

# 『BIG CANOPY』の開発と実用化 (その2)

## —— システムの改造と3工事への適用結果 ——

浜田 耕史 古屋 則之 汐川 孝 栗田 康平  
堂山 敦弘 金子 智弥 国本 勇 宮川 宏

(建築事業本部 生産技術部) (同)

### Development and Application of Automated Construction System for High-rise Reinforced Concrete Buildings (Part 2)

—— Improvement of Automated Construction System and Effects on Three Projects ——

Koji Hamada Noriyuki Furuya Takashi Shiokawa Kohei Kurita  
Atsuhiko Doyama Tomoya Kaneko Isamu Kunimoto Hiroshi Miyakawa

#### Abstract

BIG CANOPY, an all-weather automated construction system, was applied for the first time in the world to the construction of a 26-story reinforced concrete apartment house in the Tokyo Metropolitan area in 1995. This first application demonstrated that BIG CANOPY ensures good quality; improves working and environmental conditions; reduces construction time, manpower, and wastes; and improves overall productivity.

BIG CANOPY had been applied to two more high-rise apartment house construction projects in Japan and a high-rise office building construction project in Singapore. For these applications, the authors improved the system by adapting it to the different conditions of the three projects. This paper mainly describes improvements to BIG CANOPY and results achieved in these three projects.

#### 概 要

1995年に世界で初めて高層鉄筋コンクリート造の建物を対象とした全天候型自動化建設システムを開発し、千葉県内の高層集合住宅の新築工事に適用した。この自動化建設システムは、①同調クライミング式仮設屋根架構、②並列搬送システム、③プレファブ化・ユニット化、④資材総合管理システム、の4つの要素技術から構成され、生産性の向上、品質・工程の安定と工期の短縮を図ると共に、作業者に快適な環境を提供することによって、最終的にトータルコストの低減を目的としている。第1回目の適用工事において各種の実態調査を行い、適用効果を定量的に把握すると共に、システムの改善点を抽出した。その後、日本で2つの高層集合住宅、シンガポールの高層事務所ビルと適用を重ねた。この過程で、部分的な改良や搬送システムを新たに開発するなどして対象建物の規模・形状・仕様等に対応させ、大きな改善効果を確認した。

#### 1. はじめに

1995年に世界で初めて高層RC造建物を対象とした全天候型自動化建設システム(以下、BIG CANOPYと略す)を開発し、千葉県内の高層集合住宅の新築工事(Y工事)に適用し、多くの成果を挙げた<sup>1)</sup>。BIG CANOPYは、労働生産性を高め、品質・工程の安定と工期の短縮を図ることを目的とし、全天候化、機械化・自動化、工業化、情報化、多能工化等の技術を統合したシステムである。BIG CANOPYを構成する要素技術は、①全天候化施工を可能にする同調クライミング式仮設屋根架構、②垂直と水平搬送を分離することで効率的な搬送を実現する並列搬送システム、③高品質と省力化を目指したプレファブ化・ユニット化、④多種多様な資材を管理する資材総合管理システム、である。

Fig.1に示すように、BIG CANOPY(図中システムA)は

Y工事への適用終了後、福岡市内の集合住宅新築工事(K工事)に転用され、さらに、シンガポール内の高層事務所ビル(D工事)へ海外では初めて適用された。この間、K工事と併行して新たに開発したBIG CANOPY(図中システムB)を神戸市内の高層集合住宅(H工事)に適用した。本報では、各工事の条件に合わせて改造・開発を行った項目とその適用結果を中心に言及する。

#### 2. 適用工事の概要

Table 1に4工事の概要と、Photo 1~4にシステムの外観を示し、以下に3工事の概要を述べる。

##### 2.1 K工事の概要

K工事は、福岡市内の博多湾近くにある大規模プロジェクトの一角に位置している。BIG CANOPYを適用した建物は20階建ての高層集合住宅棟で、中央にエレベータ

や階段などのコアを配した平面計画となっている。敷地には比較的余裕があり、同敷地内における別棟の集合住宅新築工事で使用中のクローラタワークレーンをBIG CANOPYのポスト継ぎ足し等の作業に利用し、屋上にジブクレーンを設置しなかった。Y工事からBIG CANOPYを転用・改造するための時間的制約やK工事は地下工事の物量が少ないこと等から、地上2階床までの施工終了後に、仮設屋根架構を組み立てた。

