

小特集 建設施工にかかわるシミュレーション技術 建設技術のシミュレーション技術

運搬システム支援ソフトウェアの現状

坂井忠浩・山本茂太

近年、大型土工現場の切盛計画や露天採掘現場の岩石採取設計にはCADが広く用いられ、環境や経済性を考慮した、より現実に近い開発計画が机上で簡便に立案できるようになり、国土や資源の有効活用に大きく寄与している。そのような中、新キャタピラー三菱株式会社では、独自開発した露天採掘計画用CADとダンプトラックの運搬シミュレーションや、走路設計ノウハウを組合わせたソフトウェアを考案し、より安全で効率的な機械編成や走路造成を行える体制を築きつつある。本報文ではそのソフトウェアの概要と効果について報告する。

キーワード：安全、運搬、効率化、CAD、シミュレーション、ビークル、フリート

1. ソフトウェア開発の経緯

建設機械が土木工事や鉱山開発にとって欠くことのできないツールとなってから半世紀を迎えようとしている現在においても、大量の土砂や原石を移動させる手段のひとつとして、ダンプトラックはその汎用性の高さなどから中核を成す運搬機械として位置付けられ広く使用されている。それ故に、現場におけるコストダウンを考えるうえで運搬というファクターの占めるウエイトは非常に重く、メーカーに対するユーザからの現場改善提案のニーズも大きい。

新キャタピラー三菱株式会社（以下、当社と略記）においては、ダンプトラックの走行シミュレーションや、積み込み運搬の組合せ作業量シミュレーションなどのソフトウェア開発を1970年代より手掛け、数多くの現場改善活動を支援し成果を上げてきた。しかし、これら従来のシミュレーションはいわば「個」のシミュレーションにとどまっており、より複雑な条件でのシミュレーションに対するニーズが大きかったため、様々な現場条件を再現できる「群」をシミュレート可能なソフトウェアを新たに開発した。

また、それと並行して独自に3次元CADを用いた地形処理ソフトウェアを開発し、土木工事や露天採掘場における開発計画の省力化を図り、景観などの環境保全と経済性を考慮した計画立案基盤の提供を行ってきた。

現在では、これらの当社で開発したソフトウェアを組み合わせることによって、運搬システム効率向上をよ

り高い精度でシミュレート可能であり、開発計画の段階から既に進行中のプロジェクトの改善提案まで様々なニーズに対応することが可能となっている。

2. ソフトウェアの概要

(1) ビークルシミュレーション (Vehicle Simulation)

ビークルシミュレーションとは1970年代に米国CAT社で原型が開発された、任意の走路における運搬機のサイクルタイムおよび運搬作業量を算出するソフトウェアである。

そのオリジナルのソフトウェアは1980年代に日本語化され、その後も改良が続けられている。現在のバージョンはMS Visual Basicを利用して再開発され、各種データの入力と結果出力がMS Excelにて行えるようになり、データの汎用性が高くなっている。

本ソフトウェアでは、

- ・コースデータ、
- ・マシンデータ、
- ・シミュレーションデータ、

の3種のデータを入力し、それらを演算した結果、運搬機のサイクルタイムおよび作業量を算定する（図1）。入力データと出力データの詳細は以下の通りである。

ソフトウェアの歴史は長く、多くのシミュレーション実施実績があるが、単一走路、単一機種のみに対応しており、複数機種、複数走路が混在する現場に対応した結果を算出するためには、機種や走路に応じたシミュレーションを繰返す必要がある。

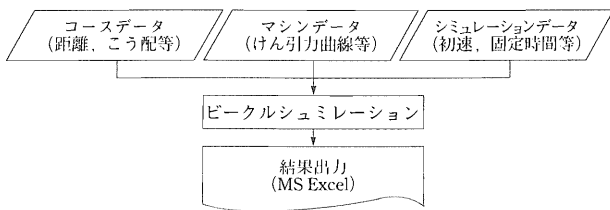
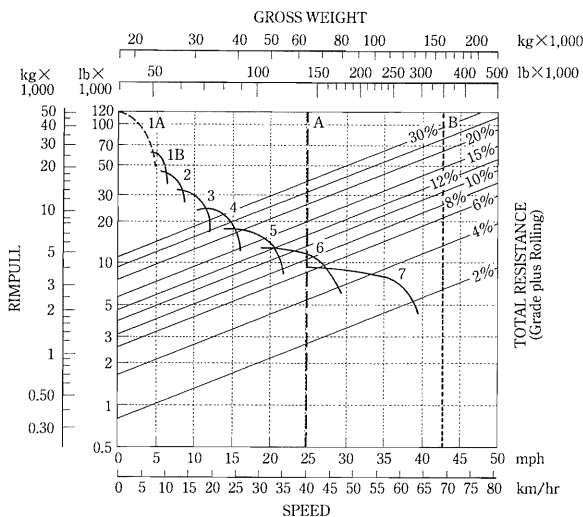


