

大規模沖合人工島建設における埋立土砂搬入量の検収システム － 光波を利用した検収システムの開発と現地への適用 －

関西国際空港株式会社 (正会員) 高 井 俊 郎
関西国際空港株式会社 (正会員) 及 川 研
東亜建設工業株式会社 合 田 耕
MBCエンジニアリングサービス株式会社 渡 田 正 之

はじめに

関西国際空港の護岸及び埋立工事においては、約1億8,000万 m^3 という大量の山砂が土砂採取地から土運船により海上輸送され、埋立予定地に投入される。その頻度と量は、ピーク時1日当たり80隻程度で、20～25万 m^3 にも及ぶ。これらの土砂搬入量を正確に、効率的にかつ安全に検収するために光波を利用した検収システムを開発し、現地に適用してその有効性を検証した。

1. 関西国際空港建設工事における大量急速埋立施工

関西国際空港は、24時間供用可能な空港として大阪湾泉州沖5Kmに建設中の世界初の本格的海上空港である。空港島の工事は昭和62年1月末に着工され、平成元年5月末に外周の護岸が完成した。現在平成5年3月末の開港を目指して埋立工事を進めている。

空港島建設の技術的特徴としては、大水深（平均水深約18m）、軟弱地盤（約20mの沖積粘土層とその下に数100mにわたる洪積粘土層）という条件下における空前の大量急速施工（延長約11Kmの外周護岸を約2年、約500haに及ぶ埋立を約3年で施工）があげられる。

埋立工事の施工手順は、図-1に示すとおりで、（-3m）までの埋立は底開バージによる直投により実施されるが、それ以上は吃水の関係から底開バージの使用が不可能なため、揚土船により実施される。土砂の供給地は、図-2に示すように兵庫県淡路島、大阪府阪南町箱作地区および和歌山市加太地区の3ヶ所で、約1億8千万 m^3 の山砂が各地区から概ね3分の1ずつ供給される。

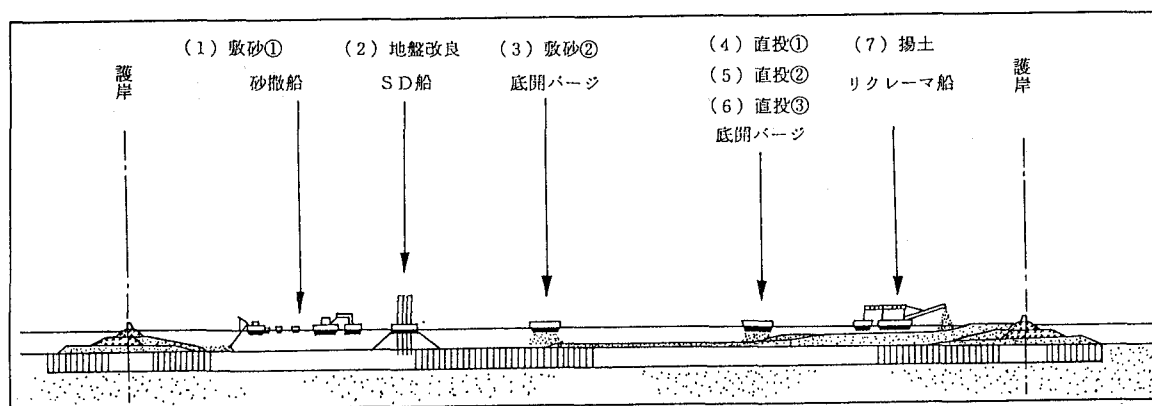


図-1 埋立工事の施工手順

2. 既応の検収方式と問題点

関西国際空港の埋立工事においては、軟弱地盤上の大量急速施工のため、沈下量が大きく、また、過去において施工事例が少ないことから、設計出来高に対しての土砂の必要量をあらかじめ精度よく定めることは困難である。そのため、発注者、請負者双方の危険度を考慮し、発注者が搬入時の数量を確認し、精算する方法で対処することにした。

土量を計測する方法としては、①容積を直接計測する方法と②重量を計測し、容積に直す方法が考えられる。②の方法では土運船の吃水を計測する方法、土取場のベルトコンベアに設置されたベルトスケールで計測する方法が考えられるが、重量から容積に換算する際に使用する単位体積重量のバラツキにより精度が悪くなるため、①の容積法を採用することにした。

