

(Ⅱ-9)

GPSの土木工事への適用性に関する研究

Study on the Application of GPS to Site Management

三井建設㈱ 中川良文*

三井建設㈱ 高田知典*

三井建設㈱ ○佐田達典*

By Yoshifumi NAKAGAWA, Tomonori TAKADA, Tatsunori SADA

人工衛星を用いた測位・測量システムとして近年注目されているGPS (Global Positioning System: 汎地球測位システム) について、実際に工事現場において精度確認実験を行い土木工事への適用性に関する検討を行った。GPSの測位方法には観測点の三次元位置を求める単独測位と2点間の相対位置を測定する相対測位とがある。また、最近では観測点を移動しながら連続して計測するキネマティック測量という方式も開発されている。そこで、それらの測位方法について実際に高速道路工事現場において精度の確認と作業性に関する実験を行った。その結果、精度面で基線の確認や出来形測量に利用できることがわかった。また、重機の位置把握などの移動体の測定にも応用できることが伺えた。それらを踏まえ、土木工事分野での利用方法の検討と解決すべき問題点の整理を行い、システム開発の方向性を示した。

【キーワード】GPS、測量、出来形管理、位置検出

1. はじめに

GPS (Global Positioning System: 汎地球測位システム) は、米国が開発中の人工衛星による新しい電波測位システムである。このシステムの主要な目的は航空機や船舶等が自分自身の位置を100m程度の精度で知るための航法用であるが、特別な受信装置を用いた測量への応用では、基線ベクトルの測定に1cmの桁の精度が得られるため、測量技術をはじめとして様々な分野での応用が始まっている。

わが国においてもGPSの土木工事測量への応用に関して国土地理院を中心に研究が進められている¹⁾。また、地盤変位計測への応用についても可能性が検討されている²⁾。本研究では測量技術を中心として土木工事分野へのGPSの適用性を検討するため、高速道路工事現場においてGPSを用いた基線測量、出来形測量を実施し精度の確認と従来の測量法との比較を行った。また、GPSを重機(ロー-

バッド等) に搭載して走行しながら位置データを採ることにより重機の走行経路把握への応用も検討した。それらを通じて土木工事分野へ適用するに際しての課題を抽出するとともに、システム開発の方向性を検討した。

2. GPSの概要

(1) GPSの構成

GPSは宇宙部分(Space Segment)、制御部分(Control Segment)、利用者部分(User Segment)の3部から構成されている(図-1)。

宇宙部分とはGPSの人工衛星のことである。GPS衛星は高度約2万kmの軌道に打ち上げられ、システム完成時には21個(+予備衛星3個)が配置され常時地球上から4個以上視界内にあるようになる。1990年9月現在14個の衛星が配備されており予定では1992年中に完成するといわれている。

GPS衛星からは測位用としてL1帯(1.6GHz)とL2帯(1.2GHz)と呼ばれる2波の電波が常時送

* 技術開発本部技術研究所 0471-55-4615

信されている。L 1 帯には C/A コードと P コードという 2 種類の疑似雑音符号 (pseudo random noise code) が乗っていて、L 2 帯には P コードが乗っている。P コードは軍用に秘密になっているので、一般には C/A コードのみ利用できる。これらの疑似雑音符号を重ねて、測位計算に必要なデータが乗せてあり、これを航法メッセージ (navigation message) という。

制御部分は衛星の追跡と管制システムをさす。その主な内容は、衛星の軌道追跡、衛星上の原子時計の誤差のチェック、衛星から利用者に向けて送信している各種の測位計算用データの更新、衛星の軌道修正などである。

利用者部分とは測位を行うための受信機のことである。受信機には次に述べる単独測位用の受信機と干渉測位用の受信機とがあり、構造的にも解析処理方法にも相違がある。受信機の開発は民間に解放されており、いく種類もの機器が市販されている。利用者は受信機、アンテナおよびコンピュータを用意すれば、どこでも GPS を利用できる。

