論文

GPS による露天採掘鉱山の地形図作成と採掘計画*

伊藤 俊秀¹ 大村 誠² 西山 孝³

Use of GPS for Generating Topographic Maps and Production Schedules of Open Pit Mines

by Toshihide ITO¹, Makoto OMURA² and Takashi NISHIYAMA³

1. Department of Informatics, Kansai University, Ryozenji, Takatsuki-shi, Osaka 569-1095

2. Department of Environmental Science, Kochi Women's University

3. Graduate School of Energy Science, Kyoto University

Utilization of digital topographic data for open pit mines was analyzed, including topographic map generation, modification of maps and estimation of mine productivity.

On previous topographic maps of open-pit mines generated by computer systems, construction details, such as working faces and roads, were difficult to identify from the contour lines. In these maps, many contour lines were drawn very close together due to large fluctuations in topographic features. The presence of large numbers of contour lines often obstructed construction details. To identify these construction details, the outlines of each construction were drawn, and the contour lines enclosed by these outlines were erased. Furthermore, construction details, such as manufacturing plants and office buildings, which were not identified by the contour lines, were drawn using the same algorithm. Highly detailed maps that distinguished these construction details from contour lines were then created. This digital topographic data was useful for simulating scene changes and the extent of mining. Computer graphics allowed simulation of scene changes in advance, and provided basic data concerning future changes. Moreover, these maps allowed accurate estimates of mine production to be calculated. To generate these maps, GPS (Global Positioning System) was utilized to measure topographic changes only where the operations had taken place. Furthermore, construction detail outlines were also obtained from the operator's input previously arranged by the rule, i.e. inputting a set of surveyed points for construction. This mapping system easily maintained monthly or annually updated data on topographic and construction changes.

For production schedule simulation, topographic maps, computer graphics, and product estimations based on monthly or annually up-to-date digital topographic data were useful.

KEY WORDS : GPS, Open-pit Mine, Topographical Map, Contour, Simulation, CG

1. はじめに

砕石や石灰石を採掘する露天鉱山ではプラントの自動化や効率化は進んでいるが、採掘計画の策定など、机上での計画作業の効率化には改善の余地が多い(西山ら, 1994)。なかでも、切羽地形図の作成は、許認可申請にも欠かせない作業であるが、機械化が遅れている。そこで、GPS (Global Positioning System) を利用して常に最新のデジタル地形データを保持するとともに、業務に適した地形図を作成することを検討した。

GPS はカーナビゲーションなど、身近な製品に利用され始めており、製品の種類も豊富で、精度の良い測量も可能となっている

(丹野ら, 1997) が、現状では、まだ高価な測量機材の範疇に入り、露天鉱山での利用は見当たらない。しかしながら、価格は下降の傾向にあり、近い将来、少ない投資で手軽に利用可能となることが考えられる。また、砕石場において実際に行った測量では、作業の効率性と精度について十分に実用可能であることが確かめられた(大村ら, 1998)。そこで、現状のアルゴリズムを活用しつつ、構築物などのデータも取り込み可能なソフトウェアを開発し、GPS によるデジタル地形データの作成と、業務に直接利用できる地形図の作成を考えた。

さらに、最新のデジタルデータを保持することができれば、これを利用して採掘計画に対する景観や鉱量の予測が可能になる(伊藤ら, 1995)。周知のように、近年パーソナルコンピュータのハードウェアは容量・速度ともに性能が飛躍的に向上してきており、景観を作成するための CG (Computer Graphics) 用のソフトウェア、あるいは数値計算用のソフトウェアも充実した機能を備え、種類も豊富である。ここでは、その一例として、適切なソフトウェアを使用したシミュレーションを示し、検討した。

露天鉱山においては、近年、重機器の自動化の研究が盛んに行わ

* 1998 年 1 月 6 日受付 10 月 2 日受理

1. 正会員 工博 関西大学助教授 総合情報学部

2. 正会員 理博 高知女子大学助教授 生活科学部

3. 正会員 工博 京都大学大学院教授 エネルギー科学研究科

〔著者連絡先〕 FAX 0726-90-2493 (関西大・総合情報)

