

## 17. 高精度GPSを利用した建設機械の情報化施工システム

コマツ 永井孝雄 ○神田俊彦  
ハザマ 沖 政和

### 1. はじめに

建設機械の作業機を自動で操縦するユーザニーズは、30年以上前から存在していたが、主に水田の造成等に、回転レーザによるブルドーザのブレード制御が先ず実用化された。その当時はまだGPSはなく、やがて計測用に利用が可能なRTK-GPS受信機が登場したが当時は2000万円以上と高価で利用範囲はごく限られていた。本格的にRTK-GPSによる工事の施工が始まったのは1990年の無人化施工による雲仙普賢岳災害復旧工事（以下普賢岳）である。これを契機にRTK-GPSによる3次元計測システムの利用が広く認知され、その適用検討が始まったといえる。雲仙普賢岳災害復旧工事は大掛かりな工事であり、かつ試験施工も兼ねていたため、高精度なGPSによる地形の測量など今日の情報化施工につながる当時の最新技術が惜しみなく投入された。その結果、数多くの技術的な課題が明確になった。コマツでは、普賢岳用工事機械として自律走行可能なダンプトラックやラジコンブルドーザを提供すると同時に、これらの無人化施工システムを更に広くかつ容易に使用できるように仕上げることに傾注し、これまでに数多くの危険作業現場で施工実績を積み上げてきた。普賢岳においては無人化施工という制約がRTK-GPSによる計測技術の進歩に多いに寄与したが、日本におけるその後の普及は計測器用途が中心で、RTK-GPSを機械に搭載した建設機械はまだ普及していない。今回紹介するシステムはコマツが開発し、ハザマがその初号機を兵庫県淡路市津名町佐野・生穂地区150haの土砂採取事業の跡地造成工事に於いて2年間に渡って使用し、その間に改良を行った成果である。

一方で海外では、大規模鉱山でRTK-GPSを搭載した鉱山機械での利用がまず1995年から始まった。対象になったのが、発破のための穿孔機械、リクレーメーションに使用する大型ブルドーザと超大型積み込み機であった。いずれの機械もRTK-GPSを搭載し、機械そのもので位置計測を行い、超大型機械を計測のため止めることなく稼働させる事を可能にした。更に積み込み機の場合には、鉱山生産管理コンピュータの指定どおり掘削する

ことが出来、容易に鉱石の品位を一定に保つことが可能になるため、多いにコストダウンにも寄与する。鉱山管理システムの代表的なサプライヤであるModular Mining Systems社などから各社の鉱山機械に装着するシステムが普及している。

鉱山機械から5年ほど遅れて土木工事用の建設機械にRTK-GPSを搭載するシステムが登場してきた。北米では昨年から急速にブルドーザとモータグレーダへのRTK-GPS搭載が目立ち始めた。日本ではRTK-GPSのコストが建設機械そのもののコストに比べて割高であることや、鉱山機械に比べて年間稼働時間が少なく償却コストが割高になることから本格的な普及はまさにこれからという段階である。本論文ではRTK-GPSを使用したブルドーザとモータグレーダの作業機を自動制御するシステムを先ず紹介する。さらにシステムを使用したときの効果をコマツやハザマの社内試験施工結果から紹介し、今後のRTK-GPSを使用する工事（以下GPS施工）普及に寄与したい。

### 2. 開発のねらい

GPS施工システムは、地上に設置するGPS固定局とそのデータ送信無線局、建設機械と搭載するGPS受信機と固定局データ受信機、さらに3次元設計CADデータを連携して操作する必要があるため、従来は主にこれらのシステムを施工業者が直接GPSや無線機、CADシステムをそろえてシステム構築と建機への装着作業を行っていた。これまでは建機への装着作業は標準化されておらず、油圧回路への追加工や作動油のオーバーヒート、電気配線の断線やショート等で問題を起こしたり、注文のたびに異なる部品やソフトのバージョンなどを管理するため、専門家をおく必要がある等、改善を求められる点が多い。このためこれらの作業の一部をシステム化して施工業者から一括して受注する会社も出てきたが、肝心の建機への搭載作業は、数多くある機種ごとに設計することや性能の作りこみなどは不可能であった。

