

2020年東京オリンピックにおける競技者・観戦者の熱的ストレスの評価と オリンピック・レガシーとしての暑熱対策の検討

Evaluating heat stress of athletes and spectators at 2020 Tokyo Olympics and developing mitigation measures as legacies for urban thermal environment

学生証番号 37-166141 氏名 小坂 英智

Tokyo 2020 Olympic games will be held from July to August. As these are the hottest months in Tokyo, the risk of heat stress to athletes and spectators of outdoor games is a serious concern. And recently, the concept of Olympic Legacy has been receiving attention. In Tokyo, which urban infrastructures have already accumulated, it is important to utilize the existing urban infrastructure to improve heat stress. This study focuses on the marathon games, which are held outside for a prolonged time and evaluates the heat stress of marathon runners and spectators and daily street users. On clear sunny days, for runners, the entire courses are rated as dangerous and, for spectators, the spots, which there are no shade, are evaluated as dangerous. Utilizing existing urban infrastructure, such as starting the race one hour earlier or making use of urban greenery decrease thermal stress for both runners and spectators. Therefore, it is assumed that utilizing existing urban infrastructure is valid as mitigation measures as Olympic legacies.

1.1 背景

2020年に開催が予定されている東京オリンピックにおいては、暑熱環境による熱的ストレスが課題のひとつとされる¹⁾。近年、世界の大都市では、全球レベルでの温暖化やまたヒートアイランド現象の進行により気温が上昇するとともに、路面や建物側面の長波放射が増加し²⁾、人体への熱的ストレスによる健康被害が深刻化している^{3),4)}。とりわけ東京は、温帯湿潤気候下であり、8月に開催が予定されているオリンピックの開催時には高温多湿となるため、熱的ストレスによる健康被害が従前から指摘されてきた^{5),6),7)}。8月の東京で、オリンピックを開催した場合、実際に競技者と観戦者がどの程度の熱的ストレスを受けるのかを評価し、熱的ストレスを軽減する暑熱対策の実施を検討することは喫緊の課題である。

他方で、オリンピックをめぐっては近年“Legacy”という概念が注目されている⁸⁾。この概念は、オリンピックを通じて作られたインフラ及び施設が負の遺産として開催都市と開催国に残った過去の反省を踏まえ、オリンピック開催に伴う開発の際には、オリンピック期間中の利便性・効率性のみではなく、オリンピッ

ク後の日常の暮らし・行動にどう影響を与えるかについても検討されるべきであるという考えを表している⁹⁾。暑熱対策としてドライミストなどが想起されるが、これらは効用と同時に維持管理の必要性を都市に残す。2020年は成熟都市東京での開催であり、これまで蓄積してきた都市インフラの活用も重要であると考えられる。したがって、既存の都市インフラを活用した暑熱対策を考えていく必要性があると考えられる。

オリンピックの競技の中でもマラソン競技は、競技の実施中、ランナーは夏の炎天下の中で2時間から3時間程度の運動を連続的に強いられる。また観戦者についても、暑熱環境に脆弱な高齢者も含む多様な観戦者がコース上に存在し、かつ長時間暑熱環境下で観戦すること想定され、熱的ストレスによるリスクが高いと考えられる。そこで本研究では、オリンピックのマラソン競技におけるランナーと観戦者を熱的ストレスの評価及び暑熱対策の検討対象とする。

過去にオリンピックなどイベントへ向けた暑熱対策について扱った研究は、アトランタオリンピックの各競技会場の暑熱環境の評価を行なった研究¹⁰⁾、FIFA World Cup 2022年カタール大会のメインスタジアムの暑熱環境を評価し

た研究¹¹⁾など、多数の既往研究が存在する。また2020年東京オリンピック・マラソン競技についての先行研究としては、気象庁の観測結果を用いてマラソンコース上の暑熱環境の簡易的な評価を行なった研究¹²⁾及び、マラソンコース上の暑熱環境を実際に計測し、Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT)という指標を用いて評価した研究¹³⁾が存在する。

