

市民と行政の健康・環境コミュニケーションツールとしての ウォーキング環境の可視化 -都市の熱環境に着目して-

尾崎 平*、檀 寛成*、安室 喜弘*、窪田 諭*

*関西大学 環境都市工学部

1. はじめに

近年、世界中で暑熱環境の悪化による影響が生じている。2019年6～7月には、ヨーロッパ北部から中部にかけて熱波が発生した。フランスを始め、各国で観測史上1位となる最高気温が記録された。フランスでは、この熱波による死者が1,400名以上となっている（文献1）。わが国においては特に2018年に猛暑の影響を受けた。同年の熱中症による救急搬送数は過去最多の9.5万件を超過し、うち死亡者数は160名に達した（文献2）。気象研究所らの報告によれば、同年の猛暑は地球温暖化の影響であることが示されている（文献3）。

本研究では、健康長寿の未来社会を目指し、『人の健やかさ』と『まちの健やかさ』の実現のために、気候変動による暑熱環境の悪化に着目する。昨年度の研究により、都市内の公園においては、夏季の早朝、夕方の利用であっても、熱中症リスクの高い環境下において高齢者による運動が実践されていることを確認した（文献4）。また、併せて、公園内のWBGTの可視化技術の精度向上を果たした。本年度は、(1)WBGTと熱中症搬送データに基づく暑熱環境の危険度評価手法の提案、(2)昨年開発した技術を援用し、健康増進型公園におけるWBGTの可視化技術に加え、地域の暑熱環境計測拠点として公園における温湿度計測からWBGTを推定する手法について検討する。また、(3)ウォーキング時の暑熱軽減のための経路算出手法の提案を試みる。本研究は市民と行政の健康・環境コミュニケーションツール開発のための基礎的知見が得られ、その援用による健康、環境情報をデジタルアースに投入することで、気候変動への適応を中心に複合的な問題解決にも資すると思われる。

2. 方法

2.1 WBGT（外力）と熱中症搬送データに基づく危険度評価

WBGT (wet-bulb globe temperature, 湿球黒球温度) を評価指標として活用しつつ、地域特性を考慮した暑熱環境の危険度情報を、一般市民に提供することで、より自分事として、熱中症を捉えてもらい、予防行動を促すことが重要と考える。そのため、ここでは、市民の熱中症のリスクを低減するため、WBGTを用いたDT値を定義し、対象都市の熱中症搬送データとDT値を用いることで地域特性を考慮し、自治体毎の暑熱環境の危険度を評価する方法を提案する。

(1) 本研究で提案するDT値の定義

本研究では、熱中症の危険度を表現するDT値を以下の式(1)で定義した。

$$DT_i = \{(x_{i-2} - TH) + (x_{i-1} - TH) + (x_i - TH)\} \cdot T \quad (1)$$

(x_{i-2}, x_{i-1}, x_i が TH 以下の時、 TH とする)

ここで、DT：DT値、x：WBGT(°C)、TH：閾値（ここでは21°C）、T：時間（ここでは1hr）、i：時間の添え字。式(1)より、本研究では曝露による影響時間を3時間と仮定している。これは、それ以上長い場合、WBGTが低い時間帯を含むときに、DT値が平準化されるため、3時間とした。また、危険度レベルを通知する際に、環境省より提供される予測値を用いることを前提としており、その予測値が3時間毎であり、利用しやすいことも考慮した。また、閾値は、スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブックに示される「WBGT：21°C未満：ほぼ安全」を参考に、21°Cとした。

(2) 危険度レベルの設定方法

本研究では、横軸にDT値、縦軸に熱中症による救急搬送者数をプロットし、両者の関係より、日本生気象学会による日常生活における熱中症予防指針（文献5）と同じ4区分（危険、嚴重警戒、警戒、注意）で設定することとする。また、区分毎での熱中症に関する救急搬送数の非超過確率発症確率を算定し、対象地域における危険度レベルの違いを定量的に表現する。

2.2 都市内公園の暑熱環境の簡易推計

主要な公園内での計測による居住地域のエリア単位の暑熱環境情報を提供することを目的に、暑さ指数 (WBGT) の簡易推定方法を提案する。本手法は、第一に、対象公園における気象データの計測、第二に、対象公園における WBGT の推定の 2 つの方法からなる。以下にこれらの手法について説明する。