図-1 ビークルシミュレーションの概略

① 入力データ (図-2, 図-3 参照)

図-2 ユースデータ



KEY	KEY
1A - 1st Gear (Torque Converter)	A* - Empty 64,359 kg (141,889 lb)
1B - 1st Gear	B* - Max GMW 161,028 kg (355,000 lb)
2 - 2nd Gear	
3 - 3rd Gear	
4 - 4th Gear	
5 - 5th Gear	
6 - 6th Gear	
7 - 7th Gear	

*These two reference lines (A and B) apply only to 777D.

図-3 マシンデータ (牽引力曲線)

- コースデータ：各変化点における距離, 勾配, 回転抵抗等
- マシンデータ：バケット容量, 積載重量, 牽引力曲線等

- シミュレーションデータ：初速, 終速, 固定時間, 作業効率等

② 出力データ (図-4)

- サイクルタイム：運搬機の走路往復時間
- 走行データ：各地点における限界速度
- 時間当たり作業量：m³/h もしくは t/h

図-4 出力データ

(2) フリートプロダクション (Fleet Production)

フリートプロダクションは、ビークルシミュレーションと同時に米国 CAT 社で開発された、積み込み運搬システムとしての作業量を算出することが可能なソフトウェアである。

本ソフトウェアでは、ビークルシミュレーションで算出された運搬機単体の運搬作業量とその台数、積み込み機単体の積み込み作業量とその台数、およびバンチングファクターを用いることにより、作業量を算出する。運搬システムとしての作業量を考える場合、単純に機械単体の作業量に台数分を乗じるだけでシステム全体の作業量を求められるものではない。また、積み込み作業を行う積み込み機と、運搬作業を行う運搬機を組合わせた積み込み運搬システムの場合、システム全体の作業量は理論的な総作業量の値が低い方に制限される。

例を挙げるならば、ある現場に時間当たり 100 トンの運搬作業量を持つ機械を 100 台導入した場合、時間当たり 10,000 トンの作業量を得ることは非常に難しく、相当の条件が揃わない限り理論的な総作業量である 10,000 トンは得られないであろう。そこで米国 CAT 社では、運搬機の理論的な総作業量と積み込み機の理論的な総作業量の比 (マッチファクター) から作業量低下係数 (バンチングファクター) と呼ばれるもの

を、莫大な量の実測値を基に経験値として導出し適用することによって、より現実に近い結果を算出することができるようになった。

現在では、ピークルシミュレーションと統合され、データの受渡しなどにおいて利便性が向上している。

(3) フリートシミュレーション (Fleet Simulation)

前述したピークルシミュレーション、フリートプロダクションの二つのソフトウェアは、それぞれ単一機種、単一走路におけるシミュレーションが可能なソフトウェアであり、複数機種が稼働し、走路に分岐、離合などが複数存在する実際の稼働現場の状況を再現しているとは言い難い。そこで、複雑な現場状況を高い精度で再現したシミュレーションを行い、サイクルタイムや作業量の算出、あるいは走路上の待ちの発生状況などを正確に把握し、効率的な積込み運搬システムの提案を可能にすることを目的として、フリートシミュレーションが開発された。

本ソフトウェアは、米国 Rockwell Software 社製のソフトウェアである「Arena (アリーナ)」を利用している。この「Arena」は、離散系シミュレーションに関して十分な機能を備えているほか、MS Visual Basic for Application に対応しており、運搬機の挙動を求める際にピークルシミュレーションの機能を利用することも可能となっているため、本ソフトウェア開発に相当であった。

当社ではこの「Arena」の機能と、これまで当社で研究開発してきたロジックを組み合わせることによって、走路のモデリング、積込機、運搬機の稼働パターンのモデリングを行い、シミュレーションを実行している(図-5)。

本ソフトウェアの最大の特徴は「現場に適した積込み運搬システムを構築するために、様々な条件における比較分析(“What-if”分析)の実施が容易である」という点にある。例えば、

- 運搬機の機種変更をした場合の作業量はどの程度変化するのか?
- 積込機の機種を変更した場合の作業量はどの程度変

化するのか?

