

# VBAを活用した鉱山配車計画システムに関するシミュレーション分析

譚 奕 飛

Materials handling represents approximately 50 per cent of the operating costs for an open pit mine. This means an efficient operation of shovel-truck dispatching system is vital. In this paper, a practical dynamic simulation approach enhanced with Visual Basic for Applications (VBA) programming is proposed to optimize the trucks dispatch system for open pit mining planning. By presenting a case study in an open pit mine, it was found that by combining the simulation technique with the utilization of VBA programming, the transportation performance of trucks could be significantly improved, and a practical dispatching control table for meeting a mining plan can be created automatically.

**Keywords:** Simulation, Open Pit Mining, Trucks Dispatch, Visual Basic for Applications

## I. はじめに

鉱山は掘削技法によって、露天掘りと地下掘りの2種類に大別することができる。その中、露天掘り鉱山では、鉱石の上に覆う土砂である表土 (Soil) と鉱石 (Ore) を掘削・運搬するために、大型油圧ショベルのような掘削機械とダンプトラックのような運搬機械が必要とされる。このように、表土や廃石類の処分所までの運搬や、鉱石を製の錬工場への輸送等、マテリアルハンドリングにかかる費用は、鉱山のオペレーションコスト全体の50~60パーセント以上をも占めることが指摘されている (Kolojna *et al.*, 1993; Munirathinam and Yingling, 1994; Alarie and Gamache, 2002; Subtil *et al.*, 2011)。そのため、露天掘り鉱山のオペレーションコストを下げるためには、採掘や生産等の条件に応じて、マテリアルハンドリングを担うショベルやダンプトラック等を効率よく配車・管理させることが重要な課題になる。

鉱業における配車計画の問題に関しては、生産性の向上とオペレーションコストを削減するための重要な手段として1980年代中期から注目を浴び、研究されてきた (Elbrond and Soumis, 1987; Hagenbuch, 1987; Bandopadhyay and Venkatasubramanian, 1987; Blackwell, 1999; Ta *et al.*, 2005)。配車計画を最適化するための手法として, Ercelebi and Bascetin (2009) は待ち行列

理論 (Queueing Theory) などの数理計画モデルを用いたアプローチを提案している。Ercelebi and Bascetin (2009) は、ある一定の生産目標を確保しつつも、ダンプトラックの数を最小化するために、線形計画法 (LP: Linear Programing) を用いたモデルを開発し、ある鉱山の適用事例を通して検証した。線形計画法を使って配車計画の問題を解く前提条件としては、目的関数と制約条件などは線形であることや、不確実性を排除した精確なデータ (パラメータ) が必要とされるという課題が残されている。しかし、採掘の現場においては、不確実性を伴うことがむしろ一般的だといえるだろう。一方、不確実な条件やパラメータの「曖昧さ」を考慮し、ファジィ理論を目標計画モデルに取り入れた「Fuzzy Goal Programming」(ファジィ目標計画) モデルも提案されている (Oraee and Asi, 2004)。しかし、この研究において、生産目標や輸送条件に応じて、ショベル~ダンプトラック~鉱石投入口間/表土廃棄所間の最適な輸送ルートの組み合わせを洗い出すことができたとしても、輸送目標を達成するまでの詳細な配車表を提示するところには至らなかった。

鉱山のオペレーションの現場においては、生産目標量や輸送条件に応じて最適なショベルとダンプトラックの数を計画・設定することも重要であるが、ダンプトラックを何時 (When) にどのようなタイミングでどこ (Where) へ配車するか、そしてど

れぐらい (How much) の鉱石を運ぶかのような問題を解決することも、実務レベルでは非常に重要な課題である。このような課題に関しては、これまでの研究においては詳細に検討されていない。

上記の課題を解決するために、本研究では大規模な露天掘り鉱山におけるショベルとダンプトラックの配車計画問題に着目する。ある露天掘り鉱山を研究事例として取り上げ、ダンプトラックの配車計画を最適化するために、シミュレーション技法を生かした配車計画のアプローチを提案する。また、VBA (Visual Basic for Applications) プログラミングをシミュレーションモデルに組み込むことで、現実条件により合致した鉱山配車計画と詳細な配車表の自動作成についても検討する。

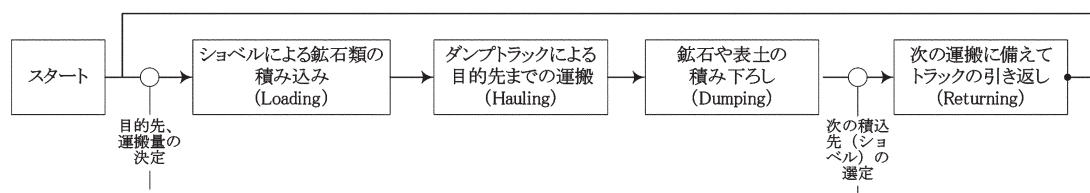
## II. 露天掘り鉱山における配車計画問題

露天掘り鉱山におけるマテリアルハンドリングシステムは、図 1 に示されるように、積込 (Loading) ・運搬 (Hauling) ・投棄 (Dumping) の 3 つのサブプロセスに分けられる。露天掘り鉱業において、配車管理を行う目的は主に 2 つ挙げることができる。1 つは、鉱山の生産性を向上させることで、そしてもう 1 つは、操業コストを削減することである (Alarie and Gamache, 2002)。ショベルとダンプトラック等のマテハン車両を効率よく配車し管理することで、同じの設備でもより多くの生産量を達成し、企業の収益性を改善することができる。一方で、露天掘り鉱山で使われるショベルやダンプトラックは、1 台に数億円もかかるものが多く、導入費用が高い。また、過酷な環境で連続して操業するため、機械の故障率が高く、車両のメンテナンスに高額な費用がかかる。ダンプトラックは、鉱石や表土等の運搬する際の最も一般的な手段である一方、車体が巨大なため、ガソリン等の燃料を莫大に消耗する。このように、ショベルやダンプトラックの配車や操業効率は直接に鉱山の生産性と操業コストに影響す