(2) GPS による測位の原理

本稿では、GPS による測位の原理の概略を紹介する。詳細については、参考文献3)、4)を参照されたい。

GPS 受信装置には、①単独測位用受信機と②干渉測位用受信機とがある。

a) 単独測位用受信機による測位

3 個の衛星があってそれぞれの位置が既知ならば衛星から受信機までの距離がわかれば位置は確定する。利用者が測位を行おうとする任意の瞬間の GPS 衛星の位置は衛星から送られてくる軌道情報によって正確に計算できる。一方、電波が衛星を出た時刻と受信時刻との差から電波の伝搬時間が分かり、それに光速をかけて距離が分かる。しかし利用者の受信機の時計は正確なものではないため、測定された電波の伝搬時間は不正確であり、距離も正しい値ではない。こうして求めた距離のことを疑似距離 (pseudo range) という。そこで、正しい距離を求めるために 4 番目の衛星が必要となる。図-2 のようにそれぞれの衛星までの疑似距離 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 ρ_4 を半径とする 4 つの球面が一点で交わるように、受信機内の計算機が時計を修正するわけである。す

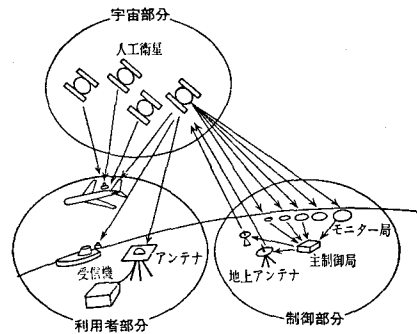


図-1 GPS の構成³⁾

4 個の衛星の位置は既知

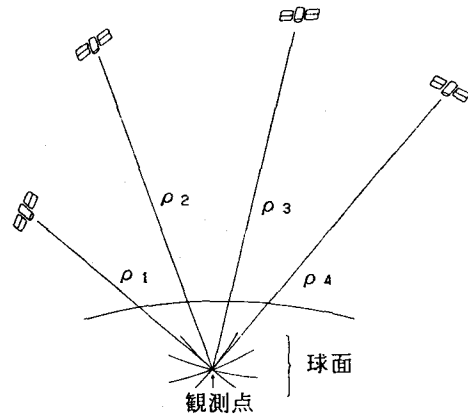


図-2 GPS による単独測位の原理⁴⁾

なわち、単独測位では同時に 4 個の衛星が見えることが必要である（高さを固定して緯度、経度を求めるときには 3 衛星でもよい）。

単独測位用受信機による測位は、L 1 帯の電波を受信し C/A コードのみを使って測位を行う。1 秒程度の短時間の測定ではビット周期の 1/10 程度の到達測定分解能が得られる。この値が電波の進む距離に換算すると約 30m になることから、これが測位精度を決める 1 つの要因となっている。

また、測定精度は観測時の衛星配置によっても影響を受ける。その影響程度を測位計算における重み行列式の対角要素の和の平方根として定義し、GDOP (Geometrical Dilution of Precision) と呼んでいる。GDOP は空間座標 (Position) に関する部分 = PDOP と時計 (Time) に関する部分 = TDOP とに分割される。また PDOP はさらに水平方向の部分 (HDOP) と垂直方向の部分 (VDOP) に分割される。具体的には