- 積込機と運搬機をそれぞれ何台導入すれば最も効率上がるか?

などの、様々な状況を想定したシミュレーションを行い、その結果を比較分析することによって、その現場における積込み運搬システムの最適解を容易に求めることができる、ということである。また、こうした最適機種選定におけるシミュレーションの他に、走路設計におけるシミュレーションも可能である。即ち、

- 走路上のどの位置に離合場所を設けるか?
- 1車線から2車線走路に拡幅が可能であるならば、どの部分を拡幅するのが最も効果的か?
- 勾配を緩やかにするために走路延長を延ばすか?
- 急勾配の走路を設置しても効率は上がるか?

などの、様々な走路の状況を想定したシミュレーションを行い、同様の比較分析をすることによって、走路設計においても本システムを有効に活用することが可能である。

結果出力機能については、本ソフトウェアには以下の通り3種の機能がある。

① MS Excel による詳細結果出力(図-6)

運搬機サイクルタイム、運搬機運搬回数、運搬機作業量、運搬機稼働率、待機場所における運搬機の待ち回数、待機場所における平均待ち時間、等

No.	機種名	稼働時間	積込回数	運搬回数	サイクルタイム
88	積込機	02:42	02:46	11	01:52
89	積込機	02:42	02:46	11	01:52
90	積込機	02:42	02:46	11	01:52
91	積込機	02:42	02:46	11	01:52
92	積込機	02:42	02:46	11	01:52
93	積込機	02:42	02:46	11	01:52
94	積込機	02:42	02:46	11	01:52
95	積込機	02:42	02:46	11	01:52
96	積込機	02:42	02:46	11	01:52
97	積込機	02:42	02:46	11	01:52
98	積込機	02:42	02:46	11	01:52
99	積込機	02:42	02:46	11	01:52
100	積込機	02:42	02:46	11	01:52
101	積込機	02:42	02:46	11	01:52
102	積込機	02:42	02:46	11	01:52
103	積込機	02:42	02:46	11	01:52
104	積込機	02:42	02:46	11	01:52
105	積込機	02:42	02:46	11	01:52
106	積込機	02:42	02:46	11	01:52
107	積込機	02:42	02:46	11	01:52
108	積込機	02:42	02:46	11	01:52
109	積込機	02:42	02:46	11	01:52
110	積込機	02:42	02:46	11	01:52
111	積込機	02:42	02:46	11	01:52
112	積込機	02:42	02:46	11	01:52
113	積込機	02:42	02:46	11	01:52
114	積込機	02:42	02:46	11	01:52
115	積込機	02:42	02:46	11	01:52
116	積込機	02:42	02:46	11	01:52
117	積込機	02:42	02:46	11	01:52
118	積込機	02:42	02:46	11	01:52
119	積込機	02:42	02:46	11	01:52
120	積込機	02:42	02:46	11	01:52
121	積込機	02:42	02:46	11	01:52
122	積込機	02:42	02:46	11	01:52
123	積込機	02:42	02:46	11	01:52
124	積込機	02:42	02:46	11	01:52
125	積込機	02:42	02:46	11	01:52
126	積込機	02:42	02:46	11	01:52
127	積込機	02:42	02:46	11	01:52
128	積込機	02:42	02:46	11	01:52
129	積込機	02:42	02:46	11	01:52
130	積込機	02:42	02:46	11	01:52
131	積込機	02:42	02:46	11	01:52
132	積込機	02:42	02:46	11	01:52
133	積込機	02:42	02:46	11	01:52
134	積込機	02:42	02:46	11	01:52
135	積込機	02:42	02:46	11	01:52
136	積込機	02:42	02:46	11	01:52
137	積込機	02:42	02:46	11	01:52
138	積込機	02:42	02:46	11	01:52
139	積込機	02:42	02:46	11	01:52
140	積込機	02:42	02:46	11	01:52
141	積込機	02:42	02:46	11	01:52
142	積込機	02:42	02:46	11	01:52
143	積込機	02:42	02:46	11	01:52
144	積込機	02:42	02:46	11	01:52
145	積込機	02:42	02:46	11	01:52
146	積込機	02:42	02:46	11	01:52
147	積込機	02:42	02:46	11	01:52
148	積込機	02:42	02:46	11	01:52
149	積込機	02:42	02:46	11	01:52
150	積込機	02:42	02:46	11	01:52
151	積込機	02:42	02:46	11	01:52
152	積込機	02:42	02:46	11	01:52
153	積込機	02:42	02:46	11	01:52
154	積込機	02:42	02:46	11	01:52
155	積込機	02:42	02:46	11	01:52
156	積込機	02:42	02:46	11	01:52
157	積込機	02:42	02:46	11	01:52
158	積込機	02:42	02:46	11	01:52
159	積込機	02:42	02:46	11	01:52
160	積込機	02:42	02:46	11	01:52
161	積込機	02:42	02:46	11	01:52
162	積込機	02:42	02:46	11	01:52
163	積込機	02:42	02:46	11	01:52
164	積込機	02:42	02:46	11	01:52
165	積込機	02:42	02:46	11	01:52
166	積込機	02:42	02:46	11	01:52
167	積込機	02:42	02:46	11	01:52
168	積込機	02:42	02:46	11	01:52
169	積込機	02:42	02:46	11	01:52
170	積込機	02:42	02:46	11	01:52
171	積込機	02:42	02:46	11	01:52
172	積込機	02:42	02:46	11	01:52
173	積込機	02:42	02:46	11	01:52
174	積込機	02:42	02:46	11	01:52
175	積込機	02:42	02:46	11	01:52
176	積込機	02:42	02:46	11	01:52
177	積込機	02:42	02:46	11	01:52
178	積込機	02:42	02:46	11	01:52
179	積込機	02:42	02:46	11	01:52
180	積込機	02:42	02:46	11	01:52
181	積込機	02:42	02:46	11	01:52
182	積込機	02:42	02:46	11	01:52
183	積込機	02:42	02:46	11	01:52
184	積込機	02:42	02:46	11	01:52
185	積込機	02:42	02:46	11	01:52
186	積込機	02:42	02:46	11	01:52
187	積込機	02:42	02:46	11	01:52
188	積込機	02:42	02:46	11	01:52
189	積込機	02:42	02:46	11	01:52
190	積込機	02:42	02:46	11	01:52
191	積込機	02:42	02:46	11	01:52
192	積込機	02:42	02:46	11	01:52
193	積込機	02:42	02:46	11	01:52
194	積込機	02:42	02:46	11	01:52
195	積込機	02:42	02:46	11	01:52
196	積込機	02:42	02:46	11	01:52
197	積込機	02:42	02:46	11	01:52
198	積込機	02:42	02:46	11	01:52
199	積込機	02:42	02:46	11	01:52
200	積込機	02:42	02:46	11	01:52