2.2 H工事の概要

BIG CANOPYを適用した建物は、中央にエレベータ等の共用部を有するセンターコア形式の純ラーメン構造であり、基準階は約30m×30m（5×5スパン）の正方形である。高層部では建物コーナーが1スパン規模でセットバックしている。3階以上の基準階躯体工事には、Y・K工事と同様のPCa化を施し、施工の省力化を図った。敷地の一部をPCa化部材のストックヤードとし、バルコニーやマリオン部材については、テント式の仮設屋根の下で先行塗装を施した。国内の適用物件では、初めて最高高さが100mを超える超高層建物となった。

2.3 D工事の概要

D工事は、シンガポールの市街地中心部にある旧チャイナタウンの再開発地域に位置し、対象建物は地域の中核となる超高層事務所ビルであり、6階建ての駐車場棟

も隣接している。建物の構造形式は、外周部はフレーム構造、コア部が壁式構造である。2階から上層階はPCa工法で計画されたが、日本との設計上の差違や調達等の制約などから、日本とは仕様が大きく異なった。周辺敷地の余裕はほとんどなく、敷地上空をマイクロウェーブが通過している等、多くの制約があった。日本の工事とは異なり、①PCa部材の寸法・重量が大きい、②階高が高いため、貨物リフトに立てた状態で揚重できない部材が多い、③建物中央部に多くの部材があり、リフトからの部材揚重に用いる中央の搬送クレーンを建方作業に多用する、④横置きして揚重した柱や壁部材の建て起し作業や梁部材への落下養生ネット取付作業など、施工階床上を仮置きヤードとして使用する部材が多い、⑤多能工としてのタイ人の技能レベルが未知数である、といった厳しい制約があった。一方、シンガポールでは地震が無いため、仮設屋根架構への水平力を低減でき、適用物件では最大の約2,500㎡の仮設屋根を従来通りの4本のポストで支えることが可能となるメリットもあった。