(1) 対象公園における気象データの計測

調査対象公園は、吹田市と摂津市の両市にまたがる「北大阪健康医療都市(愛称：健都)」の開発エリアに築園された健都レールサイド公園(面積：約 2.6ha, 2018 年 3 月開園)とする。健都レールサイド公園は土の広場、みどりの広場、健康増進広場の 3 つの広場で構成されており、本研究では健康増進広場を対象に調査を行う。調査は、7/30(火)、8/3(土)、9/7(土)、9/10(火)、10/5(土)、10/8(火)の 6:00~9:00、11:00~14:00、16:00~19:00 に実施した。調査項目は、WBGT、温度、湿度、黒球温度を高さ 1.5m の地点、30 分間隔で計測し、地表面温度を 1 時間間隔で計測した。計測地点について園路、健康器具エリア、芝生、東屋の 4 つの地点で行った(東屋のみ日陰で、他の 3 地点は日向)。

(2) 対象公園における WBGT の推定

WBGT 推定方法として方法として、表 1 に示すように、目的変数を WBGT、黒球温度、説明変数を気温、相対湿度、湿球温度、黒球温度、地表面温度、風速などの組み合わせた上で、日向、日陰にわけて、重回帰分析を実施した。方法③~⑥で用いる WBGT の計算方法(文献 6)を式(2)に示す。

$$\text{WBGT} = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度} \quad (2)$$

また、WBGT の計算に必要となる湿球温度については、湿球温度計算ツールを用いて算出した(文献 7)。湿球温度の計算方法について式(3)に示す。

$$P_v = P_s(T_w) - AP(T_d - T_w) \quad (3)$$

T_d : 乾球温度(°C)、 T_w : 湿球温度(°C)、 $P_s(T_w)$: 湿球温度での飽和水上気圧、 $A = 0.000662$ 、 $P = 1013.25(\text{hPa})$ とする。

表 1 WBGT の推定方法一覧

方法	目的変数	説明変数	方法	目的変数	説明変数
①	WBGT	乾球温度、相対湿度	④	黒球温度	乾球温度、湿球温度
②	WBGT	乾球温度、湿球温度	⑤	黒球温度	乾球温度、地表面温度
③	黒球温度	乾球温度	⑥	黒球温度	乾球温度、湿球温度、地表面温度

2.3 ウォーキング時の暑熱軽減のための経路算出

暑熱による影響を軽減する対策の一つとして、人々が健康で安全に外出する機会の提供が必要である。そこで、ウォーキング時の暑熱軽減のための経路算出手法を提案する。本手法は、「(手法 A) 道路上の日陰量の算出」と「(手法 B) 暑熱リスクを軽減する経路の算出」の 2 つの手法からなる。以下、これらの手法について具体的に説明する。

(1) (手法 A) 道路上の日陰量の算出

(後述の)暑熱リスクを軽減することができる徒歩経路を算出するためには、指定した日時において道路上にどれだけ日陰ができるかを知る必要がある。そこでここでは、その手法を提案する。

道路(枝)上の日陰量を算出するための準備として、ある建物が道路上のある 1 点に陰をつくるための条件を以下のように整理した。

条件 1: 道路上の点から見た建物の方角(図 1)

条件 2: 「道路上の地点と建物との距離」と「建物の高度」の関係(図 2)

これらの条件を調べると、指定した特定の日に道路上のある 1 点が陰になっているかどうか分かる。

これにより、各交差点間を $(N + 1)$ 個に均等に分割し、 N 個の分割点が陰になっているかどうかを調べることができる(図 3)。このとき、 k 個の分割点が陰になっていた場合、当該交差点間の日陰率を k/N と定めることにする。