E-mail: ito@res.kutc.kansai-u.ac.jp

キーワード: 測量, 露天採掘鉱山, 地形図, 等高線, シミュレーション, コンピュータグラフィックス

れているが、常に最新の標高データを備えておくことで、重機器の自動制御にこれを利用することも考えられる。

2. 地形図作成手法

2・1 地形図作成のアルゴリズムと問題点

コンピュータで地形図を作成する場合、近傍にある同一の標高データをプロットして等高線を描画するのが基本的なアルゴリズムである。通常は、標高データが格子状に準備されているものとして地形図を作成する。すなわち、対象区域の2次元平面上を格子状の一定間隔に区切り(図1(a))、各格子点の標高をファイルに格納し、これを読んで地形図を作成する。いま、隣り合う格子点を結んだ線を格子線、隣り合う格子線で囲まれた最小の矩形を格子セルとすると、等高線が通る格子セルを検出して、各格子セルの等高線を結合させれば全体の等高線を描画することができる。例えば、標高Cメートルの等高線を描画する場合、各格子セルの4つの格子点のなかで、最も高い標高を $H_{\max}$ 、最も低い標高を $H_{\min}$ として、

$$H_{\min} \leq C \leq H_{\max} \dots\dots\dots (1)$$

が成立するのであれば、標高Cメートルの等高線はこの格子セルを通過することになる。したがって、すべての格子セルの中で(1)式を満足するものについて、各セルごとに等高線を描画して結合させれば全体の地形図を作成することができる。実際の処理では、(1)式で等号が成立してしまうとセルを通る等高線の形状を決定するための場合分けが煩雑になるので、等高線を作成する標高は整数値で与え、格子点の標高は実数値として設定し、(1)式の等号が成立しないようにしたり、あるいは、図1(b)に示しているように、1つのセルに2本の等高線が通る場合は、例えば距離の短い方の線を結ぶなどのルールに従って等高線を作成する(塩野ら, 1988)。

図1 格子状の標高データと等高線

図2 地形図の作成例

このような方法で地形図を描画した場合、起伏の穏やかな箇所では、図2に示すように良好な地形図を作成することができるが、露天採掘を行っている鉱山などでは、ほとんどの場合、随所にベンチや構築物が存在し、目的に適した地形図を得ることはできない。すなわち、掘削途中の人工的に開発された非常に起伏の激しい箇所などでは、等高線が複雑に錯綜した読みづらい地形図になってしまう。また、採掘作業に欠かせない道や建物を地形図に記載しない限り、コンピュータで作成された地形図を直接利用することはできない。このような問題点を改善するためには、等高線が複雑に集中する箇所では、描画する等高線の数を減らす必要がある。さらに、等高線の描画とともに構築物の記載を行うなどの改善も必要である。

2・2 露天鉱山における地形図の作成例

標高データに、例えば、切羽による広場とか、切羽と切羽を結ぶ作業道など、構築物の情報を加えれば、地形図上にそれらを表現することが可能になる。露天鉱山の例として、図3に示すようなベンチカット方式で採掘を行っている碎石場を考える。これは、従来の等高線作成アルゴリズムによって、架空の碎石場の標高データをもとに地形図を作成したものであるが、図で明らかなように、切羽の開発によって得られた広場にも一定の標高間隔で等高線が描画されている。また、切羽と作業道、残壁の区別がつきにくく、碎石場の地形図としては現況の把握がむずかしいものになっている。

図3 碎石場の地形図

図4 切羽と作業道などの構築物

[測量データ]			
測量順番	X座標	Y座標	標高
1	x_1	y_1	h_1
2	x_2	y_2	h_2
.	.	.	.
.	.	.	.
n	x_n	y_n	h_n
[構築物データ]			
切羽Aの測量点 : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9			
道の測量点 : 8, 9, 10, 11			

