

コンクリート工事における寒中期・暑中期を詳細に示すメッシュマップ

DETAILED GRID MAPPING FOR COLD AND HOT WEATHER CONCRETING PERIODS

高杉 文也
Fumiya TAKASUGI

Concreting requires countermeasures according to the daily mean temperature because concrete quality is greatly affected by the temperature environment before and after casting. There is the countermeasure-needed period in each guideline, however, the representative points are unevenly distributed and do not coincide with individual construction locations. In this paper, I created the maps detailing the countermeasure-needed period of each concreting with the Mesh Climatological Normal and GIS. Since some issues related to the setting method of the countermeasure-needed period were raised by visualizing, I proposed the more reasonable method of degerming countermeasures and evaluated the effectiveness of the proposal.

Keywords : *Concreting, Quality control, Cold period, Hot period, Mesh Climatological Normal, GIS*

コンクリート工事, 品質管理, 寒中期間, 暑中期間, メッシュ平年値, GIS

1. はじめに

わが国は南北に長く、北海道は冷帯、南西諸島や小笠原諸島は亜熱帯、それ以外の地域については温帯に属している¹⁾。加えて、日本列島の中央には高い山脈が連なるため、冬には降雪の多い日本海側と乾燥する太平洋側に大別される。さらに、夏季と冬季の気温差が大きな内陸性気候と少雨の瀬戸内気候も分類される。このように多様な気候のなかで建築物に対する要求品質を確保するために、日本建築学会では「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事²⁾」(以下、JASS 5 という)、「寒中コンクリート施工指針・同解説³⁾」(以下、寒中指針という)および「暑中コンクリートの施工指針・同解説⁴⁾」(以下、暑中指針という)が整備されてきた。

寒中コンクリート工事は冬の寒さに対処するものであり、用いる調査および打込み後の管理が極めて重要な要素を担っている。養生温度が低いとセメントの水和反応が遅延するため、同一環境下と比較すると低温環境にさらされたコンクリートは標準養生によるものよりも強度が小さくなる傾向がある。そこで、寒冷期であってもコンクリートの品質を確保するために、加熱養生といった措置を施す必要がある。このような対策を要する環境が生じうる地域は北海道、内陸性気候地域の全域、主として関東地方以北の太平洋沿岸地域、北陸地方以北の日本海沿岸地域を中心に分布しており、極寒地域だけではなく全国的に対象となっている。

暑中コンクリート工事は夏の暑さに対処するものであり、フレッシュ性状および打込み直後の管理が極めて重要な要素を担っている。近年使用されるコンクリートは高強度化の傾向があり、気候変動に伴う異常高温化も相まってコンクリート温度の上昇につながりやす

くなっている。コンクリート温度の上昇は施工性の低下や不十分な硬化組織の形成といった被害を招く恐れがあるため、荷卸しまでの時間制限のような措置を施す必要がある。このような対策を要する地域は東北以南に広く分布しているとされるが、都市部では暑中期の過酷化・長期化が顕著になる傾向にあることから、北海道など従来は対象とされなかった地域でも該当するリスクが生じつつある。

以上から、コンクリートの品質管理は概ね温度環境に応じて対処することが必要である。しかし、気象条件は周囲の環境、緯度だけではなく特に標高にも大きく左右され、同一自治体内でも地域差が存在する可能性がある。そのため、個別の各現場で気象条件を調査したうえで施工計画を検討することが品質確保上は最も有効であるが、個別位置での過去の気温状況を遡ることは現実的ではない。加えて、JASS 5 で例示された近隣の工事適用期間をそのまま適合することによって不具合を発生させてしまう懸念もある。

以上の背景を踏まえて、本論文では全国各地を網羅する各工事の適用期間を詳細に示す地図の作成し、適用期間に関する考察を行う。本検討で得られた知見から、施工計画段階で寒中・暑中対策の適用を合理的に判定する手法の構築を通じて、品質の確保されたコンクリート工事の実施に寄与することを目的とする。

2. 既往の研究

2.1. 各種工事の適用期間

JASS 5 では、寒中コンクリート工事を適用する期間(以下、寒中期間という)および暑中コンクリート工事を適用する期間(以下、暑中期間という)について、以下のようにまとめている。