空港島建設工事の初期の段階では、護岸工事が先行し、これに必要な石材及び山砂は淡路島から供給された。これらの土量は比較的少なく、昼間の工事に限定され、かつ淡路島の6ヶ所から供給されたため、土量の検収は、土運船が空港島の周辺海域に近づいた際に検収員が土運船に乗り移り、スタッフを使用した人力検収で実施され

た、人力検収方式は、既に確立された方法で多くの実績があり、信頼性が高く、直接容積を計測するため精度が高いなどの特徴を有している。しかし、埋立工事の本格化に伴い、入域する土運船の隻数が80隻/日程度に増加すること、夜間工事が始まること、大阪府阪南町及び和歌山市加太地区から土砂が集中的に供給されるようになることなど情勢が大きく変化することになったため、人力検収方式では検収作業の安全性を確保し、迅速で安定的な検収を遂行していく上で問題の生じることが予想された。このため、新しい情勢に対処しうる新しい検収方式を開発する必要性が生じた。

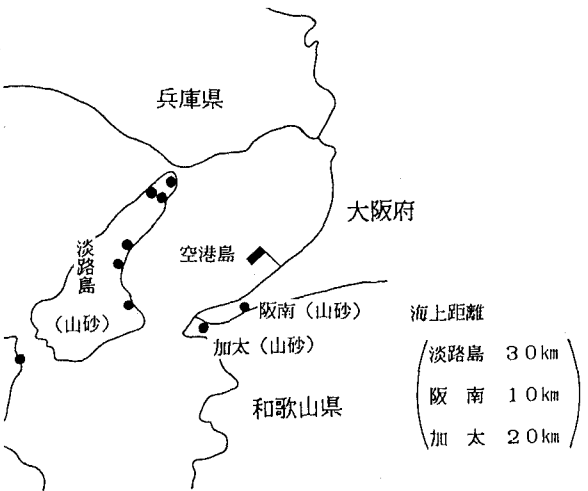


図-2 埋立土砂の供給地

3. 新しい検収システムの開発

(1) 基本的考え方

新しい土量検収システムは、①安全性が確保されること、②計測精度が高いこと、③実行性があり、効率が良いこと、④経済的であること、という条件を満たす必要がある。これらの条件に合致し、早急に実行可能な方式として、光波方式及び写真方式があげられる。両方式の計測方法、特徴及び問題点を整理して表-1に示す。表-1には比較のため既収の人力方式も加えてある。

両方式には甲乙はつけがたいが、写真方式の場合ランニングコストが比較的高く、夜間にはストロボを使用するため周辺海域で操業する漁業関係者の同意を得ることが困難であること等の理由から近赤外線を利用した光波方式を採用することにした。また、検収場所は、空港島周辺海域にタワーなどの固定した装置を設けることが困難なため、和歌山市加太地区及び大阪府阪南町の積出し栈橋で行うことにした。