本開発のねらいは、施工者が工事に必要な建機を選定する感覚で、GPS施工に必要な機材とシステム

1. あらゆる現場に対応するパッケージシステム商品（ワンストップショッピング対応）
2. コマツ建機に対応する、共通化され、コスト改善されたシステム
3. コマツ建機で最高に性能を発揮するように開発された自動制御システム
4. RTK-GPSには米国とロシアの衛星が受信可能なトプコン製を使用して稼働率が高い

を調達することが出来るようなシステム商品化、ワンストップショッピング化であり、施工者はシステム構築の為に要員や多くの専門メーカーとの折衝要員を必要とせずに購入と使用を可能にすることである。またその結果、これまでは規模が小さく適用が困難であったような工事現場にも、気軽に GPS 施工システムを投入できるようにすることである。

そのため弊社は、これらの個々のシステムを総合的に一体化し、フルラインメーカーの強みや自前のエレクトロニクス部門を持つ強みを生かし、システムコンポーネントを組み合わせることにより、小規模から大規模な現場で使用される、ブルドーザ、モータグレーダの主要機種に対応できるシステムを開発した。図1に従来と本システムの比較、表1に本システム構成と対応機種を、本開発の特長を前ページにまとめる。

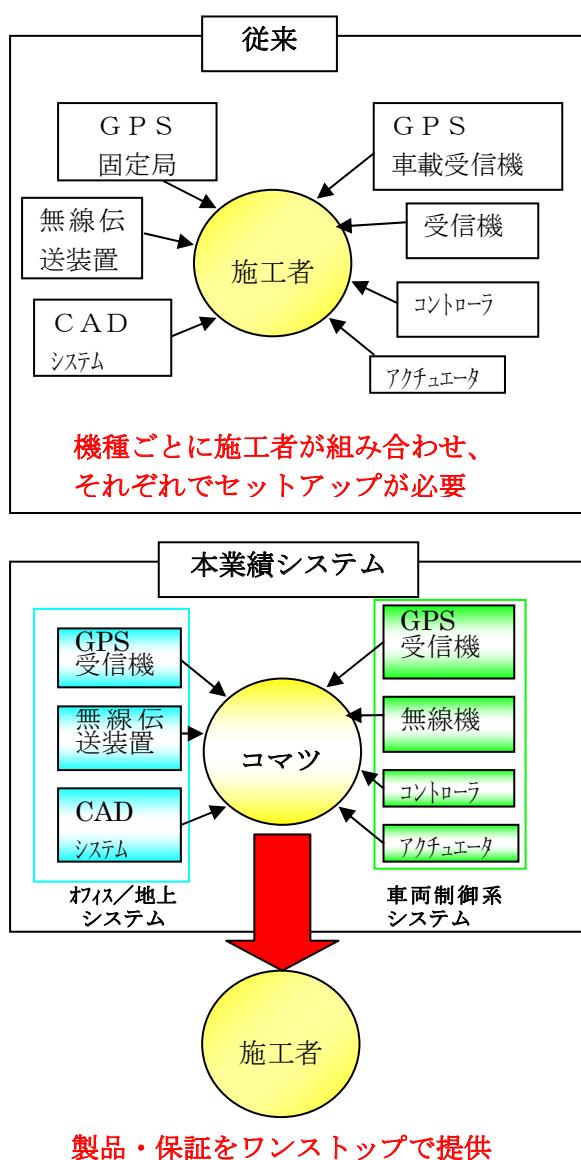


図1 従来と本システムの比較

表1 本システム構成と対応機種

| 区分       |        | 内容                                                                           |
|----------|--------|------------------------------------------------------------------------------|
| オフィスシステム |        | 3D-CAD                                                                       |
| 地上システム   |        | GPS受信機<br>無線伝送装置                                                             |
| 車載システム   |        | GPS受信機<br>無線受信機<br>コントローラ<br>油圧アクチュエータ                                       |
| 対応機種     | ブルドーザ* | D31-21, D37-21, D39-21,<br>D61-15, D65-15, D85-15,<br>D155-5, D275-5, D375-5 |
|          | グレーダ   | GD555-3*, GD655-3,<br>GD675-3*                                               |