る重要問題である。

鉱山オペレーティングの現場においては、配車はしばしば複雑で難しい問題でもある。配車を考慮する際には、配車オペレーターは「次に、トラックをいつ、どのショベルへ行かせ、どれぐらいの量の鉱石を積んで、そしてどこへ向かわせるべきか」を迅速的に決め、トランシーバーなどを使い、トラックドライバーに指示を出す必要がある。この際に、製錬工場で設定した生産条件や鉱石に含まれる鉱物の含有量に応じて、「どのショベルへ」と「どれぐらいの量」を適切に調整する必要がある。例えば、マイニングプロセスの一環として、鉱山から掘削された岩石を精錬工場まで運んで、大型なミルで粉砕し、スライム状にしてから気泡剤を添加し、よく攪拌させ、金属と水を分離させることで、鉱物を回収しやすいようにする必要がある。この気泡剤は鉱石に含まれる鉱物の含有量に応じて、薬剤を使い分けたりブレンドする必要がある。24 時間稼働体制の工場では、鉱石は 24 時間間断なく供給される。製品の品質の均一性を維持するという生産管理の観点から、供給される原材料である鉱石に含まれる鉱物の含有量を一定に維持することが望ましい。しかし、自然界の鉱石に含まれる鉱物の含有量は、採掘ポイントによって異なる場合が多い。この場合、鉱石における鉱物の含有量を一定に維持させるためには、鉱物含有量の高い鉱石と含有量の低い鉱石をブレンドしてから工場に供給する必要がある。例えば、あるマイニング工場では、供給される鉱石における銅の含有量が 0.53% を目安にして気泡剤を調合した場合、工場へ供給される鉱石の銅の含有量が 0.53% 前後に維持することが望ましい。この際に、もし採掘ポイント A と B から得た鉱石の銅の含有量がそれぞれ 0.65% と 0.4% の場合、供給鉱石の銅含有量が 0.53% になるように、採掘ポイント A と B の鉱石を混ぜながら工場へ供給し続けたいといけない。この場合、ポイント A からどれぐらいの量の鉱石とポイント B からどれぐらいの量の鉱石を混ぜれば、0.53% の含

図 1 露天掘り鉱山におけるマテリアルハンドリングシステム



有量になるかを計算する必要がある。しかも、この計算は、一回だけではなく、ダンプトラックをショベルへ配車するたびに計算する必要がある。

露天掘り鉱業における配車アプローチは、1段階と多段階アプローチの2種類に大別することができる。表1にはこれまで提案された主な配車計画法をまとめる(Alarie and Gamache, 2002)。1段階アプローチのManual Dispatching法(マニュアル配車法)は、数理計画法を用いて論理的な計算せず、人間の経験と「勘」で手動で配車計画を決める手法である。一方、多段階配車アプローチは、数理計画法等を用いてショベル別の生産目標を計算してから、ショベルごとの生産目標を完成させるためにトラックの配車計画を考えるなど、いくつかのステップに分けて配車計画を立てていく手法である。さらに、多段階アプローチは、ショベルとトラックのどちらかを計画の基軸に置くかによって、また1-Truck-for-n-Shovelsとm-Trucks-for-1-Shovelのような手法にわけることができる(表1)。多段階配車アプローチは、生産(採掘)目標量の完成を最優先して、ショベル間、或いはトラック間の進捗の偏差を低減することを目指して配車計画を行う手法であるが、前出した課題の「トラックはいつに、どれぐらいの量の鉱石を積みか」の問題は依然として解決していない。本研究では、表1で提案した多段階配車アプローチを踏まえて、上記の課題を解決できるような配車計画法を検討する。

### Ⅲ. VBAを活用した動的配車アプローチ

これまでの研究で検討されなかった配車アプローチの課題を念頭に、本研究では、VBAプログラミングを取り入れた動的配車アプローチ(Dynamic Dispatching Approach)を提案する(図2)。

動的配車アプローチは、表1における多段階の配車アプローチに分類することができる。これまでの多くの配車法は、ある一定期間における鉱山の生産目標の完成を大前提とした最適なトラック数を計算する(これは提案したアプローチの第1段階の割当

