

ニューマチックケーソン工法における新技術の導入

後藤 修二・内田 貴大・根岸 直人・片岡 知泰

建設業界ではかねてより安全管理を最重要課題として取り組んでおり、加えて昨今では生産性向上や働き方改革といった課題への対応が求められている。ニューマチックケーソン工法で築造される王子給水所（仮称）ではこれらの課題解決に努めており、本報では T-iDigital Field（以下、本現場管理システム）、GeoViz[®]（以下、本システム）、ケーソンショベルの自動運転について、その概要と実施結果について報告する。

キーワード：ニューマチックケーソン，王子給水所（仮称），働き方改革，自動運転

1. はじめに

東京都水道局では安全で高品質な水の安定供給のため、以下の取り組み等を推進している。

- ・導水施設の二重化・更新
- ・浄水場（所）の更新・覆蓋化
- ・送水管のネットワーク化・更新
- ・給水所の新設・拡充・更新（今回工事の対象事業）

図-1の区部北東部地域の給水所整備イメージ図に示すように、このエリアの整備前（昭和50年代）では、一つの浄水場（所）が配水する区域が広大であった。万が一、震災等で浄水場（所）の機能が停止した場合、断水エリアが広範囲に及ぶ恐れがあった。整備

後は配水区域を5つに分割し、耐震性を有する送水管を整備することで各給水所は二つの浄水場（所）から受水できることになり、災害時や事故時の断水リスクが低減され、王子給水所（仮称）の整備により約25.9万人の給水が安定する。本工事で築造される王子給水所（仮称）はこのエリアで最後に整備される給水所である。

2. 工事概要

本工事は、水道水を貯水する目的でニューマチックケーソン工法により有効容量50,000 m³の配水池を築造する工事である。ニューマチックケーソン工法（以

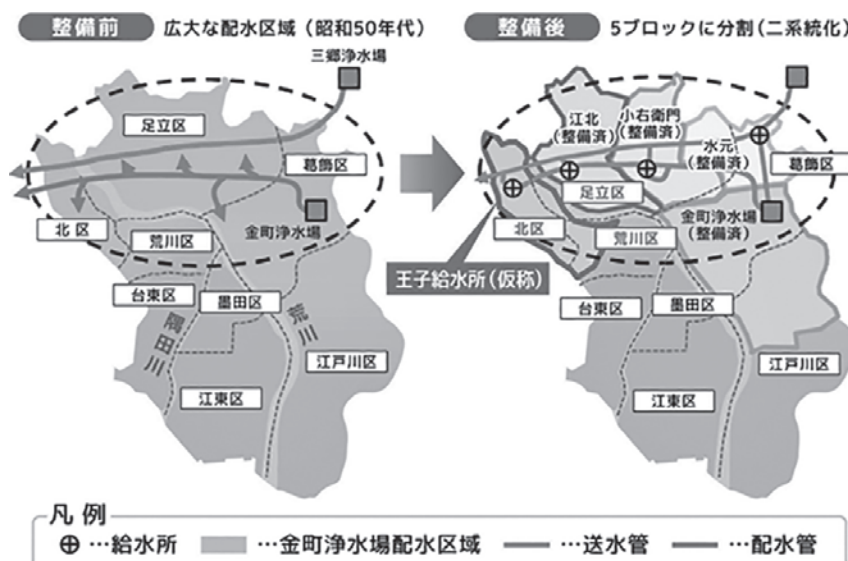
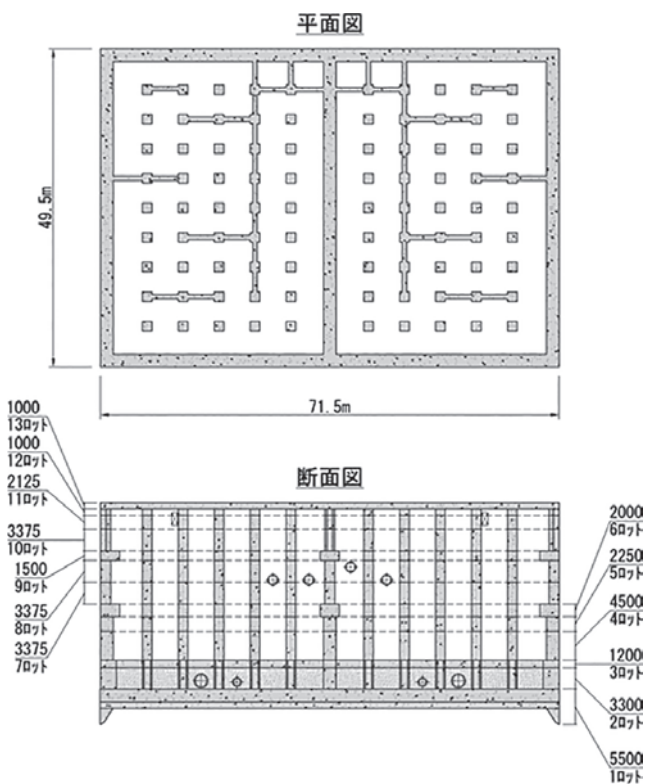


