

筑波大学内の避難場所における停電発生時の熱中症リスクの評価

R2E グループ PBL 演習 9 班

植野 旬真 渡邊 海斗 鷲尾 友康 山本 太一

アドバイザー：遊佐 暁 スーパーバイザー：木下 陽平

1. はじめに

日本は、地震、津波、台風、火山噴火など、自然災害が頻発する国として世界的に知られている。近年では、東日本大震災（平成 23 年）、熊本地震（平成 28 年）、能登半島地震（令和 6 年）など、度重なる大規模な地震や津波による被害を経験してきた。また、今年 8 月に宮城県沖で発生した地震を契機に、南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）が発表されるなど、巨大地震への危機意識は一層高まっている。さらに、国内外における大雨の頻発や気温の上昇など、異常気象による影響も指摘されている。令和元年には、台風 19 号が茨城県を襲い、那珂川（常陸大宮市）や久慈川（大子町）で堤防の決壊や越水が発生し、広範囲にわたる水害をもたらされた。茨城県内では死者 2 名、負傷者 20 名、行方不明者 1 名が報告され、県北地域や水戸市を中心に約 4000 軒の家屋が全半壊や浸水の被害に見舞われ、多数の住民が避難生活を余儀なくされた[1]。

こうした大規模災害時の避難生活における大きな課題の一つに、暑さ対策が挙げられる。近年では、地震や大雨と同様に、猛暑もまた災害の一つと認識され始めている。東京管区气象台によると、水戸市における日最高気温が 35℃を超える猛暑日は 1990 年頃から急増しており、2019 年からは気象庁と環境省が共同で熱中症警戒アラートを発表している[2]。2023 年の熱中症による救急搬送者数や警戒アラートの発表回数は 2 年前から倍増しており、避難所での暑さ対策が急務となっている[3]。例えば、能登半島地震では避難所に冷風機やクーラーの設置が行われたものの、一般的な体育館や屋外の避難場所には十分な冷房設備が備わっておらず、災害直後の緊急避難時に使用できる設備は限られている。また、停電が発生すれば、これらの冷房機器も利用できない可能性がある。そこで本研究では、筑波大学内の避難場所をモデルケースとして、緊急時における現状の暑さ対策や夏季における避難場所の温度変化を分析し、その課題を明らかにした上で、今後の避難

場所における適切な暑さ対策について提案する。

2. 関連研究・関連技術

2.1. 熱中症予防ガイドライン

熱中症とは、体温調節機能が崩れ、体内に熱が蓄積されることで、体温上昇や水分・塩分のバランスが乱れ、眩暈、痙攣、頭痛といった多様な症状を引き起こす疾患である。熱中症のリスクを高める要因には、「環境」、「身体」、「行動」の 3 つが挙げられる。環境要因としては、気温、湿度、風の有無、日差しの強さが影響する。身体要因には、高齢者や乳幼児、肥満、糖尿病や精神疾患などの持病、栄養状態、さらには二日酔いや寝不足といった体調不良が含まれる。行動要因は、激しい運動や長時間の屋外作業、水分補給不足などが関与する。通常熱中症対策としては、これらのリスク要因を排除することが重要であり、扇風機やエアコンによる室温調整、保冷剤や冷水、濡れタオルでの身体冷却、吸湿性・速乾性の衣服の着用などが推奨される。屋外では、日傘や帽子の使用、日陰での休憩、こまめな水分補給が必要である[4]。

しかし、災害発生時の避難行動を考慮すると、避難場所には日陰や冷房設備が整っていないことが多く、さらに停電や断水が発生した場合、冷房機器や保冷剤、冷水の確保が困難となる。特に体育館など大人数が避難する場所では、体温や汗の影響で室温や湿度が通常以上に高くなることが予想される。実際に、今年 7 月 27 日から 28 日にかけて、防災の専門家が集まる避難所・避難生活学会によって「酷暑を想定した避難所生活訓練」が小学校の体育館で行われた[5]。最高気温が 35℃を超える猛暑日の中、エアコンのない体育館で一晩を過ごすという停電を想定した訓練であった。夜間でも室温は 30℃以上、湿度は約 70%に達し、極めて過酷な環境であったことが確認された。また、扇風機の騒音による不眠、風の当たらない場所での「熱だまり」の発生も新たな課題として浮き彫りになった[6]。この訓練は長期的な避難生活を想定して行われたが、たとえ数時間の一時的な