4 個の衛星で構成される四面体の体積が大きくなるほど観測上衛星配置は良くなりPDOPは小さくなる。

b) 干渉測位用受信機による測量

受信機 2 台を測定する基線の両端に設置し同時に観測することにより 2 点間の相対位置を求めるものである。受信方法は衛星からのマイクロ波電波（搬送波）の位相を測定する方式であり、L 1 帯の波長 19cm の 1/100 に近い分解能を持つ。受信機では、ドプラー効果を利用して特定の番号の衛星の搬送波の位相角をカウンターによって積算する。実際には周波数変換を行い中間周波数に落とした上で搬送波を再生し、波長の端数に相当する位相角を含めた波数を測定する。この位相には 360° の整数倍（整数バイアス）が乗っているので多重解を避けるため、バイアス値を求めなければならない。そこで両測点で同時に 2 つの衛星を観測し位相の差をとる（二重位相差、図-3）ことを衛星が空間を大きく運動するだけの十分な時間（通常 60 分程度）観測を続ける。そして最小二乗法的にデータを処理することにより未知点の相対位置と整数バイアスを同時に決定する。実際には単独測位で求められる一方の観測点を出発点とする無数の基線ベクトルの中から二重位相差の時間変化と同じ様な時間変化を与えるものを最小二乗法的に探し出している。

（3）GPS による測位の種類

GPS による測位には、①単独測位（point positioning）と②相対測位（relative positioning）とがある。

単独測位は単独測位用受信機を観測点に 1 台設置し、少なくとも 4 個の衛星から電波を受信し、観測点の三次元座標を求めるものである。（3 個の衛星の時は、1 次元の座標を既知として 2 次元の座標が求まる。）この方法では、観測から結果を得るまでの時間は 1 ～数秒と短く、船舶などの移動体の位置

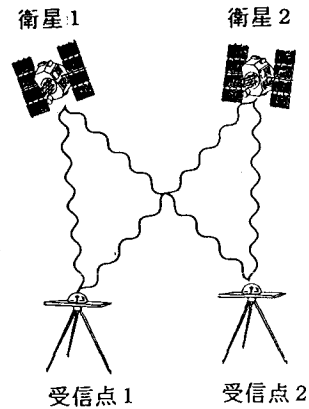


図-3 搬送波の二重位相差⁵⁾

測定に利用されている。

相対測位には 2 つの方法がある。一つは単独測位用受信機を 2 台用いて同時に観測し、両者のデータにより 2 点間の相対位置を求めるトランスローケーション（ディファレンシャルとも呼ばれる）である。この方法によると誤差要因の大部分が相殺されて精度が向上する（誤差は数 m が限度といわれている）。

もう一つは干渉測位用受信機を 2 台用いて同時に基線の両端で観測する測位である。この方法には、静止測量とキネマティック測量の 2 つがある。静止測量は観測時間 6 0 分程度であり、受信機からパーソナルコンピュータにデータをダウンロードし解析することにより、2 点間の相対位置が計算できる。一方、キネマティック測量では受信機 2 台のうち一方を固定局、他方を移動局とし、移動局は一点当り 1 分程度の観測で他点に移動し観測できる。このように短時間での観測が可能になったのは、アンテナスワップという初期処理を行うことにより整数バイアスが決定できるためである。ただし、測定中は移動中も含めて常時電波を受信しなければならない。データは、静止測量と同様に、オフラインで処理される。表-1 に測位方法のまとめを示す。

表-1 GPS による測位方法のまとめ

測位方法			受信機	観測時間	処理方法	精度
相対測位	単独測位		単独測位用 1 台	1 ～数秒	リアルタイム	公称 100m
	トランスローケーション		単独測位用 2 台			数 m
	干渉測位	静止測量	干渉測位用 2 台	6 0 分程度	オフライン	$1\text{cm} + (\text{基線長}) \times 2\text{ppm}$
		キネマティック		1 分程度		$2\text{cm} + (\text{基線長}) \times 2\text{ppm}$

3. 土木工事現場でのGPS実験

関東地方の高速道路工事現場においてGPSを用いた測量実験を行い、光波測距儀等を用いた従来の測量法と精度や操作性の面で比較を行った。使用したGPS受信機は米国トリプル社製4000ST（2台）とAT7000（1台）である。4000STは単独測位、干渉測位両方の受信機能を備えているが、AT7000は単独測位用のみの受信機である。

