

ICT浚渫工（河川）の出来形管理基準策定の検討

山口 敦久

姫路河川国道事務所 調査課（〒670-0947兵庫県姫路市北条1-250）

国土交通省は建設現場の生産性向上の施策としてi-Constructionを提唱し、そのトップランナー施策であるICTの全面的活用について、2016年度に開始したICT土工に続き、2017年度はICT舗装工並びにICT浚渫工（港湾）、2018年度は新たにICT浚渫工（河川）を開始した。ICT浚渫工（河川）の開始には、バックホウ浚渫船による面的な施工管理基準の適用を図る方法の一つに、MGバックホウによる施工履歴データの活用に着目した。実現場等での出来形により収集されたデータから現場実態を整理し、施工履歴データを用いた面的な出来形管理に対応した精度管理手法や規格値案を検討した。

キーワード i-Construction, バックホウ浚渫船, 施工履歴データ, MGバックホウ

1. はじめに

国土交通省が推進するi-Constructionのトップランナー施策である「ICTの全面的活用」については、3次元起工測量、3次元設計データ作成、ICT建設機械による施工、3次元出来形管理及び3次元データでの納品を行うものであり、2016年度よりICT土工として取組を開始し、2017年度にはICT舗装工及びICT浚渫工（港湾）が開始されている。2016年9月の政府の「未来投資会議（第1回）」では建設現場の生産性を2025年度までに2割向上させること等を打ち出している中、新たな生産性向上を図るため、対象工種の拡大が求められている。

このような状況のもと、河川の浚渫工事では、以前よりバックホウ浚渫船における情報化施工技術として、MGバックホウ（MGはMachine Guidanceの略）による河川浚渫での普及も進められており、3次元設計データを利用して行われるため、工程全体での効率化も期待できることから、2018年度より「ICT浚渫工（河川）」として取組を始めることとなった。

情報化施工技術のうち、MGバックホウ等のICT建設機械による施工では、丁張の削減や作業効率の向上等、様々な導入効果が得られるが、ICT建設機械の作業装置における施工中の軌跡（以下「施工履歴データ」とする。）を記録することが出来るものがあり、適切な精度管理を行ったうえでこの軌跡データを出来形管理に活用することにより、出来形管理作業の大幅な効率化・省力化が期待できる。特に施工中や施工後に降雨に伴う河川の水位増加等により、常にあるいは一時的に水面下に没する河床部分の掘削や、浚渫工における水底の掘削では、

レーザースキャナー（以下「TLS」とする。TLSはTerrestrial Laser Scanningの略）やUAV（UAVはUnmanned Aerial Vehicleの略）等の既存の出来形計測技術による出来形計測が困難であるが、代替として施工履歴データを活用した出来形管理手法を用いることにより、作業効率が飛躍的に向上する。

そこで、河川浚渫でのバックホウ浚渫船による施工履歴データでの出来形管理の適用を目指し、実現場等での出来形で収集されたデータから現場実態を整理し、施工履歴データを用いた面的な出来形管理に対応した精度管理手法や規格値案を検討した。

2. 施工履歴データの計測機器としての精度検証

図-1に施工履歴データの精度検証のイメージを示す。施工履歴データを出来形計測に使用するには、施工履歴の計測機器としての精度検証を実施する必要がある。これは過年度のバックホウ浚渫船現場における結果において、施工履歴データを用いた出来形管理結果が、トータルステーション（以下、TSとする。）やレッド測深による測定結果と比較して、40cm程度の差異が見られたためである。この要因の一つとして、実際の施工形状と施工履歴データによる出来形形状の違いが発生することが考えられ、これは連続的に取得される施工履歴データの取得間隔が疎であるため、実際の出来形と記録点間をつないだラインが適合しないことが原因であると考えられた。そのため、施工履歴データから求められる出来形

計測結果が実際の出来形形状に適合するために必要なデータ取得頻度や、計測前のICT建設機械の精度管理方法とその管理値について、真値（TSで計測された刃先の軌跡）と施工履歴データで比較検証を行うため、まず最初に施工履歴データの計測機器における精度検証を行った。