図-1 区部の北東部地域の給水所整備イメージ図



図一 2 配水池躯体平面図および断面図（13ロット長辺）

表一 1 工事概要一覧

工事名称	王子給水所（仮称）配水池築造工事	
発注者	東京都水道局	
施工者	大成・岩田地崎・関電工建設共同企業体	
工事場所	東京都北区王子 5-2-7	
躯体諸元	躯体長さ	71.5 m
	躯体幅	49.5 m
	躯体高さ	34.5 m
	沈設深さ	35.8 m
	有効容量	50,000 m ³
工事内容	刃口金物工	582.1 t
	掘削工	139,630 m ³
	地盤改良工	φ700×21.9 m×1,674 本
	静的締固め砂杭工法	φ700×14.2 m×1,316 本
	鉄筋コンクリート工	48,225 m ³
	埋戻し工	6,059 m ³
	鉄筋工	7,903 t
ニューマチックケーソン工	1.0 式 最終気圧 0.36 MPa	

下、本工法）は、ケーソン躯体の下部に設けられた作業室内でケーソンショベル（以下、ショベル）により地盤を掘削し、ケーソン躯体を沈設し、所定深度に構築物を設置する工法である。躯体の大きさは図一 2 の配水池躯体平面図および断面図に示すように長さ 71.5 m×幅 49.5 m×高さ 34.5 m の鉄筋コンクリート構築物であり、計 13 ロットに分割して構築される。表一 1 に工事概要を示す。周辺がマンションに囲まれているため、工事はすべて昼間のみに行われる。本



写真一 1 現場施工状況全景

工法で躯体を沈設させながら、写真一 1 に示すように 4 台のタワークレーンを用いて、鉄筋や型枠材等を投入し、鉄筋構築物を築造している。また、同時に 10 t ダンプトラックで 100 台/日程度の掘削土を搬出しており、資材の搬入出と両立する必要があるが、工事ヤードが狭いこと、周辺がマンションに囲まれているため早朝や夜間に作業ができないなど、ヤード内車両同線や工事時間に制約がある場所となる。また、昨今では労働時間の削減や働き方改革に取り組んでおり、本工事での取り組みを以下に述べる。

3. 本現場管理システム

本現場管理システムは、ネットワークにつなげたカメラ映像や IoT 機器や API 連携する外部アプリで得られたデータを用いて現場の施工状況を可視化し、工事関係者間でリアルタイムに一元管理して、現場関係者の QCDSE 管理の判断を支援する現場管理システムである。当現場での取り組みを以下に述べる。

(1) ホッパースカナ

本工法の工事現場では、一般に、掘削状況、土砂ホッパー内の土量、および翌日の掘削工程を考慮して、掘削土を搬出する翌日のダンプトラックの手配をしている。しかしながら、土量についてはホッパー上部に登って（図一 3）目視確認するため、土量が正確に把握できないことがある他、複数の土砂ホッパーの土量把握の時間差から、適切な台数のダンプトラックが手配できず、過不足が生じて作業効率が低下するといった課題があった。この解決策として、レーザー計測器により土量計測を自動化、可視化する「ホッパースカナ」を開発した。