3. BIG CANOPYの改善・新規開発項目

3.1 同調クライミング式仮設屋根架構

3.1.1 仮設屋根架構組立作業の改善 Y工事において、在来工法と比べ仮設屋根架構の組立・解体作業に時間と労力を費やしたことから、システムの第1の改善項

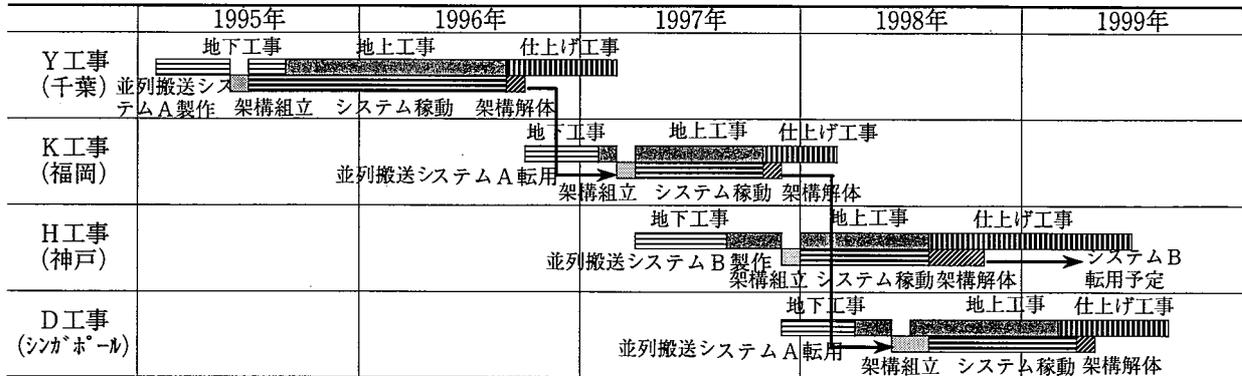


Fig.1 BIG CANOPYの転用スケジュール  
Diversion Schedule of BIG CANOPY for Four Projects

Table 1 4工事の概要  
Abstract of Four Projects

	Y工事	K工事	H工事	D工事
所在	千葉県八千代市	福岡県福岡市	兵庫県神戸市	シンガポール
用途	高層集合住宅	高層集合住宅	高層集合住宅	高層事務所ビル
規模	地上26階、地下1階	地上20階	地上33階、地下1階	地上28階
構造	鉄筋コンクリート構造	鉄筋コンクリート構造	鉄筋コンクリート構造	鉄筋コンクリート構造
敷地面積	8,516㎡	7,563㎡	7,840㎡	3,076.6㎡
建築面積	6,115.4㎡	720.7㎡	3,034.1㎡	2,608.7㎡
延床面積	25,540㎡	12,641.3㎡	28,499㎡	42,652.8㎡
基準階法定床面積	910.4㎡(3F)	624.7㎡(2F)	891.5㎡(3F)	1,685.2㎡(7F)
最高高さ	GL+90.5m	GL+69.1m	GL+114.25m	138.345m
工期	1995年1月～1997年2月	1996年9月～1998年3月	1997年3月～1999年6月	1997年11月～1999年9月
仮設屋根面積	約1,980㎡	約1,330㎡	約1,590㎡	約2,490㎡

目と定め検討を重ねてきた。架構の軽量化・ユニット化や、施工中の建物の躯体を利用することで組立・解体作業におけるベント支柱等仮設材の削減、組立解体関連作業の一部の作業を本体外工事と重複させる等を実施した。

3.1.2 クライミング作業の改善 仮設屋根を支持する4隅のポストと建物を繋ぐ水平控え金物を簡素化し、この盛替回数が減少するようにクライミングステップを検討した。また、ポストに用いたタワークレーンのマストを先行して取付けることによってクライミング関連作業の山崩しを図った。

その他、仮設屋根4周の垂直ネットを下方に延長したり、仮設屋根上の雨水処理方法の改善等を実施した。

3.1.3 セットバック建物への対応 コーナー部がセットバックした建物では、水平控えを設けることが困難であるため、セットバック部分には仮設の鉄骨柱・梁(2層毎)を組むことで対応した。仮設の鉄骨工事は、躯体のサイクル工程の中で大幅な作業工数の増加も無く進める事ができ、セットバックした建物に対しても柔軟に対応できた。

3.2 並列搬送システム

3.2.1 旋回式天井クレーンの開発 H工事において、半径3mの旋回アームを有する旋回式天井クレーン2基(Photo 5)を新たに開発・導入した。Fig.2に従来の乗移り式天井クレーンと旋回アーム式天井クレーンの平面を示す。乗移り式天井クレーンは、リフトからの荷の吊上げから建方クレーンまでは中央のクレーンが搬送し、部材の建方作業は主に左右の建方クレーンが行う。新規開発の旋回アーム式天井クレーンは、中央部で2台の稼動範囲を重複させることで、貨物リフト上から資材を直接揚重し、建物全域への搬送を可能にした。開発に当っては、H工事の建物規模や採用するP C a 工法の施工実績から求めた搬送・建方効率を、従来の乗移り式天井クレーンと比較するなどの事前検討を重ねた。

3.2.2 ラック式貨物リフトの開発 搬器下部に設置したピニオンギアをサーボモーターで駆動し、ポストに設けたピンラックに沿って架台を昇降させるラック式貨物リフト(Photo 6)を新規開発した。ポストにピンラックおよび給電トロリを設け、従来の貨物リフトのクライミング時に必要なワイヤ延長作業を不要にした。また、昇降速度をより高速化すると共に、搬器中央部に縦穴を設けることで、コンクリートバケットや柱P C a 部材等の挿入を可能にし、搬送作業の効率化・省力化を図った。

3.3 資材総合管理システム

Y工事では、EWS(Engineering Work Station)を用いたが、システム利用者に対する教育や工事現場での保守等の制約から、パソコン中心のシステムにK工事から変更した。この結果、実績データの処理なども容易に汎用パッケージに変換可能となり、ユーザーである工事管理者の負担が減少した。

4. 並列搬送システム開発のための事前評価

4.1 サイクルタイムの算出

並列搬送システムを構成する各搬送設備のサイクルタイムは、式(1)のように一連の作業時間の総和となる。貨物リフトの昇降時間 $[T_{上昇}]$ 、 $[T_{下降}]$ は施工階が高くなるに従い増加する。逆に、部材の建方時間 $[T_{建方}]$ は作業者の習熟に伴って減少し、式(4)を用いて表現できる。その他の作業時間は、部材の種類や搬送設備の仕様から求められる。並列搬送システムでは、複数の設備を用いるため、一部の設備の能力でシステム全体の効率が式(2)のように定まる。一方、タワークレーンのサイクルタイムは台数によらず一定であり、式(3)で表せる。