避難であっても、直射日光の下や高温・高湿度の体育館内に滞在することで、熱中症リスクが急激に増大する可能性がある。したがって、冷房機器に依存しない、効率的で実践的な熱中症対策の構築が急務である。

2.2. WBGT

前述したように、災害発生時の避難における暑さ対策および熱中症対策は喫緊の課題である。この課題に対処するために、暑熱環境を数値的に評価する指標がいくつか提案されてきている。その中でも代表的な指標の一つが、湿球黒球温度 (Wet Bulb Globe Temperature: WBGT) である。WBGT は、1954 年にアメリカで提案された指標であり、単位は摂氏度 (°C) で示される。しかし、単なる気温とは異なり、湿度、日射・輻射などの外部熱環境、さらに気温といった、人体の熱収支に大きく影響を与える要素を取り入れている点が特徴である。本研究では、WBGT が熱中症の予防を目的として開発された指標であること、さらに労働環境や運動環境における指針としてその有効性が認められ、国際的に規格化されていることを踏まえ、これを評価指標として採用することとした。なお、WBGT を用いた日常生活における指針について、日本生気象学会が公表している「日常生活における熱中症予防指針」[7]では、WBGT の値に基づき暑熱環境を 4 つの段階に分類している。表 1 に、WBGT の値に基づく暑熱環境の分類を示す。

表 1. WBGT による暑熱環境の分類 [7]

日常生活における熱中症予防指針		
WBGT による温度基準域	注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 31°C以上	すべての生活活動でおこる危険性	高齢者においては安静状態でも発生する危険性が高い。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
厳重警戒 28°C以上 31°C未満		外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒 25°C以上 28°C未満	中等度以上の生活活動でおこる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に十分に休息を取り入れる。
注意 25°C未満	強い生活活動でおこる危険性	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には発生する危険性がある。

次に、WBGT の測定方法および算出方法について述べる。WBGT は、黒球温度 (Globe Temperature: GT)、湿球温度 (Natural Wet Bulb Temperature: NWB)、乾球温度 (Natural Dry Bulb Temperature: NDB) の 3 種類の温度を同時に測定して算出される。黒球温度は、直射日光や周囲の熱放射を含め

た体感温度に近いものであり、太陽光の強度や周囲の建造物からの熱放射の影響を評価するのに重要な指標である。湿球温度は、蒸発冷却を示し、空気中の湿度が高い場合に汗が蒸発しにくくなるため、熱中症のリスクが高まることを表す。また、乾球温度は通常の気温を測定するものであり、気温自体の変化を把握するために用いられる。これらの測定結果を基に、WBGT は屋外と屋内でそれぞれ異なる算出式を用いて求められる。屋外の場合、大気中の温度である気温の影響を受けるため、乾球温度を含めた式(1)で算出される。一方で、屋内ではその影響を受けないことから、乾球温度を含めない式(2)で算出される。

$$WBGT = 0.7 \times NWB + 0.2 \times GT + 0.1 \times NDB \quad (1)$$

$$WBGT = 0.7 \times NWB + 0.3 \times GT \quad (2)$$

しかし、本研究では、予算の制約により専用の WBGT 測定装置を用意することができなかった。そこで、WBGT を近似的に算出する方法を検討した。埼玉県環境科学国際センターの研究成果[8]によれば、気温 (T) および相対湿度 (RH) のみを用いて、屋外および屋内の WBGT をそれぞれ近似的に算出できることが示されている。屋外における WBGT は式(3)、屋内は式(4)で求められる。

$$WBGT = 1.0577 \times T + 0.1066 \times RH - 11.5011 \quad (3)$$

$$WBGT = 0.866 \times T + 0.1152 \times RH - 6.8569 \quad (4)$$

これらの式は、気温と相対湿度の 2 つの変数のみを用いるため、実際の測定装置を使用することなく WBGT の近似値を算出できる利点がある。この方法は、簡便でありながらも一定の精度が期待できるため、本研究においても採用した。この近似的算出法は、専用機器を用いた測定には劣るものの、避難場所の環境評価や予備的な熱中症リスクの評価には十分な有用性があると考えられる。

3. 現状分析

我々は、避難所における暑熱対策の現状を考慮し、筑波大学内の避難場所において停電時に熱中症患者が発生するリスクがあると推察し、その実態調査を行った。まず、筑波大学環境安全管理室の Web サイト[9]を参照し、大学内の避難場所の確認を行った。その結果、筑波大学には 25 か所の屋外避難場所と 9 か所の屋内避難場所が設けられていることが判明した。屋外避難場所は、大規模災害発生時やその可能性がある際に一時的な



