

T-iDigital[®] Field を活用したトンネル仮設備最適制御による 電力マネジメント技術の開発と検証

古賀 快尚^{*1}・上岡 亮一^{*1}・片山 三郎^{*2}

Keywords : T-iDigital Field, cycle for tunnel face excavation, temporary facilities, electrical power management, digital transformation
T-iDigital Field, 掘削サイクル, 仮設備, 電力マネジメント, DX

1. はじめに

近年、デジタルツイン技術の発達により、工事現場のリアルタイムな状況が可視化され、現場状況を把握する遠隔管理技術が確立されつつある。そして将来的には可視化するだけでなく、データを分析して様々な状況を判断し、重機や設備の制御に活用して生産性向上に寄与することが期待されている。

このような中で、大成建設では DX により生産システムの変革を実現することを目的に、建設現場の生産性向上に向けた技術開発に取り組んでいる。土木分野では、現場の「ヒト」、「モノ」、「コト」の情報を CPS (Cyber-Physical System)^{注1)} の概念に基づいてクラウドに集積・統合する現場管理システム「T-iDital Field」の導入を推進している¹⁾。これまで、ダム工事やトンネル工事など各工種に応じてシステムを拡張し、現場状況の可視化に有効であることを確認した。特にトンネル工事では、建設機械の位置情報と稼働データを加工・分析することで、切羽掘削の作業内容(削孔・装薬・ずり出し・吹付けコンクリート・ロックボルト等)を判定することができる。この機能により切羽掘削に係るサイクルタイムを可視化・分析し、ズリ出しに供するダンプの運行間隔や台数を調整することで、サイクルタイムの改善を実現した²⁾。

今回はトンネル工事の特性に着目し、T-iDital Field の切羽掘削の作業内容判定機能を主とした、ずり出し用ベルトコンベアや換気設備等の仮設備自動制御機能を開発し、契約電力量の超過防止や電力消費量の削減を

図った。本稿では、仮設備運用におけるトンネル工事の特性について整理し、T-iDigital Field と仮設備制御機能の概要、トンネル工事現場における試験運用結果について述べる。

2. 仮設備運用におけるトンネル工事の特性

2.1 電力消費量の傾向

建設工事では、工程の各フェーズにおいて稼働する機械、設備を抽出し、その容量や稼働台数を合算し最大電力消費量を算定することで契約電力量を決定する。トンネル工事においては、切羽掘削の作業内容によって稼働する機械・設備が異なる。一例として表-1 に 2 車線道路トンネルの施工条件、表-2 に電気を動力とした切羽掘削に伴い稼働する機械・設備の一覧を示す。なお、換気設備の運転は次節で詳述するが、作業内容に応じて所要換気量相当に制御するものとしている。

表-1 2車線道路トンネルの施工条件
Table1 Construction conditions for two-lane road tunnels

項目	単位	値
トンネル延長	m	1300
トンネル断面積	m ²	83.7
掘削方式	-	機械掘削
ずり運搬方式	-	ベルトコンベア方式
換気方式	-	吸引・捕集方式
風管径	mm	1600

*1 技術センター 生産技術開発部 地下空間技術開発室

*2 技術センター 生産技術開発部 スマート技術開発室

表-2 電気を動力とした切羽掘削に伴い稼働する機械・設備の一覧
Table2 List of machines and facility used in electrically powered face excavation

作業内容	施工機械		ずり搬出設備		換気設備		合計 容量 [kw]
	機械名	容量 [kw]	設備名	容量 [kw]	設備名	容量 [kw]	
掘削	自由断面掘削機	240			送風機 中	113	396
					集塵機 中	44	
ずり出し			ジョークラッシャー	132	送風機 中	113	485
			グリズリフィーダー	15	集塵機 中	44	
			コンベア	22			
			メインドライブ	160			
吹付け	コンクリート吹付機 エレクトター付 (吹付時)	201			送風機 中	113	357
					集塵機 中	44	
支保工 建込み	コンクリート吹付機 エレクトター付 (建て込み時)	49			送風機 小	14	69
					集塵機 小	5	
ケレン					送風機 小	14	20
					集塵機 小	5	
ロック ボルト	ホイール式ジャンボ2B2B	128			送風機 小	14	153
	モルタル供給装置	6			集塵機 小	5	

表-3 切羽掘削の作業内容別所要換気量
Table3 Required ventilation volume by work content at tunnel face