\*) 海外向け機種

### 3. 技術的説明

#### 【システム構成要素】

パッケージシステム商品は大きく区別すると、表1に有るようにオフィス系、地上系、車載系の各システムに大別され、これらを必要に応じて組み合わせて提供している。

オフィス系のシステムは、3次元 CAD システムである。本システム専用の 3D-CAD である必要はなく、施工計画図を TIN (三角メッシュ) ファイル形式で出力出来るものであればいずれの CAD も使用可能である。従来は 3D-CAD 専用機が必要であったが、機能向上と低価格化の目覚ましいパソコン上で作動するものが主流となっている。本システムでは、コマツが開発した砕石 CAD i-ROCK®のプラットフォームとして採用し、汎用 CAD として業界標準となっている Autodesk 社の AutoCAD®を提供する事とした。これにより、ソフトウェアの提供、教育、サポート、また各種図面の作成請負も提供可能と成っている。

地上系のシステムは、GPS 受信機と補正信号送信用の無線伝達装置から成っている。高精度 GPS の計測手法には RTK-GPS を採用することとし、後述する GLONASS 衛星も受信出来る株式会社トプコン (以下(株)トプコン)製の GPS 受信機とコントローラを採用している。

車載系のシステムは、フルラインナップメーカーとしてのコマツの強みを生かし、GPS 施工システムを大型から小型までのブルドーザおよびグレーダの各機種共通のプラットフォームとして開発した。これにより、車載するコントローラ、GPS アンテナ、GPS 受信機、無線機、ケーブル類の共通化を実現し、コストダウン、補給性の向上、また、異なる車格間での操作性の共通化による使い勝手の向上を実現した。次に詳細を述べる。

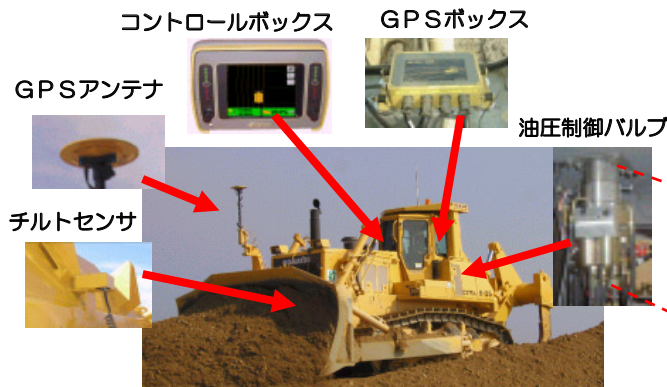


図2 建機搭載システム

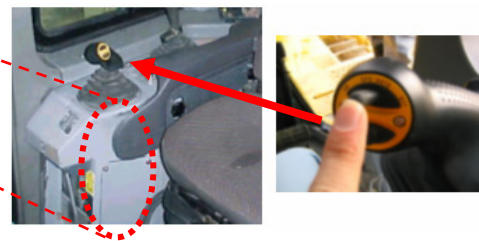


図3 自動／手動の切り替えSW

#### 【建機搭載システム】

作業機（ブレード）の水平・垂直位置検出には、RTK-GPSにより、米国が運用しているGPS衛星とロシアが運用しているGLONASS衛星を併用できるシステムとなっている。ブレード背面に装着している傾斜計によりブレードの傾きを検出している。

施工設計データは、3次元CADを使用しTINファイル形式で作成し、オペ席前方に設置したカラー表示器と制御ユニットの一体型のコントロールボックスにインストールする。施工設計データのインストールには、デジタルカメラなどにも使用されているコンパクトフラッシュメモリを使用しており、特殊な機器などは不要である。

コントロールボックスのカラー表示器には、施行設計図面上に建設機械の現状位置をリアルタイムで更新表示し、オペレータが常時作業状態を確認出来るように成っている。

また、一方でコントロールボックスは、施行設計データとブレードの位置・姿勢をリアルタイムで比較し手動操作と自動制御一体型のコンパクトなバルブを駆動する事により、ブレード制御を行っている。

このバルブは、本システム用に開発された物であり、コンソール内に内蔵され外部への露出もなく、作動油温のオーバーヒートも皆無となっている。

自動／手動の切り換えは、ブレード操作レバー上に設けた切り替えSWで行い、レバーから手を離さずに手動／自動の切り換えが常時可能であり、違和感なく使い操作性の優れた物となっている。

