

# デジタルカメラによる土量計測システムの開発

## －その2 現場導入によるシステム実用化－

増谷 正治\* 高橋正志\*

池田 正\*\*

### 要 旨

1999年五洋建設技術年報(Vol.29)にて報告した「デジタルカメラによる土量計測システムの開発 その1:システムの概要と計測精度の検証」の続編として、同システムを現場導入した工事が昨年度までに完了したことを受けて、大規模埋立工事への導入に際して実用化を行った実施状況を報告する。

システムの計測原理は航空写真測量に利用される「ステレオ画像計測法」と呼ばれるもので、2台のデジタルカメラで土運船の船艙を同時に撮影し、画像をコンピュータで画像処理することによって積載土砂の三次元形状を求め、この三次元座標から平均断面法を用いて積載土砂量を算出する。

今回導入した現場は新潟県の直江津港荒浜ふ頭地区埋立事業工事であり、本システムをシップローダと呼ばれる土砂を連続的に土運船に積込む搬送設備に設置し約950万m<sup>3</sup>の土量検収を行った。

### 1. まえがき

大規模な港湾空港の埋立工事において、大量の土砂を効率良く短期間に投入するためには、土砂の投入サイクルを短縮する必要がある。従来から実施されてきた土運船の積載土量計測方法には、目視によるドラフト検測、及びスタッフ・テープを用いる検測などによる人力方式、又は光波・超音波計測器を用いた機械方式<sup>1)</sup>がある。このうち人力方式では、土砂の積込作業後に検測時間を割いて行う必要があり、土砂投入サイクル短縮には対応が困難である。また、光波・超音波計測器を用いる機械方式は短時間に計測が可能であるが、システムが高価であると云われている。

本システムは測量分野では公知の技術として取り扱われている写真測量技術と、市場にて一般化の進む高性能デジタルカメラとを融合した技術であり、大型土運船の土量を短時間かつ安全に計測するために開発し、従来の機械式検収と同等な精度を確保し比較的廉価で保守が容易なものである。

今回の報告は、本システムを実際の大型埋立工事に導入し、実用化を行った実施状況<sup>2)</sup>について記す。

### 2. 工事概要

今回、本システムを導入した直江津港荒浜ふ頭地区公有水面埋立事業は、平成11年3月の埋立免許を受けて、同年4月より着工し、火力発電所用地、及び公共ふ頭用地を造成するために約100haの大型埋立工事である。稼働日数の限られる日本海側において土運船を用いた大規模埋立工事としては、国内初の工事である。埋立面積約100haのうち、約70haの火力発電所用地は上越市土地公社で行っている谷浜地区公園事業の建設発生土を2,000m<sup>3</sup>～3,000m<sup>3</sup>級の土運船で搬送し、搬送土量は平成14年度より3年間で約950万m<sup>3</sup>であった。土砂の積み込みは、陸上の公園造成計

画地から土砂をベルトコンベヤにて搬送し、海上栈橋に設置したシップローダにより土運船へ積み込みを行った。ベルトコンベヤの搬出能力は4,000m<sup>3</sup>/時間、土運による1日の運搬量は40,000m<sup>3</sup>であった。直江津港平面図を図-1に示す。



図-1 直江津港平面図

### 3. 土量検収システム概要

#### 3.1 システム概要

システム概要図を図-2に示す。

本システムは、航空写真測量に利用されるステレオ画像計測法を土運船積載土量検収に適用したものである。海上栈橋に設置されたシップローダ土砂投入口の上面にデジタルカメラ2台1組として設置し、土運船の船艙を2台のカメラにて同時に撮影する。この同時に撮影された画像をステレオ画像と呼び、画像解析処理を行うことで積載土砂表面の三次元形状を求めることができる。土量は、この土砂表面の三次元形状と船艙寸法などの土運船情報とを組み合わせて求める。また、大型土運船においては一度の撮影で船艙全体を写すことが困難なため、シップローダの移動情報をもとにシャッター