精度検証を行う項目は、MGバックホウによる静止状態での計測精度の検証（静的計測）、動作状態での計測精度の検証（動的計測）と実施工を想定した整形後の出来形と軌跡データの比較検証を行った。なお、実現場における精度検証は、現場条件の制約や時間的制約が大きく、誤差の原因が現場条件に起因するものか、ICT建機自体に起因する物かの切り分けが困難であるため、ICT建機の精度検証実験をテストヤードに於いて実施した。

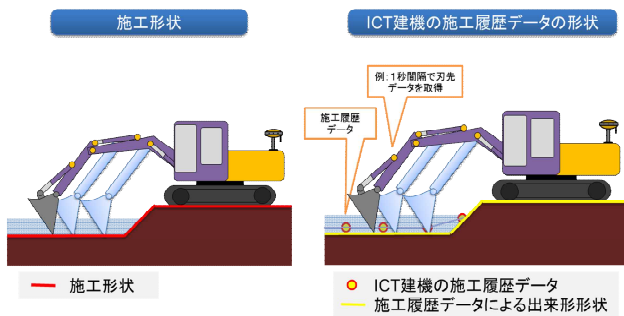


図-1 施工履歴データの精度検証イメージ

(1) 静止状態での計測精度の検証及び結果（静的計測）

a)検証内容

図-2に静止状態での計測精度検証内容を示す。MGバックホウのブーム・アームを最も開いた状態から、最も抱えた状態になるまで、10点の異なる位置でバケットの刃先を静止させ、各静止点で施工履歴データとTSで計測する刃先の三次元座標を記録し、両者の差を確認することにより施工履歴データの静止観測時の精度を評価した。

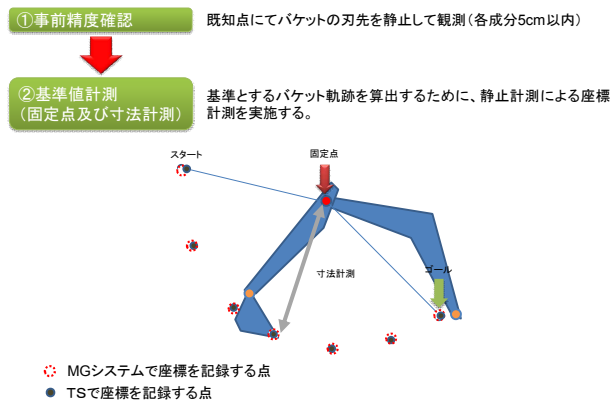


図-2 静止状態での計測精度検証内容

b)検証結果

図-3に静止状態での計測精度の検証結果を示す。静止状態で計測した施工履歴データとTSで計測した真値

との距離誤差は、最大で50mmであった。また、距離誤差の標準偏差は3σで33.6mmであり、ICT土工の出来形管理に適用できる精度の目安（3σ<50mm）¹⁾を満足する結果であるが、x、y座標のばらつきが大きい。

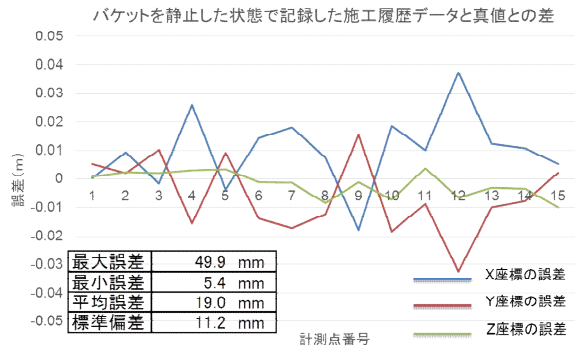


図-3 静止状態での計測精度の検証結果

この検証結果から、施工履歴データを用いた出来形管理に記載する精度管理方法として、以下の2点を記載する必要があると考えられた。

- ・河床掘削の施工を行う日の始業時に、ICTバックホウの刃先の位置をTSで計測し、計測される刃先の位置座標との差異から計測精度を確認することを施工者に課す必要がある。
- ・計測精度の管理値は、x、y、zの各成分について±50mmとする。

