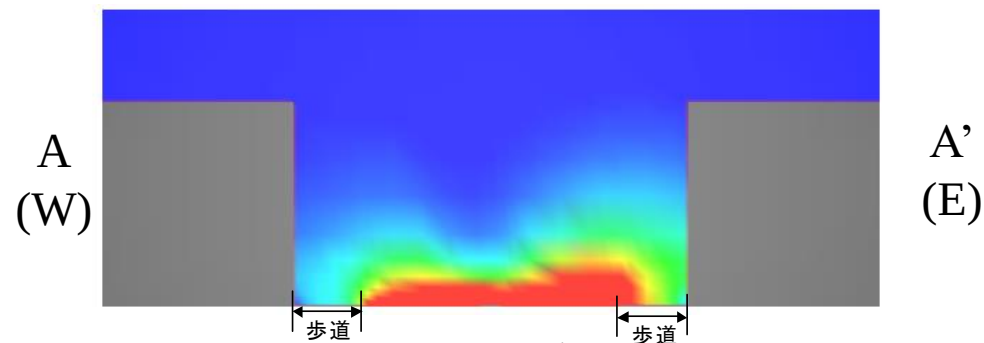
(1) 風速ベクトルの水平分布
(高さ1.5m)



風速ベクトル分布



気温分布



濃度分布

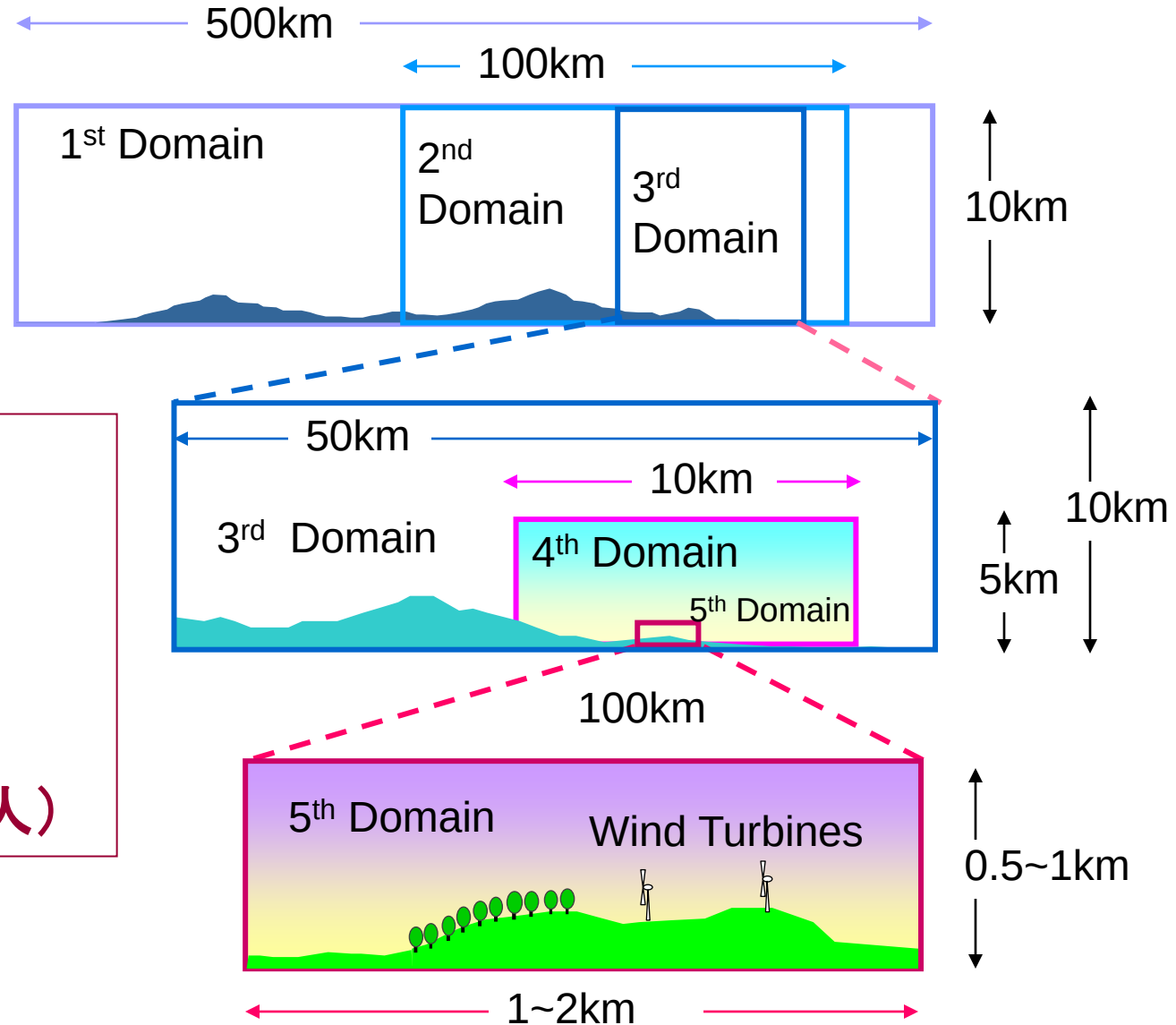
(2) 鉛直分布

4.1 環境工学分野助教授の時代（3）：

風力発電施設の立地選定のための局所風況予測システムLAWEPSの開発
(LAWEPS：Local Area Wind Energy Prediction System)（1999～2002年度）

- ヒートアイランド対策用から続いて風力エネルギー用のメソ・ミクロ接続のプロジェクトが始まった。
- 当時欧米で用いられていた風況予測モデルは、Jackson-Hunt の線形モデルに基づいていて、緩やかな地形変化を想定していて、崖のような急峻地形に適用できない。
- 急峻な崖地形を予測するノウハウがあるのがだれか？
⇒ 建物風上コーナ一部の流れの再現で苦勞してきた建築の奴らだ！
⇒ 当時は、建築のCFDの専門家というより、風上コーナ(front-step) 周りの乱流解析専門家として、乱流解析業界で認知されていたのかなと思う。

Five-stage Grid Nesting (One-way)



Leader: 村上周三

- ・日本気象協会
- ・加藤信介・持田灯(建築)
- ・長野靖尚(機械)(名工大)
- ・大林組(大塚清敏・片岡浩人)

長野先生等が提案したS-Ω model (5次領域) (白澤君、Isaac Lun さんがモデル評価に関与)

$$\nu_t = C_\mu k \tau_m \quad (\text{混合タイムスケールモデル})$$

Mixed time scale
Concept by Nagano & Hattori

A harmonic balance of τ_μ
(turbulence time scale) and τ_s (time
scale of mean velocity gradient)

$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_\mu} + \frac{C_s}{\tau_s} \right), \quad C_s = 0.4$$

Average of the reverse of two
value is equal to the reverse of τ_m

τ_μ , turbulence time scale
(usually used in k-ε model)

$$\tau_\mu = \frac{k}{\varepsilon}$$

τ_s , time scale of mean velocity gradient

$$\tau_s = \frac{2}{\sqrt{S^2} + \sqrt{\Omega^2}} \quad (\text{S - } \Omega \text{ model})$$

$$S^2 = S_{ij} S_{ij} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)$$

$$\Omega^2 = \Omega_{ij} \Omega_{ij} \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)$$

白澤多一君の博士論文（2004年度）「LESによる建物周辺の乱流構造の解析と混合時間スケール型k- ϵ モデルの評価」

倫裕發 (Isaac Lun)さんの博士論文（2004年度）「Modelling Airflow over Topographic Features Using Revised k- ϵ Models」

Yu Fat Lun, Akashi Mochida, Shuzo Murakami, Hiroshi Yoshino, Taichi Shirasawa, Numerical simulation of flow over topographic features by revised k- ϵ models, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91 (1-2), (2003), 231-245

Yu Fat Lun, Akashi Mochida, Hiroshi Yoshino, Shuzo Murakami, Applicability of linear type revised k- ϵ models to flow over topographic features, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 95 (5), (2007), 371-384

樹木の流体力学的効果を模擬する Tree Canopy モデル(5次領域)

(加藤(木村)敦子さん、岩田達明君の成果)

[連続式]

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0$$

[平均流の輸送方程式]

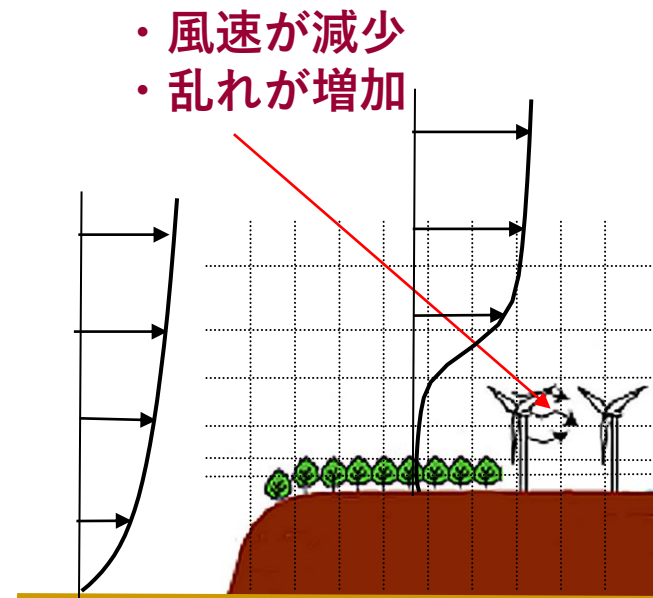
$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\langle p \rangle}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right\} - \underline{\underline{F_i}}$$

[kの輸送方程式]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon + \underline{\underline{F_k}}$$

[εの輸送方程式]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon) + \underline{\underline{F_\varepsilon}}$$
$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}$$



Canopy モデルとは？

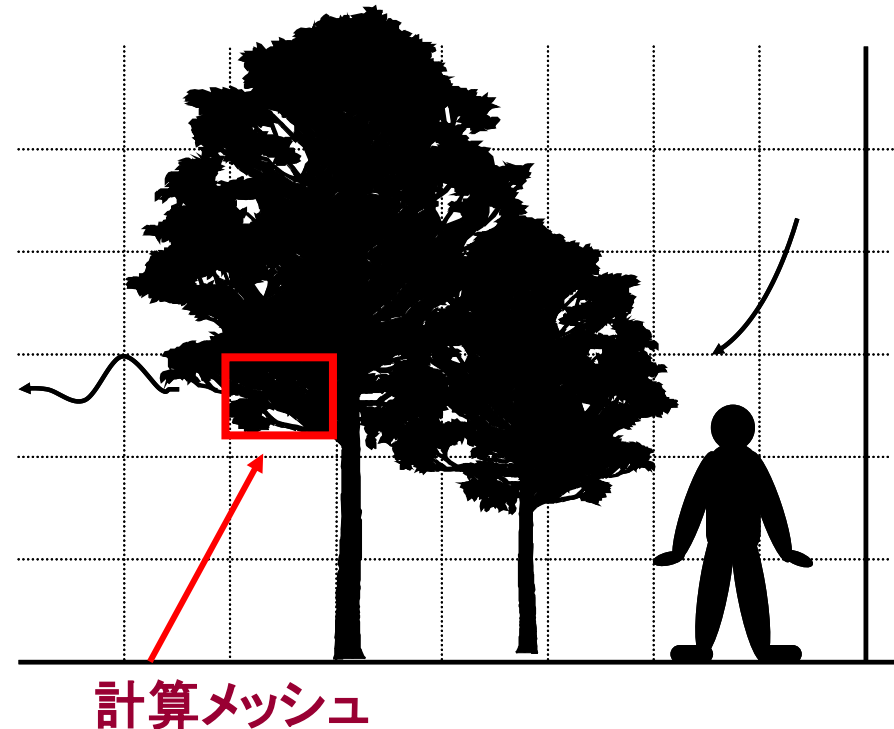
流体解析において固体境界の形状を逐一解析で再現するのではなく、
解析グリッド内で固体と流体が混在する状態を考え、
固体が流体に及ぼす影響を表現する項を基礎方程式に付加してその効果を再現するというアプローチ

微小な物体の形状
(例えば葉の一枚一枚)を計算メッシュで再現するのは、とても大変。



Canopy モデル

解析メッシュに含まれる葉の影響をまとめて、解析メッシュ毎に方程式に付加項を加える。



樹木の流体力学的効果を模擬する Tree Canopy (5次領域)

(加藤(木村)敦子さん、岩田達明君の成果)

- ・ 風速が減少
- ・ 乱れが増加

[連続式]

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0$$

[平均流の輸送方程式]

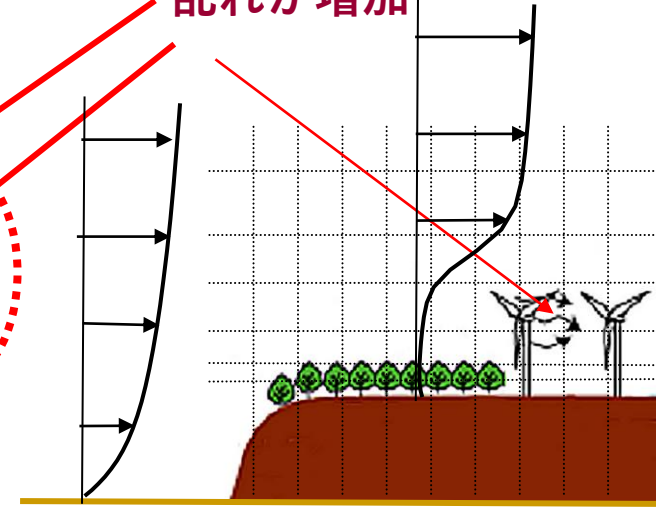
$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\langle p \rangle}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right\} - \underline{\underline{F_i}}$$

[kの輸送方程式]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon + \underline{\underline{F_k}}$$

[εの輸送方程式]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon) + \underline{\underline{F_\varepsilon}}$$
$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}$$



- ・ 葉の1枚1枚の形状まで正確に再現するのは困難。
- ・ 基礎方程式に気流障害物の影響を表す項を加える。

Shuzo Murakami, Akashi Mochida, Shinsuke Kato, Development of local area wind prediction system for selecting suitable site for windmill, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91 (12-15), (2003), 1759-1776

樹木の流体力学的効果を模擬するための付加項 F_i , F_k , F_ε

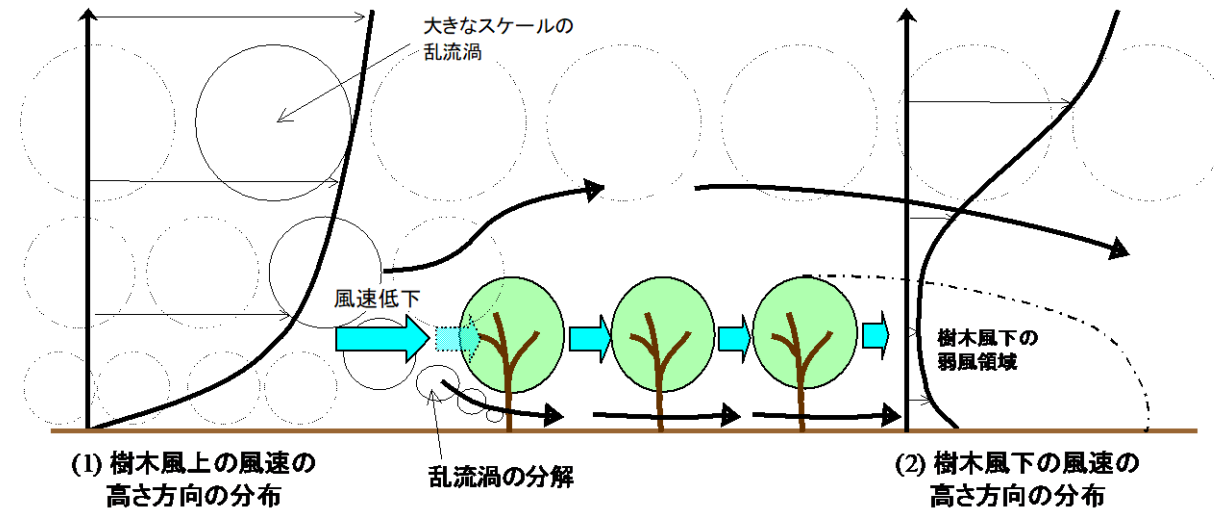
η : 木で覆われた領域の割合 (⇒実態に即して与えるべきもの)

a : 葉面積密度 (⇒実態に即して与えるべきもの)

C_f : 抗力係数 (⇒実態に即して与えるべきもの)

$C_{p\varepsilon 1}$ 樹木の影響で変化する乱流の時間スケールを規定するモデル係数
(⇒乱流モデルのモデル係数でチューニングが必要)

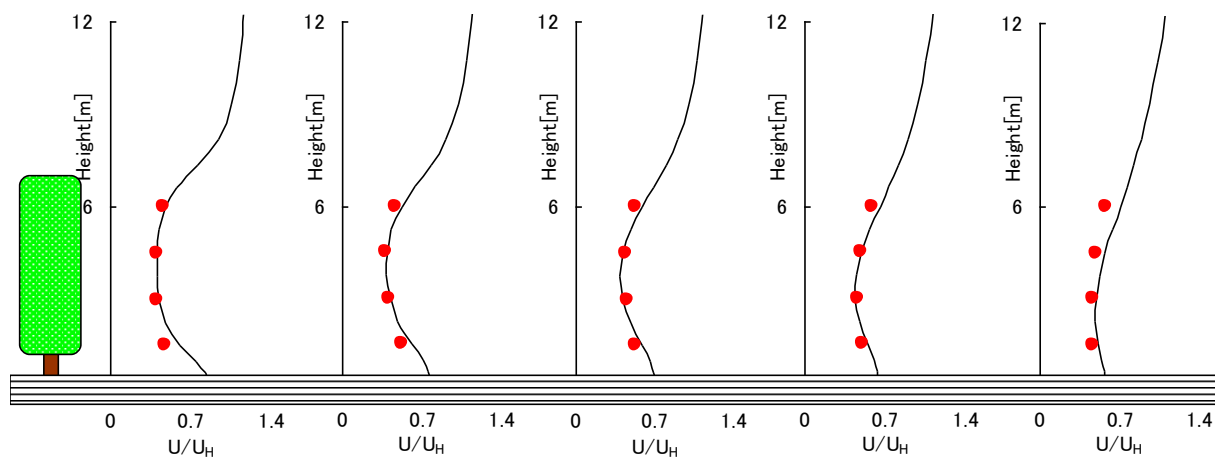
F_i	$\eta C_f a \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_j \rangle^2}$
F_k	$\langle u_i \rangle F_i$
F_ε	$\frac{\varepsilon}{k} \underbrace{C_{p\varepsilon 1}} \langle u_i \rangle F_i$



出雲地方の築地松後方の風速分布の比較 ($C_{p\varepsilon 1}=1.8$)



● measurement
— Type B model($C_{p\varepsilon 1}=1.8$)

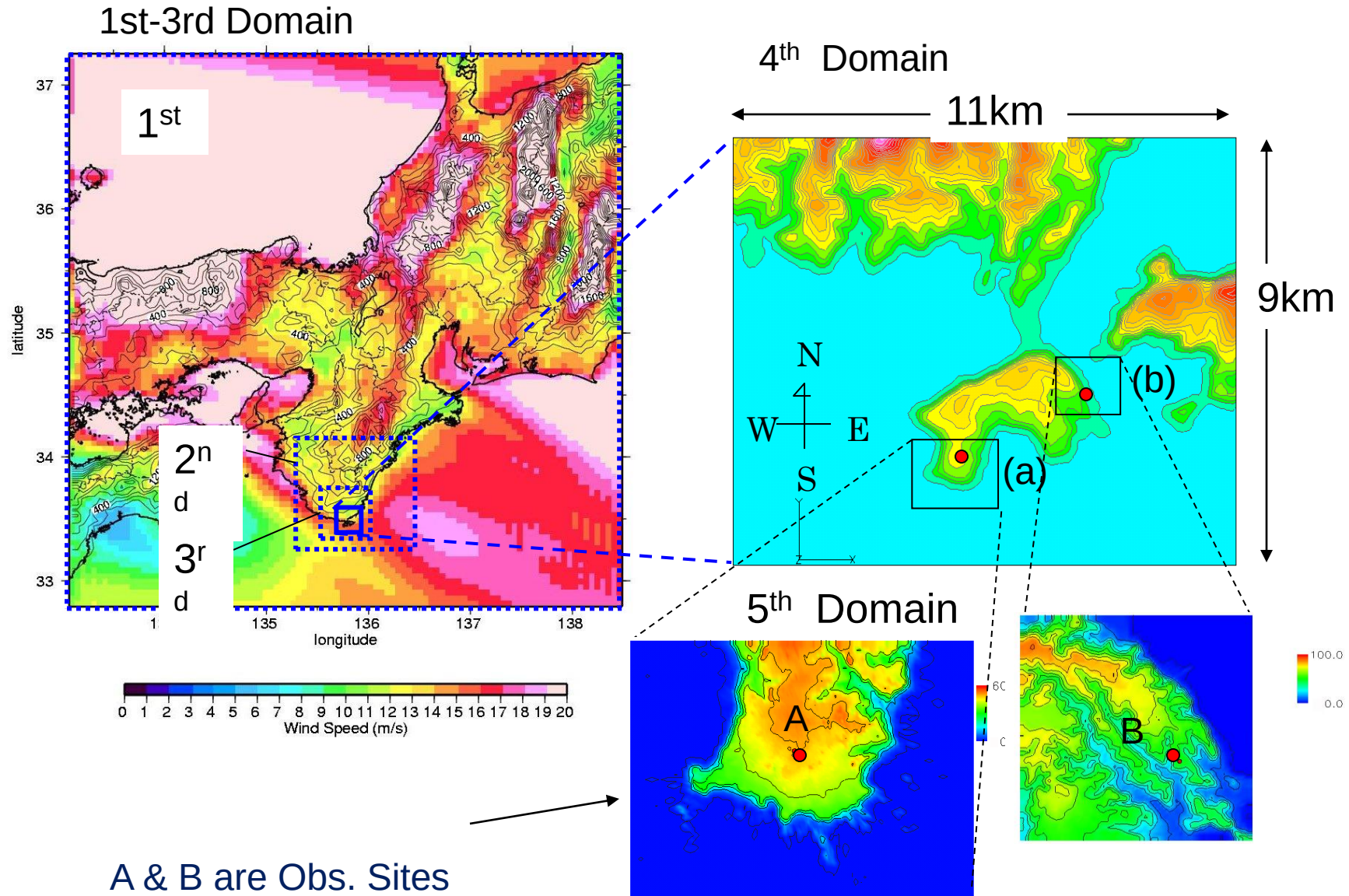


Akashi Mochida, Yuichi Tabata, Tatsuaki Iwata, Hiroshi Yoshino, Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 96 (10-11), (2008), 1667-1677

潮岬で観測データを取得しモデルの精度を検証



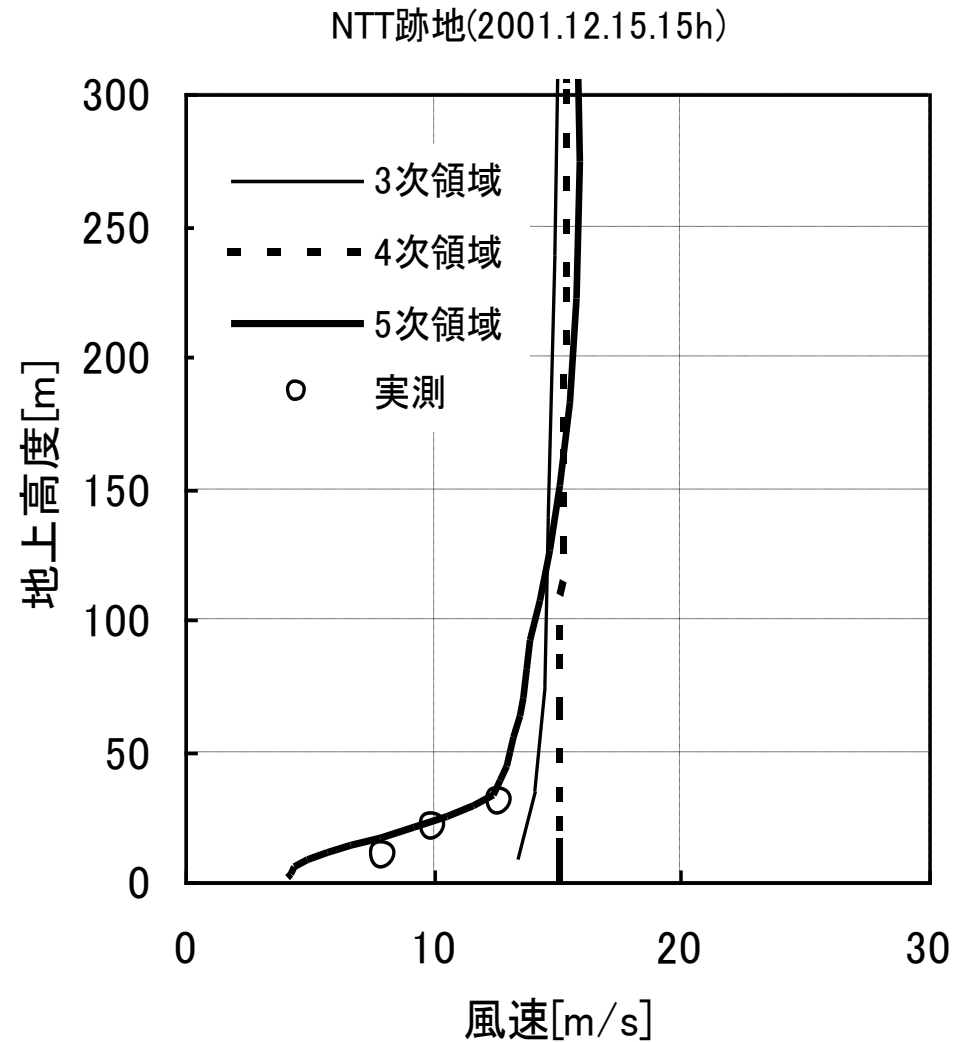
潮岬で観測データを取得しモデルの精度を検証



A & B are Obs. Sites

Doppler Sodar Observations are done at site B

潮岬における計算結果(5次領域で樹木Canopyあり)

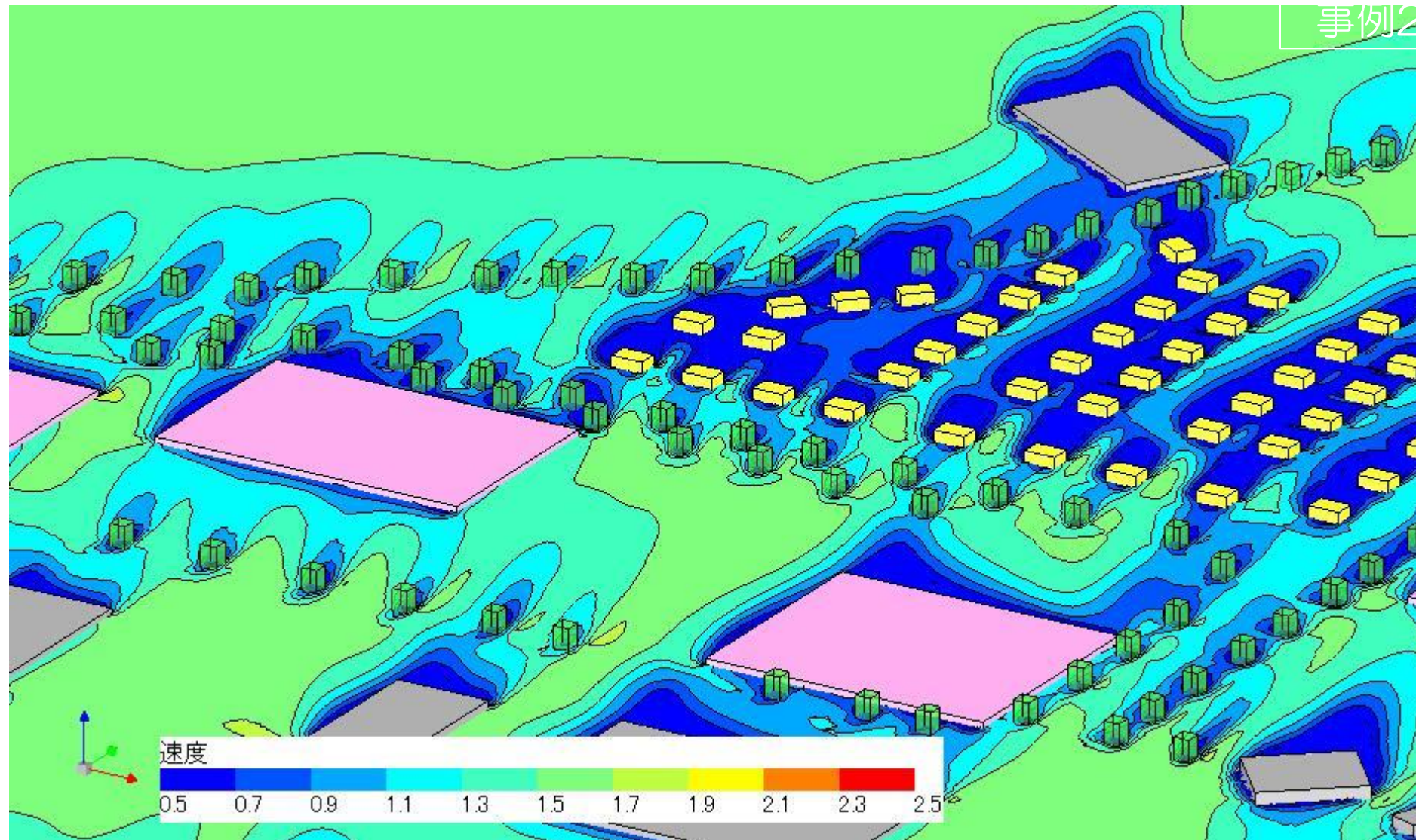


風速の鉛直分布の比較 (2000年, 9月2日, 15:00)

局所風況予測のためにチューニングした樹木Canopy モデル、その後

①田子西スマートヴィレッジプロジェクト

- 2011年の震災後の田子西スマートヴィレッジプロジェクトに関連して、小野田先生から協力要請を受ける。
- 商用CFDソフトのFlow Designerに我々の樹木Canopyを組み込んで貰い、小野田研の学生がいろいろなケーススタディを実施（乱流モデルも標準 $k-\varepsilon$ から改良型の $k-\varepsilon$ へ）。



田子西地区スマートブリッジ街区 配置計画シミュレーション
東北大学小野田研究室＋持田研究室、国際航業(株)



S市街区計画

藤野高志・高橋一平・小野田泰明

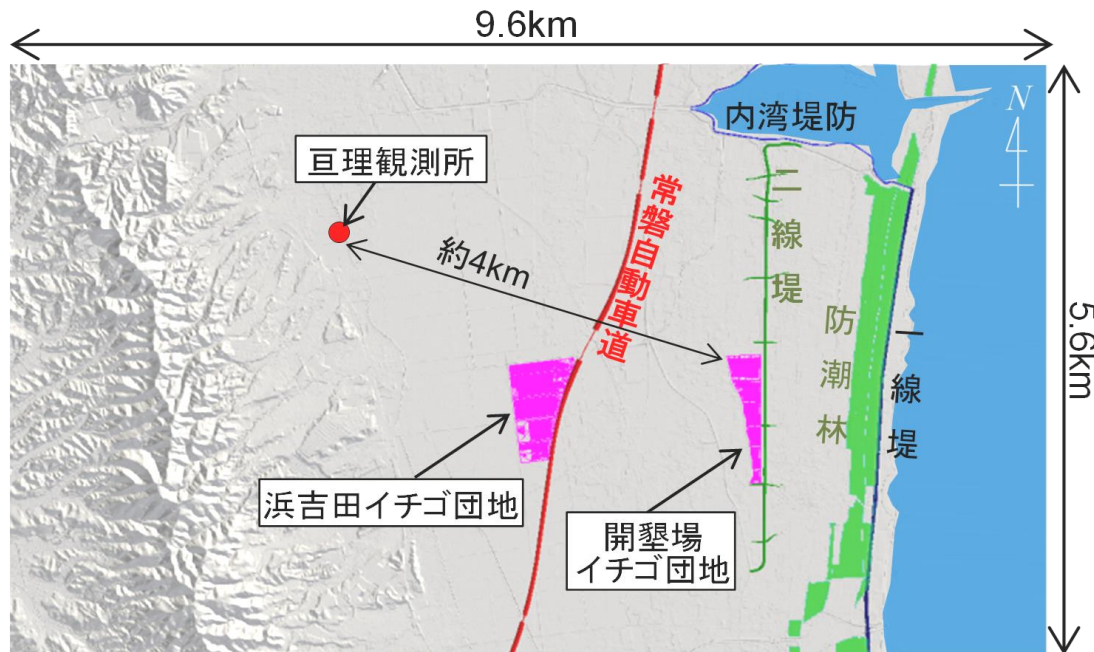
写真提供:新建築写真部

局所風況予測のためにチューニングした樹木Canopy モデル、その後

②震災で防潮林が消失した仙台平野の農地の風環境と飛砂発生の予測

CWE × 農学 = CFD × 風工学 × 農学

- 東日本大震災の津波被害による防潮林の消失により、沿岸部の農地の風環境が変化。さらに、嵩上げされる防潮堤及び内陸に新設予定の2線堤も風環境を更に変化させることが懸念された。
- これらが、仙台平野の農地に及ぼす影響を分析した。



農林水産省の減災・防災システムの
開発・実証研究委託事業

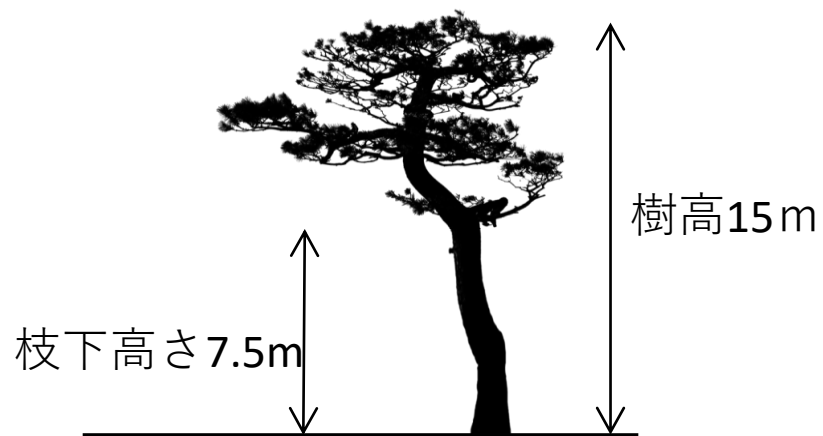
「被災地域の持続的発展のための合
意形成手法の実証研究」

代表: 米澤千夏先生 (東北大・農学研究科)

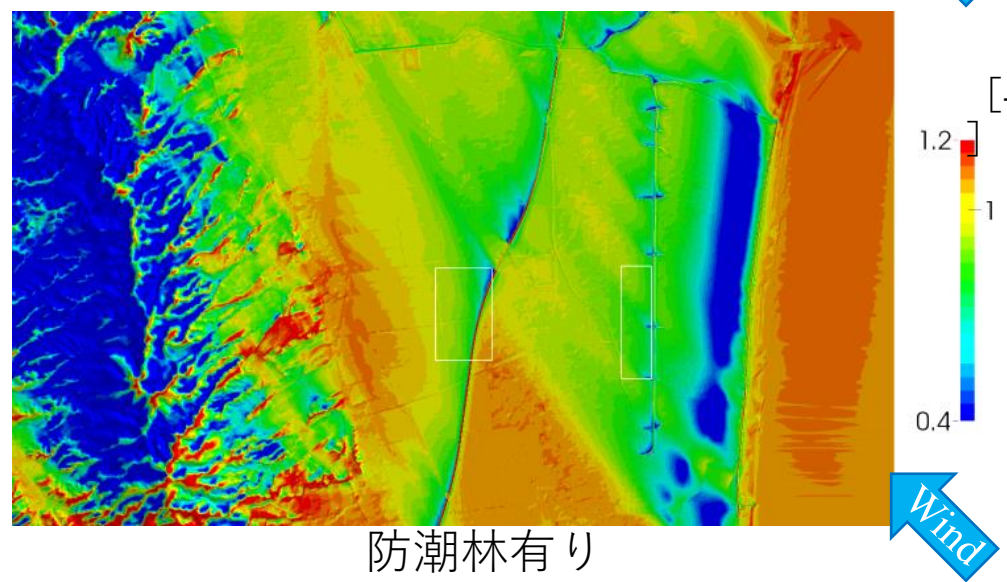
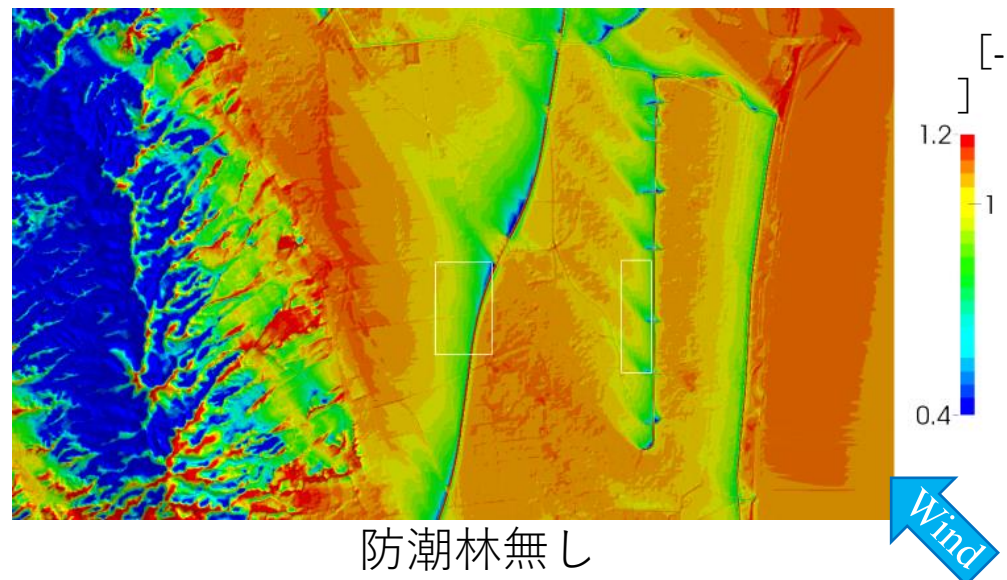
(2014年度・2015年度)

地上1.5mの平均風速分布(夏季の卓越風:南東風)

- 防潮林の有無により沿岸付近の風速は大きく変化。
- 消失により大きく増加、



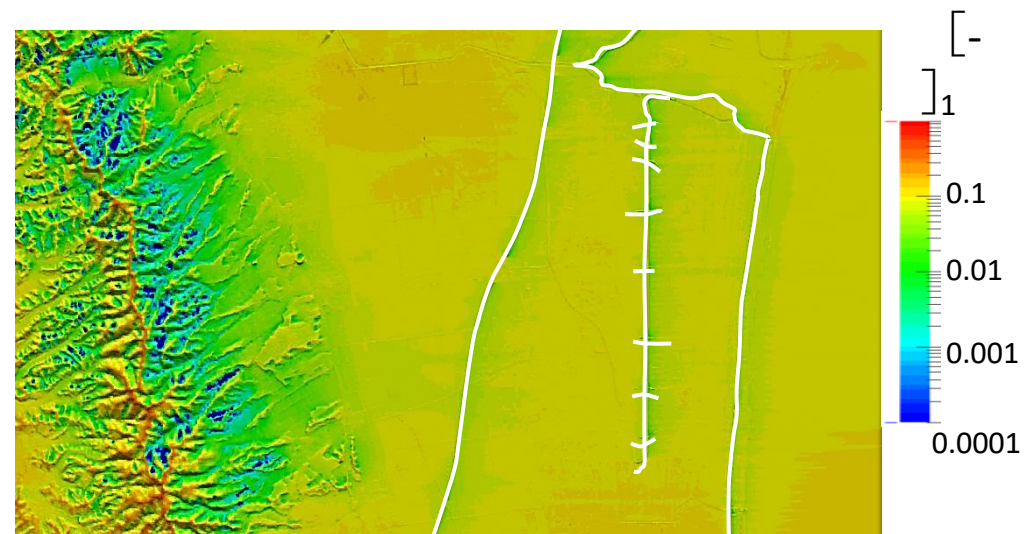
防潮林は40年後の十分に成長した黒松を想定し、樹高15m、枝下高さ7.5mとした



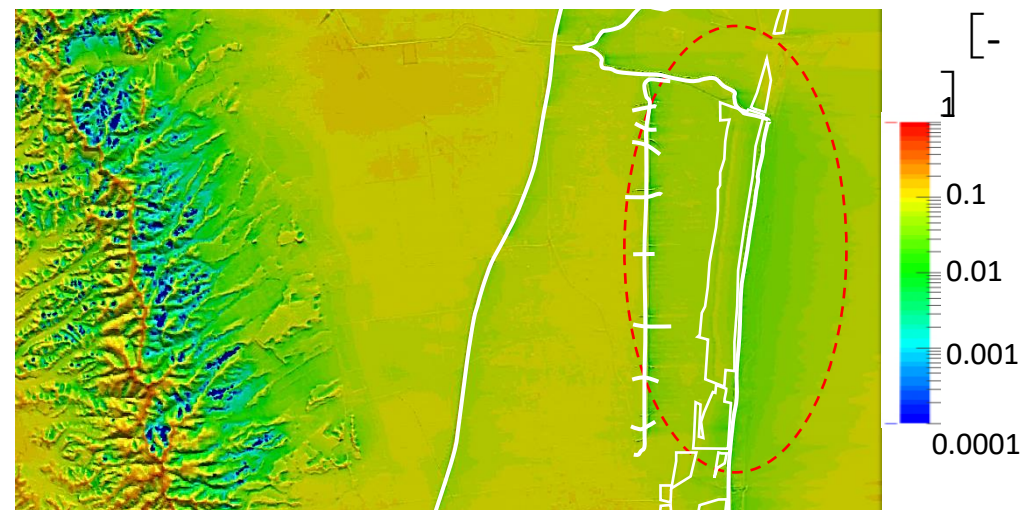
飛砂発生風速の超過確率分布の算出

- 飛砂発生が始まる平均風速を5m/sと想定し、平均風速を5m/sを超える確率（超過確率）の空間分布を算出。
- 防潮林の消失により飛砂発生風速を超える風速の発生頻度が年間で1%→10%程度に増加した領域も見られる。

**局所風況予測モデルの開発の際に
チューニングした樹木モデルと中条
中核工業団地の時の経験が活かして
よかった！**



防潮林無し



防潮林有り

4.1 環境工学分野の助教授時代（1999～2006頃）（一部、研究終了時期が教授になってからのものも含む）

(1) 赴任当初の様子

＜赴任前から抱えていた対外的commitments＞

(2) ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合評価のためのSoftware Platformの開発

(3) 風力発電最適立地選定のための局所風況予測システムLAWEPSの開発

(4) 流体数値解析（CFD）による風環境評価のためのガイドブックとガイドライン

＜ここからが、東北大での研究＞

(5) 仙台中心市街地の温熱空気環境実測-定禅寺通りの街路樹の効果-

(6) 原町環境調和まちづくり研究と市街地温熱環境実測

(7) 沿岸都市仙台の熱収支分析と熱収支Map の作成（これは、最初は生研グループと共同）

(8) その他の助教授時代の研究

4.1 環境工学分野助教授の時代（4）：

流体数値解析（CFD）による風環境評価のためのガイドブックとガイドライン

- 2000年代に入り、CFDで多くのビル風のアセスメントの実務計算が実施されるようになった（大半が、 $k-\varepsilon$ 系のモデルによる）。
- これに伴い、怪しげな結果も出まわるようになり、ガイドライン・ガイドブックの必要性が指摘された。

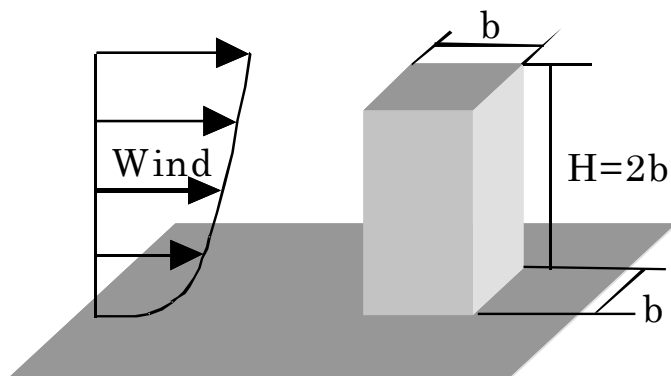
流体数値計算による風環境評価ガイドライン検討WG委員名簿

持田 灯(主査)	東北大学
富永禎秀(幹事)	新潟工科大学
石原孟	東京大学
上原清	国立環境研究所
浦野明・張本和芳・吉川優	大成建設(株)
大岡龍三・石田義洋	東京大学生産技術研究所
片岡浩人	(株)大林組
倉渕隆	東京理科大学
小林信行・義江龍一郎	東京工芸大学
土屋直也	(株)竹中工務店
日比一喜・野津剛	清水建設(株)
野々村善民	(株)フジタ
村上周三	慶應義塾大学
山中徹・高木賢二	鹿島建設(株)
白澤多一(専門委員、副幹事)	東京工芸大学

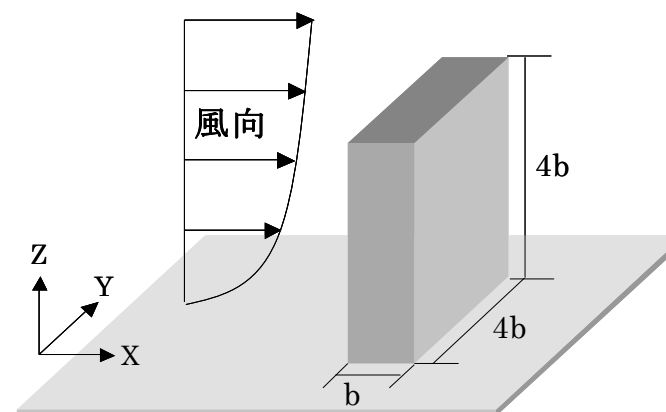
主査：持田， 幹事：富永先生

**メンバーは大学とゼネコンの研究所、国の研究機関から。
7つのテストケースに対するベンチマークテストを実施。**

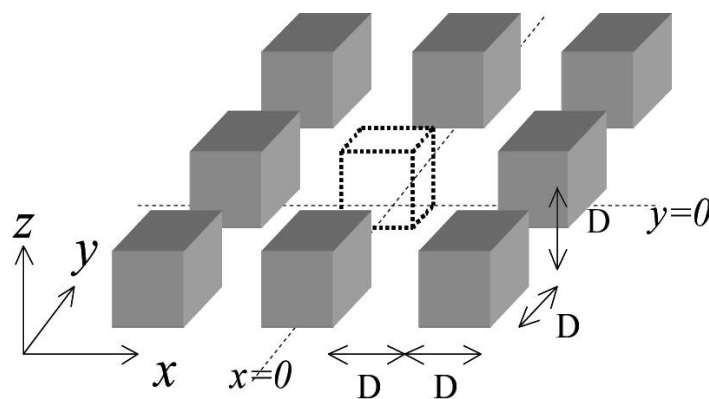
ベンチマークテストの対象(1/2)



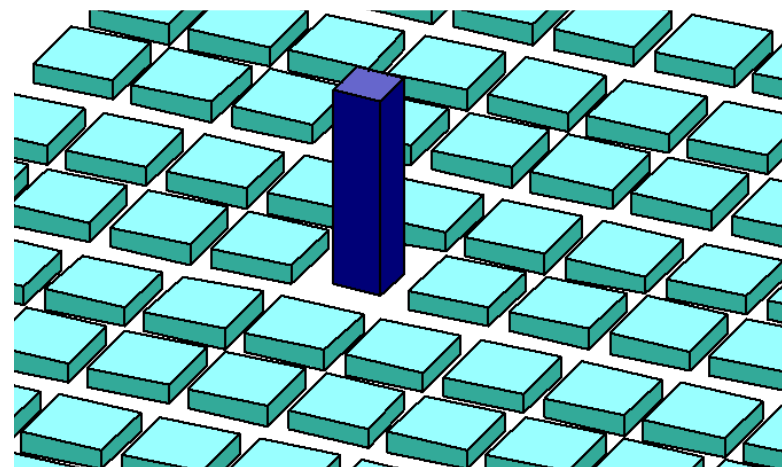
Test Case A 2:2:1角柱モデル



Test Case B 4:4:1角柱モデル

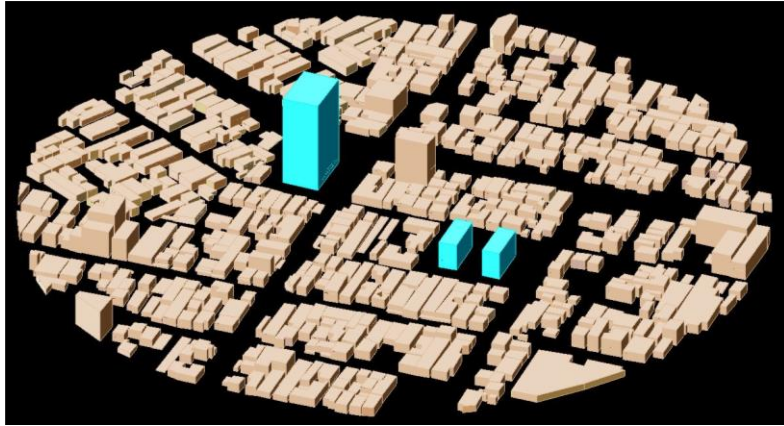


Test Case C 単純建物群モデル

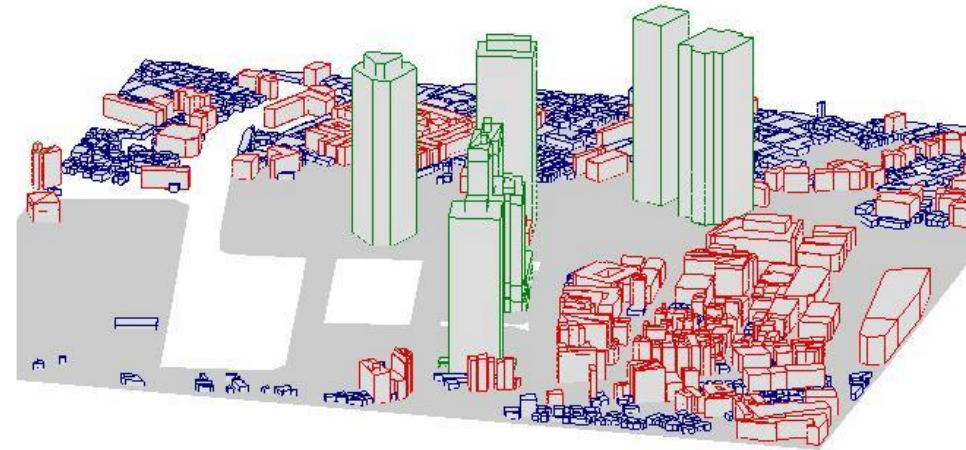


Test Case D 街区モデル

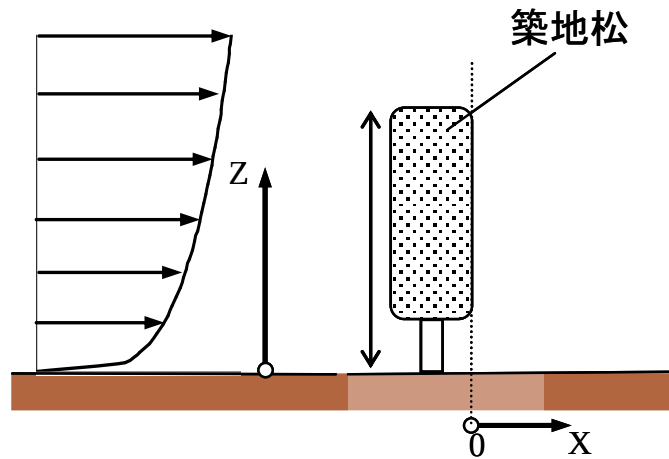
ベンチマークテストの対象 (2/2)



Test Case E 実在市街地モデル (新潟市)



Test Case F 実在市街地モデル (新宿)



Test Case G 築地松 (島根大の黒谷先生の測定)

日本建築学会“CFDによる風環境予測のためのガイドブック”（2007）

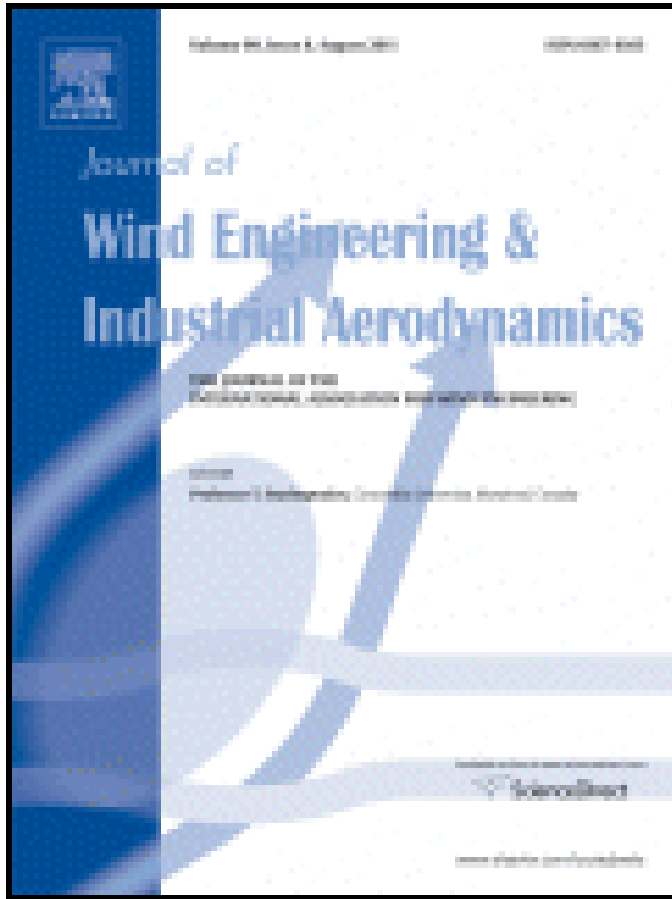


第Ⅰ編 風環境の予測・評価と流体解析技術の解説

第Ⅱ編 ベンチマークテストの結果

第Ⅲ編 市街地風環境予測のための流体数値解析利用に関するガイドライン

- 計算領域及び周辺地物の再現範囲
- メッシュ分割
- 境界条件
- 計算アルゴリズム・離散化手法
- 解の収束
- 乱流モデル
- 解析結果の検証
- 結果の表示方法



ベンチマーク:テストに基づき作成したガイドラインを論文化して、Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamicsで発表。

Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa, T. Shirasawa, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, Vol. 96, pp 1749-1761, 2008

=>この論文は、びっくりするほどの大ベストセラーになった。

Scopus上でのScore (2024.3.5) は、被引用件数1725(Top 1%), FWCI=16.07

ベンチマークテストの結果に関する論文

R. Yoshie, Akashi Mochida, Y. Tominaga, H. Kataoka, K. Harimoto, T. Nozu and T. Shirasawa, Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 95 (9-11), (2007), 1551-1578

Scopus上でのScore (2024.3.5) は、被引用件数372(Top 5%), FWCI=4.13

Yoshihide Tominaga, Akashi Mochida, Shuzo Murakami, Satoshi Sawaki, Comparison of various revised k- ϵ models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed with in the surface boundary layer, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 96(4), (2008), 389-411

Scopus上でのScore (2024.3.5) は、被引用件数317(Top 2%), FWCI=8.13

Akashi Mochida, Isaac T. F. Lun, Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 96 (10-11), (2008), 1498-1527

Scopus上でのScore (2024.3.5) は、被引用件数263(Top 3%), FWCI=5.35

何故上手く行ったのか？

⇒一度、共著者の皆さんと議論してみたい。

①（当時の）日本のゼネコンの底力

外国では、これだけの検証例題の検討を行うのは無理

⇒研究委託すれば億単位の手間。

② Lobbying の成功

Guidelines 作成過程から Stathopolous 先生に相談に載って貰っていた。

また、各委員が、積極的に海外発信した。

③ 風洞実験とCFDの両方を分かっている委員が多く、過度に厳しい要求をせず、バランスの取れた内容だった、等々

⇒しかし、今振り返ると、一番の勝因はメンバーの人選
(優秀で意欲的なメンバーが集まった) だと思います。

4.1 環境工学分野の助教授時代（1999～2006頃）（一部、研究終了時期が教授になってからのものも含む）

（1）赴任当初の様子

<赴任前から抱えていた対外的commitments>

- （2）ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合評価のためのSoftware Platformの開発
- （3）風力発電最適立地選定のための局所風況予測システム~~LAWEPS~~の開発
- （4）流体数値解析（CFD）による風環境評価のためのガイドブックとガイドライン

<ここからが、東北大での研究>

（5）仙台中心市街地の温熱空気環境実測-定禅寺通りの街路樹の効果-

- （6）原町環境調和まちづくり研究と市街地温熱環境実測
- （7）沿岸都市仙台の熱収支分析と熱収支Map の作成（これは、最初は生研グループと共同）
- （8）その他の助教授時代の研究

4.1 環境工学分野助教授の時代（5）：

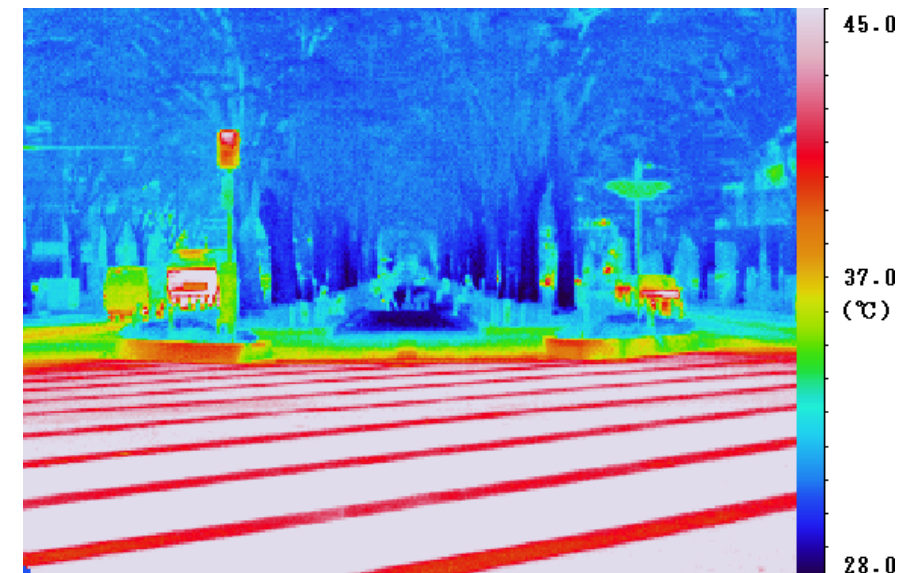
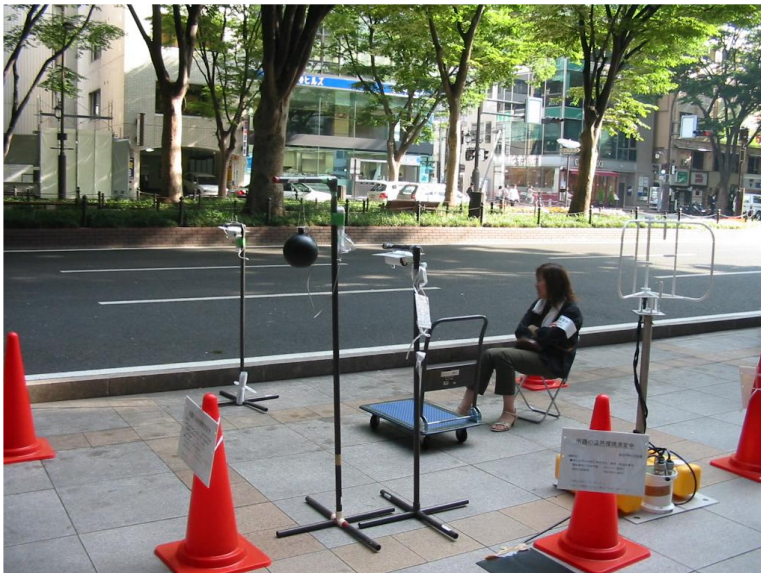
仙台中心市街地の温熱空気環境実測-定禅寺通りの街路樹の効果-

- 2004年と2006年に、東北工業大学の渡辺研と東北大学の地理が専門の境田研と共同で、仙台中心市街地の実測を行うことができた。

第1回⇒2004年の幡谷(野崎)尚子さんの卒論

第2回⇒2006年の菊池(粕谷)文さんの卒論&幡谷(野崎)尚子さんの修論の一部

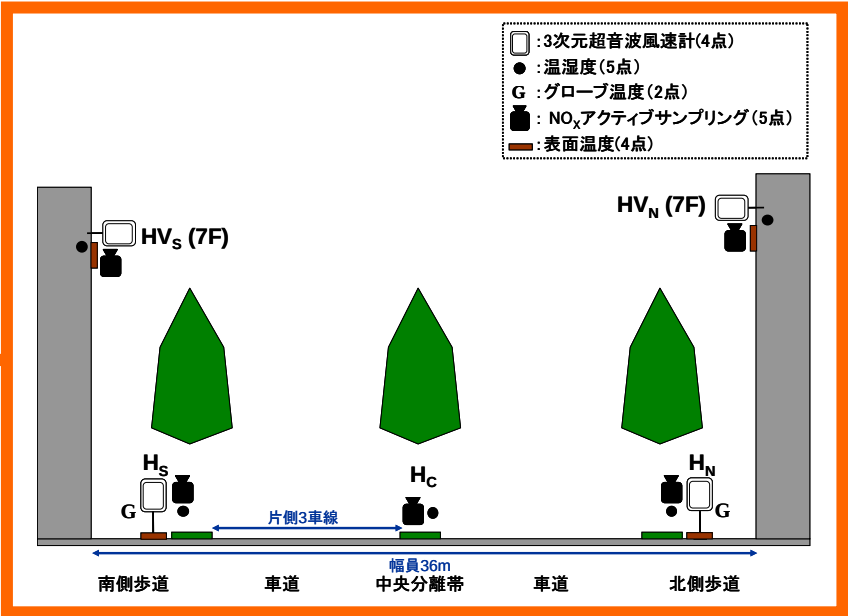
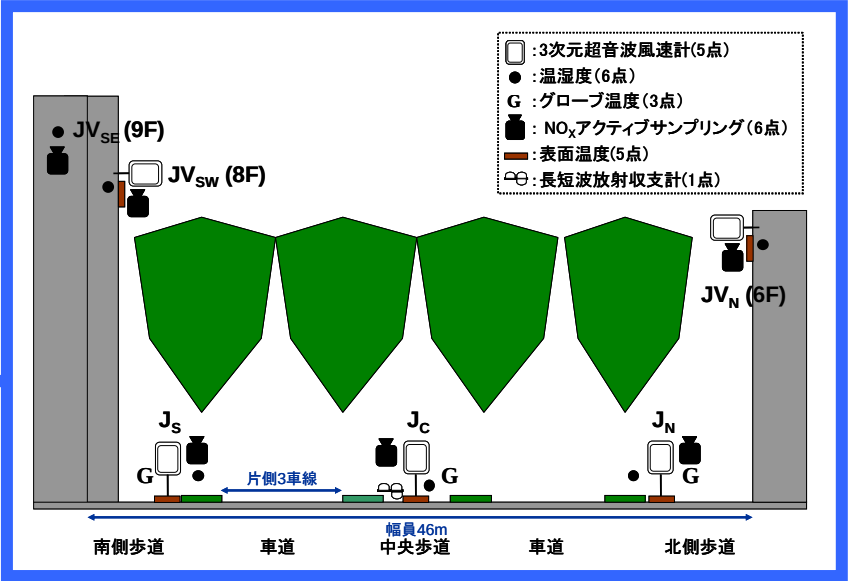
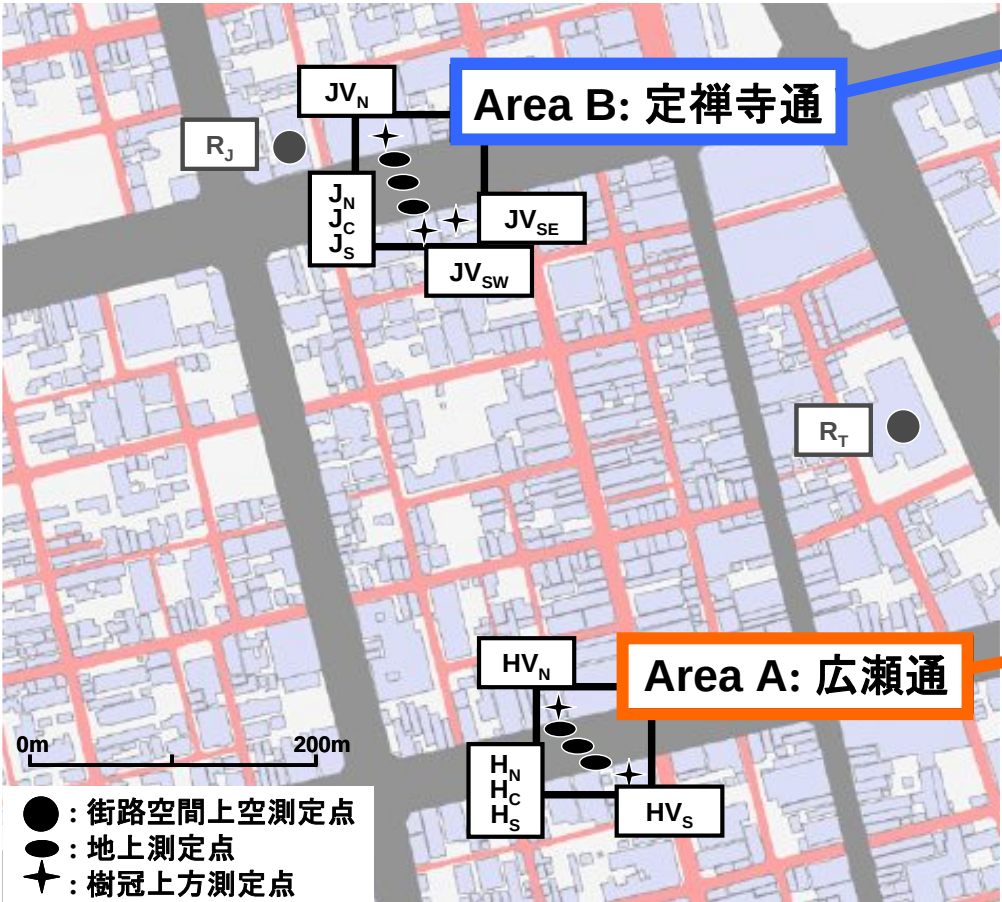
- 非常に大規模な実測(測定中にNHKのローカル番組(てれまさむね)の取材が来るほど)となった。
実現できたのは幡谷(野崎)さんの行動力とリーダーシップのおかげ。



2006年の第2回実測の概要（2006年8月9日～11日）

測定項目

- 風環境（風速、風向）
- 温熱環境（気温、相対湿度、表面温度...）
- 空気環境（NO_x濃度）
- ...etc.



歩行者の温熱快適性の評価

○ 新標準有効温度SET*（体感温度）の比較

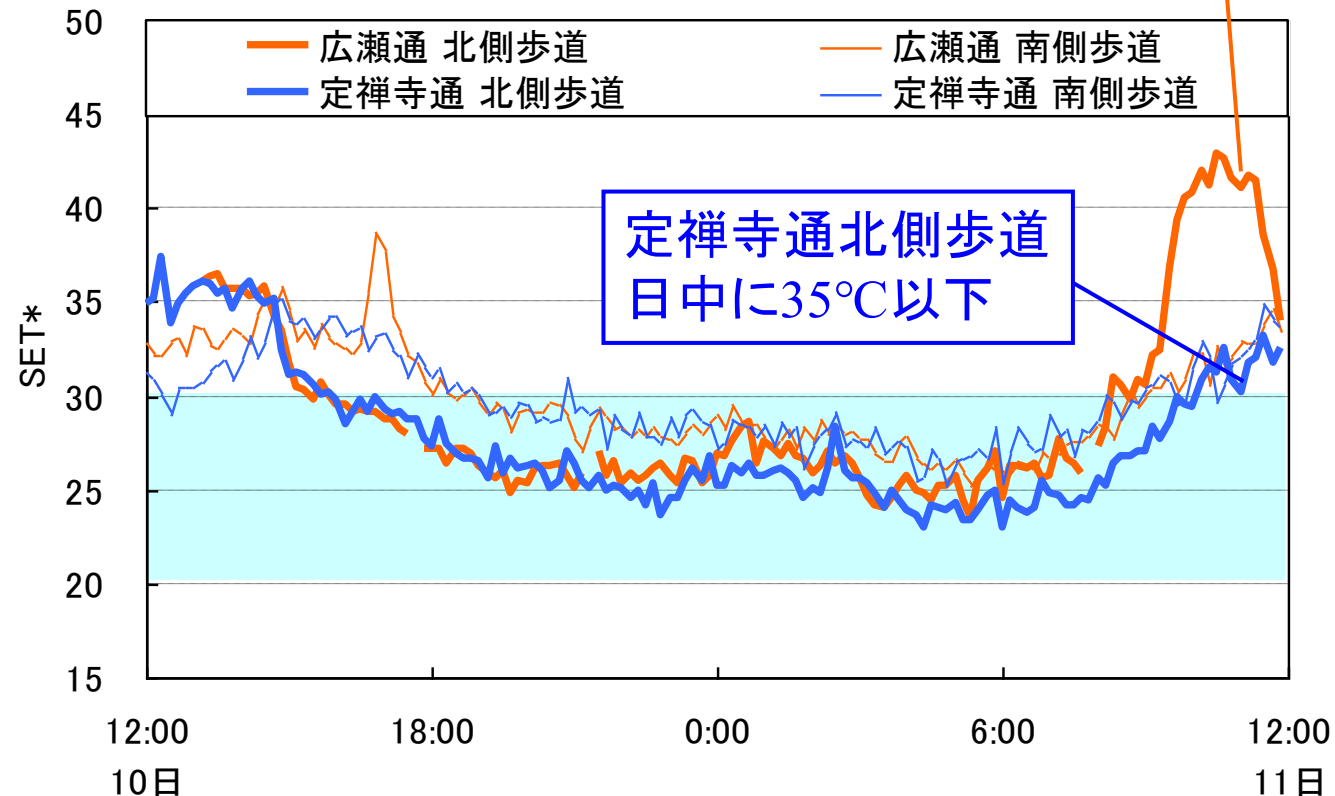
※ SET* : 20~30℃（図中の水色部分）のときが快適範囲。



広瀬通

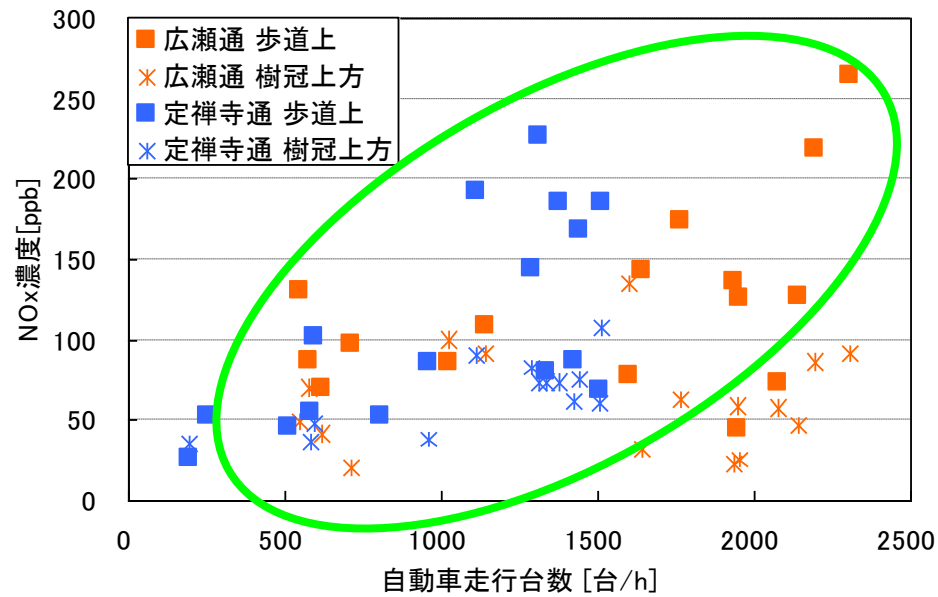
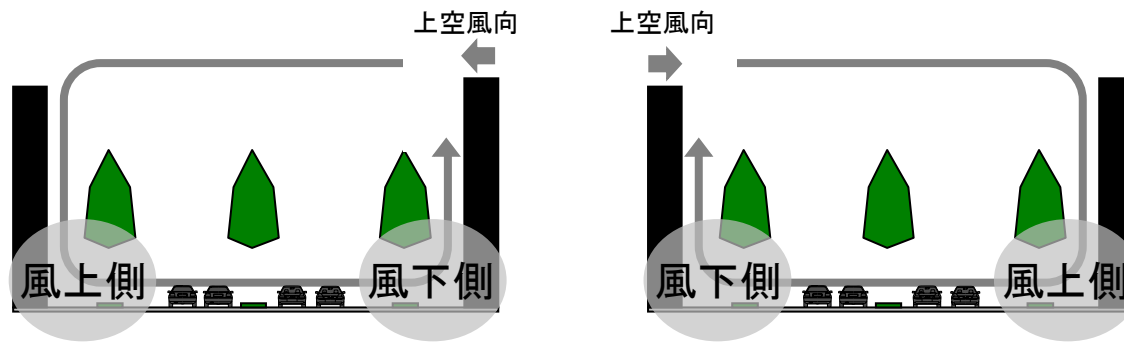


定禅寺通

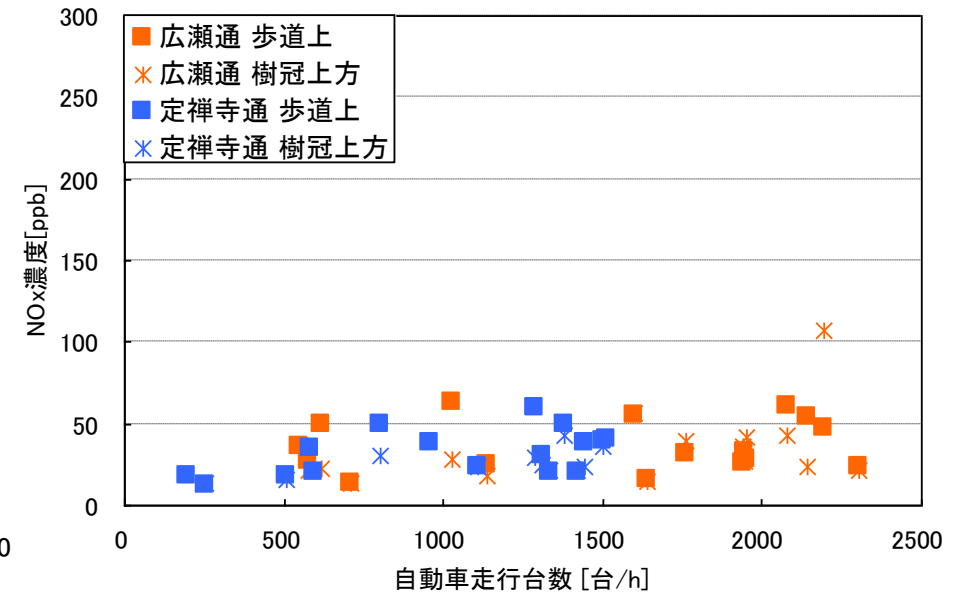


2006年8月10～11日

自動車走行台数とNO_x濃度の関係



循環流の風下側

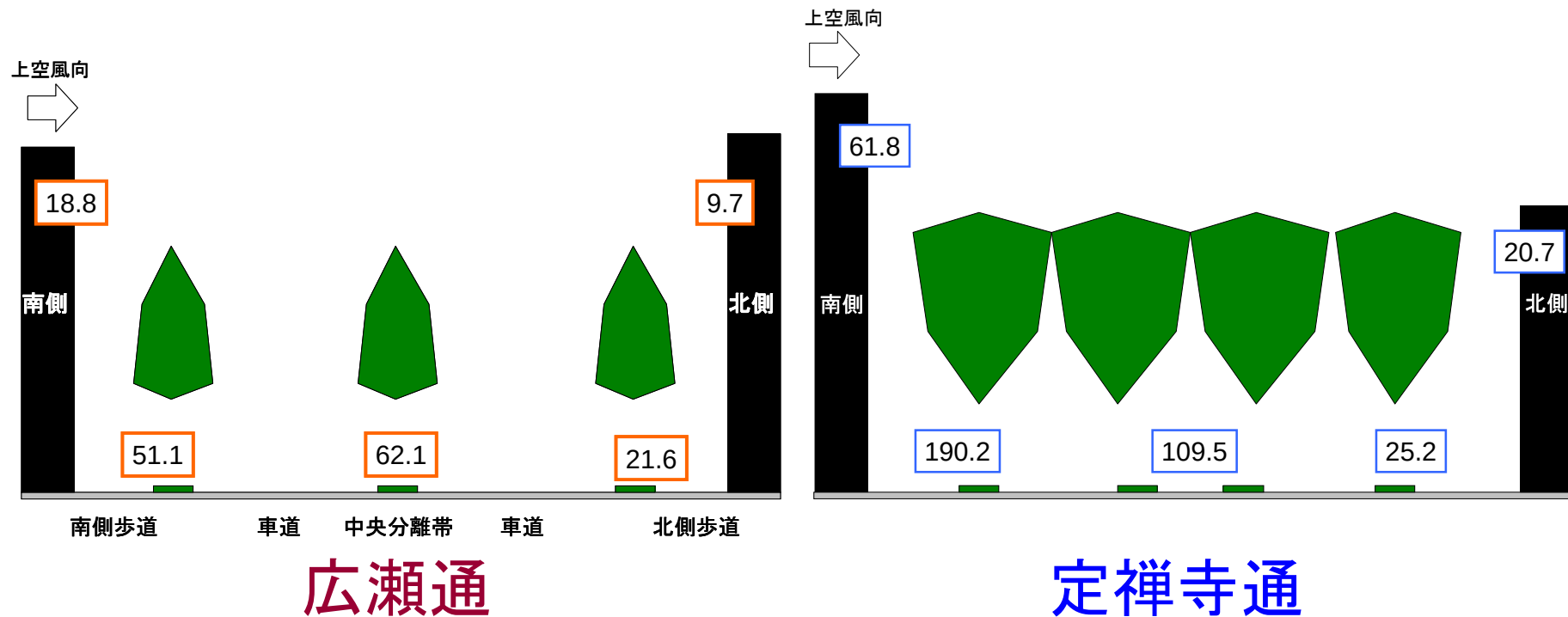


循環流の風上側

街路樹による空気環境悪化の助長

○ 基準化されたNO_x濃度の比較 (単位: [$\times 10^{-5}$ m³/台])

※ 風速が1m/s、自動車走行台数が1台/sのときの濃度に換算

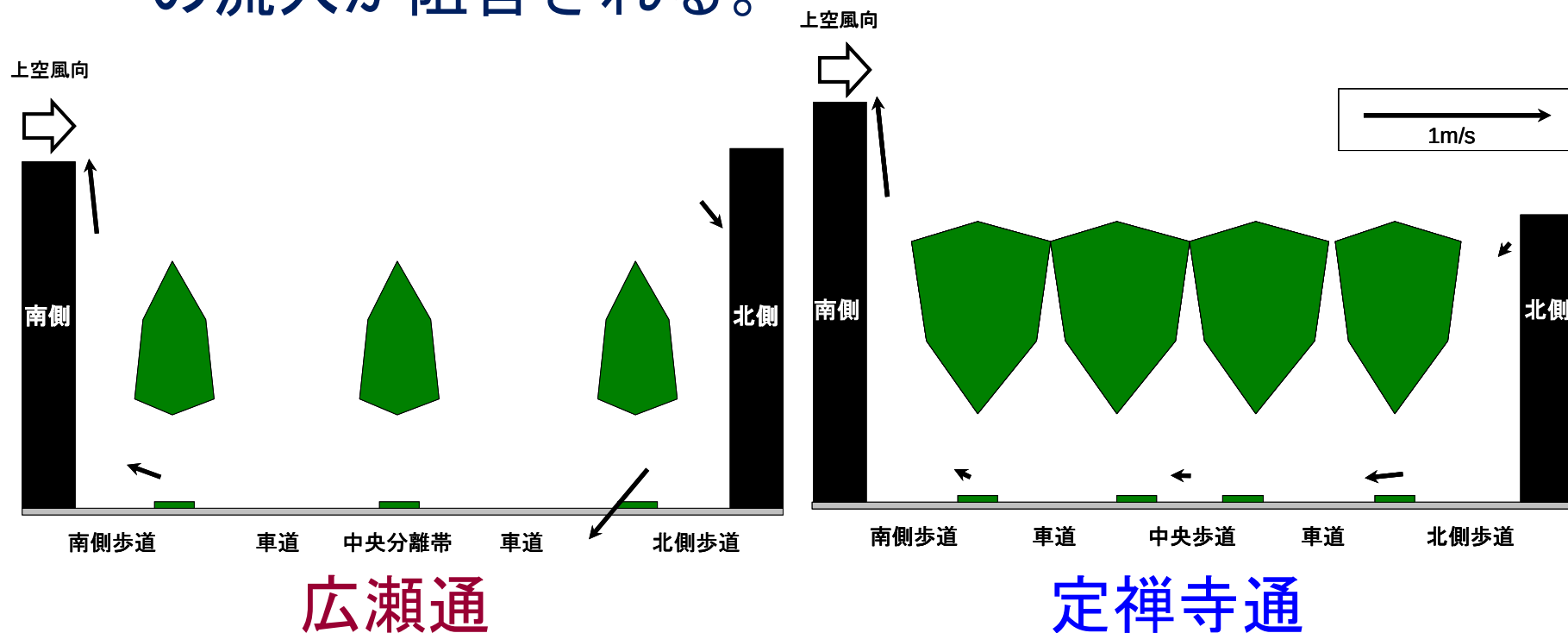


2006年8月11日8:00~9:00

街路樹による空気環境悪化の原因 1)

街路樹があると、なぜ NO_x 濃度が上昇するのか？

- ① 街路樹が風の道の障害物となり、上空からの新鮮空気の流入が阻害される。



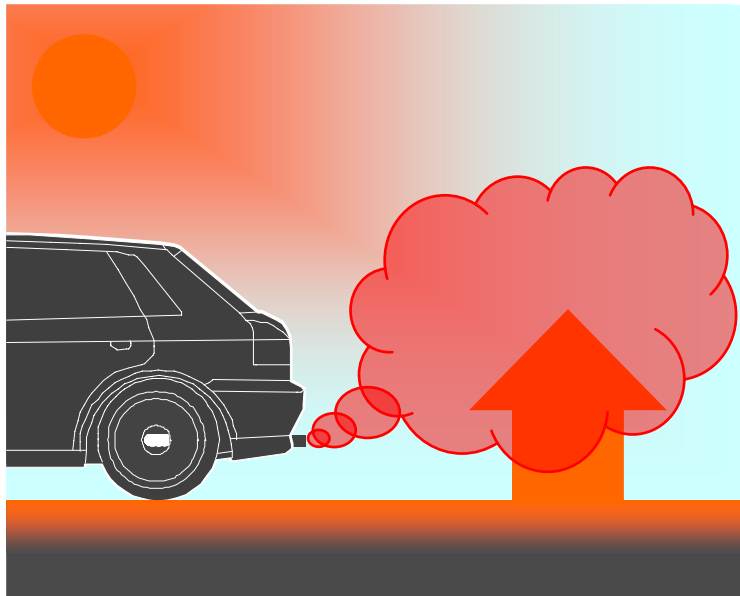
鉛直断面における風速ベクトル(2006年8月11日8:00~9:00の平均値)

街路樹による空気環境悪化の原因 2)

街路樹があると、なぜ NO_x 濃度が上昇するのか？

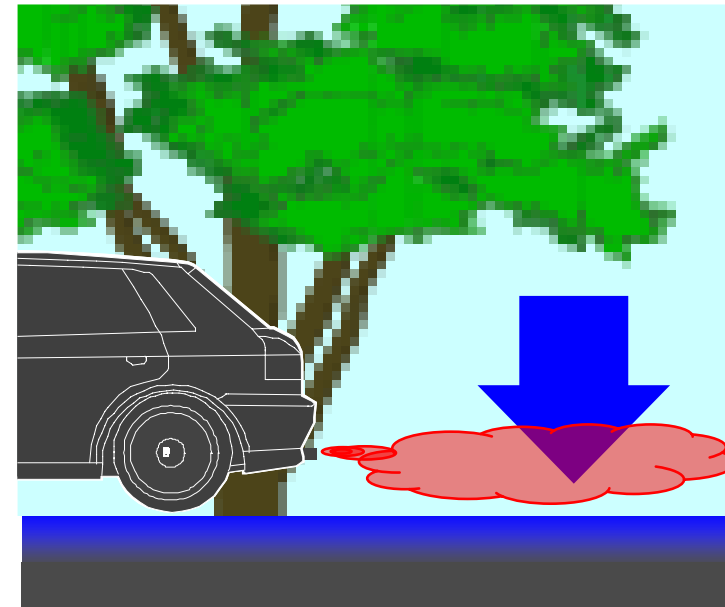
② 緑陰の影響で局部的に大気が安定化し、大気の混合が起こりにくくなる。

(1) 街路樹がない場合



- 道路表面付近の大気が日射で加熱され、高温となる。

(2) 高密度の街路樹がある場合



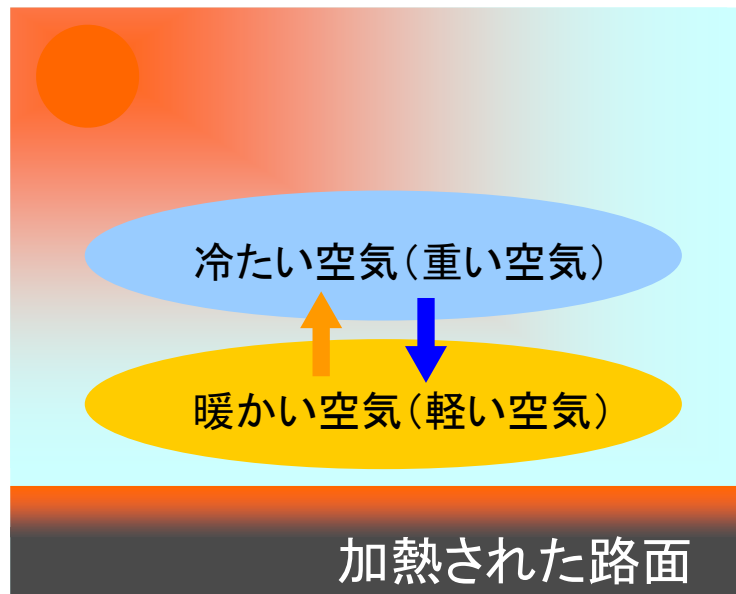
- 道路表面付近の大気が緑陰の影響で低温に保たれる。

街路樹による空気環境悪化の原因 2)