\* 技術研究所

\*\*北陸支店

一制御を行い、船艙を部分的に分割撮影した。この分割画像は、画像処理の過程において繋ぎ合わせ処理(モザイク処理)を施し、1枚の写真へ合成した。

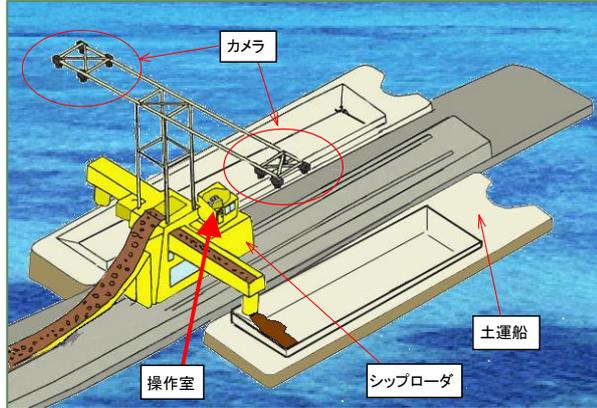


図-2 システム概要図

### 3.2 システム構成

システム構成図を図-3に示す。

主な構成要素は、シップローダ土砂投入口に設置したデジタルカメラ、シップローダ操作室に設置した撮影制御機器、及び土量検収所に設置した解析機器である。デジタルカメラ設置に関しては、シップローダは両舷に土運船が接舷すること、及び土砂船積み終了時にシップローダが移動している方向は陸側・沖側の両方向あるため、両舷に2セット(合計4セット8台)を設置した。

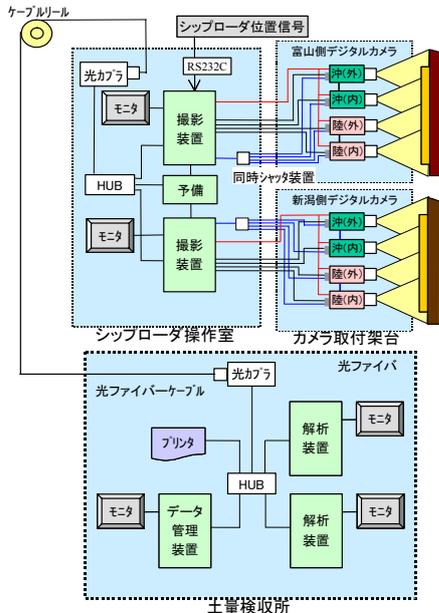


図-3 システム構成図

### 3.3 システム仕様

システム仕様を表-1に示す。

表-1 システム仕様

項目	内容
対象土運船	～5,000m <sup>3</sup> 級土運船
船艙幅	最大22m
計測方式	デジタルカメラを用いたステレオ画像解析
土量算出方法	・画像データをステレオマッチング解析し、土砂積載形状を算定 ・土砂積載形状に土運船寸法データを用いて平均断面法により土量算出
計測精度	1%以内 (理論積込土量比) (測線間隔: 1m、測点間隔: 0.2m)
必要照度	250 lx以上 (土山表面)

### 3.4 システムフロー

図-4にシステムフロー図を示す。

カメラ制御(撮影、画像転送)は栈橋先端のシップローダ操作室で行い、画像処理などは陸上の土量検収室で行う。各処理について以下にまとめる。

#### ①撮影処理

撮影はシップローダ操作室にてオペレータがベルトコンベヤの作動状況を見ながら撮影開始・終了操作を行い、モニター画面にて正常に撮影できていることを確認する。撮影するタイミングは、シップローダ運転機器より出力される信号により自動的にシャッターを切る。

#### ②画像処理

画像処理は土量検収所に設置された解析装置にて自動的に行われる。ここで行う画像処理は、船艙部コーミングの自動抽出、土運船の傾斜修正、及び分割撮影された画像のモザイク処理である。解析結果は、オペレータにより最終チェックを行い、不具合が見つかった場合は半自動処理により修正を行う。

