

304:408 (都市キャノピー; LIME; 融合研究)

3. 都市の温熱環境シミュレーションと健康影響の評価

近藤 裕 昭*

1. はじめに

工学における教育プログラムに関する検討委員会(1998)によれば、「工学とは数学と自然科学を基礎とし、ときには人文社会科学の知見を用いて、公共安全、健康、福祉のために有用な事物や快適な環境を構築することを目的とする学問である。工学は、その目的を達成するために、新知識を求め、統合し、応用す

るばかりでなく、対象の広がりに応じてその領域を拡大し、周辺分野の学問と連携を保ちながら発展する。また、工学は地球規模での人間の福祉に対する寄与によってその価値が判断される。」とある。また理学とは広辞苑によれば「自然科学の基礎研究諸分野の称」とある。

本シンポジウムの表題となっている「理学と工学の融合」について、どのように考えられているのか、いろいろな人と議論をしていると人によって温度差があるように思われる。筆者が勤務している「産業技術総

* 産業技術総合研究所, kondo-hrk@aist.go.jp

© 2014 日本気象学会

合研究所（英文名：National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 以下「産総研」）では、サイエンスとエンジニアリングについてはよく議論になる。研究開発とその先にある製品化については、基礎研究→開発研究→製品化（→マーケティング）の順に発展していく、というリニアモデルという考え方があり、これについてどう考えるかということとは産総研に入ってきたポストクラスや新任の研究者に対する研修のグループ討議でよく与えられるテーマである（現在は否定的に考えられることが多い；たとえば山辺（2006））。産総研で工学的研究を実施している研究者もいつもエンジニアリングのことを考えているわけではなく、メカニズムがわからないまま新しい事象が発見されれば、そのメカニズムを分析し、さらなる応用研究に進むべくサイエンス的な研究も実施している。何も理学部出身だからいつもサイエンスをやっているわけではなく、工学部出身だからいつもエンジニアリングのことをやっているわけではないはずである。つまり理学と工学の融合は一人の研究者の頭の中で起きているはずであり、それができかつ評価される環境が環境科学の分野では重要である。

2. 多層都市キャノピーモデルの構築

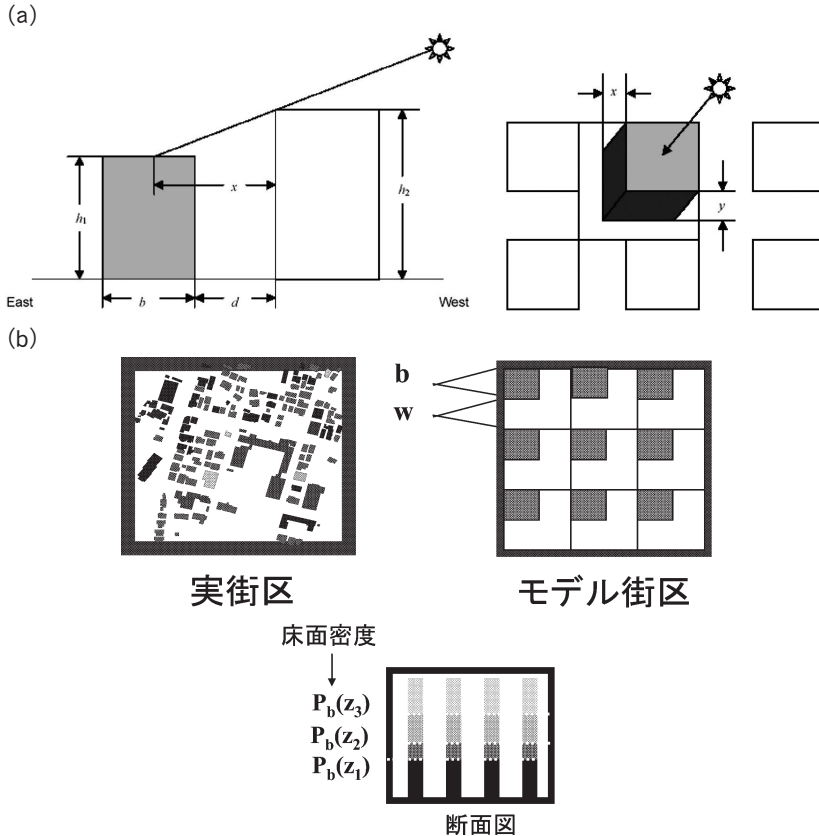
筆者が多層都市キャノピーモデルを作るきっかけとなったのは、ある大学の工学系のセミナーに呼ばれ、メソスケールモデルを用いた都市気候の解析の話をした際、「都市のような複雑な表面を持っているところでモデルが出している地上気温はどこを指しているのか」と問われたことに始まる。（当時の）気象学の範囲で言えば、都市のビルが作るでこぼこにより生成される抗力（風の方向に対して逆向きにかかる力で風速を減衰させる）を粗度長を使用して表したときに、ゼロ面変位（地上にある物体の大きさを無視できないとき、境界層の対数風速プロファイルの起点として地表面から移動する距離）を考慮してかつビル上に行ける近似的コンスタントフラックス層の中の“ある高さ”，と言うこともできるが、では具体的にどこかといわれると、なかなか答えるのは難しい。つまり、それは実際の都市を抽象化した空間の中に位置している点ではあるが、それが東京の大手町のビル街のどこかということと言うことはなかなか困難である。しかし、工学的にはどこかを明確にしなければいけない場合も多い。