街路樹があると、なぜ NO_x 濃度が上昇するのか？

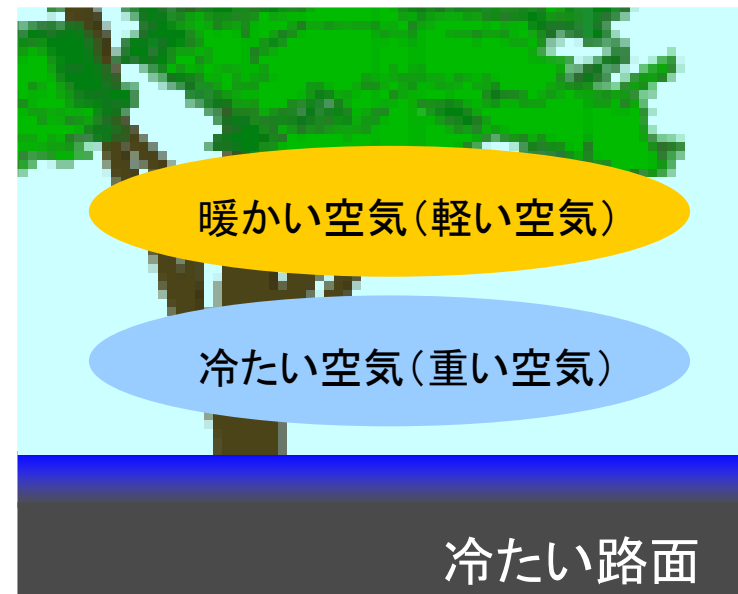
② 緑陰の影響で局部的に大気が安定化し、大気の混合が起こりにくくなる。

(1) 街路樹がない場合



- ・ 上下方向の混合が促進される。
(不安定な大気の状態)

(2) 高密度の街路樹がある場合



- ・ 上下方向の混合が生じにくい。
(大気が局所的に安定化している)

街路樹が乱流エネルギー k の輸送方程式の浮力生産項 G_k に及ぼす影響

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \underbrace{-\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}}_{P_k} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \langle u'_i u'_i u'_j \rangle + \frac{1}{\rho} \langle p' u'_i \rangle \right)}_{P_k} + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2}}_{P_k} - \underbrace{\beta g_i \langle u'_i \theta' \rangle}_{\mathcal{E}} - \underbrace{\nu \left\langle \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right\rangle}_{P_k}$$

(g_i : 重力加速度ベクトル, $g_i = (0, 0, -9.8\text{m/s}^2)$)

P_k : 生産項 (乱流エネルギーを生成する項)

⇒ 家計に例えると給与所得 (基本的にいつもプラス)

$\mathcal{E}$: 粘性散逸 (乱流エネルギーが単位時間あたりに熱に変換される割合)

⇒ 家計に例えると支出 (基本的にいつもマイナス)

G_k : 浮力生産項 (浮力で乱流エネルギーを増減させる項)

⇒ その場所の大気の状態でプラス/マイナスが変化

(不安定状態だとプラス、安定状態だとマイナス)

⇒ 家計に例えると投機やギャンブルによる収入・損失

乱流フラックス $\langle u_3' \theta' \rangle$ (高さ 1.5m)

⇒鉛直方向の風速成分の変動量と温度変動の積の時間平均値

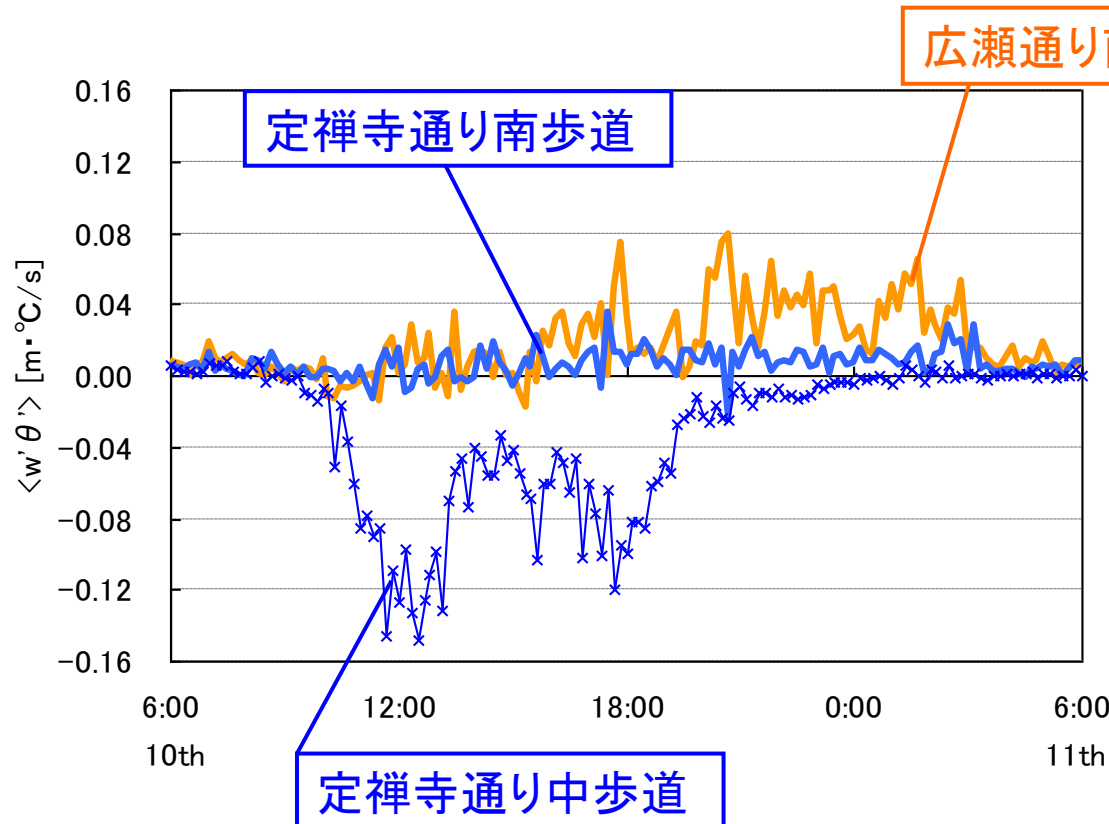
- 乱流渦の回転による熱の輸送を表す(＋なら上向き、－なら下向き)。
- これがプラスなら乱流エネルギーの浮力生産項Gkもプラスで乱流拡散が増大し、マイナスならGkもマイナスで乱流拡散が減少(大気が安定化)。



Hirose-street



Jozenji-street



$$G_k = -g\beta \langle u_3' \theta' \rangle$$

($g = -9.8[\text{m/s}^2]$)

この結果はドイツの
気候学者の先生方に
興味を持って貰えた
気がする。

2004年の実測

幡谷尚子，十二村佳樹，岩田達明，持田灯，渡辺浩文，吉野博，街路樹がストリートキャニオン内の気流分布、空気汚染、歩行者空間の温熱快適性に及ぼす影響の検討，日本建築学会環境系論文集，72（613），（2007），95-102

2006年の実測

菊池文，野崎尚子，持田灯，渡辺浩文，吉野博，街路樹と自動車街路空間内の温熱環境および汚染物質の乱流拡散性状に及ぼす影響に関する実測，日本建築学会環境系論文集76（665），（2011），623-631

数値解析

佐々木澄，岩田達明，持田灯，渡辺浩文，吉野博，街路樹がストリートキャニオン内の温熱空気環境に及ぼす影響に関する数値解析，日本建築学会環境系論文集，71（605），（2006），139-146

これらの成果は都市気候や風工学関係の国際会議で度々発表しており、ドイツの気候学者にも興味を持った貰えた。

4.1 環境工学分野の助教授時代（1999～2006頃）（一部、研究終了時期が教授になってからのものも含む）

(1) 赴任当初の様子

＜赴任前から抱えていた対外的commitments＞

(2) ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合評価のためのSoftware Platformの開発

(3) 風力発電最適立地選定のための局所風況予測システム LAWEPSの開発

(4) 流体数値解析（CFD）による風環境評価のためのガイドブックとガイドライン

＜ここからが、東北大での研究＞

(5) 仙台中心市街地の温熱空気環境実測-定禅寺通りの街路樹の効果-

(6) 原町環境調和まちづくり研究と市街地温熱環境実測

(7) 沿岸都市仙台の熱収支分析と熱収支Map の作成（これは、最初は生研グループと共同）

(8) その他の助教授時代の研究

(9) その他助教授時代の研究

4.1 環境工学分野助教授の時代（6）：

原町環境調和街づくり研究と市街地温熱環境実測

- 2000年から、横浜国立大学の佐土原先生（尾島研の先輩）が福島県浜通りの原町市（今は南相馬市の一部）をフィールドに実施されていた「環境調和まちづくりの共同研究」に参加することとなった。
- 原町の和菓子屋のご主人だった佐藤裕一さんに熱心に誘って頂いた。



「原町環境調和街づくり研究」メンバーと専門分野(2000年～)

⇒福島県浜通りの原町をフィールドにした学際的研究

佐土原聡(横浜国立大学)―GIS・都市エネルギー

金子信博(横浜国立大学)―土壌生態学

小池文人(横浜国立大学)―植物生態学

後藤光亀(東北大学)―水環境学

中西準子(横浜国立大学)―環境リスクマネジメント

中村文彦(横浜国立大学)―交通計画

増田 聡(東北大学)―地域計画・地域経済

松村 茂(東北芸術工科大学)―情報社会学

持田 灯(東北大学)―風工学・都市気候

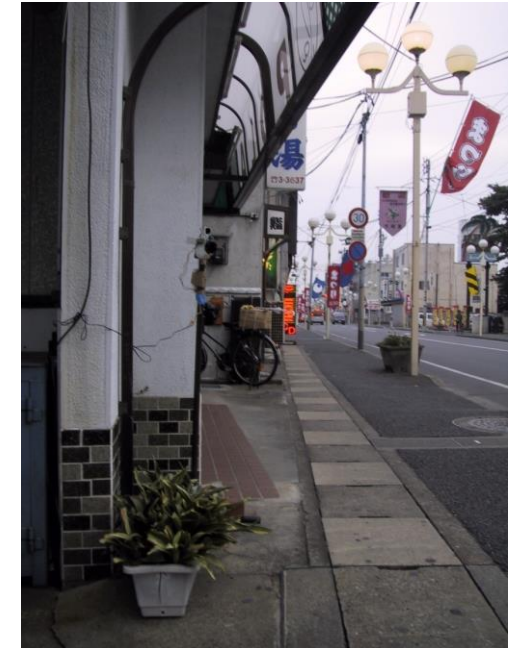
渡辺浩文(東北工業大学)―都市環境工学・都市気候、他

＋原町の市民の皆さん

⇒この一環として行った野外観測で沿岸都市の気温に及ぼす海風の効果を強く印象付けられる。

2002年夏の温熱環境実測

- 測定期間：2002年7月14日～8月23日



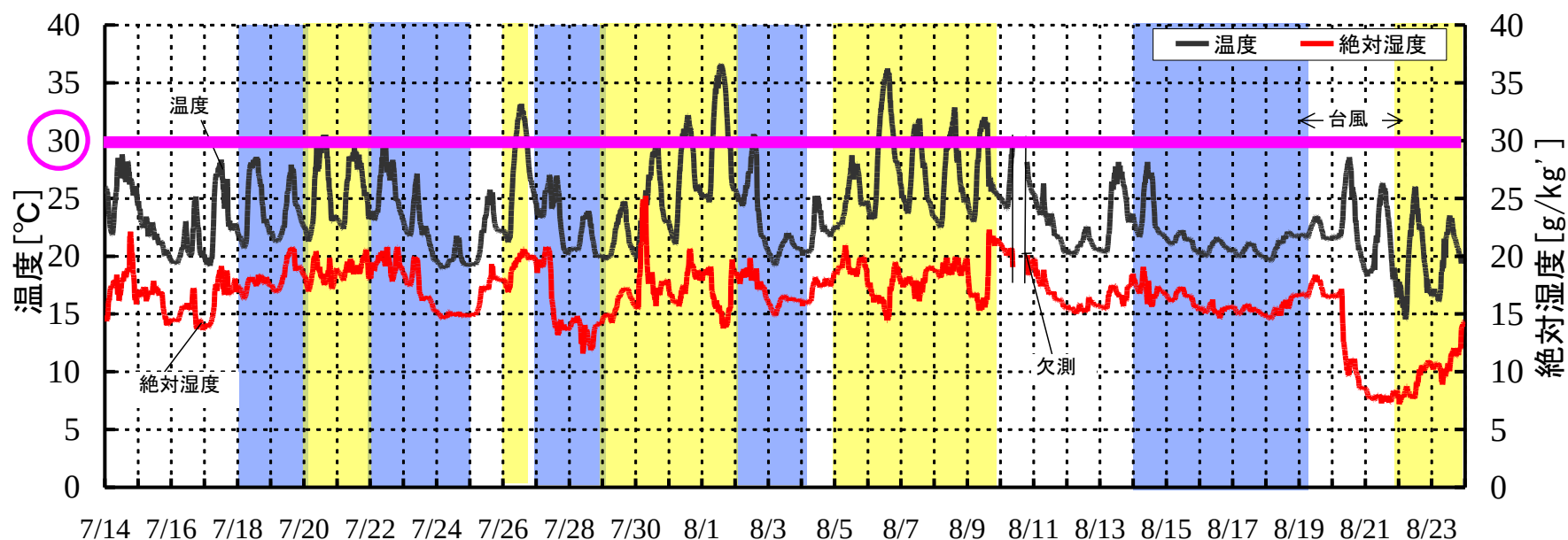
計27点の温湿度の定点同時測定

- 長期間(ひと夏)の長期測定ができたのは、市民の皆さんのご協力のお陰。

全測定点の温湿度の平均値の変化

青色 → 海風が吹いた日（日中の主風向が東）

黄色 → 海風の吹かなかった日（日中の主風向が西）

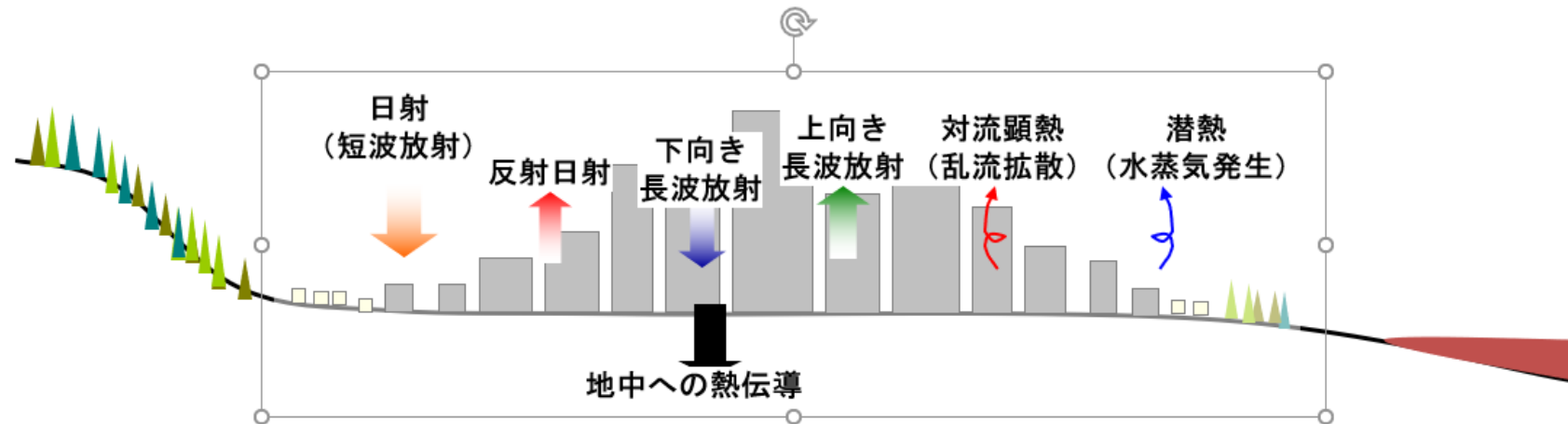


海風の吹く日は、日中のピークが30℃以上の日がほとんどない！
⇒沿岸都市の気温に及ぼす海風の効果を強く印象付けられる。

4.1 環境工学分野助教授の時代（7）：

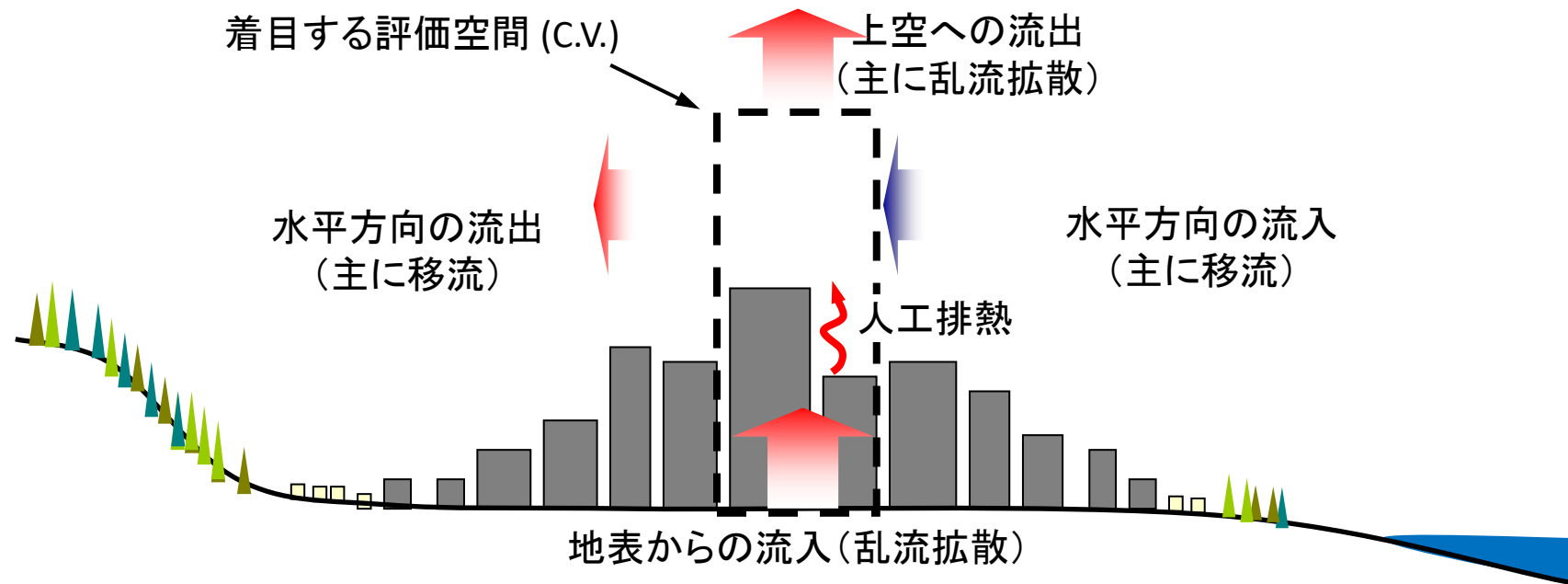
沿岸都市仙台の熱収支分析と熱収支Map の作成

- 海風の都市を冷やす効果 (cooling potential) を定量化し、可視化したい。
- しかし、従来、用いられてきた地表面の鉛直1次元の熱収支の評価では、海風のような水平方向の熱移動が考慮されない



新たな方法⇒都市大気部の熱収支

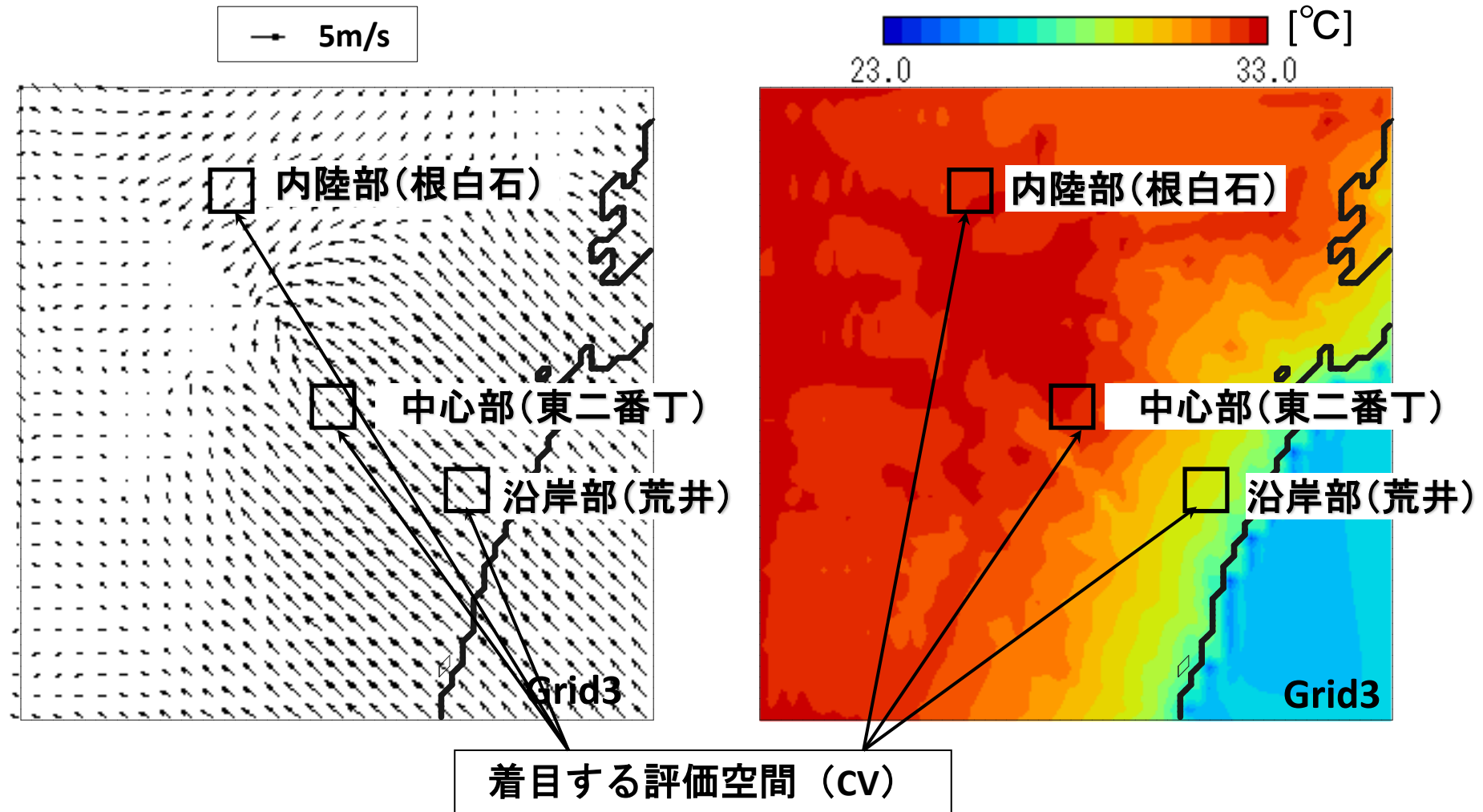
都市大気部に評価のための仮想の評価空間（C.V.）を設定し、メソ気候モデルの結果を用いて、評価空間（C.V.）の熱の収支（鉛直方向、水平方向、全体の収支（出入り））を求める。



大岡龍三，吉田伸治，村上周三，佐々木澄，持田灯，吉野博，都市の熱代謝モデルの提案と緑化に係わる熱収支分析—都市気候モデルに基づく東京の都市熱環境の分析—，日本建築学会環境系論文集，69 (579)，(2004)，73-80

佐々木澄，持田灯，吉野博，渡辺浩文，吉田知弘，海風が卓越する夏季晴天日における規模の異なる3つの太平洋沿岸都市、東京、仙台、原町の中心部の大気部熱収支構造の比較—気候数値解析に基づく都市気候の地域特性の定量化（その1）—，日本建築学会環境系論文集，70 (595)，(2005)，121-128

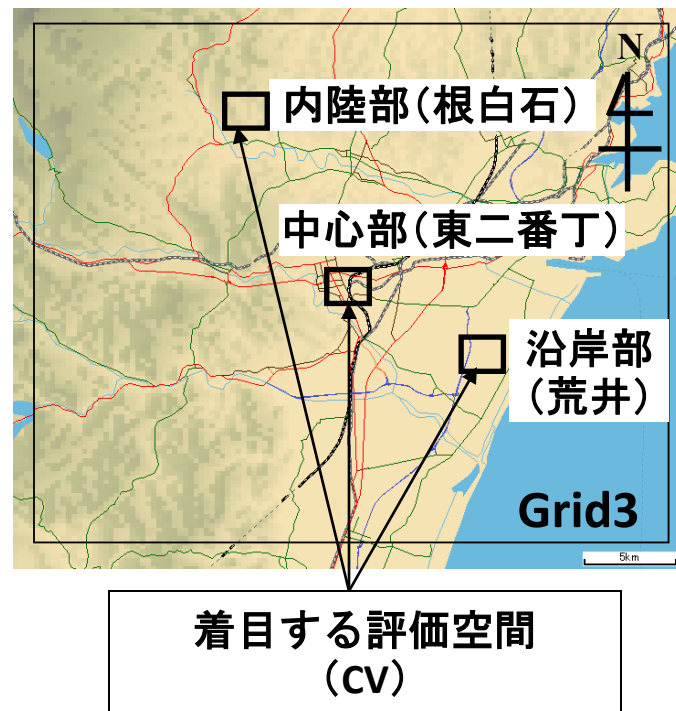
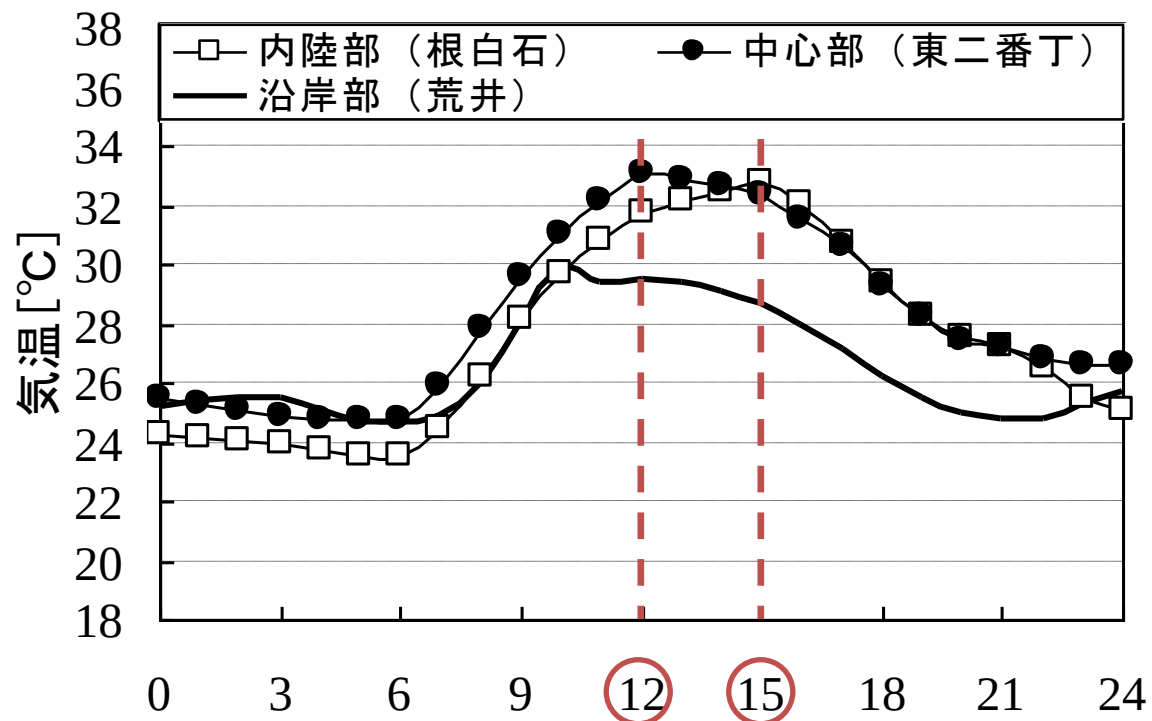
メソ気候解析結果一日中に仙台で形成される気候（8月上旬、13時、高さ10m）－



(1) 風速ベクトル分布

(2) 気温分布

メソ気候解析結果 —3地域の気温の日変化の比較(夏季)—

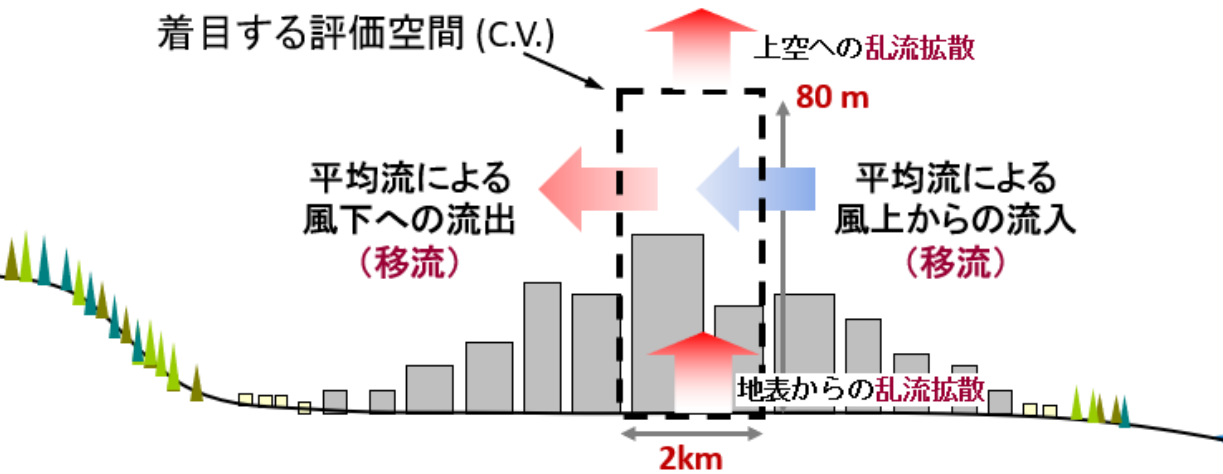


■3地点の気温の日変化 [°C] (内陸部、中心部、沿岸部)

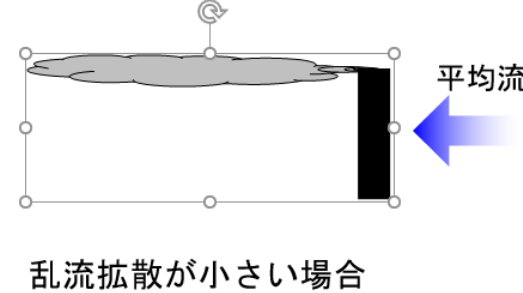
・海岸に近い程気温の上昇が停止する時間が早い。

⇒これは、東北工業大学の渡辺先生、十二村さん(現、岐阜大学准教授)が広域多点観測結果から指摘している傾向と合致。⇒先ずこの理由を熱収支分析で検討した。

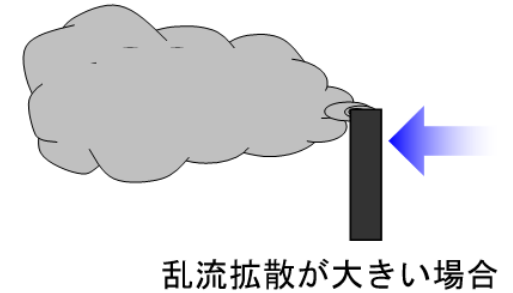
都市大気部の熱収支構造



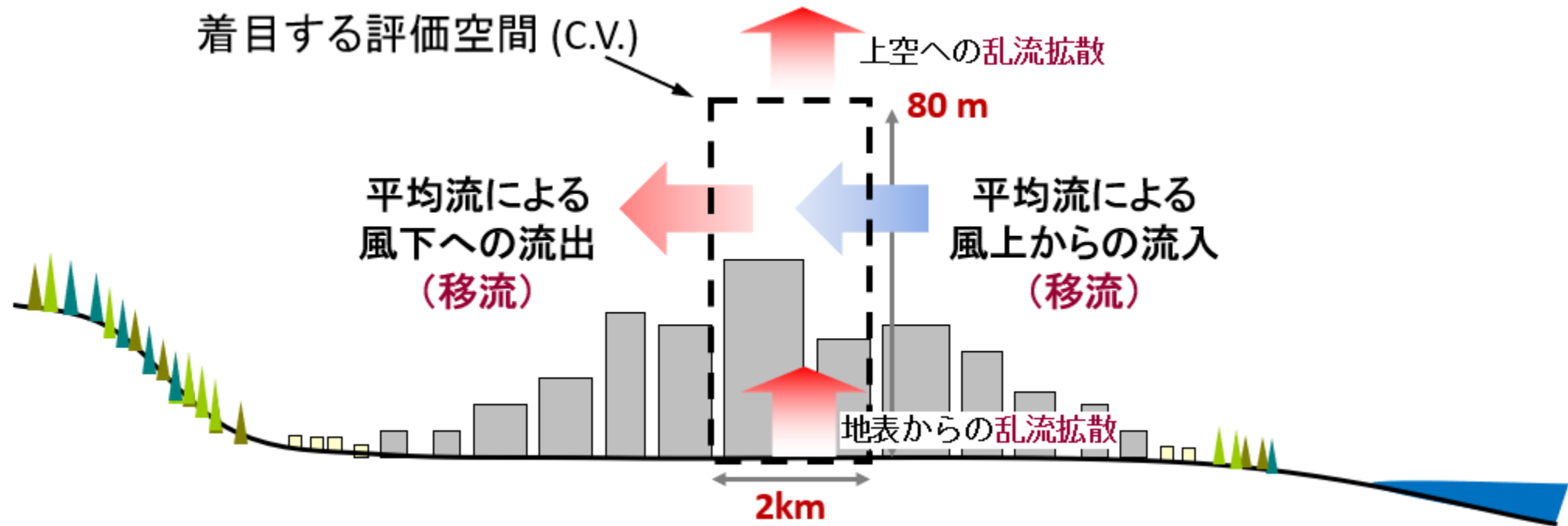
移流: 平均流に運ばれ、
風下へ輸送されること
⇒ 風向に沿った輸送



乱流拡散: 乱流渦の運動に伴う拡散作用
⇒ 風向に対して 直交方向への輸送

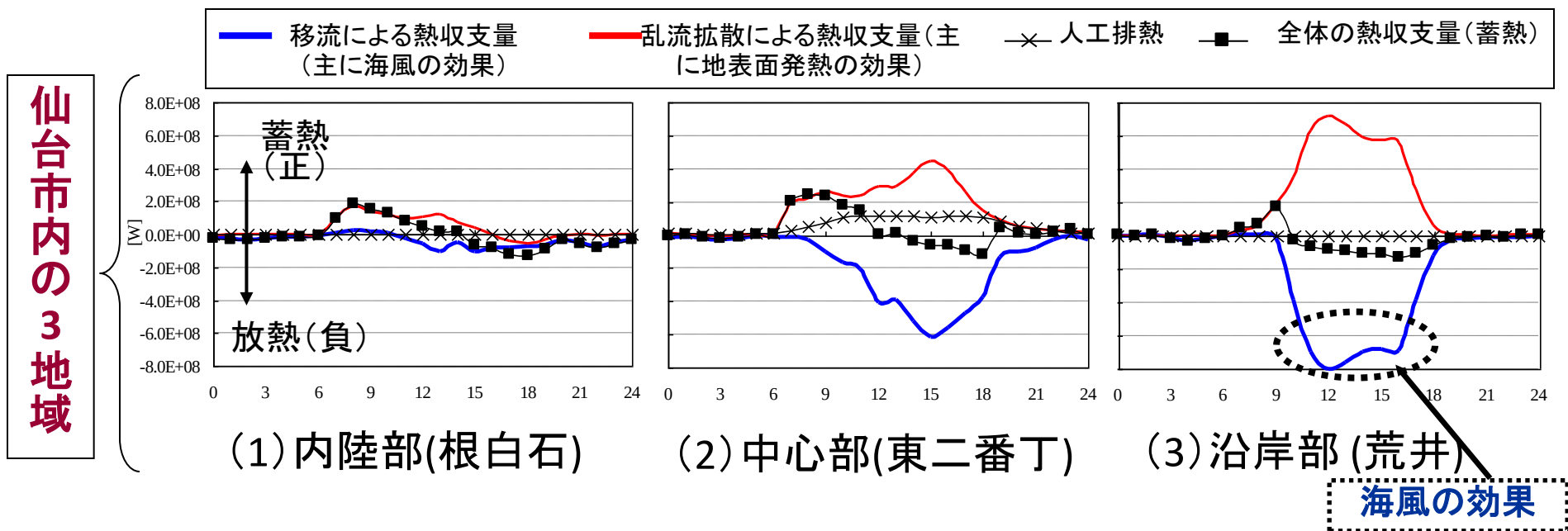


- 都市大気部の熱収支は評価空間 (Control Volume (C.V.)) に流入・流出する正味の熱量で評価される。
- 水平方向: 主として移流により熱が輸送される。
- 鉛直方向: 主として乱流拡散により熱が輸送される

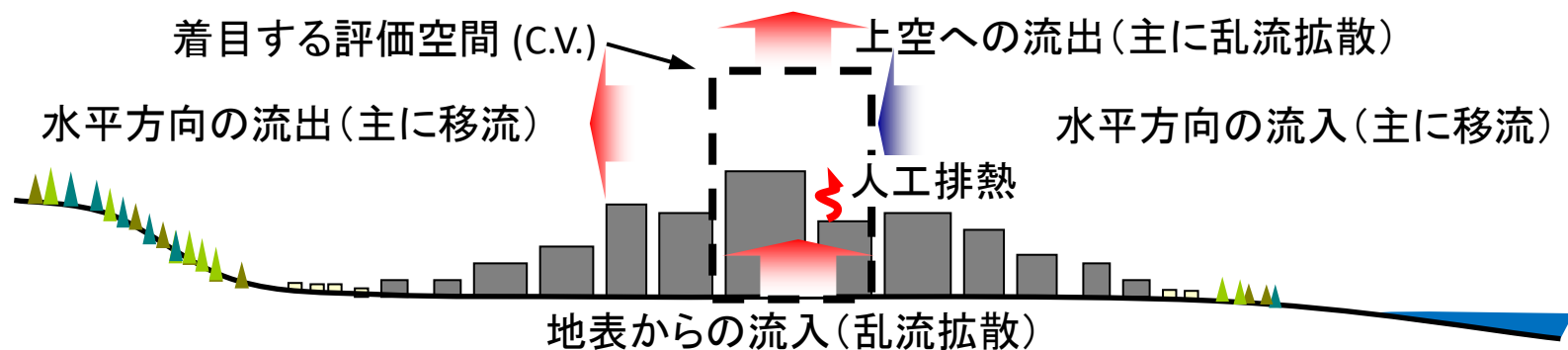


- 熱収支の移流成分は、
「平均流により流入する熱量」－「平均流により流出する熱量」
- 熱収支の乱流拡散成分は、
「乱流拡散により流入する熱量」－「乱流拡散により流出する熱量」

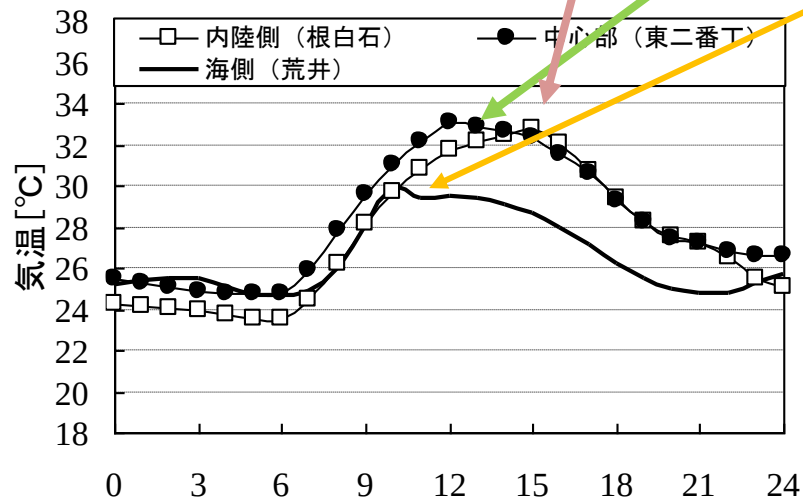
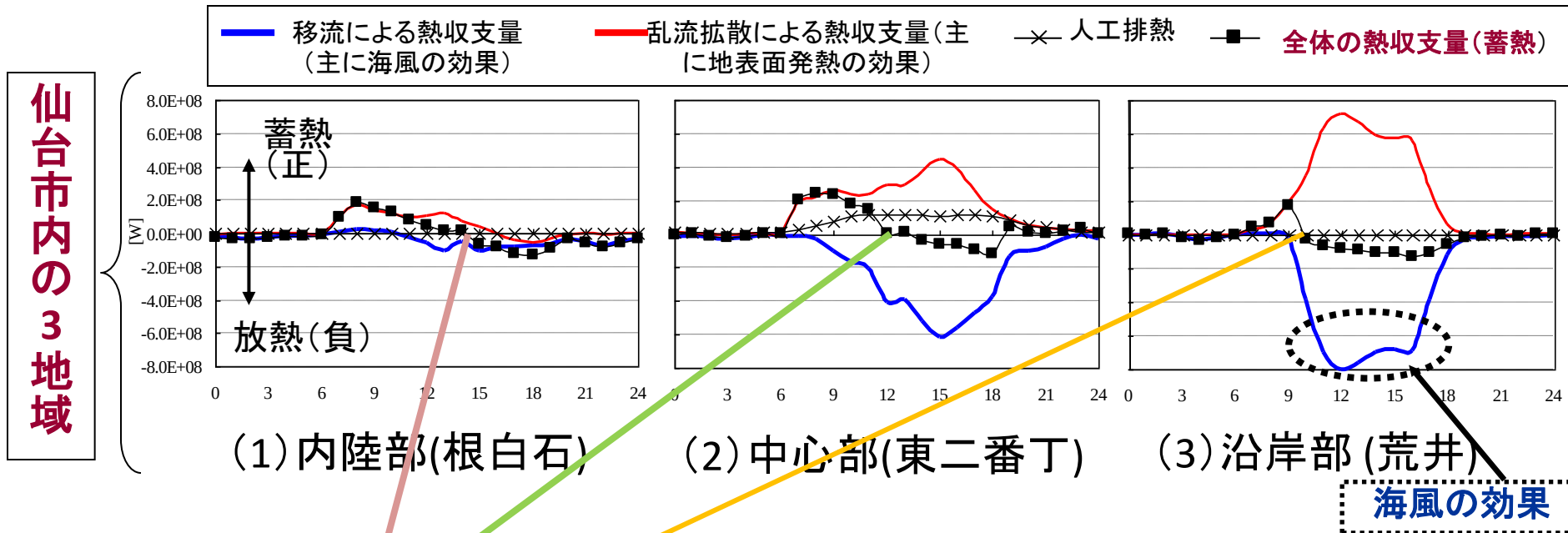
仙台市内の3地域における熱収支構造の比較



■ 移流、乱流拡散、人工排熱成分で流入出する正味の熱量と収支量
 (移流 + 乱流拡散 + 人工排熱、+ が評価空間への熱の流入を示す) [W]



仙台市内の3地域における熱収支構造の比較



- 全体の熱収支 (-■-) がプラスなら気温は上がり、それがマイナスなら気温が下がる。
- これが0の時気温上昇は停止する
⇒ 気温変化のピーク時刻となる。
- 荒井は全体の熱収支 (-■-) が0になる時刻が非常に早い。
⇒ 熱収支の内訳を見ると、移流のマイナス値の絶対値が非常に大きい。
⇒ 沿岸部の海風の大きな気温低減効果が確認される。
- 他の地域ではどうなっているのだろうか？

“熱収支 MAP”の作成 ー分割した各CVでの評価ー

解析領域を60×60個のCVに分割

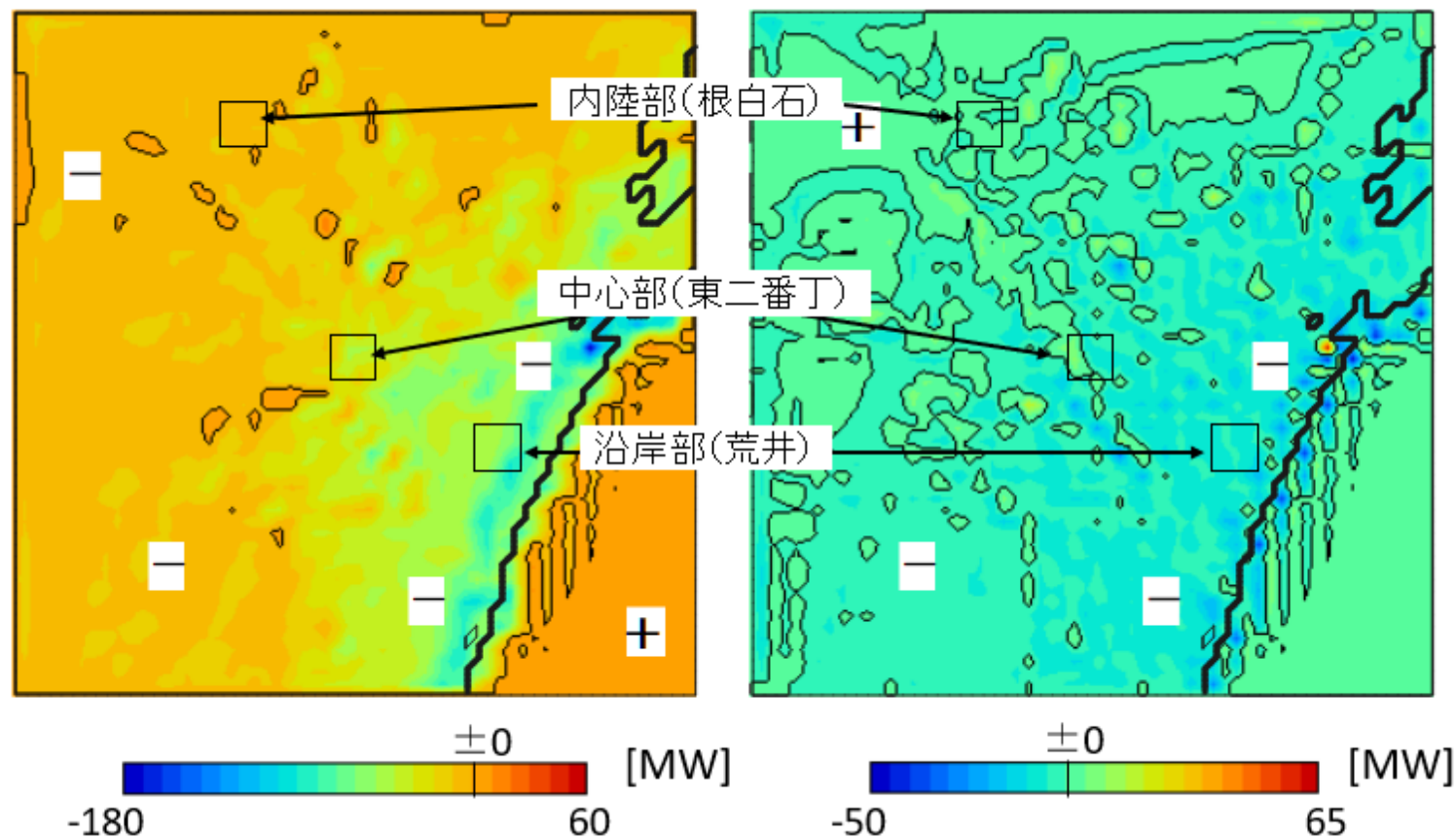


※各CVのサイズ
0.5km(x) × 0.5km(y) × 80m(z)

分割された各CVの熱収支から
“熱収支MAP”を作成

夏の風通し推奨エリアの抽出

夏季の日中(12時～15時)における移流による熱収支量・全体の熱収支の時間平均値の空間分布



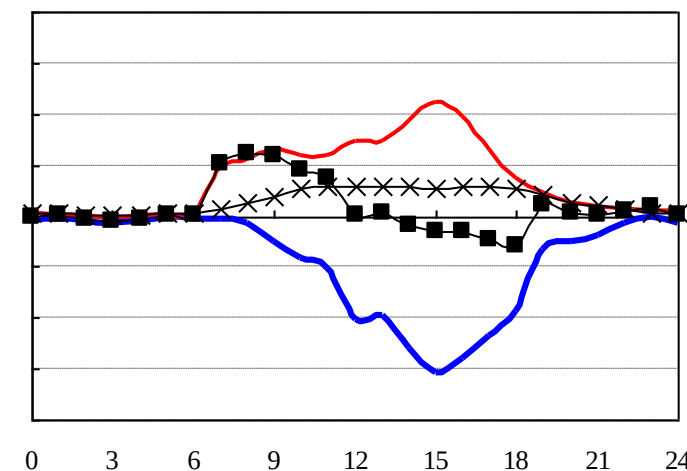
移流による熱収支量(—)の平均値の空間分布 [MW]

全体の熱収支量(—■)の平均値の空間分布 [MW]

移流による熱収支量が負
&
全熱収支量も負の領域

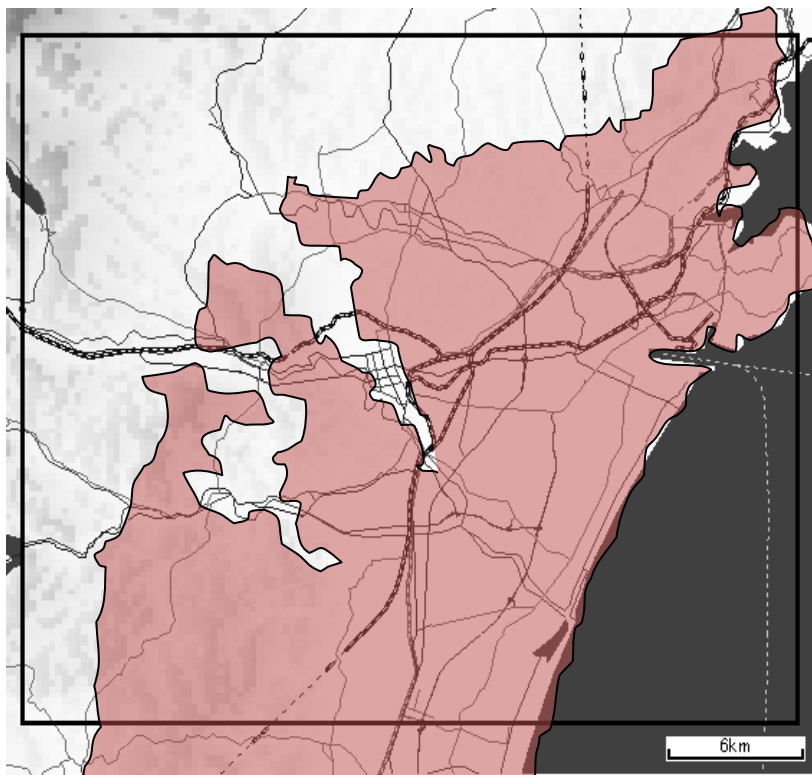


夏の風通し推奨エリア



夏の風通し推奨エリアの抽出

夏季に海風によって気温低下効果が期待できる地域



の領域

||

移流による熱収支量:
負の領域

かつ

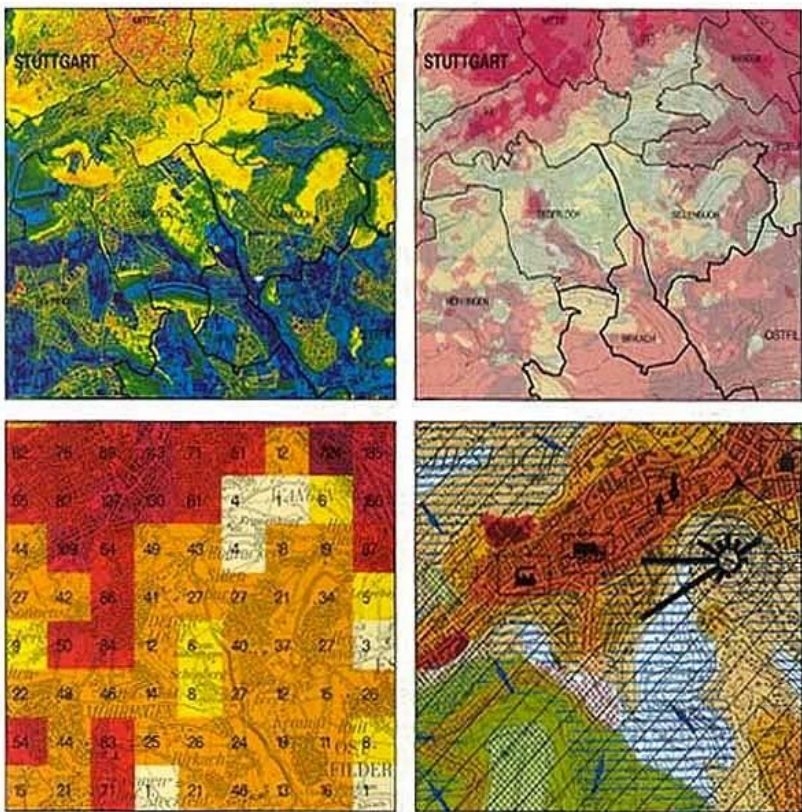
全熱収支量: 負の領域



海風による気温低減効果が期待できる地域

数値解析の特性を活かした新たなクリマアトラスの作成

Nachbarschaftsverband Stuttgart KLIMAATLAS



Klimauntersuchung für den Nachbarschaftsverband Stuttgart und angrenzende Teile der Region Stuttgart

都市環境気候図・クリマアトラス

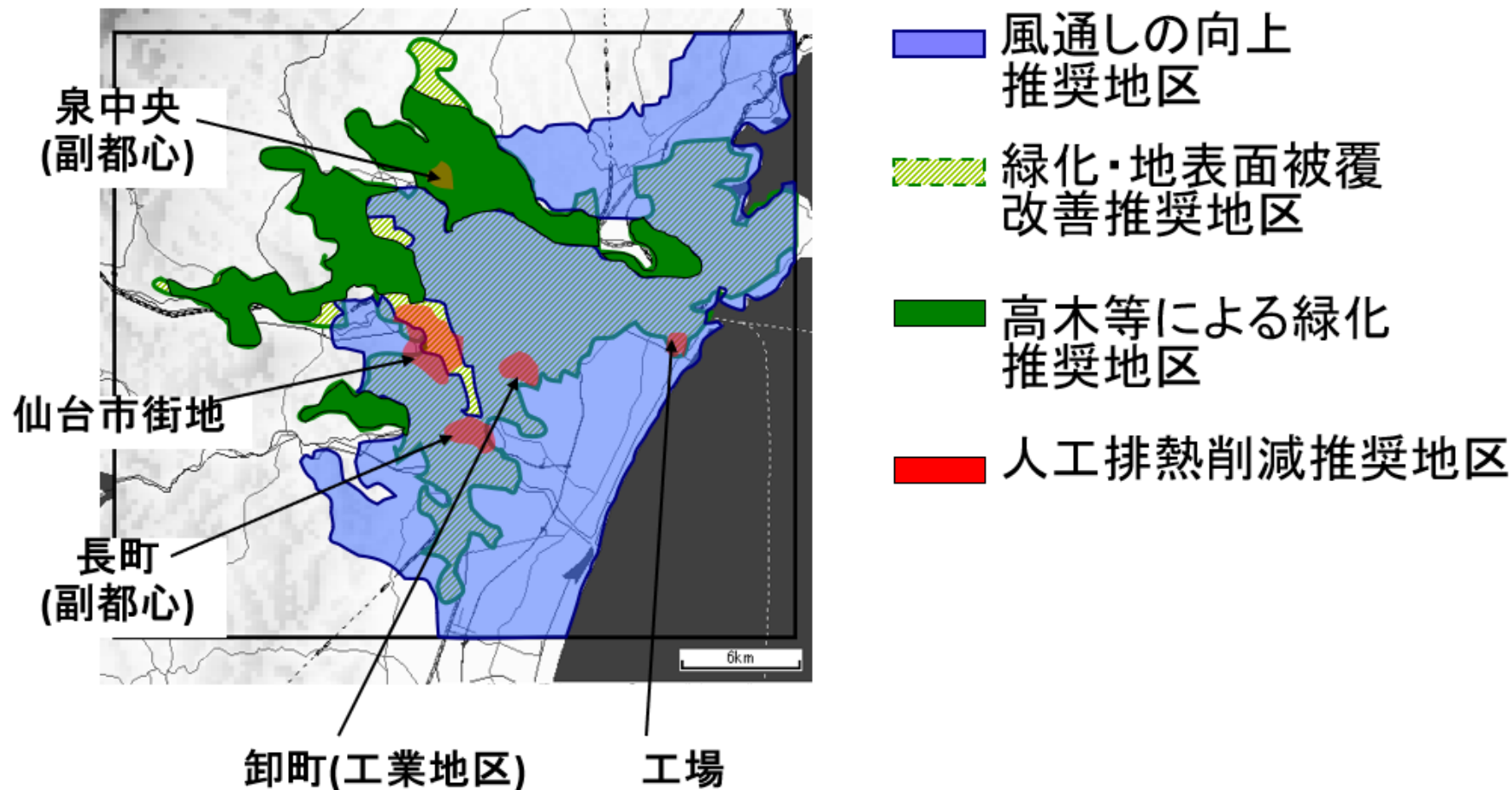
都市計画、建築計画に対して気候学的視点から指針を与えるための気候Map集。

森山正和先生(元神戸大学)が我が国に紹介され、ドイツのシュツットガルトのクリマアトラスが有名。

⇒気候数値解析の特性を活かした新たなクリ
マアトラスの作成を試みた。

数値解析の特性を活かした新たなクリマアトラス作成の試み

CWE × 都市気候学 × 都市計画



熱収支構造の地域特性を踏まえたヒートアイランド対策のゾーニング(暫定案)

1) コンセプトの提案と定式化（村上研出身者グループ共同、定式化は大岡先生）

大岡龍三，吉田伸治，村上周三，佐々木澄，持田灯，吉野博，都市の熱代謝モデルの提案と緑化に係わる熱収支分析—都市気候モデルに基づく東京の都市熱環境の分析—，日本建築学会環境系論文集，69（579），（2004），73-80

2) 上記 1) の手法の東北の都市への展開

佐々木澄，持田灯，吉野博，渡辺浩文，吉田知弘，海風が卓越する夏季晴天日における規模の異なる3つの太平洋沿岸都市、東京、仙台、原町の中心部の大気部熱収支構造の比較—気候数値解析に基づく都市気候の地域特性の定量化（その1）—，日本建築学会環境系論文集，70（595），（2005），121-128

3) 熱収支分析をクリマアトラスに展開

⇒ここから東北大の独自路線（生研culture×尾島研culture）

佐々木澄，吉田知弘，持田灯，渡辺浩文，吉野博，典型的夏季晴天日を対象とした大気部熱収支構造の定量評価に基づく都市内部の熱収支MAP の試作，日本建築学会環境系論文集，71（602），（2006），85-92

Kiyoshi Sasaki, Akashi Mochida, Hiroshi Yoshino, Hironori Watanabe, Tomohiro Yoshida ,
A new method to select appropriate countermeasures against heat-islands effects according to the regional characteristics of heat balance mechanism, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 96 (10-11), (2008), 1629-1639

佐々木澄君の博士論文(2003):

「気候数値解析を用いた都市空間の熱収支制御に関する研究」

これ以降、

- 吉田知弘君の修士論文(2005)
- 大場拓君の修士論文(2007)
- 蔡昌殷君の修士論文(2009)(内陸都市長野と沿岸都市の比較)
- 毛利圭介君の修士論文(2009)

とこのテーマを追求。

佐々木澄君は日本風工学会研究奨励賞と日本建築学会奨励賞を受賞(2007年)。

4.1 環境工学分野の助教授時代（1999～2006頃）（一部、研究終了時期が教授になってからのものも含む）

(1) 赴任当初の様子

＜赴任前から抱えていた対外的commitments＞

(2) ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合評価のためのSoftware Platformの開発

(3) 風力発電最適立地選定のための局所風況予測システムLAWEPSの開発

(4) 流体数値解析（CFD）による風環境評価のためのガイドブックとガイドライン

＜ここからが、東北大での研究＞

(5) 都市の温熱環境に及ぼす都市白色化と積雪の効果

(6) 仙台中心市街地の温熱空気環境実測-定禅寺通りの街路樹の効果-

(7) 原町環境調和まちづくり研究と市街地温熱環境実測

(8) 沿岸都市仙台の熱収支分析と熱収支Map の作成（これは、最初は生研グループと共同）

(9) その他助教授時代の研究

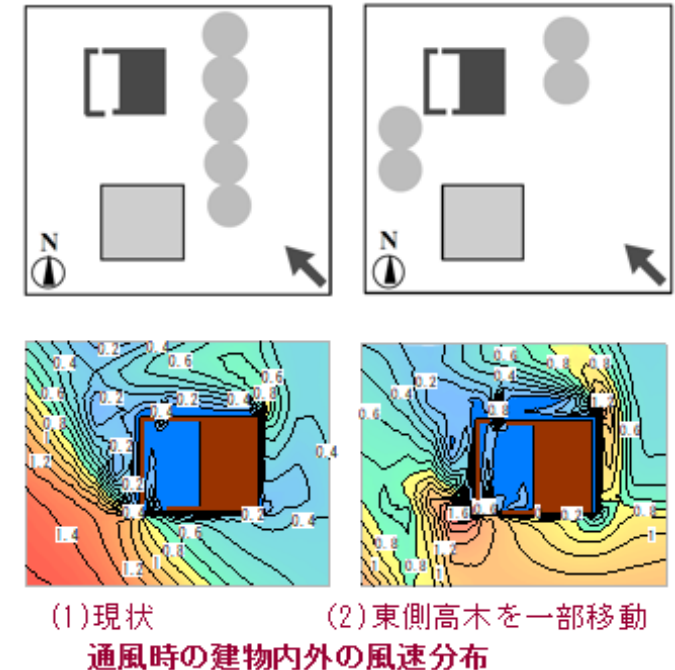
4.1 環境工学分野助教授の時代（8）：その他の研究①

建物周辺のミクロ気候の制御によるの室内環境の改善（通風と熱負荷）

都市気候 × CWE × 室内環境 = 都市気候 × CFD × 風工学 × 室内環境

- 建物周辺の樹木配置の変更により、通風量や室内の温熱環境や熱負荷がどの程度改善できるか？
- CFDで検討し、さらにメソ気候解析も組み込み、通風や日射遮蔽のpassive cooling potentiaの都市内空間分布をMap化まで行った。

⇒竹田智哉君修論（2003）、宮内郷史君修論（2003）、高橋賢伍君修論（2006年度）



Akashi Mochida, Hiroshi Yoshino, Tomoya Takeda, Toshimasa Kakegawa, Methods for Controlling Air Flow in and around Building under Cross-ventilation to Improve Indoor Thermal Comfort, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 93 (6), (2005), 437-449

Akashi Mochida, Hiroshi Yoshino, Satoshi Miyauchi, Teruaki Mitamura, Total analysis of cooling effects of cross-ventilation affected by microclimate around a building, SOLAR ENERGY, 80 (4), (2006), 371-382

4.1 環境工学分野助教授の時代（8）：その他の研究②

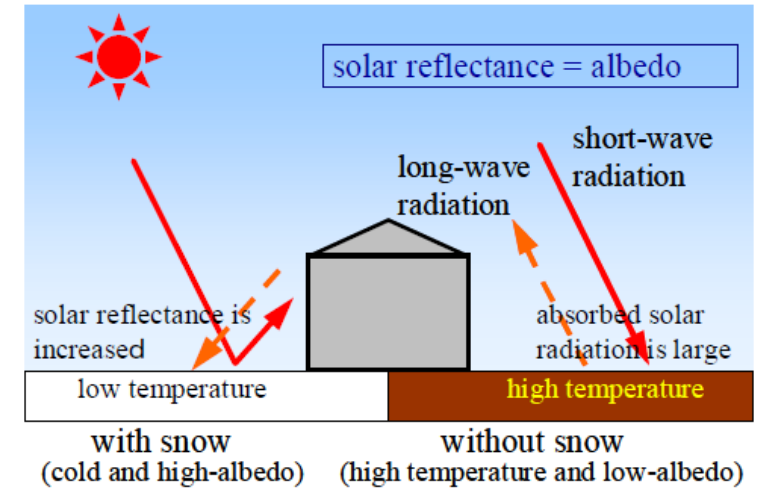
積雪面が温熱環境に与える影響

都市気候学 × CWE × 雪工学 = 都市気候学 × CFD × 風工学 × 雪工学

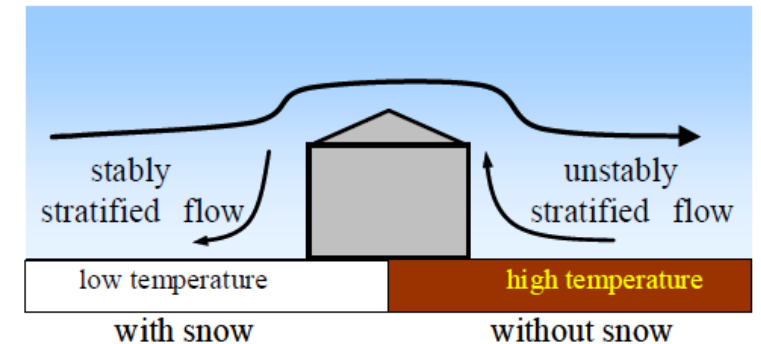
- ヒートアイランド対策としての都市の白色化の効果に関する修論の中で、雪面（日射反射率が高く、かつ表面温度が0℃まで低下）の効果も分析して貰った。

⇒ 新潟の気象条件で、晴れた日に雪面上と雪のない地面上どちらが体感温度(SET*) が高いか？

大庭万希子さんの修士論文(2000年度)「都市環境の温熱快適性に及ぼすwhite paintingの効果に関する研」



(1) radiation field



(2) convection field

Fig. 1. Effects of snow on outdoor environment

夏の暑さ対策の目的で開発して来た都市表面の熱収支解析に積雪面の熱収支モデルを追加し、冬の積雪時の屋外の温熱環境の予測を可能とした。

1) 無雪面

$$Q_{\text{solar}} + Q_{\text{RD}} + Q_{\text{CV}} + Q_{\text{CD}} + Q_{\text{EV}} = 0$$

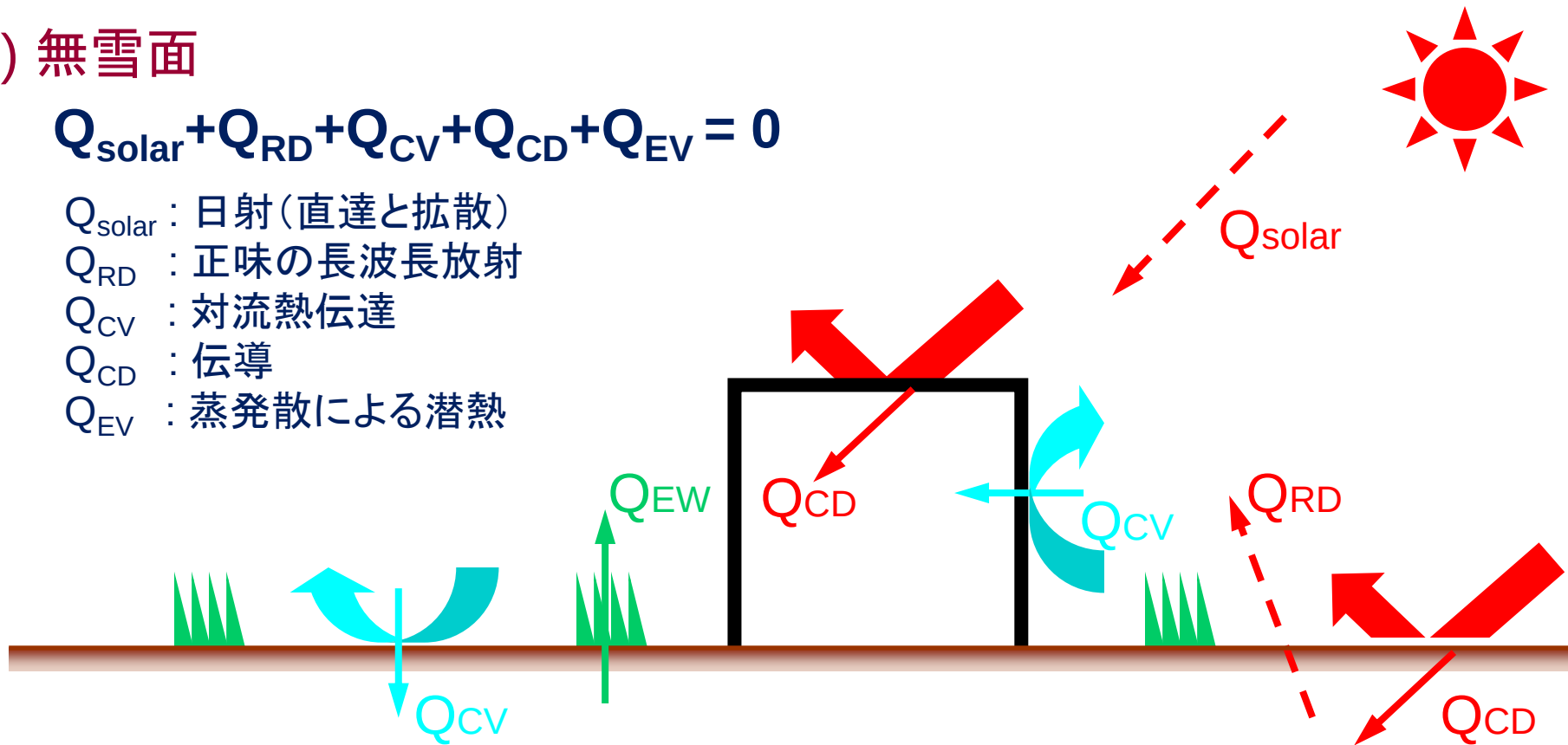
Q_{solar} : 日射(直達と拡散)

Q_{RD} : 正味の長波長放射

Q_{CV} : 対流熱伝達

Q_{CD} : 伝導

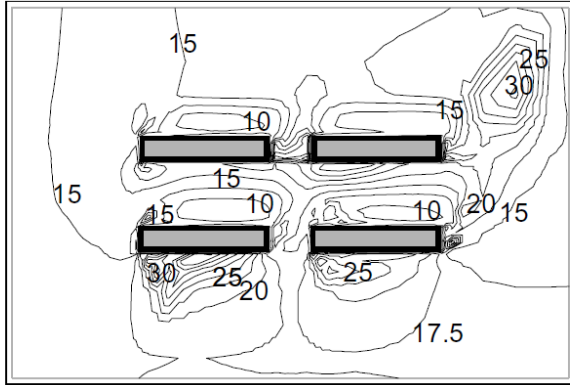
Q_{EV} : 蒸発散による潜熱



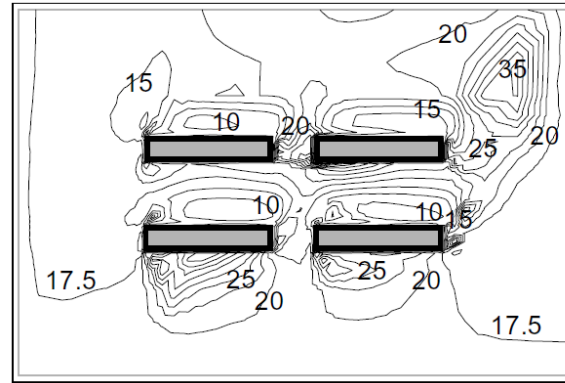
2) 積雪面

$$Q_{\text{solar}} + Q_{\text{RD}} + Q_{\text{CV}} + Q_{\text{CD}} + Q_{\text{EV}} = M$$

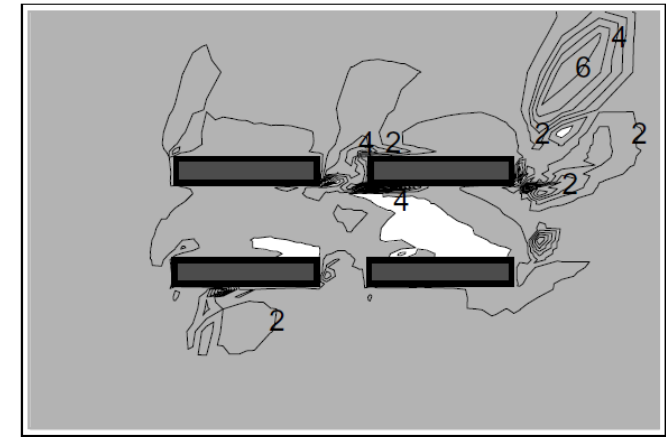
(M: 融雪エネルギー)



(1) Case 1 (without snow)



(2) Case 4 (with snow)



積雪面と無雪面のSET*の差(積雪面－無雪面)
・図中のグレーの領域が+ (積雪によりSET*が増加)

●晴れた日は雪面上の方が体感温度高い！（スキー焼けの原理）

- 大庭万希子さんが、Cold Climate HVACの国際会議発表。
- その後、創刊間もないJAABE(2002-2003 (Journal of Asian Architecture and Building Engineering))に下記タイトルで投稿。

Akashi Mochida, Yoshihide Tominaga, Hiroshi Yoshino, Kiyoshi Sasaki, Makiko Ohba, Numerical Study on Thermal Effects of Cold and High-albedo Surface Covered with Snow in Outdoor Environments, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 1 (1), (2002), 175-182

⇒2005年度のThe JAABE Best Paper Award を受賞。

4.1 環境工学分野助教授の時代（8）：その他の研究③

村田高校の体育館の結露対策と結露発生メカニズムの分析

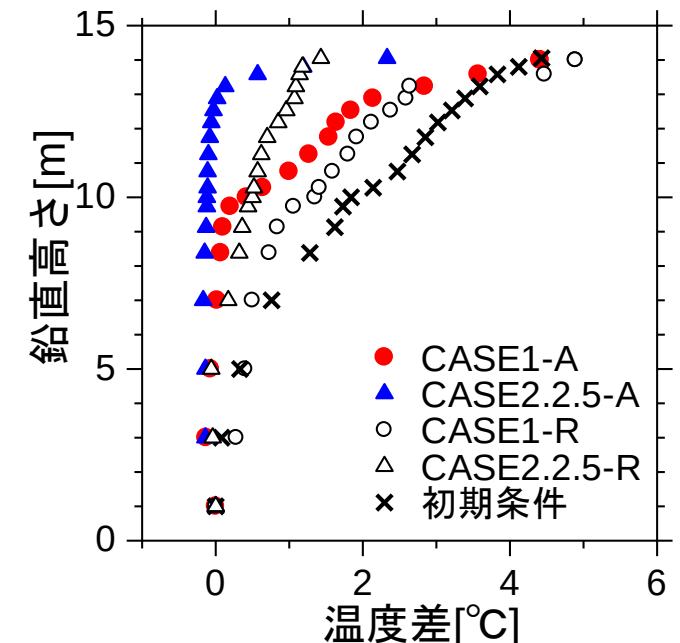
- 吉野先生から換気で対策を考えたいという相談があり、検討を行った。

この成果を空気調和・衛生工学会の論文集に投稿。

吉野博，持田灯，掛川敏正，三田村輝章，佐々木澄、
「実測と数値シミュレーションに基づく大空間の換気性状と結露発生メカニズムの解析」、空気調和・衛生工学会論文集，28（88），（2003），1-11

この論文で持田が空気調和・衛生工学会賞（学術論文部門）を受賞。
高校の体育館の結露対策という極めて地味なテーマで受賞したことに大変驚いた。

- 2005年度は、JAABE, 空気調和・衛生工学会に加えて、建築学会の論文賞も貰えて、2006年8月に教授に昇進（受賞がどれぐらい影響したかは分からないが。。。）



4.1 環境工学分野助教授の時代（9）：その他の研究③

前田建設との共同研究（国土交通省の平成14年度建設技術開発助成採択課題）

バルコニー一体型ソーラー利用集合住宅換気空調システムの開発

－ 研究開発概要 －

- 住宅部門のエネルギー起源CO₂排出量は年々増加（国内総排出の14%、1990年比+37%（開発時点））し削減が急がれる。自然エネルギー利用の拡大が必要だが、全国で4割を占める集合住宅向けの普及型システムが無い。
- 省エネルギーと、快適・健康空間を同時に満足する、新しい自然エネルギー利用型の集合住宅換気空調システムについて、最適な構造と制御方法を明確にし、実用化システムを開発（仕様決定）する。

【社会的背景】

- ①住宅部門のエネルギー消費増加
- ②住宅の質的向上⇒空調電力増大
- ・24時間換気義務化(2003)
- ・住生活基本法(2006)⇒住戸面積拡大、空調設備高度化(全館空調)、在宅時間延長
- ③集合住宅向けの自然エネルギー利用技術＝少

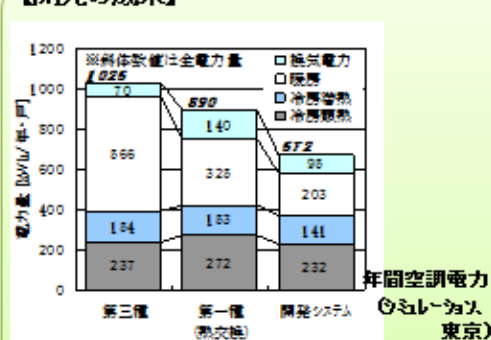
集合住宅向け普及型システムが必要



【開発システムの概要】



【開発の成果】



シミュレーションや実証実験を行い、最適な装置構成や自動制御方法を決定し、開発システムの省エネ効果が一般(第3種)換気比▲35%を明らかにした。

－ 研究開発成果・今後の展開 －

- バルコニー手すり、24時間換気設備、床先行工法による住戸内を連続する二重床空間を利用した、省エネ、快適・健康空間を同時に達成する、新しい自然エネルギー利用型の集合住宅換気空調システムの最適仕様を明らかにした。
- バルコニー空間を利用した集合住宅における自然エネルギー利用の方向性を実証実験にて提示した。
- 実用化システムが設計でき、さらに応用開発ができるデータ・知見を整備した。
- 開発システム適用住宅の冷暖房負荷や室内温湿度の予測・評価(シミュレーション)方法を開発した。
- 自然エネルギー利用を図った環境配慮型集合住宅の推進に対する貢献が期待できる



- 当時、前田建設技術研究所におられた義江先生にお誘い頂き、国土交通省の平成14年度建設技術開発助成制度（第1回目）に共同で応募。
- 当たる訳ないと思っていたら、前田建設が作成された実現性の高い非常に優れた計画が評価されて採択され、単年度で3000万円の予算がついてビックリした。
- 企画、実施、報告書作成の全ての工程が、前田建設の義江先生と佐竹さんラインで的確・確実に実施された。また、三田村輝章さんにも、ここでもお世話になった。
（私が貢献できたことは、申請時のヒアリングと最後の事後評価のプレゼンだけ）。
- その後、前田建設と吉野研がいろいろと共同研究するきっかけとなり、
後年、佐竹さんは吉野先生の指導で学位取得。

事後評価

総合評価

a（非常に優れた研究であった）

非常に具体的で社会的価値のある提案がなされており、1年間という短い期間で十分目標を達成し、実用性の高いレベルまで研究を進めたことを高く評価する。

内容

1. 早稲田での放し飼いの7年（高校・大学時代）
2. 村上周三先生の下での14年の修業時代（東大生研）
3. 新設大学で非大都市圏における環境問題に触れた4年
（新潟時代工科大学 1995～1999）
4. 東北大学での25年
 - 4.1 環境工学分野の助教授時代
 - 4.2 地域環境計画学分野の教授時代
5. おわりに

組織改編と2005年度からの新体制

- 土木と建築が合体した建築・社会環境工学科が誕生
⇒土木系3コース＋建築系2コースの体制に
 - 教員の職位が、教授・助教授・助手⇒教授・准教授・助教へ
 - 本専攻では准教授は独立した分野を担当することになった（PI化）。
 - 環境系が計画講座から分かれて、材料と一緒にサステナブル空間構成学講座を構成することとなった。
 - 持田の担当分野名は（都市ではなく）地域環境計画学分野とした。
 - 同時になされたカリキュラム改革で、自分の専門に関する科目を新設することができた。
学部：都市環境工学、サステナブルエンジニアリング、
建築環境デザイン（伊香賀先生に非常勤講師をお願いしたCASBEEベースのデザイン教育）
大学院：都市・建築環境解析学、環境性能評価論、建築数理基礎理論、
応用システム開発論 を新設。
- ⇒この改革で非常にやりやすくなった。また、総合研究棟が出来て、研究室スペース不足も改善した。
- 2006年8月に教授に昇進。

東北大におけるCFDを取り入れたカリキュラム

	設計教育	CFD教育	環境工学教育
3セメ	基礎設計B・演習E		
4セメ	設計A		建築環境工学基礎 建築設備
5セメ	設計B		熱・空気/音・光環境
6セメ	設計C		都市環境工学 サステナブル エンジニアリング
7セメ	設計D・建築環境デザイン		
院前期	建築環境性能評価論		
	設計Ⅰ	都市・建築環境解析学	
院後期	設計Ⅱ	建築数理基礎論	建築設備設計論
		応用システム開発論	居住環境設計論 サステナブル建築論

4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

（１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発

- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発
- （４）メソスケールの研究の進捗
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価
- （７）広州、武漢を対象とした研究

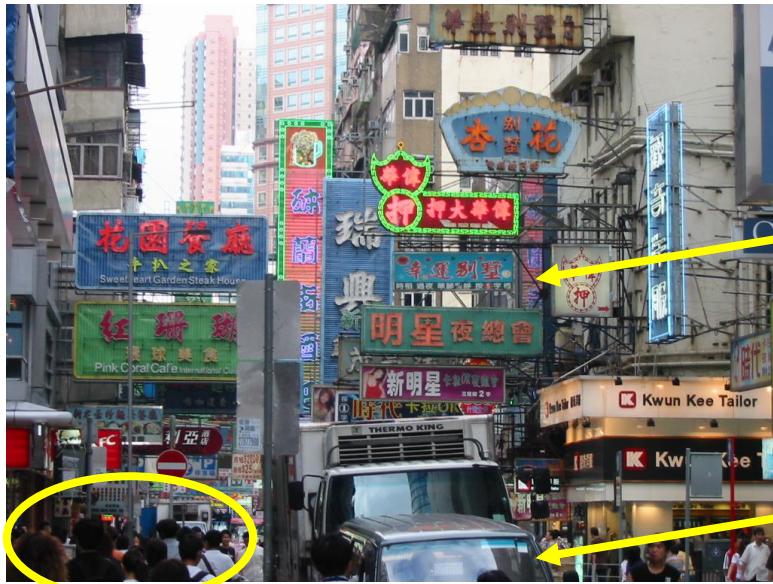
<2010年代半ば以降>

- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発
- （10）市街地風環境の制御
- （11）若干、手を付けた今後の課題

(1) 自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発

CFD × 風環境工学 × 耐風工学 × 都市気候学

- 香港の市街地の風通し改善のためのプロジェクト(AVA: Air Ventilation Assessment)のために、2005年に義江先生とともに香港を訪問。
- 様々な気流障害物が存在する街路空間 (Street Canyon)の様子に驚いた。



看板

自動車

群衆

香港の旺角の様子(2005)

- 市街地の風通しを評価するためには、これら風通しの阻害要因の効果を考慮する必要がある。

⇒ Canopy モデルの方法論を使うことを考え、丸山敬先生(京大)、萩島理先生(九大)に協力をお願いして、研究に着手。

Canopy モデルとは?(再掲)