項目		切羽の作業内容						備考
		掘削	ずり 出し	吹付け	支保工 建込み	ケレン	ロック ボルト	
①	コンクリート吹付け粉塵 に対する所要換気量 [m ³ /min]			1298				液体急結剤を採用
②	ディーゼル排気ガス に対する所要換気量 [m ³ /min]	1046	1046	866	752	512	579	ずり出しはベルトコンベアで搬出
③	坑内風速確保 に対する所要換気量 [m ³ /min]	853	853	853	853	853	853	坑内風速は0.17m/sec
所要換気量 [m ³ /min]		1046	1046	1298	853	853	853	

表-2 に示したように、切羽掘削の作業内容で稼働する機械や設備が異なることから、電力消費量は大きく変動する。表-2 は作業内容別に電力消費量を抽出したものであるが、実際の作業では掘削とずり出し、ずり出しと吹付けに供する機械・設備が同時に稼働する場合がある。この場合、契約電力量を超過する恐れがあり、作業を中断して同時稼働を回避する必要があるが、工事を円滑に進めるためにも可能な限り連続して作業を進めたい。以上から、契約電力量の超過を防止する観点で、複数の機械・設備が同時に稼働した際の電力消

費量マネジメント技術が望まれている。

2.2 換気計画

トンネル工事は閉鎖された空間で、重機・車両が稼働し、吹付けコンクリートに代表されるように施工に伴い多量の粉塵が発生することから、送風・集塵といった換気を行う必要がある。所要換気量は、主として①吹付けコンクリートの施工に伴う粉塵、②ディーゼルを動力とする重機・車両が排出する排ガス、③坑内風速に対して検討する。表-1 の施工条件において、切羽掘削とインバートの施工を同時に行う前提で、所要

換気容量の検討を行う。この施工条件における切羽の作業内容別所要換気容量を表-3に示す²⁾。各作業内容において、①～③の最も大きな値が所要換気量として採用される。このように切羽の作業内容に応じて所要換気量が異なるため、切羽の作業内容をリアルタイムに判定することができれば、作業環境基準を遵守しつつ換気設備の制御を行うことが可能である。

3. T-iDital Field と仮設備制御機能の概要

3.1 T-iDigital Field の全体概要¹⁾

図-1 に T-iDigital Field の全体概要を示す。T-iDigital Field の構造は三層構造で構成されており、下層はデータを取得する層で、IoT デバイスから取得する現場の生データに相当する部分である。次に下層で取得したデータをネットワークを介してクラウド上に集積させる部分が中間層の基盤クラウドである。そして最上位のアプリケーション層は、中間層で集積された様々なデータを工事関係者の判断できる情報に加工・統合し、可視化する層である。このアプリケーション層も同じクラウド内で開発しており、リアル現場とユーザーをクラウドを介して繋ぐユーザーインターフェースの部分となっている。

3.2 切羽掘削の作業内容判定機能

建設機械の位置と稼働データを加工・分析することで、切羽掘削の作業内容を判定しデータ化することが可能である。例えば、「ダンプとホイールローダーが稼働

していればずり出し作業中」、「コンクリート吹付機が稼働していれば吹付け作業中」の様に推定することができる。この作業内容判定結果をリアルタイムでクラウド上に集積し、サイクルタイムの可視化や仮設備制御に活用する。

3.3 仮設備制御機能

図-2 に仮設備制御機能の概要を示す³⁾。T-iDigital Field で判定した切羽掘削の作業内容を別途クラウドにリアルタイムにアップロードする。このクラウドは仮設備用制御盤に接続されており、切羽掘削の作業内容をもとにベルトコンベアや換気設備といった仮設備の制御を行う。仮設備制御の目的は、①契約電力量超過防止、②電力消費量の削減としている。以下にその内容を詳述する。

3.3.1 契約電力超過防止機能

2.1 で説明した通り、トンネル工事では切羽掘削に伴い稼働する機械・設備が異なることから、電力消費量は大きく変動する。また、実際の作業では掘削とずり出し、ずり出しと吹付けに供する機械・設備が同時に稼働する場合があります。この際に契約電力量超過が発生する恐れがある。複数の作業並行による設備の同時稼働について、ずり出しが共通していることから、契約電力量超過を防止するために、ずり搬出設備であるベルトコンベアのメインドライブを制御対象とした。図-3に契約電力量超過防止機能の処理フローを示す。はじめに現場の受電柱に計測器を設け、現場全体の電力消費量をモニタリングする。次に計測した電力消費量を

