

<p>自然地理学オンラインセミナー</p>	
<p>第4回 ヒートアイランドと気候学</p>	
<p>筑波大学・計算科学研究センター 日下博幸</p>	
	<p>日本気象協会より提供</p> <h3>本日の話題</h3> <ul style="list-style-type: none"><li>• 気候学と気象学の違い</li><li>• 都市のヒートアイランド現象の基礎</li><li>• 暑さ指数と暑さの緩和、暑さへの適応</li><li>• 都市は豪雨を誘発するのか？</li><li>• フェーンと猛暑、大きな誤解と真実</li></ul>


## はじめに

本講義の動画と講義資料は、このセミナーの予習復習のみに利用可能です。

本講義の動画と講義資料の(本サイト※1以外への)インターネット上へのアップロードや再配布は禁止です。

よろしく申し上げます。 筑波大学 日下博幸

※1 <http://danso.env.nagoya-u.ac.jp/phygeo/>



## 日下博幸 (Kusaka, Hiroyuki)

専門は気候学・気象学

Googleで検索  
筑波大学 日下

筑波大学 計算科学研究センター 教授  
(地球学類, 地球科学・地球環境科学学位プログラム)

日越大学, VJU 講師(気候学)  
気象庁気象大学校 非常勤講師(自然地理学)ほか

島根県出雲市生まれの千葉県君津市育ち

- 1997年 筑波大学大学院修士課程 修了(安成哲三教授)
- 1997年 (財)電力中央研究所 研究員
- 2001年 主任研究員
- (2002年 論文博士(木村富士男教授); 2002-2004年 アメリカ国立大気研究センター)
- 2006年 筑波大学計算科学研究センター 講師
- 2011年 准教授
- 2016年 教授

査読付論文 110編  
(被引用回数 4243回)  
解説・総説 39編  
テレビ紹介 40回  
新聞掲載 90回  
Boundary-Layer Meteor  
(Springer)  
最多引用論文認定  
2013年, 2014年



## 「小気候, 身近な気象の未解明問題への挑戦」

なぜ?に答える 地域, 地形, 土地利用, 人間活動を重視

地理学の(昔の)気候学との違い

地球物理学としての気象学との違い



都市気候

日本気象協会より提供



山岳気候

ヒートアイランド  
都市化と豪雨の関係  
東南アジアの都市気候

局地風(地域風), フェーン現象  
富士山の雲



生気象(熱中症リスクの分析・予測)



日本の気候全般

日下博幸・藤部文昭  
(編集代表)  
吉野正敏・田林明  
(編集委員)  
中川・三上・松本・境田・  
松山ほか計60名(著者)  
丸善出版

モデル開発・シミュレーション, 機械学習・統計解析, 現地観測  
理論・実験(観測)・データ解析

スパコンでシミュレーション

ライブカメラで雲の長期観察

PCで統計解析・機械学習

手作り百葉箱で  
ヒートアイランド観測

GPSソングで局地風の観測

## 「気候学」ってどんな学問？

- 「なぜ、あの地域では雨が多いの？」
- 「なぜ、あの地域は暑いのか？」
  
- ある地域の天気の特徴を調べ、その地域の気候と「気候形成」の理解を目指す学問
  
- 気候を知ると、その地域のことがより良く理解できる  
(水循環、地形、植生、伝統的な衣食住、農業、工業、文化など、歴史も?)
  
- 中学・高校では、社会科(地理学)
- 大学の気候学は地理学ではあるが、気象学との境界はなくなりつつある

## 「気象学」ってどんな学問？

- 「風はどこから吹いてくるの？」
- 「雲はどうやってできるの？」
- 気象学とは、“空気”と“水”と“太陽の光”が生み出す様々な**大気現象(大気中の自然現象)**の理解をめざす学問(実学的には、天気予報の学問)
- 気象は自然現象なので、そのメカニズムは場所に依存しない
- 中学・高校の気象学は、理科(地学)
- 大学の気象学は、地球物理学(流体力学+熱力学)。気候変動や気候システムの研究は、気象学者たちの方がむしろ活発にやっているように見える。



提供 日本気象協会

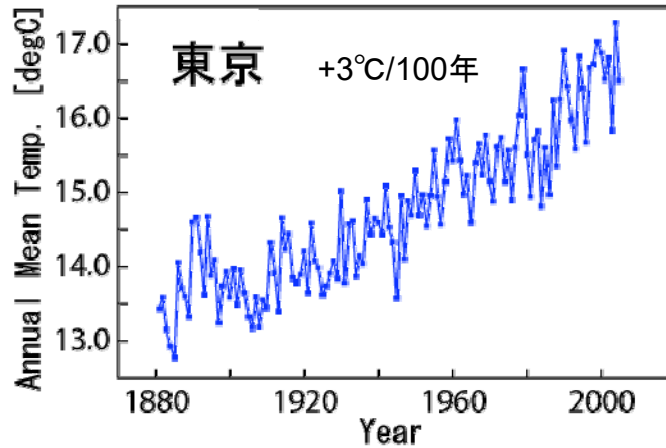
7

## 都市のヒートアイランド現象の基礎

8

## 東京の年平均気温の変化

気候変動(地球温暖化)の影響はどのくらい？  
ヒートアイランドの影響は？



9

		年平均	1月	8月	最高	最低
札幌	1901	2.3	3.0	1.2	0.9	4.1
仙台	1927	2.2	3.3	0.2	0.8	3.1
<b>東京</b>	<b>1901</b>	<b>3.0</b>	<b>3.8</b>	<b>2.4</b>	<b>1.8</b>	<b>3.9</b>
名古屋	1923	2.7	3.4	1.8	1.1	3.8
京都	1914	2.6	3.0	2.2	0.7	3.7
福岡	1901	2.6	1.9	2.1	1.1	4.1
<b>小規模都市</b>	<b>1901</b>	<b>1.1</b>	<b>1.0</b>	<b>0.9</b>	<b>0.7</b>	<b>1.5</b>

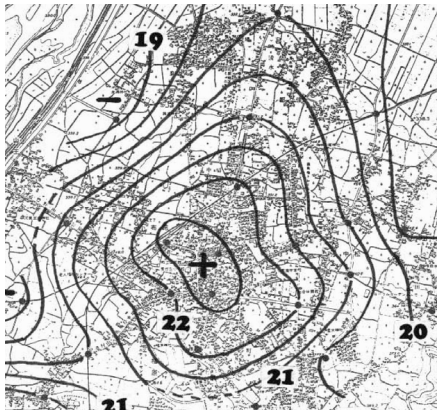
東京の気温上昇の約2°Cは都市化の影響(ヒートアイランド)