（1）単独測位計の精度確認

図-4に示すような原点から1m、2m、4m、8mの半径の円と直交軸であるX軸、Y軸が交わる点に原点から順に受信機（4000ST）を置き、原点からの相対位置について精度を確認した。なお、X軸の正方向がほぼ北方向、Y軸の正方向がほぼ東方向である。

各点毎に移動局と固定局とで同時に受信機の画面から緯度、経度データを読みとった。10秒間隔で3回読みとり平均している。電波を受信した衛星は3衛星であったため、高さの値を固定し緯度、経度の値を読みとった（二次元測位）。また、全点の測定時間は約15分であり、HDOPは4前後であった。図-5は移動局の読み値の変化を示すが、西方向に変動している。固定局（原点に固定）の読みも図-6のように西方向に大きく変動していることからこの方向に指向性があることがわかる。そこで、移動局の読みから固定局の読みを差引いたもの（トランスローケーション）を描くとかなり原形の図形に近い形となる（図-7）。しかし、それでもなお各点は本来の位置から逆に2m程東方向に変位している。なお、この時観測できた3個の衛星は全て方位角が $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、すなわち東側の方向に位置しており、これが影響を及ぼしていると考えられる。

（2）静止測量の精度確認

2台の干渉計測受信機で60分以上衛星電波を受信することにより、2点間の相対位置を求める測量である（表-2）。測定1は光波測距儀との比較である。2つの視通可能な基準点間の水平距離と高低差を光波測距儀とGPSで測定して比較を行った（写真-1）。なお、GPS観測時間は62分、常時4個以上の衛星から電波を受け、最小PDOPは2.9と観

