

無人ダンプトラック走行システムの開発・運用

宮下 耕一・川地 真司・石井 崇暁

本稿では、秋芳鉱山において、露天掘石灰石鉱山の無人ダンプトラック走行システムを開発・導入したので、その経緯を紹介する。

このシステムの画期的な特徴は、2台のダンプトラック（180t積）を同時に制御できるとともに、有人ダンプトラックと同一のエリア・立坑での稼働を可能にしたことにある。さらに、GPSを利用してダンプトラック運行位置を制御する本邦初のシステムとして、運搬経路変更の場合でも関係施設移動を必要としない等、従来システムからの決定的な進歩がある。

メーカーと共同で行った無人ダンプトラック走行システムの開発は、1999年に60tダンプトラックのフィールドテストで開始し、その後180tダンプトラックへシステムを移行、2007年から採掘現場での運用に至った。

キーワード：秋芳鉱山、無人ダンプトラック、安全、GPS、フリート、障害物検出装置

1. はじめに

秋芳鉱山は、カルスト台地として有名な景勝地である『秋吉台』や国内最大級の鍾乳洞『秋芳洞』の西方に位置する。昭和40年に操業を開始し、開山以来40年を経過した。現在石灰石の生産量は年間約800万tであり、累計数量としては2億5千万tを突破した。また長期的な安定生産のため現在採掘中の第2鉱画に隣接する第3鉱画の開発に着手しており、2009年度より出鉱開始予定である。

無人ダンプトラック（以下DT）走行システムの開発、運用にあたり次の構想にてシステムの構築を実施した。

①安全第一

安全に特に留意したシステム。対人、対物事故を発生させないこと。

②有人積込運搬機との共存

ベンチ間の移動を含め、同一のエリア、立坑で稼働できること。また有人積込運搬機が生産性阻害要因とならないこと。

③システムの利便性

日々条件が変わる現場条件のもとで、システム運用に伴う付帯作業を可能な限り省力化でき、利便性が高いこと。

無人DT走行システムは、1980年代より石灰石鉱

山においてテスト、導入されてきた。同システムは、推測航行を利用したシステムである。推測航行とは初期位置に対して、各センサーで単位時間あたりの移動距離と進行方向を測定、計算し、逐次現在位置を求めていく方法である。但し、累積誤差が生じるため、それを補正する必要がある。1980年代当時、レーザービームを使用して補正を実施していたが、1990年代後半になるとGPSを使用して位置を補正する技術が確立した。本システムは鉱山の中でGPSを利用し現在位置を補正した無人DTの運用を行っている本邦初のシステムである。

秋芳鉱山での無人DT走行システムプロジェクトは、1999年、メーカーと共同フィールドテスト契約を締結し、60t積DTのテストを実施することでスタートした。共同フィールドテストは、走行テスト、チューニング等を実施し約1年間で完了した。そのテストにおいて発生した問題は改良により解決できると判断し、180t積DTに無人DT走行システムの導入を決定した。表1に経緯を示す。

2. システム概要

(1) 無人DT (Autonomous Mining Truck)

