



197

土木研究所資料

第1062号

建設機械の自動化に関する調査試験(第3報)

——ブルドーザブレード操作の自動化、
位置検出装置の開発 ——

昭和 50 年 9 月

建設省土木研究所

要 旨

建設機械の自動化の一環として、ブレード操作の自動化および操向操作の自動化を目標に実機ブルドーザにブレード制御装置、負荷制御装置および平面位置検出装置を装着し、位置検出実験およびブレードのプログラム制御実験を行った。この結果、超音波による平面位置の検出は演算回路を多少改良すれば実用化できる目途がついた。また、プログラム制御およびブレード負荷制御を行うことによって、さらに能率的かつ応用面の広いブレード制御が可能になった。一方、操向操作の自動制御に関しては、シミュレーション解析結果、前記した平面位置検出装置とジャイロコンパスを使用することにより開発の目途がついた。

この報告書は主に昭和49年度に実施したブルドーザの自動化についての詳細を述べたものである。

建設機械の自動化に関する調査試験（第3報）

ーブルドーザブレード操作の自動化，位置検出装置の開発ー

建設省土木研究所機械研究室

本 田 宜 史

岡 崎 治 義

小 室 日出男

目 次

1. まえがき	1
2. 調査試験目的と実施内容	2
3. 実験装置および制御機器	3
3.1 模型ブレード制御試験機	3
3.2 自動ブレード操作ブルドーザ	3
3.3 制御機器	5
3.3.1 傾針角計	5
3.3.2 機関回転速度（機関負荷）検出器	8
3.3.3 履帯スリップ（ブレード負荷）検出器	9
3.3.4 平面位置検出装置	10
3.3.5 ブレード制御器	12
4. 実験結果	14
4.1 位置検出装置の調査	14
4.1.1 位置検出装置・種類	14
4.1.2 超音波式位置検出装置の試験結果	18
4.2 ブレード制御	24
4.2.1 理論およびシミュレーション解析	24
4.2.2 模型試験機による実験	33
4.2.3 実機によるプログラム制御実験	37
4.3 操向制御のシミュレーション解析	60
5. 結 論	68

1. ま え が き

建設機械は、騒音・振動・塵埃などの面で、操作の難しさの面で、安全性の面で、オペレータの技量が工事の質や量に影響を及ぼすことが多い。

こうしたことから建設機械の自動化、無人化の試みは以前から行われており、例えばプラント類、舗設機械などには一部取り入れられている。あるいはスラグ処理や水中作業など特殊な条件のもとで遠隔操作という方式が採用されている例もある。

しかしながら、ブルドーザやショベルなど単体で作業を行う機械については制条件の多様さから一部研究された例はあるが、製品として市場に出ているものはない。

オペレータ保護のみならず、将来の労働人口の不足に対処する方策として、完全無人化、自動化には至らないまでも、その一つのステップとして部分的な自動化を図り、操作の省力化を行うことも必要である。

複雑な操作方法を自動化することは、自動車と同様に誰にでも運転できる建設機械の普及にもつながるものと考えられる。

機械研究室では、建設機械の中でもっとも汎用的なしかも台数の多いブルドーザを取り上げて、ブレード操作の自動化を図ることにした。昭和47年度にはブルドーザの一部を改造して、ブレードを自動操作させるための自動ブルドーザの試験機を製作し、土木研究所千葉支所構内テストコース上で掘削押土の実験を行った。この自動操作ブルドーザはブレードCフレームの傾斜角を常時一定に保つ自動制御を目標としたものであり、作業前の地形に影響され易いが、掘削時の負荷状態が少ない場合には、数回の作業で地形はかなり平坦化することが判明した。しかし、負荷が大きくなると履帯がスリップし、作業がストップしてしまう欠陥が生じてくることが分かった。昭和48年度は模型のエンジン負荷制御装置により、エンジン弾性を考慮した最適ブレード制御を見い出し、これを実機の自動操作ブルドーザに適用した。また、これと同時にブレードのレベル制御、負荷制御（履帯スリップ制御）を総合したブレード制御装置の開発を行い、ブレードの最適制御方法および条件を理論的にかつ実験的に裏づけた。

昭和49年度は、以上のレベル制御、負荷制御の他、操向制御の開発を目途に、計算機によるシミュレーションを行うとともに、ブルドーザの平面位置を検出する装置の開発も同時に行った。

この平面位置検出装置とレベル制御、負荷制御装置を連動させることによって、プログラム制御を行うことが可能となりその制御性について実験的に検討した。

本報告は上記の各制御機構の開発経緯、制御実験結果および本自動ブルドーザの施工への適用性について述べたものである。

2. 調査試験目的と実施内容

昭和47～48年度は、主にレベル制御によるブレード操作の自動化に取り組んできたが、バーチカルジャイロをブレード標高位置検出器として用いることにより、ある程度ブレード操作の自動化の目的が^{1), 2)}ついた。しかし、一般の土工作業への応用となると、レベル制御の他に負荷制御、またブルドーザの移動位置に応じて適当にブレードを操作する必要がある。さらに走行関係の自動化も完全自動化のためには必要である。従って、昭和49年度は上述したような点を解決すべく検討することを目的とした。

昭和49年度調査実施内容は下記のとおりである。

- (1) 建設機械の自動化に関連した文献、並びに位置検出装置に関連した資料を調査し、収集する。
- (2) ブルドーザ位置検出装置を試作し、その性能および実用性について検討する。
- (3) 計算機により操向制御のシミュレーション解析を行う。
- (4) ブレードのプログラム制御方式による実験をテストコース（現場を単純モデル化したもの）上で実施し、制御性について検討する。

3. 実験装置および制御機器

3.1 模型ブレード制御試験機

本装置は、ブルドーザのブレード操作を自動的に行わせる方法および機器を検討するため、実機ブルドーザに模擬させて製作した室内実験用試験機である。この装置にいろいろな検出器や制

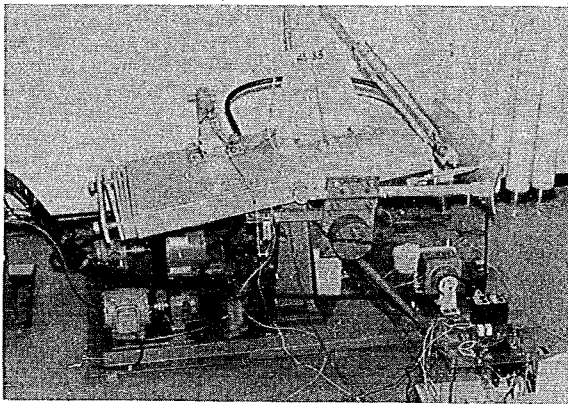


写真-1 模型ブレード制御試験機

御機器を取り付け、実機ブルドーザへの適用および制御方法について検討した。写真-1に、この装置の外観を示す。

3.2 自動操作ブルドーザ

理論解析および模型試験機による室内実験結果を基に、ブレード自動操作を目的とした自動操作ブルドーザ（以下、単に自動ブルドーザと称す）を47年度に製作した。写真-2は、その外観を示したものである。本機は、ベスマシンとして、小松D50A-15型（アングルドーザ）を用い、ブレード操作部の油圧回路を図3.1のように一部改造したものである。本機の制御器は、偏差（ブレード標高位置と目標値との差）が小さい間は、フローコントロールバルブにより比例動作し、偏差が大きくなると、ソレノイドバルブによりON-OFF動作するようになっている。また、フローコントロールバルブをフロートに切り換え、バルブ開度を固定することによって、

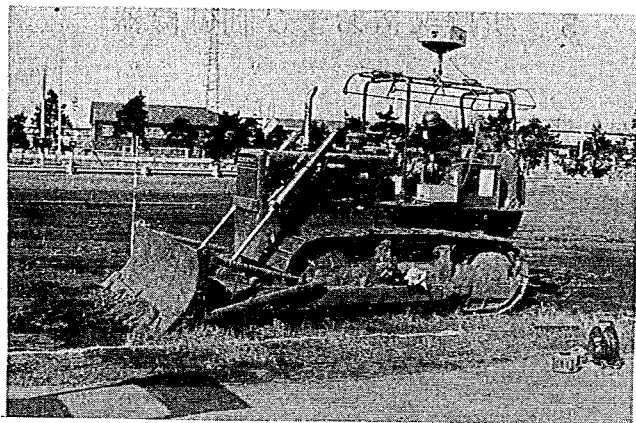


写真-2 自動ブレード操作ブルドーザ

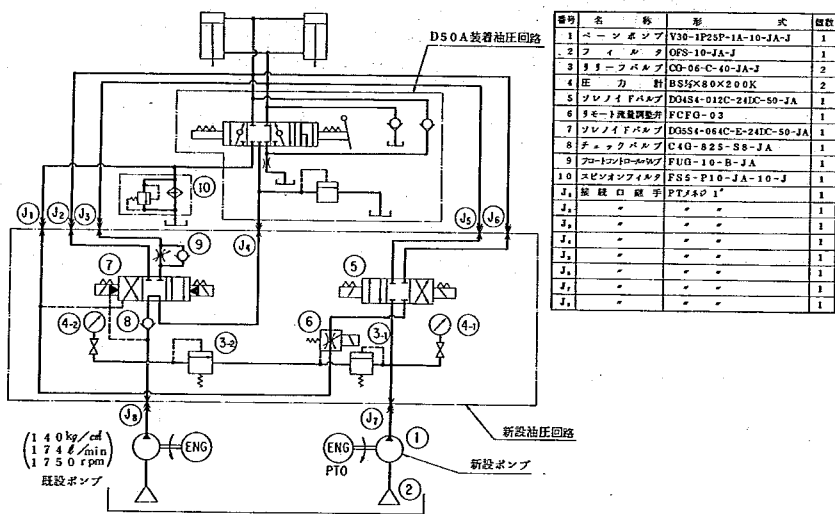


図-3.1 自動操作ブルドーザ油圧回路図

5値動作（偏差に応じて操作量が5段階に変わる制御動作）に切り換えることも可能になっている。さらに48年度にはブレード負荷を検出するため履帯のスリップを検出する装置を取り付けた。49年度にはさらに平面位置検出装置を付加し、総合的なプログラム制御ができるように改造した。

3.3 制御機器

3.3.1 傾斜角計

(1) 土研製傾斜角計

土研製傾斜角計は、ハンマ型重錘をもった振子式傾斜角計で、振子の重量を分割式重錘の装着、脱着により3段階に変えることができ、一方、急激な変化に対して生ずる振子の振動を減衰させるために、振子の回転軸中心からカンチレバーを出し、これとピストン型のダッ

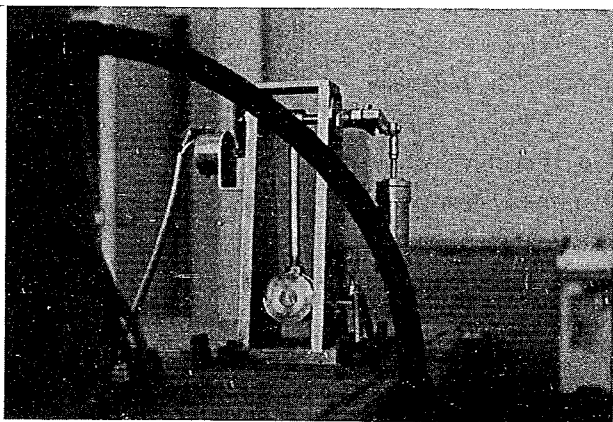


写真-3 土研製傾斜角計

シュボットを連結できるようにしたもので、その外観を写真-3に示す。傾斜角は、振子の回転軸に取り付けられたポテンシオメータにより、回転角に比例した電気量として取り出せるようになっている。

(2) フロートベンドラム傾斜角計

これは、山武ハネウェル社製のもので、土研製のものと同様、振子を応用したもので、出力信号はポテンシオメータにより、電気量として取り出せるようになっている。土研製と異