図2 VBAを活用した動的配車アプローチ

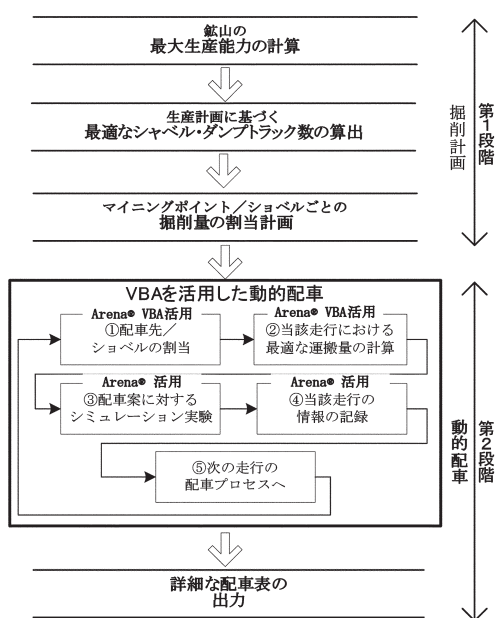
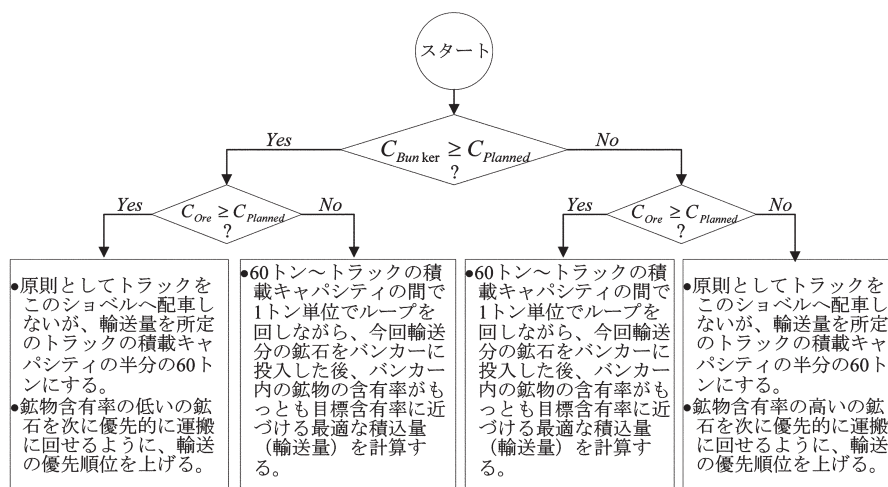


表1 露天掘り鉱山における主な配車計画法

1段階アプローチ	多段階アプローチ	
生産目標や制約条件等について数理計画法を用いて論理的に考慮せず、これまでの経験と勘だけで配車を決める。	配車するロジックを段階的に分ける(典型的なのは2段階)。最初の段階では、線形もしくは非線形の方法でショベル別に生産目標(採掘量)を計算・計画する。2番目の段階では、前段階で立てられたショベルごとの生産目標を完成させるようにトラックを配車しながら、生産偏差の低減を狙う。	
<b>配車法1: Manual Dispatching</b>	<b>配車法2: 1-truck-for-n-shovels</b>	<b>配車法3: m-trucks-for-1-shovel</b>
現場の「勘」による手動型配車を行う。	1台のトラックはn台のショベルから配車依頼を受ける可能性のある場合に、下記のどれかの評価基準に従い、ショベルに配車する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>Fixed Truck Assignment (FTA)</li> <li>Minimising Truck Waiting Time (MTWT)</li> <li>Maximise Trucks</li> <li>Minimising Shovel Waiting Time (MSWT)</li> <li>Maximising Truck Momentary Productivity</li> <li>Minimising Shovel Saturation (MSC)</li> </ul>	ショベルを採掘計画に対する進捗状況を示す尺度でソートし、配車依頼の順番を決める。m台のトラックの中から、生産の遅れを最も改善されるトラックを選んで配車する。

図 3 配車先の選定と最適な鉱石運搬量の計算のアルゴリズム



注:  $C_{Bunker}$  は現在、バンカー内の鉱石に含まれる鉱物の含有率を指す;  
 $C_{Planned}$  は、製錬プラントの生産計画を達成するために、掘削計画で計算に用いられた鉱石中の鉱物目標含有率を指す;  
 $C_{Ore}$  は、今回の運搬対象となる鉱石に含まれる鉱物の含有率を指す。  
 ※ダンプトラックの1回あたりの輸送量に関しては、1往復の走行で消耗するガソリンのコストを考慮し、採算の角度から、輸送量の下限をトラックキャパシティの約半分の60トンに設定してある。

計画のステップ2に相当する)。これらの方法では、現在のトラックの発送が次の配車要請にもたらす影響を考えないという「近視眼」的な配車法といえる (Subtil *et al.*, 2011)。これに対して、本研究で提案する動的配車アプローチは、第1段階の割当計画に加えて、第2段階に動的配車法を新たに導入し、ダンプトラックの毎回の輸送がシステム全体に与える影響を動的に捉えながら、走行ごとの最適な輸送量を動的に計算し、リアルタイムでの部分的最適化をも図る。

図2で提案した動的配車アプローチの「①配車先/ショベルの割当」と「②当該走行における最適な運搬量の計算」のステップは、VBAを活用して実現する。なお、配車先(ショベル)の選定および最適な運搬量を計算するアルゴリズムを図3に示す。本研究は、シミュレーションモデルにVBAプログラミングを取り入れることで、よりダイナミックで複雑なシミュレーションモデルを作ることができ、現実世界をより柔軟に対応することが可能になる。