図-6 結果出力の一例

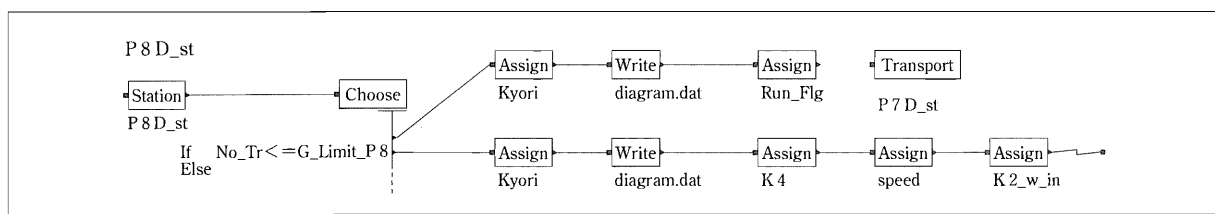


図-5 アルゴリズムの一例

② MS Excel によるダイヤグラム作成 (図-7)

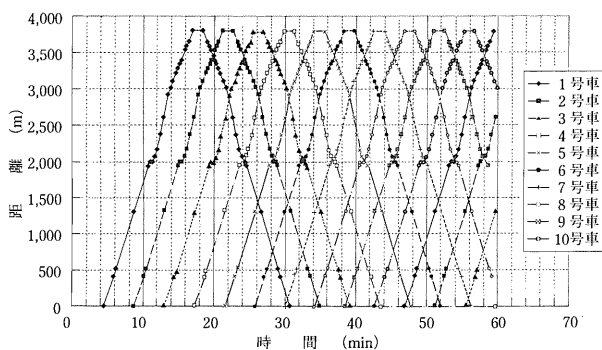


図-7 ダイヤグラムの一例

③ シミュレーション状況のアニメーション表示 シミュレーションを実行する際にモデリングした画面を利用して、運搬機、積込機の稼働状況をアニメーション表示することが可能 (図-8)