図5 測量データと構築物のデータの入力概念図

図6 地形図上に作成された切羽と作業道

そこで、切羽や作業道、あるいは建物の端点の座標を入力し、このデータをもとに、開発過程のそれぞれの構築物の形状を描画する。図4はこのようにして描画された構築物の形状である。図のなかで①～⑯は座標データを与えた地点の例であり、この測量データが図5に示すようなフォーマットで加工されているとして、描画している。図3の地形図上で、切羽や作業道の輪郭部分を描画し、各構築物の内部の等高線を消去すると、図6に示すような地形図が得られる。図3に比べて図6は、切羽と残壁の境界部分や作業道の位置を把握することができ、碎石場を管理するうえで有効な地形図となっている。そこで、GPSによる測量で常に最新の標高データを保持し、しかも図6に示すような地形図を作成することを検討する。

3. 地形図作成におけるGPSの利用

3・1 GPSによる測量

GPSによる測量にはいくつかの方法があるが(土屋・辻, 1991), 露天鉱山の切羽の測量を想定した場合、1点当たりの測定時間が短く、かつリアルタイムで衛星の捕捉状態を確認しながら目的の精度を達成させる方法が適切である。このような条件を備えたシステムとして、RTK-GPS (Real Time Kinematic GPS) がある(建設省国土地理院, 1996)。RTK-GPSでは、4機以上の複数のGPS衛星からの搬送波の位相を2台以上の受信機で同時に測定し、各受信機の相対的な位置関係を求める。最低2台のGPSでRTK-GPS測量を行う場合、1台は基地局として固定して設置し、他の1台で移動しながら測量を行う(日本測地学会, 1986)。作業の慣れにもよるが、1地点の測量に要する時間は、約30秒～1分程度と短く、条件さえ整えば、効率的な測量を連

図7 採掘途中でのGPS測量による地形図の補正

続的に実施することができる。

つぎに、測量の精度は、衛星の捕捉状態に大きく左右され、3次元位置データを±10 cm程度の誤差で測定するためには、最低でも5機程度の衛星を捕捉する必要がある(大村, 1997)。したがって、測定位置の形状、遮蔽物の状況などの条件によっては測定精度が著しく劣ることもある。また、衛星の捕捉という点では問題がないとしても、足元が不安定であったり、落下物の危険などのため、受信機を移動できない地点も存在する。そこで、測量を行うに当たって、しばしば問題となる事柄について、測量方法と標高データの取得方法を検討した。

3・2 採掘途中のデジタル地形データの補正

数値地形データを取得するためには、測定可能な地点で測定したデータをもとに標高データの補間を行う必要がある。地形図の作成や鉱山の計算などに利用することを考えると、数値地形データは格子点における標高データで取得するのが、後のプログラム作成上便利である。

補間方法には、適当な関数を利用する方法や最適化問題に置き換えて最適解を求める方法など、いくつかの手法が考案されているが(塩野ら, 1988), 数値地形データの精度を高めるためには、測量する地形の形状に応じて補間方法を使い分ける必要がある。この点、切羽の開発過程においては、地形の変化は部分的であり、しかも直線的・平面的な変化がほとんどである。したがって、直線や平面の端点で測量を行えば、線形補間でも実用的に十分な精度が得られると考える。

すなわち、最初は地形図などから読みとった正確な格子点座標に基づくマスターデータを用意する。つぎに、切羽の開発が行われて、地形が変化した場合に、適宜GPSによる部分的な測量を行い、三角メッシュ法(塩野ら, 1988)による線形補間でマスターデータを更新すれば、十分な精度の標高データを維持することができる。

例えば、図6の鉱山の採掘が進み、図7に示すように地形が変化したとする。新たに採掘が行われた区域の中で、図7に示す①～⑥をGPSで測量し、この6点の3次元データに基づいて標高データを更新する。このように、部分的な測量を行うだけで、最新のデジタル地形データを維持し、しかも有効な地形図を効率的に作成することができる。

