



気象庁におけるヒートアイランド監視業務について

—都市気候モデルによる解析事例の紹介—

萱場 互起*

1. はじめに

近年、都市化の進展に伴い顕著となりつつあるヒートアイランド現象は、夏季においては、気温の上昇や熱帯夜の増加によって生活上の不快感を増大させ、熱中症等の健康への被害も生じさせている。また、冬季においても、植物の開花時期の変化や蚊等感染症を媒介する生物の越冬などの生態系の変化が懸念されている。観測データによる調査の結果、年平均気温は、大都市で顕著な上昇傾向を示しており、中でも東京の平均気温の変化量は $+3.3^{\circ}\text{C}/100\text{年}$ （統計期間は1931年から2008年）と顕著で、都市化の影響が少ないと考えられる国内17地点を平均した変化量の $+1.5^{\circ}\text{C}/100\text{年}$ （統計期間は1931年から2008年）に比べてはるかに大きい（気象庁 2009）。

政府は、ヒートアイランド対策に関する国、地方公共団体、住民等による対策や取り組みを推進するため、平成16年3月に「ヒートアイランド対策大綱」を取りまとめた。気象庁では、この大綱において行うこととされたヒートアイランド現象の観測・監視のための取り組みとしてヒートアイランド現象の実態やメカニズム解明のための調査を行い、ヒートアイランド監視報告としてまとめ、気象庁ホームページにて公表することとした。これまで、各都市の都市化による気温上昇の実態を観測データを用いて調査するとともに、都市気候モデルを用いた（主に3大都市圏である関東、近畿、東海地方を対象とする）シミュレーションも実施し、ヒートアイランド現象の実況の監視を行っ

てきた。観測データによるヒートアイランド現象の把握は、非常に重要であることは間違いないが、気温分布や経年変化の実態把握に留まらざるを得ない。他方、都市気候モデルによるシミュレーションは、現象を正確に再現するということが難しいが、都市域地表面状態を表現するパラメータを変更して比較実験を行うことにより、ヒートアイランド現象を引き起こすと考えられる要因推定を行うことが可能である。これら、観測データによる解析と都市気候モデルによるシミュレーションを組み合わせることにより、ヒートアイランド現象の実態やメカニズム解明への貢献が期待できる。そこで今回は、気象庁におけるヒートアイランド監視業務の紹介として、気象庁地球環境・海洋部気候情報課で使用している都市気候モデルの概要を説明し、2008年の高温日を対象とする解析事例をシミュレーションの手順に従って簡単に解説する。

2. ヒートアイランド現象と都市気候モデル

都市とその郊外を含めた地域について気温の等値線を描くと、都市部の高温が洋上に浮かぶ島の形のように現れることから、ヒートアイランド現象と呼ばれている。都市域への人口集中や、建造物の増加、緑地の減少などによって、都市が周辺の郊外と異なる気候となることは、すでに18世紀のロンドンで報告され、都市気候と呼ばれてきた。都市気候としては、ヒートアイランドと呼ばれる都市における特徴的な高温の他に、風速や湿度の減少、雨や霧の発生頻度の変化などが知られているが、その影響のあらわれ方は、都市の規模や周辺の地形条件などによって異なる。これら都市気候の主な要因として、以下が考えられている。

* Nobuyuki KAYABA, 気象庁地球環境・海洋部気候情報課。

・人工排熱の増大

都市域での冷暖房や物流など都市の人間活動に伴い消費されるエネルギーが最終的に熱となり排出される。

・土地利用の変化

都市域では、緑地や水面が建築物や道路の舗装に置き換わることにより、潜熱の減少と顕熱の増大が起こる。

・建築物の影響

建物が建物壁面や地面からの反射光をより多く吸収することで日中に熱を蓄積する。また、建物による摩擦の増大が風速を弱め地表付近の熱が拡散しにくくなる。さらに、建物により天空の見通しが悪化（天空率の減少）し、地表付近の放射冷却が妨げられる。

