

# ヒートアイランド対策について

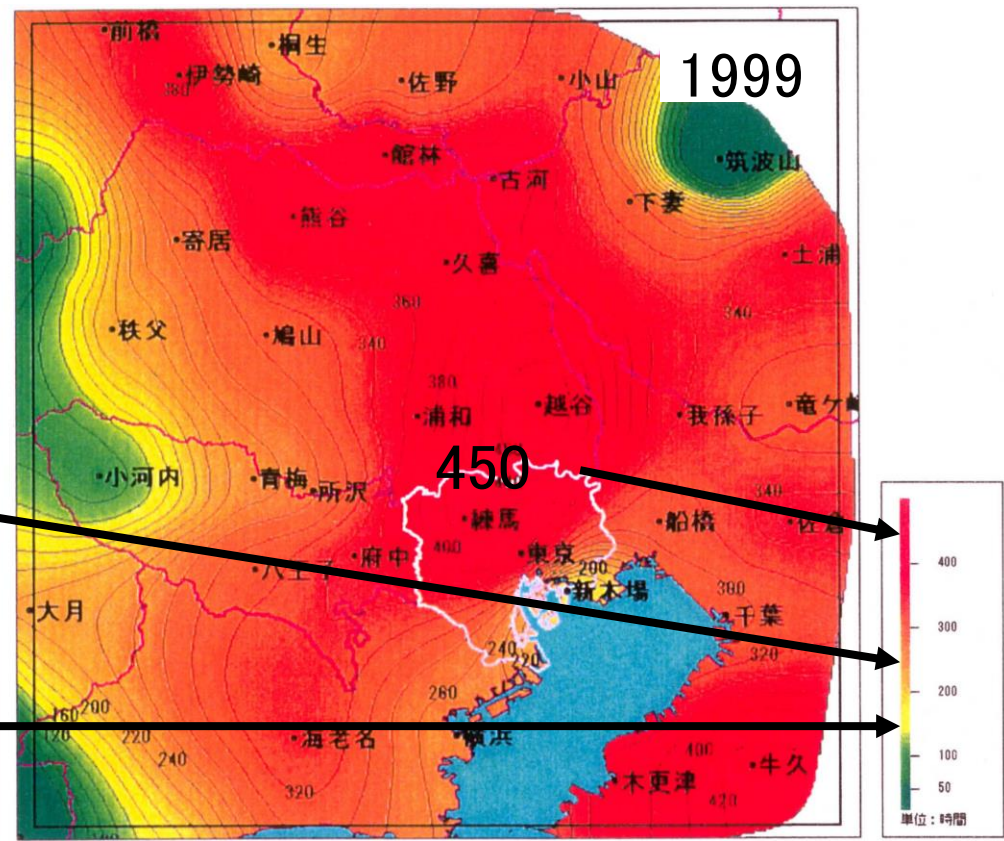
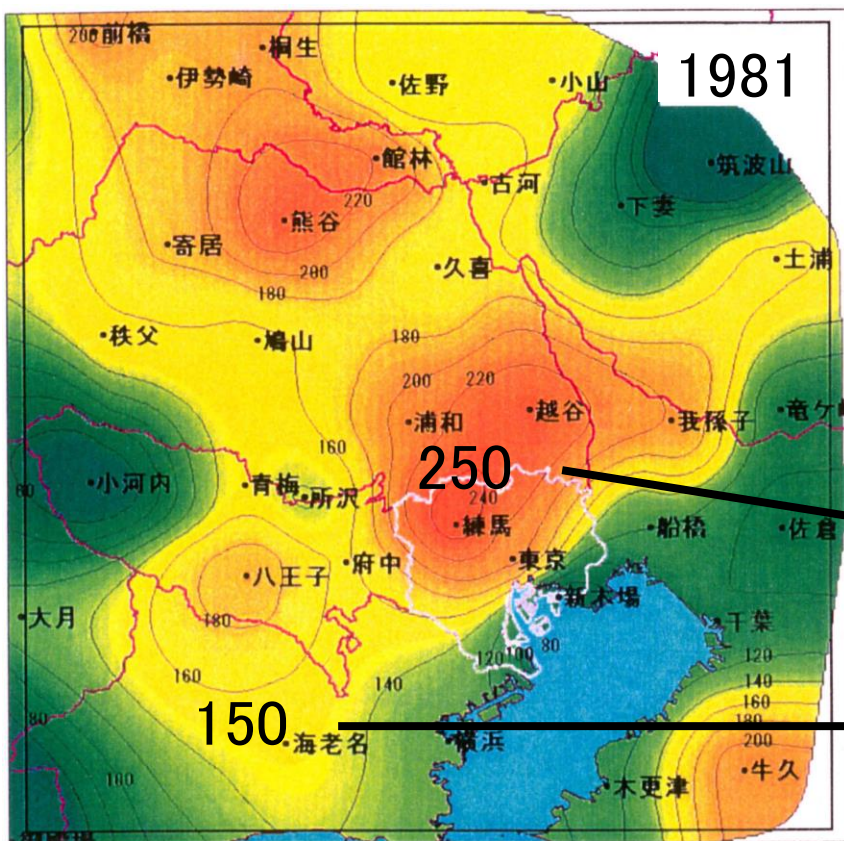
一ノ瀬俊明

国立研究開発法人国立環境研究所  
上席研究員

(名古屋大学大学院環境学研究科連携大学院教授)

- ・各種測器やリモートセンシングによるモニタリング、数値シミュレーションによる検証と予測、GISによる解析など、1990年代以降、都市熱環境に関する研究が盛んに行われてきた。
- ・自然地理学・気象学などの理学分野において古くから現象解明が進められてきた一方、土木工学・建築学などの工学分野においては熱環境改善に資する技術開発研究が進められ、その対象とする空間スケールも都市圏、都市、街区、建物、素材と多様である。
- ・さらなる効果が期待できる方策としての「東京湾海風の有効利用」の検討(東京湾を媒体とした熱循環による暑熱緩和効果に関する研究)を行った。

# 東京のまわりで30°Cを超えた時間数(120km四方)



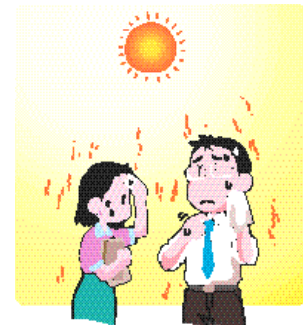
東京1999年  
30°C以上の時間数



環境省 (2001)

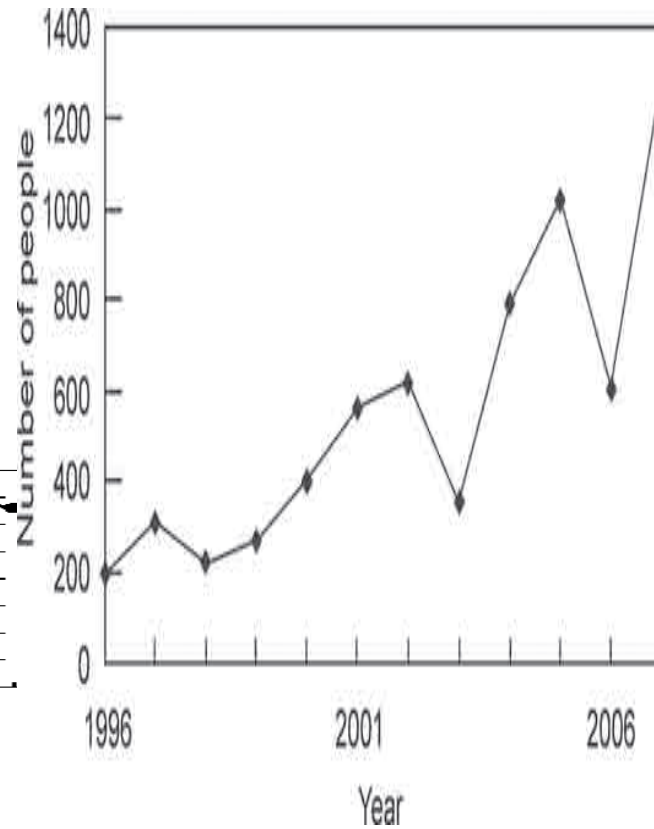
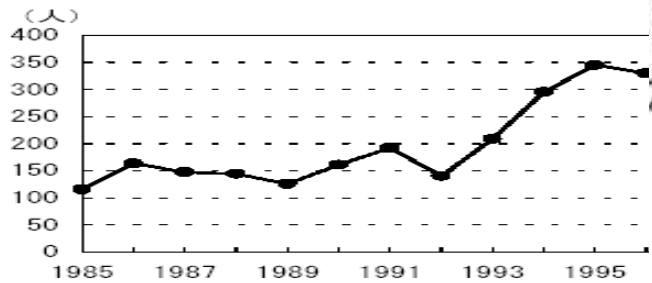
地球の温暖化+都市の温暖化

2010年頃には550時間前後にまで上昇

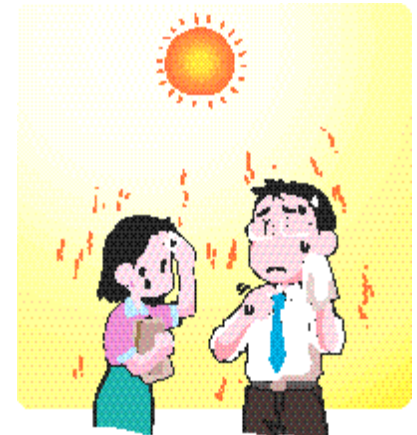




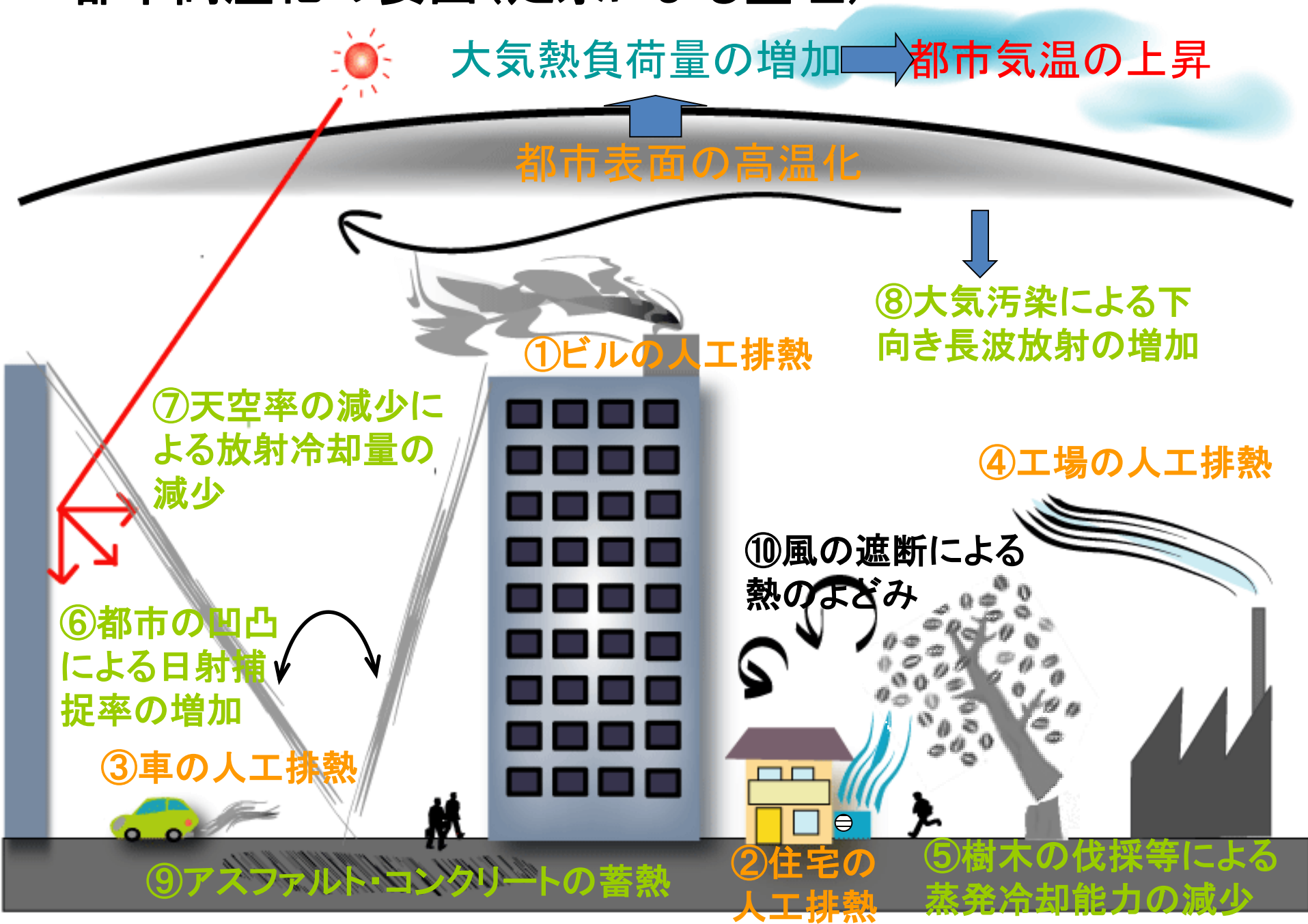
# 東京都内の熱中症による搬送者数(1985～)



2015年は  
3000人の大台

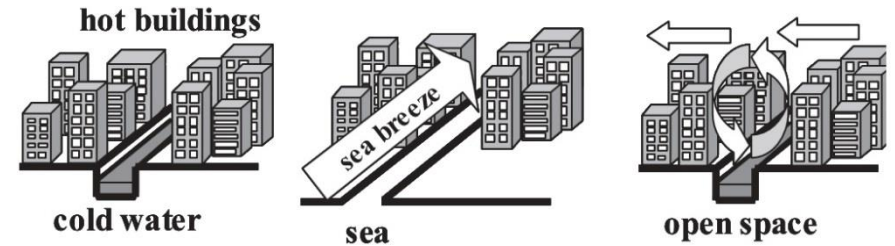
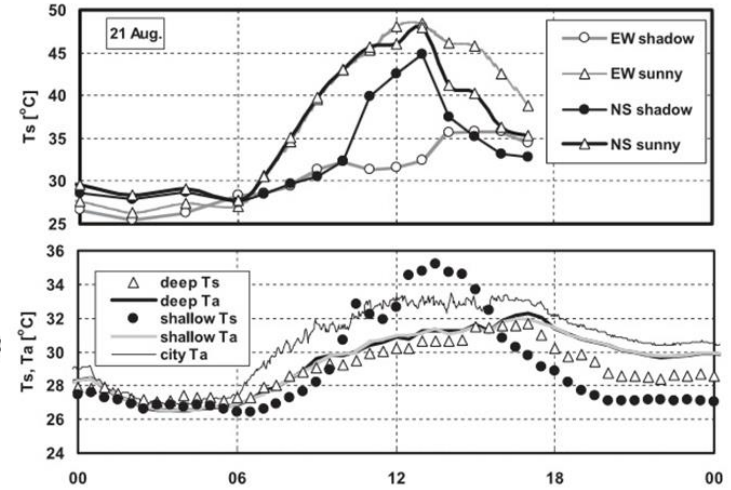
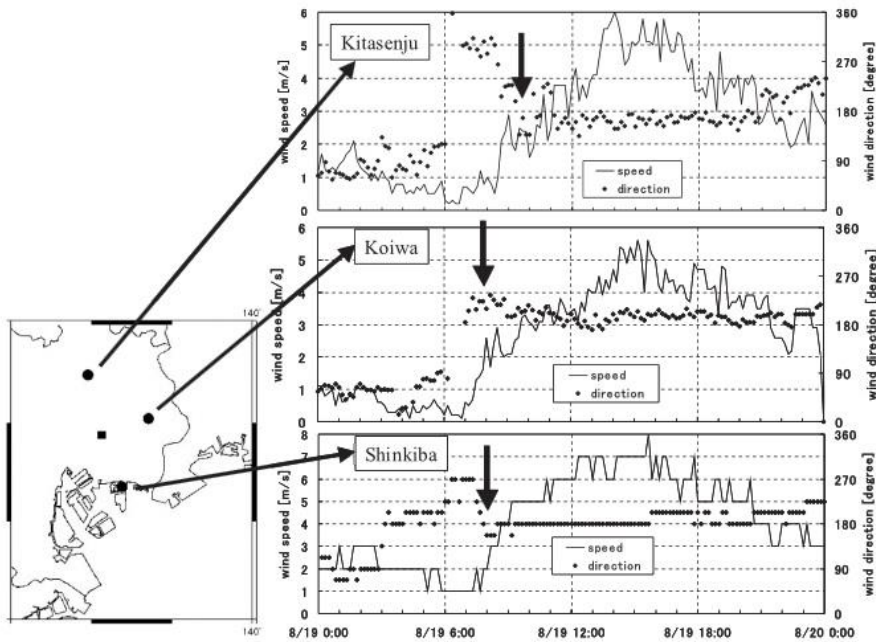


# 都市高温化の要因(足永による整理)



# 日本気象学会・日本建築学会 都市水面効果の物理

Sugawara and Narita (2012)





# 日本建築学会 リモートセンシングとCFD計算

Asawa et al. (2012)

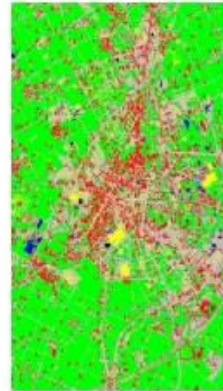
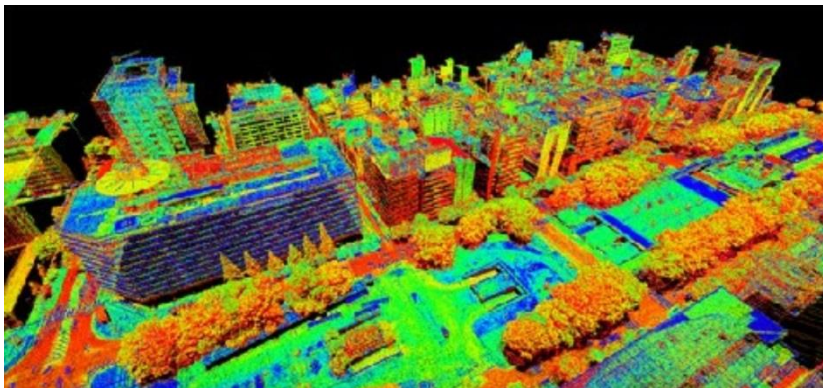