180t積DT2台を無人DTとして改造。GPSや光ジャイロ等を搭載し、位置検出ユニットにて、現在位置の

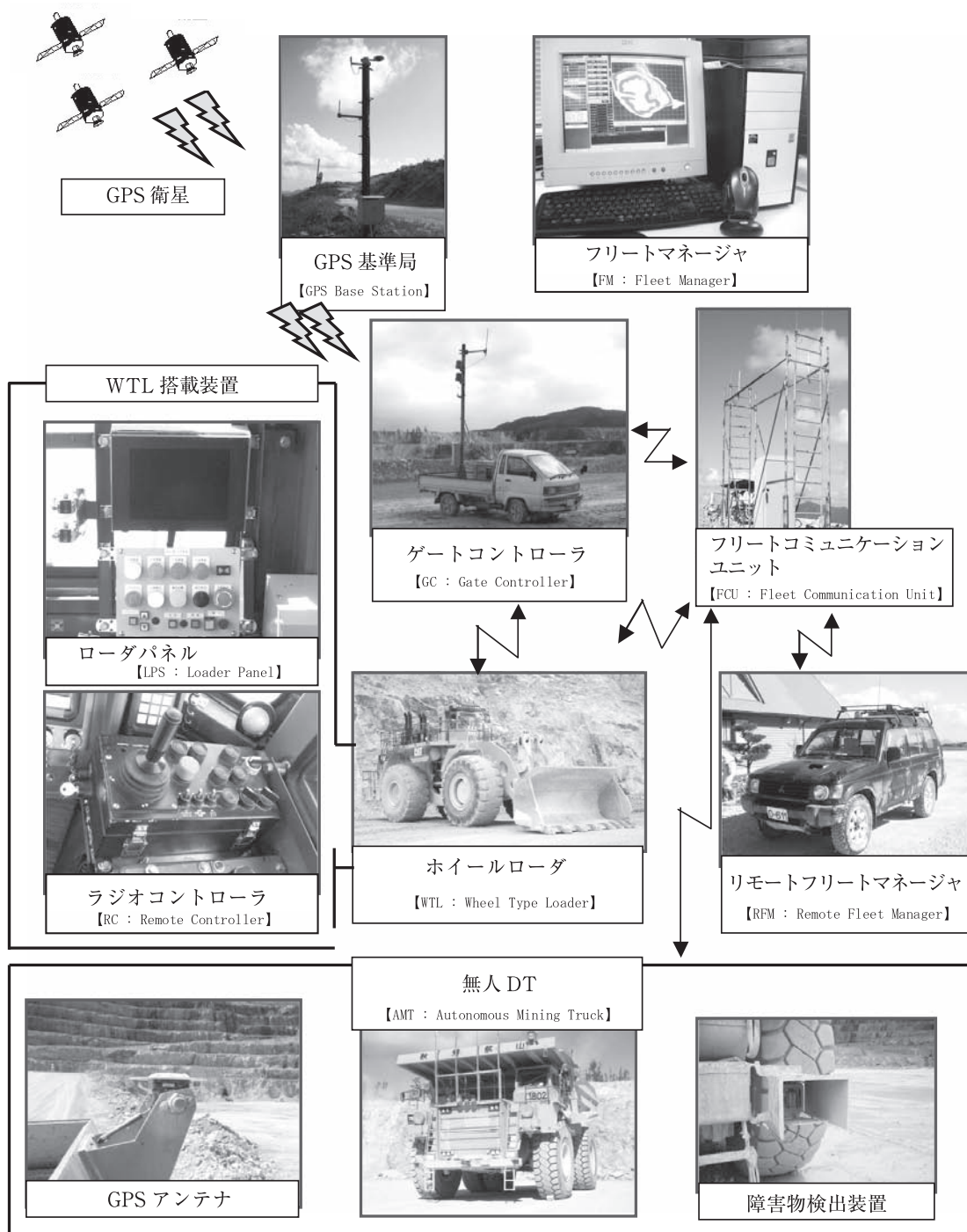
表一 経緯

1999年～2000年	秋芳鉱山において60t積DTによる共同フィールドテスト
2001年	180t積無人DT走行システムプロジェクトスタート
2003年	3月 180t積無人DT走行システム売買契約書締結 4月 1台目改造開始
2004年	1月 鉱山保安監督部に運用試験計画について説明 1月 1台による単体走行テスト
2004年	5月 2台目改造開始
2005年	2月 フリート（ダンプ2台同時）稼働開始
2007年	4月 メーカーより引渡し、運用開始

計測を常時行っている。切り替えスイッチにより自動、手動を変更することができる。手動の場合は改造前と同様に有人にて運転可能である。

(2) フリートマネージャ (Fleet Manager)

定置の中央管理パソコンであり、車両運行管理、立坑・交差点管理、走行コースデータ管理、走行コースデータ作成をする。



図一 無人DT走行システムブロック図

(3) ホイールローダ：以下 WTL (Wheel Type Loader)
バケット容量 18 m³ の WTL を使用。搭載された操作パネル (ローダパネル) にて、無人 DT の積込位置の決定、立坑・駐機場所への発進指示 (選択可能) 等を行う。

(4) ゲートコントローラ (Gate Controller)

立坑の信号機。無人または有人 DT が、立坑に進出し、投入している場合には、赤回転灯が点灯し、次の無人 DT は、立坑エリア外で待機する仕組みとなっている。ゲートコントローラがあることによって無人、有人の混合投入を可能にする。

