

ラグランジュアン人間気象学の試論

ATTEMPT OF LAGRANGIAN HUMAN METEOROLOGY

仲吉信人¹・神田学²
Makoto NAKAYOSHI, Manabu KANDA

¹学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 修士課程 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1石川台4号館)

²正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 准教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1石川台4号館)

We discussed advantages of introducing a lagrangian concept toward urban hydrometeorology. The essence of the new concept is to observe and analyze variations of micro-climate and human vital signs along human pathways. This new idea can be contributable to (1) understanding of thermal environment within urban canyons and (2) understanding of the comprehensive interaction between thermal environment and human beings. The discipline of the new idea was termed as "Lagrangian Human Meteorology".

In order to confirm the value of "Lagrangian Human Meteorology", a lagrangian observation was conducted at Shibuya and Roppongi, i.e., major cities in Tokyo.

Key Words : Heat Island, Vital sings, Thermal environment within urban canopy, Thermal sensation, Heat stroke

1. はじめに

流れの記述法には、オイラー的方法とラグランジュ的方法がある。前者は空間に固定された観測点で流れ場を記述する方法であり、後者は個々の流体粒子に沿って変化する流れ場の記述法である。タワーによるフラックス観測 (Moriwaki and Kanda¹⁾), AMeDASなどのルーチン観測網など、現在の水文気象学の体系はオイラー的概念に基づき確立されたと言える。

しかし、都市の大気環境を考える上で、オイラー的概念よりもむしろラグランジュ的概念に基づく観測が適していると思える場合も多々ある。ここで我々の意図するラグランジュ的概念に基づく観測とは、人の移動経路に沿って連続的に変化する気象因子を捉えようとするものである (人を流体粒子と擬えている)。例えば、都市キャノピー内の温熱環境変数の計測などはラグランジュ的概念が適しているのではないだろうか。都市温熱環境は人の健康に直接影響を与えるため人間の生活空間での気象指示値の取得が望まれる。AMeDAS・SDPデータは周囲数十kmの空間代表値を指示することが期待されるが、露場という都市キャノピー内と異質な場で計測された値を都市空間の代表値としていいかは議論の別れると

ころであり (菅原²⁾)、また局所的で多様性の強い都市空間においては、空間代表値という概念がそもそも成り立たないかもしれない。オイラー的に都市キャノピー内に高密度の観測網を設置出来れば良いが、社会的要因から難しく、都市キャノピー内の気象計測は短期の集中観測によっているのが現状である。一方、人の動線に沿って気象計測を行うラグランジュ的概念の下では人間生活圏の温熱指示値の取得は容易である。さらに、生体反応も同時に計測することで、人の移動経路に沿った、気象場の連続変化に伴う人体生理の動的応答を捉えることが出来るため、生理学への貢献も可能となるかもしれない。

本報では都市水文気象におけるラグランジュアン概念の有効性を確認すべく、2008年夏季にラグランジュ的観測を実施したのでその結果を紹介する。

2. ラグランジュアン人間気象学のコンセプト

人の動線に沿って連続的に変化する気象場、それに伴う人体生理反応の動的変化を捉えることに本研究の本質がある。ラグランジュ概念に基づき、気象と人体生理の関係に焦点を当てることから、本研究分野を“ラグランジュアン人間気象学”と名づけた。本研究分野の構築により、微気象変化に伴う人体生理の動的応答への理解、

定点観測網設置の難しい人間空間における微気象場の定量把握，に繋がることを期待する．

(1) 既往研究との比較

(a) 生気象学・保健学との比較

人体生理反応を取り扱った研究は生気象学，保健学の分野で盛んである．これらは衣服学や医学からの流れをくむもので室内空間での研究を主に対象とし発展してきた．屋外空間に拡張した例もあるが（神田ら³⁾；木内⁴⁾）オイラー的な定点観測データが用いられている．ラグランジュアン人間気象学は，屋内屋外を問わず日常の行動経路に沿った環境因子・生体反応の連続的変化を計測・評価する点に特徴がある．