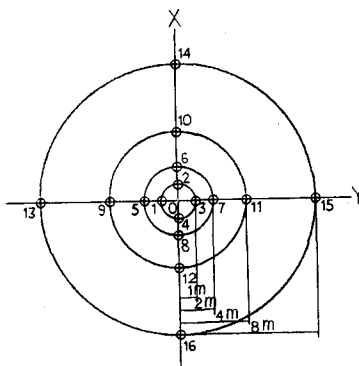


図-4 精度確認実験における観測位置

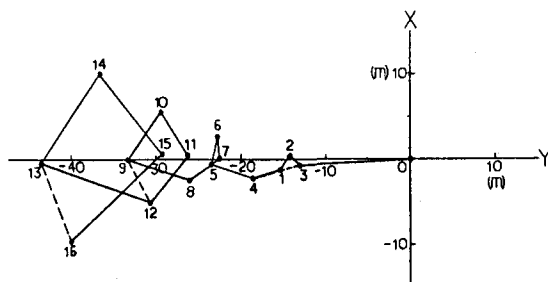


図-5 移動局の読み値の変化

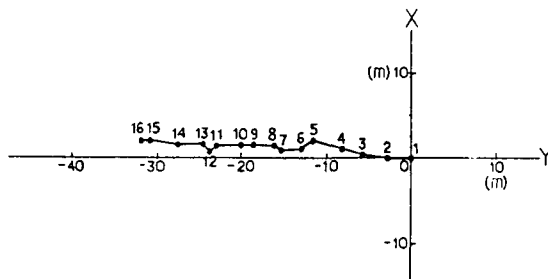


図-6 固定局（原点）の読み値の変化

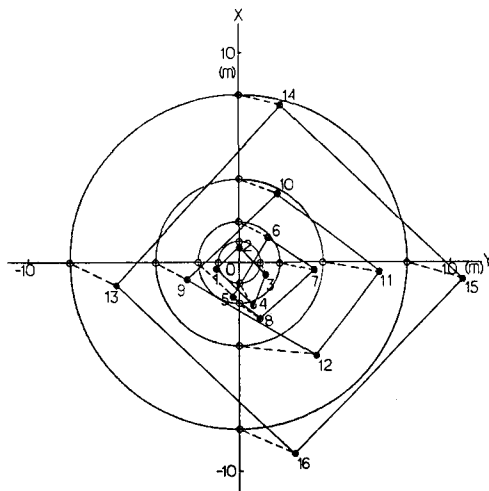


図-7 移動局から固定局の読みを引いた値の変化

測条件は良好であった。その結果は光波測距儀との比較で水平距離の差が 6mm（基線長に対する割合：11ppm）、高低差の差が 17mmであった。測定 2 は視通不能の場合の基線測量である。この工事道路の起点側、終点側のセンター杭はそれぞれ隣接工区の基準点から導出したものであり、視通が不能であるため直接距離を計測することができない。そこでGPSを用いて水平距離を求めてみた。なお、GPS観測時間は63分、常時5個以上の衛星から電波を受け、最小PDOPは 1.3と観測条件は非常に良好であった。求めた水平距離（縮尺補正を行った）と座標から求めた計算値との差は10mm（5ppm）となる。

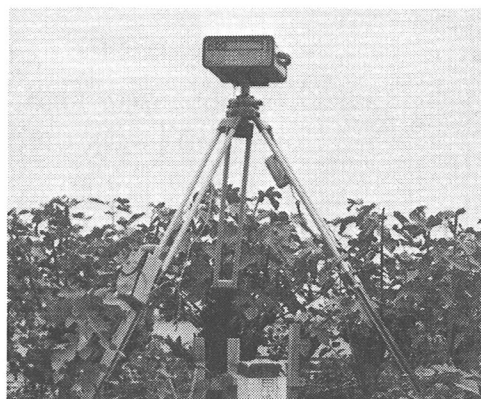


写真-1 静止測量（4000ST）

表-2 静止測量による基線測量結果

測定番号	水平距離 (m)			高低差 (m)		
	基準値 (1)	GPS (2)	差 (2)-(1)	基準値 (3)	GPS (4)	差 (4)-(3)
1	543.309 (光波実測)	543.303 (実測値)	-0.006 (11ppm)	8.039 (光波実測)	8.022 (実測値)	-0.017
2	2009.750 (計算値)	2009.760 (縮尺補正)	0.010 (5ppm)	—	12.792 (実測値)	—

※ 縮尺補正係数 = 0.999974

(3) キネマティック測量の精度確認

(1)と同じく図-4の位置で原点に固定局を置き移動局で各点を順に観測した。1点の受信回数は3回、受信時間は45秒（1回当たりの観測時間15秒）である。なお、移動局のアンテナは写真-2の外部アンテナを用いた。電波を受信した衛星は4衛星、全点の測定時間は約20分、PDOPは 2.8であった。精度は平均誤差が水平距離で11～16mm、高低差で17～34mmであった（表-3）。水平距離の誤差は基線長にかかわらず同じような値をとること、高低差の誤差は水平距離の誤差に比べて大きいことがわかる。

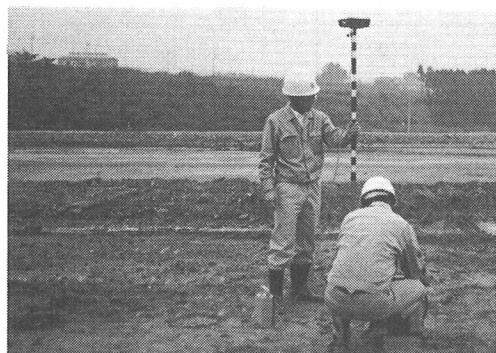


写真-2 キネマティック測量（外部アンテナ）

(4) 出来形測量への応用

図-8に示す道路断面（A、B断面：断面の間隔20m）においてキネマティック測量を行い光波測距儀とレベルによる従来の測量方法と結果を比較した。キネマティックの方法は前述と同じであり、電波を受信した衛星は4衛星、作業時間は全部で約20分、PDOPは 2.8であった。結果は表-4に示すように道路センターからの水平距離の差が最大で 2cm、高低差の差が最大で19mmであった。