図9(a) 土地被覆分類図  
(夏期)

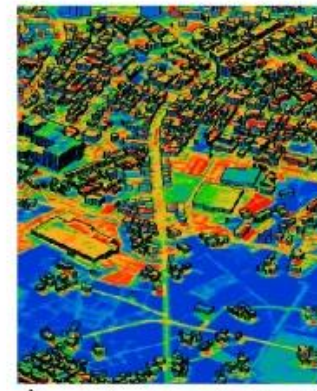


図9(b) 表面温度分布(夏期、昼)

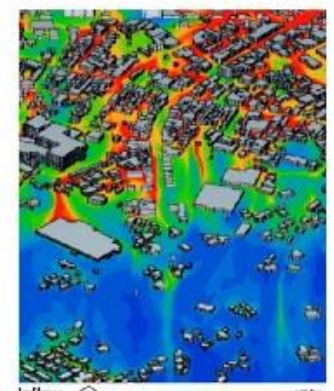


図9(c) 気温分布の計算結果(夏期、昼)

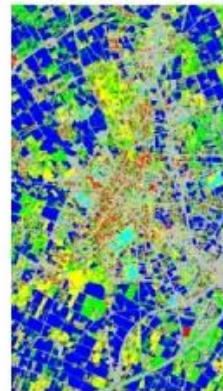


図10(a) 土地被覆分類図  
(梅雨期)



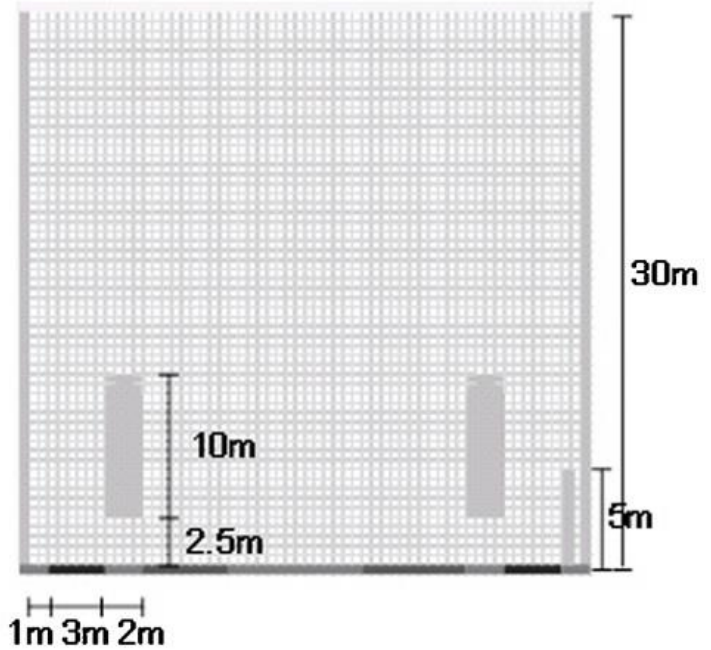
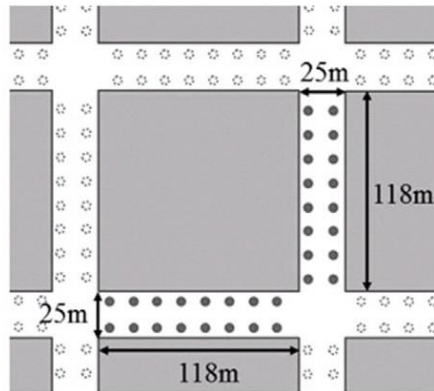
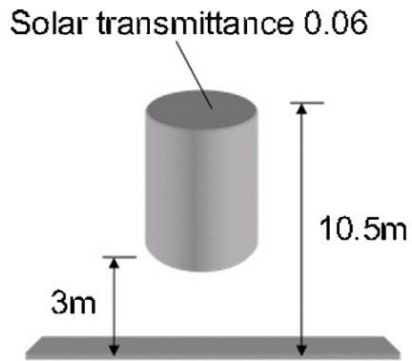
図10(b) 表面温度分布(梅雨期、夜)



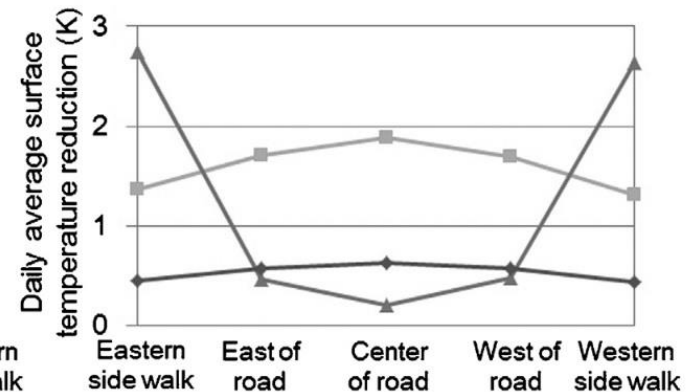
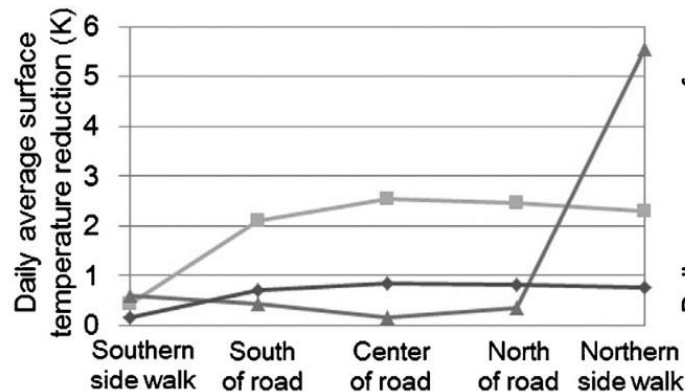
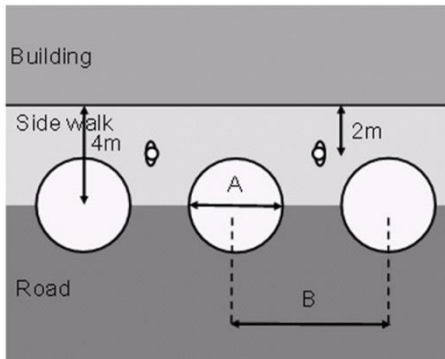
図10(c) 気温分布の計算結果(梅雨期、夜)

# 日本建築学会 都市計画のための評価ツール

Takebayashi et al.  
(2014)



Outline of the street canyon model with a street tree and green wall.



1. 気候を活かしたまちづくりの可能性
2. 都市街区設計へ応用するための実験研究
3. 東京湾を媒体とした熱循環による暑熱緩和効果



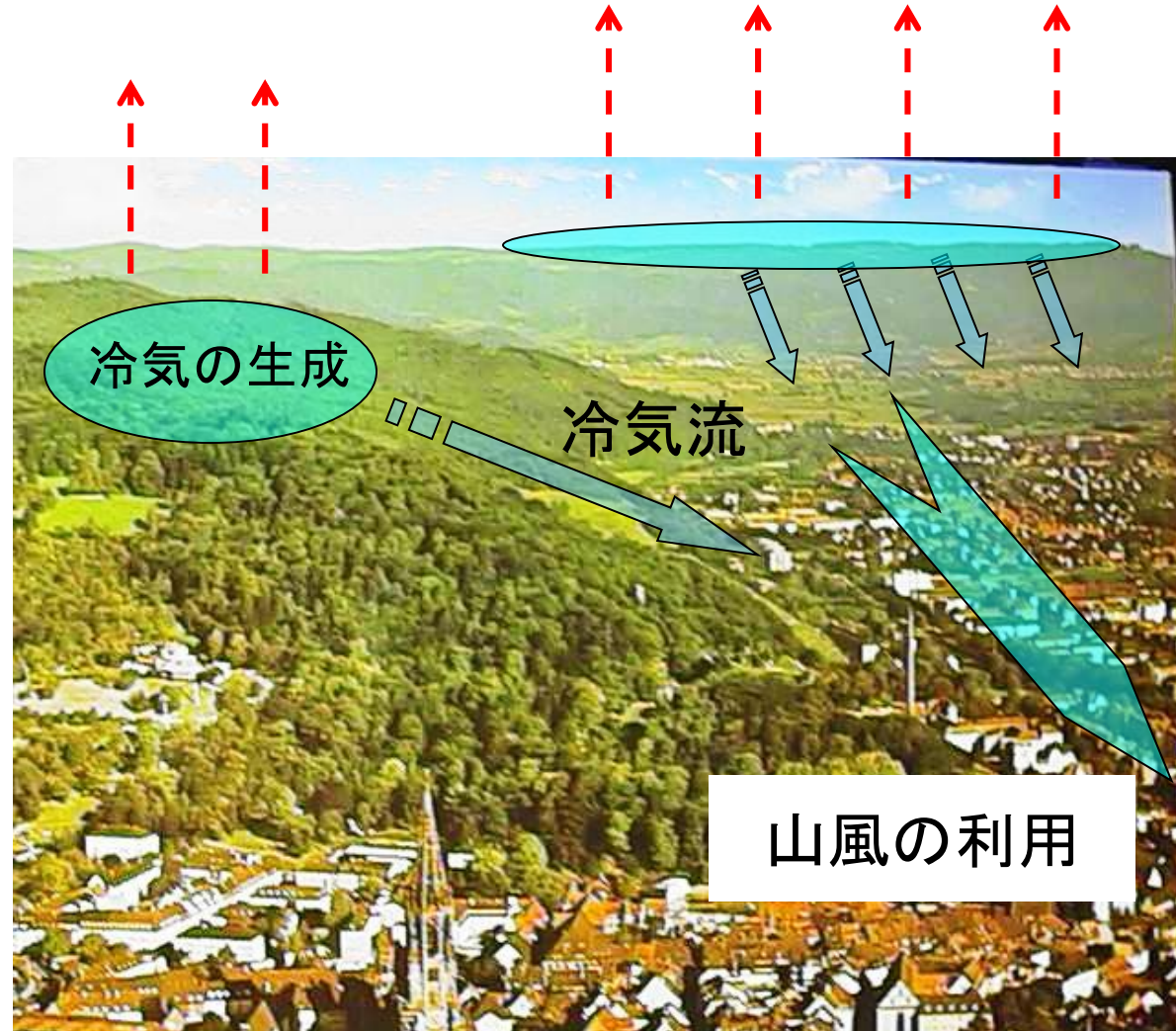
# ドイツの風の道のメカニズム

## シュツットガルトなどでの実践例が有名

フライブルク

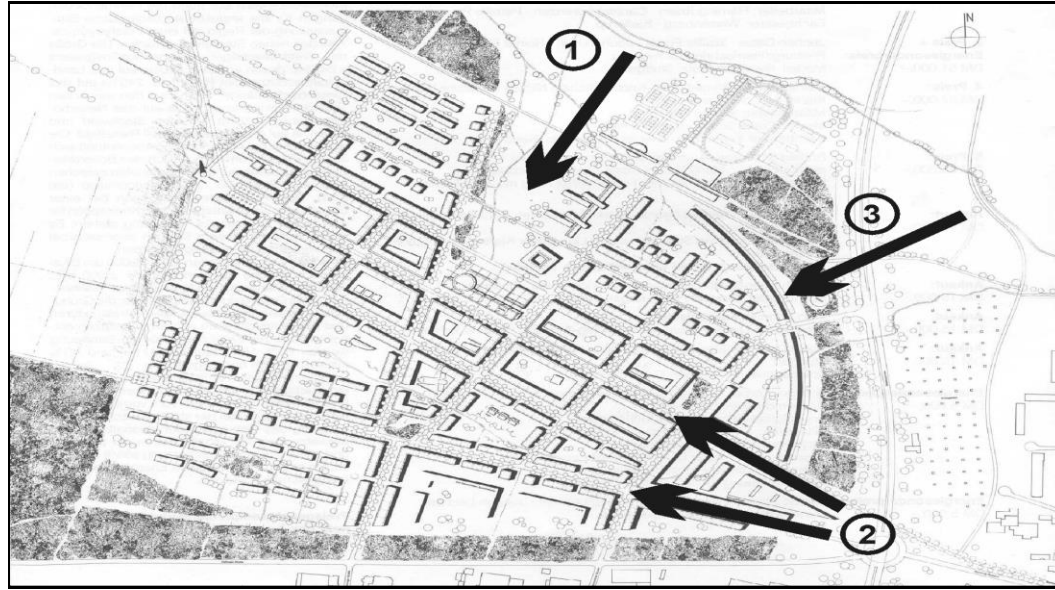


日没後、赤外線を放射、地表面が冷却。



# 風の道を探り入れた開発例

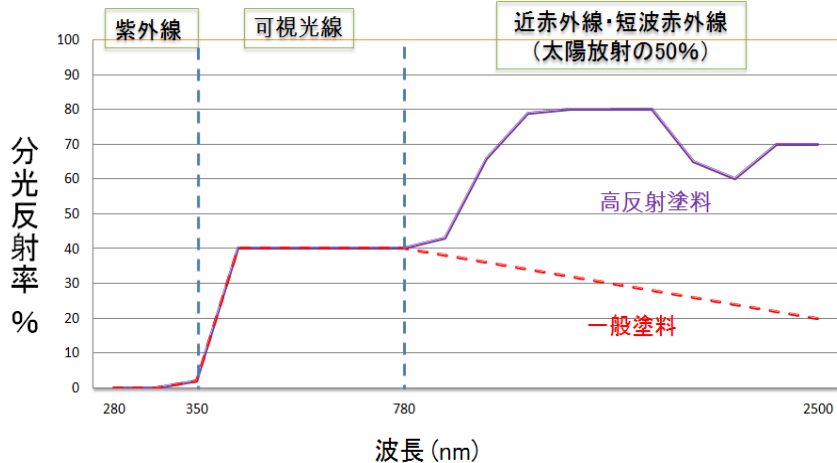
## フライブルク市近郊 リーゼルフェルド



下水処理場跡地に住宅団地を計画

夜間に東方の谷から吹いてくる  
山風を導入しやすい街路を設計  
(大気汚染と暑さの軽減)





# ロサンゼルスGardena小学校 敷地の明色化

出典: Los Angeles Unified School District and Streetbond 2013

特殊塗料による建物表面温度低減のメカニズム

「都市の表面をクールに」  
技術開発と政策



イタリアの壁面緑化モジュール

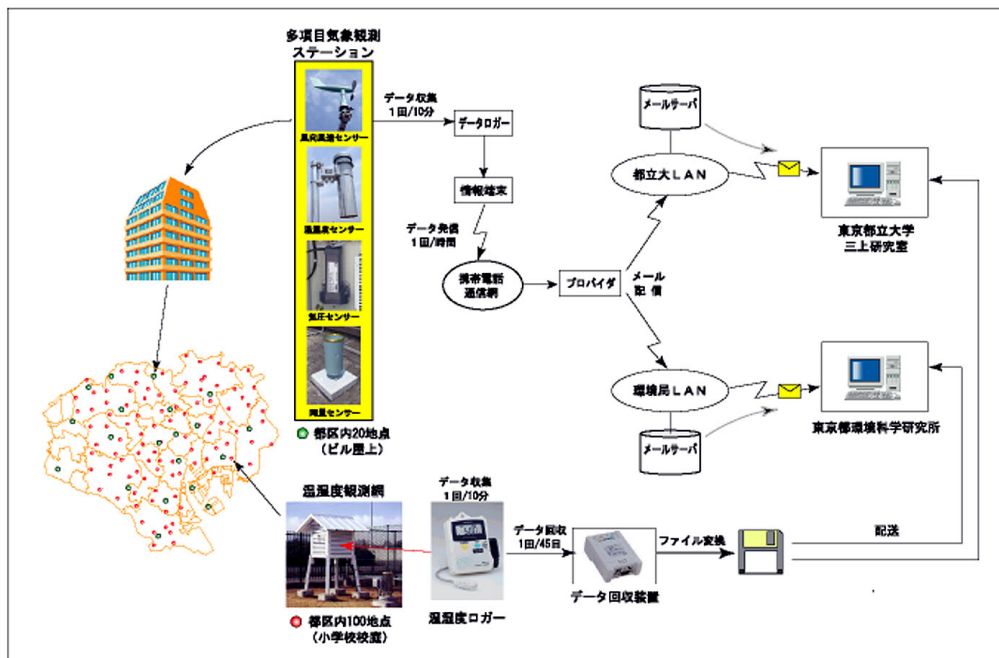
出典: Serra, V. et al (2014)

Proceedings of the 3rd IC2UHI

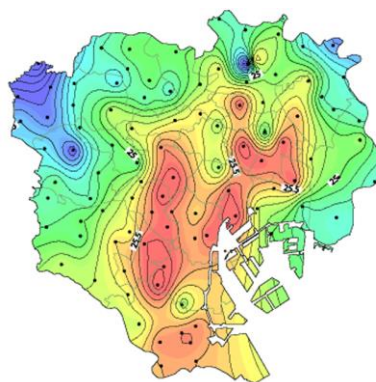




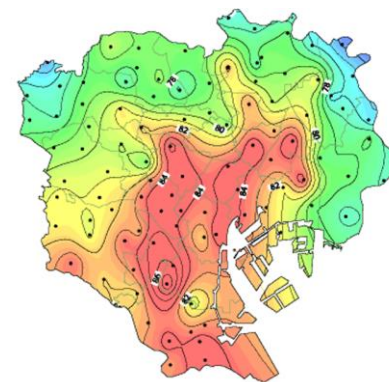
# METROSシステム(東京都環境局)



## METROS夏期気温分布 2002.7.20～8.31



最低気温平均値(°C)



25°C超過時間割合(%)