(5) リモートフリートマネージャ (Remote Fleet Manager)

移動式の指令車。搭載されたパソコンにて、無人 DT の発進、停止指示、GPS 測量によるコース測量、現場でのモニタリング、故障内容確認、復帰を実施する。

3. 安全対策

無人 DT 走行システムは、安全に特に留意されたシステムである。主たる安全対策について次に説明する。

(1) 無人 DT 本体の安全対策

(a) 障害物検出装置

無人 DT 走行中の落石や機器の故障によりコース離脱した場合の盛土などとの衝突を回避するために、自動でこれらの障害物を検出するシステムが必要不可欠である。またコースから 1.5 m 離脱した場合には緊急停止になるように、二重の安全対策がなされている。

障害物検出装置の設定は、人が直立した状態で調整し、時速 20 km までは対象物手前で自動停止し、悪路、坂道で誤検出しない設定とした (詳細は後述)。

(b) 機械異常検知

無人 DT のベース車両となった 180t 積 DT は VIMS (機械稼働情報管理システム) を搭載しており、機械の稼働状況を常時監視している。システム起動中は、搭乗オペレータによる機械異常の認識ができない。そこで VIMS を利用し、車両異常を監視し、異常な場合緊急停止するシステムとしている。

(c) GPS 位置精度低下、無線通信ダウン

無人 DT の位置補正には、GPS によるリアルタイムキネマティック測位 (誤差数 cm) を利用している。DT の正確な位置検出には、一定数の GPS 衛星が必要であり、場所、時間によっては残壁に遮られて、位

置精度が低下することがある。この場合は一時停止状態となり、位置精度が向上次第、自動的に復帰する。また無線が一定時間以上通信ダウンした場合にも一時停止状態となり、通信が再接続次第自動的に復帰するシステムとしている。

(2) 周辺機器の安全対策

(a) 遠隔停止装置

フリートマネージャ、リモートフリートマネージャ、WTL には、クリックまたはボタン式の遠隔停止装置が装着されている。また稼働エリア内に進入する可能性があるオペレータは腕時計式の遠隔停止装置を携帯し、必要があれば無人 DT を停止させることができる。

(b) 接近警報装置

接近警報装置は、無人 DT の接近を検出するための装置である。無人 DT からの連続的に発信されている電波の電界強度によって三段階の警報レベルが設定されており、有人車両にとりつけられている。

4. コース

(1) コース図

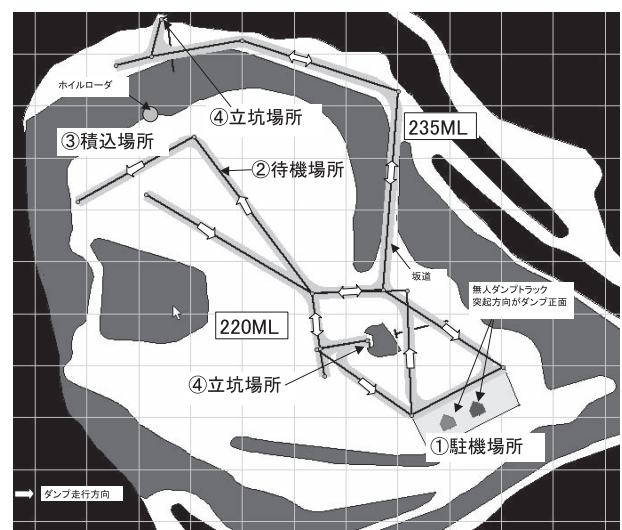
図—2 は実際に使用したコース図である。図のコースの特徴としては、2 立坑投入可能、交差点・坂道があるという点である。コースの仕組みについて次に述べる。走行コースの作成には、

積込対象場所…積込対象場所及びその幅の決定

使用立坑、駐機場所…1 立坑 or 2 立坑、

駐機場有 or 無の決定

走行可能場所…盛土他障害物の有無の確認



図—2 コース図

が必要である。走行可能場所情報は、リモートフリートマネージャによるGPS測量によって得ることができる。図-2の白色部分が、走行可能場所であり、コースを作成することが可能である。また灰色線は無人DTの走行コースである。走行コースは、出発点と到着点で一つのコースとして認識され、図-2の場合、表-2の7つのコースから構成されている。走行コースは、ダンプ同士の衝突をさけるため、ゾーンに細分されている。ゾーンは、コンピュータ上で自動的に計算、細分される。一つのゾーンは一台の無人DTのみ占有する仕組みとなっており、ゾーンの占有、開放を繰り返すことによりフリート制御を可能にしている。仮にそれぞれコース同士でゾーンが重なっている場合は、交差点であると認識し同一のゾーンとなっている。