寒中期間には次の2条件がある。

- 1) 打込み日を含む旬の日平均気温が4℃以下の期間
- 2) コンクリートの打込み後91日までの積算温度が840 °D・D未満となる期間 (式(1))

$$M_{91} = \sum_{n=1}^{91} (\theta_n + 10) [^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}] \quad (1)$$

ただし、 θ_n : 打込み後n日目の日平均気温 ($\geq -10 [^{\circ}\text{C}]$)

1)では初期凍害の防止, 2)では強度増進の防止を目的にしている。なお、コンクリート標準示方書[施工編]⁹⁾をはじめとする土木学会指針では1)のみ規定されている。これは、建築現場では上階の施工が継続するため、施工に伴う資材や仮設足場設置など早期に荷重を受けることを想定し、十分な強度発現が求められることに由来する。

暑中期間は原則過去10年の日平均気温の日別平滑値(以下、暑中指針の用語定義に従い、平年値[10年]という)が25.0℃を超える期間を指す。このうち、28.0℃を超える期間を特別に酷暑期とする。暑中環境下では寒中環境下に対して特に運搬・打込み時の環境が品質に対する影響が大きく、日平均気温が25.0℃を超えると悪影響となるとされている。また、日平均気温が28.0℃を超えた場合、荷卸し時のコンクリート温度が35℃を超えるため、入念な対策を要するとして設定されている。

2.2. 各種工事の適用期間の地域分布

深瀬ら⁹⁾は、日本全国のアメダス891地点における寒中コンクリート工事の該当条件を図-1のように纏めている。日平均気温が4℃以下のみに該当する地点は401箇所、積算温度が840 °D・D未満のみに該当する地点は0箇所、両者にも該当する地点は243箇所である。以上のいずれにも該当しない地点は247箇所あり、これらは寒中コンクリート工事の適用外である。寒中期間に該当する地域は北海道から九州にかけて広く分布しており、特に北海道、東北地方内陸部および中央高地は寒中期間の適用期間も長いことがわかる。これらの結果から、図-2のように日本全国に対して寒中期間の分布を色分けしているが、具体的な座標データを示すものではない。そのため、図-2では色分けの異なる観測所間を等分するように境界線が示されているが、実際の境界線は異なる場合が考えられる。また、寒中指針で示される代表値は各都道府県の中で都市規模の大ききなところに限られるため、周辺の人工被覆率は大きいことから、近隣自治体の寒中期間を網羅しているとは限らないと推察される。

小山ら⁷⁾は、日本全国の暑中環境を気象庁が発表するメッシュ平年値を用いて図-3のように纏めている。メッシュ平年値は気象観測所のない地域の平年値を地形や被覆状態を考慮に入れて約1km四方の格子状に推定したもので、気象庁から一般に公開されており、

これを用いることで各地域の温度環境を詳細に示すことが可能になる。しかし、図-3は30年間を対象とする通常の平年値を使用しているため、現状の暑中指針の平年値[10年]に従っておらず、月平均気温からの算定のため、実際の環境との隔たりが考えられる。

また、各種指針で示される適用期間の代表地点は、改定によって削除または追加される場合がある。しかし、削除された地点について、記載がなくなったとしても、過去の気温データから低温・高温環境の懸念がないとは言いきれないと考えられる。また、今後追加される危険性の示唆される地点や、実際に適用する条件を満たす地点の提示が十分ではない可能性がある。そこで本研究では、最新版のメッシュ平年値を用いて各種適用期間の可視化を通じて、適用期間の分布を把握したうえで、低温・高温対策を講じる方法に関して議論する。

3. 適用期間メッシュマップの作成

3.1. メッシュ平年値

本検討で使用した気象データは、気象庁の公開する「メッシュ平年値 2020⁸⁾」である。本データは気象台およびアメダス観測所のない地域の平年値を、地形などの影響を考慮に入れて、1km四方の格子状に推定したものである。日本全国を対象に日平均気温、日最高気温、日最低気温、降水量、最深積雪、日照時間、全天日射量の7要素について作成されている。ここでは日平均気温のデータを使用した。日平均気温は全気象観測所における平年値7要素、緯度・経度、標高、勾配といった地形因子や、人工被覆率(都市因子)との統計的関係を重回帰分析によって推定され、1km四方で値が与えられている。なお、ここで用いるメッシュ平年値2020には、前回のメッシュ平年値2010には格納されていなかった日別値が新たに追加されている。また、地形因子や都市因子を求めるために、標高・傾斜度3次メッシュデータ(平成23年度版)および土地利用3次メッシュデータ(平成26年度版)が使用されている。ここで用いる1kmメッシュの気象データは世界測地系による標準地域メッシュの3次メッシュ(第3次地域区画)に対応したものである。3次メッシュは20万分の1地勢図に相当する1次メッシュを縦横に80等分したものであり、それぞれ8桁のメッシュコードが割り振られている。