#### ③復元処理

各測線の断面形状を作成し、断面積を算出する。断面形状を作成する処理では、コーミング部に設置した外部標定を用いて土山表面の三次元形状を算出し、三次元形状と船艙寸法情報とを処理し断面積を算出する。

#### ④土量計算処理

測線の断面積、及び測線間隔を用いて平均断面法にて体積計算を行う。

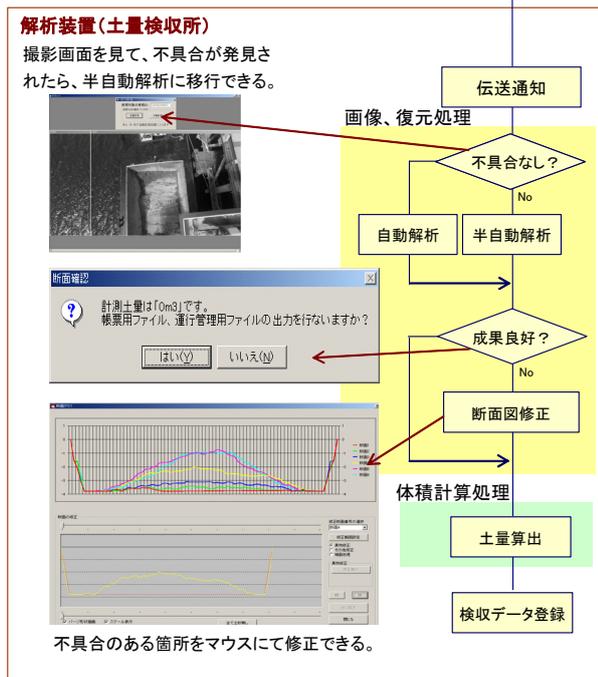
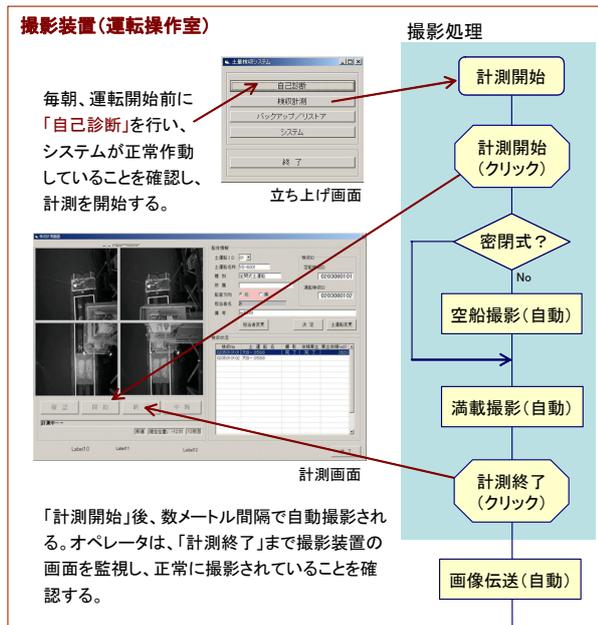


図-4 システムフロー図

#### 4. システム実用化

本システムの実用化にあたり、4 項目の機能を開発した。各機能について以下に示す。

##### 4.1 土運船コーミングの自動抽出

本システムでは、船倉寸法の実寸確認、及び土運船の傾斜補正のためコーミングを利用する。コーミングのある土運船

では、解析装置にて分割撮影した画像1組の写真中で座標既知点となる点を見つけ出し抽出を行う。また、コーミングは、解析装置が認識できるように黄色の塗装を行い、船倉内側から7.5cmの部分に10cm幅の黒色線を塗装した。太陽光の強い日中では、反射によりコーミングの塗装が確認できない状況が想定されたため、対策として長辺方向のコーミングには2m、4mの間隔にて十字型に反射防止シートを設置した。