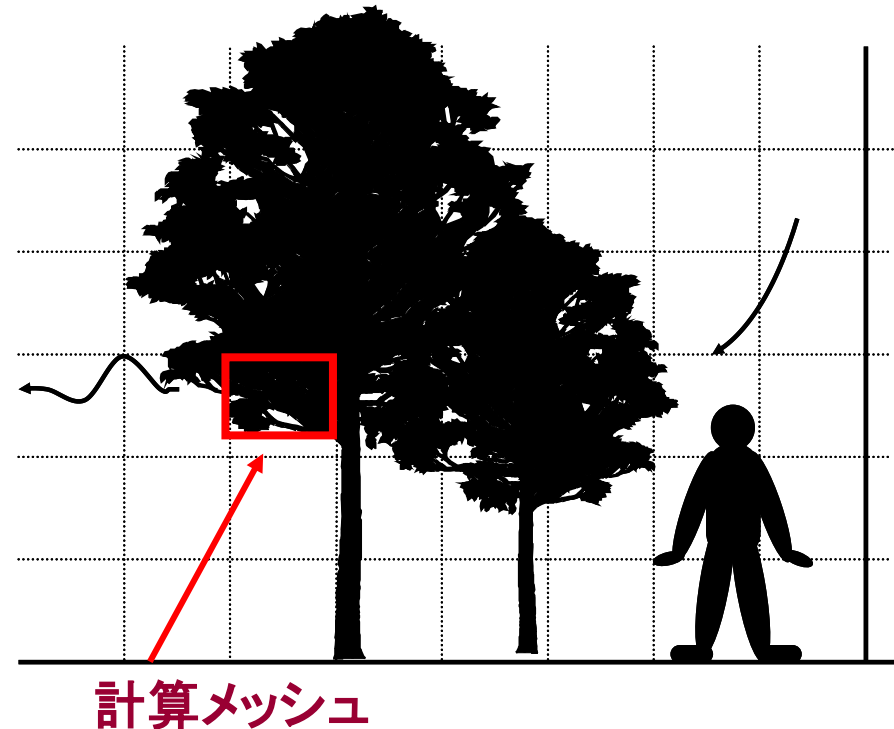
流体解析において固体境界の形状を逐一解析で再現するのではなく、
解析グリッド内で固体と流体が混在する状態を考え、
固体が流体に及ぼす影響を表現する項を基礎方程式
に付加してその効果を再現するというアプローチ

微小な物体の形状
(例えば葉の一枚一枚)を計算メッシュで再現するのは、とても大変。



Canopy モデル

解析メッシュに含まれる葉の影響をまとめて、解析メッシュ毎に方程式に付加項を加える。



Canopyの影響を組み込んだ方程式群(平岡)

[連続式]

$$\frac{\partial G \langle \overline{u_j} \rangle}{\partial x_j} - \langle \overline{u_{obs-j}} \rangle \frac{\partial G}{\partial x_j} = 0$$

[運動方程式]

$$\frac{\partial G \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial t} + \frac{\partial G \langle \overline{u_i} \rangle \langle \overline{u_j} \rangle}{\partial x_j} = - \frac{\partial G}{\partial x_i} \left(\frac{\langle \overline{p} \rangle}{\rho} + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial G \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial G \langle \overline{u_j} \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \langle \overline{u_{obs-j}} \rangle \frac{\partial G}{\partial x_j} \delta_{ij} \right\} - GF_i$$

[kの輸送方程式]

$$\frac{\partial Gk}{\partial t} + \frac{\partial G \langle \overline{u_j} \rangle k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma} \frac{\partial Gk}{\partial x_j} \right) + G(P_k - \varepsilon + F_k)$$

$-F_i$: 物体の抵抗によって
流体が受ける力(抗力)

[εの輸送方程式]

$$\frac{\partial G\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial G \langle \overline{u_j} \rangle \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma} \frac{\partial G\varepsilon}{\partial x_j} \right) + G \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon) + GF_\varepsilon$$

$+F_k$: 物体による乱れの発生
を表す付加項

$$P_k = \nu_t \frac{1}{G^2} \left(\frac{\partial G \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial G \langle \overline{u_j} \rangle}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \langle \overline{u_{obs-j}} \rangle \frac{\partial G}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \frac{\partial G \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial x_j} \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$+F_\varepsilon$: 物体による乱流渦の分解
の増加を表す付加項

$\langle f \rangle$: アンサンブル平均値(時間平均値) $\overline{f}$: 空間平均値

G : 流体占有率

(対象物体群の体積 V_{object} と対象物体群が占めるCanopy層の体積 V_{unit} の比(= V_{obj} / V_{unit}))

物体による影響を表す付加項

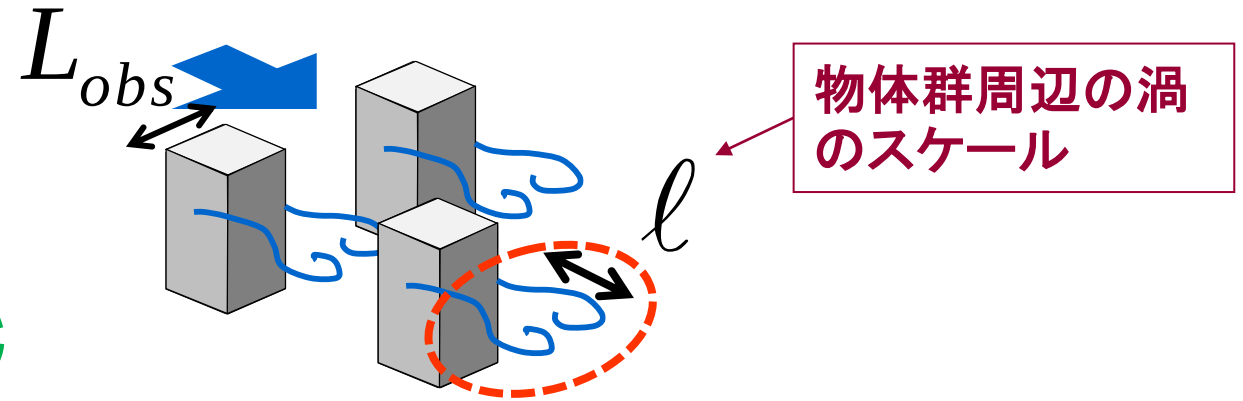
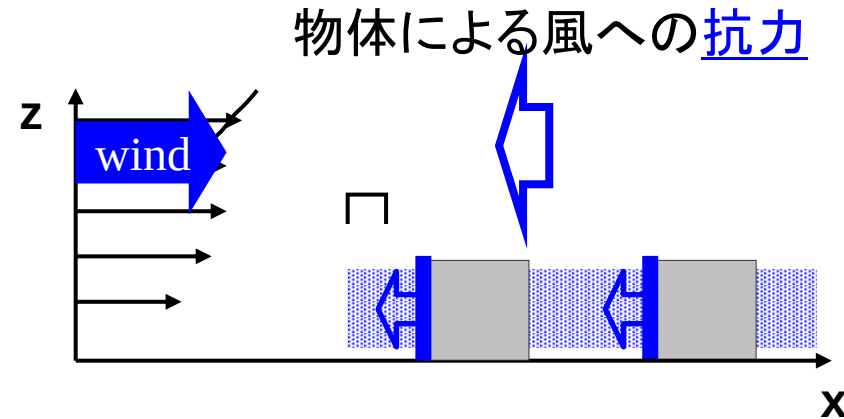
$-F_i$: 物体の抵抗によって
流体が受ける力(抗力)

$$F_i = \frac{1}{2} \underbrace{a_{xi} C_f}_{\text{抵抗面積密度} \times \text{モデル係数}} \overline{\langle u_i \rangle} \sqrt{\overline{\langle u_j \rangle}^2}$$

抵抗面積密度 × モデル係数

$+F_\varepsilon$: 物体による乱流渦の分解
の増加を表す付加項

$$F_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{k^{3/2}}{\underbrace{\ell}_{\ell = \frac{L_{obs}}{C_\varepsilon}}}$$



流れ場の性状を正しく再現するには、
物体の密度や形状に応じて適切な
モデル係数を与える必要がある

C_ε = 物体のスケール/物体群周辺の渦のスケール

既往の研究(丸山の建物Canopyモデル)⇒これが出発点

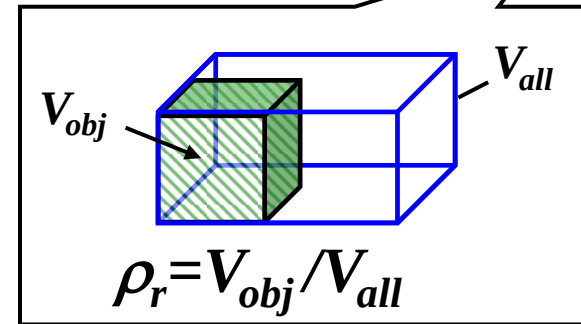
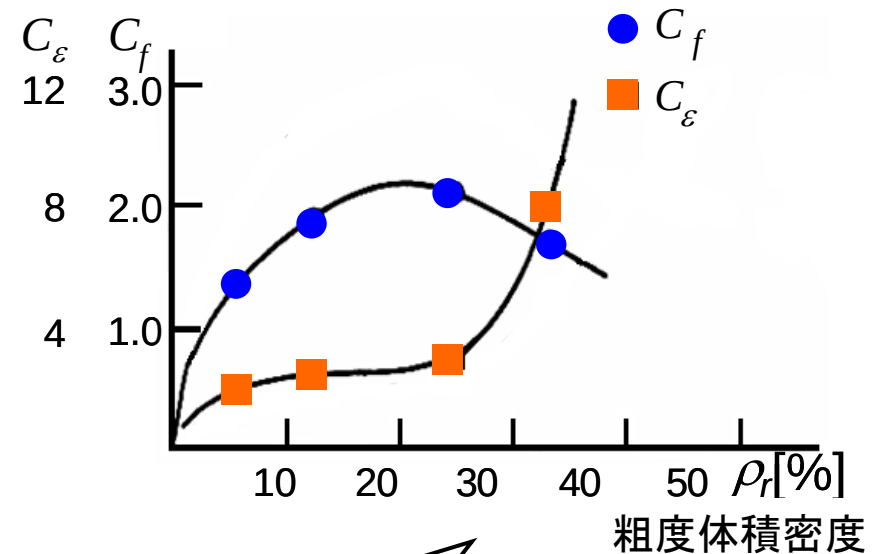
建物Canopyモデルの付加項

$$F_i = \frac{1}{2} a_{xi} \overbrace{C_{fi}}^{\text{blue dashed circle}} \overline{\langle u_i \rangle} \sqrt{\overline{\langle u_j \rangle}^2}$$

$$F_k = \overline{\langle u_i \rangle} F_i$$

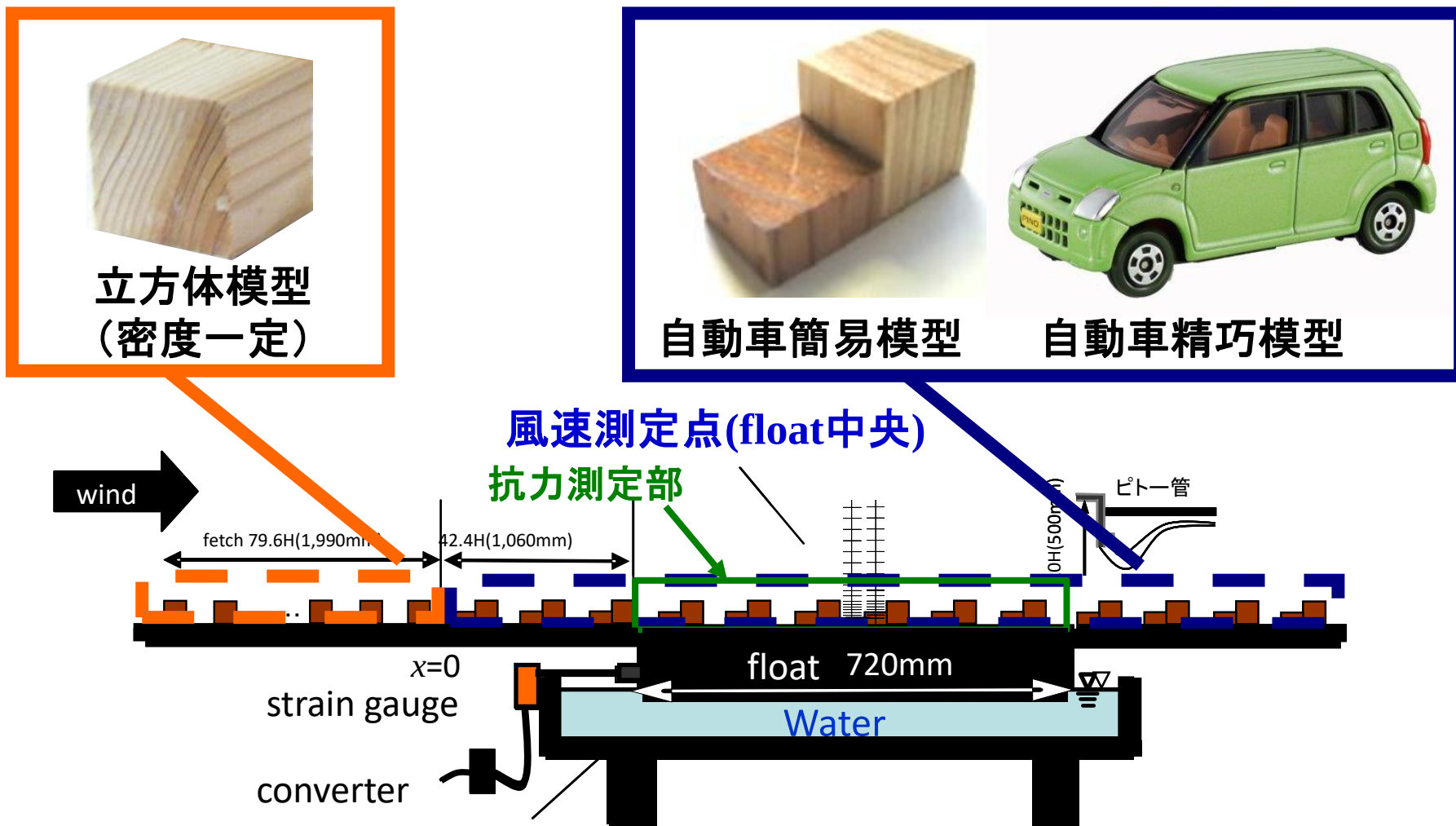
$$F_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{k^{3/2}}{\ell} = \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{k^{3/2}}{L_{obs}} \overbrace{C_{p\varepsilon}}^{\text{red dashed circle}}$$

丸山先生(京大)の建物Canopyモデル:
立方体模型群の風洞実験結果と
解析の比較により、それぞれの模型密度
におけるモデル係数 C_f 、 C_ε の最適値を決定 ⇒ 粗度体積密度 ρ_r の関数と定義



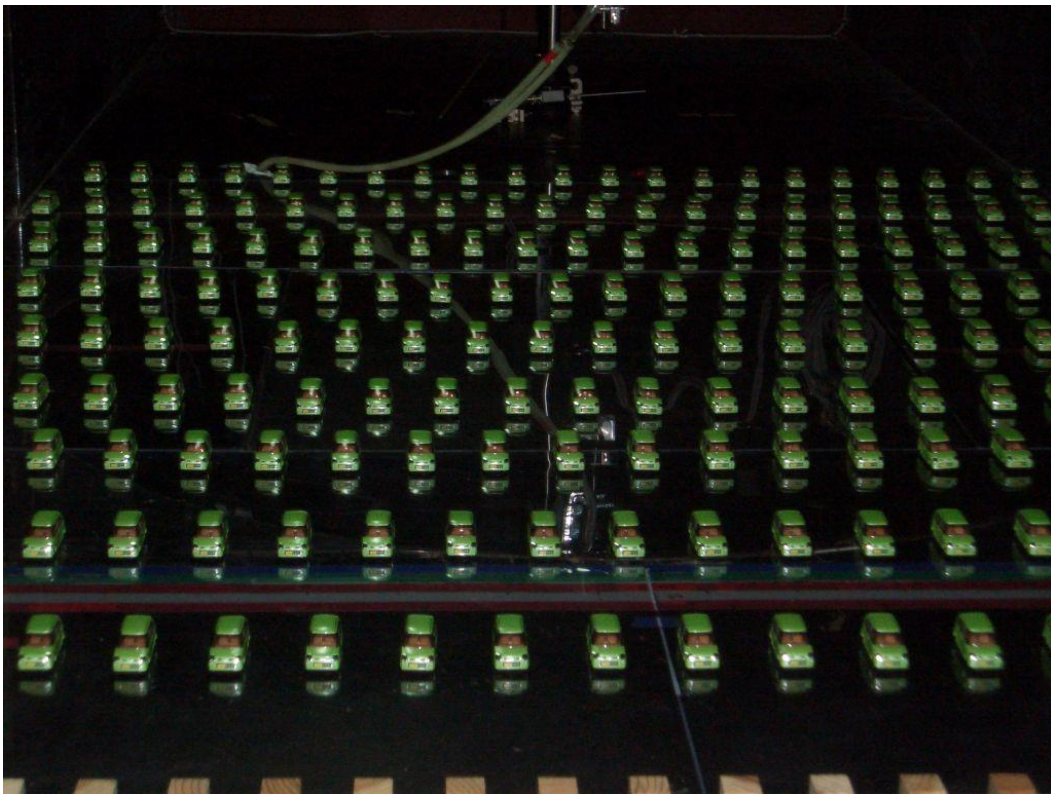
九州大学萩島研での風洞実験

各々の模型を対象に、模型密度を4段階変えて抗力と鉛直風速分布を計測



フロート 28.8H(720mm) × 28.8H(720mm)

風洞実験装置概念図(九州大学都市建築環境工学研究室)

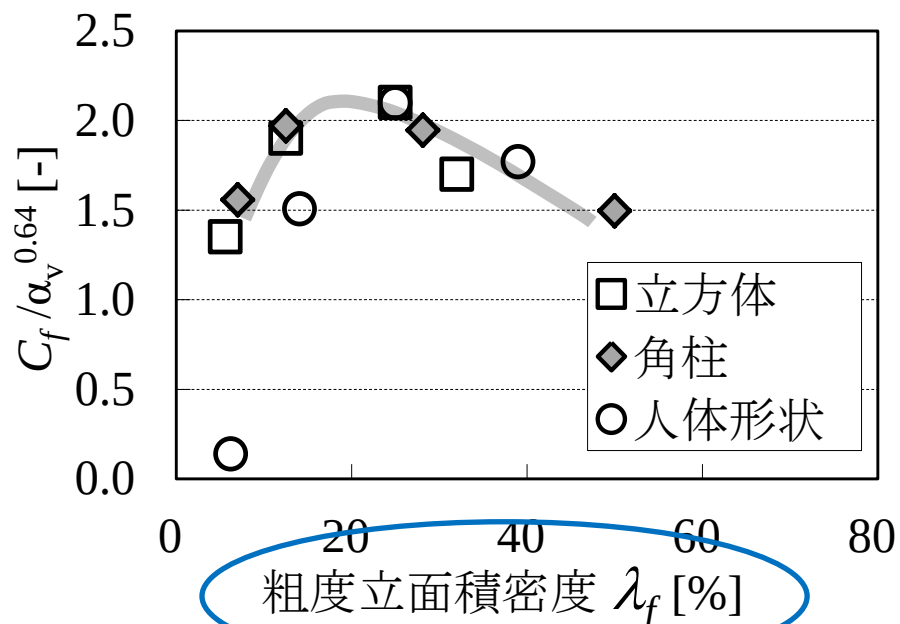


- 丸山先生の建物Canopy モデルをベースに様々な形状に適用可能な形に拡張。
⇒田畑侑一君修士論文(2007年度)、今野尚子さん修士論文(2010年度)、
小野梓さん修士論文(2012年度)の一部
- さらに、LESの結果を用いて Canopy 層内乱れの長スケールや付加項 F_k の空間分布を算出等(小野梓さん修士論文(2012年度)、馬佳敏さん修士論文(2012年度)、渡辺朱生君修士論文(2015年度)、阿藤裕昭君の修論(2016年度))。

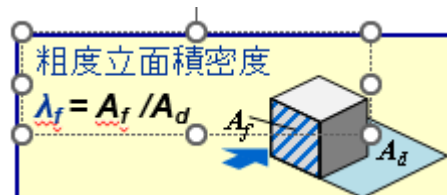
丸山敬: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46&47, 1993, 165-171

モデル係数設定方法(今野(2010)+小野(2012))

抵抗を表すモデル係数 C_f

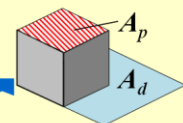


⇒ 曲線から求めた値に
アスペクト比の0.64乗を乗じる

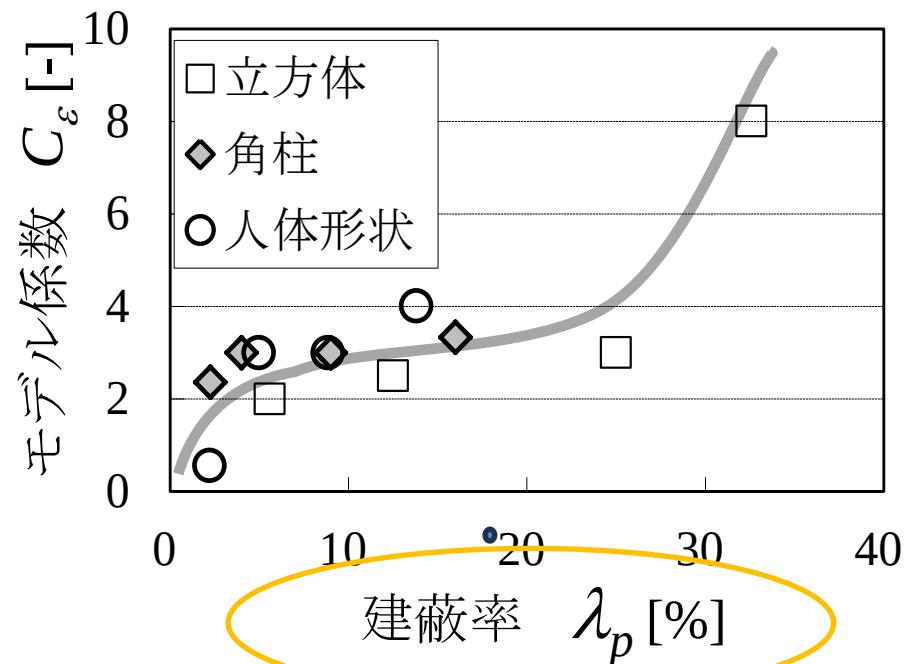


粗度面積密度
(建蔽率)

$$\lambda_p = A_p / A_d$$



渦の長さスケールを規定するモデル係数 C_ε



⇒ すべての形状に対し
曲線の値を用いる

物体のスケール L_{obs}

$$L_{obs} = \max(L, H)$$

L : 物体の幅, H : 物体の高さ

田畑侑一、持田灯、今野尚子、菊池文、丸山敬、萩島理、谷本潤、自動車の形状・密度を変化させた場合のモデル係数の最適値の変化—走行する自動車群の流体力学的効果を再現するためのCFDモデルの開発（その1）、日本建築学会環境系論文集、76(667)、(2011)、831-837

都市空間に散在する微小物体群により形成されるCanopy Flowのモデリング

⇒**科研の目的に沿った Output**

今野尚子、小野 梓、持田 灯、丸山 敬、萩島 理、谷本 潤、一様物体群のアスペクト比と密度が異なる場合に対するCanopyモデル係数設定法の提案、日本建築学会環境系論文集、79(702)、(2014)、699-707

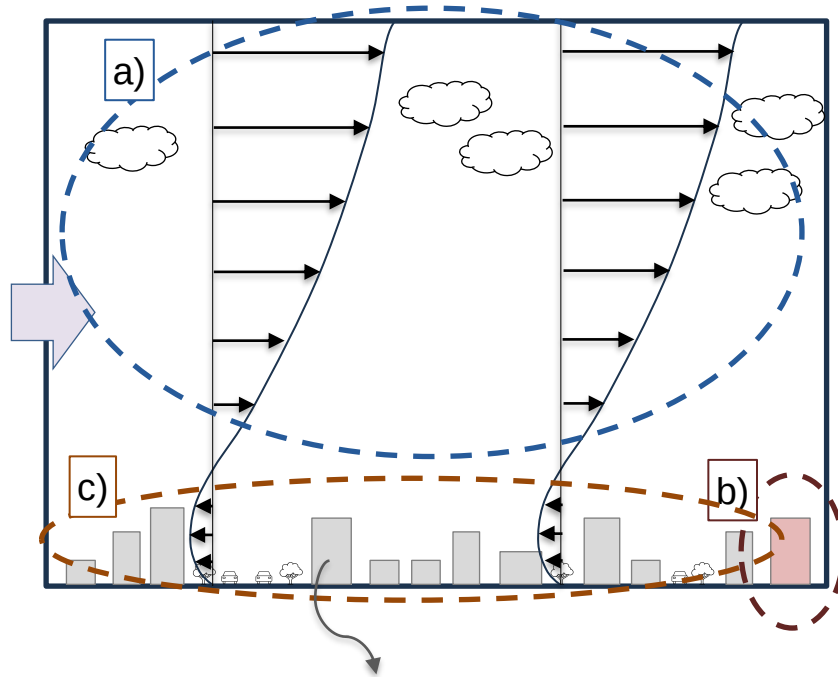
⇒**より一般化を志向。**

T. Okaze, A. Ono, A. Mochida, Y. Kannuki, S. Watanabe, Evaluation of turbulent length scale within urban canopy layer based on LES data, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 144, (2015), 79-83

⇒**非常に deep な世界に到達。**

このCanopyモデルの研究が、この後の風通しの研究のための我々の基礎体力作りになった！

Canopyモデルの目的は、
この様々な微細な気流障害物の風速分布への影響を見ること。
これは、萩島（都市気候学）・丸山（耐風工学）・持田（風環境工学） 共通。



しかし最終目的が違う。

- a) 都市気候学(萩島)
全体の大気境界層の性状
(主として、都市ラフネス上部)
- b) 耐風工学(丸山)
特定の設計対象の建物に
作用する風荷重
- c) 風環境工学(持田)
都市ラフネス内部の人間の
生活空間の風荷重

都市の地表付近の様々な気流障害物 => 都市ラフネス

- 都市気候学 => 集合としての建物等の都市ラフネス群が
全体の気候に及ぼす影響が興味の対象（都市計画と親和性?）
- 風工学 => 個別の建設プロジェクトの設計・アセスのための学問として発展

4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

- （１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発
- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発**
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発
- （４）メソスケールの研究の進捗
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価
- （７）広州、武漢を対象とした研究

<2010年代半ば以降>

- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発
- （10）市街地風環境の制御
- （11）若干、手を付けた今後の課題

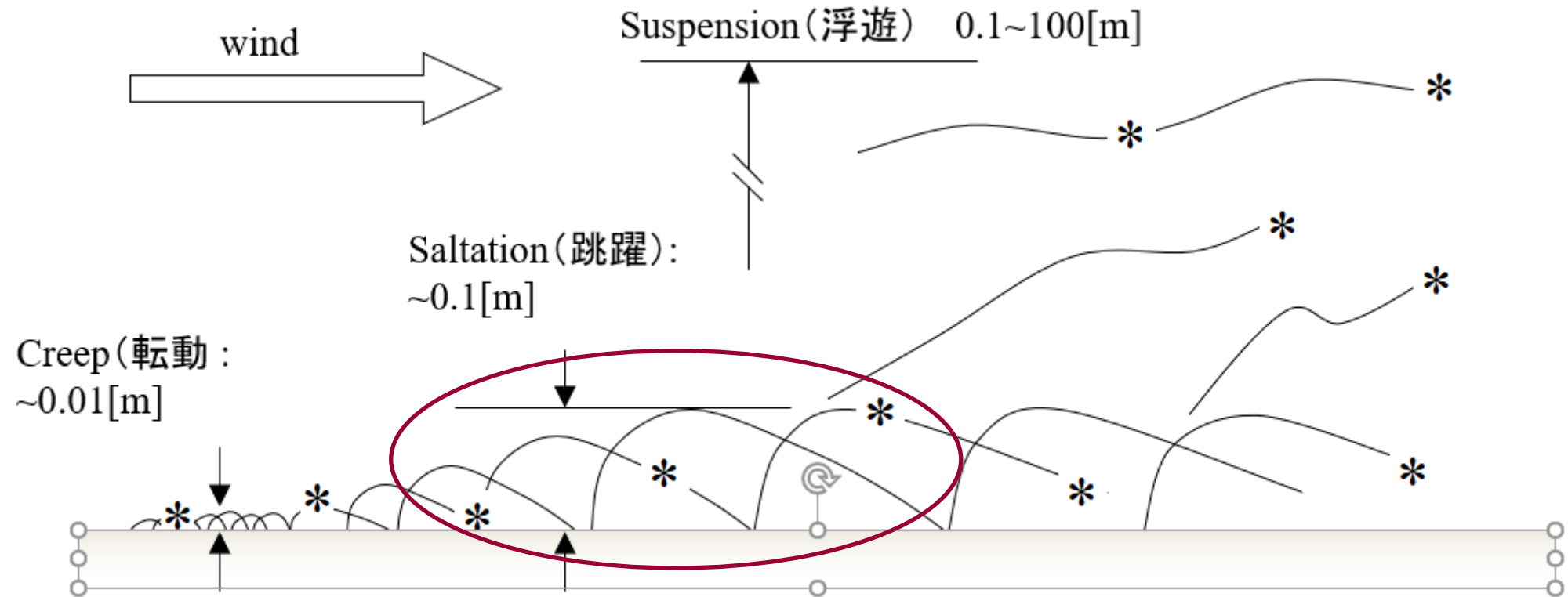
(2) 建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発

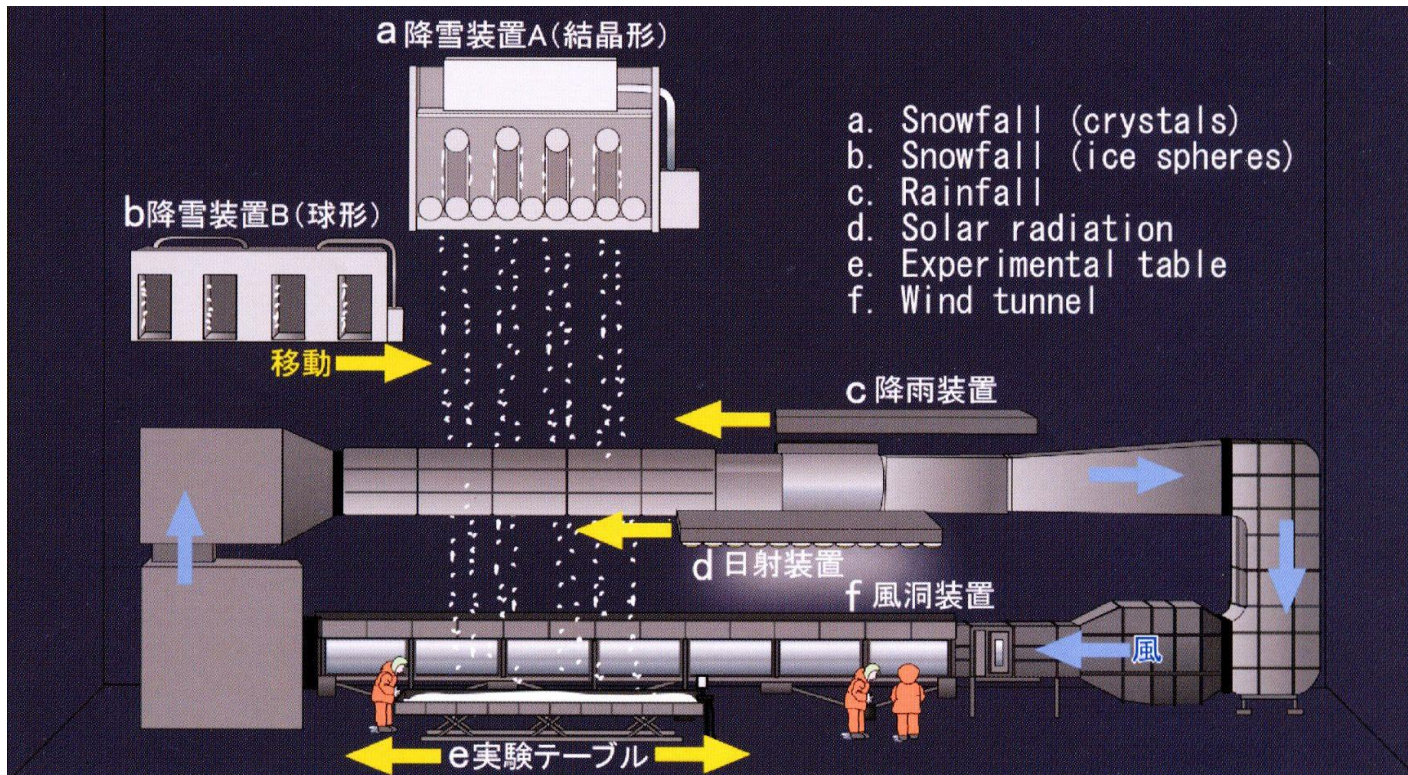
CWE × 雪工学 × 都市気候学 = CFD × 風工学 × 雪工学 × 都市気候学



- 2005年度に卒論生として研究室に
来た大風翼君(山形出身)が雪の研究を志望してくれたので、新潟時代に少し手掛けた雪の研究を再開。
- 新潟工大の富永研との雪に関する共同研究がスタート。いろいろな予算を獲得しながら、学際的な共同研究を進めることが出来た。
- 雪は一様に積もる訳ではない。
- 風の強い所で舞い上がり、風の弱い所に吹き溜まる。
- この積雪の偏分布が様々な問題を引き起こす。

雪粒子の運動の3形態





防災科学技術研究所 雪氷防災センター 新庄支所

- 積雪地域で起こる様々な現象を実験室レベルで再現できる世界最大規模の施設

新たな飛雪モデルの提案

従来,

一つの飛雪空間密度 $\langle \Phi \rangle$ の輸送方程式を解いていた。

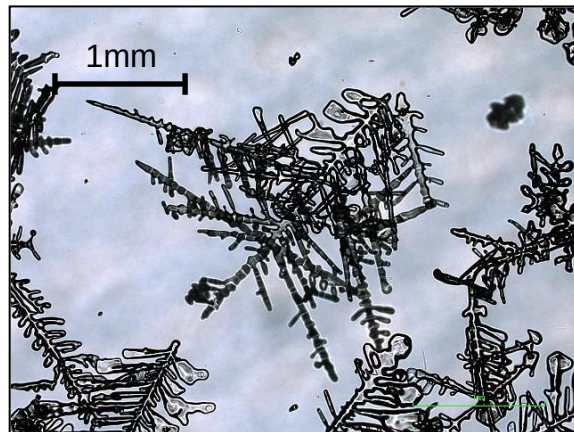
⇒ 飛雪空間密度 $\langle \Phi \rangle$: 単位体積当たりの雪粒子の質量 [kg/m³]

大風君の博士論文,

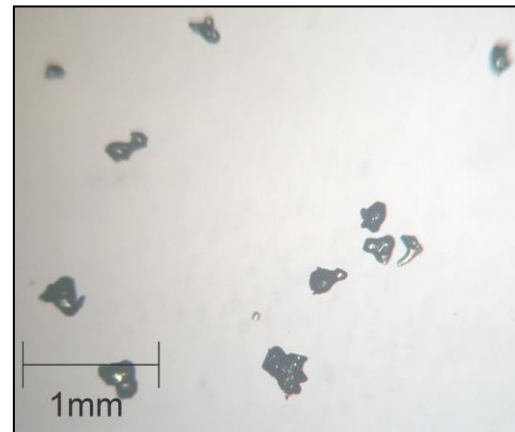
飛雪空間密度 $\langle \Phi \rangle$ を以下の2つの成分（空から降ってきた雪と地面から舞い上がってきた雪）に分けて考える。そして、2つの飛雪空間密度の輸送方程式を解く。

$$\langle \Phi \rangle = \langle \Phi_{sky} \rangle + \langle \Phi_{surf} \rangle$$

$\langle \Phi_{sky} \rangle$



$\langle \Phi_{surf} \rangle$



2つの飛雪空間密度の輸送方程式

Two transport equations of the two different drifting snow densities were solved with two types of settling velocities, corresponding to the snow particles from sky and those from surface.

$$\langle \Phi \rangle = \langle \Phi_{sky} \rangle + \langle \Phi_{surf} \rangle \quad (14)$$

1) snow particles from the sky

$$\frac{\partial \langle \Phi_{sky} \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \Phi_{sky} \rangle \langle u_i \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial \langle \Phi_{sky} \rangle \langle wf_{sky} \rangle}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_s} \left(\frac{\partial \langle \Phi_{sky} \rangle}{\partial x_i} \right) \right] \quad (15)$$

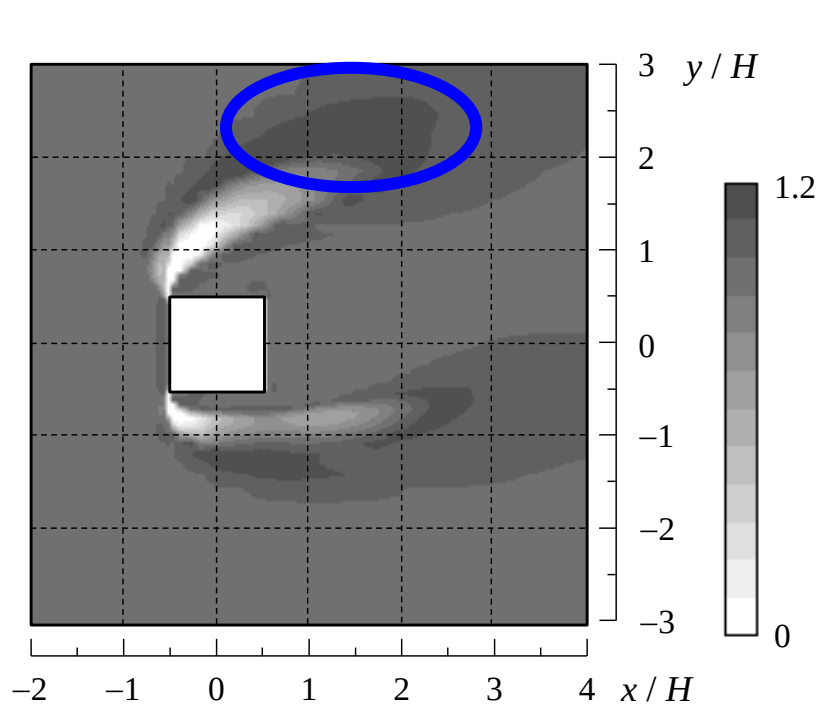
$\langle wf_{sky} \rangle$: settling velocity for $\langle \Phi_{sky} \rangle$ [m/s]

2) snow particle from the surface

$$\frac{\partial \langle \Phi_{surf} \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \Phi_{surf} \rangle \langle u_i \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial \langle \Phi_{surf} \rangle \langle wf_{surf} \rangle}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_s} \left(\frac{\partial \langle \Phi_{surf} \rangle}{\partial x_i} \right) \right] \quad (16)$$

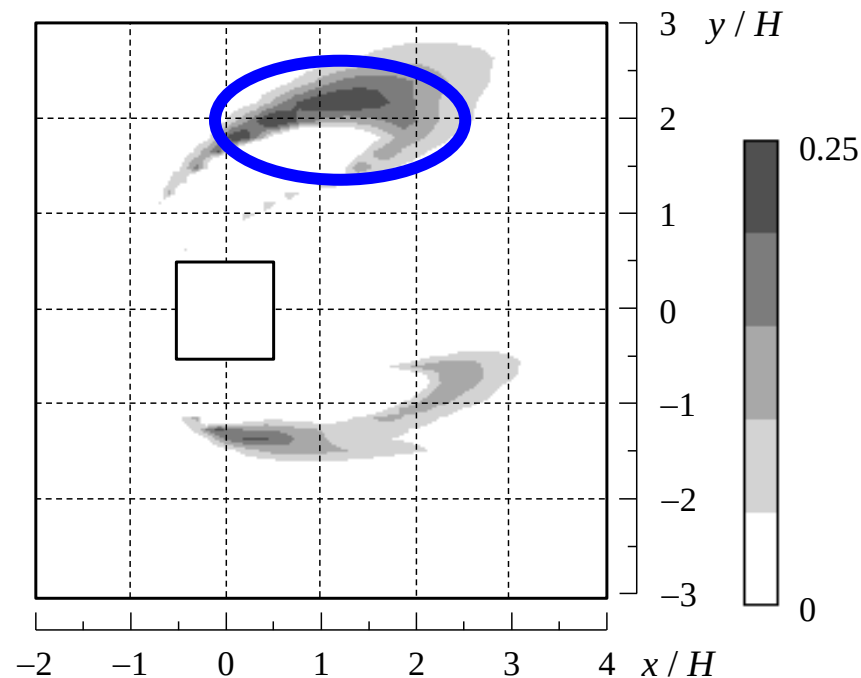
$\langle wf_{surf} \rangle$: settling velocity for $\langle \Phi_{surf} \rangle$ [m/s]

トータルの積雪量に占める地面からの雪の成分 $\langle \Phi_{surf} \rangle$ の割合



Snow depth

CFD (Case 3; $\zeta = 1.0 \times 10^{-5}$)



Contribution ratio of $\langle \Phi_{surf} \rangle$ to
accumulated snow R_{surf}

大風 翼, 富永禎秀, 持田 灯, 2つの飛雪空間密度の輸送方程式に基づく新たな飛雪モデルの開発—CFDによる建物周辺の飛雪現象の数値予測(その2)—, 日本建築学会環境系論文集, 78(684), (2013), 149-156

⇒大風君が、この論文で2015年 日本建築学会 奨励賞

また、大風君は平成24年度 日本雪工学会賞 学術奨励賞も受賞 (「複雑流れ場における飛雪現象のモデル化に関する研究」)

移動物体を対象とした自動車Canopyモデルの方法論の雪工学への応用： 雪粒子の流体への影響を記述するCFDサブモデルの開発

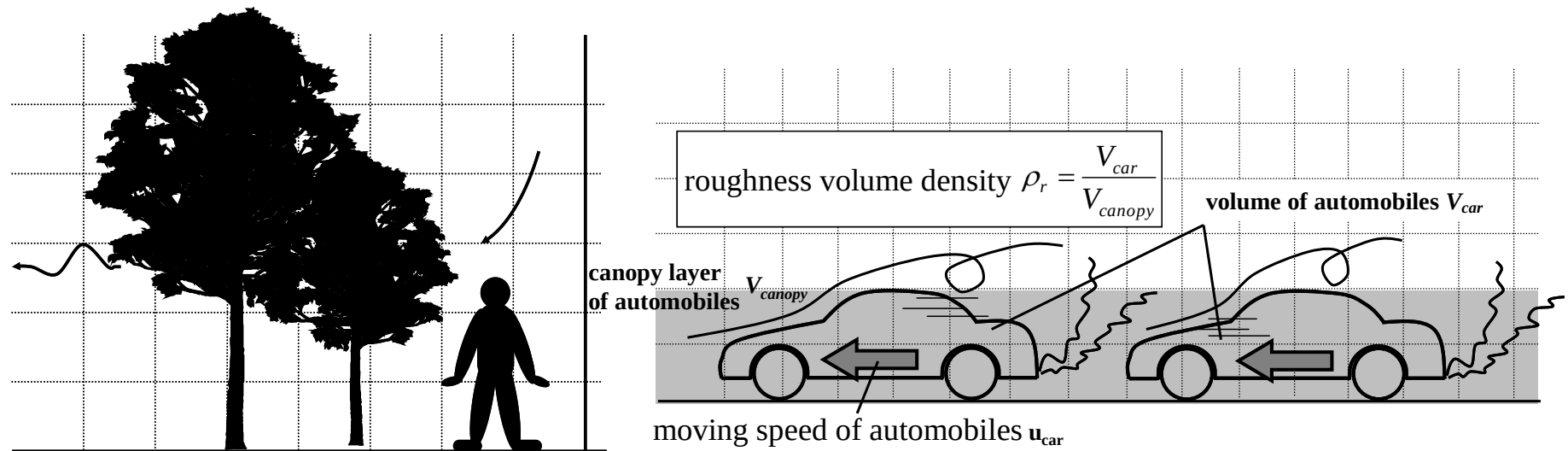


雪面付近のSaltation層では、雪の再飛散の影響により、
飛雪空間密度が、時折大きな値となる。

→ これらの領域では、雪粒子が流れ場へ及ぼす影響は無視できない。

- ・4-2(2)で示した移動物体(自動車群)を対象とする Canopyモデルの考え方を飛雪のモデル化に応用。

⇒ 雪粒子が流れ場へ及ぼす影響を再現する数値モデルを定式化し、モデル係数を同定。



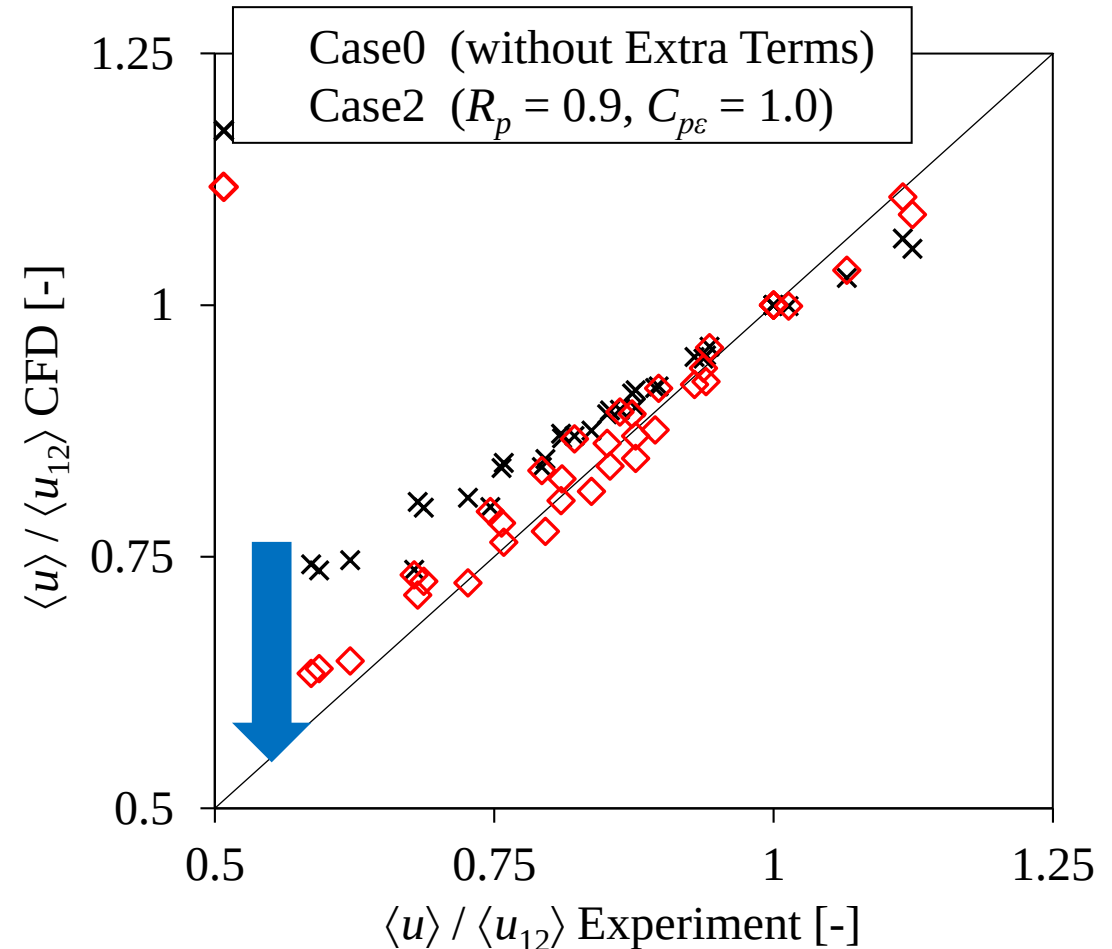
田畑侑一ほか: 日本建築学会環境系論文集、第76巻、第667号、pp831-837、2011.9

Canopyモデルの方法論を用いた数値サブモデルの開発

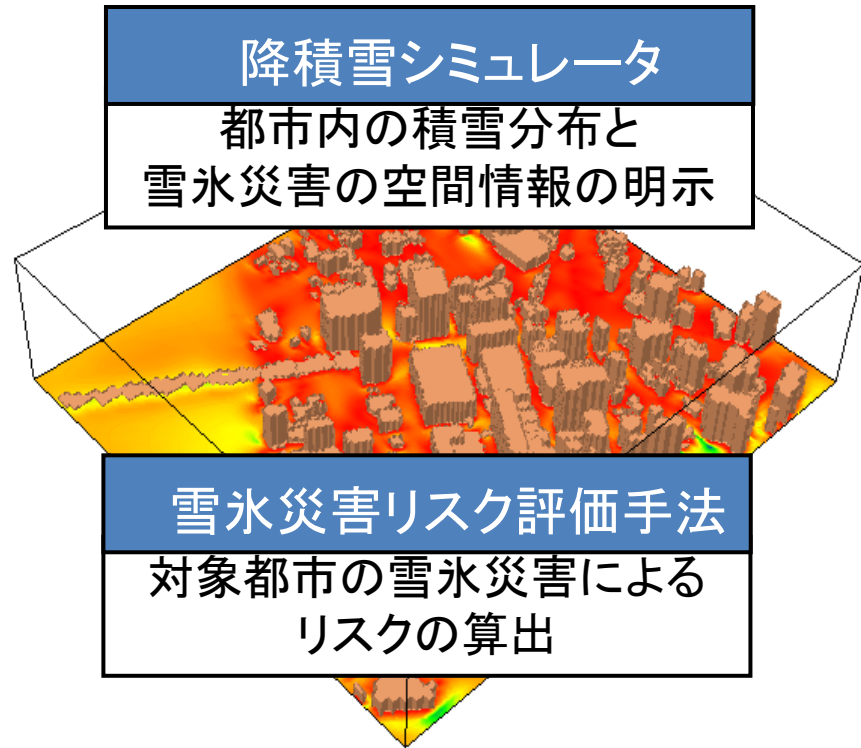
- ・移動物体(自動車群)を対象とするCanopyモデルの考え方を飛雪のモデル化に応用。
- ⇒ 雪粒子が流れ場へ及ぼす影響を再現する数値モデルを定式化し、モデル係数を同定。

新しいモデルの結果 (Case2
($R_p=0.9$, $C_{p\varepsilon}=1.0$)) は、雪粒子
による風速低減効果をよく再現。

T. Okaze, Y. Takano, A. Mochida, Y.
Tominaga, Development of a new k- ε
model to reproduce the aerodynamic
effects of snow particles on a flow field
[Journal of Wind Engineering and
Industrial Aerodynamics, 144, (2015),
118-124



都市・建築空間の雪氷現象の総合予測のための 気象モデルと工学的CFDモデルの統合 (2008-2010)



気象モデルと工学的CFDモデルを統合した総合
予測の応用分野の拡大

①ヒートアイランド対策のためのSoftware Platform



②局所風況予測モデルLAWEPS



③都市・建築空間の雪氷現象の総合予測のため
の降雪シミュレーター

- ・日本建築学会 都市・建築空間の雪氷災害対策に関する
特別研究委員会(委員長:持田、2007年・2008年)
- ・国土交通省の研究開発助成(代表:吉野先生 2008年～2010年)

委員構成

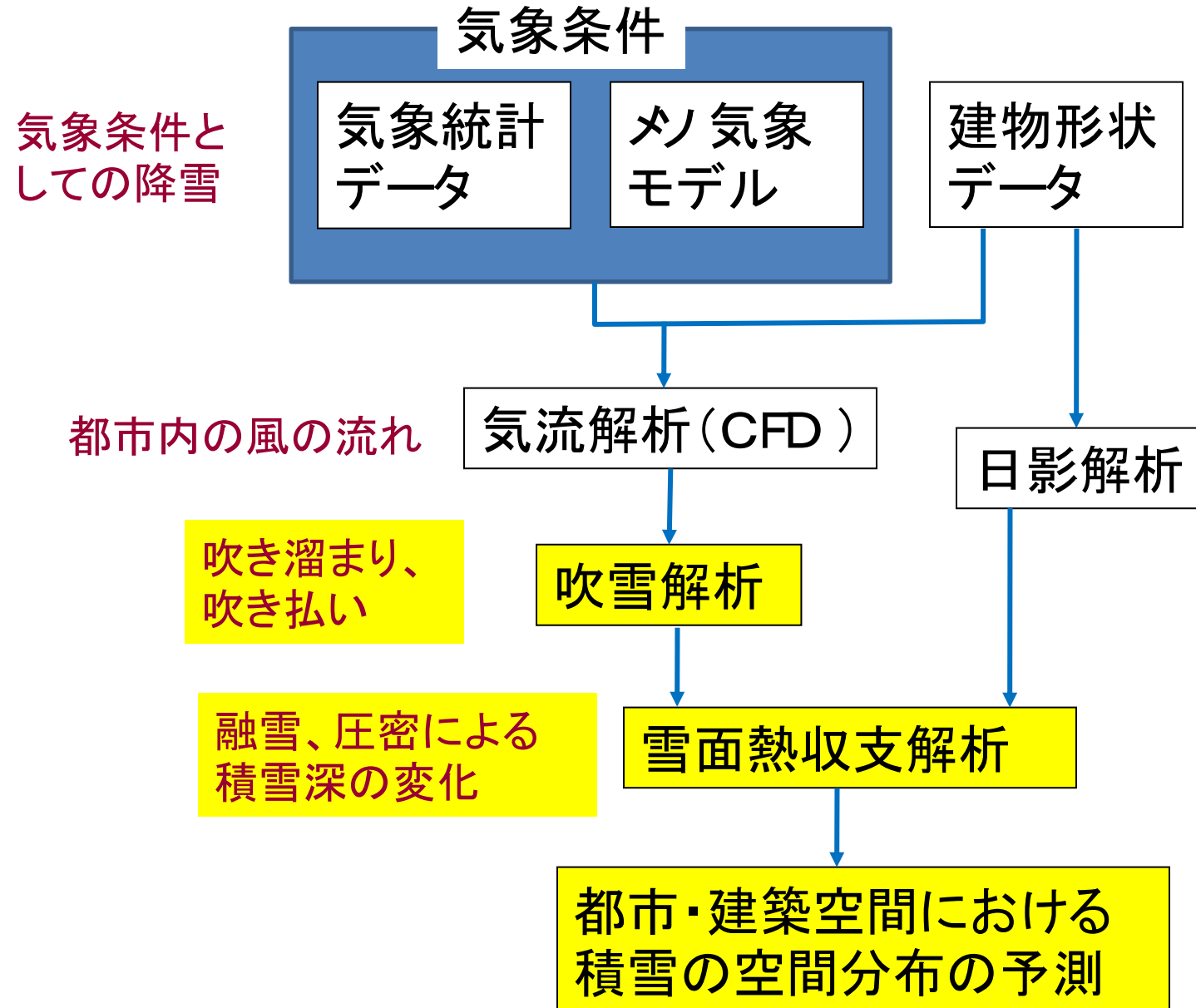
社会システムWG

沼野夏生(東北工大)	堤 拓哉(北方総研)
佐藤 威(防災科技研)	深澤大輔(新潟工大)
植松 康(東北大)	苫米地司(道工大)
吉野 博(東北大)	谷口尚弘(道工大)
高橋 徹(千葉大)	上村靖司(長岡技大)
寺内義典(国土館大)	持田 灯(東北大学)
諸橋和行(日本システム開発研)	

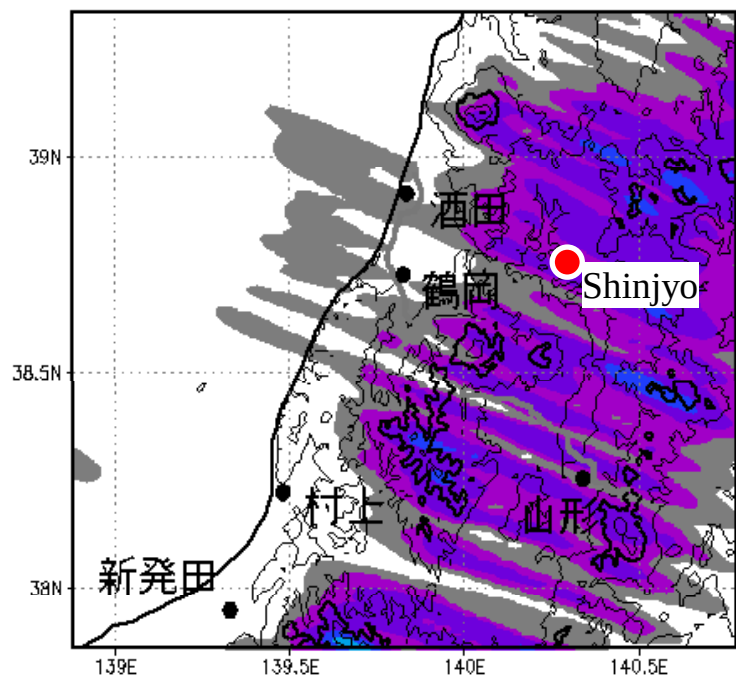
Snowdrift WG

富永禎秀(新潟工大)
持田灯(東北大・工学研究科)
根本征樹(防災科学技術研究所・雪氷防災技術研究所)
山崎剛(東北大・理学研究科)
本谷研(秋田大・教育文化学部)
本間義規(岩手県立大)
植松孝彦(雪研スノーイーターズ)
中井専人(防災科学技術研究所・雪氷防災技術研究所)

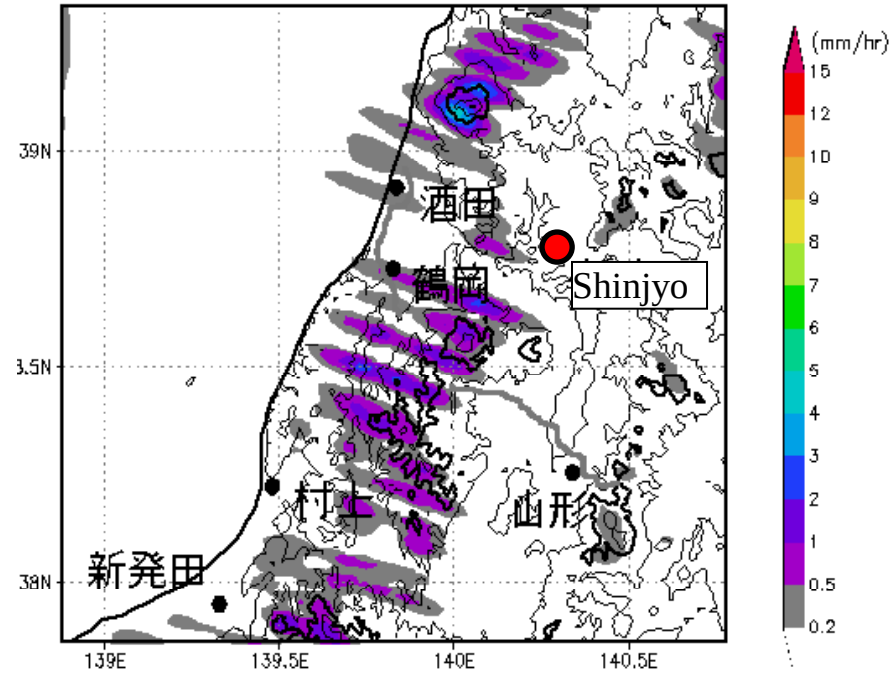
都市・建築空間における雪氷現象の予測モデル



メソ気象モデルの結果



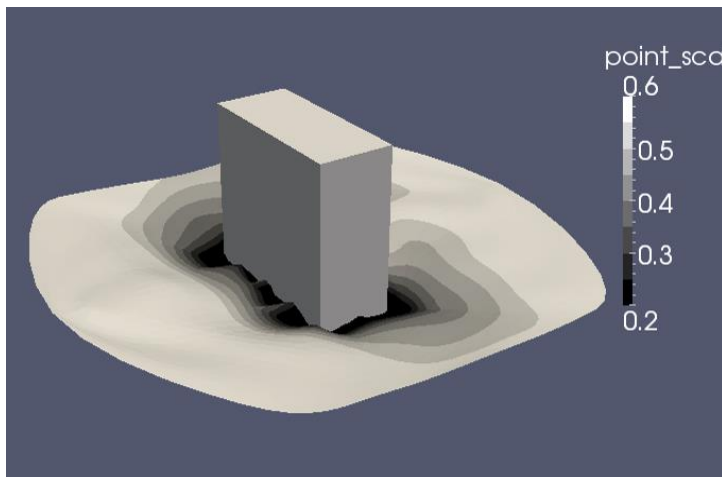
Snow



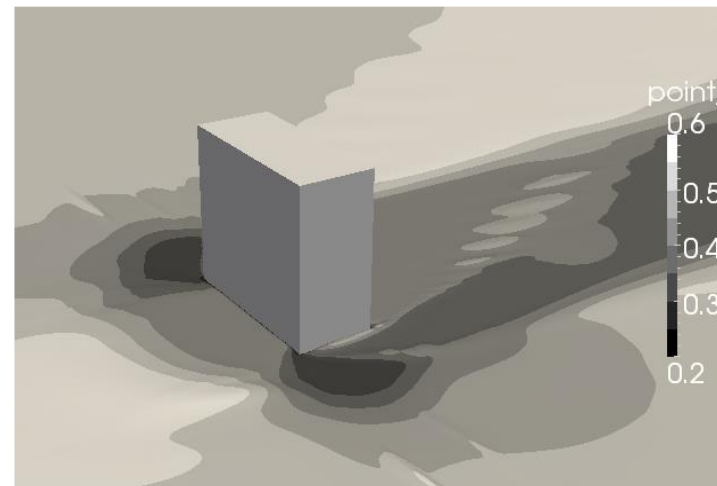
Hail(雹)

2010/01/02 06JST

観測結果とCFD予測値の比較



(1) 観測結果



(2) CFD

Test Building 周辺の積雪深分布

Yoshihide Tominaga, Akashi Mochida, Tsubasa Okaze, Takeshi Sato, Masaki Nemoto, Hiroki Motoyoshi, Sento Nakai, Takuya Tsutsumi, Masaya Otsuki, Takahiko Uamatsu, Hiroshi Yoshino, Development of a system for predicting snow distribution in built-up environments: Combining a mesoscale meteorological model and a CFD model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 99, (2011), 460-468

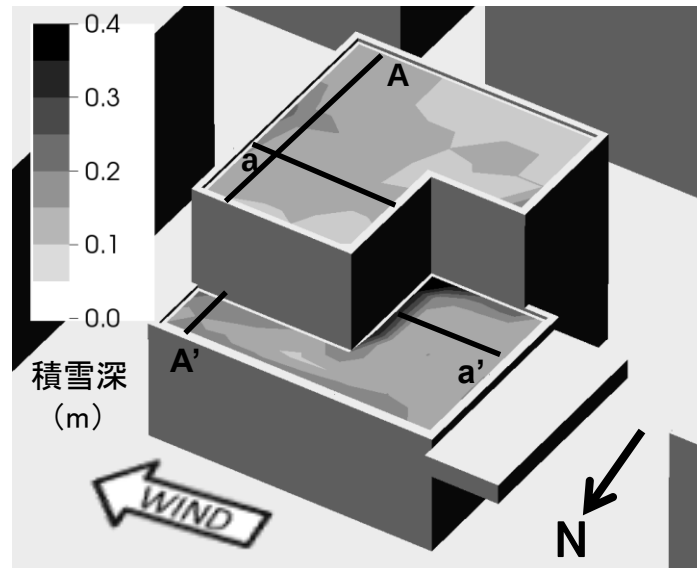
⇒日本風工学会ベストペーパー賞受賞

住宅の屋根雪分布の予測モデルの開発（2011年度）

セコム科学技術振興財団・平成23年度研究助成

「流体数値シミュレーションによる個別住宅の屋根雪危険度判定」

- ・ 持田（東北大）、富永（新潟工科大学）、堤拓哉（北方建築総合研究所）、植松孝彦（株式会社雪研スノーイーターズ）



北海道の札幌市と下川町で屋根雪の積雪深さの長期測定を実施し、シミュレーション結果と比較。

大槻 政哉, イセンコ エフゲーニー, 齋藤 佳彦, 富永 禎秀, 堤 拓哉, 持田 灯, 苫米地 司,
CFDに基づく戸建住宅の屋根雪分布予測 [第23回風工学シンポジウム論文集, (2014), 529-534]

雪をテーマにした博士論文・修士論文

博士論文

- 大風翼君博士論文(2011年度)「2つの飛雪空間密度の輸送方程式に基づく建物周辺における飛雪現象の数値解析手法の開発」

修士論文

- 伊藤 優君修士論文(2009年度)「吹雪モデルと融雪モデルを連成させた市街地内における積雪分布の予測手法の開発」
- 佐々木康友君修士論文(2011年度)「CFDによる建物周辺の積雪分布予測手法の研究－隣棟間隔の相違が積雪量・融雪量に及ぼす影響に関する検討－」
- 加藤冴佳さん修士論文(2015年度)「CFDを用いた積雪寒冷都市における建物配置計画に関する基礎的研究」
- 大風君の博士論文は飛雪の数値モデルに焦点を絞っているが、修士論文では融雪も含めた評価を行い、計画論的な検討をしている。
- 都市空間での放射もきちんと解いて融雪量まで計算できるグループは殆どいないと思うので、今後誰かに引き継いで貰いたい。

博士修了後の大風君の履歴

- 2012年4月 東北大学 大学院工学研究科 日本学術振興会特別研究員 (PD)
- 2013年4月 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 助教
- 2016年3月 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 准教授
後任として、石田泰之君にオリエンタルランドから戻って来て貰う。

⇒ここで持田研の雪の研究は東工大の大風研に暖簾分け。

その後の大風君研の雪の研究の展開

①北海道道東の吹雪観測・ニセコの吹き溜まり観測等、理学方面への進出

2022年 日本雪氷学会平田賞

「風洞実験や野外観測による吹雪現象の解明と数値流体力学に基づく吹雪モデルの構築」

②CFD解析の雪国の建築デザインへの応用（鈴木建築設計事務所の作品へのコンサル）

2023年 日本風工学会デザイン賞

「受賞作品名：川西町庁舎」鈴木建築設計事務所藤原薫氏、千葉巧也氏、齋藤英二氏＋大風君

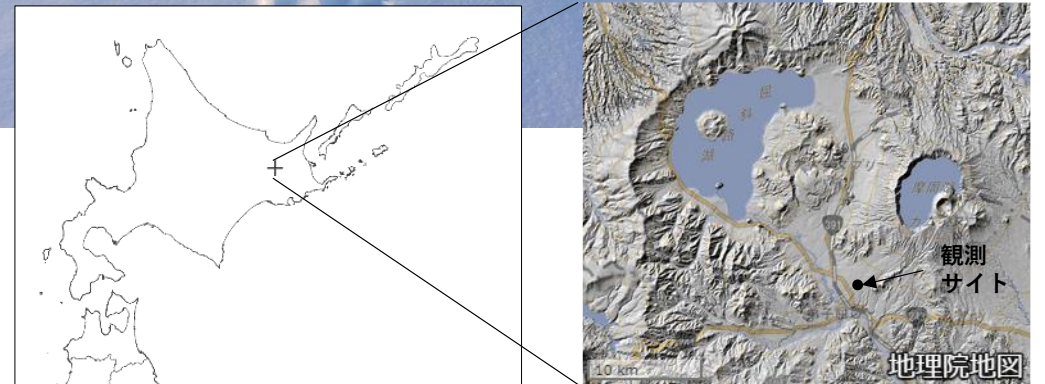
道東での吹雪観測



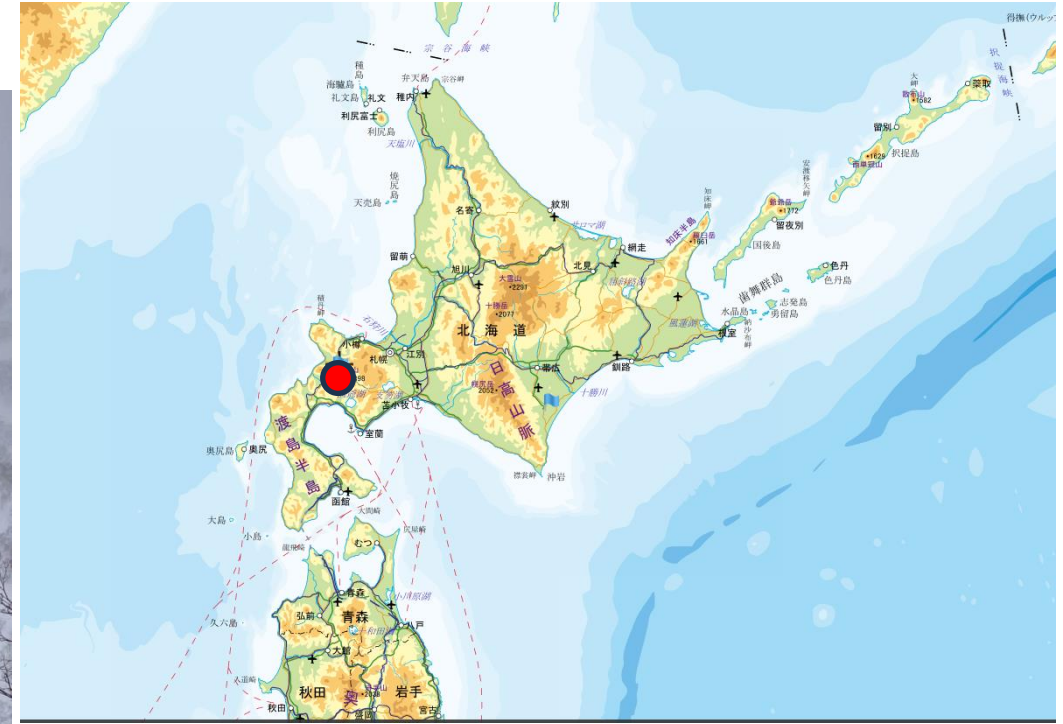
吹雪による視程低下の評価のため、
ここ数年は、道東(摩周湖の近く)で吹雪観測。

2022年度 日本雪氷学会平田賞

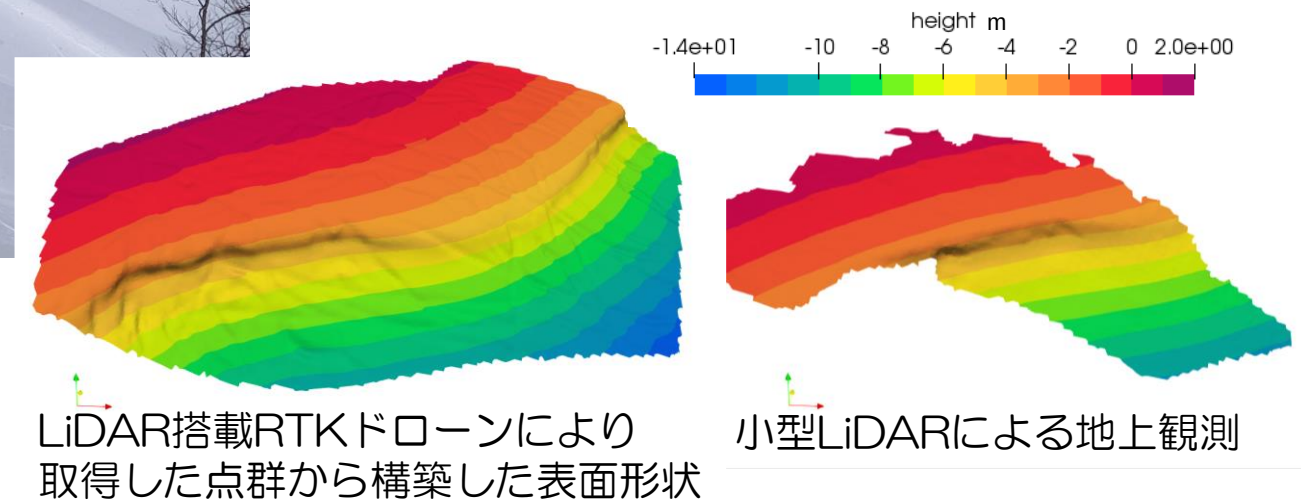
「風洞実験や野外観測による吹雪現象の解明と数値流体
力学に基づく吹雪モデルの構築」



ニセコ山中での吹き溜まり観測



加えて、最近は、雪崩の原因になる
山の稜線にできる吹きだまりの観測
ニセコ山中にて。



川西町役場 設計:株式会社鈴木建築設計事務所

・大風君がCFD解析に基づく風雪対策を担当

⇒日本風工学学会デザイン賞を共同で受賞

(鈴木建築設計事務所 藤原薫氏、千葉巧也氏、齋藤英二氏+大風君)



△川西町役場(南面)

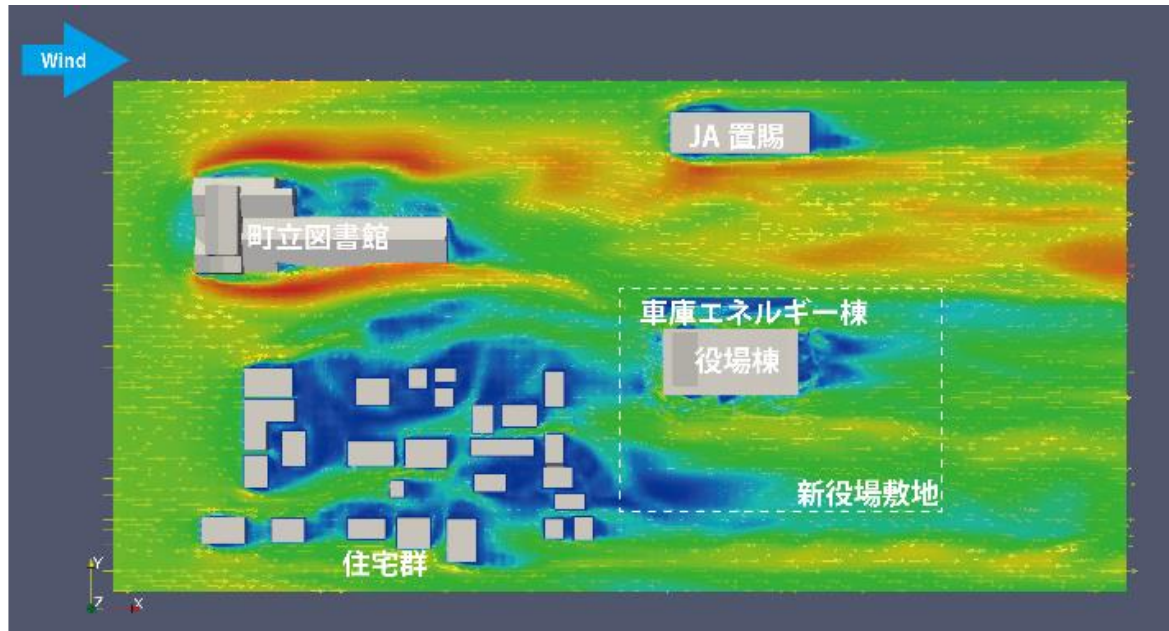


△役場西側から見たかざらい格子

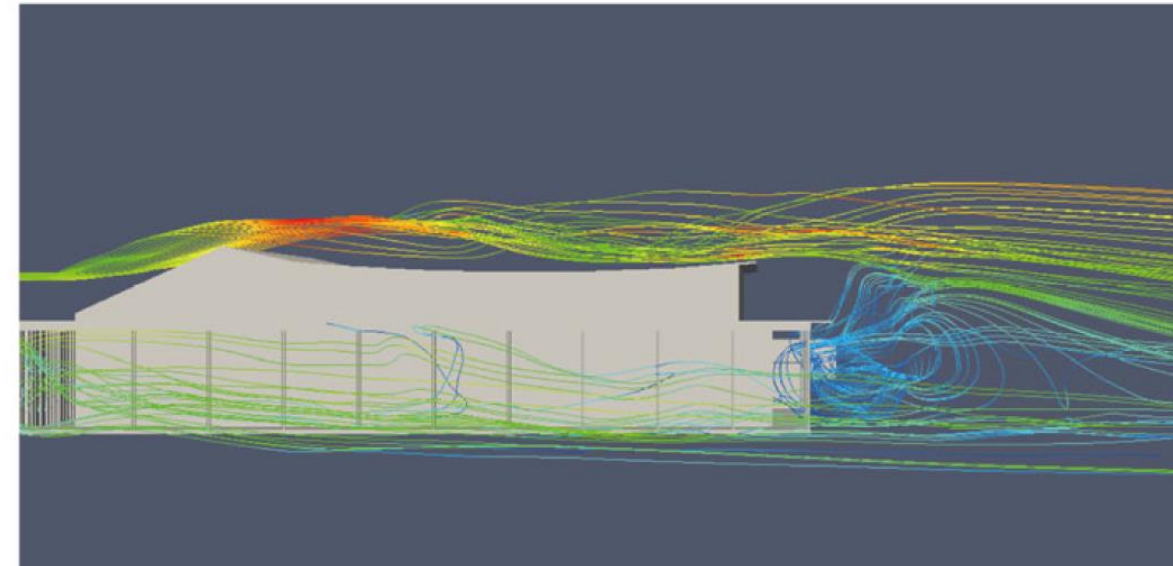
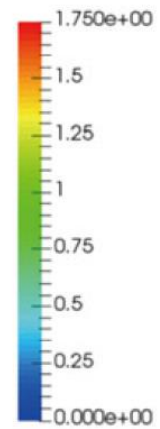
この作品に関する設計者等の解説:

藤原薫、千葉巧也、齋藤英二、大風翼 「豪雪地帯における雪と建築デザインの融合」、
日本風工学学会誌、2024年1月号、41-45

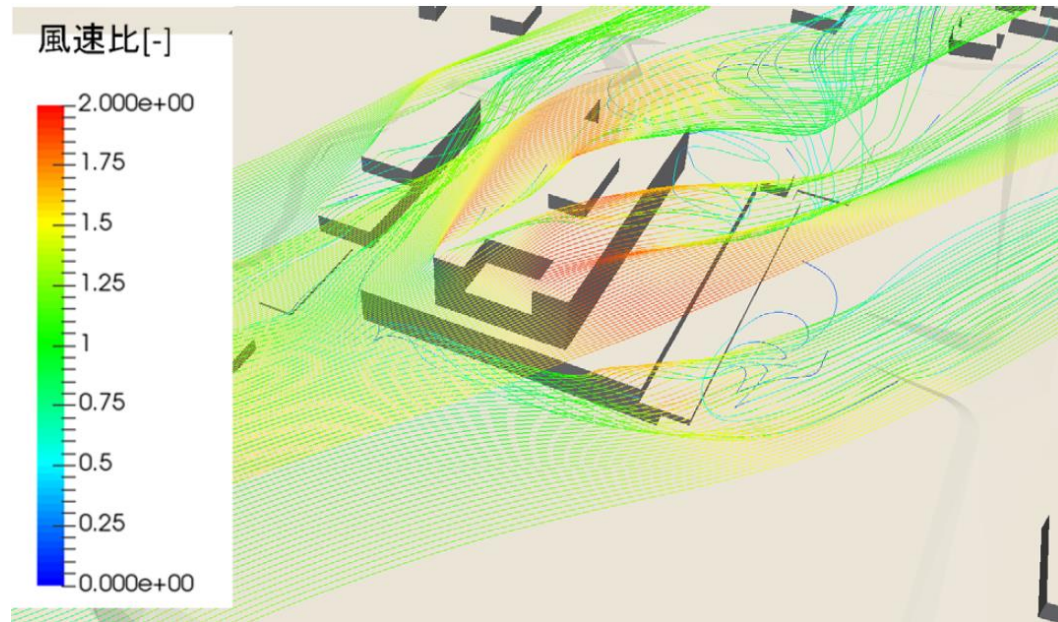
川西町役場のCFD解析



風速比 [-]

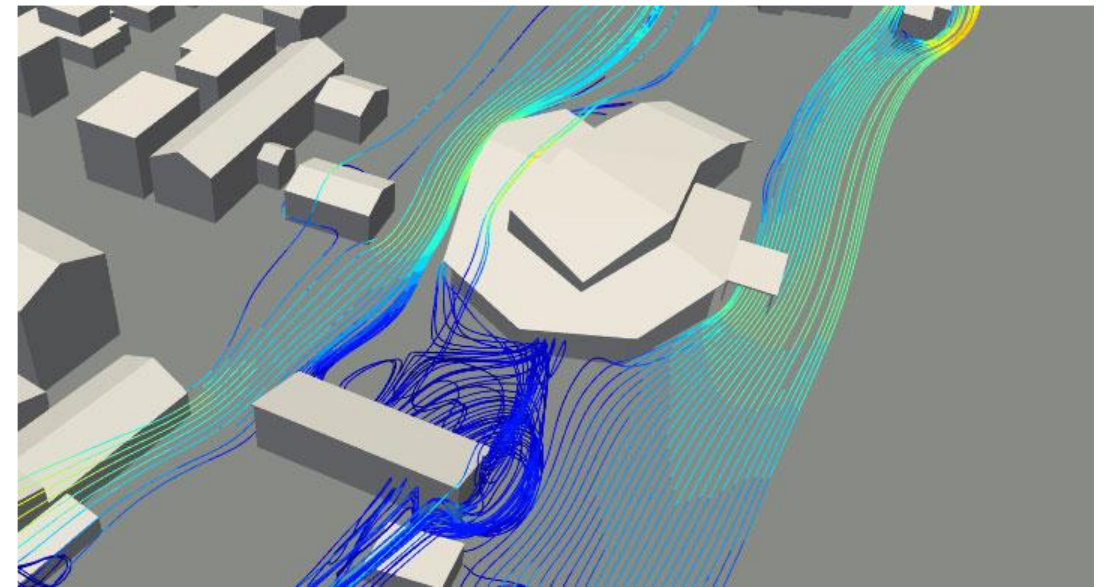


他の公共建築の雪対策のためのCFD解析の事例



△某病院の解析事例

▽某交流拠点施設の解析事例



鈴木建築設計事務所との関わりの発端は
2014年の前田研のバーベキューパーティ

4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

- （１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発
- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発**
- （４）メソスケールの研究の進捗
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価
- （７）広州、武漢を対象とした研究

<2010年代半ば以降>

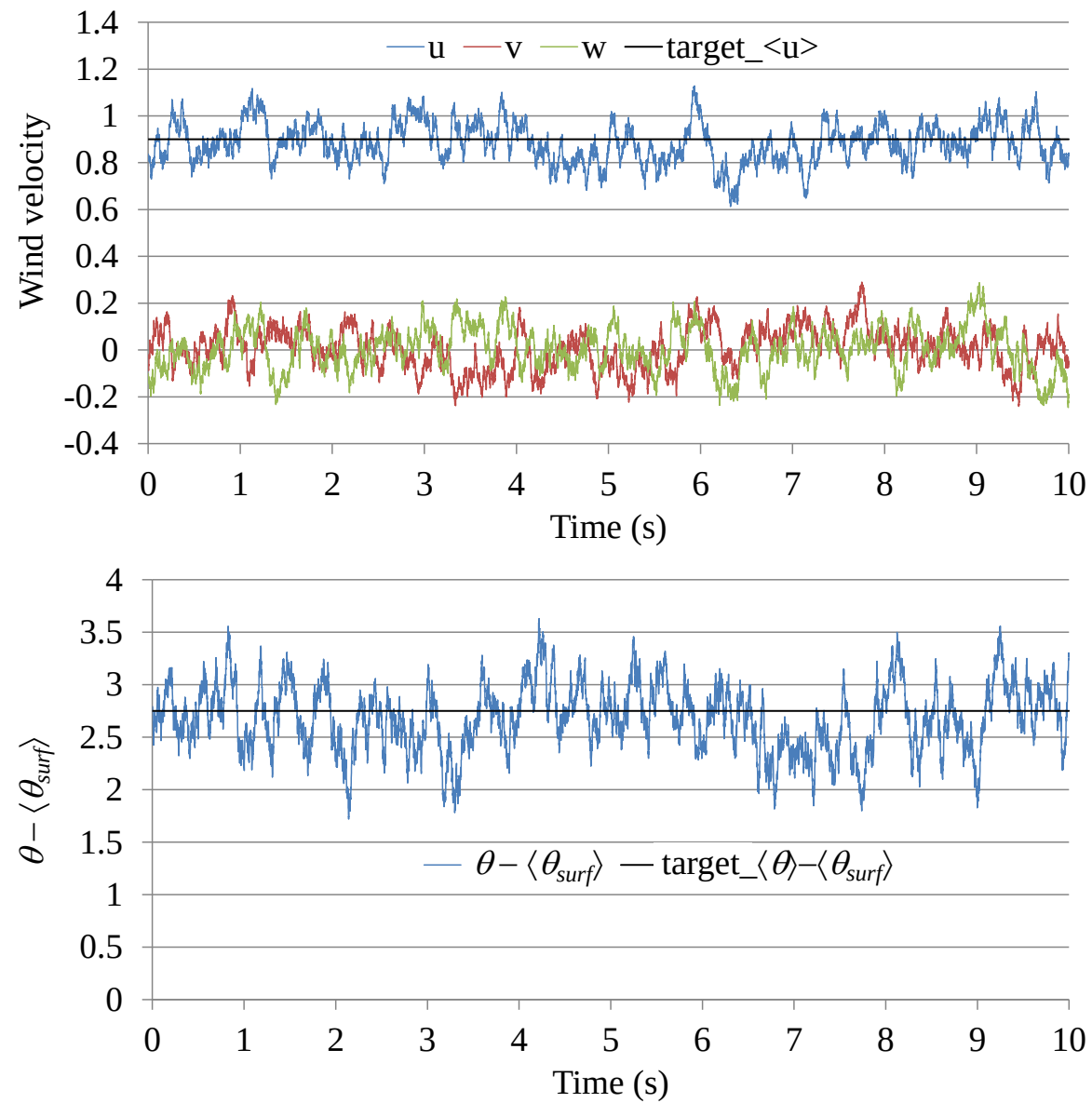
- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発
- （10）市街地風環境の制御
- （11）若干、手を付けた今後の課題

(3) LESのための流入変動風とスカラー量の変動の人工的な生成手法の開発

- 1990年代後半以来中断していたテーマだが、久々に大風君が復活させてくれた。
- Xie and Castroにより提案され、近藤・飯塚によって改良されたReynolds stressのコレスキー分解より人工的に変動風を生成する手法を拡張し、スカラー量（温度や湿度、濃度等の変動）の変動も含めて、乱流変動を生成する手法を開発。

Xie, Z.-T., Castro, I. P.: Efficient Generation of Inflow Conditions for Large Eddy Simulation of Street-Scale Flows, Flow, Turbulence and Combustion, 81(3), pp.449–470, 2008.