表-2 走行コース

走行コース	出発点	到着点
1	駐機場所	積込場所
2	積込場所	立坑場所1
3	立坑場所1	積込場所
4	積込場所	立坑場所2
5	立坑場所2	積込場所
6	立坑場所1	駐機場所
7	立坑場所2	駐機場所

5. 問題点の解決

(1) 障害物検出装置の改良

障害物検出装置は、無人DTの前方に3箇所、後方に1箇所取り付けられており、検出した際には、WTLオペレータは、対象物（落石等）を確認し、必要に応じて除去し、安全を確認した上で無人DTを復帰させる。障害物検出装置は安全対策の中で最も重要な項目である。

180t積無人DT走行システムにおいて当初検討した障害物検出装置は、電波法上日本国内で使えなかったため（電波周波数帯不適合）新たな装置を模索した。2005年に超音波センサーを使用し、調整を試みた。超音波センサーは粉塵を誤検出することはなかったが、DTのホーンやコンプレッサーのエア開放音に反応することがあり、調整を断念し装置の再検討が必要となった。障害物検出装置を選定、調整する中で、備える要件を以下の通りとした。

- ①反応対象物 人（直立）、盛土（1m以上）、車
- ②検出範囲（幅）車体幅をカバーし、広過ぎないこと
（最終設定：車体幅片側+1m）
- ③対象物前停止スピード 可能な限り大きく
（最終設定：時速20km）

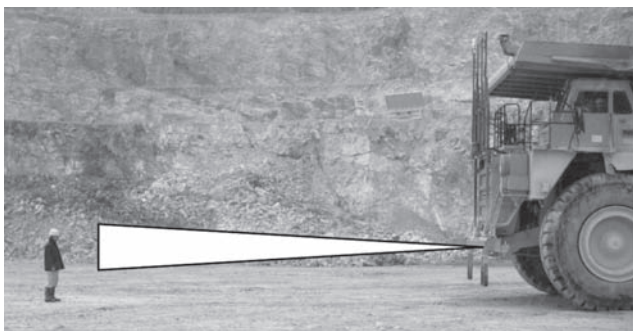
表-3 障害物検出装置 調整経緯

年月	現象	原因	対策
2006年 3月	機器納入・調整開始		
3月	走行中誤検出発生	走行中に路盤を検出していると推定	アンダーガード取り付け
3～4月	走行中誤検出発生	エンジン振動であると推定	ゴムマウントを製作、取り付け
4月	レーダの固体差が顕著		不良レーダの交換
6月	降雨時に誤検出発生	雨を誤検出	オーバーガードの取り付け、レーダ取り付け角度を上方に修正⇒検出範囲が狭くなる 条件を統一するために同一取り付け箇所にて、レーダ検出閾値を調整、設定完了
7月	人を対象にして最終確認実施中にレーダにより個体差が発生	確認走路が若干傾斜 DT本体の沈み込み	整盤実施 サスペンション圧調整
8月～10月	フリート稼動にて確認、通常路盤にても誤検出する場合がある		それぞれの取り付け箇所にて再度レーダ検出閾値を個々に調整、設定完了
11月	レーダの固体差が完全に除去されない		盛土、車は人よりも反射率が高い 人の反射率を高めるために、金属スプレー、金属テープを安全ベストに取り付け、テスト⇒検出状況は変わらず 誤検出の原因と思われるGATEを使用せずに調整・設定完了 坂道での誤検出のチェック⇒誤検出無
12月～2007年1月	フリート稼動にて確認⇒8-10月に比べ誤検出は少なくなった 障害物が車体幅+1m以上離れていても検出する場合有り	レーダの検出幅が広い	左右のレーダについては遮蔽板装着し、検出幅を制限
1月	調整完了		