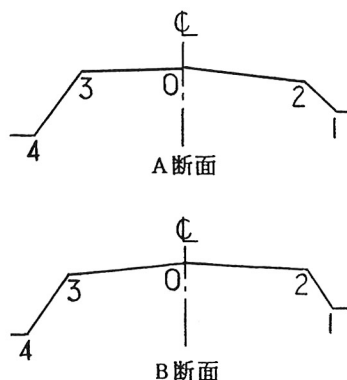


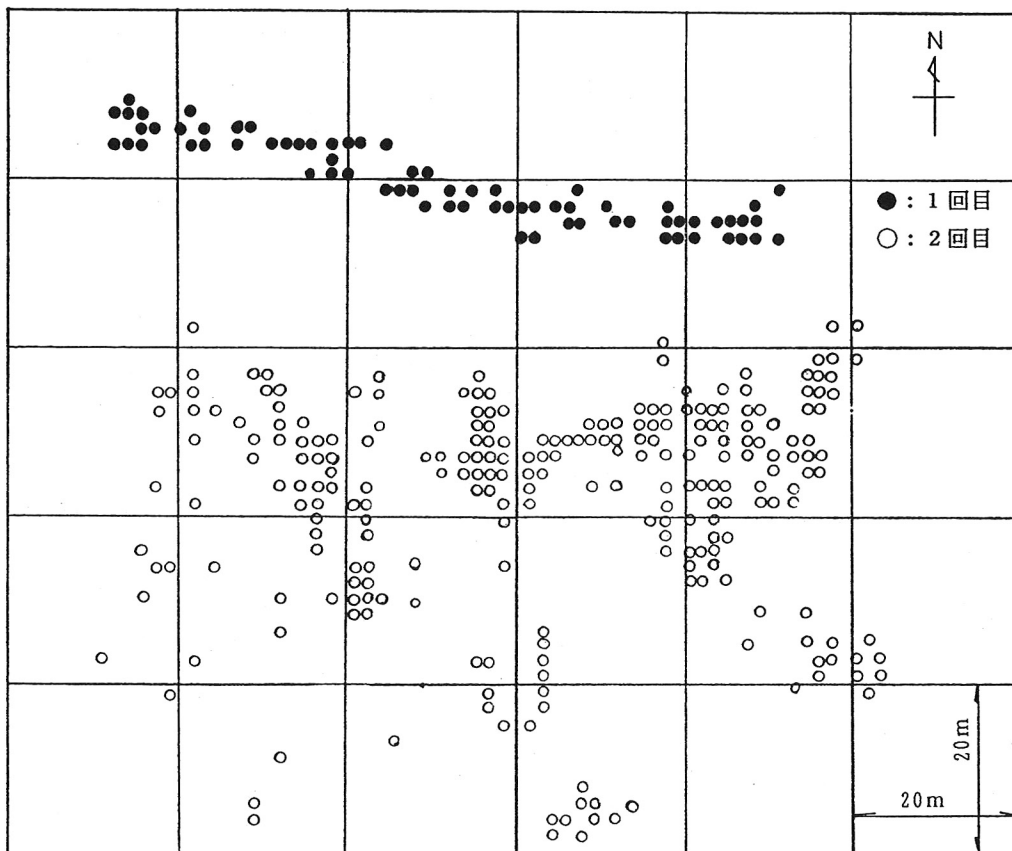
図-8 道路横断面図

表-3 キネマティック測量の精度確認実験結果

測 定 点		原点からの水平距離 (m)			原点からの高低差 (m)		
		テープ (1)	G P S (2)	差 (2)-(1)	レベル (3)	G P S (4)	差 (4)-(3)
I	1	1.000	1.011	0.011	-0.029	-0.009	0.020
	2	1.000	0.989	-0.011	-0.017	0.006	0.023
	3	1.000	0.985	-0.015	0.033	0.058	0.020
	4	1.000	0.985	-0.015	0.040	0.043	0.003
	平均誤差			0.013			0.017
II	5	2.000	1.990	-0.010	-0.044	-0.028	0.014
	6	2.000	1.982	-0.018	-0.044	-0.018	0.024
	7	2.000	1.990	-0.010	0.062	0.089	0.027
	8	2.000	1.991	-0.009	0.057	0.056	-0.001
	平均誤差			0.016			0.017
III	9	4.000	3.985	-0.015	-0.090	-0.064	0.026
	10	4.000	3.978	-0.021	-0.129	-0.085	0.044
	11	4.000	3.992	-0.008	0.117	0.156	0.039
	12	4.000	3.999	-0.001	0.057	0.095	0.038
	平均誤差			0.011			0.037
IV	13	8.000	7.983	-0.017	-0.194	-0.166	0.028
	14	8.000	7.987	-0.013	0.095	0.139	0.044
	15	8.000	7.991	-0.009	0.210	0.245	0.035
	16	8.000	7.989	-0.011	0.039	0.067	0.028
	平均誤差			0.013			0.034

表-4 キネマティック測量による出来形測量結果

測 定 点		道路センターからの水平距離 (m)			道路センターからの高低差 (m)		
		光 波 (1)	G P S (2)	差 (2)-(1)	レベル (3)	G P S (4)	差 (4)-(3)
