

超高層建物における閉鎖型解体工法 「テコレップシステム」の温熱環境評価

佐藤 大樹*1・庄司 研*1・市原 英樹*2・梅津 匡一*2

Keywords : demolition method, high-rise building, enclosed, thermal environment, field measurement, CFD simulation

解体工法, 高層建物, 閉鎖型, 温熱環境, 実測, CFD 解析

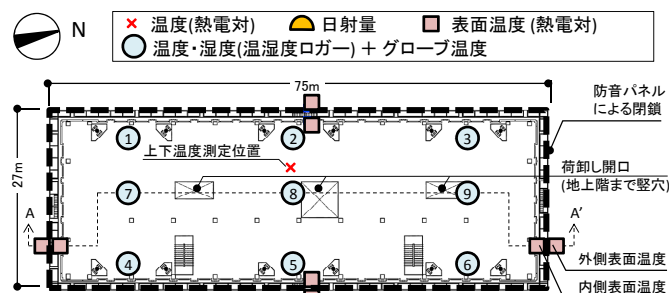
1. はじめに

100m以上の超高層建物の多くは都心部に密集しており、それらを解体する際には、解体騒音の低減、落下物の防止等、近隣への配慮が欠かせない。著者らは、このような超高層建物を対象に、解体時における近隣への安全性の確保に加え、廃棄物の抑制や解体工事に伴うエネルギー削減等の環境配慮、及び工期短縮等へも貢献する超高層建物閉鎖型解体工法「テコレップシステム」(以下、本工法)を開発してきた。

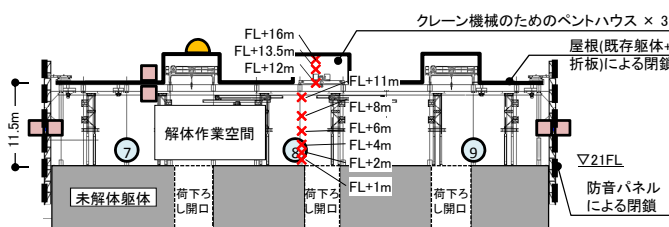
本工法は、屋根等で閉鎖されない従来型の解体工法

(以下、在来工法)と比べて、近隣(外部)に対する騒音低減、落下防止等のメリットがある一方で、解体作業空間(内部)に対しても、夏期の直射日光の遮蔽による作業員の熱中症リスクの軽減や、上層階での外部の強風を防ぐことによる作業不能日(休工日)の減少等が期待できる。これらの効果はいずれも工期短縮につながるメリットである。しかし、閉鎖のための屋根や壁面が日射で温められることによる内部空間の温度上昇等の可能性も考えられるため、本工法における作業空間の温熱環境の把握は、本工法の開発上、重要な要素である。

そこで、本工法により解体が行われた超高層建物を対象に、夏期の作業空間内の温熱環境の実測を行い、さらに、実測結果を基にしたCFD(Computational Fluid Dynamics)解析も併用して、実測と解析の両面から温熱環境を調査した。



(1) 平面図
(1) Floor plan



(2) 断面図 (A-A'断面)
(2) Cross-section (A-A' section)

図-1 解体作業空間の概要と測定位置

Fig.1 Outline of demolition work-space and mesurement location

*1 技術センター 建築技術研究所 環境研究室

*2 技術センター 建築技術開発部 建築生産技術開発室

2. 温熱環境の実測

2.1 建物概要

本調査は、本工法が適用された、東京都内の地上24階、建物高さ105m、基準階面積約1,700m²、鉄骨造の超高層建物の解体が行われている中で実施した。図-1に示すように、作業空間の上面と側面が閉鎖されている。上面の閉鎖は、一部、主に外周部で既存の屋上スラブを再利用しつつ、折板(以下、屋根面)により行われ、側面の閉鎖は、吊り足場外周部に設置された樹脂製の防音パネル(以下、壁面)により行われている。屋根は既存大梁等により支えられ、吊り足場を含む閉鎖のための構造物全体は昇降機能付きの仮設柱で支えられている。解体階の床には地上階までつながる荷下

表-1 測定機器および測定時間間隔

Table 1 Measurement equipment and interval

測定項目	測定機器	センサ名	測定間隔
温湿度(屋外, 内部 FL+1.5m)	温湿度ロガー (おんどとり)	RTR-53A (T&D)	5分
表面温度・上下温度分布	T熱電対	DC100 (横河電機)	5分
日射量	全天日射計	MS402 (英弘精機)	5分
グローブ温度	グローブ球+T熱電対	AM7052 (安立計器)	5分
壁面熱画像	赤外線サーモグラフィ	TH9260 (NEC 三栄)	—