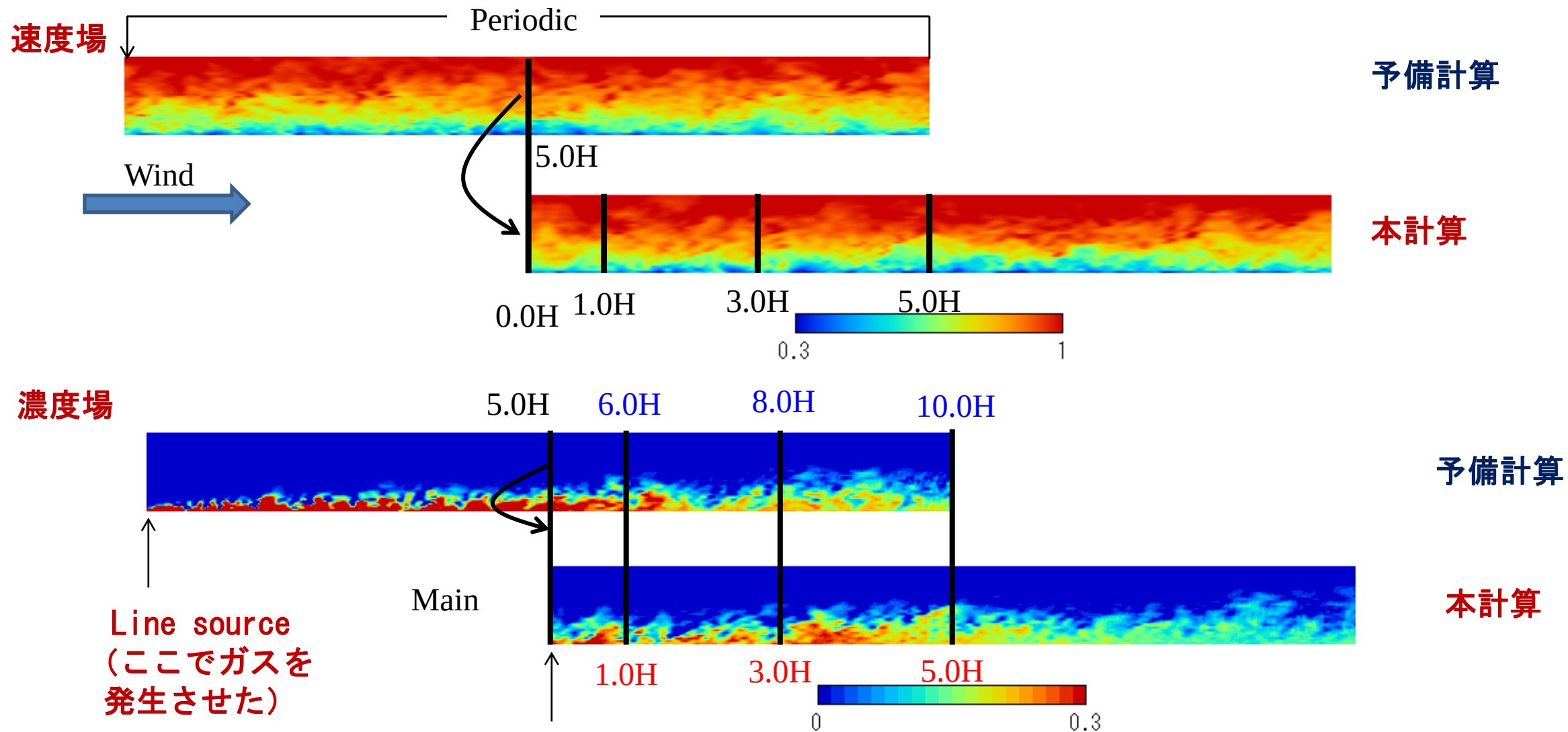
近藤亮彦，飯塚悟：気象モデルと工学LESモデルのシームレスな結合手法の開発 その1 Reynolds応力のコレスキー分解に基づく人工的なLES流入変動風生成手法の検討，日本建築学会環境系論文集, 77, 678, pp.661-669, 2012.8.



人工的に生成された風速変動(3成分)と温度変動の例

開発した手法の検証（風速変動と濃度変動を生成する場合を対象にして）：

- 予備計算で統計量を取得し、それを満たすように濃度葉を含む流入変動風を人工的に生成。
- 人工的に生成した本計算の速度場、濃度場の空間的な変動は、予備計算の傾向をよく捉えている。



人工的に生成した風速変動・濃度変動をこの位置の境界条件として与えた。

大風 翼, 持田 灯, 乱流フラックスのコレスキー分解によるスカラー変動を含む変動風生成法の開発—スカラー変動を考慮したLESのための流入変動風の生成

(その1), 日本建築学会環境系論文集, 79(703), (2014), 771-776

⇒大風君が日本風工学会 研究奨励賞を受賞。

Tsubasa Okaze, Akashi Mochida, Cholesky decomposition-based generation of artificial inflow turbulence including scalar fluctuation, Computers and Fluids, 159, (2017), 23-32

また、スカラー変動を扱ったものではないが、デジタルフィルタを用いた手法で風環境予測を行う場合の流入変動風の生成に関しては、

大風 翼, 持田 灯, LES による市街地風環境予測のためのデジタルフィルタを用いた人工的な流入変動風の生成, 第25回風工学シンポジウム論文集, (2018), 211-216

⇒大風君が第25回風工学シンポジウム薫風賞を受賞

環貫陽君の修士論文(2014)「都市環境を対象としたLESのためのスカラー変動を考慮した人工的な流入変動風生成手法の検討」がこの手法の諸条件の設定について検討。

4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

- （１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発
- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発
- （４）メソスケールの研究の進捗（2010年以降）**
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価
- （７）広州、武漢を対象とした研究

<2010年代半ば以降>

- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発
- （10）市街地風環境の制御
- （11）若干、手を付けた今後の課題

(4) メソスケールの研究の進捗 (2010～)

(4)-1 領域気象モデルWRFの導入と将来気候の予測

- メソスケールの気象モデルは、最初は山田哲司先生のHOTMAC, その後、産総研の近藤裕昭先生のプログラムを使用していた。
- 2010年代になると、米国大気研究センター (NCAR) と 米国環境予測センター (NCEP) 等によって開発されたWRF (Weather Research and Forecasting Model) というオープンソースのプログラムが急速に普及するようになってきたので、我々もこの波に乗ることにした。

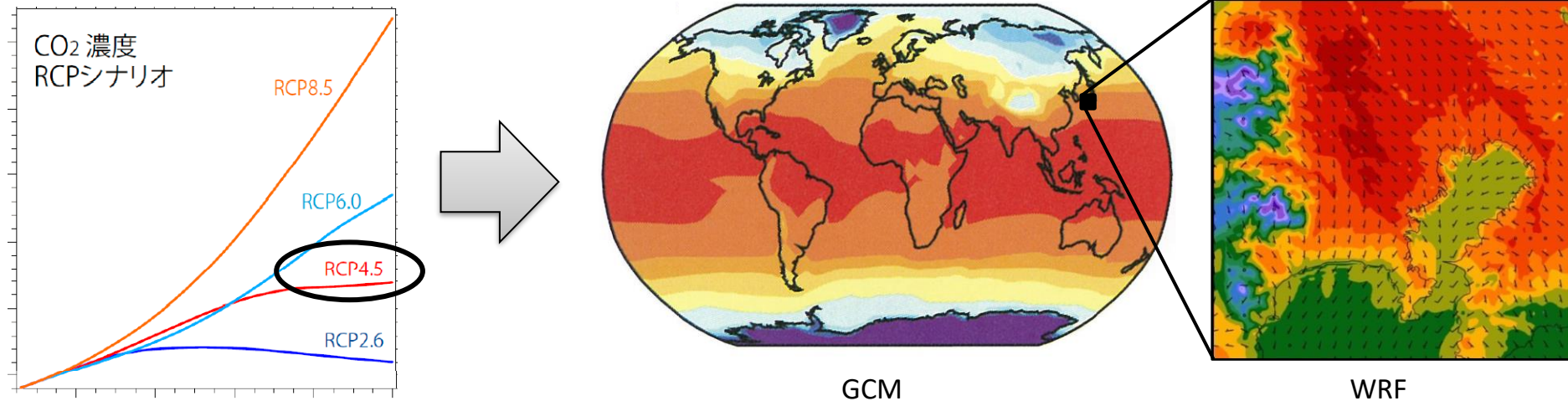
最初の修論が、菊地大君 (2011年度) 「領域気象モデルWRFによる東北地方沿岸部を対象とした気候解析」

続いて、李苑さん修論 (2013年度) 「Proposal of a New Urban Environment Assessment System Combining Urban Expansion Prediction with WRF Simulation」

鄧勤犁君博論 (2013年度) 「Impacts of Building Density and Green Area Ratio on Urban Climate in Humid Subtropical Climate City」

また、大多和君の修論 (2013年度) では、将来の気候の予測 (全球モデルとWRFの接続) に取り組んだ。⇒「領域気象モデルWRFによる2030年代の仙台を対象とした都市気候予測」

将来気候の予測



- 日本建築学会 地球環境委員会の 適応都市検討小委員会の気候変動モデリングWG (主査:名古屋大学 飯塚悟先生)では、将来の日本の主要都市の気候の予測を行った。我々もこのWGに参加し、将来予測の方法を勉強。
- 地球スケールの気象現象を解くGCM (全球気象モデルGlobal Climate Model) による将来の気候の予測結果を境界条件として、WRFを用いて都市スケールの気候解析を行い、高解像度の結果を得る。

災害としての暑さの評価法と熱中症リスクの将来変化の予測

都市気候学 × 生気象学 × 防災学

- 2010年代に入ると、極端気象による猛暑の増加等により、熱中症被害も大きく増加した。
- 猛暑も災害と捉え直した新たな評価の枠組みが必要と考えた。

暑さを快・不快の問題から災害として捉え直す

濱田 直浩君の修論(2013年度)「暑熱環境下の市街地歩行空間における健康被害発生リスク評価手法の提案とハザードマップの作成」

東海林 諭君の修論(2015年度)「領域気象モデルWRFによる2000年代と2030年代夏季の東京を対象とした猛暑による熱中症発症リスクの評価」

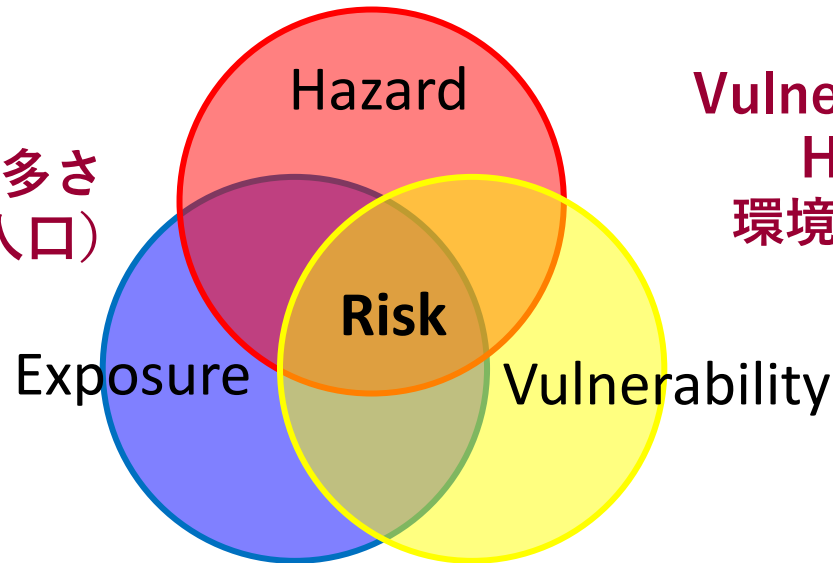
防災分野の災害のリスク評価方法

- 一般に災害のRiskは、Hazard, Vulnerability(脆弱性), Exposure(曝露)の3要素の組み合わせによって評価される。

Hazard: 災害の原因となる現象の危険度

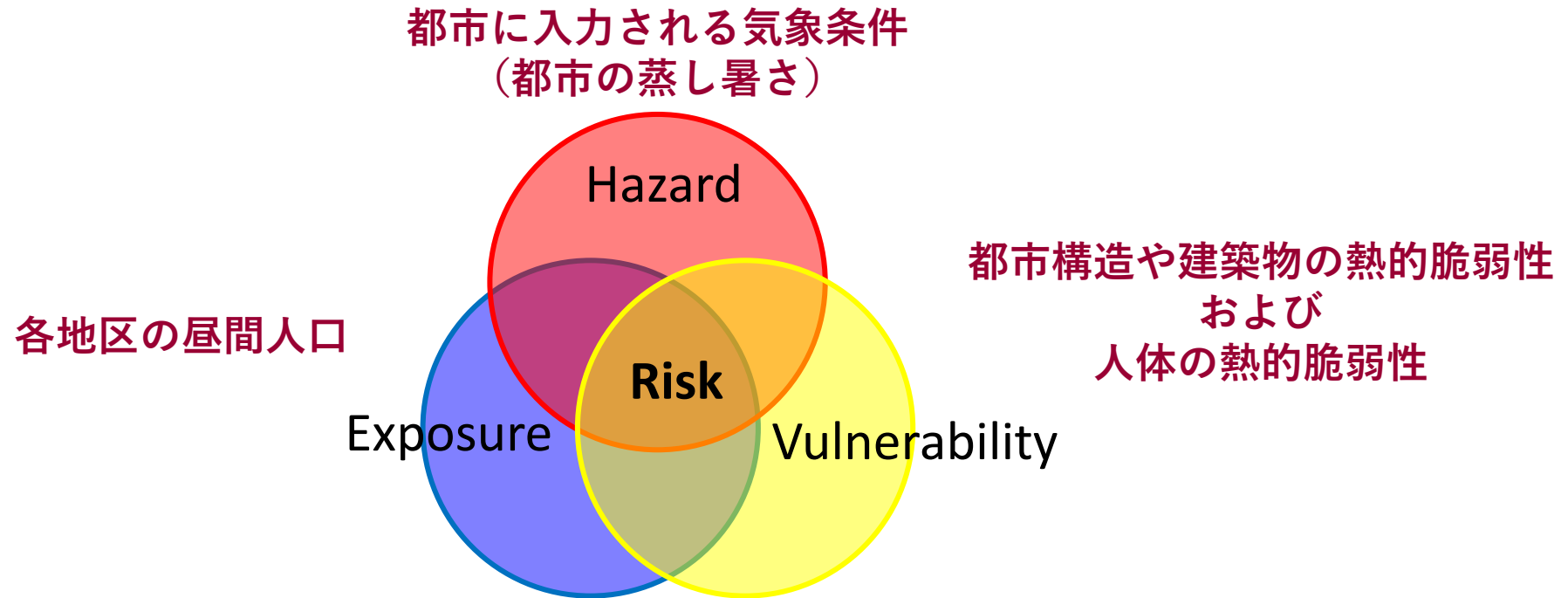
Exposure (曝露):
人々が災害に遭う機会の多さ
(災害発生頻度や被災地人口)

Vulnerability (脆弱性):
Hazardに対する
環境的及び人的脆弱性



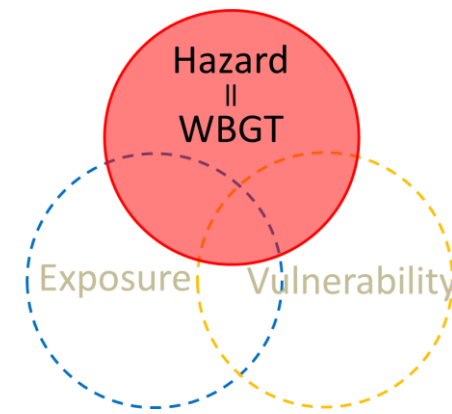
熱中症のリスク評価方法

- ・ 災害分野の考え方に倣って、熱中症のRiskにおけるHazard, Vulnerability, Exposureをそれぞれ以下のように考えた。



⇒構造が専門の東北大学の大野晋先生いろいろ教えて頂いた。

熱中症をもたらすHazardの評価



- Hazard: 災害をもたらす危険要因
- 熱中症における危険要因を表す指標として、日最高WBGTが用いられることが多い。⇒我々もこれに従う。

➡ WBGT (Wet Bulb Globe Temperature, 黒球湿球温度)
(天気予報の暑さ指標というのはこれのこと)。

$$\text{WBGT}[\text{°C}] = \underline{0.1T_a + 0.7T_w + 0.2T_g}$$

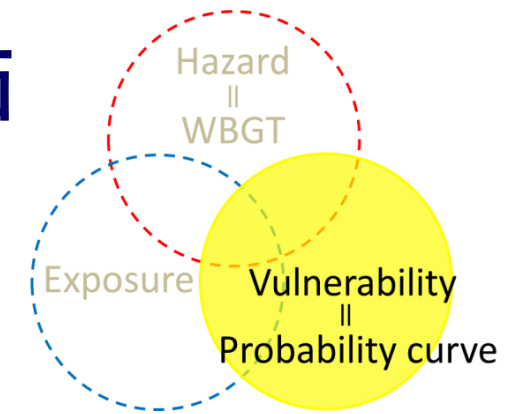
T_a [°C]: 乾球温度 (いわゆる温度)

T_w [°C]: 湿球温度 (湿度と関係する)

T_g [°C]: 黒球温度 (放射量と関係する)

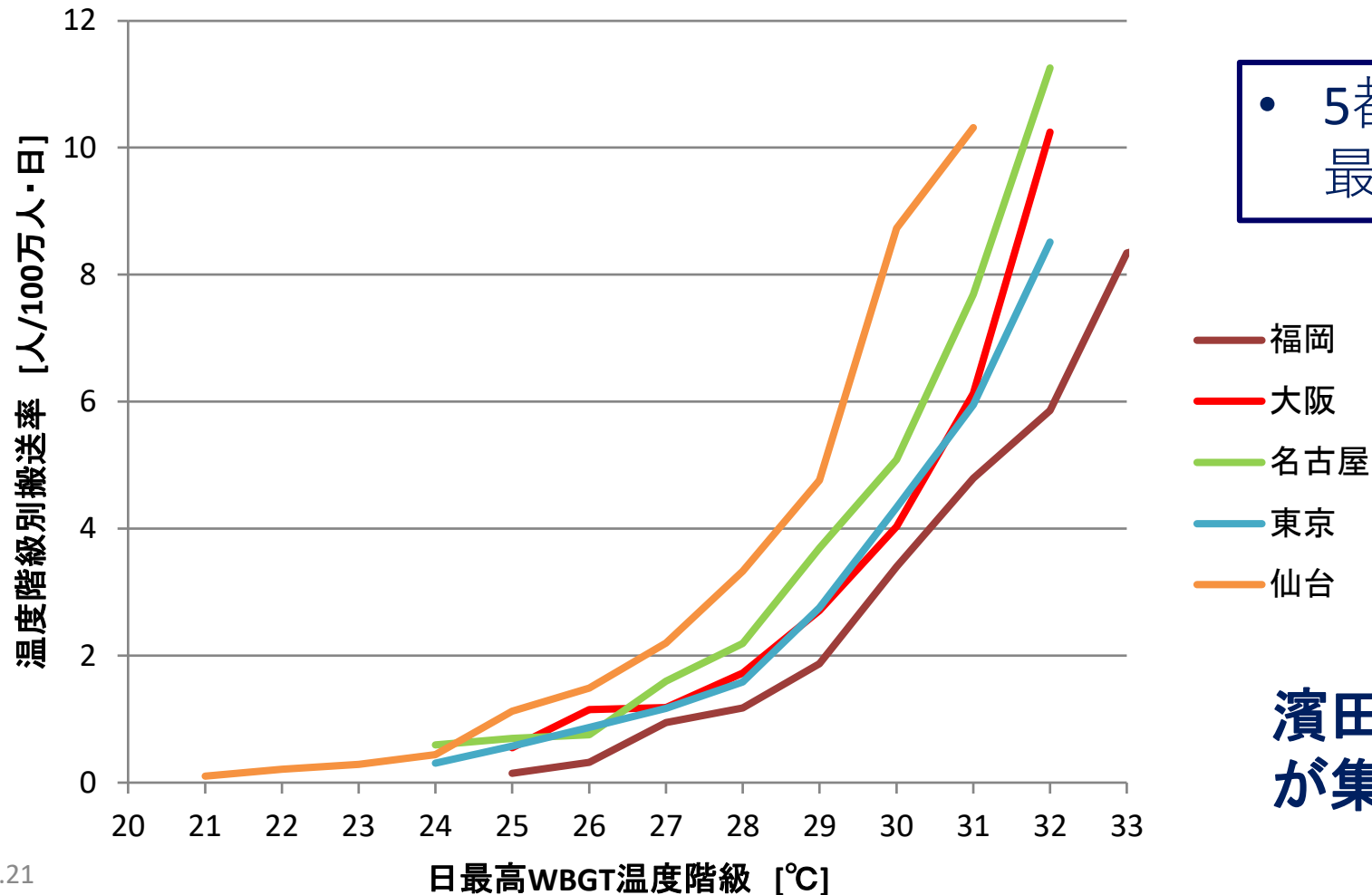
暑さに対する脆弱性（Vulnerability）の評価

- 暑さに対する脆弱性（Vulnerability）は、熱中症を引き起こすHazard（日最高WBGT）レベルに対する熱中症被害（熱中症救急搬送率）の発生度合いとして捉える。



5都市の熱中症リスクカーブ（発生場所：全体（室内+屋外））

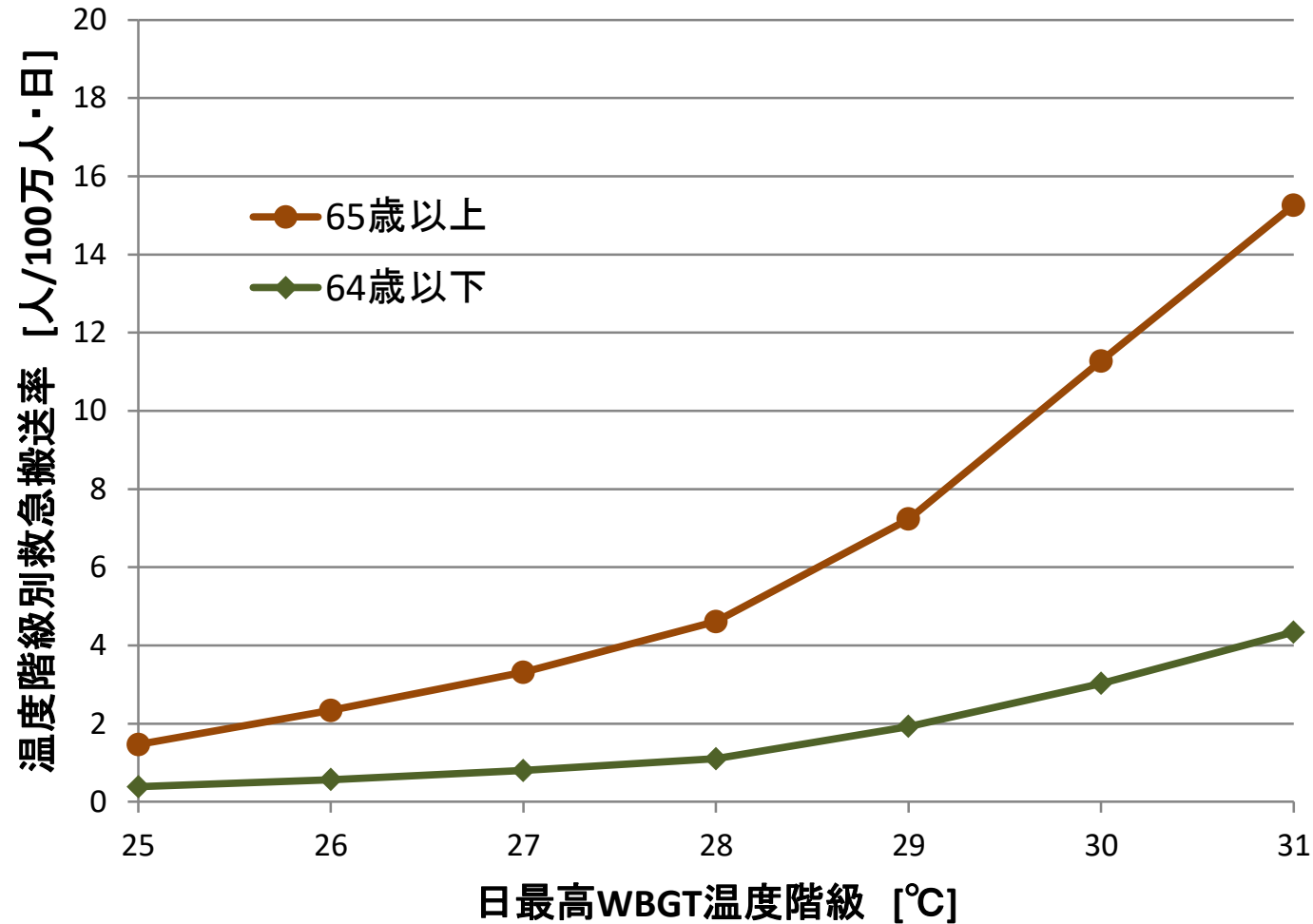
横軸を日最大WBGT、縦軸を熱中症搬送率（100万人あたりの1日あたりの搬送者数）として描いたグラフ⇒熱中症リスクカーブ



- 5都市の中では仙台が最も熱的に脆弱

濱田 直浩君(2013年度修了)
が集めてくれたデータ・

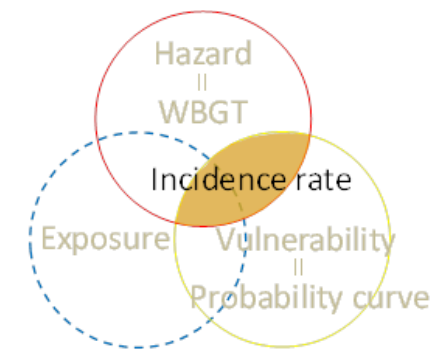
65歳以上と64歳以下の熱中症リスクカーブ（発生場所：全体）



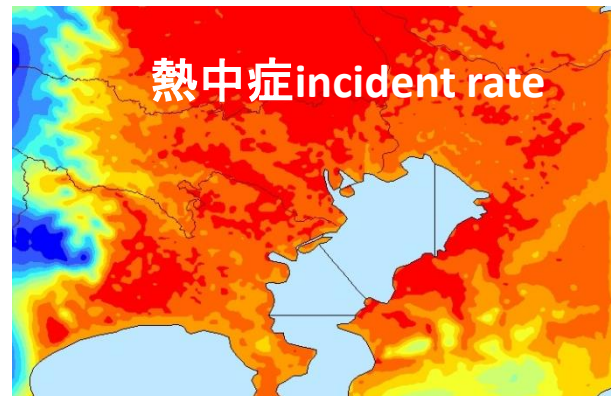
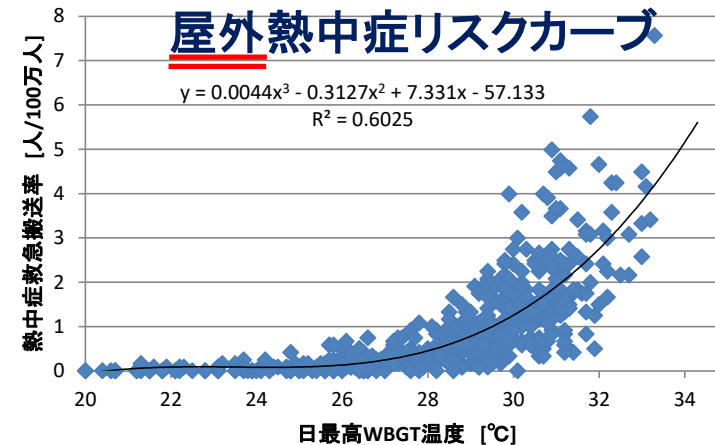
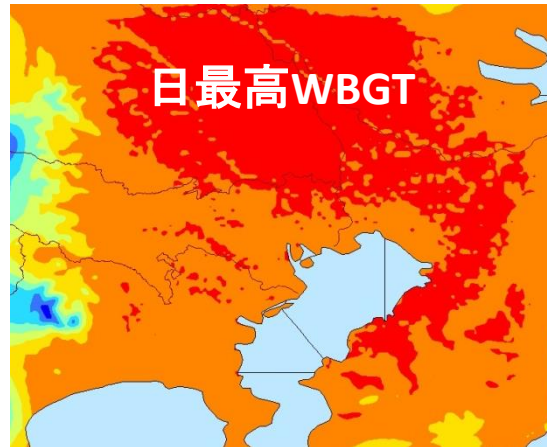
- 老人ははるかに熱的に脆弱

熱中症 Incident Rateの算出

Hazard × Vulnerability

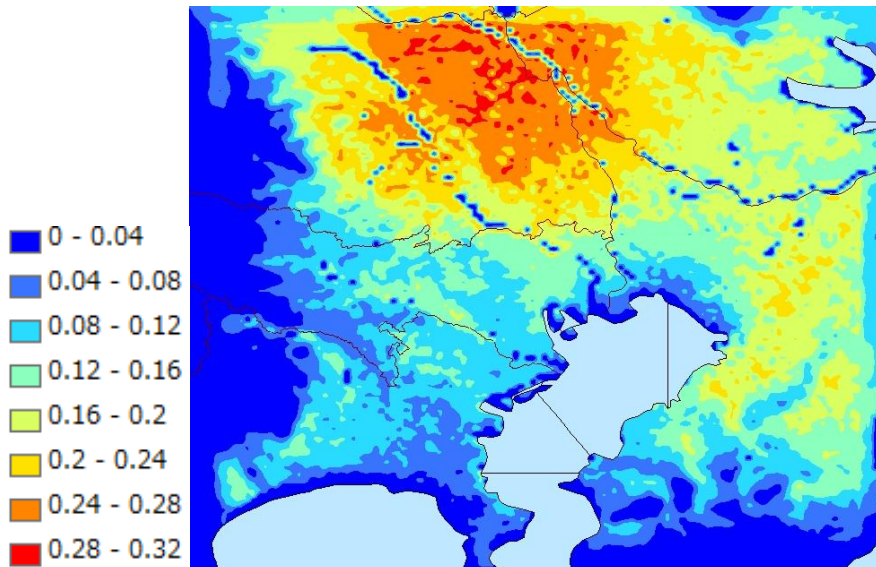


- 人口100万人あたりの1日あたりの発症率⇒Incident Rate
HazardとVulnerabilityを組み合わせた指標であり、人口分布を考慮しない、その場所の潜在的な熱中症リスクを表す。



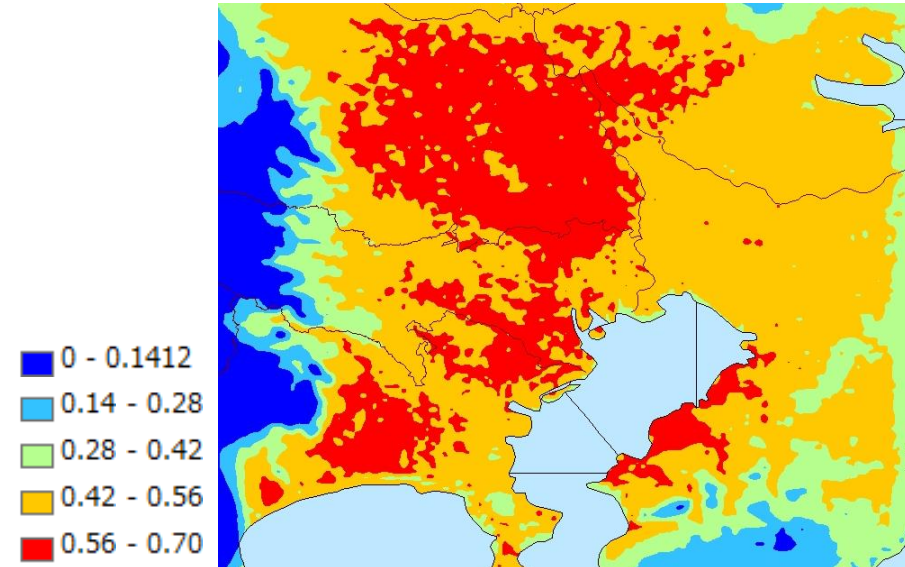
現在と2050年代の熱中症 Incident Rate（発生場所：屋外）

- 以下の図は屋外で発生する熱中症の Incident Rate
- 2000年代の屋外熱中症incident rate(左図)では、沿岸部のincident rateは低く、incident rate が高いのは内陸部。
- 2050年代のIncident Rateの変化量(右図)を見ると、東京23区内の多くの地域で増加。



8月で平均した2000年代の屋外熱中症incident rate

単位[人/(人口100万人・日・km²)]

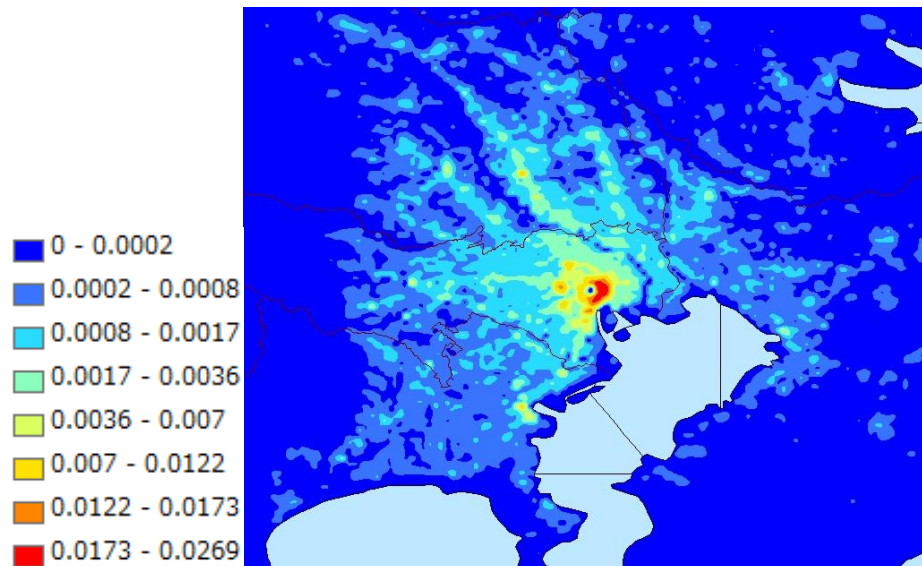


8月で平均した屋外熱中症incident rateの変化量
(2050年代－2000年代)

現在と2050年代の熱中症リスク（発生場所：屋外）

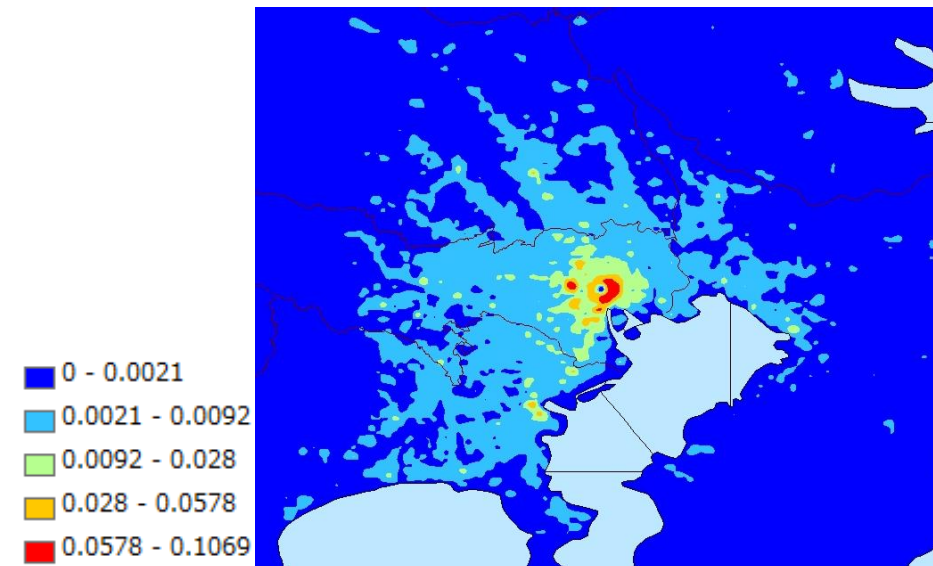
Incident Rate × Exposure

- 以下の図は屋外で発生する熱中症の発症リスク(Incident Rate にExposure(昼間人口分布)を掛け合わせたもの)。
- 現在の屋外熱中症リスク(左図)は都心において極めて高く、また将来的な屋外熱中症リスクの変化量(右図)も都心において特に大きい。
- 2000年代の熱中症リスクの値よりも、将来50年間の熱中症リスク変化量の値の方が大きく、都心においては熱中症リスクが5倍程度まで跳ね上がると予想される。



8月で平均した2000年代の屋外熱中症リスク

単位[人/(日・km²)]



8月で平均した屋外熱中症リスクの変化量
(2050年代－2000年代)

Masataka Kasai, Tsubasa Okaze, Miguel Yamamoto, Akashi Mochida, Kazumasa Hanaoka, Summer heatstroke risk prediction for Tokyo in the 2030s based on mesoscale simulations by WRF, Journal of Heat Island Institute International, 12-2, (2017), 61-67

⇒ 日本ヒートアイランド学会論文賞

Miguel Yamamoto, Masataka Kasai, Tsubasa Okaze, Kazumasa Hanaoka, Akashi Mochida, Analysis of climatic factors leading to future summer heatstroke risk changes in Tokyo and Sendai based on dynamical downscaling of pseudo global warming data using WRF, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 183, (2018),187-197

また、

河西昌隆 君の修士論文（2017年度）「WRFとLESを結合した高精度メソ・ミクロ気象一貫解析手法の開発と実市街地における温熱環境の将来予測」と

布川啓徳君修士論文（2020年度）「WRF・LES・人体温熱生理モデルを結合したメソ・ミクロ・人体一貫解析による実街区の温熱・風環境の非定常解析及び歩行者の温熱生理状態の評価」

では、メソスケール（WRF）＋ミクロスケール（LES）により、市街地内の詳細な温熱環境の予測に取り組んだ。

(4) メソスケールの研究の進捗 (2015～)

(4)-4 Local Climate Zone (LCZ)による市街地の類型化

- Local Climate Zone (LCZ)とは、Stewart and Okeが提案した、形成される微気候の観点からカテゴリー分けされた市街地区分。
⇒計17の区分を提案：10の都市域区分＋7の土地被覆区分
- 2015年に香港を訪問した際にChao Ren 博士に勧められ研究を開始。

周希霖君が持田研のLCZのパイオニア。

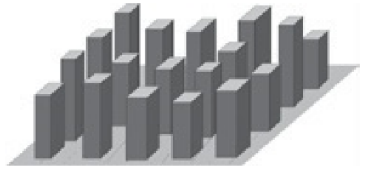
周君の2019年度の博士論文「Evaluation of Local Climate Zones in Large Japanese Cities and Its Application to Modelling of Mesoscale Climate over Sendai」

千葉 絵理奈さんの2021年度の修士論文「Proposal of a Standardized LCZ Scheme for Asian Cities Based on the Analysis of Urban Morphological and Landcover Characteristics of Tokyo Metropolis」

Stewart et al., Local climate zone for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93, pp1879-1900, 2012

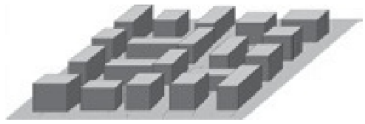
10 Local Climate Zone (LCZ) Built Types

1. Compact high-rise



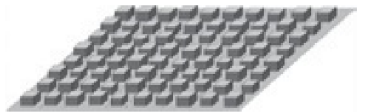
Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.

2. Compact midrise



Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.

3. Compact low-rise



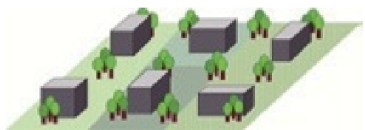
Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.

4. Open high-rise



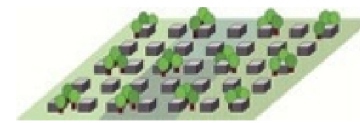
Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.

5. Open midrise



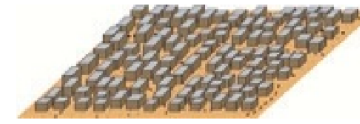
Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.

6. Open low-rise



Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.

7. Lightweight low-rise



Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).

8. Large low-rise



Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.

9. Sparsely built



Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).

10. Heavy industry



Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.

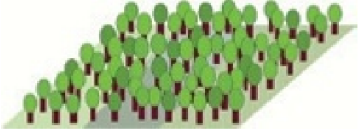
LCZ 1～3は、compact区分。

LCZ 4～6は、open区分。

各々に高層・中層・低層のタイプがある。

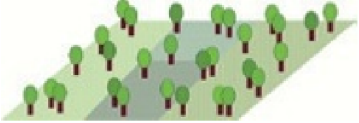
7 Local Climate Zone (LCZ) Land Cover Types

A. Dense trees



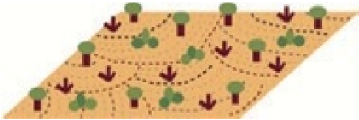
Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.

B. Scattered trees



Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.

C. Bush, scrub



Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.

D. Low plants



Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.

E. Bare rock or paved



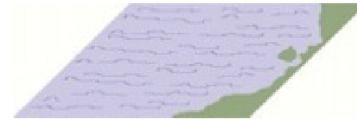
Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.

F. Bare soil or sand



Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.

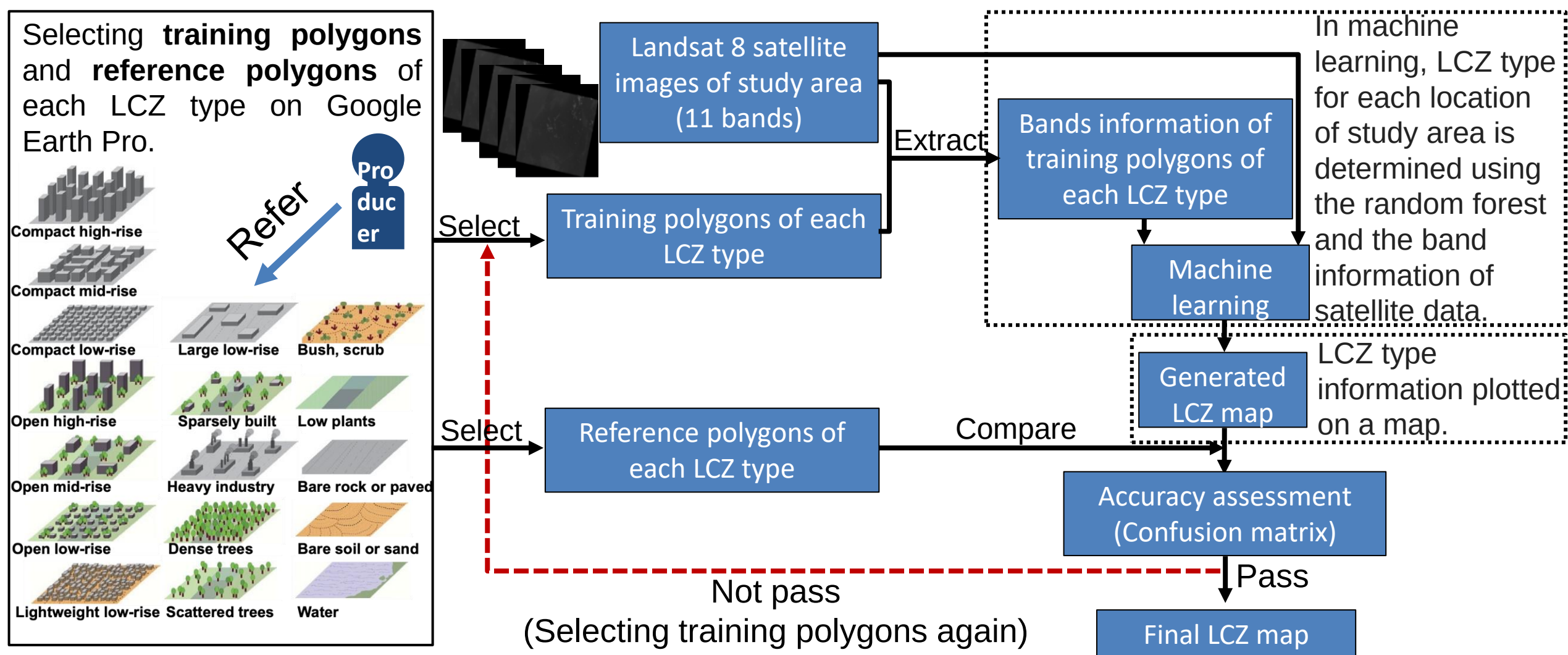
G. Water



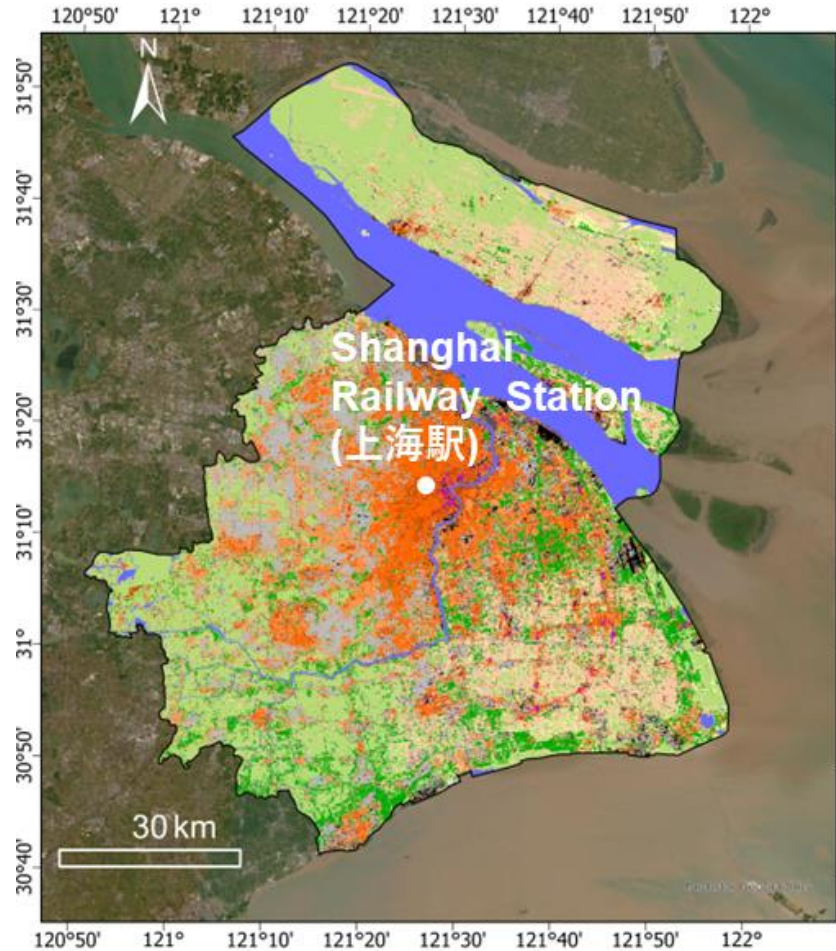
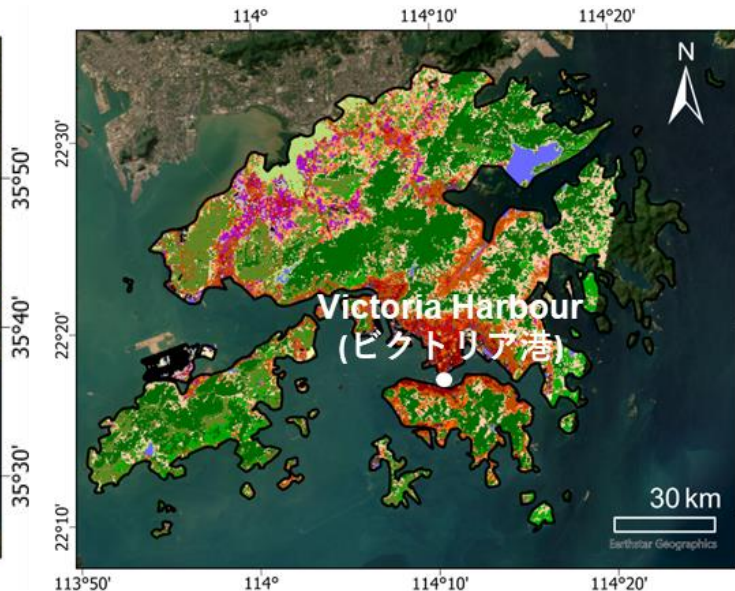
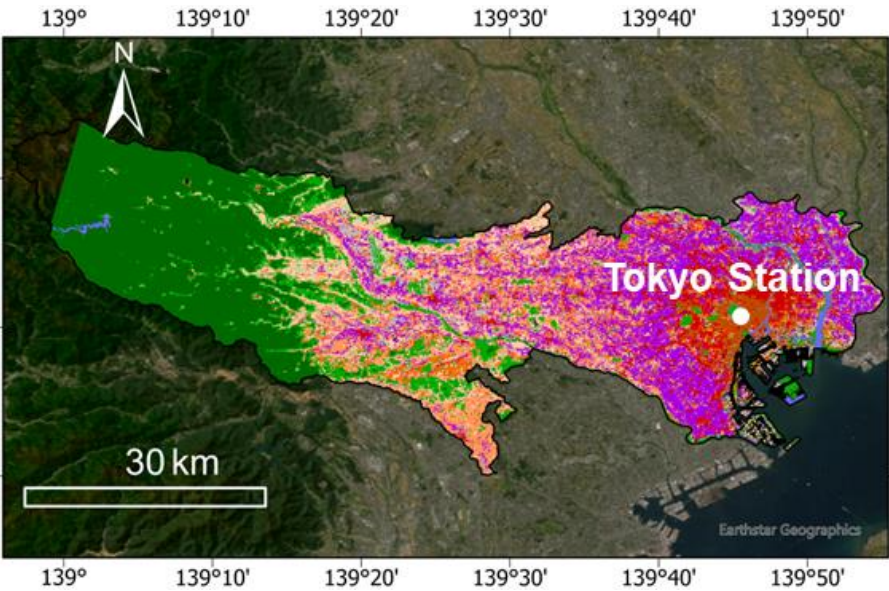
Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.

Flowchart of WUDAPT Lv.0 method

- WUDAPT Level 0: a workflow of mapping LCZs by machine learning.



LCZ classification using the WUDAPT L0 method



LCZ 1		LCZ 2		LCZ 3		LCZ 4		LCZ 5		LCZ 6	
Compact high-rise		Compact mid-rise		Compact low-rise		Open high-rise		Open mid-rise		Open low-rise	
LCZ 7		LCZ 8		LCZ 9		LCZ 10		LCZ A		LCZ B	
Lightweight low-rise		Large low-rise		Sparsely built		Heavy industry		Dense trees		Scattered trees	
LCZ C		LCZ D		LCZ E		LCZ F		LCZ G			
Bush or scrub		Low plants		Bare rock or paved		Bare soil or sand		Water			

Wang et al., Effective Factors for Reducing Land Surface Temperature in Each Local Climate Zone Built Type in Tokyo and Shanghai, Remote Sensing, 15, 15, 3840, 2023

Xilin Zhou, Tsubasa Okaze, Chao Ren, Meng Cai, Yasuyuki Ishida, Hironori Watanabe, Akashi Mochida, Evaluation of urban heat islands using local climate zones and the influence of sea-land breeze, Sustainable Cities and Society, 55, (2020), 102060

⇒Scopus上(2024.3.5)で被引用件数66(Top 4%), FWCI=3.95 (2024.3.5)

Xilin Zhou, Tsubasa Okaze, Chao Ren, Meng Cai, Yasuyuki Ishida, Akashi Mochida , Mapping local climate zones for a Japanese large city by an extended workflow of WUDAPT Level 0 method, Urban Climate, 33, (2020), 100660

Erina Chiba, Yasuyuki Ishida, Zheng Wang, Akashi Mochida, Proposal of LCZ categories and standards considering super high-rise buildings suited for Asian cities based on the analysis of urban morphological properties of Tokyo , Japan Architectural Review, (2022)

⇒Best Paper Award 2022 Japan Architectural Review

LCZ導入後は、LCZを用いてWRFの土地利用データ等の入力条件を設定。

(4) メソスケールの研究の進捗 (2016～)

(4)-5 都市空間の熱収支構造の将来変化の予測と海外都市への展開

- WRF導入後、しばらく途絶えてしまっていた都市空間の熱収支分析を山本ミゲイル君がLCZ+WRFの最新のモデルで復活してくれた。

- 研究上の関心:

将来、海からの風は今より高温・高湿になると予測される。

⇒2050年代においても海風の冷却効果は得られるのか？

山本ミゲイル君の修士論文 (2018年度)

「気候変動による都市の熱収支構造変化の将来予測」

Miguel Yamamoto, Yasuyuki Ishida*, Akashi Mochida, Hikaru Kobayashi, Hironori Watanabe, Kyohei Abe, and Shuhei Fujita, Assessment of cooling effect of sea breeze under future climate based on analysis of heat balance mechanism of urban space, Building and Environment (in press)

熱収支の移流成分の将来変化

顕熱増加

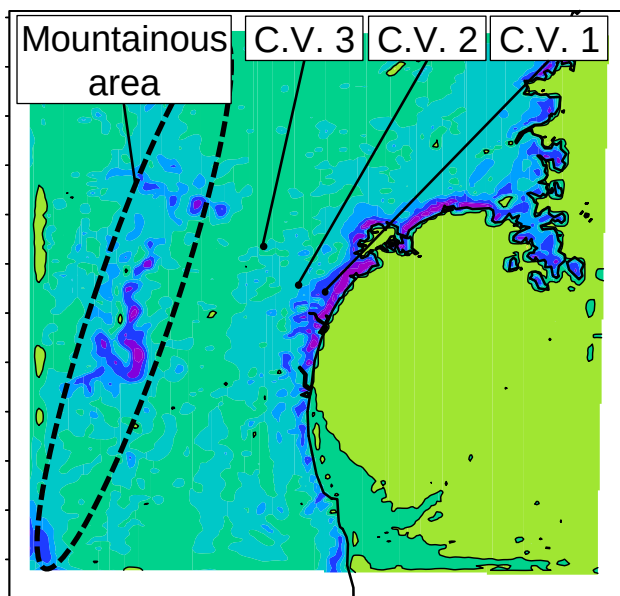
+50



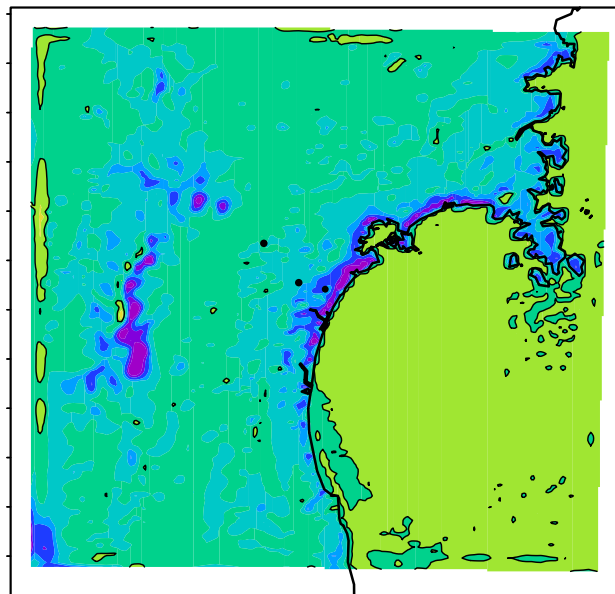
顕熱減少

-50

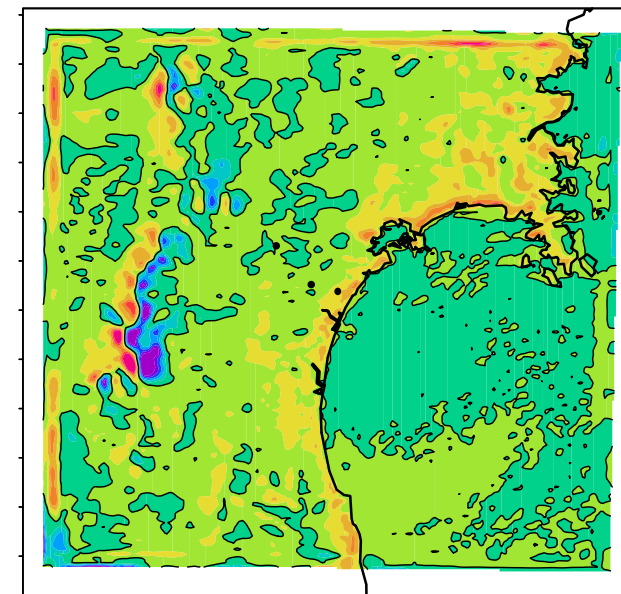
(MW)



2000年代



2050年代



将来変化(2050年代－2000年)

- 2000年代・2050年代ともに、負の値を示している。

風上からの流入量 < 風下への流出量

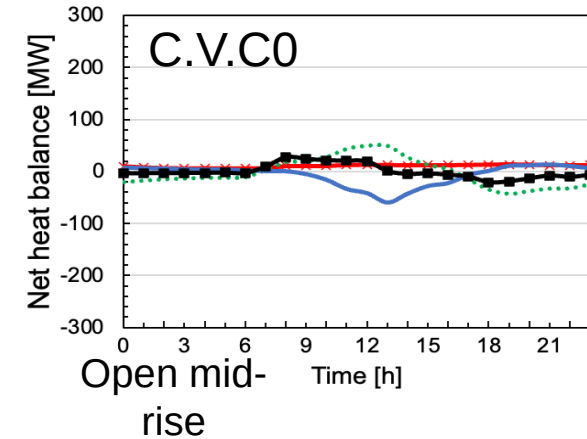
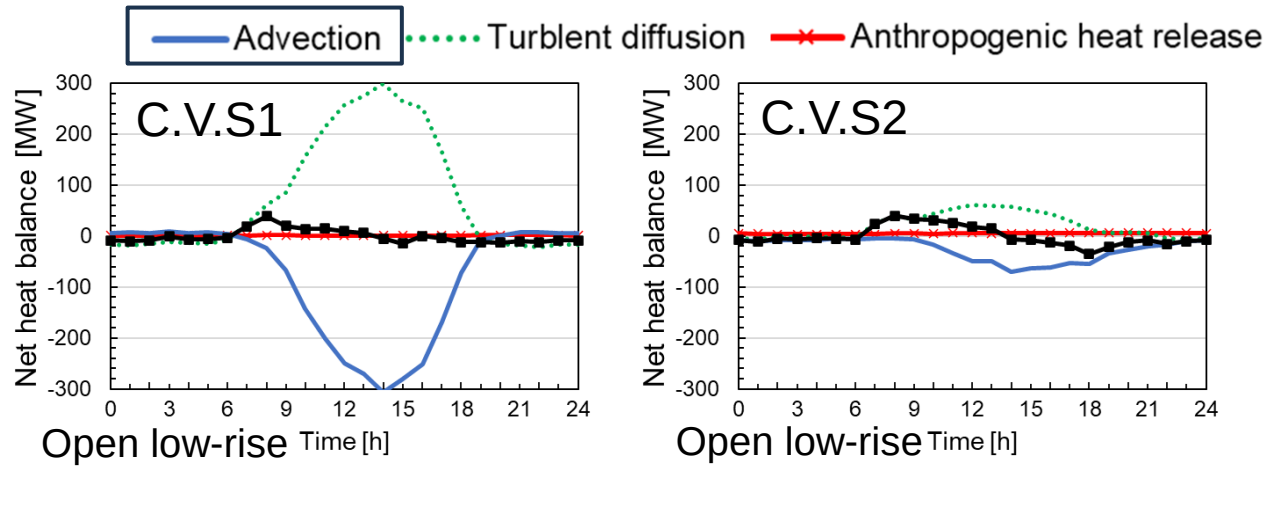
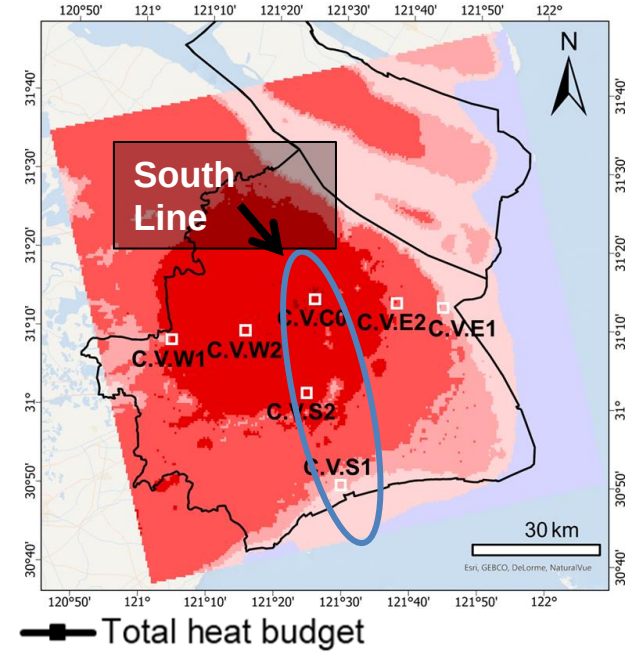
⇒ 2050年代においても海風は気温低減効果を有する。

しかし、2050年代はこの負値（冷却効果）の絶対値は減る
（この結果の場合、沿岸部で最大17%）。

海外都市の熱収支分析 (1) 上海の熱収支構造

王正君の博士論文（2023年度）、藤田修平君の卒業論文（2022年度）では、中国の都市の熱収支分析を実施できた。

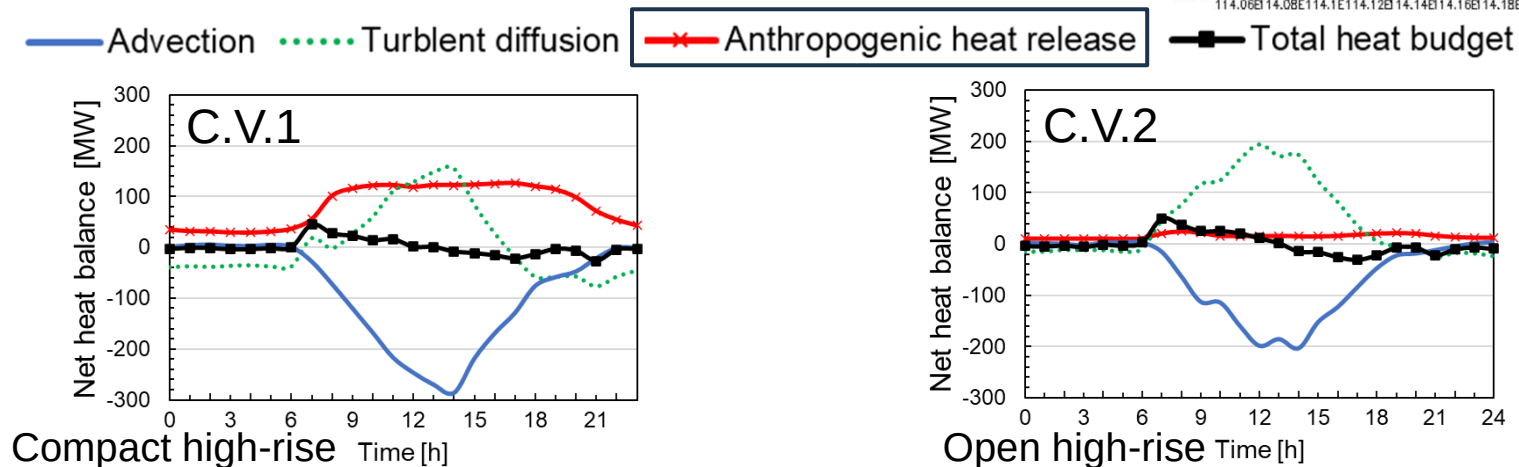
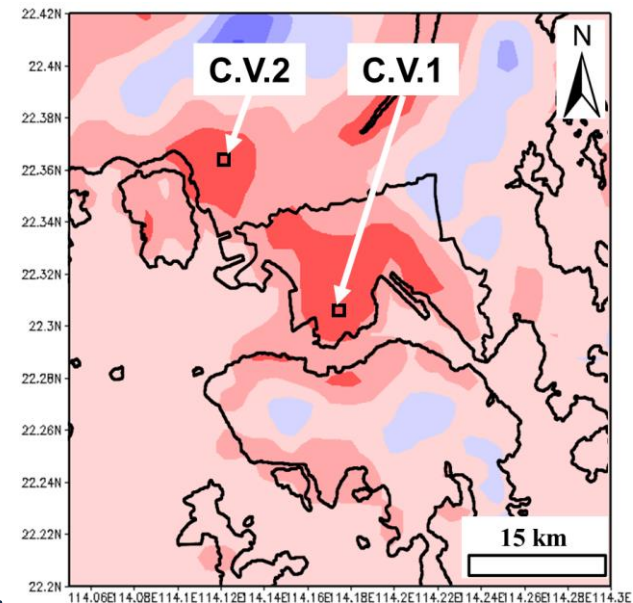
上海の場合、日本の沿岸都市と同様の傾向。
沿岸部で海風の大きな冷却効果（移流の負値）が確認できる。



海外都市の熱収支分析 (2) 香港の熱収支構造

Hong Kong の高層高密な市街では、他の都市に比べて人工排熱量が非常に大きく、沿岸部でも海風の効果を相殺してしまっている。

今後、熱収支のMap化まで突き進んで貰いたい。
藤田修平君の修論に期待する。



謝永杭君の博士論文（2023年度）「Quantitative Evaluation of the Impacts of Urban Development and Broader-Scale Climate Change on the Effects of Sea Breezes in Sendai - Comparison of Heat Balance Mechanism in Urban Space between the 2000s and 2010s-」

王正君の博士論文（2023年度）「Extraction and Comparison of Urban Climate Characteristics in Tokyo, Shanghai, and Hong Kong Based on Local Climate Zone Scheme」

藤田修平君の卒業論文（2022年度）「香港と仙台における顕熱・潜熱収支分析とこれに基づく海風の効果の定量評価」

Yonghang Xie, Yasuyuki Ishida, Hironori Watanabe, Akashi Mochida, Impacts of Urban Development between 2002 and 2022 on the Effects of Sea Breezes in Sendai, Japan—Analyzing Heat Balance Mechanism in Urban Space [Atmosphere, (2023), 14(4), 677

Zheng Wang, Yasuyuki Ishida, Akashi Mochida , Effective Factors for Reducing Land Surface Temperature in Each Local Climate Zone Built Type in Tokyo and Shanghai, Remote sensing, (2023), 15(15), 3840

(4) メソスケールの研究の進捗 (2017~)

(4)-6 ドップラーライダーによる仙台の大気境界層の時空間構造の観測

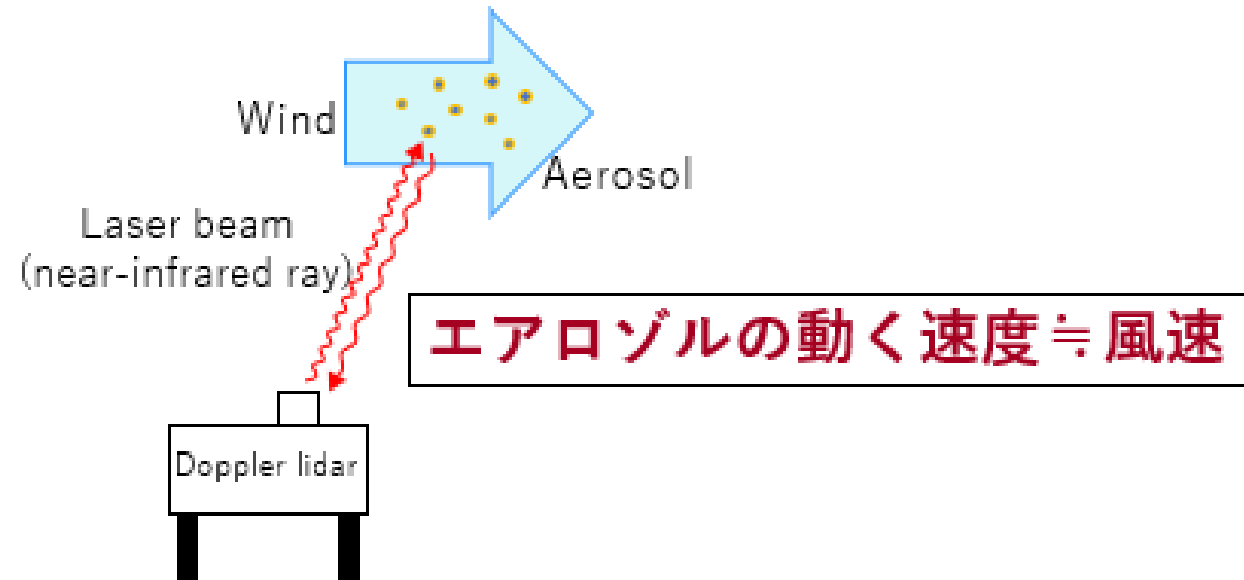
2017年、2018年と2023年の夏に東北電力本店ビルと電力ビルの屋上にドップラーライダーを設置させていただき、仙台上空の風観測をする機会を得た。

小野田（上田）真帆さんの2019年度修士論文
「ドップラーライダー計測に基づく沿岸都市
仙台の大気境界層の時空間構造と地表付近の
温湿度への影響の実態解明」

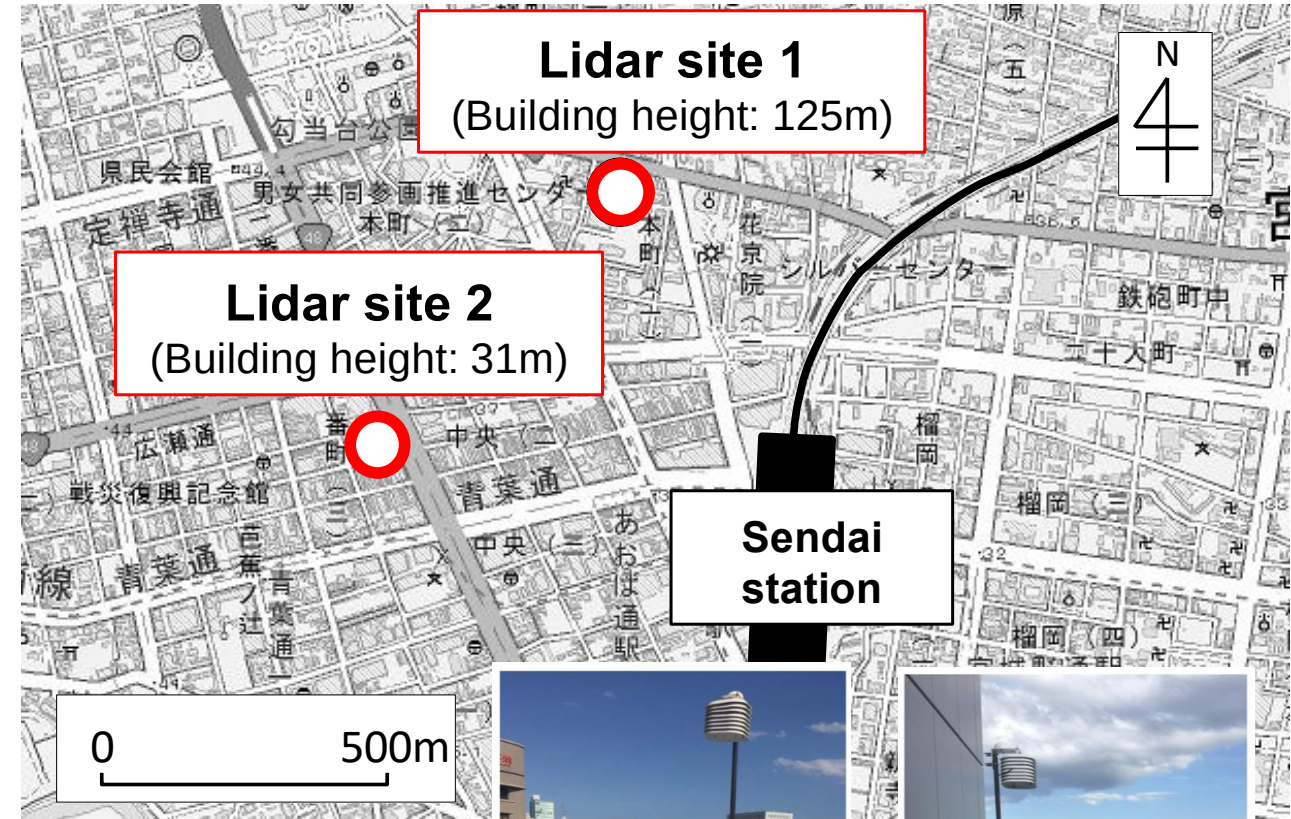
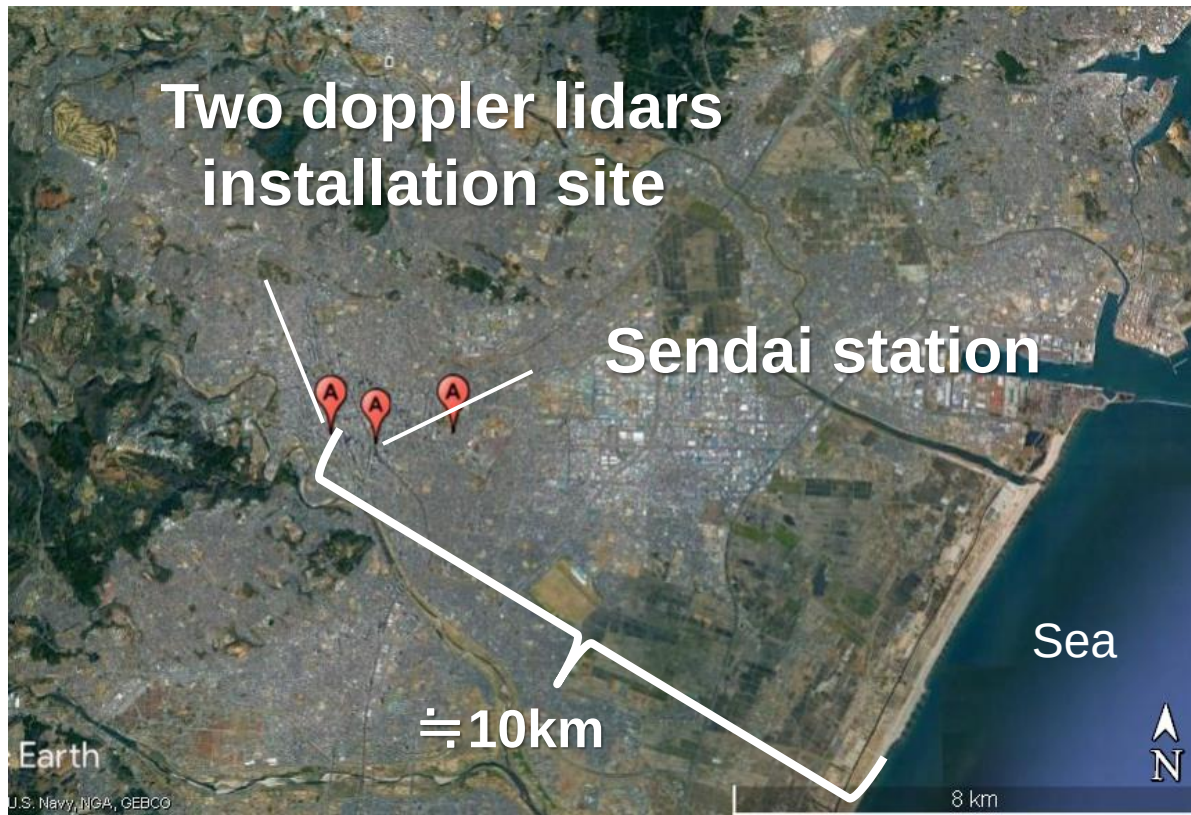
⇒ライダー観測と東北工大の渡辺浩文先生の
研究室の地表付近の温湿度の多点広域観測
データの比較。

阿部 匡平君の2023年度の修士論文
「ドップラーライダーとWRFによる都市空間
の3次元的な気候形成メカニズムの分析」

ライダー観測、渡辺研の温湿度データ+WRF
で、海風進入時の仙台の大気境界層の状況を
3次元的に把握・分析。



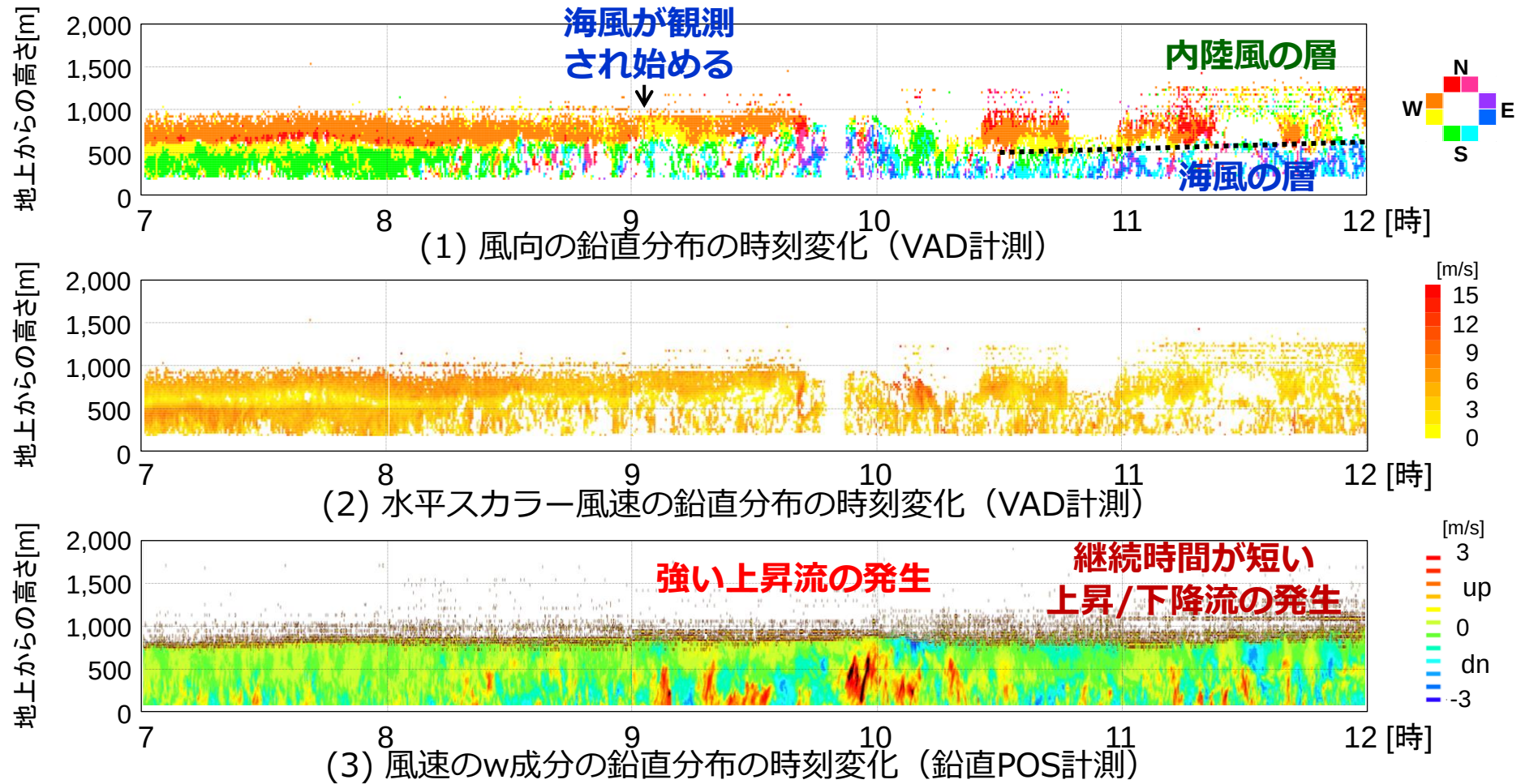
ドップラーライダーの設置位置



- 観測期間
- ・2017年9月23日～10月23日
(初年度は1台のみを電力ビルに設置)
 - ・2018年8月6日～9月11日
 - ・2023年8月1日～9月21日

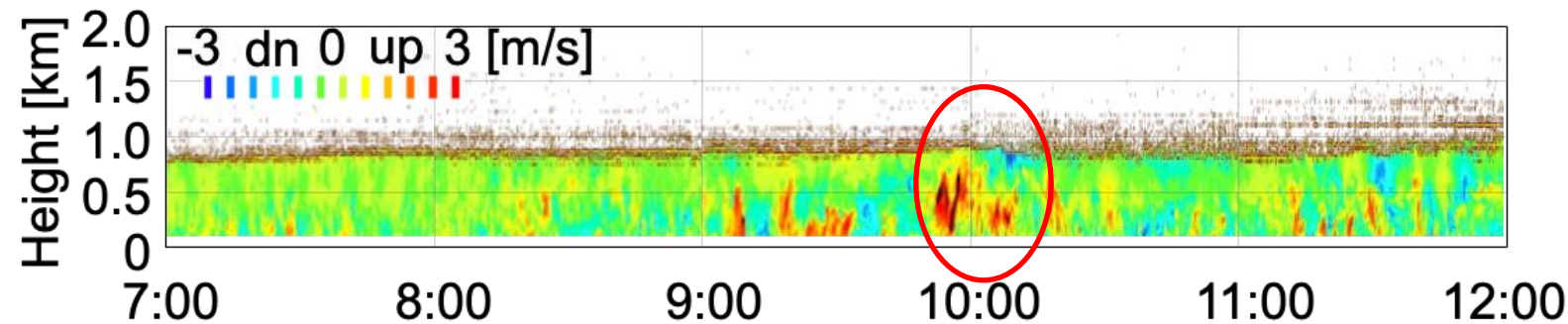
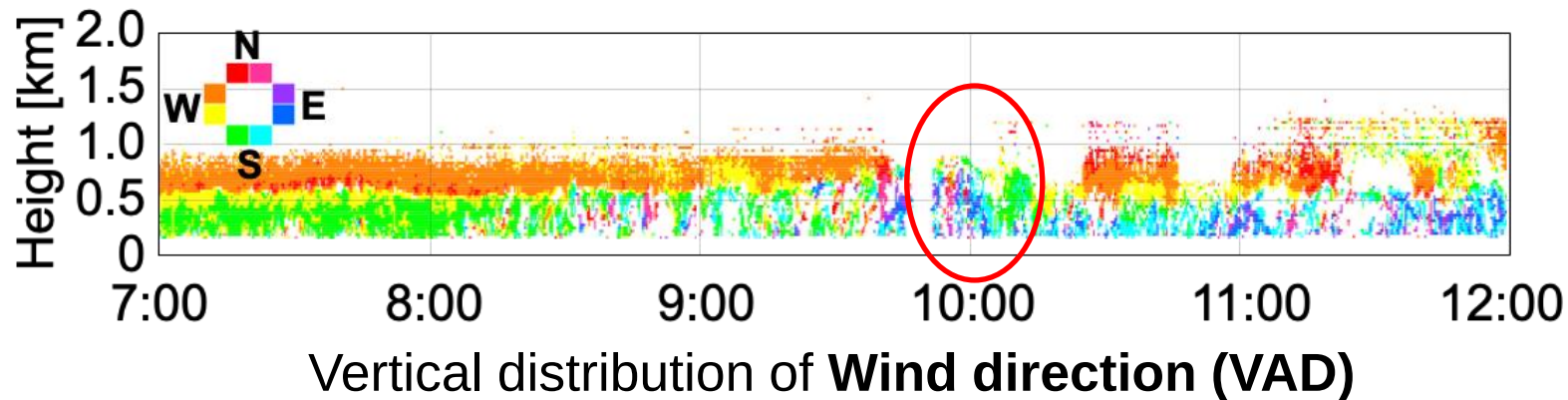


海風日の上空気流性状 (2018. 8. 22の例)

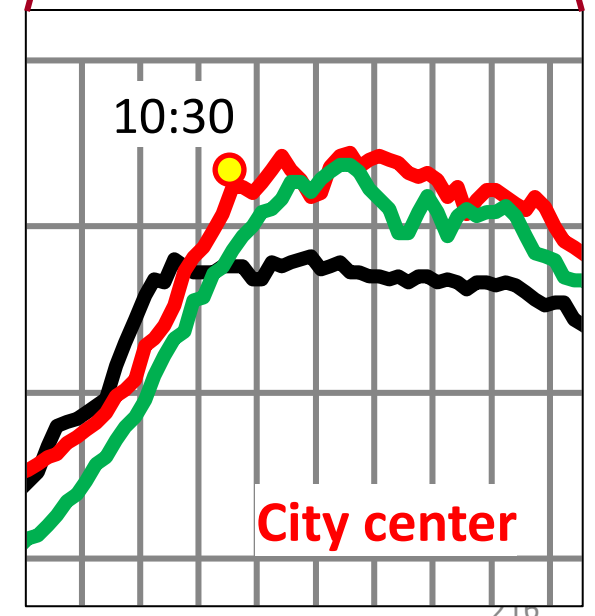
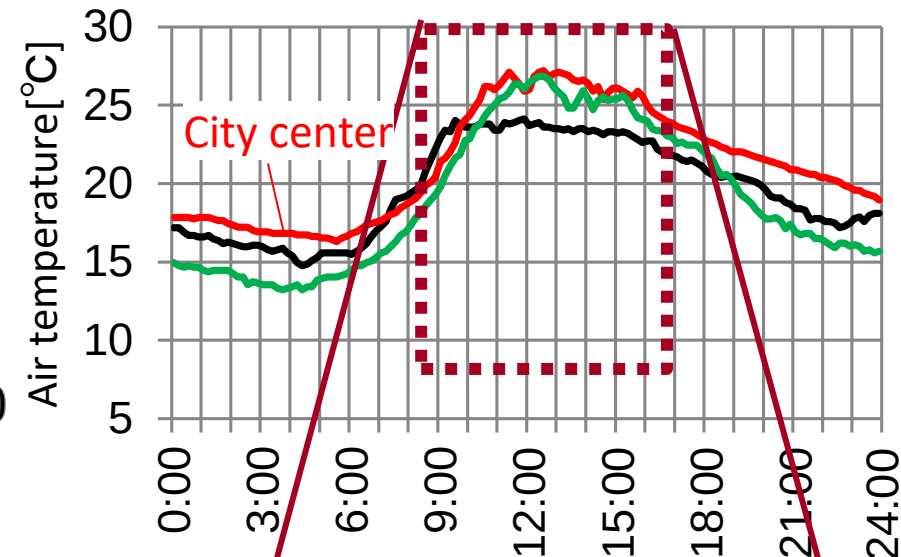