3・3 構築物の認識

(1) 建物と道 建物や道について形状を把握するためには、輪郭の取得が必要になる。このため図8のように、周囲の輪郭に沿って測量を行い、図5に示すように、測量結果とともに測量の

図8 構造物や道では特徴点の測量を行う

図9 残壁などの傾斜面

対象物や測量の順位もデータとして把握する。輪郭把握のアルゴリズムの簡素化を考え、とりあえず測点間は直線で描画して輪郭を構成する。測点間を直線で描画することを考えると、湾曲している道などの場合に、実際の形状に近い輪郭描画を行うためには測点になるべく多くとる必要がある。したがって、要求精度と測量作業の効率性の観点から測量点を選択する必要がある。

プラントや事務所などの建物は、衛星の捕捉にとっては構造物そのものが障害となることもある。しかし、測量結果を採掘計画に利用する場合は、3次元的な形状を正確に把握する必要はなく、2次元上での外郭が測定できれば十分である。ほとんどの建物は平地に作成されており、最低でも外郭の1箇所の位置が正確に測量されていれば、RTK-GPSを利用しなくても全体の2次元的な形状を容易に取得することができる。また、このような構造物が変化することは少ないので、頻繁に測量する必要はない。図8(a)は建物の測量を想定し、その端点を測量する例である。

道については、残壁に作成された犬走りなど視界が開けているものはRTK-GPS測量に支障はなく、輪郭を構成する必要な特徴点の測量は十分容易である。一方、作業用に作られたり、ダンプトラックなどが走行する道の場合、斜面に囲まれてRTK-GPS測量が困難な場合も考えられるが、もともと複雑な構造は想定されないで、測量可能な地点を測量し、標高の補完を行えば十分に実用可能である。図8(b)は道の測量を想定し、カーブなどの特徴点を測量する例である。

(2) 残壁などの傾斜面 残壁などの傾斜面は、危険が伴うために測量が困難となる場合があるが、ほとんどの残壁は、かぶりの少ない平面で構成されている。したがって、図9(a)で示すように、残壁の上部と下部の測量を行い、図9(b)に示すように一定の角度で斜面の標高を比例配分しても、許容できる誤差範囲で現状の地形を表すことができる。

4. 計画的採掘に向けた標高データの利用

4・1 CGによるシミュレーション

標高の数値データが取得でき、しかも開発途中であっても最新のデータが整備されていれば、これをもとに計画的採掘の基礎となる正確な統計資料を簡単な操作で、即座に作成することができ

図10 景観作成と鉱量計算を行う区域の地形

る(伊藤, 1997)。そのような例として、図10に示す地域の開発を想定して、景観描画と鉱量計算のシミュレーションを示す。

一般に、原石山の開発は、まず、鉱区が決定し、最終的に目標とする採掘量が決まると、つぎに終掘にいたるまでの数年から数十年といった長期計画がたてられる。さらに、この長期計画に基づいて数年から数か月単位の短期採掘計画が作成される。この基本的採掘計画に従って、日常の具体的なスケジュールが組まれ、要員や機械が配備される。こういった計画作業の過程では、地形図をもとに鉱量の計算や技術的な採掘可能性が検討され、何枚もの地形図が計画案として作成されている。地形図に基づく判断は、作業そのものは比較的単純ではあるが、数多くの測点が錯綜し、間違いの生じやすいものである。また、採掘跡地の景観予測は地形図を読みとるよりは、CGによって描画された景観を利用する方がわかりやすい(伊藤ら, 1993)。

例えば、図10において、開発を想定している区域は南北に長い楕円状であり、東西の最大距離が約850m、南北の最大距離が約1,700mである。この対象域を一辺が10mの格子状に区切り、格子点の標高データ(m単位)を入力してシミュレーションを行った。

景観変化のシミュレーションではコンピュータグラフィックスを用いて、標高データを3次元画像として描画した。ハードウェアは、DOS/V機を使用し、画像描画ソフトウェアは、AIソフト社製のVISTAPRO for Windows 95を用いた。