#### 【建設機械の作業機制御について】

本システムでは、ブレードの上下動作を制御するメインバルブをコントロールバルブで制御するシステムであり、図4に示す構成となっている。

ブルドーザの場合、ブレードは車体の前方に配置されておりブレードが整地した面を走行する。前後

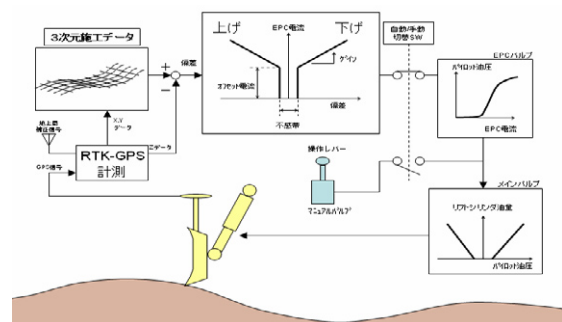


図4 GPS ドーザの制御ロジック

方向の車体の仮想的な回転中心を履帯の接地面後端部とした場合、履帯前端部までの長さをC、ブレード刃先までの長さをLとすると、その比は1以上となる。図5参照。

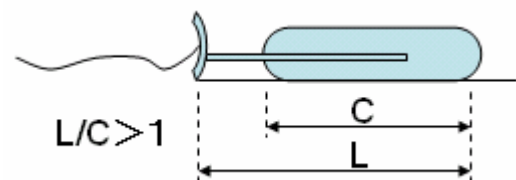


図5 ブルドーザの場合のブレード刃先位置

この場合、GPS位置計算遅れや油圧バルブ応答遅れ等により、履帯の僅かな上下変化がブレード刃先位置では大きく変化することになり、通常のフィードバック制御では発散して仕舞う場合がある。本システムでは応答性の良いEPCバルブを開発しブレードの制御応答性を確保し、ブレード目標位置での不感帯を設ける事により、不要なブレード動作を抑制する事により静定性を実現している。

グレーダの場合は、LC比が1以下（図6参照）であるので安定系で在るが、より施工精度の高い作業が要求されるため、ブルドーザと同様にブレード制御応答性の早さと、ブレード目標位置での静定性が求められる事には変わりはない。



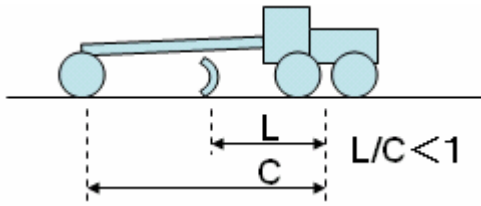


図6 グレーダの場合のブレード刃先位置

#### 【GPS+GLONASS のメリット】

本システムでは、29機が稼働中の米国の GPS (Global Positioning System) と 13機<sup>\*1</sup>が稼働中のロシアの GLONASS (Global Navigation Satellite System) の両衛星からの電波を活用することが可能である。

高精度 GPS 計測には、最低でも5機以上の衛星が天空に可視状態で飛来している必要があり、またその配置も分散している事が望ましい。しかしながら、GPS 衛星だけを使用している場合は、時間帯によっては可視衛星が5機未満と成る場合があり、この時間帯での高精度 GPS 測位は不可能となる。よって、GPS 衛星に GLONASS 衛星を補完することにより、可視衛星数の増大し高精度 GPS 計測が可能となる。図7にグラフで示す。

また、GPS の軌道面傾斜角が 55° であるのに対し、GLONASS は 65° の傾斜を持つため、高緯度地域では GLONASS を利用出来る事はさらに優位であり、頭上を飛来する確率が高く成る為、特に上空視界が遮られているような場所でも高精度 GPS 計測が可能となる<sup>\*2</sup>。

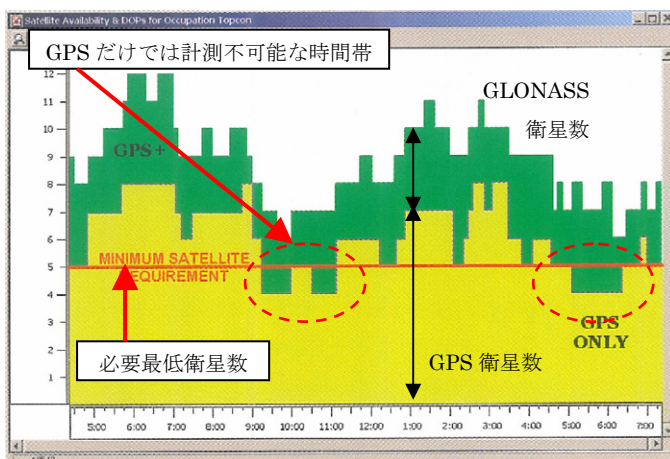


図7 可視衛星数の時間的変化 (㈱トプコン提供)