- 海風進入後は海風の層の上に内陸風の層が存在する。
- 海風進入時に強い上昇流が発生。

上空風の性状と地表付近の気温



東北工業大学の渡辺先生の
気温観測データ



Vertical distribution of **Vertical component of wind velocity (POS)**

海方向からの風が計測され、前線部のheadの影響とみられる強い上昇流の後、気温上昇が停止

小野田（上田）さんの修論（2018年度）の成果：

石田泰之，小野田真帆，渡辺浩文，上田裕洋，持田灯，沿岸都市仙台を対象とした2台のドップラーライダーによる中心市街地上空の気流性状の計測（その1）
：内陸風及び海風の気流性状が地表付近の温湿度に及ぼす影響，日本建築学会環境系論文集，86（780），（2021），185-195

阿部君の修論（2023年度）は論文化はこれからだが、都市空間の熱収支モデルのUpdate 等も行っており、今後の展開が期待される。

4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

- （１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発
- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発
- （４）メソスケールの研究の進捗
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗**
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価
- （７）広州、武漢を対象とした研究

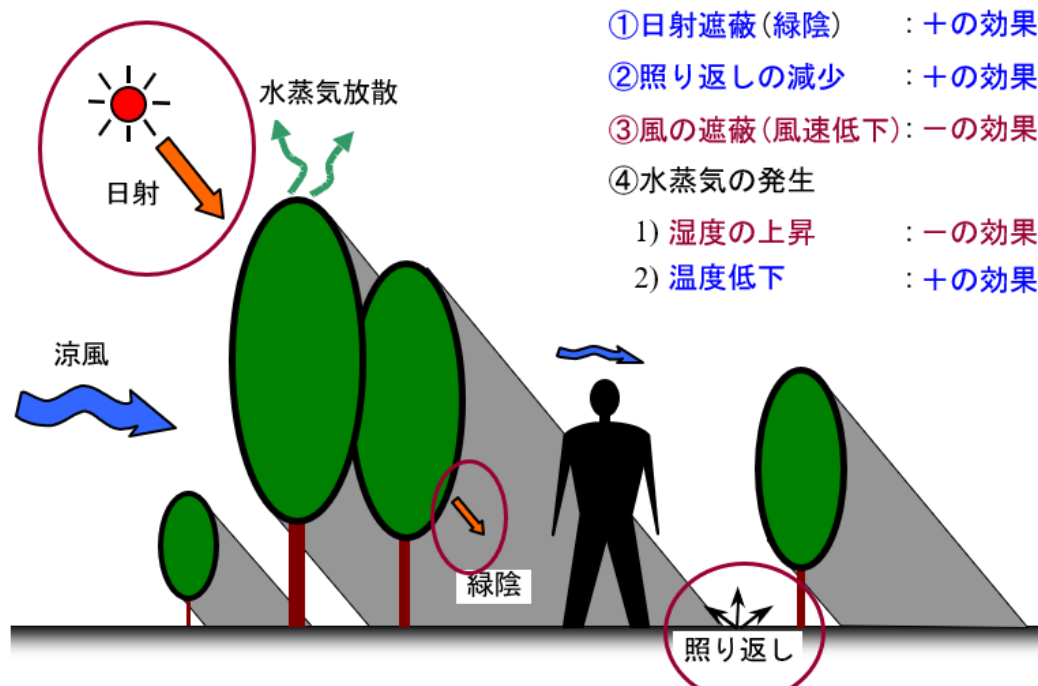
<2010年代半ば以降>

- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発
- （10）市街地風環境の制御
- （11）若干、手を付けた今後の課題

(5) 2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗

(5)-1 樹木効果の分析とその形態・配置の最適化

樹木が人間の温冷感に及ぼす影響



ここで、プラスの効果というのは、夏の温熱環境を改善する効果
⇒体感温度(SET*等)を下げる効果。

マイナスの効果というのは、夏の温熱環境を悪化させる効果
⇒体感温度(SET*等)を上げる効果

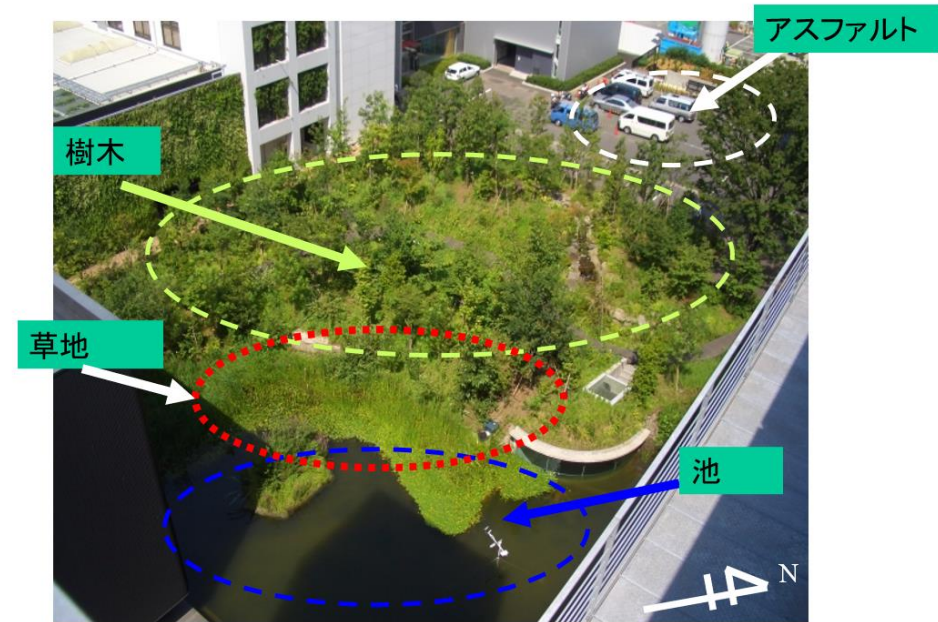
正負いろいろな効果がある中で、どの効果の影響が大きいのだろうか？

(5) 2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗

(5)-1 樹木効果の分析とその形態・配置の最適化

樹木・水面による気象要素の変化が体感温度(SET*)に及ぼす影響の要因分解

- a. 緑地や水面の影響で
 - ①温度、②湿度、
③MRT(平均放射温度)、④風速
の4つの気象要素が変化。
- a. 結果としてSET*が変化。
- b. ①～④の気象要素の変化の各々がSET*
の増減の及ぼす個々の影響を抽出。

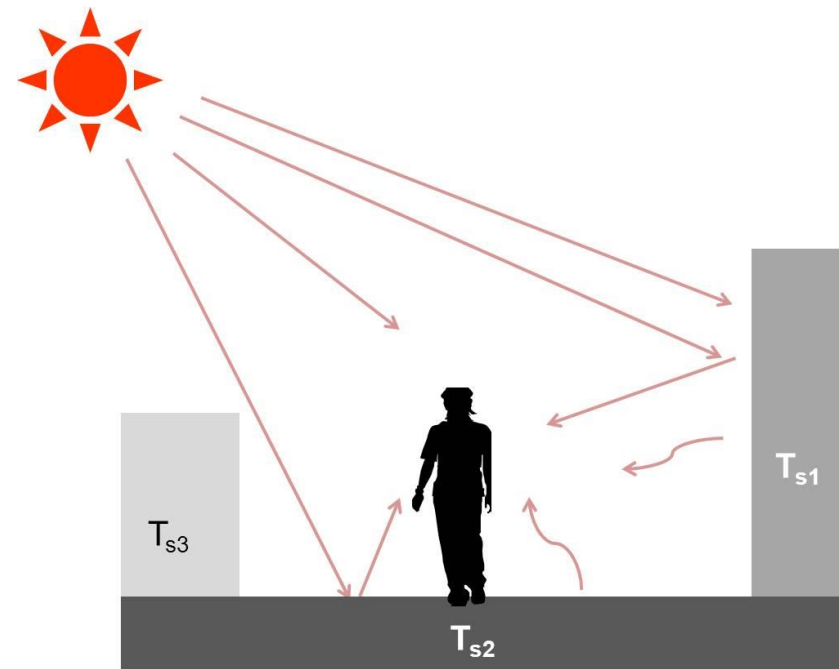


清水建設技術研究所のビオトープの観測
と緑・水面の効果分析

内田茉莉亜さんの修士論文(2009)「都市部の小規模緑地・水面により形成される温熱環境の評価手法に関する提案とそれに基づく効果分析」

MRT (Mean Radiant Temperature)とは？

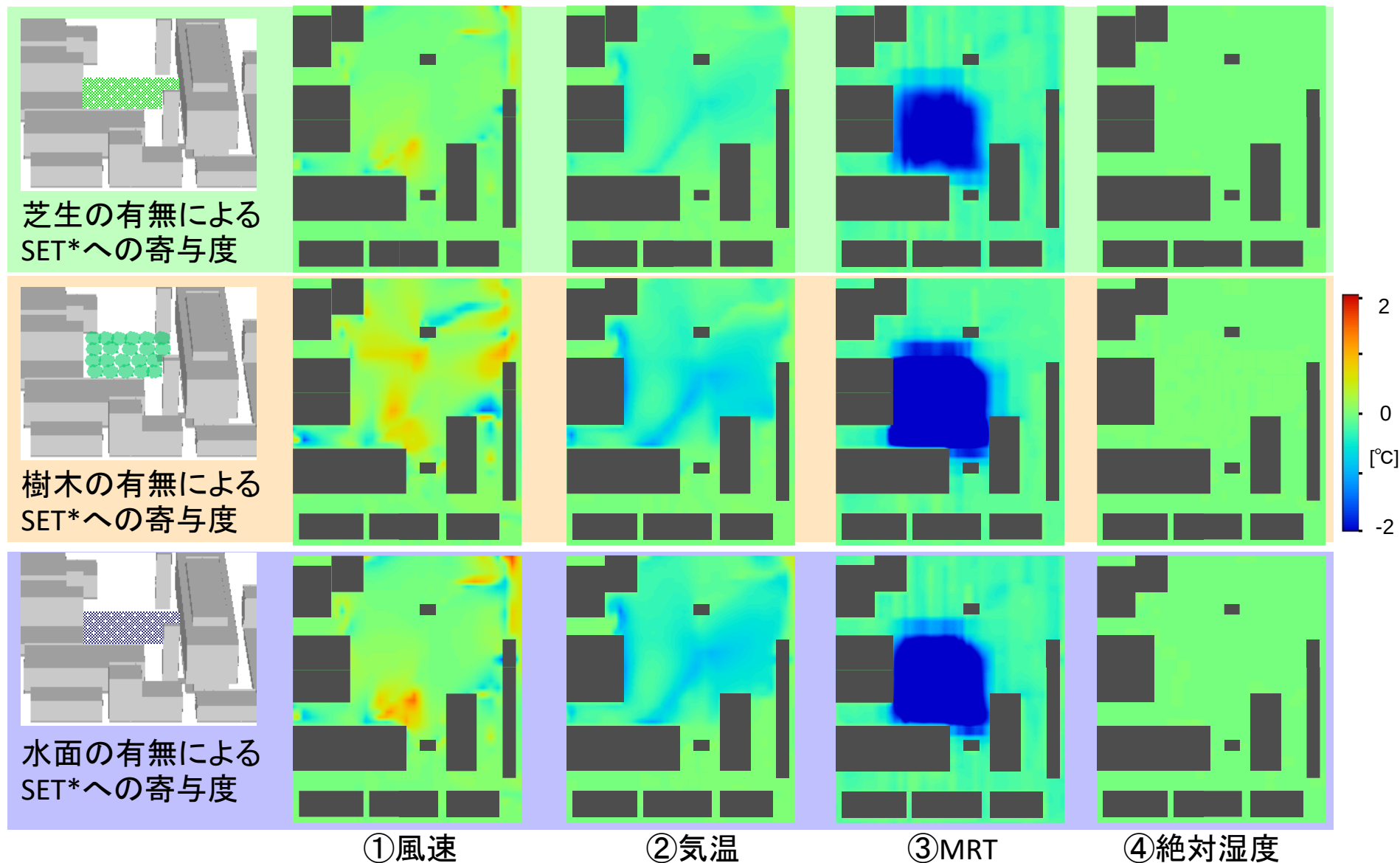
MRT(平均放射温度)とは、ある対象物(人体等)に対して、周囲から流入する放射量の総量(短波長放射(日射) + 長波長放射)を温度の次元に換算したもの。屋外空間では、建物の壁、地面からの長波長放射(赤外線) 以外に日射(短波長放射)があり、この影響が大きい。



アスファルト面との比較



負値: 緑地・水面があることによってその要素がSET*の**低下**を引き起こしている
正值: 緑地・水面があることによってその要素がSET*の**上昇**を引き起こしている

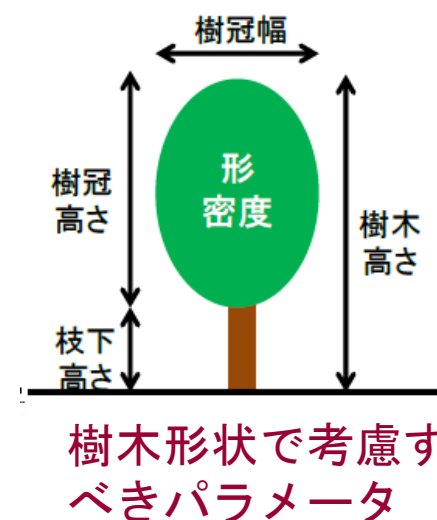
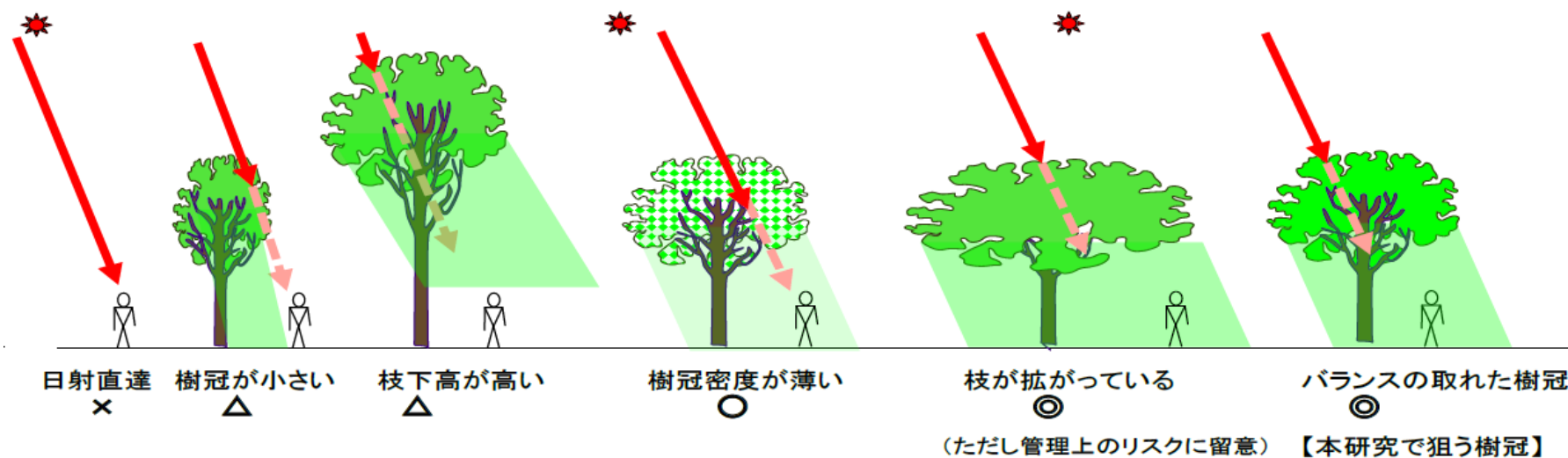


各Case のSET*の値から、Case Aの物理要素の1要素のみを各ケースのその物理要素の値に換えて算出したSET*の値を引いた結果

温熱環境の観点からの樹木配置のポイント

- 如何に風速低下を回避して、放射環境の改善(主として日射遮蔽効果)を最大限に利用するか？
(管理上のリスクも考慮して)

⇒このような興味から、都市緑化機構の手代木さんの科研B(2015年度～2017年度)「アーバン・クール・スポットを創出する都市樹木の最適な樹冠形状の効果検証」に共同研究者として参加した。

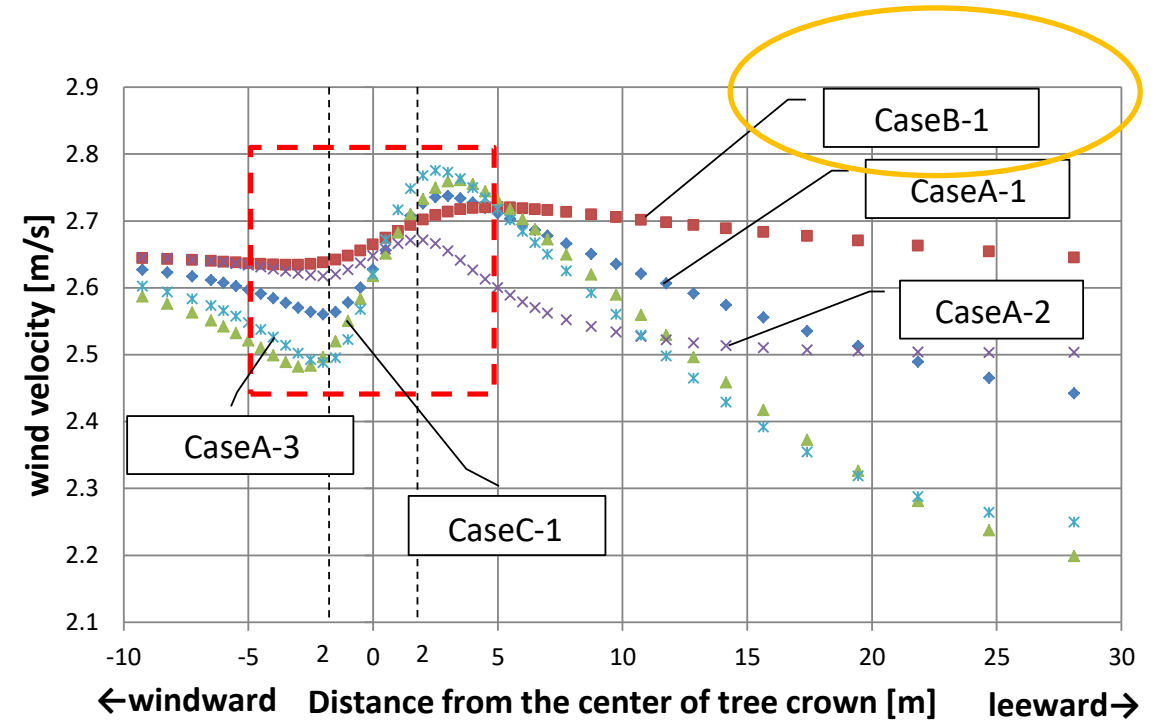
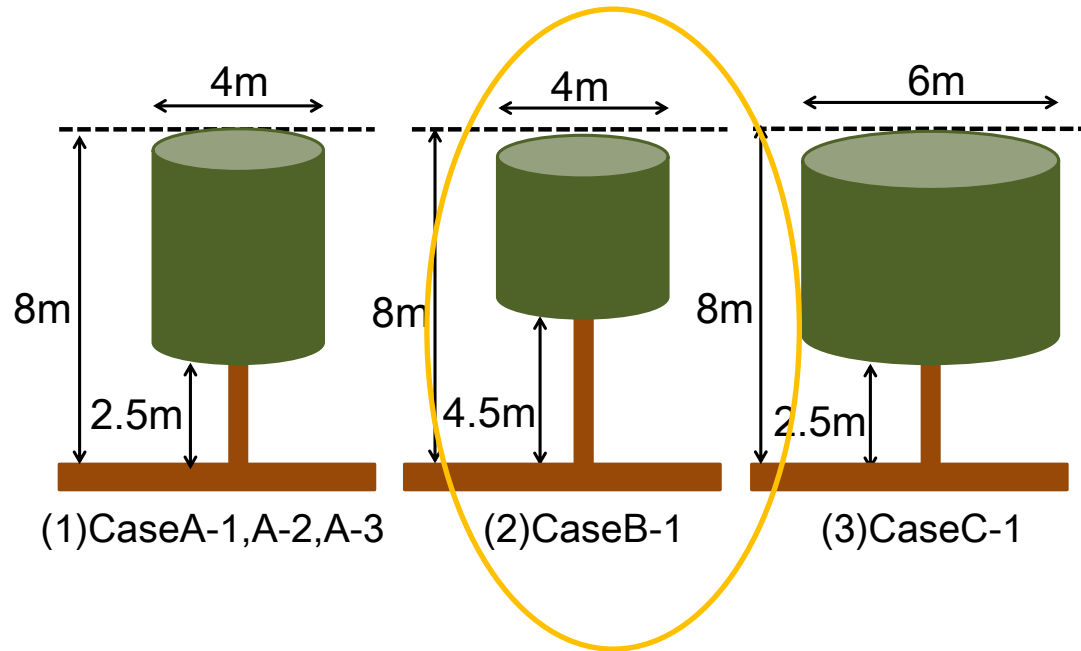


市林あゆみさんの修士論文(2016年度)「樹木の蒸散量に影響を及ぼす要因と蒸散による歩行者空間における気温低減効果の影響範囲の分析」

新井千秋さんの修士論文(2017年度)「歩行する人間が経験する温熱環境の変化を考慮した樹木配置計画に関する研究」

本間実季さんの修士論文(2018年度)「列植樹木の樹冠形状、配置間隔が歩行者空間の温熱快適性に及ぼす影響の分析と樹木モデルの改良」の一部

樹冠に関するパラメータ(樹冠幅、樹高、枝下高さ、葉面積密度)に関するケーススタディの例

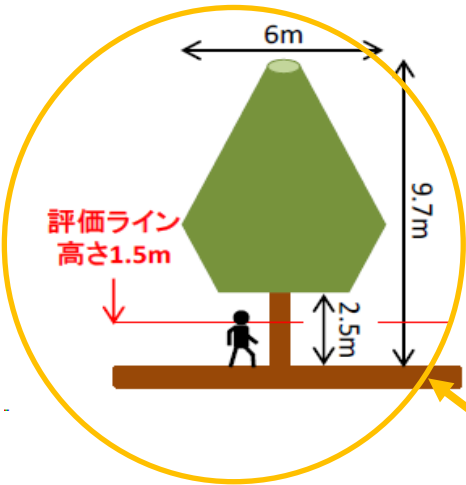


歩行者高さ(地上1.5m)の流れ方向の風速分布
($x=0\text{m}$ の場所が樹冠の中央)

Chiaki Arai, Saori Yumino, Taiki Uchida, Ayumi Ichibayashi and Akashi Mochida: Effects of shape and leaf area density of roadside trees on pedestrian thermal comfort, *The Fifth International Conference on Human-Environment System, ICHES2016 Nagoya, October 29 - November 2, 2016*

列植樹木の間隔が歩行経路の各温熱要素に及ぼす影響に関するケーススタディの例

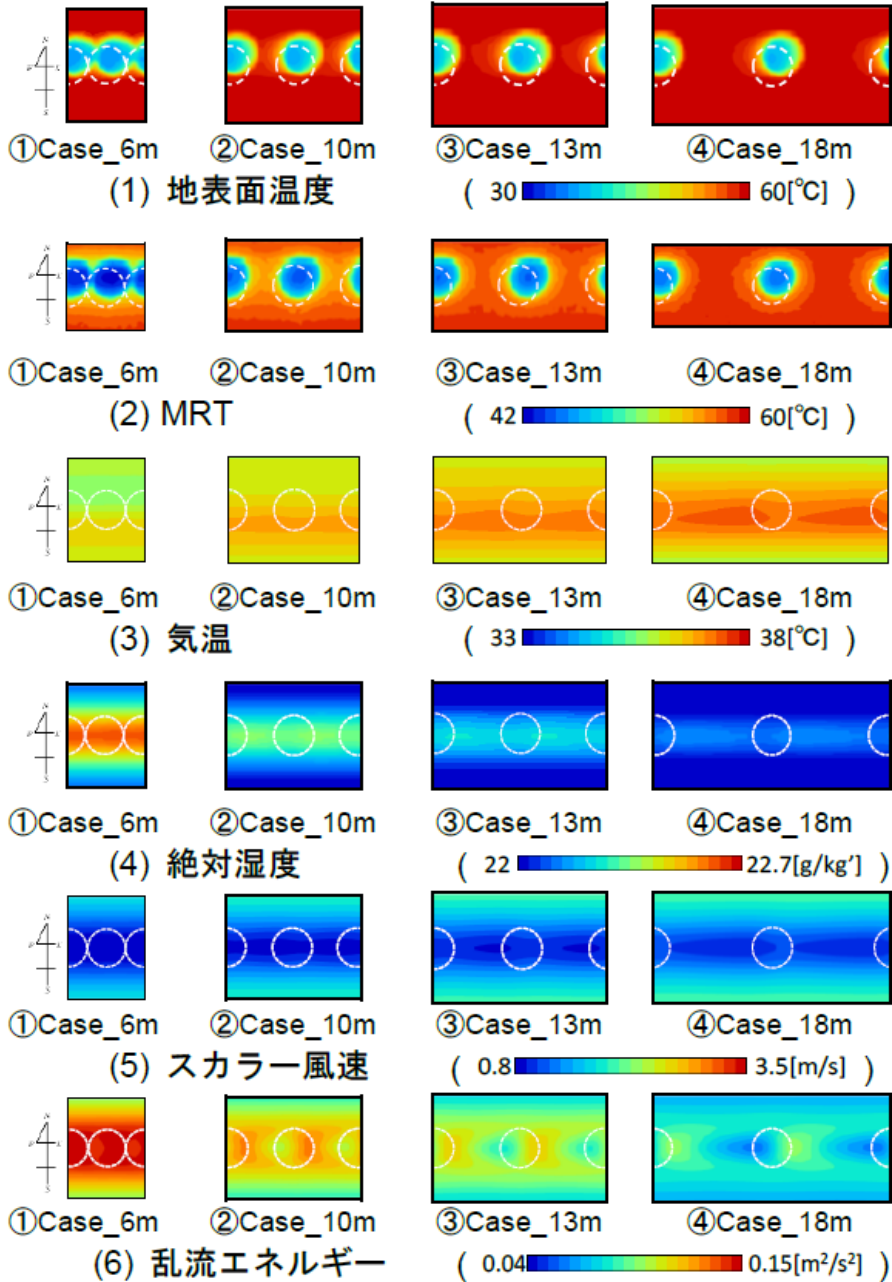
ケース	Case_6m	Case_10m	Case_13m	Case_18m
樹木間隔[m]	6	10	13	18



項目	値
樹高[m]	9.70
枝張り[m]	6.00
枝下高さ[m]	2.50
葉面積密度[m ² /m ³]	0.86
消散係数[-]	0.60
樹冠の蒸発効率[-]	0.30
樹冠のアルベド[-]	0.15
樹冠の長波放射の吸収率[-]	0.98

手代木さんとの共同研究の結果から得られた「推奨樹冠形状」

本間実季，新井千秋，石田泰之，持田灯，列植樹木の間隔が歩行経路の各温熱要素に及ぼす影響の分析，第25回風工学シンポジウム論文集，（2018），133-138

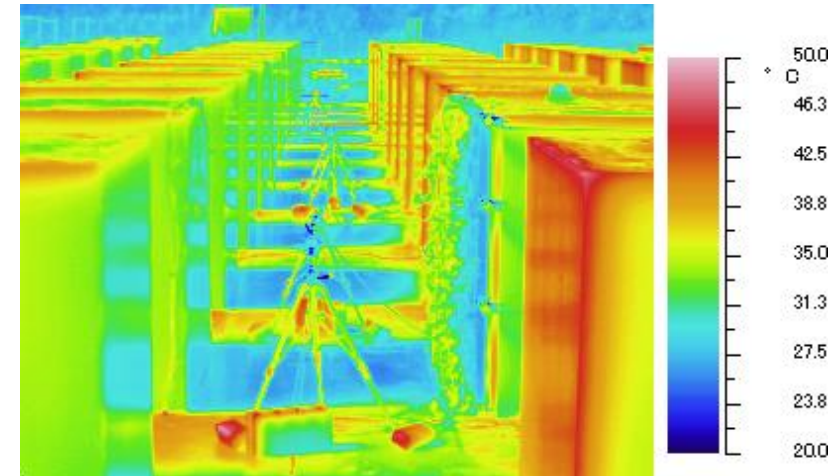


歩行者高さ(1.5m)における諸量の水平分布

(5) 2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗

(5)-2 建物の鉛直壁面の高反射化や緑化が街路空間の温熱環境に及ぼす影響

- 2010年頃、歩行者空間の放射環境への影響の大きさから鉛直壁に興味を持つようになった。
- 日本工業大学のCOSMO観測サイトにおいて、鉛直壁面が、
①コンクリート、②緑化、③高反射面、の場合の3次元放射環境を詳細に計測、人体への放射の影響を定量的に評価した（清水建設技術研究所の佐々木澄氏との共同研究）。
- 弓野さん（M1）、洪廷炫さん（B4）⇒洪さんの卒業論文「3次元放射収支の計測に基づく鉛直壁面による街路空間の温熱環境への影響の分析」⇒弓野さんの修論・博士論文の一部。

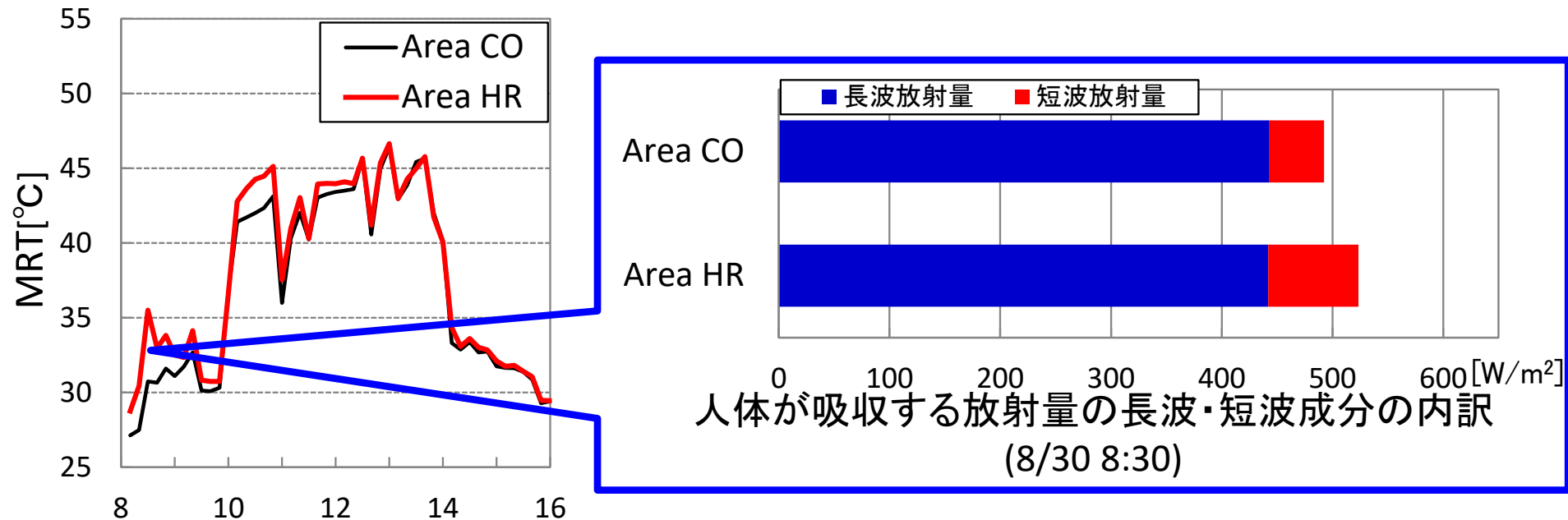


日本工業大学の COSMO 観測サイト

Comprehensive Outdoor Scale Model for Urban Climate

(Source: <http://leo.nit.ac.jp/~narita>)

平均放射温度(MRT)と人体に入射する放射エネルギーの比較 (コンクリート面 vs 高反射面)



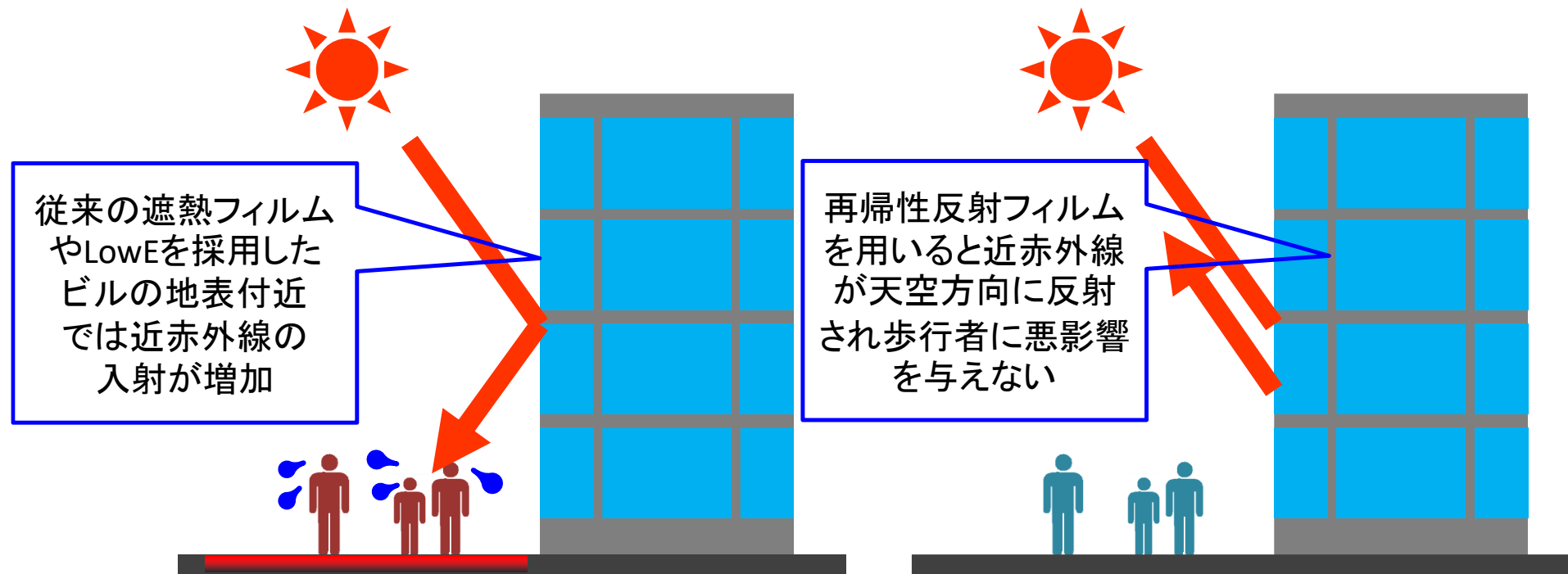
Area HR (高反射面) では、日射の当たる午前中にArea CO (コンクリート面) に比べMRTが最大で4.8°C上昇。

⇒Area HR (高反射面) とArea CO (コンクリート面) は吸収される長波放射量は変わらないが、短波成分が増えたことで、Area HR (高反射面) のMRTが上昇。

(5) 2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗

(5)-3 再帰性熱反射フィルムが室内外の環境に及ぼす影響の評価 都市気候×室内気候×化学工学

- 2012年からSONYケミカル（現、デクセリアルズ）社との共同研究がスタート。
- ビルの窓面の遮熱対策が屋外放射環境を悪化させることが懸念されるが、この対策として同社が開発した再帰性熱反射フィルムの効果の検証を行った。

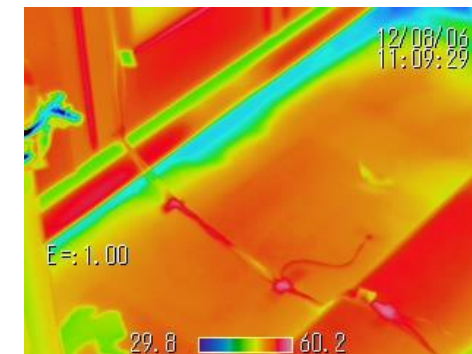


- 東日本大震災後に建設された仮設校舎（片平キャンパス）の中庭において、熱線再帰性反射フィルム、従来型の遮熱フィルムを貼付した窓ガラスと普通ガラスの計3面周辺で実施（弓野さんの研究の一部、また石田尚君の2012年度卒業論文）。

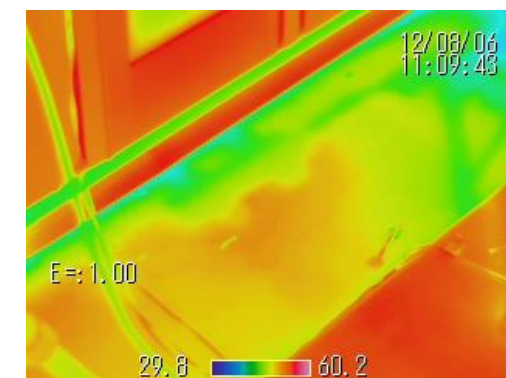


片平の仮設校舎での実測の様子
(2012年8月2～11日)

⇒石田壽一先生に大変お世話になった。



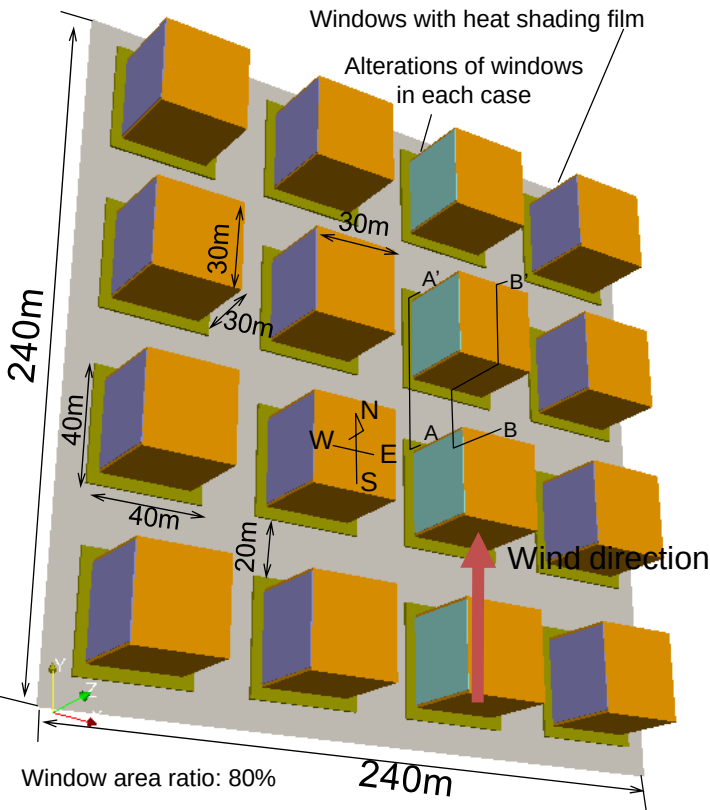
従来型の遮熱フィルム



再帰性熱反射フィルム

放射・CFD連成解析による熱線再帰性反射フィルムの評価

- 指向性反射の影響を考慮した放射・CFD連成数値解析を夏季の街路内歩行空間の温熱快適性評価に適用



解析対象(鳥瞰図)

吉田伸治先生 (奈良女子大) の成果

解析日時: 2011/8/7/6:00~8/9/0:00, 結果の評価: 8/8

Case	窓の種類
1 (FI)	普通ガラス (3mm厚)
2 (HSF)	従来の遮熱フィルム貼付け窓
3 (LowE)	Low-E複層EA窓
4 (RRF)	再帰反射フィルム貼付け窓 (RRF)

窓面における日射収支の比較

普通ガラス:

- 入射日射の8割が室内に透過・吸収

再帰性熱反射:

- 室内へ入る成分はLow-E窓, 遮熱窓と同程度。
- 地表への再入射を半減 (Low-E窓, 遮熱窓に比べ)。

Case	1 (普通)	2 (遮熱)	3 (LowE)	4 (再帰)
窓面に入射	403 kW (100%)			
室内に透過・吸収	326 kW (81%)	274 kW (68%)	270 kW (67%)	286 kW (71%)
地表に再入射	79 kW (19%)	129 kW (32%)	133 kW (33%)	60 kW (15%)
対向壁に再入射				
天空に再帰				57 kW (14%)

Shinji Yoshida, Saori Yumino, Taiki Uchida, Akashi Mochida Effects of windows with heat ray retro-reflective film on outdoor thermal environment and building cooling load [Journal of Heat Island Institute International, 9(2), (2014), 67-72]

Shinji Yoshida, Akashi Mochida, Evaluation of effects of windows installed with near-infrared rays retro-reflective film on thermal environment in outdoor spaces using CFD analysis coupled with radiant computation [Building Simulation, 11(5), (2018), 1053-1066]

4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

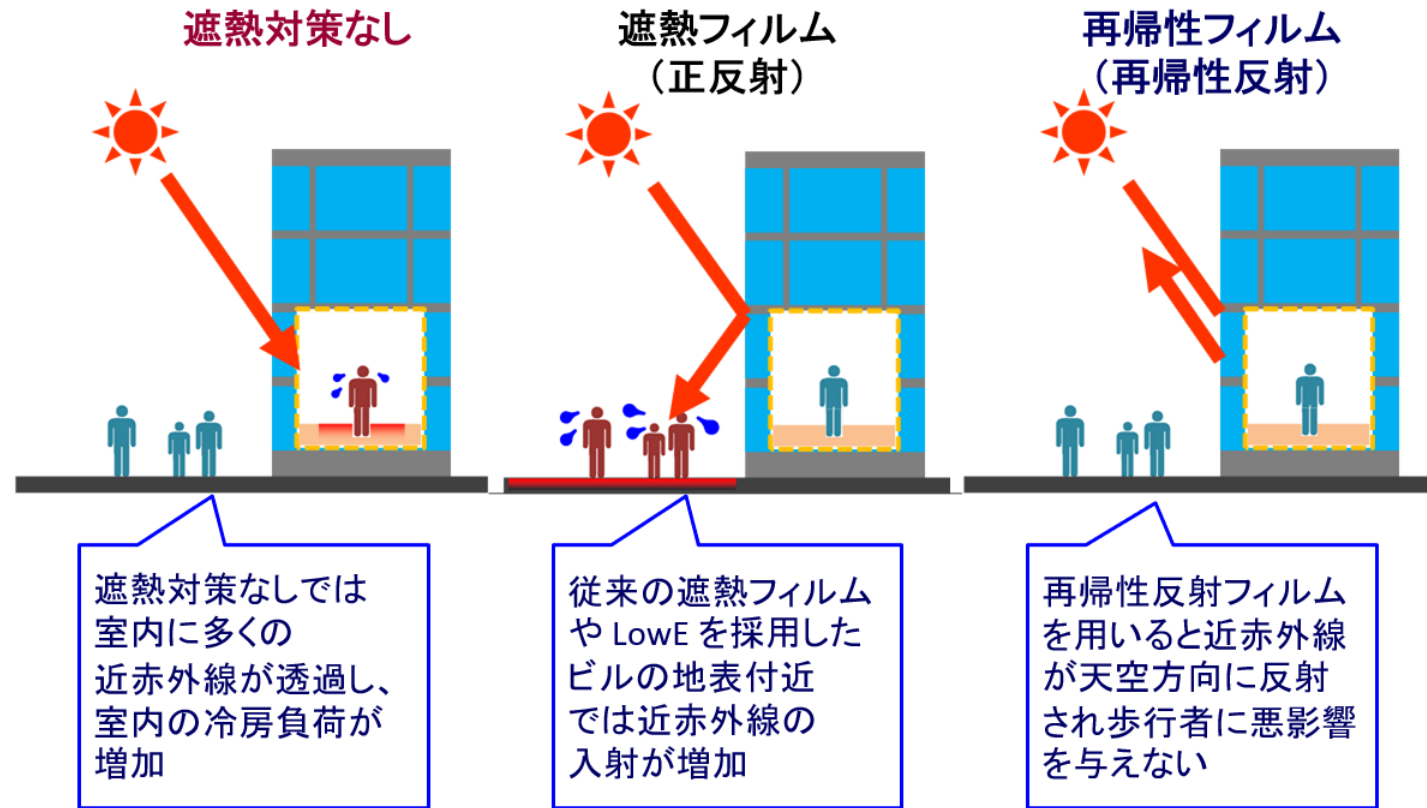
- （１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発
- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発
- （４）メソスケールの研究の進捗
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価**
- （７）広州、武漢を対象とした研究

<2010年代半ば以降>

- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発
- （10）市街地風環境の制御
- （11）若干、手を付けた今後の課題

建物外表面に対する対策に伴う建物内外の熱の流れの変化

→「ここでは、日射熱がババ抜きの子。ババを掴まされるのは誰だ？」



⇒都市内部のある部位に制御を加え、どこかが良くなれば、どこかにしわ寄せが行っている。
⇒建物内外の全体のヒート・フローを俯瞰的に捉える必要がある！⇒総合評価が必要だ！

(6) 緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価

- 温暖化対策には2つの観点、緩和と適応がある。
- 都市温暖化は地球温暖化とヒートアイランド現象が複合して生じている。
- そして、地球温暖化とヒートアイランドの発生メカニズムは全く異なる。
- 従って、現象そのものを緩和するためには、別々の緩和策が必要である。
- 一方、暑さの人間への影響を軽減するための対策(適応策)については、地球温暖化によって生じた暑さであろうと、ヒートアイランドによって生じた暑さであろうと変わらない。

Mitigation (緩和策)

現象の原因を解決し
現象そのものを
緩和する

Ex.) 人工排熱を抑制し、
ヒートアイランド現象
を緩和

Adaptation (適応策)

現象が起こること
による影響を抑制する

Ex.) 緑陰を創出し、
人間への熱ストレスを
抑制

「都市温暖化に伴う暑さ」の対策に係る3つの観点

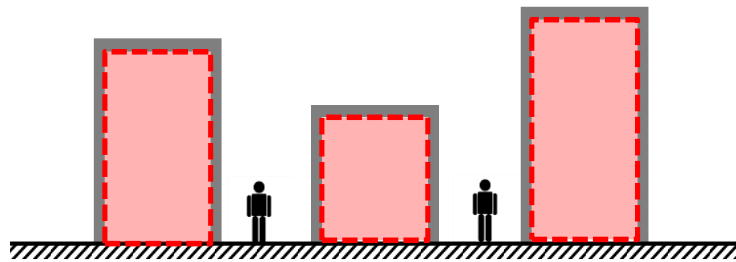
- 以上から、都市の温暖化に伴うまちなかの暑さ対策の目的は、
 - A) 地球温暖化の緩和（冷房用エネルギー削減を通じた脱炭素化）
 - B) ヒートアイランド現象の緩和
 - C) 暑さへの適応の3つに分けられると考えられる。

⇒弓野沙織さんの博士論文（2015年度）「都市温暖化緩和・適応策の効果分析のための温熱環境予測・評価手法の開発」の最終パート。

⇒内田大貴君の修士論文（2015年度）「放射・対流解析に基づく都市温暖化対策のもたらす効果の3つの観点からの定量化と分析」

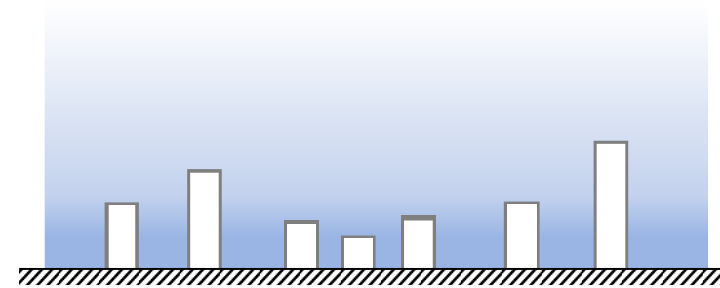
3つの観点からの都市温暖化緩和・適応策の評価

- 3つの観点に対応する領域と指標を以下のように定義した。



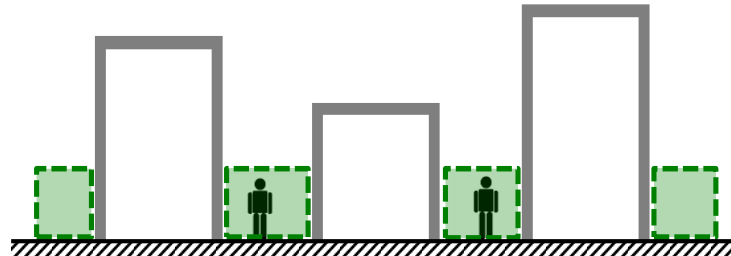
(A)地球温暖化緩和効果

- ・指標: 空調用エネルギー消費
- ・領域: 室内(への熱の流入)



(B)ヒートアイランド緩和効果

- ・指標: 都市大気部を加熱する熱量
- ・領域: 都市大気部

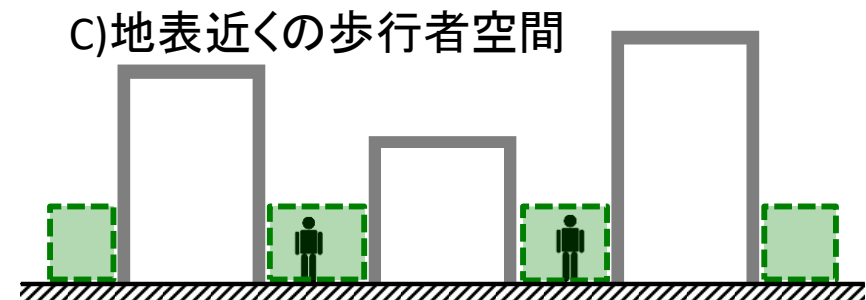


(C) まちなかの暑さへの適応効果

- ・指標: 歩行者空間の体感気候
- ・領域: 都市大気部の地表付近の人間の生活空間

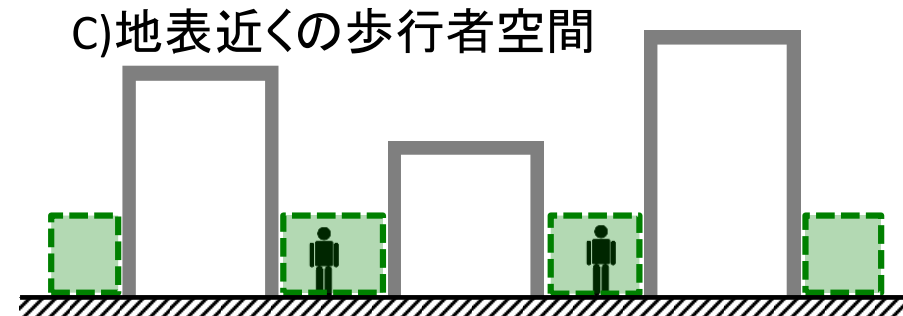
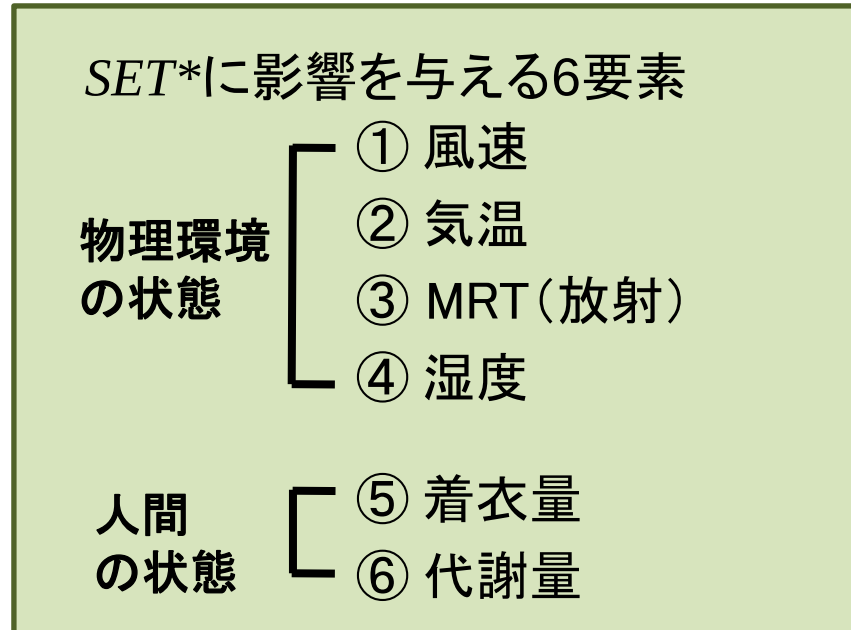
領域(C) 暑さへの適応策の評価

- 暑さへの適応策としての効果は、都市大気部の中の屋外歩行者空間(=領域(C))の体感気候をどれだけ改善できるかで評価。
- ここで、「暑さ」の評価対象を以下の2つに分けて考える・
 - 1)平均的な気温の上昇(地球温暖化+ヒートアイランドの影響)によるもの
 - 2)猛暑の頻発・激甚化(偏西風の蛇行等により生じる極端気象)によるもの
- 1)は夏季の期間中ずっと、2)は時々影響する。
⇒平均的な夏日の**快適性**(SET*が許容値以下となる面積率)、
極端な猛暑日の**安全性**(熱中症発症リスクの増幅率)、
の2つの観点から評価することとした。



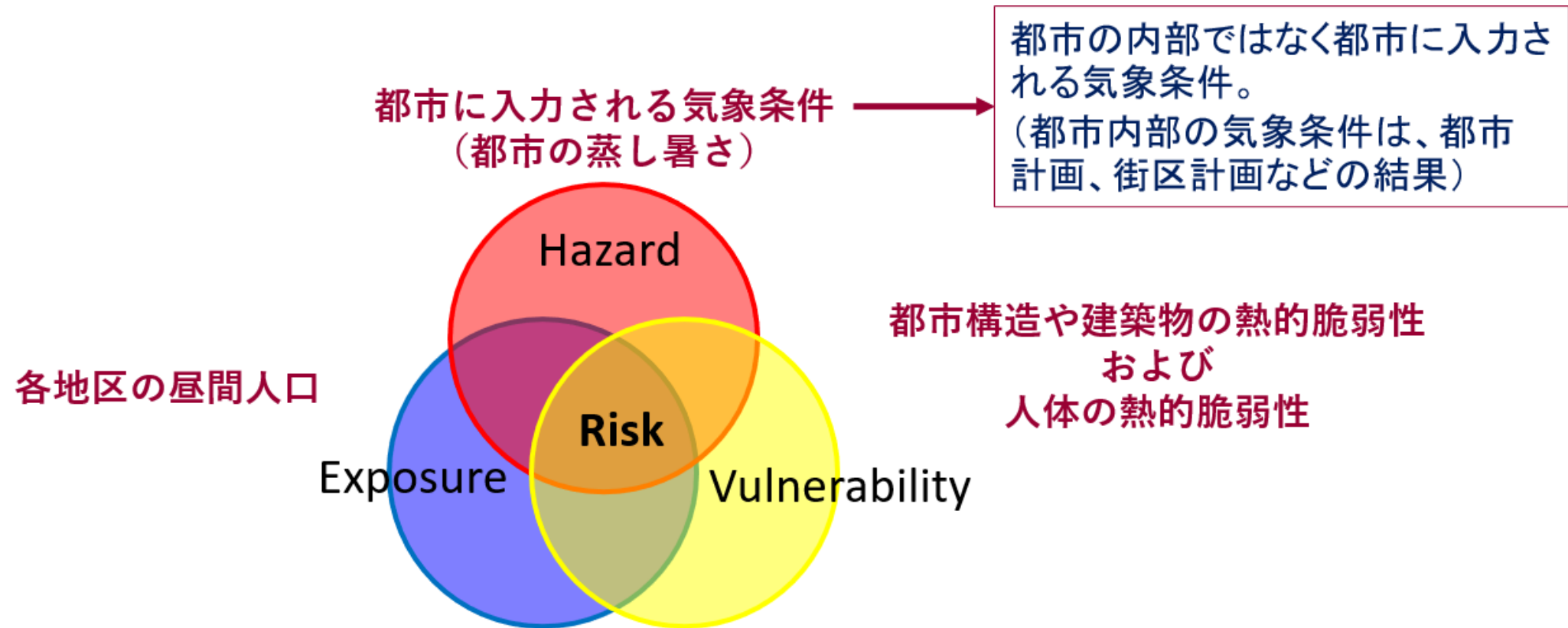
領域(C)-1 平均的な夏日における暑さに対する適応策としての評価

SET*の許容値を35℃と設定し、
評価領域中で許容値を下回る面積率を指標とする。



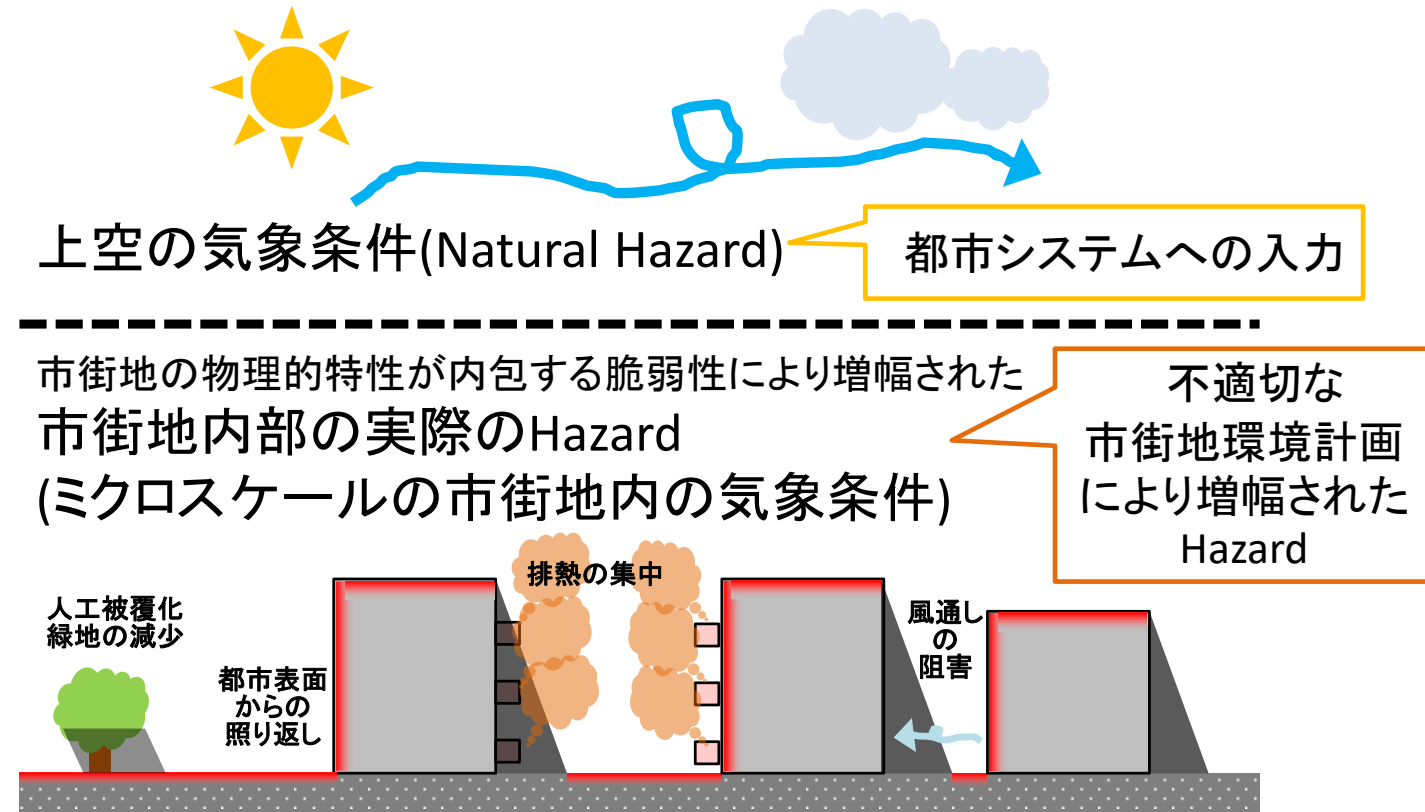
領域(C)-2 極端な猛暑日における暑さへの適応策の評価

⇒ 熱中症発症リスクに基づく評価方法を考えた。



拘ったポイント: Natural Hazardと実市街地内のHazardの区別

- 市街地内部では、その上空よりも人間に厳しい温熱環境の場所が数多く存在する。
⇒ 緑地減少、風通し悪化、人工排熱等の影響。
- 言い換えると、上空の気象条件のもたらす脅威(Natural Hazard)が不適切な市街地環境計画により増加している。 ⇒ 不適切な計画が市街地の熱的脆弱性を増加させている。



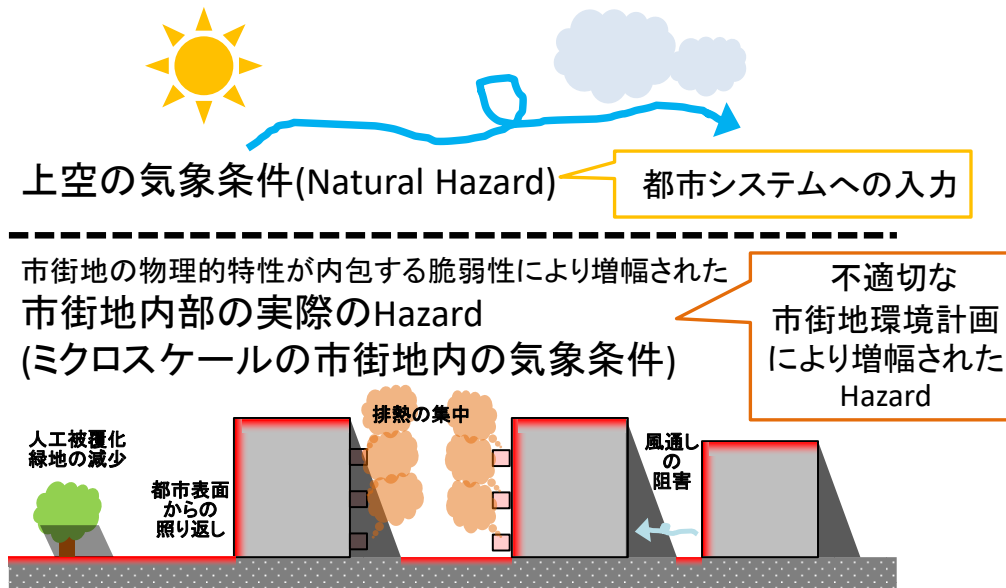
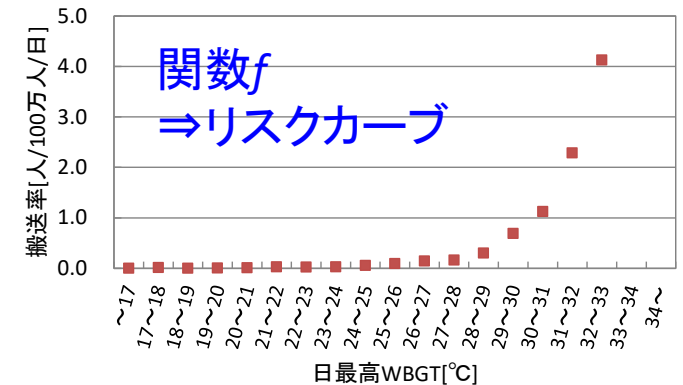
Risk増幅率の定義

- 不適切な市街地環境計画による市街地内でのHazardの増加によるRiskの増幅を表すためにRisk増幅率を定義。⇒その市街地の熱的脆弱性の指標

$$\text{Risk増幅率} = f(\text{実市街地内のHazard (WBGT)}) / f(\text{Natural Hazard (WBGT)})$$

- ここで、**Natural Hazard = 市街地上空の気象条件**
(都市構造の影響を受けない気象条件)

実市街地内のHazard = 実市街地内部の気象条件

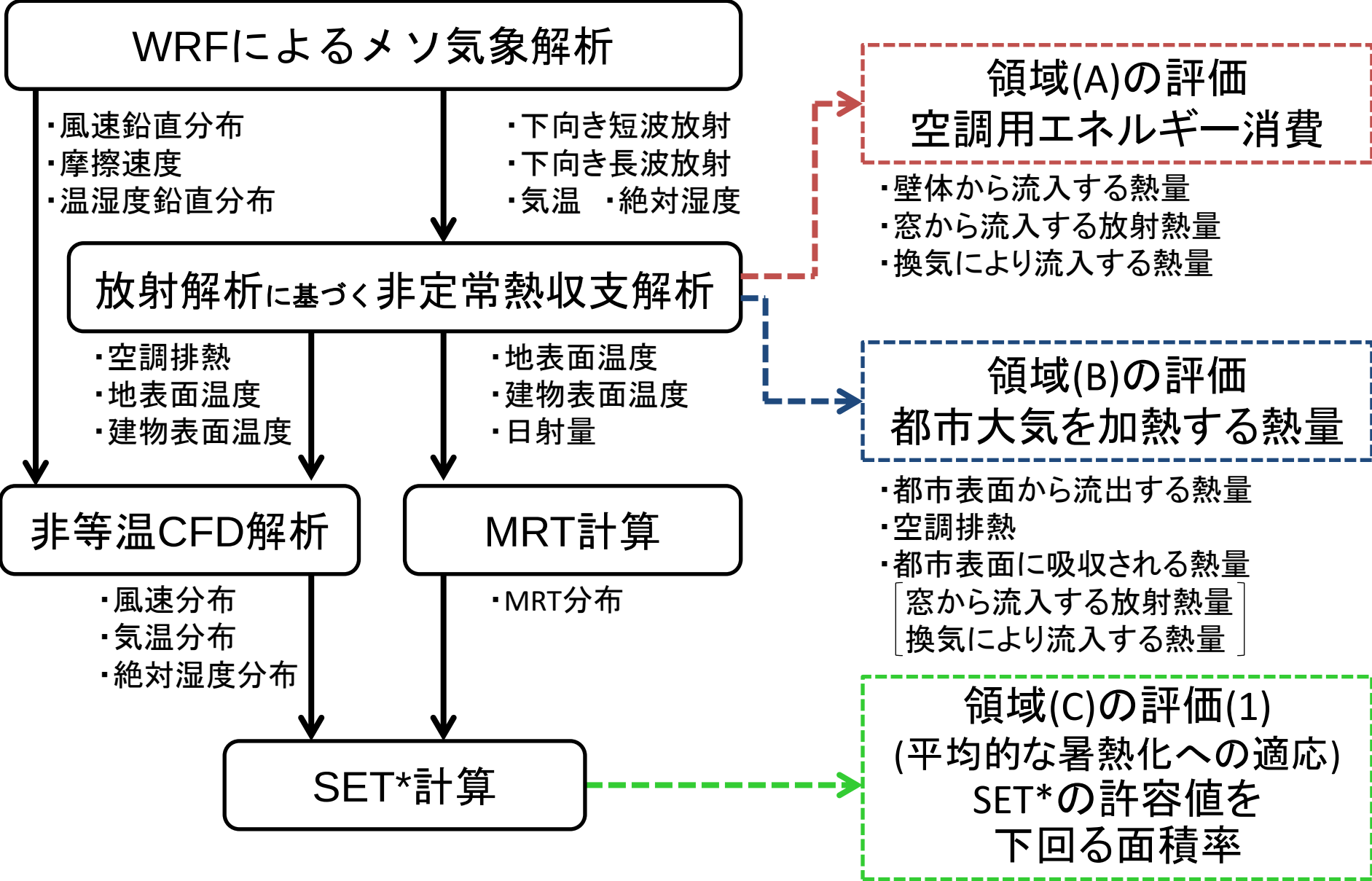


Risk増幅率:

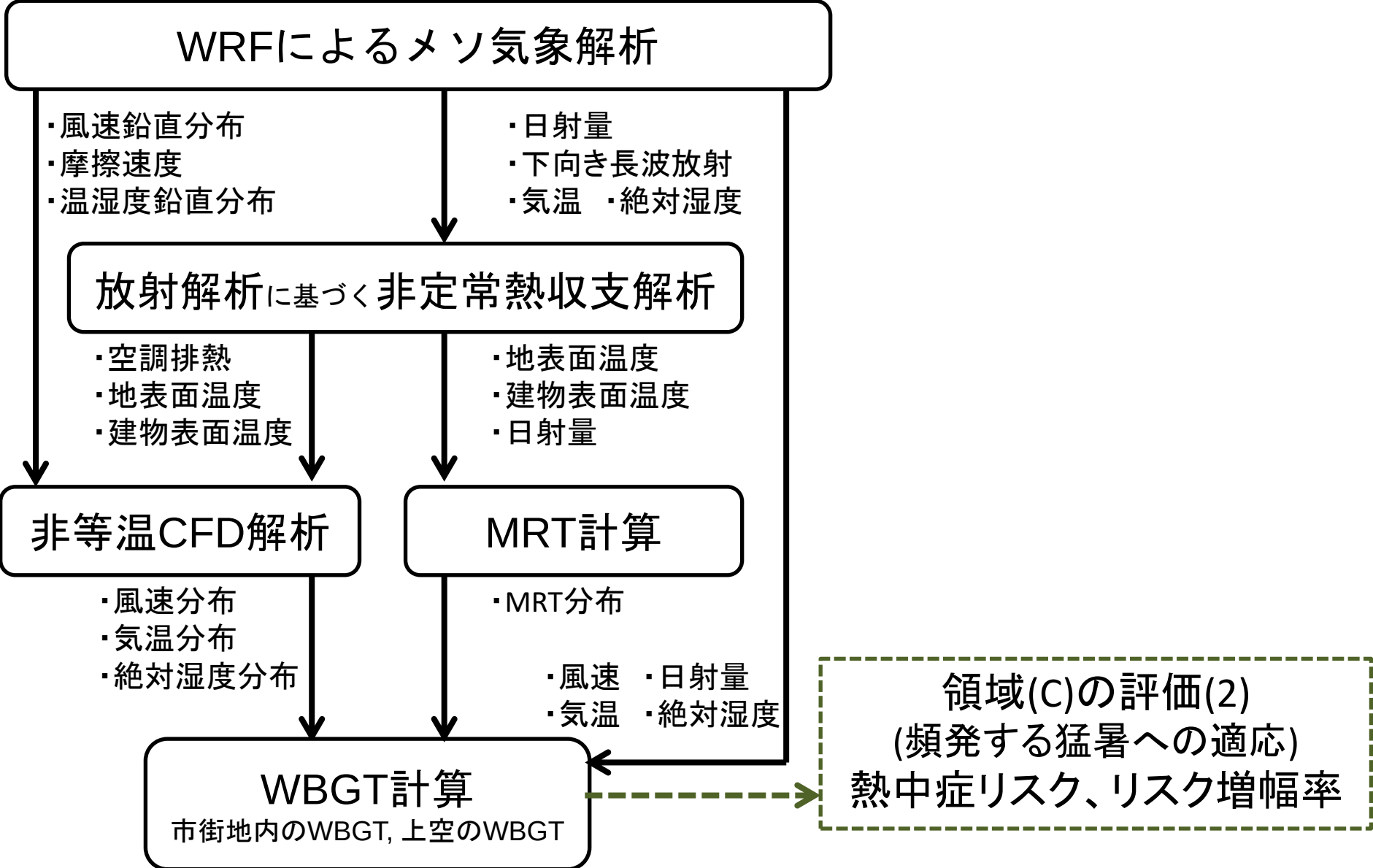
市街地温熱環境計画の良しあしから生じる熱的脆弱性の違いを表すパラメーター

Risk増幅率>1ならば・・・都市構造がリスクを**増幅**
Risk増幅率<1ならば・・・都市構造がリスクを**低減**

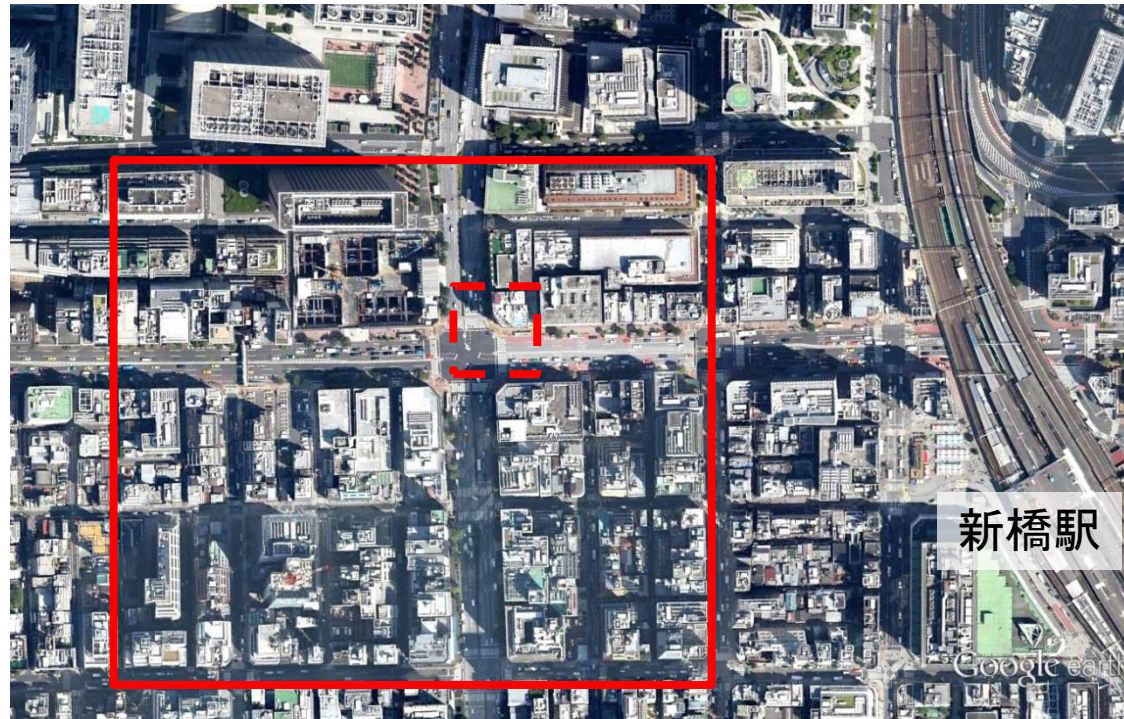
評価指標算出のフロー(平均的夏日の場合)(これまで開発した各解析モデル総動員)



評価指標算出のフロー(猛暑日の場合)(これまで開発した各解析モデル総動員)

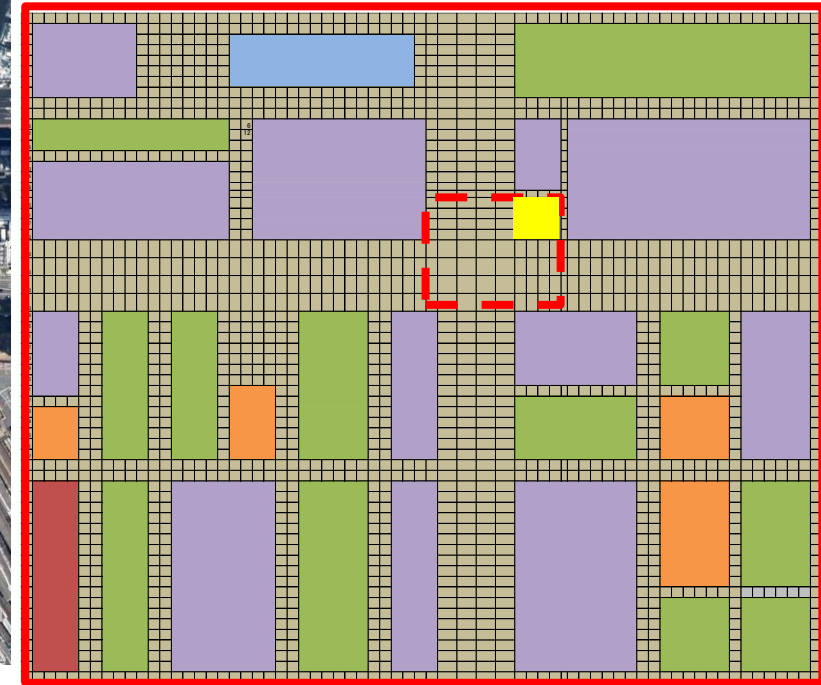


新橋の街区を対象としたケーススタディ



新橋の航空写真(Google Earthより)

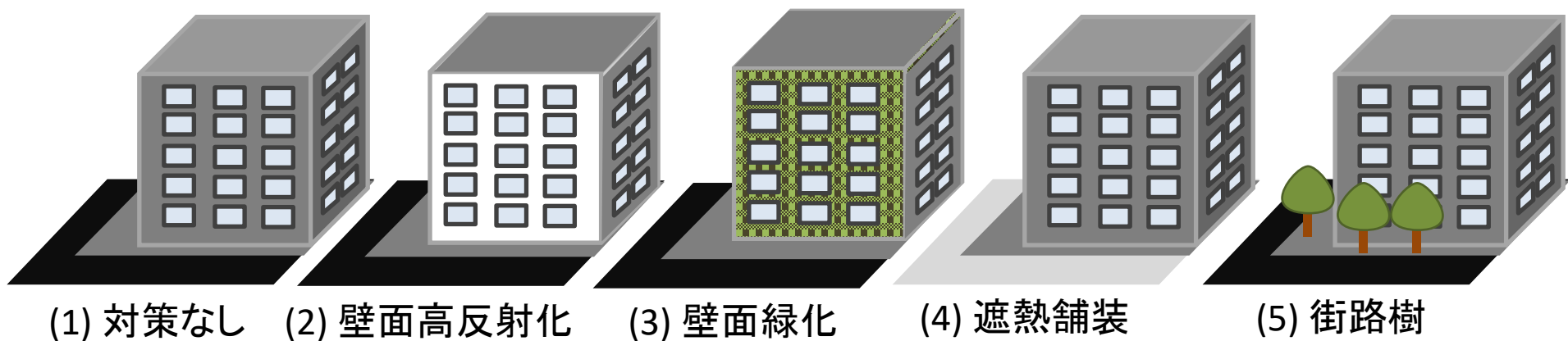
対象建物



モデル化した新橋の街区

大通りに面する面(西・南面)に対して各種暑さ対策を施したケースの解析を実施。
⇒今回は建物内外の熱の流れの変化を分析するために1棟への対策を対象とする。

東京の新橋の街区を対象とした各種対策の総合評価



	case	建物 南・西面 日射反射率[-]	建物 南・西面 蒸発効率[-]	車道 日射反射率 [-]
	対策なし	0.20	0	0.10
壁面 対策	壁面高反射化	<u>0.60</u>	0	0.10
	壁面緑化	0.15	<u>0.3</u>	0.10
街路 対策	遮熱舗装	0.20	0	<u>0.34</u>
	街路樹	0.20	0	0.10

すべての壁面で窓面積率は50%とした。

3つの評価軸からの総合評価

地球温暖化の緩和、ヒートアイランドの緩和、暑さへの適応

青字：無対策より改善，赤字：無対策より悪化

	Domain A	Domain B	Domain C	
	Mitigation of global warming	Mitigation of UHIs	Adaptation to urban warming	
			Adaptation to gradual warming	Adaptation to extreme hot weather
	Total energy consumption of HVAC system	Net effluent heat from urban surfaces	Acceptable area ratio	Risk amplification ratio
Without countermeasure	96.1[GJ/day]	543.0[GJ/day]	38.6[%]	2.08[-]
Highly reflective building surface	95.3[GJ/day]	525.6[GJ/day]	27.9[%]	2.24[-]
Greening	95.5[GJ/day]	534.9[GJ/day]	45.9[%]	2.09[-]
Highly reflective pavement	96.5[GJ/day]	536.5[GJ/day]	17.0[%]	2.21[-]
Roadside trees	95.8[GJ/day]	539.0[GJ/day]	63.1[%]	1.54[-]

Saori Yumino, Taiki Uchida, Kiyoshi Sasaki, Hikaru Kobayashi, Akashi Mochida, Total assessment for various environmentally conscious techniques from three perspectives: Mitigation of global warming, mitigation of UHIs, and adaptation to urban warming, Sustainable Cities and Society, 19, (2015), 236-249

弓野沙織，石田泰之，大場優作，内田大貴，小林光，持田灯，都市の暑熱化への適応、ヒートアイランド現象緩和、地球温暖化緩和の観点からの街路空間の暑さ対策効果の定量化，日本建築学会環境系論文集，87 (794)，(2022)，271-281

4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

- （１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発
- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発
- （４）メソスケールの研究の進捗
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価
- （７）広州、武漢を対象とした研究**

<2010年代半ば以降>

- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発
- （10）市街地風環境の制御
- （11）若干、手を付けた今後の課題

JST-MOST 戦略的日中科学技術協力推進事業 (華南理工大学との共同プロジェクト)

「東アジアの諸都市の気候変化のメカニズムとその予測・計測・評価技術」

プロジェクト期間：2011 年1月～ 2013年12月迄

日本側：代表：持田、メンバー：大岡先生、義江先生、吉田（伸治）先生、
竹林先生、他多数

中国側：代表：孟慶林教授（華南理工大学 建築学院）

メンバー：趙立華教授、李瓊准教授、張磊准教授、張宇峰教授、
張玉技師（全てのメンバーが華南理工大学 建築学院）

- 当時、研究室に武漢からの留学生の周曾さん、鄧勤梨さんも在籍していたので、武漢も研究フィールドとした。

華南理工大学の先生方のセミナー(広州(2011.6), 広州(2012.12), 東京(2013.3), 仙台(2014.4))



華南理工大学のキャンパス内で屋外温熱環境実測を実施(席天宇君、登内君、弓野さん)

⇒席天宇君の博士論文(2011年度)「Research on the Influence of Piloti Ratio on Outdoor Thermal Environment of Residential Blocks in Humid Subtropical Climate City」へ

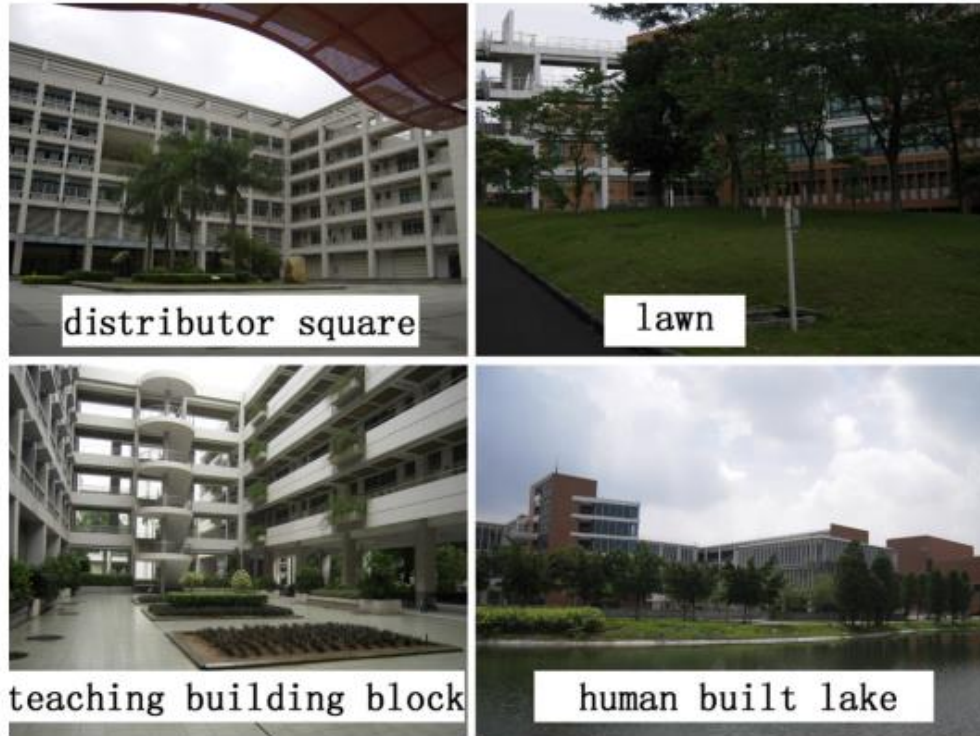


Fig. 2. View of various elements in the Guangzhou campus clusters.



Fig. 4. Views of the questionnaire survey site.