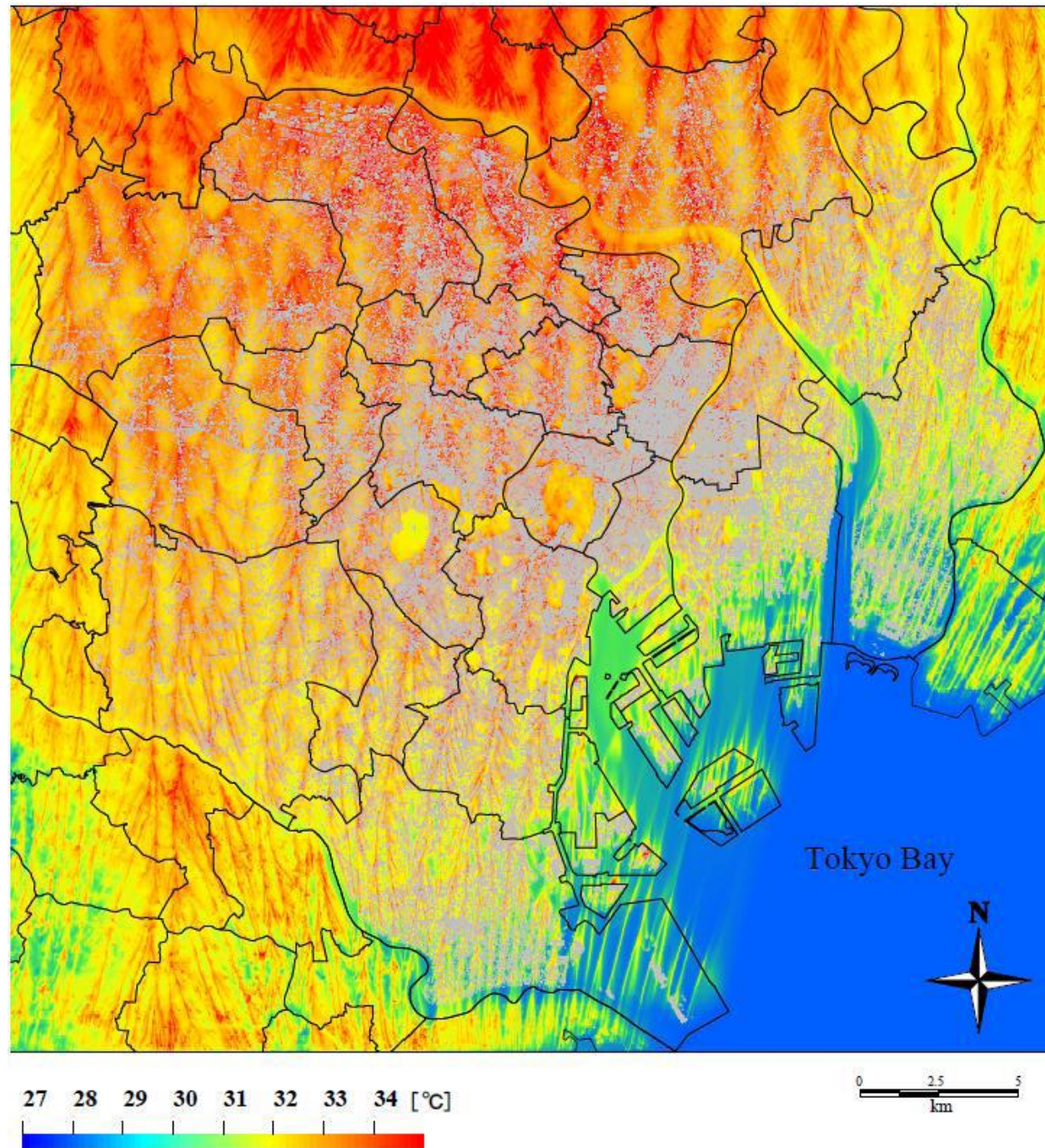
Top runner of  
numerical  
simulation

Air temperature of  
Tokyo's 23 wards  
(10m height from  
ground)

5,000,000,000  
grid cells  
( $dx=dy=5m$ )

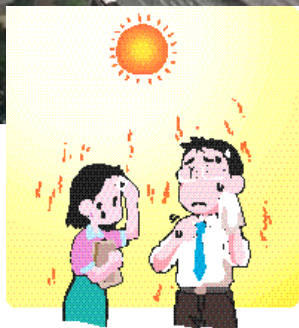
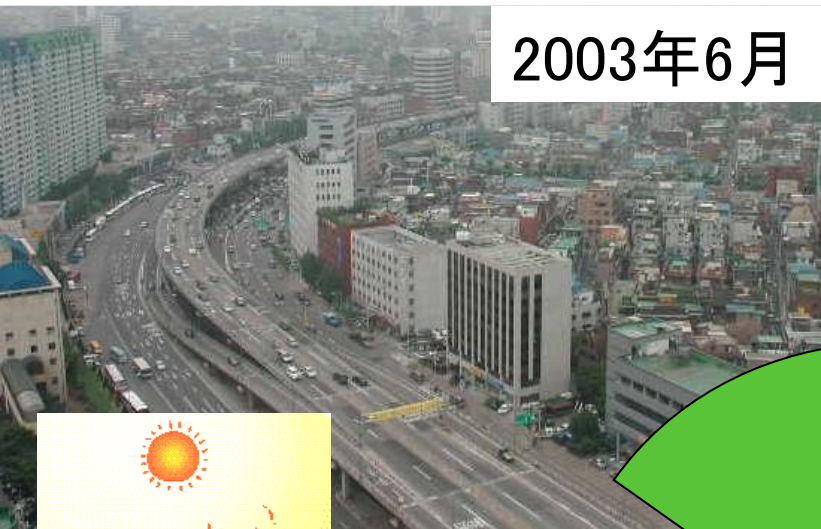
Earth simulator

Ashie, *et al.* (2010)





2003年6月



ソウル市清溪川(チョンゲチョン)の復元  
都市河川→暗渠化・高架道路  
(1950年代～)

自然と共生するまちづくり

松本・一ノ瀬ら(2009):  
日本生気象学会雑誌, 46など



2006年夏

河川など都市内の水面は都市の夏の暑さを軽減

都心における清流の大規模な復活

→ ソウル市政府のチャレンジ

→ 暑さをやわらげる効果検証

都市開発の流れが変わる!

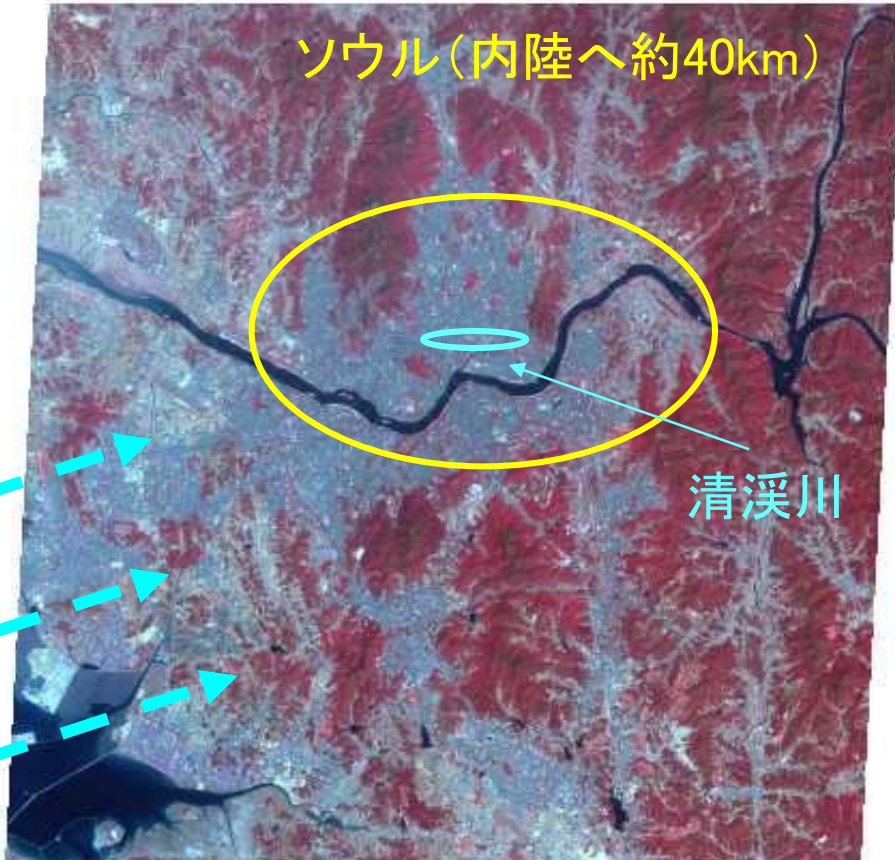
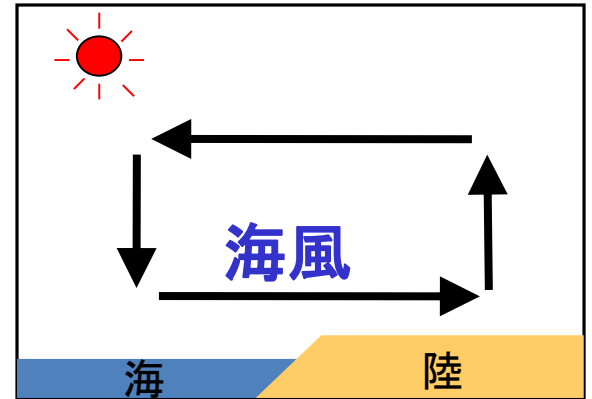
「自然を利用した都市の再開発事例」







# ソウル市周辺の地勢 (ASTER衛星画像) (2004年4月17日)









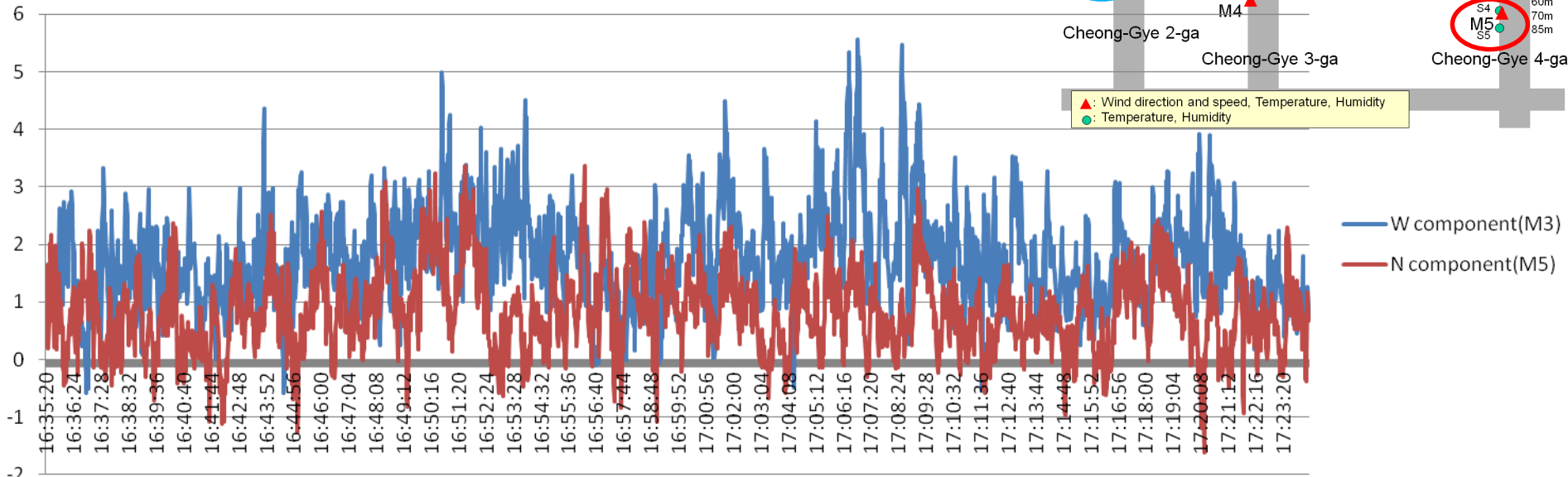
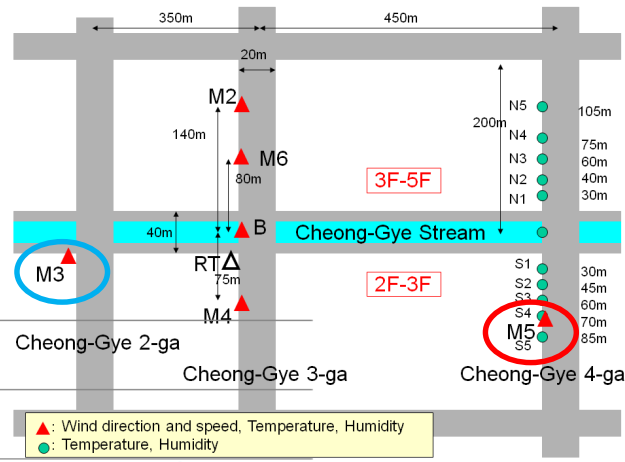
M6: 比較的高層の街路樹付き街区,  
日当たりが悪い



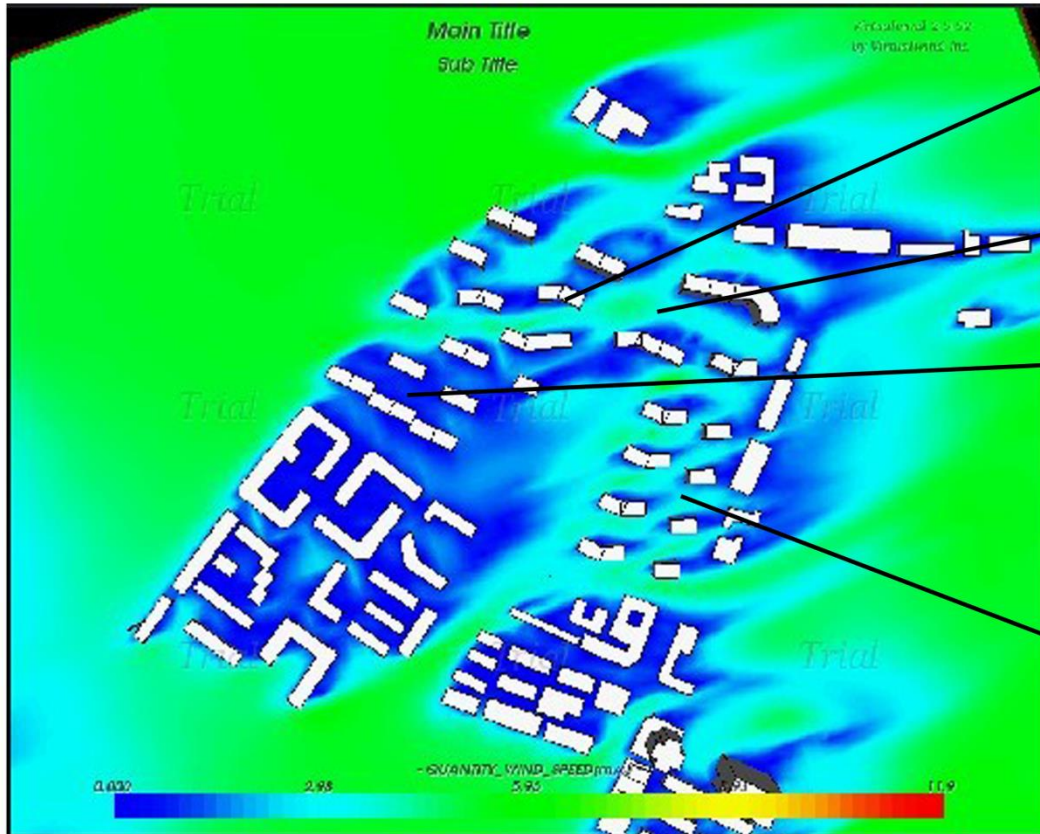
M4 (M5): 低層街区,  
日当たりがよい



2006年8月8日 16:35-17:24 (m/s)  
好天, 西風(海風)







在风影区内, 可否往南移动?

是否太空?

通风不佳  
保留上轮方案, 未做改动  
why? ? ? ?

通风效果大大滴改善  
牺牲了不少建筑面积。。。

武漢(長江沿いの街区)における風通し(2010年夏 陳宏らの計算)

気温や風通しは街区の中でも多様。

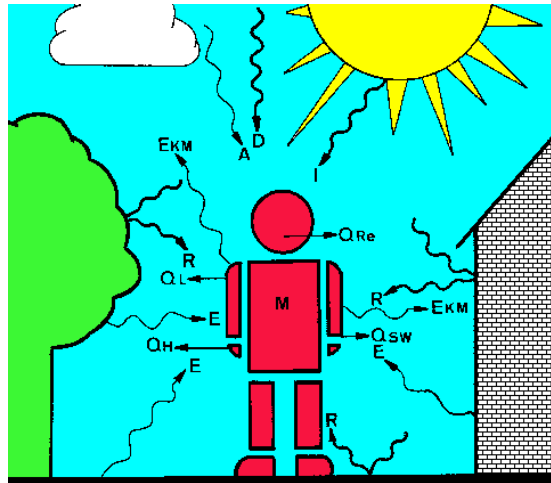
いつまでも都市の広域的な気温分布図ばかりでは役にたたない。

1. 気候を活かしたまちづくりの可能性
2. 都市街区設計へ応用するための  
実験研究
3. 東京湾を媒体とした熱循環による暑熱緩和効果

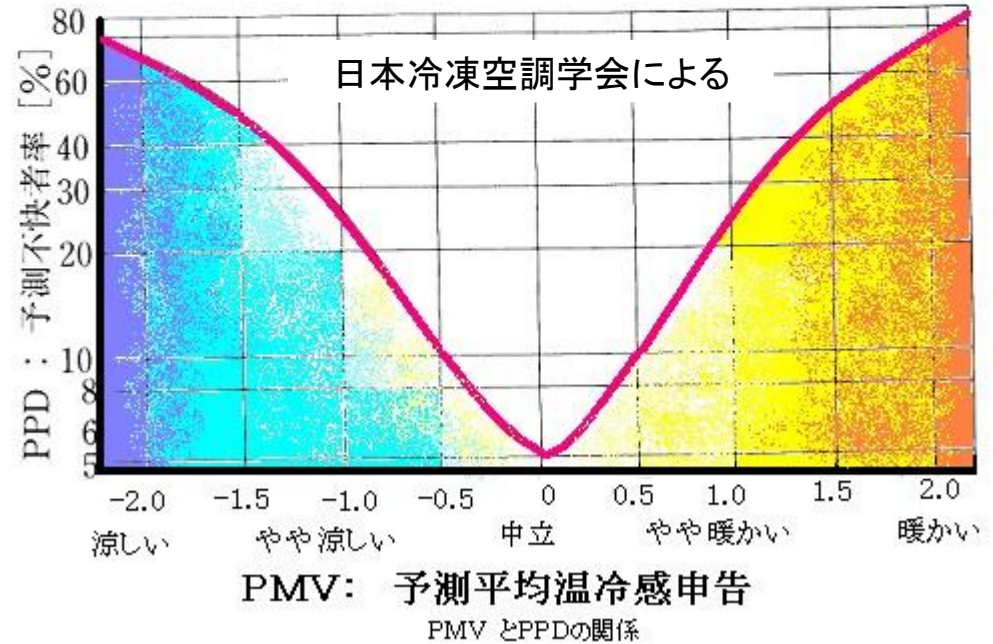


人体は肌で気温を  
感じ取るだけではなく  
周辺にある物体の表面と  
赤外線をやりとりしている

周りに比較的表面温度の  
高い物体が多ければ  
受け取る赤外線が多く  
人体は暑く感じることになる



PMVの適用範囲		PMVの7段階評価尺度	
PMV	$-2 < PMV < +2$	+3	Hot 暑い
代謝量	0.8~4met	+2	Warm 暖かい
着衣量	0~2clo	+1	Slightly warm やや暖かい
空気温度	10~30°C	0	Neutral 中立
平均放射温度	10~40°C	-1	Slightly cool やや涼しい
平均風速	0~1m/s	-2	Cool 涼しい
相対湿度	30~70%	-3	Cold 寒い