4.2 サイクルタイムの推定

現状の搬送設備仕様による並列搬送システムとタワークレーン2基のサイクルタイムと施工階高さの関係をFig.3に示す。A・B2タイプの貨物リフトの昇降速度は同一とした。第1回目の建方時間 $t_1$ は過去の施工実績から5分および10分を用いた。この結果、①2種類の並列搬送システムのサイクルタイムは低層階では異なるが、施工階高さが一定値を超えると等しくなる。②建方

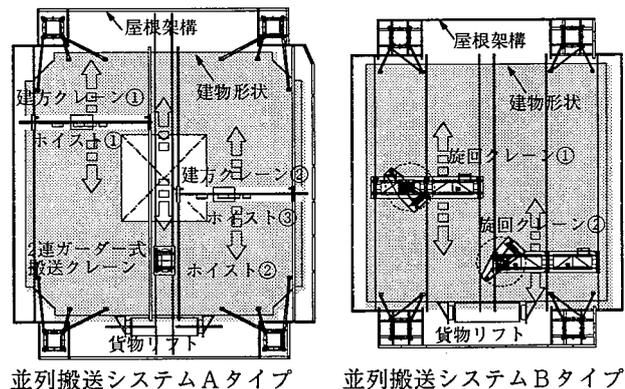


Fig.2 2種類の並列搬送システム

Two Types of Parallel Material Delivery System

貨物リフトのサイクルタイム	} (1)
$[L_{T_{サイクル}}] = [L_{荷積込}] + [L_{T_{上昇}}] + [L_{T_{建方}}] + [L_{T_{下降}}]$	
2連ガーター式搬送クレーンのサイクルタイム	} (1)
$[L_{DC_{サイクル}}] = [L_{DC_{建方}}] + [L_{DC_{巻上げ・走行}}] + [L_{DC_{乗移り}}] + [L_{DC_{走行・巻下げ}}]$	
建方クレーンのサイクルタイム	} (1)
$[L_{EC_{サイクル}}] = [L_{EC_{乗移り}}] + [L_{EC_{走行}}] + [L_{EC_{建方}}] + [L_{EC_{走行}}]$	
旋回クレーンのサイクルタイム	} (1)
$[L_{HA_{サイクル}}] = [L_{HA_{建方}}] + [L_{HA_{巻上げ}}] + [L_{HA_{走行・旋回}}] + [L_{HA_{建方}}] + [L_{HA_{走行・旋回}}] + [L_{HA_{巻下げ}}]$	
並列搬送Aタイプのサイクルタイム	} (2)
$[L_{HA_{サイクル}}] = [\text{Max}([L_{T_{サイクル}}] \times 2, [L_{DC_{サイクル}}] \times 2, [L_{EC_{サイクル}}])]/2$	
並列搬送Bタイプのサイクルタイム	} (2)
$[L_{HA_{サイクル}}] = [\text{Max}([L_{T_{サイクル}}] \times 2, [L_{DC_{サイクル}}])]/2$	
タワークレーン2基のサイクルタイム	} (3)
$[L_{TC_{サイクル}}] = ([L_{TC_{建方}}] + [L_{TC_{巻上げ}}] + [L_{TC_{起伏・旋回}}] + [L_{TC_{建方}}] + [L_{TC_{起伏・旋回}}] + [L_{TC_{巻下げ}}])/2 \dots (3)$	
部材の建方時間: $[T_{建方}] = t_1 \cdot x^n$	(4)
習熟率: $P(\%) = (1/2)^n \times 100$	(5)

※式中の左下添字は搬送設備を、右下添字は作業内容を示す。;Lは貨物リフト,DCは搬送クレーン,ECは建方クレーン,BCは旋回クレーン,HAは乗移り式クレーンによる従来の並列搬送Aタイプ,HBは旋回アーム式クレーンによる新規開発の並列搬送Bタイプ,TCはタワークレーンを示す。 $t_1$ は初回の建方時間,xは繰返し回数,nは習熟係数。Max(a,b,c)で示した関数は、a,b,cのうち最大のものを選択することを表す。