ろし開口が3か所あり、それらは地上階で屋外に開放されている。一方、作業空間の頂部の屋根と外壁吊り足場の間には、400mm程度の隙間があり、ここでも、作業空間が屋外に開放されている。この上下2種類の屋外開放部は、作業空間上部に滞留する高温空気の排気、及び荷下ろし開口での煙突効果による給気、という自然換気による置換換気を期待して計画されたものである。ただし、自然換気は、作業空間内外の状況により左右されるため、自然換気量が小さい時に燃料の燃焼を伴う解体機械を利用する可能性も考慮して、新鮮外気を確実に供給するための機械換気装置(本工事では、軸流式600φ、消費電力3.7kWの仮設用送風機を10台)も設置されている。

2.2 実測概要

温熱環境の実測は、2011年7月1日～10月5日に行った。解体工事が進行している中での測定であり、計測機器の移設や信号線の盛替え等による測定の中断が多かった中で、本報では、盛夏期の晴天日で、後述する全ての計測内容の連続測定を行うことができた2011年8月4日17:00～8日16:00の4日間の結果について報告する。

この期間は、21階の解体時であった。本建物の周辺には同規模の高層建物があるが、21階の解体時には、まだ、日中に屋根面や壁面に周辺建物による大きな影ができることは無かった。図-1に各測定機器の設置場所を示す。また表-1に測定項目別の測定機器を示す。

外気の状態を把握するために、屋外の日射量と温湿度を測定した。日射量は屋上のペントハウス上部で測定(図-1(2))し、温湿度は、屋上では日射により高温になった屋根の影響を受ける可能性があったため、地上での測定とした。また屋根面(折板部)及び壁面内外の表面温度を熱電対により測定(図-1中の□印)した。整形な建物であり、かつ前述の通り、各面に大きな日影は出来なかったため、表面温度は各方位1点ず

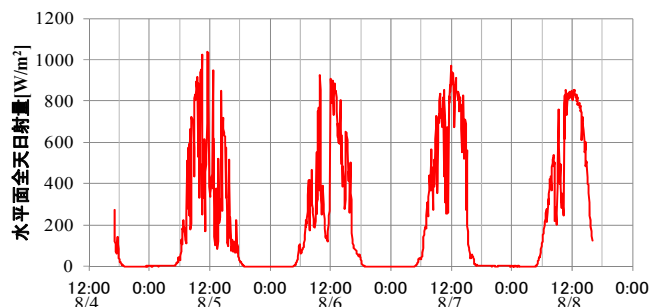


図-2 水平面全天日射量の観測値

Fig. 2 Horizontal global solar radiation

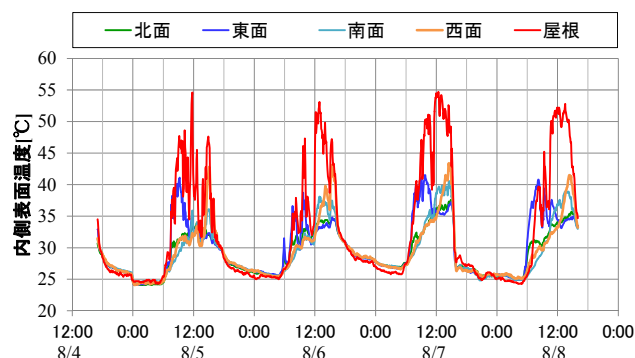
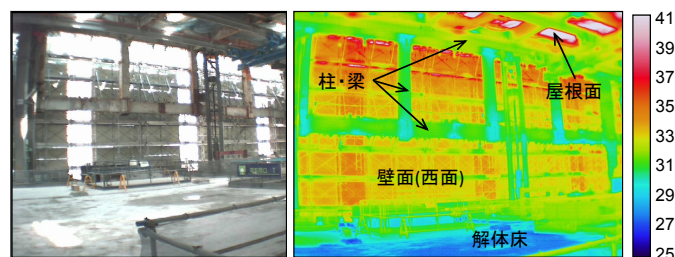


図-3 屋根面と壁面の内側表面温度の測定値

Fig. 3 Inside wall temperature



(1) 写真 (2) 熱画像[°C]
(1) Photo (2) Thermal image

図-4 8月8日13時の解体空間内の熱画像
Fig. 4 Thermal image of demolition work-space at 1300JST on 8 August

