

デジタルカメラ式船積土量検収システムの実用化

渡辺政則¹・早津誠一²・柏原裕彦³

¹正会員 新潟県 上越土木事務所計画調整課 上越市本城町 5-6

²正会員 新潟県 土木部河川整備課 新潟市新光町 4-1

³正会員 (株)日本港湾コンサルタント 東京都品川区西五反田 8-3-6

デジタル画像計測・処理技術の急速な進展にともない、測量分野で高速化・高度化が図られている。その結果、異なる位置にて撮影した2つの写真により元の形状を3次元に復元する写真測量においても、フィールドにてパソコンを使用し容易に作図出力できるようになった。

本システムは、土運船の土量を検収するために公知のステレオ画像計測原理を利用し、パソコンにて自動的に土運船山土を3次元形状に復元し全自動で土量を計算し出力するもので、市販品を組み合わせ比較的廉価に実用化に成功した。

キーワード : デジタルカメラ, 土量検収, ステレオ画像計測原理, 写真測量, 土運船

1. はじめに

大規模埋立工事においては、大量の土砂を短期に投入するには、土砂の投入サイクルを短縮することが不可欠である。そのため、土砂の積み込み作業が終了したとき速やかに土砂の容積を検収する方法が求められている。従来の人力検収では、積み込み作業後時間を割いて検収するのでこれに対応困難である。一方、在来の機械式検収¹⁾では、短時間に高精度土量計測が可能であるが、システムが高価と云われている。

写真測量²⁾は、航空写真測量分野では公知の技術で、高精度かつ、効率よく広域を3次元計測する方法である。近年、廉価かつ、高密度なデジタルカメラが市販され、さらに、デジタル画像を高速処理できるパソコンが発売されたため、現場にて迅速な画像処理が可能となった。

本システムは、このような背景のもと、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されたもので、在来の機械式検収と同等な計測精度を確保し、比較的廉価で保守が容易なものである。

2. 土量検収システムの概要

(1) 埋立工事の概要

土砂積出し場所と埋立場所を示した直江津平面図を図-1に示す。土量検収を行う土砂積出し場所の位置図を図-2に示す。

埋立用地は、上越市土地開発公社で行っている谷浜の公園事業の建設残土を2,000m³~3,000m³級の土運船10隻で運搬し埋立てる。土運船で1日約40,000m³を運搬し、3年間で埋立てる予定である。