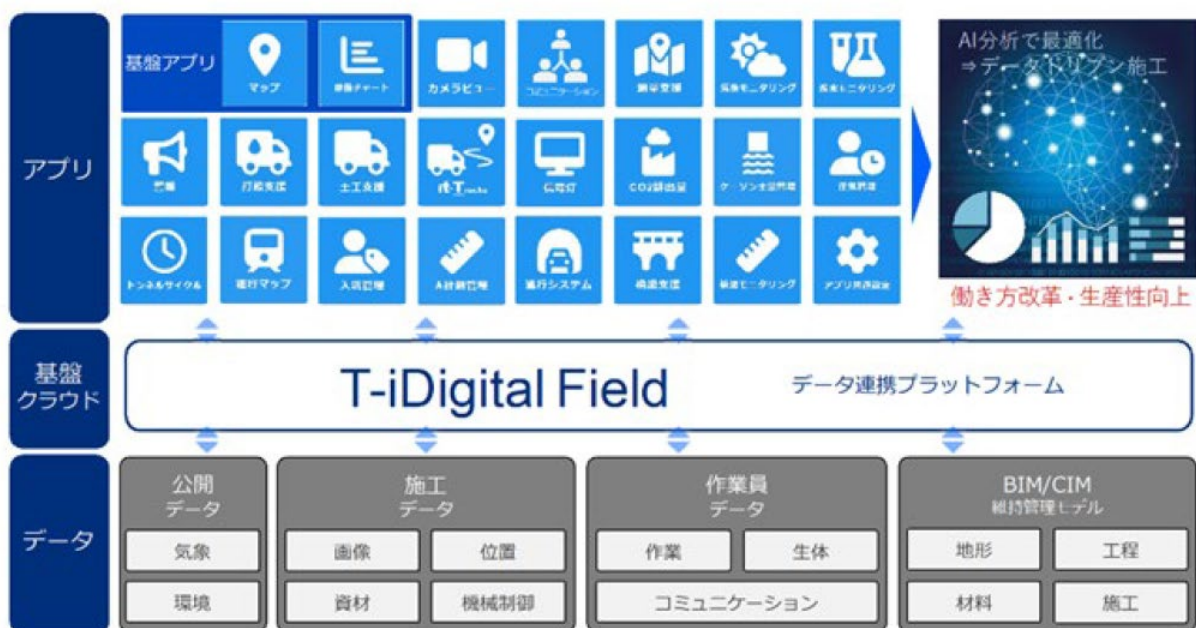


図-1 T-iDigital Fieldの全体概要図
Fig.1 Overview of T-iDigital Field

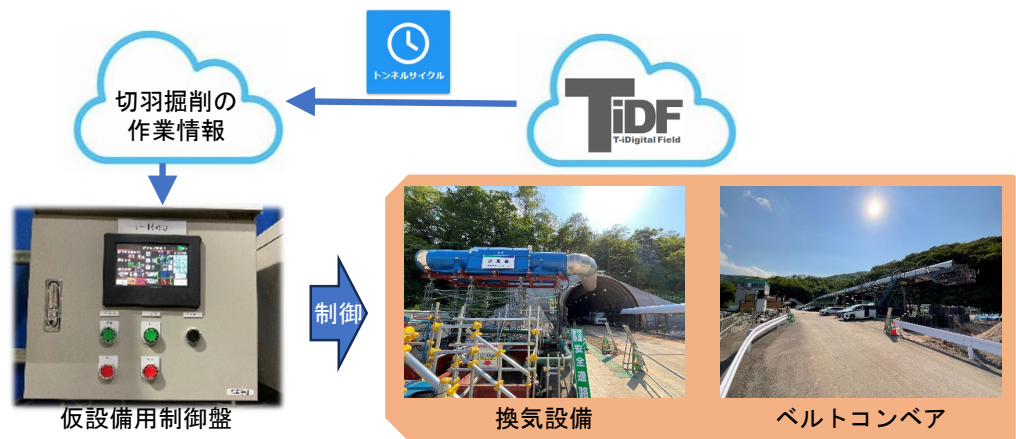


図-2 仮設備制御機能の概要
Fig.2 Overview of temporary facilities control function

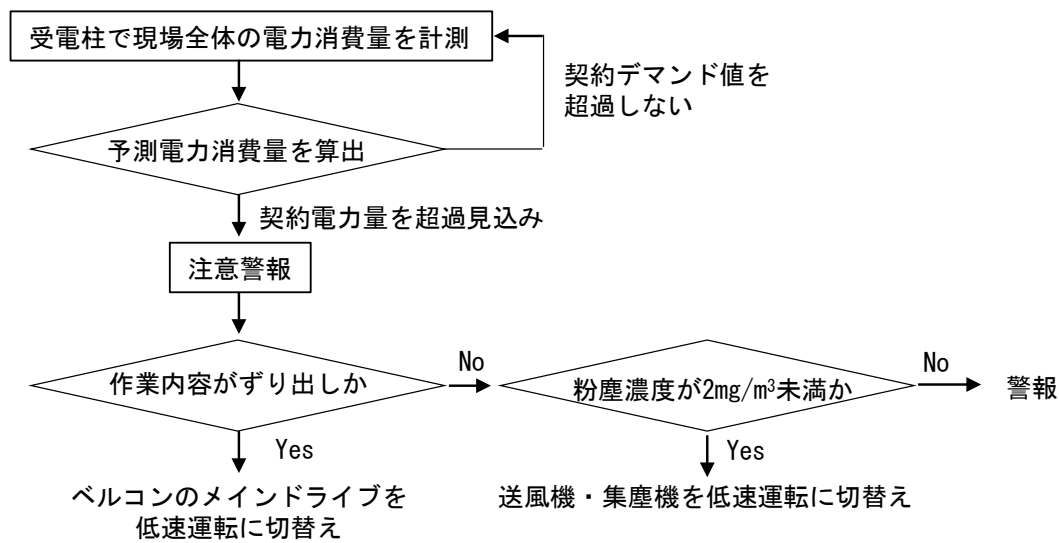


図-3 契約電力超過防止機能の処理フロー
Fig.3 Processing flow for preventing excess power consumption

重回帰分析等を行い、数分後の予測電力消費量を算出する。この予測電力消費量が契約電力量を超過する見込みであると判定された際に注意警報を発する。その後、T-iDigital Field の切羽掘削の作業内容を参照し、作業内容がずり出しであれば、ベルトコンベアのメインドライブを低速運転に切り替える。表-2 より、メインドライブの出力は 160kw であるが、低速運転に切替え出力を落とすことで現場全体の電力消費量をマネジメントし、契約電力量の超過を防止する。

3.3.2 電力消費量削減機能

2.2 で述べたように、切羽の作業内容に応じて所要換気量が異なるため、切羽の作業内容をリアルタイムに判定することができれば、作業環境を遵守しつつ換気設備の制御を行うことが可能である。特に送風機は回転ファンにより風を発生させるもので、インバータで任意の周波数（≒回転数）に制御が可能である。送風量はファンの回転数に比例、軸動力（≒電力量）は回