一方、当時の建築のモデルはビルのまわりにどのよ

うに日射があたるかを計算し、日陰・日向を含めてある時刻のビルまわりの温度分布を数値流体力学（Computational Fluid Dynamics；CFD）モデルを用いて詳細に計算することができた。しかし、気象をやっている者からみると、ではそれはいつ「実現」するのでしょうかということを知りたい。なぜなら大気境界層では風速などの時空間変動が非常に大きく、瞬時でみると時間毎に大きく異なる温度分布になることを観測により知っているためである。気象の分野で使用するメソスケールモデルは時間変化の概念が比較的明確ではあるが、空間的な実用性は無く、建築の分野で使用する CFD モデルは空間的には明確であるが時間的には不明確である。しかし、これはこれでよかったのである。気象学の大きな社会的な貢献は防災予報にあり、時間変化や予報が重要である。一方建築学では具体的な設計をしなければいけないため、人間のスケールでの空間的な変化は明確でなければならないが、時間変化について変動の幅がわかっていたらよく、気候値を用いれば十分である。

これら双方の欠点を補い、日変化も追えながら都市のビル街の中からその上までの状況を表現できるモデルとして多層都市キャノピーモデルを考えた（近藤・劉 1998；Kondo *et al.* 2005）。これは水平方向には数百 m から 1 km 程度の街区を考慮してその鉛直構造を合理的に平均化していくにはどうすればよいかという問題を考えたもので、特に対象街区内のビルの床面積の鉛直方向の変化を考慮に入れた放射環境や風環境を考慮した点が独創的なモデルである。当時は都市キャノピー内の乱流輸送をどう考えればよいかよくわかっていなかったため従来手法を踏襲した。このような考えは理学なのか、工学なのか筆者にはよくわからない。理学的ないいわけを考えるのであれば、都市の総括的熱容量が大きいのは立体構造が原因であるという仮説を立て、多重放射・散乱をある程度考慮できるようにモデルを構築したともいえる。また工学的には、都市キャノピーの中で起きている現象について、季節変化を追いながら環境対策のデザインなどの工学的応用に利用可能なように構築したともいえる（第1図）。

このモデルでは、第1図のように街区を簡略化したパラメータをもとに鉛直1次元の運動量、熱、物質の拡散方程式を解くモデルが基本であるが、メソスケールモデルに組み込む場合には、メソスケールモデルの下層300 m 程度の範囲までに組み込んで計算する（Tokairin *et al.* 2006；Kondo *et al.* 2008）。ただ気



第1図 都市キャノピー多層モデル構築の概念図。(a)直達光による日向・日陰の計算,(b)実街区をどう簡略化するかに関する概念図。(b)の中にあるパラメータ b は簡略化された街区区内にある平均化されたビルの幅, w はビルとビルとの間隔である。

象学では都市の総体から出てくるエネルギーがその上で起こる現象にどのような影響を及ぼすかという問題の方が重要であるので、そのような場合には多層モデルの特徴はあまり発揮されない (Grimmond *et al.* 2010, 2011)。

3. 健康影響の評価

筆者らは現在文部科学省(以下文科省)の気候変動適応研究推進プログラムにおいて「フィードバックパラメタリゼーションを用いた詳細なダウンスケールモデルの開発と都市暑熱環境・集中豪雨適応策への応用(代表:飯塚 悟名古屋大学准教授)」という課題に参加し、その中で「都市高温化による人間健康の影響評価」というサブテーマを担当している。これまで産総研では前節で紹介した多層都市キャノピーモデルに、

