

# 外壁検査システム「ウォールチェッカー®」の開発

土井 暁 沼崎 孝義

## Development of High-Efficiency Outer Wall Inspection System

Satoru Doi Takayoshi Numazaki

### Abstract

Performing an external wall inspection of a building is dangerous, and significant diagnosis is necessary. The latter is because an inspector typically uses a temporary gondola and inspects all the surfaces of the buildings. In this research, the authors developed an external wall inspecting system that has inspecting arms elastic that are in the left and right. This system could examine all the tiles of the considered external wall of a building, avoiding obstacles, and could acquire the images of all the tiles. In this paper, we describe the outline of this system and the efficiency obtained from the result of applying this system to an actual building.

### 概要

外壁検査の定期報告制度が改定され10年が経過した。しかしながら、検査員不足に起因する外壁検査の費用の上昇や検査時における入居者への合意形成の難しさ等の課題が残る。このような問題を解決するために、従来の人による検査よりも安全で、効率が良く、検査精度の高い自動化システムの開発が求められている。そこで、全面打診に対応できる新たな自動検査システムを開発した。開発システムは、左右の伸縮可能な検査アーム部と本体下部のスライダ部をそれぞれ横移動する3基の検査機構を装備する。これにより、従来の自動検査システムでは対応不可能な移動障害物周辺の検査が可能となり、最大検査幅での稼働が可能な壁面では検査効率が大幅に向上する。筆者らは開発システムを実建物の外壁検査に適用し、従来の人による検査結果と比較した。その結果、従来の人による検査よりも効率がよく、その診断結果は十分に信頼できることを確認した。

### 1. はじめに

2000年代に外壁タイルの剥落事故が相次いだため、建築基準法の定期報告制度が2008年に改定され、外壁周りの定期検査と報告が義務付けられた<sup>1)</sup>。従来の外壁検査作業(以後、従来検査と言う)では検査員がゴンドラや足場上にて高所作業する必要があり、また膨大な数のタイルを打診・目視検査、およびその記録など手間のかかる作業である。このため、検査の自動化へのニーズは高まっているが、全面打診検査に適用するには開発課題が多く、これまでに実用化されたシステムは存在しない。

筆者らはこれまでに、中低層事務所ビルの外壁を対象とした外壁タイルの自動打診システム<sup>2)</sup>および集合住宅のバルコニー面に対応した外壁タイルの自動検査システム<sup>3)</sup>(以後、従来システムと言う)を開発し、実物件に適用してきた。しかし、これらのシステムは上下移動が必要であり、建物の外壁に設置されている換気孔のフードや窓など、システムの移動に障害となる設備(以後、移動障害物と言う)の周囲や下部を検査できず、外壁タイル壁に必要な全面打診検査に適用するには非効率である。また、膨大な検査データを検査報告書にするには手作業による部分が多く、手書きデータのCAD入力など効率化が必要な課題もある。

そこで、移動障害物周りを検査でき、特に妻面などの移動障害物が少ない面については最大効率を発揮できる自動検査システム(Fig. 1)(以後、開発システムと言う)を

開発し、実物件の外壁検査に適用した。本報では開発システムの概要と実物件に適用して得られた検査性能について報告する。

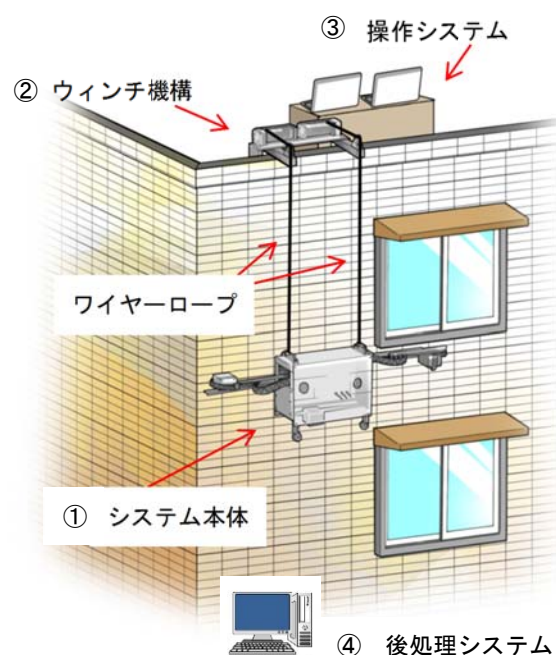


Fig. 1 開発システムの基本構成  
Basic Configuration of the Development System

## 2. 開発した外壁検査システムの概要

### 2.1 開発システムの構成と機能

開発システムは、①外壁面を上下移動して検査するシステム本体部、②屋上に設置して本体を上下移動させるためのウィンチ機構、③屋上あるいは地上にて操作・監視するための操作システム、および④取得データを処理して検査報告書用出力を可能にする後処理システムから構成される。