土量管理は、土運船で運搬される埋立土の全土量を計測し、新潟県が実施している。

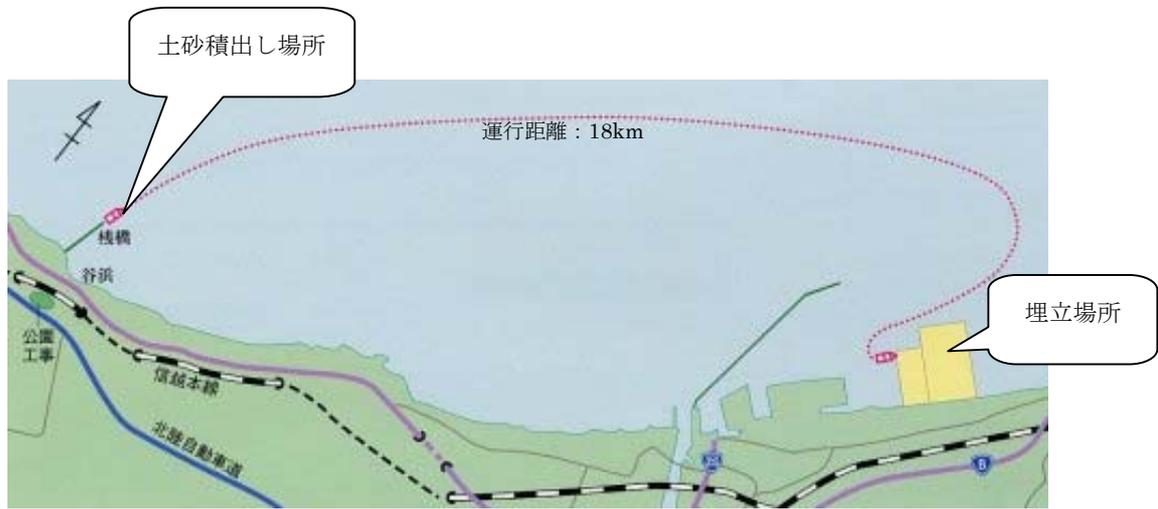


図-1 直江津 平面図

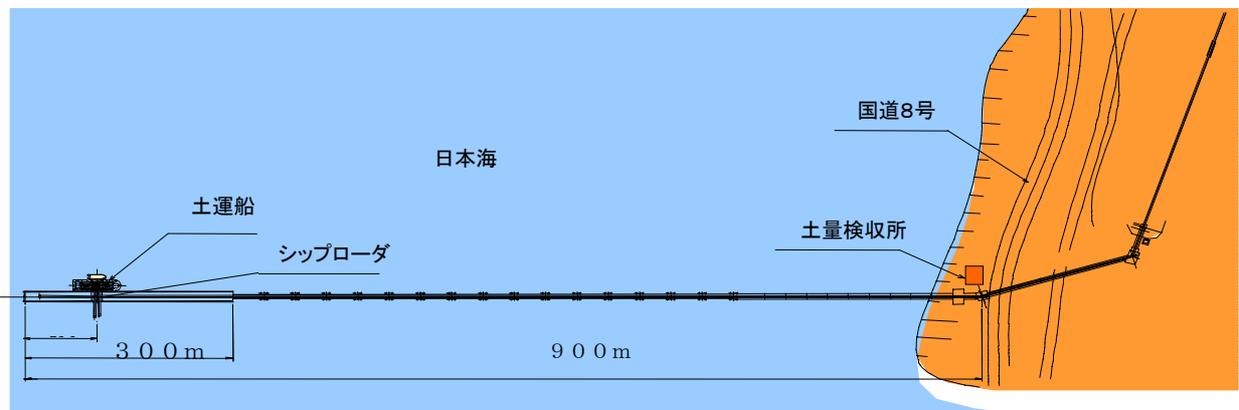


図-2 土砂積出し場所 位置図

(2) システムの開発経緯

平成12年度に基本設計を、平成13年度に詳細設計を行った。

詳細設計の成果がそのまま実際に適用できるよう、平成13年9月より翌年3月にかけて室内模型による屋内試験と2回の現地試験を実施し、運用方法の見直し、ハードおよびソフトの課題を抽出し、実機にて課題が解決していることを確認した。

また、平成14年4月に行われたシップローダ負荷試験および、本稼働開始を通し、実運用で本システムが基本性能・機能を満足していることを確認した。

3. システムの基本仕様

(1) システムの概念

土運船の船倉を一望できる位置に2つのカメラを

設置することが望ましいが、一般に、土運船を離岸する場所付近に高所はなく、仮に高所を築造できたとしても台風等に耐える基礎を建設するのは高価となり、得策ではない。

そこで、図-3に示すように、既設シップローダの隣にカメラを取り付けることにする。船積み最終時にシップローダが移動している方向は両方あるのでシップローダの両側にカメラ2セットを取り付ける。