外気環境に応じて建物のエネルギー使用量が変化するビルエネルギーモデルを連成させ、具体的なヒートアイランド対策の評価に使用してきた (AIST-CM-BEM, Kikegawa *et al.* 2006; Ihara *et al.* 2008)。そこでは、いろいろな対策について夏場ばかりではなく年間のエネルギー使用の観点からどのような得失があるかを東京を例として示した。たとえば、高反射塗料を建物の表面に塗布した場合には、夏は日射を反射して建物内に進入するエネルギーを小さくするが、冬季は逆にそのことが暖房需要を増すことになる。

一方、ヒートアイランドに限らず、都市の人間環境に影響を及ぼすものはたくさん存在する。しかしながらそれらの引き起こす影響や被害も多種多様であり、相互に比較することは容易ではない。このような比較をするために近年開発され

てきた手法が被害算定型環境影響評価手法 Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling (LIME) と呼ばれる手法である (伊坪・稲葉 2005)。これは、第2図のような流れで、最終的にある単一指標のもとにいろいろな環境影響や被害を比較可能にする手法である。被害を算定する対象項目としては、健康影響、社会資産、一次生産、生物多様性などがある。Ihara and Genchi (2009)によればLIMEを用いてここ30年の東京の気温上昇の影響について、エネルギー消費への影響と睡眠障害への影響を比較すると、睡眠障害への影響のほうが大きいという結果になった。

都市や地球の温暖化にともなう健康への影響は、夏季を除けば高齢者の寒冷ストレスを低下させる一方、夏季は疲労や睡眠障害などの軽度の症状が多くの人に

現れることの影響が大きいとされる（環境情報科学センター 2006）。このような健康影響を比較する指標としては Disability-Adjusted Life Year (DALY) という単位が用いられている（WHO 2013）。

健康被害を算出し、それを防止するためにはきめ細かな気象要素と健康状態を比較検討する為のデータの集積が必要である。このような基礎データを集積し、かつ予測できるモデルを開発すること、さらに自治体で使用可能なもののプロトタイプを作成することが文科省のプロジェクトの目標の一つである。このように、具体的な社会的要請や、社会の利益の追求のために技術開発を行うのが「工学的」技術開発の一つの特徴であろう。しかしながら、たとえば第2図のLIMEの流れの矢印の部分にはさまざまなサイエンス的課題が存在し、それらの解決無しにはこの枠組みはうまく機能しない。

それでは、都市の温暖化にともなう健康影響の評価にどのようなことが気象学に要請されているかを考えてみる。まず、都市のさまざまな構造物やシステムに影響された細かい時間・空間スケールの気象要素についてそれなりの普遍性を見つけ、それを記述することにある。ただし、気象学は自然科学の分野であり、建築の分野とは異なってその中心に人間はいないことも特徴である。