都市気候モデルは、上述した都市と大気との運動量や熱交換をモデル化した気象モデルで、建物・道路や公園などの現実の土地利用形態や人工排熱なども取り入れて、都市固有の気候状態を再現する。計算に用いる土地利用形態は、国土交通省国土計画局参事官室が公開している国土数値情報ダウンロードサービスのページ (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>) の土地利用メッシュ（平成9年度版）をもとに、都市・森林・水田・草地・裸地・水面の6カテゴリに再分類し、各計算格子に面積割合として与えている。人工排熱は、大学や研究機関によって整備された月別の各時間のデータを使用している（時別の人工排熱量が得られない東海地域については、各月で時別のデータが整備されている東京都のデータをもとにした推定値を用いている）。日々の大規模な気象状態を取り込むために計算領域の境界条件として、気象庁のメソ数値予報モデルによる1時間ごとの解析値を用いる。このように、実際の都市（都市

地表面の広がりや人工排熱の水平分布）と実際の気象条件にもとづいて地表付近の気温分布を表現できることがこのモデルの特徴となっている。

モデルの概要を第1表に示す。地表面の放射過程では、6つのカテゴリに分割された1格子内の地表面（第1図に例を示した）における大気第1層に渡す顕熱、潜熱フラックスをそれぞれのカテゴリごとに計算し、面積割合に応じた平均を求める（モデル格子のモザイク化）ことで、より詳細な土地利用の違いも表現している。それぞれのカテゴリで設定するパラメータは、建物や樹木の高さとその関数である粗度長、ゼロ面変位、また、林や草地での熱交換に関連する葉の気孔抵抗、葉面積指数（LAI）、地表面の水分量（ウェットネス）、地表面アルベド、キャノピーアルベドなどである。さらに、都市域では、第2図のような建物による熱の蓄積と大気との熱交換を計算するために、建物の壁面積指数や天空率、仮定する壁の厚さ等のパラメータが加わる。

「粗度」（幾何学的粗度）とは、地表面の凹凸の大きさを表す。「ゼロ面変位」とは、凹凸の影響により風速がゼロとなる高度（凹凸がなければ地表面となる）

第1表 都市気候モデルの概要。

基本方程式系	静力学・ブジネスク近似系
予報変数	風速の x, y 成分, 温位, 比湿
座標系	水平：デカルト座標系, 鉛直：地形準拠座標系
水平格子	4 km メッシュ
鉛直格子	staggered 格子系, 最下層は15 m
水平格子数	50×50（関東地方）, 100×100（近畿・東海地方）
鉛直格子数	18層, 上限6000 m
放射	長波放射：水蒸気, 炭酸ガスの温室効果 短波放射：大気の散乱, 水蒸気による吸収 (Katayama 1972)
乱流	レベル2クロージャーモデル (Mellor and Yamada 1982)
地表面	1格子内の地表面を6つのカテゴリ（水面, 裸地, 草地, 水田, 森林, 都市）に分割し、それぞれにおいて大気第1層とのエネルギー、運動量の交換を仮定。 水面, 裸地は、(Louis 1979) のパラメタリゼーションで計算。 地面, 水面温度は、強制復元法 (Deardorff 1978) で予報。 草地, 水田, 森林は、植生キャノピーモデル (Deardorff 1978) で計算。 都市は、植生キャノピーモデルに準じるが、以下の点で異なる。 ・ビルと道路で構成されるキャニオンを仮定。 ・ビルと道路の放射は道路比, 天空率の関数で計算する。 ・ビルの熱容量を考慮し、ビル表面温度及び地面温度を予報変数とする。
降水過程	考慮していない

で、風に対する見かけ上の高さを表す。「気孔抵抗」とは、気孔内の空気中の拡散抵抗を表す。「葉面積指数 (LAI)」とは、葉の総面積が単位地表面積に占める割合を表す (近藤 2000)。