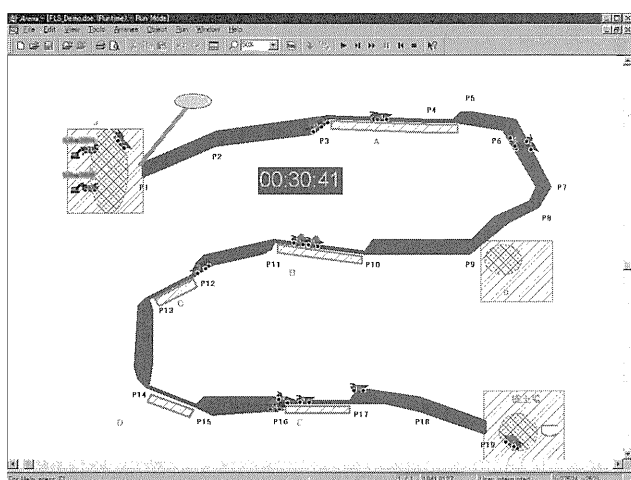


図-8 アニメーション表示

運搬機の大型化、様々な現場周辺の制約条件などにより、重機の稼働環境は従来と比較して非常に複雑になっている。現場条件の正確な再現と複数通りの検討を容易に行うことができる本ソフトウェアに対するユーザーズは、今後ますます大きくなると考えられる。

(4) 地形処理ソフトウェア「Sitecraft」 (サイトクラフト)

サイトクラフトは、砕石、鉱山、ダム現場などの原石山管理と開発計画の立案、図面作成を目的とした地形処理用 CAD ソフトウェアである。

当社では、早期から砕石業の許認可申請業務代行および現場コンサルティングを行っており、従来は全て自社開発した CAD ソフトウェアである「DOGRUN (ドッグラン)」を利用して当該業務を行ってきたが、汎用 3 次元 CAD ソフトウェアが目覚ましく進歩した

こと、また図面作成業務の効率化を図る必要から、米国 Bentley Systems 社製の汎用 CAD ソフトウェアである「Micro Station」(マイクロステーション)をベースとして、新しく地形処理ソフトウェアを開発することとした。

本ソフトウェアは、汎用 CAD ソフトウェアがベースとなっているため、その機能を用いて作図を行うことができ、使用に際して違和感の無いことが特徴の一つとなっている。また他の優れたアドオンソフトウェアとも自由に関係が取れるため、高い拡張性も有している。

本ソフトウェアの主な機能は以下の通りである。

- ・現状地形および地層の 3 次元モデリング機能
- ・採掘および盛土計画のためのベンチ設計機能
- ・三斜求積法、または座標求積法による求積図表の作成
- ・平均断面法による採取量および盛土量の算出
- ・許認可申請図面の作成
- ・計画入り景観図の作成

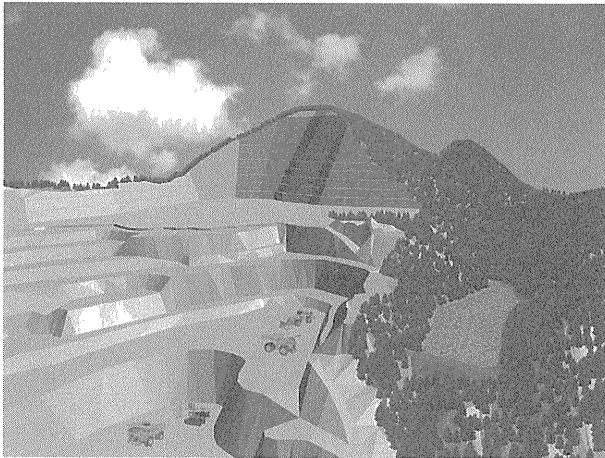
ベンチ設計機能は本ソフトウェアの中心的機能である。机上でベンチ設計を行う場合とほぼ同じ手順で作業を進めていくことになるが、設計の途中でベンチを立体的に確認したり、採掘鉱量を把握したりできるのが最大の特徴である。

まず採掘区域を設定し、採掘計画を立てる場合は切り始めの位置から、盛土計画を立てる場合は盛り始めの位置から、それぞれ設計を開始することができ、全体計画の設計は極めて簡単に完成する。次に採掘鉱量を確認しながら各年度の計画を立て、最終的な設計が完了する。計画線の位置を修正する場合は、数段先の計画線が参照線として表示され、先を予想しながら修正できるので、計画線を確実に採掘区域内に収めることができる。

採掘計画を設計する際の特殊機能としては、最大採掘量を意識しながら設計を進めやすくするために、指定標高までの採掘円を参照表示させる機能や、切り始めとなる最初の小段を自動で発生させる機能などがある。