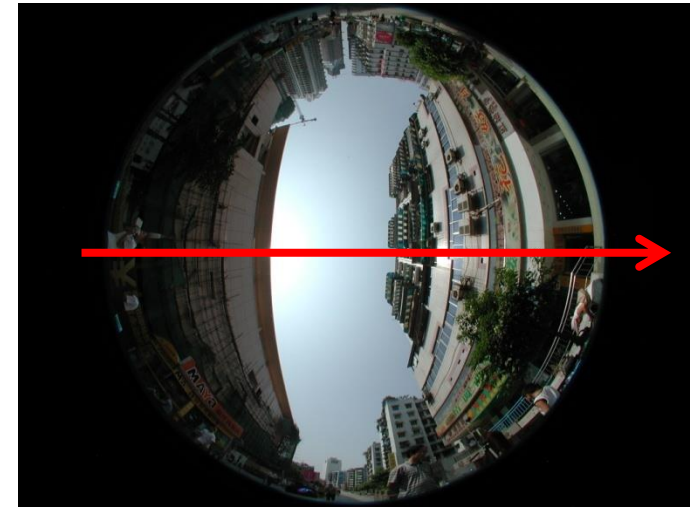
気温が高いのが問題なのではない。  
問題は熱が体にたまってしまうこと(健康影響)。

街づくりで考えなくてはいけない要素は、気温だけではない。

重慶市南坪 2004年8月9日 (一ノ瀬ら(2007):環境システム研究, 35)

＜東西方向街路 南北方向街路＞

太陽の軌道





# RayMan Model

Matzarakis *et al.* (2006)

任意の地点で、放射環境にかかわる範囲の周辺地物(建築物)形状などを入力。

温熱環境(体感温熱指標)を計算。

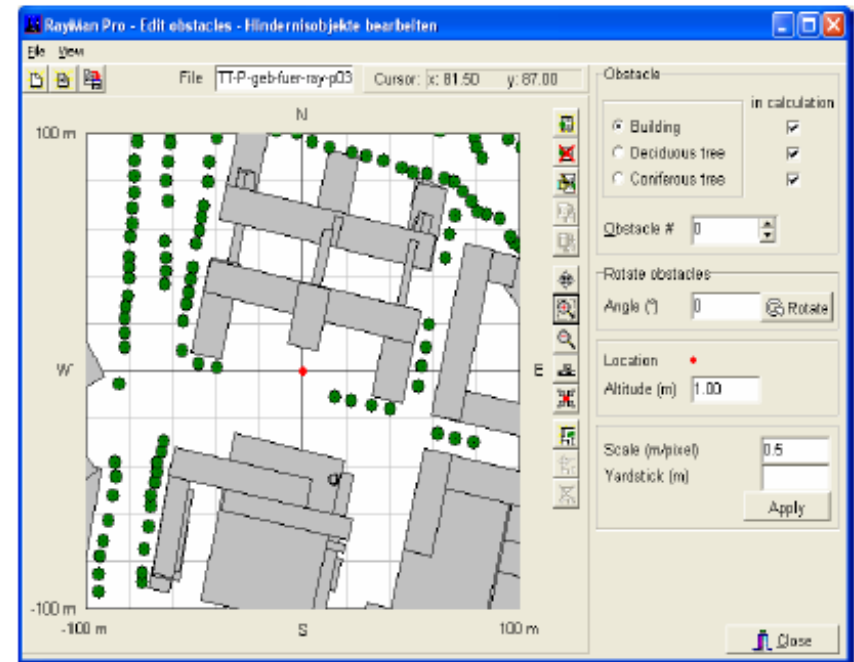


Figure 2: Input windows for morphologies.

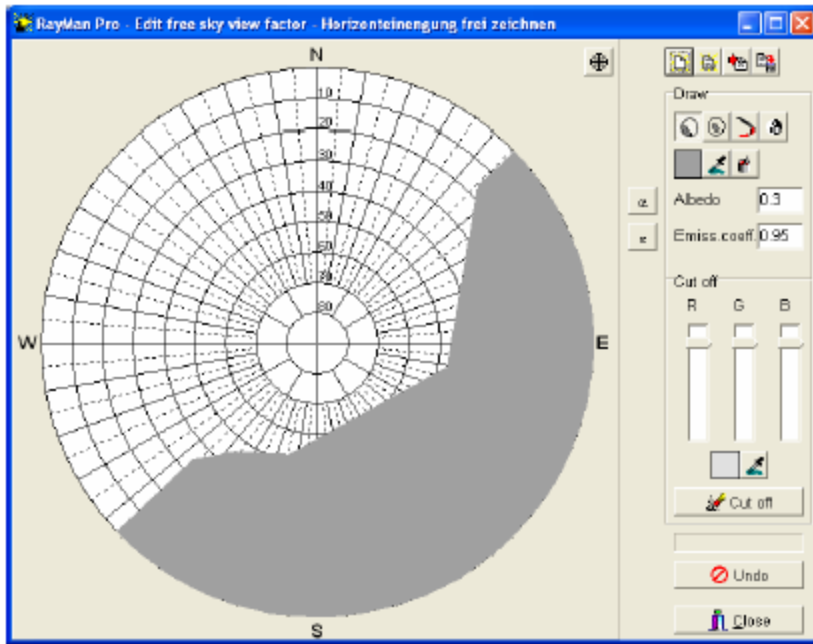


Figure 5: Input window for free drawing and import of fish eye photographs.

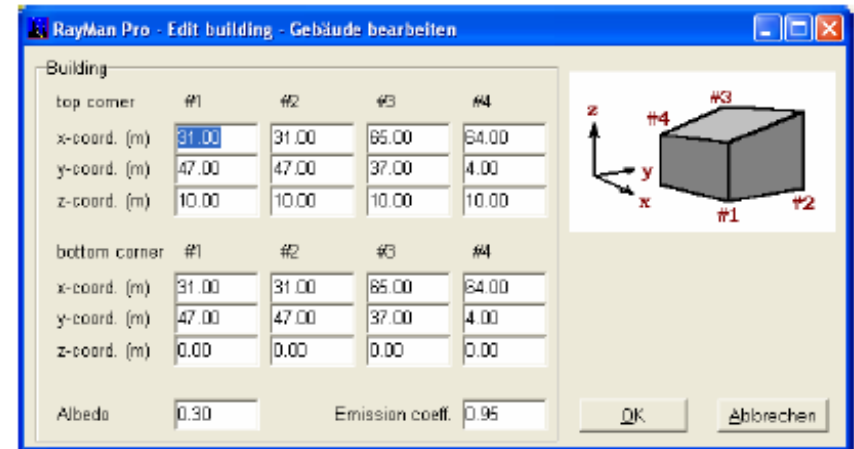
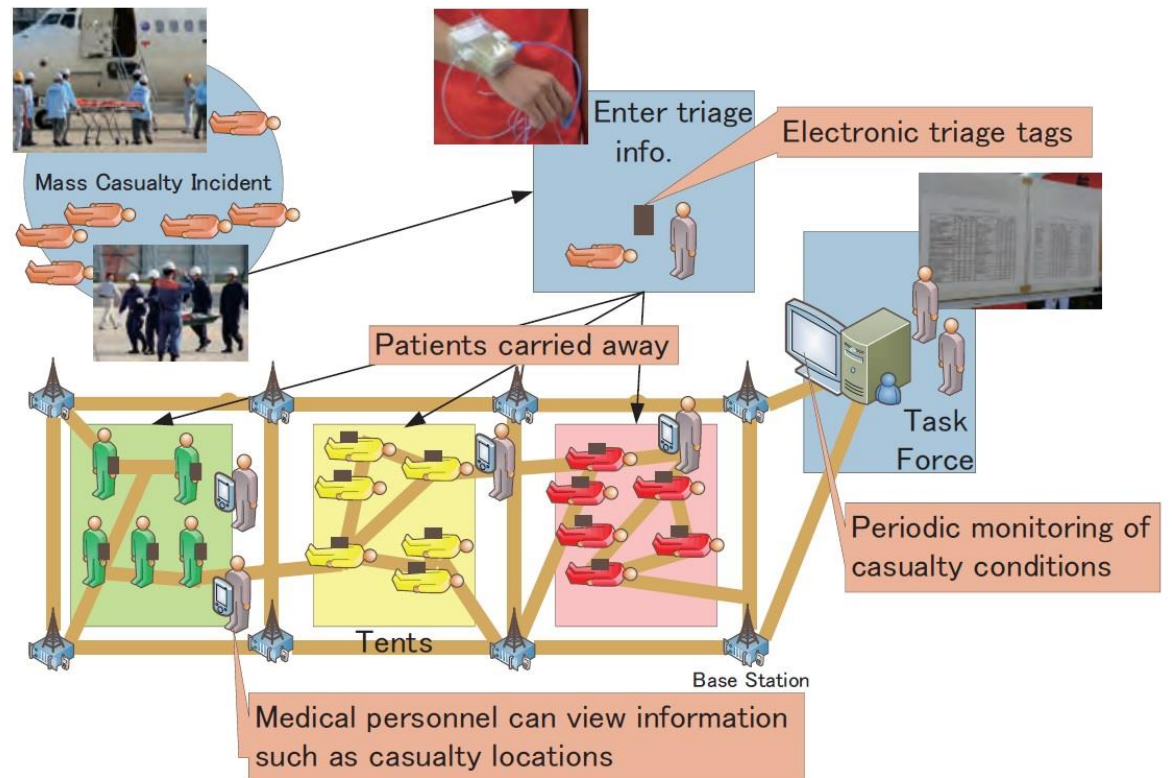


Figure 3: Input window for buildings.

# 大阪大学・東野先生によるeTriageの試み

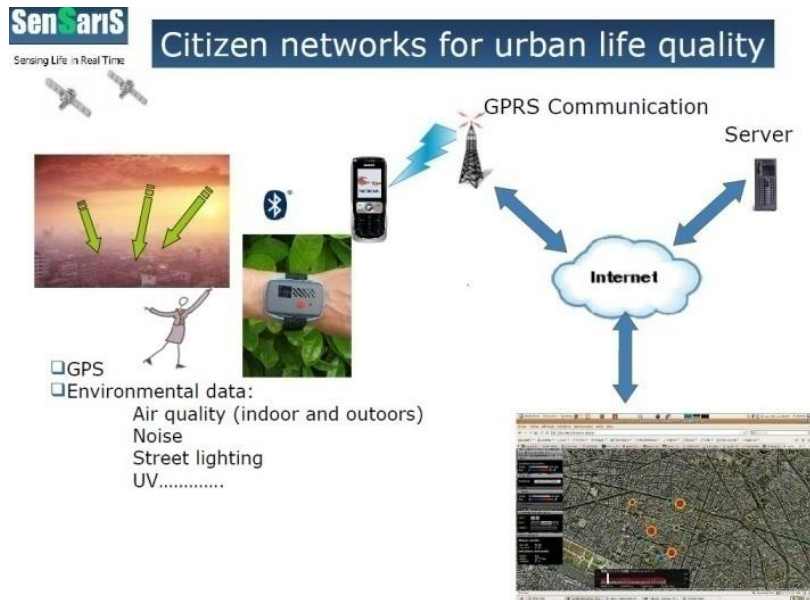
Higashino et al. (2012): IoTSP 2011  
(Keynote Speech/Invited Paper)





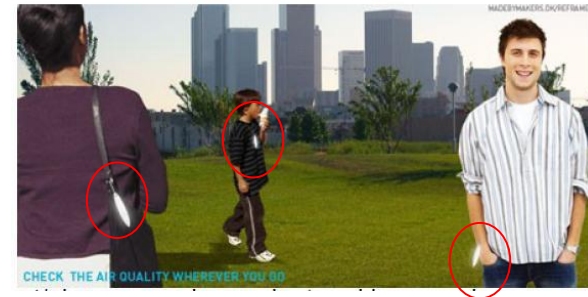
# モバイルテクノロジーを応用した 街区設計のための都市気候環境調査

- ① 省エネルギー性能を高めるための街区や建築のデザインを属地的に実現するためには、高空間解像度の環境情報データベースを高時間解像度で構築する必要がある。
- ② 屋外温熱環境について、市民参加型の近隣環境モニタリングシステムの開発を行う。
- ③ モニタリングデータをリアルタイムで利用者がシェアするフィードバックシステムを構築することにより、市民啓発、地方自治体における近隣環境政策に貢献する。



フランスのSenSariS社で開発されたモバイルセンサーの事例

携帯電話を通じて観測された情報をサーバーに収集し、GIS上でリアルタイムに表示する。



携帯電話のストラップなどとして組み込まれたセンサーのイメージ(SenSariS社)

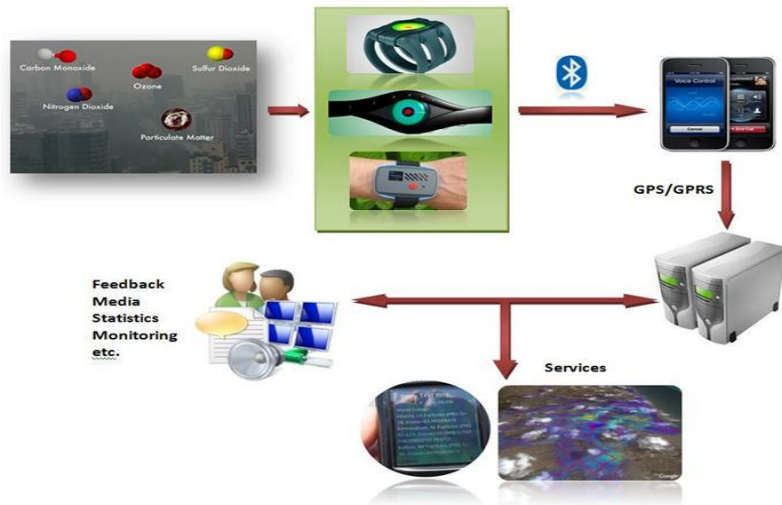


サーバー上に表示された情報のイメージ(Nokia社)

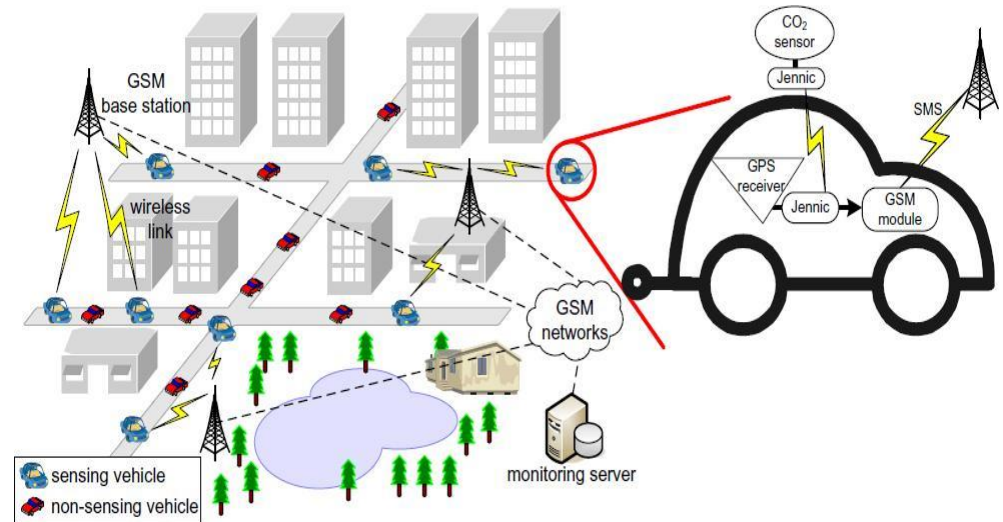
- ① 都市の街区スケールにおけるモバイルテクノロジーを応用したリアルタイムの環境データの収集・空間分布表示システムの構築
- ② 構築システムのテストサイトへの展開と運用
- ③ 市民啓発、地方自治体における近隣環境政策への貢献の評価



携帯電話を通じたセンサー(Bluetooth)からサーバーへのデータ送信イメージ



構築システムのイメージ



自動車とワイヤレスセンサーネットワークによるデータ収集

Likhvar and Ichinose (2015):  
土木学会環境システム研究  
論文発表会講演集, 43など





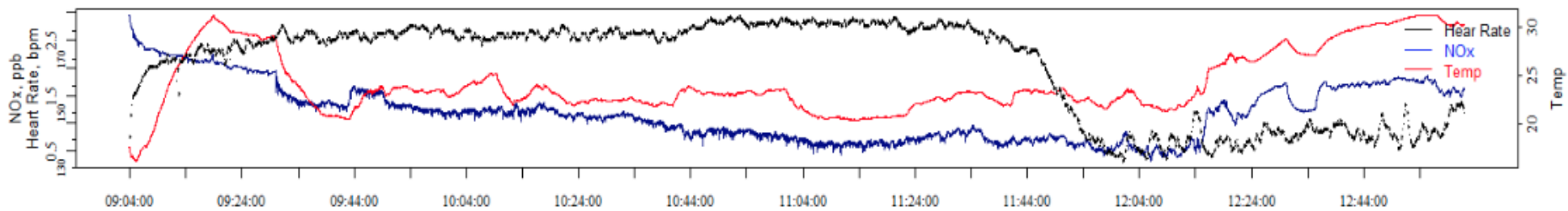
センサーを装着したところ

# 東京マラソンの事例 (騒音)

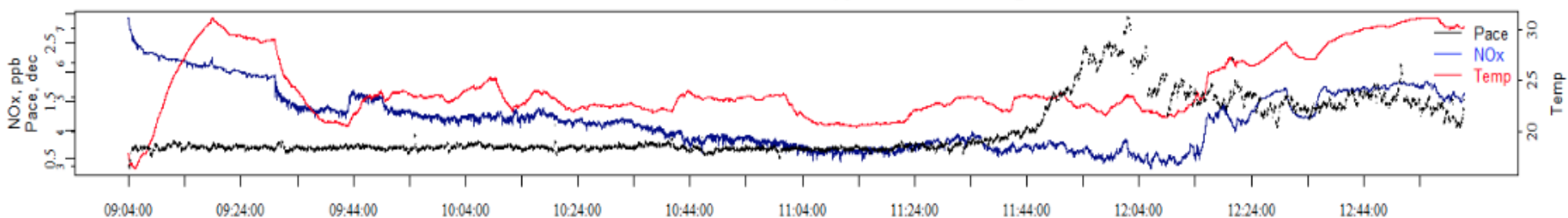
Likhvar and Ichinose (2015):  
土木学会環境システム研究  
論文発表会講演集, 43など