表-1 検収方式の比較

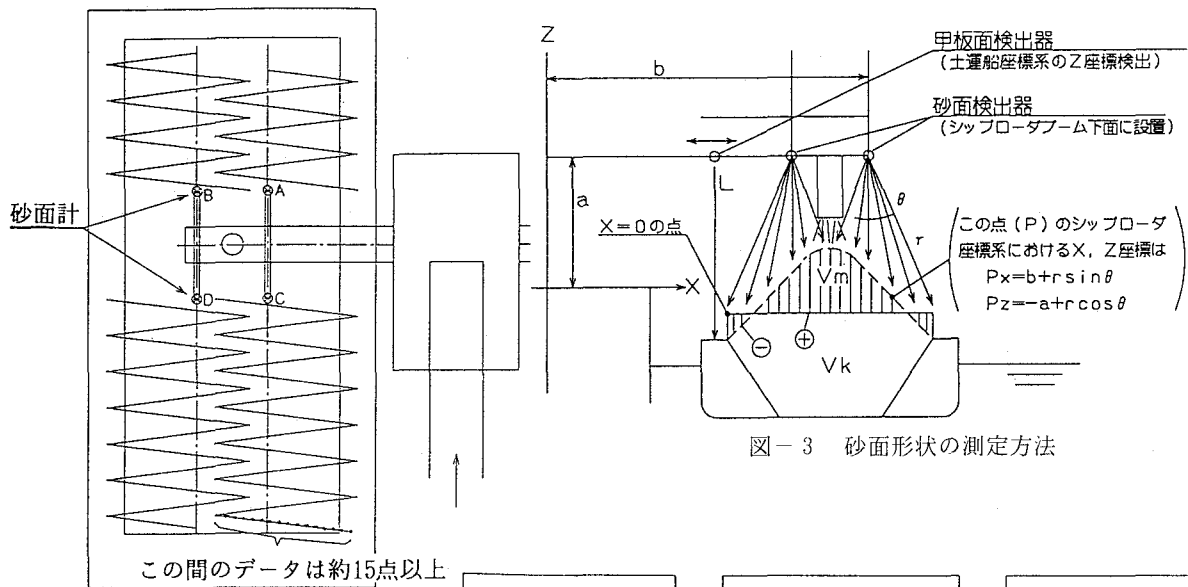
検収方式	光 波 式	写 真 式	人 力 式
計測方式	光波が物体に当り反射してくる時間を計測し、その位相差より形状を求める	撮影した写真を解析して立体像を求める(写真測量の応用)	計測員が土運船上でレベル測量により形状を求める
計測場所	積出し栈橋	積出し栈橋	空港島周辺
特 徴	・夜間での計測に対して安全 ・計測時間が短く、効率的 ・計測の確認が計測時に可能	・同左 ・同左 ・写真測量として既に確立された技術	・既に確立された方法で、多くの実績がある ・計測・計算が簡単にチェックが容易 ・公認された第三者が行うので中立
問 題 点	・機器の故障等に備えバックアップが必要 ・振動により計測データ・通信に支障が生じることがある	・同左 ・計測の確認がフィルムの現像時点になることから遅れる ・夜間ストロボをたく必要があるため漁業者の同意が難しい ・ランニングコストが大きい	・海上での人力作業のため、早朝・夜間において安全上不安 ・人力作業のため、大量処理するには不向き

(2) 光波式土量検収システムの構成

光波式土量計測システムは、光波式砂面検出器を用いて土運船に積載された土砂の任意の点の砂面高さを多数検出し、そのデータを使って土量計算を行い、検収に必要な土量と管理データを提供する新しい検収方式である。

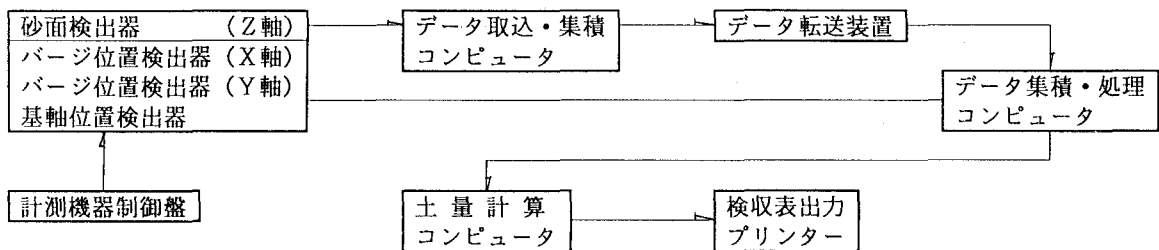
本方式の基本原則としては、「光波が物体に当り跳ね返ってくる時間をマイクロプロセッサで計測し、その位相差より距離を求める」ことを利用したもので、この検出が可能な光波式砂面検出器の開発が本システム構築の基礎となっている。システム構成の主な要件は以下の通りである。

- ① シップローダー座標系(固定座標系)に設置した計測器より土運船に積載された土砂の砂面高さ及び船体の平面的な動きを3次元(X, Y, Z)データとして捕捉する機能
- ② 土運船はシップローダー座標系(固定座標系)に対して、波等の影響により任意の動きをするため、土運船系座標(X', Y', Z')への変換機能
図-3に砂面形状の計測方法、図-4に座標変換の手順を示す。
- ③ 3次元で捕捉したデータを経時変化の中で同期したデータとして管理出来る機能
- ④ 計測したデータを時系列毎に取込出来る機能
- ⑤ 取込データを1カ所に集積出来かつ転送できる機能
- ⑥ 座標変換データを基にガウス関数近似法により土量計算する機能
- ⑦ 土量計算結果を検収表として出力する機能