#### IV. 事例研究：ある露天掘り鉱業企業における配車計画

##### 1. 露天掘り鉱山企業のA社

本研究で取り上げる露天掘り鉱山企業のA社は、

モンゴル国の北部に位置し、世界においても有数の鉱山企業である。A社は露天掘り鉱山のそばに製錬工場を建設し、1974年より銅と副産物であるモリブデンを採掘・生産し始めた。A社の場合、露天掘り鉱山も製錬工場も一年間を通じて24時間体制で稼働している。A社の国際競争力をあげるために、銅の国際価格や需要の動向に柔軟に対応できる発掘と生産体制を再構築することが重要となってきた。これを支援するために、A社とモンゴル国立大学との共同研究プロジェクトを立ち上げた。本研究は、その共同研究プロジェクトの一環として、鉱山の採掘と輸送等、企業におけるオペレーションの改善を第一の目的としている。

長年の採掘と開発に伴い、この鉱山の鉱石に含まれる銅とモリブデンの平均含有量が年々減少する傾向にある。また、この鉱山においては、採鉱地点の海拔により、銅の含有量が異なるという特徴がある。特に、採鉱で深く掘り込んだ海拔の低い場所では鉱石の銅の含有量が低くなっている。しかし、上述のように、製錬工場にとっては、安定した生産と製品の品質を維持するためには、24時間体制で供給される原材料の鉱石に含まれる銅の含有量がある程度安定していることが望ましい。そのような理由から、製錬工場の生産計画に合わせて採掘と生産の計画を行う際には、銅の含有量の低い採鉱点で採掘する鉱

表2 A社における輸送リソースに関するテクニカルデータ

<b>穿孔機・削岩機</b>		
保有数	5	台
稼働シフト数	2	shifts
<b>ブルドーザー</b>		
保有数	2	台
稼働シフト	3	shifts
<b>ショベル</b>		
保有数	8	台
時間あたりの平均生産性	331.4	m <sup>3</sup> /h
稼働シフト	3	shifts
オペレーター数	30	人
<b>ダンプトラック</b>		
保有数	24	台
積載量	130	トン
1回あたりの平均積載量	TRIA (90, 130, 147)	トン
1回の輸送における平均走行距離	3.26	km
積載走行時の平均速度	24	km/h
空車走行時の平均速度	40	km/h
稼働シフト (1シフトは8時間)	3	shifts
ドライバー数	80	人
<b>稼働・勤務シフト</b>		
Shift A	8:00 - 16:00	
Shift B	16:00 - 24:00	
Shift C	24:00 - 8:00	
<b>鉱山のレイアウト</b>		
鉱石投入口 (バンカー)	2ヶ所	
表土廃棄所	2ヶ所	

石の量と、含有量の高い地点から採掘する鉱石の量をそれぞれ計算し、割当量を計画する必要がある。なお、鉱山の最大生産量の予測、生産目標を達成するための最適なダンプトラック数の計算、ショベルごとの掘削量の割当など、図2で提案した配車アプローチの第1段階の計算に関しては、先行研究の Tan and Takakuwa (2012) で提案した方法と結果を採用する。この鉱山において、掘削計画は普段1ヶ月ごとの計算になっているが、表2と3はそれぞれ、A社における輸送リソースのテクニカルデータと、ある1週間の採掘実績を示している。

A社は、操業効率の向上と、ダンプトラックの現在位置・走行スピード・積載量・燃料消費状況など

の情報リアルタイムで把握するために、2005年にGPS (Global Positioning System) と無線通信技術を利用した鉱山輸送制御システムを導入した。ダンプトラックと油圧ショベルのオペレーションに関する情報は無線通信システムを通して、データベースに時系列データの形で保存される。この鉱山輸送制御システムは、ショベルの割当とトラックの配車機能も提供しているが、A社の配車ロジックは複雑で、導入した輸送制御システムが対応しきれないため、現在は利用されていない。そのため、A社は経験豊富な配車オペレーターを24時間体制で配属し、オペレーターはこれまでに現場操業で培った経験と勘を生かして、マニュアル配車をおこなっている。専属の配車オペレーターは、ショベルとトラックの操業状態だけでなく、輸送計画の進捗具合を考慮して配車先のショベルを選定し、さらに、銅の目標含有率を意識しながら銅の含有率異なる鉱石の輸送量と運搬順番を適切に組み合わせなければならない。

## 2. VBAプログラミングを取り入れたシミュレーションモデルの構築

コンピュータを援用したシミュレーションは確率現象、ランダム性をモデリングに取り入れることができる。そのため、複雑に変動しているマイニングシステムを対象にしても、定量かつ可視化した分

表3 ある1週間の採掘量

採掘点の 海拔	ショベルの 番号	廃棄表土 (トン)	鉱石 (トン)	鉱石に含まれる 銅の含有量 (%)
1355	16	357,000	-	-
1355	17	459,000	-	-
1355	12	56,100	350,000	0.54
1325	14	40,800	280,000	0.52
1310	15	91,800	313,000	0.57
1310	16	0	103,000	0.44
1295	18	63,750	342,000	0.42
1295	20	40,800	419,000	0.49
1280	19	48,450	410,000	0.68
合計		1,157,700	2,217,000	目標含有量 0.53