(b) 都市水文気象における従来の移動観測との比較

移動観測は本質的にはラグランジュ的概念に基づく観測手法である．しかし都市空間における移動観測の適用例をみれば，オイラー観測の補間的手法として用いられている例が多い．つまり，周囲の気象場が変化しない程の短時間に多くの場所で観測を行い，オイラー的に詳細な空間情報を得るために移動観測が行われている．

ラグランジュアン人間気象学においては，移動観測の本質に立ち返りラグランジュ概念に立脚している点に注意されたい．

3. ラグランジュアン観測の概要

本研究分野の意義を確認すべく，著者の一日の行動経路に沿った微気象場の変化，及びそれに伴う生理反応の変化を実測した．実験日は2008年8月20日（月曜日）である．詳細な行動パターンを表-1，行動経路を図-1に記す．

表-1 ラグランジュアン観測における行動記録，ID中のアルファベットは図-1，図-4中のそれと対応する

時：分	ID	イベント	時：分	ID	イベント
6:55		自宅出発（徒歩）	16:03	h	六本木駅着
7:06	a	大岡山駅着	16:20	i	街区へ出る
7:08	a'	大井町線乗車	16:30	j	六本木ヒルズ散策
7:21		二子玉川駅着	18:15		東京ミッドタウンへ移動
7:22	b'	田園都市線乗車（長津田方面）	18:32		ミッドタウン着
7:41	b	長津田駅着	18:39	k	ガーデンシアターにて映画鑑賞
7:50	c'	田園都市線乗車（渋谷方面）	20:05		ミッドタウン建物内スーパーマーケットへ
8:31	c	渋谷駅着	20:32		屋外へ出る
8:39		路上へ出る	21:51	l	カフェにて友人と談笑（オープンテラス）
8:48	d	アルバイト開始	23:01		ミッドタウンを後に
11:49		アルバイト終了	23:11		地下鉄六本木一丁目駅へ
12:08	e	宮下公園で日向ぼっこ	23:19		大江戸線乗車
14:40		渋谷～原宿にかけてshopping	23:31	m	渋谷駅着
14:16	f	昼食	23:34	n	渋谷路上へ出る
15:05	g	東急ハンズで買い物	23:54		田園都市線乗車・二子玉川駅へ
15:41		渋谷駅前より地下鉄半蔵門線へ	0:08		二子玉川着，大井町線乗り換え
15:48		半蔵門線乗車	0:28		大岡山駅着
15:50		青山一丁目駅着	0:41		帰宅
16:01		大江戸線乗車			

(1) 計測項目

気象因子として気温・放射温度・湿度・風速を，生理因子として拡張期血圧・収縮期血圧・脈拍・体温を計測した（表-2）．気象因子より人体温熱感指数の一つ，標準有効温度（SET*）の算出が可能である．SET*はGagge et al.⁵⁾によって提唱された体感温度指標であり人体の温熱生理現象（ふるえ，発汗など）のモデル化，及び人体・温熱環境間の熱平衡式に基づいている点に特長がある．SET*と温冷感・生理状態などの対応表を表-3に示す．体温については熱電対を腋下にテープで貼り付け固定し計測した．活動中，汗でテープがはがれることがあるため3箇所計測した腋下温度の最大値を用いている．完全に断熱になっていないため対流により熱が奪われ実際の体温より過小評価している可能性に注意されたい．

ラグランジュアン人間気象学では計測センサが被験者の精神的・肉体的負担にならないほど小型でなければならぬが，今回はセンサ開発が間に合わず，市販のセンサを用いて観測を行った（表-2）．使用したデータロガーはCambellのCR-10Xである．観測システムの外観図を図-2に示す．

(2) 放射温度算定

簡便に放射温度を測る目的でグローブ温度計がしばしば利用される．計測されたグローブ温度を用い球の熱収支（式1）を解くことで放射温度を算定できる．

$$C \frac{dT_g}{dt} = \varepsilon\sigma(T_r^4 - T_g^4) + h(T_r - T_a) \quad (1)$$