- ④坂道 坂道上り, 下り対応可
- ⑤現場条件 雨, 粉塵, 音に反応しないこと

この条件を満たす可能性が高く, 電波法に適合する障害検出装置(マイクロ波レーダ:FMCW方式24GHz帯)の納入は2006年3月となった。このレーダはGATEと呼ばれる距離ごとに閾値を設定し, 閾値を超えた場合に検出するようになっている。調整を実施するにあたっては, 取り付け方法(マウント, ガード), 取り付け位置・角度, 使用GATEの選択, 各GATEの閾値の調整等を実施した。

採掘現場は一様なものではなく, 路盤条件は常に化する。雨が降ったあとには路盤はぬかるみ, また同一のコースを走行する中で, 荒れてくる。その中で, 上記条件を満たす検出装置になるように調整する必要がある。また調整後, 短期間使用した場合には誤検出がなくても, 長期間にわたり使用した場合には誤検出が起きることがある。そのため起きた事象に対して, 対応策を順次実施し, 最終的な設定に到達することができた。



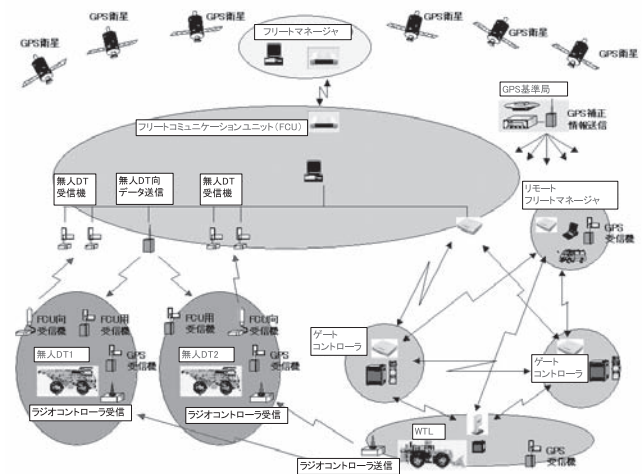
図一3 障害物検出装置 検出範囲概念図

(2) 無線システムの改良

図一4は, 今回使用した無線システムのブロック図である。348M~2.4GHz帯まで様々な周波数帯の無線機を使用することによって, 無線の混信を避けている。

当初検討した無線システムでは, フリートマネージャ⇔無線中継局(アンテナ)の通信設備において, 有線LANを使用していた。しかし無線中継局から, 採掘現場全体が見渡せないため, 無人DTやWTLとの無線電波断が発生することがあった。無線中継局を採掘現場全体が見渡せる場所に移動させるために, 無線LANに変更した。またゲートコントローラに使用されている2.4GHz無線機が製造中止となり, 機器の更新追加等で問題が発生するため, 無線中継局⇔ゲートコントローラの通信設備をフリートマネージャ⇔無線中継局とは電波周波数帯がずれている無線LANに仕

様を変更した。この際, 無線中継局⇔WTL・無線中継局⇔リモートフリートマネージャの通信設備を同様に, 無線LANとして構築することによって汎用性を持たせるとともに, 無線電波断の可能性を低減するために仕様を変更した。



図一4 無線システム

6. 生産実績, 今後の対策

表一4 無人DT生産実績

	2007年1~2月	3~12月	
操業時間:A	599	1,585	[h]
システム稼働時間:B	270	484	[h]
稼働割合:B/A	45.1	30.6	[%]
生産数量:C	284,240	488,680	[t]
生産性:C/B	1,053	1,009	[t/h]
有人DT生産性	1,500	1,500	[t/h]
対有人DT生産性比率	70.2	67.3	[%]

※生産量、生産性はDT2台の合計

(1) 稼働確認(1~2方連続無人)…2007年1月~2月
 障害物検出装置の調整が完了し, 1~2方連続でフリート稼働を実施した。WTLの故障が1週間程度あり稼働できなかった時もあったが, システム機器の完成度は高く, 機器の故障は少なかった。積込運搬作業を省力化することができ, 約15万t/月の生産数量で, 一定の評価に値する結果であった。但し, 2ヶ月間無人DT走行システムの1~2方連続運転を実施することにより, 無人DTに必要な広い作業範囲の確保が困難となった。また, 有人DTとの生産性の差異があり, 1日の必要生産数量を確保するための方策に苦慮していた。そのため3月以降は1方のみでフリート稼働を実施し, 2方は生産数量を確実に確保するために有人DTとして使用している。