図 4 シミュレーションモデルの基本的配車ロジックとVBAの役割

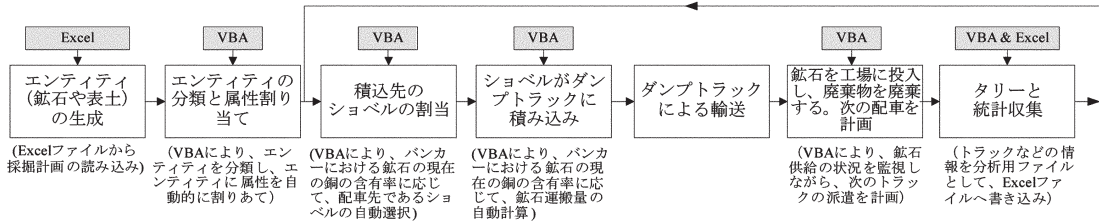
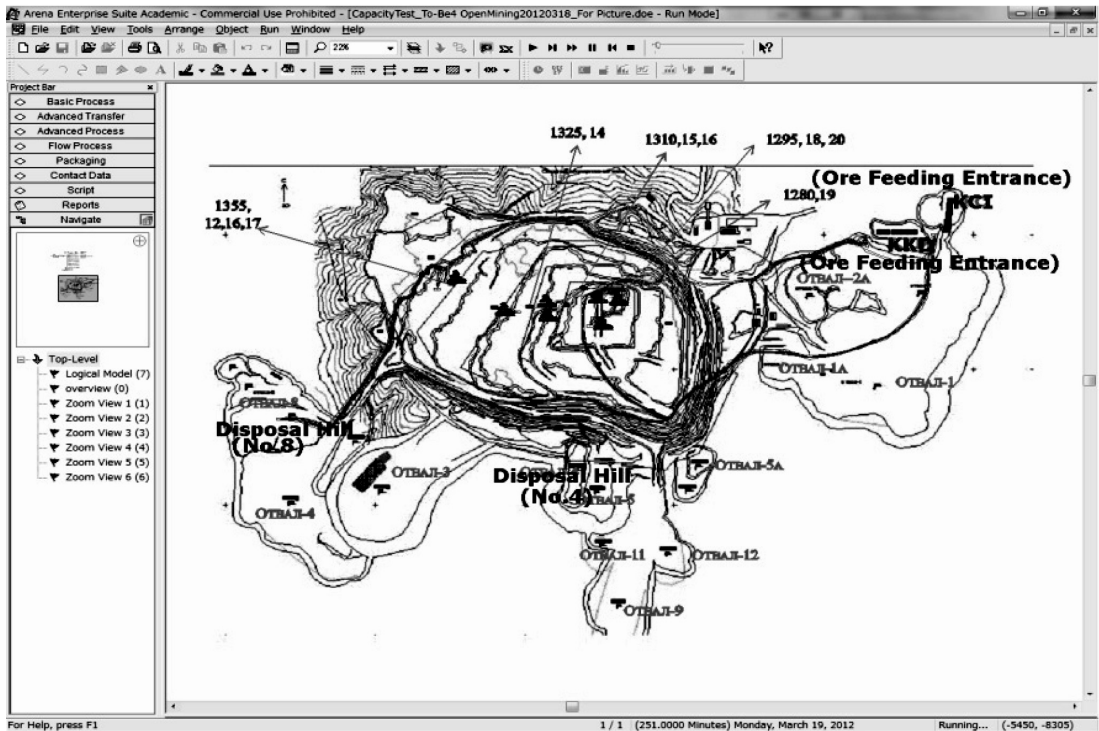


図 5 シミュレーションのアニメーション表示



析ができる (Tan and Takakuwa, 2012)。本研究では、SIMAN/Arena シミュレーション言語を用いて、シミュレーションモデルを構築する (Kelton *et al.*, 2007)。Arena では Microsoft VBA プログラミング言語が使用可能である。本研究では、図 2 で提案した動的配車アプローチを実現するために、Arena シミュレーションモデルに Microsoft VBA 言語を用いたプログラミングを取り入れて、統合したモデルを構築する。図 4 ではシミュレーションモデルにおける配車ロジックおよび VBA の主な役割を示している。完成したシミュレーションモデルを実行するときの様子を図 5 に示す。なお、図 6 はこのモデルで作成した VBA プログラムのソースコー

ドの一例を示している。この VBA プログラムを通して、輸送の進捗具合とバンカーの中の鉱石の銅の含有量をリアルタイムに感知して、最適なショベルの割当と輸送量を算出することができる。なお、この VBA プログラムのアルゴリズムは、図 3 に示されている。