**2.1.1 システム本体部** システム本体部は本体上部に左右それぞれに伸縮・収納可能なテレスコピック方式の検査アームを搭載する。本体最下部のスライダー上と左右の2本の検査アーム上を検査機構が左右に移動しながら検査する。検査機構は打診機構とカメラ、およびオートクリアランス機構から構成されており、外壁検査にて要求される打診と目視を可能とする。

システム本体部の仕様・外観をTable 1およびPhoto 1に示す。システム本体上段には、リチウムイオンバッテリーと電源関連、およびデータを保存する記憶装置(以下、NAS-HDDと記す。)が搭載される。システム中段には、本体を壁面に一定の推力で押しつけるためのファンが2基搭載され、中央部には無線LAN、メインPC、A/D変換器が搭載される。システム下段には、本体の動作制御を行うシーケンサ類が配置される。

メインPCには、検査時にタイルの剥離診断をリアルタイムで処理可能なリアルタイム診断システムを搭載している。タイルの剥離状況を詳細に解析できるウェーブレット診断<sup>4)</sup>には処理時間がかかるため、検査タイル全数の解析は現実的ではない。そこで、本システムではFig. 2の診断処理フローに示すように、健全なタイルの詳細診断を省くことで解析処理の時間を短縮し、メインPCによるリアルタイム診断を可能とした。ウェーブレット診断は後述の後処理システムにて解析する。

リアルタイム診断システムでは、取得された打音データを順次波高値と相互相関係数による診断<sup>5)</sup>で健全であるか否かを判定する。剥離があるとされたタイル(剥離：赤色)、剥離がある可能性があるとして診断されたタイル(疑剥離：黄色)を、健全であると診断されたタイル(健全：緑色)を設定し、剥離と疑剥離の打音データのみが位置情報とともに保存される。また、これらの結果は操作システム上でFig. 3に示すように簡易表示ができる。

**2.1.2 ウィンチ機構** ウィンチ機構は、建物の屋上あるいは地上に設置され、システム本体部を上下移動させる。ウィンチ機構は、吊り治具とウィンチ、およびウィンチの自動制御のための制御盤から構成される。ウィンチとシステム本体部は、吊り治具を介してワイヤーロープにより連結される。採用したワイヤーロープは一般的な金属製ワイヤーに比べ、よりが発生せず、軽量で耐久性・耐荷重性に優れるナイロン製である。制御盤のシーケンサはシステム本体部のシーケンサと無線LAN通信し、ウィンチを自動的に操作できるほか、制御盤にて



Photo 1 システム本体部の外観  
Appearance of the Main-System

Table 1 開発システムの基本仕様  
Specification of the Developed System

外形サイズ	W1,500mm (最大3,700mm) × D350mm × H1,300mm
重量	200kg (分割運搬可)
昇降速度	最大3.0m/min
検査速度	最大80m <sup>2</sup> /h (約500m <sup>2</sup> /日)
バッテリー駆動時間	約4h