両舷に土運船が接舷される場合、空載時の土量を計測するため、カメラを両舷に取り付ける。

全景を一度で撮影できないので、シップローダが5m程度移動するごとに部分的に撮影し、解析段階で統合した形状に復元する。

図-4にシップローダ搭載部の栈橋断面を示す。

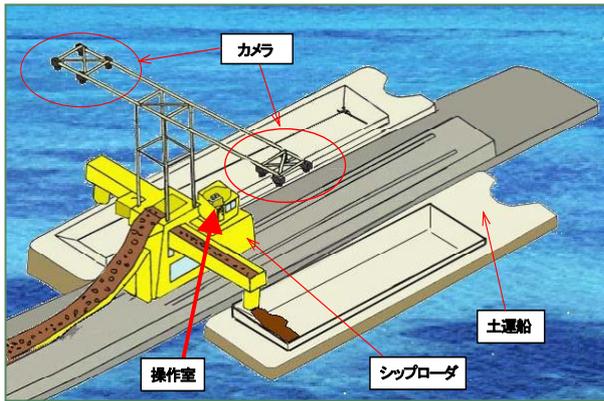


図-3 シップローダの概念図

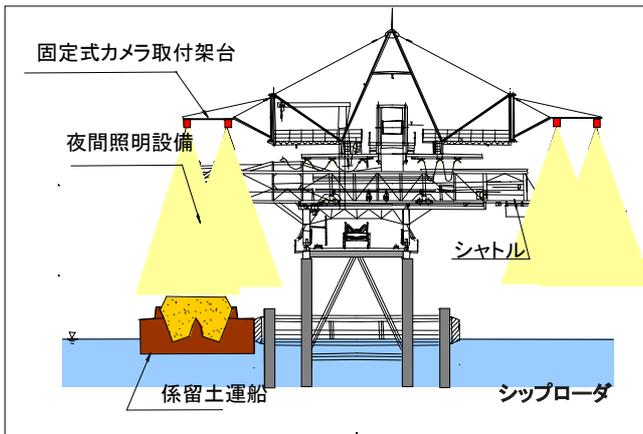


図-4 栈橋断面図

(2) システム構成

図-5は、システムの概念に合わせ機器を構成したものである。

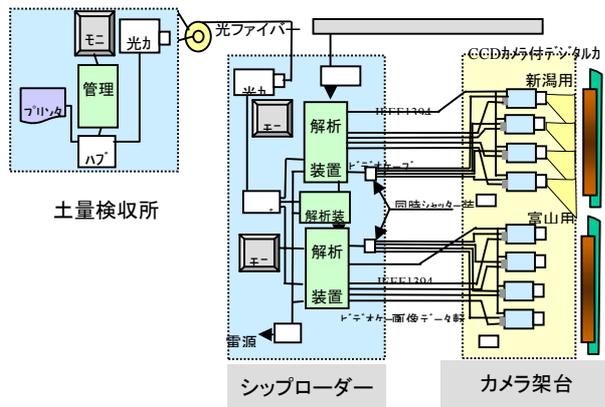


図-5 システム構成図

(3) 仕様

a) 対象土運船

～5000m³級土運船

b) 船倉幅

最大22m

c) 計測方法

デジタルカメラを使用したステレオ画像計測³⁾
(図-6 システムフロー図 参照)

d) 土量算出方法

- ・デジタルカメラにより撮影されたステレオ画像をパソコンにて自動マッチングさせる。
- ・土砂の積載形状と事前入力された土運船の寸法データを照合し、3次元形状を復元する。
- ・指定の土量計算方法にて積載容積を算出する。

e) 計測精度

1m間隔で断面を、その断面は20cmピッチで計測する。
計測精度は1%以内(理論積込土量比)

f) 夜間計測

土山表面で250lx以上の照度が必要

g) 視界

シップローダ上の運転席より土山の視認が可能なこと

h) トラブル対応

機器単体の予備を備えるとともに、システム全体が故障したときは、ベルトスケールまたはドラフト検収にて代用する。

(4) システムフロー

撮影から画像転送までは栈橋先端のシップローダ運転室で行い、画像処理、復元処理等は陸側の土量検収所で行っている。

a) 撮影

撮影はシップローダの運転室にてオペレータがベルコンの作動状況を見ながら撮影開始、終了ボタンを操作し、モニター画面にて正常に撮影されていることを確認する。撮影はシップローダから送られてくる信号により自動的に行われる。