文科省のプロジェクトでは、健康影響を評価する気象側の指標として wet bulb globe temperature

(WBGT ; ISO 7243, JIS Z 8504) を使用することを考えている。WBGT は次の式で与えられる。

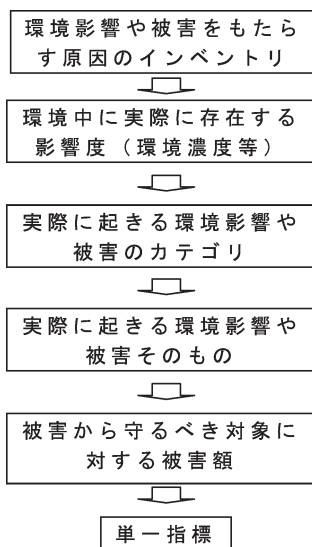
屋外で日射がある場合

$$0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度}$$

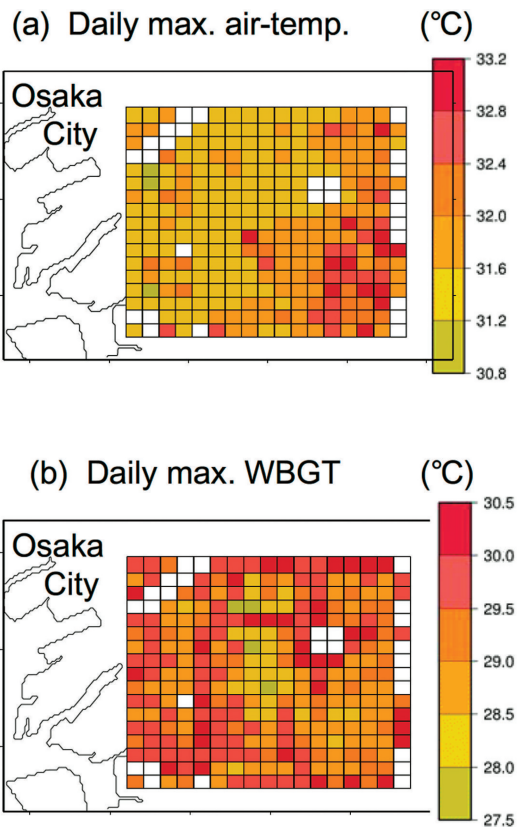
屋内及び屋外で日射が無い場合

$$0.7 \times \text{湿球温度} + 0.3 \times \text{黒球温度}$$

これらを求めるための外気環境側での気象要素は、放射（長波・短波）、気温、湿度、風速の4つであり、具体的にはこの4つのパラメータの時空間変化を求めることになる。地上付近でのこれらの量はまわりの建物等の影響を大きく受けているため、その影響を合理的かつ適度な精度で表現できることが必要である。第3図に2007年夏を対象とした大阪市における平均日最高気温と平均日最高 WBGT について、我々が開発し



第2図 LIME の流れ。



第3図 大阪市における2007年夏の (a)平均日最高気温と (b)日最高 WBGT の計算例 (大橋ほか 2011)。

てきた多層都市キャノピーモデル (AIST-CM-BEM) で計算した例を示す (大橋ほか 2011)。この計算では WRF の結果を境界条件として用いている。第3図では、日最高気温は海岸 (西側) から内陸 (東側) に向かって上昇するのに対し、皮膚温度に近いとされる WBGT は高層ビルが建ち並ぶ図の中心部で低く、周辺で高い分布となっている。

もう一つの気象学への要請としては、都市境界層のスケールよりも大きな時空間スケールをもつ擾乱の影響をどう都市環境モデル側にとりこむかという問題であるが、この問題には名古屋大学などの機関がこのプロジェクトの中で取り組んでいる。

4. 行政対応とサイエンス

文科省プロジェクトでは自治体の気候変動適応政策に貢献することがプロジェクトの成果に対する一つの条件となっている。行政対応ということ、「理学」と「工学」との融合との関連で、大気環境の分野で用いられてきたパスキル安定度という指標について少し紹介する。この安定度は今から30年ほど前、この気象学会でもよく議論されていたものである。また行政対応ということでは、大規模な工場や道路を作る際にその環境影響を事前に評価する環境アセスメントの大気環境予測評価によく使用される。

パスキル安定度とは、煙の拡散幅や上空へ風速が増大していく現象が大気の安定度によって異なることからこれを指標化し、非連続的に分類したものである。

この指標では、地上付近で観測可能な地上風速と日射量、放射収支量から大気の安定度を A~F の6段階に分類するのが一般的である (第1表、たとえば公害防止の技術と法規編集委員会 2012)。1本の煙突から拡散した大気中で反応をしない化学物質の濃度は、たとえば次のブリューム式と呼ばれる式で表現される。

$$C = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(H_e - z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(H_e + z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

ここで、 C は濃度、 Q は化学物質の排出強度、 H_e は有効煙突高、 σ_y 、 σ_z は主風向 (x 軸方向) に直交する横風方向と鉛直方向の煙の拡がりのパラメータ、 u が代表風速である。これらのうち最後の3つのパラメータが第1表の安定度分類により値や風下距離に対する依存性が変化する。この式を1時間ごとに平均風向の変化を勘案して計算し、年間8760時間についてその出現頻度の重みづけで重合する。

もちろん実現象はこの表の分類のように非連続的に起こるわけではない。実際、井上栄一先生はこの考え方を批判し続けておられたのを覚えている。しかしこの分類法を用いて煙突や道路からの大気汚染物質の拡散を計算すると、地形が比較的平坦なところでの長期平均値については非常によく観測値を説明できる。おそらくいまだに LES で計算するよりもはるかに簡単にかつ精度よく計算できるであろう。なぜ科学的には一見非合理的な分類法を用いた結果が現実をうまく説明できるのか、そこにはさらに奥深いサイエンスが潜んでいるはずである。その鍵はこの手法に用いられているアンサンブル平均をとるところにあると筆者は考えている。