3.2. メッシュマップ作成の手順

各種適用期間について、以下の手順で算定を進めた。

(1) 寒中期間

JASS5に従い、まず日平均気温が4℃以下となる日を含む第1旬と最終旬を探し出し、第1旬の初日を適用期間の初日、最終旬の末日を適用期間の末日とした。また、その日数の差から適用日数を算

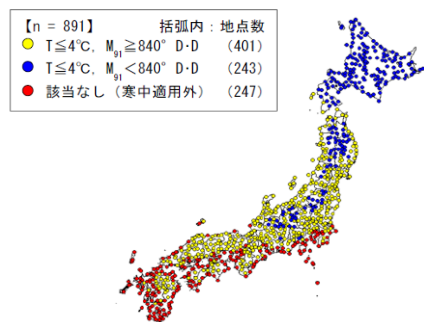


図-1 寒中期間の適用条件⁶⁾

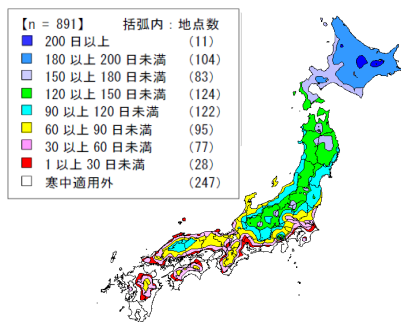


図-2 寒中期間の総日数⁶⁾

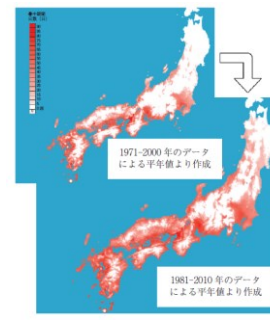


図-3 暑中期間の分布と増加⁷⁾

出した。続いて、それぞれの91日積算温度 M_{91} について式(2)を用いて算出した。

$$M_{91} = 0.5 \cdot (\theta_1 + 10) + \sum_{n=2}^{90} (\theta_n + 10) + 0.5 \cdot (\theta_{91} + 10) \text{ [}^\circ\text{D}\cdot\text{D]} \quad (2)$$

ただし、 θ_n : 日平均気温[$^\circ\text{C}$]、($\theta_n \geq 10$)

91日積算温度 M_{91} の算定にあたって、初日と91日後は半日分の温度を受けたと仮定した。この積算温度 M_{91} が $840^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ を下回る期間について、その第1旬と最終旬を取り出し、先と同様に第1旬の初日を適用期間の初日、最終旬の末日を適用期間の末日とし、その総日数を算出した。最後に、以上2期間のいずれかが含まれる期間について、寒中期間全体の初日、末日、総日数を算出した。

(2) 暑中期間

現行の基準は過去平年値[10年]を用いるが、メッシュ平年値は1991~2020年の30年間に基づく平年値であるため、指針に合致させるために事前処理を行った。まず、気象観測所915地点の2011~2023年の日別日平均気温観測値を取得し、2011~2020年(期間A)、2012~2021年(期間B)、2013~2022年(期間C)および2014~2023年(期間D)の平年値[10年]を算定した。次に、各気象観測所(地点*i*)および各期間について、平年値との差分 ΔT_i を日毎に算出した(式(3))。

$$\Delta T_i = T_{10\text{-year}} - T_{30\text{-year}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

ただし、 $T_{10\text{-year}}$: 平年値[10年]

$T_{30\text{-year}}$: 平年値

続いて、各メッシュデータ $t_{k,30\text{-year}}$ について、最寄りの4気象観測所の差分 ΔT_i を、距離による重みをつけて日毎に加算し、各10年間の平年値[10年] $t_{k,10\text{-year}}$ を模擬した(式(4))。

$$t_{k,10\text{-year}} = t_{k,30\text{-year}} + \sum_{i=1}^4 \frac{1/d_i}{\sum_{j=1}^4 1/d_j} \cdot \Delta T_i \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4)$$