「壁面積指数」とは、建物の壁の総面積が単位地表面積に占める割合を表す。

「天空率」(地面から見た天空率)とは、ある点から空の見える部分をまず天球に投影し、これをさらに水

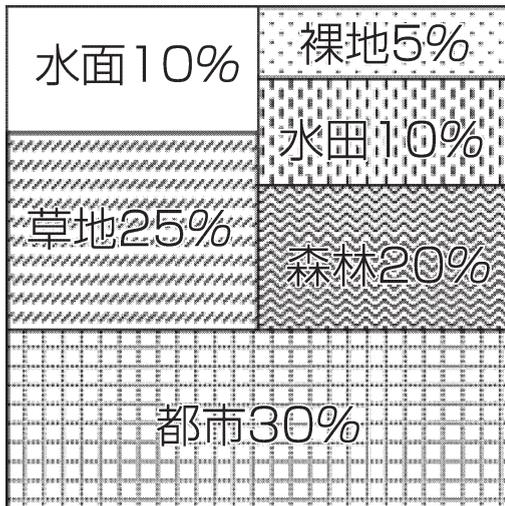
平面上に投影したときの全体の面積に対する割合を表す (近藤 2001)。

3. 高温となった日のヒートアイランド現象

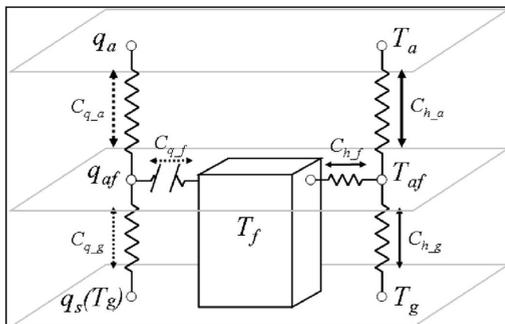
関東地方を対象とした都市気候モデルを用いたシミュレーションによる分析の事例を示す。分析対象日は、晴れて高温となった2008年7月25日とした。この日の高温は比較的顕著で、東京の最高気温が34.5°C、熊谷で36.2°Cだった。第3図にシミュレーション領域とモデルにおける地形を示す。初期値は、2008年7月24日09時 [JST] で、12時間のスピナップを行い、解析には7月24日21時 [JST] からの24時間を使用する。

3.1 シミュレーション結果とアメダス実況との差
計算した最下層 (高さ15 m) の気温からアメダスの観測条件にあわせるため草地上1.5 m の気温を換算し、アメダス気温との差を求めた (第4図)。05時の差は都市域で-3~-2°C、15時の差は小さく、都市域では概ね+1°Cとなっている。なお、第3図で示した範囲において標高が100 m 以下に位置するアメダスとの根平均二乗誤差 (RMSE) は、05時で約1.8°C、15時は約1.5°Cだった。なお、本モデルによる一般的な結果とアメダスとの差は、概ね±1°C以内であることが確認されている (気象庁 2005)。

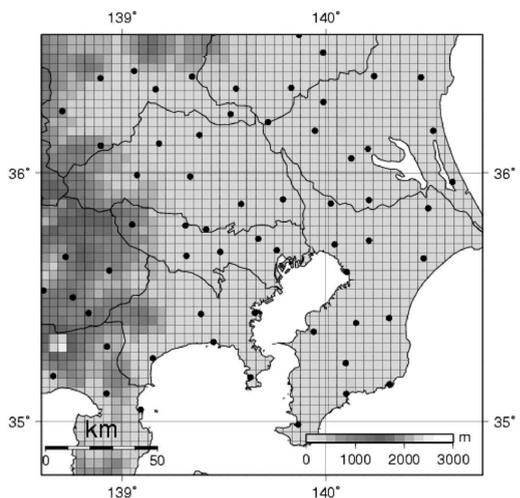
風については、ベクトル量なので東西成分 U、南北成分 V を独立に評価せず、U を実部、V を虚部として、モデルの最下層の風向とアメダス実況の複素相



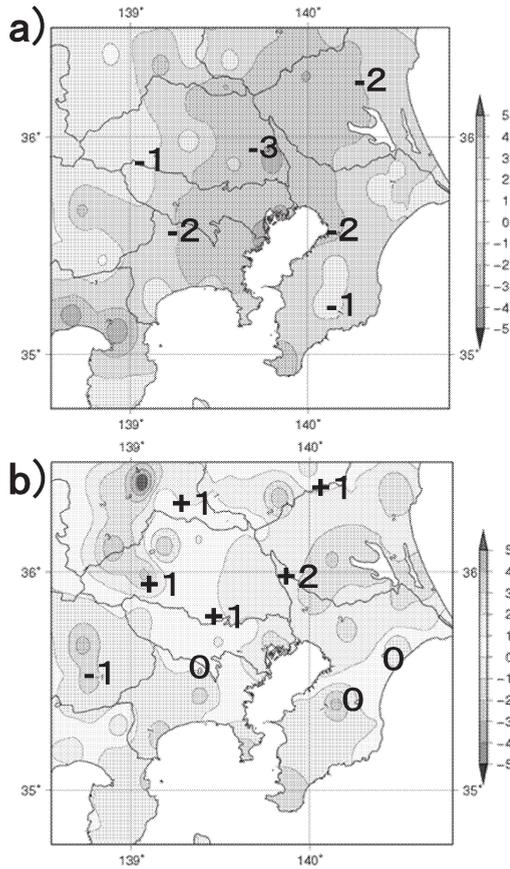
第1図 都市気候モデルの1格子内の土地利用の 카테고리によるモザイク化の例 (それぞれの 카테고리ごとで地表面における熱・運動量輸送の計算を行い、面積に応じて格子平均の輸送量をもとめる。)