10



## ヒートアイランド(Urban Heat Island)の語源

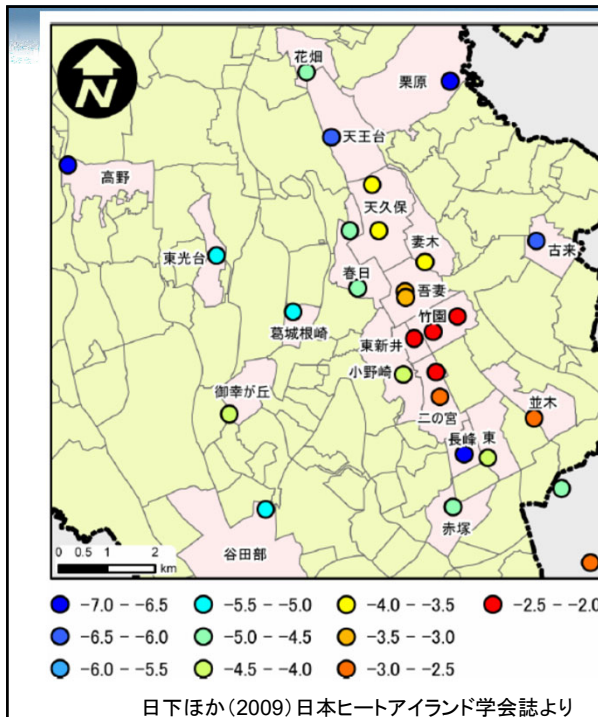
Luke Howard(雲の命名者としても有名)が1833年に著書「ロンドンの気候」で都心の高温現象を紹介



冬の晴天日の早朝の気温分布  
長野県小布施(榎原保志先生より提供)

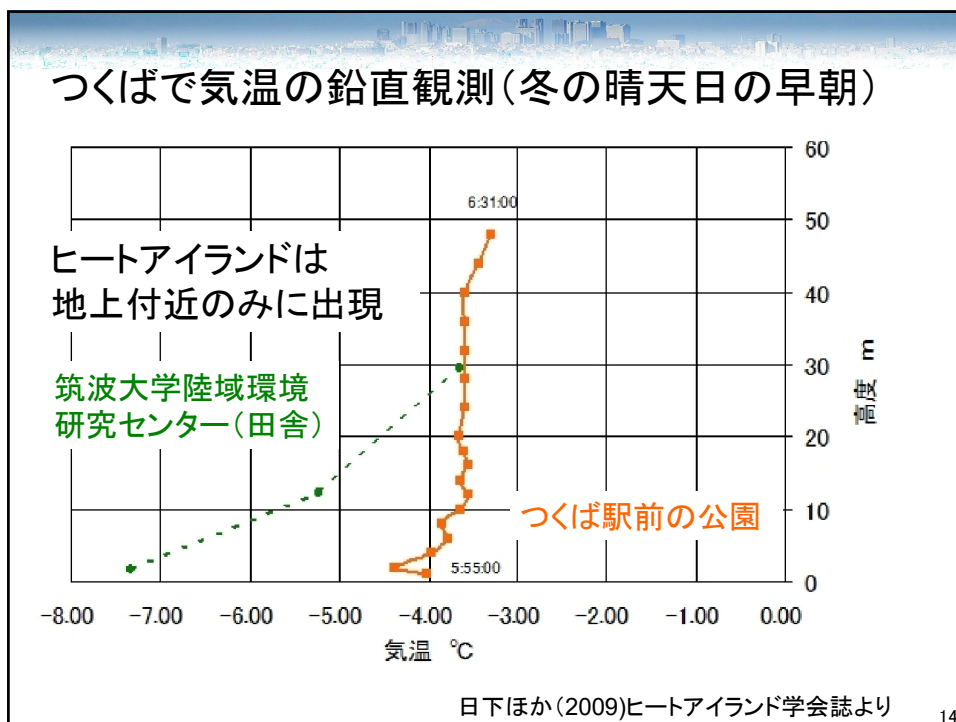
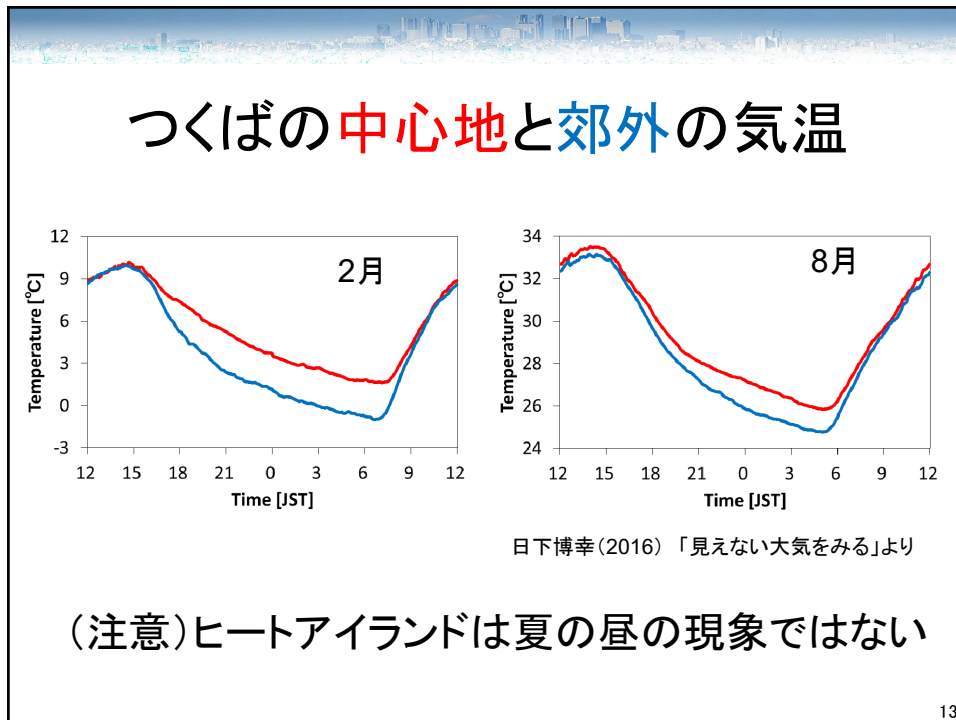