ただし、 $t_{k,10\text{-year}}$: メッシュコード*k*における平年値[10年]

$t_{k,30\text{-year}}$: メッシュコード*k*における平年値

d_i : メッシュと気象観測所*i*との距離

これはメッシュデータが既に地形や都市因子を反映させたものであり、気温の変動のみをよりによる傾斜で模擬可能であるという仮定を踏まえた。

以上の事前処理を踏まえ JASS 5 の基準に従い、メッシュ平年値

の生データを用いたものおよび各10年間について 25°C を超える期間の初日、末日および総日数を暑中期、また、 28°C を超える期間についても同様に期間の初日、末日、総日数を酷暑期として算出した。

以上の手順で得られた各種工事の適用期間データは Arc GIS pro を使用して適用期間のデータを内包する地図として可視化した。

3.3. 適用期間メッシュマップ

(1) 寒中期間

作成した寒中期間メッシュマップについて、日平均気温が 4°C 以下となりうる期間を図-4(a)に、91日積算温度 M_{91} が $840^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ を下回りうる期間を図-4(b)に、統合した寒中期間を図-4(c)に示す。なお、総日数が3旬だけ大きくなるごとに色を分けている。図-4(a)から、北海道から屋久島まで、わが国の広い地域で日平均気温が 4°C 以下になる危険性があることが確認される。これに対し、図-4(b)から、91日積算温度 M_{91} が $840^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ を下回りうる期間を持つ地域は、北海道および本州の山間部に限定されることがわかる。また、図-4(c)は概ね図-4(a)と同様な分布になっており、91日積算温度 M_{91} による条件の満たす期間の長い地域ほど色濃くなり、期間が延長されることが確認される。図-4は、図-2とは異なり1kmメッシュとして全国を網羅して寒中期間を詳細に描画しており、任意の点での適用旬数を詳細に確認できる。メッシュ平年値とGISを活用することで、適用期間に関する詳細な地域差を確認したが、併せて最寄りの気象観測所や都市名に紐づく適用期間をそのまま採用することに関する危険性が明らかになった。

(2) 暑中期間

作成した暑中期間メッシュマップについて、期間Aの平年値[10年]に基づく日平均気温が 25°C を超える期間を図-5(a)に、期間Dの平年値[10年]に基づく日平均気温が 25°C を超える期間を図-5(b)に、期間Dの平年値[10年]に基づく日平均気温が 28°C を超える期間を図-5(c)に示す。図-4に示した寒中期間メッシュマップと同様に、図-5においても適用日数の細かい地域差を確認することができる。図-5(a)と図-5(b)を比較すると、暑中期の対象地域がわずかに拡大していることが確認される。したがって、期間Aと期間Dによる地図間で暑中環境のリスクはここ数年の間で変化が少なく、適用期間の再設定の間隔は1年ごとでなくてもよいと考えられる。また、図-5(c)について、酷暑期に該当する地域は図-5(b)の分布に対して関東以南の都市部に限定されることが確認された。しかし、2023年は記録的な猛暑を全国各地で観測したため⁹⁾、実測値と適合していない可能性が示唆された。