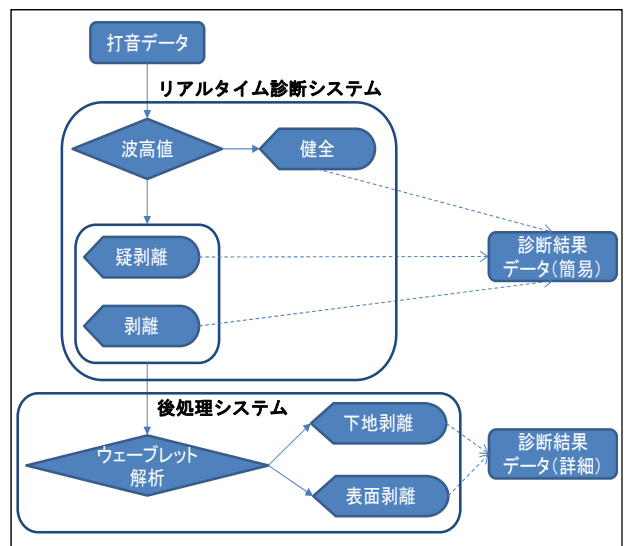


Fig. 2 打音データの診断処理のフロー  
Diagnostic Processing Flow of Sound Data

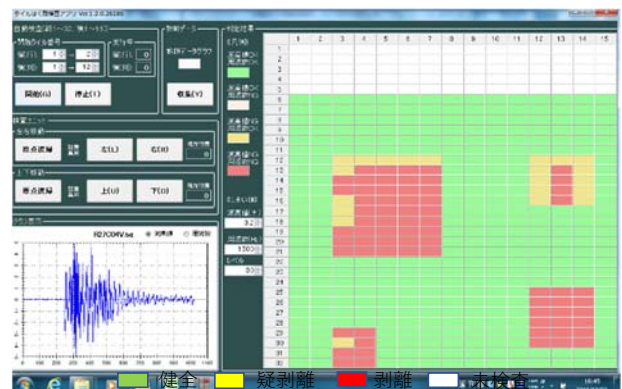


Fig. 3 リアルタイム診断システムによる簡易表示  
Real-time Analyzing System of Tile Exfoliation

手動でもウィンチの操作が可能である。

**2.1.3 操作システム** 操作システムは、1台のPCのみであり、システム本体のメインPCと無線LANにより通信する。操作画面をFig. 4に示す。操作画面は、システムの操作領域と診断状況の表示領域など、検査員の使いやすさを優先した表示構成としている。

**2.1.4 後処理システム** 検査結果のまとめ作業の省力化を目的とし、後処理システムを開発した。本システムの主な機能は、①立面図上への診断結果表示、②帳票出力、③詳細解析、④CAD出力機能である。

①立面図上への診断結果表示機能：本システムは、診断結果を対象建物の立面図上に重ねて画面上に表示できる(Fig. 5)。また、画像上で任意の2点間距離を指定し、原点と設定するタイルの位置を画面上で指定することで、所定の診断結果フォルダ内にあるタイル毎の剥離状態をFig. 3と同じ色分けで表示できる。また、表示ウィンドウ内は、任意に拡大縮小できるため、表示させたい領域のみを拡大することもできる。色分け表示されたタイル部分をクリックすると撮影画像が拡大表示され、1枚ずつ目視確認も可能である。

②帳票出力機能：立面図表示された領域の診断結果は、非健全(剥離、ひび割れなど)なタイルがそれぞれ位置情報とともに一覧表形式に出力でき、合計枚数も自動計算される。また、指定した領域の検査結果のみ抽出することも可能である。

③詳細解析機能：詳細解析機能には、カメラ画像からひび割れを自動検出する機能と剥離診断解析機能<sup>6)</sup>とが搭載されている。ひび割れ自動検出は、指定フォルダ内の画像のピクセルを2値化して解析し、健全なタイルと一定以上差が生じたタイルのファイル名にひび割れフラグを設定する。また、剥離診断解析機能では、指定されたフォルダ内の打音データをウェーブレット解析し、タイル陶片浮きと下地浮きの剥離状態フラグを設定する。

④CAD出力機能：詳細解析で得られた結果は、CAD立面図データがある場合には、CADのマクロ機能により立面図上に出力可能である。また、CADデータがなく、手書きやコピーの立面図の場合には、背景にこれらの図面を電子化して読み込み、①で述べた表示機能により立面図上への出力が可能である。CAD出力機能には、フラグ設定されたデータからタイル陶片浮き、下地浮き、ひび割れ、欠損を任意の4色により区別して出力できる。また、指定範囲のタイル目地表示、タイル座標表示が可能であるため、報告書としての利用だけでなく、補修時に位置情報としても活用できる。

## 2.2 検査の動作

検査機構は、打診機構、カメラおよびオートクリアランス機構<sup>7)</sup>から構成される。検査機構は検査アーム上を横移動しながらカメラでタイルの縦目地を認識し、オートクリアランス機構により壁面までの距離を一定に保ちながら、タイル中央部を1枚ずつ打診するとともに各タ



