論文

露天採掘鉱山の地形測量における RTK-GPS測量の適用*

大村 誠¹ 伊藤 俊秀² 西山 孝³

Topographic Survey in Open-cut Mines by Using RTK-GPS

by Makoto OMURA¹, Toshihide ITO² and Takashi NISHIYAMA³

1. Department of Environmental Science, Kochi Women's University, Eikokuji-cho, Kochi 780-8515

2. Department of Informatics, Kansai University

3. Graduate School of Energy Science, Kyoto University

RTK-GPS (Real Time Kinematic-Global Positioning System) was applied to topographic survey in open-cut mines. The operation of the survey involves great difficulties, such as obstacles caused by local topography and electromagnetic noises interfering with micro-wave from GPS-satellites. Therefore, the survey was carried out under conditions when a good GPS-satellite constellation was formed in the sky, limited by local topography in each working face. A clear data link between two GPS-receivers on the working face was also important.

In a field experiment at an operating open-cut mine, about 190 points were surveyed in about 5 hours on two successive days. Repeatability was estimated to be about ± 6 cm in coordinates obtained by the RTK-GPS. Topographic changes by operation were well pointed out by examining plotted RTK-GPS surveyed points on the topographic map surveyed by the traditional method. Consistency in coordinates was estimated to be about ± 9 cm between traditional local coordinates and those obtained by the RTK-GPS.

Usefulness of the RTK-GPS was clearly demonstrated by examining actual field data acquired in operating open-cut mines. Rapid and precise measurement by the RTK-GPS is more suitable than the traditional optical surveying method for monitoring the topographic change in working face and for providing digital topographic data required for computer systems.

KEY WORDS : Open-cut Mine, Global Positioning System, GPS, Survey, Topography, Digital Map

1. 緒 言

近年、露天鉱山では自動化・情報化を初めとする様々な取り組みが行われ、急速に作業の効率化が進んでいる。その一つとして、切羽の最新デジタル地形データを取得する測量システムが考えられている。これまでの光学的測量（三角測量や光波測量など）は、熟練作業者を要するとともに時間およびコストがかかる。ところが新しいGPS測量システムは、迅速にデジタル地形データの取得が可能で、無人採掘への基礎資料をも提供する。

GPS (Global Positioning System : 汎地球測位システム) は人工衛星を用いる測位システムで、これは、もともとアメリカ合衆国の軍用航法支援のために開発されたが、いまではカー・ナビゲーション・システムを初めとする民生分野でも広く活用されるようになっていく。利用は、精度や運用面での制限から様々な形態をとり、多分野において実用化されている。とくに位置計測とその応用分野で、顕著な成果を挙げている（藤岡ら、1993；岡野ら、1996；櫻井・和久、1996）。そこで、筆者らは、露天鉱山の

地形測量にRTK-GPS (Real-Time Kinematic-GPS : リアルタイム・キネマティックGPS) 測量を適用した場合の技術的問題、利点等について考察した。すなわち、これまでのGPSの利用例は、衛星からの電波が遮られないよう、天空の視界が開けた平坦地で実施されたものが多い。しかしながら、露天鉱山の切羽は地形が複雑で、残壁などにより天空の視界が制限されることがあり、また、各種の重機や送電施設等による電波障害も考えられる。そこで、操業中の碎石場でRTK-GPS測量を行い、その有効性を実証した。

2. 測量システム

2・1 GPSの概要

GPSは、軌道半径約26,600 km (軌道高度約20,000 km)、軌道傾斜角約55°の6つの地球周回軌道に4機ずつ配置され、周期約11時間58分(0.5恒星日)で地球を回っている24機の衛星を使用するシステムである。これらの衛星からは、L1帯(1575.42 MHz : 1.5 GHz : 波長約19 cm)およびL2帯(1227.6 MHz : 1.2 GHz : 波長約24 cm)という2つの周波数帯の搬送波に測位用の情報が乗せられて送信されている。測位は、4機以上のGPS衛星から発信された電波を受信して、航法目的のデータ処理を行い、受信機の3次元位置をリアルタイムで求める。また、搬送波位相の測定機能を備えた受信機を複数台同時に使用すると、

* 1998年6月16日受付 8月4日受理

1. 正会員 理博 高知女子大学助教授 生活科学部

2. 正会員 工博 関西大学助教授 総合情報学部

3. 正会員 工博 京都大学教授 大学院エネルギー科学研究科

(著者連絡先) FAX 0888-24-6579 (高知女子大・生活科学)