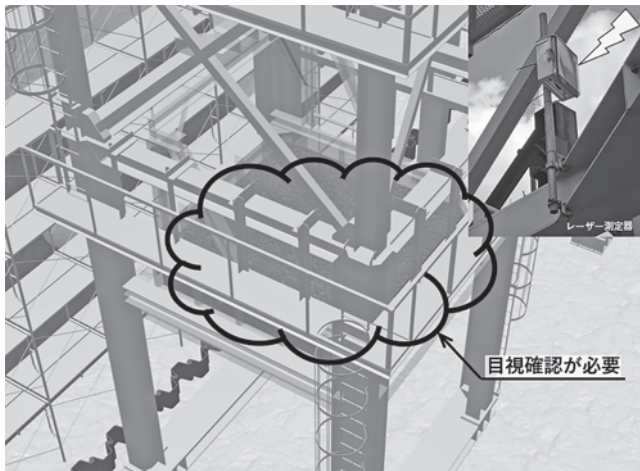


図-3 ホッパー

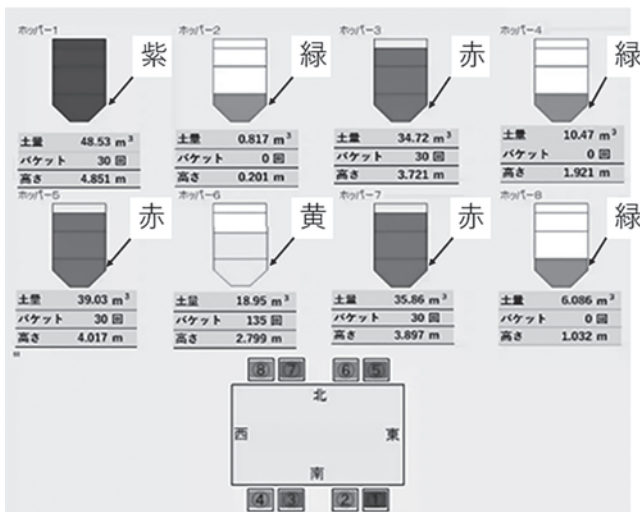


図-4 土量確認画面

※緑：0～15 m³，黄：15～30 m³，赤：30～40 m³，紫：40～50 m³
(土砂ホッパー容量：50 m³)

ホッパースキャナの導入により、土砂ホッパー内土量を常時計測し作業所のPCやタブレット端末等に表示(図-4)することで、土砂搬出作業の担当者間での情報共有、正確な土量の把握が可能となった。そのため、搬出用ダンプトラックの配車・誘導の他、正確な掘削計画等の立案が容易になった。また、土砂ホッパーへの登り降りといった苦渋作業の解消と計測時間を削減した。

また、排土ホッパーからダンプトラックに土砂を積み込む作業員やダンプトラック運転手が各ホッパー内の土量を積層回転灯の表示で可視化することにより、直接目視確認できるようになった。そのため、搬出が必要な土砂ホッパーへの配車が迅速化し、掘削土搬出作業の効率化が実現した。

(2) 運搬情報管理システム

従来、ダンプトラックの位置情報は電話等により運転手へ直接確認していたため、掘削重機の運用や休憩時間の確保を効率よく行うことができなかった。また、土砂ホッパーから積み込んだ掘削土は台貫にて計量・重量調整するが、従来は台貫の計量伝票をパソコンの集計データに打ち込み出力していたため、入力に手間がかかり、データの整理が煩雑であった。

当現場では it Trucks (以下、本管理システム) を API 連携して上記の問題の効率化を実施した。これは掘削土の運搬状況をクラウド上で一元管理し、リアルタイムに確認・記録するための管理システムである。本管理システムにより、以下の2点において成果が得られた。

(a) 運搬情報の見える化

ダンプトラックに位置情報発信端末を取り付け、QRコードで車両情報や積荷荷重などの情報を連携させることで、ダンプトラックの運行情報をリアルタイムに可視化した(図-5)。排土ホッパーからダンプトラックに土砂を積み込む作業員や積み込んだ搬出土の調整をバックホウで行う作業員、その他の誘導員らが効率よく働くことが可能になり、他作業との調整もしやすくなった。

(b) 帳票作成の効率化

日報・週報・月報はこれまで搬出台数や台貫伝票をエクセルに入力していた。本管理システムを活用して



図-5 ダンプトラック運行状況

積載内容等クラウドで一元管理することにより、日報・週報・月報をワンクリックで出力でき、帳票作成業務が不要になるため、省力化を実現し、生産性が向上した。

(3) 入坑管理・加減圧管理のデジタル化

マンロックが7箇所あり入坑管理が煩雑なので、従来手動で行っていた入坑札を電子化してWEB上でリアルタイムに閲覧可能にすることで、入坑管理が円滑になった(図-6)。