Fig. 4 操作画面  
Display of the Operation-System

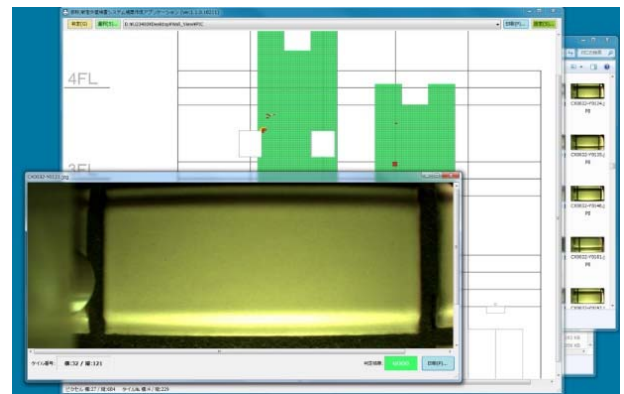


Fig. 5 表示ウィンドウとタイル拡大表示  
Magnification Display Function of the Tile Image

イルの撮影を行う。水平領域の検査が終了すると、屋上に設置されたウィンチ機構に無線LANを介して上昇指令を出す。上昇指令を受けたウィンチ機構は、ウィンチを巻き上げ、シーブに取り付けられたエンコーダのデータを操作システムに送信するとともに、左右の検査機構のカメラによる横目地の認識により、自動で上下位置および水平を調整して停止する。これを繰り返し、一定幅の領域の検査が終了する。

## 2.3 検査データ処理

カメラの目地認識機能により、打診ハンマーがタイルの中央の正面に位置すると、打診ハンマーが作動してタイルを打撃する。発生した打撃音はマイクによりアナログ電気信号に変換され、増幅器を介してA/Dコンバータによりデジタル変換される。デジタル変換された打撃音データは、メインPCに取り込まれ、波形表示するとともにリアルタイム診断にかけられる。リアルタイム診断結果はメインPCのシステム上に表示され、剥離が疑われる(以後、疑剥離と言う)あるいは剥離と判定された打撃音データとともにNAS-HDDに位置情報とともに保存される。ハンマーの打撃と同時にカメラによりタイル画像を撮影し、位置情報とともにNAS-HDDに画像を保存する。タイルの位置情報は、横方向位置が検査アームの検査機構の位置により換算され、高さ方向は、シーブに取り付けられているエンコーダのデータが距離に換算される。

### 3. 開発システムの現場適用

開発システムの検査効率と検査精度を検証するために、事前に従来検査による外壁調査が行われた2棟の中層事務所ビル(Table 2)の一部に開発システムを適用した。CASE1では、開発システムを用いた外壁検査に必要な作業フローと基本検査性能を取得した。CASE2では、1,409m<sup>2</sup>(検査タイル数約85,000枚)の範囲を検査し、検査効率と検査精度を取得した。次に結果を示す。

#### 3.1 事前調査と適用準備

現場適用にあたり、事前に建物を調査する。調査内容は、システム本体部の設置・稼働の可否、ウィンチ機構の設置の可否、開発システム適用の有効性の把握となる。その上で当該現場に対して作業計画を行う。作業計画では、必要な治具類の準備、搬入搬出方法と経路の確認および手配、検査時の配置と電源計画、非作業時の仮置き場・置き方、人員手配などを決定する。

#### 3.2 現場作業

**3.2.1 搬入と設置・調整** 現場作業初日には、開発システムの搬入と設置・調整作業を実施する。設置手順は、養生・安全関係設備の配置、電源系統設備の配置、無線機を含めた操作システムの設置、屋上の吊り治具の設置、ウィンチ機構の設置を行い、最後にシステム本体部を地上にて設置する。調整作業では、開発システムにて現場のタイルを一部検査し、動作確認と打診の判定閾値の調整を行う。判定閾値の調整では、建物最下部の検査員が確認できる位置にてテスト打診し、健全といえる打音を20データ以上取得して基準データとして設定する。