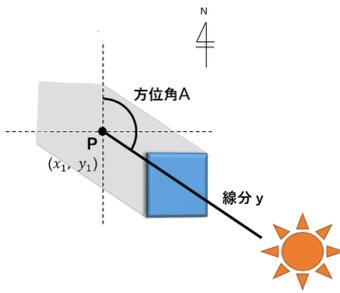


図 1: 条件 1

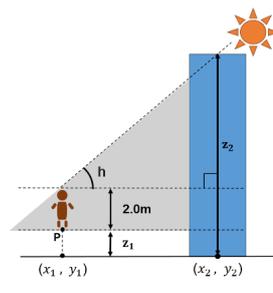


図 2: 条件 2

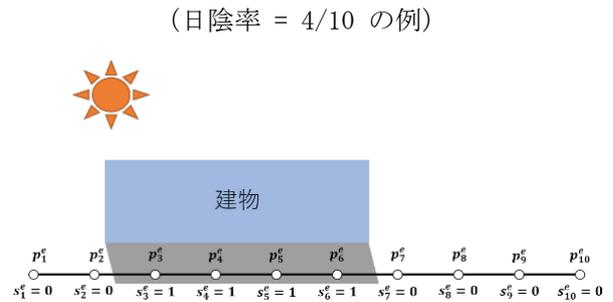


図 3: 交差点間の分割と日陰率

(2) (手法 B) 暑熱リスクを軽減する経路の算出

出発地から目的地まで、できるだけ短い距離、かつ、できるだけ日陰になっている道を歩く経路を求める最適化問題を定式化し、それを最適化ソルバで解くことで、暑熱リスクを軽減する経路を算出する。

ここでは、以下の 2 つの最適化問題を考える。

$$\begin{cases} \text{minimize} & \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} x_{ij} \\ \text{subject to} & \sum_{(i,v) \in E} x_{iv} = \sum_{(v,j) \in E} x_{vj} \quad (v \in V, v \neq o, d) \\ & \sum_{(o,j) \in E} x_{oj} - \sum_{(j,o) \in E} x_{jo} = 1 \\ & \sum_{(d,j) \in E} x_{dj} - \sum_{(j,d) \in E} x_{jd} = -1 \end{cases}$$

最適化問題 1: 最短経路の算出

$$\begin{cases} \text{minimize} & \sum_{(i,j) \in E} (w_{ij} - \bar{w}_{ij}) x_{ij} \\ \text{subject to} & \sum_{(i,v) \in E} x_{iv} = \sum_{(v,j) \in E} x_{vj} \quad (v \in V, v \neq o, d) \\ & \sum_{(o,j) \in E} x_{oj} - \sum_{(j,o) \in E} x_{jo} = 1 \\ & \sum_{(d,j) \in E} x_{dj} - \sum_{(j,d) \in E} x_{jd} = -1 \\ & x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \quad ((i,j) \in E) \\ & \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} x_{ij} \leq rL \end{cases}$$

最適化問題 2: 暑熱リスク軽減経路の算出

V : 交差点の集合, E : 枝 (交差点間) の集合, o : 始点, d : 終点

w_{ij} : 枝 (i, j) の長さ, \bar{w}_{ij} : 枝 (i, j) のうち日陰部分の長さ

L : 始点から終点までの最短経路長 (= 最適化問題 1 の最適値), r : L に対する経路長の許容比率

最適化問題 1 では、定めた出発地点から目的地までの最短経路長を算出することができる。また最適化問題 2 では、最適化問題 1 の結果をもとに、出発地点から目的地までの最短の経路より長くなりすぎず、かつ日の当たる道のりを最小にする徒歩経路を算出する。

3. 結果および考察

3.1 WBGT (外力) と熱中症搬送データに基づく危険度評価

(1) WBGT と熱中症に関する救急搬送件数の関係

熱中症に関する救急搬送データについて、堺市消防局協力の下、個人情報を含まない、覚知時刻 (年月日時分)、救急車到着地点住所 (町・字)、同場所 (住居、道路、教育機関等)、性別、年齢、傷病程度 (軽傷～死亡、その他) に関する情報の提供を入手した。収集期間は、2013～2018 年 (6 年間) であり、期間全体の熱中症による救急搬送数は 2, 145 件/6 年である。

入手した 6 年分の熱中症に関する救急搬送データの年月日時に対応する WBGT は、環境省の HP で公開されているデータ (地点: 堺) を用いた。図 4 に時間帯別の WBGT と熱中症に関する救急搬送数の関係を示す。同図は、横軸に時刻、縦軸に WBGT、円の大きさと搬送者数を示している。なお、時刻について分単位は切り捨ての処理を行い、表現している。また、夏季の熱中症を対象とするため、WBGT21℃以上の結果を示す。