なる点は、密閉した容器の中に振子とシリコンオイルを入れ、直接、振子に粘性抵抗を生じさせて、振動を減衰させている。従って、土研製傾斜角計に比べて、小型になり、また減衰効果も大きい。しかし、検出角の範囲は狭くなっている。写真-4は、その外観である。

(3) パーチカルジャイロ傾斜角計

これは、ジャイロの原理を利用した傾斜角計で、特に建設機械用として、東京航空計器K. K.にて、開発、市販されているもので、ピッチ角、ロール角の2つを同時に検出できる。このジャイロは回転軸が常に地球の重力方向に向くようにするため、ボールトラッキング自立装置を使用している。本検出器の特徴は、ジャイロを用いているため、加速度および振動の影響が比較的少なく、また、検出角の範囲が広い（約 $\pm 60^\circ$ ある）。しかし、前記のものに比べて、非常に高価である。写真-5に、その外観を示す。

以上の3つが、今回の実験で使用されたもので、これらの主な仕様を表-1に示す。これらの中で、価格上の問題を別にすれば、試験の結果、パーチカルジャイロがよいことが分かったので、本自動ブルドーザのCフレーム傾斜角検出器（制御用）として、これを採用した。

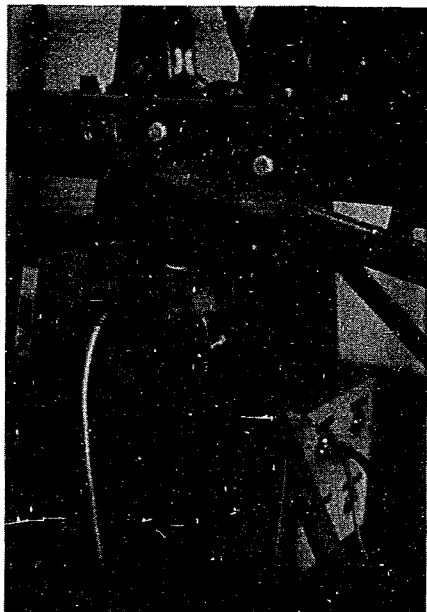


写真-4 フロートペンドラム傾斜角計

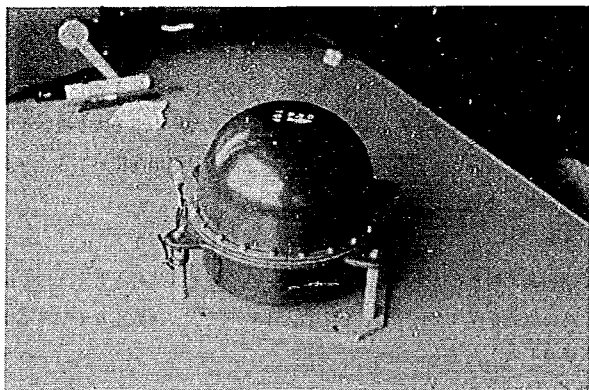


写真-5 パーチカルジャイロ傾斜角計

表-1 傾斜角計の仕様

項目	検出器	土研製傾斜角計	フロートベンドラム SB95A	パーチカルジャイロ VG23
外形寸法		50 ϕ ×100 ^{mm} 振りアーム長172 ^{mm}	165 ϕ ×98.6 ^{mm}	190 ϕ ×180 ^{mm}
重さ		3.5 kg	3.4 kg	3.6 kg
電源		24VDC以下	24VDC以下	DC: 24~28V
消費電力				0.7A以下
検出素子		ポテンシオメータ 1K Ω	ポテンシオメータ 1.8K Ω	ポテンシオメータ 2K Ω
測定範囲		$\pm 36^\circ$	$\pm 5^\circ$ (電気検出角)	ピッチ角 $\pm 5^\circ$ ロール角 $\pm 70^\circ$
分解能			0.1 $^\circ$	0.2 $^\circ$
直線性				0.5%
再現性			$\pm 0.05^\circ$	
ジンバル自由度		—	—	ピッチ軸 $\pm 60^\circ$ ロール軸 $\pm 80^\circ$
自立精度		—	—	ピッチ0.05 $^\circ$ ロール0.06 $^\circ$
自立速度		—	—	20 $^\circ$ ~1.5 $^\circ$ まで3~10分
ダンピング定数		可変	0.6	—
ロータ回転数		—	—	8000 rpm

3.3.2 機関回転速度（機関負荷）検出器

(1) 直流タコジェネレータ

機関回転軸に直接もしくはケーブルを用いて間接的に結合させ、タコジェネレータの発電量より回転速度を検出するものである。特長として、小型で取り扱い（出力信号の処理および取り付け）易いことである。しかし、低速時には発生電圧が小さく、かつ非線形となり、検出精度が悪くなる。

(2) マグネチックパルスピックアップ（山武ハネウェル社製）

機関回転軸に取り付けられたギヤの歯の凹凸をパルス信号として、取り出す方式を用いており、その原理を図3.2に示す。ここに、1秒間のパルス数を R （回/秒）、歯数 N （枚）、ギヤ直径 D （mm）とする。

と、周速 U （mm/s）は、

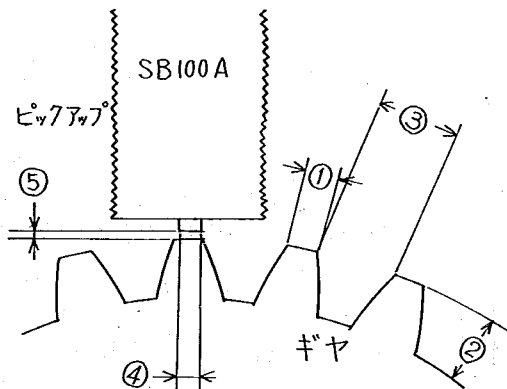
$$U = R \times N \times D / 60$$

…………… (3.1)

と求められる。この装置は機械的の接触運動部分がないため、耐久性の点で優れているが、取り付けに高精度が要求される欠点がある。

以上、これらの仕様を表-2に示す。これらの検出器は機関回転速度を検出することにより、ブレードの負荷制御をしようとするものであるが、ブルドーザの場合、オールスピードガバナにより、機関回転速度を一定に保つ作用があるため、実機に用いた場合、余り効

果が期待できない。そこで、本自動ブルドーザでは次に述べる「履帯スリップ検出器」をブレード負荷制御用として用いた。



$$(a) \quad ① \geq ④$$

$$(b) \quad ② \geq ③$$

$$(c) \quad ③ \div ④ \times 3$$

$$(d) \quad ⑤ \text{は小さいほどよい}$$

$$SB100 \text{ の場合 } ④ = 5 \text{ mm}$$

図-3.2 マグネチックパルスピックアップ原理図

表-2 機関回転速度検出器の仕様

検出器 項目	タコジェネレータ T-15	マグネチックパルス ピックアップ WN245A
外形寸法	36.5φ×69.4mm, 2極	本体213mm×120mm×85mm
重さ		
電源	—	100V-50Hz
制御動作	—	2段2位置動作
許容周囲温度範囲		0~55℃
設定可変範囲		H_i 側 1000~2000 rpm L_o 側 0~1000 rpm
リレーディフェンシャル	—	フルスパンの1.5%
制御リレー接点定格	—	250VAC, 3A 抵抗負荷 250VAC, 0.7A 誘導負荷
出力電圧	0.005V/rpm	
直線性	1%(0~1500 rpm)	
位相	+20°	—
絶縁抵抗	DC. 500Vにて100MΩ以上	—
絶縁耐力	AC. 1000Vにて1分間	—
ロータ慣性モーメント	3 g-cm ²	—
耐振動		0.5G, 3600 rpm以上

3.3.3 履帯スリップ(ブレード負荷)検出器

本装置は、掘削作業中のブルドーザの車速を検出するもので、ブレードの背後に第5輪を取り付け、極低速時においても確実に信号を検出できるようにカムマイクロスイッチでパルス信号として取り出し、そのパルスで鋸波信号発生回路をセット・リセットし、アナログ量に変換したあと、コンパレータにて、履帯のスリップ(間接的には、ブレード過負荷)を検出するものである。この回路の出力は、履帯がスリップしているか否かを表すロジック信号(+6Vおよび0V)であるが、この車速に対するONの時間比 τ は次式のようになる。

$$\tau = 1 - m \cdot v \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに、

$$m = -2.24 \ell_n (1 - e_{adj} / 8.6)$$

e_{adj} : 設定値(0~6の任意に設定できる)

v : 車速(m/s)

図3.3に本装置の回路の概要を示す。

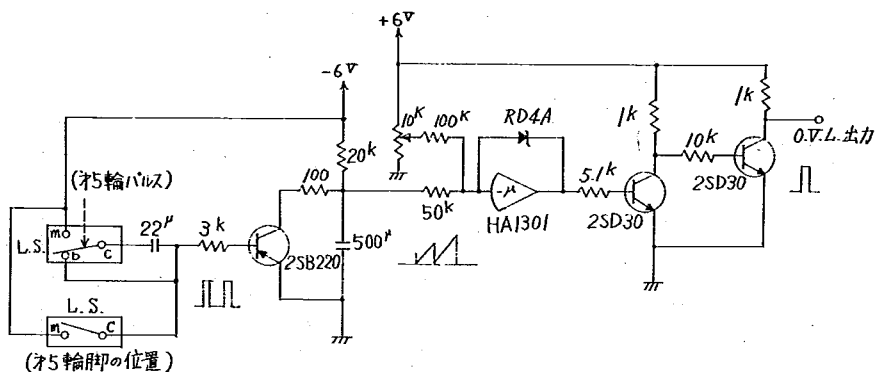


図-3.3 履帯スリップ検出器の回路図

3.3.4 平面位置検出装置

本装置は、ブルドーザが移動中、その現在位置を自動的に検出するもので、ある位置より無線

表-3 平面位置検出装置の仕様

	設計仕様値
超音波周波数	15 KHz
超音波発生繰返し周期	1 ^{sec}
測定最大距離(スピーカ〜マイク間)	200 ^m
超音波発生器出力(最大)	70W (peak)
スピーカ最大発生音圧	120 ^{dB} (peak)
スピーカ指向特性	無指向性360°, 指向性80°×4
マイク指向特性(1ヶ当り)	
発信部電源	DC 12V
受信部電源	AC 100V
同期用トランシーバ出力(最大)	500mW
関数器(演算回路)精度	1.5%
測定(総合)精度	2%

で指令信号を送り、この信号をブルドーザ上の無線機で受信し、同時にブルドーザ上の超音波発

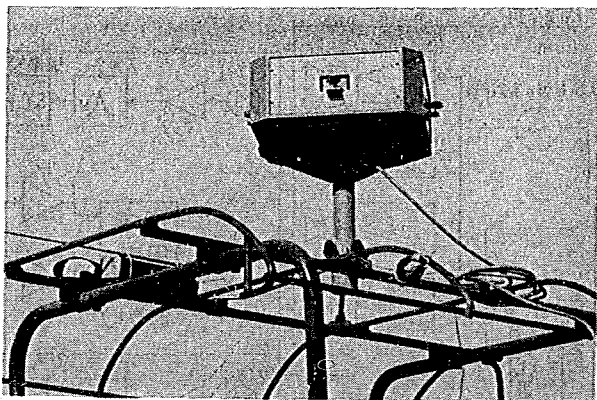


写真-6 超音波スピーカ（№1）

生器をこの指令信号で駆動する。このブルドーザからの超音波を2カ所の超音波受信装置で受音し、位置を検出するものである。表-3に本装置の主な仕様を示す。また、写真-6に超音波スピーカ（指向性）、写真-7に超音波マイクの外観を図3.4に本装置の概要を示す。