図 1. 筑波大学内の避難場所[9]

危険回避のために利用されるものである。一方、屋内避難場所は、屋外避難が長期化する場合や雨天・夜間などに利用される施設である。中地区においては、第 1 体育館および 1H 棟が屋内避難場所として指定されており、本部棟南側駐車場や石の広場が屋外避難場所として指定されている。図 1 に中地区の避難場所マップを示す。また、同 Web サイトには、学内で地震が発生した際の具体的な行動指針も記載されている。この行動指針は、地震発生後の対応を三段階に分けて説明しており、第一段階では自身の安全を最優先に確保することが強調されている。第二段階では、揺れが収まり次第、出火防止に努めながら最寄りの屋外避難場所へ移動することが推奨されている。ただし、雨天や夜間の場合は、屋内避難場所への避難が適切であるとされている。第三段階では、屋外避難が長期化する恐れが生じた際に屋内避難場所へ移動するが、その際には建物の安全確認が必須である。さらに、災害発生時の備蓄物資に関しても調査を実施した。その結果、筑波大学内の 15 か所に防災倉庫が設置されており、水や食料などの必要物資が備蓄されていることが確認された[10]。しかし、避難場所における暑熱対策に特化した物資の備蓄は確認できなかった。

次に、避難場所における熱中症対策について、総務部リスク・安全管理課に対してメールによる聞き取り調査を実施した。調査内容は、(1)筑波大学が地震発生時の避難場所における暑熱対策として何らかの取り組みを行っているか、(2) 学生や教職員に対して暑熱対策に関する周知が行われているか、の 2 点である。その結果、(1)については、暑熱対策に特化した取り組みは実施されていないものの、防災用品として飲料水が備蓄されており、また避難場所には通常の建物設備として冷暖房が設置されていることが確認された。(2)については、特に暑熱対策に関する周知は行われていないとの回答であった。

これらの調査結果から、筑波大学の指定避難場所には冷暖房設備が整備されているものの、停電時にはこれらが使用できず、熱中症の発生リスクが存在することが明らかとなった。本研究では、これらのリスクを定量的に評価し、具体的な対策を提案することを目的とする。

4. 実験

4.1. 実験概要・実験方法

本研究では、筑波大学内に設置された 25 か所の屋外避難場所および 9 か所の屋内避難場所の中から、屋外と屋内の両方において実験を実施した。また、研究メンバーが頻繁に利用する総合研究棟 B 周辺に位置する場所での実施を考慮し、屋外では「石の広場」、屋内では「第 3 体育館」と「1H 棟 (101 教室)」の 3 か所を測定場所として選定した。これにより、避難場所の多様な環境における熱中症リスクを総合的に評価する。さらに、晴天時および曇天・雨天時の気象条件による WBGT (湿球黒球温度) の変化を比較するため、両方の天候条件下で実験を行った。実験では、各天候条件下において、各測定場所に温湿度計を設置し、9 時から 18 時までの間、1 時間ごとに計 10 回の測定を実施した。これにより、時間帯や天候の違いが避難場所の温熱環境に与える影響を詳細に把握する。得られたデータを基に、2.2 節で示した計算式を用いて WBGT の近似値を算出した。また、使用した温湿度計の仕様を表 2 に示す。

表 2. 温度計の測定仕様

	温度	湿度
精度	±1°C	±5% (30~90%)
測定範囲	0~50°C	20~95%
最小表示	0.1°C	1%
測定間隔	20 秒	

4.2.実験環境

実験は、曇天・雨天であった2024年9月1日および晴天であった2024年9月7日の2日間にわたって実施した。なお、参考として、両日の気象庁つくば（館野）観測地点における気象データを表3に示す[11]。9月1日については、実験時間帯は曇り時々雨となっており、気温は32℃を超えることはなく、湿度は70～80%台で推移した。一方、9月7日には実験時間帯を通して晴れとなり、気温は32℃や33℃台になる時間帯もあり、湿度は主に50～60%台を記録した。風速については、両日ともに大きな差は見られなかった。