A 断 面	1	16.36	16.36	0.00	-1.310	-1.305	0.005
	2	13.08	13.08	0.00	0.045	0.045	0.000
	3	13.57	13.59	0.02	0.020	0.029	0.009
	4	23.38	23.39	0.01	-5.334	-5.315	0.019
B 断 面	1	19.99	19.97	-0.02	-3.636	-3.639	-0.003
	2	13.17	13.16	-0.01	-0.119	-0.138	-0.019
	3	12.80	12.80	0.00	0.318	0.324	0.006
	4	19.18	19.19	0.01	-3.213	-3.216	-0.003



図－9 単独測位による重機走行の軌跡図



写真－3 ローラーに搭載したアンテナ

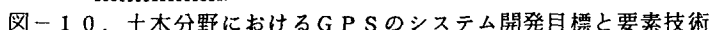
(5) 重機搭載による軌跡測定

A T 7 0 0 0 のアンテナと本体をローラーに搭載し、約 80m の直線を往復して走行しながら単独測位を行い重機の位置認識を行った（写真－3）。その軌跡の測定結果を図－9 に示す。1 回目の測定では

PDOP が 2.3 ～ 3.3 という良好な衛星配置であったため直線走行の軌跡がはっきりと現れ、位置認識の誤差は 10m 程度である。走行時間は約 2 分であった。しかし、約 2 時間経過後 2 回目を行ったところ非常にバラツキが大きく、しかも 1 回目の軌跡から大きくずれる結果となった。これは PDOP が 2.3 ～ 19.8 と悪くしかも観測中に捕捉衛星の組合せが変わったためであると思われる。なお、走行時間は約 10 分であった。このように単独測位においては観測条件によって精度が大きく変わることがわかった。

4. 土木工事への適用性

静止測量は観測時間が 60 分必要であるが、その高精度の結果から重要な基線の確認には十分適用でき、特に視通がない場合には威力を発揮できる。また、キネマティック測量も土工事については十分な精度の結果が得られ、1 点あたり 45 秒という観測時間の



それらの開発目標と要素技術の関係について図-10に示す。

最後に、本実験に際して多大なご助力をいただいた(株)アカサカテック、新日本コンサルタント(株)に対して、心より謝意を表する。

4) 5) 日本測地学会編著：GPS-人工衛星による精密測位システム-、日本測量協会、1986.