第2図 建物と大気最下層との熱交換過程。顕熱フラックスによる熱交換と建物による熱の蓄積が考慮されている。図中の記号について、 T は温度、 q は比湿、 C は熱容量、 f は建物面、 a はモデルの大気面、 g はモデルの地表面を示す。



第3図 シミュレーション領域とモデルにおける地形。黒点はアメダスの位置を示す。

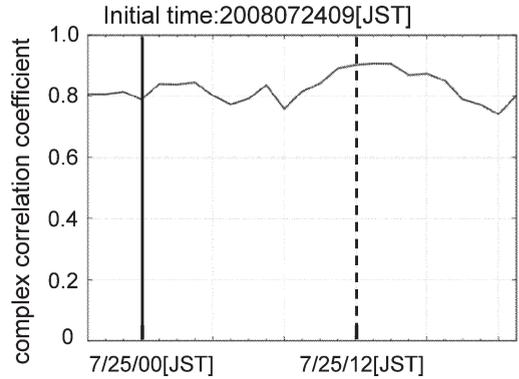


第4図 関東地方における2008年7月25日のシミュレーション結果とアメダス実況の差(°C)。a) 05時, b) 15時を示す。

関係数(1に近づくほど精度が良い)で精度を評価した。観測点によっては局所的な地物の影響を受けるアメダスとそれらを考慮しないモデル計算の結果の比較であるが、計算期間の複素相関係数は、約0.8で推移しており(第5図)、シミュレーションによる結果は、風の実況を比較的良好に再現していたと評価した。夜間から早朝の相関係数が日中に比べやや小さくなるが、海風が支配的な日中と比較して夜間の陸風は一般に弱く、風向が安定しないためと考えられる。

3.2 解析値の計算

モデルの系統誤差を取り除くため、都市気候モデルによる気温のシミュレーション結果をアメダス実況気温により補正した値を解析値として求める。解析値の計算方法を示す。都市気候モデルの各格子点の気温について、格子点を中心とした半径0.5°以内のアメダス



第5図 関東地方における2008年7月25日を対象としたシミュレーションの風向と計算領域内のアメダス実況の複素相関係数の時系列。図に示した期間は7月24日21時から25日21時まで。(モデルの初期値は2008年7月24日09時)

との差を、それらの距離の逆2乗で重み付けした平均差で補正する。この補正で使用する式は(1)である。

$$t^{anal} = t^{fcst(gp)} + \sum_i (t_i^{fcst(obspoint)} - t_i^{obs}) w_i$$

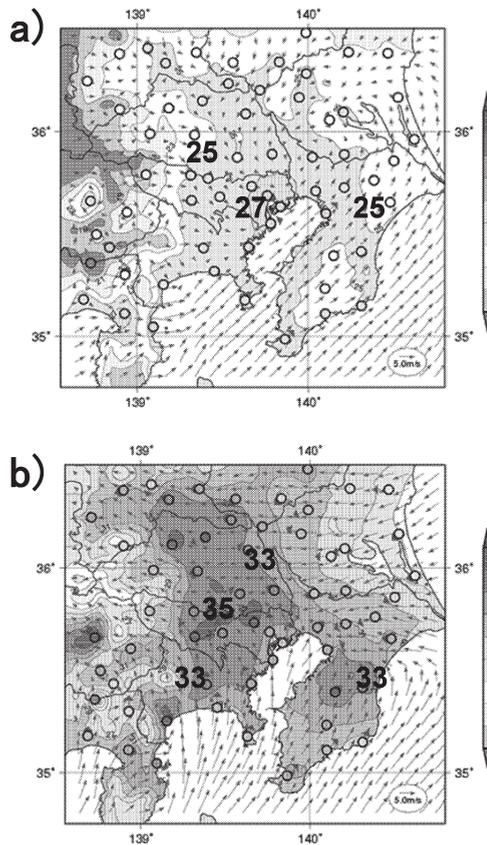
$$w_i = \frac{1/distance(i)^2}{\sum_i 1/distance(i)^2} \tag{1}$$