Tsukuba Marathon 2010-11-28, personal monitoring



Tsukuba Marathon 2010-11-28, personal monitoring



つくばマラソン(2010年11月)の事例(気温、NOx、心拍数、ペース)

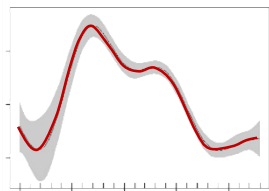


# ジオタグ付きTwitterデータを活用した主観的気温場の補正事例



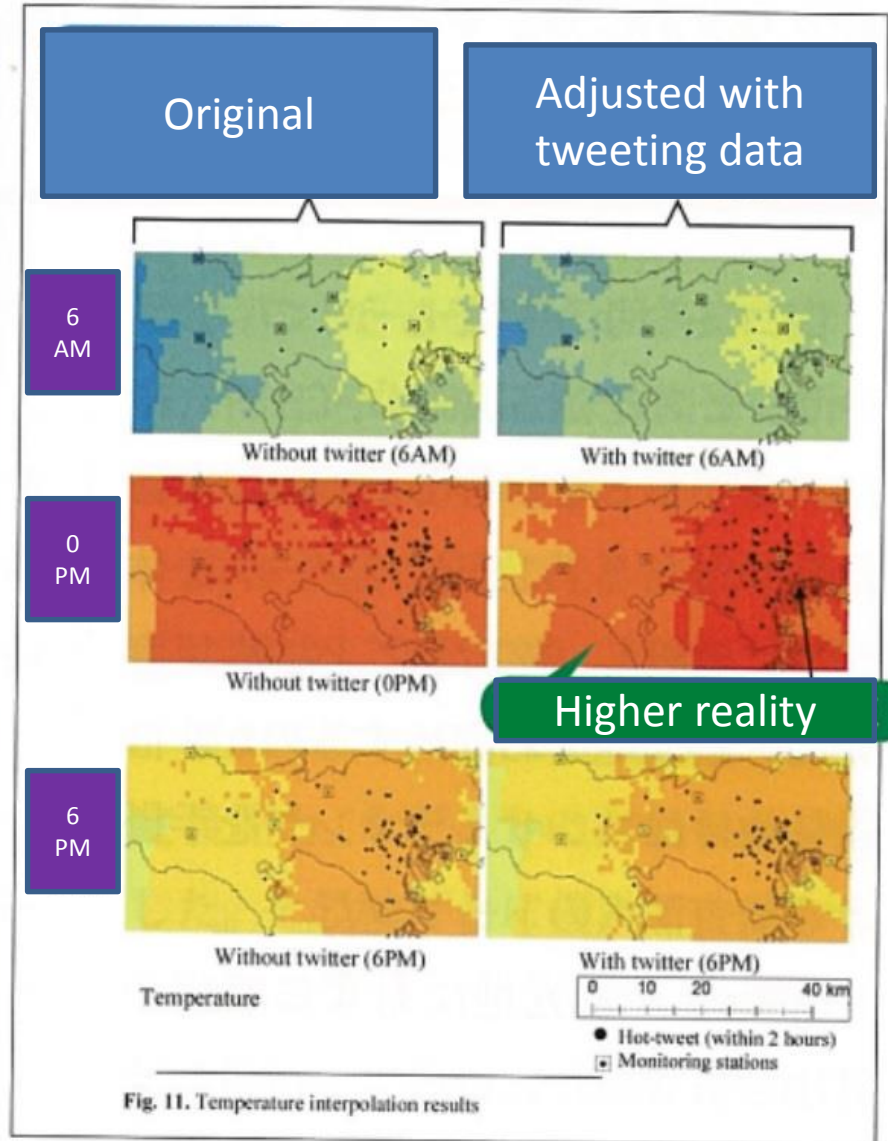
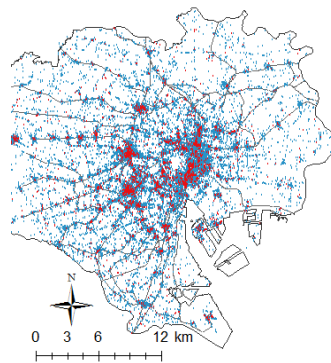
Keywords:

hot, humid, hard, tired, summer, severe, uncomfortable, die, heat, etc.



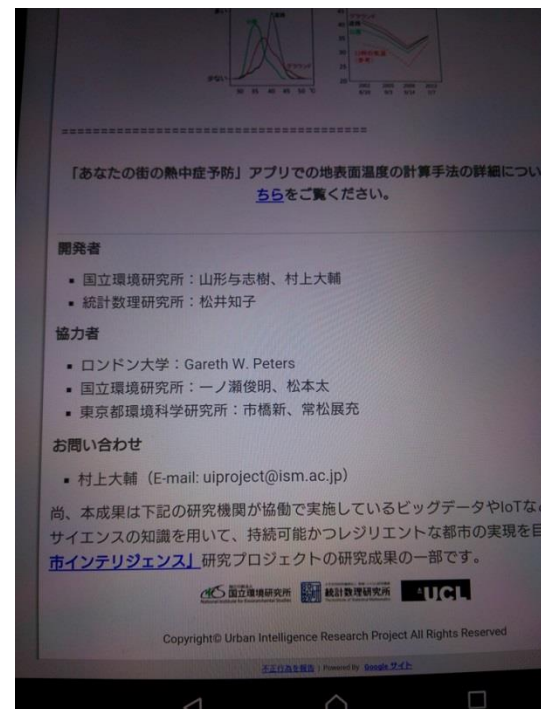
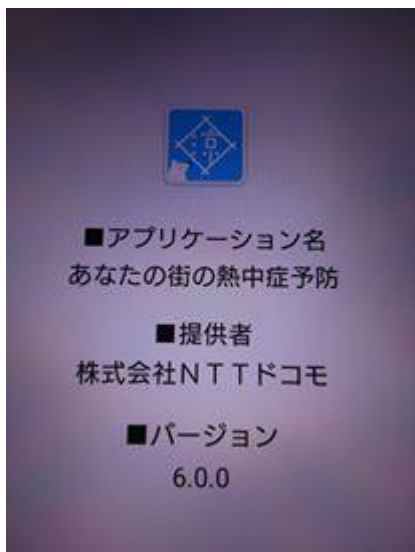
0AM 0PM 11PM

Number of related tweeting



Yoshiki Yamagata, Daisuke Murakami, Gareth W. Peters and Tomoko Matsui, "A spatiotemporal analysis of participatory sensing data "tweets" and extreme climate events toward real-time urban risk management," Proc. 14th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management (CUPUM 2015), July 2015.

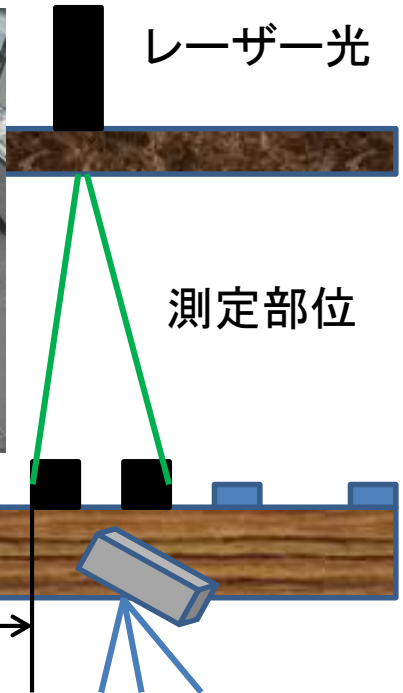
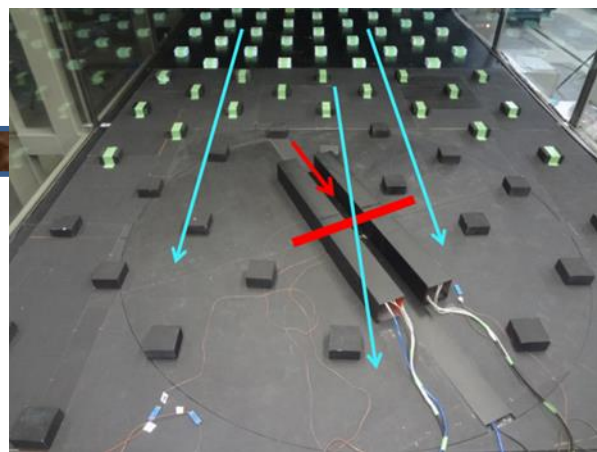
# 熱中症予防アプリ NTT docomoと共同開発 (現在はサービス終了)





# 街路空間の構成が屋外熱環境と流れ場に与える影響に関する風洞実験

・PIV手法による都市キャニオン空間の  
気温・流れ場観測(街路空間の形状)



風速: 0.5m/s, 1.5m/s

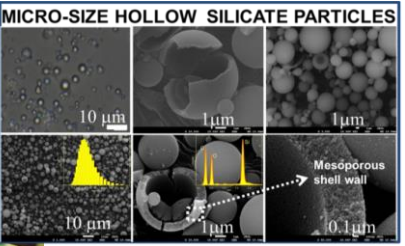
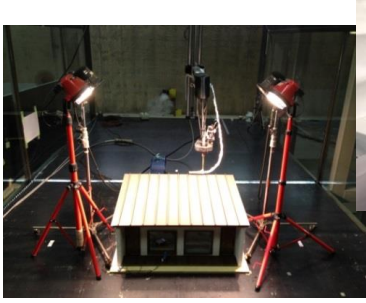


粗度模型

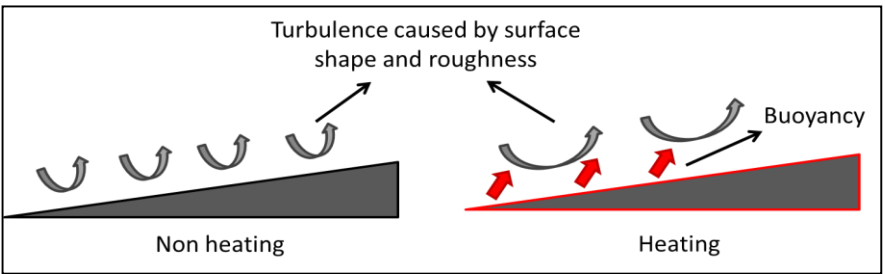
床面温度(可変)

17m

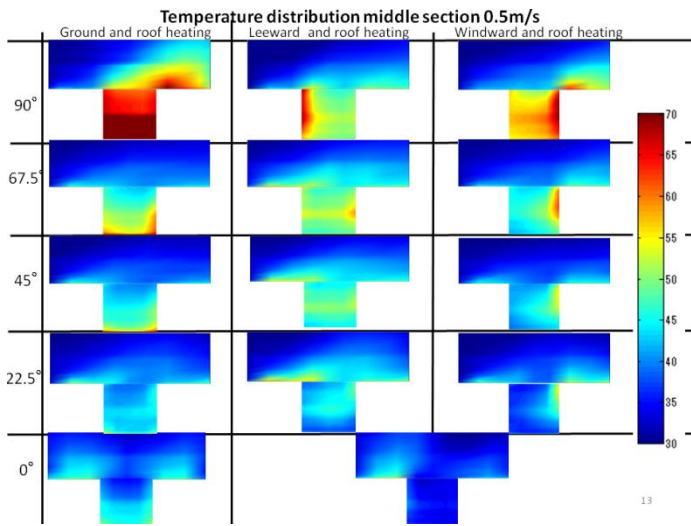
街区設計のガイドライン作成のためには、  
屋上緑化や特殊表面素材の適用と  
街区デザイン(風向の多様性を考慮)との  
賢い組み合わせの提示が必要。



・加熱条件下における  
建築材料の流れ場への影響(前段の観測)  
この知見を上記のPIV  
観測へ適用



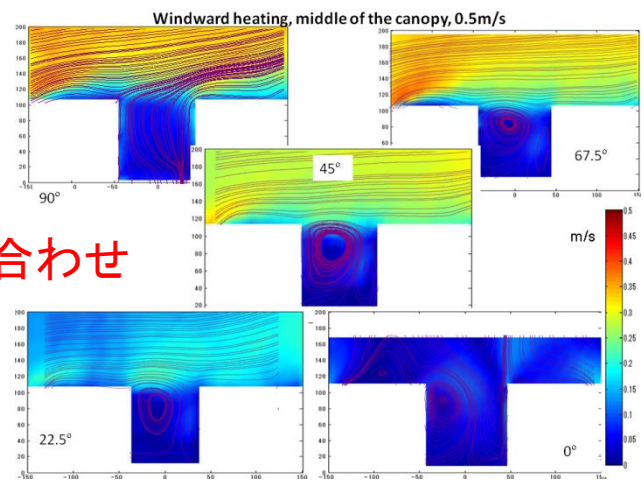
- 風速が小さい条件の下では、  
流れ場は建物形状や浮力の  
影響を受けやすい。  
- 屋上面を加熱すると、風速の  
増大と乱流強度の減少が見ら  
れる。  
(Lin, Ichinose et al.: Journal of Heat  
Island Institute International, 2014)



# ・PIV手法による都市 キャニオン空間の 気温分布観測

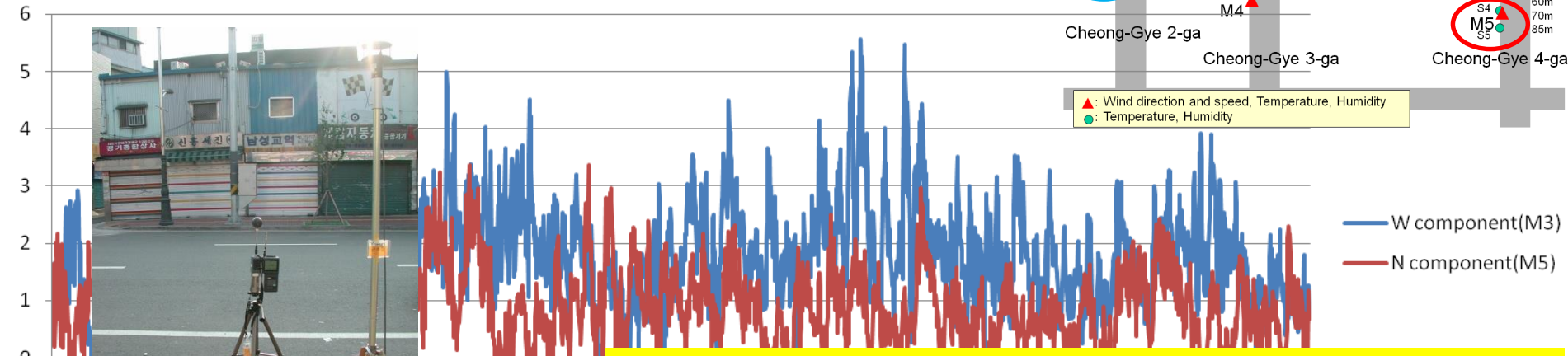
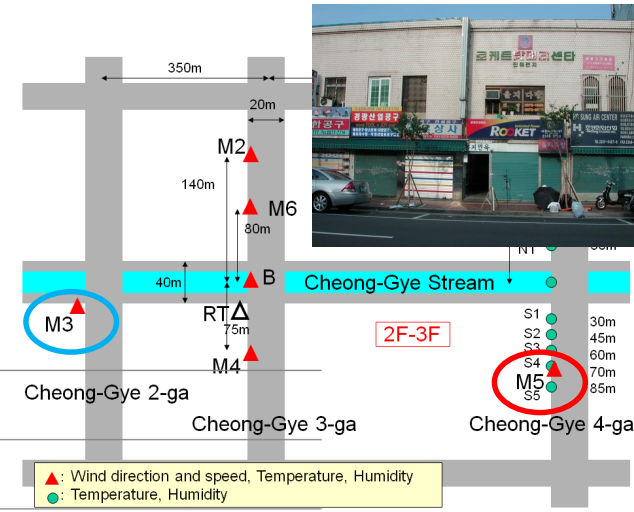
## 風向と加熱条件の組み合わせ

# ・PIV手法による都市 キャニオン空間の 流れ場観測



・ナノ材料を用いた前段実験の知見を実際の街区に敷衍するため、PIV (Particle image velocimetry) の手法を用い、都市キャニオンにおける卓越風向や加熱条件の違いがもたらす流れ場や温熱環境への影響について風洞実験を行った。

・Oke (1988) などを嚆矢とする一連の先行研究事例(街路空間形状と気温・流れ場の関係)に対し、街区デザインに有益と考えられる新たな体系的知見を加えることができた。(Lin, Ichinose et al.: Building and Environment, 投稿中)



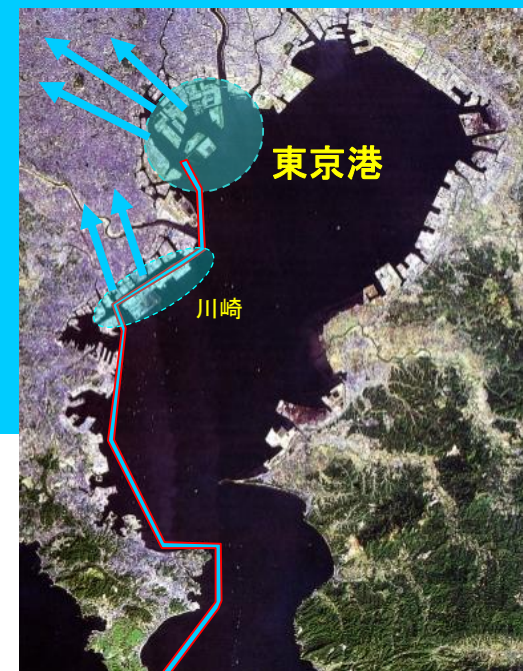
ソウル(夏季, 晴天, 西風)での実測データによる検証(風洞実験と整合的)  
 壁面や道路面が加熱される条件では河川上の空気が直交街路に進入しやすい。  
 復元河道上の西風(青)と直交街路上の北風(赤)が同期(風速:m/s)。