(2) 動作状態での計測精度の検証及び結果（動的計測）

a)検証内容

図-4に動作状態での計測精度検証内容を示す。バケット静止状態での精度確認により、3σで50mm程度以下の精度を有することが確認されたが、実現場において出来形管理に用いることを想定しているのは、施工中（バケット動作中）に記録される刃先の位置精度であるから、MGバックホウのバケット動作中の精度をTSの自動追尾計測（以下「自動追尾TS」とする。）との比較により検証した。

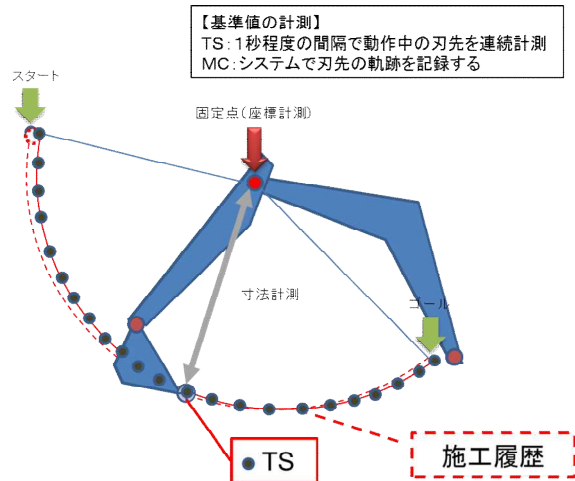


図-4 動作状態での計測精度検証内容

b) 実験手順

図-5に実験手順を示す。実験は既知点にてバケットの刃先を静止観測し、x, y, zの各成分の誤差が5cm以内であることを確認した後、掘削を模した動きでバケットを動作させ、施工履歴データと刃先の自動追尾TSを実施した。実験ケースでは、動作中の施工履歴データの記録頻度を1秒毎、2秒毎、10cm毎、50cm毎の4パターンに変化させると共に、各パターンについてバケット移動速度を高速と低速の2パターンを組み合わせた計8ケースで各ケース3回実施した。自動追尾TSによる刃先の位置計測の頻度は、全てのケースで1秒毎に設定した。なお、高速とはMGバックホウによる整形ではない掘削作業を想定したバケット動作速度で有り、低速とはバックホウによる河床の整形作業を想定したバケット動作速度である。実際の施工では、高速、低速の区別無く施工履歴データが記録されるので、高速でも所要の精度を満足する必要があるため、実験ケースに設定した。

図-6にパターン別の施工履歴データ結果と自動追尾TS結果によるデータ処理手順を示す。精度の評価は、自動追尾TSで計測した刃先の位置座標（1秒毎に計測）を直線で結び、このライン（基準線と呼ぶ）に対する施工履歴データの離れ距離を計測精度として評価した。

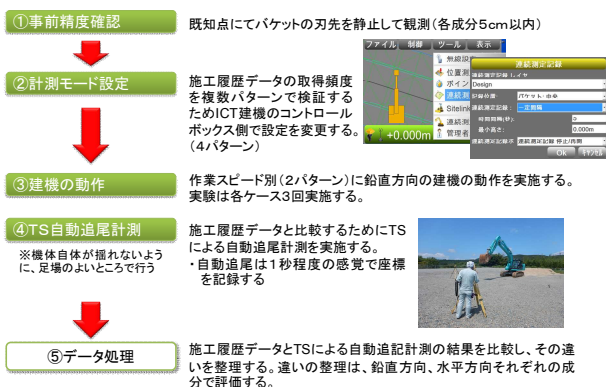


図-5 実験手順

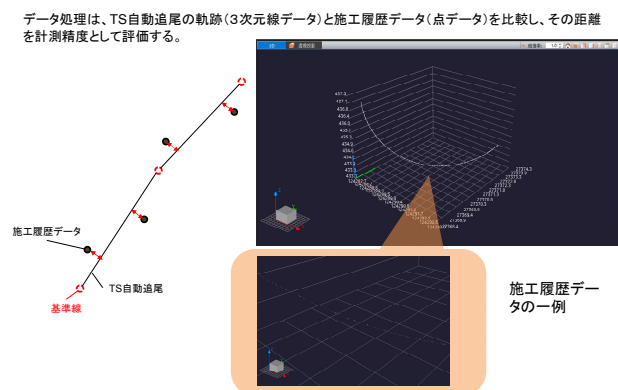


図-6 データ処理手順

c) 検証結果

図-7に動作状態での計測精度の検証結果を示す。MG

バックホウのバケットを動作させている途中の施工履歴データのx, y, z座標と、同時に自動追尾TSで計測した刃先の位置座標との比較を行い、x, y, zの各成分についての差を算出した結果、以下のことが分かった。