ここでCはグローブ球熱容量 ($J K^{-1} m^{-2}$)， σ はステファアン・ボルツマン係数 ($5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$)， T_r は放射温

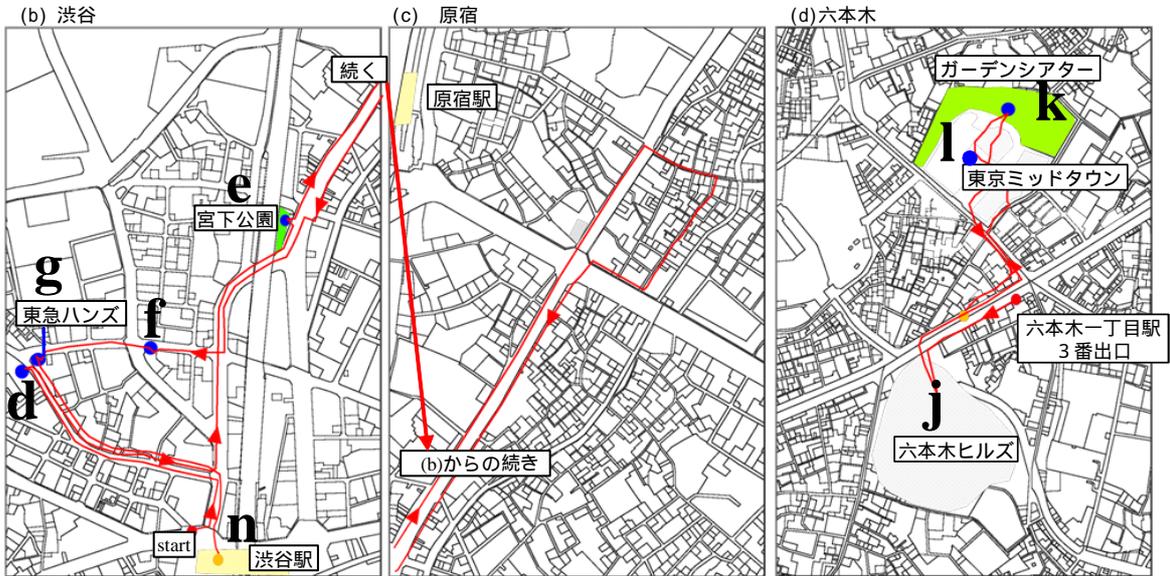
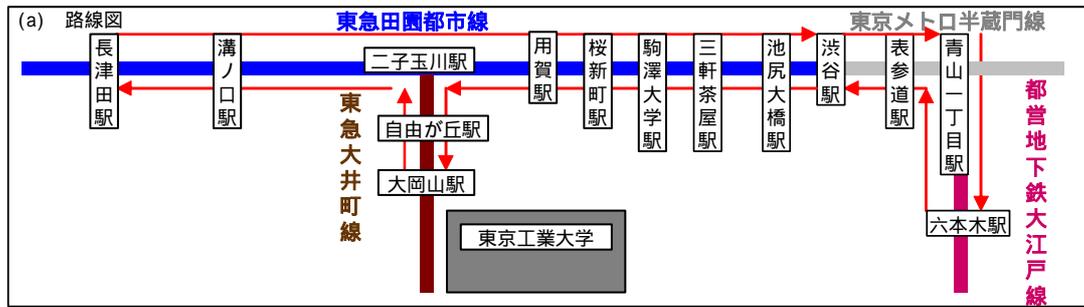


図-1 ラグランジュ観測経路 (a) : 路線図, (b)-(d) : 徒歩移動経路
 図中のアルファベットは表-1, 及び図-4(a)-(e)中のアルファベットに対応する