1. 気候を活かしたまちづくりの可能性
2. 都市街区設計へ応用するための実験研究
3. 東京湾を媒体とした熱循環による暑熱緩和効果

- ・人間活動への影響(適応研究)や政策とのつながりなど、人間次元のテーマがまだ弱いとの印象。
- ・10年前にくらべると政策ニーズは、「都市の気温低減」のようなセンスから「都市内クールスポットの創生による都市高温化への適応」のようなセンスにシフト。
- ・静止気象衛星ひまわり8号の運用が最近開始され、従来不可能であった高頻度の地表面熱画像データ取得も可能となり、地方自治体レベルでの都市計画や都市環境評価への応用可能性。
- ・さらなる効果が期待できる方策としての「東京湾海風の有効利用」の検討(東京湾を媒体とした熱循環による暑熱緩和効果に関する研究)を行った。

# 東京湾を媒体とした熱循環による 暑熱緩和効果に関する研究



○一ノ瀬 俊明<sup>1,2</sup>, 鈴木 一令<sup>3</sup>,  
鈴木 高二朗<sup>4</sup>, 清野 聡子<sup>5</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人国立環境研究所社会環境システム研究領域

<sup>2</sup>名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻

<sup>3</sup>八千代エンジニアリング株式会社

<sup>4</sup>独立行政法人港湾航空技術研究所海象情報領域

<sup>5</sup>東京大学大学院総合文化研究科







対策の効果を挙げるには

**巨額の投資と長期の時間が必要**

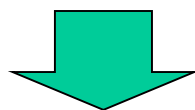


さらに、既往のヒートアイランド対策は、あまり有効とは言えない。

東京23区全ての

- 1)建物・事業所排熱の50%を削減
- 2)自動車交通排熱の20%削減
- 3)全舗装面の50%を透水化(草地・裸地化)
- 4)全建物屋上の50%緑化

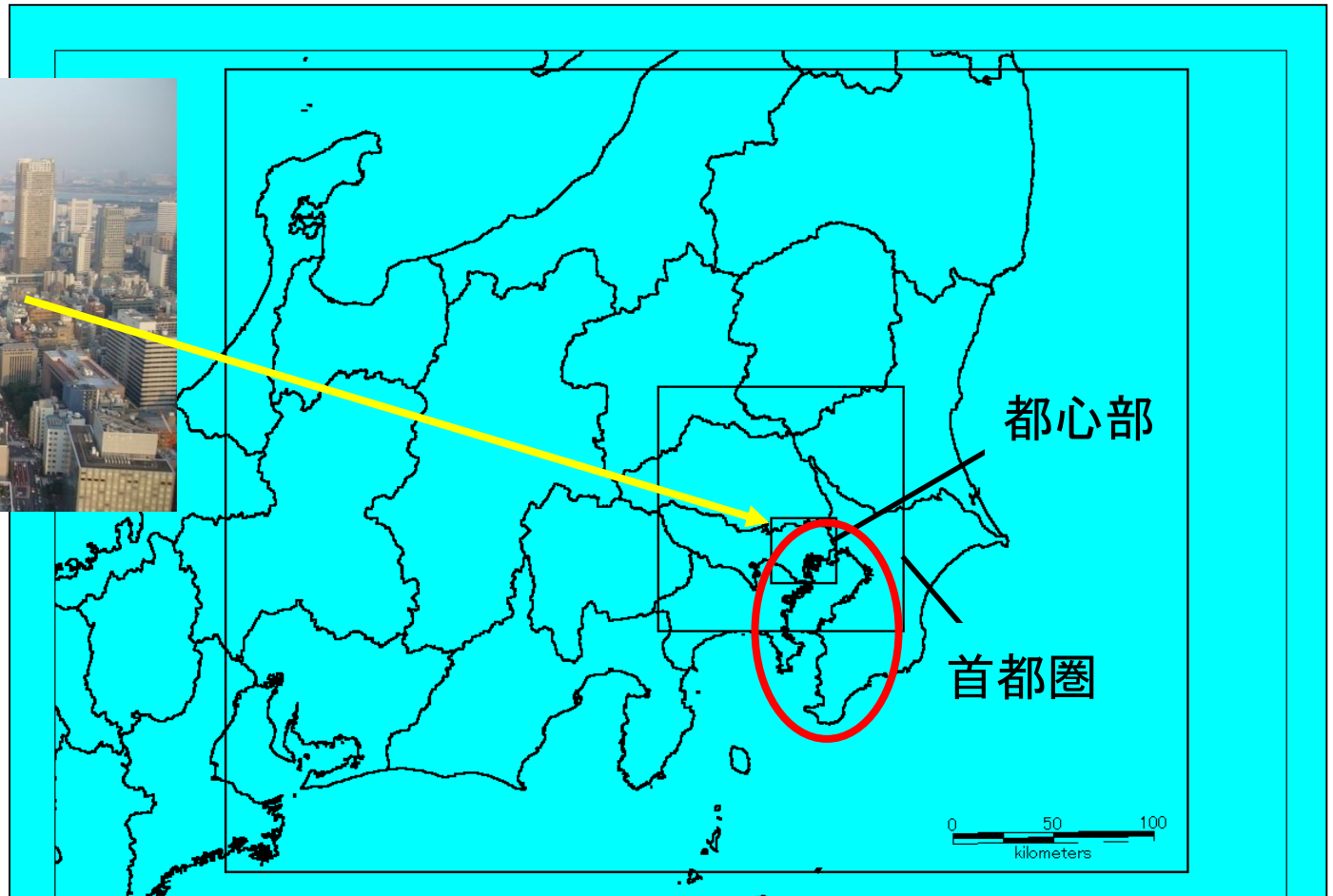
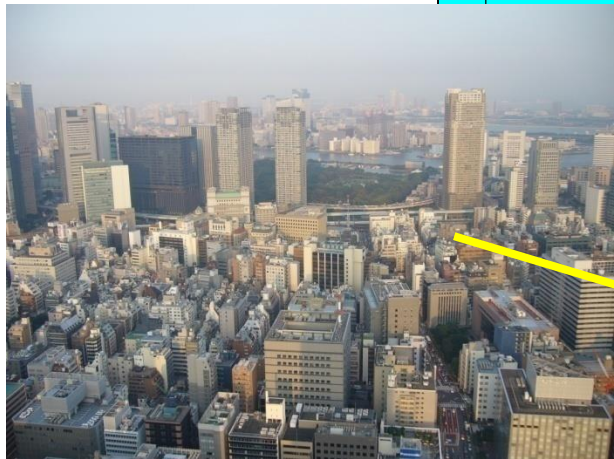
を図っても



都心3区の真夏日の日最高気温の低下は、**わずか約1°C。**

# 東京都心部周辺と東京湾

東京湾のさらなる水質改善が必要

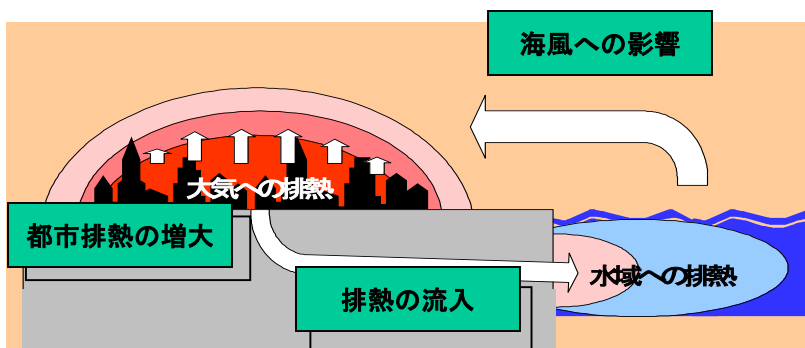


東京湾は都市活動由来の温排水流入により  
熱的に汚染されている（木内，2003）

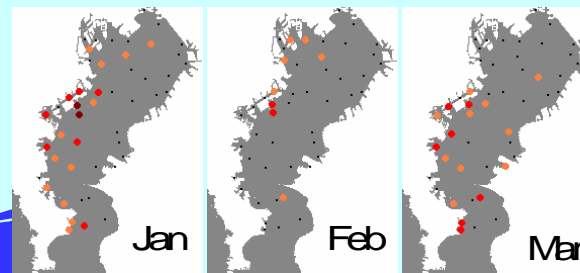




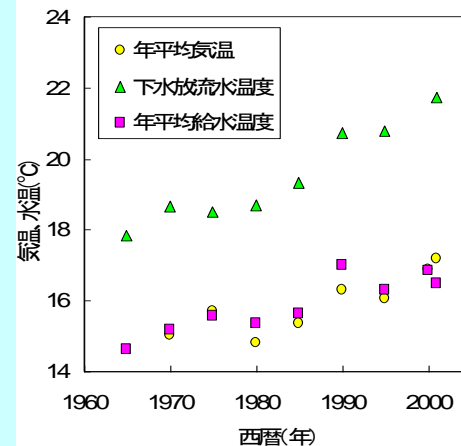
# 都市の人工排熱が東京湾へ流入するシステム



## 都市排熱の増大と湾水温の上昇



## 東京湾における過去30年の水温上昇率

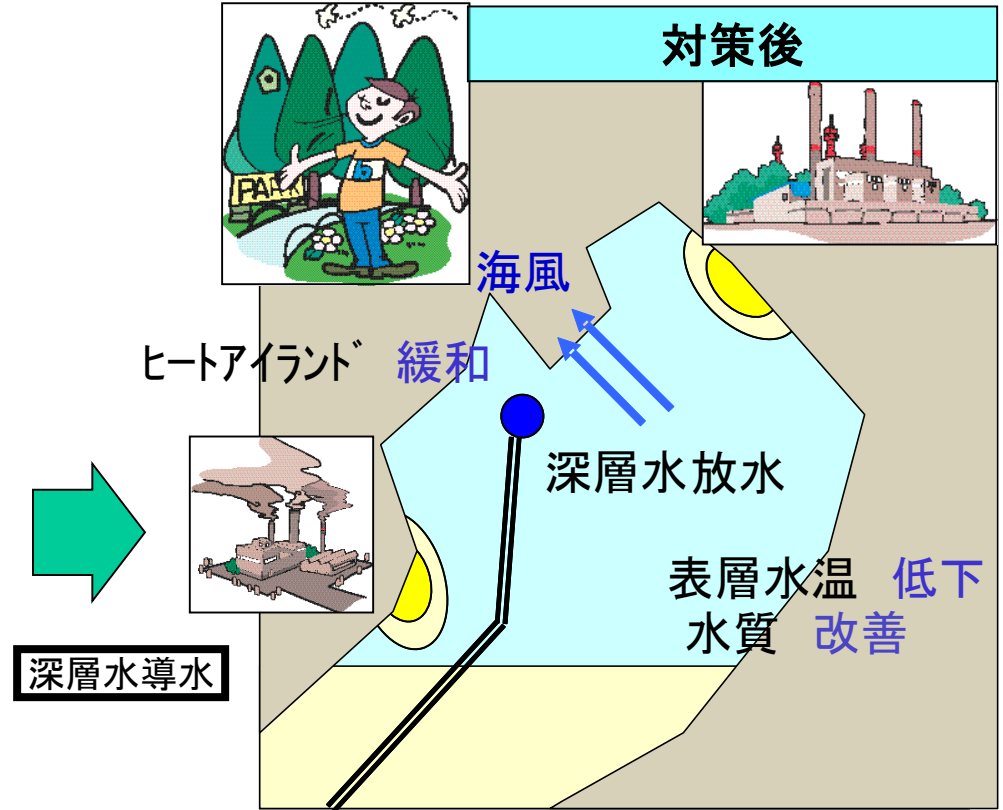
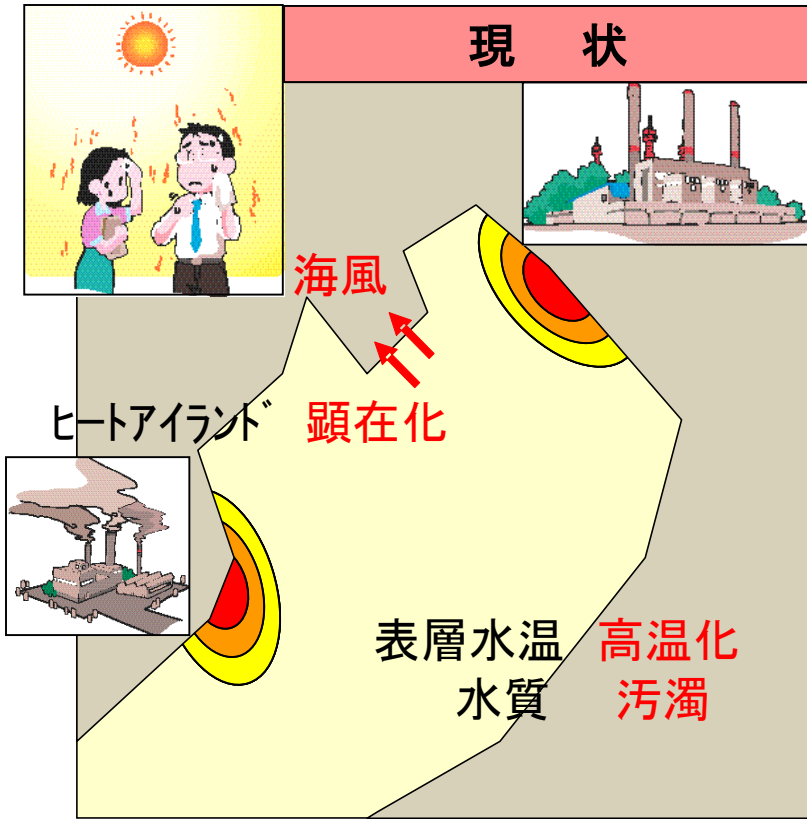


## 人工排熱増による東京23区下水処理場からの放流水温の経年変化

都市人工排熱の流入による東京湾  
水面温度の上昇と海風への影響



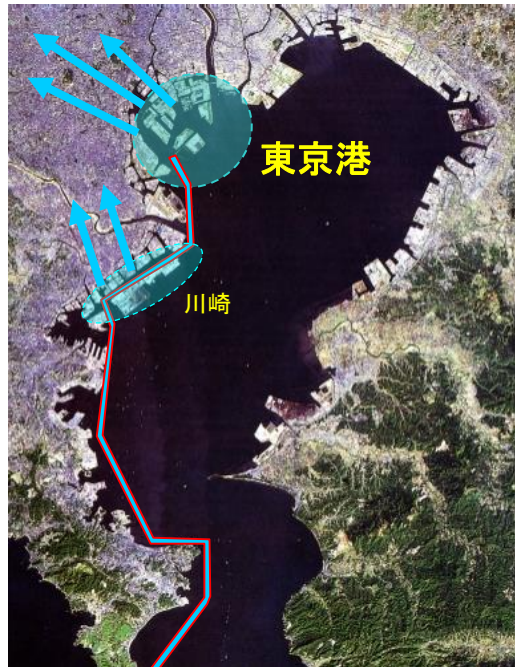
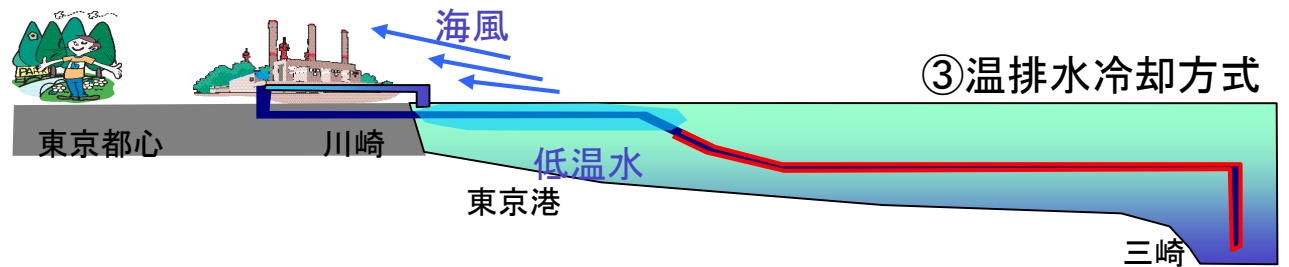
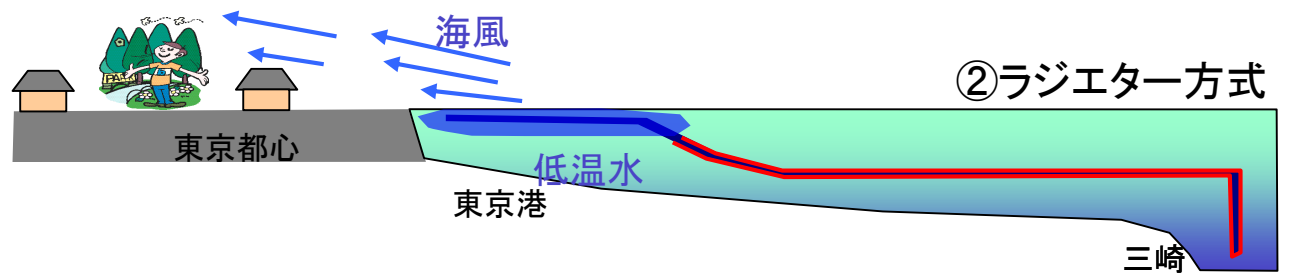
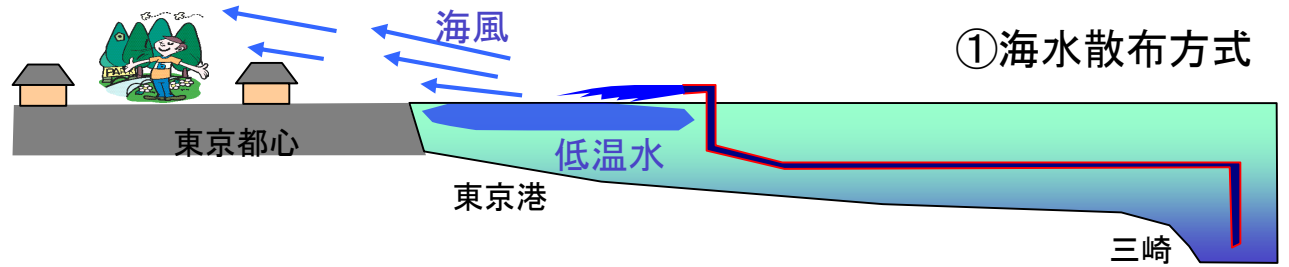
# 海洋深層水導水によるヒートアイランド現象緩和の概念