シミュレーション画像は、視点を中心部上空、南側、西側の3点において景観を描画した。図11は現在の景観について描画したものをインクジェット方式のカラープリンター(EPSON製PM-700C)で出力したものである。図11(a)は中心部上空1,600mから下方向を見下ろす景観、(b)は南側上空800mから北側を眺望する景観、(c)は西側上空800mから東側を眺望する景観である。高度(描画対象からの距離)は、全域が視野に入り、しかもなるべく多くの画素を用いて画像を表現できるように設定した。なお、対象域の外側の標高座標は入力していないので、外郭は垂直な断崖のように描かれているが、実際は同じような山並が続いている。

画像では、太陽の位置を東南東に設定してあるので、陽光はほぼ、東から西に向かっているが(Soft, 1996)、対象区域北部の

図11 現在の景観

(a)上空からの景観, (b)南からの景観, (c)西からの景観

図12 南半分を標高100mまで採掘した場合の跡地景観

(a)上空からの景観, (b)南からの景観, (c)西からの景観

中心付近に谷があり、谷を挟んで東西にそれぞれピークが存在するのがよくわかる。この区域の南部のピークから採掘を始めることを想定し、シミュレーション画像を作成した。図12は対象域南部を標高100mまで掘り進んだ場合の景観である。図11と同様に、(a)は中心部上空1,600mから下方向を見下ろす景観、(b)は南側上空800mから北側を眺望する景観、(c)は西側上空800mから東側を眺望する景観である。周囲の残壁部分は傾斜角を最大50°に設定しているが、採掘跡地の東側の残壁は太陽の影で暗くなっており、逆に西側の残壁は陽光を浴び、明るくなっている。また、対象域の南西側には標高が100m以下のところがあるため、この部分では残壁が形成されていない。

図12を見ると、対象域南部のピークが採掘された場合に、北部の景観が眺望される様子が見てとれる。図11(a)と図12(a)を比較すると、跡地の北端中央部が、現在の景観では比較的標高の低い部分であることがよくわかる。しかし、跡地の景観では北側に位置する残壁の標高差が大きく見え、とくに北東側の残壁がせり出している様子が伺える。また、残壁中央部には沢による窪地ができている。北部に開発が進んだ場合には、この沢による窪地は廃土置き場として一時的に活用できることなども一見してわかる。

4・2 鉦量、廃土量のシミュレーション

鉦量、廃土量および平地面積がどのように変化するかについてシミュレーションを行った。計算とグラフの作成には、

図13 標高別の鉦量の推移

図14 標高別の累積鉦量

図15 標高別の廃土量の推移

図16 標高別の累積廃土量

図17 標高別の平地面積

図18 毎年200万tを採掘した場合の標高の推移

Microsoft社のExcel 97を用いた。対象とするのは景観シミュレーションで示した区域であり、岩石比重を2.6とし、平均表土厚を10m、15m、20mに分けてシミュレーションを行った。すでに、景観シミュレーション(図11、図12)で示したように、対象区域の南部を採掘した場合について、標高別の鉱量、標高別の累積鉱量、標高別の廃土量、標高別の累積廃土量、標高別の平地面積を計算してグラフに表すと、図13～17のようになる。いずれも、標高が250～70mまで掘り進むとして計算した。

標高別の鉱量(図13)を見ると、標高が160m付近から急速に鉱量が増大し、85m以降では鉱量の通減が生じていることがわかる。これは、標高85m付近から以降では残壁の占める割合が多くなるためであり、残壁角度の設定によっても鉱量が大きく変化するものと考えられる。累積鉱量(図14)も標高が160m付近から増加が目立ち始め、標高100mまで採掘を行った場合は $1.8 \times 10^7 \text{ t} \sim 2.6 \times 10^7 \text{ t}$ 、70mまで採掘を行った場合は $3.3 \times 10^7 \text{ t} \sim 4.0 \times 10^7 \text{ t}$ 程度の鉱量がある。