表-2 計測項目及び計測センサー一覧

測定項目	測器	型番・製造元	サンプリング周期 (秒)
気温	熱電対 (0.2 mm)	0.2 x1P K-6F, 二宮電線工業	1
放射温度	黒球温度計 (40 mm)	-	1
相対湿度	Humidity transmitter	Humitter50Y, Vaisala	1
風速	熱線風速計	クリモマスター風速計 (6542), カノマックス	1
心拍数	手首式電子血圧計	HEM-6371T, オムロン	-
血圧			
体温	熱電対 (0.2 mm)	0.2 x1P K-6F, 二宮電線工業	1



図-2 観測システム写真
 気温センサは直達日射を受けないようにグローブ温度計の影に入るように調整．放射による気温計測誤差は最大でも0.1以下

表-3 SET*と温冷感・快適感, 及び人体生理・健康状態との対応表 (Gagge et al.⁵⁾)

SET*	温冷感	快適感	生理状態	健康状態
> 40	暑さ限界	許容できない	体温上昇, 体温調節不良	血液循環不良
37.5 - 40	非常に暑い	不快	激しい発汗・血流によるストレス増加	熱中症の危険増加
35 - 37.5	暑い			脈拍不安定
30 - 35	暖かい	やや不快	発汗・血流変化による通常の体温調節	正常
26 - 30	やや暖かい	快適		
23 - 26	中立		中立	
20 - 23	やや涼しい		血流変化による体温調節	

度 (K), T_a は気温 (K), $\varepsilon \cdot h \cdot T_g$ はそれぞれグローブ温度計の射出率・対流熱伝達率 ($W m^{-2} K^{-1}$)・温度指示値(K)を表す．上記パラメータが既知であれば素材, 球

径の違いは時定数のみに影響し放射温度算定に支障をきたさない．よって本観測では時定数, 携帯・加工のしやすさを鑑みてセルロイド製の直径40 mm, 殻厚0.4 mmのグローブ温度計を自作し用いた．グローブ球の熱容量は

20 乾燥空気，及びセルロイドの体積熱容量の重み付け平均値を用いている．一つのグローブ温度計から求めた平均放射温度はグローブ球と人体のアルベド・射出率が異なる場合厳密には平均放射温度にはならないため，物性値の異なる2球のグローブ球を用いて，任意のアルベド・射出率の人間に作用する平均放射温度を算出する方法が提案されている（神田ら⁶⁾）．しかし，人間のアルベドや射出率を同定するのは容易ではない．黒球と人体頭部のアルベドが近い値を持つと考えられることを考慮し，本報においては木内⁴⁾に倣い黒球のグローブ温度計のみから平均放射温度を求めている．

4．結果と考察

本報では，気象因子として気温・SET*，人体生理因子として血圧・脈拍・体温に注目して考察を行う．都市内温熱場の時空間的局所性に考慮して気温，SET*は10秒平均値で示している．風速・放射温度・湿度の個別の変化に興味を持たれる読者もいると思われるが紙面の都合により本報では割愛させて頂く．

図-3にラグランジュ観測の結果，及び東京大手町でルーチン観測された気温（AMeDAS）の時系列図を示す．図-4には気象因子データを4時間ごとに区分し拡大表示したものを示す．図-4中に付記したアルファベットは表-1の行動記録，及び図-1の地図上のそれと対応している．

(1) 電車内の微気象場及び人体生理反応

(a) 通勤電車

7:06～8:31までのデータが通勤電車内データに相当する（図-3，図-4(a)）．その間発現する3回の急激な気温上昇はそれぞれ東急大岡山駅（図-4(a)中のa，32.0℃），長津田駅（図-4(a)中のb，31.8℃），渋谷駅ホーム（図-4(a)中のc，34.4℃）で生じていた．渋谷駅ホームにおける気温は街区気温より高く，早朝でありながら既に当日の大手町最高気温（32.4℃，13:10）を2℃上回っていた．SET*を見れば熱中症の危険を伴う暑熱環境であったことが分かる．このような暑熱環境を生み出す直接の要因として，電車運行，及びホーム内人口密度の高さに伴う人工排熱量の増加の影響が考えられる．人間の出す排熱影響を挙げる根拠として混雑度による車両内気温の変化を示す（図-4(a)のa'，b'，c'）．サラリーマンで埋め尽くされる田園都市線渋谷方面車内の気温（図-4(a)のc'）は混雑度の低い大井町線車内（図-4(a)のa'），及び田園都市線長津田方面車内（図-4(a)のb'）の気温より有意に高かった．車内平均気温で見ると，渋谷方面車内の気温は27.8℃であり，車両設定温度（25-26℃，東急電鉄HPより）より2℃近く高くなっていた．一方，大井町線，長津田方面の車内気温はそれぞれ25.2℃，