**3.2.2 検査作業** 検査は、まず操作システムから事前に決定した検査開始と検査終了タイル番号を入力する。スタートさせることで、地上に設置したシステム本体部が、指定された範囲のタイルを打診する。指定範囲の打診が終了すると地上に戻り、待機する。待機時に屋上吊り治具を横方向に盛替え、再度スタートする。操作システム担当と監視担当の2名で検査作業が可能である。

**3.2.3 撤収作業(搬出・清掃)** 検査が終了すると、開発システムを撤収する。システム本体部を地上に降下させた後に、屋上の治具、ウィンチ機構、操作システムの順で撤収し、無線機と電源系統設備を撤収する。最後に清掃を行い、検査終了となる。

#### 3.3 後処理作業

後処理作業では、システム本体に保存されているデータを後処理システムに取り出し、詳細解析機能により打診のウェーブレット解析を進める。また、保存されている画像のひび割れ解析処理を行い、CAD立面図上に結果を表示させる。また、指定範囲ごとの各不具合の枚数を出力させ、検査報告書を作成する。Fig. 6に出力の一例を示す。CAD表示、帳票出力共に必要な情報のみを個別に

Table 2 検証現場の概要  
Summary of the Applied Building

CASE	構造 用途	S・RC造, 事務所ビル
	CASE1	規模 竣工 外壁
CASE2	構造 用途	地下RC造・地上S造, 事務所ビル
	規模 竣工 外壁	地下4階・地上7階・塔屋2階, 1970年9月 (補修歴あり) PC打込みタイル (165×95 磁器質タイル)

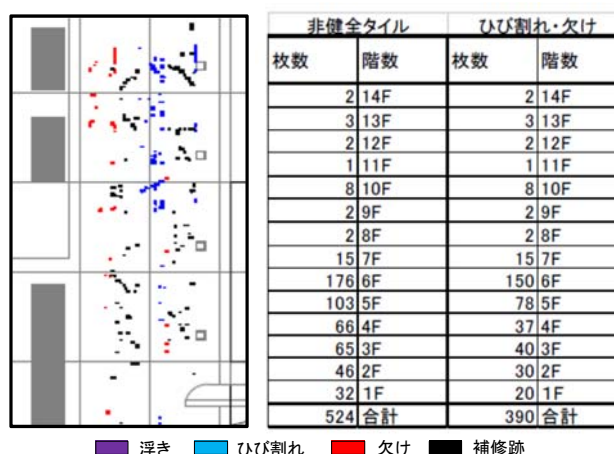


Fig. 6 CAD出力と帳票出力  
Results of CAD-Output and Number Form

出力することもできるなど、客先の要望に応じてカスタマイズ可能である。

#### 3.4 適用結果

**3.4.1 基本動作** 開発システムの基本動作を確認するために、障害物のない妻面にて、検査アームを全開にして検査作業を実施した。その結果、各検査機構が目地を認識し、タイル中央を打診、撮影していること、目地を認識してウィンチを正確に制御していること、オートクリアランス機構により、検査機構が壁面のうねりに対応して最適距離に前後移動していること、遠隔で非常停止できることが確認できた。

次に、従来システムでは、上下移動の必要性から看板や窓、庇などの移動障害物下部の領域は検査ができなかった。そこで、看板のある壁面にて看板位置を設定し、設定された位置で検査アームが伸縮して障害物を回避できることを確認した(Photo 2)。最後に、窓まわりの検査を行い、設定通りに左右の検査アームが窓位置を回避して検査することを確認した。

**3.4.2 検査効率** CASE2では、検査対象建物の外壁が幅3.2mのPCカーテンウォールで構成されていた。そこでリアルタイム診断システムでの結果の状況を現地で容易に把握できるよう、検査アームの伸縮を調整して検査

領域を幅3,200mmで開発システムを稼働させた。また、盛替えを含めた作業員3名(地上1名, 屋上2名)による検査作業時間を計測した。実際の作業実績をTable 3に示す。検査範囲は建屋の各面(北東, 東, 南, 西面)の合計1,409m<sup>2</sup>を6日間で検査した。その結果, 実質検査効率は235m<sup>2</sup>/日(約50m<sup>2</sup>/h)であった。なお, CASE1において, 検査アームを全開にした状態では, 最大検査効率が約80m<sup>2</sup>/h であること, 検査アームが全開と全閉を繰り返すような一定間隔で窓がある壁面における検査効率は約55m<sup>2</sup>/h(窓面積を含む。)であることを確認している。