また、ICタグとセンサを用いて時間計測することで、入坑時間管理システムを構築し、リアルタイムで管理可能になった。

(4) コンクリート品質管理システム

コンクリート打設時に生コン車の配車状況や運搬状況、およびコンクリート打設の進捗状況をクラウド上で管理することにより、配車状況の確認や作業員の休憩時間の管理、練り混ぜから打ち込み終了までの時間の管理など、コンクリート打設の施工管理が円滑に

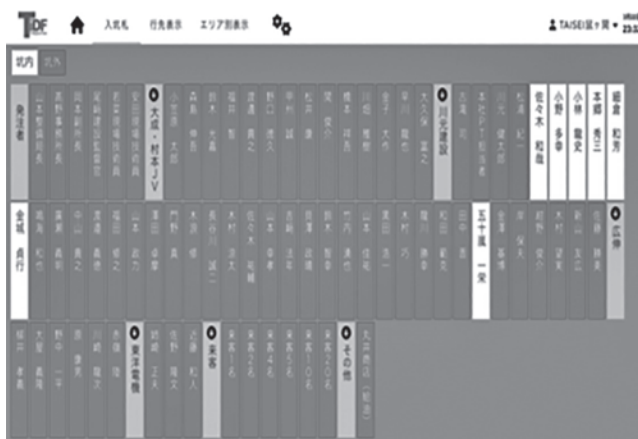


図-6 電子入坑管理札

2019年2月15日 〇〇工事

■ 時間別数量 [集計表] [打設進捗グラフ] [生コン車位置] 合計: 9.00/128.00m³ (7.0%)
打設箇所: ポンプ車1 打設累計: 9.00/128.00m³ (7.0%)

出向種	運搬車種	納入時刻	納入時刻	運送	打設開始	終了	打設完了	経過	納入	打設累計	品質
		(分)	(分)	(分)	(分)	(分)	(分)	(分)	(m³)		試験
24-15-20L	株式会社〇〇生コン 新築工場	比隣	調整	3分	工場運抵 [到着時間]						
2	7145 [空入]	13:52						3	4.50		[登録]
6	6714 [空入]	13:44						11	4.50		[登録]
2	5143 [修正]	13:40	13:52	12	待機中 [即時開始]			15	4.50	ポンプ車1	[登録]
[即時] ← [荷卸中]											
ポンプ車1	24-15-20L	株式会社〇〇生コン	入庫	計: 18.00m³							
4	4139 [修正]	13:38	13:51	13	13:51 [即時完了]			17	4.50		[登録]
[即時] ← [荷卸済]											
ポンプ車1	24-15-20L	株式会社〇〇生コン	打設	計: 9.00m³ (9.00m³/車1台)							
2	1348 [修正]	13:11	13:25	14	13:25	13:31		20	4.50	生コン車1台	[登録]
1	1245 [修正]	13:00	13:19	19	13:21	13:25		25	4.50		[登録]
[即時] ← [返却]											
ポンプ車1	24-15-20L	株式会社〇〇生コン	戻車	計: 4.50m³							
2	1470 [修正]	13:40	13:40	19	13:40			10	4.50		[登録]

インターネットにつながる端末で打設状況を確認

図-7 コンクリート品質管理システム

なった(図-7)。

(5) 監視カメラの設置

現場の各所に監視カメラを設置し施工状況を観察することで、進捗状況の把握や安全管理が円滑になった。また、元請が監視カメラで現場作業を監視することで、作業員の安全意識の向上を促している。

4. ニューマチックケーソン掘削工における省人化と生産性向上の取り組み

作業室内は地下水で水没することが無いよう、圧縮空気により圧気されている。測量等の施工管理を目的とし圧気環境へ立ち入る機会があるが、高気圧障害の発症可能性が存在している。また、昨今では労働人口不足や時間外労働の上限規制への対応が求められており、これら諸課題を解決するため、施工管理と掘削作業の省人化・生産性向上を目的とし、オリエンタル白石(株)と(株)DeepXはケーソン函内デジタルツイン可視化システムとショベル自動運転システムの協業開発を行っている^{1), 2)}。これらの試験運用を実施した結果について報告する。