26.4℃でありほぼ設定温度内であった．

人体生理反応に目を移せば（図-3(b)中の囲い領域），電車混雑度の高くなる渋谷方面車内では脈拍値が高くなる傾向を示した（車内平均脈拍，渋谷方面：97 bpm，大井町線・長津田方面：88 bpm）．また血圧についても収縮期血圧に10 mmHg程度の増加が確認された．人口気象室を用いたNiimi et al.⁷⁾の研究によれば熱負荷の増加に伴い脈拍は上昇するが，血圧は若干減少する．脈拍，血圧ともに上昇傾向を示した本結果は微気象要因よりも車内混雑度からくる肉体的・精神的ストレスによる作用が大きいと考えられる．一般に外部要因に対する血圧変化は若年者では鈍感であると言われており，26歳の被験者で収縮期血圧に10 mmHgの増加が見られているならば中高年ではより敏感な変化が生じていると考えられる．体温については37℃を越えることがしばしばあった．以上の結果は満員電車が人体にストレスを与えていることを示唆している．年齢・性別による満員電車内の生理反応の違いも興味深い点であり，今後被験者数を増やし更にデータを蓄積していきたい．

(b) 日中と夜間の地下鉄ホームの気温差

ここでは都営大江戸線六本木駅ホームの気温に着目する（図-4(c)のh，図-4(e)のm）．日中（16:00）のホーム気温は28℃程度なのに対し，夜間の気温（23:19）は32℃近くまで上がっていた．街区空間と当該駅ホームの気温の大小関係が日中と夜間で逆転することは興味深い．日中に比べ夜間の方が地下鉄ホーム内の人口密度が高かったため，夜間にホーム内気温が高くなる原因としては人的影響が第一に考えられる．また大江戸線の持つ熱的特性も考慮すべき事項である．大江戸線の車両設定温度は他線より2℃低く設定されており，冬季においても暖房は使用されていない．東京都交通局によれば，これは大江戸線内のトンネル，車両などの空間が他線より小さく設計されており，他線に比べ熱がこもりやすい環境となっていることによる．人工排熱の増加，換気効率の悪さが上記環境を生んだと考えられる．

(2) 都市キャニオン内の微気象場

11:50～15:50のデータは渋谷，原宿におけるキャニオン空間のものである（図-4(b)-(c)）．区間中の7回の気温，SET*の急落は冷房の効いた室内への移動の際に生じた．生気象学会発行の熱中症予防指針により，急激な高温暴露は熱中症の危険を高めることが指摘されており，気温・SET*の急変を度々受けることによる熱的ストレスは無視できないだろう．また歩行程度の活動強度においても体温は37℃を越えることがしばしばあり，暑熱環境と相まって熱中症発生のリスクを高めていることは想像に難くない．血圧・脈拍については変動の大きさがまず目につくが，これは歩行による影響が大きいと考えられる．そこで運動影響を除外するため座位静止中のデータ