次に、各実験場所の環境について詳述する。まず、石の広場については、9月1日は終日日射がなかったが、9月7日は9時から13時まで日なた、14時から18時は日陰であった。また、風通しは良好であり、測定機器に対する外部環境の影響が少ない状況であった。温湿度計は、南側と西側に高さ2mほどの塀があるエリアに設置し、石のオブジェの上に高さ約30cmの位置で据え付けた。第3体育館については、晴天時でも直接の日射はなかったが、周囲の建物による完全な日射の遮断はなく、体育館自体が日光を受ける状況であった。出入り口の扉のみが解放されており、風通しは十分ではなかった。9月1日は空調が稼働していなかったが、9月7日には卓球部および卓球同好会の活動に伴い、6台の大型送風機が稼働していた。温湿度計は、送風機の影響を避けるため、風の当たらない場所に設置した。1H棟（101教室）では、晴天時でも教室内に日射が直接差し込むことはなく、出入り口や窓は全て閉め切られていたため、風通しは全くなかった。また、1H棟は外部と直接つながっている構造で、隣接する廊下にも空調は設置されておらず、外部の冷房機器の影響を受けることはなかった。温湿度計は、窓からの光が入らない教壇上に設置した。

表3. 実験日の気象データ

(a) 2024年9月1日

時	気温(℃)	湿度(%)	風速(m/s)	天気
9	28.1	84	1.1	曇
10	29.2	82	1.8	曇
11	30.5	76	1.7	曇
12	31.0	72	2.1	曇
13	30.1	81	1.3	曇
14	31.5	73	2.3	曇
15	28.3	80	3.1	雨
16	28.5	83	1.9	雨

17	28.2	87	0.7	雨
18	28.4	86	1.2	曇

(b) 2024年9月7日

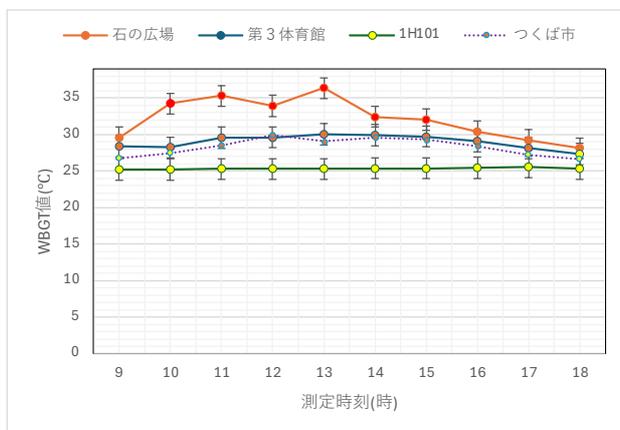
時	気温(℃)	湿度(%)	風速(m/s)	天気
9	28.4	77	1.0	晴れ
10	29.9	69	1.0	晴れ
11	31.0	68	1.3	晴れ
12	32.7	64	1.1	晴れ
13	32.5	58	1.5	晴れ
14	33.0	58	1.8	晴れ
15	33.7	48	3.0	晴れ
16	32.8	49	3.2	晴れ
17	31.4	51	2.4	晴れ
18	29.8	62	1.8	晴れ

4.3.実験結果

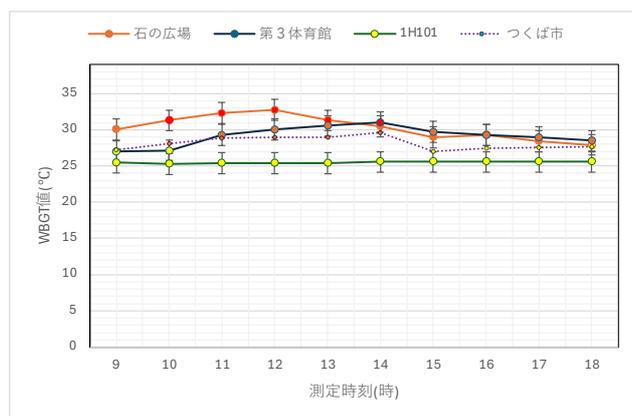
本実験では、晴天時と非晴天時の2日間にわたり、3箇所における測定結果を取得した。各天候条件における測定地点ごとのWBGTの違いを明確にするため、それぞれの天候条件下での3箇所の実験結果を図2に示す。また、2.2節で示したWBGT値に基づく熱中症予防指針に従い、WBGT値を「危険」「嚴重警戒」「警戒」「注意」の4つの基準域に分類した。これらの基準域は、図中において、それぞれ赤色、橙色、黄色、白色で表現している。なお、石の広場の測定結果は、13時以前が日向、14時以降が日陰での値である点に留意する必要がある。また、測定値は使用した温湿度計の測定誤差を含んでいる。