行政対応には、途中の科学的なロジックの厳密性よりもモデルや手法の結果が現実をよく説明できることが求められる。そのため疫学的調査や統計解析による手法もよく用いられてきた。またロバスタな結果であることも必要条件の一つである。しかし、あまりに科学的内容の無い手法に対しては、信頼性の問題が残る。このため近年では数値モデルを行政対応に使用する際の考え方としての verification and validation

(V&V) が大気環境の分野でも導入されつつある (たとえば COST 2007; Council for Regulatory Environmental Modeling 2009; 近藤 2010)。ここで前者の V は対象となる現象の概念モデルを数値モデルに変換するところに瑕疵が無いかどうかをチェックするもの、後者の V はモ

第1表 パスキルの安定度分類。

地上風速 (ms ⁻¹)	日 中			日中と夜間 本曇 (雲量8-10)	夜 間	
	日射量(Wm ⁻²)				上層雲 (雲量5-10) 0-59*	雲量 (0-4) <-60*
	強 >580	並 579-290	弱 <290			
<2	A	A-B	B	D	---	---
2~3	A-B	B	C	D	E	F
3~4	B	B-C	C	D	D	E
4~6	C	C-D	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D

*は放射収支量(Wm⁻²)

デルを具体的な計算対象に応用して計算した時にどの程度の定量的不確かさの範囲にあるかどうかをチェックするものとされることが多い。これらにはその判定基準を決めておく必要がある。

5. おわりに

研究の実施、管理、理学、工学を必然的に融合させざるを得ない立場から本稿を作成してみた。近年、自然を記述しそのメカニズムを解明することを主体とする理学といえども社会との関わりが必然的になってきている。環境問題においては、科学的事実にとえ確実性があったとしても、社会的なコンセンサスが必ずしも簡単に得られるわけではない。ましてこれだけ環境問題が複雑となり、科学的事実の不確実性がある状況でどのように社会・経済と連携 (connection) していくのか、理学に主に携わっている人にとっても重要となってきた。ここでは都市の温暖化に伴って懸念される健康影響評価について、気象学がどうかかわっていくのかについて紹介するとともに、工学的考え方、理学的考え方の双方が環境問題の分析や解決にとって重要であることを述べた。

Discipline により自然科学を細分することは一方で自然の理解を深めてきた。しかし変動する地球環境とその人類への影響や適応策を研究しなければならない今日、過度の細分化はシステムとしての地球の理解やいまや避けることができなくなった科学の社会・経済等との連携において障害となってきた。このことは最近 borderless science としてよく国際会議でも議論されるようになった。つまり、multidiscipline であり、社会・経済との連携を深めていかなければならない中で、科学の研究にいろいろな意味で自ら境界を設けてしまうことはその発展を阻害するものとなる。地球環境や都市の環境を研究する上で扱わなくてはならない情報や手法の種類や量は今や膨大であり、研究の効率化は至上命題である。しかし、過度にミッションや discipline にこだわり、明確に研究内容を仕分けてしまうことも全体の研究の効率を下げることにつながっている。

社会との連携を考えたとき、工学の製品は常に市場の評価を受けている。またロバストでない「いいかげん」なものはずぐ市場に淘汰される。一方、理学はその本質から特に発展段階では必ずしもロバストではない。また結論を得るのに非常に時間がかかることもしばしば存在する。工学の製品と同様にロバストさを求

める社会に対し、どう理学がつきあっていくのか大きな課題であろう。環境問題の中には、メカニズムが解明される以前に原因と結果の統計的因果関係から対策技術を打つことにより問題が解決される例も存在する。それが理学の研究者の怠慢と社会から非難されないように頑張っていく必要がある。

謝辞

本稿を作成するにあたり、産業技術総合研究所安全科学研究部門の井原智彦研究員 (現 東京大学准教授) および岡山理科大学の大橋唯太准教授より資料を提供していただいた。ここに感謝します。

略語一覧

AIST-CM-BEM: National Institute of Advanced Science and Technology (AIST) urban Canopy Model with Building Energy consumption Model 産総研都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデル