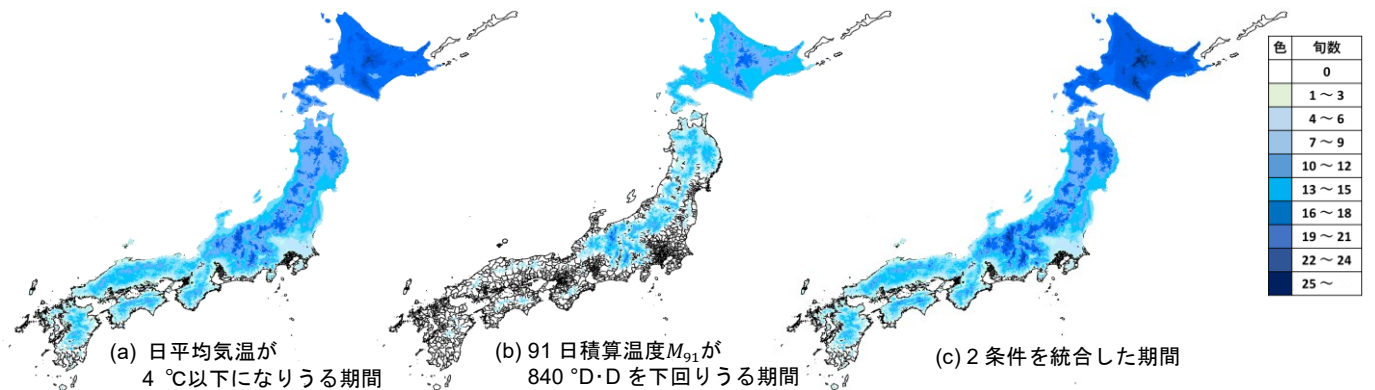


図-4 寒中期間メッシュマップ

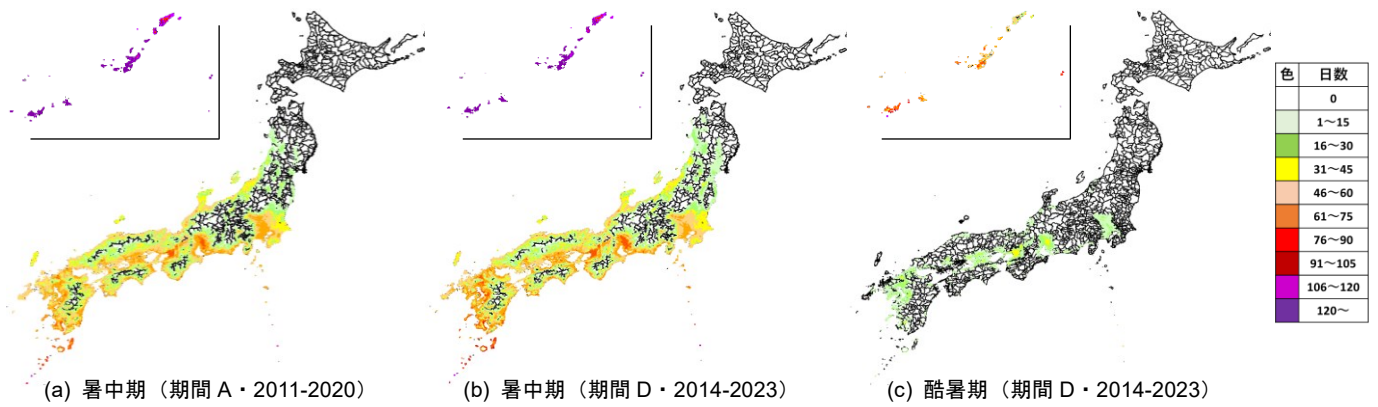


図-5 暑中間メッシュマップ

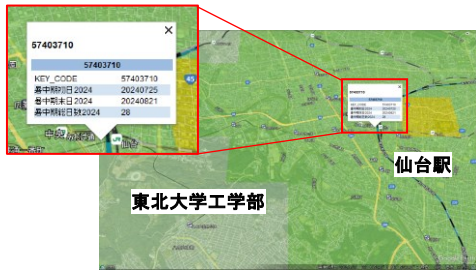
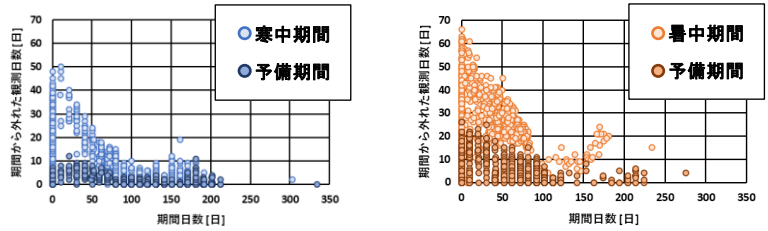


図-6 Google Earth との連携 (仙台駅周辺の例)



(a) 寒中予備期間 (対 2022 年)

(b) 暑中予備期間 (対 2023 年)