b) 画像処理

一連の画像処理は土量検収所の解析装置により自動で行われるがオペレータにより確認する。不具合が見つかった場合は半自動に切り替えて処理する。

c) 復元処理

断面が正常に処理されているのを確認し、断面作成, 土量計算後帳票出力する。

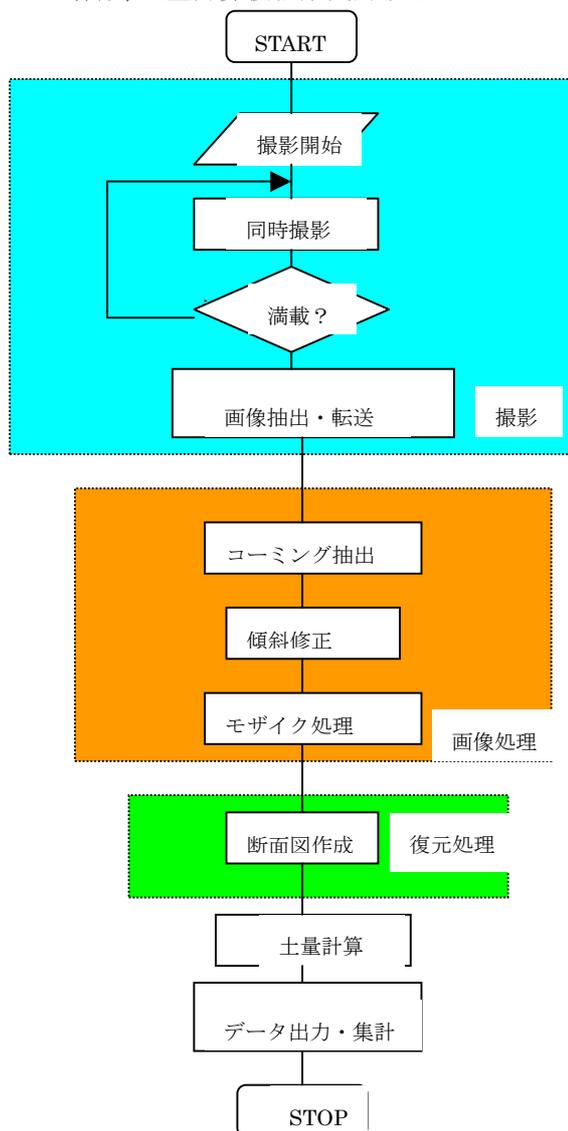


図-6 システムフロー図

(1) 土運船の船倉（コーミング）形状の自動抽出

写真測量を応用した土量検収システムでは、実寸の確認および、土運船の傾斜補正のためコーミングを利用している。

コーミングのある土運船では、解析装置が、1枚の写真の中で座標既知の基準となる点を自動的に見つけ抽出する。

コーミングは、コンピュータがコーミングを認識できるよう黄色く塗ったコーミングの内側に10cm幅の黒線を入れ、確実に黒線を識別できるようにした。

コンピュータは、前後の土山の画像から共通対象を見つけ出していたが、太陽光によるハレーション対策をより確実にするため、黒線に適宜、十字マークを入れることにした。

その結果、前後の同一点をコーミング上で容易に抽出できるようになった。



写真-1 コーミングの自動抽出例

4. システムの実用化

本システムの実用化にあたり、1) 土運船の船倉（コーミング）形状の自動抽出、2) 動揺する土運船の自動傾斜補正、3) 部分的に撮影した数枚の画像を自動的に合成、4) シップローダからカメラに伝わる振動の低減等を2回の実証実験を通して確立し、14年5月からの本格的運用に向け改良、実用化した。