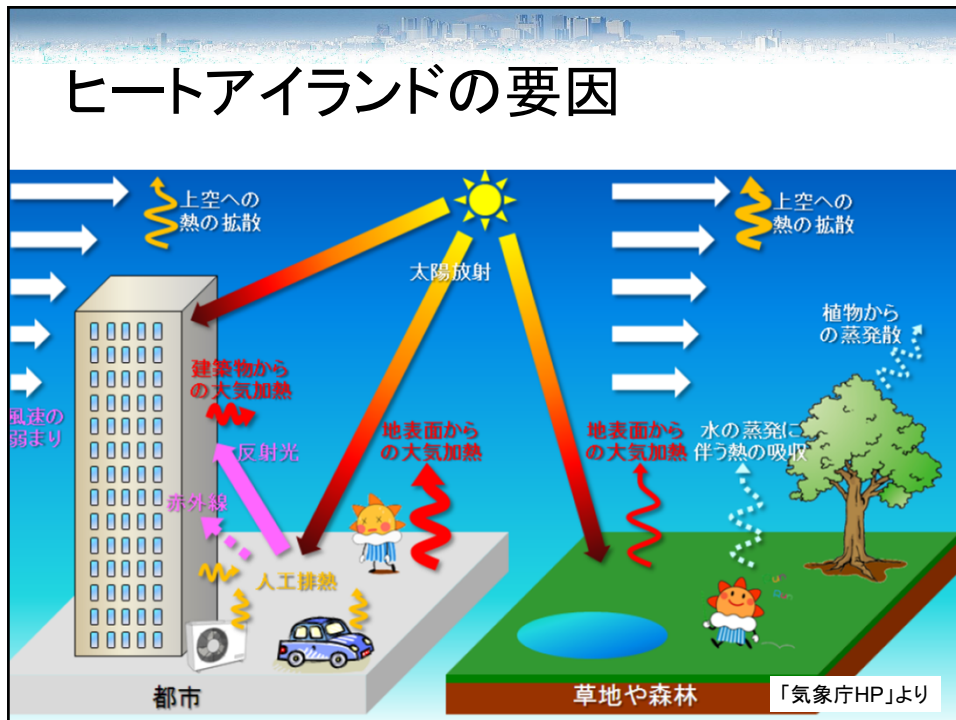
利尻島の地形(地理院地図より)



冬の朝、温度計を持ってみんなで観測(3年生の  
大気科学野外実験にて)

日下博幸(2016)  
「見えない大気をみる」より





スパンコンで流体力学の方程式などを解く

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -c_p \theta_0 \frac{\partial \bar{\Pi}'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\nu S_{ij}) + \bar{F}_i + \bar{B}\delta_{i3}$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}'}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{\theta}'}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -\tau_{\theta j} + \kappa \frac{\partial \bar{\theta}'}{\partial x_j} \right) + Q + R$$

$$\frac{\partial \bar{q}_v}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{q}_v}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -\tau_{q_j} + \kappa_q \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial x_j} \right)$$

都市街区内の気象を数m毎に予測  
(気温、湿度、風、放射、雲、建物・道路路面温度)

3次元放射を計算する

名古屋駅前の気象シミュレーション

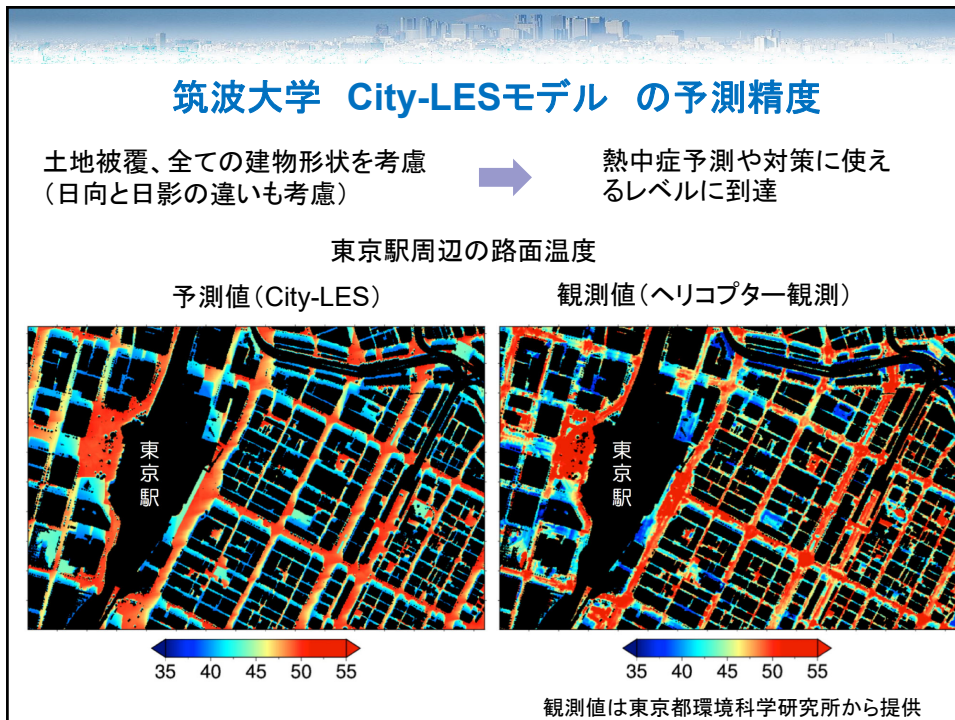
### 筑波大学 City-LESモデル

世界最高レベル空間分解能の都市気象シミュレーションモデル

(筑波大学・朴泰祐研究室、名古屋大学・飯塚悟研究室との共同開発)

気象学(日下)+建築工学(飯塚)+情報工学(朴)の力を結集できたからこそ開発できた。Since 2007





今後ますます暑くなる...