Tianyu Xi, Qiong Li, Akashi Mochida, Qinglin Meng,
Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas, Building and Environment, (52), (2012), 162-170

⇒Scopus上(2024.2.23)での被引用件数166 (Top7%), FWCI=3.32

武漢理工大学訪問(2012.1)



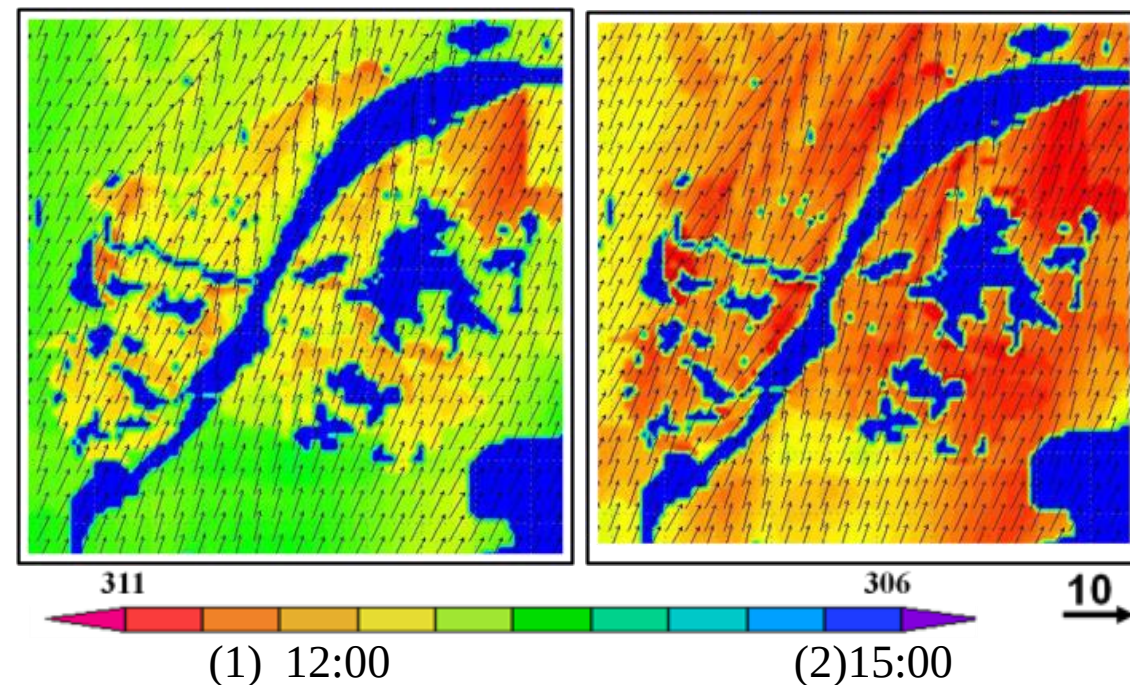


武漢における日中共同での屋外温熱環境実測
と被験者アンケート

Zeng Zhou, Hong Chen, Qinli Deng and Akashi Mochida, A Field Study of Thermal Comfort in Outdoor and Semi-outdoor Environments in a Humid Subtropical Climate City, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 1 (12), (2013)

周曾さんの博士論文(2012年度)「Effects of Piloti on Outdoor Thermal Environment of Residential Blocks in a Hot-summer and Cold-winter City」

鄧勤犁さんの博士論文(2013年度)「Impacts of Building Density and Green Area Ratio on Urban Climate in Humid Subtropical Climate City」



武漢を対象とした気候解析例
(気温と風速の水平分布)

都市の風通しと日射遮蔽の両面から見た最適な隣棟間隔の研究

- 風通しの観点からは隣棟間隔が長い方が望ましい
- 日射遮蔽の観点からは隣棟間隔が短い方が望ましい
- 両者のバランスからの最適な間隔があるはずだが、それは地理的条件下で異なるはず。⇒隣棟間隔を系統的に変化させ、地理的条件の違う都市を対象に検討。

玄英麗さんの博士論文（2012年度）「Climatically Adapted Building Arrangement to Maximize Thermal Acceptability of Outdoors under Different Climatic Conditions」

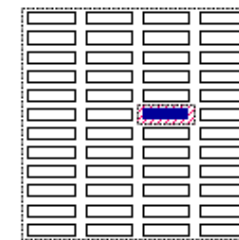
⇒隣棟間隔を7段階変化させ、仙台と広州で比較（緯度の変化）。

楊光さんの博士論文（2013年度）「東アジア諸都市における緯度の相違による建物周辺環境の変化—建物隣棟間隔と屋外温熱環境の関係の分析—」

⇒内陸都市も含めて検討対象を拡大。

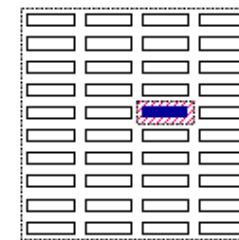
緯度の変化⇒太陽高度の変化

沿岸から内陸への変化⇒風速の変化（沿岸（高）、内陸（低））



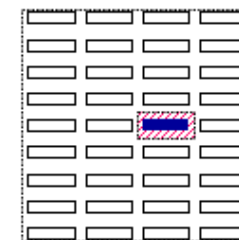
D/H=0.24

D=10m



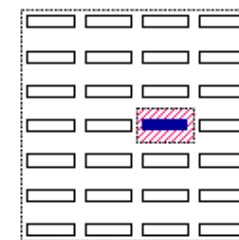
D/H=0.37

D=15m



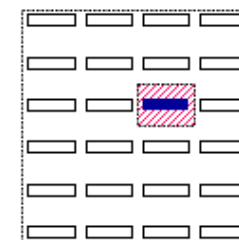
D/H=0.48

D=20m



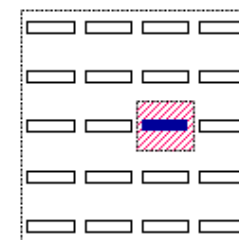
D/H=0.71

D=30m



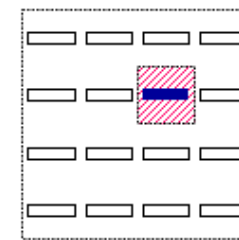
D/H=0.95

D=40m



D/H=1.19

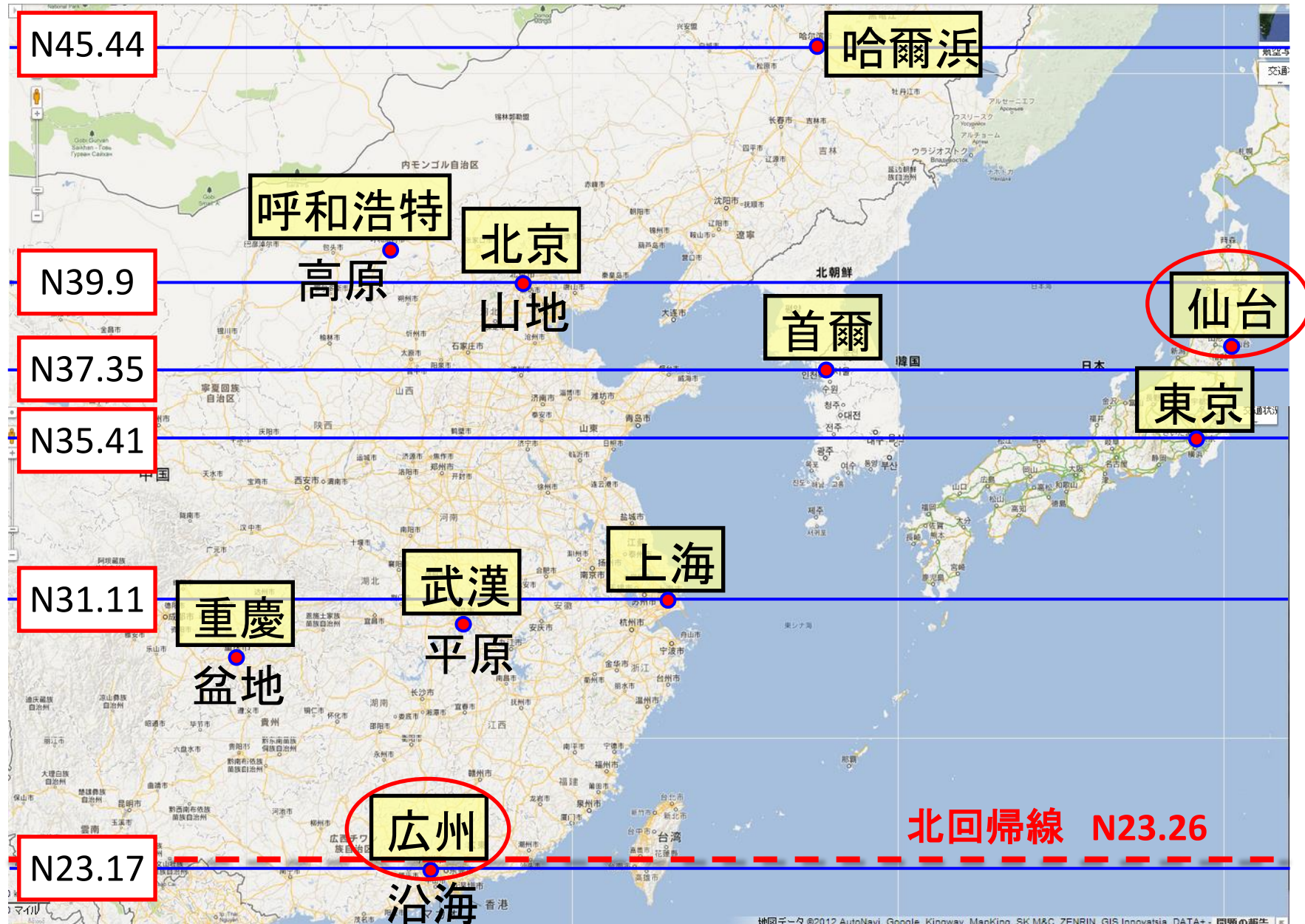
D=50m

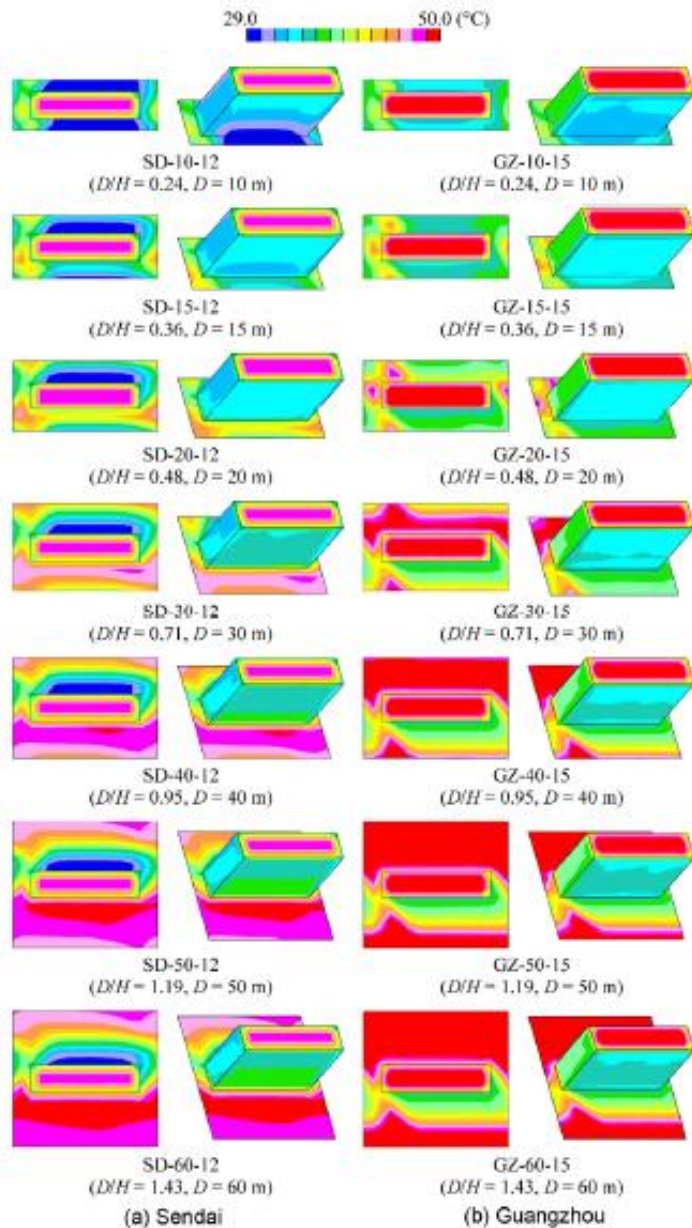


D/H=1.43

D=60m

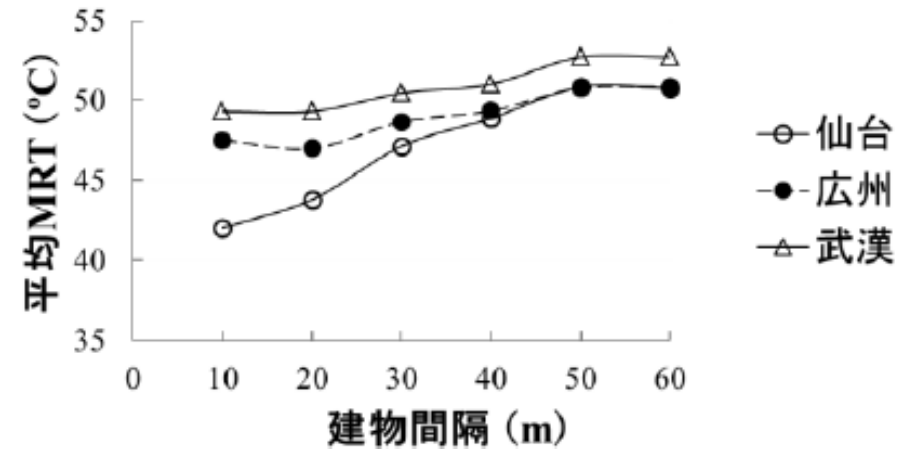
Candidates of cities for our parametric studies (different latitude, coastal⇒inland)





表面温度の分布(仙台と広州)

仙台の場合、隣棟間隔の減少に伴ってMRTは単調に減少し、温熱環境が改善されるのに対して、武漢と広州の場合は、隣棟間隔の減少による温熱環境改善をあまり期待できない。



広州、武漢と仙台の平均MRT (6/21 12:00真太陽時)

Yingli Xuan, Guang Yang, Qiong Li, Akashi Mochi da, Outdoor thermal environment for different urban forms under summer conditions, Building Simulation, 9(3), (2016), 281-296

楊光, 玄英麗, 持田 灯, 建物配置と周辺の風環境と温熱環境の関係の分析—広州、武漢と仙台における緯度の相違による建物周辺環境の変化—, 第23回風工学シンポジウム論文集, (2014), 67-72

華南理工大学再訪(2023.11)

Sino Japanese Symposium on Urban Thermal Environment

中日城市热环境研讨会



Date	Content		Department	Time
11月7日 7th of Nov (14:30pm -17:00pm)	开幕式 OPENING CEREMONY	孟庆林 Meng Qinglin	华南理工大学 South China University of Technology	14:30 pm 14:40 pm
	夏热冬冷地区建筑室内外人体热舒适研究 Research on Indoor and Outdoor Human Thermal Comfort in Hot-summer and Cold-winter Areas	周曾 Zhou Zeng	武汉大学 Wuhan University	14:40 pm 14:55 pm
	基于局地气候分区的广州城市热岛研究 Urban heat island studies in Guangzhou based on local climate zones	陈光 Chen Guang	广东工业大学 Guangdong University of Technology	14:55 pm 15:10 pm
	我的故乡-临沂 My Hometown - Linyi	王云霄 Wang Yunxiao	临沂大学 Linyi University	15:10 pm 15:25 pm
	WUT 可持续建成环境研究组课题进展报告 Introduction to the Sustainable Built Environment Research Group of WUT	周希霖 Zhou Xilin	武汉理工大学 Wuhan University of Technology	15:25 pm 15:40 pm
	极端热浪事件下传统沿街檐廊的居民和游客的热风险评估 Assessing the thermal risks for residents and visitors in traditional Street-facing Dwellings with Eaves Gallery during an extreme	晏舒婷 Yan Shuting	武汉工程大学 Wuhan Institute of Technology	15:40 pm 15:55 pm
	东北大学到湖南大学 From Tohoku to Hunan	谢育全 Xie Yuquan	湖南大学 Hunan University	15:55 pm 16:10 pm
	东京和上海各 LCZ 建成区类型的土地覆盖和城市形态特征 对地表温度的影响 Influence of land cover and urban morphological properties of each LCZ built type on land surface temperature in Tokyo and Shanghai	王正 Wang Zheng	河北工业大学 Hebei University of Technology	16:10 pm 16:25 pm
	华南理工大学城市热环境研究的部分工作进展 Part of the progress of urban thermal environment research at South China University of Technology	李琼 Li Qiong	华南理工大学 South China University of Technology	16:25 pm 16:40 pm
	总结 SUMMARY	Akashi Mochida	日本东北大学 Tohoku University	16:40 pm 17:00 pm
会议主持: 赵立华(华南理工大学)、席天宇(东北大学) Moderator: Zhao Lihua (South China University of Technology)、Xi Tianyu (Northeastern University)				

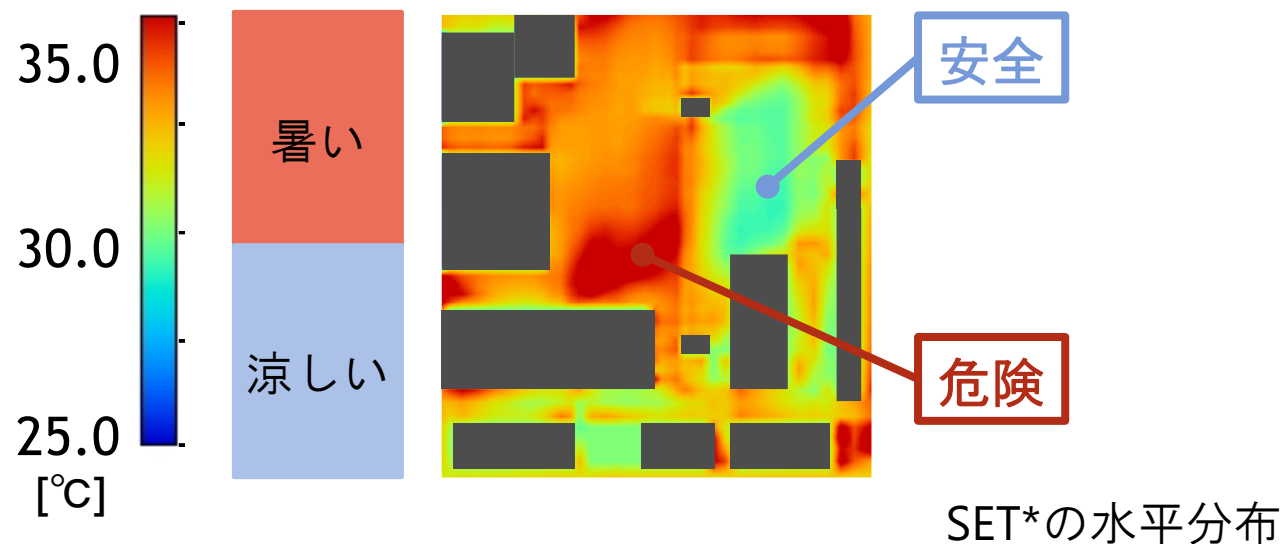
4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

- （１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発
- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発
- （４）メソスケールの研究の進捗
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価
- （７）広州、武漢を対象とした研究

<2010年代半ば以降>

- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発
- （10）市街地風環境の制御
- （11）若干、手を付けた今後の課題

この時点(2015年頃) までの我々の屋外温熱環境評価の方法

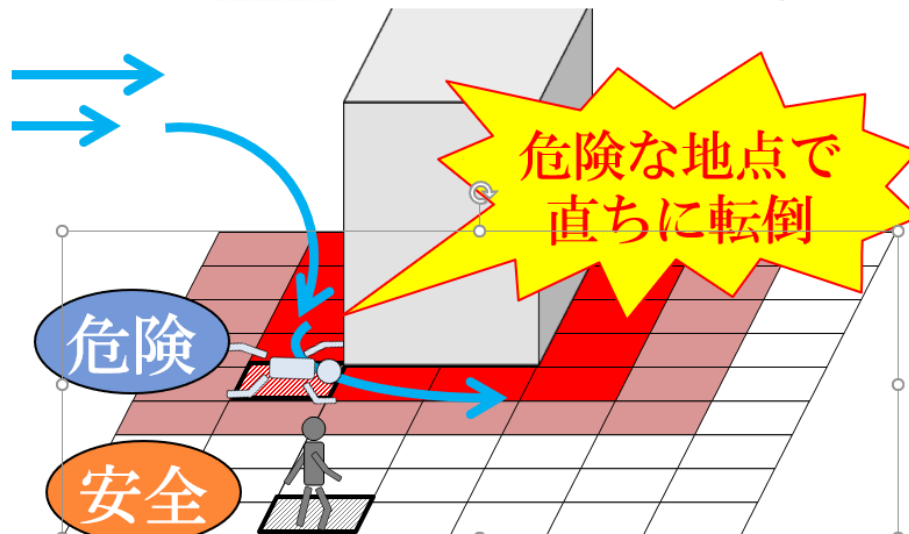


- ここまで示してきた我々の屋外温熱環境評価の方法は、各ポイントの体感温度（SET*やWBGT）の大小から、その場所が危険か安全か、或いは、不快か快適かを判断するものであった。

ビル風による強風被害と暑さによる健康被害の違い

- しかし、ビル風の場合、強風により直ちに、その場で、人が転倒するのに対して、暑い場所を通過した歩行者が直ちに、その場で、熱中症になる訳ではない。
- 従って、街路空間の温熱環境（危険・安全、快適・不快）は、“歩行者が歩行経路に沿って蓄積される熱負荷”に基づき評価するのが適当であると考えようになった。

その場のHazard（強風）が直ちに影響



猛暑被害: Hazardの蓄積による被害



持田研の屋外空間における人体温熱生理の研究

登内隆宏君の修士論文（2010年度）「屋外空間における人体温熱生理と快適性の研究 ―日射の影響下の非定常環境における 2 node modelの適用性を中心として―」（弓野さんの卒業論文もこのテーマ）⇒登内君が持田研での先駆者

⇒日向と緑陰に滞在する被験者が対象

長谷川拓真君の修士論文（2016年度）「熱中症発症リスクに関わる歩行者の生理量の予測手法の開発とこれに基づくクールスポットの配置計画」

⇒長谷川君の研究から（空間を移動する）歩行者に着目

大場優作君の修士論文（2019年度）「歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく街路空間における温熱快適性・熱中症リスクの評価」

⇒長谷川君の研究を継承し、人体生理量の予測精度を改善

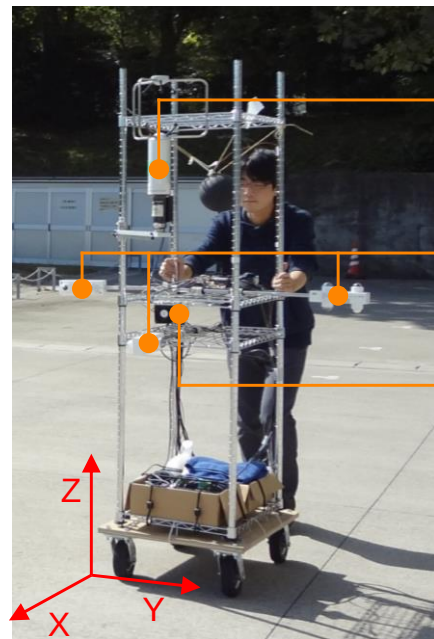
2016年度の測定概要（長谷川君の修論）

測定方法:

環境条件 : 測定機器を取り付けたカート

人体生理量 : 被験者に測定センサーを取り付け

⇒これにより被験者の**生理量**と**周囲の環境条件**を同時に測定。

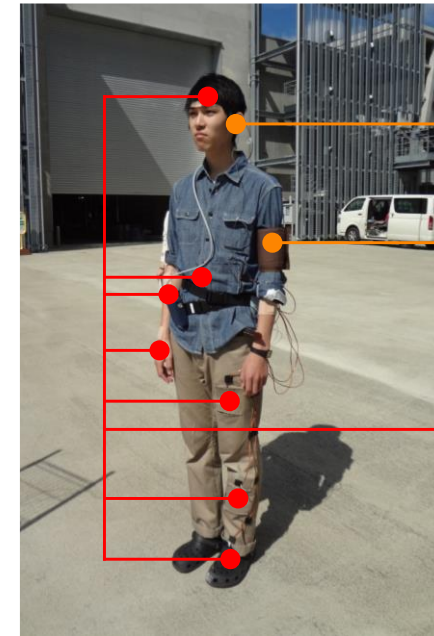


風向・風速

長短波放射量
(3方向)

気温・湿度

周囲の環境条件を測定するためのカート



深部温度
(鼓膜温度)

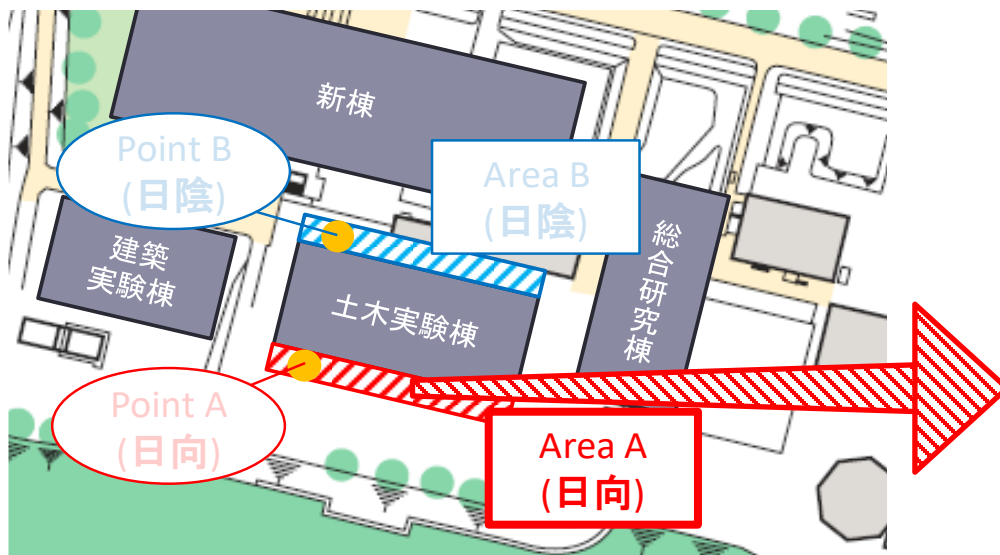
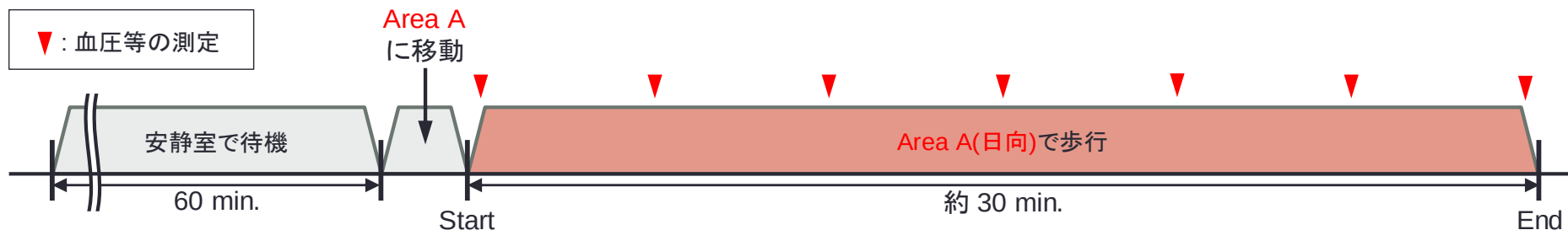
血圧・心拍数

皮膚表面温度
(額、腕、手の甲、
腹部、太股、すね、
足の甲)

人体生理量を測定するための衣服

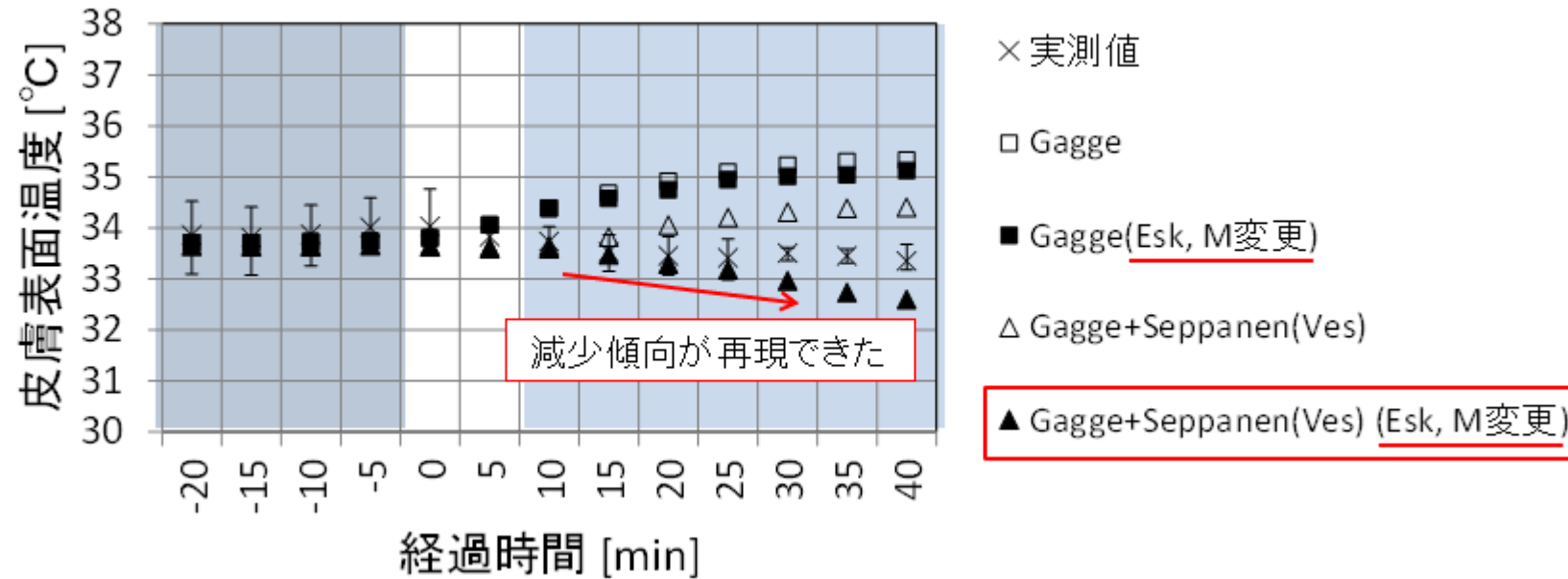
Case 4 (日向で30分歩行)

— Area A(日向)において30分間歩行



測定結果との比較に基づく2NMによる人体生理量の 予測精度の改善(大場君の修論)

- 人体表面の対流熱伝達率の与え方、発汗モデル(E_{sk})と代謝による産熱量(M)に変更を加えることに、皮膚表面温度の予測精度が大幅に改善。



皮膚表面温度の実測値と予測値 (2015年の日向歩行時の皮膚表面温度の例)

大場優作, 石田泰之, 長谷川拓真, 後藤伴延, 持田灯, 歩行者が経験する熱負荷の蓄積に関する研究 (その1): 夏期の屋外における立位静止時及び歩行時の物理環境と人体生理量の同時計測 [日本建築学会環境系論文集, 86 (781), (2021), 259-269]

人体に蓄積される熱負荷に基づく評価の例

歩行者空間において、各種の暑さ化対策が歩行する人体に蓄積される熱負荷に及ぼす影響を定量的に分析。

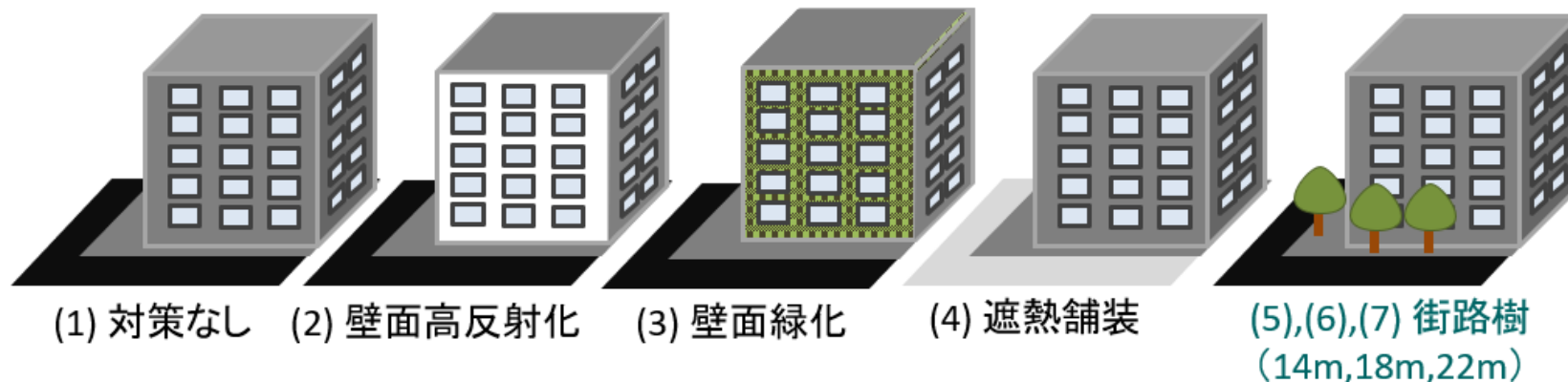
⇒あと一息
今後の研究に期待。

解析対象街区：東京の新橋

解析日時： 2011年8月8日

・2010～2019年の月の東京管区気象台の気象データ夏期の典型的晴天日として選定

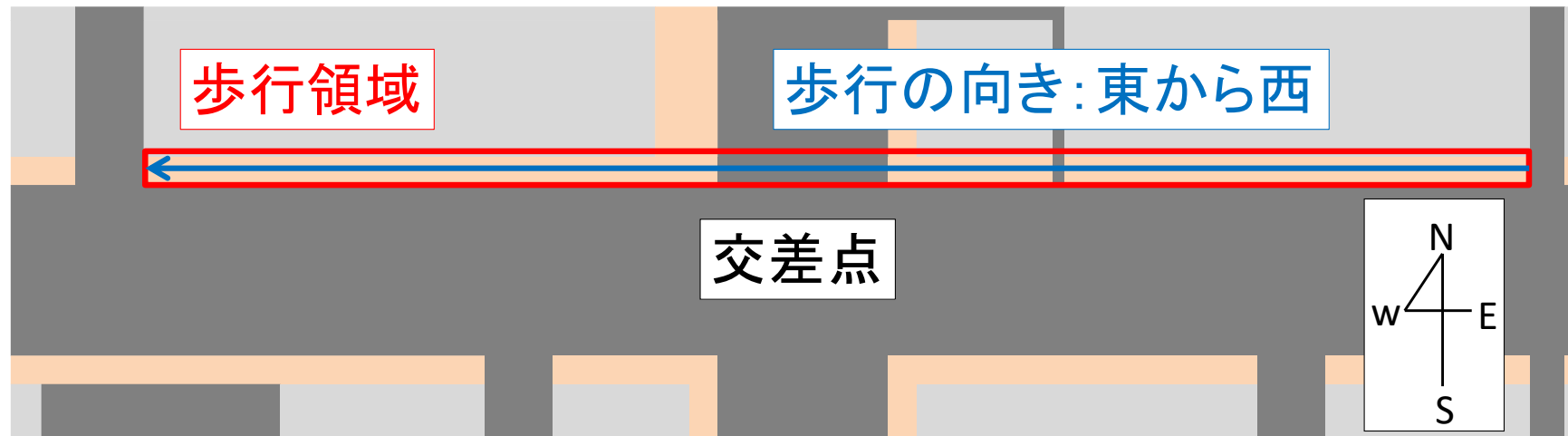
解析ケース：計7ケースの解析を実施



橋本悠実さんの修士論文(2022年度)「蒸散量予測モデルの検証及び地球温暖化緩和・ヒートアイランド現象緩和・都市の暑熱化への適応の観点からの街路空間の暑さ対策効果の定量化」の一部

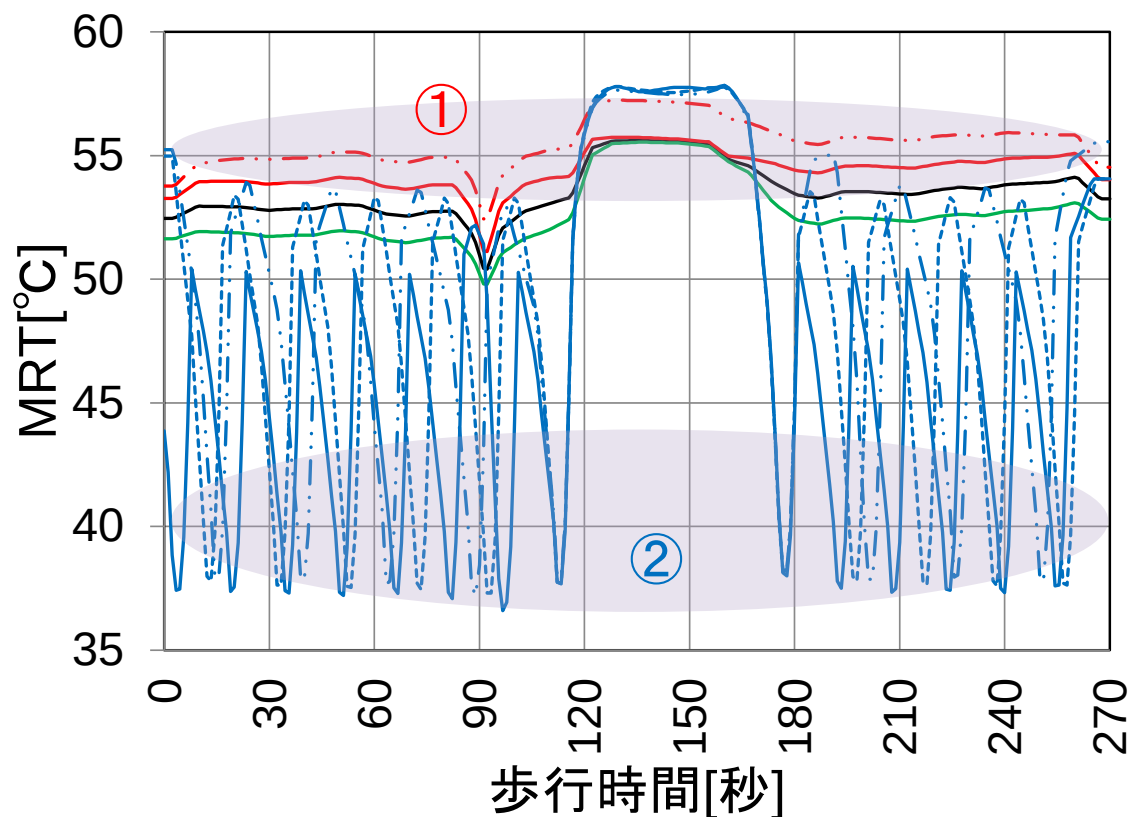
歩行経路の設定

- 下図の赤枠内の壁面から1.5m離れた位置を、東から西に歩行。
- 歩行速度($u_{i,walking}$)は1.1m/sとした。
- 風速には歩行速度($u_{i,walking}$)を考慮した相対気流速度($V_{es,walking}$)を用いた。



歩行者が曝される物理環境値(MRT)

— 対策なし
— 壁面高反射化 — 壁面緑化 - - 遮熱舗装
— 街路樹14m - - 街路樹18m - · 街路樹22m

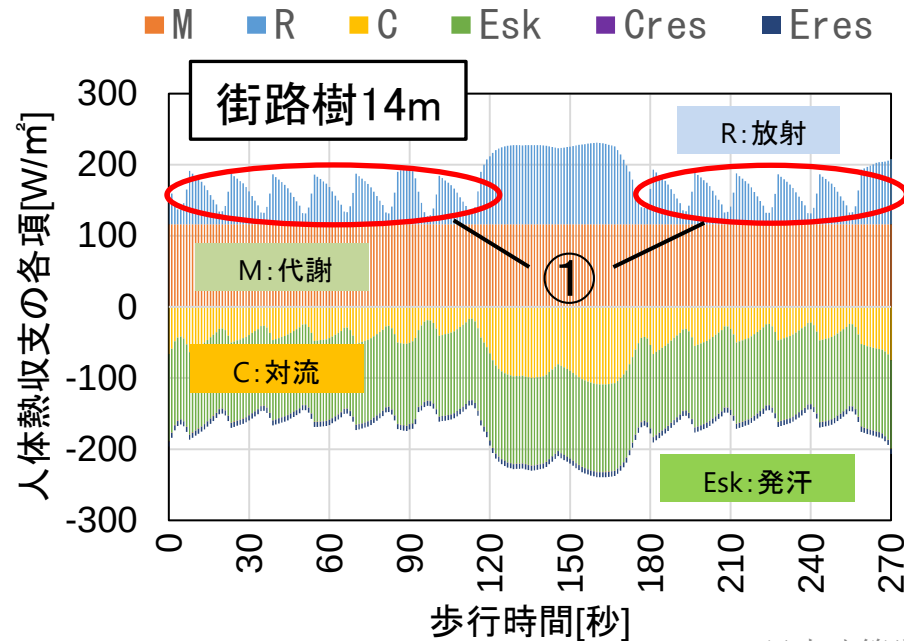
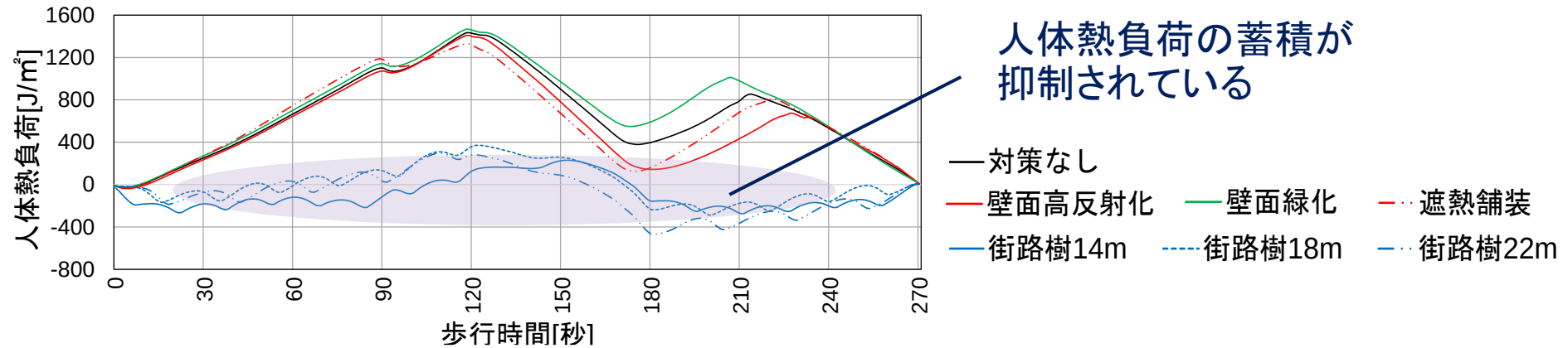


① 壁面高反射化及び遮熱舗装では、MRTは全域で高い。

② 街路樹のケースは、樹木位置でMRTが大きく低下し、配置間隔が狭いほど低くなる。

人体熱収支の経時変化

■ 街路樹14m、街路樹18m、街路樹22m



4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

- （１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発
- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発
- （４）メソスケールの研究の進捗
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価
- （７）広州、武漢を対象とした研究

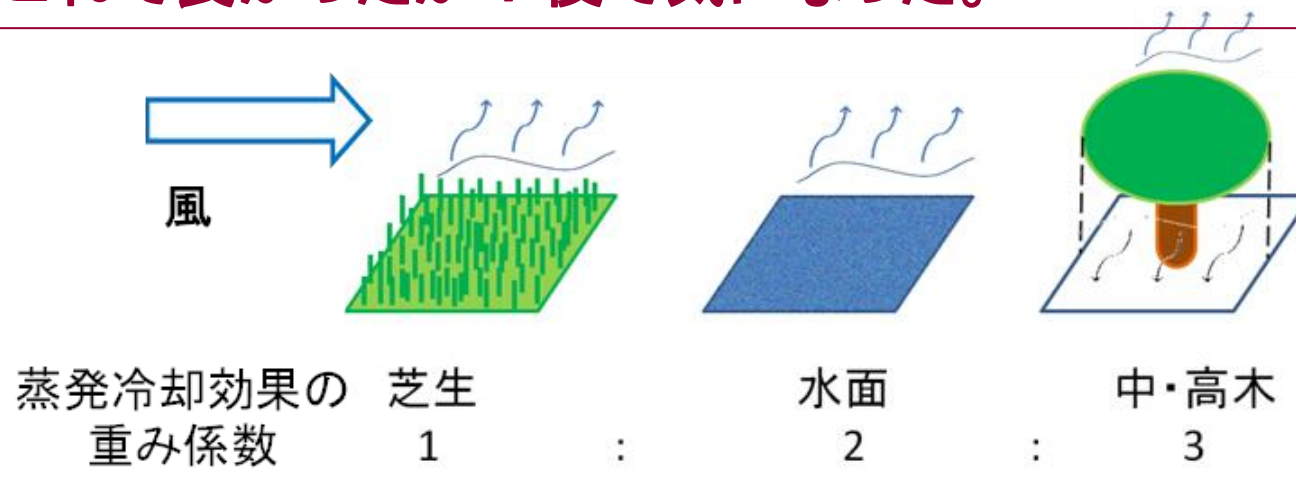
<2010年代半ば以降>

- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発（これは2013年～）
- （10）市街地風環境の制御
- （11）若干、手を付けた今後の課題

CASBEE-HI 2010年改定の際の中高木からの蒸散の評価方法の変更

- CASBEE-HIの2010年の改定の際に、
「水平投影面積が芝地面積と同じ場合、中高木からの蒸散量は芝地からの蒸散量の何倍か？」が問題となった。
⇒取り敢えず3倍とした。

水平投影面積1m²の中高木は芝地3m²分に相当するとして緑地率を算定することとした⇒これで良かったか？後で気になった。



CASBEE-HI: 建築設計に係るヒートアイランド対策の効果の評価ツール。

https://jsbc.or.jp/research-study/casbee/tools/cas69_hi.html

蒸散量の長期測定(都市緑化機構の手代木純氏との共同研究)

実測期間:2013年3月(林縁部ケヤキ設置 2013年12月)～2015年8月

実測サイト:千葉県袖ヶ浦市(株)富士植木の圃場

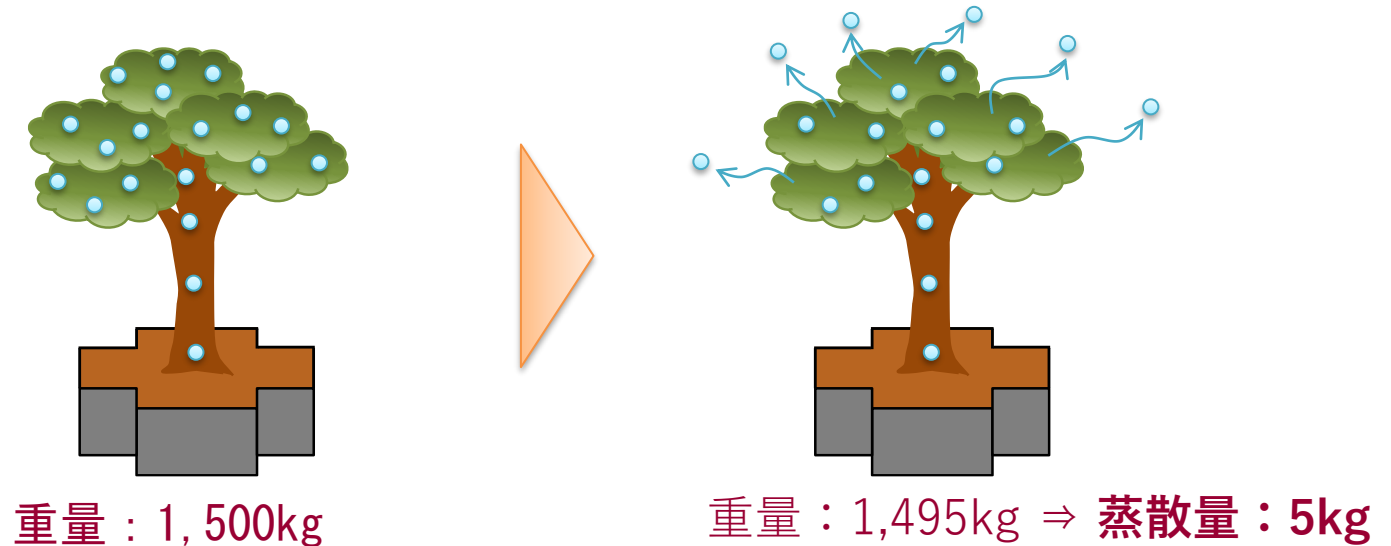


重量変化(ライシメータ法)による蒸散量の計測

「試験体の重量変化＝樹木からの蒸散量」と仮定

(重量変化と周辺の気象条件を

2013年3月～2015年8月の長期間計測)

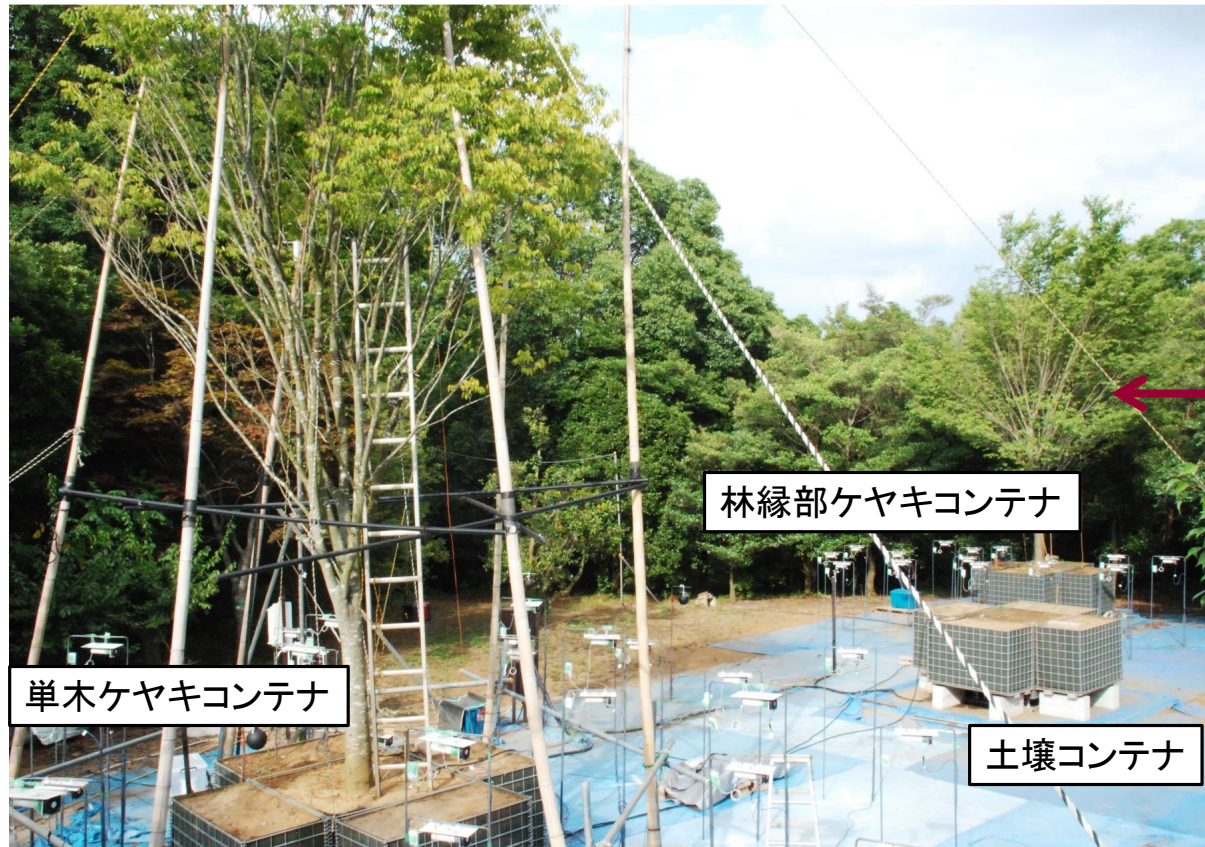


Teshirogi, Ishida, Mochida: Study on long-term measurement of transpiration from multiple urban vegetation for grasping latent heat consumption under various conditions, Urban Climate, 33, 100635, 2020

蒸散量の長期測定(都市緑化機構の手代木純氏との共同研究))

実測期間:2013年3月 (林縁部ケヤキ設置 2013年12月) ~ 2015年8月

実測サイト:千葉県袖ケ浦市 (株)富士植木の圃場



実際の市街地に植樹される街路樹に近いと考える。

気象条件による変動が大きいですが、**樹木の蒸散量が芝生の蒸散量の3倍**というのは悪くない仮定であったという評価。

単木ケヤキコンテナに対し、土のみを充填させた土壌コンテナと、
周囲の樹木に日射を遮られる時間帯のある林縁部ケヤキコンテナを設置。

鹿島学術振興財団・2012年度研究助成

「樹林密度の差が蒸散効果に及ぼす影響の計測と分析によるCASBEE-HI等のアセスメントシステムの改善」

国土交通省先導的都市環境形成促進事業費補助金（先進緑化技術開発支援）

「樹木の温熱環境改善ポテンシャルの把握による屋外温熱環境設計手法の技術開発」

（2013年4月 - 2015年3月）

科研基盤研究(B)

「アーバン・クール・スポットを創出する都市樹木の最適な樹冠形状の効果検証（代表：手代木純）」
2015年4月 - 2018年3月

大林財団・2020年度研究助成

「歩行者空間等の温熱環境制御の基礎となる樹冠内蒸散量分布の詳細測定」
等の助成を得て共同研究を継続。

●2020年度に手代木さんが学位取得

「都市の温熱環境評価のためのライシメータ法による緑化樹木の蒸散特性の研究」

ケヤキを対象とする蒸散量測定に基づく典型的な夏期晴天日における蒸散量予測を 目的とした気孔コンダクタンスモデルのモデルパラメータ同定

● 蒸発と蒸散の違い

蒸発

液体の表面から気化が起きる物理現象。駆動力は飽差。

$\text{飽差} = (\text{飽和水蒸気量}) - (\text{その時の空気中に含まれている水蒸気量})$

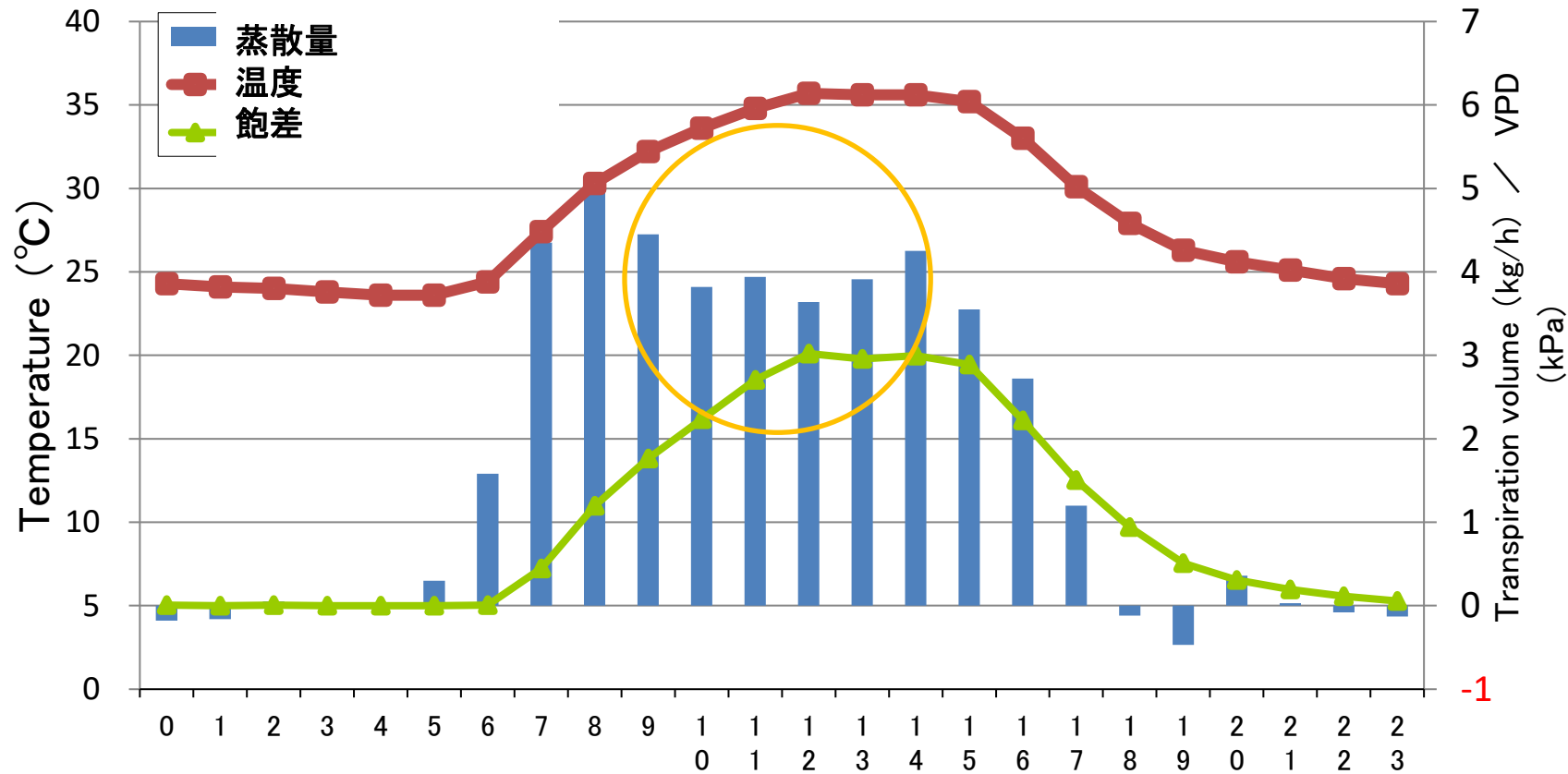
⇒ その時の空気に後どれくらい水蒸気が含まれる余地があるか？

蒸散

植物の地上部から大気中へ水蒸気が放出される現象。

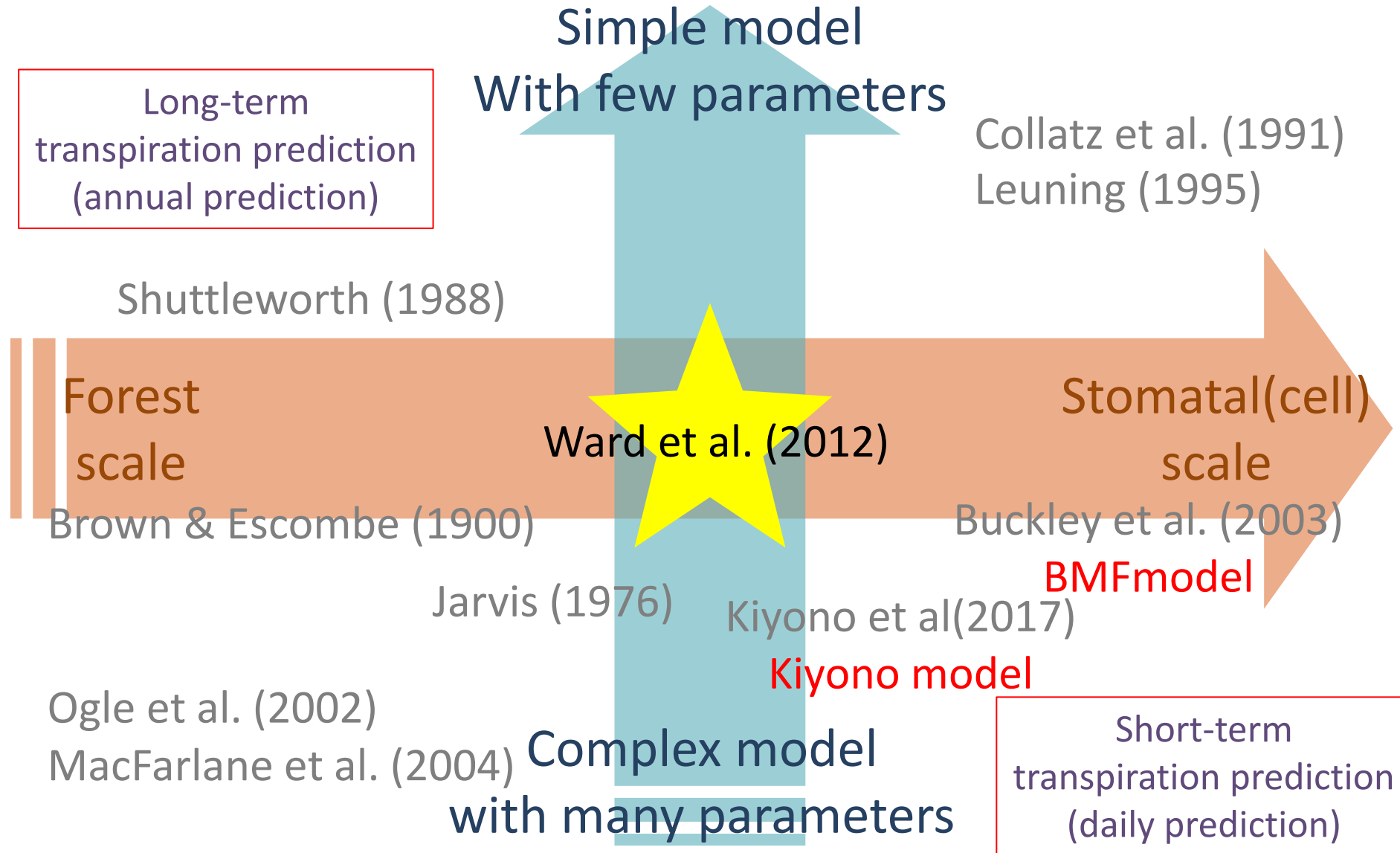
蒸発が物理的現象であるのに対して、蒸散は植物の生理反応が加わる。

温度、飽差と蒸散量の測定例



- 日中の飽差がピークを示す時間帯に蒸散量は減少する。
- 植物の生理反応(気孔の開閉)をモデルに組み込まない限り、この現象は再現できない。
- 気孔の開閉の程度を示すパラメータ⇒気孔コンダクタンス g_s

Selection of the stomatal conductance (気孔コンダクタンス) g_s model



Wardモデルの概要 3つのストレス関数

- 飽差、日射、土壌含水率により気孔コンダクタンス g_s を決めるモデル
(植物生理作用：気孔の開きやすさ)

ある基準値の g_s

$$g_s = g_{sref} \cdot f_D \cdot f_{PAR} \cdot f_\theta$$

飽差 D (湿度) に対する
ストレス

日射 PAR に対する
ストレス

土の水分量 θ に関する
ストレス

$$f_D = 1 - \lambda \ln D, \quad f_{PAR} = 1 - \alpha_1 \exp\left(\frac{-PAR}{\alpha_2}\right), \quad f_\theta = \begin{cases} \exp\left\{-0.5 \left(\frac{\theta - \alpha_4}{\alpha_3}\right)^2\right\} & \theta < \alpha_4 \\ 1 & \theta \geq \alpha_4 \end{cases}$$

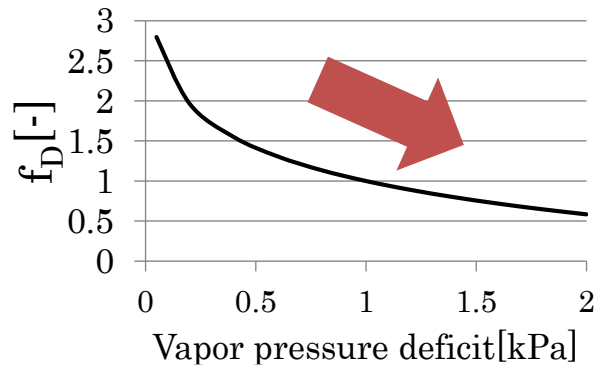
PAR：光合成有効放射量

Wardモデルの概要 3つのストレス関数

$$g_s = g_{sref} \cdot f_D \cdot f_{PAR} \cdot f_\theta$$

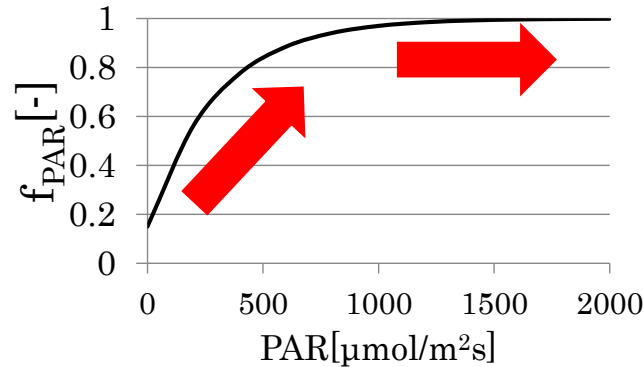
$$f_D = 1 - \lambda \ln D, \quad f_{PAR} = 1 - \alpha_1 \exp\left(\frac{-PAR}{\alpha_2}\right), \quad f_\theta = \begin{cases} \exp\left\{-0.5 \left(\frac{\theta - \alpha_4}{\alpha_3}\right)^2\right\} & \theta < \alpha_4 \\ 1 & \theta \geq \alpha_4 \end{cases}$$

飽差 D (湿度)に対する
ストレス



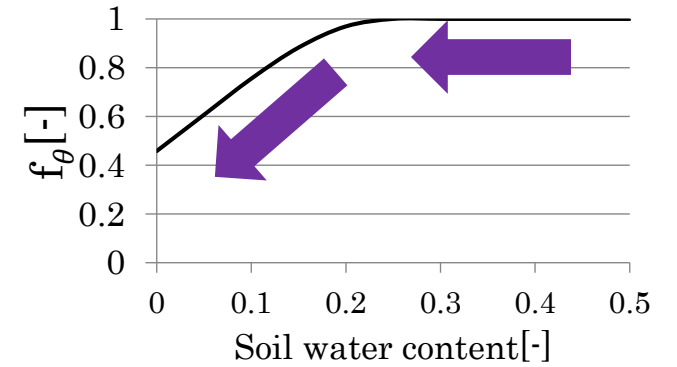
乾燥が進むと
気孔を閉じる

日射 PAR に対する
ストレス



日射が強くなっても
必要以上に気孔を開かない

土の水分量 θ に関する
ストレス



土の水分が減ると
気孔を閉じる

モデルパラメータの同定

Penman-Monteith法

$$LE_P = (\Omega LE_{eq} + (1 - \Omega) LE_i) \times A_p$$

$$LE_{eq} = \frac{s}{s + \gamma} (R_n - G)$$

$$LE_i = \frac{\rho c_p g_s D}{\gamma}$$

$$\Omega = \frac{s + \gamma}{s + \gamma(1 + g_{bl}/g_s)}$$

Wardモデル

$$g_s = g_{sref} \cdot f_D \cdot f_{PAR} \cdot f_\theta$$

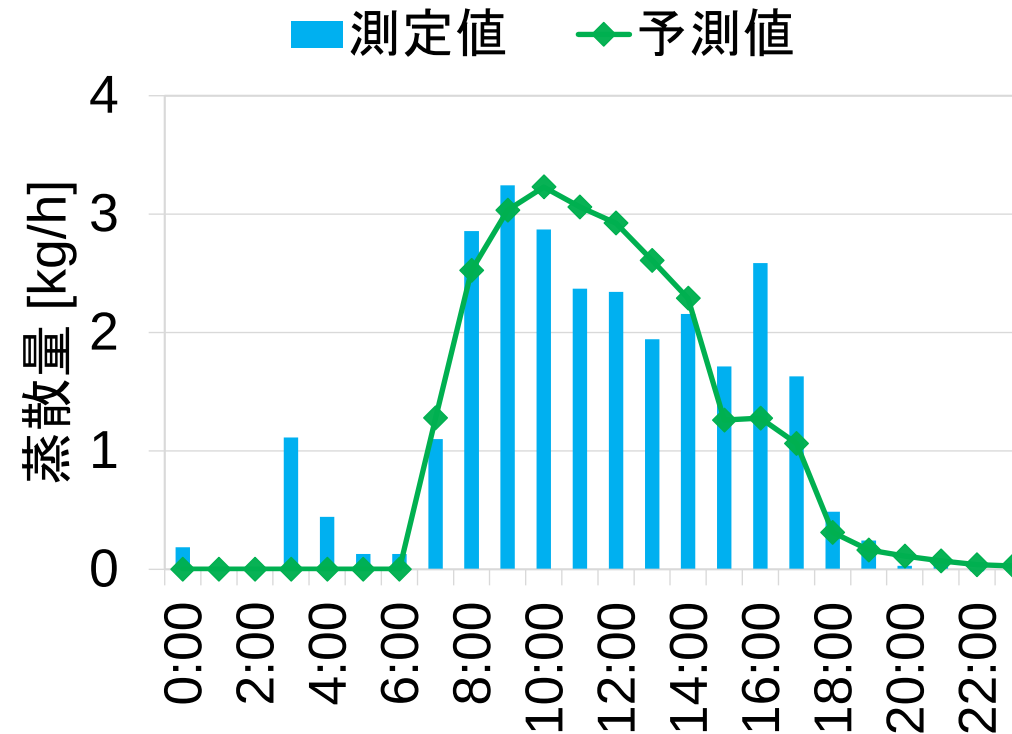
$$f_D = 1 - \lambda \ln D$$

$$f_{PAR} = 1 - \alpha_1 \exp\left(\frac{-PAR}{\alpha_2}\right)$$

$$f_\theta = \begin{cases} \exp\left\{-0.5 \left(\frac{\theta - \alpha_4}{\alpha_3}\right)^2\right\} & \theta < \alpha_4 \\ 1 & \theta \geq \alpha_4 \end{cases}$$

$$\Rightarrow g_{sref} = 100, \lambda = 0.6, \alpha_1 = 0.9, \alpha_2 = 300, \alpha_3 = 0.4, \alpha_4 = 0.2$$

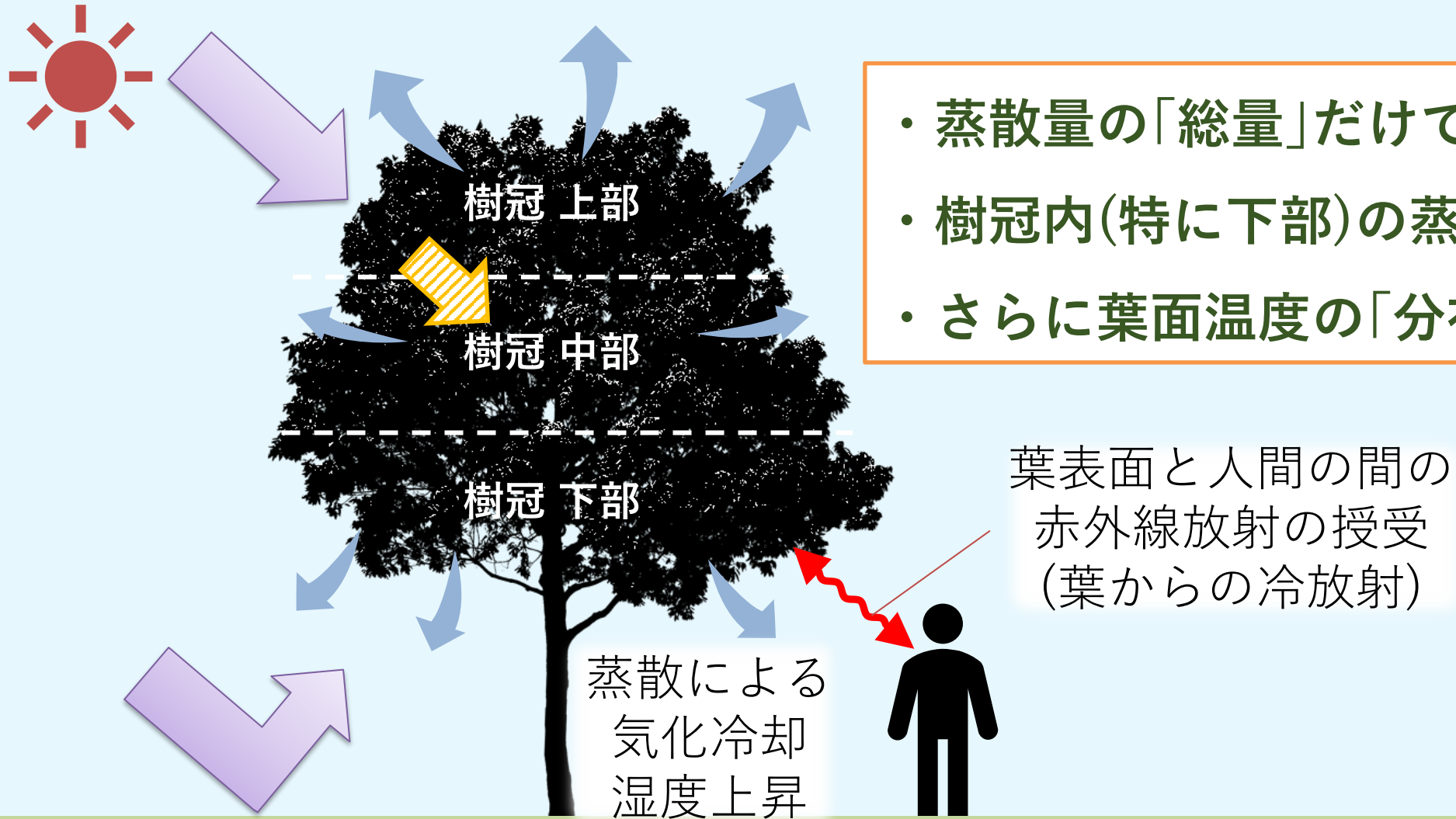
蒸散量測定値とPM+Wardモデルによる予測値との比較



気孔開閉に関
する樹木の気持
ちが、少し分
かってきた！

小林炎, 石田泰之, 本間実季, 石津光, 手代木 純, 持田灯, ケヤキを対象とする蒸散量測定に基づく典型的な夏期晴天日における蒸散量予測を目的とした気孔コンダクタンスモデルのモデルパラメータ同定, 日本建築学会環境系論文集, 86 (782), (2021), 377-387

蒸散による樹冠下の人間への影響



- ・ 蒸散量の「総量」だけではなく、
- ・ 樹冠内(特に下部)の蒸散量の「分布」、
- ・ さらに葉面温度の「分布」の予測が重要！

樹冠内の蒸散量及び葉温の実測調査(2016年)

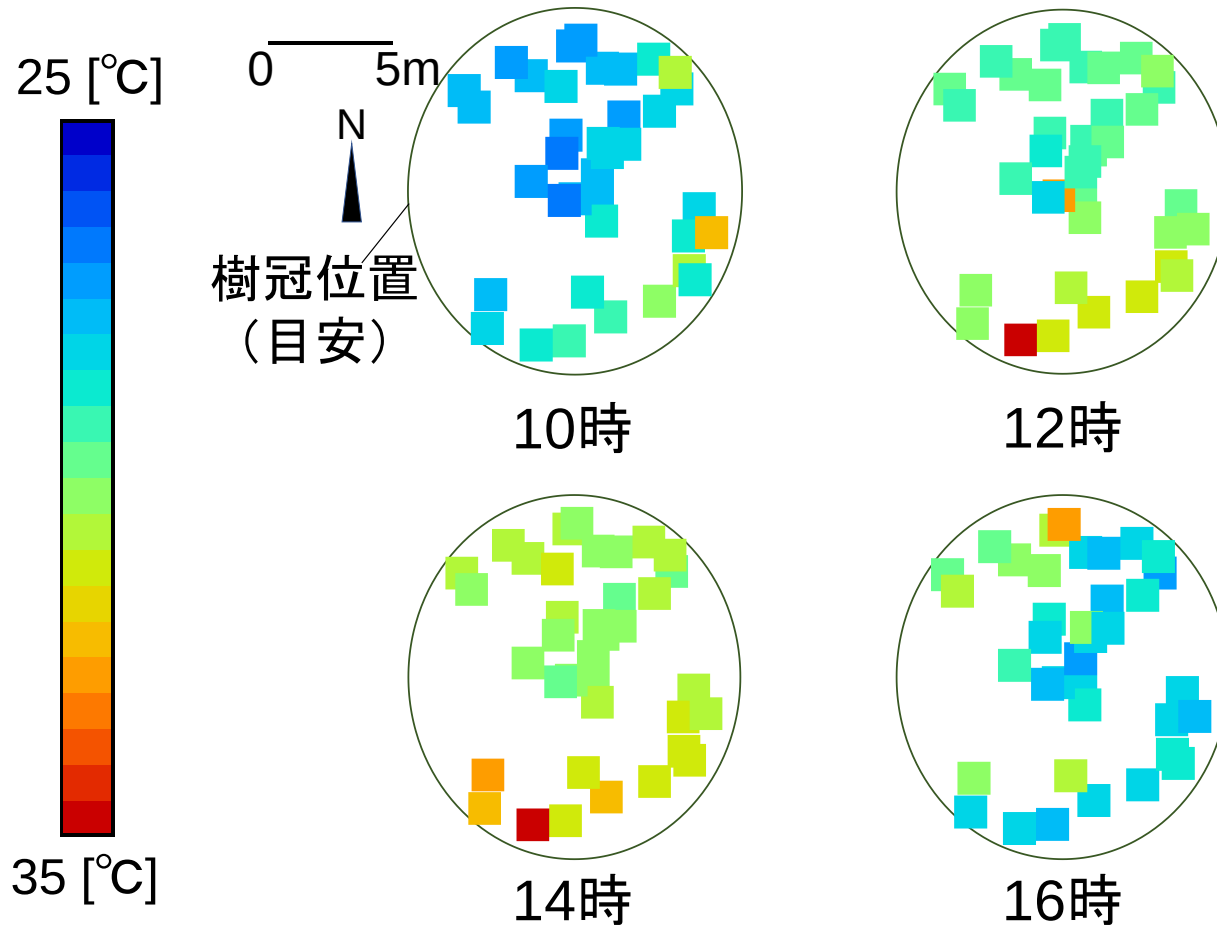


樹冠「下部」葉温の空間分布の実測調査(2022年)

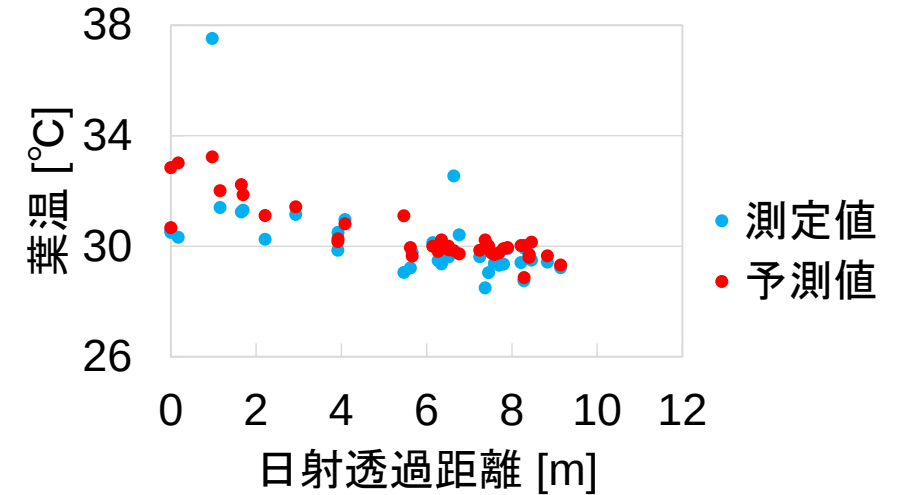
- ・ 熱電対を用いた葉温を計測。
- ・ ドローンを利用した計測。



樹冠「下部」葉温の空間分布



測定結果



葉温の測定結果とモデルによる
予測結果の比較(13時)

橋本悠実さんの修論(2022)
出牛すすかさんの卒論
(2022)

樹木の蒸散モデルに係る修論・卒論

本間実季さんの修論(2018)「列植樹木の樹冠形状、配置間隔が歩行者空間の温熱快適性に及ぼす影響の分析と樹木モデルの改良」の一部

⇒長年手を付けられずにいた植物生理に踏みこんだ。

小林炎君の修論(2020)「蒸散モデルの改良及び都市温暖化対策のもたらす効果の将来変化の分析」の一部

⇒本間さんを引継ぎ、蒸散モデルを改良し、気孔コンダクタンスのモデルパラメータを同定した。

石津光君の修論(2021)「実大樹木の樹冠内蒸散量分布の測定及び単木樹木を対象とする蒸散量予測モデルの改良」

⇒蒸散の測定結果をさらに詳しく分析するとともに、樹冠内の蒸散量分布に踏み込んだ。

橋本悠実さんの修論(2022)「蒸散量予測モデルの検証及び地球温暖化緩和・ヒートアイランド現象緩和・都市の暑熱化への適応の観点からの街路空間の暑さ対策効果の定量化」の一部

及び出牛すずかさんの卒論(2022)「樹冠内の葉温の空間分布を予測するための気孔コンダクタンスモデルのパラメータ同定」

⇒樹冠内の葉温分布を測定し、気孔コンダクタンスのモデルパラメータを再同定した。

4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

- （１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発
- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発
- （４）メソスケールの研究の進捗
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価
- （７）広州、武漢を対象とした研究

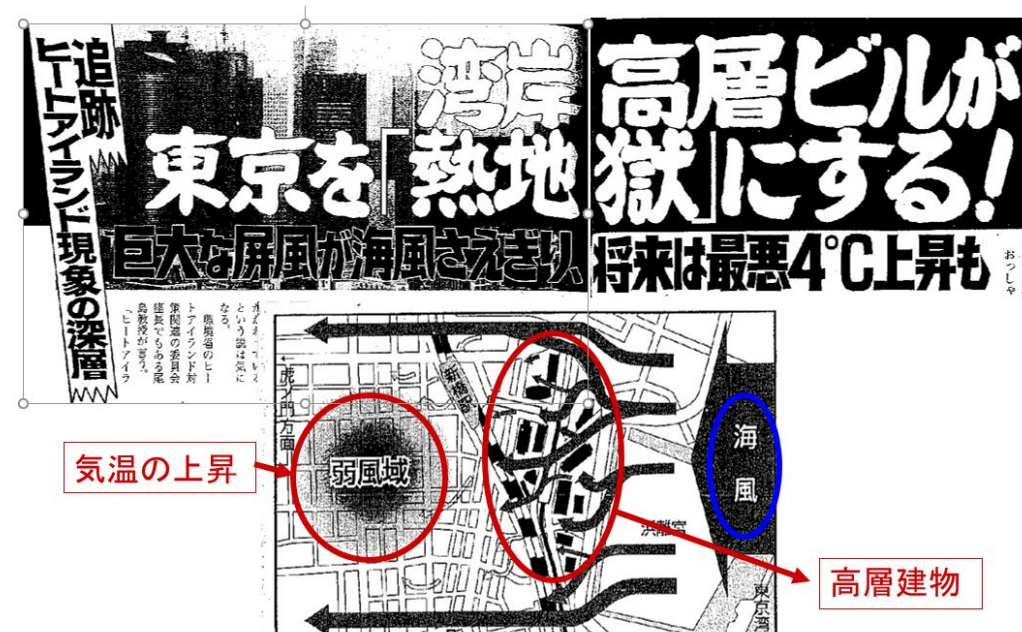
<2010年代半ば以降>

- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発
- （10）市街地風環境の制御⇒この3年間、一番力を入れていたテーマ**
- （11）若干、手を付けた今後の課題

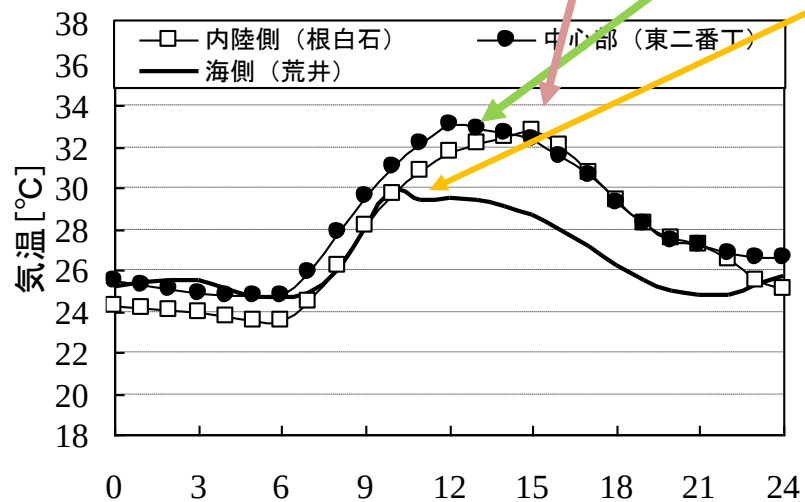
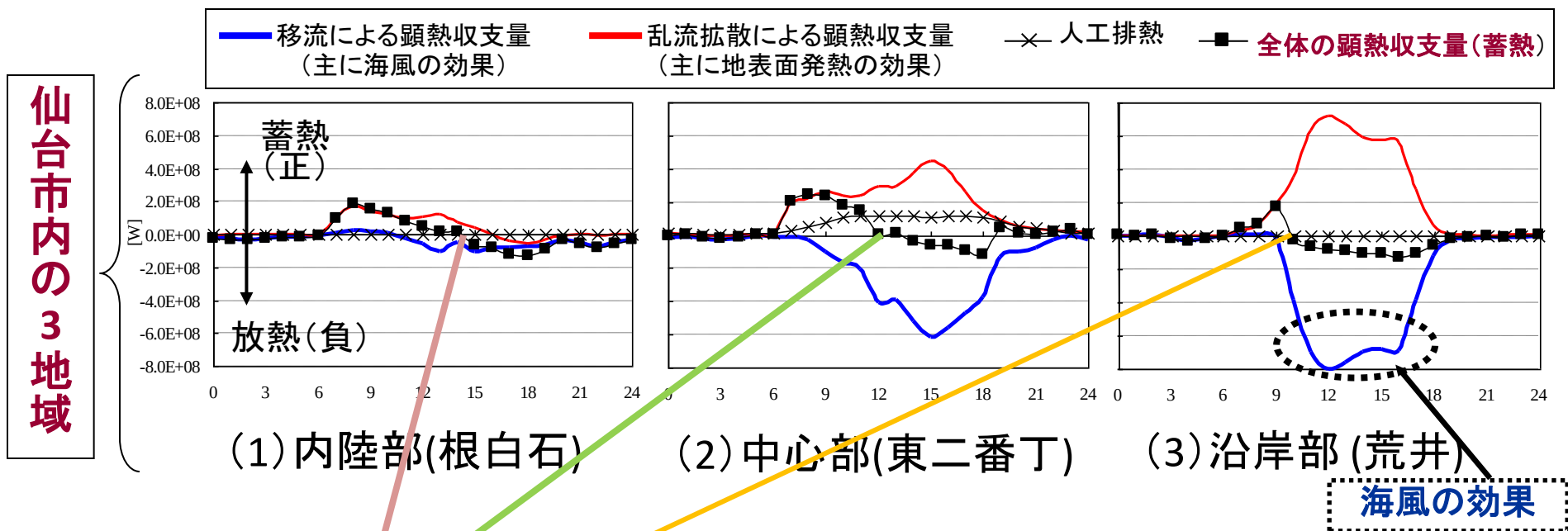
都市の暑さ対策としての都市空間の換気・通風と風の道