つでの測定とした。

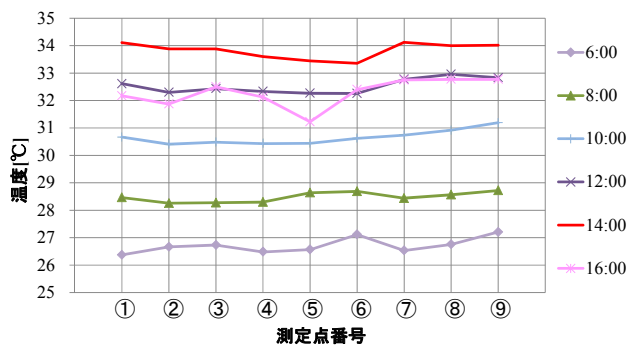
作業空間の温熱環境は、解体対象となる床から1.5mの高さで温度、相対湿度、グローブ温度を測定(図-1中の○印)すると共に、中央付近で高さを変えて温度を測定(図-1中の×印)した。

2.3 実測結果

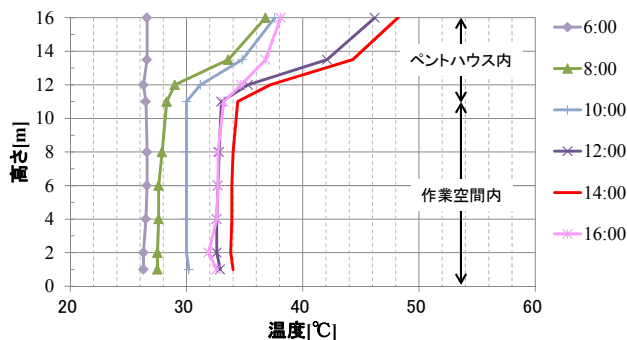
2.3.1 日射量と表面温度

図-2に屋外の水平面全天日射量の測定結果を示す。また、図-3に屋根面と各壁面の内側表面温度の測定結果を示す。

屋根面は、折板のため熱伝導による内外表面温度の時間遅れは小さく、内側表面温度の変動が日射量の変動に対応している。また、RC部分に比べて熱容量が小さいため、晴天時には最大で55°C程度まで上昇している。壁面については、いずれの日も、東面では午前中、



(1) 水平分布
(1) Horizontal distribution



(2) 鉛直分布
(2) Vertical distribution

図-5 8月8日の解体空間内各所の温度の測定結果

Fig. 5 Air temperature of demolition work-space on 8 August

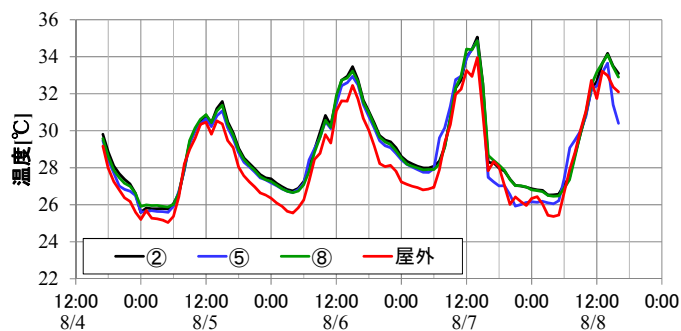
西面では午後に温度が上昇していることから、屋根面同様、日射量と内側表面温度の変動が対応していると考えられる。表面温度分布の例として、図-4 に 8 月 8 日 13 時の熱画像を示す。屋根面や壁面 (西面) に比べ、柱や梁の表面や床面が低い温度になっている。特に床面は、日射が当たらないことから 28℃程度の小さな値に保たれており、次節以降で示す内部温度の上昇抑制や WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature) の低減に大きく寄与していると考えられる。

2.3.2 温度の空間分布

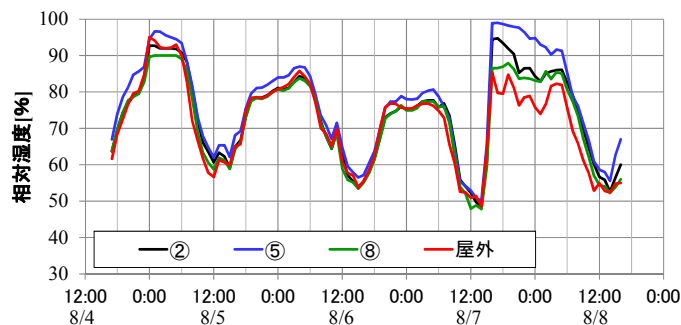
図-5 に特に日射量が安定していた 8 月 8 日における作業空間内各所の温度の測定結果を示す。