しかし、これらの既往研究は単に暑熱環境のみを対象としており、人体が運動を行うことによって生じる熱的ストレスというものを対象にしておらず、マラソン競技のランナーにおいては継続的に強度の高い運動を行い、運動から人体が受ける熱的負荷は極めて高くなる主体に対する知見は不足している。また、既往研究ではマラソン競技中の暑熱環境の評価といったオリンピック開催時のリスクを明らかにし、暑熱対策を提示することに主眼であり、暑熱対策がオリンピック期間中のみでなく、オリンピック後の日常にも資するかというオリンピック・レガシーの視座が欠けている。

1.2 研究の目的

そこで本研究は2020年東京オリンピック・マラソン競技におけるランナー・観戦者にとっての熱的ストレスの評価と今ある都市インフラを生かす暑熱対策の効果と限界について分析を行う。そして、オリンピック・レガシーとしての暑熱対策を検討することを目的とする。

1.3 研究の流れ

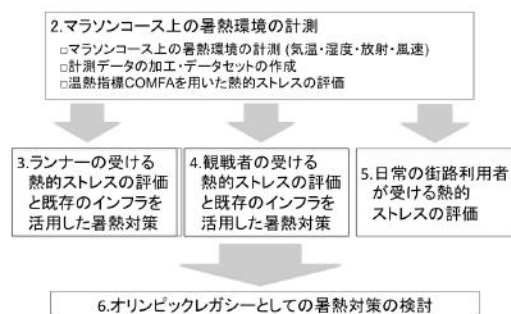


図1-1 研究の流れ

本研究では、まずマラソンコース上の暑熱環境の実測調査を行う。その際、マラソン競技中のみでなく、競技時間外についても調査を行う。そのデータを元にランナー・観戦者・日常の街路利用者が受ける熱的ストレスの評価と今あるインフラを活用した暑熱対策の効果を明らかに

しました。最後にその結果を元にオリンピック・レガシーとしての暑熱対策を検討する。

1.4 研究の対象

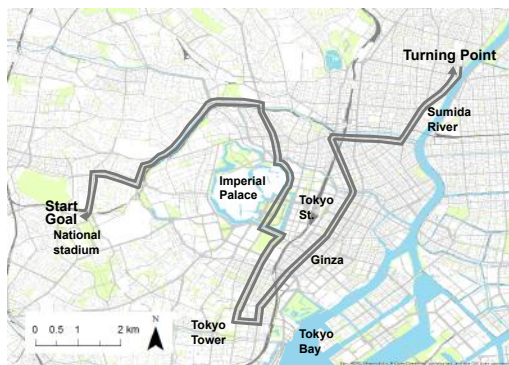


図1-2 予定されるマラソンコース

本研究の対象値は、2020年東京オリンピックの陸上・マラソン競技における予定コースである。東京の中心部を横断しながら、各地の名所を巡るコースとなっている。

2. マラソンコース上の暑熱環境の計測

表2-1 ランナー計測日一覧

日付	時間	天候	最高気温
2016年7月29日	7:30-10:29	晴れ	33.0℃
2016年8月5日	7:30-10:30	晴れ	33.6℃
2016年8月6日	7:30-10:31	晴れ	32.8℃
2016年8月9日	7:30-10:33	晴れ	37.9℃
2016年8月11日	7:30-9:57	曇り	29.6℃
2016年8月12日	7:30-10:15	曇り	29.4℃
2016年8月13日	7:30-10:16	晴れ	30.1℃
2016年8月14日	7:30-10:10	曇り	28.6℃
2016年8月23日	6:30-9:20	曇り	29.8℃
2016年8月25日	6:30-9:25	晴れ	31.5℃
2016年8月26日	7:30-10:25	晴れ	32.7℃

表2-2 観戦者計測日一覧

計測日	計測時間帯	計測箇所	天候	最高気温
2017年7月21日	往路・復路	6-17	晴れ	33.0℃
2017年8月7日	往路復路	9-15	晴れ	32.8℃
2017年8月9日	往路復路	1-8, 16-20	晴れ	37.9℃
2017年8月30日	復路	9-15	晴れ	32.7℃