参考文献

- COST, 2007: Model evaluation guideline and protocol document. COST Action 732, Quality assurance and improvement of microscale meteorological models, 27 pp. http://www.mi.uni-hamburg.de/fileadmin/files/forschung/techmet/cost/cost_732/pdf/GUIDANCE_AND_PROTOCOL_DOCUMENT_1-5-2007_www.pdf (2012.12.19閲覧).
- Council for Regulatory Environmental Modeling, U.S. EPA, 2009: Guidance on the development, evaluation, and application of environmental models. EPA/100/K-09/003, March 2009, 99pp.
- Grimmond, C. S. B., M. Blackett, M. J. Best, J. Barlow, J.-J. Baik, S. E. Belcher, S. I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Dandou, K. Fortuniak, M. L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, T. Kawai, Y. Kawamoto, H. Kondo, E. S. Kravynhoff, S.-H. Lee, T. Loridan, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, G. Pigeon, A. Porson, Y.-H. Ryu, F. Salamanca, L. Shashua-Bar, G.-J. Steeneveld, M. Tombrou, J. Voogt, D. Young and N. Zhang, 2010: The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First results from Phase 1. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 1268-1292.
- Grimmond, C. S. B., M. Blackett, M. J. Best, J.-J. Baik, S. E. Belcher, J. Beringer, S. I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Coutts, A. Dandou, K. Fortuniak, M. L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, M. Kanda, T.

- Kawai, Y., Kawamoto, H., Kondo, E. S., Krayenhoff, S.-H., Lee, T., Loidan, A., Martilli, V., Masson, S., Miao, K., Oleson, R., Ooka, G., Pigeon, A., Porson, Y., Ryu, F., Salamanca, G. J., Steeneveld, M., Tombrou, J. A., Voogt, D. T., Young and N. Zhang, 2011: Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *Int. J. Climatol.*, **31**, 244-272.
- Ihara, T. and Y. Genchi, 2009: Environmental impact assessment of urban air temperature increase based on endpoint-type life cycle impact (Part 2) — Quantification of environmental impact in Tokyo. *Proceedings of The seventh international conference on urban climate, Yokohama*, P4-41.
- Ihara, T., Y. Kikegawa, K. Asahi, Y. Genchi and H. Kondo, 2008: Changes in year-round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat-island countermeasures and energy-saving measures. *Appl. Energy*, **85**, 12-25.
- 伊坪徳宏, 稲葉 敦編, 2005: ライフサイクル環境影響評価手法 LIME-LCA, 環境会計, 環境効率のための評価手法・データベース, 産業環境管理協会, 384pp.
- 環境情報科学センター, 2006: 平成17年度ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討業務報告書, <http://www.env.go.jp/air/report/h18-06/index.html> (2012.12.19閲覧).
- Kikegawa, Y., Y. Genchi, H. Kondo and K. Hanaki, 2006: Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning. *Appl. Energy*, **83**, 649-668.
- 公害防止の技術と法規編集委員会編, 2012: 新・公害防止の技術と法規2012, 大気編, 産業環境管理協会, 782pp.
- 工学における教育プログラムに関する検討委員会, 1998: 8 大学工学部を中心とした工学における教育プログラムに関する検討. <http://www.eng.hokudai.ac.jp/jeep/08-10/pdf/pamph01.pdf> (2012.1.6閲覧).
- 近藤裕昭, 2010: DiMCFD に関連するモデル使用ガイドライン策定に関する国内外の動き—大気環境アセスへの適用に関連して—. 第51回大気環境学会年会講演要旨集, 112-113.
- 近藤裕昭, 劉 発華, 1998: 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究. *大気環境学会誌*, **33**, 179-192.
- Kondo, H., Y. Genchi, Y. Kikegawa, Y. Ohashi, H. Yoshikado and H. Komiyama, 2005: Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance. *Bound.-Layer Meteorol.*, **116**, 395-421.
- Kondo, H., T. Tokairin and Y. Kikegawa, 2008: Calculation of wind in a Tokyo urban area with a mesoscale model including a multi-layer urban canopy model. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **96**, 1655-1666.
- 大橋唯太, 亀卦川幸浩, 井原智彦, 2011: 数値気象モデルを利用した屋外熱中症リスクの評価手法に関する研究. *環境情報科学論文集*, (25), 335-340.
- Tokairin, T., H. Kondo, H. Yoshikado, Y. Genchi, T. Ihara, Y. Kikegawa, Y. Hirano and K. Asahi, 2006: Numerical study on the effect of buildings on temperature variation in urban and suburban area in Tokyo. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 921-937.
- World Health Organization (WHO), 2013: Metrics: Disability-Adjusted Life Year (DALY). http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/metrics_daly/en/ (2013.9.14閲覧).
- 山辺正顕, 2006: 研究成果の社会への還元—産業化をめざす研究論—. *日本化学会論説*, <http://www.chemistry.or.jp/kaimu/ronsetsu/ronsetsu0610.pdf> (2013.9.14閲覧).