土量検収結果を既存の検収方法と比較した結果良好な計測精度を得ている。

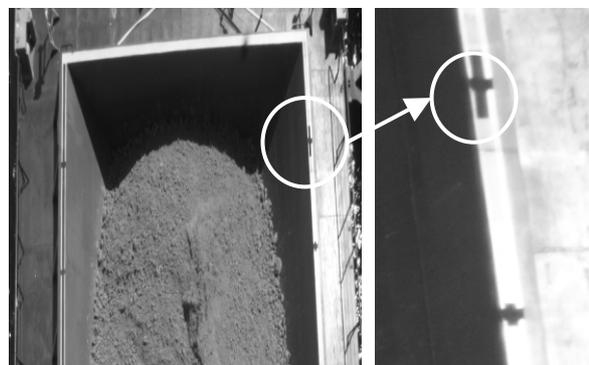


写真-2 ハレーション対策

(2) 動揺する土運船の自動傾斜補正

撮影した画像から土運船船倉の縁（コーミング）を自動抽出する。

あらかじめ登録してあるコーミングの形状から撮影した土運船のコーミング天端面を基準に傾きや方向を修正する。

土運船がどのような傾斜をしていても修正可能である。また、コーミング幅で長さを補正するので、土山形状を計測する誤差が小さくなる。

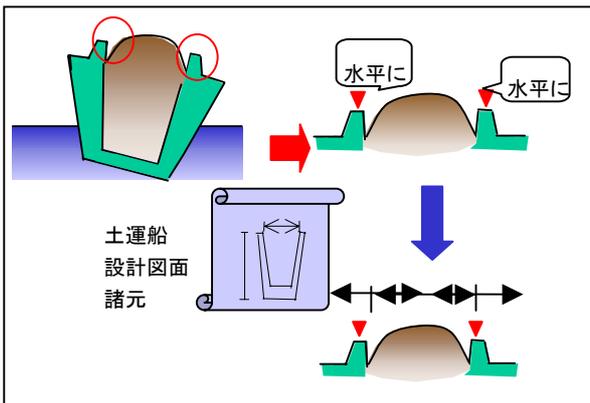


図-7 コーミング天端面による0レベル補正

(3) ステレオ画像処理

AUTO-3D ソフトを使用し、同時に撮影した2枚の写真（ステレオ画像）について、お互いの同一点を自動的に見つけ出す。左画像と右画像で明暗の類似値を求め、この値が最高になるときを一致したと見なす。（ステレオマッチング）左右2台のカメラの相互関係あるいは、対象土の数点の位置関係が判れば、解析装置にてラップしている2枚のステレオ画像から対象全域を3次元形状に自動復元できる。