表2-3 日常の街路利用者計測日一覧

計測日	計測時間帯	計測箇所	天候	最高気温
2017年8月6日	1時-3時-5時	16-20	晴れ	33.6℃
2017年8月7日	1時	9-15	晴れ	32.8℃
2017年8月23日	1時	1-8	晴れの曇り	29.6℃
2017年8月24日	1時-3時-5時	1-8	晴れ	29.4℃
2017年8月27日	1時-3時-5時	9-15	□りの晴れ	28.6℃
2017年8月28日	3時	9-15	晴れ	29.8℃
2017年8月29日	1時	9-15	晴れ	31.5℃
2017年8月30日	1時	9-15	晴れ	32.7℃

ランナー、観戦者を対象とした暑熱観測、日常の街路利用者を想定した暑熱環境の計測を2016年、2017年の7月から8月にかけて実施した。計測は、気象計測機を搭載した自転車および自動車でおこなった。ランナーについては、マラソンコースのスタートからゴールまでを移動計測する形で行なった。またランナーに関しては、スタート予定時刻である7:30からの計測のみでなく、一時間はやめた6:30からスタートした場合の計測も行なった。観戦者・日常の街路者については道路方向・周辺の環境を基準にマラソンコースを20分割し、計20地点で道路の左右20mずつ約2m間隔で計測を行なった。

表 2-4 計測機器一覧

機器	要素	モデル	精度	間隔
気温計	気温(°C)	POTEKA	±0.3 °C	1秒
湿度計	相対湿度(%)	POTEKA	±5%	1秒
日射計	日射量(W/m ²)	POTEKA	±10%	1秒
表面温度計	表面温度(°C)	ThermoGEAR G100	±2 °C	3秒
風速計	風速(m/s)	POTEKA	±1.0m/s	1秒
GPS	緯度経度	eTrex30	-	1秒

またランナー・観戦者については、計測されたデータを合成することで、最も暑くなったケースを仮装した Worst case scenario、最も涼しかった場合を仮装した Best case scenario を作成した。各計測日、各計測日ごとに温熱指標 COMFA を用いて暑熱環境の評価を行なった¹⁴⁾⁻¹⁸⁾。COMFA の計算については、本指標作成者の Robert Brown 教授にご協力いただいた。