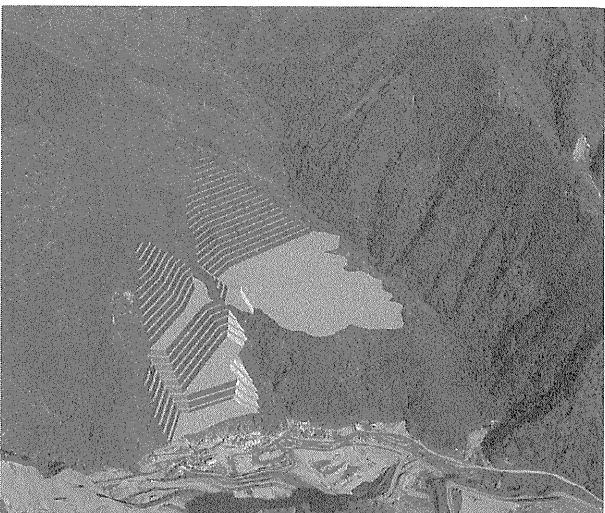
作図結果の出力機能では、いくつかの設定値を入力するだけで、平面図、断面図、求積図および景観図を自動作成することができ、これらは許認可申請の下図として利用することも可能である。また、景観評価の資料となる景観図の作成機能では、実際の景観により近づけるために、日時指定の太陽光による陰影、カメラおよび目標点位置を指定した透視投影効果、テクスチャマッピングによる複数種の樹木の植樹や原石の材

質指定などの様々な効果を設定することができる（図—9）。



図—9 景観図

カメラの視点を変えることができることにより、走路を走行する運搬機からの視界をバーチャルに再現することもできる。さらにモンタージュ機能によって、現場上空から撮影した現況の航空写真に、サイトクラフトで作成したベンチの画像を合成することができるため、より実感的な景観図を作成することも可能である。これらの機能は、景観評価における開発地域住民への説明や、現場の安全管理において非常に有用である（図—10）。



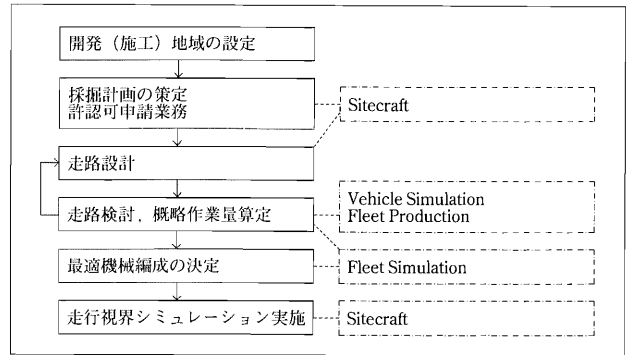
図—10 モンタージュ

本ソフトウェアの作図機能を用いた申請図面作成コストの低減に対するユーザの評価は非常に高いが、許認可申請業務に限らず、シミュレーションとして地形モデルを用いた様々な鉱量や施工量の計算は応用の範囲が非常に広く、今後適用事例が増えるものと思われる。

3. 実施事例

ユーザへの支援活動に、前述した各種ソフトウェアを援用した事例を以下に紹介する。

ある砕石業を営むユーザの新規開発計画において、採掘計画の立案から最適機械編成の提案などのコンサルティングを行った。コンサルティングのフローは図—11の通りである。



図—11 フローとソフトウェア

（1） サイトクラフトによる採掘計画の策定および許認可申請業務支援

サイトクラフトによって開発区域の全体のベンチ設計、各年度の鉱量算定といった採掘計画を策定し、許認可申請に必要な下図を作成した。許認可申請コストに対するユーザの関心は高いが、サイトクラフトを利用することによって、効率の良く開発計画の検討および作図作業が行え、コストの低減が期待できる。また当社では、様々な開発計画の支援活動によって蓄積したノウハウから、安全で効率の高い開発計画の提供を行うことができる。

さらに切羽展開に合わせた走路設計も同時に行ったが、サイトクラフトによる走路設計と運搬シミュレーションソフトウェアのデータと関係することによって、開発段階で精度の高い走路設計が可能となっている。当該計画の走路設計では、走路幅員が十分に確保できない箇所も多く存在したが、当社のソフトウェアを組み合わせることで活用することによって、効率の低下を最小限とすることができた（図—12）。