キーワード: 露天採掘鉱山, GPS, RTK-GPS, 測量, 地形, デジタルデータ

図1 RTK-GPS 測量の概念図

受信機間の相対位置関係（基線ベクトル）を、1 ppm（100 万分の $1 = 10^{-6}$ ）程度の精度で測定することも可能である（日本測地学会, 1986；土屋・辻, 1991）。

2・2 砕石場切羽における RTK-GPS 測量

GPS の利用形態（丹野ら, 1997）はいくつか考案されているが、砕石場切羽での地形測量には、迅速性、簡便さの点から、RTK-GPS（リアルタイム・キネマティック GPS）測量が最適であると考えられる。RTK-GPS 測量の概念図を図 1 に示す。固定された基準局、測点を順次移動する移動局、両局間のデータリンク（特定小電力無線など）が構成要素である。測定には、理論的には 4 機以上の同じ GPS 衛星からの電波を両局で同時に受信すれば十分であるが、衛星電波の受信の中断から迅速に回復するために、5 機以上の衛星からの電波を同時に受信することが望ましい。基準局で受信された搬送波位相データはデータリンクを用いて移動局に送信される。このデータと移動局で受信された搬送波位相データを使用して、移動局の受信機で基準局と移動局の 3 次元位置関係が計算され、データ・コレクタのメモリに保存される。データはパーソナル・コンピュータ（PC）へ転送され、座標系の変換などが行われる。

GPS を用いた測量における誤差は、衛星や受信機の時計誤差、大気の影響などにより生じるが、RTK-GPS 測量では両局で受信された搬送波位相データの差を取ることによって、これらの誤差をうち消すことができる（安田, 1997）。1 測点の測量に要する時間は、GPS 衛星の天空における配置が良好で、電波ノイズや電波障害がなければ、1 分間以下、3 次元座標値の精度は数 cm 程度である。今回の測量に使用した GPS 測量機材（GPS 測量受信機 4000 SSI, GPS トータルステーション 4800）および解析ソフト（GPSurvey）は、Trimble Navigation Ltd. 製のものである。

2・3 砕石場における RTK-GPS 測量と問題点

すでに述べたように、砕石場切羽の地形や砕石施設の存在が RTK-GPS 測量にどのような障害となるかをあらかじめ検討した。予備測量を行ったのは高槻砕石（株）高槻工場の切羽で、ベンチ・カット法による採掘が行われている。障害が予想される残壁の直下ならびに送電鉄塔近傍を含む 14 点の測定結果の座標値を平面直角座標系第 VI 系に変換して示すと表 1 のようになる。これらの測点における座標値の精度および測定時間を表 2 に示す。すべての測点において座標値の標準偏差は約 10 cm 以下で、平均的には南北、東西、高さの各成分でそれぞれ 3 cm, 2 cm, 6

表 1 RTK-GPS 測量結果（平面直角座標系 第 VI 系）

測点番号	N (m)	E (m)	H (m)
F001	-123835.886,	-34383.642,	135.004
2	-123843.419,	-34404.026,	125.194
3	-123924.325,	-34369.655,	124.288
4	-123921.791,	-34393.538,	115.955
5	-123836.395,	-34433.571,	115.307
6	-123792.916,	-34442.503,	114.679
7	-123751.191,	-34495.102,	114.109
8	-123804.034,	-34459.880,	102.429
9	-123852.187,	-34451.005,	102.050
10	-123928.789,	-34408.306,	100.954
11	-123781.485,	-34530.202,	104.370
12	-123662.796,	-34655.741,	128.318
13	-124054.332,	-34427.375,	85.183
14	-124141.103,	-34484.461,	71.507

N：北向き（+），E：東向き（+），H：上向き（+）

表 2 RTK-GPS 測量の精度および測定に要した時間

測点番号	座標値の標準偏差 (cm)			測定時間 (sec)
	N	E	H	
2	2.4	1.6	5.2	2
3	2.5	1.7	5.5	12
4	2.3	1.6	5.5	4
5	3.0	1.8	4.5	1
6	2.3	1.5	4.4	10
7	2.5	1.5	3.9	1
8	2.0	2.7	5.1	4
9	1.6	2.1	4.2	18
10	2.2	2.1	4.9	1
11	2.9	1.5	5.8	5
12	2.5	1.9	4.6	8
13	2.5	2.0	7.2	3
14	3.6	2.8	10.2	2
平均	2.5	1.9	5.5	6