約20年前、小泉内閣の時に汐留に建てられた高層ビル群の影響により、海風の侵入が阻害され、風下側の市街地の気温が上昇したと指摘され、マスコミを賑わした。

⇒ヒートアイランド対策としての“風の道”が注目を集め、以来、多くの研究がなされてきた。



仙台市内の3地域における熱収支構造の比較



● 我々も海風を市街地内に呼び込めれば、大きな気温低減効果があることを指摘して来た。

⇒ 如何にして風通しの良い市街地を形成するか？

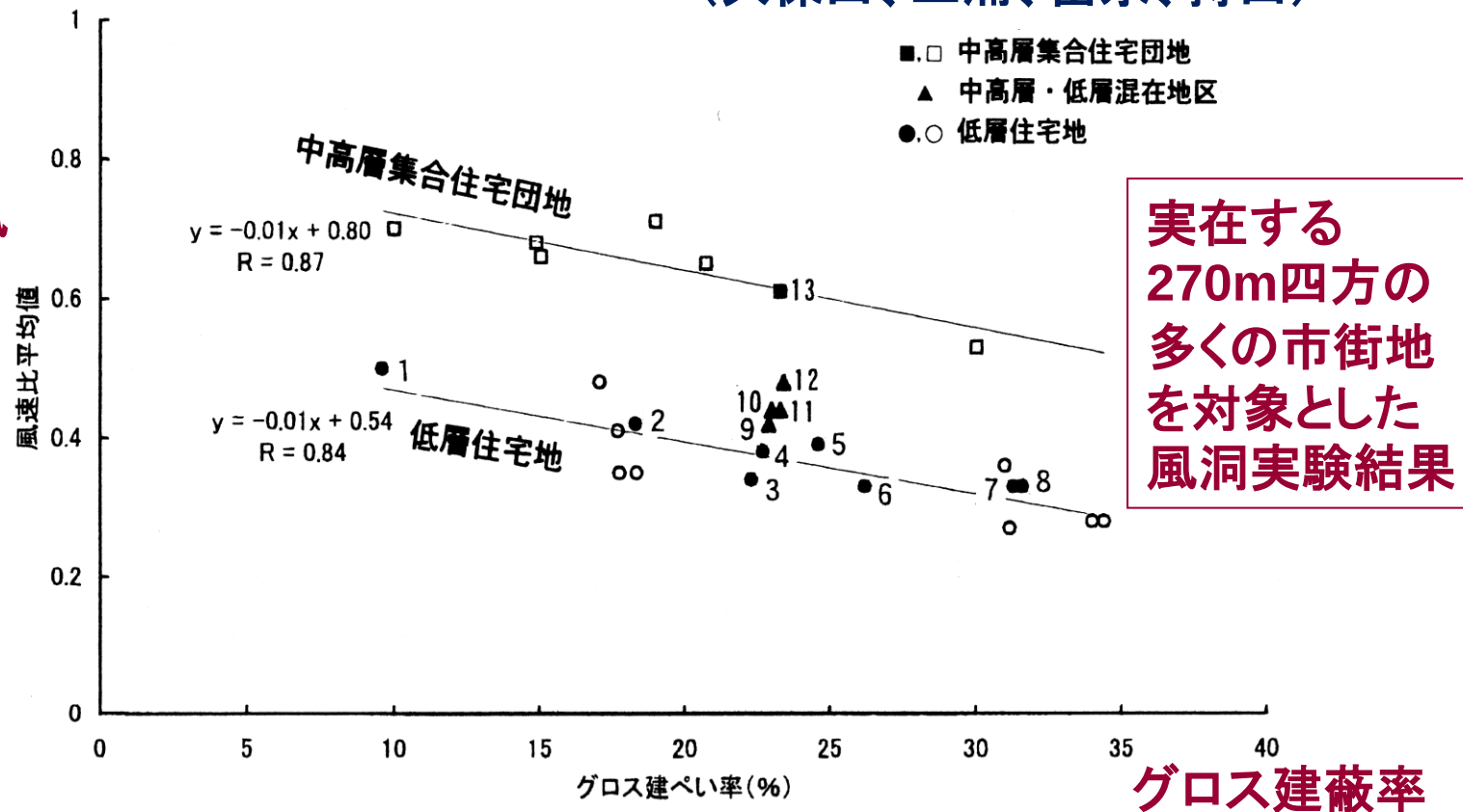
市街地のグロス建蔽率と平均的な風通し(再掲)

(久保田、三浦、富永、持田)

市街地内
の地上
1.5mの風
速比の空
間平均値

風速比平均値 =

$$\frac{\text{建物のある場合の風速の空間平均値}}{\text{建物がない場合の風速の空間平均値}}$$



同じグロス建蔽率で比べると、低層市街地より、

中高層市街地の方が地表付近の平均風速が高い⇒何故か？

⇒建物高さのバラツキ (non-uniformity of building height) の影響？

香港の高層密集市街地（旺角）を対象とした風洞実験（義江先生のグループ） ー建物高さのバリエーション等が歩行者レベルの風速に及ぼす影響ー

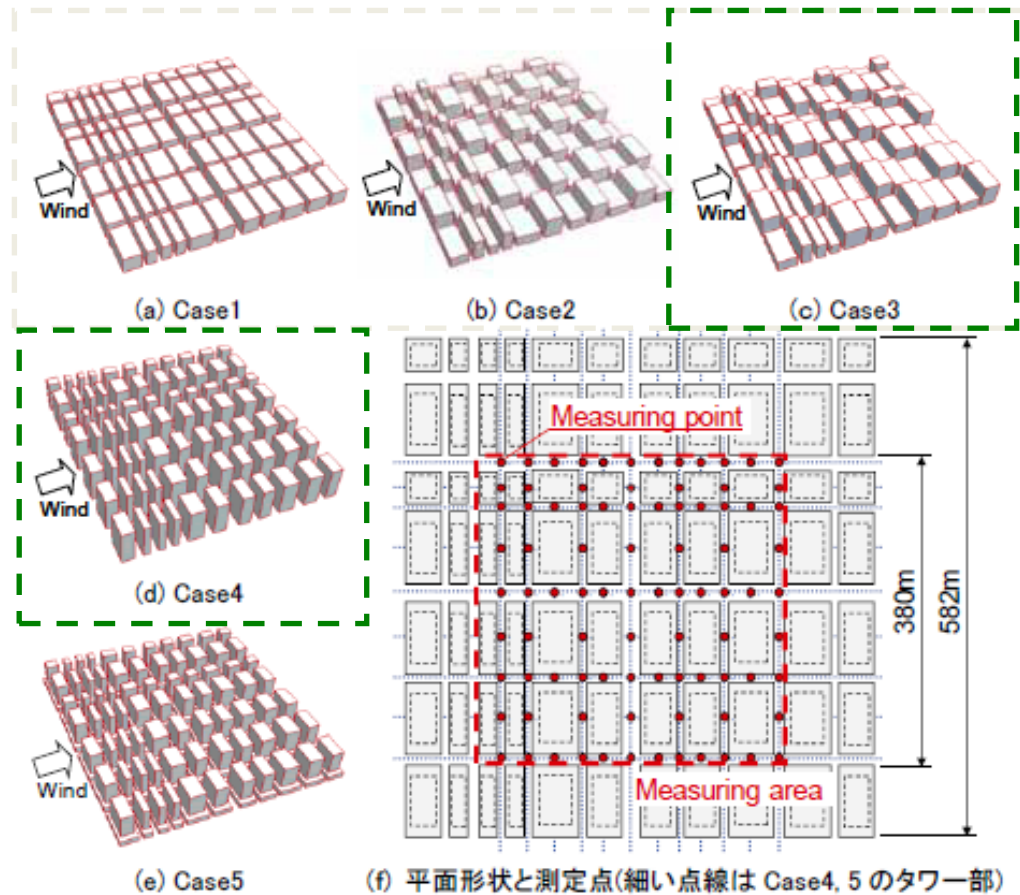


図1 実験模型と測定点

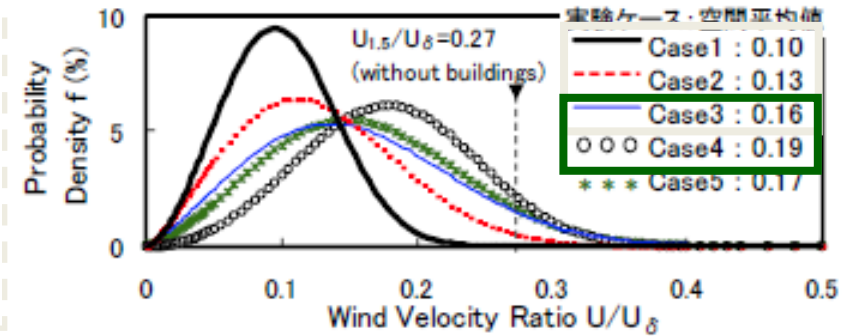


図2 風速比の確率密度分布

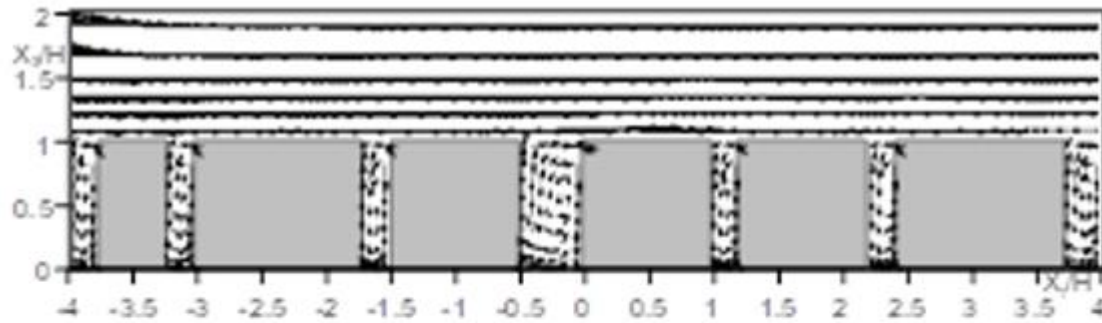
- 高さのばらつきを増すと、歩行者レベルの風速が増加することを確認。

⇒我々は、同じ対象に対してCFD解析を実施(遠藤芳信君の修士論文(2008)、石田泰之君の卒業論文(2008))

義江龍一郎、田中英之、白澤多一、小林剛、高層密集市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響、日本建築学会環境系論文集、第73巻 第627号、661-667、2008年5月

(10) 市街地風環境の制御

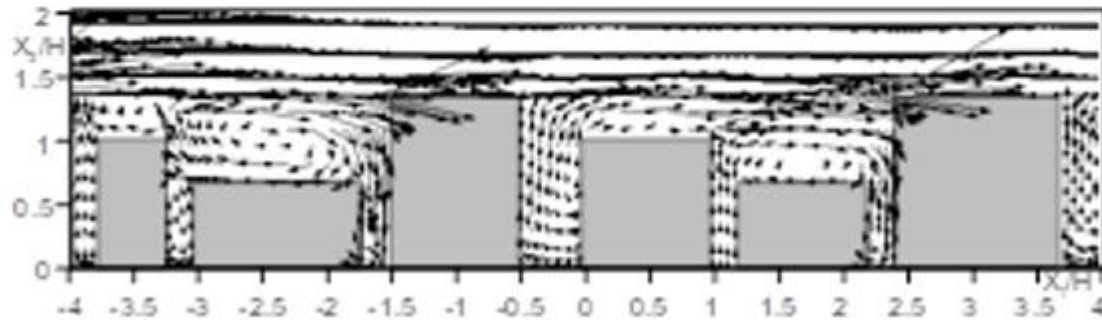
(10)-1 建物高さのバラツキと鉛直方向の風の道



(a) Case 1 (uniform)

建物高さが一様なケース

大半の上空の新鮮な空気は建物上部を通過し、地表付近に入ってこない。



(b) Case 3 (nonuniform)

建物高さにバラツキのあるケース

建物の上方と地表付近の空気交換が活発。

Yasuyuki Ishida, Yoshinobu Endo, Akashi Mochida, Large Eddy Simulation of Flow and Pressure Fields around Buildings in High Dense Cities -Effects of nonuniformity of building heights on drag force and momentum transport-, CD Proceedings of The 7th International Conference on Urban Climate (ICUC-7), (2009)

遠藤芳信君の修士論文(2008年度)「高密度市街地内の移流・拡散メカニズムと換気・通風性能に関する研究」

石田泰之君の修士論文(2010年度)「LESによる都市空間の運動エネルギー収支の詳細解析 —エネルギー散逸の総和に基づく外部環境負荷の定量評価法の提案—」⇒石田君に博士進学を勧めたのだが就職してしまう。

高野芳央君の修士論文(2013年度)「Street Canyonにおける屋根勾配の変化が気流性状に及ぼす影響の分析—RANSを用いた屋根勾配のパラメトリックスタディとLESを用いた渦構造の分析—」

⇒ETHに留学した成果

瀧澤 幸大君の修論(2017年度)「実在市街地を対象とする移流・乱流拡散性状の評価—数値表層モデルDSMを用いた市街地の再現とこれを対象とするLES解析—」

⇒実際の市街地を対象とした解析に道を拓いた。

この頃にLCZの研究も始まっていた。また、Canopyモデルの研究によって、風通し研究にも有用な知見も得られていた。

これらを踏まえて、高田一成君の修論(2019年度)「Breathabilityが高くエネルギー散逸が少ない市街地計画に関する研究—これを実現するための高層建物の建物高さに関する検討—」で石田君の修論のテーマを再開

⇒ここで、遠藤君・石田君の研究の流れが再開。

石川大君の修論(2020年度)「着目する市街地内の運動エネルギーの散逸とその風下側の市街地の風環境の関係の分析」

荻原 隆太郎 君の修論(2021年度)「Breathabilityが高く地表付近の高風速発生を抑制する市街地形態に関する研究」

大野 陽太君の修論(2023年度)「LESによる市街地形態と運動エネルギー交換量の関係の分析」

⇒この論文が、一連の風通し研究の一応の到達点。

鎌田 脩平君の修論(2022年度)「高層建物が市街地内の流れ場および周辺建物に作用する風圧力に及ぼす影響」

⇒高層建物の近隣の建物の構造被害リスクに手を付けた。

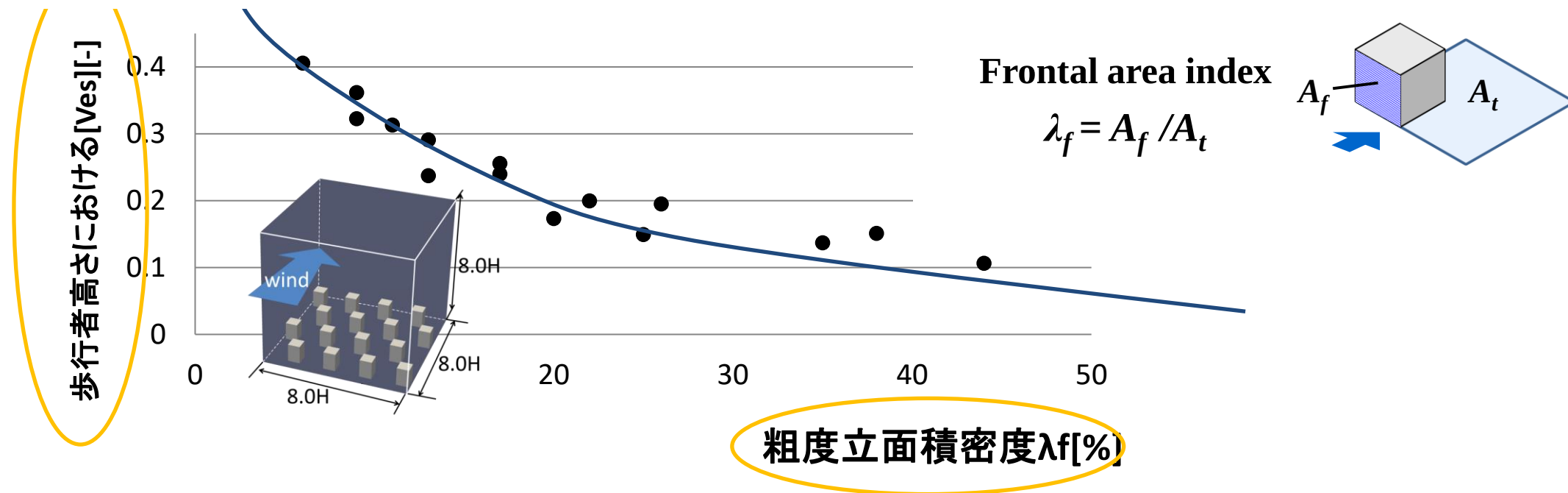
山根 優太君の修論(2023年度)「強風時に高層建物がその周囲の低層建物の風圧力に及ぼす影響に関する研究」

⇒同じく、高層建物の近隣の建物の構造被害リスクを対象に研究を進めた。

浜崎美晴さんの修士論文(2023年度)「領域気象モデルWRFによる都市上空の風速の確率密度分布に関する研究」

⇒他の研究とは違うがWRFで上空風速の確率密度分布を検討し、ワイブルパラメータの空間分布、将来変化を求めた。

単純形状でモデル化された街区（理想街区）で、建物高さが一様な場合の粗度率面積密度と V_{es} の空間平均の関係



単純形状でモデル化された街区（以後、理想街区）で、建物高さが一様な場合には、粗度立面積密度 λ_f とeffective speed V_{es} （乱れの影響も考慮した平均風速）の空間平均値には強い相関があることを確認（⇒高田一成君の卒業論文（2017年度））

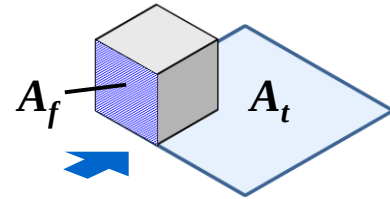
$$V_{es} = \sqrt{\langle (\langle \mathbf{u}_i \rangle + \mathbf{u}_i')^2 \rangle} = \sqrt{(\langle (\mathbf{u}_1) \rangle^2 + \langle (\mathbf{u}_2) \rangle^2 + \langle (\mathbf{u}_3) \rangle^2) + \langle (\mathbf{u}_1')^2 \rangle + \langle (\mathbf{u}_2')^2 \rangle + \langle (\mathbf{u}_3')^2 \rangle)} = \sqrt{2K + 2k}$$

市街地の平均的風通しを特徴づけるパラメーターは何か？

粗度面積率（グロス建蔽率）VS 粗度立面積率

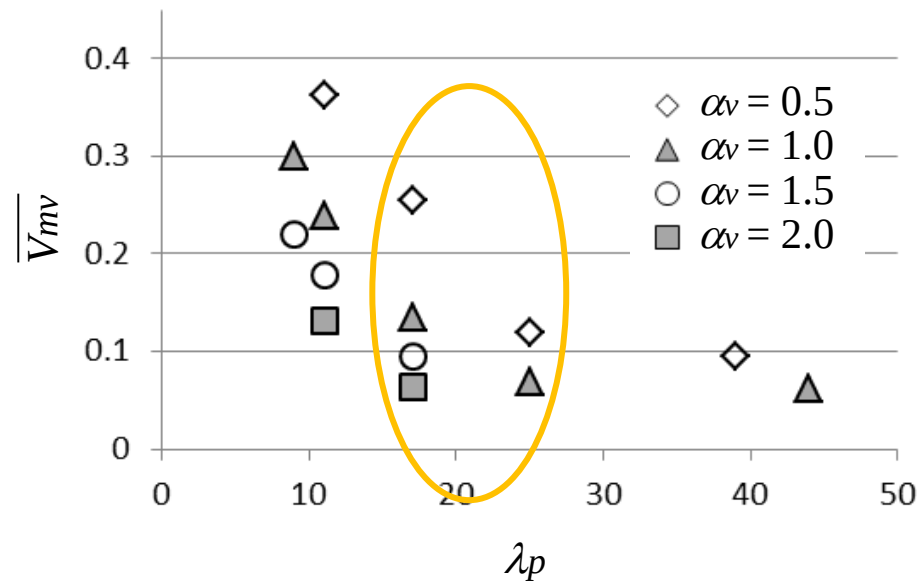
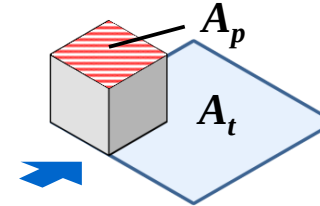
Frontal area index

$$\lambda_f = A_f / A_t$$

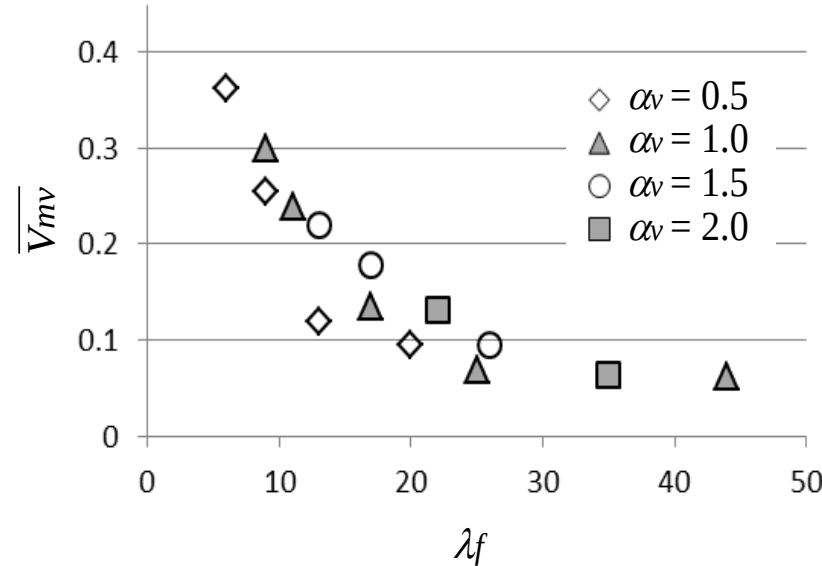


Plan area index
(Gross Coverage ratio)

$$\lambda_p = A_p / A_t$$



粗度面積率（グロス建蔽率）と歩行者高さにおける時間平均風速 (mean vector speed V_{mv}) の空間平均値 ($\overline{V_{mv}}$) の関係



粗度率面積密度の方が歩行者高さの風速の空間平均値との相関高い。

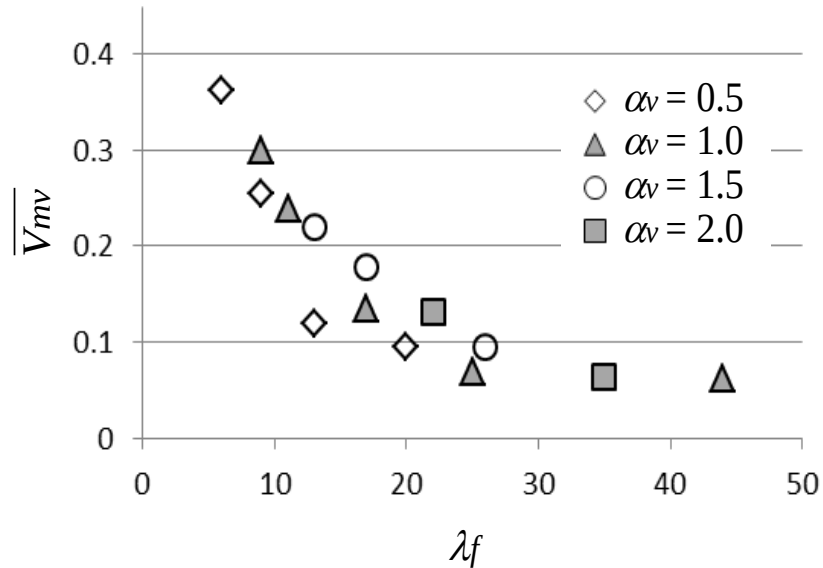
粗度率面積密度 λ_f と歩行者高さにおける時間平均風速 (mean vector speed V_{mv}) の空間平均値 ($\overline{V_{mv}}$) の関係

Mean Vector Speed V_{mv} VS Effective Speed V_{es}

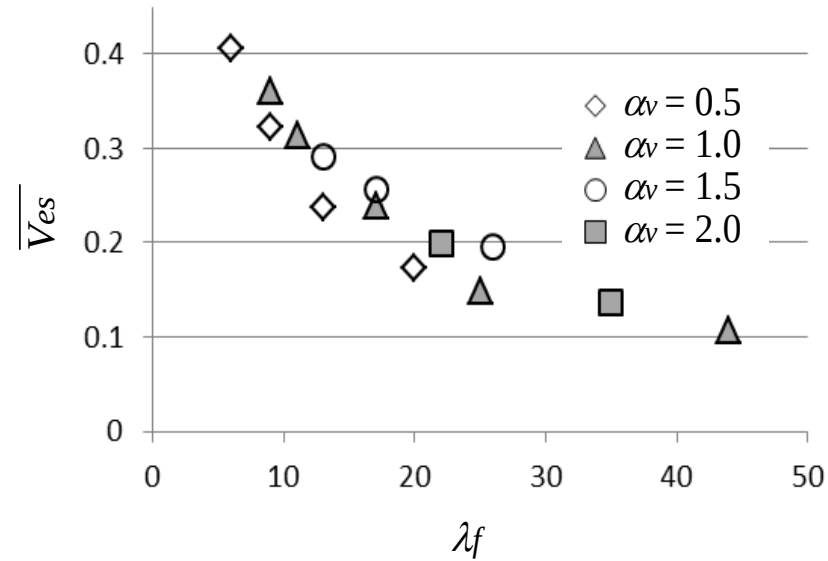
$$V_{mv} = \sqrt{\langle u_i \rangle \langle u_i \rangle} = \sqrt{\langle (u_1) \rangle^2 + \langle (u_2) \rangle^2 + \langle (u_3) \rangle^2} = \sqrt{2K} \quad (1)$$

$$V_{es} = \sqrt{\langle (\langle u_i \rangle + u'_i)^2 \rangle} = \sqrt{(\langle (u_1) \rangle^2 + \langle (u_2) \rangle^2 + \langle (u_3) \rangle^2) + \langle (u_1)'^2 \rangle + \langle (u_2)'^2 \rangle + \langle (u_3)'^2 \rangle)} = \sqrt{2K + 2k} \quad (2)$$

V_{es} は風速変動の影響も加味した風速 (全運動エネルギーから求められる風速)



粗度面積率（グロス建蔽率）と歩行者高さにおける時間平均風速 (mean vector speed V_{mv}) の空間平均値 ($\overline{V_{mv}}$) の関係



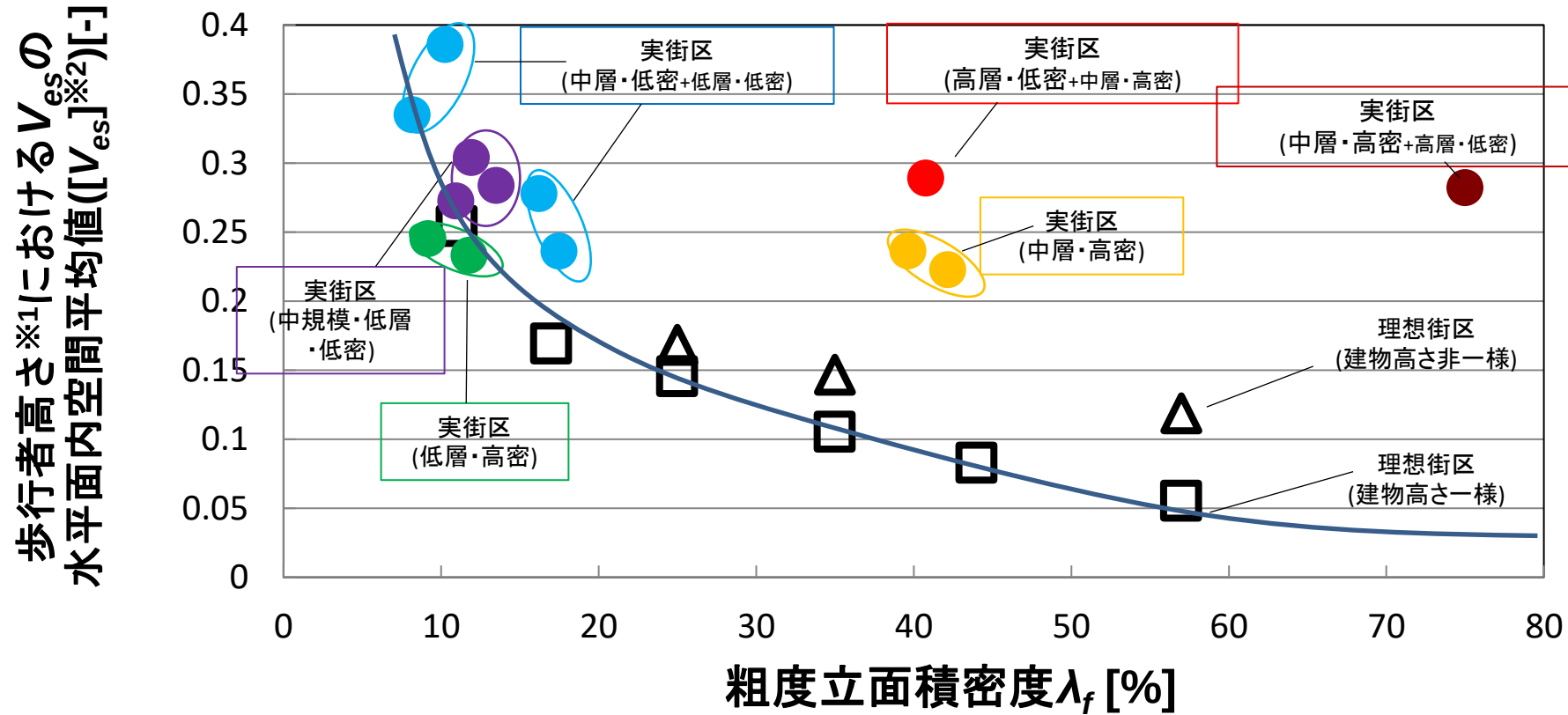
粗度面積率（グロス建蔽率）と歩行者高さにおける時間平均風速 (effective V_{es}) の空間平均値 ($\overline{V_{es}}$) の関係

λ_f と V_{es} の方が相関が高い。



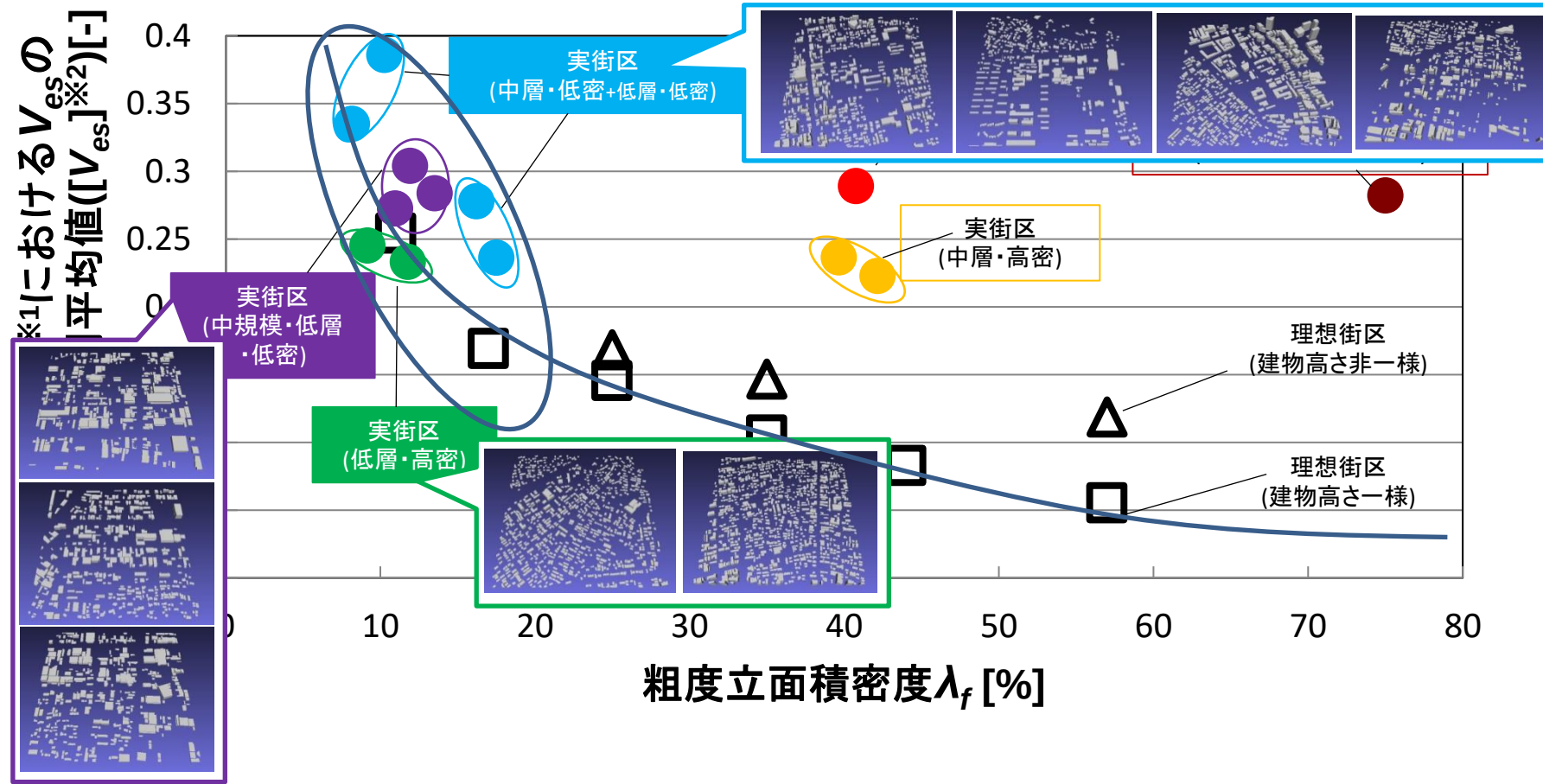
以降は、 λ_f と V_{es} を用いて分析を進める。

実市街地の解析結果(各LCZ区分ごとの結果)



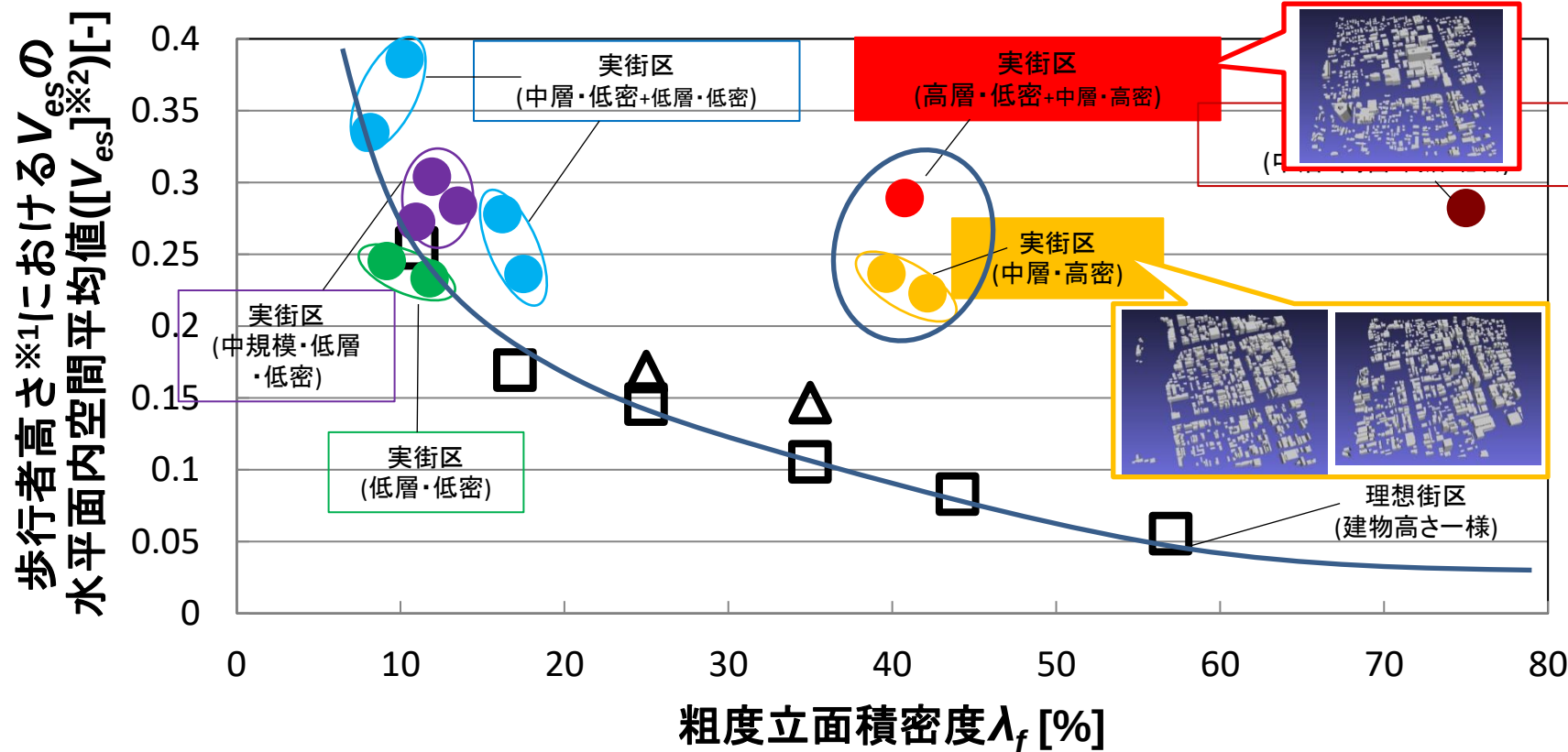
実市街地のデータは理想街区のカーブからは外れているものが多い。
しかし、LCZ区分ごとにある程度まとまっている。

実市街地の解析結果(低粗度立面積密度ケース)



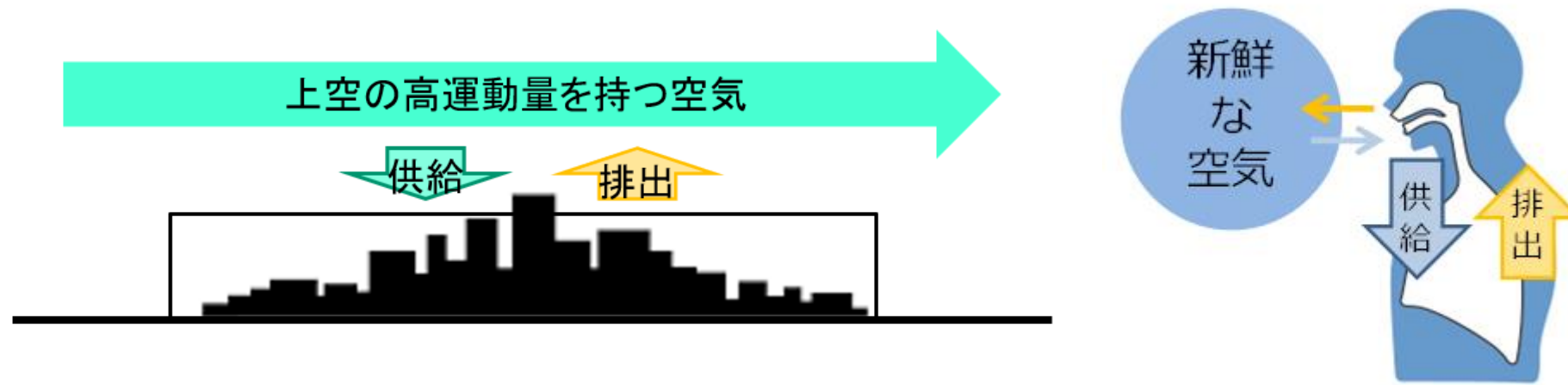
中低層の実街区(粗度立面積密度 $\lambda_f \leq 20\%$)では、理想街区と実街区の傾向が概ね一致。

実市街地の解析結果(高粗度立面積密度ケース)



中高層の実街区($\lambda_f \approx 40\%$)では、理想街区の $[V_{es}]$ よりも実街区の値が大きい
 ⇒建物高さのバラツキや高層ビルの吹きおろし等により高風速化したものと考えられる。
 ⇒過度な風速増加に注意しながら、
上空と地表付近の空気交換を促進するにはどうすればよいか？

(10)-2 新たなターゲット：Breathableな都市（呼吸する都市）



Breathabilityとは、市街地上空と地表付近の空気を交換する能力を表す概念。

(Breath (呼吸)、Breath+ able (呼吸しやすい))

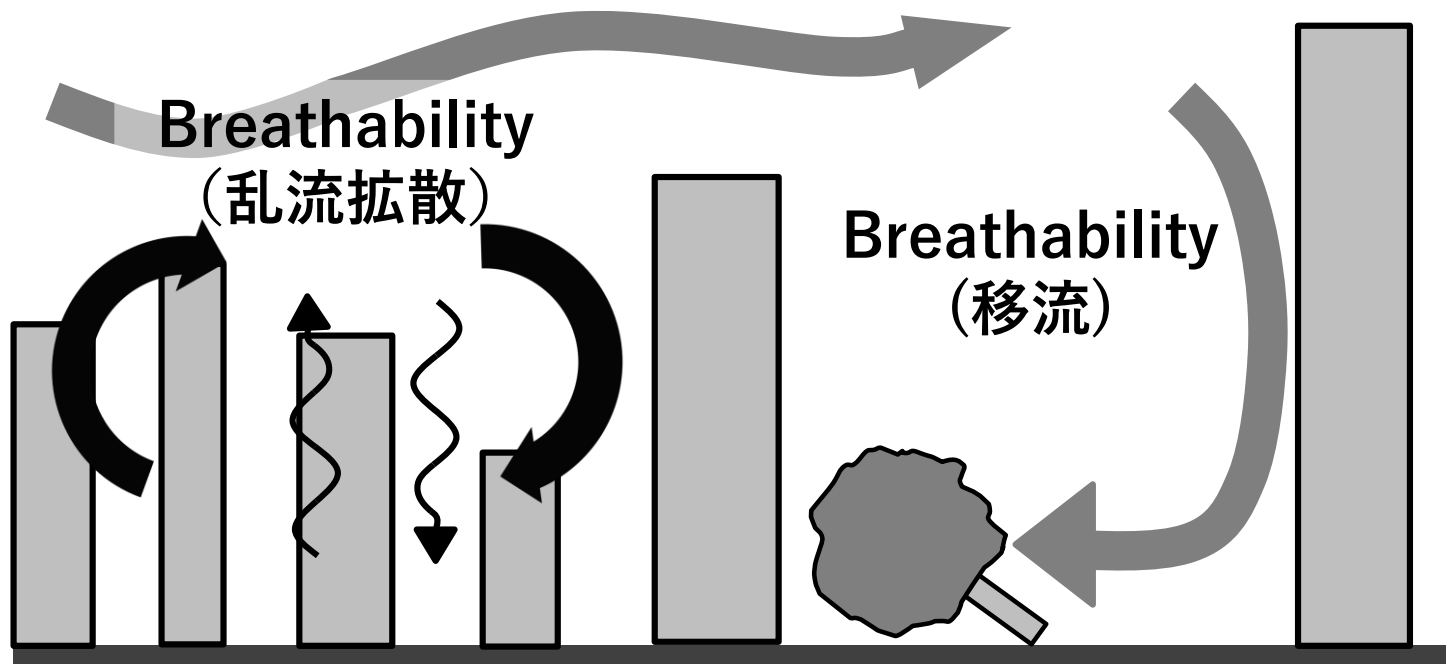
Breathabilityの高い市街地とは上空風を歩行者空間に取り込みやすい状態の市街地。

既往研究ではある面を通過する流量や運動量で評価しているが、我々は運動エネルギーで評価。

Neophytou, M.K.A., Markides, C.N., Fokaides, P.A., 2014. An experimental study of the flow through and over two dimensional rectangular roughness elements: Deductions for urban boundary layer parameterizations and exchange processes. Phys. Fluids 26. <https://doi.org/10.1063/1.4892979>

Kubilay, A., Neophytou, M.K.A., Matsentides, S., Loizou, M., Carmeliet, J., 2017. The Pollutant Removal Capacity of an Urban Street Canyon and its Link to the Breathability and Exchange Velocity. Procedia Eng. 180, 443–451.

Breathabilityを担う要素—移流と乱流拡散—



高層建物周囲の吹きおろし
流を適切に制御しないと、
強風被害を生む怖れがある



Breathabilityが高く、且つ、
地表付近の高風速発生を抑
制する市街地の形態とは？

鉛直方向の運動エネルギーの輸送量に基づく Breathabilityの評価

$$E_{vt} = \left\langle \frac{u_i^2}{2} u_{\textcolor{red}{3}} \right\rangle = \overset{\textcircled{1}}{\langle \overline{u_3} \rangle K} + \overset{\textcircled{2}}{\langle \overline{u_3} \rangle k} + \overset{\textcircled{3}}{\langle \overline{u_i'} \overline{u_3'} \rangle \langle \overline{u_i} \rangle} + \overset{\textcircled{4}}{\frac{1}{2} \langle \overline{u_i'} \overline{u_3'} \overline{u_i'} \rangle} \quad (1)$$

- ① **移流**により輸送される平均運動エネルギー
- ② **移流**により輸送される乱流エネルギー
- ③ **乱流拡散**により輸送される平均運動エネルギー
- ④ **乱流拡散**により輸送される乱流エネルギー

$\overline{u_i}$ フィルター化した瞬間風速

K : 平均運動エネルギー $((\langle \overline{u_1} \rangle^2 + \langle \overline{u_2} \rangle^2 + \langle \overline{u_3} \rangle^2)/2)$

$\langle \overline{u_i} \rangle$: 平均風速

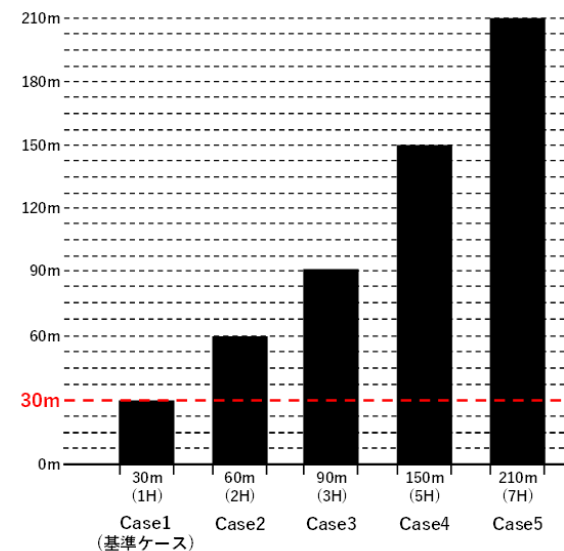
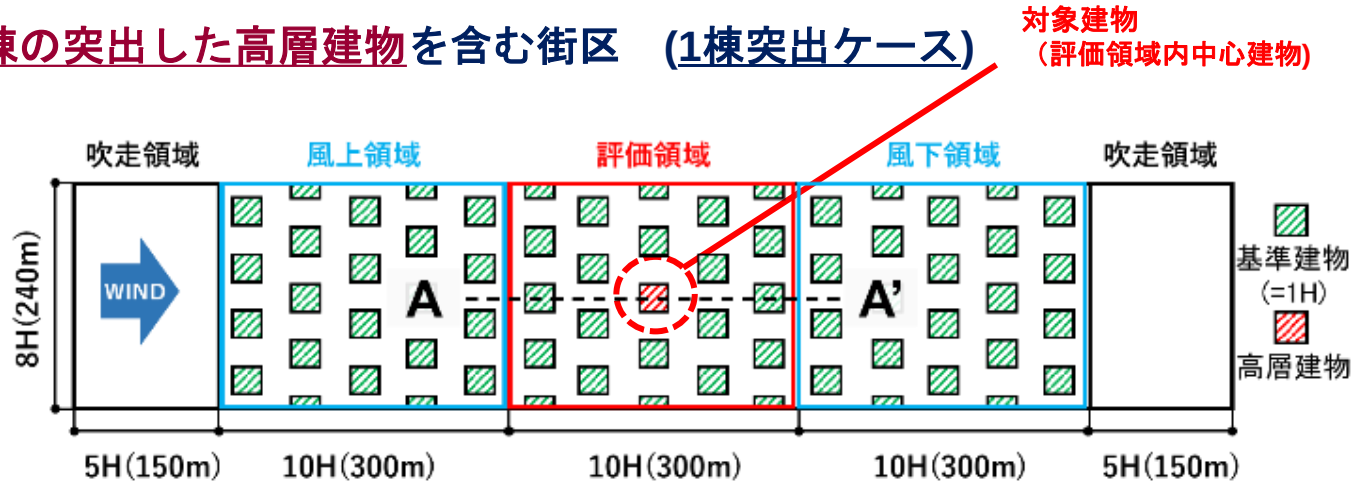
$\overline{u_i'}$: 変動成分

k : 乱流エネルギー $((\langle \overline{u_1'}^2 \rangle + \langle \overline{u_2'}^2 \rangle + \langle \overline{u_3'}^2 \rangle)/2)$

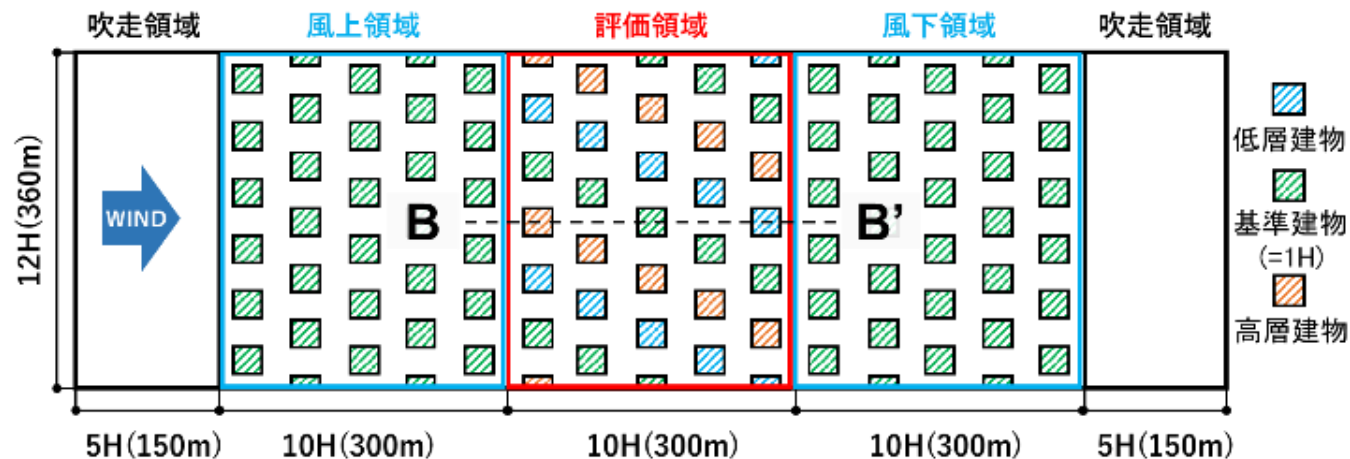
移流・乱流拡散による鉛直混合 (Breathability) への影響を詳細に分析可能に。

高層建物と建物高さのばらつきの影響を調べるための解析ケース

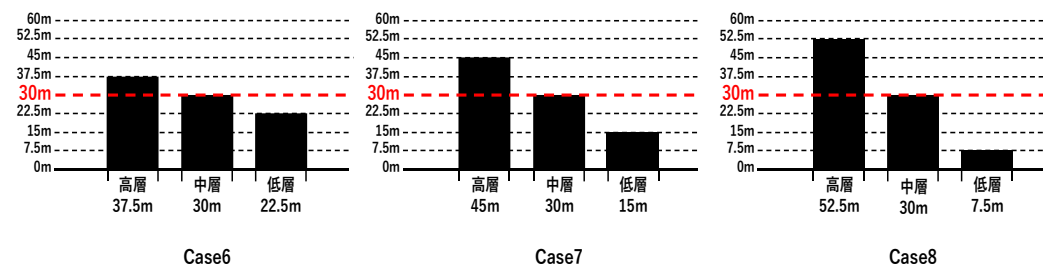
1棟の突出した高層建物を含む街区 (1棟突出ケース)



評価領域内で建物高さが非一様な街区 (非一様ケース)



1棟の対象建物を平均建物高さから徐々に突出させる



建物高さの非一様性を大きくする
(同じ平均建物高さで標準偏差を大きくする)

平均風速ベクトル

(日常的な風環境は、各ポイントの風速の時間平均値で評価)

基準ケース (Case1)

各建物の流れが干渉しない
Isolated building flow が生じる。

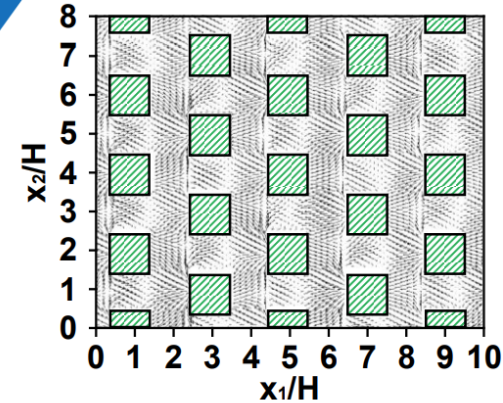
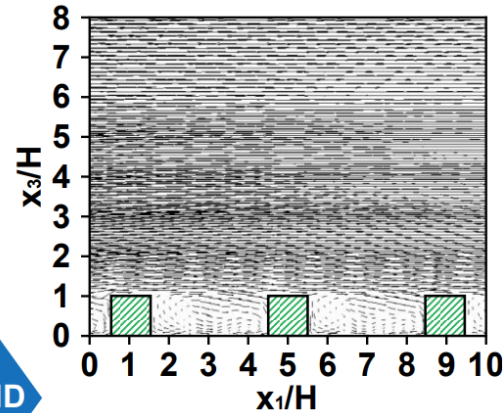
1棟突出ケース (Case5)

高層建物が1棟突出することで
上空から平均的な吹き降ろし
が発生し,建物周囲にのみ高風
速領域が形成される。

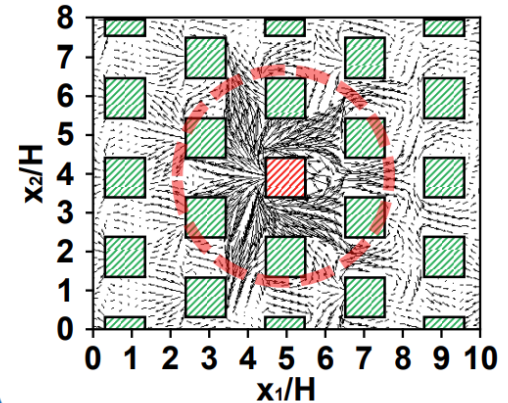
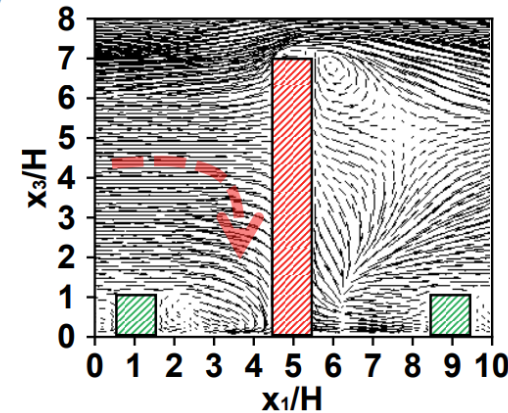
非一様ケース (Case8)

高層建物の風上側における吹
き降ろしの他,高層建物の風下
側には,Case1よりも強い乱流
渦が確認できる。

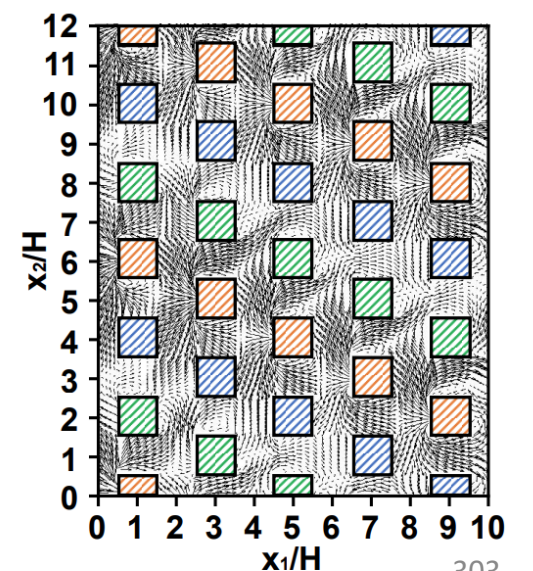
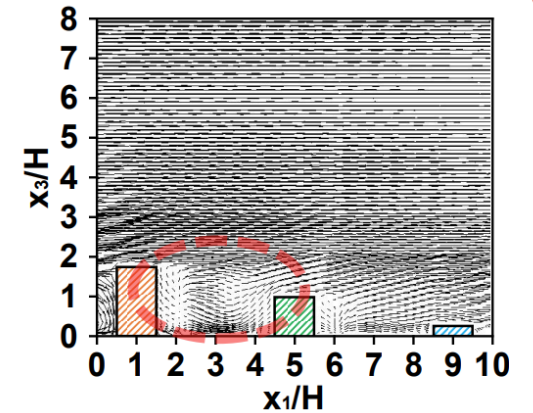
Case1 (基準ケース)



Case5 (1棟突出ケース)



Case8 (非一様ケース)



上図) 鉛直分布, 下図) 水平分布 (歩行者高さ)

低層建物

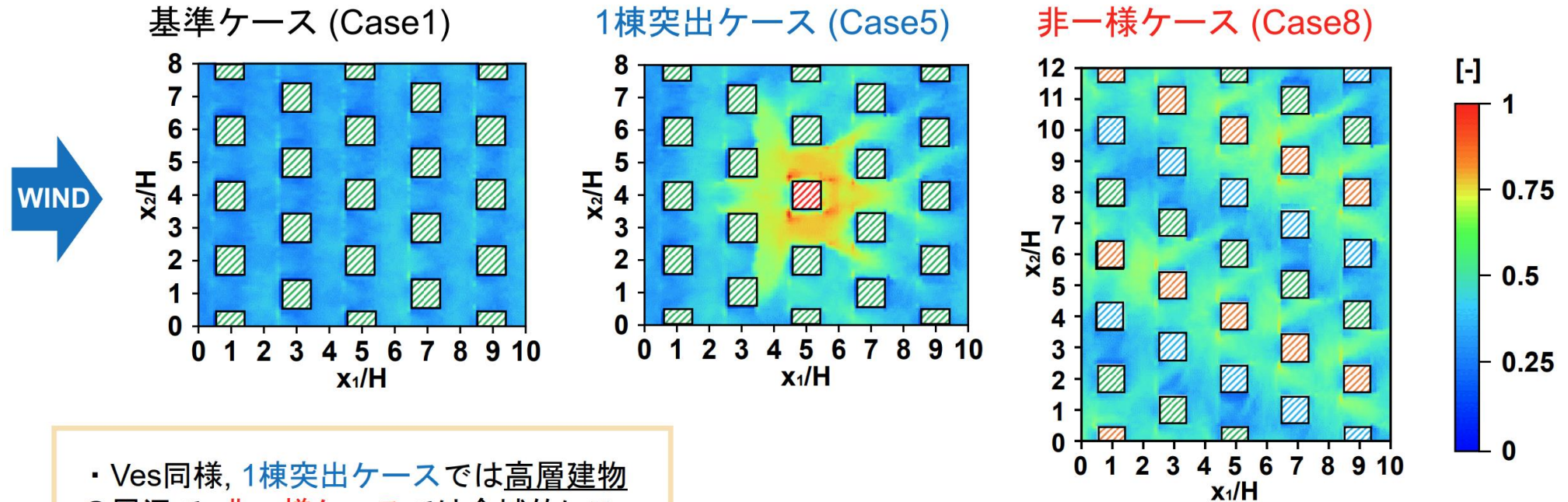
高層建物 (1棟突出ケース)

基準建物 (=1H)

高層建物 (非一様ケース)

強風の評価(風速の95パーセンタイル値)

風速の95パーセンタイル値:
各ポイントの風速の時系列データを小さい方から並べた時に下から95%(上から5%)の値。



・ Ves同様, 1棟突出ケースでは高層建物の周辺で, 非一様ケースでは全域的に V_{95} が増加する。

・ 各ケース, Vesと比較して全域的に高風速になる。

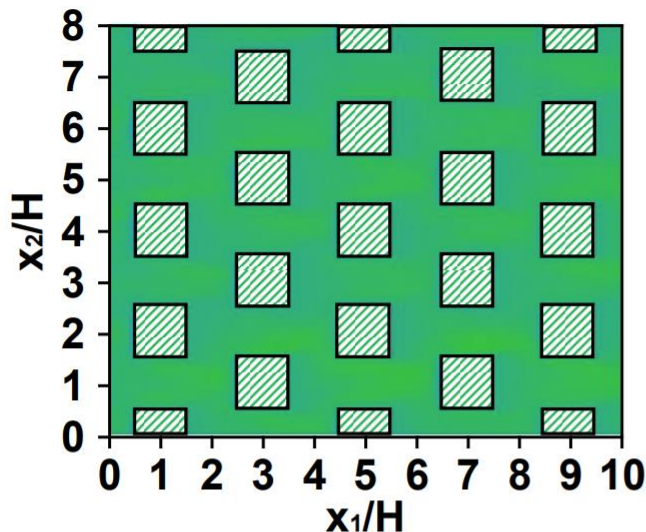
- 低層建物
- 基準建物 (=1H)
- 高層建物 (1棟突出ケース)
- 高層建物 (非一様ケース)

風速の95パーセンタイル値は
歩行者高さ(1.5m)における
水平分布を示す。

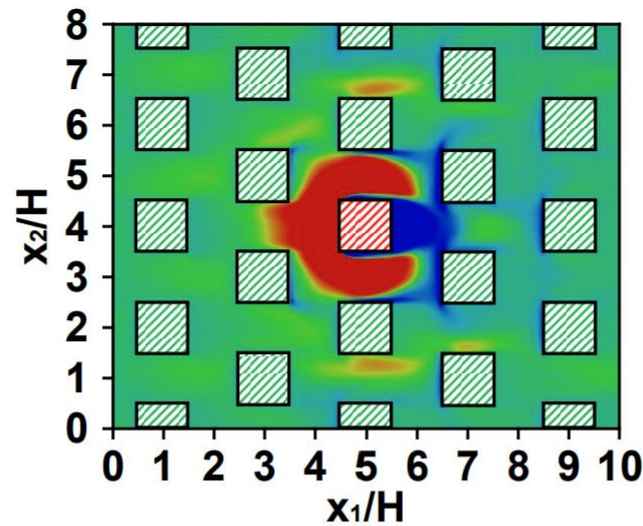
Breathability E_{vt} の水平分布 (この図は下向きが正)



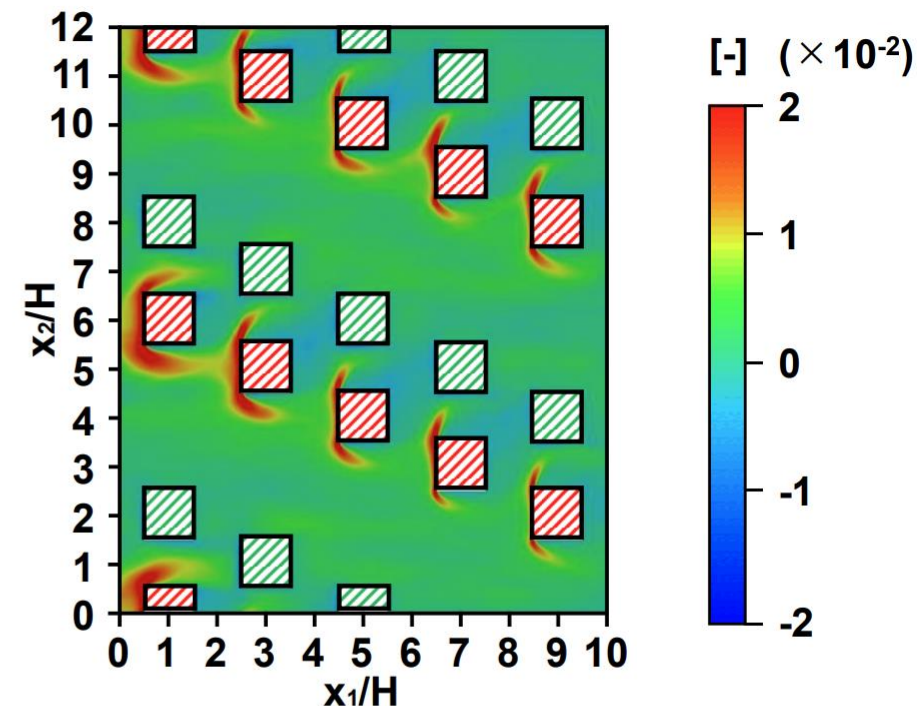
基準ケース (Case1)



1棟突出ケース (Case5)



非一様ケース (Case8)



1棟突出
ケース
(Case5)

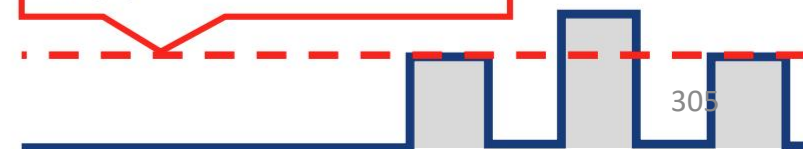
風上の吹きおろし部分, 高層建物の風上から側方	強い下向きの 運動エネルギー輸送
風下の循環流	強い上向きの 運動エネルギー輸送

非一様
ケース
(Case8)

高層建物風上側の 吹きおろしと回り込み	下向きの 運動エネルギー輸送
風下の乱流渦	上向きの 運動エネルギー輸送

- 低層建物
- 基準建物 (=1H)
- 高層建物 (1棟突出ケース)
- 高層建物 (非一様ケース)

Breathabilityは基準建物高さ
(1H, 30m)における水平分布を
示す。



Breathabilityの構成要素の各成分の評価

$$E_{vt} = \left\langle \frac{u_i^2}{2} u_{\textcolor{red}{3}} \right\rangle = \overset{\textcircled{1}}{\langle \overline{u_3} \rangle K} + \overset{\textcircled{2}}{\langle \overline{u_3} \rangle k} + \overset{\textcircled{3}}{\langle \overline{u_i}' \overline{u_3}' \rangle \langle \overline{u_i} \rangle} + \overset{\textcircled{4}}{\frac{1}{2} \langle \overline{u_i}' \overline{u_3}' \overline{u_i}' \rangle} \quad (1)$$

- ① **移流**により輸送される平均運動エネルギー
- ② **移流**により輸送される乱流エネルギー
- ③ **乱流拡散**により輸送される平均運動エネルギー
- ④ **乱流拡散**により輸送される乱流エネルギー

$\overline{u_i}$ フィルター化した瞬間風速

K : 平均運動エネルギー $((\langle \overline{u_1} \rangle^2 + \langle \overline{u_2} \rangle^2 + \langle \overline{u_3} \rangle^2)/2)$

$\langle \overline{u_i} \rangle$: 平均風速

$\overline{u_i}'$: 変動成分

k : 乱流エネルギー $((\langle \overline{u_1}'^2 \rangle + \langle \overline{u_2}'^2 \rangle + \langle \overline{u_3}'^2 \rangle)/2)$

移流・乱流拡散による鉛直混合(Breathability)への影響を詳細に分析可能に。

6m高さにおけるBreathabilityの各成分の比較(この図は上向き正)

C1～C5：1棟突出ケース

C6～C8：非一様ケース

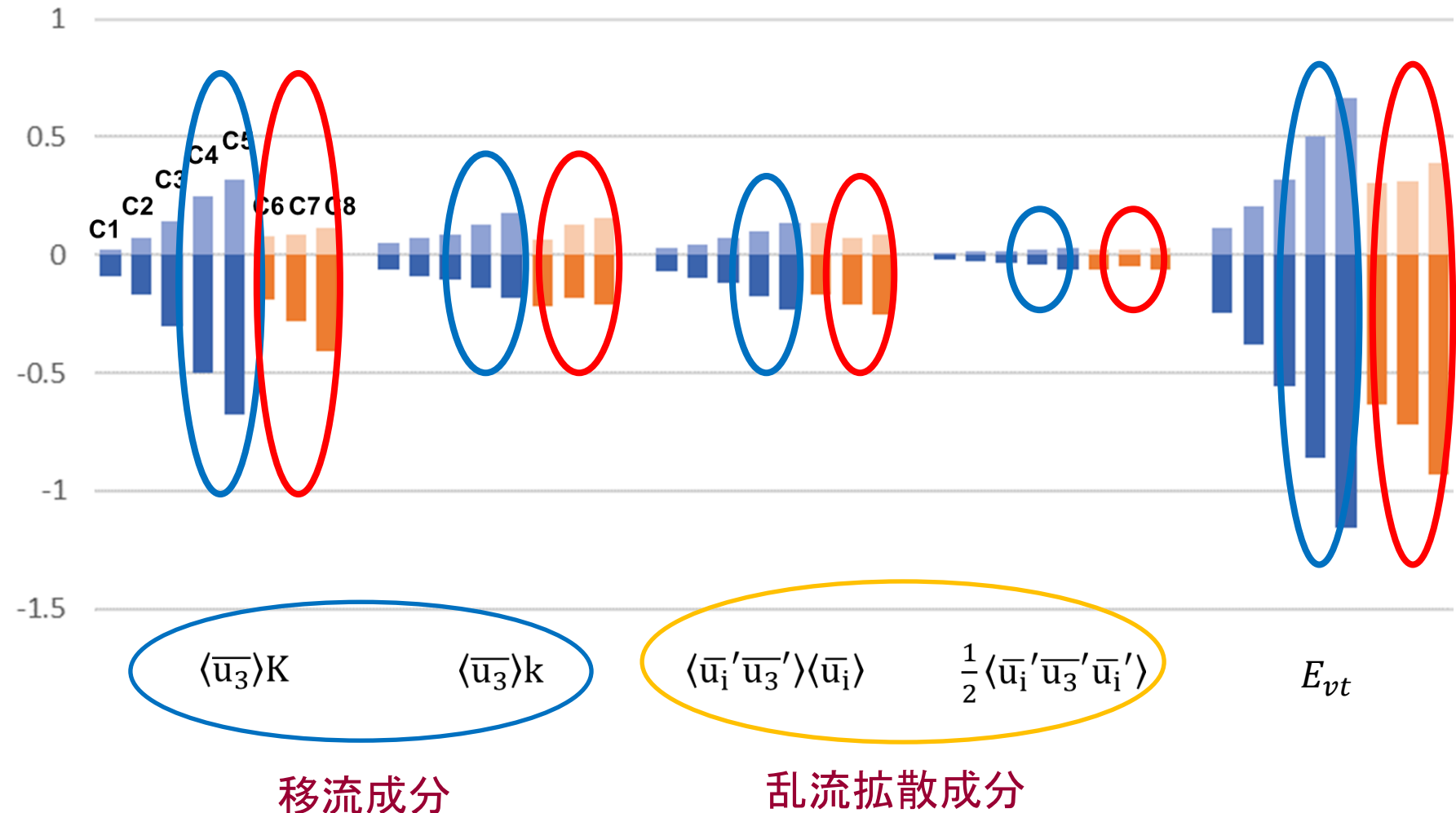
1棟突出ケースでは「移流による平均運動エネルギーKの輸送 ($\langle \bar{u}_3 \rangle K$) が非一様ケースよりも大きい。



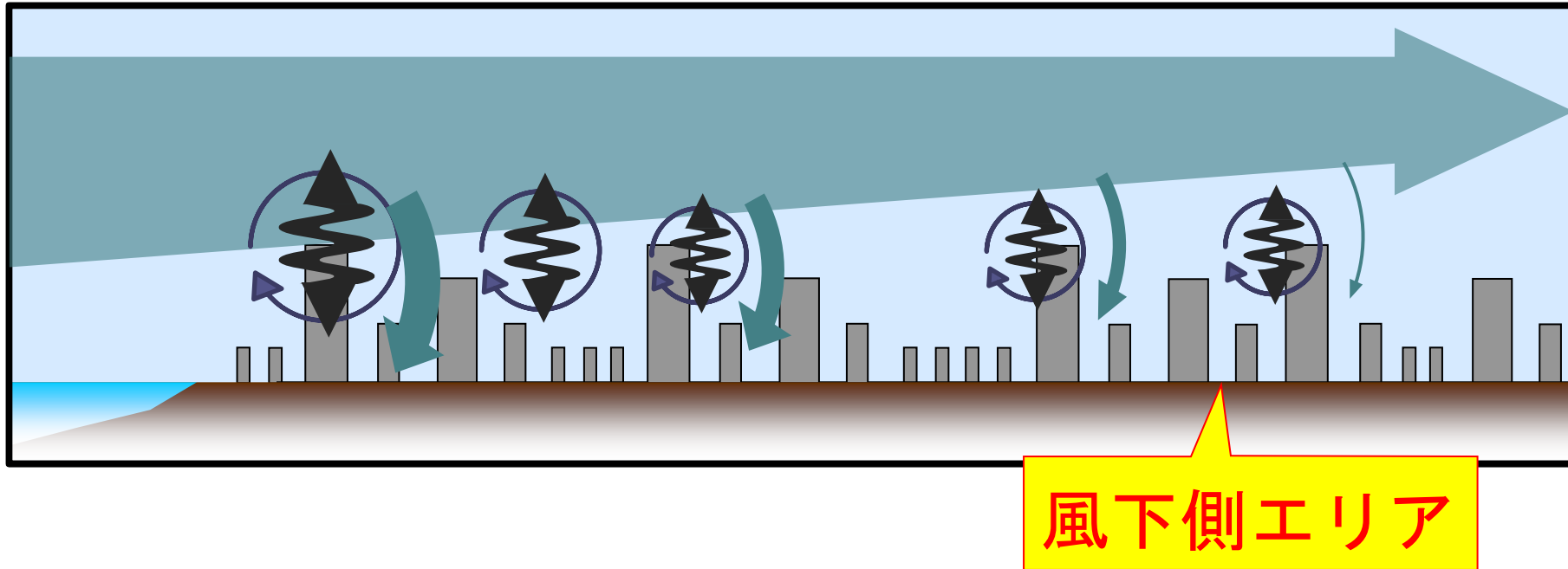
移流による輸送が1棟突出ケースの場合の局所的な過度の風速増加の原因。



乱流拡散によりBreathabilityを上げることが重要。



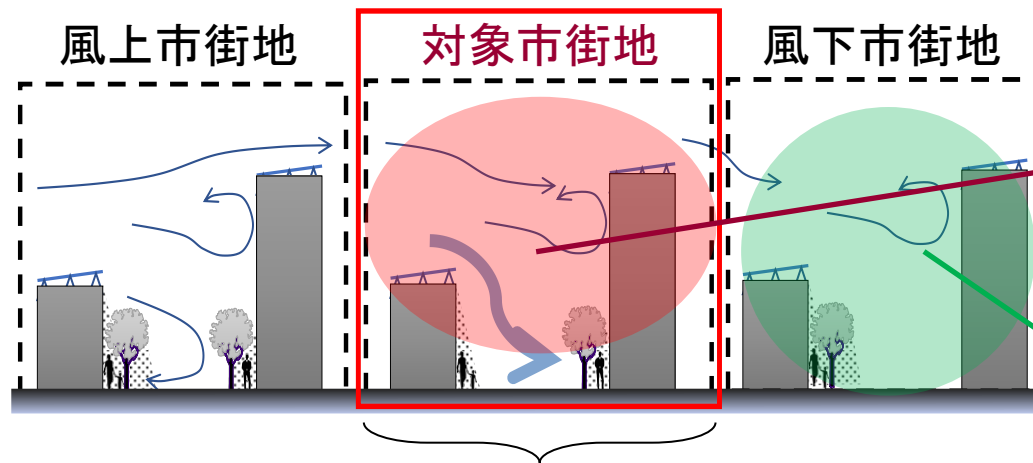
(10)-3 着目する市街地のBreathability (Q) と風下市街地への悪影響 (L)



上空風との積極的な空気交換

⇒ 上空風の運動エネルギーの消費・減衰

⇒ 風下側エリアに引き渡すべき運動エネルギーの減少
(風下側りの市街地の換気・通風の悪化)を招く



着目する市街地の風環境に
 にとって良い市街地形態モデル

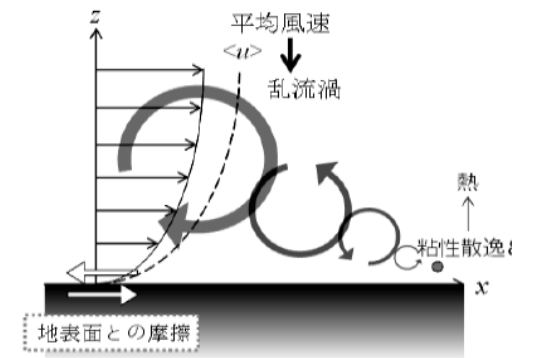
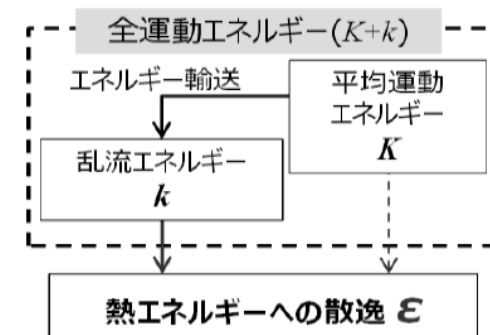
上空から地表付近に空気を取り込む際
 に生じる運動エネルギーの減少

風下側のエリアにおいて利用可能な
 運動エネルギーの減少

着目する市街地のBreathabilityを向上させるための努力がもたらす、風下側市街地への迷惑（引き渡すべき運動エネルギーの減少）を如何に評価するか？

⇒風通し改善を検討する対象市街地内の
 粘性散逸率 ε の総量から評価
 （石田泰之君の博士論文（2021年度）の核の部分）

粘性散逸率 ε ：運動エネルギーが単位時間あたりに熱エネルギーに変換される（運動エネルギーとしては失われる）割合。



乱流エネルギー k の輸送方程式と生産項 P_k

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \underbrace{-\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}}_{P_k} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \langle u'_i u'_i u'_j \rangle + \frac{1}{\rho} \langle p' u'_i \rangle \right)}_{D_k} + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2} - \beta g_i \langle u'_i \theta' \rangle}_{G_k} - \underbrace{\nu \left\langle \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right\rangle}_{\varepsilon}$$

(g_i : 重力加速度ベクトル, $g_i = (0, 0, -9.8\text{m/s}^2)$)

P_k : 生産項(乱流エネルギーを生成する項)

⇒家計に例えると給与所得(基本的にいつもプラス)

ε : 粘性散逸率 (乱流エネルギーが単位時間当たりに熱に変換される割合)

⇒家計に例えると支出(基本的にいつもマイナス)

G_k : 浮力生産項(浮力で乱流エネルギーを増減させる項)

⇒その場所の大気の状態でプラス/マイナスが変化

(不安定状態だとマイナス、安定状態だとマイナス)

⇒家計に例えると投機やギャンブルによる収入・損失

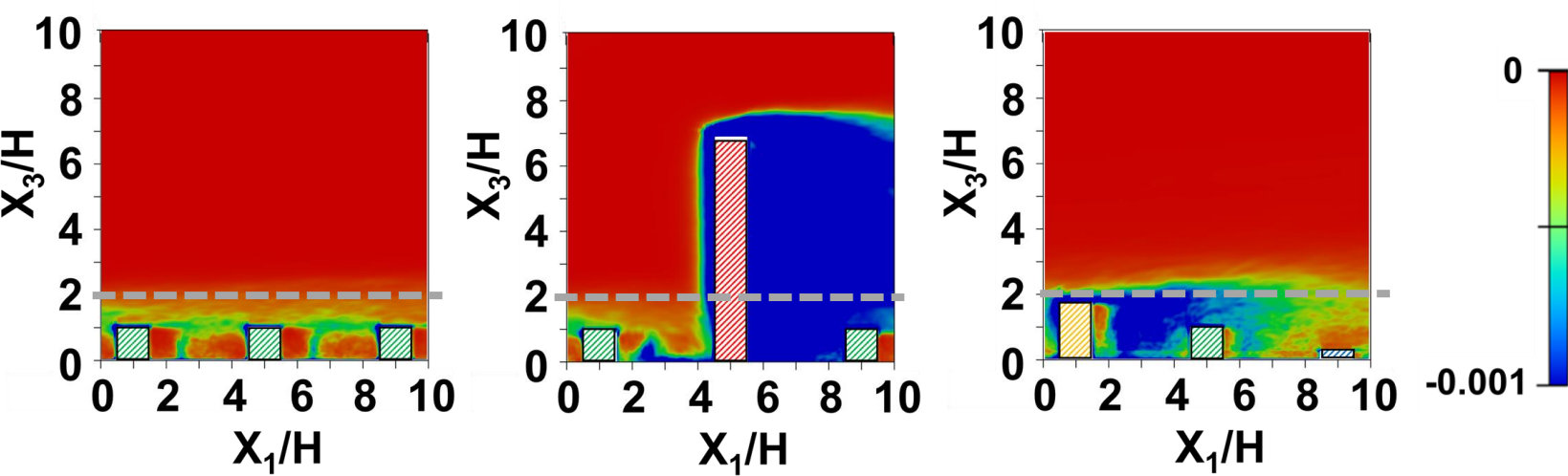
(弱風条件では重要だが、強風条件では浮力の影響は小さいので、重要度は低くなる。)

エネルギー散逸率ε の空間分布（鉛直断面）

基準ケース (Case1) 建物高さHの2.5倍程度までエネルギー散逸がみられる

1棟突出ケース (Case5) 高層建物風下側の広い範囲
高層建物の風上側の低層建物の屋上面付近や地表付近 増加

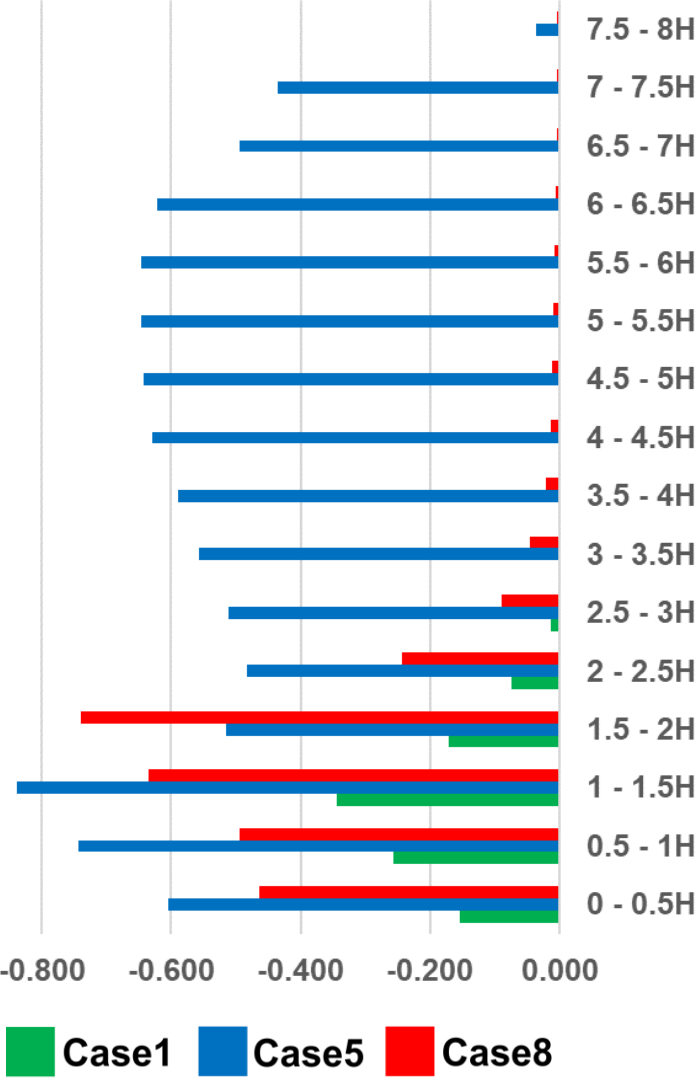
非一様ケース (Case8) 高層建物やや上空及び風下側
建物高さよりも高い範囲 増加



基準ケース (Case1)

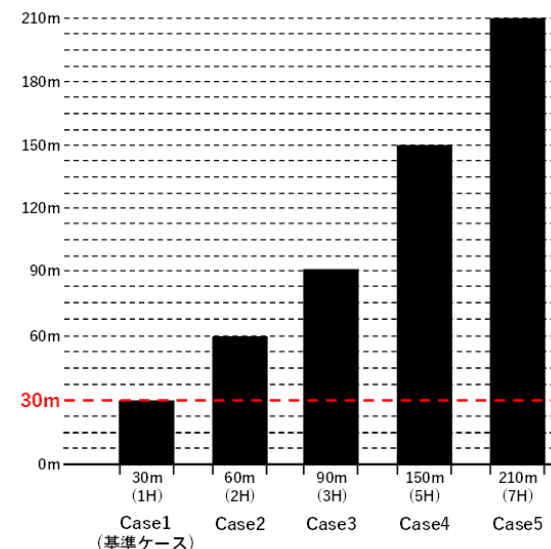
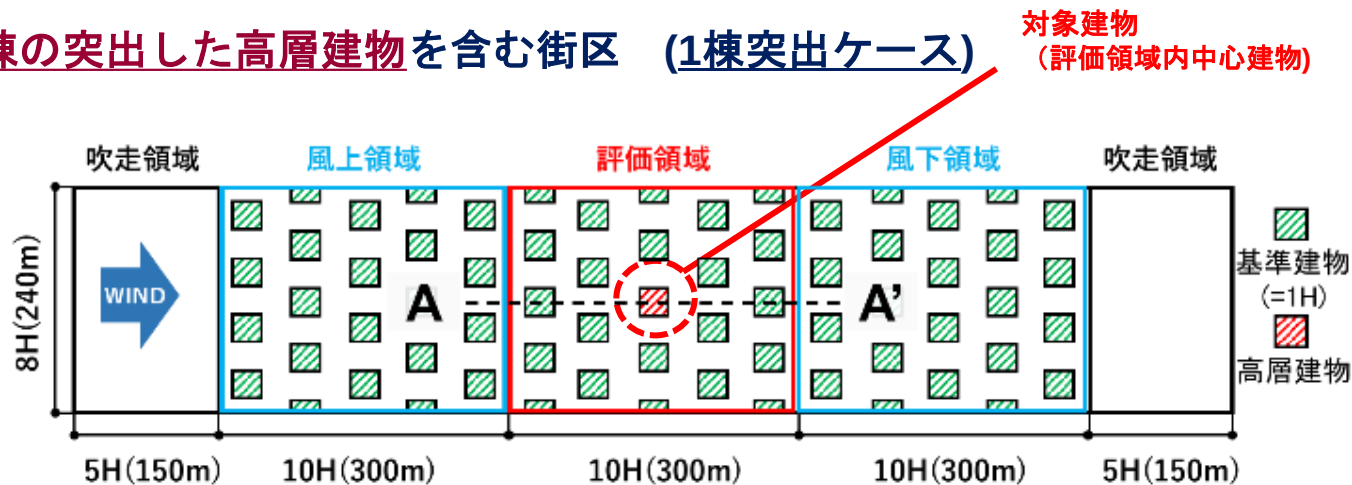
1棟突出ケース (Case5)