機能面から見たシステム構成の内容を満たすためには、装置（ハードウェア、ソフトウェア含む）の組立が必要となるが、これらは図-5に示すよう

に土運船の砂面、基軸位置等の座標系データを検出するセンサー群、砂面検出器等の制御装置、管理室からの計測指令及び基軸上で検出されたデータを管理室側に転送する光波データ通信装置、センサー群のデータ処理及び記録、土量計算と検収表出力等を管理するコンピュータ群より構成されている。

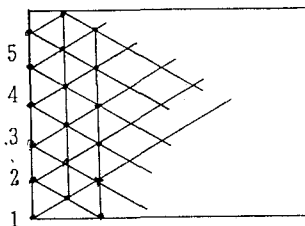


(3) 土量計算手法

本システムの中では、土量算定の過程において従来のシンプソン法とは異なり山口大学の田中等⁽¹⁾により開発されたガウス関数近似法を用いている。

ガウス関数を用いた計算手法は、中心が正三角形格子状に様に配置された多数のガウス型関数の一次結合により、土砂面の形状を推定しようとするものである。自然落下によって堆積した土砂面の形状は、多数のガウス関数の集合体とみなせる。一方(2)で述べた通り砂面形状の取得は、断面として行うのではなく、シップローダーブームの前後の動きと砂面検出器のスキャンングにより任意の点で行うため、各点の値をそのまま使うガウス関数近似法のほうが有効に活用できる。以下にガウス関数近似計算手法について述べる。

- ① ガウス基底関数の中心をバージ平面上に正三角形格子に一様に配置する.



$$g_i(x, y) = \exp \left[- (1/2) (x - X_i)^2 / \sigma^2 \right] \\ \times \exp \left[- (1/2) (y - Y_i)^2 / \sigma^2 \right]$$

ここに $1 \leq i \leq N$ N は 105 程度で十分な精度が得られる

(X_i, Y_i) はガウス型関数 $[g_i(x, y)]$ の中心座標

- ② 砂面形状の関数は、 $f(X, Y) = \sum C_i \cdot g(X, Y)$ となる。
 C_i (展開級数) は $C_1 \sim C_{105}$ まであり、これを各計測データ (約 1000 ~ 2000) を使って連立方程式として解けば C_i が求まる。但し、各展開係数 (C_i) は解がデータ数だけ求めることとなり、この多数の解を最小二乗法によって最適値としての C_i を求める。
- ③ 容積は、砂面形状の推定関数 $f(X, Y)$ を積分して、 $V = \int f(X, Y) dx \cdot dy$ として求めることができる。

4. 新しい検収システムの現地への適用

平成元年度において、和歌山市加太地区及び大阪府阪南町箱作地区の積出し棧橋に、前章で述べた光波式土量検収装置を設置し、計測を開始した。以下では、このうち、加太地区の積出し棧橋の検収事例について述べる。

(1) 土運船の運搬計画

加太地区の積出し棧橋においては、左右2つの棧橋によって1日当たり16時間の作業時間のあいだに、30隻程度の土運船により10万 m^3 程度の土砂を積出すように計画されている。一方、検収の対象となる土運船は、直投用の底開バージと揚土用の箱型バージの2種類あり底開バージにおいては満船時のみの検収で十分なのに対し、箱型バージにおいては土艀に残土が残るため満船時と空船時の2回に亘って計測する必要がある。この結果、検収の対象となる土運船の延べ隻数は45隻前後となる。

このような制約条件の下で、光波式による土量検収が付加されたことにより土運船の運航計画に支障を生じさせることなく、かつ十分精度のある検収が行えるようなシステムの実施設計を行う必要があった。