測定時間：測定可能になってから解を得るまでの時間

cm である。なお、衛星の捕捉数が少なく測定が不可能になり、回復するまで待機する必要があったが、その時間は最大数分間程度であった。しかし、場合によっては、天空の開けた場所まで移動局を移動せざるを得ず、作業効率が低下することがあった。残壁による視界制限下でも 5 機以上の GPS 衛星からの電波が受信できる時間帯をあらかじめ選択しておく必要がある。さらに、衛星電波の受信ができていても、砕石場施設等が基準局と移動局との間にあると、受信局間の通信がしばしば妨害されて、位置計算が困難になるという問題も生じ、受信局間のデータリンクを確保するための対策が必要であることが分かった。

つぎに、個々の測点についてみると、測点 12 は送電鉄塔および高圧送電線の近傍にあり、衛星電波受信に対する障害が懸念されたが、測定結果は良好であった。測点 13 および 14 で高さ方向の標準偏差が、平均値に比べて 1.3 ～ 2 倍となったのは、これらの測点がともに残壁の直下で天空の視界が制限され、5 衛星以上の電波を受信することができなかったためである。

3. 砕石場切羽における測量結果

3・1 測量計画

測量は、1998 年 3 月 5 日～6 日に実施したが、まず、GPS 解析ソフトを用いて衛星の動きに配慮し適切な時間帯を選定した。すなわち、基準局の設置場所および測定点の両地点での残壁等による視界制限（Curtain：カーテン）を与えて、受信可能な衛星の数（仰角 10 度以上）と PDOP（Position Dilution of Precision

：測位精度劣化指数）の時間的変化を推定した。

ある時間帯で受信可能な衛星の数は、衛星からの電波の入射方向が視界制限物に遮られない衛星の数である。具体的には、それぞれの衛星から放送される軌道データをもとに算出された各衛星の方位角・仰角に対して、残壁上端（カーテン上端）の仰角のほうが小さいものが受信可能な衛星となる。さらに、低仰角の衛星からの電波は大気影響を受けやすいので除外することが望ましく、今回は仰角 10 度以上の衛星の数を求めた。なお、時間の経過とともに衛星は天空での位置を変えてゆくので、受信可能な衛星の数は時間的に変化する。つぎに、PDOP は、誤差がどの程度かを表す指数で、観測可能な衛星の数と天空における衛星の分布状況によって変わる（安田, 1997）。PDOP が小さい衛星配置ほど測位精度は高い。したがって、観測時間帯は衛星数が多く、かつ PDOP が小さい時間帯を選択することになる。たとえば図 2 は、基準局と碎石場西部での残壁による視界制限、衛星数、PDOP を表したもので、RTK-GPS 測量に好適な条件の目安として、衛星数が 5 以上、PDOP が 5 以下とすると、測定可能な時間帯が求まる。どの方位で視界が制限されているかによって多少結果は異なるが、3 月 5 日前後には、6～8 時の衛星配置が最良で、午前中の条件がよいことが分かる。良好な衛星配置のもとでは衛星電波の受信中断もなく、1 分間に 1 測点程度のペースで測量が可能であった。このように、残壁による視界制限のある碎石場切羽では、作業能率の向上のために、各測定点周囲の残壁による視界制限を考慮した衛星配置の事前確認は不可欠の作業である。

3・2 測量

予備測量の結果を配慮して、次のような対策を講じた。

① 基準局をできるだけ天空の視界が開けた高い場所に設置した。GPS アンテナは三脚上に立てた延長支柱の上端に取り付けて 2.6 m の高さとした。

② 基準局の特定小電力無線送信機の送信アンテナも約 2.6 m の高さに設置して、地形の複雑な切羽における移動局との通信可能範囲を広げた。

③ 移動局の特定小電力無線受信機には、受信アンテナの直後にアンプを入れて受信感度を上げるとともに、データリンクに対する電波障害物がある場合、特定小電力無線受信アンテナの高さを 3 m 以上にまで上げることを可能とし、固定局とのデー