図-5(1)に示す FL+1.5m の各所の温度では、同一時刻であれば、いずれの測定点でも大きな差は見られない。つまり、図-3 で示した内側表面温度では、方位による面間の温度差が見られたが、このことが、空気温度に対して、測定位置による差が見られるほど大きな影響を及ぼすことはなかった。3.2 節で示す CFD 解析からも、高温な壁面による空気温度への影響は、壁面の近傍に限られていることが分かる。

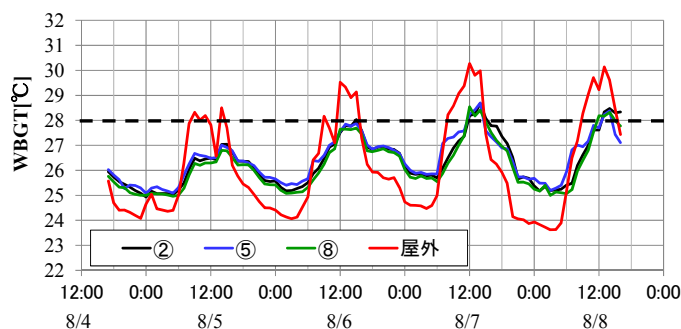
作業空間中央付近での上下温度分布の測定結果を図-5(2)に示す。ペントハウスはクレーン装置の保護の目的で、熱気抜き開口が設置されているが、本実測期



(1) 温度の測定値
(1) Measured value of air temperature



(2) 相対湿度の測定値
(2) Measured value of relative humidity



(3) WBGT の試算値
(3) Calculated value of WBGT

図-6 温度、相対湿度の測定値と WBGT の計算値
(1 時間毎の平均値)

Fig. 6 Air temperature, relative humidity, and WBGT
(averaged values per hour)

間では、開口を閉鎖して実測を行ったため、ペントハウス内で急激に温度が高くなっている。一方で、FL+1m~FL+11m (屋根から 0.5m 下部) までの測定高さによる温度の差は、いずれの時刻でも小さく、FL+1m と FL+11m での差は最大で 1℃程度であった。このことから、屋根の内側表面温度は日中高温になる (図-3) もの、屋根外周部の隙間において、自然換気による高温な空気の排気が行われており、その結果、作業空間の温度上昇が抑えられていると考えられる。

2.3.3 温湿度と WBGT

図-6 に屋外及び、作業空間の測定点のうち No.②, ⑤, ⑧の温度、相対湿度の測定値、及び WBGT の計算

値 (1 時間平均値) の時間変化を示す。作業空間の WBGT ($WBGT_{in}[^{\circ}C]$) は、日射量の無い場合の計算式 (式(1)) を用い、各測定点における温度、相対湿度の測定値から求めた湿球温度 $T_w [^{\circ}C]$ 、及びグローブ温度 $T_g [^{\circ}C]$ の測定値から求めた。

$$WBGT_{in} = 0.7 \times T_w + 0.3 \times T_g \quad (1)$$

屋外の WBGT ($WBGT_{out}[^{\circ}C]$) は、外気温 $T_a [^{\circ}C]$ 、全天日射量 $S [W/m^2]$ 、及び風速 $U [m/s]$ から、式(2)、式(3)に基づきグローブ温度を推定し、日射の有る場合の式 (式(4)) から算出した¹⁾。ここで、気温と全天日射量は本実測で得られた値、風速は、東京管区気象台の観測値を用いた。

$S > 400W/m^2$ のとき

$$T_g = T_a + 12.1 + 0.0067 \times S - 2.40 \times U^{1/2} \quad (2)$$

$S \leq 400W/m^2$ のとき

$$T_g = T_a - 0.3 + 0.0256 \times S - 0.18 \times U^{1/2} \quad (3)$$

$$WBGT_{out} = 0.7 \times T_w + 0.2 \times T_g + 0.1 \times T_a \quad (4)$$

図-6(1)に示す作業空間の気温は、外気温に比べ、日中で約 $0.5 \sim 1^{\circ}C$ 、夜間で約 $1^{\circ}C$ 大きい値となる。これは、屋根面や壁面の表面温度が日射により高温になったためである。しかしながら、図-6(3)に示す作業空間内部の WBGT は、内外の WBGT の計算式が異なるために一概には比較できないものの、WBGT が大きくなる日中に、屋外の値に比べ $2^{\circ}C$ 程度小さい値となっている。これは、屋根面と壁面により日射を遮蔽していることによる効果である。具体的には、直達日射の削減効果、床面からの反射日射の削減効果、及び床表面温度の上昇が抑制されることによる (図-4)、床面からの長波放射の削減効果、であると考えられる。