## 暑さ指数と暑さの緩和、暑さへの適応

LESモデルはこのような社会問題にも貢献できる

18

**人が暑く感じるのは高温だけのせいじゃない**

赤外線カメラの画像      赤外放射も忘れてはいけない

**熱中症のリスクは、暑さ指数(WBGT)で判断**

- 気温（高温だと暑い）
- 湿度（蒸し蒸しすると暑く感じる）
- 風（風がないと暑く感じる）
- 放射（日射、赤外線）

これらすべてを考慮した指標が**WBGT**(湿球黒球温度)  
※暑さ指数ともいう

WBGT(°C) =

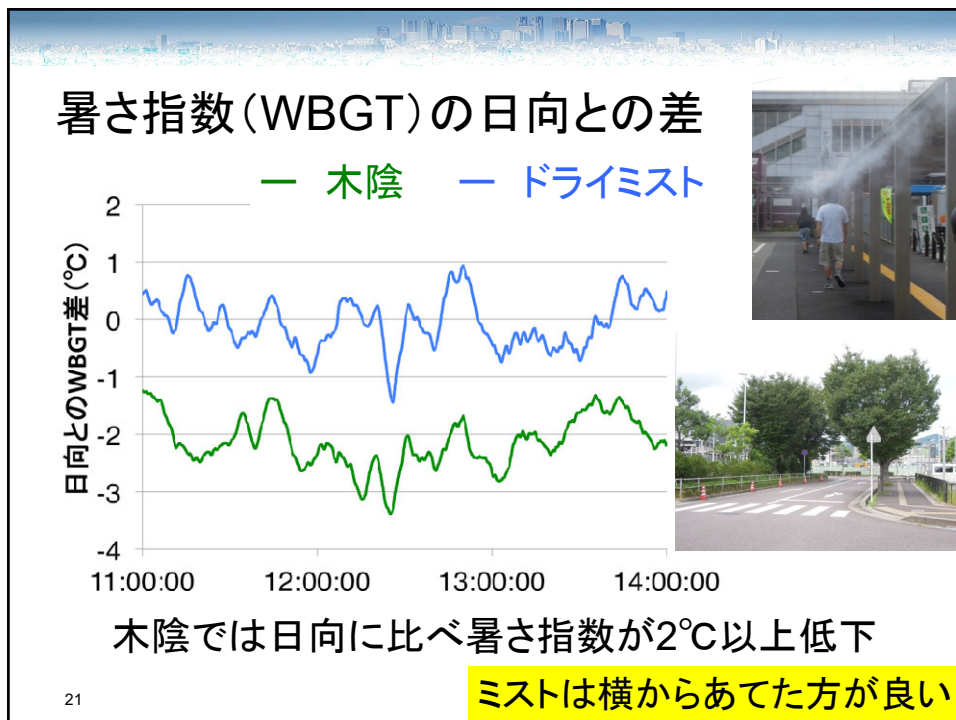
0.7 × 湿球温度

+ 0.2 × 黒球温度

+ 0.1 × 乾球温度

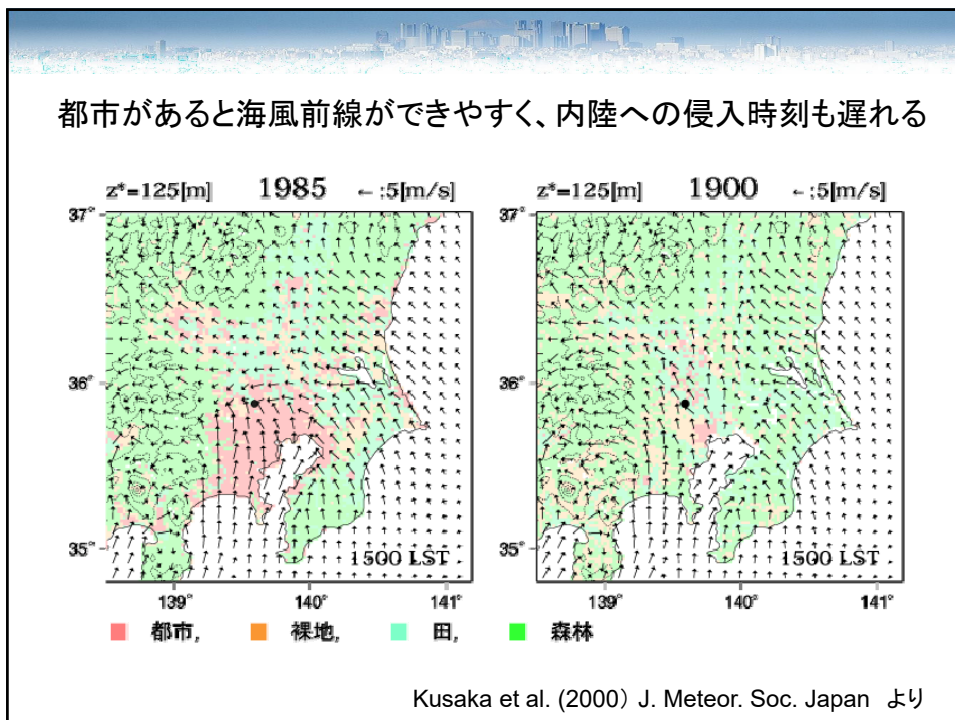
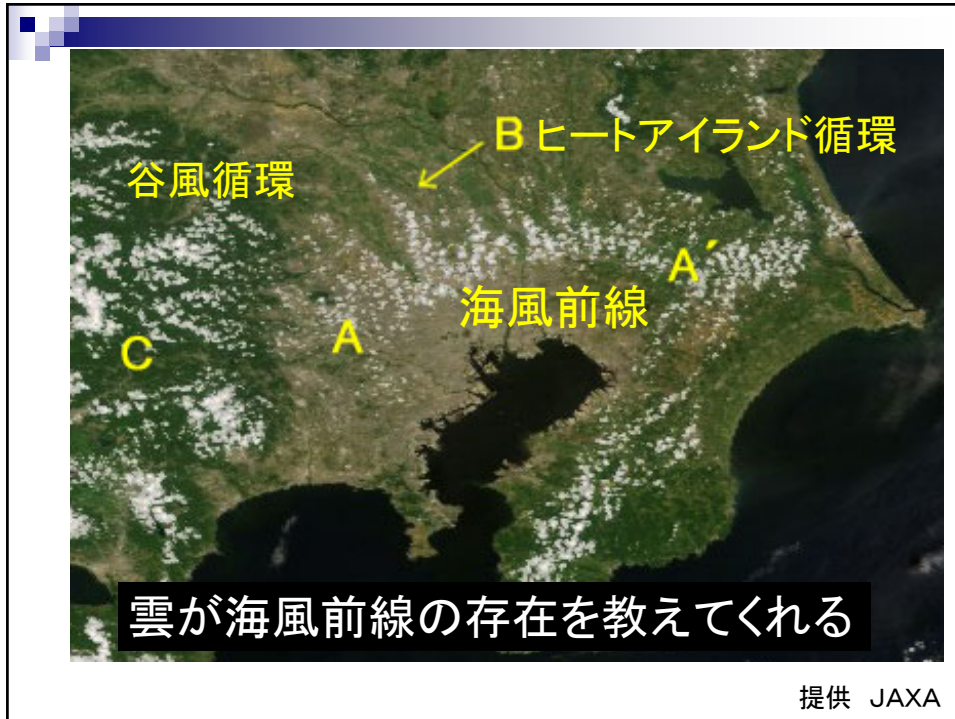
<b>暑さ指数</b>
危険 31°C以上
嚴重警戒 28~31°C
警戒 25~28°C
注意 25°C未満