- t^{anal} : 解析値 (各格子地点)
- $t^{fcst(gp)}$: シミュレーションによる計算結果 (各格子地点)
- $t^{fcst(obs)}$: シミュレーションによる計算結果の内挿値 (アメダス地点)
- t^{obs} : アメダス実況値 (アメダス地点)
- $distance$: モデルにおける格子とアメダス地点の距離
- i : モデルにおける各格子地点

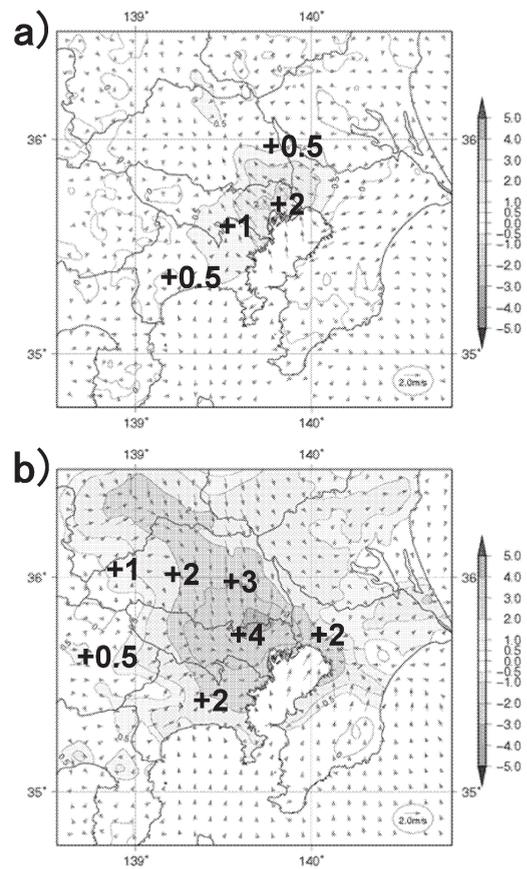
第6図に2008年7月25日の朝方と日中の解析値を示す。05時の気温は、25°C以上の領域が東京の都心域を中心に分布している。また、都心や内陸では弱い陸風が見られる。15時には、東京都から埼玉県や群馬県にかけて33°C以上の領域が広がり、東京都と埼玉県の都県境では35°C以上の極大域(練馬アメダスの実況は35.3°C)となっている。また、海風が内陸に吹きこんでいる様子も見ることができる。

3.3 都市による昇温

都市気候モデルによるシミュレーションでは、いく



第 6 図 関東地方における2008年7月25日のシミュレーション結果とアメダス実況から得られた解析気温(°C, 等値線)と風(矢印)の分布. 丸はアメダスの位置を示す. a) 05時, b) 15時を示す.



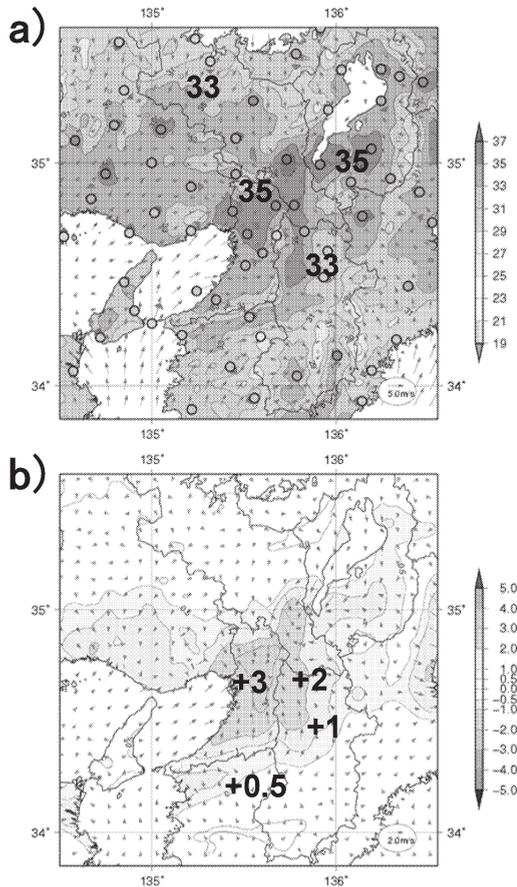
第 7 図 関東地方における2008年7月25日のシミュレーション結果で「都市がある場合」と「都市がない場合(モデルの中で都市として分類されている区域を, 仮想的に全て草地に置き換えたもの)」の気温(°C, 等値線)の差と風(矢印)の差. a) 05時, b) 15時を示す.