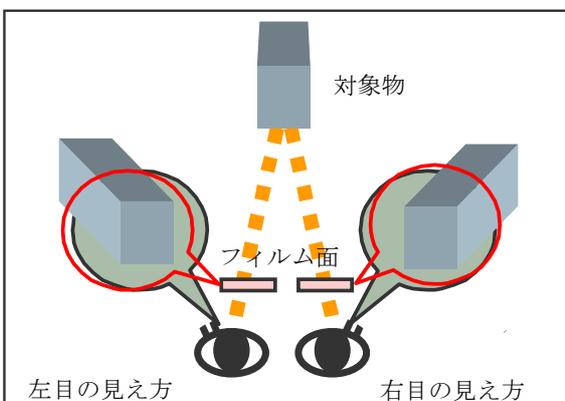


図-8 ステレオ画像計測概念図

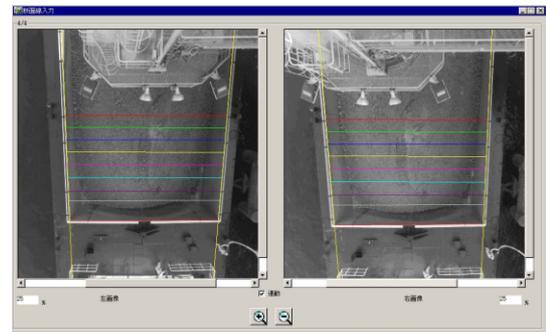


写真-3 ステレオ画像

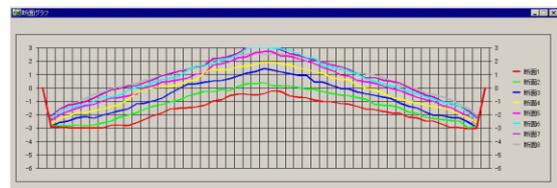


図-9 解析断面図

(4) モザイク処理

モザイク処理は、撮影した前後のステレオ画像をつなぎ合わせる技術のことである。

ラップしている前後の画像から相互の対応点を解析装置にて自動抽出し、画像をつなぎ合わせ、全体の土山形状をもとめる。検収用写真が必要であれば、つなぎ合わせた写真で代用できる。

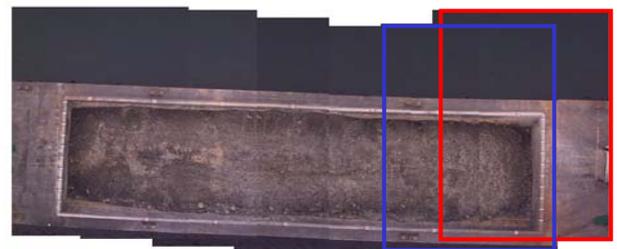


写真-4 モザイク処理例

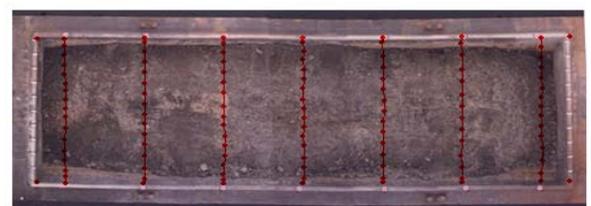


写真-5 検収写真

(5) 断面データの自動修正

写真測量を土量検収システムに適用するにあたり原理的な課題がある。それらは、断面図を自動生成したときに典型的な症状として現れる。

本稼働当初、その部分（特異点）をまず手動にて修正した。そして、そのやり方を経験則とし手動修正と比較しながらアルゴリズム化した。その結果、手動修正と実用に差し支えないレベルに達したことを確認した。典型的な症状として、鉄板や水溜による光の反射、日陰の濃淡がある。ここでは鉄板の自動修正の例を示す。

すべての空船、満載時の船首／船尾端等では、船倉の底に貼られ、錆止めした鉄板が剥き出しになっていた。鉄板の表面は凹凸に乏しい結果、光学的な陰影が鮮明でないため、ステレオマッチングする対象点が見つかりにくい課題があった。

鉄板上で間違っただステレオマッチングをした典型例を図-10 に示す。写真-6 をもとに下図のように断面図が自動生成されていた。修正前断面では、土運船データベースに登録された船倉の底より深く作図される傾向があった。船倉の底より深いデータについては、船倉の底に合わせ自動修正ソフトを作成した。



写真-6 ステレオマッチング例

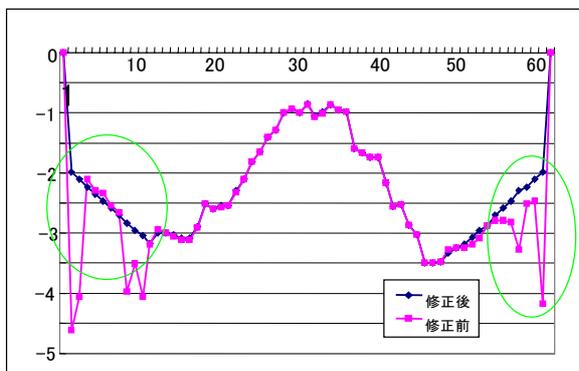


図-10 鉄板による断面データ

5. 検収実績

平成14年4月1日に運用を開始し、10月26日に終了した。平成14年度の検収実績を以下に示す。

(1) 対象土運船

平成14年度に使用した土運船は、密閉型5隻、底開型2隻、全開型3隻の合計10隻である。この内、密閉型は空船の残土を、全船とも満載土量を検収した。



写真-7 土運船運搬状況

(2) 検収実績

検収は7時に開始し、18時終了の1日10時間稼働で行った。

- ・検収総土量 3,091,241m³
- ・検収延べ日数 104日
- ・検収機会 1,313回
- ・検収実績 1,276回 (97.2%)
- ・検収時間 30分 (1隻平均)