まず、晴天条件下での測定結果を(a)に示す。全ての測定時刻において、石の広場のWBGT値が最も高く、その次に第3体育館、1H棟（101教室）の順に高いことが確認された。また、石の広場におけるWBGTの時間的変化は、屋内の第3体育館および1H棟（101教室）に比べて顕著であった。ただし、第3体育館における晴天時の測定結果は、卓球部および卓球同好会による送風機の稼働の影響を受けた可能性が高いと考えられる。次に、非晴天時の測定結果を(b)に示す。13時以前の全ての測定時刻において、WBGT値は石の広場が最も高く、その次に第3体育館、1H棟（101教室）の順であった。しかし、14時以降は石の広場と第3体育館のWBGT値がほぼ同等となった。また、1H棟（101教室）におけるWBGTの時間的変化は、石の広場や第3体育館に比べて小さい傾向が見られた。さらに、1H棟（101教室）の空調は両日とも稼働していなかったものの、やや涼しい体

感があった。このように、晴天時と非晴天時の WBGT 値の変動には顕著な差があり、特に屋外と屋内の環境差が大きく現れたことが示された。



(a) 晴天条件下



(b) 非晴天条件下

図 2. 各地点の時刻による WBGT の変化

5. 考察

実験により得られた WBGT 値をもとに分析を行った結果、非晴天時の石の広場における日陰での測定時間を除外すると、石の広場が最も熱中症リスクが高く、その次に第3体育館、1H棟（101教室）の順であることが明らかになった。特に、石の広場で非常に高い WBGT 値が測定された理由としては、日当たりの良さやアスファルトで舗装されていることが挙げられる。晴天時には直射日光による熱の影響で気温が上昇しやすく、実験結果でも 14 時以降の日陰での測定において WBGT 値が大幅に低下していることから、日射の影響が大きいことが確認された。さらに、アスファルトは熱容量が高く、熱を蓄積しやすい特性があるため[12]、周囲の温度上昇にも寄与していると考えられる。一方、1H棟（101教室）における

WBGT 値は他の測定場所と比べて一貫して低く、時間的な変動も少なかった。この理由として、101教室が日射の影響をほとんど受けないことや、1H棟が池の近くに位置していることが考えられる。教室が1階に位置しており、2階や周囲の建物により日射が遮断されるため、また池が近くにあることで周辺温度が安定しやすいことが影響していると推察される。

これらの結果から、アスファルトで舗装された石の広場は、特に晴天時において熱中症リスクが高いため、一時避難場所としては適さない可能性があるといえる。また、晴天でない場合でも第3体育館の WBGT 値が石の広場に近い数値を示したことから、第3体育館は熱気や湿気を閉じ込める構造になっており、結果として湿度が高まり熱中症リスクを増加させたと考えられる。そのため、熱気や湿気を閉じ込めやすい空間も避難場所としては不適であると判断される。一方、避難場所として適しているのは、1H棟（101教室）のように日射の影響を受けにくく、冷房設備が利用できない場合でも熱中症リスクを低く抑えられる場所である。このことから、特に晴天時には熱を蓄積しにくい舗装や外壁を備えた屋内を避難場所として選定し、非晴天時には熱気や湿気がこもりにくい場所を選ぶことが重要であると考えられる。さらに、実際に災害が発生し、避難場所が開放された場合には、多数の人々が集まることで人の体温が周囲の気温上昇に寄与し、結果として熱中症リスクが高まることが予想される。したがって、適切な避難場所の指定に加え、人数制限や適切な換気対策などを講じることで、人的要因による熱中症リスクを低減することも重要であるといえる。

6. 今後の改善策

本研究により、筑波大学の避難場所において、特に夏季の晴天時には、屋外のみならず場合によっては屋内でも熱中症リスクが高まることが示された。この結果を踏まえ、今後筑波大学で講じるべき対策として、まずは本研究で実験を行った3か所を含めた、全ての屋外および屋内避難場所における暑熱環境の詳細な調査が挙げられる。特に、駐車場や陸上競技場といった屋外施設や、生活センターなど屋内の施設については、本研究とは異なる環境条件を持つため、同様の調査が強く求められる。また、人的要因による熱中症リスクを評価するために、それぞれの避難場所に集まることが予測される人数について、事前に概算を行