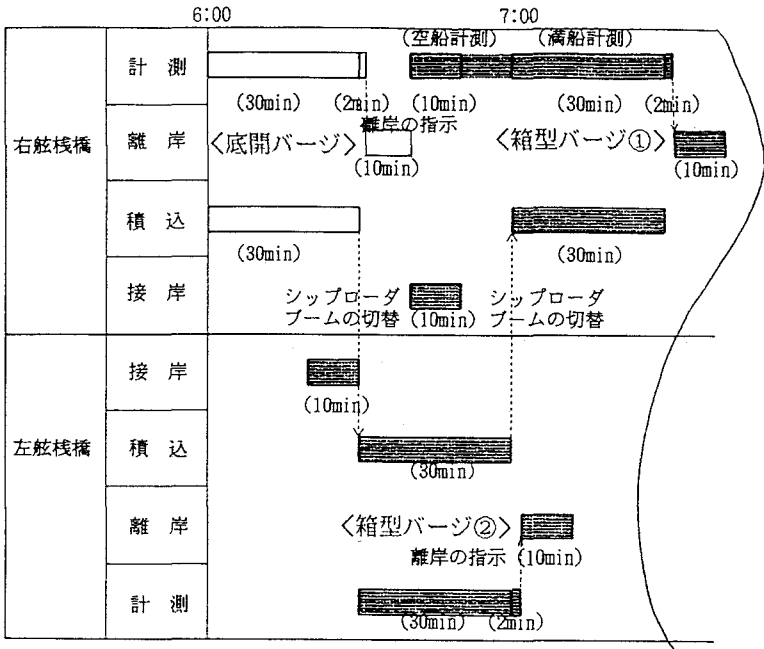


図-6 棧橋における積込・計測・離接岸のダイアグラム

(2) 検収システムの実施設計

加太における検収システムの実施設計においては、(1)で述べた土運船の運航計画を考慮し、①シップロダによる積込時に計測を行う。②積込終了直後にシャトルを既に着岸している反対側の棧橋に切り替える。③計測終了後、必要なデータが収録されたことを確認して離岸の指示を出す。④後続する土運船の接岸、箱型バージの空船計測は、もう一方で積込みされている間に行うことにした。これら一連のフローを整理して図-6に示す。このような設計を行うことにより、土運船の運航計画に支障を与えないで土量の検収を行うことが可能になった。

検収システムの全体装置図は図-7に示すとおりで、砂面検出器はシップロダブームに4台設置し、同器をX軸方向にスキャンさせて土運船の土艀内の砂面高(Z軸)を端から端まで計測できるようにした。またシップロダ座標系(固定座標系)と土運船との位置関係を同期に計測するため、ひとつの棧橋に対し光波距離計を利用した甲板面(Z軸)検出器を1台、横断方向(X方向)位置検出器を2台、縦断方向(Y軸)位置検出器を1台設置した。

現地の検収作業においては、計測が終了した段階で、土量計算を行うために必要なデータが収録されたかどうか確認し、できるだけ短い時間に、土運船に離岸の指示を出す必要がある。このため図-8に示すように計測点の3面投影表示を行い、これらの形状と、目視による結果とを比較し、判定することにした。投影表示と判定に要する時間は約2分で、非常に短い時間で離岸の指示を出すことができた。

最終的な土量検収表の出力までに約15分を要した。このため、ひとつの土運船の計測と土量計算を連続して行うことにより、後続の土運船の計測に支障をきたすことがないように、計測と土量計算は分けて行う(オフライン方式)方式も付加した。