#### 4. テスト施工結果と考察

テストは最初にコマツ社内で行い、さらにハザマでも整地精度の確認と施工時間の手動と自動の比較について行ったので報告する。

#### (a) 平面整地の精度の確認結果

(コマツ 社内実験場)

整地精度の確認は、10m×20 or 30mの水平面を GPS 施工にて仕上げ、仕上げ面を光学レベル測量により計測し精度を確認した。

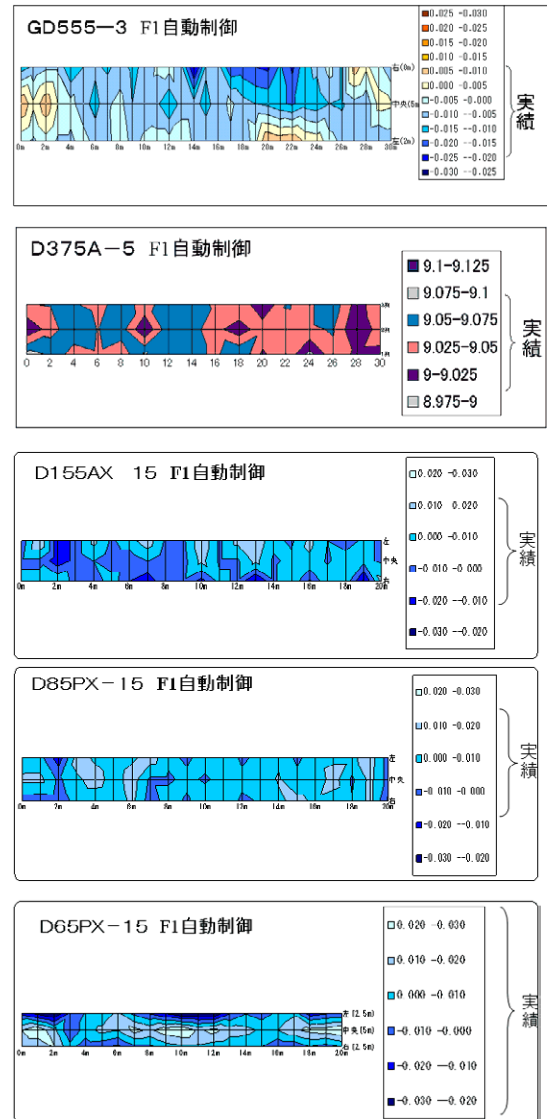


図8 整地精度テスト結果

モータグレーダ GD555-3 によるテスト結果は、+10～-26mm、大型のフルードザ D375 の結果は±5cmの範囲に入っており、続いて D155、D85 は±20mm、中型のフルードザ D65 は±30mm、という結果となった。整地精度の差はそれぞれの機種特性と RTK-GPS 測量誤差に依存したものと考える。

施工管理基準にもよるが、D375 は下層路盤整地に、D155、D85、D65 と GD555 は上層路盤整地に使用可能と考える。(RTK-GPS の測量精度誤差は±20mm 程度である。)

(b) 情報化施工と従来施工での施工時間比較と精度の確認 その1 (コマツ 社内実験場)

テストはD65を用い、図9に示すような高速道路ランプウェイ形状を模して行い、GPS施工による仕上げ精度の確認と従来施工とで施工に掛かった時間を比較した(表-1)。

3D-CADによるテスト施工設計図は、横幅8m、縦断勾配は20mの平坦路の後、8%一定勾配となり、で縦断勾配は20m~50mの区間で縦断勾配は0~9%まで連続的に変化する設計となっている。

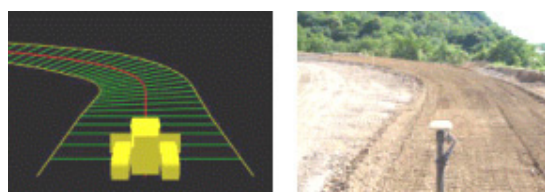
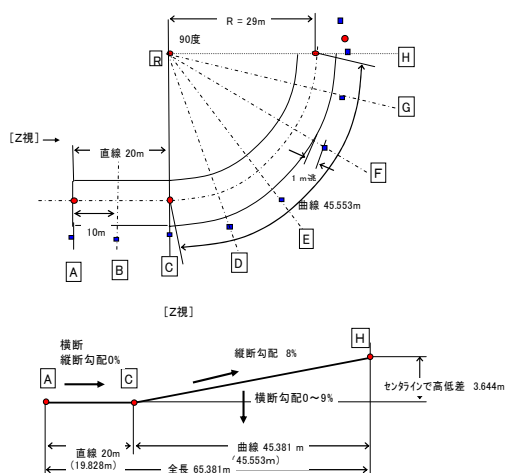