つかのパラメータを変更しての比較実験を行うことができる. 例えば, 基本となるシミュレーションの結果から, 現状の土地利用形態での「都市」を取り除いて「草地」に置き換え, 「人工排熱」をゼロにするという仮想的な「都市無し」条件でシミュレーションを実施し, 基本シミュレーション結果との差を求めることにより, 都市による昇温の寄与が推定可能となる.

第 7 図に, 基本シミュレーション結果と「都市無し」シミュレーション結果との差分画像を示す. 等値線は地上気温の差, 矢印は風ベクトルの差である. この図から, この特定日における都市による影響は, 朝方05時で東京の都市域を中心に最大で約+2°C, 日中にかけて関東地方の広い範囲におよび最大で約+4~+5°C, 寄与していたことが示唆される. また, 都

市による昇温の影響が及ぶ範囲は, 朝方で都市部に集中し, 日中には内陸部に広くあらわれているが, これは観測から知られているヒートアイランド現象の特徴と矛盾しない. また, 日中の風ベクトルの差をみると, 都市による昇温域に向かって収束する風系が形成されている様子がわかる. 埼玉県から東京都北部にかけては, ベクトルが, 南の方向を示しており, 南寄りの海風が都市によって内陸に侵入しにくくなったことをあらわしている.

近畿地方についても, 関東地方と同じ日で同様な調査を行った. 同日の大阪では最高気温が36.3°Cで猛暑日となった. シミュレーション結果の地上気温とアメ



第8図 a) 近畿地方における2008年7月25日15時のシミュレーション結果とアメダス実況から得られた気温(°C, 等値線)と風(矢印)の解析図。丸はアメダス域を示す。b) 同時刻の「都市がある場合」と「都市がない場合」の気温(°C, 等値線)の差と風(矢印)の差。

ガスによる地上気温の実況値を用いた解析によると、日中、大阪平野を中心とするヒートアイランドが形成されていることが示された(第8図a)。都市による昇温は、日中で都市域を中心に最大で約+3~+4°Cであったことも都市気候モデルによるシミュレーション結果から推測することができる(第8図b)。

これらの都市による昇温の影響は、日中は都市域の乾燥化による潜熱輸送減少が大きいことがわかっている(気象庁2006)。ただし、このシミュレーション結果は、あくまでも「都市無し」の状態を「草地」で代

表した場合の結果であることには注意が必要である。

4. おわりに

気象庁では、全国諸都市でのヒートアイランド現象に関する実態やそのメカニズム解明に取り組んでいる。蓄積された知見や解析システムをもとに、高温となった日や期間について調査、分析を行い、ヒートアイランドの観点からの実況監視を行っている。都市気候モデルを用いたシミュレーションには、実際の都市で起っているヒートアイランド現象の発生メカニズムを調査するだけでなく、その緩和対策の効果を調べることも可能である。しかし、現バージョンのモデルでは降水過程をはぶいているため、シミュレーションの対象は晴天日に限定されるなどの制限もある。このため、現在は降水過程を考慮した新しい都市気候モデルの開発など、更なる調査や分析のための新たなシステムの構築に取り組んでいるところである。

ヒートアイランド現象については、都市化と湿度や降水との関係、また、都市が気温と風系に及ぼす影響についても依然として未解明なことが多く、現象の理解には、今後の継続的な調査や研究が重要である。

参考文献

- Deardorff, J. W., 1978: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1889-1903.
- Katayama, A., 1972: A simplified scheme for computing radiative transfer in the troposphere. *Numerical Simulation of Weather and Climate Tech. Rep.*, (6), Dept. of Atmospheric Sciences, University of California, Los Angeles, 77 pp.
- 気象庁, 2005~2009: ヒートアイランド監視報告. <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/himr/index.html>
- 近藤裕昭, 2001: 人間空間の気象学. 応用気象学シリーズ8, 朝倉書店, 106.
- 近藤純正, 2000: 地表面に近い大気の科学. 東京大学出版会, 324 pp.
- Louis, J.-F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound.-Layer Meteor.*, **17**, 187-202.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys.*, **20**, 851-875.