- ・施工履歴データの誤差はZ座標で最大でも約50mm程度の誤差で収まっている。
- ・出来形管理で最も重要視されるZ座標については、全体的な傾向としてはx, y成分と比較して誤差が小さい傾向があるため、施工前の精度確認試験により、x, y, z各成分の誤差が50mm以内であることを確認しておけば、Z成分の精度を十分担保出来ることがわかった。

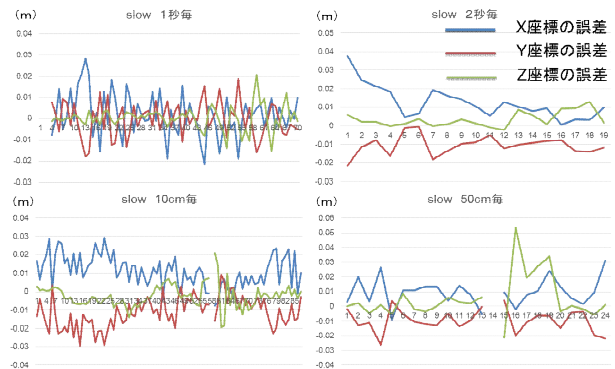


図-7 動作状態での計測精度の検証結果

図-8に高速及び低速でのバケット刃先位置の誤差結果を示す。バケット動作中の施工履歴データと自動追尾TSで計測した真値とを50点比較した結果、施工履歴データと自動追尾TSとの誤差（距離誤差）は施工履歴データの記録頻度やバケット動作の速度によらずほぼ一定で、15mm~20mmの程度である。よって、動的な計測精度はデータの取得頻度の影響を受けにくいと考えられたため、精度担保の観点からは、取得頻度についての規定は不要と考えられた。

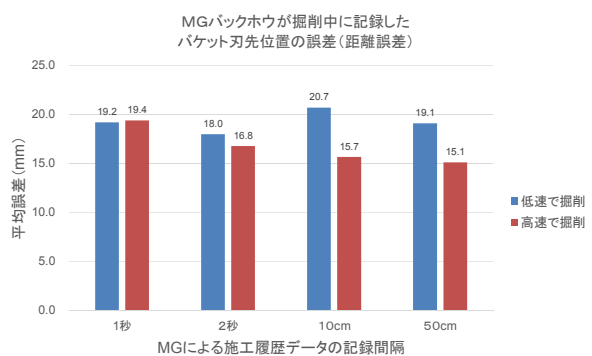


図-8 バケット刃先位置の誤差結果

(3) 整形後の出来形と軌跡データの比較

a) 検証内容

図-9にMGバックホウによる整形後の出来形と軌跡データの比較を示す。施工履歴データの取得間隔の違いによる計測精度の変化を確認するために、作業パターン別の比較検証を実施した。この検証は、施工履歴データと

実際に整形を行った地盤の出来形との比較である点で、前述した(2)の検証とは異なっており、実現場における施工履歴データを用いた出来形管理を想定した精度検証実験となっている。なお、実験手順は基本的に(2b)と同じ手順で行っているが、建機の動作は低速パターンのみで行った。