3. ランナーの受ける熱的ストレスの評価と既存のインフラを活用した暑熱対策

3.1 ランナーの受ける熱的ストレスの評価

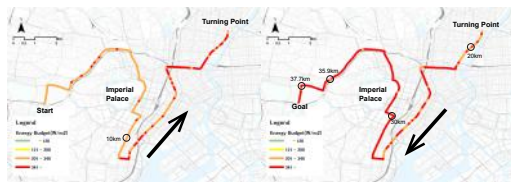


図 3-1 Worst case 結果

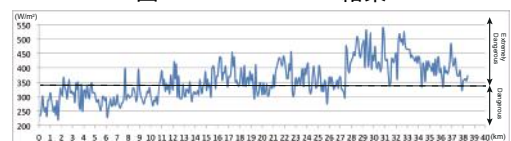


図 3-2 Worst case 結果

Worst case は、データの合成により常に晴れている状況を仮装したものである。

レースの開始直後では、危険と評価されるス

ポットが連続している。東西方向の道路を走行する区間(15.8km-17.2km)は、太陽方向へ走行することとなり、日射及び路面温度が高い値をとることで、極めて危険の基準値を超える値を取っていた。復路では、時間の経過により気温・日射・路面温度の値が上昇することで往路に比べてより高い熱収支の値を取っていた。往路と同様に東西方向の道路(21.3km-22.7km)においては極めて危険の基準値を大きく超える値を取っていた。22.8km 地点から 27.5km 地点では、南北方向の道路であり、道路沿いに高層のビルが立ち並んでいるため、コース上はビル陰で覆われていた。そのため、他のスポットに比べて、日射量及び路面温度の値が低く、COMFA 値は周囲に比べて 100(W/m²)程度、低かった。一方、27.5km 以降は、多くのスポットで日射が大部分を占めていた。そのことから、他のスポットよりも日射量及び路面温度が高い値をとっており、気温上昇も相まって、極めて危険の基準値を大きく超える値をとるスポットがゴール付近まで連続していた。例えば、皇居前広場(30.4km - 31.2km)の熱収支は 463.8 - 596.8 と高くなっていた。これはこの区間は周囲に高い木々や建物が存在せずランナーに陰が供給されなかったためであると考えられる。

3.2 既存のインフラを活用した暑熱対策

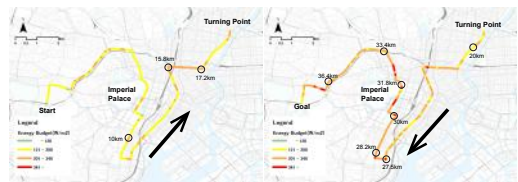


図 3-3 一時間時間を早めた場合 結果



図 3-4 一時間時間を早めた場合 結果

8月25日は計測を通常のレース開始時間より一時間早めた7:30に計測を開始したデータである。8月25日は、日中の最高気温が32°Cで、気象庁のデータによると計測時間中は常に晴れていた。そのため、8月25日は日射のみで考えると Worst case scenario と同様に、一時的に日が陰るといった気象の変化による影響を受けず、各スポットがその時点での日射量の最大値

Eichi Kosaka

をとっていると考えられる。

図 10, 11 が評価結果を示している。結果は往路においては危険な区間が連続しているが、極めて危険なスポットは東西方向の道路を走行する区間(15.9km-17.3km)の一部のみであった(図 10)。復路においては、8月9日と Worst case Scenario と同様に 27.5km を境として高い COMFA 値をとっている。しかし、28.2km-29.9km、33.4km-36.4km では COMFA 値が周囲より低かった。そのため、極めて危険なスポットの連続は、最長でも 31.8km-33.4km の 1.6km という結果となった。これはスタート時間を 6:30 と早めたことにより太陽の高度があがりきらず、7:30 からの計測に比べて、コース上にビルや街路樹による陰がまだ大きく残っていたためであると考えられる。特に暑さが過酷な復路において、Worst case では日陰が 5.1km と日向部分を大半で走行していましたが、一時間早めた場合は日陰部分が 10.9km となり、対策により 5.8km 日陰の部分が増加した。したがって街路樹陰やビル陰を活用できていることから、一時間時間を早めることは対策として有効であると考えられた。

4. 観戦者の受ける熱的ストレスの評価と既存のインフラを活用した暑熱対策

4.1 観戦者の受ける熱的ストレスの評価

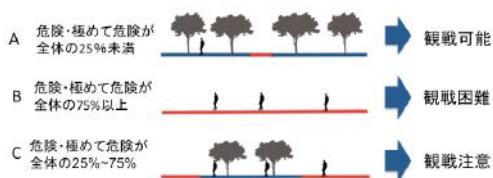


図 4-1 熱的ストレス評価方法

ランナーは移動する存在であるが、観戦者は静止している。そのため、観戦者については区間全体の平均は意味を持たず、安全に観戦できる場所の割合がより重要である。そこで本研究では、各地点の観戦可否を COMFA 値で危険・極めて危険と評価される地点が 25%未満の場合を観戦可能、危険・極めて危険が 75%以上の場合を観戦困難、危険・極めて危険が 25%~75%の場合を観戦注意と評価する。

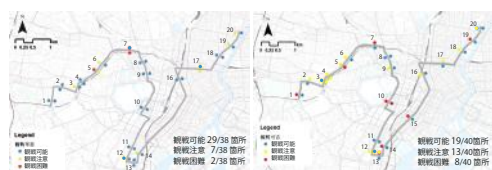


図 4-2 観戦者評価結果(左：往路, 右：復路)