(1) 本システムについて

本システムは、ショベルに搭載したセンサ(写真-2)の情報からショベルの位置・姿勢と、LiDARから取得した地盤の高低情報を組み合わせ、作業室内の地盤状況とショベルの動作をリアルタイムに3Dで可視化するデジタルツインシステムである(図-8)。本システムは以下の情報を表示する機能を有す。

- ・作業室内の地盤高低状況とセンサ搭載ショベルの位置・姿勢を3Dでリアルタイム可視化。
- ・3D地盤は等高線によって色分け、または設定した標高以上の地盤をハイライト表示(図-9)。

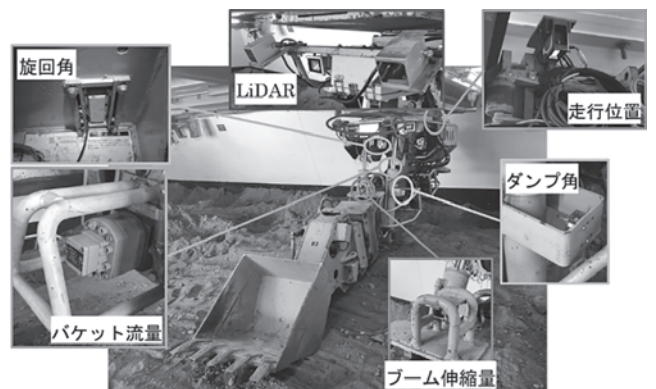
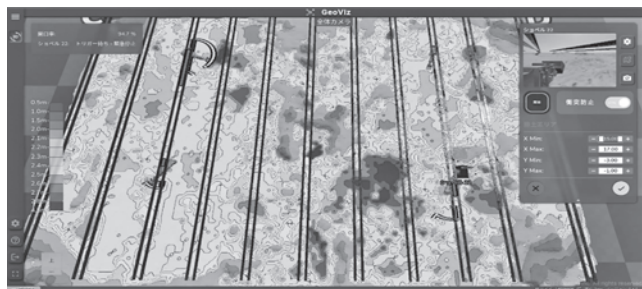
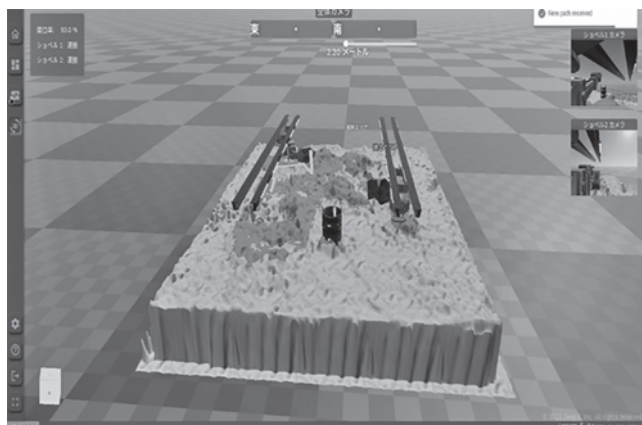


写真-2 各種センサ搭載ショベル



図一八 本システムの画面



図一九 ハイライト表示の地盤可視化



図一十 掘削・排土範囲の設定



写真一三 現場職員による本システム立ち上げの様子

- ・作業室の地盤高低状況を俯瞰図として画像出力。
- ・掘残し土の面積とケーソン底面積の比である開口率³⁾の算出。

これらの情報から、ケーソン躯体の沈下バランスの確認に必要となる開口率の算出に際し、作業室内に立ち入り掘り残し地盤を実測する機会の削減ができ、高気圧障害の発症機会を抑制できる。また、実測後の数値をもとに開口率を算出する時間も短縮でき、生産性向上に寄与する。

(2) ショベル自動運転について

ショベル自動運転は、特定のショベルに掘削・運搬・排土の工程について移動経路生成・動作を繰り返し自動で計画・実施させる機能である。前述の地盤の高低情報を活用し、任意の掘削範囲と排土範囲を3D可視化された地盤に設定(図一十)することで、現場のユーザーが自動運転システムを利用することができる。本機能の目的は掘削作業に従事する人員の省人化で、ケーソン躯体の沈下や傾斜具合を大きく変動させるケーソン躯体刃口直下の掘削はこれまで通りショベル操縦者が担当し、その範囲以外の地盤掘削を自動運転に担当させる。