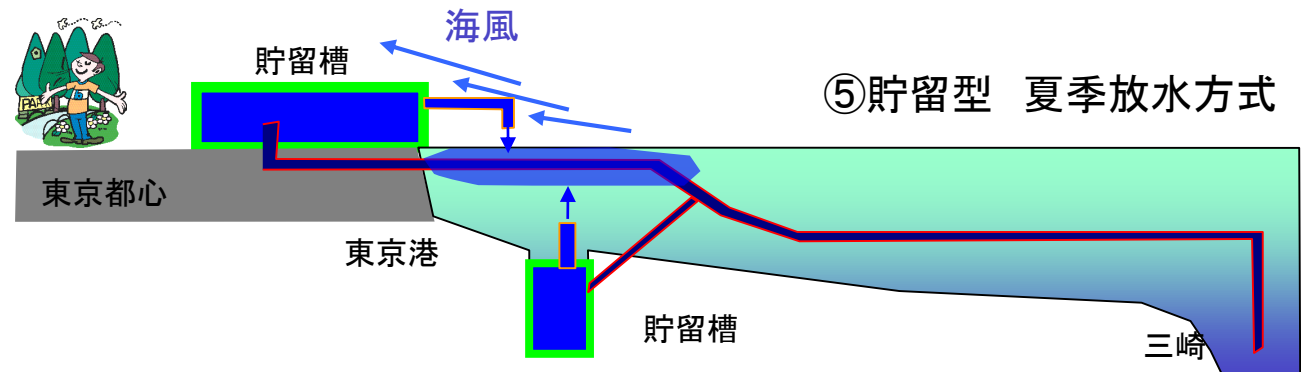
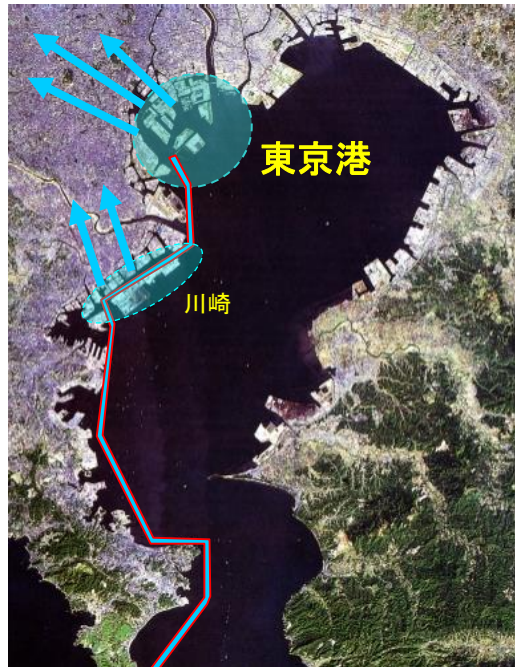
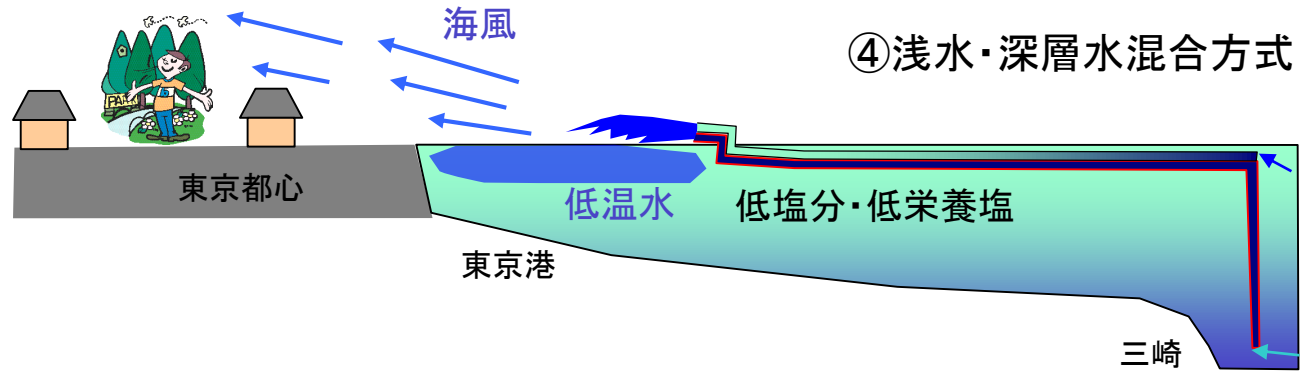
海風: 風速小 ⇒ 冷却効果小  
ヒートアイランド 顕著

海風: 風速大 ⇒ 冷却効果大  
冷気塊の供給 ヒートアイランド抑制

# 想定される様々な海洋深層水導水システム



# 想定される様々な海洋深層水導水システム

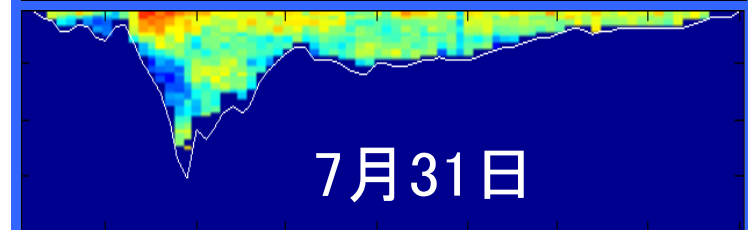
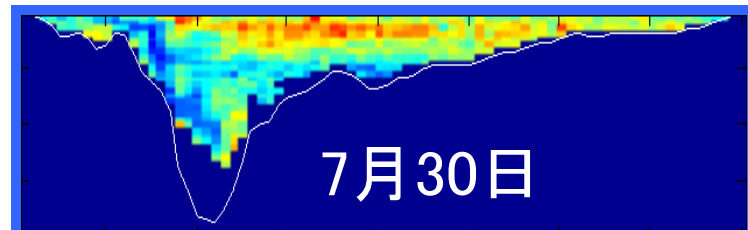
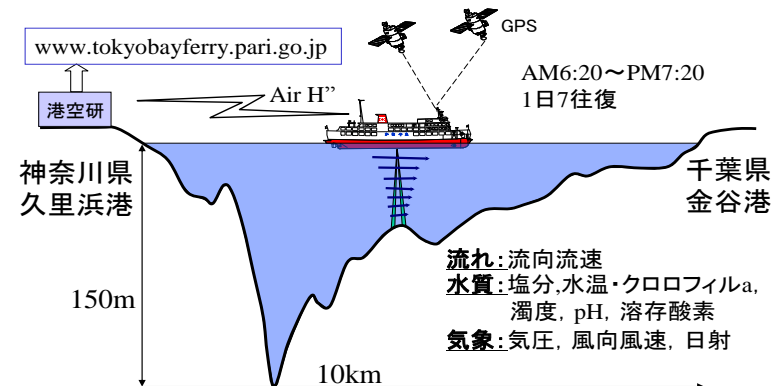
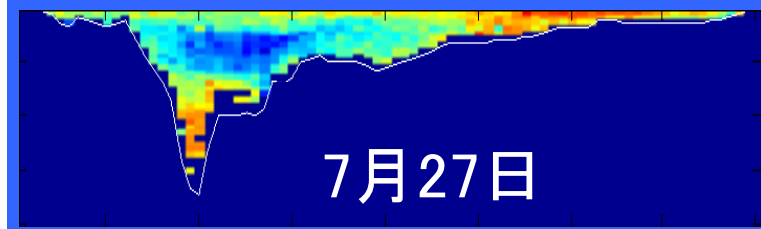
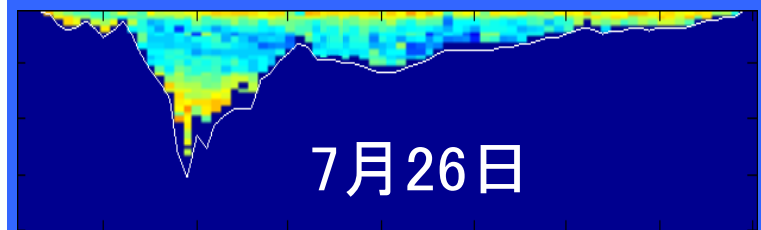
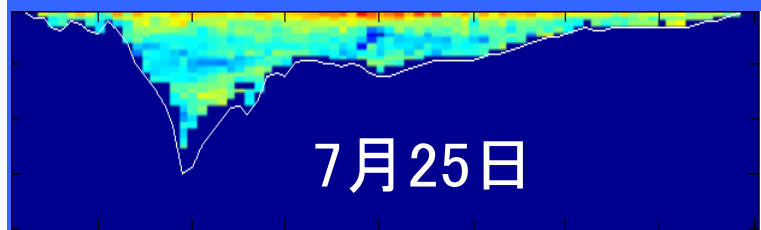
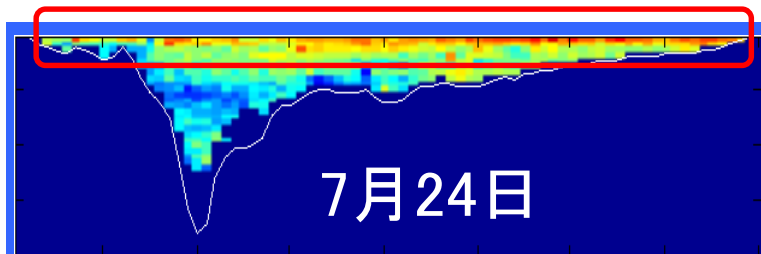




# 外洋からの熱の流入(鈴木ら, 2004)

2004年暑熱時の湾口流速データ: 南風による吹走流

表層10~20m 湾内へ流入



夏季5日ほど連続すると,  $0.9 \times 10^{10}(\text{m}^3)$ ,  
東京湾0.5杯分の外洋水が流入

# 各種対策より経済的?

## – 既往のヒートアイランド対策

23区 保水性舗装  $7\text{千万}(\text{m}^2) \times 1\text{万}8\text{千}(\text{円}/\text{m}^2) = \mathbf{1兆3千億(円)}$   
屋上緑化  $1\text{億}4\text{千万}(\text{m}^2) \times 2\text{万}(\text{円}/\text{m}^2) = \mathbf{2兆8千億(円)}$

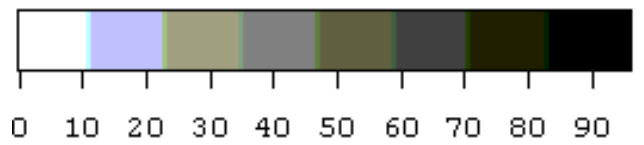
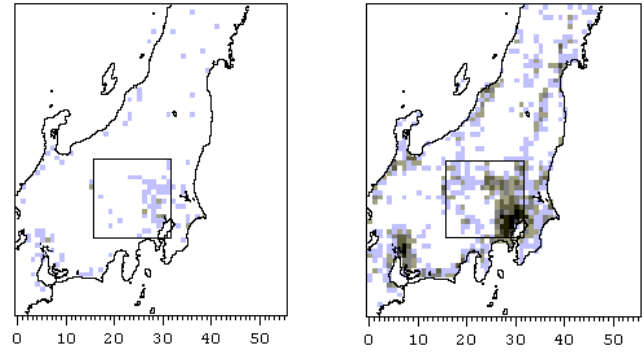
## – 既往の東京湾浄化対策

下水道事業費  $\mathbf{1兆3千億円}$   
河川事業費  $\mathbf{1兆2千億円}$

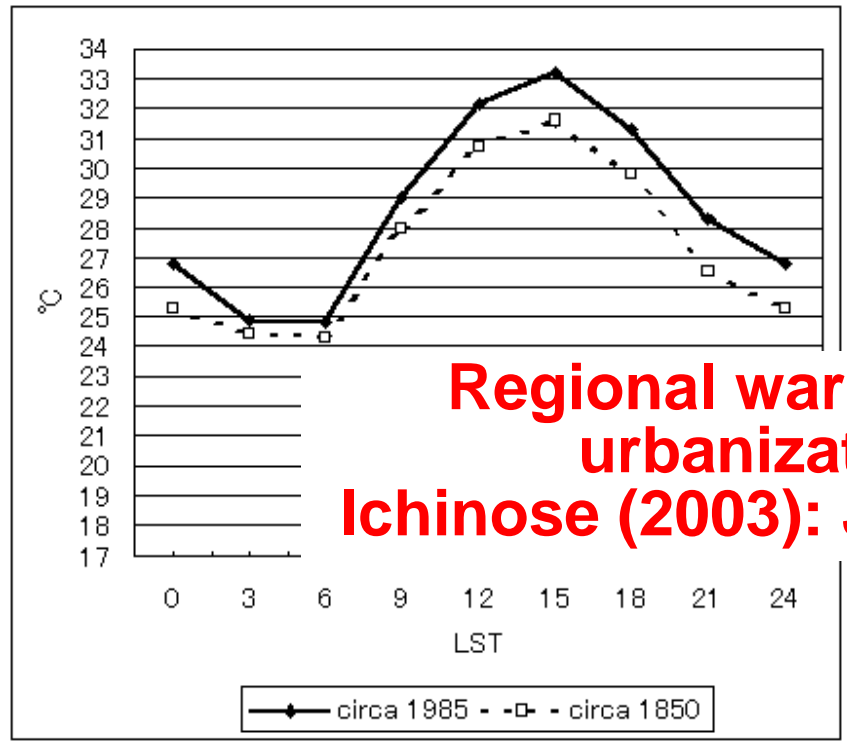
## – 海洋深層水導水

導水施設整備費  $50(\text{km}) \times 25\text{億}(\text{円}/\text{km}) = \mathbf{1千250億(円)}$



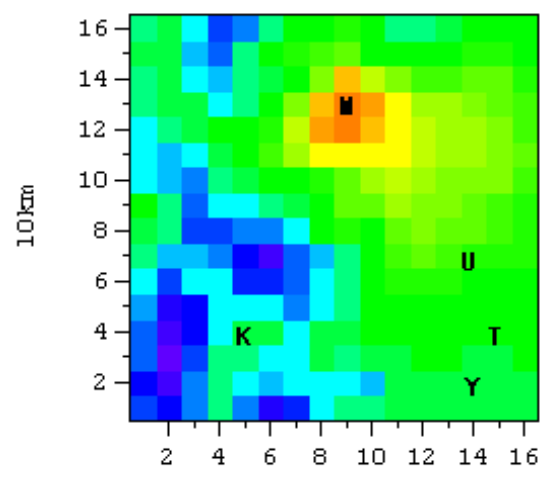


Percentage of Urbanized Area (%)

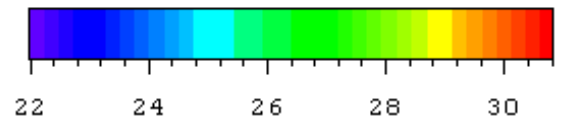
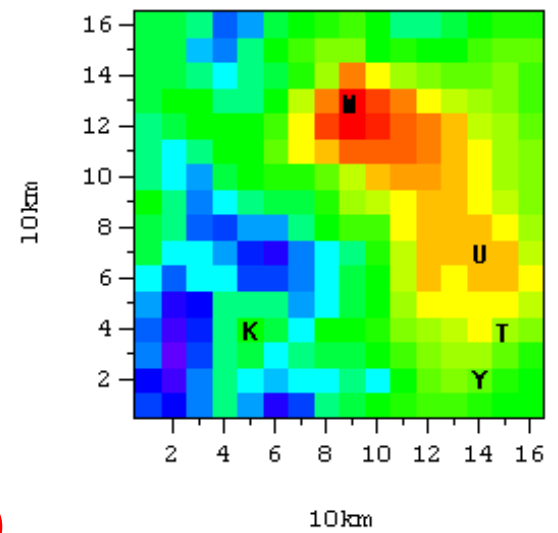


**Regional warming by urbanization**  
**Ichinose (2003): JGEE, Vol.9**

around Tokyo; circa 1850; July 27; 9 PM



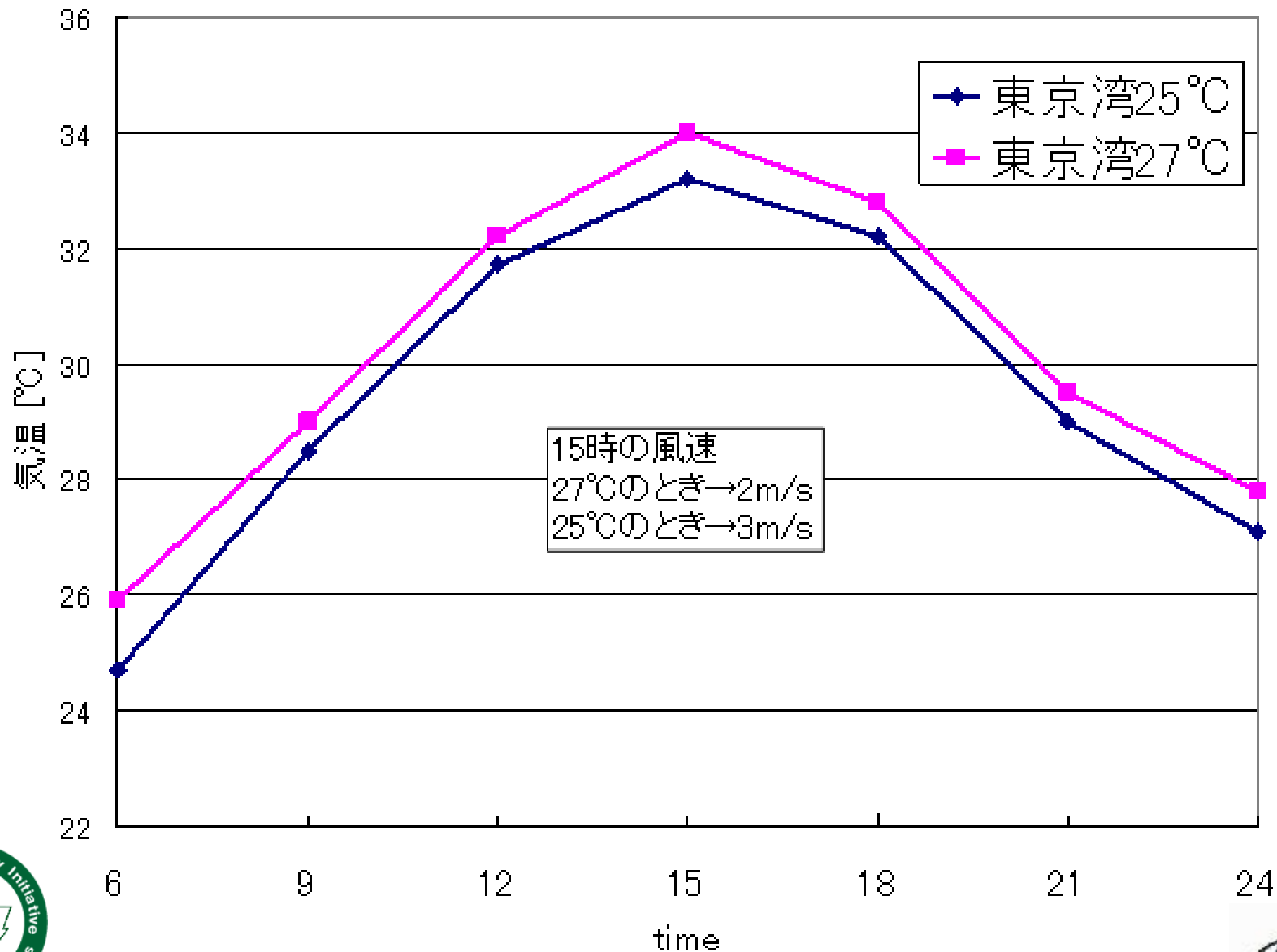
around Tokyo; circa 1985; July 27; 9 PM



(C)