タリンクを確保した。

また、効率のよい測量が実施できるよう小型化された RTK-GPS 測量装置を用いると、移動局に配置する人員を 2 名以下にすることができる（図 3）。

3 月 5 日の気象条件は悪く、小雨と強風、低温、3 月 6 日の天気は回復して晴天であったが、衛星配置がよければ、測量結果には問題はなかった。衛星電波の受信中断によって測量が不可能になることはほとんどなく、また、このようなトラブルが起こっても 2 分間程度のうちに回復した。この 2 日間（実作業時間：約 5 時間）で、延べ約 190 点の測定が実施された。測定された座標データを、移動局のデータ・コレクタからノート型 PC に転送して平面直角座標系第 VI 系に変換し、表 1 に示されたものと同様のデジタル座標データを得た。

また、測量精度を検討するために、4000 SSI 受信機によるデータ取得時には、移動局のデータ・コレクタに表示される、水平精度、垂直精度、衛星数ならびに PDOP を記録した。これらの精度は、L1 搬送波位相の測定から求まった解の誤差の大きさと衛星配置によって決まるもので、おおむね 99 % 信頼限界の誤差楕円の半径を表していると考えられる（Trimble Navigation Ltd., 1997）。測定された約 190 点のうち、3 つの測点を除いて、すべての測点において測量精度は水平方向で 2.0 cm、垂直方向で 2.7 cm 以下であり、平均的には、それぞれ 0.9 cm、1.4 cm であった。なお、精度の悪かった 3 つの測点は、衛星電波の受信状態が一時的に極端に悪化したため、精度の計算が不可能となったものである。このような場合には、再測定する必要がある。

3・3 デジタル地形データの利用例

このようにして得られた RTK-GPS 測量によるデジタル地形データの利用法は種々考えられるが、その一例として、平面図、断面図の作成がある。図 4 は、従来の手法により作成された碎石場東部の地形図上に、RTK-GPS 測量で再測した点を示したものである。RTK-GPS 測量の測点は主としてベンチフロア先端や法尻に設定されており、これらの測点位置は従来の光学的な測量で作成された地形図とよく一致している。しかし、詳細に検討すると、図中に A～E で示された太線で囲まれた測点では、地形図上の残壁や切羽面に RTK-GPS 測量の測点がプロットされている。これらは地形図が作成された後の地形改変が行われた場所、A～C の部分は、発破によって残壁が崩されたもの、D および E では、埋め戻しが行われたところであった。したがって、RTK-GPS 測量によって、地形図作成後の切羽の地形改変を迅速にモニターしていることが分かる。また、碎石場東部の南北断面図（図 5）では高度差（比高）が示されており、ベンチのレベル差がよく分かる。さらに、碎石場西部の平面図

図 2 基準局および碎石場西部における GPS 測量に適した時間帯の選定
最下部に、測量に適した時間帯（衛星数が 5 以上、PDOP が 5 以下）を示す。原図は、GPSurvey (Trimble Navigation Ltd. 製) により作成。

図 3 RTK-GPS 用測量装置

図4 砕石場東部の平面図
●: RTK-GPS 測量点

(図6)および南北断面図(図7)も、同様に良好な結果が得られている。この地域では、地形図作成後に作業が行われておらず、地形が変わっていないので、RTK-GPS 測量結果と地形図は細かいところまで一致している。断面図(図7)では高さ方向が水平方向より約16.7倍拡大されており、同じレベルでの地形の起伏を詳細に表している。

以上のように、砕石場切羽におけるRTK-GPS 測量では、衛星配置をよく考慮して計画を立て、適切な機材構成で測量を実施すれば、迅速にデジタル地形データを取得できる。また、このデータをもとにした採掘シミュレーションへの応用も容易である。

4. 砕石場切羽におけるRTK-GPS 測量精度

前章で述べたように、RTK-GPS 測量のデータ・コレクタに表示された平均的な水平精度、垂直精度は、それぞれ0.9 cm, 1.4 cmで、きわめてよい精度で測量が実施されている。しかし、

図6 砕石場西部の平面図
●: RTK-GPS 測量点

図5 砕石場東部の南北断面図
●: RTK-GPS 測量点

このときに示される精度は、あくまでも測量計算に適用した方程式の解が持つ誤差と衛星配置の影響により決まるものである。これらの誤差とは別に、砕石場切羽では、電波ノイズや残壁に反射してGPS アンテナに到達する電波(マルチパス: Multi path)の影響によって生じる誤差も懸念される。つぎに、砕石場におけるRTK-GPS 測量の総合的な精度について考察した。