もう1つの機能として、ショベル同士の衝突を検知し、ショベルの動作を停止させる機能がある。遠隔操

作・自動運転にかかわらず動作する機能であり、遠隔操作時と自動運転の併行作業でも衝突を防止することができる。また、自動運転ショベルに対する衝突検知・自動停止機能は作業室内の内壁や天井に対しても有効である。ショベル同士や作業室内構造物への衝突は機材の破損を招き、機材交換や修理対応のため圧気環境下への立ち入りを必要とする。省人化を目的とした機能が目的と真反対の事象を発生させないように、本機能を実装した。

(3) 試験運用の結果

本システムは、トラブル・障害を除いて日常的に運用可能であることを目標として開発している。システムの不具合や安定性・操作性を検証するため、約1ヶ月間の継続運用を実施した(写真一三)。

結果として、作業室内の地盤高低状況とセンサ搭載ショベルの位置・姿勢を3Dでリアルタイム可視化する機能については、期間中にセンサ搭載ショベルがショベル本体の原因で故障し、システムの運用を中止する事態が発生したが、システム側のトラブルは発生せず、ショベルの位置・姿勢と地盤高低状況の3D可視化が恒常的にリアルタイムで更新できていたことを

確認した。継続運用中に本システムの使用感・要望等を現場職員にヒアリングした結果、システムの起動・終了や可視化された地盤のスクリーンショット・俯瞰図の出力等をタイマー設定可能な仕様にして欲しいといった、システム操作を自動化する要望があった。これらを今後の開発に追加する予定である。

ショベル自動運転については、センサ搭載ショベル3台に対し、それぞれに掘削・排土領域を設定し、順次自動運転を開始させた。掘削から排土までの一連の動作の所要時間について、人による操縦は1分以内の時間であったのに対し、ショベル自動運転の機能による動作は3分前後の時間を要した結果となった。要因として、安全のためにショベルの最大動作速度を制限していたことが挙げられる。自動運転による動作時間に課題が残ったものの、実現場かつ圧気環境下での継続試験で、自動掘削排土機能と衝突防止機能を3台のショベルで同時に実施できる性能を確認した。

5. おわりに

1章,2章では本工事の概要と課題について述べた。

3章では、本工事に取り組んでいる T-iDigital Field について、5つの取り組みを紹介した。これらの取り組みによって、施工状況を可視化し、工事関係者間でリアルタイムに施工情報を一元管理することができ、生産性だけでなく QCDSE 管理の向上や働き方改革などの課題解決の一助となると考えている。

4章では、施工管理と掘削作業の省人化・生産性向上を目的にケーソン函内デジタルツイン可視化システムと、その機能を応用した自動運転システムを開発し、実現場での継続運用を実施した。開口率算出のための作業室内への入函機会を削減するなど省人化に寄与した。また、実際の現場での圧気環境下にて両システムの運用が可能であることを確認した。今後は、GeoViz[®] の現場適用数を増やし、省人化寄与度の算

出、システム操作性の向上に取り組み、ショベル自動運転については、機能の拡充としてアースバケットへの土砂積込を自動化し、排土を含めた作業の自動化にも取り組んでいく予定である。

JICMA

《参考文献》

- 1) 根岸直人, 進藤匡浩, 中川大地, 倉知禎直, ニューマチックケーソンの自動運転システムによる生産性向上, 基礎工, 第52巻第5号, (株)総合土木研究所, 令和6年5月15日
- 2) 中川大地, 根岸直人, 倉知禎直, ニューマチックケーソンの自動化施工ケーソンショベルの自動運転, 建設機械施工, Vol.76 No.9, (一社)日本建設機械施工協会, 令和6年9月25日
- 3) 日本圧気技術協会, 大型・大深度地下構造物ケーソン, 令和4年5月31日

【筆者紹介】

後藤 修二 (ごとう しゅうじ)
大成建設㈱
東京支店 王子給水所



内田 貴大 (うちだ たかひろ)
大成建設㈱
東京支店 王子給水所



根岸 直人 (ねぎし なおと)
オリエンタル白石㈱
技術本部 技術部
機電チーム
係長



片岡 知泰 (かたおか ともやす)
㈱DeepX
ソリューション部
マネージャー