(2) 運用 (1方無人, 2方有人) …2007年3～12月
1方のみでフリート稼働を実施しており, 4月にメーカより引渡しとなった。生産性は1～2月とほぼ変わらなかったが, 生産数量が増大しなかった。これは次の理由による。

(a) 切羽整備

無人DT走行システムの稼働を優先した場合は, 下段ベンチからの積込運搬作業が多くなり, 切羽形状が悪化する。上段ベンチの採掘を優先したために, 無人DT走行システムの稼働時間を短くせざるを得なかった。

(b) 生産数量の確保

無人と有人DTの生産性の差異により, 必要生産数量を確保するために, WTL及び無人DTの故障や定期修理実施の際には, 2方だけではなく, 1方においても無人DTを有人DTとして使用した。そのため稼働時間が短くなった。

(c) 故障対応

引渡し後, メーカの駐在員が不在となり, 故障の際, 初期故障診断や現象の再現性確認に時間を要した。

(3) 今後の対策

今後, 無人DTの稼働割合及び生産性の向上のために以下の対策を順次実施していく予定である。

(a) 稼働割合の向上

- ①端縁部の採掘促進によりベンチ段数を減らし, 各ベンチフロア幅を拡げることで, 無人DT走行システムの運行可能場所の増大を実施。
- ②故障対応の迅速化のために故障履歴の活用を実施, 主故障原因については, 改造を含めた抜本的防止対策を実施。
- ③現在システム運用責任者は若干名であり, 常時システムを運用するために, 運用責任者の拡充を実施。

(b) 生産性の向上

- ①各ベンチフロア幅を拡大することにより積込対象場所に応じた最適なコース設計を実施。
- ②現在使用している障害物検出装置をより高性能な装置とすることにより, 最高速度を20⇒30km以上に引き上げる。

また現在, 2009年度より出鉱予定の第3鉱画での稼働を検討している。理由として第2鉱画の採掘レベルの低下に伴って残壁に遮られる割合が多くなり, GPS位置精度低下時間が多くなること及び第2鉱画の立坑貯鉱容量減少に伴い, 投入量と立坑曳き出し量の調整を行う必要があり, 生産性が制限される可能性が高いからである。第3鉱画で稼働することにより, 稼働割合の向上及び生産性の向上の両方を実施するこ

とができると考えている。

7. 終わりに

冒頭で記載のとおり, ①安全第一, ②有人積込運搬機との共存, ③システムの高利便性の構想で開発, 運用を行ってきた。安全第一については, 現在まで対人, 対物事故を発生させていない。有人積込運搬機との共存は, 問題なく実施されている。システムの高利便性についても所用の対策をとることができた。しかしながら有人DT並の生産性の確保を含め今後の運用にあたっては, 次のように考えている。

無人DTの生産性は, 有人DTに比べ7割程度であったが, 積込運搬作業の省力化に一定の成果をあげることができた。今後対策を実施し, さらに省力化を実施していく予定である。

また導入検討から運用までに約8年の歳月が経過した。未だいくつか課題が残っており, 完全に積込運搬作業を合理化できていないことは無人DT走行システムの開発, 運用が如何に困難であることを示している。しかしながら, 無人DTは, 未知の技術ではなくなり, “手に届く”技術となった。今回, 無人DT走行システムを開発, 運用の中で得られた知見及び経験は, 我々の中で間違いなく財産となり, 今後引き継がれていくことであろう。

最後に, 無人DT走行システムの開発, 運用にあたり, システムの開発を担当して頂いたキャタピラー・ジャパン社の関係各位, 懇切丁寧なご指導, ご高配を賜りました諸先輩方に厚く御礼申し上げます。

JICMA

【筆者紹介】

宮下 耕一 (みやした こういち)
住友大阪セメント(株)
栃木工場唐沢鉱業所 鉱山課長



川地 真司 (かわじ しんじ)
住友大阪セメント(株)
鉱産品事業部資源グループ 資源チーム



石井 崇暁 (いしい たかあき)
秋芳鉱業(株)
アンホ製造所火薬生産課係長