表-4 送風機の風力と軸動力の関係
Table4 Relationship between wind force and shaft power of fan

項目	単位	値
最大風量	m ³ /min	2000
最大軸動力	kw	220

運転	周波数 [Hz]	風量 [m ³ /min]	軸動力 [kw]
高速	50	2000	220
中速	42	1680	130
低速	22	880	19
停止	0	0	0

転数の 3 乗に比例する⁴⁾。表-4 に送風機の風量と軸動力の関係を示す。送風機の仕様は最大風量 2000m³/min、最大運転時の軸動力は 220kw である。風量が

2000m³/min と 1680m³/min の軸動力を比較すると、前者が 220kw、後者が 130kw と大幅に異なる。これは軸動力がファン回転数の 3 乗に比例するためであるが、作業内容に応じて所要換気量を満足するよう制御を行うことで、大幅な電力消費量削減が期待できる。

4. トンネル現場における試験運用

T-iDigital Field と仮設備制御機能の導入効果を検証することを目的に、2 車線道路トンネルの新設工事にて試験運用を行った。本章では試験運用の概要と導入効果について述べる。

4.1 試験運用概要

試験運用を行った現場の施工条件は第 2 章で示した表-1、本現場の電気を動力とした切羽掘削に伴い稼働する機械・設備の一覧は同様に表-2、切羽掘削の作業内容別所要換気量についても同様に表-3 の通りである。試験運用期間では、契約電力量超過を防止するためにベルトコンベアのメインドライブの制御を、電力消費量を削減するために換気設備の制御を行った。なお、電力消費量削減効果は同規模でかつベルトコンベアを