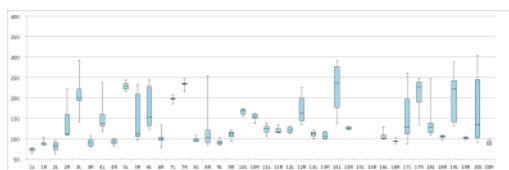


図 4-3 観戦者評価結果・箱ひげ図(往路)

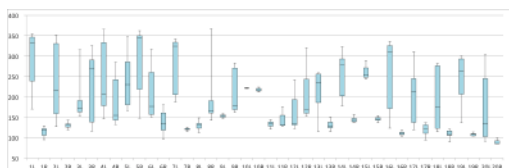


図 4-4 観戦者評価結果・箱ひげ図(復路)

往路では地点 16 のみ十分にデータが取れず分析から除外した。観戦可能な地点としては往路では、全 38 地点中、29 地点で安全に観戦可能、入場制限をすれば、観戦可能と評価された地点が 7 地点、観戦不可と評価された地点が 2 地点であった。全体としては、安全と評価される地点が過半数以上を占める結果となった。

復路に関しては、全 40 地点中、19 地点で安全に観戦可能、13 地点で入場制限付きで観戦可能、残り 8 地点で現状では観戦不可と評価された。往路で半数を超えていた安全な地点は半数を割り、何らかの対策を講じることが必要と評価された地点が大勢を占めた。

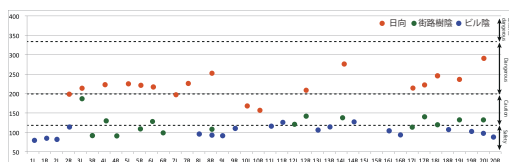


図 4-5 日向・日陰比較(往路)

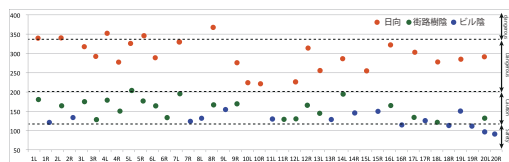


図 4-6 日向・日陰比較(復路)

図 4-5, 6 は全地点の日向とビル陰と街路樹陰ごとの値の平均を示したものである。図からビル陰・街路樹陰内は気温が高くなる復路においても安全から注意の水準で評価されている。街路樹、ビル陰の効果は大きく、日向から街路樹陰、ビル陰に入ること、往路では熱的ストレスは危険から安全に、復路では極めて危険から注意に推移している。よって、街路樹陰を有効

Eichi Kosaka

活用することは暑熱対策として有効であると考えられた。一方で、復路の5L, 7L, 14Lなどでは、建物が長時間直射日光を浴びることで壁面温度が高くなり、街路樹陰内でも危険の基準値に近い熱的ストレスの値を取っている。このような地点では、街路樹の陰以外の暑熱対策を講じる必要性が示唆された。

4.2 既存のインフラを活用した暑熱対策

4.1の結果より街路樹陰活用の暑熱対策としての有効性が示された。そこで本研究では、街路樹の樹冠が2020年までに直径2m伸長すると仮定し、樹間拡大による観戦可否の評価への効果について分析を行った。

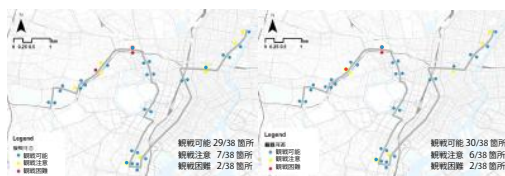


図 観戦者評価・往路(左：拡大前 右：拡大後)



図 観戦者評価・復路(左：拡大前 右：拡大後)

往路では、安全と評価される地点が38地点中、30地点、6地点が観戦注意、2地点が観戦困難と評価された。対策を実施しない場合は、29地点で安全に観戦可能、7地点が観戦注意、観戦困難と評価された地点が2地点であったため、往路では街路樹の樹冠拡大を行うことによって、安全な地点が1箇所増えるという結果となった。