実際の観測の様子  
環境省HPより



都市は、海風を強める

22

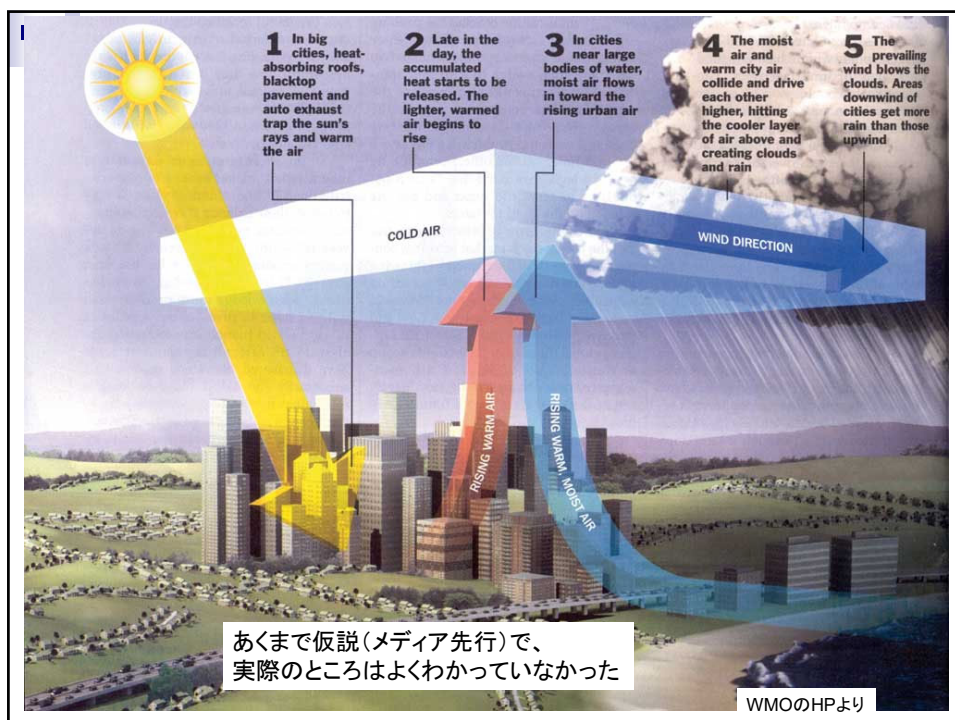




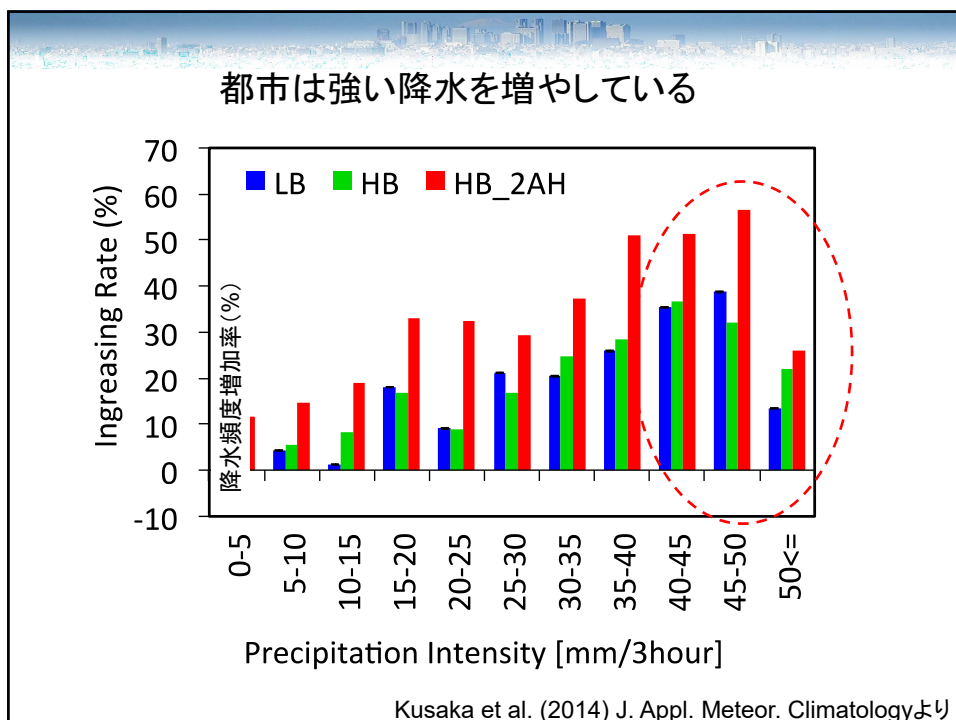
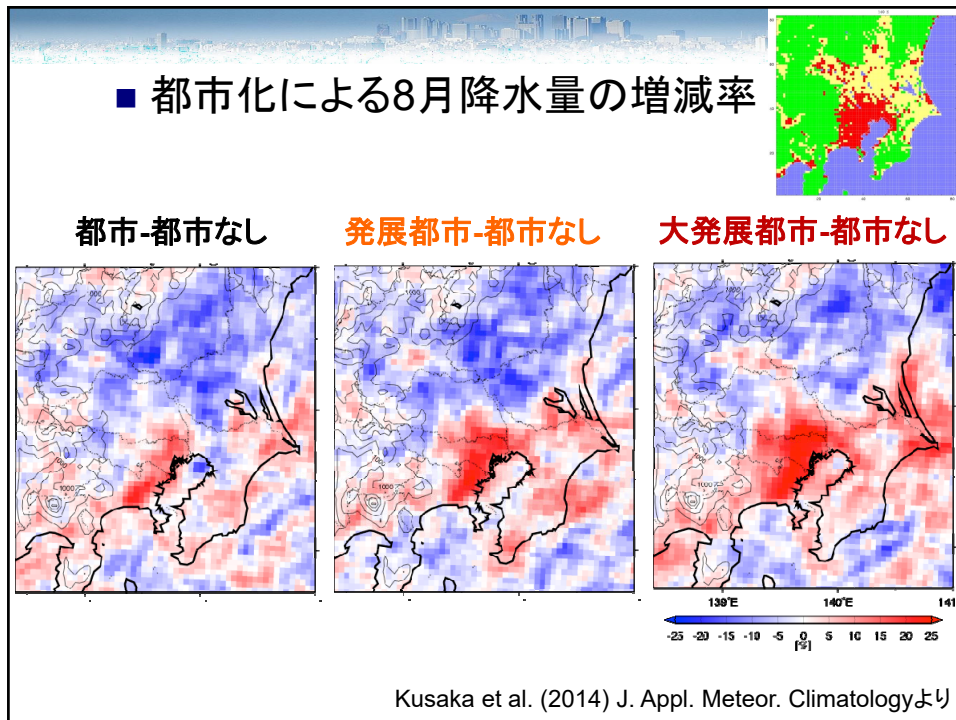
## 都市は豪雨を誘発する？