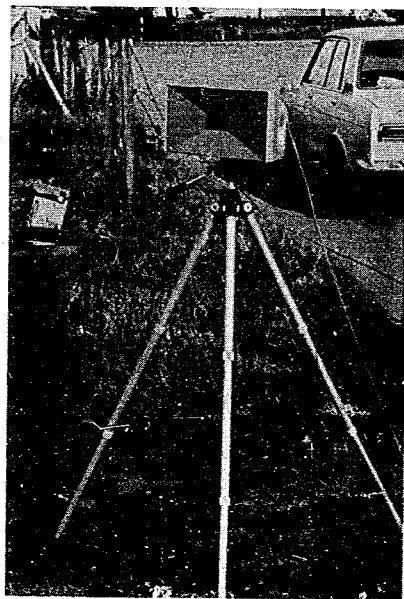


写真-7 超音波マイク

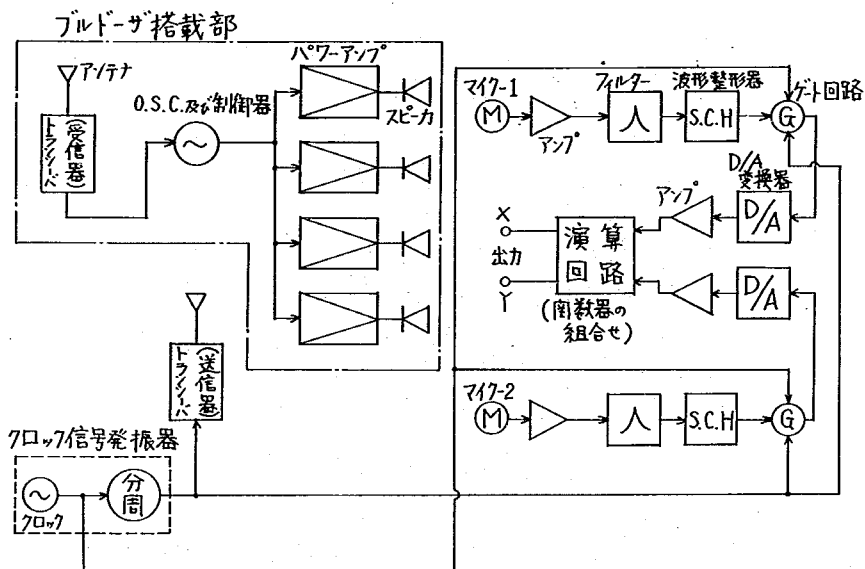


図-3.4 平面位置検出装置の概要

3.3.5 ブレード制御器

本装置は、ブレードを自動制御するための中枢となるもので、図 3.5 ~ 3.6 に示すような回

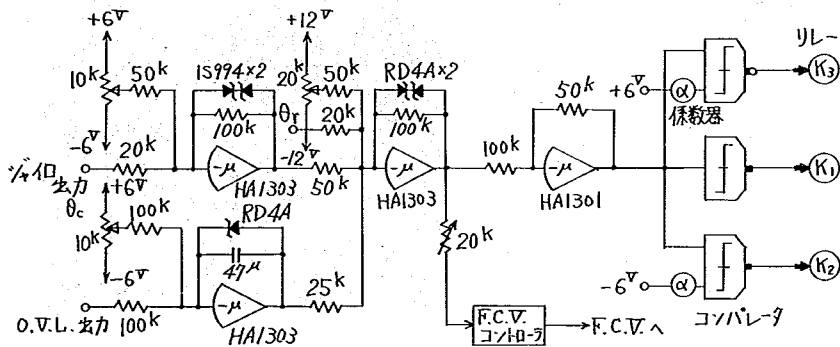


図-3.5 ブレード制御器の回路図(1)

路構成をなしている。これらの構成部分を大きく分けると、

a) Cフレーム傾斜角検出信号を増幅する回路

b) 過負荷信号をレベル制御系の信号と同質の信号に変換する回路（積分回路を応用した回路）

c) 目標値、過負荷信号、フィードバック信号（制御量）を加算・比較し、さらに増幅する回路

d) ソレノイドバルブ等を駆動するリレーロジック回路

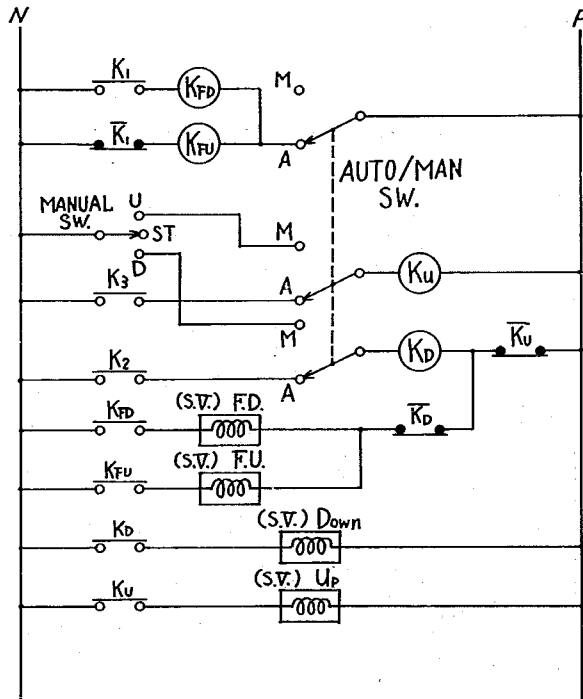


図-3.6 ブレード制御器の回路図 (2)

のようになる。本制御器は、むだ時間を少なくし、また、振動・衝撃などに耐えうるように、

d) の部分を除き、すべてトランジスタ化されている。

4. 実験結果

4.1 位置検出装置の調査

4.1.1 位置検出装置・種類

ブルドーザによる土工作业を自動化するに当たって、各位置でのブレード制御目標値を設定するため、ブルドーザの位置および標高を検出する必要がある。一方、操向制御を行う場合にも位

表-4 各種位置検出装置の概要

方 式	名 称	範 囲	精 度
電波式位置検出	(1)ロ ラ ン	広 範 囲	15～400 m
	(2)デ ッ カ	狭 範 囲	5～50 m
	(3)デッカDyna-Fix	きわめて狭範囲	数 m
	(4)オ メ ガ	広 範 囲	800～3000 m
	(5)エレクトロポジック	100 km	0.5～0.6 m
衛星による位置検出	(6)I. T. T.	広 範 囲	60～120 m
	(7)ハネウェル		
	(8)アフナボックス		
機械式位置検出	(9)トートワイヤ	きわめて狭範囲	フルスケール5%以下 (5 m 以下)
	(10)ワイヤーセンサ	100 m 位	
	(11)傾斜計-走行速度		
光学式位置検出	(12)レーザビーム	100 m	1% 以下 (1 m 以下)
	(13)臭素ランプ-光電管		
	(14)黒点追跡方式		
超音波式位置検出		100～200 m	

置検出を必要とする。現在のところ、位置検出装置は航空機、船舶、車輛等で広く利用されている。これらの概要を表-4に示す。ここで、これら各位置検出装置のうち、ブルドーザをはじめ建設機械に適用可能と考えられるものを以下説明する。

(1) エレクトロポジックによる位置検出(平面位置検出)

この装置は電波を利用した位置検出装置で、図 4.1 における S 主局から電波を発し、従局 A、B でそれぞれその電波を受信することにより、 $\overline{SA}=a$ 、 $\overline{SB}=b$ の距離を検出し、図 4.2 に示す流れに従って X、Y 座標を演算するものである。従局 A、B を結ぶ基線を X' 軸、これと直角に A を通る直線を Y' 軸とすれば、ブルドーザ位置 S の座標 (x' 、 y') は次式で与えられる。

$$x' = \frac{a^2 + b^2 - c}{2c} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$y' = \sqrt{a^2 - x'^2} \dots\dots\dots (4.2)$$

a, b はエレクトロロジックより最小単位 0.1^m で与えられる。座標 (x, y) に変換すると、

$$x = x_0 + x' \cos \theta + y' \sin \theta \dots\dots\dots (4.3)$$

$$y = y_0 + x' \sin \theta + y' \cos \theta \dots\dots\dots (4.4)$$

となる。

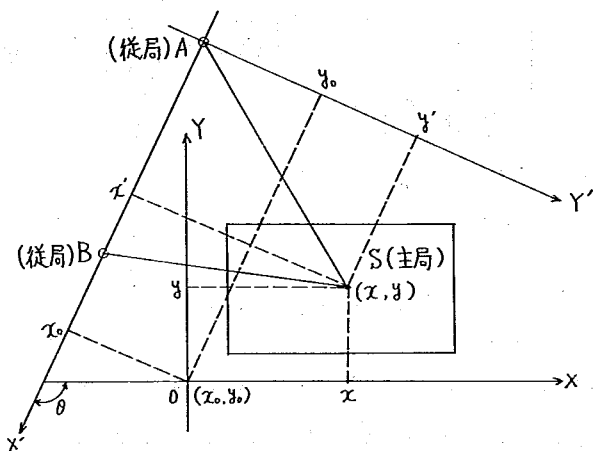


図-4.1 エレクトロロジックによる測定方法

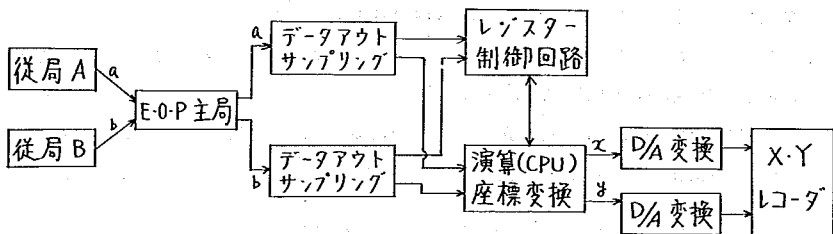


図-4.2 エレクトロロジックのフローチャート

(2) ワイヤースенсаによる位置検出 (絶対高さ検出)

この方法は走行距離およびブルドーザの絶対高さを計測するためのもので、あらかじめ標準となる基準線を、ワイヤーを付設することにより規定し、ブルドーザ本体に装着したセンサーとワイヤー基準線との相対変位 (変角)、ブルドーザ車速を逐次見い出す。図 4.3 (a) にこの概要を示す。この変角と車速を電気信号に変換し、さらに次式により演算し、ブルドーザの

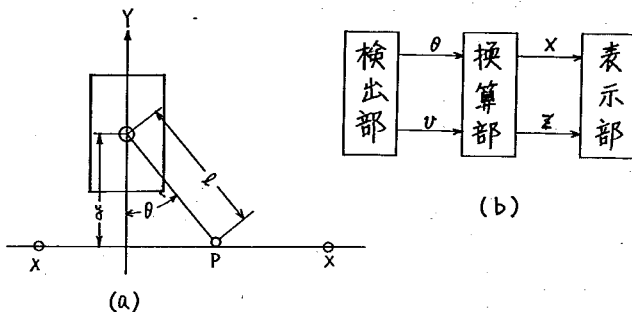


図-4.3 ワイヤースンサ

位置を検出するものである。ここでP点の位置 $(x(t), z(t))$ は、

$$z = \ell \cos \theta(t) \approx \ell \left(1 - \frac{\theta^2}{2} + \frac{\theta^4}{24} \right) \quad (4.5)$$

$$x = \int_0^t v dt - \ell \sin \theta(t) = vt - \ell \sin \theta \approx vt - \ell \left(\theta - \frac{\theta^3}{6} \right) \quad (4.6)$$

となる。また、この検出システムの流れを図 4.3 (b) に示す。

(3) 傾斜角-走行速度による位置検出 (絶対高さ検出)

この方法は図 4.4 (a) に示すように、ブルドーザ本体に装着した傾斜角検出装置および第 5 輪一回転速度検出装置により、それぞれブルドーザ本体傾斜角およびブルドーザ車速を求め、電気信号に変換し次式に従う演算を行うことにより、 x および z の変位を測定するものである。この検出システムの流れを図 4.4 (b) に示す。

$$x = \int_0^t v \cos \theta dt \approx \int_0^t v \left(1 - \frac{\theta^2}{2} + \frac{\theta^4}{24} \right) dt \quad (4.7)$$

$$z = \int_0^t v \sin \theta dt \approx \int_0^t v \left(\theta - \frac{\theta^3}{6} \right) dt \quad (4.8)$$