解体工事の作業内容は、多くの場合、日本工業規格 Z8504 附属書 A²⁾ における作業状態の区分 (代謝率区分) の区分 2 (中程度代謝率：中程度の作業) 程度と考えられる。この場合、熱に順化した作業員であれば、WBGT の基準値は $28^{\circ}C$ であり、本工法では、盛夏期の晴天日である本実測期間のほとんどの時間帯で、基準値を下回っていることが分かる。もちろん、区分 3 (高代謝率：激しい作業) の場合や、熱に順化していない作業員も十分想定されるため、作業環境の管理は適切

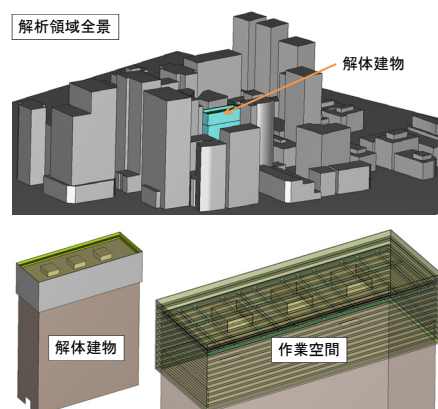


図-7 解析領域

Fig. 7 Computational domain

表-2 計算条件

Table 2 Computational conditions

計算メッシュ	非構造ヘキサメッシュ (約 400 万)
移流項差分スキーム	MARS
圧力解法	SIMPLE
壁面・地表面境界条件	一般化対数則
上空面・側面境界条件	Slip 壁
流入境界条件	$U(z)/U_s = (z/z_s)^\alpha$, $k(z) = (I(z) \cdot U(z))^2$ $I(z) = 0.1 \cdot (z/z_g)^{-(\alpha-0.05)}$ $\epsilon(z) = k(z) \alpha C_\mu^{1/2} (U_s/z_s)(z/z_s)^{(\alpha-1)}$ U_s : 基準風速, z_s : 基準高さ, z : 高さ, z_g : 上空風高度, $\alpha=0.25$, $C_\mu=0.09$

表-3 主な境界条件

Table 3 Boundary conditions

外気温	33.2 $^{\circ}C$
基準高さ・基準風速 (風向)	74.6m 高さで 3.6m/s (SSE)
内側表面温度	屋上面 50.5 $^{\circ}C$
	北面 34.0 $^{\circ}C$
	東面 34.0 $^{\circ}C$
	南面 39.0 $^{\circ}C$
	西面 37.0 $^{\circ}C$
床面	28.0 $^{\circ}C$

に行われるべきであることには変わりはないが、在来工法の作業環境が図-6 の「屋外」に相当することを考えれば、本工法により、解体工事における作業空間の暑熱環境を改善できると考えられる。

3. 実測結果に基づく CFD 解析

3.1 解析概要

実測期間中の最も日射量が安定していた 8 月 8 日の日中を対象に実測値を解析条件とした CFD 解析を行い、実測での把握が困難であった作業空間の温度分布と荷下ろし開口と屋根周囲での外気の流出入の状況を確認した。荷下ろし開口での煙突効果による自然換気の再現、並びに自然換気に対する外部風の影響を考慮する