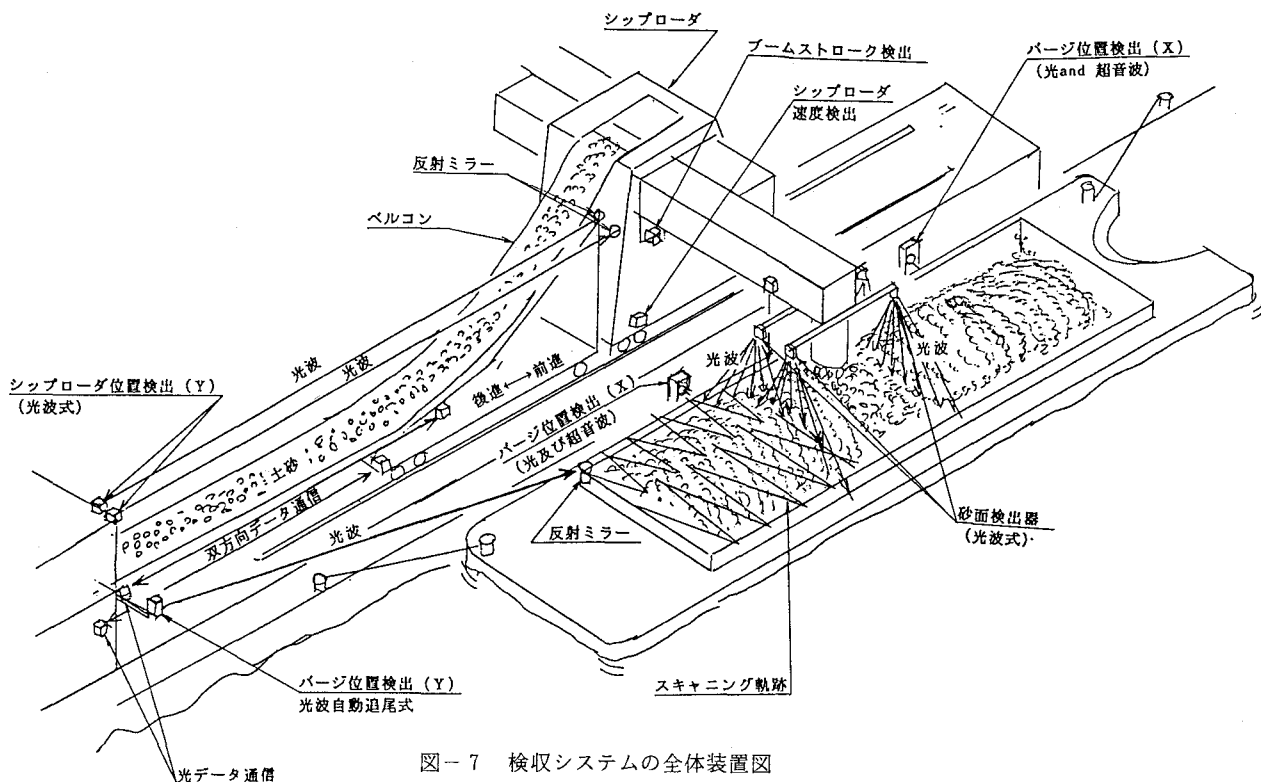


図-7 検収システムの全体装置図

(3) 試運転時に発生したトラブルとその処置

本格的な運用開始までに、試運転の期間を設け、すべての土運船に対応可能な検収システムを確立することにした。試運転時に発生した主なトラブルとその処置は以下のとおりであるが、これらのトラブルを経験することにより、ほぼ完全に近いシステムを確立することが可能になった。

- ① 土運船等が砂面計に接触したことにより作業が3回中断した → 砂面検出器に警報機を設置
- ② レーダー波のノイズによりコンピュータの作動に影響が生じた → 周辺に金属板等を設置
- ③ 積込時の微細粉塵により光波計のガラス面が汚れ計測不能となった → 小まめな保守管理
- ④ 搬送コンベアーの振動の影響で光データ転送装置の機能が停止した → 防振対策

(4) 検収精度と評価

光波式土量検収システムの精度を2つの方法により確認した。ひとつの方法は、陸上において実物大の土運船の模型を作成し砂面の計測は、シップローダを移動するかわりに模型をローダと同一速度で移動させるほかは、全く同一の方法で行ったものである。表-2はその結果を示したもので、満船状態、残土状態、空船状態ともすべて1%以下の精度が得られている。もう1つの方法は、現地において5隻の土運船をランダムに抽出し、1隻当たり4回の計測を行ったものである。その結果は表-3に示すとおりで、そのバラツキの範囲がすべて1%以下に収まり安定した計測がなされていることを確認できた。これらのことから、光波式土量検収システムは現地の土量検収において十分精度を有するシステムであることが確認された。