図-9 整形後出来形と軌跡データの比較イメージ

b) 計測密度についての検証結果

図-10に計測点群密度の検証結果を示す。施工履歴データは、TLS、UAV写真と比較して計測点数が大幅に少なく、出来形評価を行う1m×1mメッシュの個数に対して点が不足しやすい傾向が見られる。面的出来形管理には少なくとも1m²に1点以上の点群密度が必要であるが、10cm刃先が移動する度に1点の頻度で施工履歴データを記録する設定で整形作業を行った場合、施工範囲全面で1m²に1点以上の割合で点が記録されているものの(図-10の赤メッシュが該当)、50cm毎に施工履歴データを記録した場合、1点も記録されていないメッシュ(図-10の黄メッシュ)が見られた。以上の結果より、施工履歴データの記録頻度について、計測精度の観点からは規定を設ける必要は無いが、出来形評価に最低限必要となる点群密度を担保する観点からは、10cmに1点以上の計測頻度に設定するよう規定を設ける必要がある事がわかった。ただし現時点では、MGバックホウのICT建機メーカーによって計測頻度の設定方法が異なり、一定距離毎や一定時間毎、あるメッシュサイズ毎に1点代表点を記録する等、様々な方式があることから、計測頻度に関する管理値を一義的に要領に記載することが困難である。そこで、要領には「1m×1mメッシュに1点以上有効な施工履歴データを記録すること」という規定を設けることが適切であると考えられた。

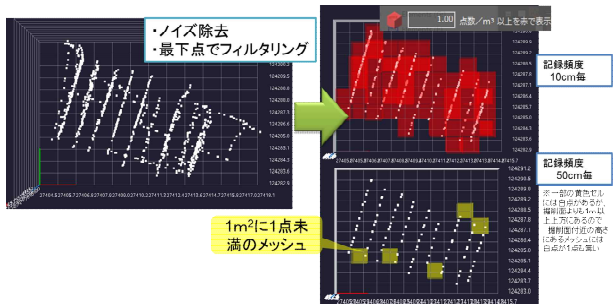


図-10 計測点群密度の検証結果

c) 計測精度についての検証結果

図-11及び表-1にMGバックホウで掘削中に記録した低速モードにおけるバケット刃先位置と出来形の差の平均及び偏差を示す。施工履歴データと出来形との平均誤差(距離誤差)は施工履歴データの記録頻度によらずほぼ一定であり、50~60mm程度であった。またデータのばらつきは、4ケースの平均で $\sigma=22.71\text{mm}$ $3\sigma=68.13=70\text{mm}$ であった。平均誤差(50~60mm程度)は、実験時刻での衛星配置等が原因の誤差であると考えられるため、GNSS衛星の配置などに偏りが無い条件における実際の平均誤差は、GNSSの公称精度 $\pm 30\text{mm}$ 程度になると考えられる。以上の誤差の傾向を踏まえた結果、計測精度全体としては、施工履歴データとTS計測との差が $\pm 100\text{mm}$ 程度になることがわかった。

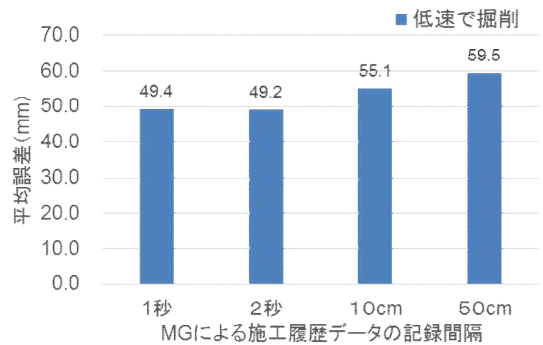


図-11 バケット刃先位置と出来形との差

表-1 バケット刃先位置と出来形との平均及び偏差

		施工履歴記録間隔			
		1秒	2秒	10cm	50cm
低速で掘削	平均(mm)	49.4	49.2	55.1	59.5
	偏差(mm)	19.2	26.5	18.3	26.9

3. バックホウ浚渫船による出来形実態の分析

ICT活用工事の浚渫工(河川)への適用に必要な出来形管理手法や管理基準の整備に向け、2.で実施した精度検証結果により施工履歴データが浚渫工(河川)の出来形値として利用できることが確認できた後、河川浚渫の現場で実際に取得されているレッド測深のTS計測出来形値を真値とし、施工時に取得されたMGバックホウによる施工履歴データとの同一平面上での標高較差を利用して精度検証を行い、出来形実態の分析を行った。

表-2に出来形実態調査を行った近畿地方整備局管内の対象工事を示す。

表-2 出来形実態調査対象工事

工事名	事務所名	年度
戸ノ内地区掘削工事	猪名川河川事務所	2016
熊野川筋筋・鮎田地区上流部河道浚渫工事	紀南河川国道事務所	2017

(1) 施工履歴データを用いた出来形管理の施工精度確認

図-12に出来形実態調査を行った現場での施工履歴データとレッド測深によるTS計測（真値）の標高差を示し、表-3に標高差の平均および標準偏差を示す。近畿管内での現場では、真値よりも施工履歴データの結果が深い（一方向）傾向にある。