WBGT と熱中症に関する救急搬送数の関係を見ると、WBGT が 29℃超えると熱中症に関する救急搬送数が急増する傾向にある。ピークは 13 時台の WBGT31℃の時 (58 人) である。一方、WBGT32℃以上の搬送数がやや少ないのは、WBGT32℃を超える気象条件の発生頻度が少ないためである。そのため、今後、気候変動の影響により、その発生頻度が増加した場合には、搬送数はさらに増加すると考えられる。

次に、時刻と WBGT、搬送数の関係について、17～19 時に着目すると、WBGT は 25～28℃の範囲にもかかわらず、熱中症に関する救急搬送数が多い。すなわち、単に WBGT と熱中症に関する救急搬送数の関係だけに着目すると、WBGT25～28℃での搬送数が多いように見えるが、時系列データで見る限り、昼間の WBGT が高いことの影響を受けていることは明らかである。このことから今回提案する DT 値のように WBGT の大きさと曝

露（影響）時間の関係から熱中症に関する危険度を評価することは有用と考えられる。

(2) 熱中症に関する救急搬送数と DT 値の関係からみた危険度レベル

2013～2018 年の 5 月 1 日～9 月 30 日期间における堺市を対象とした熱中症に関する救急搬送数と DT 値との関係を図 5 に示す。DT 値が 5 未満であっても時間当たり搬送数が 1 名（一例のみ 2 名）存在する事例が見られるが、大局的には DT 値の高まりに応じて、時間当たり搬送数は増加傾向にある。堺市における対象期間の結果に基づけば、時間当たりの搬送数のピークは、DT 値が 25 を超えた場合の 7 名である。時間当たり 1 名の搬送は、いずれの条件下においても起こりうることも読み取れる。

危険度レベルの設定は、現在の WBGT を基にした生活行動指針と同様に 4 区分（危険、嚴重警戒、警戒、注意）とする。ここでは、まず、DT 値と時間当たりの搬送数の関係（図 5）から、右肩上がりである傾向が見られるため、概ね実績値が含まれるように (0, 0) と (30, 7) の 2 点を結ぶラインを引いた。次に、4 区分に区分するため、「危険」と「注意」の DT 値の境界点を設定した。「危険」は、時間当たりの搬送数が最大となる点を含む境界として、DT 値：25 とした。「注意」の下端は、同搬送数 2 名以上の発生が相対的に頻度高く発生する DT 値：5 とし、上端は、同搬送数 3 名が生じない境界として、DT 値：10 と設定した。最後に「警戒」と「嚴重警戒」に関しては、同搬送数 5 名の点に着目し、DT 値：20 と設定した。結果、図 5 の下部に示すように DT 値を用いた暑熱環境の危険度レベルを設定した。

本評価指標の特徴の一つは、熱中症に関する救急搬送数を定量的に表現することである。そのため、ここでは、DT 値と熱中症に関する救急搬送数の非超過確率の関係（図 6）より考察する。危険度レベル別（普通、警戒、嚴重警戒、危険）の搬送数の非超過確率は、それぞれ、6%、12%、40%、60%である。すなわち、「警戒」レベルで、熱中症による救急搬送数の約 9 割の方へのアラートを出すことを意味している。また、「危険」と「嚴重警戒」の危険度レベルの違いは、「危険」の搬送確率は、「嚴重警戒」のそれよりも 1.5 倍高いことを意味する。このように定量的にリスクの大きさ、違いを市民に対して説明することが可能である。

3.2 都市内公園の暑熱環境の簡易推計

各方法による WBGT の推定結果の一例（日向の場合）を図 7 に示す。また、各推定方法の決定係数の比較を表 2 に示す。日向、日陰のいずれの地点においても、最も精度高く、推計できる方法は方法⑥の目的変数を黒球温度とし、気温（乾球温度）、湿度（湿球温度）、地表面温度から推定する方法である。その決定係数は、日向の場合、0.8314、日陰の場合、0.9918 と高い精度で推計可能と判断できる。