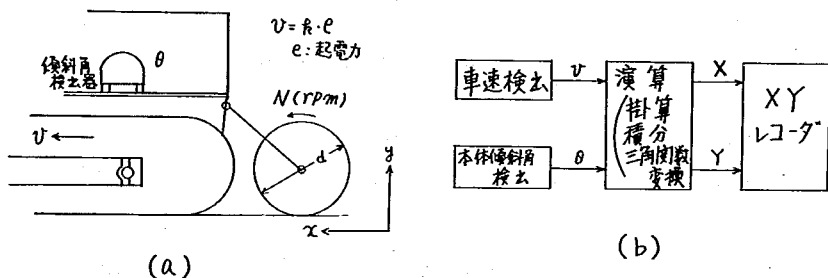


図-4.4 傾斜角-走行速度による方法

(4) レーザビーム（角度追跡方式）による位置検出（高さ，平面位置検出）

この検出方法はレーザビームを応用したもので，その原理を 図 4.5 に示す。

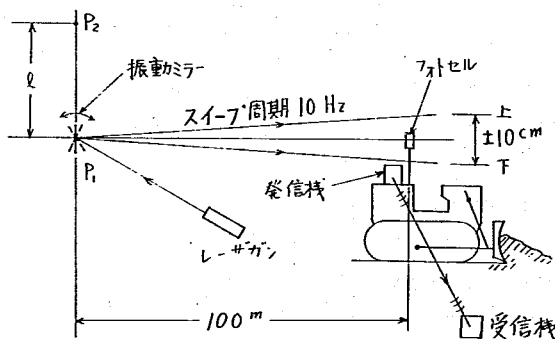


図-4.5 レーザビーム方式

a) 高さの検出

P_1 ， P_2 点よりレーザーガンにてレーザを発射し，ブルドーザに装着してあるフォトセルでこのレーザを感知すると同時にFMテレメータの発信機より電波を発信させ，受信機でこの電波を受信させる。この時のそれぞれの振動ミラーの角度 θ_1 ， θ_2 を測ることにより高さを検出する。

b) 平面位置の検出

高さの検出と原理的には全く同様である。この場合はレーザガンの設置位置が同一高さの点にある。

(5) 黒点追跡方式による位置検出（平面位置検出）

図 4.6 に示すように、ある既知の距離 ℓ にある 2 点 P_1 、 P_2 に望遠鏡を置き、ブルドー

ザ本体に黒点のある板を取り付け、常時、この黒点を望遠鏡の影像としてキャッチさせ、自動的にサーボ系を動作させることにより測定を行うものである。この概略の原理図を

図 4.7 に示す。

4.1.2 超音波式位置検出装置の試験結果

平面位置検出装置の性能（精度、測定範囲、安定性）を把握するため、本装置を取り付けたブルドーザを

図 4.8 に示すパターンで実際に走行させ、実際の位置と本装置

による検出値を測定し、比較・検討した。

また、本装置のスピーカの性能を把握するため、交通環境研究室の無響実験室にて、スピーカの指向特性試験を行った。

図 4.9 ～ 4.10 は指向性のあるスピーカを 4 方向に取り付けたもの（ $\#1$ ）および無指向性のスピーカ（ $\#2$ ）の音圧レベル（指向特性）を測定した結果である。ただし、パワーアンプの出力は若干絞っており（最大出力の 60% 程度）、最大音圧レベルではないが、双方ともアンプ出力（同一のアンプ）を同じにして測定してある。スピーカ（ $\#1$ ）はスピーカ（ $\#2$ ）に比べて若干指向性が強いことを示しているが、最大値

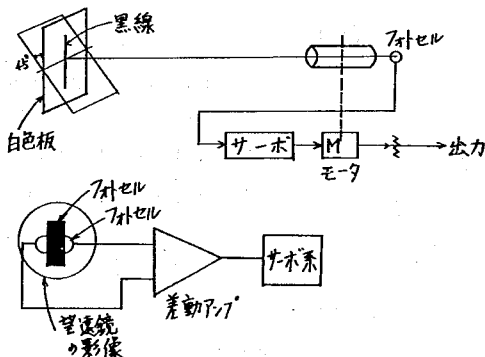


図-4.6 黒点追跡方式の装置

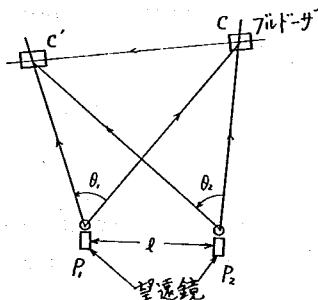


図-4.7 黒点追跡方式の測定原理図

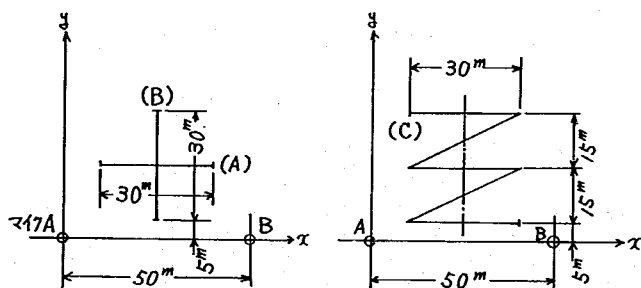


図-4.8 位置検出実験走行パターン

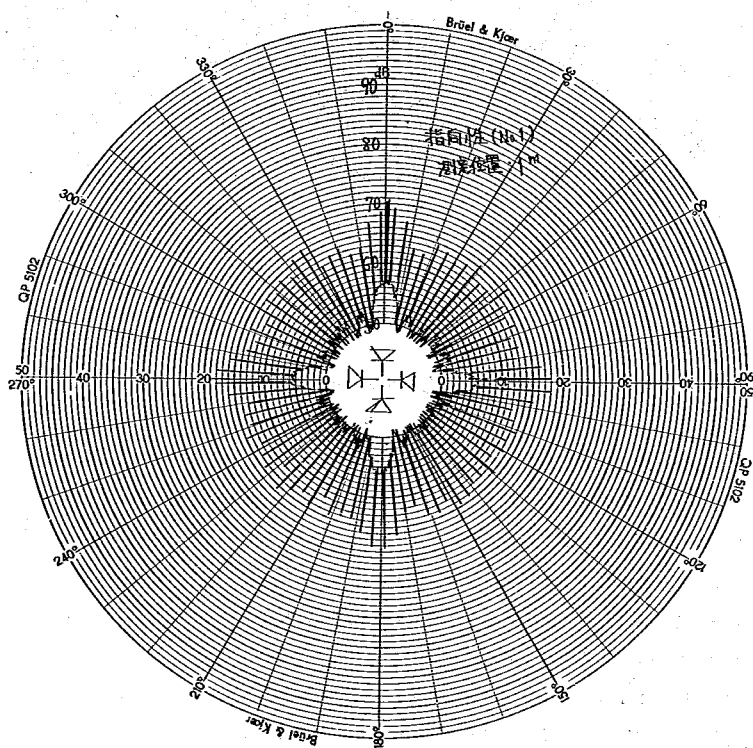


図-4.9 指向特性 (スピーカ No. 1)

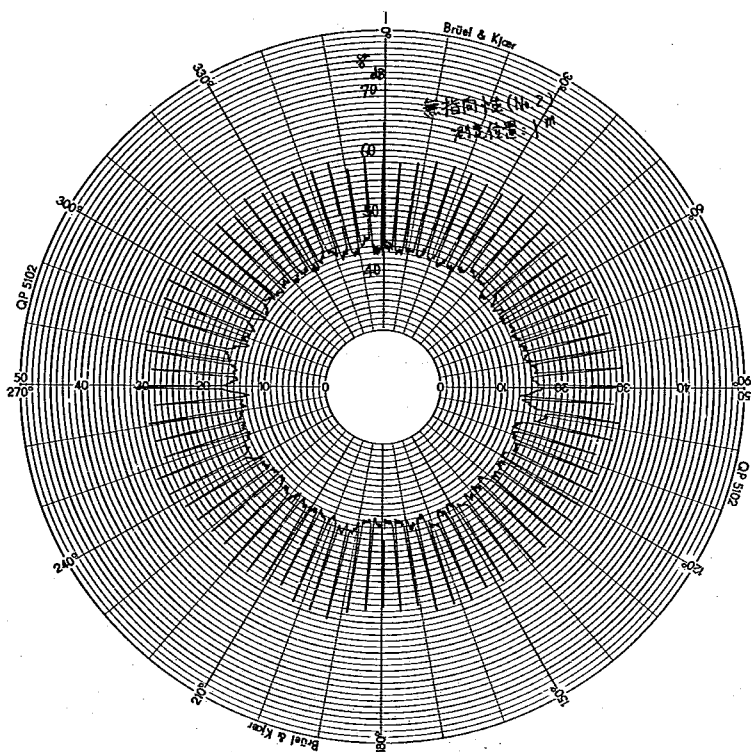


図-4.10 指向特性(スピーカ№2)

(スピーカ取付中心線より $\pm 5^\circ$ の範囲でピークとなる)と最小値との差は約6 dB(アンプ出力最大時で12 dB程度と思われる)であり、実用上、差しつかえないと思われる。また、スピーカ(№2)は音圧レベルが全面一様であり、その点スピーカ(№1)より良好であるが、音圧発生出力がスピーカ(№1)より、平均値で約6 dB低かった。従って、このアンプの最大出力時でスピーカ(№1)の最大音圧レベルは約120 dBといわれており、スピーカ(№2)では出力の点で多少問題があるようである。

図4.11～4.13は音圧発生出力の大きいスピーカ(№1)をブルドーザに取り付け、本装置の実際の走行による位置検出測定実験結果を示したものである。Y方向の設定値と測定値との差およびバラツキは、X方向のそれらに比べて、いずれもかなり大きく、実用化するには、さらに改良の余地がある。この原因については演算回路の精度、気温の変化および装置の動作時間遅

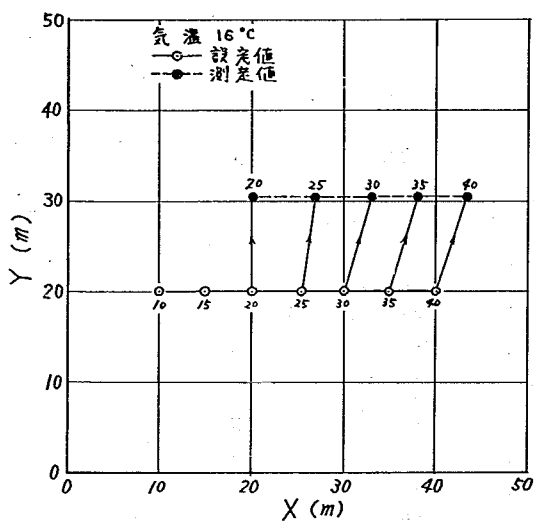


図-4.1.1 位置検出実験結果(1)

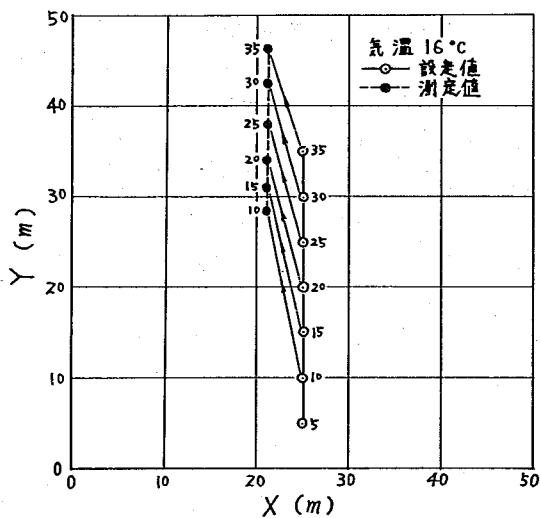


図-4.1.2 位置検出実験結果(2)