図-5 にコーミングの自動抽出例、写真-1 に反射防止対策を示す。



図-5 コーミングの自動抽出例



写真-1 反射防止対策

##### 4.2 動揺する土運船の自動傾斜補正

コーミングの自動抽出処理を行った後、予め登録された船倉寸法を用いてコーミング天端面を基準にピッチング、及びローリングなどの傾斜を自動的に補正する。この処理は、土運船がどのような傾斜をしていても修正可能である。

図-6 に傾斜補正イメージ図を示す。

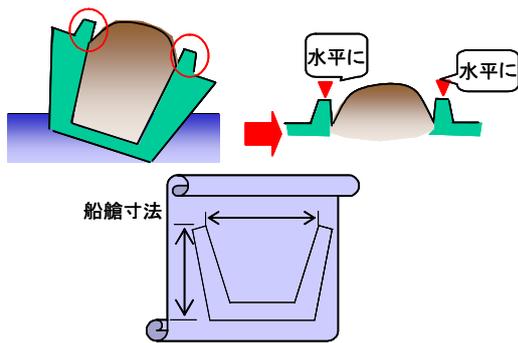


図-6 傾斜補正イメージ図

#### 4.3 ステレオ画像処理

2台のデジタルカメラにて撮影したステレオ画像について、互いの同一点を自動的に確定する。それぞれの画像データの中で明暗など模様の類似値を求め、この値が最も近い点を同一点と見なす。各カメラの相互位置関係、もしくは対象土上の数点の位置関係が条件として与えられると、解析装置によってステレオ画像から重複領域全域を三次元形状に自動復元できる。

図-7 にステレオ画像、及び図-8 に解析断面図を示す。

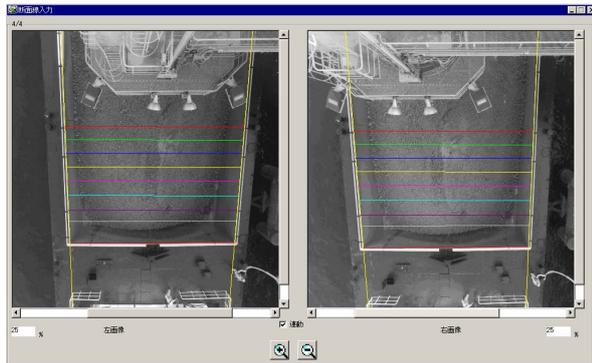


図-7 ステレオ画像

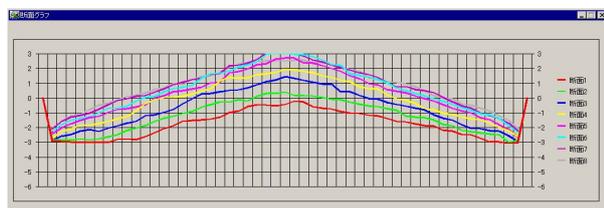


図-8 解析断面図

#### 4.4 モザイク処理

船艙部を数回に分けて分割撮影したステレオ画像を繋ぎ合わせて、1枚の写真に復元する。前後の画像から重複している部分の同一点を解析装置にて自動抽出し、画像を繋ぎ合わせ船艙全体の土山形状をもとめる。積載状況などを確