現状の環境省の示す「熱中症予防情報サイト」（文献 8）で提供している暑さ指数（WBGT）の予測値の精度

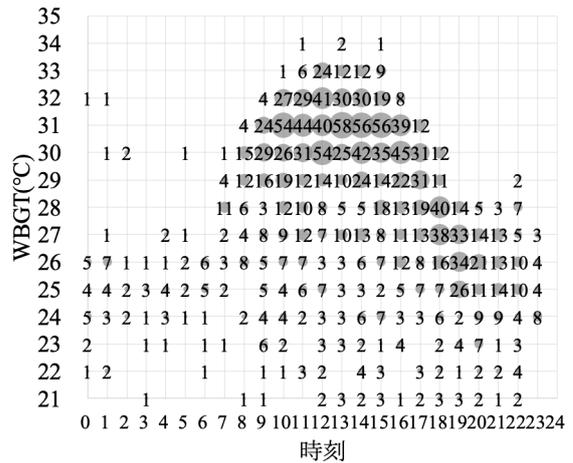


図 4 WBGT と熱中症に関する救急搬送数の関係

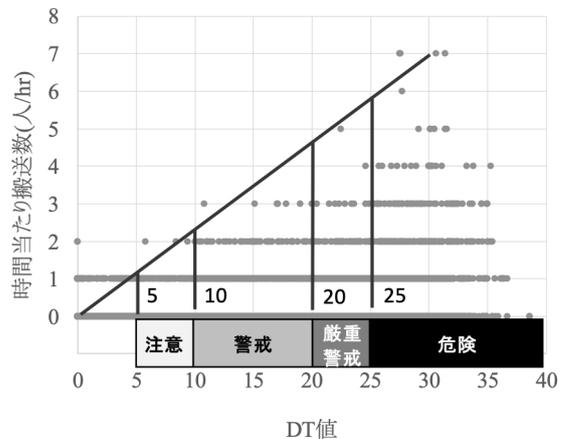


図 5 暑熱環境の危険度レベルの設定

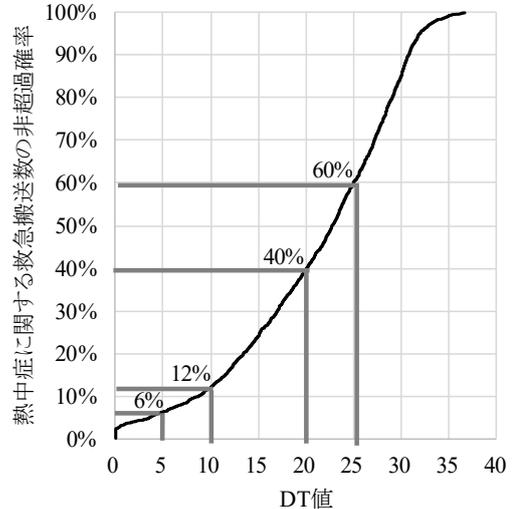


図 6 DT 値と熱中症に関する救急搬送数の非超過確率の関係

は、予測値と実況値の誤差の標準偏差は 1.2~1.8℃、暑さ指数（WBGT）の予測値は実況値よりも平均して、0.6~1.6℃高くなる傾向があると示されている。これに対して、本研究の予測値と実測値の誤差の標準偏差は、0.80℃、WBGTの平均は、共に 29.4℃であり、ほとんど誤差はない（実：推 = 29.41 : 29.45）。