図6 本研究で作成したVBAプログラムのソースコードの一部

```

Private Sub VBA_Block_12_ Fire()
Set s = ThisDocument.Model.SIMAN
Dim myStation As Arena.station

Dim MiniumContentGosa As Single
DesiredContentCu = 0.53 ##planned copper content (%) ###
myDistance_to_KKD = s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("Distance to KKD"))
myDistance_to_KCI = s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("Distance to KCI"))
myDistance_to_Disposal4 = s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("Distance to Disposal 4"))
myDistance_to_Disposal8 = s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("Distance to Disposal 8"))
myEntitytype = s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("EntityTypeCode"))
myStationQueue_KKD = s.StationEntitiesTransferring(s.SymbolNumber("KKD"))
myStationQueue_KCI = s.StationEntitiesTransferring(s.SymbolNumber("KCI"))
myStationQueue_Waste4 = s.StationEntitiesTransferring(s.SymbolNumber("Waste 4"))
myStationQueue_Waste8 = s.StationEntitiesTransferring(s.SymbolNumber("Waste 8"))
myContent_Cu = s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("Content_Cu"))
myWeight = 120 ## Set as a provisional value ###
myOreTransportedtoKKD = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Ore Transported to KKD"))
myOreTransportedtoKCI = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Ore Transported to KCI"))

If myEntitytype = 1 Then ##### When the entity type is Soil #####
    If myDistance_to_Disposal4 - myDistance_to_Disposal8 > 0 Then ## When the disposal hill No.4 is further
        myDestinationIndex = 4 ## To sent the transportation destination to Disposal hill No.8
        If myStationQueue_Waste8 >= 4 Then
            myDestinationIndex = 3 ## To sent the transportation destination to Disposal hill No.4
        End If
    Else
        myDestinationIndex = 3 ## To sent the transportation destination to Disposal hill No.4
        If myStationQueue_Waste4 >= 4 Then
            myDestinationIndex = 4 ## To sent the transportation destination to Disposal hill No.8
        End If
    End If
    s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("UnloadPlace")) = myDestinationIndex
    s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("weight")) = 120 'To set the transportation amount to 120 t
ElseIf myEntitytype = 2 Then ##### When the entity type is Ore #####
    If myDistance_to_KKD - myDistance_to_KCI > 0 Then ## When the disposal hill No.4 is further
        If myStationQueue_KCI < myStationQueue_KKD Or myStationQueue_KCI < 9 Then
            myDestinationIndex = 2 ## To sent the transportation destination to bunker KCI
            myCu_Content_NOW = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Cu_Content_NOW_KCI")) ## Cu% in Bunker KCI,
            OreTransportedtoDestination = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Ore Transported to KCI"))
            myNet_Cu_atDestination = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Net_Cu_KCI"))
        Else
            myDestinationIndex = 1 ## To sent the transportation destination to bunker KKD
            myCu_Content_NOW = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Cu_Content_NOW_KKD"))
            OreTransportedtoDestination = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Ore Transported to KKD"))
            myNet_Cu_atDestination = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Net_Cu_KKD"))
        End If
    Else
        If myStationQueue_KCI > myStationQueue_KKD Or myStationQueue_KKD < 9 Then
            myDestinationIndex = 1 '行き先をKKDに
            myCu_Content_NOW = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Cu_Content_NOW_KKD")) ## Cu% in Bunker KKD,
            OreTransportedtoDestination = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Ore Transported to KKD"))
            myNet_Cu_atDestination = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Net_Cu_KKD"))
        Else
            myDestinationIndex = 2 '行き先をKCIに
            myCu_Content_NOW = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Cu_Content_NOW_KCI")) ## Cu% in Bunker KCI,
            OreTransportedtoDestination = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Ore Transported to KCI"))
            myNet_Cu_atDestination = s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Net_Cu_KCI"))
        End If
    End If
    s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("UnloadPlace")) = myDestinationIndex
    *****Calculation of the Transportation Amount*****
    If myCu_Content_NOW >= DesiredContentCu Then
        If myContent_Cu < DesiredContentCu Then
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority14")) = 1
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority16")) = 1
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority18")) = 1
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority20")) = 1
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority19")) = 3
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority15")) = 3
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority12")) = 3
        Else
            MiniumContentGosa = (130 * myContent_Cu + myNet_Cu_atDestination) / (OreTransportedtoDestination + 130)
            For i = 60 To 130 Step 1
                EstimatedContentCu = (i * myContent_Cu + myNet_Cu_atDestination) / (OreTransportedtoDestination + i)
                NowContentGosa = Abs(DesiredContentCu - EstimatedContentCu)
                If NowContentGosa <= MiniumContentGosa Then
                    MiniumContentGosa = NowContentGosa
                    OptimizationLoad = i
                End If
            Next i
            s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("weight")) = OptimizationLoad
        End If
    Else
        '++++++When the copper contents of KKD or KCI Is lower than the target value of 0.53% ++++++
        If myContent_Cu >= DesiredContentCu Then
            MiniumContentGosa = (130 * myContent_Cu + myNet_Cu_atDestination) / (OreTransportedtoDestination + 130)
            For i = 60 To 130 Step 1
                EstimatedContentCu = (i * myContent_Cu + myNet_Cu_atDestination) / (OreTransportedtoDestination + i)
                NowContentGosa = Abs(EstimatedContentCu - DesiredContentCu)
                If NowContentGosa <= MiniumContentGosa Then
                    MiniumContentGosa = NowContentGosa
                    OptimizationLoad = i
                End If
            Next i
            s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, s.SymbolNumber("weight")) = OptimizationLoad
        Else
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority19")) = 1
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority15")) = 1
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority12")) = 1
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority14")) = 3
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority16")) = 3
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority18")) = 3
            s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("Priority20")) = 3
        End If
    End If
End If #####
End Sub