図9 施工図面と仕上がり形状

図11, 12, 13に、GPS施工テスト後の仕上げ面を光学レベル測量により計測した結果を示す。

図11に示すように、発進時から6m程度(約1車長分)は仕上げ精度に乱れが在り、本施工方法に於いては、1車長程度の助走区間を設ける事が有効で有ることが判る。また本来の道路形状では有り得ない設定であるが、水平面から8%の上り勾配への屈曲部に於いても精度が乱れる事無く、2車長以内に静定している事が判り、本GPS施工の有効性が確認出来る。

自動と手動での施工時間は表-2の結果となり、自動は手動に対し、丁張りで100%、施工で16%短縮し、丁張り・施工時間を含めた全行程では自動は手動に対し43%短縮している結果となった。

表-2 ランプウェイ形状施工 自動 vs 手動

丁張り、施工時間 テスト結果

| 項目                | 自動   | 手動        |
|-------------------|------|-----------|
| 人数、丁張り時間(h)、丁張り本数 | 0    | 3人 2h 12本 |
| ブルドーザ作業時間(h)      | 3.63 | 4.32      |
| 参考: 施工時間(h)       | 3.63 | 6.32      |

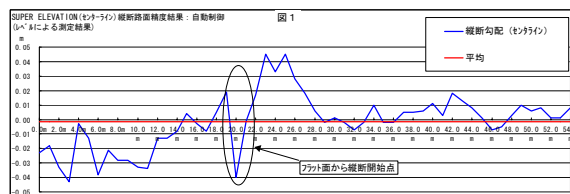


図10 センタライン縦断面での精度

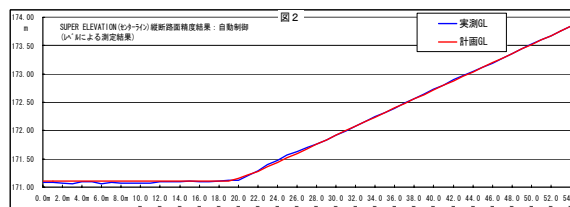


図11 センタライン縦断面形状

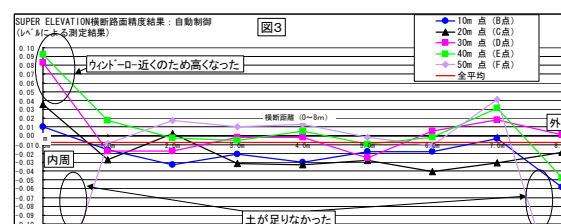


図12 横断面での精度



図13 テスト施工の様子

(c) 情報化施工と従来施工での施工時間比較と精度の確認 その2 (ハザマ 津名採土事業所)

50m×50m平面を盛土成形により水捌け勾配1%に仕上げる、GPS施工と従来施工それぞれのテスト(図14)について報告する。

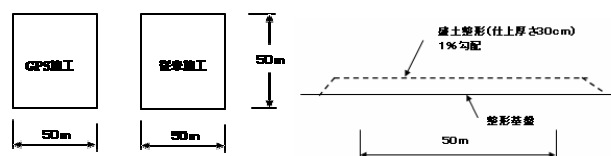


図14 テスト施工内容

各施工後地形を10mメッシュで光学測量し設計面との誤差を等高線で表した物を図15に示す。±5cmの施工基準範囲で面積比較すると従来工法の72%に対し89%と精度が向上している結果と