Photo 1 BIG CANOPYの外観（Y工事）  
External View of BIG CANOPY on Y Project



Photo 2 BIG CANOPYの外観（K工事）  
External View of BIG CANOPY on K Project



Photo 3 BIG CANOPYの外観（H工事）  
External View of BIG CANOPY on H Project



Photo 4 BIG CANOPYの外観（D工事）  
External View of BIG CANOPY on D Project



Photo 5 旋回アーム式天井クレーン  
Overhead Crane with a Cycling Arm



Photo 6 ラック式貨物リフト  
Construction Lift with Rack and Pinion

時間 $t_1$ が長い場合、低層階ではAタイプのサイクルタイムはBタイプより短くなる。③建方時間 $t_1$ が長い場合、並列搬送システムのサイクルタイムはタワークレーンより短くなる。④中高層規模であれば、並列搬送システムのサイクルタイムはタワークレーンより短くなる。等の知見が事前評価から得られ、BIG CANOPYの適用はサイクルタイムが減少し、工期短縮に有効であると判断した。

## 5. BIG CANOPYの適用結果

### 5.1 労働生産性の向上

日本の3工事における床面積当りの躯体工事に係わる労務歩掛りを、当社の施工実績から在来工法を100として半PCa化工法・タワークレーンによるフルPCa化工法も含め、比較したものがFig.4である。K工事では梁PCa部材が設計上の制約から1.5スパンの長さの部材を多用した点や、床部材にはハーフPCa部材と鋼製部材が混在したことで若干生産性は劣ったものの、H工事では生産性が最も高くなった。これは、Y・K工事で蓄積した生産ノウハウが有効に生かされた事や新規開発した搬送設備の効率向上によるものと考えられる。

Fig.5には、4工事の躯体工事ににかかわる作業工数(第1回目:2階施工を100)の推移を累計平均として算出し、習熟率( $p$ )も併せて示した。Y工事では初めての適用工事でもあり作業改善を進めながらの施工となり習熟効果も高くなったが、それ以降の2工事では前述のように施工の初期段階からY工事で蓄積したノウハウを活かすことで習熟効果は低かった。一方、D工事では初めての海外の事務所ビルへの適用であり、システム稼動開始直後の作業工数は多くなったが、その後の作業改善により習熟効果はY工事以上に高くなった。D工事の労働生産性は、現地の在来鉄筋型枠工法に比べ約5倍に達した。

### 5.2 工期の短縮(サイクルタイムの短縮)

Y工事における最短の躯体タクト工程は6日間であったが、K工事では5日間に短縮された。さらに、H工事では、Y・K工事の実績から標準的な躯体タクト工程を6日/階で計画したが、5日(最短で4日)/階とこれまでに以上の工期短縮を実現し、躯体工程を前倒しにすることができた。D工事では、7階からの標準階での工程は終始安定(6~7日/階)し、現地在来工法に比べ工期短縮を実現した。

日本の3工事における柱と梁部材のサイクルタイムの実績とY・H工事の推定値をFig.6およびFig.7に示す。Y工事の実績値が推定値より大きくなった点や、H工事の柱部材では推定値よりも低層階の時点で貨物リフトによってサイクルタイムが決まった点など、若干の相違はあったが、推定値と実績値はほぼ一致した。以上により、第1回目の作業時間 $t_1$ と各作業時間を適切に仮定することにより、並列搬送システムのサイクルタイムは式(2)によって推定可能と考えられる。

D工事の搬送時間の実績を日本と比べると、階高の大

きい事務所ビルへの適用であったことから柱や壁等の鉛直部材の搬送・建方効率は若干低下したが、接合部における鉄筋の納まりが単純だったことにより梁や床等の水平部材では同等以上となった。