```

### 3. シミュレーションの実行と詳細な配車表の自動出力

シミュレーションモデルの構築が終わったら、モデルの正確性と妥当性を検証する必要がある。まずはシミュレーションモデルがエラーを起こらず実行できるかどうかをチェックした後に、シミュレーションの結果について妥当性を確認する。今回は、シミュレーションモデルの検証作業は、モデル構築者とA社の関係者とディスカッションしながら確認した。まずはシミュレーションモデルのAs-Is（現状）モ

デルの実行時の様子をA社関係者にみせながら、実験からアウトプットされた結果を、既存のマイニング輸送制御システムに保存してある実績データと比較し、問題の箇所を指摘された場合、それを改善することにした。

シミュレーションモデルを構築し正確性の検証を終えたら、シミュレーション実験を行い、実験から得られる結果を統計的なアプローチで分析することが可能である。現状の手動式配車法と本研究で提案したVBAを活用した動的配車法によるパフォーマンス

図7 手動式配車法とVBAを活用した動的配車法による結果比較

Observation Intervals	Min <span style="display: inline-block; width: 50px; border-bottom: 1px solid black; position: relative; top: -5px;">Ave 95%CL</span> Max	
	VBAを活用した動的配車法 (T0-BEモデル) (配車法3 : m-Trucks-for-I-Shovel)	手動式配車法 (AS-ISモデル) (配車法1 : Manual Dispatching)
A. 鉱石の発掘(運搬)計画 (トン)	593,670	
B. 表土や廃石等の発掘(運搬)計画 (トン)	422,612	
C. シミュレーションの長さ / 発掘計画をすべて完了するのにかかる時間 (分)	11,442 11,532 11,594 11,519 11,545	11,502
D. 輸送回数 (往復)	8227 8241 8262 8232 8246	8,347
E. 運搬した鉱石の量の合計(トン)	593670 593670 593670 593670 593670	593,670
F. 運搬した廃石等の量の合計(トン)	422,612 422,612 422,612 422,612 422,612	422,612
G. 1回あたりの平均積載量(トン)	60.0 122.9 1146.9 122.7 123.1	122
H. 片道の平均輸送時間(分)	4.50 9.57 421.47 9.55 9.62	11.8
I. 鉱石を運搬するのに合計走行距離 (km)	12214 12362 112566 12343 12372	13,332
J. 廃石を運搬するのに合計走行距離 (km)	8267 8304 8460 8290 8322	11,423
K. ダンプトラックの平均稼働率 (%)	99.73 99.81 100 99.73 99.85	71.2

図8 シミュレーションモデルにより出力された配車表の一部

ホーム 挿入 ページレイアウト 設定 データ 印刷 表示 開発 アドイン Acrobat									
14755 0.539205432065269									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Time Loading	Dump Trucks No.	Assigned Driver No.	Loading Location & Excavator No.	Weight	Unloading Location	Time Unloading	Copper Content in Bunker A	Copper Content in Bunker B
4729	2012/9/3 21:55	13	6	20	132	Ore Feeding Entrance A (KKD)	2012/9/3 22:13	0.49	0.54
4730	2012/9/3 21:46	24	18	19	130	Ore Feeding Entrance A (KKD)	2012/9/3 22:14	0.49	0.54
4731	2012/9/3 21:55	16	5	20	117	Ore Feeding Entrance A (KKD)	2012/9/3 22:14	0.49	0.54
4732	2012/9/3 21:55	6	9	20	133	Ore Feeding Entrance A (KKD)	2012/9/3 22:15	0.49	0.54
4733	2012/9/3 22:02	1	1	20	112	Ore Feeding Entrance A (KKD)	2012/9/3 22:17	0.49	0.54
4734	2012/9/3 21:58	4	17	20	130	Ore Feeding Entrance B (KCI)	2012/9/3 22:17	0.49	0.54
4735	2012/9/3 21:57	15	11	20	130	Ore Feeding Entrance B (KCI)	2012/9/3 22:18	0.49	0.54
4736	2012/9/3 22:00	18	21	20	124	Ore Feeding Entrance A (KKD)	2012/9/3 22:19	0.49	0.54
4737	2012/9/3 22:01	19	23	20	125	Ore Feeding Entrance A (KKD)	2012/9/3 22:20	0.49	0.54
4738	2012/9/3 22:04	8	2	20	110	Ore Feeding Entrance A (KKD)	2012/9/3 22:23	0.49	0.54
4739	2012/9/3 22:05	7	7	20	130	Ore Feeding Entrance B (KCI)	2012/9/3 22:23	0.49	0.54
4740	2012/9/3 22:05	14	4	20	110	Ore Feeding Entrance A (KKD)	2012/9/3 22:24	0.49	0.54
7350	2012/9/5 12:02	22	23	19	120	Disposal Hill No.4	2012/9/5 12:18	0.50	0.54
7351	2012/9/5 11:54	10	13	19	120	Disposal Hill No.8	2012/9/5 12:19	0.50	0.54
7352	2012/9/5 12:05	7	8	14	130	Ore Feeding Entrance B (KCI)	2012/9/5 12:21	0.50	0.54
7353	2012/9/5 12:06	15	9	19	120	Disposal Hill No.4	2012/9/5 12:21	0.50	0.54
7354	2012/9/5 11:57	23	2	19	120	Disposal Hill No.8	2012/9/5 12:21	0.50	0.54
7355	2012/9/5 11:55	21	20	19	120	Disposal Hill No.8	2012/9/5 12:22	0.50	0.54
7356	2012/9/5 11:59	6	11	19	120	Disposal Hill No.8	2012/9/5 12:23	0.50	0.54