認する検収用写真が必要な場合は、この繋ぎ合わせた写真を用いる。

図-9 にモザイク処理例、写真-2 に繋ぎ合わせ写真を示す。

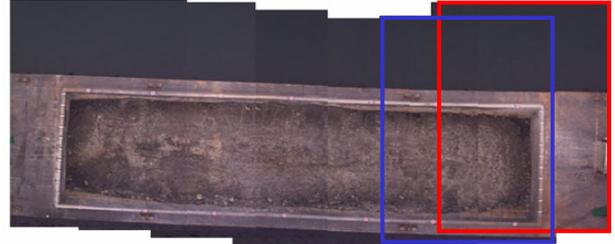


図-9 モザイク処理例

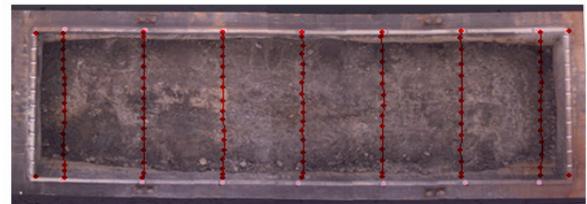


写真-2 繋ぎ合わせ写真

#### 5. 検収精度

本システムの精度検証と故障時に用いる代替検収方法の選定のために、土砂の重量計測としてドラフト検収、及びベルトスケールを、また体積計測として人力検収とを比較検討した。各検収との比較を以下にまとめる。

##### 5.1 ドラフト検収との比較

図-10 に示すように、重量計測であるドラフト検収と体積計測であるデジカメ検収との間に明確な相関関係があった。

相関係数(比重に相当)から平均単位体積重量、及び標準偏差を求めると平均単位堆積重量:1.46tf/m<sup>3</sup>(14.31kN/m<sup>3</sup>)、並びに標準偏差:0.029tf/m<sup>3</sup>(0.28 kN/m<sup>3</sup>)となり、比重が正確であれば代替検収となり得る結果となった。

##### 5.2 ベルトスケールとの比較

図-11 にベルトスケールとドラフト検収の測定結果を示す。ベルトスケール検収は1隻の標準偏差が29m<sup>3</sup>あり、ドラフト検収と相関関係にある。また、ベルトスケールは、1日の全体誤差が0.63%と1%以内の測定精度となった。

ベルトスケールの精度は、1隻ごとに若干の誤差が見られるが、全体では誤差が少ないことが確認できた。

ベルトスケールとドラフト検収の相関関係、及びドラフト検収と本システムの相関関係より判断して代替検収となり得る結果となった。

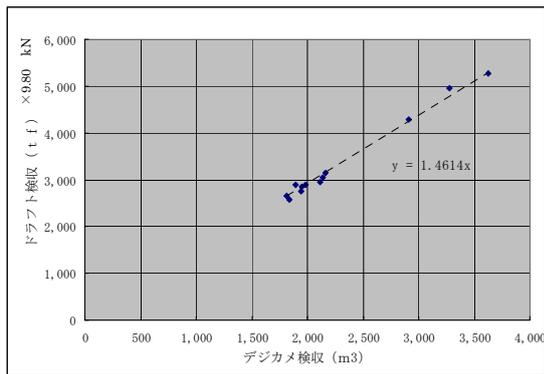


図-10 本システムとドラフト検取との比較

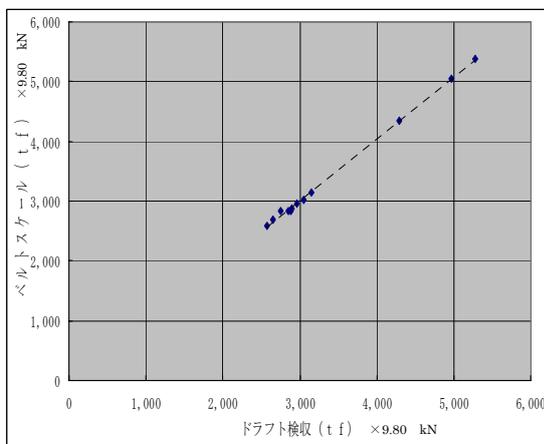


図-11 ベルトスケールとドラフト検取との比較

### 5.3 人力検取との比較

工事で使用する土運船(10隻)について、各1回の満船検取を人力検取にて実施し、本システムとの比較を行った。

図-12に本システムと人力検測の断面形状を示す。人力検測での測点は形状変化点とするのに対し、本システムでは0.2m間隔にて測点を取っているため、断面形状は若干の違いが生じた。本システムの測点間隔を調整し、人力検取の測点とほぼ同等な位置を計測した結果、土量差は平均0.23%(最大0.096%)であった。これにより、本システムの計測精度が適正であることが確認できる。