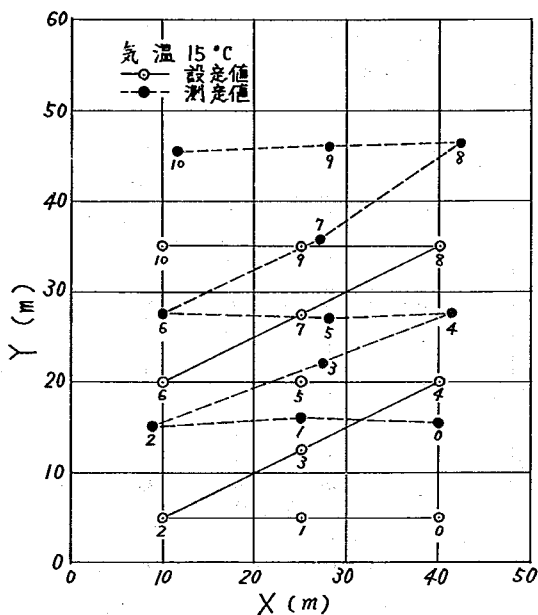


図-4.13 位置検出実験結果(3)

れによるものと考えられる。気温の変化による誤差は今回の実験ではほとんど無視できる。また、演算回路の精度については、デジタル化によって解消できる見通しがある。従って、問題は時間の遅れによる誤差である。この装置の時間遅れ $\Delta \tau$ は図4.16より、

$$\Delta \tau = 2.78 / 340 \approx 0.008 (\text{s}) = 8 (\text{ms})$$

と思われる。従って、この遅れをさらに小さくすることは、すでに限界であり、演算部に補正回路を挿入して補正する方法の開発が望まれる。

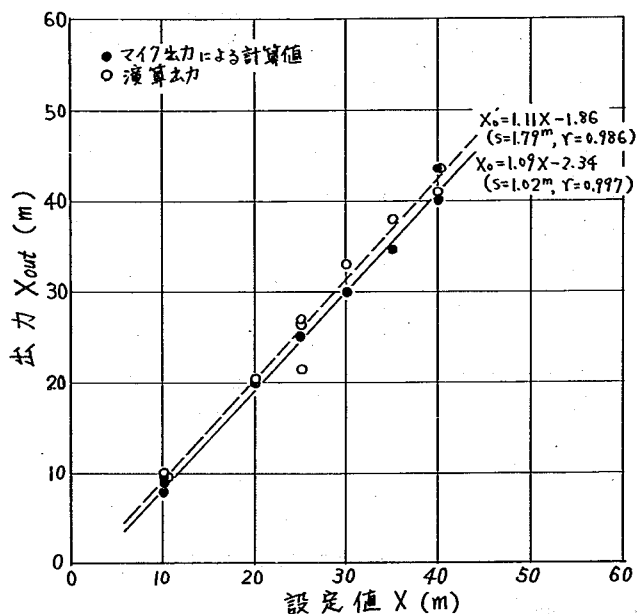


図-4.1.4 設定値と測定値との関係 (X方向)

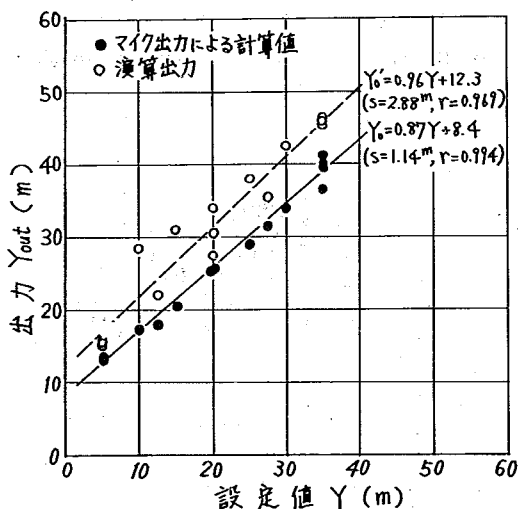


図-4.1.5 設定値と測定値との関係 (Y方向)

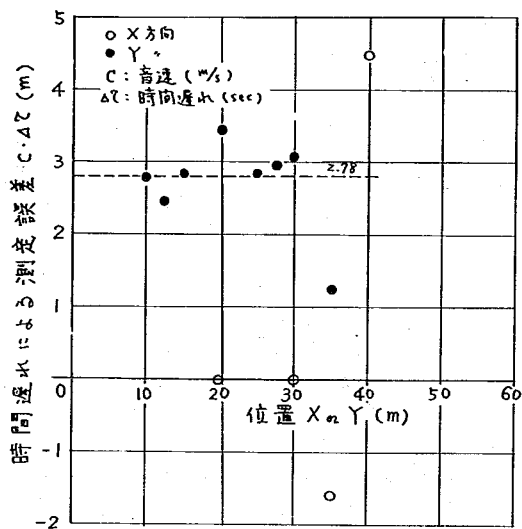


図-4.16 時間遅れによる測定誤差

4.2 ブレード制御

4.2.1 理論およびシミュレーション解析

ブレード制御は、主に上下方向の変化に対して行われるものであるから、その運動状態は、図4.17のように表せる。従って、ブレードを目標のレベルに保つためには、次式を満足するよう

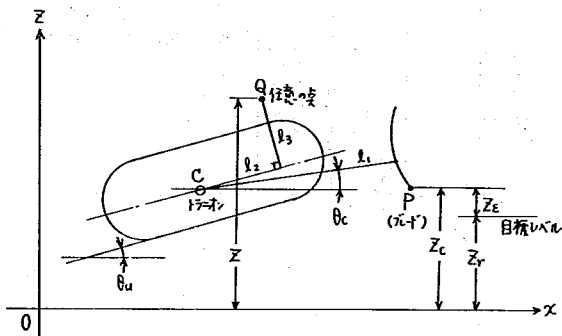


図-4.17 ブルドーザのブレード操作

な制御を行えばよい。

$$Z_r - (Z + \ell_1 \sin \theta_c - \ell_2 \sin \theta_u - \ell_3 \cos \theta_u) = 0 \quad (4.9)$$

ここに、

Z_r : 目標値

Z : ブルドーザの任意の固定点の絶対標高位置

θ_c : C フレーム傾斜角

θ_e : C フレーム傾斜角の制御偏差

θ_r : C フレーム傾斜角の目標値

θ_u : 本体の傾斜角 (ピッチ角)

ここで、作業目的を余り凹凸の大きくない地形を平坦にするとした場合、トラニオンの絶対標高位置の変化が無視できると仮定すると、

$$\theta_e = \theta_r - \theta_c = 0 \quad (4.10)$$

とするような制御を行えばよいことになる。ブレードの操作は、一般に油圧シリンダへの圧油の流入量を操作バルブの開度調整によって行っているから、

$$\frac{dw}{dt} = \frac{q}{A} \quad (4.11)$$

ここに、

w : シリンダの動作量 (cm)

q : 圧油のシリンダ流入量 (cm^3/s)

A : シリンダ断面積 (cm^2)

t : 時間 (sec)

となる。次に、 w と C フレーム傾斜角の変化 θ との関係は、図 4.18 より、

$$\begin{aligned} (w_o + w)^2 &= \ell_4^2 + \ell_5^2 - 2 \ell_4 \ell_5 \cos (\theta_o + \theta) \\ &= \ell_4^2 + \ell_5^2 - 2 \ell_4 \ell_5 (\cos \theta_o \cos \theta - \sin \theta_o \sin \theta) \end{aligned}$$

$$\text{また、} w_o^2 = \ell_4^2 + \ell_5^2 - 2 \ell_4 \ell_5 \cos \theta_o$$

であるから、 w 、 θ を微小値とすると、

$$2 w_o w = 2 \ell_4 \ell_5 \sin \theta_o \theta$$

$$\therefore \theta = \frac{w_o}{\ell_4 \ell_5 \sin \theta_o} w$$

w の変化が小さい間は、

$$B = \frac{w_o}{\ell_4 \ell_5 \sin \theta_o} = \text{Const}$$

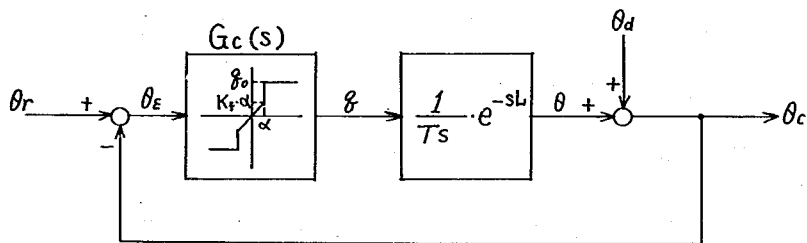


図-4.19 レベル制御系のブロック線図

本制御系は非線形性の非常に大きい系であるため、その理論解析は線形系のような一般的な方法ではできない。しかし、周波数応答については等価線形化法により線形系のごとく扱い、また³⁾インディシャル応答については位相面を用いた図解法により、近似的に理論解析する手段はある。以下はこれらの理論解析方法により計算した結果とアナログ計算機による演算(シミュレーション)結果を示したものである。

(1) 周波数応答

一巡の伝達関数 $G_o(s)$ は、図4.19より、

$$G_o(s) = \frac{G_c(s)}{Ts} \cdot e^{-sL} \quad (4.16)$$

ここに、

$G_c(s)$: 制御器の伝達関数(非線形)

である。いま、周波数応答の場合、制御器の周波数伝達関数 $G_c(j\omega, \theta_\epsilon)$ は等価線形化法により、等価ゲイン K_s (位相差はない)に置き換えることができる。すなわち、制御器の特性関数は図4.20のようになっているから、

a) $|\theta_\epsilon| \leq \alpha$ のとき

$$K_s = K_f \quad (\text{一般の線形系として扱える}) \quad (4.17)$$

b) $|\theta_\epsilon| > \alpha$ のとき

$$K_s = \frac{2}{\pi} \cdot \left[K_f \cdot \sin^{-1} \frac{\alpha}{\theta_\epsilon} + \frac{2q_0 - K_f \cdot \alpha}{\theta_\epsilon} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\theta_\epsilon} \right)^2} \right] \quad (4.18)$$

となる。従って、一巡の周波数伝達関数 $G_o(j\omega, \theta_\epsilon)$ は、

$$G_o(j\omega, \theta_\epsilon) = \frac{K_s}{j\omega T} \cdot e^{-j\omega L}$$

となり、ゲイン g および位相 ϕ は上式より、

$$|G_o| = \frac{K_s}{\omega T}$$

$$\therefore g = 20 \log \frac{K_s}{\omega T} = 20 \log K_s - 20 \log \omega T \text{ (dB)} \quad (4.19)$$

$$\phi = -\frac{\pi}{2} - \omega L \text{ (rad)} \quad (4.20)$$

となる。ハンチング周波数、ハンチング限界感度をそれぞれ ω_c 、 K_{sc} とすると、

$$\omega_c = \pi / 2 L \text{ (rad/s)} \quad (4.21)$$

$$K_{sc} = \omega_c T = \pi T / 2 L \quad (4.22)$$

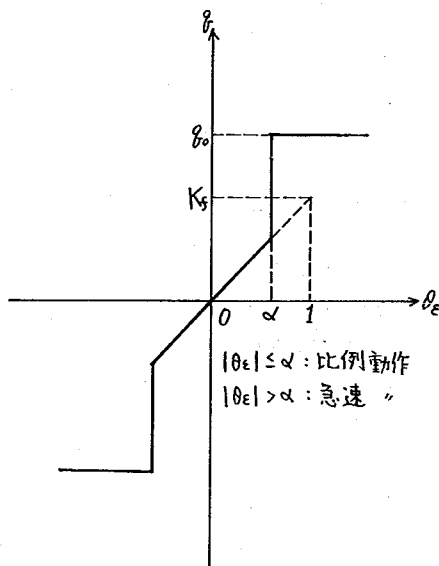


図-4.20 制御器の入出力関数

である。従って、 $|\theta_\epsilon| \leq \alpha$ のとき、 $K_s = K_f$ であるから、フローコントロールバルブ（比例制御動作時）のゲイン K_f は K_{sc} より小さくしなければならない。また、 $|\theta_\epsilon| > \alpha$ のとき、すなわち、