図-7 期間の日数と期間から外れた観測日数

4. 各種工事の適用に関する考察

4.1 Google Earth との連携

今回提案した手法によって、GIS 上で作成した地図は一般的な地図アプリケーションと連携させることが可能である。ここでは Google Earth を例として、GIS 上で作成したメッシュデータ (暑中期・期間 D) を連携させた様子を図-6 に示す。ここに示す仙台駅周辺の場合、数 km 以内の近隣範囲も詳細に暑中間期間の変化を確認することができる。寒中期間についても同様の連携が可能である。このように、地図アプリケーションとの連携により、任意の座標に対しても GIS に格納した詳細なデータを確認することが可能である。このようなシステムを活用することにより、施工計画段階において、寒中・暑中対策の検討がより合理的に行うことが可能となる。

4.2 寒中・暑中対策が検討される予備期間

メッシュ平年値と GIS の活用により、全国各地における各種工事の適用期間の可視化を達成したが、実際に対策の検討が生じる期間は適用期間と乖離する場合がある。そこで、本節では各種工事の検討が生じる予備期間を提案する。

気象庁の公開する旬別日平均気温および標準偏差のデータ⁹⁾を用いて、予備期間を以下のように定義した。まず、旬別日平均気温の平年値 $T_{\text{旬} \cdot 30\text{-year}}$ と標準偏差 $\sigma_{\text{旬} \cdot 30\text{-year}}$ から 95%信頼区間をとり、旬別日平均気温の下限值 $T_{\text{旬} \cdot \text{min}}$ 、上限値 $T_{\text{旬} \cdot \text{Max}}$ を以下の式(5)、式(6)で設定した。

$$T_{\text{旬} \cdot \text{min}} = T_{\text{旬} \cdot 30\text{-year}} - 2 \times \sigma_{\text{旬} \cdot 30\text{-year}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5)$$

$$T_{\text{旬} \cdot \text{Max}} = T_{\text{旬} \cdot 30\text{-year}} + 2 \times \sigma_{\text{旬} \cdot 30\text{-year}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

この $T_{\text{旬} \cdot \text{min}}$ が 4 °C 以下の期間を寒中予備期間、 $T_{\text{旬} \cdot \text{Max}}$ が 25 °C を上回る期間を暑中予備期間とした。

予備期間の日数と予備期間から外れたある年の適用期間に該当する観測日数を図-7 に示す。なお、寒中予備期間については 2022 年、暑中予備期間については 2023 年と比較したが、それぞれ近年で厳しい低温・高温環境になった年である。図-7 のいずれの予備期間

についても、日数に依らず外れた観測日数は寒中で概ね 10 日以内、暑中で概ね 20 日以内と一定である。したがって、式(5)、式(6)に示される期間では適用期間から外れていたとしても、低温・高温環境が予想される場合には寒中・暑中対策実施の検討を要する。

5. まとめ

本論文では温度環境に従うコンクリート工事の適用期間について、メッシュ平年値と GIS を活用した詳細な地図の作成を通じて、現行の適用期間の課題および対策実施の基準について論じた。ここで得られた知見を以下に記す。

- 1 km 四方に区切って推定された詳細な気象データを用いることで、全国各地の寒中・暑中間期間を示すデータベースを作成した。GIS を活用し、適用期間の分布を可視化することで適用期間に関する詳細な地域差を確認し、併せて最寄りの適用期間をそのまま採用することに関する危険性を示唆した。
- 2) 適用期間メッシュマップを活用することで、施工計画段階においては対策の有無を合理的に判定可能である。また、寒中・暑中対策の実施が生じる予備期間を提案し、低温・高温環境のリスクが残される期間として実測値との照合により有効性を確認した。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ (<https://www.jma.go.jp>)
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2022. 11
- 3) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説, 2010. 1
- 4) 日本建築学会：暑中コンクリートの施工指針・同解説, 2019. 7
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編], 2018. 3
- 6) 深瀬孝之ほか 2 名：寒中コンクリート工事に影響する気候特性に関する考察, 日本建築学会技術報告集, Vol.25, No.61, 1039-1044, 2019. 10
- 7) 小山幸智ほか 2 名：日本建築学会「暑中コンクリート施工指針・同解説」改定の背景と要点, コンクリート工学, Vol.58, No.3, 217-222, 2020. 3
- 8) 気象庁：メッシュ平年値 2020 解説, 2022. 3
- 9) 気象庁：令和 5 年報道発表資料 夏 (6~8 月) の天候, 2023