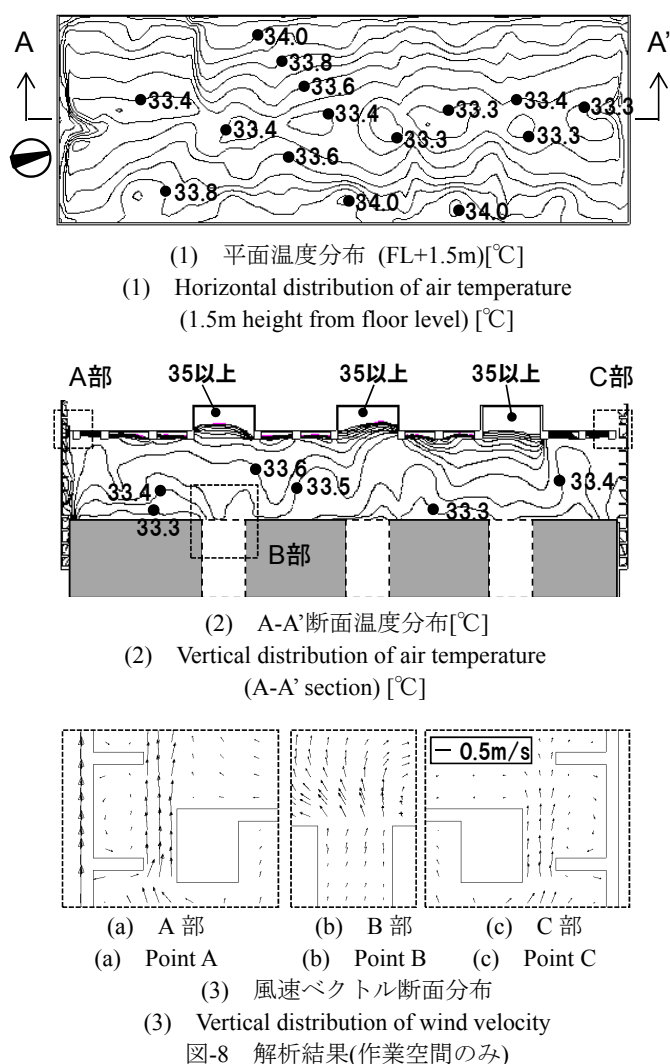


Fig. 8 Simulation results (inside of demolition work-space)

ために、図-7 に示す 1km 四方、上空 500m までの領域を対象に、屋外、作業空間、荷下ろし開口を一体でモデル化し解析を行った。STAR-CD(株IDAJ)を使用し、乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。表-2 にその他の計算条件、表-3 に観測値に基づき設定した主な境界条件を示す。表-3 中の外気温と各壁面の作業空間側の表面温度は測定値、風向、風速は当該時刻の東京管区気象台の観測値により与えた。

3.2 解析結果

図-8 に解析結果を示す。ここでは、注目している作業空間の結果のみを表示している。図-8(1)の温度の平面分布より、作業空間の温度は、表面温度の高い壁面に近い外周部ほど温度が高い傾向にあるが、概ね 33~

34°C程度になっており、これは外気温と比べると、0.5~1°C程度大きい値である。また、図-8(2)の断面分布では、ペントハウス内部で高温となる以外は上下温度差が小さい結果となった。これらの結果は、測定結果と良く対応している。

図-8(3)の風速ベクトルの断面分布では、上部の隙間部、荷下ろし開口部共に、上昇気流となっていることが分かる。このことから、作業空間の中でも、特に作業員の居るレベル(空間下部)に、荷下ろし開口から煙突効果より外気が導入され、最も高温となる部分(空間上部)から高温な空気が排気されており、置換換気による効率の良い換気が出来ていると考えられる。

4. まとめ

閉鎖型解体が行われた超高層建物を対象に、夏期晴天日の作業空間の温熱環境を、実測と CFD 解析の両面から調査し、以下に示す温熱環境改善効果を確認した。

- (1) 日中に屋根面の折板や壁面の防音パネルが日射により温度が高くなることで、外気温に比べ内部の作業空間の気温が高くなるものの、その差は、日中で 0.5~1°C、夜間で 1°C程度の上昇に抑えられている。これは、屋根の周囲に計画された隙間と荷下ろし用の開口を換気ルートとして効率的な排熱が行えているためであると考えられる。
- (2) 閉鎖することによる日射の遮蔽は、天空からの直達・拡散日射を遮蔽するだけでなく、解体床からの照り返しや解体床の高温化を防止することにもつながり、WBGT を小さく抑える効果がある。
- (3) 以上より、適切な温度差換気を確保できる自然換気計画と日射の遮蔽効果により、作業空間の暑熱環境は緩和可能であり、作業員の熱中症防止に貢献できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 環境省、平成 21 年度 WBGT 観測による熱中症予防情報の提供業務報告書、p.36, 2010.3
- 2) 日本工業規格 Z8504 (人間工学-WBGT(湿球黒球温度)指標に基づく作業員の熱ストレスの評価-暑熱環境)、附属書 A (WBGT 熱ストレス指標の基準値表)、p.7, 1999.