非一様ケース (Case8)

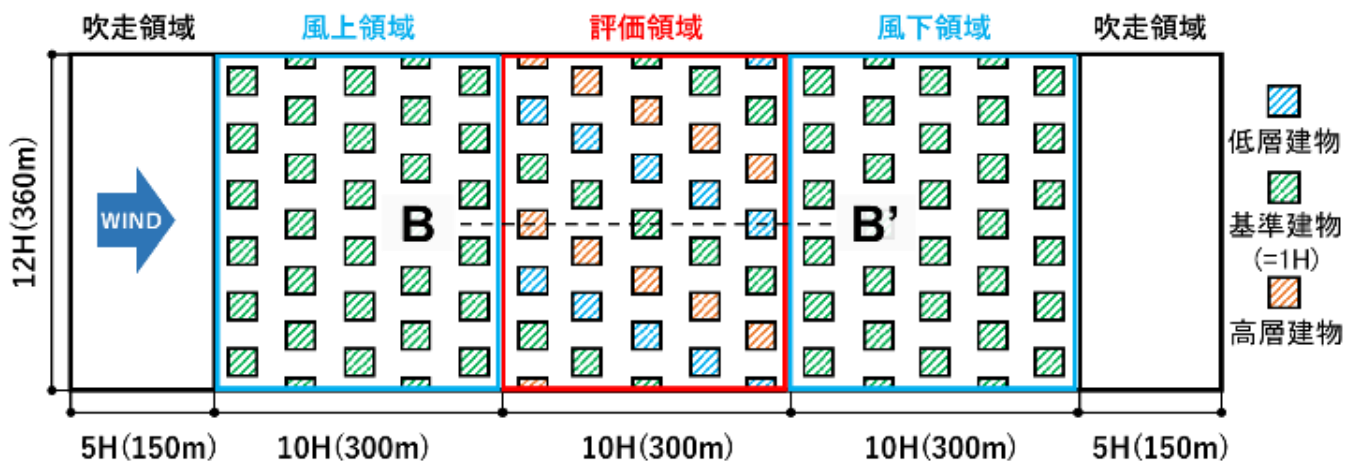


高層建物と建物高さのばらつきの影響を調べるための解析ケース

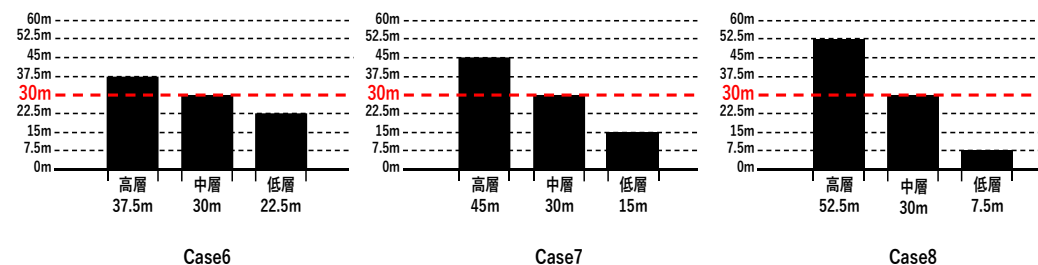
1棟の突出した高層建物を含む街区 (1棟突出ケース)



評価領域内で建物高さが非一様な街区 (非一様ケース)



1棟の対象建物を平均建物高さから徐々に突出させる



建物高さの非一様性を大きくする
(同じ平均建物高さで標準偏差を大きくする)

着目する市街地のBreathability 改善効果(Quality; Q)と 風下市街地への悪影響 (Loadings: L) の両者を考慮した評価指標

⇒エネルギー輸送効率EF

- 着目する市街地の上空から市街地内に供給される正味の運動エネルギー輸送量
(下向きー上向き) KE_{net} をQの指標、
- 風下側エリアへの悪影響の評価指標 (L) として、着目する市街地の地表から境界層高さまでのエネルギー散逸総量 ϵ_{total} を考える。

そして、エネルギー輸送効率EFを以下の様に定義する。

$$EF=Q^*/L^*$$

Q*: Case1(建物高さ一様の基準ケース)の値で規準化した正味の運動エネルギー輸送量 KE_{net}

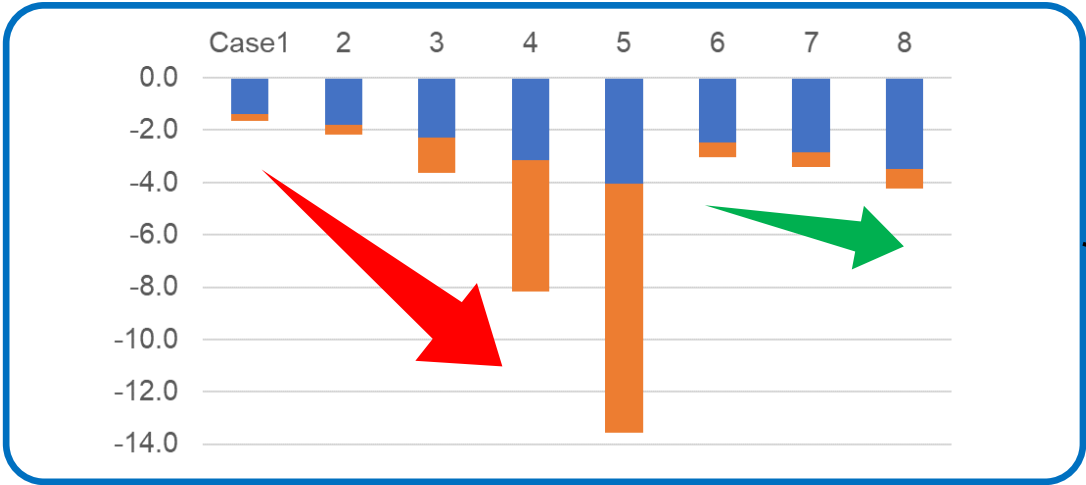
L*: Case1(建物高さ一様の基準ケース)の値で規準化したエネルギー散逸総量 ϵ_{total}

基準ケースでは、 $EF=Q^*/L^*=1$

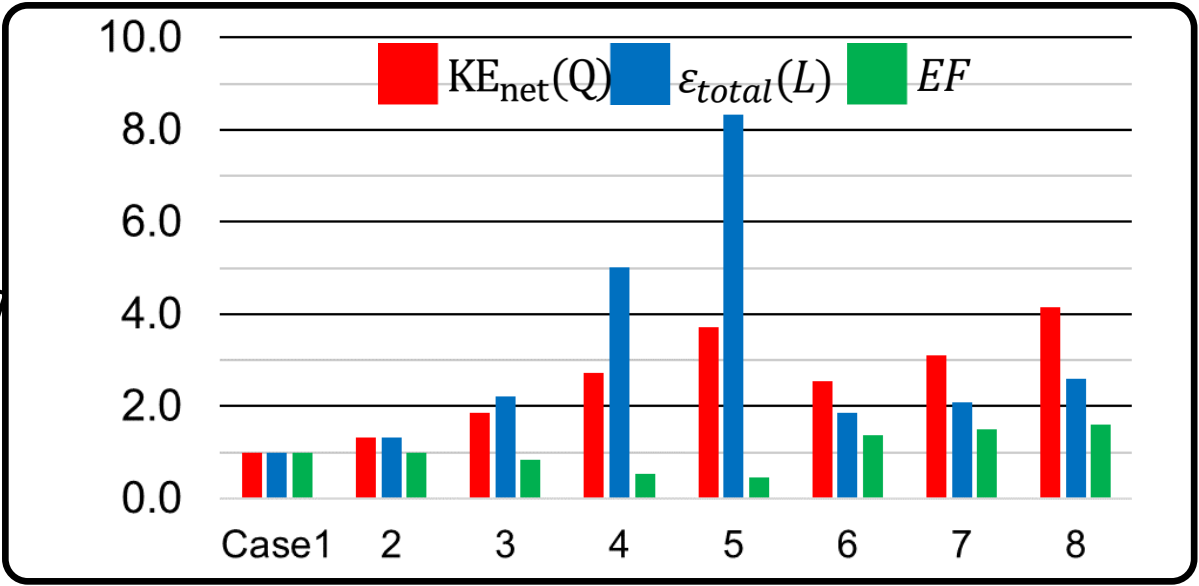
エネルギー輸送効率の比較(KEnet (Q*) の評価高さ : 6m)

C1~C5 : 1棟突出ケース
C6~C8 : 非一様ケース

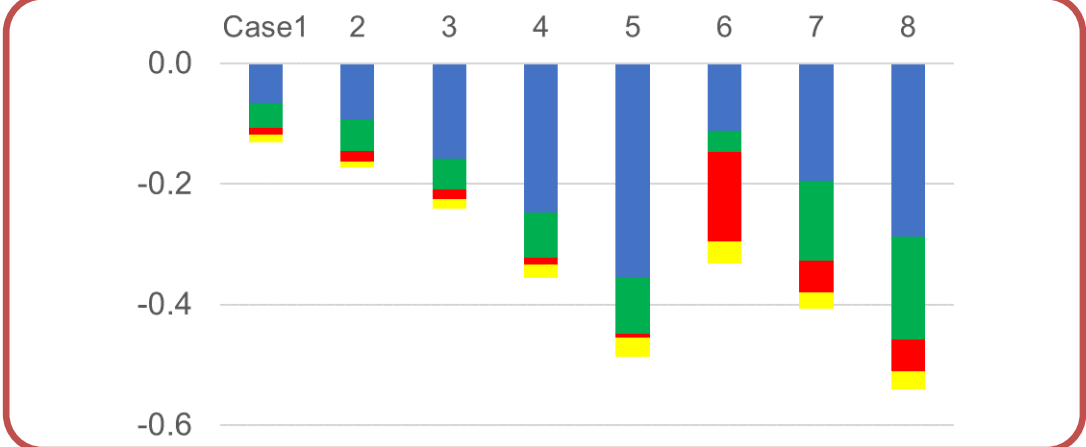
基準化されたエネルギー散逸率 ϵ (L^*)



エネルギー輸送効率 EF (Q^*/L^*)



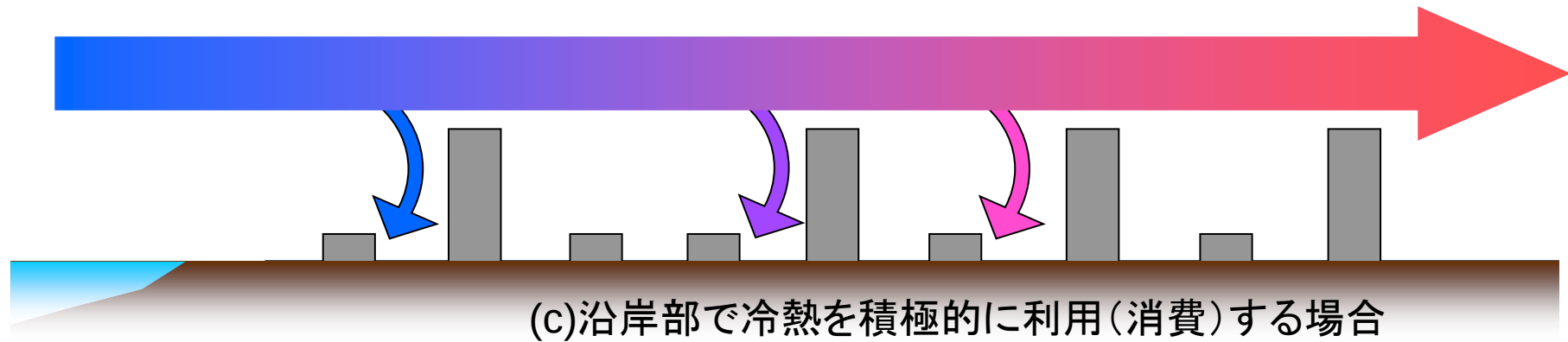
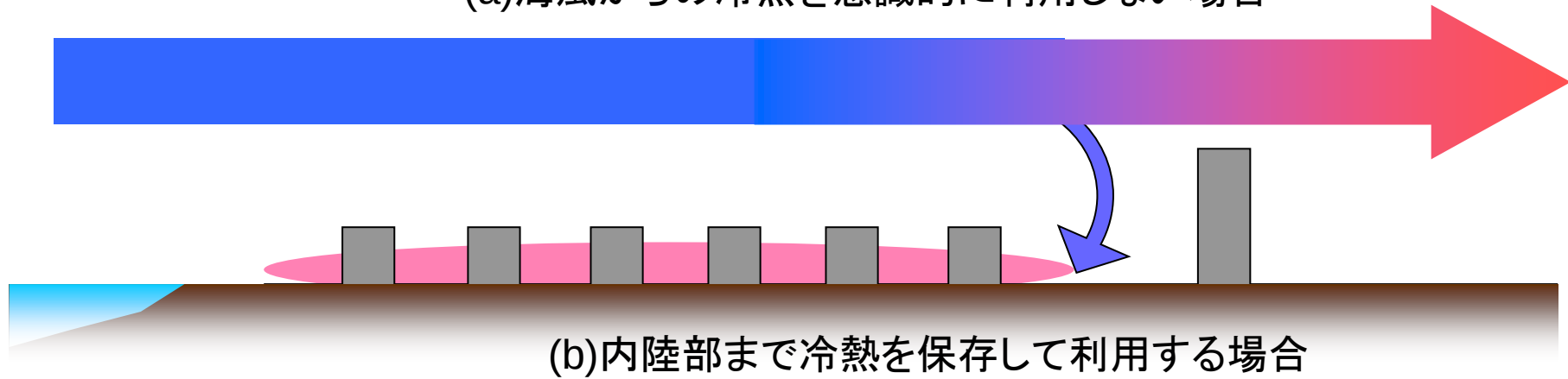
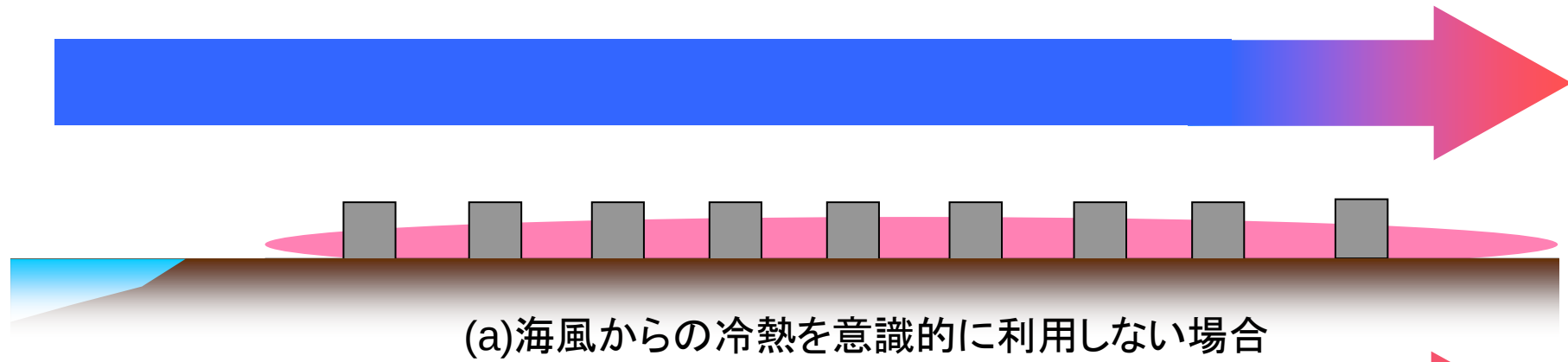
基準化された運動エネルギー供給量KEnet (Q^*) (上向き正)



		Q^*	L^*	Q^*/L^*
		KEnet	ϵ total	EF
Case1	基準ケース	1.00	1.00	1.00
Case2	2H	1.32	1.33	0.99
Case3	3H	1.85	2.22	0.83
Case4	5H	2.72	5.02	0.54
Case5	7H	3.72	8.32	0.45
Case6	非一様性 小	2.55	1.85	1.38
Case7	非一様性 中	3.12	2.09	1.49
Case8	非一様性 大	4.15	2.59	1.60

EFが減少

EFが増加



いずれが、より公正で妥当であるか？

石田 泰之君の博士論文(2021年度)「市街地形態が着目する市街地及びその風下領域の通風性能に与える影響の同時評価法提案－LESによる建物高さの非一様性の影響評価－」

Yasuyuki Ishida, Tsubasa Okaze, Akashi Mochida, Influence of urban configuration on the structure of kinetic energy transport and the energy dissipation rate, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 183, (2018),198-213

⇒石田君が日本風工学会 研究奨励賞受賞

石田泰之，遠藤芳信，持田 灯，白澤多一，義江龍一郎，田中英之，LESによる高密度市街地の建物高さの非一様性が風環境に及ぼす影響の分析（その1）：市街地抗力及び主流方向の運動量輸送量の定量的評価，日本建築学会環境系論文集，85 (778)，(2020)，1005-1015

石田泰之，遠藤芳信，持田 灯，白澤多一，義江龍一郎，田中英之，LESによる高密度市街地の建物高さの非一様性が風環境に及ぼす影響の分析（その2）：主流方向及び鉛直方向の運動エネルギーの輸送及び散逸の構造 [日本建築学会環境系論文集，86 (784)，(2021)，649-659

⇒石田君が日本建築学会奨励賞受賞受賞

(10)-4 台風等の強風襲来時の高層建物周辺市街地の構造安全性

風環境工学 × 耐風工学

近年、地球温暖化の影響で台風が大型化し、台風の襲来時に多くの構造的な被害が発生している。

これらの中には高層建物による風速増加が影響しているものも含まれていると考えられる。



<https://typhoon.yahoo.co.jp/weather/calendar/389/>



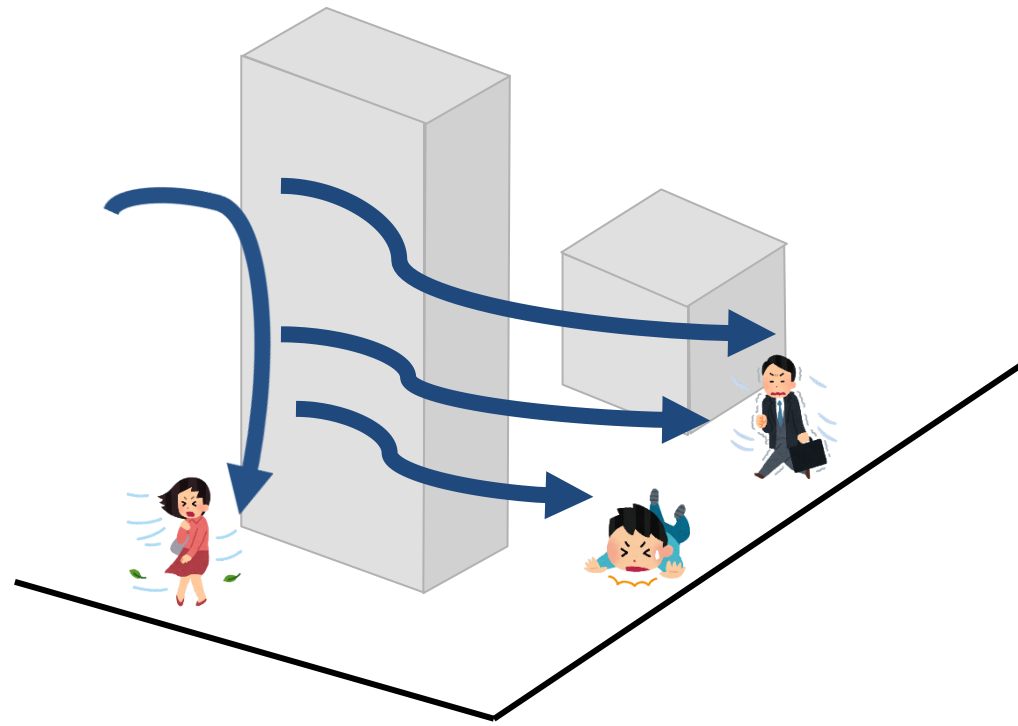
<https://www.nikkei.com/article/DGXZO49287500S9A900C1000000/>



https://www.jma.go.jp/jma/kisshou/know/ame_chuui/ame_chuui_p5.html

研究背景1) 風環境工学 (Environmental Wind Engineering) における伝統的課題

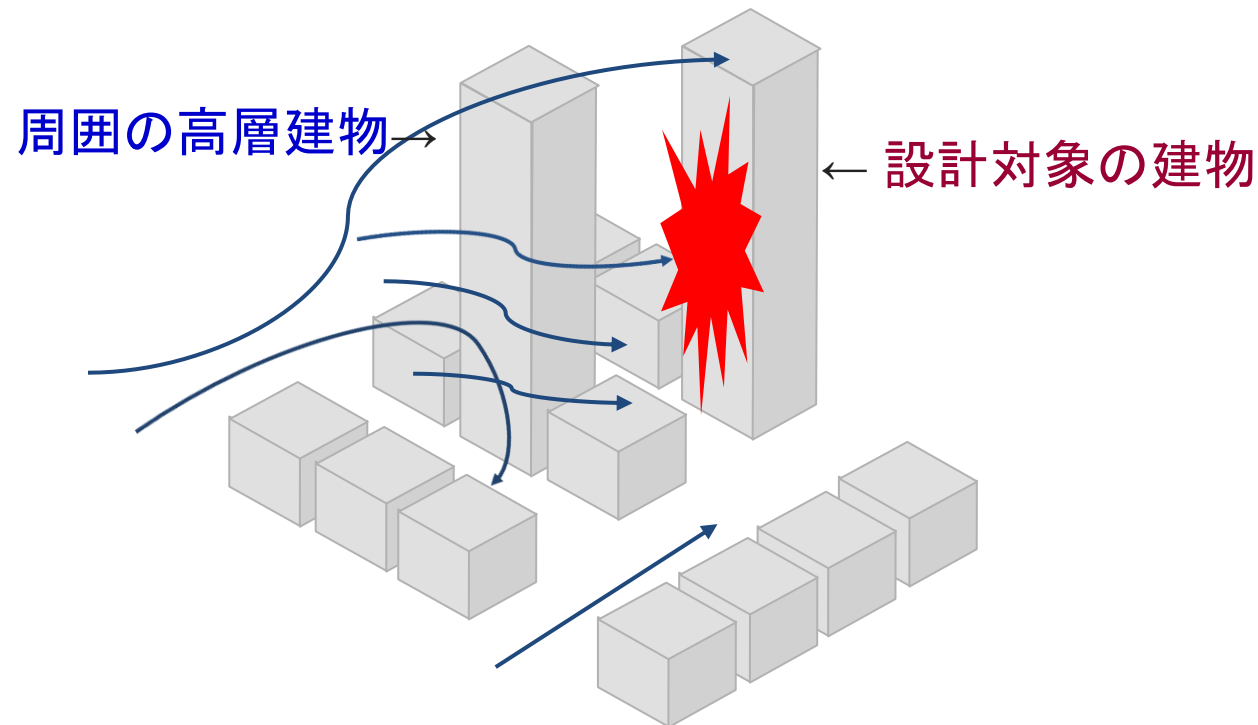
高層建物の影響で発生する強風(ビル風)のもたらす環境障害の防止は、過去50年にわたり我が国の風工学の環境系の主要なテーマであり続けてきた。



研究背景2) 耐風工学 (Structural Wind Engineering)における伝統的課題

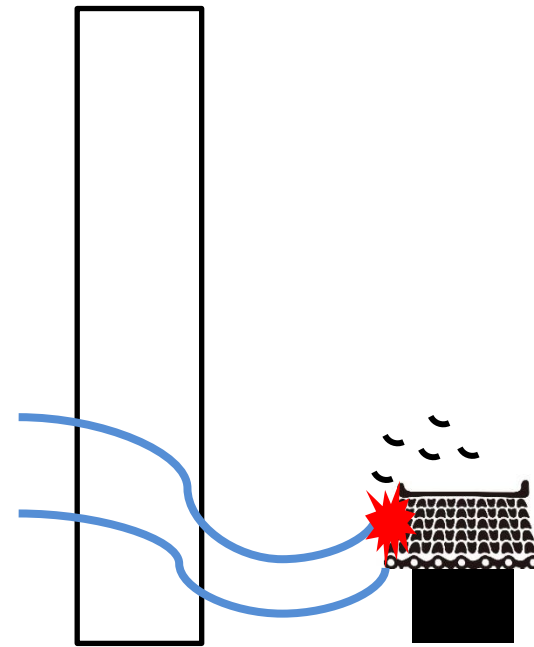
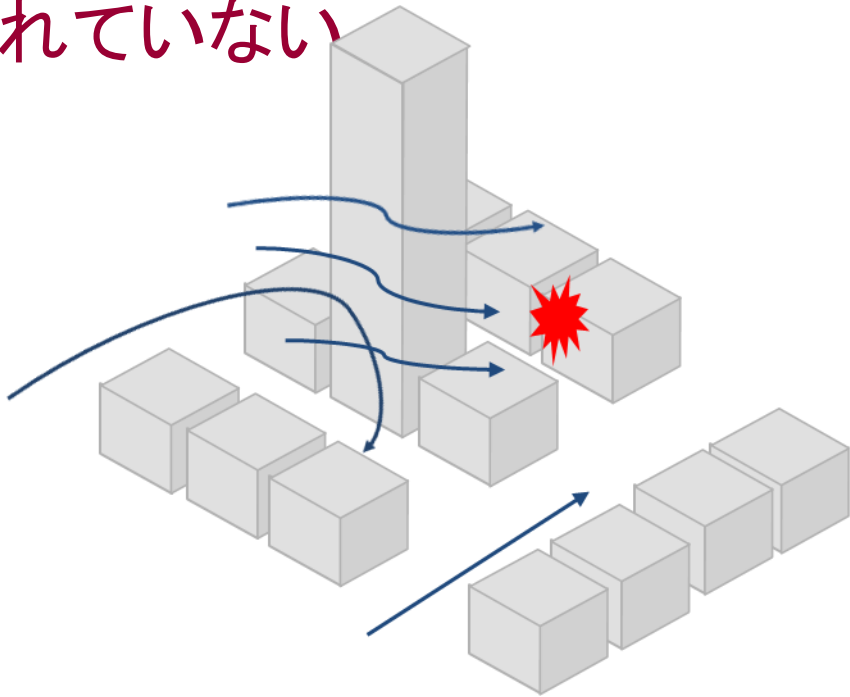
一方、耐風工学の分野では、設計対象の建物に作用する風荷重が主要な研究対象。

近年では、設計対象建物の風上に位置する高層建物が、設計対象の建物の風荷重に与える影響を明らかにする研究も行われている。



研究背景3) 未着手の課題—本研究のtarget—

しかし、新規に設計される高層建物が引き起こす周囲の建物に作用する風圧力の増加、そして、これが強風時にもたらす被害を防止するための研究は殆どなされていない



耐風工学 (Structural Wind Engineering) と風環境工学 (Environmental Wind Engineering) の守備範囲

① 新規に設計される高層建物への影響

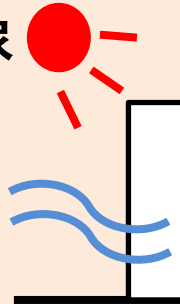
② 新規に設計される高層建物が周辺市街地に及ぼす影響

[A] 日常的な 気象条件下

室内環境分野の研究対象

- 室内の温熱快適性
- エネルギー消費etc

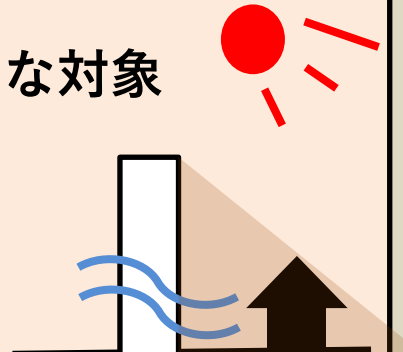
対象建物内の環境



風環境工学の伝統的な対象

- 風環境アセス(ビル風)
- 風通し、温熱環境

周辺環境の保全

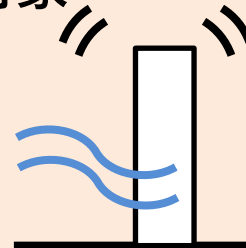


[B] 稀に発生する 強風条件下 (大型台風等)

耐風工学の伝統的な対象

- 設計される建物自体
の構造安全性

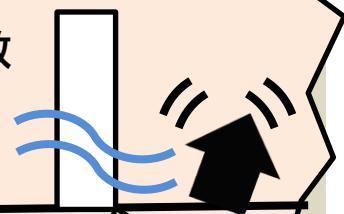
対象建物の安全性



誰も自分の責任と思っていない！

- 周辺建物・樹木の倒壊、車の飛散

周辺建物の安全性



「新規に設計される高層建物の影響で大型台風襲来時等に生じる近隣市街地の構造的被害の防止」

⇒誰も自分の担当分野(責任)と思っていないので、その防止対策の議論が進んでいないのではないかな？

このような問題意識から、耐風工学の専門家の東京工芸大の吉田先生にお願いして、高層建物がその周辺の建物に作用する風圧力に及ぼす影響に関する共同研究を開始した。

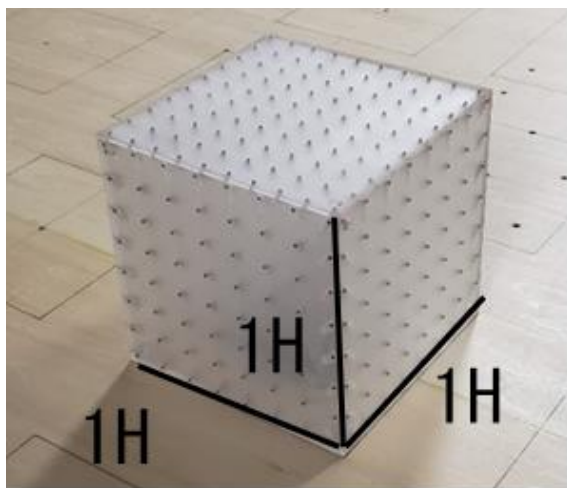
以下の結果は、
鎌田脩平君の修士論文(2022年度)「高層建物が市街地内の流れ場および周辺建物に作用する風圧力に及ぼす影響」でこのテーマに着手し。

山根優太君の修士論文(2023年度)「領域気象モデルWRFによる都市上空の風速の確率密度分布に関する研究」で耐風安全性評価まで分析を進めた最新の結果。

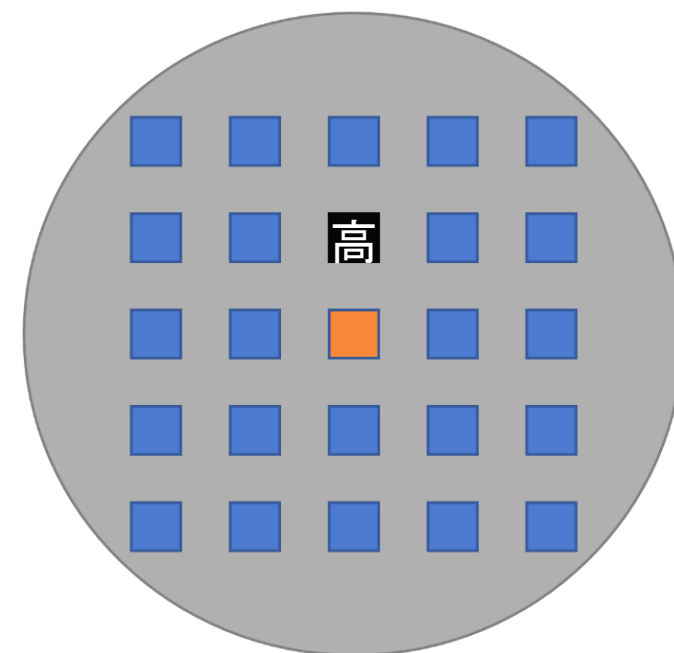
⇒今後、学会発表の機会等にご意見いただきたい。

風洞実験の概要

- 東京工芸大学の大型境界層風洞
- 風圧測定模型は一辺15cm(=1H)の立方体（風圧測定点は計356点）。
- 風圧模型はターンテーブルの中央に配置(下の図のオレンジ色の位置)
高層建物を黒色の位置に設置



1H=15cm



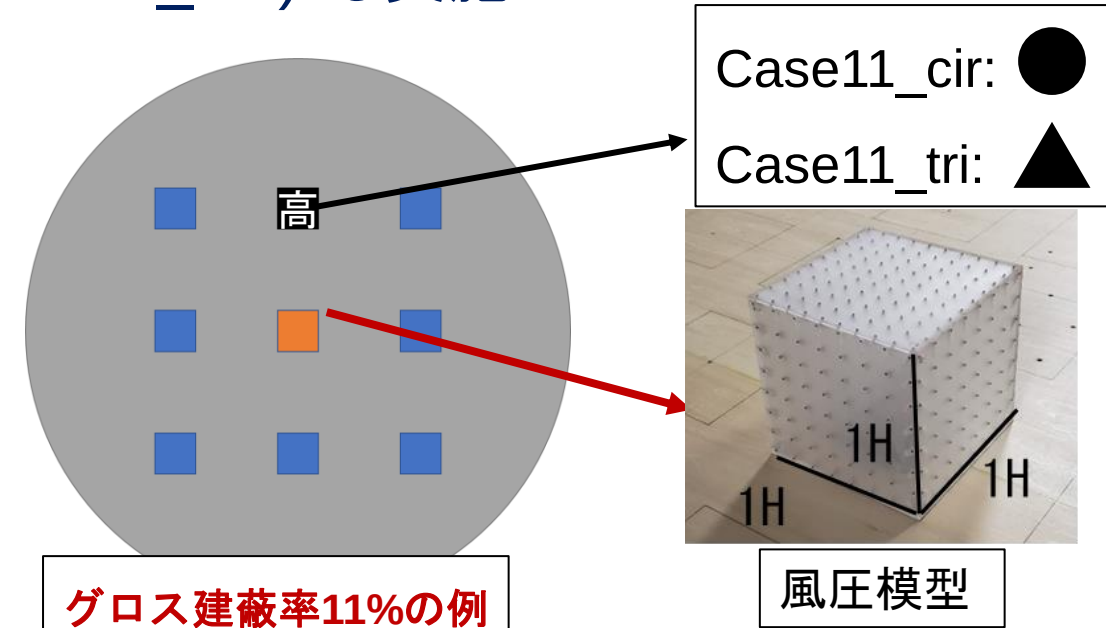
実験ケース

- 高層建物の高さの変更(3H, 5H, 7H)
- グロス建蔽率の変更(11%, 25%, 44%)
 - 高さ5Hで断面形状変更ケース(正方形, 円, 正三角形)
- 比較のため、
 - 周辺の建物が無く、風圧模型のみのケース(Case_iso)
 - 高層建物が無く、建物高さが一様なケース(Case11_uni) も実施

表1 風洞実験実施ケース(グロス建蔽率11%の例)

ケース名	説明
Case_iso	周辺建物が無いケース(単体)
Case11_uni	高層建物が無いケース
Case11_3H	直方体(高さ3H)の高層建物を設置したケース
Case11_5H	直方体(高さ5H)の高層建物を設置したケース
Case11_7H	直方体(高さ7H)の高層建物を設置したケース
Case11_cir	円柱(高さ5H)の高層建物を設置したケース
Case11_tri	三角柱(高さ5H)の高層建物を設置したケース

※高層建物形状を同様に变化させた、グロス建蔽率25%及び44%の街区モデルを対象とする風洞実験についても実施した

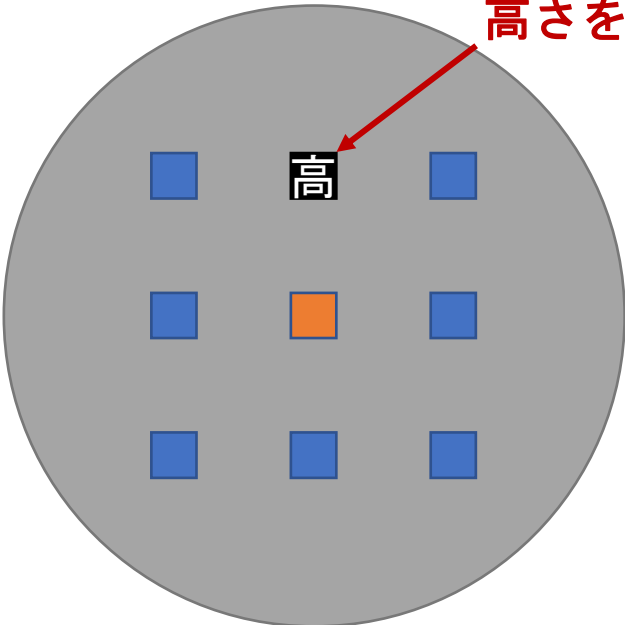
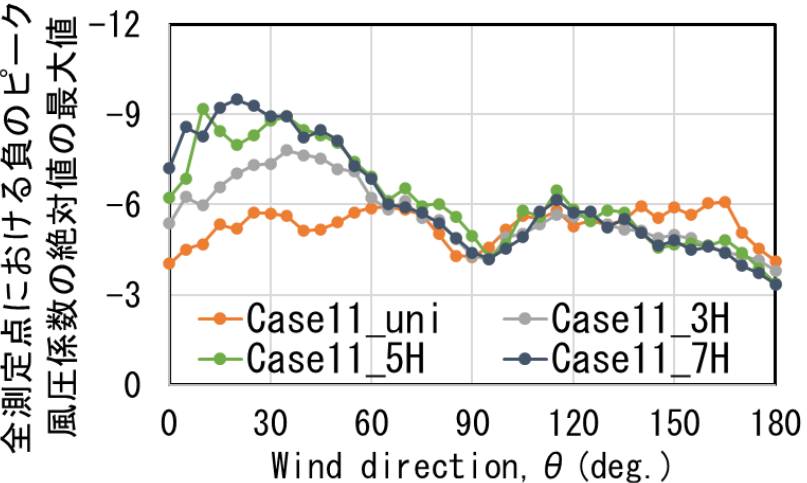


※中央橙色に風圧模型、黒色に高層建物を配置。
その他は150×150×150(mm)のダミー模型。

全測定点における風向角ごとの負の $peakC_p$ の絶対値の最大値

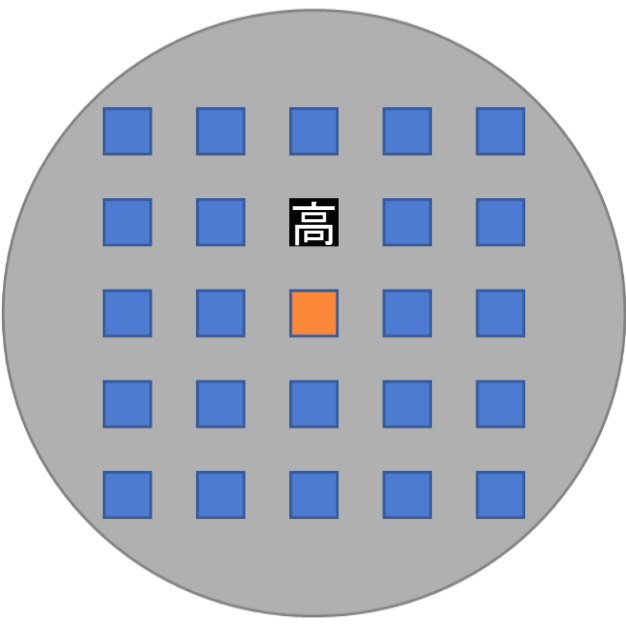
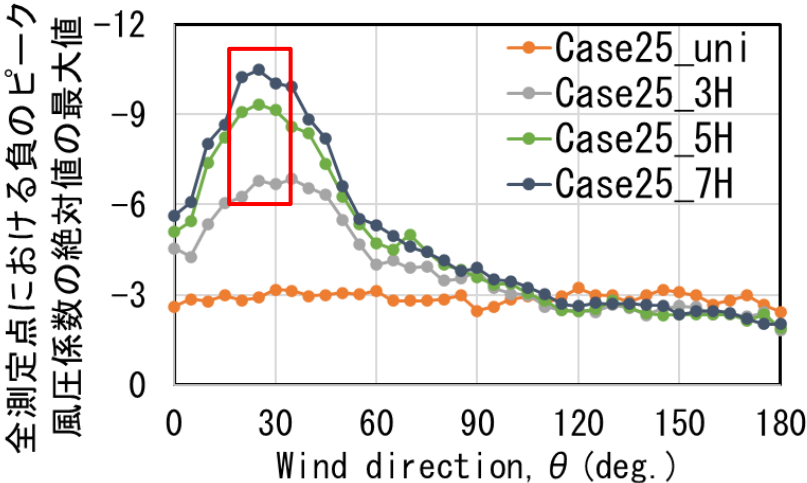
グロス建蔽率11%

10度及び20度
でピーク



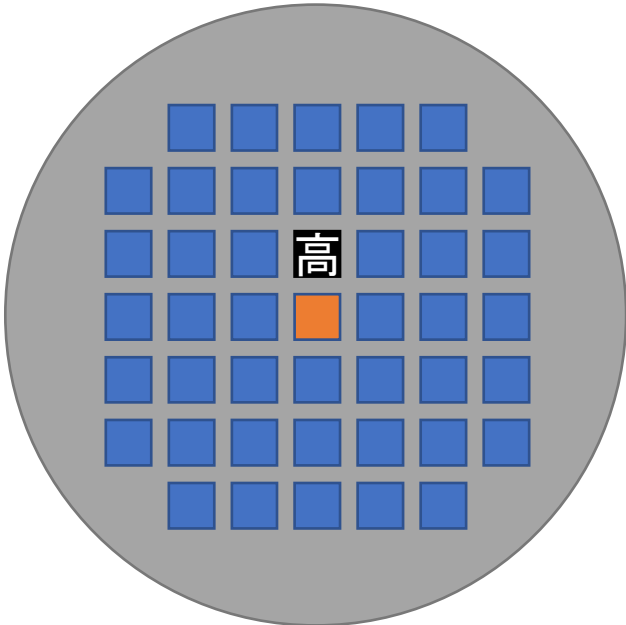
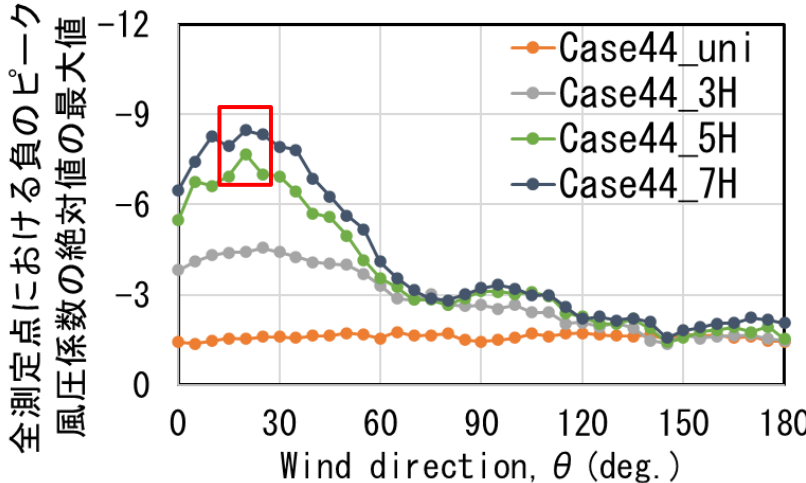
グロス建蔽率25%

25度でピーク
7Hで-10.5



グロス建蔽率44%

20度でピーク



Interference Factor

$$IF = \frac{\text{peak}C_p \text{ with surrounding buildings}}{\text{peak}C_p \text{ without surrounding buildings (Case_iso)}}$$

IF値は風圧模型周辺に建物があるケースのピーク風圧係数と、周囲に建物がない風圧模型のみのケースのピーク風圧係数の比。

建築学会の建築物荷重指針記載のピーク外圧係数は周辺に建物のない条件（Case_isoに相当）の結果を基にしている。

IF値が1を超えると建築部荷重指針の想定を超える風圧力が作用している。

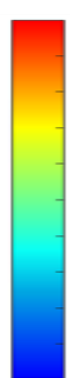
各測定点ごとの全風向中(0～360度)の絶対値の最大値を使用。

負のピーク風圧係数が-10を超えたCase25 7Hに着目。

IF値が1を超える範囲の空間分布 (Case25_7H)

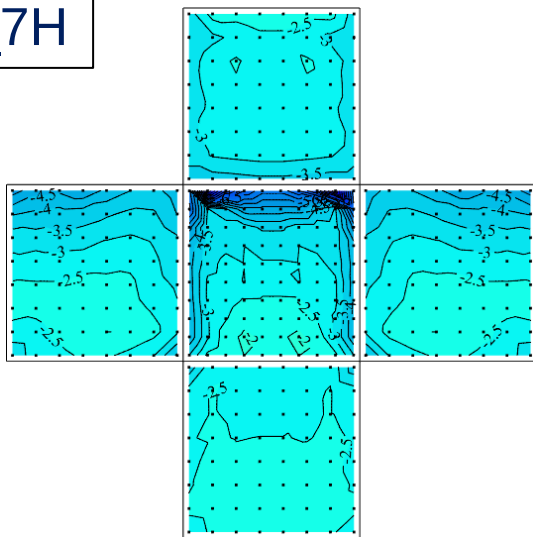
327

Case25_7H

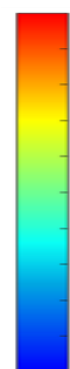


10[-]

-10

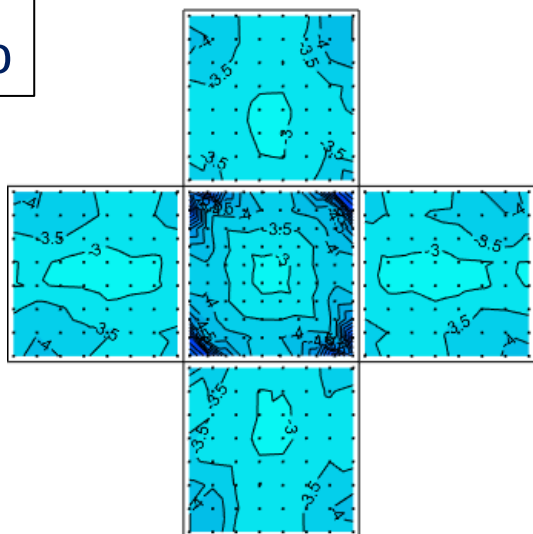


Case_iso



10[-]

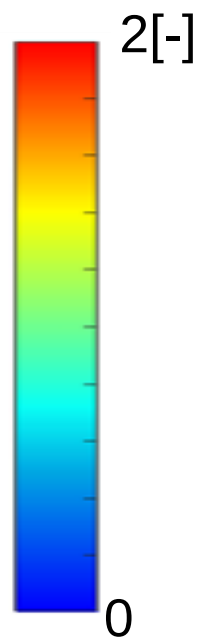
-10



※ 風圧模型単体

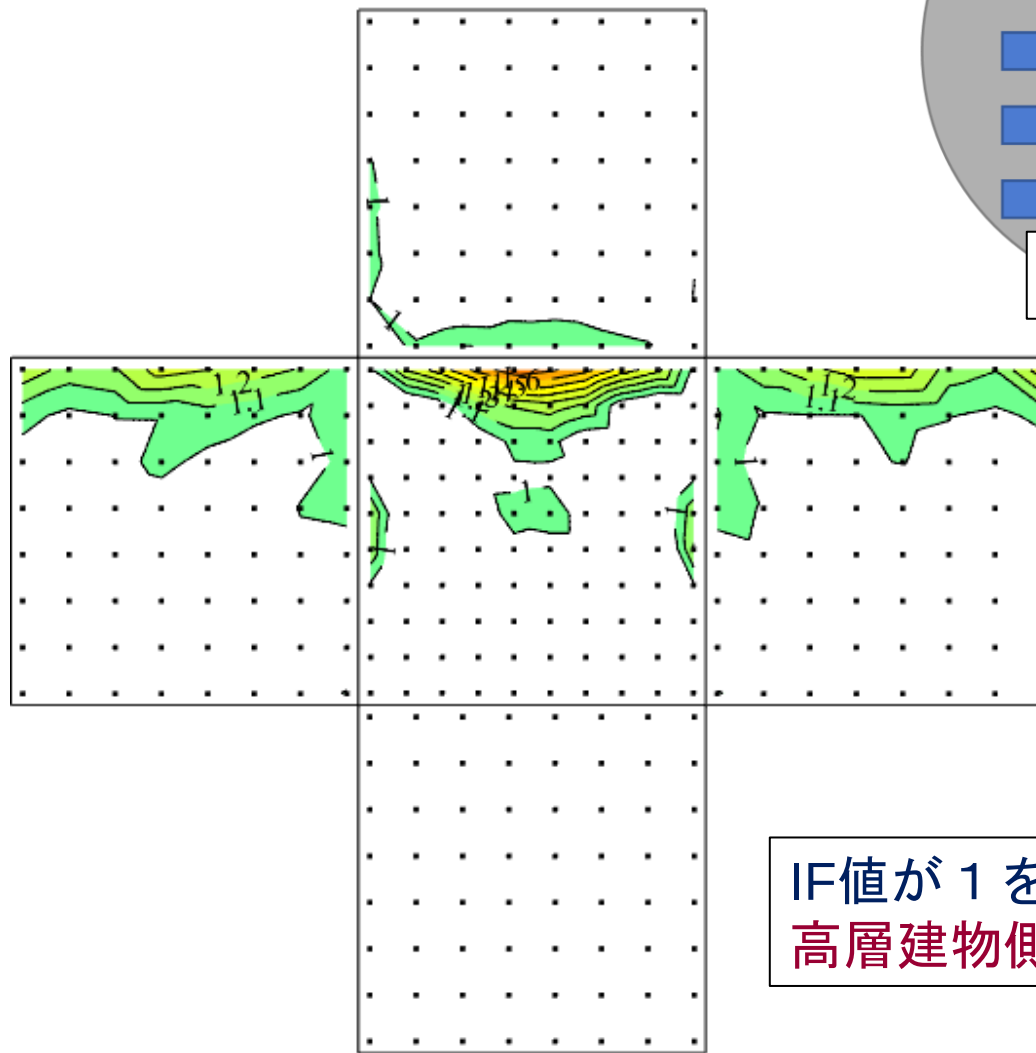
Case25_7HのIF値

$$IF = \frac{\text{Case25_7H}}{\text{Case_iso}}$$

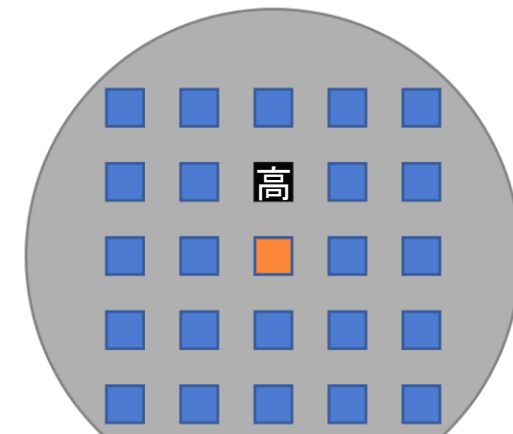


2[-]

0



IF値が1を超える領域が
高層建物側の角部に集中



グロス建蔽率25%

風荷重と屋根材の最大耐力の比較

金属屋根を評価対象として、下記文献の試験結果を参考とした。

金属屋根の耐力データ

金属屋根の種類	評価範囲	荷重負担面積	実験の 最大耐力 μ_{R0}	最大耐力 μ_R
折板屋根	隅角部	10.8 m ²	8000 N/m ²	7600 N/m ²
平板ぶき屋根	屋根面全体	4.12 m ²	7000 N/m ²	6650 N/m ²

・ 屋根材の最大耐力： $\mu_R = \mu_{R0} \cdot \alpha_c$

μ_R ：屋根材の最大耐力[N/m²]

μ_{R0} ：実験による最大耐力^{文4,5}[N/m²]

α_c ：施工による低減係数(=0.95)[-]

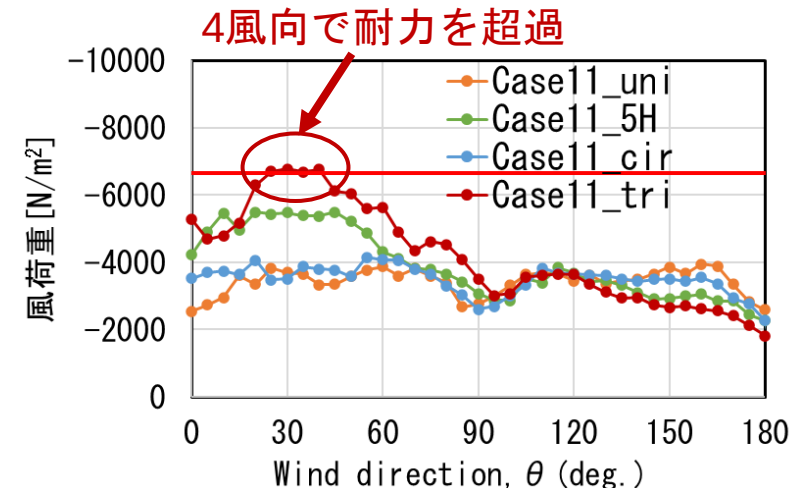
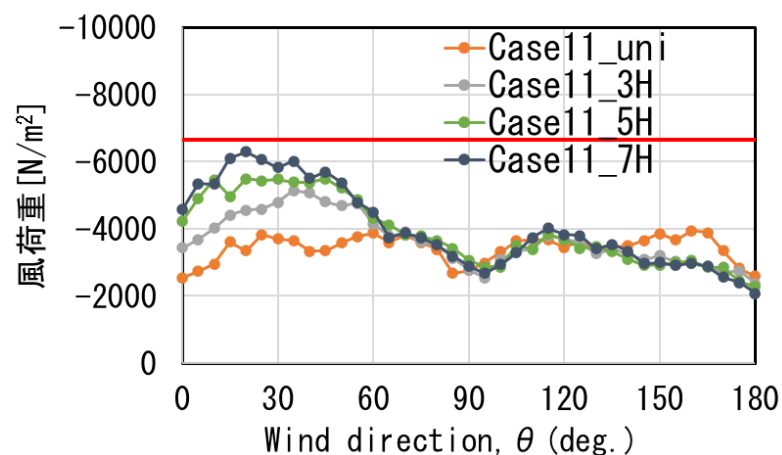
鋼板製屋根構法標準改定委員会：鋼板製屋根構法標準(SSR2007)，日本金属屋根協会，2007

鋼板製屋根・外壁 設計・施工・保全検討委員会：鋼板製屋根・外壁の設計・施工・保全の手引き(MSRW2014)，日本金属屋根協会 日本鋼構造協会，2014

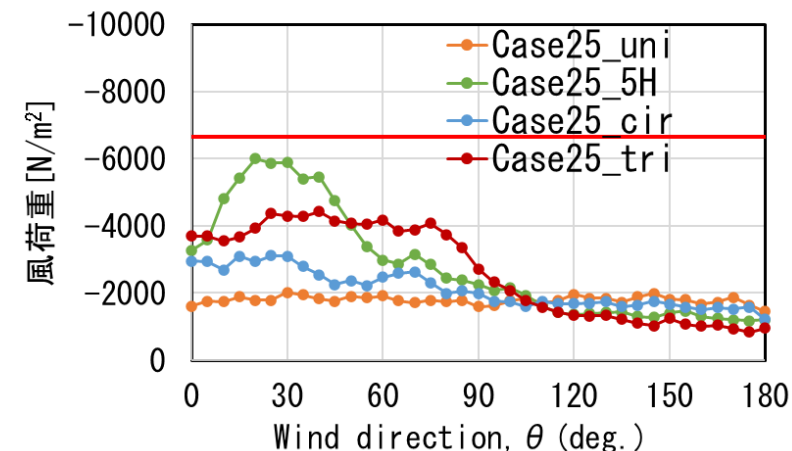
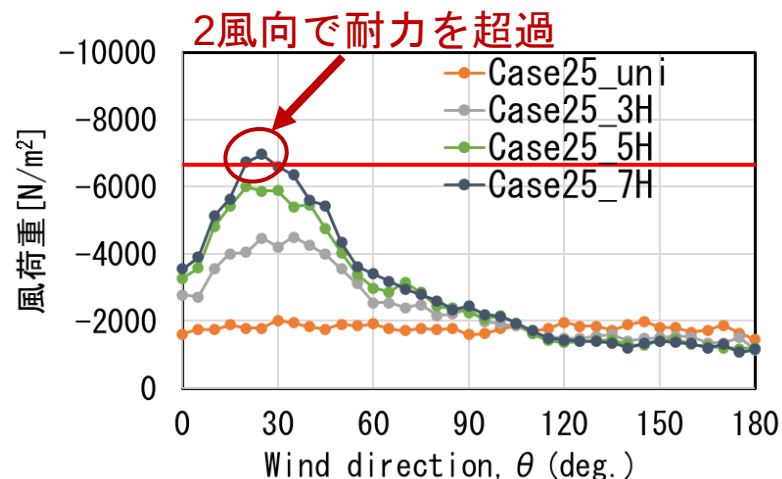
風向角ごとの風荷重の最大値(東京23区, 再現期間50年風速の場合)

329

グロス建蔽率11%
平板ぶき屋根



グロス建蔽率25%
平板ぶき屋根



(a) 高さ変更ケース

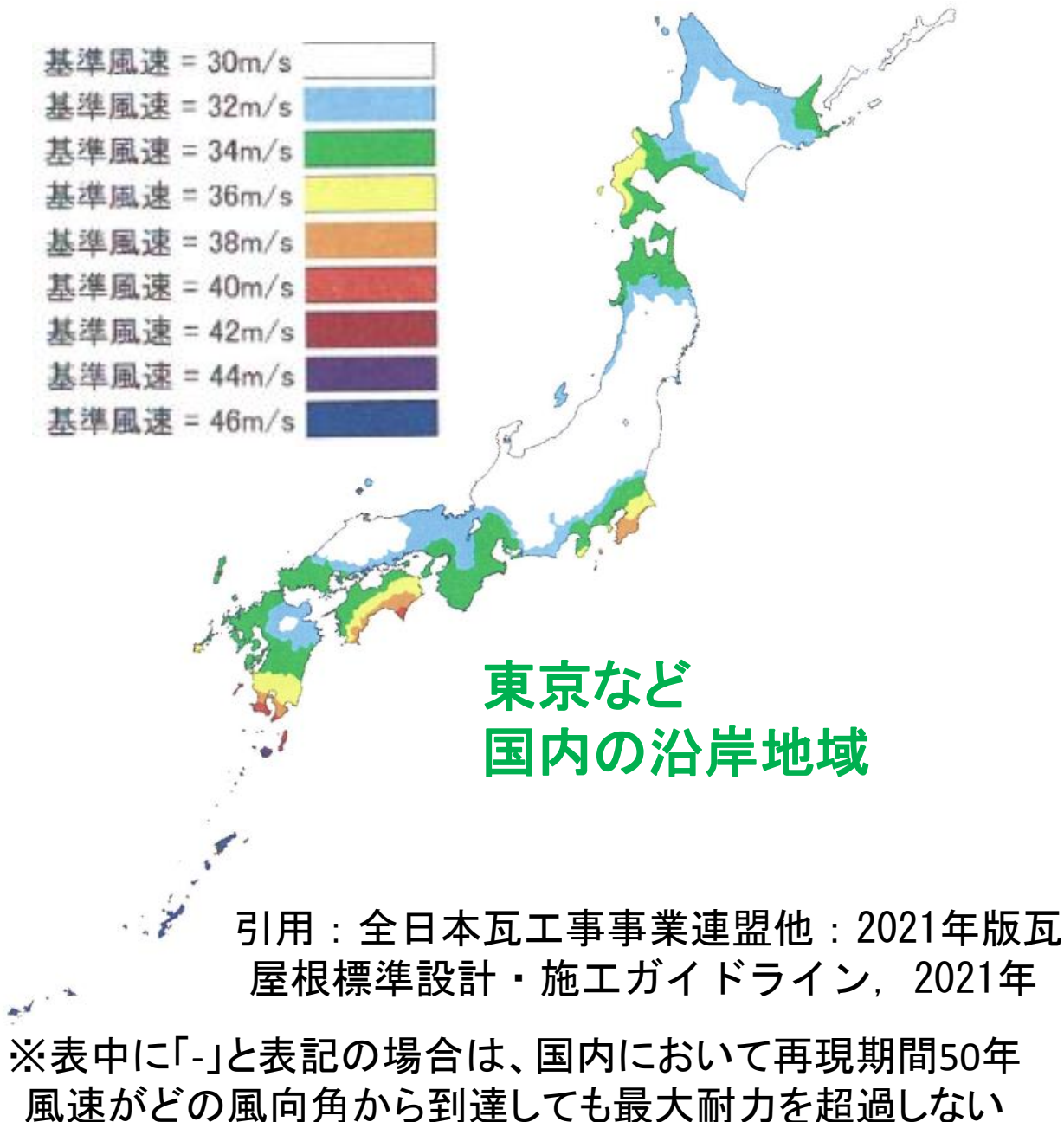
(b) 断面形状変更ケース

折板屋根の隅角部では耐力が高く最大耐力を超過するケースは存在しなかった。

最大耐力を超過する風速の閾値と各地域の再現期間50年風速

表3 最大耐力 μ_R を超過する風速の閾値

ケース名	折板屋根(隅角部)	平板ぶき屋根
Case11_uni	-	44m/s
Case25_uni	-	-
Case44_uni	-	-
Case11_3H	42m/s	40m/s
Case25_3H	46m/s	42m/s
Case44_3H	-	-
Case11_5H	40m/s	38m/s
Case25_5H	40m/s	36m/s
Case44_5H	44m/s	40m/s
Case11_7H	40m/s	36m/s
Case25_7H	38m/s	34m/s
Case44_7H	42m/s	38m/s
Case11_cir	-	44m/s
Case25_cir	-	-
Case44_cir	-	-
Case11_tri	38m/s	34m/s
Case25_tri	46m/s	42m/s
Case44_tri	-	46m/s



将来気候下における安全性評価

- ・ 竹中工務店の畔上さん他の研究を参考に、将来気候下における風速は、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース、database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF)」から推定される4度昇温温暖化シナリオにおける再現期間50年風速の増加率(=1.08)と想定。
- ・ これを告示記載の東京23区の再現期間50年風速(34m/s)に乗じて36.8m/sとした。

畔上泰彦 ほか3名：地球温暖化が日本列島上陸時の台風の性状に及ぼす影響に関する研究，
風工学研究論文集，Vol. 27， pp. 126-133， 2022

浜崎美晴さんの修士論文(2023年度)「領域気象モデルWRFによる
都市上空の風速の確率密度分布に関する研究」

最大耐力を超過する風向角数(東京23区の場合)

将来気候(4度昇温)では折板屋根(隅角部)と平板ぶき屋根のどちらにおいても耐力を超過するという結果となった。

表4 最大耐力 μ_R を超過する風向角数(東京23区の場合)

ケース名	折板屋根(隅角部)		平板ぶき屋根	
	現在気候	将来気候	現在気候	将来気候
Case11_7H	0	0	0	5
Case11_tri	0	2	4	8
Case25_5H	0	0	0	3
Case25_7H	0	1	2	5

山根優太君の修士論文(2023年度)「領域気象モデルWRFによる都市上空の風速の確率密度分布に関する研究」で耐風安全性評価まで分析を進めた最新の結果。
⇒今後、学会発表の機会等にご意見いただきたい。

4.2 地域環境計画学分野の教授時代（一部、助教授時代から始まっているものも含む）

- （１）自動車・歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発
- （２）建物周辺の飛雪現象と積雪時の都市環境の予測手法の開発
- （３）LESのための流入変動風とスカラー量の変動の生成手法の開発
- （４）メソスケールの研究の進捗
- （５）2010年代半ばまでのミクروسケールの研究の進捗
- （６）緩和と適応の両面から見た都市の暑さ対策の総合評価
- （７）広州、武漢を対象とした研究

<2010年代半ば以降>

- （８）歩行者が経験する熱ストレスの蓄積に基づく屋外温熱環境の評価
- （９）樹木の蒸散量の測定とこれに基づく蒸散モデルの開発
- （10）市街地風環境の制御
- （11）若干、手を付けた今後の課題

(11) 若干、手を付けた今後の課題

(11)-1 AIを利用した屋外環境の長期予測・高速予測

- このテーマには余り前向きではなかったが、胡家龍君がこのテーマではじめて博士論文(2016年度)を書き、
「Method for Predicting Seasonal Outdoor Thermal Environment and Building Cooling Load」
- 続いて、謝育全さんの博士論文(2021年度)で本格的に取り組んだ。
「Long-Term Prediction of Mean Radiant Temperature around Buildings in Summer Season Using a Backpropagation Neural Network Improved by a Genetic Algorithm」

Yuquan Xie, Yasuyuki Ishida, Jialong Hu, Akashi Mochida, A backpropagation neural network improved by a genetic algorithm for predicting the mean radiant temperature around buildings within the long-term period of the near future, Building Simulation, 15, (2022), 473-492

Yuquan Xie, Yasuyuki Ishida, Jialong Hu, Akashi Mochida, Prediction of mean radiant temperature distribution around a building in hot summer days using optimized multilayer neural network model, Sustainable Cities and Society, (2022), 103995

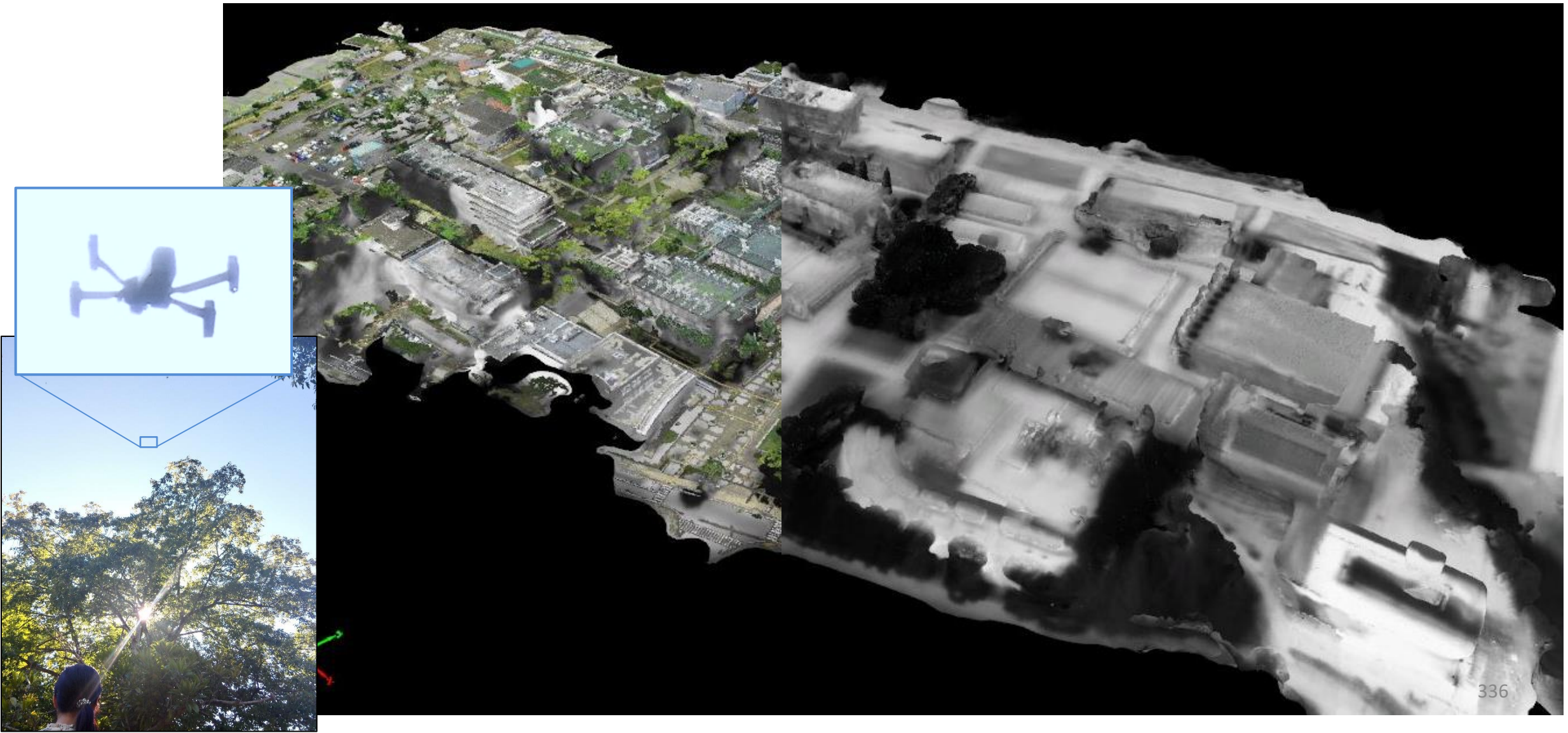
(11)-2 ドローンを利用した屋外放射環境計測

- 王云霄さんの博士論文（2019年度）「都市・建築空間の構成要素から放出される熱放射量の熱画像と可視画像を併用した測定法の開発」で放射環境の画像計測に取り組んだ（宮城教育大学の菅原先生の手法により）。
- 石田泰之君がこの手法とドローン計測を結びつける研究計画で科研の挑戦的研究(萌芽)を獲得（ドローンを活用した熱放射モジュール作成とこれに基づく熱環境設計プロセスの変革）。
- 藤山真美子先生にも共同研究者になって頂き、研究を開始。

古澤 志帆さんの卒業論文（2021年度）「ドローンで取得した可視・赤外線画像に基づく都市構成要素の3Dモデリング及び長波放射特性の分析」

石田泰之，小林 光，藤山真美子，持田 灯，都市空間内における長波長放射環境のRapid-Estimation手法の提案，日本建築学会技術報告集，29（72），（2023），898-903

東北大学川内北キャンパス全域の熱画像撮影・3Dモデル化



(11)-3 河川氾濫流解析 CWE×水工学

- 近年、豪雨による大規模な水災害が相次いでいる。。
- 建築学会の委員会や学術会議の分科会の活動を通じて、建築分野の治水対策を立ち上げる必要性を感じて、いろいろ発言してきた。
- 現在、河川氾濫のハザードは浸水深のみで考えられているが、流速も重要なファクターであり、河川周辺市街地における氾濫流解析が必要と思われる。

⇒CWEの経験が活きる分野のように思う。

- 手始めに、ピロティーを取り上げ、石田泰之君が一般財団法人・大成学術財団に「猛暑・洪水・強風適応型都市の創出に資するピロティ空間の功罪の総合評価手法の開発」と題する申請をして採択された。

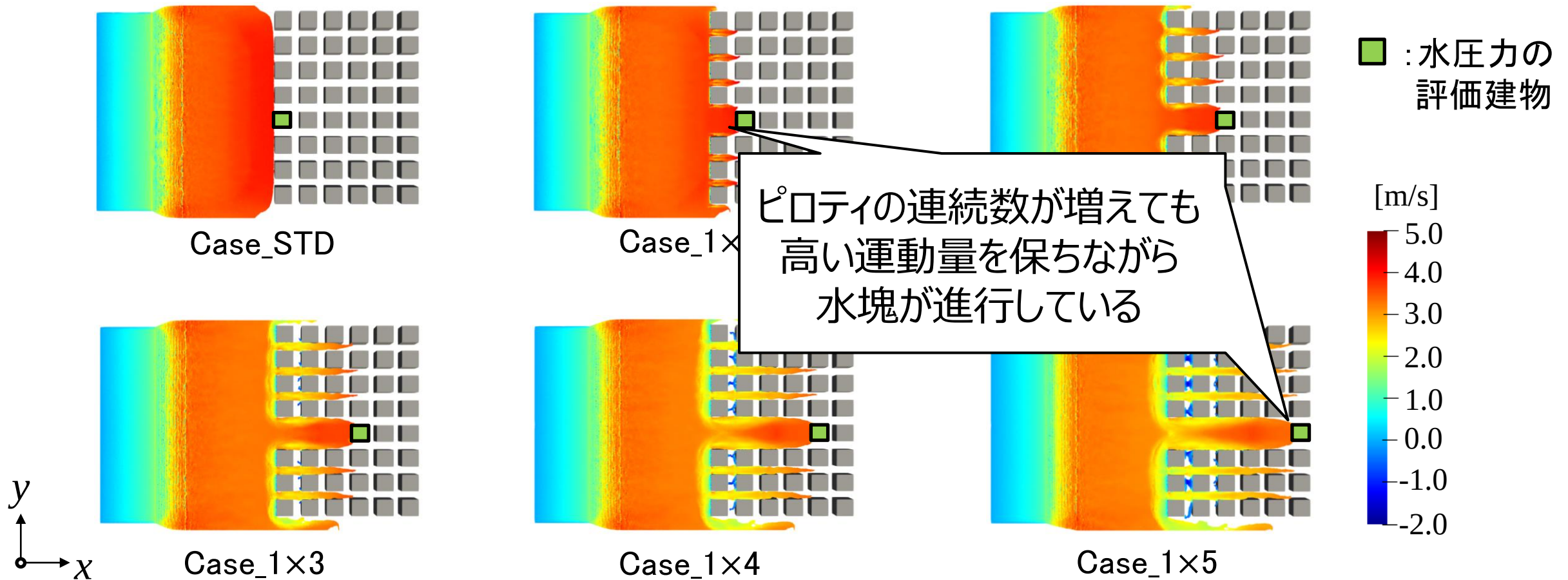
⇒東北大学の構造の専門家で、津波解析の実績のある高橋 典之先生に共同研究者になって頂いた。

- この研究により、石田泰之君が「大成学術財団選奨」金賞を受賞。

市街地内における主流方向の水流速分布

(研究当時高橋研に在籍していた三富皓介さん計算結果)

評価建物到達時における水塊の流速分布



三富, 高橋, 石田, SPH法による流体解析を用いた市街地の水害評価に向けた検討ー河川氾濫時にピロティ建物が市街地内の水流分布および周辺建物への水圧力に及ぼす影響ー, 日本建築学会技術報告集, 29, 72, pp.671-676, 2023.6

内容

1. 早稲田での放し飼いの7年（高校・大学時代）
2. 村上周三先生の下での14年の修業時代（東大生研）
3. 新設大学で非大都市圏における環境問題に触れた4年
（新潟時代工科大学）
4. 東北大学での25年
 - 4.1 環境工学分野の助教授時代
 - 4.2 地域環境計画学分野の教授時代

5. おわりに

5-1 到達点と若干のやり残し

1) CFDを中核とした都市気候の予測・解析技術

- 乱流数値解析技術の中核として、様々なサブモデルを組み込み、気象モデルとも接続可能とし、総合的な予測・評価・分析の基盤を構築した。
- 飛雪、雪面熱収支等のサブモデルも開発し、雪国の地域環境にも応用可能な形に機能拡張した。

2) 都市内微気候の制御

- 多くのケーススタディから、中高木、芝地、高反射面、風通し等の暑さ対策の特性を整理した。

心残りなこと：再帰性熱反射フィルムを普及させられなかった。

3) 地域の気候特性の定量化

- LCZ+WRF+UCNの最新のメソ気候解析技術に基づき、都市空間の熱収支の分析を可能とした。
- 将来予測や海外都市への展開も可能となった。

心残りなこと： 都市の熱収支のMap化とこれに基づく対策提案が仙台のみに終わった。他都市への展開、相互比較をもっとやりたかった。

4) 樹木効果のモデル化

- 流体力学的効果に関するCanopyモデルは、広く使われるようになった。
- 蒸散のモデル化については、最近、気孔の開閉に関する樹木の気持ちが少しわかるところまで来た。

心残りなこと： 蒸散モデルの成果を広く使って貰うために、もう一歩、分かりやすいOutputを出したかった。

5) 都市の暑さ対策の評価

CASBEE-HI の評価指標の考案に始まって、

- ①何を善とするのか？
- ②そのための評価の枠組は？
- ③それに適した指標は？

について考え、いろいろな評価指標を提案し、これらを用いた分析を行って来た。

心残りなこと:

- ①3つの評価軸の枠組みの中に歩行者の熱負荷の評価を組み込む所迄行きたかった。
- ②市街地のRisk 増幅率という指標は気に入っているのだけれども、誰にも(持田研の学生にも)使われていなくて残念。

6)市街地の風環境の制御

①風通しの向上

- 上空から市街地内への運動エネルギー輸送量から市街地のBreathability (Q)を評価し、同時に着目する市街地内のエネルギー散逸率の総量から風下市街地に与える悪影響(L)を評価する手法を開発した。
- これに基づき、市街地形態がQとLに及ぼす影響を分析した。

②強風時の周辺市街地の安全性

- 特定の風向において、高層建物風下側の低層建物の屋根面に非常に大きな局部負圧が発生することを明らかにした。

少し、心残りなこと:

①については、様々なLCZ区分の実街区の分析まで行きたかった。

心残りなこと:

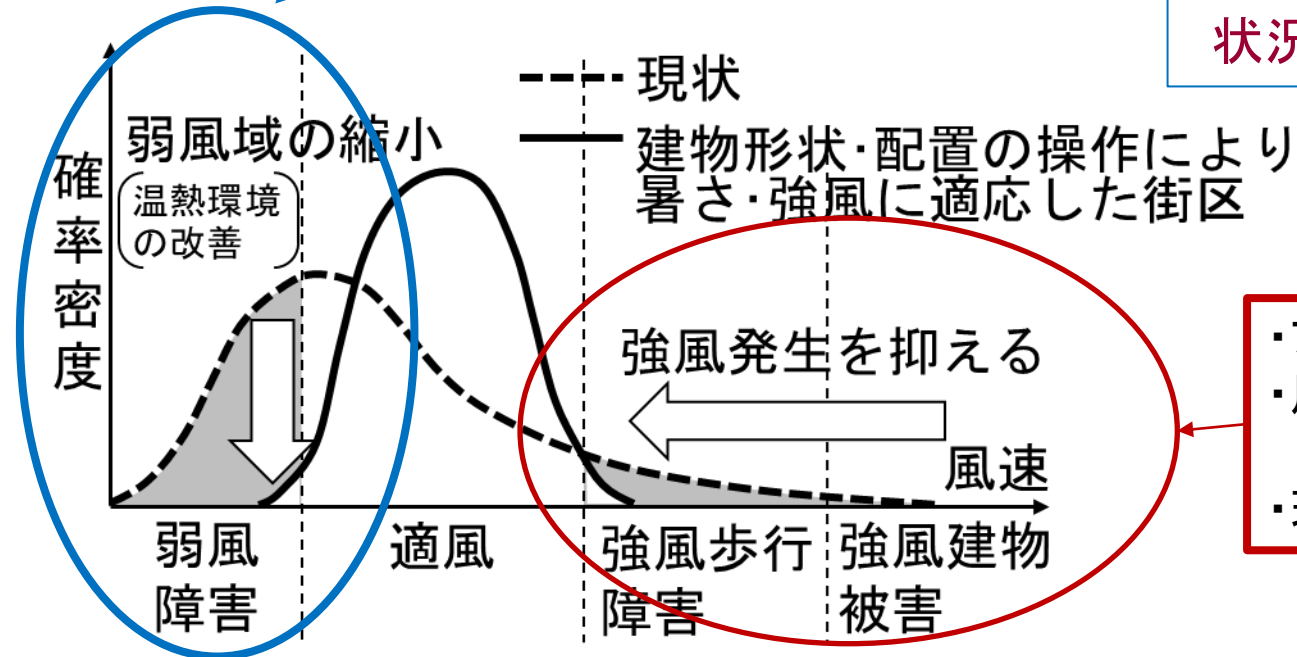
①と②の観点も踏まえて、適風環境を実現するための方法について、もう少し議論したかった。

心残りなこと

—風環境制御に係る分野の脱縦割り、分野連携—

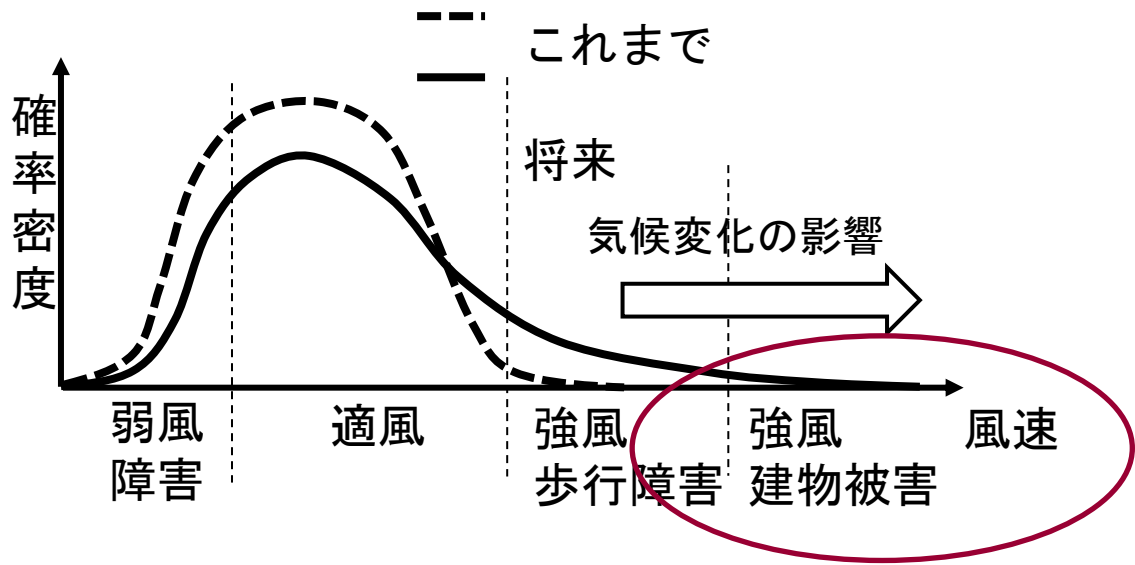
- ・アクセルを踏む
- ・ヒートアイランド対策としての風の道(20年の歴史)
(環境工学委員会では都市環境・設備運営委員会)

- ・状況に応じて、臨機応変にアクセル、ブレーキを使い分けるべきだが、アクセルを踏む操作とブレーキを踏む操作が、連携なく、ばらばらに行われている。
- ・アクセルとブレーキを同時に踏むような状況も生じていないか？



- ・ブレーキを踏む
- ・風工学における伝統的な風環境問題
(50年の歴史)
- ・環境工学委員会では空気環境運営委員会

気候変動が進む中、都市空間内に如何に安全で快適な適風環境を実現するか？



- ・気候変化⇒台風の大型化
日常的(平時)の風環境と稀なる強風の乖離が広がる？
- ・大型台風到来時の高層建物の周辺市街地への影響
⇒近隣建物の構造被害の問題の増加？
⇒今の風環境評価指標で良いのか？
- ・構造との連携も必要

環境規準やアセスの方法等の制度的なことも含めて、もう少し関係する皆さんとの議論を進めたい。

	C(尺度パラメータ)	K(形状パラメータ)	平均値	55%値	95%値	最大値
8月(2000年代)	3.34	2.23	3.0	3.0	5.4	15.8
8月(2100年代)	3.34	2.25	3.0	3.0	5.4	17.0
変化率	1.00	1.01	1.00	1.00	0.98	1.08

地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベースDatabase for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) の4℃昇温シナリオの結果から算出。
(浜崎美晴さんの修士論文(2023年度)「領域気象モデルWRFによる都市上空の風速の確率密度分布に関する研究」)

5-2 振り返って思うこと

- 1) 問題を解決するためには、拙速に解決策を求めるのではなく、問題が発生するメカニズムをきちんと理解し、明快に説明することが大事。
原因を明確に説明出来た時には、いろいろな人からいろいろなアイデアが出てきました。
- 2) そして、（研究でも仕事でも）問題発生の原因を明確にするためには、よく考え、よく議論し、またよく考え。。。を繰り返し、きちんと理解し納得することが必要。⇒これが私の授業のやり方のベースだったと今にしています。
- 3) 今回、過去50年間を振り返って、大学院から助手の時代に受けた教育とその時代の経験から非常に強い影響を受けていることを再確認しました。
学生を預かる指導教員の責任は重大だと改めて思いますが、結局、教育効果を決めるのは教師の熱量の多寡ではないかというのが、現段階での結論です。

自分が若い頃、こんなに研究をするとは夢にも思っていませんでした。

村上先生、吉野先生、加藤先生、尾島先生、
東大生研の村上・加藤研の先輩・後輩の皆さん、
新潟工科大学でお世話になった個性的な先生方、
早稲田大学の尾島研の先輩・後輩の皆さん、
その他の共同研究者の皆さん、
学内外の委員会等でお世話になった皆様、
東北大学赴任当初から、吠えまくっていたにもかかわらず、寛容にお付き合い頂いた、
都市・建築学専攻の個性的で優秀な先輩、同僚、後輩の先生方、職員の皆様、
特に、吉野先生ご退職後、環境系の3研究室 LBEE(Laboratories of Built Environment Engineering)
と一緒に運営してきた小林光教授、後藤伴延准教授、前助教の大風翼君、
現助教の石田泰之君、そして非常に有能な秘書の渡辺真純さん、
いろいろな時に助っ人役をお願いした鈴木通江さん、
LBEEの卒業生の皆さん、現在、在籍中の皆さん、
そして、2回の転勤・転居を許してくれて、仕事に専念させてくれた妻と子供たち、
お世話になった皆様に深く御礼申しあげます。