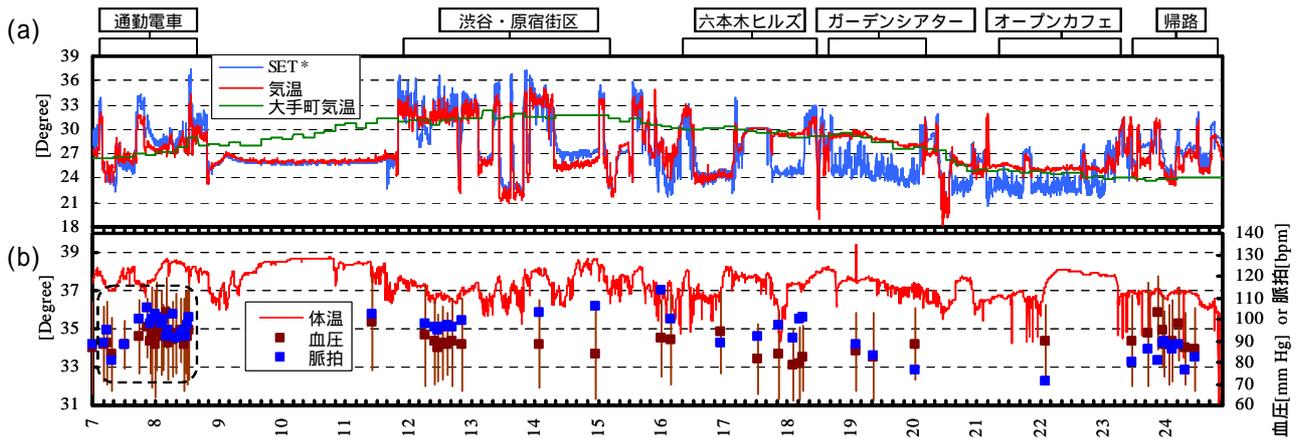


図-3 ラグランジュアン観測全時系列図，横軸は日本標準時 (a)気象因子 (b)人体生理因子

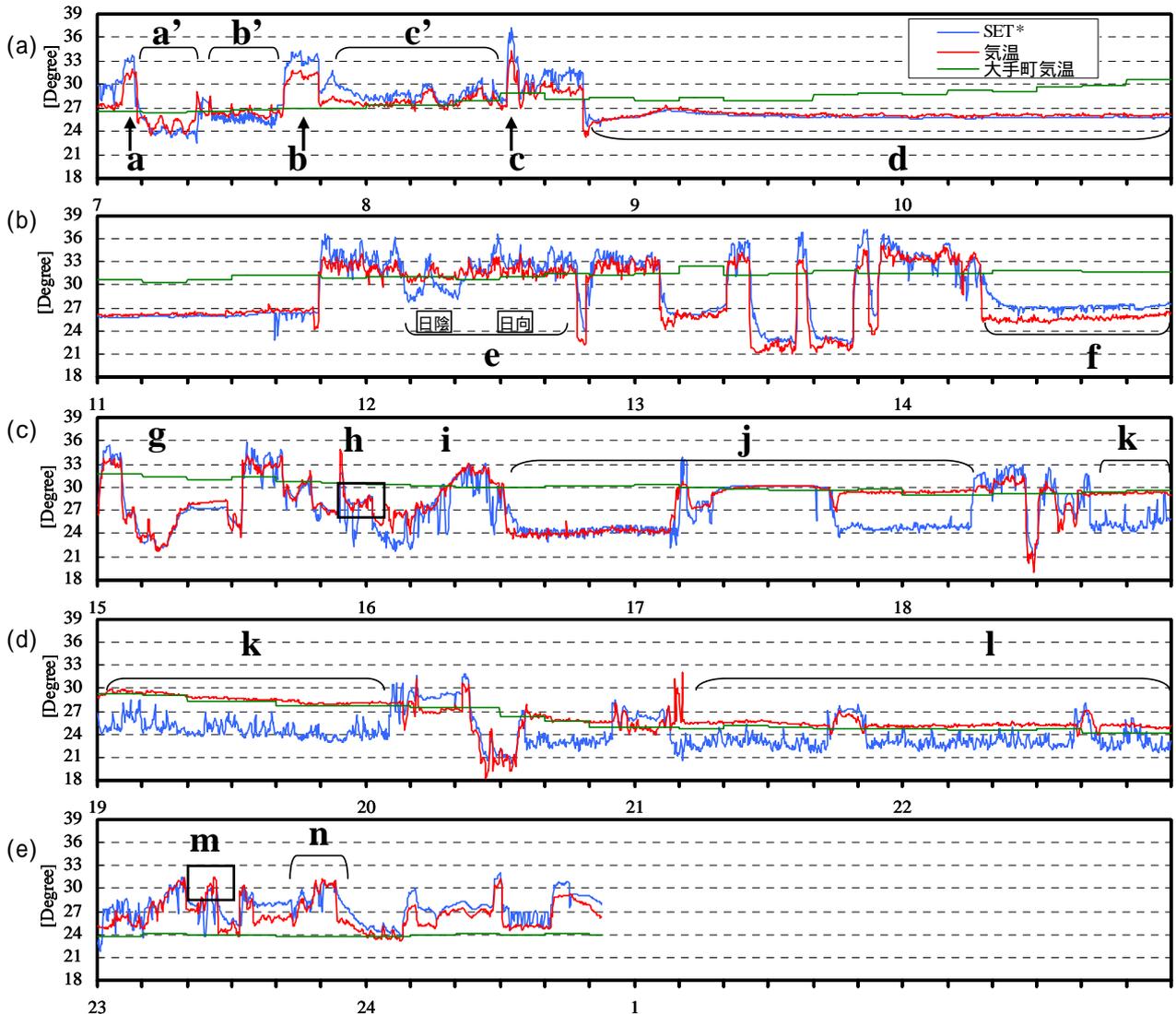


図-4 図-3の気象因子の拡大表示図 (a)7時-11時 (b)11-15時 (c)15-19時 (d)19-23時 (e)23-1時

(図-3(b)の12時 - 13時のデータ，宮下公園内，図-1(b)中のe)を平均して議論すると収縮期・拡張期血圧，及び脈拍値はそれぞれ108，70 mmHg，97 bpmであった．日没後の座位静止中データについても同様に平均すると，収縮期・拡張期血圧，脈拍値はそれぞれ101，66 mmHg，

87 bpmとなり，血圧・脈拍値とも若干日中高くなっていたことが分かる．微気象変化の少ない室内環境においては被験者の血圧・脈拍値は日中・夜間で有意な違いが確認されていないため(図省略)，本結果はバイオリズムによるものよりむしろ微気象場による影響と思われる．

次にAMeDAS気温と本実験結果の比較を行う。これまでヒートアイランド研究にAMeDAS気温を用いることに對してしばしば注意が促されてきたが（例えば菅原²⁾）、本結果（図-4(b)）から日中の都市キャニオン内気温は大手町気温より1 から3 程度高くなっていることが分かった（屋内データは除外）。

(b)日没後

18:50以降のデータが概ね日没後に相当する。ここでガーデンシアター内の気温に注目する（図-4(c),(d)中のk）。ガーデンシアターとは東京ミッドタウンの提供する（2008年7月18日～8月24日）広大な芝生広場でのオープンシアターである。地表属性はAMeDAS計測が行われている露場のそれと近い。興味深いことにガーデンシアターでの気温はAMeDAS大手町気温とほぼ一致していた。人為的環境である六本木ヒルズ内気温を除けば夜間でも街区気温はAMeDAS指示値より高い（例えば図-4(e)のn）。この結果からも都市におけるAMeDAS観測データはその周囲数十kmの代表値となっているとは言えず、芝生上の微気象といった都市とは本質的に異なる場の指示値になっていることが示唆される。