急速制御の安定限界不感帯幅 α_c は近似的に $K_f = 0$ とおくと、(4.18), (4.22)式より、

$$\frac{\pi T}{2L} = \frac{4q_0}{\pi\theta_\varepsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha_c}{\theta_\varepsilon}\right)^2}$$

$$\therefore \alpha_c = \theta_\varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{\pi^2 T \theta_\varepsilon}{8q_0 L}\right)^2} \dots\dots\dots (4.23)$$

となる。次に上式を θ_ε で微分して、

$$\frac{d\alpha_c}{d\theta_\varepsilon} = \sqrt{1 - \left(\frac{\pi^2 T \theta_\varepsilon}{8q_0 L}\right)^2} - \left(\frac{\pi^2 T \theta_\varepsilon}{8q_0 L}\right)^2 \bigg/ \sqrt{1 - \left(\frac{\pi^2 T \theta_\varepsilon}{8q_0 L}\right)^2} = 0$$

とおくと、

$$\theta_\varepsilon = 4 \sqrt{2q_0 L / \pi^2 T}$$

となり、これを(4.23)式に代入すると、

$$\alpha_c = 4q_0 L / \pi^2 T \text{ (deg)}, \text{ (等価線形化法による安定限界点)} \dots\dots\dots (4.24)$$

である。図4.2.1は開ループのBode線図を、図4.2.2は閉ループのBode線図である。また、

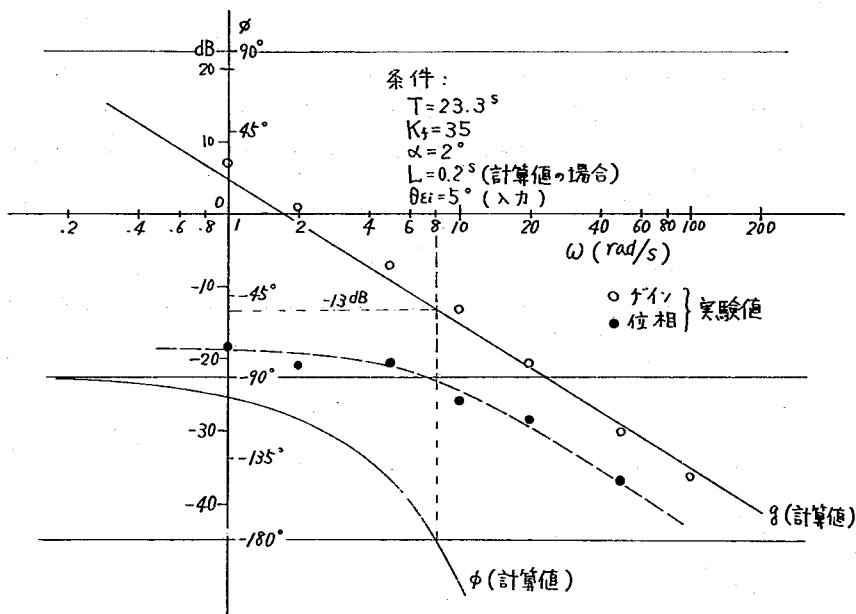


図-4.2.1 開ループのBode線図

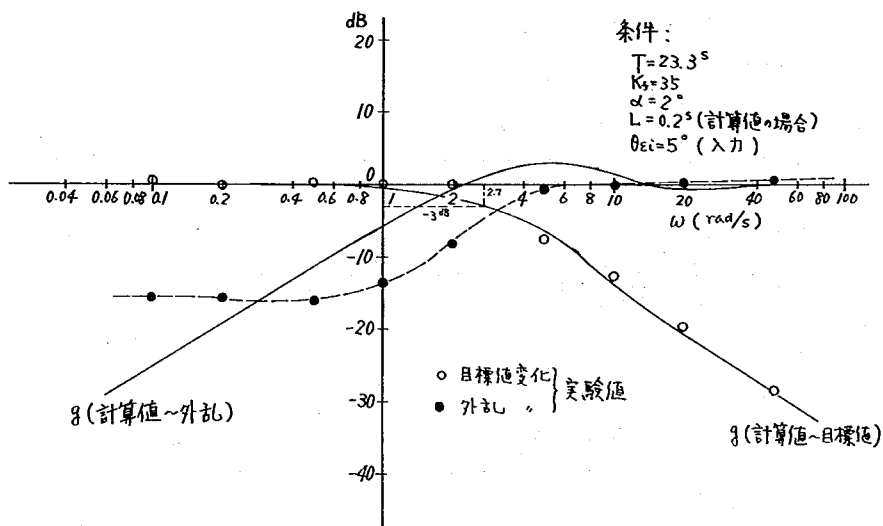


図-4.2.2 閉ループのBode線図

プロットまたは破線はアナログ計算機によるシミュレーション値を示したものである。開ループにおいて、ゲイン特性は理論値とシミュレーション値ともよく一致しているが、位相特性は少々異なっている。この原因の主なものとして、シミュレーションにおいて、むだ時間 L を考慮していないためと思われる。

(2) インディシャル応答

この系の制御方程式は、

$$T\dot{\theta}_e + Q\{\theta_e(t-L)\} = T\dot{\theta}_r \quad (4.2.5)$$

ここに、

$$\theta_d(t) = 0$$

$$\theta_e(t-L) \geq \pm \alpha \text{ のとき: } Q = \pm q_0$$

$$|\theta_e(t-L)| < \alpha \text{ のとき: } Q = K_f \cdot \theta_e(t-L) \quad (4.2.6)$$

である。いま、

$$\theta_r = u_0 \cdot u(t), \quad (\text{step関数})$$

とすると、(4.2.5)式は、

$$T\dot{\theta}_e + Q\{\theta_e(t-L)\} = 0, \quad t > 0$$

となる。従って、この系のトラセクトリは、

$$T\dot{\theta}_e \pm q_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.27)$$

$$T\dot{\theta}_e + K_f \cdot \theta_e = 0$$

を解いて得られる。従って、この系の位相面は 図 4.2.3 のようになる。いま、不感帯幅 α を極

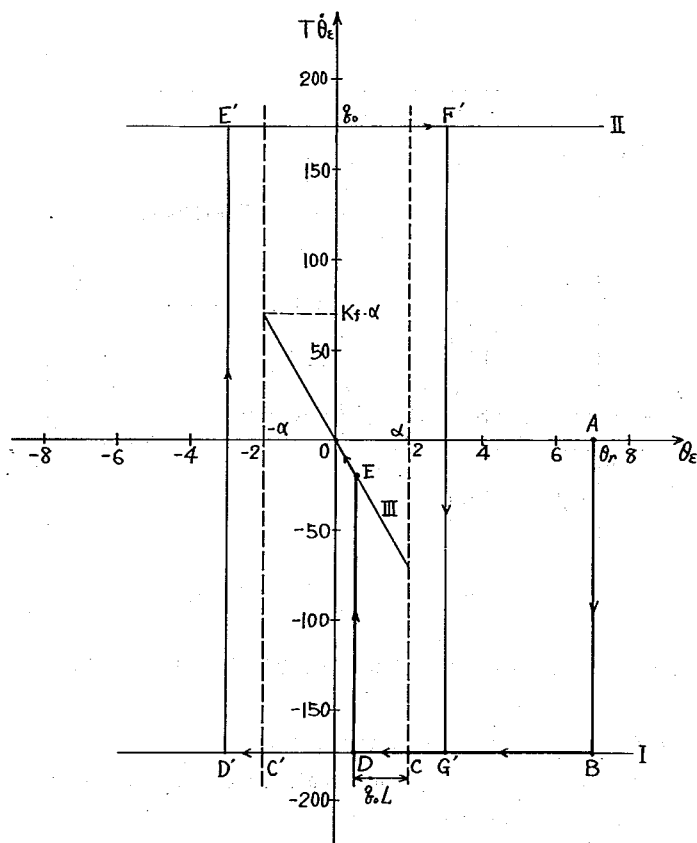


図-4.2.3 位 相 面

端に小さくすると、位相面上の状況点は図上の $D' E' F' G'$ 上をぐるぐる回ることになり、系が不安定（サイクリング現象）となることを示す。従って、この系の安定限界点 α_c は、

$$\alpha_c = q_0 L / 2 T \text{ (deg)}, \text{ (位相面図解法による安定限界点)} \quad \dots\dots\dots (4.28)$$

である。図 4.2.4 は位相面図解法より求めたインディシャル応答曲線およびアナログ計算機

(シミュレーション)より求めたインディシャル応答曲線を示したものである。この場合も、むだ時間 L の有無による分だけ曲線がずれている。このようなことから、近似計算による理論解析

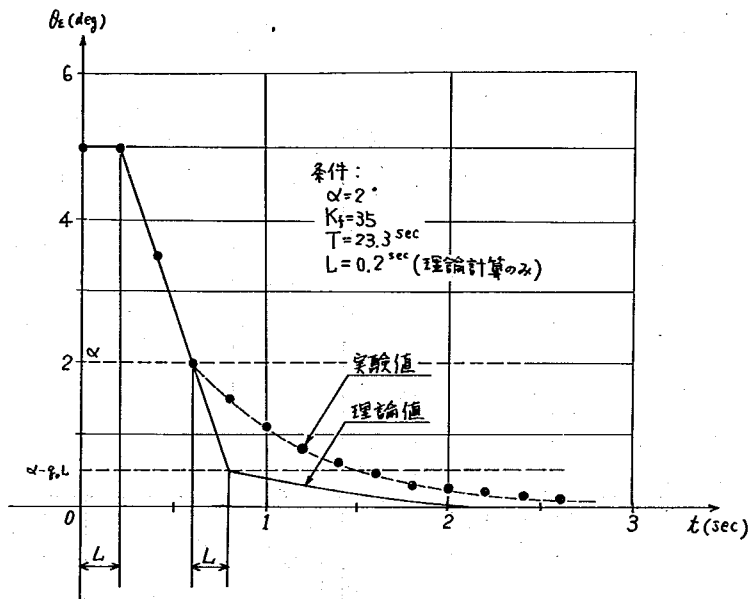


図-4.24 インディシャル応答

方法を実機制御系の設計に用いることも有用であると考えられる。以下は、この制御系の定数を

$$\left[\begin{array}{l} T = 23^{\text{sec}} \\ L = 0.2^{\text{sec}} \text{ (リレー, パワーリレー, 電磁弁, 角度)} \\ \text{検出器のむだ時間は, おおの, } 20^{\text{ms}}, 50^{\text{ms}}, 100^{\text{ms}}, 300^{\text{ms}} \text{ と考えられるから, 一} \\ \text{巡中の遅れの合計を } 0.2^{\circ} \text{ とした)} \\ q_0 = 174 \text{ (急速制御)} \\ q_1 = 70 \text{ (F.C.V. の最大圧油流量)} \end{array} \right.$$

とにおいて、以上の理論解析結果を用いて、この系の安定限界条件について計算した結果である。

ここで、安全側をとって、(4.28)式を用いると、

$$a_c = \frac{174 \times 0.2}{2 \times 23} = 0.756 \text{ (deg)}$$

となり、急速制御時の安定限界点は約 0.8^{deg} である。また、ハンチング限界感度 K_{sc} （比例制御時の安定限界条件）は、

$$K_{sc} = \frac{\pi \times 2.3}{2 \times 0.2} = 18.0$$

となり、本制御器のフロー・コントロールバルブより得られる最大感度 K_{fmax} は、

$$K_{fmax} = \frac{q_1}{\alpha_c} = \frac{7.0}{0.8} = 8.75$$

であるから、さらに大きな容量のフロー・コントロールバルブとポンプを用いてもよいことがわかる。図 4.2.5 は安定限界条件（非線形系であるため、制御器の入力振幅値によって、その条件が変わる）を図で表したものである。