導入している道路トンネル新設工事における送風機の稼働実績と比較することで検証する。

4.2 契約電力量超過防止効果

図-4 にずり出し作業中における予測電力消費量とメインドライブ出力の関係を示す。本試験運用において、予測電力消費量が 500kw を超えると警報を発し、メインドライブの出力を制御するものとした。図-4 よりメインドライブの出力を制御することで、ピークカットを行い契約電力量超過防止効果を確認できる。

4.3 電力消費量削減効果

本試験運用では、送風機の運転について高速・中速・低速・停止の 4 段階で設定を行い、切羽掘削の作業内容と対応させるものとした。表-5 に切羽掘削の作業内容と送風機の設定を示す。中速と設定した掘削・ずり出し・吹付けについては、顕著に粉塵が発生する作業であるため、表-3 の所要換気量に対して余裕を持った風量を設定した。

図-5 に T-iDigital Field で判定した切羽掘削の作業内容と送風機の運転周波数を示す。リアルタイムな切羽作業内容に応じて細かく送風機の運転制御を行っていることが確認できる。

表-6 に試験運用現場と未導入現場の送風機稼働実績

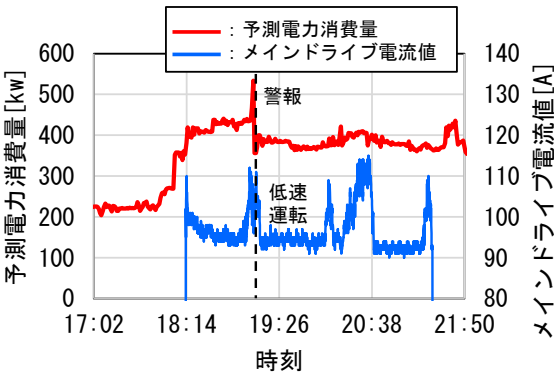


図-4 予測電力消費量とメインドライブ出力の関係
Fig.4 Relationship predicted power consumption and maindrive output

表-5 作業内容と送風機の設定
Table5 Work content and blower settings

作業内容	送風機運転	周波数 [Hz]	風量 [m ³ /min]	軸動力 [kw]
掘削	中速	42	1680	130
ずり出し	中速	42	1680	130
吹付け	中速	42	1680	130
支保工建込み	低速	22	880	19
ケレン	低速	22	880	19
ロックボルト	低速	22	880	19
休憩	停止	0	0	0

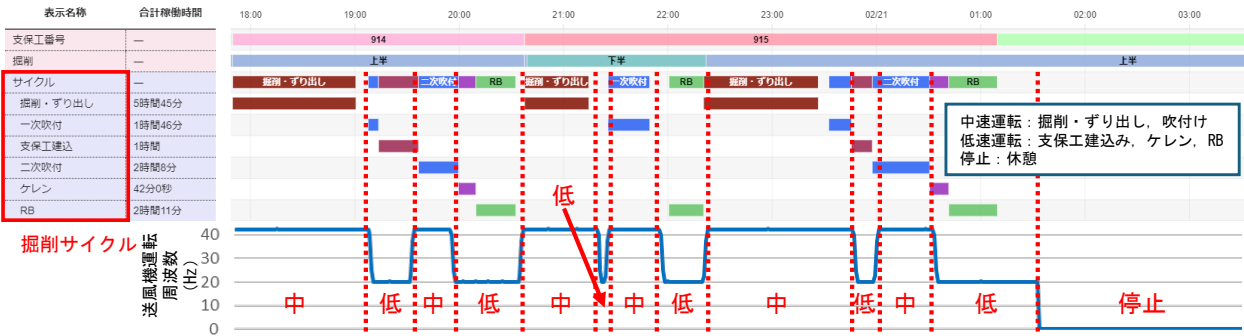


図-5 T-iDigital Fieldで判定した切羽掘削の作業内容と送風機の運転周波数
Fig.5 Face excavation work contents and fan operation frequency determined by T-iDigital Field

表-6 送風機稼働実績の比較
Table6 Comparison of blower operation records

(a) 試験運用現場

集計月	送風機運転割合[%]				電力消費量 [kw]	CO ₂ 排出量 [t]
	高速	中速	低速	停止		
2024年11月	0.0	20.5	40.2	39.3	23,352	15.6
2024年12月	0.5	18.8	32.1	48.6	22,395	15.0
2025年1月	5.2	21.2	29.5	44.1	32,218	21.6
2025年2月	0.2	29.4	37.8	32.6	29,624	19.8