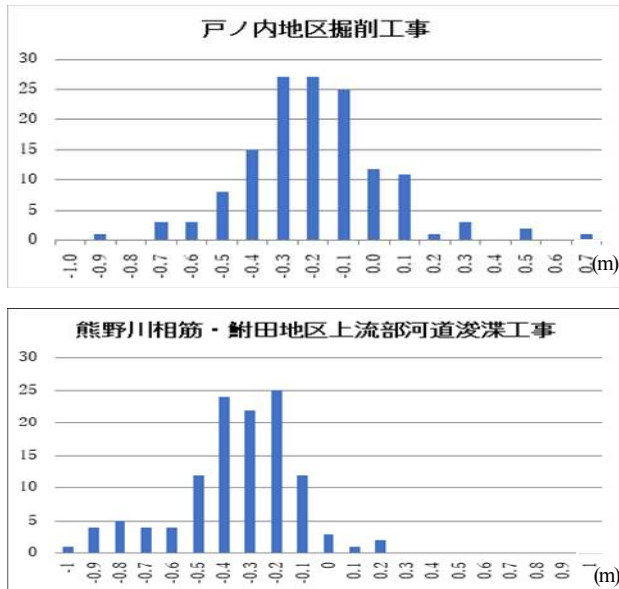


図-12 施工履歴データと真値との標高差

表-3 標高差の平均および標準偏差

工事名	差の平均値	標準偏差
戸ノ内地区掘削工事	-241mm	233mm
熊野川相筋・鮎田地区上流部河道浚渫工事	-296mm	224mm

(2) 施工履歴データと真値との標高差の要因

戸ノ内地区掘削工事及び熊野川相筋・鮎田地区上流部河道浚渫工事のように刃先が真値を下回る誤差の原因としては、以下の点が考えられる。

- ・施工者ヒアリングによるとバックホウのオペレータは、バケットで抱える土量を最大化し、掘削効率をあげるため、はじめの掘削は刃先を設計面より深めに入れて掘削するが、掘削がある程度進むと平たんに仕上げるために、刃先の位置を設計に沿うように動かす傾向がある。この場合、はじめに深く掘削した時点で記録された刃先の履歴データを用いて出来形計上を算出するため、最終仕上がり面よりも深めに出来形が記録されることになる。

- ・刃先と根本のどちらの座標を施工履歴データとして記録しているかにより、施工履歴と出来形との差異が生じる。本現場では、バケットの爪先の履歴を施工履歴データとして記録しているが、掘削の進展により刃先が摩耗するため、徐々に実際の刃先の位置よりも施工履歴データが深く記録される傾向が生じる。

- ・掘削直後に埋まるため、刃先データが深くなる傾向にある。

また近畿地方整備局管外の現場においては、施工履歴データの値が真値よりも浅い結果（+方向）となる現場もあった。その誤差の原因としては、提供データのフィルタリング方法が最下値ではなく平均値としていたため、実際の川底よりも高い位置の履歴データになったと考えられる。

以上の誤差要因を考慮して、施工履歴データを用いた出来形管理をする場合には、日々の刃先位置の精度確認を行うだけでは不十分であり、事前にテスト施工を実施し、施工履歴データから求まる出来形とTS等による出来形の実測値との比較を実施し、その差異を加味して施工を行うとともに、施工履歴データの算出時にテスト施工で確認した差異を反映する必要があると考えられる。

2. 及び 3. の結果により、施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）1-2-2 施工履歴データの計測性能及び精度管理及び、精度確認試験実施手順書及び試験結果報告書に反映されている。

4. 面的出来形管理基準の規格値案検討

従来管理と同等となる面的な出来形管理基準および規格値案を検討するため、該当工事の設計面とレッド測深の出来形値の同一平面上での標高較差を利用し出来形実態調査を行った。