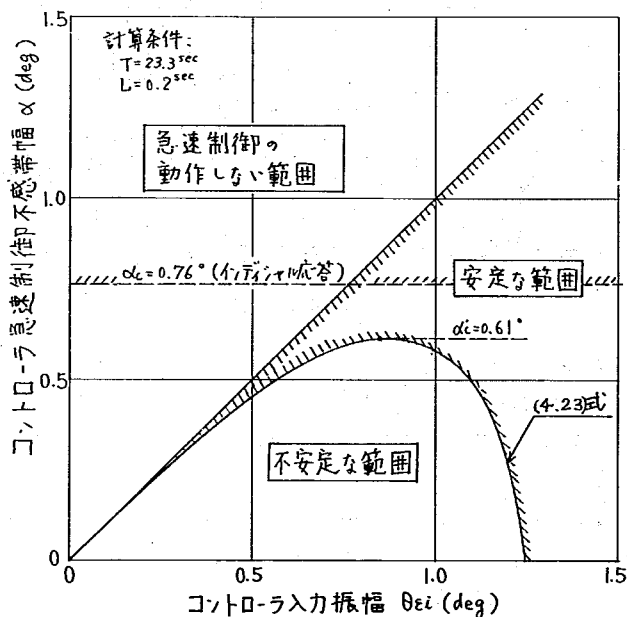


図- 4.2.5 安定限界線図

4.2.2 模型試験機による実験

ここでは、主に傾斜角計の応答性、安定性および精度についての性能試験、並びに、これらの

検出器を用いて実機の模擬制御系を作り、制御系の応答性、安定性についての実験を行った。地面の不陸によるブルドーザのピッチング運動に相当するものとして、油圧シリンダにより模型試験機の本体を上下に振動させた。このときの振動速度（周期）および振幅は、油圧シリンダへの流量調整バルブの絞りおよび方向切換弁の切換時間を変えて、いろいろな条件を設定した。また、各位置はポテンシオメータにて計測した。図 4.2 6 に計測器の取り付け位置および方法を示す。

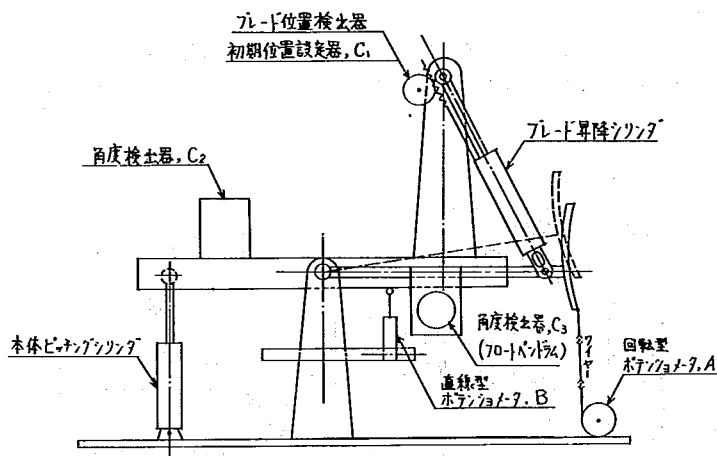


図-4.2 6 計測器の取付位置

(1) 傾斜角計の性能試験

- i) 試験機の本体に傾斜角計を取り付けた。
- ii) 本体を急激に、 10° 動かし停止させた。このとき、傾斜角計の出力信号をリニアコーダに記録した。
- iii) 次に、本体を 10° の振幅で上下に振動させ、そのときのポテンシオメータ(A)および傾斜角計の出力信号を記録し、追従性について解析した。

(2) インディシャル応答試験（外乱による影響）

- i) 本体およびブレードを水平に設定した。
- ii) 本体を急激に動かし、水平位置より、 10° 傾かせて停止させた。（このとき、油圧回路の流量調整弁の絞りは全開にした。）
- iii) このとき、ブレードが定常状態になるまでの経過（過渡状態）をポテンシオメータ(A)、(B)にて検出し、リニアコーダに記録した。

(3) 閉ループ周波数応答試験

- i) 本体を油圧シリンダにより、ピッチング運動させた。
- ii) このとき、本体の動きおよびCフレームの動きをポテンショメータ④、⑤にて検出し、リニアコーダに記録した。
- iii) 外乱（本体の上下の動き）信号の周波数および制御器の不感帯幅をいろいろ変えて、同様の実験を繰り返した。

(4) 土研製傾斜角検出器の性能および制御実験

土研製傾斜角計は振子形式で、かつ振子重量およびダッシュボットの装脱着可能を特徴としている。この検出器によるブレードの制御性についてブレード模型試験機により試験したところ図4.27のようになった。振子重量およびダッシュボットの有無で制御率（ブレードの入力変位量に対する制御後のブレード出力変位量の割合）および制御遅時間の傾向は著しく異なる。すなわち、制御率は振子重量

1400g位までダッ

シュボットの無い方が有る

方より良好であるが、

1500g以上になると

ダッシュボット装置の効

果が出てくる。これは振

子重量が増加するに従い

振子自体の慣性が大きく

なり減衰が低下してくる

ためと考えられる。

一方、遅れ時間に関し

てはダッシュボットの無

い場合が圧倒的に小さい。

またダッシュボットの有

無にかかわらず、振子重

量の増大に対して、遅れ

時間は低減する傾向を示

している。

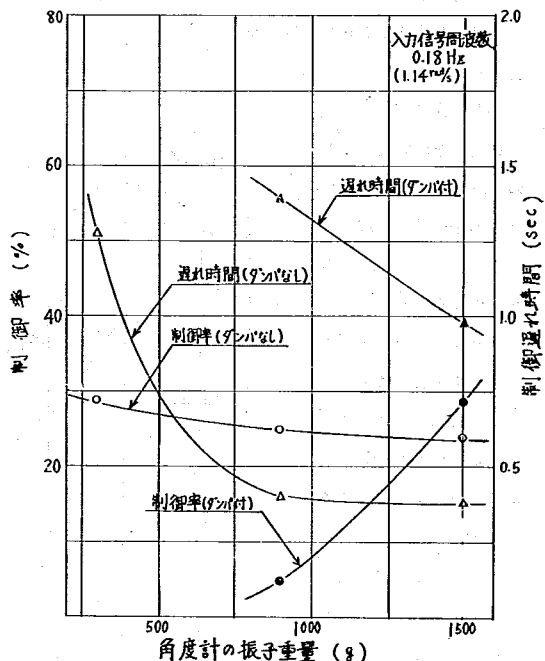


図-4.27 振子重量と制御性（土研製傾斜角計）

(5) フロートベンドラムの特性お

よび制御実験

ベンドラム形式の傾斜角検出器は一般に加速度の影響を受けやすく、特に発進時、停止時等に発生する大きな加速度に対して影響されやすい。図 4.28 にフロートベンドラムの水平加速度作用時の挙動を示す。フロートベンドラムでも水平加速度が働いている間は必ず角度の指示誤差を伴うが、定速度区間においては鉛直方向の加速度に対する影響は比較的少なく、また影響を受けても 0.5 秒位で減衰する。

一方、模型ブレード制御試験機を用いて制御器の不感帯幅を変化させた場合の制御性に及ぼす影響を調べたところ図 4.29 のようになった。このグラフよりブルドーザ本体の上下動の周波数の値にかかわらず制御率（入力変位量に対する制御量の割合で 100% を完全制御とみなす）の最大となる不感帯幅はほぼ一致していた。（本実験では約 0.25° ）。又本体上下動の周波数が小さいほど制御率は良くなってい

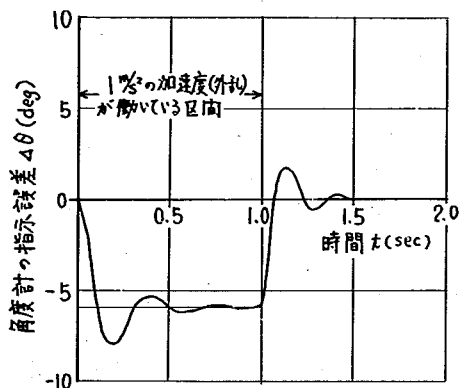


図-4.28 フロートベンドラムの特性

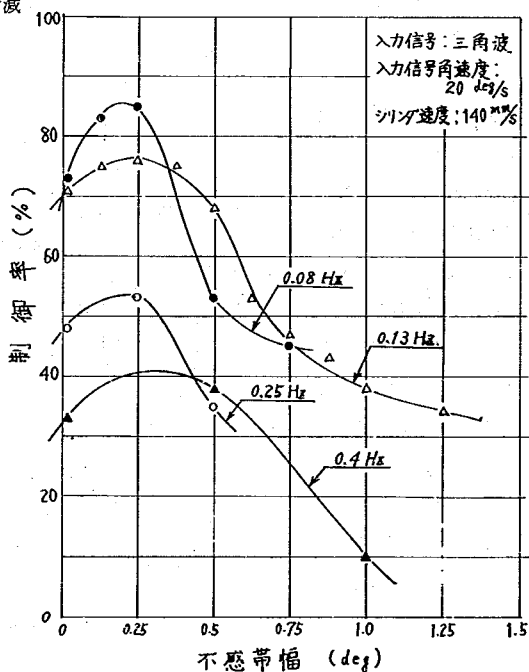


図-4.29 不感帯幅と制御性（フロートベンドラム）

ることが判明した。

4.2.3 実機によるプログラム制御実験

ブレード制御系（レベル制御のみ）の自動制御特性を把握するため、アナログ計算機（入力信号として用いるStep関数、 $\sin$ 関数を発生させる装置）と実機ブレード制御系（非線形系）を物理的に結び、また、制御量（Cフレーム傾斜角）をフロートベンドラムおよびジャイロ傾斜角計の両方で検出できるようにして、インディシャル応答および閉ループ周波数応答試験を行った。