4・1 RTK-GPS 測量結果の再現性

まず、砕石場西部の測点の座標を、日時、気象条件および移動局の受信機を変えて測定し、その再現性を検討した。結果をまとめて表3に示す。これら16測点において、複数回測定された座標値の最大差の平均値は、南北、東西、高さの各座標成分において、それぞれ6 cm, 6 cm, 3 cmであった。最大差が12 cmを超えたのは2つの測点(測点2006, 測点2029)のみで、その量は最大約21 cmであった。この原因として、両測点とも地形的な制約から基準局と移動局とのデータリンクの確保が困難であったこと、さらに測点2029は切り立った残壁から数mの距離にあり、マルチパスの影響が大きいことが考えられる。しかし、砕石場切羽におけるRTK-GPS 測量結果の再現性は、3次元各方向における座標値で、平均的には±6 cm程度であり、砕石場における地形データの取得に十分な精度であると判断される。

4・2 異なる測量手段による座標値の整合性

光学的測量手段によって得られている既存の地形データは、独自の座標系(「局所座標系」と記す)に基づく座標値を持っている。局所座標系とRTK-GPS 測量で今回使用した平面直角座標系第VI系(「第VI系」と記す)は異なっているので、異なる測量手段による座標値の整合性を議論するには、座標変換が必要である。

今回の測量におけるRTK-GPS 測量の測点には、従来の

図7 砕石場西部の南北断面図
●: RTK-GPS 測量点

表3 観測日時・移動局受信機が異なる場合の座標値
(平面直角座標系 第VI系)の再現性

測点番号	N (m)	E (m)	H (m)	測定日時	移動局受信機
2003	-120329.632	-39727.797	265.035	3/05 PM	4000
	-120329.659	-39727.841	265.081	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.027	0.044	0.046		
2004	-120332.037	-39729.236	264.925	3/05 PM	4000
	-120332.032	-39729.163	264.844	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.005	0.073	0.081		
2006	-120332.458	-39734.381	265.357	3/05 PM	4000
	-120332.450	-39734.184	265.325	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.008	0.197	0.032		
2007	-120326.057	-39751.088	265.558	3/05 PM	4000
	-120326.082	-39751.162	265.549	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.025	0.074	0.009		
2008	-120324.331	-39757.124	265.547	3/05 PM	4000
	-120324.268	-39757.218	265.539	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.063	0.094	0.008		
2009	-120321.204	-39758.260	265.632	3/05 PM	4000
	-120321.120	-39758.228	265.627	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.084	0.032	0.005		
2010	-120307.844	-39754.833	265.559	3/05 PM	4000
	-120307.798	-39754.845	265.576	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.046	0.012	0.017		
2029	-120280.977	-39775.689	265.697	3/05 PM	4000
	-120281.184	-39775.832	265.694	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.207	0.143	0.003		
2030	-120274.083	-39784.655	265.753	3/05 PM	4000
	-120274.152	-39784.687	265.746	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.069	0.032	0.007		
2033	-120279.990	-39785.323	265.554	3/05 PM	4000
	-120279.874	-39785.323	265.530	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.116	0.000	0.024		
2037	-120298.453	-39764.647	265.485	3/05 PM	4000
	-120298.524	-39764.536	265.524	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.071	0.111	0.039		
2038	-120307.791	-39763.770	265.344	3/05 PM	4000
	-120307.761	-39763.693	265.312	3/05 PM	4000
	-120307.760	-39763.733	265.398	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.031	0.077	0.086		
2039	-120315.173	-39763.842	265.261	3/05 PM	4000
	-120315.121	-39763.833	265.234	3/05 PM	4000
	-120315.107	-39763.845	265.315	3/06 PM	4800
最大差(m)	0.066	0.012	0.081		
2040	-120323.171	-39766.652	265.286	3/05 PM	4000
	-120323.231	-39766.665	265.299	3/05 PM	4000
最大差(m)	0.060	0.013	0.013		
2041	-120328.891	-39767.050	265.325	3/05 PM	4000
	-120328.902	-39767.086	265.304	3/05 PM	4000
最大差(m)	0.011	0.036	0.021		
2042	-120342.065	-39760.840	265.155	3/05 PM	4000
	-120342.097	-39760.880	265.122	3/05 PM	4000
最大差(m)	0.032	0.040	0.033		
最大差					
平均(m)	0.058	0.062	0.032		