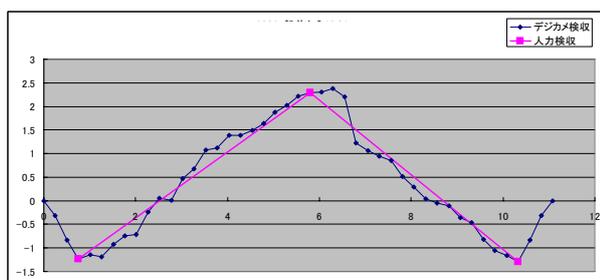


図-12 本システムと人力検取の断面形状

代替検取については、安全性・作業性から検討した結果、本工事ではドラフト検取、ベルトスケール検取を採用した。

### 6. 今後の課題

システムの実用化にあたり、土運船コーミングの自動抽出、土運船の自動傾斜補正、ステレオ画像処理、モザイク処理のソフト開発を行ったが、太陽光によるハレーション現象および土運船コーミング近傍の手摺、ロープなどによるコーミング抽出誤り、土運船内の海水による乱反射などにより全自動処理から、一部、人手による処理が必要な場合があった。外乱要因を抽出し対処する必要がある。

### 7. 検取実績

平成14年度～16年度の検取実績を以下に示す。

平成14年度に使用した土運船は10隻(密閉型5隻、底開型2隻、全開型3隻)、平成15年度は10隻(密閉型6隻、底開型2隻、全開型2隻)、ならびに平成16年度は9隻(密閉型6隻、底開型1隻、全開型2隻)である。この内、密閉型は空船の残土量と満載土量の両方を検取した。写真-3に検取状況の写真を示す。



写真-3 検取状況

14年度～16年度の検取実績を表-2に示す。

1隻の平均処理時間は30分であり、検取精度は寸法を予め測定した検定尺を定期的に撮影(計測)して、計測値が基準値以内であることを確認した。また、本システムの精度確認と代替検取の選定を目的として既存の検取方法との比較検討を行った結果から、突発的な故障時の代替検取として、ドラフト検取により適宜単位体積重量を確認しベルトスケール検取を実施した。

表-2 検収実績一覧表

	平成14年度	平成15年度	平成16年度	合 計
検収総土量(m <sup>3</sup> )	3,091,241	4,103,898	2,222,488	9,417,627
検収延べ日数(日)	104	121	81	306
検収機会(回)	1,313	1,698	965	3,976
検収実績(回)	1,276 (97.2%)	1,644 (96.8%)	921 (95.4%)	3,841 (96.6%)
1日稼働時間(時間)	10.0	10.5	10.0	
検収期間	H14.4.30~H14.10.28	H15.4.1~H15.10.11	H16.4.1~H16.8.26	

## 8. あとがき

本システムは、検収時間の短縮、コスト削減、及び安全性の向上を目的として開発されたものである。実用化にあたっては、現場諸条件(シップロダの振動対策、厳しい気象条件など)を克服し、自動処理を基本とする試行錯誤を繰り返し、現場での運用にたどり着いた。

今後の展開としては、本工事と同様な大規模埋立工事への導入を図るとともに、大規模陸上工事などにも適応するシステムとする。また、更なる機能向上により処理時間の短縮、精度向上、コスト削減に取り組む。

最後に、本件の実用化に積極的に御協力、御支援を頂いた皆様に厚く感謝をいたします。

## 【参考文献】

- 1) 建設の機械化 94'.2(No. 528) 奥田、平松
- 2) 土木建設技術シンポジウム 2003 土木学会