（2） ビークルシミュレーションとフリートプロダクションによる走路検討及び概略作業量算定

サイトクラフトによって設計された走路に対してビークルシミュレーションを実施し、その走路における運搬機のサイクルタイムと作業量を検証することによって、最も効率の高い走路条件（曲率半径、勾配、等）

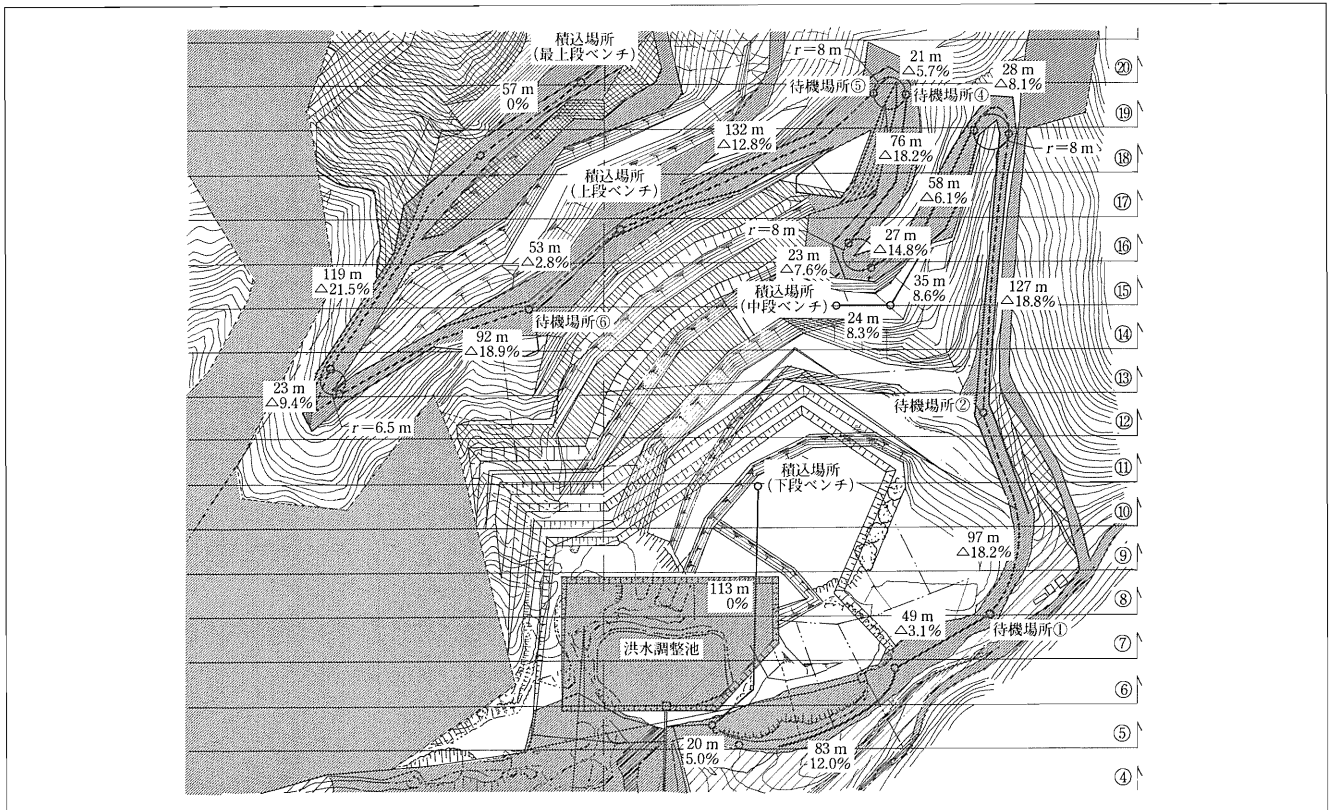


図-12 採掘計画図

を検討することができる。

当該計画で設計された走路では、走路全長の短縮を企図したため、走路中に急勾配および曲率半径が小さい箇所が散見されたが、ピークルシミュレーションの結果、これらの箇所での走行速度低下が確認されたため、勾配と曲率半径を適正なものへ是正した。

再シミュレーションの結果、走行の円滑化、速度変化の平準化による平均車速向上、サイクルタイム短縮、作業量増加が確認された。効率の高い走路を設計することによって、実際の稼働時における安全性の向上、燃料消費量の低減も期待できる。

(3) フリートシミュレーションによる走路配置の検討および最適機械編成の決定

複数の運搬機が走行した状況において、種々の走路の制約条件（狭隘部、離合場所、走路の合流部、交差部、等）が運搬機の挙動に及ぼす影響をフリートシミュレーションによってシミュレートし、最適な走路配置を検討した。