この他、仮設屋根の下では上部と比べ風速がほぼ半減し、いずれの工事においても強風による作業中断日が1~2日程度と非常に少なく、工期短縮につながった。

### 5.3 作業環境の向上

全天候型仮設屋根による雨日の作業環境向上の他に、仮設屋根が作る日陰によって真夏の温熱環境下における作業環境の改善効果も大きかった。

温熱環境下では外気温と湿度の上昇と共に生産性が低

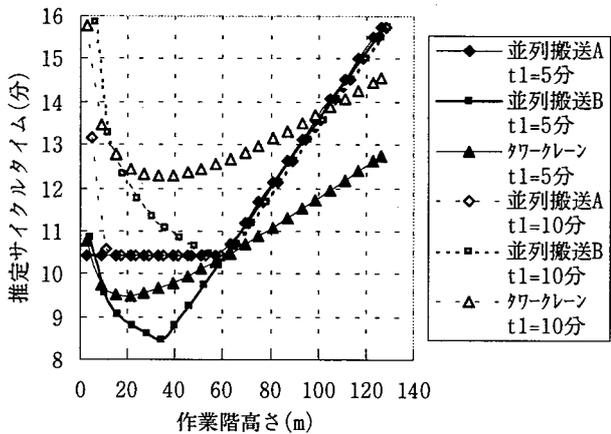


Fig.3 サイクルタイムの推定結果  
Simulation for Delivery Cycle Time

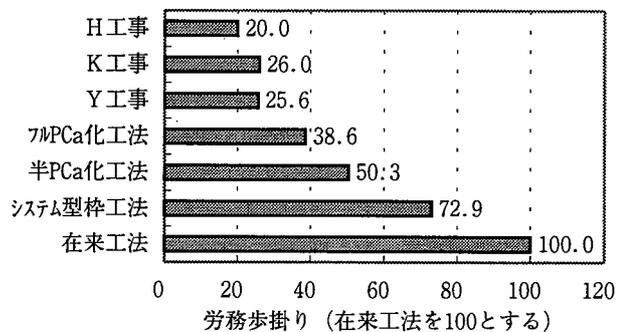


Fig.4 労働生産性の比較

### Labor Productivity Comparison

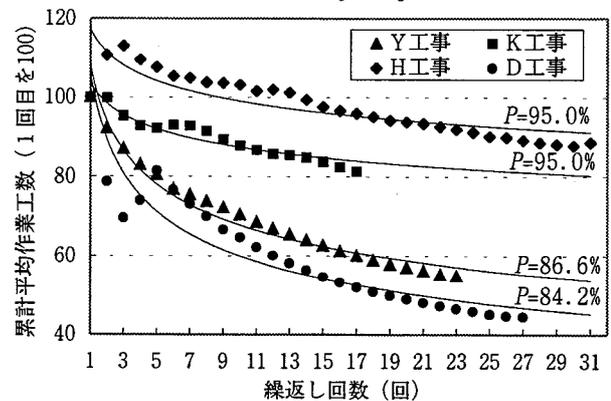


Fig.5 習熟効果  
Learning Effect

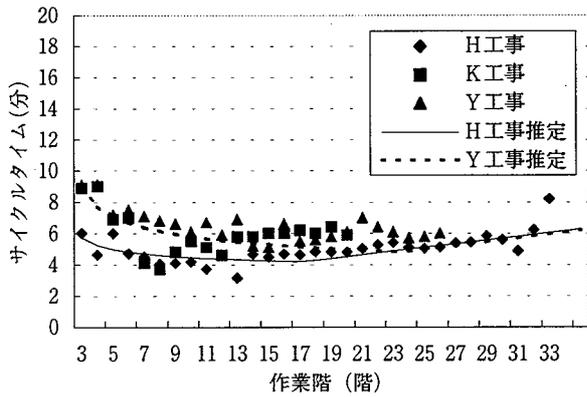


Fig.6 サイクルタイムの推定値と実績値(柱)

Result and Estimation Delivery Cycle Time (Column)

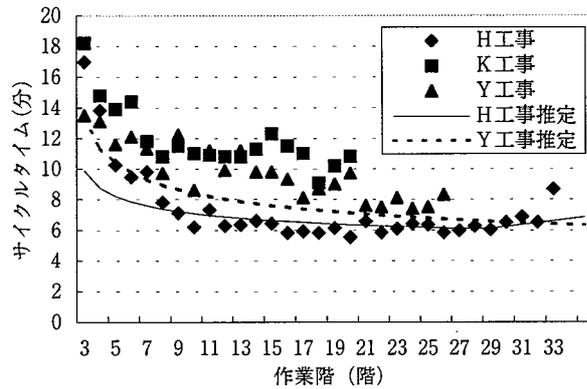


Fig.7 サイクルタイムの推定値と実績値(梁)

Result and Estimation Delivery Cycle Time (Girder)