うことも必要である。これらの調査に基づき、もし多くの避難場所において夏季の晴天時などに熱中症リスクが高いことが確認された場合には、そうした状況で災害が発生した際に利用できる補助的な避難場所を検討することが重要である。さらに、停電時における熱中症対策として、こまめな水分補給や暑さを避ける行動が推奨されていること[13]から、各避難場所の付近に倉庫を設置し、前述の人数概算に基づいた適切な量の飲料、食料、経口補水液などを備蓄しておくことが望ましい。また、屋内避難場所に関しては、体調不良者のために収容人数に余裕を持たせるなど、避難誘導時の対応策も検討すべきである。加えて、冷房機器が設置されている場合には、停電時でも利用可能な発電機や燃料の準備を行い、熱だまりを防止するために送風機を活用することで、効率的に避難所内の温度を下げる事が可能となる。このように、適切な避難場所の選定と物資の備蓄、避難時の柔軟な対応が、今後の災害時における熱中症リスク低減のための重要な対策となるといえる。

7. まとめ

日本は、自然災害が頻発する国であり、災害発生時には一時的あるいは長期的な避難が必要となる場合が多々ある。特に近年の異常気象や気温上昇により、避難所および避難場所での暑さ対策が喫緊の課題となっている。そこで我々は、筑波大学の避難所における暑さ対策の現状を調査した。その結果、熱中症対策のための備蓄品や周知の不備が明らかとなり、さらに停電時を想定した対策がほとんど講じられていないことも確認された。本研究では、複数の気象条件下で3つの避難場所を選定し、時刻ごとの暑さ指数(WBGT)を観測した上で、熱中症発生リスクを評価した。その結果、直射日光が当たる屋外避難場所や、熱や湿気がこもりやすい体育館での熱中症リスクが非常に高いことが判明した。これに基づき、日陰に位置し、冷房設備が整っている屋内避難場所への避難が推奨されるとともに、停電時に備えた飲料水や食料、経口補水液の備蓄、発電機や燃料の準備の重要性が確認できた。今後は、全ての避難所に対する詳細な調査に加え、予想される避難者数の概算や、各避難所におけるリスクに応じた対策が求められる。

[1] 茨城県庁, “令和元年台風第 19 号に係る災害対応について,” Aug. 14, 2022, Available: <https://www.pref.ibaraki.jp/1saigai/201910/bousai.html>, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[2] 環境省, “熱中症予防情報サイト 熱中症特別警戒情報・熱中症警戒情報,” Available: <https://www.wbgt.env.go.jp/alert.php>, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[3] 総務省消防庁, “熱中症情報,” Available: <https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/post4.html>, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[4] 一般財団法人 避難所・避難生活学会, “酷暑期避難所演習 2024 の実施について,” Available: <https://dsrl.jp/747>, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[5] 一般財団法人 避難所・避難生活学会, “酷暑期避難所演習 2024 の実施について,” Available: <https://dsrl.jp/747>, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[6] 読売新聞, “酷暑の避難所生活、自治体職員ら体感…室温 30 度・湿度 70% の体育館で 1 泊「対策に生かしたい」,” Available: <https://www.yomiuri.co.jp/national/20240729-OYT1T50132/>, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[7] 日本生気象学会, “日常生活における熱中症予防指針,” Ver. 4, Available: <https://seikishou.jp/cms/wp-content/uploads/20220523-v4.pdf>, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[8] 埼玉県環境科学国際センター, “環境科学国際センター報 (平成 24 年度),” Available: <https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/21777/570488.pdf>, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[9] 筑波大学環境安全管理室, “避難場所,” Available: https://anzenkanri.tsukuba.ac.jp/?page_id=13263, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[10] 筑波大学環境安全管理室, “防災及び防火管理,” Available: https://anzenkanri.tsukuba.ac.jp/?page_id=10935, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[11] 気象庁, “過去の気象データ検索,” Available: <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php>, Accessed on: Oct. 1, 2024.

[12] 代田哲朗, 上野敦, 大野健太郎, 宇治公隆, “歩道舗装における夏季温度特性の改善に関する検討,” コンクリート工学年次論文集, vol. 35, no. 1, pp.1423-1428, 2013.

[13] 厚生労働省, “停電時における熱中症対策について,” Available: https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000212521_00006.html, Accessed on: Oct. 1, 2024.