(b) 未導入現場

集計月	送風機運転割合[%]				電力消費量 [kw]	CO ₂ 排出量 [t]
	高速	中速	低速	停止		
2024年11月	0.0	60.6	8.5	31.0	59,629	39.9
2024年12月	0.1	41.8	17.9	40.2	42,527	28.5
2025年1月	0.0	48.1	15.2	36.8	48,217	32.3
2025年2月	0.3	59.9	9.6	30.2	59,547	39.8

の比較を示す。なお未導入現場の送風機は、ダストセンサーによる粉塵濃度計測値に閾値を設けた制御機能が搭載されている。また、表-6 に示す送風機運転割合は休工期を含めた全時間に対する送風機の稼働実績を割合で示したものである。

表-6 (a) の試験運用現場において、表-5 に示した設定外である高速運転が記録されているのは、現場状況を踏まえて手動で設定を変更したり、拡幅断面の掘削を行う際に一部設定を変更したためである。試験運用現場と未導入現場の稼働実績を比較すると、高速運転は僅か、停止は 30～40%である点は共通している。停止は休憩や作業班交代の合間や休工期が相当するため、概ね同一の割合となっている。異なる傾向が確認されたのは、中速と低速運転の割合である。T-iDigital Field で判定した作業内容をもとに制御を行うと、中速運転時間は掘削・ずり出し・吹付けの作業時間と概ね一致するが、粉塵濃度をもとに制御を行った場合は乖離している。この違いについて、吹付けからロックボルトに作業が変わった直後など、前作業によって発生した粉塵が残留していることが考えられる。それに加え、ダストセンサーの計測値をもとに制御を行う仕組みであるが、正確な計測を行う上でセンサー類にとって粉塵は大きな障害である。粉塵環境下であるトンネル坑内で計測を行うには、計測器の適切なメンテナンスを行う必要があるが、人手による作業のため漏れなく運用を継続することが難しく、実際の環境よりも高い粉

塵濃度を計測し、送風機の運転が過剰となったと推察される。

ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン⁵⁾には、掘削サイクル平均で粉塵濃度は 2mg/m³ 以下に管理することが求められているが、換気制御を行った場合も本基準を遵守できることを確認しており、作業環境保全の観点からも問題ないと考える。また試験運用現場と未導入現場の送風機稼働実績から算出される電力消費量は、月別の平均削減率は 47.6%、CO₂ の排出削減量に換算すると 17.1t であり、電力消費量削減効果を確認することができた。

5. まとめ

トンネル工事を対象に、T-iDigital Field で確立した切羽掘削作業内容判定機能を主とした仮設備制御機能を開発した。仮設備運用におけるトンネル工事の特性を整理し、ベルトコンベアのメインドライブと換気設備の制御を行うことで、契約電力量超過防止機能と電力消費量削減機能を付与した。

T-iDigital Field と仮設備制御機能の導入効果を検証することを目的に、2車線道路トンネルの新設工事にて試験運用を行った。契約電力量超過防止機能の有効性を確認するとともに、同規模かつベルトコンベアを導入している道路トンネル新設工事の送風機稼働実績を比較することで、電力消費量削減効果を検証した。

今後は T-iDigital Field で自動収集・蓄積されるデータとその分析結果に基づき、工事設備や施工機械の運転制御の最適化を図り、建設現場での作業効率化および生産性向上に貢献する取り組みを推進していきたい。

注

注1) CPS (Cyber-Physical System) : 現実 (Physical) 空間の各種データを仮想 (Cyber) 空間に収集し、分析・解析を行い、その結果を現実空間にフィードバックすることで、産業システムの全過程を効率化するもの

参考文献

- 1) 片山三郎, 石井喬之, 三谷一貴, 宮本真吾, 千葉勇也 : 現場管理システム「T-iDigital® Field」の開発, 大成建設技術センター報, 第 56 号, No.46, 2023.
- 2) 建設業労働災害防止協会 : ずい道等建設工事における換気技術指針, pp.101-129, 2012.
- 3) 片山三郎, 古賀快尚, 千秋匡宏, 梶谷和志, 山口和秀 : T-iDigital Field を活用したトンネル仮設備最適制御による電力マネジメント技術の検証, 令和 7 年度土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会, 投稿中.
- 4) 柴田正昭 : 空気調和設備と電動力, 電気設備学会誌, Vol.28 No.10, pp.739-742, 2008.
- 5) 厚生労働省 : ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン,
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_12521.html (2025/7/4 アクセス)