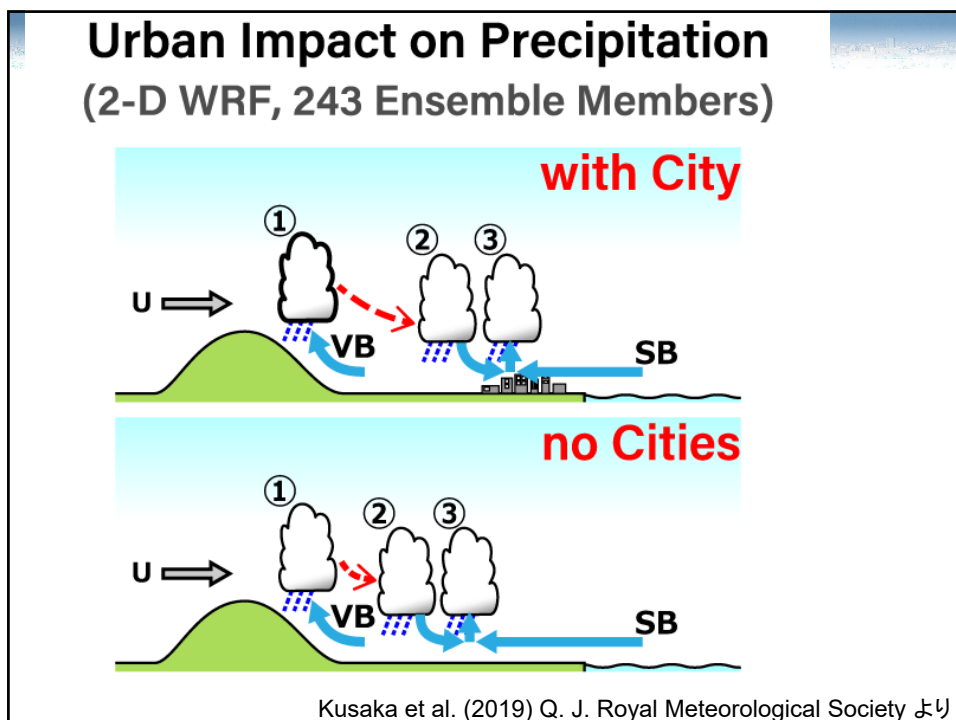
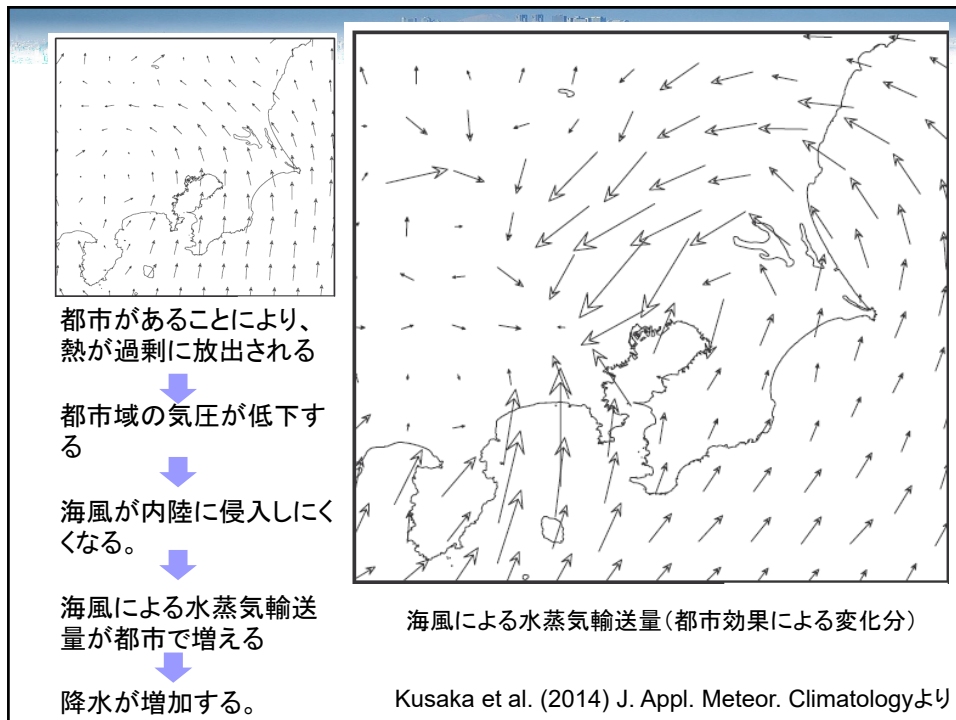
暖候期の午後、東京の都心では長期的に見て降水が増加傾向  
(Fujibe 2009) SOLA

25









## フェーンと猛暑、大きな誤解と真実

31

### なぜ、熊谷は暑いとされているのか？

- 1) 熊谷は、日本最高気温記録を更新したから  
(2018年7月23日に出した41.1°Cの記録は破られていない)
- 2) 夏、熊谷は、ほぼいつも東京より暑いから



熊谷が暑い理由をYAHOO! JAPAN知恵袋で調べてみた



盆地説、東京のヒートアイランド説(熱が海風によって運ばれてくる)、  
フェーン現象説などがあった。

- (1)はフェーン説である程度正しいが、満点とは言いがたい。
- (2)については、正しい回答を見つけることはできなかった。

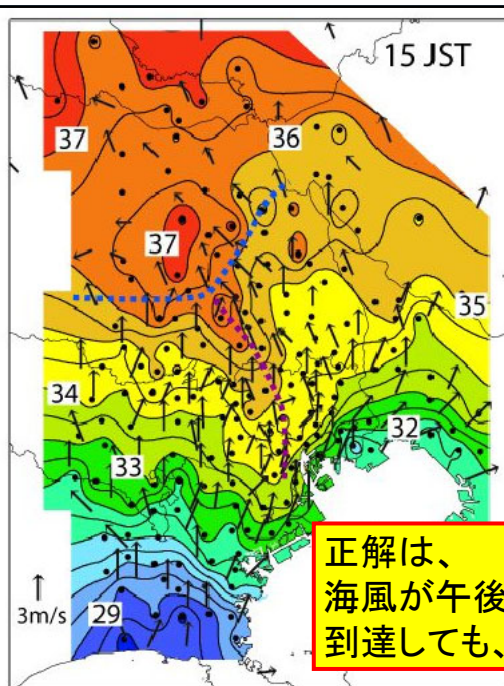
32

権威がある機関の情報でも、間違っていることはある

少し前の熊谷地方気象台のHP → 間違いの原因？



熊谷地方気象台HP(2018)より



正解は、  
海風が午後3時頃までに到達しない  
到達しても、海風の影響は比較的弱い

Yamato et al (2017) Int. J. Climatologyより

(以前とは異なり) 現在、気象庁は正しく解説している



熊谷地方気象台HP(2020)より

断熱加熱(力学フェーン)