ンスの差異を知るために、本研究では、複数の指標を用いて比較することにする。図7では、この2つの配車法によるモデルをそれぞれ20回繰り返して実行し、評価指標ごとの平均値に対する95%信頼区間の一覧を表す。

図7に示されているように、現状の手動的な配車法(As-Is)よりも、VBAを活用した動的配車アプローチを適用したモデル(To-Be)の結果では、パフォーマンスが全般的に大いに改善されたことがわかる。同じ運搬目標(A+B)を完成するのに、ダンプトラックが走行した距離の合計(I+J)は大きく改善されたことを確認できた。特に、表土の廃石を運搬するための合計走行距離(J)は、To-Beモデルが対As-Isモデル比で約28%減少した。ダンプトラックの走行距離の大幅な減少は、ガソリンなどの燃料の節約になり、直接操業コストの削減に繋がる。シミュレーションモデルにおいては、配車が行われるたびに、配車時刻、ダンプトラック番号、配車先(ショベルNo.)、輸送目的地、輸送重量、走行時間、輸送完了時刻はすべてExcelファイルに書き込む。このExcelファイルは詳細な配車計画表として使うことができる。なお、図8はシミュレーションモデルにより出力された配車表の一部を示している。この配車計画表に従って配車すれば、図7に示したシミュレーション通りの結果になると予想される。また、図8に示した配車表の一番右側の2列は鉱石の2つの投入口のバンカーAとBにおける鉱石の銅の含有率がそれぞれ目標値である0.49%と0.54%前後である。図8で示されているように、この2つの値は比較的に安定に維持していることがわかる。

## VI. おわりに

本研究では露天掘り鉱山におけるショベルとダンプトラックの配車管理と制御方法に着目し、シミュレーション技法とVBAプログラミングを統合して鉱山の配車計画を最適化するアプローチを提案した。そして、ある鉱山企業を研究事例として取り上げ、提案アプローチの有効性を検証した。検証の結果からわかるように、VBAプログラミングをシミュレーションモデルに組み込むことで、より柔軟で精度の高いモデリングを実現できることを確認できた。提案したアプローチで構築したシミュレーションモデルを実行することにより、実用レベルの配車表を自動的にアウトプットすることもできた。この詳細な

配車表は現場オペレーターの配車意思決定に大いに支援することができると期待される。さらに、VBAを活用した動的配車アプローチを適用した場合に、同じ運搬目標を達成するのに、ダンプトラックの走行距離は約28%も削減でき、ガソリンの消耗量などの輸送コストを大いに削減できることが検証された。

## 参考文献

- Alarie, S., M. Gamache. (2002) "Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines," *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 16 (1), pp.59-76.
- Bandopadhyay, S. and P. Venkatasubramanian, (1987) "Expert system as decision aid in surface mine equipment selection," *International Journal of Surface Mining*, Vol.1, pp.159-165.
- Blackwell, G. H. (1999) "Estimation of large open pit haulage truck requirements," *CIM Bulletin*, Vol. 92(1028), pp.143-148.
- Elbrond, J., Soumis, F. (1987) "Towards integrated production planning and truck dispatching in open pit mines," *International Journal of Surface Mining*, Vol.1, pp.1-6.
- Ercelebi, S.G. and A. Bascetin (2009) "Optimization of shovel-truck system for surface mining," *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol.109, pp.433-439.
- Hagenbuch, L. (1987) "Mining truck dispatching: The basic factors involved and putting these factors into mathematical formulas (algorithms)," *International Journal of Surface Mining*, Vol.1, pp.105-129.
- Karimi, S. M., S. J. Mousavi, A. Kaveh and A. Afshar, (2007) "Fuzzy optimization model for earthwork allocations with imprecise parameters," *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.133(2), pp.181-190.
- Kelton, W.D., R.P. Sadowski, and D.T. Sturrock. (2007). *Simulation with Arena*, Fourth Edition, McGraw-Hill.／高桑宗右エ門監訳 (2007), 『シミュレーションーArenaを活用した総合的アプローチ (第4版)』, コロナ社.
- Munirathinam, M., JC Yingling. (1994) "A Review of Computer-Based Truck Dispatching Strategies for Surface Mining Operations," *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 8 (1), pp.1-15.
- Oraee, K. and B. Asi (2004) "Fuzzy Model for Truck Allocation in Surface Mines," In *Proceedings of the Thirteenth International*

*Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, pp.585-593.

Subtil, R., D.M. Silva and J.C. Alves. (2011) "A Practical Approach to Truck Dispatch for Open Pit Mines," *35Th APCOM symposium*, pp.765-777.

Ta, C., J. Kresta, J. Forbes and H. Marquez (2005), "A stochastic optimization approach to mine truck allocation," *International Journal of Surface Mining*, Vol.19, pp.162-175.

Tan, Y. and S. Takakuwa. (2012) "Operations modeling and analysis of open pit copper mining using GPS tracking data," In *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, pp.1309-1320. Piscataway, New Jersey: IEEE, Inc.

(中央学院大学商学部)