図15を見ると、廃土量は標高190mあたりから増え始め、145m付近でピークに達し、それ以降は急速に減少する。また、図16で明らかなように、表土厚の差が廃土量に顕著に影響するのは標高160m以降である。つぎに、標高別の平地面積(図17)は、標高145～85mあたりでの平地面積が最も広く、標高100mで最大となっている。

さらに、廃土処理などにもきわめて有効な基礎データとなる。個々の採石場のもつ状況を考慮しなければならないが、例えば、毎年200万tの一定量の碎石を採掘すると想定した場合、標高の推移は図18のようになる。開発が始まって1～2年は、表土剥ぎによる廃土量が多いために、年ごとの標高の低下が大きいが、その後は開発年数にほぼ比例するように標高が低下してくるのがわかる。平均表土厚にもよるが、標高100mまで採掘する場合は9～12年、標高70mまで採掘する場合は16～20年で終掘に達することになる。

5. おわりに

GPSを用いた露天鉱山の測量と最新のデジタル地形データの保持について、手法の検討とデータ利用の可能性を考察した。すでに述べたように、GPSを利用して測量を行うことで、効率的で精度の良い測量が可能であり、常に最新のデジタル地形データを維持するとともに、直接業務に利用できる地形図を作成することができる。また、データ利用の可能性に関しては、計画的採掘の基礎資料の作成を想定して、計画案に対する景観シミュレーションと鉱量、廃土量の推移について一例を示し、検討した。採掘後の景観を視覚的に3次元画像で表現することができ、また鉱量や廃土量の変化がグラフで容易に取得できるので、採掘計画の立案にはきわめて有効である。

このほかにも、デジタル地形データの利用可能性は多く、例えば、地形の傾斜や急な傾斜地の位置関係、あるいは構築物の配置などの諸条件を数値的に表現し、安全性や作業効率性の向上を目的関数とする最適問題に置き換えれば、採掘計画の代替案を自動的に作成することも考えられる。さらには、重機器の自動制御に利用すれば、将来、経営計画に基づいた業務のスケジューリングとスケジュールに従った業務の自動遂行、さらには作業実績を考慮に入れた緻密な工程管理の自動化も考えられる。

謝辞 シミュレーションに関しては、高槻碎石(株)の光本知夫氏、小野寺一郎氏から貴重なデータをいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- 伊藤俊秀・西山 孝・楠田 啓(1993): 碎石事業と環境問題、骨材資源の現状と将来シンポジウム講演集, p. 37-47
- 伊藤俊秀・楠田 啓・西山 孝(1995): コンピュータグラフィックスによる碎石場の景観シミュレーション、情報地質, Vol. 6, p. 65-72
- 伊藤俊秀(1997): コンピュータシミュレーションの活用、骨材資源, No. 114, p. 95-103
- 建設省国土地理院(1996): GPS連続システム, p. 181-190
- 西山 孝・楠田 啓・伊藤俊秀(1994): 碎石資源と碎石業の課題、資源と素材, Vol. 110, p. 1037-1042
- 大村 誠(1997): 碎石場切羽におけるRTK-GPSの活用と問題点について、21世紀の碎石場のあり方シンポジウム講演集, p. 33-67
- 大村 誠・伊藤俊秀・西山 孝(1998): 露天鉱山の地形測量におけるRTK-GPS測量の適用、資源と素材, Vol. 114, p. 699-703
- 塩野清治・升本真二・弘原海清: BASICによるコンターマップI, 共立出版, p. 29-52
- 塩野清治・升本真二・弘原海清: BASICによるコンターマップII, 共立出版, p. 79-102
- Soft, A.I. (1996): VISTAPRO for Windows User's Manual, p. 35-38
- 丹野貴之・柿沼俊一・Ponnusamy, J.・仲川 寛・藤川博一(1997): GPS-GISによる碎石業の近代化に向けて、21世紀の碎石場のあり方シンポジウム講演集, p. 87-99
- 土屋 淳・辻 宏道(1991): やさしいGPS測量, (社)日本測量協会, p. 51-68