空気は縮むと  
昇温する

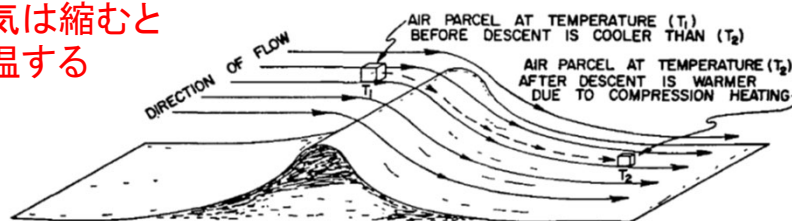


FIG. 2. Cross section through ridge showing descent. Temperature of air parcel at  $T_2$  is greater than temperature at  $T_1$  because of heating caused by the descent.   
これを乾いたフェーンと呼ぶのは日本人だけ？ (フェーンはそもそも乾いている風、頭痛が痛い?)

降水と凝結加熱  
(熱力学フェーン)

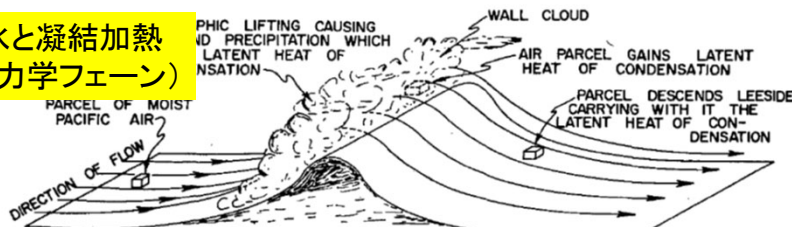


FIG. 3. Cross section through ridge showing moist air flow. Moist air rising causes condensation and the release of latent heat. The heat gained from the condensation process is realized on the leeward side.   
これを湿ったフェーンと呼ぶのは日本人だけ？ (フェーンは乾いている風なので誤解を生みそう)

Beran (1967) J. Appl. Meteorologyより



冷氣層の除去  
(チヌーク型)

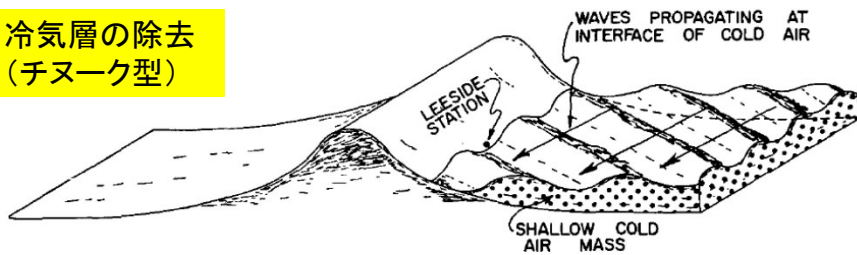


FIG. 4. Cross section through ridge with cold arctic or polar air banked against the side of the ridge. Waves are shown forming at top of cold air and periodically submerging stations located near the interface of cold and warm air. This action has been known to cause drastic temperature changes at lee-side stations.

冷氣層の除去  
(チヌーク型)

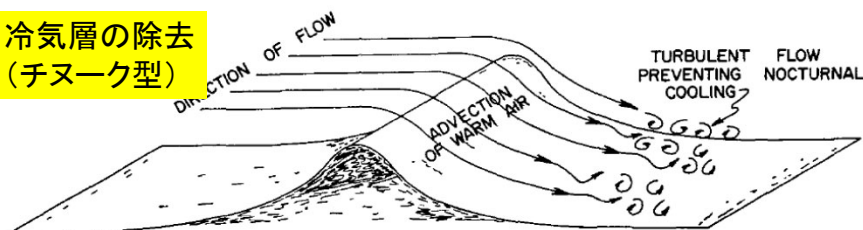
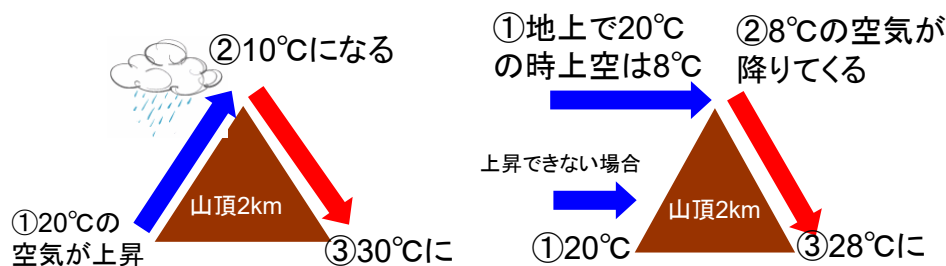


FIG. 5. Cross section through ridge showing advection of warm air and turbulence to the leeward side. When this process acts during nighttime, it prevents normal radiation cooling of the surface layer and leeward stations stay relatively warm.

Beran (1967) J. Appl. Meteorologyより

熱力学フェーン(左)とカ学フェーン(右)

通常、上空ほど気温は低い(1km上空の気温は、地上より平均的に6°Cくらい低い)。このような状態で風が山を吹き越えるとどうなる？



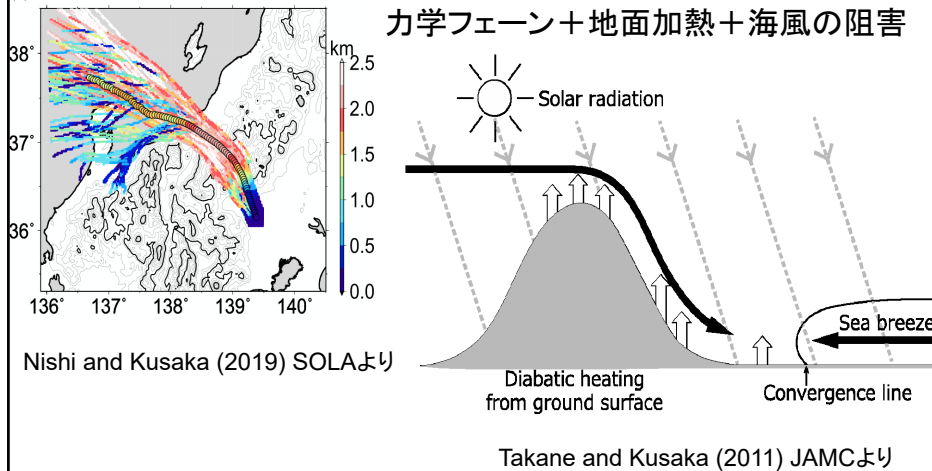
未飽和の空気が上昇・下降する場合、気温は1.0°C/100mの割合で変化する  
飽和している空気が上昇・下降する場合、気温は0.5°C/100mの割合で変化する