すなわち、方法⑥を用いることで比較的簡易に WBGT を推定することが可能であり、公園利用時ならびに、周辺地域に対する暑熱環境のアラートを出すことが可能である。

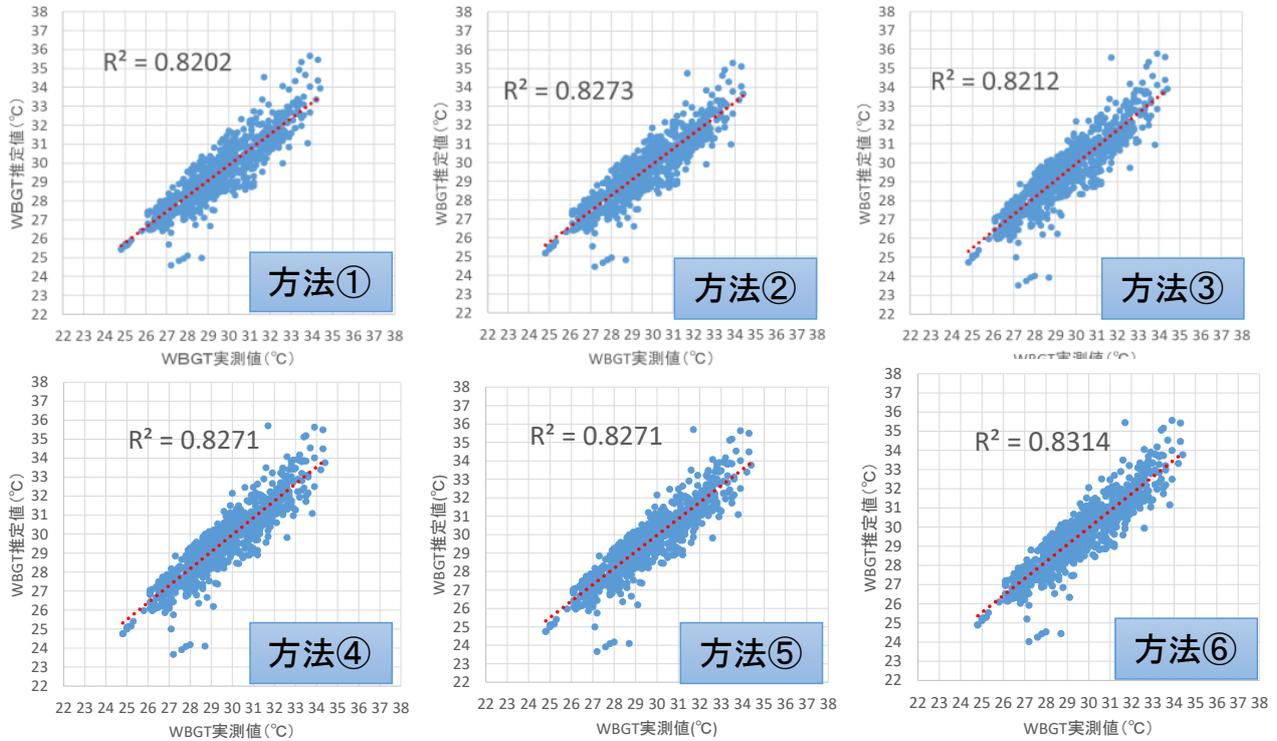


図 7 各方法における WBGT の実測値と推定値の比較（日向部）

表 2 各推計方法の決定係数の比較

方法	①	②	③	④	⑤	⑥
日向の場合	0.8202	0.8273	0.8212	0.8271	0.8271	0.8314
日陰の場合	0.9362	0.9382	0.9381	0.9382	0.9918	0.9918

3.3 ウォーキング時の暑熱軽減のための経路算出

本研究では、大阪府吹田市 江坂・豊津地区の 700m 四方の範囲を対象として実験を行った（図 8）。対象エリアの建物データは、国土地理院提供のレーザ・プロファイラデータから 50cm 解像度の DSM (Digital Surface Model), DEM (Digital Elevation Model) を作成し、これを建物ポリゴンデータに付与して生成した。

対象地域内に指定した始点・終点間の最短距離は 1145.0(m) であった（図 9）。これに対し、 $r = 1.10, 1.20$ とした場合、すなわち経路長の上限を $1145.0 \times 1.10(m)$, $1145.0 \times 1.20(m)$ とした場合の、日の当たる道のりをなるべく最小化した経路が図 10 である。