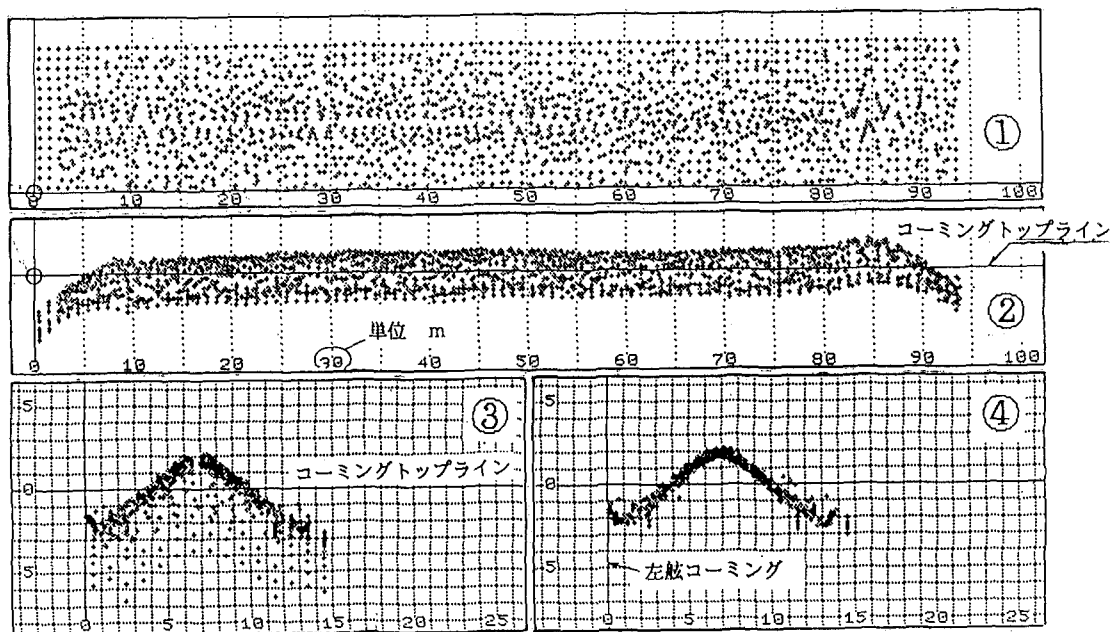
和歌山市加太地区及び大阪府阪南町箱作地区の積出し棧橋とも、既に運用を開始している。

表-2 実物モデルによる精度試験結果 (単位: m^3)

結 果	ケース	空 船		満 船
		残 土	空 船	
モデルの真の容積	2,330	153	2,330	3,221
計 測 容 積	2,336	135	2,195	3,230
計 測 誤 差 量	+6	-18		+9
精 度 (誤差量 モデル量 $\times 100\%$)	+0.26%	-0.77%		+0.28%

(注)1. 砂面計の移動速度は、現場条件に準じ10m/minとした。

2. 砂面計による計測方法は、スキャニング方式とした。



(注) ① は平面的なデータ位置を表示し高さは色分けで表示しているので等高線図の形となる。
 ② はバージを縦断方向にデータ全てを投影して見た状態。
 ③ はバージ中央より船首側を ④ は船尾側を横断方向にデータ全てを投影して見た状態。

図-8 データ収録確認のための投影表示

5. まとめ

1～4の結果をまとめれば、次のとおりである。

- ① 関西国際空港の建設工事のように、軟弱地盤上の大量急速埋立の場合には、正確、安全でかつ効率的に土量検収を行うことが必要である。
- ② 建設工事の初期の段階では、人力検収方式により実施していたが、埋立の本格化に伴い土運船の隻数が増加しかつ夜間工事を行う必要性から、新たな検収方式として安全で効率的な光波式土量検収システムを開発した。
- ③ 光波式土量検収方式は、「光波が物体に当たり跳ね返ってくる時間を計測し、その位相差により距離を求める」ことを利用したもので、光波式砂面検出器を開発することにより可能になった。
- ④ 土量計算は、砂面検出の方法に合致する方法として、ガウス型関数を用いた近似法により行った。
- ⑤ 現地への適用に当たっては、土運船の運航計画に支障をきたさないよう、計測方法、計測時間、計器の設置等に種々の工夫を行った。
- ⑥ 現地における光波式土量検収は、種々の検討の結果、十分な精度を有することが確認され、現在運用を開始している。

表-3 現地精度確認試験結果 (単位: m^3)

	1回目	2回目	3回目	4回目	平均
A 船	4,207	4,200	4,187	4,185	4,195
B 船	3,927	3,974	3,977	3,941	3,955
C 船	4,829	4,800	4,796	4,825	4,812
D 船	4,775	4,818	4,814	4,806	4,803
E 船	4,050	4,044	4,051	4,039	4,046

(注) 1. 試験方法としては、作業終了後棧橋に夜間係船している土運船の積載土量を4回に亘って計測した。

おわりに、本検収システムの実用化に当たり、適切なご助言をいただいた山口大学田中正吾教授、並びに現地において運用にこぎつけるまでに多大なご尽力をいただいた関西国際空港(株)建設事務所千葉忠樹係長に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 田中正吾・渡田正之・蒲地薫・中村譲：バージ積載量の自動計測について、電学論D，110巻3号，平成2年