復路では、40地点中、観戦可能と評価される地点は21地点、15地点が観戦注意、観戦困難と評価された地点は4地点であった。対策を実施しない場合は、19地点で安全に観戦可能、14地点が観戦注意、9地点が観戦困難と評価された。復路では街路樹の樹冠拡大を行うことによって、安全な地点が4箇所増え、観戦不可が5箇所減らすことができるという結果となった。

特に復路において、街路樹の樹冠拡大は観戦の可否に対して効果があると考えられた。

5. 日常の街路利用者が受ける熱的ストレスの評価

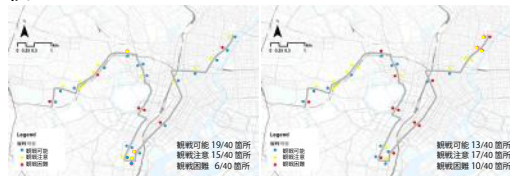


図 日常の街路利用者評価(左：午前 右：1時)

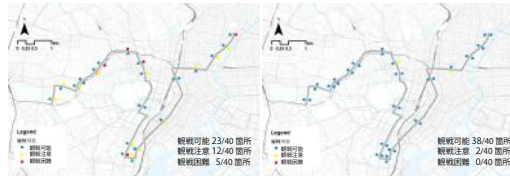


図 日常の街路利用者評価(左：3時 右：5時)

午前では、全40地点中、19地点で安全に歩行可能、15地点で歩行危険、6地点で、歩行困難と評価された。1時では、全40地点中、13地点で歩行可能、17地点で歩行危険、10地点で、歩行困難と評価された。3時では、全40地点中、23地点で安全に歩行可能、12地点で歩行注意、5地点で、歩行困難と評価された。5時では、全40地点中、38地点で安全に歩行可能、2地点で歩行注意、歩行困難と評価される地点はなかった。

この4時点のうち、2時点以上で歩行困難と評価され、特に日常においても暑熱対策が求められる地点としては、外堀通りのお堀側である地点5、皇居前広場である地点10などの長時間太陽側がオープンスペースとなっている地点、銀座通りの左側歩道である地点12など南北方向通りの西側で気温が高くなる午後に西日の影響を受ける地域など計8地点が調査からわかった。

6. オリンピック・レガシーとしての暑熱対策

6.1 オリンピック・レガシーとしての暑熱対策

ランナーは調査の結果から一時間時間を早めることにより復路において日陰の区間が5.1kmから10.9kmに増加し、既存の都市インフラを生かす暑熱対策が有効であることがわかった。

一方で限界点としては、8.4kmは日向を走る必要があり、また日陰部分でも高い熱的ストレスを受けることがわかった。

よって総合的には、一時間時間を早めた上で、ランナーへ暑さに対する注意を喚起や給水地点を増やすなど当日の対応を充実させることがオリンピック・レガシーとしての暑熱対策として

考えられた。

観戦者は調査の結果から既存街路樹の樹冠拡大により復路において観戦可能な地点が4地点増加し、観戦不可な地点が5地点減少しており、対策として有効であるとわかった。一方で限界点としては、4地点については依然として観戦困難であること、復路の後半では街路樹陰でも一部は高い壁面などの影響で高い熱的ストレスを受けることがわかった。総合的な対策としては、既存街路樹の樹冠拡大を行った上で、それでも危険な地点については、日常においては対策の必要性が高い地点を壁面緑化などの設置を優先して検討すること、上手く誘導することで観戦者を観戦困難なエリアには入れさせないといったことがオリンピック・レガシーとしての暑熱対策として考えられた。

6.2 今後の課題

本研究において成熟都市・東京における暑熱対策レガシーとして、既存の都市インフラを活用することで持続可能な社会に向けて都市へ重荷となるものは残さないこと。成熟した都市を使いこなすことをあげ、その有効性を示した。