次にガーデンシアター内のSET*に注目する。SET*は気温より2-5 低い値を示していることが分かる。区間中の気象平均値は、気温29.4 , 放射温度29.4 , 相対湿度61% , 風速2.3 m s⁻¹であり（図省略）、SET*の低下は風速の影響に他ならず、体感温度指標における風速影響の重要性を示唆している。簡易的に体感温度を測る目的でしばしば使用される湿球黒球温度（WBGT）は気温、湿度、黒球温度から算出されるが、黒球温度には風速の影響も含まれているため（式1参照）、考慮している気象因子はSET*と同じ気温、湿度、放射温度、風速である。直径150 mmの黒球と人体の対流熱伝達率が同じであるという前提によりWBGT値は人体温熱感指標として意味をなすが、近年、この前提を離れ、小黒球を用いたWBGT計測器が多数市販されている。これらの測器では人体の対流熱伝達を過大評価しており、厳密には人体温熱感指標とならない点に注意されたい。

4.まとめ

都市水文気象学の発展に貢献すると考えられるラグランジュアン人間気象学のコンセプトを紹介した。それは、小型の計測センサを携帯したヒトの行動経路に沿って変化する微気象場及び人体生理反応を連続的に捉えることに特徴がある。本研究分野の確立により、これまで観測の難しかった都市キャニオンなど人間空間の微気象場評価が可能になるとともに、気象・人体生理の相互作用に対する包括的理解に繋がることが期待される。

また、ラグランジュアン人間気象学の有用性を確かめるべく、夏季晴天日にラグランジュ的観測を行った。その結果から、

通勤ラッシュ時のホームではAMeDAS観測における日最高気温を上回る暑熱環境が生み出されていることが分かった。

満員電車内の気温は車内設定温度を2 近く上回り、車内微気象に与える人の影響の大きさが窺えた。満員電車内の環境が人体生理反応に影響を及ぼすことが定量的に示された。

都市キャニオン内の気温はAMeDAS観測値よりも高く、日中では両者に1-3 程度の違いが見られた。

一日の中で人体は幾度も温熱場の急変にさらされていることが確認された。

佐藤⁹⁾は海洋動物にハイテクセンサーを取りつけ、彼らの行動経路に沿った自然因子・生体反応を観察することで、これまでの“博物学的アプローチ”では分からなかった海洋動物の生体を次々と明らかにした。ラグランジュ概念という新しい視点の導入も同様に様々なポテンシャルを有していることが本報告から示唆されている。今回の実験は市販の計測センサを用いたため、大型でラグランジュアン人間気象学の要求にはそぐわない。今後は小型で携帯可能な気象・生理反応計測装置を自作し、被験者数を増やした大規模実験を行うことでより詳細な議論を可能にしていきたい。

参考文献

- 1) Moriwaki, R., Kanda, M.: Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO₂ over a suburban area, *Journal of Applied Meteorology*, vol.43, pp.1700-1710, 2004.
- 2) 菅原広史：観測から見た熱帯夜の形成機構 - 現象を理解する上での観測の問題点 - , 天気, Vol.51, No.2, pp.102-106, 2004.
- 3) 神田学, 木内豪, 小林裕明：新しい屋外用温熱感指標による河川の熱環境評価 多摩川河川敷における観測を例に , 水工学論文集, 第40巻, pp.237-242, 1996.
- 4) 木内豪：屋外空間における温冷感指標に関する研究, 天気, Vol.48, No.9, pp.11-21, 2001.
- 5) Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Nishi, Y.: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE*, pp. 247-262, 1971.
- 6) 神田学, 柳本記一, 宇梶正明：新しい屋外用温熱感指標の提案, 土木学会論文集, No.545/II-36, pp.1-10, 1996.
- 7) Niimi, Y., Matsukawa, T., Sugiyama, Y., Shamsuzzaman, A.S.M., Ito, H., Sobue, G., Mano, T.: Effect of heat stress on muscle sympathetic nerve activity in humans, *Journal of the Autonomic Nervous System*, pp. 61-67, 1997.
- 8) Kawai, T., Kanda, M.: Energy balance obtained from the comprehensive outdoor scale model experiment (I) Basic features of the surface balance, *Journal of Applied Meteorology* (submitted)
- 9) 佐藤克文：ペンギンモクジラも秒速2メートルで泳ぐ ハイテク海洋動物学への招待, 光文社, 2007.

(2008.9.30受付)