下する。D工事における外気温と生産性の関係を、自動化建設システムの適用期間についてFig.8のように層別した。この結果、生産性の低下を作業時間の損失分として計算すれば約260時間/年と推定される。記録的な猛暑だった年の日本における同様の集計では、生産性低下による損失時間は43.3時間/年であった。つまり、高温多湿な気候のシンガポールでは、温熱環境下における生産性の低下は日本と比べて6倍程度あり、仮設屋根の設置が特に有効だったと考えられる<sup>3)</sup>。

Fig.9は、外国人も含めた7人の被験者に対して実施した温熱環境下における心拍数調査の結果を屋根下と屋外とに分け、安静時に対する増加率として示した。作業の量や質によっても心拍数は上下するため7人分のデータだけでは考察しづらいが、被験者4のデータを除き、屋外での作業時の数値は高くなり、有意 ( $p>0.01$ ) な差が認められた。屋外では被験者の心拍数の平均値は最大値で70%増・平均値で35%増となり、肉体的負荷が非常に大きかった。仮設屋根の下での作業では、最大値で40%増・平均値で約17%増に留まり、被験者の心拍数の増加は屋外に比べて仮設屋根の下では半減し、温熱環境下における肉体的負荷は屋外と比べ、著しく低減された。

BIG CANOPYの適用工事で延べ119名に作業環境に関するアンケート調査を実施した結果、仮設屋根の設置に対する評価は全般的に高かった。仮設屋根の効果によって「暑さがしのげる」点の評価が最も高く、D工事では新しい建設工法を採用したため多くの人々から注目される

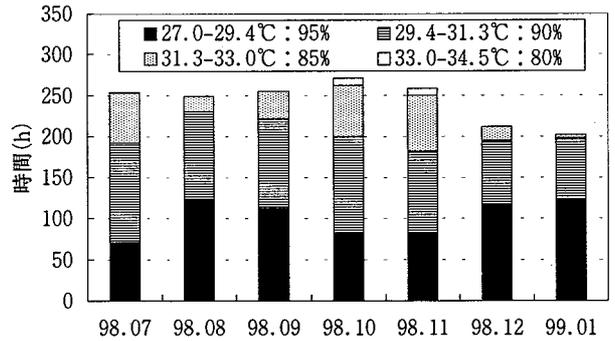


Fig.8 生産性に影響を及ぼす気温の層別

Classification of Temperature for Labor Productivity

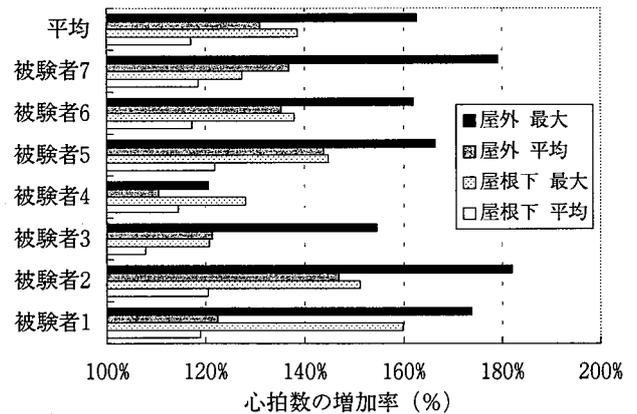


Fig.9 心拍数の集計結果

Result of Heart-rate Analysis

ことから「やる気が増える」点が高く評価されていた。

## 6. おわりに

BIG CANOPYを3工事へ適用する上で、用途や仕様・形状の異なる建物に対応させ、新たな搬送システムの開発を含め、様々な改造を実施した。適用結果から、建物の条件が変化した場合にも柔軟に対応でき、より高い生産性を発揮できること等を確認し、BIG CANOPYの適用範囲の拡大が図れた。今後の課題は、建物高さが100mを超える物件における搬送効率の向上と仮設屋根架構の組立解体作業の更なる省力化である。現在、今回報告した3工事の経験を踏まえ、上記課題を解決すべくBIG CANOPYの次物件への転用を計画中である。

最後に、システムの適用に当ってご協力頂いた各工事事務所をはじめとした関係各位に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 古屋他：高層RC造建物自動化建設システムの開発と実用化，大林組技術研究所報 No.55, (1997.7)
- 2) 堂山他：RC造建物の自動化施工法における並列搬送システムの開発，建設機械と施工法シンポジウム，日本建設機械化協会, (1998.10)
- 3) 浜田他：RC自動化建設システムの開発・実用化，第8回建設ロボットシンポジウム，ロボット工業会, (2000.7)