今後の課題としては、既存の水関係のインフラを生かした暑熱対策など、本研究で取り上げたインフラ以外の活用効果についての研究を進展させること、オリンピックを機として達成される成熟した都市の使いこなし方をオリンピック以降にも波及させる手法について実践を通じて積み重ねることがなどが考えられた。

【謝辞】

本研究では暑熱環境の計測を清水建設株式会社、明星電気株式会社のご協力のもと行いました。また東京都より街路樹データをご提供いただきました。心より御礼申し上げます。

【引用・参考文献】

- 1) 東京都都市環境整備局
URL(<https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/other/countermeasure/suishinkagai.html>)
(accessed on 16 June, 2017)
- 2) Golden, J.S. The built environment induced urban heat island effect in rapidly urbanizing arid regions –a sustainable urban engineering complexity, 2003; Environ Sci. 4, 321-349
- 3) Jianguo Tan Email author Youfei Zheng Xu Tang Changyi Guo Liping Li Guixiang Song Xinrong Zhen Dong Yuan Adam J. Kalkstein Furong Li Heng Chen. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai, 2010; International Journal of Biometeorology, Volume 54, Issue 1, pp 75-84

- 4) Jonathan A. Patz, Diarmid Campbell-Lendrum, Tracey Holloway, Jonathan A. Foley, Impact of regional climate change on human health, 2005; Nature 438, 310-317
- 5) Nakai S, Itoh T, Morimoto T. Deaths from heat-stroke in Japan: 1968-1994. Int J Biometeorol. 1999;43: 124-127.
- 6) Wetterhall SF, Coulombier DM, Herndon JM, Zaza S, Cantwell JD. Medical care delivery at the 1996 Olympic Games. JAMA. 1998; 279:1463-8.
- 7) Zhang JJ, Wang LD, Chen Z, Ma J, Dai JP. Medical care delivery at the Beijing 2008 Olympic Games. World J Emerg Med. 2011; 2:267-71.
- 8) IOC. 2016. Olympic Charter, p14
- 9) 間野義之. 2013. オリンピックレガシー 2020年東京をこうかえる!, 17-18
- 10) David E. Martin (1998) Measurement of climatic heat stress at outdoor venues for endurance events at the Atlanta Olympic Games, 1996, Sports Medicine, Training and Rehabilitation, 8:4, 321-346
- 11) P. Sofotasiou et al. 2015. Qatar 2022: Facing the FIFA World Cup climatic and legacy challenges Sustainable Cities and Society 14. 16-30
- 12) Yudai YAMASAKI, Nobumitsu TSUNEMATSU, Hitoshi YOKOYAMA, Kiyoshi UMEKI, Tsuyoshi HONJO 2016 Prediction of Thermal Environment in Olympic Marathon Course by Thermal Comfort Map, Environmental information Science 30 43-38
- 13) Osamu Kashimura, Kazuhiro Minami, Akio Hoshi. 2016. Prediction of WBGT for the Tokyo 2020 Olympic Marathon. Jpn. J. Biometeor. 53(4):139-144
- 14) Brown, R.D. and Gillespie, T.J. Microclimatic landscapes design: creating thermal comfort and energy efficiency. Wiley, 1995.;
- 15) Vanos, J.K., Warland, J.S., Gillespie, T.J. and Kenny, N.A. Improved predictive ability of climate-human-behaviour interactions with modifications to the COMFA outdoor energy budget model. 2012; International journal of biometeorology, 56(6), pp1065-1074
- 16) Brown RD, Gillespie TJ. Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy budget model. Int J Biometeorol. 1986;30: 43-52.
- 17) Vanos JK, Warland JS, Gillespie TJ, Slater GA, Brown RD, Kenny NA. Human energy budget modeling in urban parks in Toronto, ON and applications to emergency heat stress preparedness. J Appl Meteorol Clim. 2012; 51: 1639-1653.
- 18) Harlan, S.L., Brazel, A.J., Prasad, L., Stefanov, W.L. and Larsen, L.; Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress, 2006; Social science & medicine, 63(11), pp.2847-2863