次に, 開発システムの設置・撤収の作業性を測定した。その結果, 4名の作業員による作業時間は, 開発システムの搬入設置に3時間, 撤収に2時間であった。

常設ゴンドラを利用した従来検査は従来の検査手法の中では仮設を組む必要が無いために最も効率が良いことが知られている。常設ゴンドラを利用した従来検査と開発システムとの作業時間の比較結果をTable 4に示す。開発システムの調整作業は実質9時間を要したが, 本来は, Table3の計画欄のように, 搬入, 設置, および調整作業で1日を想定している。また, 検査作業には両手法とも6日間を要したが, 天候等の都合により, 終日作業していない日を含む。このため, 省力化効果については, 開発システムの搬入, 設置, および調整作業で1日を要したと仮定し, 検査作業は本来可能な7.5h/日作業で換算した場合の4日として計算した。検査報告書作成工期は従来検査では10日間必要であるが, 開発システムでは5日間で作業できる, なお, 打音解析については, PCにて自動計算処理されるため, 作業員の実質作業としては1時間程度である。現場での検査状況をPhoto 3に示す。

**3.4.3 検査精度** CASE2にて開発システムで取得した検査結果を, 従来検査による検査結果と照合した。比較結果をTable 5に示す。CASE2では, 浮き頭打ち工法による補修跡が見られたため, その数量もカウントした。南面にて補修跡の数に大きな乖離が見られるが, 開発システムでは取得した写真から判定しているために過剰なカウントの可能性はない。Photo 4に取得した補修跡のタイルとクラックが入ったタイルの写真を示す。各検査面における診断結果は従来検査とほぼ同値であり, 安全側の結果であることが確認できる。

### 3.5 実用化に向けて

開発した新型の外壁検査システムは, 実用的に運用可能であると考えられる。今後は, 現場での検証を進め, 実運用に必要な運用体制を整備する。また, 定期報告での利用には, 開発システムの現場適用に関する性能証明が必要と考えられる。現在, 地域別に関連検査会社への操作指導を実施している。

実用時の運用方法として, 従来作業と同時並行して開発システムを使用することを提案する。盛替え時に必要となる3人で作業班を組むことで, システム本体部が領域の1列を検査する時間は1人が監視し, 他の2人が従来検査

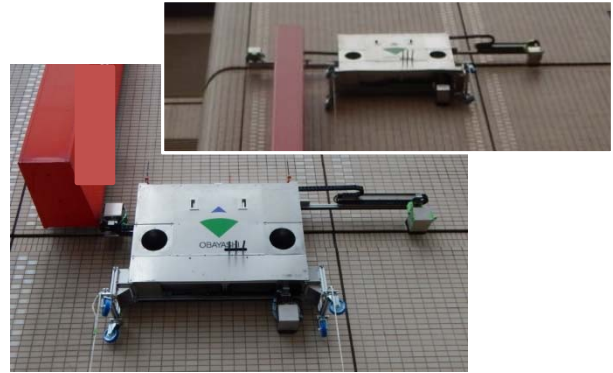


Photo 2 障害物(看板)を避けて検査する状況  
Status of the Inspection Avoiding Obstacles

Table 3 開発システムによる検査作業実績  
Results of Inspection Work by the Developed System

計画	月日	内容		検査	m <sup>2</sup>	実施面	検査時間
搬入	9月8日	搬入	調整			北東	
調整・指導	9月10日	調整				北東	
北東	9月13日	調整	検査	2列	168	北東	2:54
東	9月17日	検査		2列	117	北東	2:19
東	9月18日	検査		(1列)	93	北東	1:10
南	9月24日	検査		4列	330	南	5:46
西	9月28日	検査		4列	284	東	7:24
西	10月1日	移動	検査	6列	417	西	7:44
搬出	10月6日	搬出					



Photo 3 検査状況  
(開発システム適用時と常設ゴンドラによる従来検査)  
Status with the Inspection Methods



補修跡  
Remains of Repair



クラック  
Crack

Photo 4 浮き頭打ち補修跡のあるタイルの一例  
Example of a Tile with the Remains of Repair

Table 4 検査効率の比較および実運用時の検査効率の予測  
Comparison of Inspection Efficiency and Prediction of Inspection Efficiency in Actual Operation