成り、本成果の有効性を確認できた。また、下段に参考として、施工基準を倍とした場合の比較では、従来工法の36%に対し61%となっている。

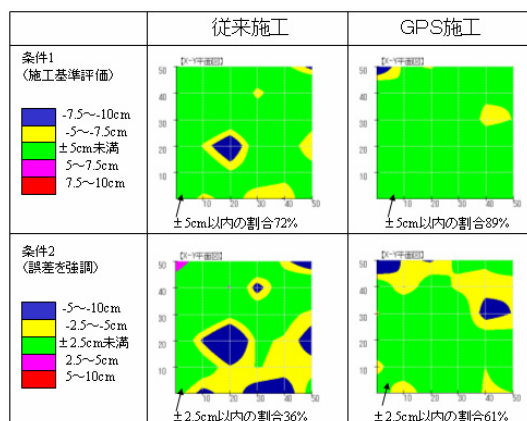


図15 テスト施工後地形

10mメッシュ計測での各点の誤差分布を従来施工とGPS施工とで比較した物を図16に示す。標準偏差計算し3σ値では、従来施工の13.5cmに対し、情報化施工では8.4cmという結果という結果を得ることが出来、有効性を確認出来た。

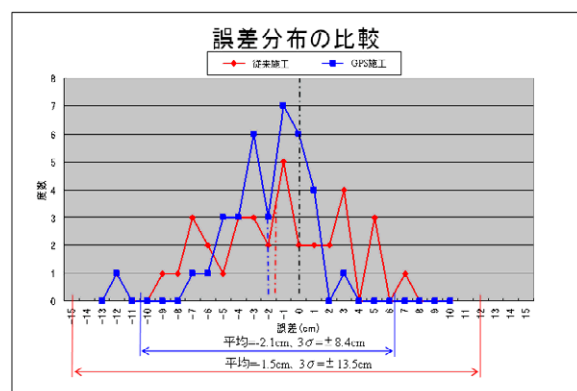


図16 誤算分布の比較

また、それぞれの工区の施行時間を計測した結果を図17に示す。従来施工に対して情報化施工では施工時間を46%短縮する結果と成った。丁張りは不要となり、測量作業も含めて3時間の節約ができ、1%勾配フラット盛土成形時間も1時間の節約となった。

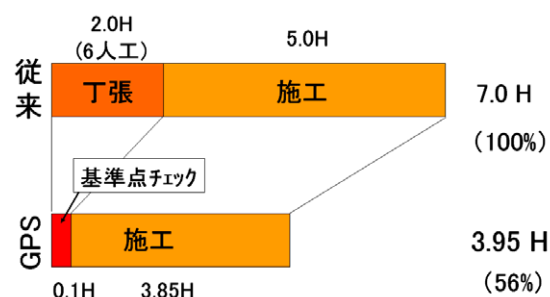


図17 施工時間の比較

## 5. 経済的効果

本開発により所謂ワンストップショッピングでのGPS施工を行う際の機材調達での対応が可能となったが、テスト施工を通じて得られた結果より以下のような経済的効果が得られる事も期待出来る。

①丁張りが不要であり、ブルドーザやグレーダの機械の作業効率が向上した結果、4割以上の工期短縮可能となる。また、これにより施工従事者の労務費削減が可能である。

②丁張り直し作業や、仕上げ面確認の為の再測量作業など稼働中の機械近傍での作業が不要となり、安全性が向上する為、安全確保に必要なコストをセーブする事が可能である。

③ブルドーザやグレーダの機械の作業効率が2～3割向上する為、燃料の節約が可能であり、これにより二酸化炭素排出量の削減も可能となる。

④誰でも複雑な施工を精度良く行う事が可能であり、熟練オペレータの減少に伴う諸問題、高賃金化対応、苦渋作業の低減、オペレータ減少による工事受注の機会損失の低減が可能である。

## 6. おわりに

情報化施工システムの進展は、先行する米国の例を見るまでもなく、今後日本国内でも益々盛んになる事は確実である。そのためには、さらに使いやすく適正な価格のシステムとすべく、ユーザの知恵や意見を元に、本システムの改善に取り組んでいきたいと考える。

最後に、本開発にあたり貴重な意見や資料のご提供と試験施工のご協力を頂いた㈱トプコン・㈱ジオススケープはじめ関係各位に感謝の意を表します。

### <参考文献>

- \*1 測量技術・建設技術審査証明報告書GNSS測量システム平成17年6月13日技審証第1701号
- \*2 James P. Reilly, PhD, A review of the evolution of the Russian GLONASS system, All the Birds in the Sky,雑誌 “POB” 2004年9月号
- \*3 神田俊彦：情報化施工に対応する建設・鉱山機械とそのサポートシステム、建設の施工企画、No. 654、(社)日本建設機械化協会、2004年8月号