写真-8 検収状況

(3) 土運船運航情報

土量検収システムでは、検収の対象とする土運船の識別番号および埋立工区を正確に入力しなければならぬ。運船の識別は、実際に船積設備に接舷している土運船の表示船名から認識する方法もあるが、早朝や日没後など現場条件によっては困難な場合が想定される。また、埋立工区の識別は船名からでは不可能である。したがって、土運船や埋立工区の識別は、土運船運航管理室から FAX で送られる予定表、および「土運船運航管理・工事情報システムのWWWサイト(土量検収所)」を閲覧し、必要に応じて土運船運航管理室との電話の交信によって確認する。

表-1 土運船運航情報モニター表示例

入域番号	識別番号	船名	工区	種別	工種	運航状況	核検到着	入域時刻	投入時刻	出域時刻	積載量	投入位置	投入方向	電話番号
101D	1	直江津	そのJUV	底開	直投	待機	8:30	10:30	12:30	13:00	2500	A120	135度	123-45-789
202D	2	直江津	そのJUV	底開	直投	検収	9:30					A121	135度	
303D	3	直江津	そのJUV	底開	直投	待機						A122	135度	
405D	1	新潟	そのJUV	底開	直投	投入								

相関係数(比重に相当)から平均単重および、標準偏差を求めると、

平均単重: 1.46tf/m³ 標準偏差: 0.029tf/m³

となり、比重が正確であれば代替検収となり得る。

但し、迅速に船と計測者の手配が必要である。



写真-9 ドラフト検収状況

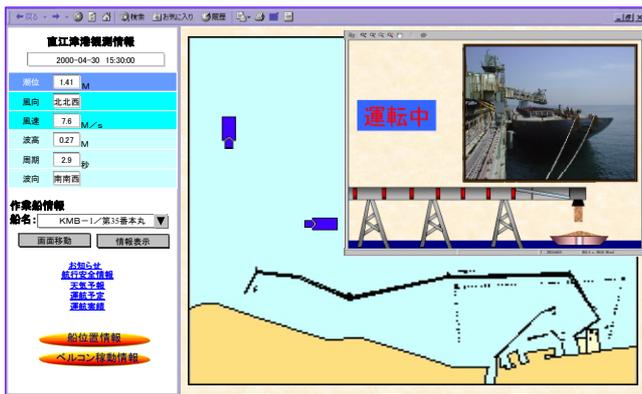


図-11 土運船運航管理 www サイト表示例

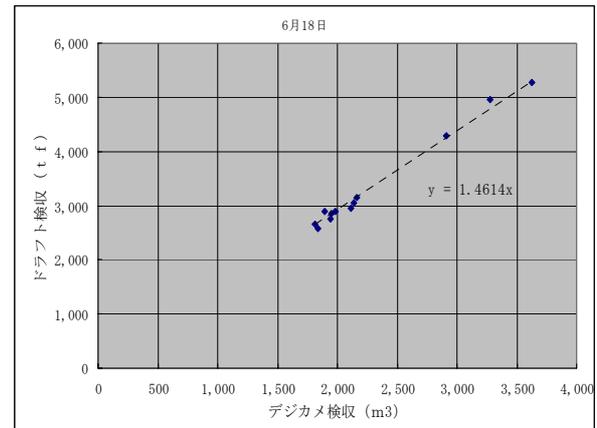


図-12 デジカメ検収とドラフト検収の相関関係

(4) 検収精度

土量検収システム(デジカメ検収)の精度の確認と土量検収システムが故障したときの代替検収方法の選定を目的として、土砂の重量計測としてドラフト検収およびベルトスケール検収、また体積計測として人力検収を比較検討した。