光学的測量において使用された固定基準点(測量用マーカーまたは杭)も含まれている。このように安定した共通測点は、3点しかなかったが、これらの共通測点のデータを用いて、座標変換を行った。

局所座標系と第VI系との関係は、次のように記述される。

① 座標系の回転：第VI系の座標軸を西回りに12.727086306度

座標系の回転は鉛直軸の周りのみであると仮定した。共通測点3点に対する局所座標系および第VI系の水平座標から、それぞれ2点を結ぶ基線の方位を計算し、対応する基線の方位差の平均値を回転角として採用した。

② 平行移動：回転後の第VI系の座標値に加えるべき値

$$dX = 109146.960 \text{ m} \quad dY = 65353.192 \text{ m}$$

$$dH = 82.270 \text{ m}$$

各共通測点において、回転後の第VI系の座標値に加えるべき

平行移動量をそれぞれ求め、その平均値を採用した。

これらのパラメータを使用して、第VI系の座標値を局所座標系での座標値に変換し、光学的測量で求められた局所座標値と比較した。3つの共通測点における座標値の差の標準偏差は、局所座標系におけるX、YおよびH方向でそれぞれ2cm、9cm、4cmとなる。したがって、RTK-GPS測量による座標値と従来の光学的測量による座標値は、±9cm程度の整合性を持っていると推定される。

なお、3つの共通測点と国家基準点との結合を行っていないため、国家座標系による切羽内の測点位置は確定できていないが、切羽内の測点の相対的な位置関係に問題はない。

5. 結 言

露天採掘鉱山におけるRTK-GPS測量による地形測量が従来の光学的手法に比べて、きわめて有効であることを示した。結果は次のようにまとめられる。

(1) 残壁による天空の視界制限を考慮した適切な計画に従って測量すると、地形的な制約や電波障害が多い操業中の碎石場においても、デジタル地形データを効率よく収集できることが実証された。その精度を平均的な再現性で表すと、3次元各方向における座標値で±6cm程度である。

(2) RTK-GPS測量で得られた地形データは、地形シミュレーションおよび採鉱モニタリングなどに直接活用できることを示唆した。その一例として、RTK-GPS測量で得られた地形データと従来の地形図を照合することによって、地形の改変を検出した。

(3) 従来の光学的測量による座標値とRTK-GPS測量による座標値との整合性は、3次元各方向における座標値それぞれの標準偏差で±9cm程度であると推定された。これは、従来の光学的な測量手段で得られている地形データとRTK-GPS測量によるデジタル地形データを統合して地形シミュレーションおよび採鉱モニタリングを行うことも可能であることを示している。

謝辞 高槻碎石(株)の光本知夫氏、小野寺一郎氏には、操業中の切羽におけるRTK-GPS測量および従来の光学的測量によって得られた測量データおよび地形図等の提供など、多くの貴重なご協力を賜った。また、日立造船情報システム(株)GPS・GIS事業本部には、RTK-GPS測量全般についてご協力いただいた。ここに記して深く感謝を表する。

引 用 文 献

- 藤岡 晃・菊田勝之・清水則一・桜井春輔(1993):GPS測量を用いた土工の出来形測定システムの開発,土木学会論文集, No. 468, VI-19, p. 31-38
- 日本測地学会編著(1986):GPS—人工衛星による精密測位システム—,(社)日本測量協会, p. 263.
- 岡野幹雄・酒向信一・奥松俊博・青景平昌(1996):雲仙普賢岳における無人化施工へのGPSの適用事例,土と基礎, Vol. 44, No. 1, Ser. 456, p. 41-43
- 櫻井春輔・和久昭正(1996):地盤工学におけるGPSの現状と今後の動向,土と基礎, Vol. 44, No. 1, Ser. 456, p. 9-12
- 丹野貴之・柿沼俊一・ジョーティマニ・ボンヌサミ・中川 覚・藤川博一(1997):GPS・GISによる碎石場の近代化に向けて,21世紀の碎石場のあり方シンポジウム講演集, p. 87-99
- Trimble Navigation Ltd.(1997):Survey Controller Reference Manual
- 土屋 淳・辻 宏道(1991):やさしいGPS測量,(社)日本測量協会, p. 376
- 安田明生(1997):GPS/DGPSの測位原理, GPSシンポジウム'97,(社)日本航海学会GPS研究会, p. 241-271