当該計画においては、十分な走路幅員が確保できず運搬機の離合場所を複数設置しなければならない区間のあることが設計段階において判明した。しかしフリートシミュレーションにより様々な離合場所の設置例を高い再現性で検討することができたため、最適な離合場所を決定することができた。現場稼働後に、こうし

た走路配置に関する問題が見出された場合、その修正には多大なコストが掛かるが、フリートシミュレーションにより計画段階において様々な状況を事前にシミュレート可能であるため、それらのコスト発生を未然に防ぐことが可能である。

さらに積込み運搬機械の編成についても、フリートシミュレーションによって、様々な機種種の混在した積込み運搬システムの作業量と稼働率を試算し、最も効率の高い編成を導くことが可能である。

当該計画においては、当初油圧ショベル2台と11t積みダンプトラック十数台による積込み運搬システムが検討されていたが、フリートシミュレーションによる試算の結果、運搬機の台数の多さから走路の各所で離合待ちや走行速度低下が発生し、各運搬機の稼働率が非常に低いことが判明した。

運搬機の1セットを重ダンプトラックへと大型化し台数を1/3程度とした再シミュレーションの結果、運搬効率が大幅に向上し、また運搬コストの低減にもつながることが判明したため、機械編成は油圧ショベルと11tダンプトラックおよび重ダンプトラックによる計画へ変更された（図-13）。

(4) サイトクラフトによる走行視界シミュレーション実施

サイトクラフトの機能の一つである景観図作成機能

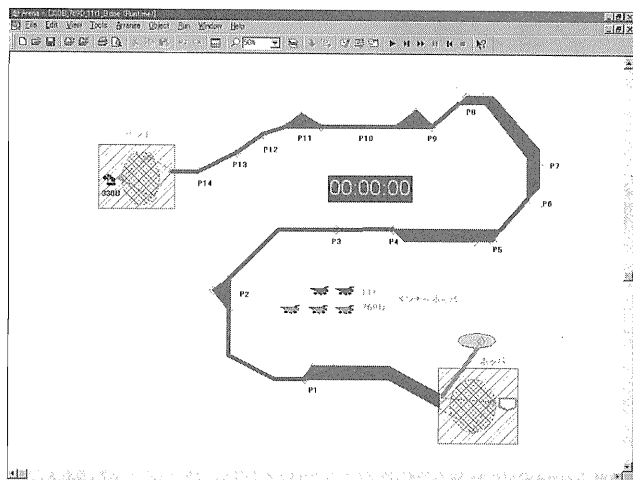


図-13 フリートシミュレーション結果

を用いて、設計された走路を実際に走行した場合の運搬機から眺めた景観を再現し、走路上の危険箇所の把握を行った。サイトクラフトでは、走路上の任意の地点間における情景を動画で再生することも可能であり、実際の走行状況に近い形で運搬機からの視界を再現できる。立体的な画像によって、走路の平面図面では確認することができない、走路上の潜在的な危険箇所を確認することが可能となる。

当該計画では、現場の稼働開始前に危険箇所を確認することによって、各種安全設備の設置場所などの検



図-14 走路景観図

討を事前に効率的に行うことができた。また現場稼働後も、作業者に対する安全教育などにこれらの画像を活用して頂いている（図-14）。

4. おわりに

新キャタピラー三菱株式会社で開発したソフトウェアの紹介を行ったが、各ソフトウェア間のデータの受渡しはまだ十分に出来ていないなど、いまだ開発の域を脱していないことは否めない。しかし個々のソフトウェアは実績に裏付けられた信頼性を持っており、現状でも十分に走路や積み込み運搬機種の最適化を図る活動に対し支援できるものと確信している。また、新たに開発する現場に限らず、既に開発が進んでいる現場においても現状分析や改善案立案に力を発揮することができることから、その活用範囲はかなり広いものと考えている。

大型土木工事や露天採掘場を取巻く社会環境は更に厳しくなると考えられる現在、環境とコストを考慮した運搬計画を立案することは必須条件となるものと考えられる。したがって、今後とも現場改善支援活動を通し、これらソフトウェアの玉成を図って行く所存である。

JCMA

【筆者紹介】



坂井 忠浩（さかい ただひろ）
新キャタピラー三菱株式会社
広報営業部
砕石マーケット営業課
課長



山本 茂太（やまもと しげた）
新キャタピラー三菱株式会社
広域営業部
環境マーケット営業課