a) ドラフト検収と土量検収システム

図-12 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きわめて明確な相関があることが分かった。

b) ベルトスケール検収と土量検収システム

図-13 にベルトスケールとドラフト検収の測定結果を示す。これより、ベルトスケールは1隻の標準偏差が 29m³ であり、ドラフト検収と明確な相関関係にある。

また、ベルトスケールは1日の全体誤差が 0.63%と1%以内の測定精度にある。

ベルトスケールの精度は、1隻毎には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された。

また、1日単位でベルトスケールと土量検収システムの比較を行うことにより、単位体積重量の経時変化を検討した結果、単位体積重量は、降雨中と降雨後で高い値となり、一定の値とならない。

ベルトスケールと土量検収システムの値から、容易に積込時の単位体積重量を算出できる。

以上より、ドラフト検収により単位体積重量を適宜チェックしておけば突発的な故障時に代替検収が可能である。

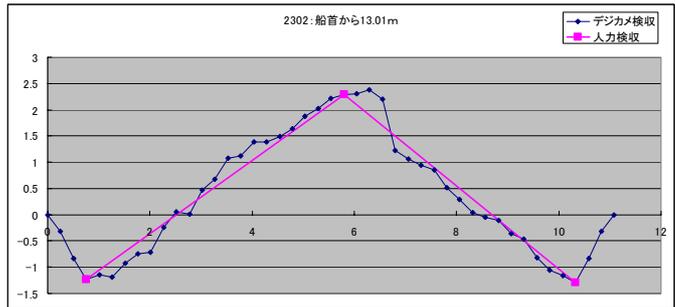


図-14 土量検収システムと人力検収の横断面の相違

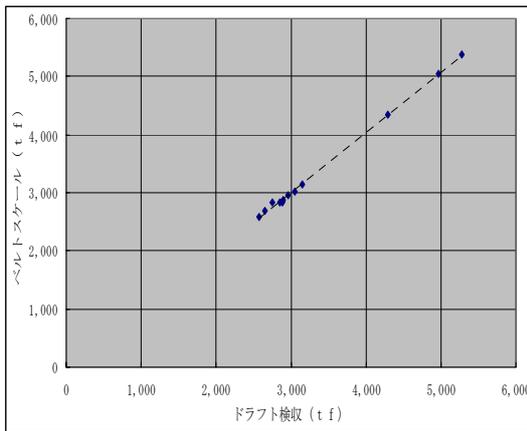


図-13 ベルトスケールとドラフト検収の相関関係

c) 人力検収と土量検収システム

14年度に使用する10隻の土運船について各1回の頻度で、満船時の人力検収を実施した。

図-14に示すように人力測定の見本数とほぼ同程度の見本とした結果、土量の差は、平均で0.23%、最大で0.96%であった。これより、土量検収システムは適正な精度を有することが確認された。

代替検収については、作業性、安全性、効率面から比較すると劣るため除外した。



写真-10 人力検収状況

6. おわりに

本土量検収システムは、コスト削減を目的に写真測量を応用したシステムとして開発提案されたものであり、実用化にあたってはシップロダーの振動、海上における風雨等の厳しい現場条件を克服し、自動処理における思考錯誤を繰り返し、実用化されたものである。

今後、類似の大規模埋立工事や大規模陸上土工事等において、低廉かつ高精度で安全なシステムとして広く活用されることを期待する。

最後に、本件の開発検討、実証実験に関し、積極的にご協力、ご支援戴いた皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 建設の機械化 94'2 (No. 528) 奥田、平松
- 2) 現代測量学 写真測量① 日本測量学会
- 3) 写真による三次元測定 日本写真測量学会編 共立出版