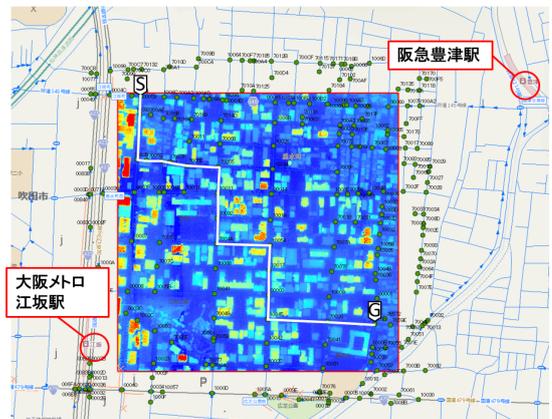


図 8: 実験対象地域

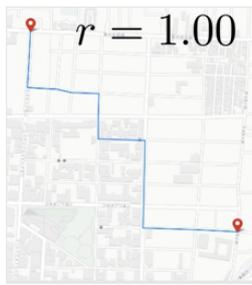


図 9 最短経路

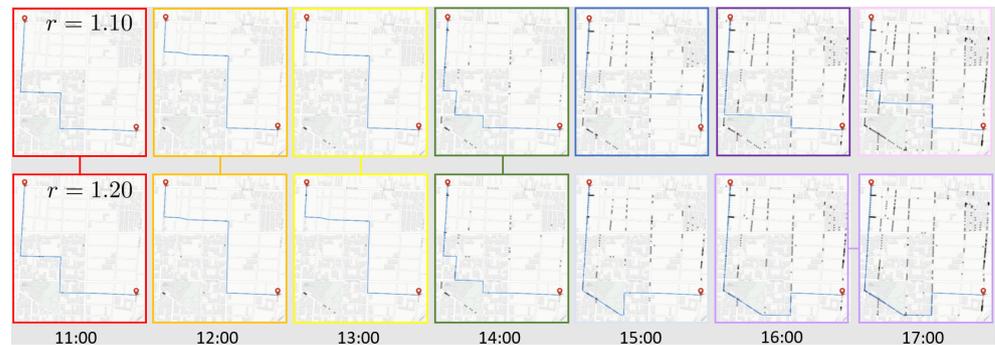


図 10 日の当たる経路をなるべく最小化した経路

図 10 に示すように、各時刻において、経路長の上限範囲内で、日の当たる経路をなるべく最小化した経路を得ることができた。許容比率を大きくすることで日の当たる経路長は減少し、特に夕方は太陽の高度が低くなるため減少量が大きくなることがわかった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を述べる。まず、WBGT（外力）と熱中症搬送データに基づく危険度評価について、これまでの WBGT を用いた熱中症に対する行動指針を補完する地域特性を考慮した自治体毎の暑熱環境の危険度評価方法を提案し、堺市を対象にその有用性を示した。次に、都市内公園の暑熱環境の簡易推計について、公園における WBGT 等の気象計測データを用いて、簡易に WBGT を推定する方法を提案した。その結果、予測値と実測値の誤差の標準偏差は、 0.8°C であり、WBGT の平均値には差がない精度で推定できた。最後に、ウォーキング時の暑熱軽減のための経路算出について、3D-GIS データ、道路網データと太陽高度と方位角の関係から、道路状の日陰量を算定し、暑熱リスクを軽減する徒歩経路の算出手法を提案し、避暑ナビシステムのアルゴリズムとして、活用できることを示した。

5. 謝辞

本研究は中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究 IDEAS201915 の助成を受けたものです。

参考文献・データ

1. 気象庁：世界の年ごとの異常気象， https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/annual/annual_2019.html， 閲覧日 2019.8
2. 総務省消防庁：平成 30 年(5 月から 9 月)の熱中症による救急搬送状況， https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/item/heatstroke003_houdou01.pdf， 閲覧日 2019.8
3. 気象庁：令和元年 5 月 22 日プレスリリース https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R01/010522/press_release.pdf 閲覧日：2019.10
4. 尾崎 平、安室 喜弘、窪田 諭、檀 寛成、宮崎 ひろ志、林 倫子：市民と行政の健康・環境コミュニケーションツールとしてのウォーキング環境の可視化 -都市の熱環境に着目して-， 問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究拠点 2018 年度成果報告書， 2019.
5. 日本生気象学会：日常生活における熱中症予防指針 Ver. 3， 2013
6. 小野 雅司，登内 道彦：通常観測気象要素を用いた WBGT (湿球黒球温度) の推定，日本生気象学会雑誌， No. 50， Vol. 4 ， pp.147-157， 2014.
7. 株式会社 CATTech.LAB: 科学技術計算ツール， <https://cattech-lab.com/science-tools/wetbulb-temp/>， 閲覧日：2019.10
8. 環境省：熱中症予防情報サイト， https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt_detail.php， 閲覧日 2019.8