(1) 出来形実態調査結果の整理

表-4に表-2の近畿地方整備局管内の工事を含め、浚渫工4現場のデータを合わせて、各現場で適用した出来形管理の規格値を基準とした場合の不良率（上側・下側）を算出した結果を示す。現場1、現場2は基準高の規格値が+200mm、現場3、現場4については規格値が0mmなので、従来規格値を参考に200mm下がり（仮に設計値とした場合の設計値からの離れを合わせて括弧書きで表記している。いずれの工事も、従来手法としては検査に合格している。

表-4 不良率一覧

現場	現場名	平均	標準偏差	最大値	最小値	母数	不良個数(上)	不良個数(下)	不良率(%)	不良率(上)	不良率(下)
1	戸ノ内地区	-0.294	0.233	0.265	-1.402	139	1	0	0.7	0.7	0.0
2	熊野川	-0.125	0.125	0.300	-0.390	140	3	0	2.1	2.1	0.0
3	現場3	-0.594 (-0.394)	0.189	0.662 (0.862)	-0.953	214	3	0	1.4	1.4	0.0
4	現場4	-0.421 (-0.221)	0.095	0.172 (0.372)	-0.642	278	2	0	0.7	0.7	0.0
	全データ	-0.385 (-0.265)	0.237	0.662 (0.862)	-1.402	771	9	0	1.2	1.2	0.0

(2) 調査結果の評価と方針と規格値（案）の検討

表-5及び図-13に不良率を許容した正規分布のパラメータと規格値（案）の検討結果を示す。表4の結果から、上限規格値においては設計値もしくはバラツキ調査結果の平均値を中心として、現状のバラツキ調査から割り出した不良率を踏まえた正規分布について、ICT土工の規格値と同じ0.3%を棄却してよい上限値として設定した値に、計測精度を加えた値で規格値を検討した。なお、余掘りを前提としており、下限値は設けず、平均値規格は設計値である±0mm以下とした。

結果、全数の面的管理となる規格値の上限としては、+302mmとなった。施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）では、+302mmに加え、施工精度±100mmを加えた+400mmが個々の規格値として設定されている。

表-5 不良率を許容した規格値（案）

4現場	①規格値 (mm)	②平均値 (mm) 【現場実 態の値】	③規格値の範囲外 となる割合P% (上限/下限)別 【現場実態の値】	③ k	④標準偏 差 σ _p (mm) 【①- ② -k】	全数管理 の上限値案 ②+2.75σ _p (mm)
(案) 平均値を 現場実態 で設定	200	-265	12 (12/0)	2257	206	302

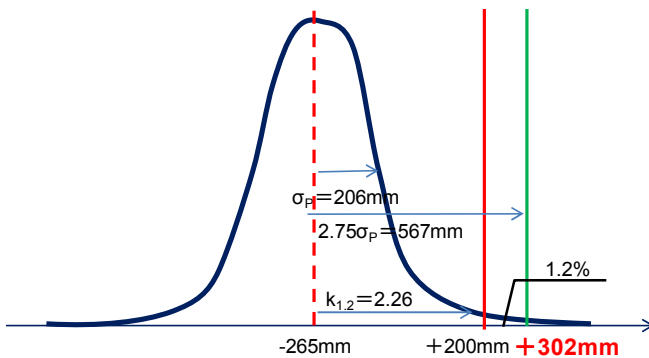


図-13 不良率を許容した正規分布のパラメータと規格値案

5. おわりに

ICT浚渫工（河川）適用にあたり、バックホウ浚渫船による面的な施工管理基準の適用を図る方法の一つに、MGバックホウによる施工履歴データの活用に着目した。結果、施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）において、施工履歴データの計測性能、精度管理、精度確認試験実施手順書及び試験結果報告書に反映され、出来形管理の規格値（案）においても提案することができた。現場数の少ない中で施工管理基準を検討していることから、今後はフォローアップを行った上で、逐次見直しを行い、カイゼンを行っていくことが必要と考える。

謝辞：猪名川河川事務所及び紀南河川国道事務所につきましては、貴重な現場及びデータ提供いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 近藤弘嗣，長山真一，藤島崇，石田大輔，服部達也，池田広貴：i-Construction で適用する土工出来形の面管理に関わる基準類の検討，第 16 回建設ロボットシンポジウム論文集，2016