※空気(塊)が断熱的に(周囲と熱のやりとりなく)上昇すると、(上空は気圧が低い)ため空気は膨張する。空気が断熱的に膨張すると気温は低下する。未飽和の場合は、この気温低下の割合が1°C/100mで、これを乾燥断熱減率という。逆に、空気が下降すると気温は上昇する。

※飽和した空気が断熱的に上昇する場合、水蒸気が凝結する時に熱を出すので、気温低下が緩和される。気温低下の割合は(気温に依存するが一般的に) 0.5°C/100m程度となる。これを湿潤断熱減率という。38

日本最高気温記録41.1°Cは、少し変わったフェーンだった

2018年7月23日 41.1°C(熊谷)



本日のまとめ

- ヒートアイランドは、寒候期の夜間に明瞭
- ヒートアイランドは、人工排熱、土地被覆変化、乱流混合で
- ヒートアイランドは、海風前線を強くし、雲を作り、強雨をもたらす（一方、霧を抑制する）
  
- 人が感じる暑さは、温熱4要素で決まる。暑さ指数は3要素。
- 暑さ対策には、街路樹が有効で、ミスト散布をする際は横からで
  
- フェーンには、降水をもたらさないタイプもある（アルプスではむしろ、このカ学フェーンが主要なタイプ）
- 日本の記録的な高温は、地面加熱をともなうフェーンによる

ネットの情報には気をつけよう

## 若い皆さんへ (あくまで私の経験に基づく私見です)

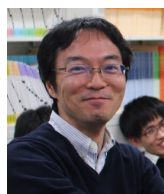
- 自分が研究テーマについて、地理分野が進んでいるところもあれば、他分野(近い分野)の方が進んでいることもあります。
- だから、他分野のことも勉強しよう。いろいろな分野の論文を読もう。地理学分野以外の人とも積極的に交流して、知識や技術を交換しよう。
- 地理学だから、こうしなければならない、ということはないと思います。流儀(手法)よりも、目的が大事。ただし、地理学的な見方とハートを忘れずに。
- 院生なら、世界を目指して研究しよう。成果を世界に発信しよう。
- 人に、「意味がない」、「無理」と言われたことでも、自分の信念を持ってやってみよう。良い研究なら、10年後にきっと評価は変わるはず。
- データなければ、自分で取ろう。道具がなければ、自分で作ろう。知識や技術がなければ、武者修行に行こう。

ネットの情報には気をつけよう... 41

自然地理学を学ぶと、地域を俯瞰的に見て、理解できるようになります。  
こんな時代だからこそ重要な見方です。

そして、自然地理学は素朴な疑問に答えてくれる、とてもおもしろい学問です。

みなさん、楽しく勉強・研究してください。



日下博幸

2020年7月11日

42

## この講義資料での引用文献

- Kusaka, H., F. Kimura, H. Hirakuchi, and M. Mizutori, 2000: The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, vol.78, p.405-420.
- Kusaka, H., K. Nawata, A. Suzuki-Parker, Y. Takane, and N. Furuhashi, 2014: Mechanism of precipitation increase with urbanization in Tokyo as revealed by ensemble climate simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol.53, p.824-839.
- Kusaka, H., A. Nishi, M. Mizunari, H. Yokoyama 2019: Urban Impacts on Spatiotemporal Pattern of Short-Duration Convective Precipitation in a Coastal City Adjacent to a Mountain range. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, vol.145, p.2237-2254.
- Nishi, A., H. Kusaka, 2019: Effect of Foehn Wind on Record-Breaking High Temperature Event (41.1 degrees C) at Kumagaya on 23 July 2018. *SOLA*, vol.15, p.17-21.
- Takane, Y., H. Kusaka, 2011: Formation Mechanism of the Extreme High Surface Air Temperature of 40.9 C Observed in the Tokyo Metropolitan Area: Considerations of Dynamic Foehn and Foehn-Like Wind. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol.50, p.1827-1841.
- 日下博幸, 大庭雅道, 鈴木智恵子, 林陽生, 水谷千亜紀, 2009: 冬季晴天日におけるつくば市のヒートアイランド - 予備観測の結果 - . *日本ヒートアイランド学会論文集*, vol.4, p.10-14.
- 日下博幸, 2013: 学んでみると気候学はおもしろい. ベレ出版, 261pp.
- 日下博幸, 2016: 見えない大気を見る - 身近な天気から、未来の気候まで. くもん出版, 159pp.

43

## 小中学校教師向け

子供から大人まで**楽しめる**気象学の本を書きました。今日の話の続きは、ぜひこの本で。



「なぜ、雲は落ちてこないのだろう?」、  
「風はどこから吹いてくるのか?」、  
「将来の気候はどうなるのだろう?」  
というような、子どもの空の様子に対する  
「どうして?」の答えがこの1冊の中にあります。

身近な天気と気象のふしぎに、**自分で行える実験**や**大学で実際に行っている研究**を交えながら答えていきます。

また、**大学での研究の様子**や研究成果を得るまでの取り組みの様子も紹介しています。

研究室の**卒業生が社会で活躍している姿**(気象学の仕事内容)も紹介しています。

くもん出版より発売中

44

### 高校生・地理学科の大学生向けの気候学の本です



ベレ出版より発売中

- 気象学と気候学の違いとは？
- 地球温暖化とヒートアイランドの違いは？
- 気象予報士でも知らない小気候とは？
- 都市はゲリラ豪雨を生み出すのか？
- 気候は、どのように形成されるのか？

ちょっと教科書的で、あまり  
 おもしろくないかもしれませんが、  
 分かりやすいとは思います。

45

### 日本各地の気候と産業・暮らしの関係に興味のある方はぜひ！ (指導教員に購入をお勧めしてください)

高価なので



丸善出版より発売中

- 気候の定義と見方
- 日本の気候の特徴と成り立ち
- 日本各地(都道府県毎)の気候の紹介
- 都道府県毎の気候と産業・暮らしの関係
- 都道府県毎の気象災害・大気環境問題
- これぞ地理学としての気候学

担当地域にゆかりのある総勢60名の著者による

46