作業項目	開発システム			従来検査			運用イメージ			
	人数	時間	日数	人数	時間	日数	人数	時間	日数	
事前調査	2人	2h	1日	2人	2h	1日	2人	4h	1日	
現場	搬入作業	4人	1h	4人	3h	1日	4人	1h	1日	
	設置作業	4人	2h					2h		
	調整作業	4人	9h					1日		3h
	検査	3人	28h	6日	2人	28h	6日	3人	7.5h/日	4日
	搬出	4人	2h	1日	4人	2h	1日	4人	2h	1日
CADベースデータ作成	1人	40h	5日	1人	40h	5日	1人	40h	5日	
事務所	打音分析	1人	41h	2人	40h	10日	1人	41h	5日	
	写真解析	1人	8h				1人	8h		
	まとめ	1人	16h				1人	16h		

にて、入隅出隅などの開発システムの適用が困難な場所を検査する。これにより現場工期を大幅に短縮できると予測できる。この場合の検査効率を従来検査および開発システムと比較した結果をTable 4に示す。この運用をCASE2に当てはめたところ、従来検査に比べ、現場工期は75%、事務所作業は50%に低減できることが分かる。

#### 4. おわりに

従来、検査員が実施してきた建物外壁の検査作業を省力化し、安全性の確保とヒューマンエラーの低減を両立させる、打診検査機能、目視検査機能および検査報告書作成の省力化機能を搭載した新型の外壁検査システムを開発した。各種要素実験の結果、以下の知見を得た。

- (1) テレスコピック方式の検査アームを左右に搭載することにより、移動障害物周りにも検査機構が到達可能である。
- (2) リアルタイム診断システムにより、外壁検査中の現場での概要把握を可能とした。また、詳細解析機能により、外壁補修のための数量予測精度の向上を可能とした。
- (3) 検査報告書作成機能を製作し、立面図への結果の表示、出力、集計作業の省力化を可能とした。
- (4) 検査報告書作成は作業員1人で対応でき、立面図への結果出力と集計作業が自動化される。従来比で約50%の省力化が確認できた。
- (5) 各種要素の動作検証実験を行い、実際の現場にて利用できることを確認した。

#### 参考文献

1) (財)日本建築防災協会：「特殊建築物定期調査業務基準」2016年改訂版，2016

Table 5 検査精度の比較  
Comparison of Inspection Accuracy  
開発システムによる検査結果集計(検査数:約85,000枚)

種別および摘要	東面	西面	南面	北東面	合計
新規浮き部(タイル)	38	162	22	37	259
ひび割れ0.2mm以上	0	0	0	2	2
欠損・爆裂	74	152	38	47	311
補修跡(浮き頭打ち)	241	527	224	211	1203

従来検査による検査結果集計

種別および摘要	東面	西面	南面	北東面	合計
新規浮き部(タイル)	39	164	28	37	268
ひび割れ0.2mm以上	0	0	0	2	2
欠損・爆裂	74	152	42	47	315
補修跡(浮き頭打ち)	241	527	256	211	1235

\*数値はタイル枚数を示す

- 2) 井上文宏, 他, “外壁タイル検査ロボットの開発”, 第5回建設ロボットシンポジウム, pp. 407-412, 1995
- 3) 土井暁, 他, “超高層集合住宅対応外壁検査システム「スカイクライマー™」”, 大林組技術研究所報, No. 76, 2012
- 4) 土井暁: “外壁タイル剥離危険度の見える化”, コンクリート工学, 公益社団法人日本コンクリート工学会, Vol. 53, No. 5, pp. 474-479, 2015
- 5) 土井暁, 他, “建築用外装タイル自動検査ロボットの開発(第2報, ウェーブレット解析を用いた定量的剥離診断)”, 日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス2007講演会論文集, 2P1-B22, 2008
- 6) 井上文宏, 他, “ウェーブレット解析を用いた建設用外装タイルの定量的剥離診断(第3報, 自作マザー・ウェーブレット関数による診断比較)”, 可視化情報学会, 全国講演会論文集, pp. 131-132, 2008
- 7) 土井暁, “高効率な外壁検査システム”, 建設機械, (一社)日本建設機械工業会, Vol. 10, No. 5, pp. 474-479, 2018