# メソスケール気象モデルによる数値シミュレーション



## 取水・導水

海洋深層水は高塩分低水温であることから、表層に導水する場合密度が大きいことに留意する必要。

ソーラーパネルを海上に浮かべるなど、自然エネルギーを利用した導水技術が必要。

## 水質

含まれる栄養塩類をそのまま放水することは困難。ある程度の水質浄化対策が必要。

夏場は赤潮により栄養塩類が枯渇しているため、海洋深層水の供給は影響をもたらす可能性。

# 東京湾および海洋深層水の栄養塩類等の比較

地点名等	水温 (°C)	DO (mg/l)	COD (ppm)	アンモニア性窒素 (mg/l)	リン酸性リン (mg/l)
横須賀長井沖 表層*1	27.52	4.68	1.59	0.003	0.0001
横須賀長井沖 水深300m*1	8.36	3.41	1.58	0.002	0.001
東京湾公共用水域水質 測定点No.8 (湾中央) 上層*2	25.0	8.3	4.2	0.01	0.006
東京湾公共用水域水質 測定点No.8 (湾中央) 下層*2	23.6	3.9	1.8	0.12	0.049

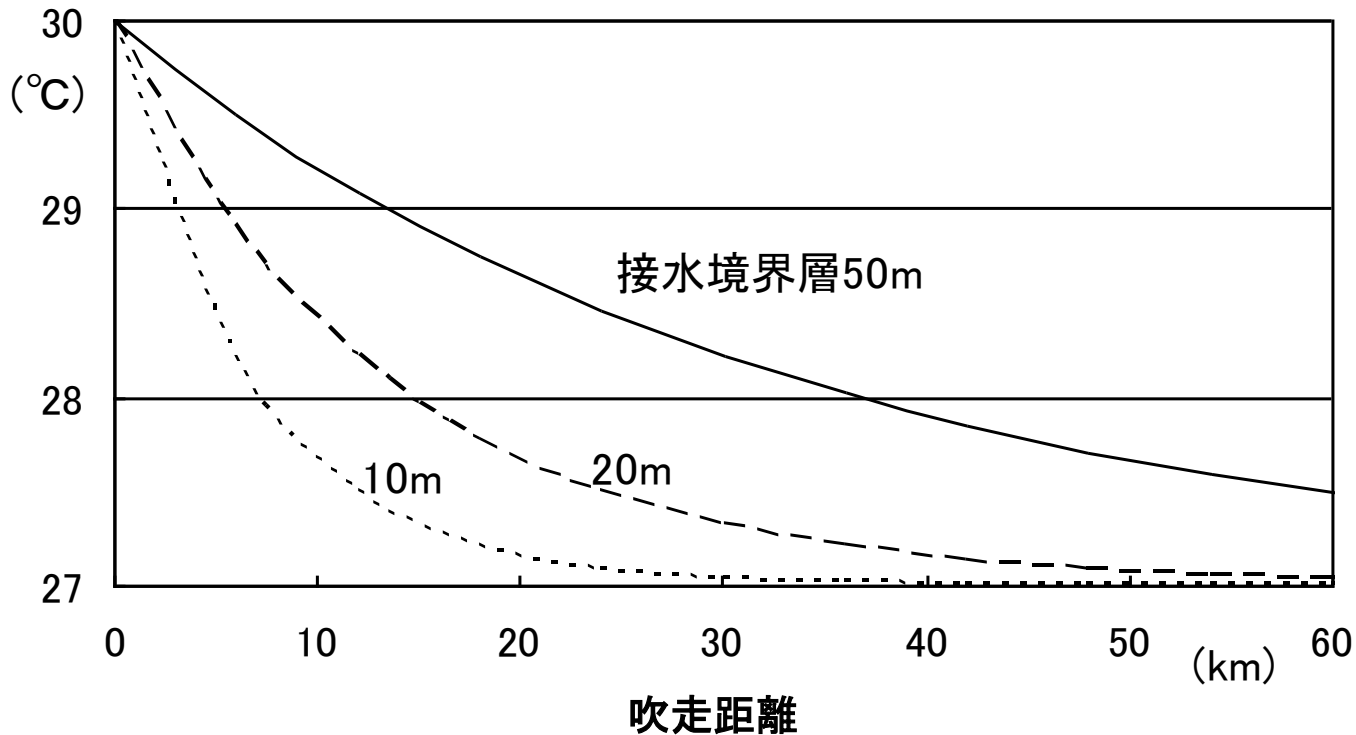
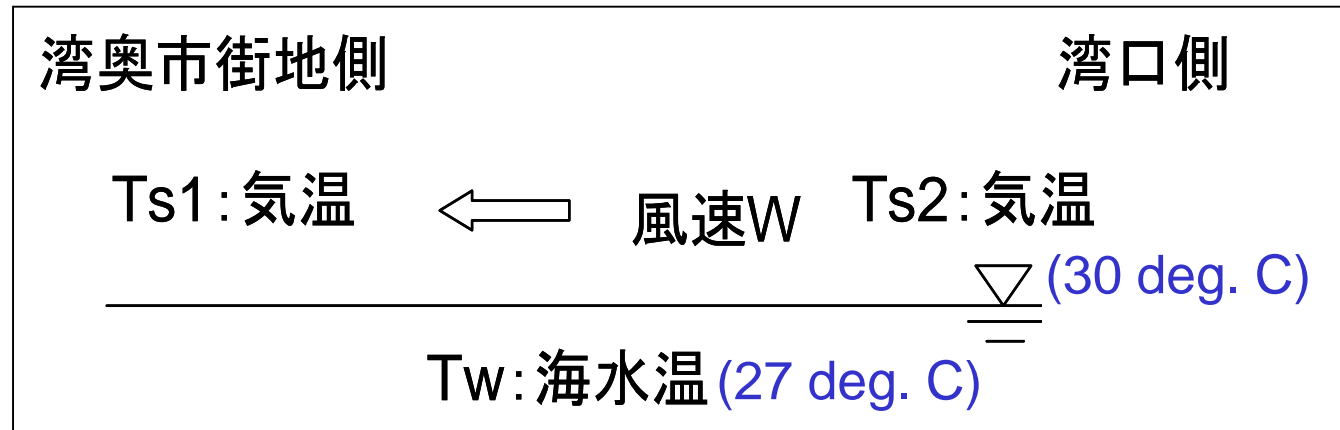
資料\*1 相模湾における海洋深層水の含有成分、神奈川県環境科学センター研究報告、第27号、H16.9  
データは平成14年9月5日

\*2 千葉県水質保全課公共用水域水質測定地点(海域)水質資料  
データは平成16年9月14日





# 接水境界層吹走時における海風の気温低減効果



# 接水境界層吹走時における海風の気温低減効果

風速  $W$ (m/s) 接水境界層厚さ  $h_a$ (m) 海水温  $T_w$ (°C) 湾口部での気温  $T_{s2}$ (°C)  
吹走距離  $L$ (m) を変化させ検討。

空気の密度  $\rho_a$ (=1.2 kg/m<sup>3</sup>) 空気の定圧比熱  $c_p$ (=1000 J/kg/K)

無次元量の顕熱輸送係数  $C_H$ (=1.5 × 10<sup>-3</sup>) 気体の単位体積  $V_a$ (m<sup>3</sup>)

気体と海面が接する単位面積  $S$ (m<sup>2</sup>)

顕熱フラックス 
$$Q_H = \rho_a c_p C_H (T_w - T_s) W \quad (1)$$

気温の変化 
$$V_a \rho_a c_p \frac{dT_s}{dt} = Q_H S \quad (2)$$

$$h_a \frac{dT_s}{dt} = C_H (T_w - T_s) W \quad (3)$$

$$\rho_s [kg/m^3] = 1.293 / (1 + 0.00367 T_s [°C]) \frac{H [\text{mmHg}]}{760} \quad (4)$$

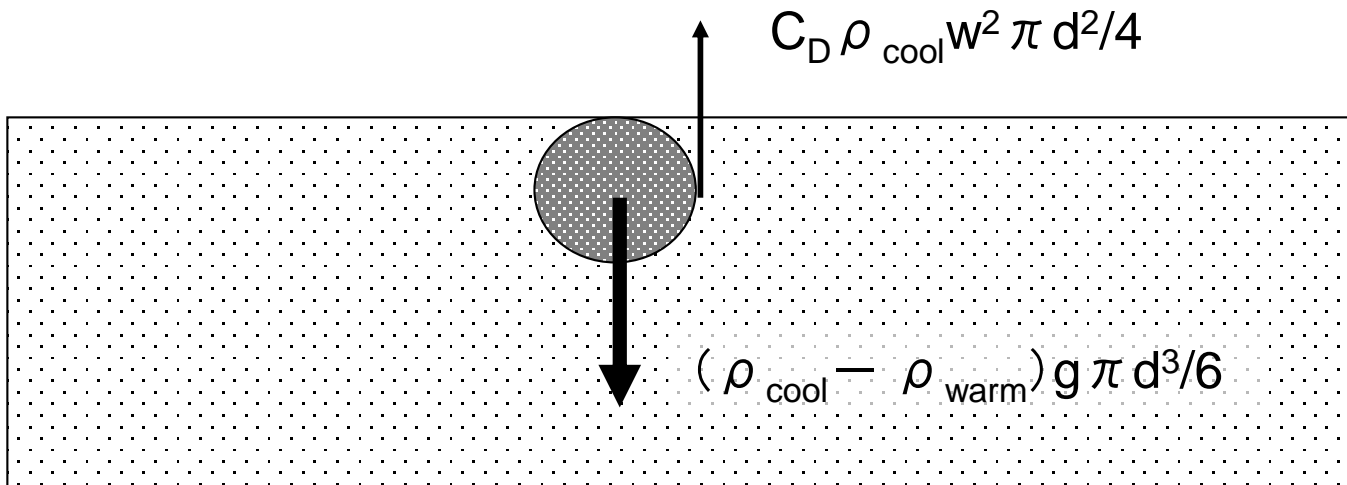
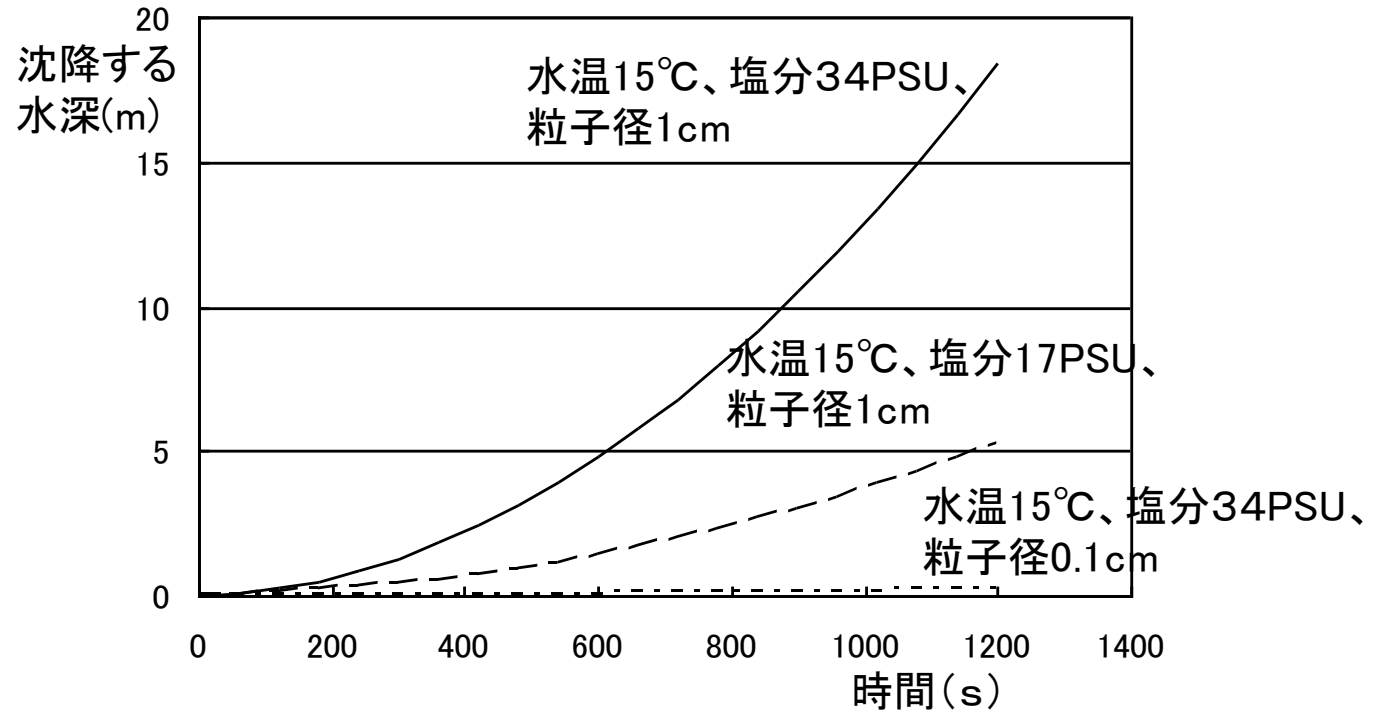
$$T_s = T_w + (T_{s0} - T_w) e^{-C_H W t / h_a} \quad (5)$$



# 冷水沈降の可能性

湾奥の海水

塩分 15PSU  
水温 30°C





# 冷水沈降の可能性

$$\text{水塊の沈降} \quad \rho_{cool} \frac{\pi d^3}{6} \frac{dw}{dt} - (\rho_{cool} - \rho_{warm}) g \frac{\pi d^3}{6} + C_D \frac{1}{2} \rho_{cool} w^2 \frac{\pi d^2}{4} = 0 \quad (6)$$

$$\text{抗力係数} \quad C_D = \frac{16}{\text{Re}} \quad \text{Re} = \frac{wd}{\nu} \quad (7)$$

$$\text{密度} \quad \rho = 1000 + 28.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35) \quad (8)$$

$w$ : 水塊の沈降速度 (m/s)     $d$ : 水塊の直径 (m)

$\rho_{cool}$ : 海洋深層水の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{warm}$ : 湾奥海水の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_D$ : 抗力係数     $\nu$ : 海水の動粘性係数

$S$ : 塩分濃度 (PSU)



## まとめ

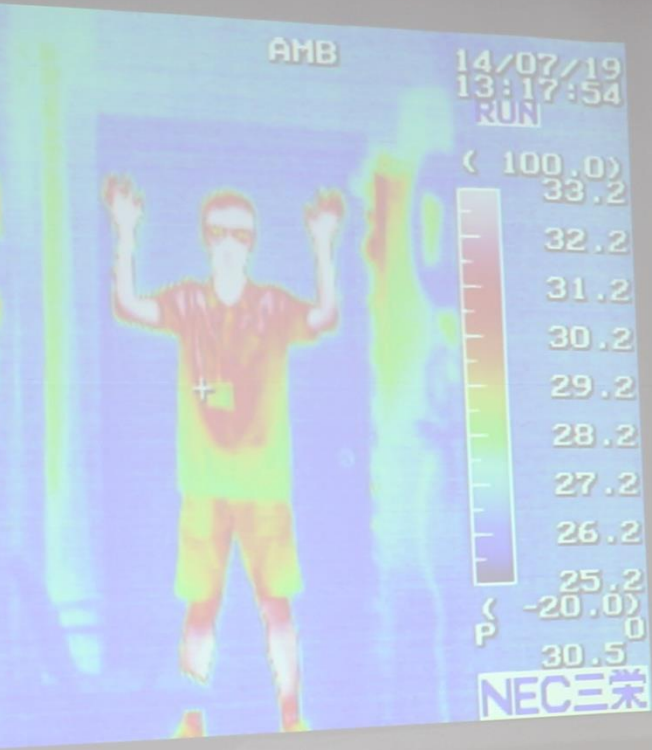
現状での都市域におけるヒートアイランド対策は、屋上緑化や保水性舗装等陸上での対策が主流である。既往の陸上対策のみでは限界があり、本提案は現状でも首都圏を冷却している海風をさらに有効に利用しようとする点に新規性を有する。

海水面温度を数℃下げる手段として、海洋深層水を東京湾奥の温排水の影響が顕著な区域へ導水することが有効であるとの仮説を提示し、主に専門家へのヒアリングと数値シミュレーションをベースに、海洋深層水導水による東京湾の海水面温度低減方策を具現化するための検討を行った。

ヒアリングで指摘された項目のうち、技術的な計算で対応が可能なものについていくつかの試算を行った。計算結果はいずれも本事業の可能性を否定するようなものではなかった。



# 国立環境研究所 夏の公開にて



温度とくらしのふしぎな関係  
～身近な熱の世界～

さわらないでね!