図4.3.0に実験回路の概要を示した。

また自動ブルドーザの総

合的な制御性を把握するた

めに、土木研究所構内の性

能試験場に敷均し、埋戻し

作業実験用として、 ± 50

cm程度の凹凸の地形、掘削

押土作業実験用として、平

坦な地形を造成した。これ

らは、長さ10～20m、

幅4～5mを1コース分と

した。実験内容は、(1)スリ

ップ制御を含んだ目標値を

一定としたレベル制御、(2)プログラム制御による掘削押土作業、(3)プログラム制御による埋戻し

作業の3種類の制御実験を行った。一方、各制御実験とも条件は、1速、機関回転速度1500

rpmの一定とし、コントローラの急速制御不感帯幅 α は、レベル制御では1、2、3の3条件、

プログラム制御では1.5°の一定とした。一実験での作業反復回数は2～3回とした。また、制御

性の良否を判定するために、作業前後の地形をレベル計にて、進行方向1mピッチ（変化の激し

い所は50cmピッチ）で測定した。さらに、本体のピッチング角、Cフレーム傾斜角（ブレード）

の動き、車速の変動、アナログ計算機により与えられる目標値の変化（プログラム）をフロート

ベンドラム傾斜角計、FMテレメータ等を用いて、リニアコーダに記録した。

模型実験により開発したセンサおよび制御回路を実機ブルドーザに適用し、各種制御実験を行

った結果、次のことが判明した。

本ブルドーザレベル制御系の制御性としてインディシャル応答、閉ループ周波数応答をみたところ

図4.3.1～4.3.2のようになった。これよりレベル制御系のむだ時間は約0.2 sec、また

厳密には非線形系であるが、その応答特性は一次遅れのフィードバック系に酷似していることが

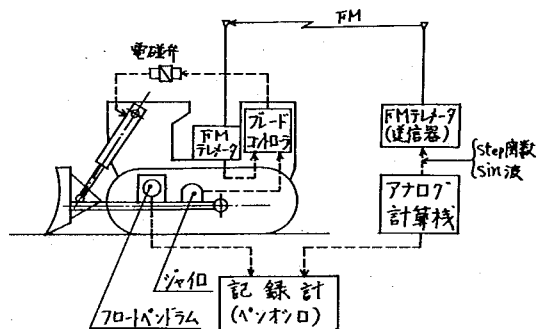


図-4.3.0 実機応答試験

判明した。

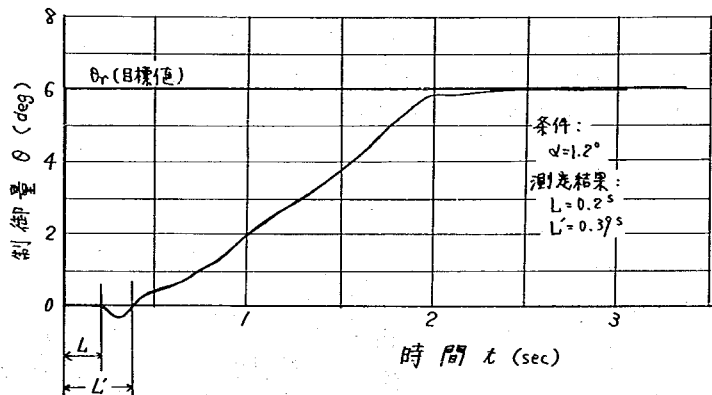


図-4.3.1 実機制御系のインディシャル応答

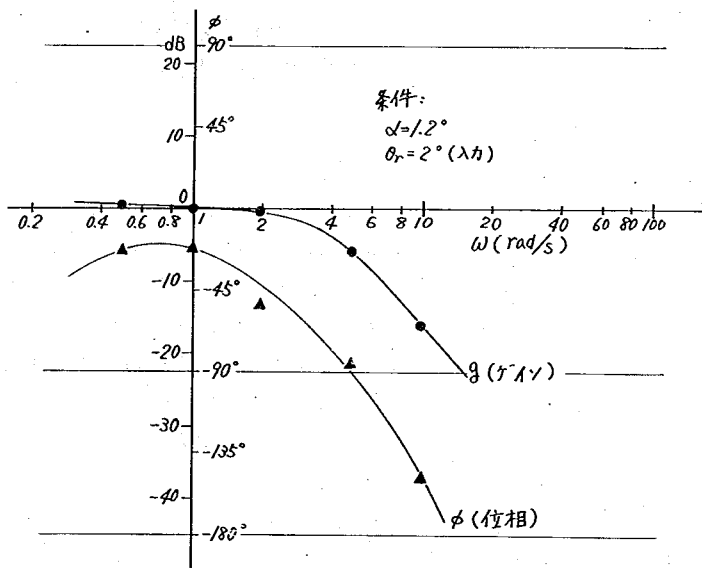


図-4.3.2 実機制御系の閉ループ周波数特性

一方、初期凹凸が±60cm程度のテストコースにおけるレベル制御実験結果を図4.3.3～4.3.5

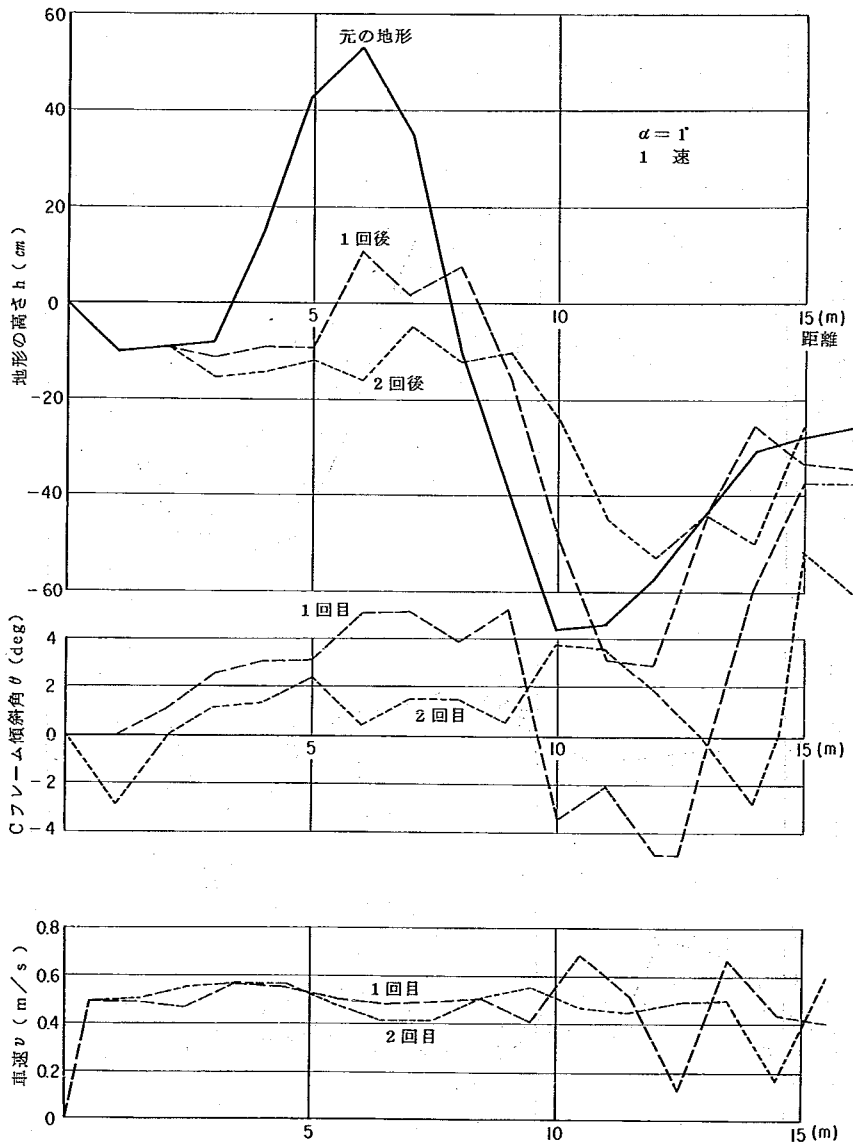


図-4.3.3 レベル制御実験結果(1)

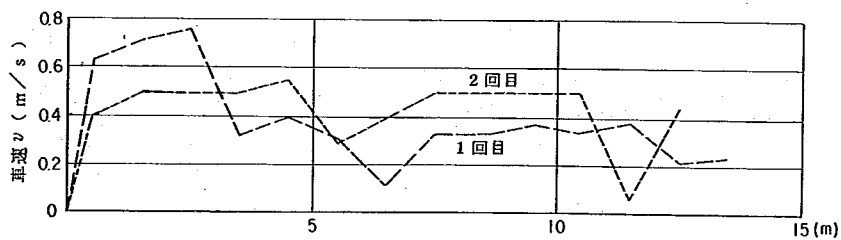
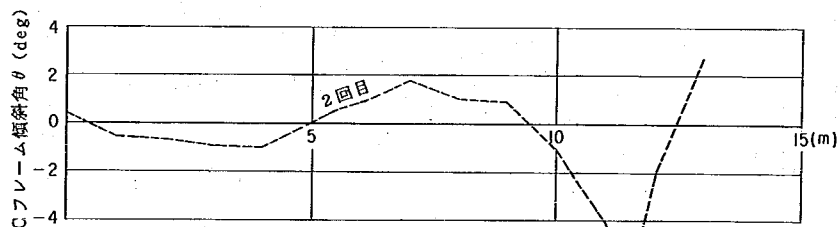
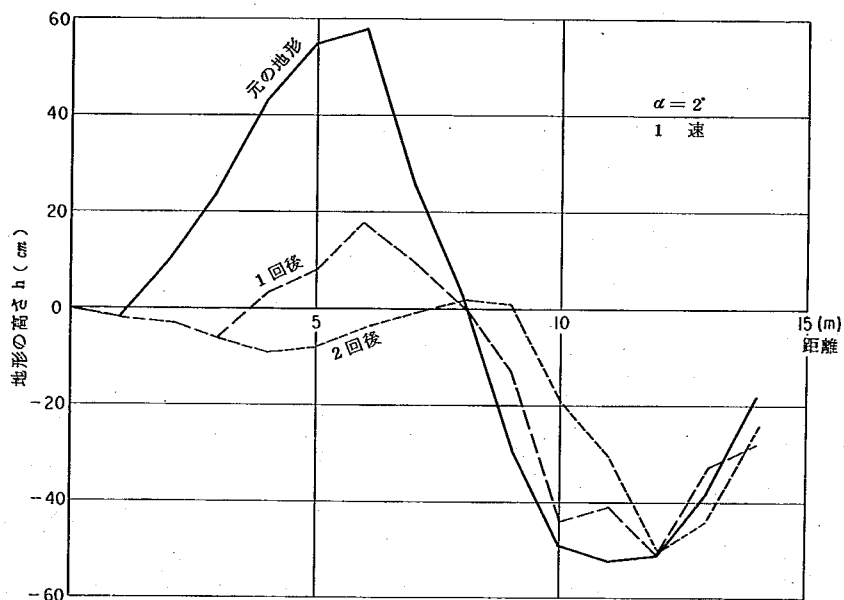


図-4.3.4 レベル制御実験結果(2)

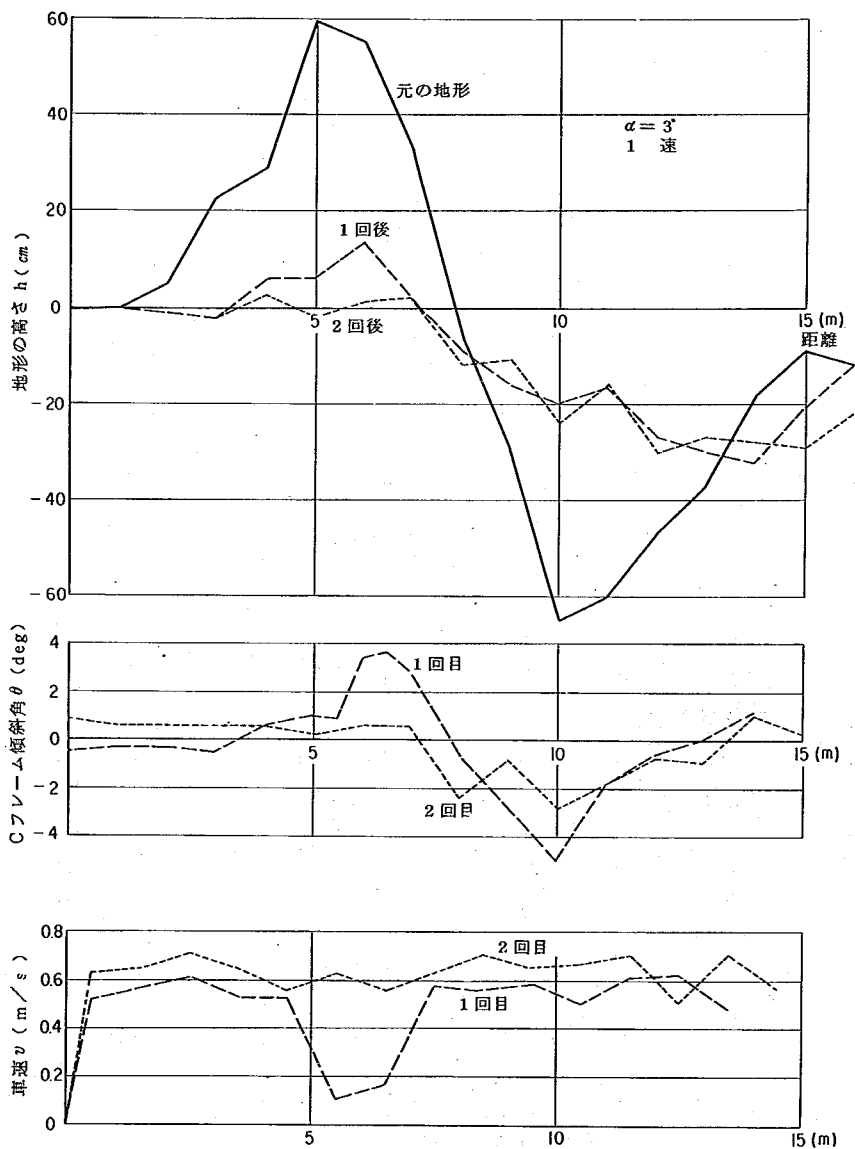


図-4.35 レベル制御実験結果(3)

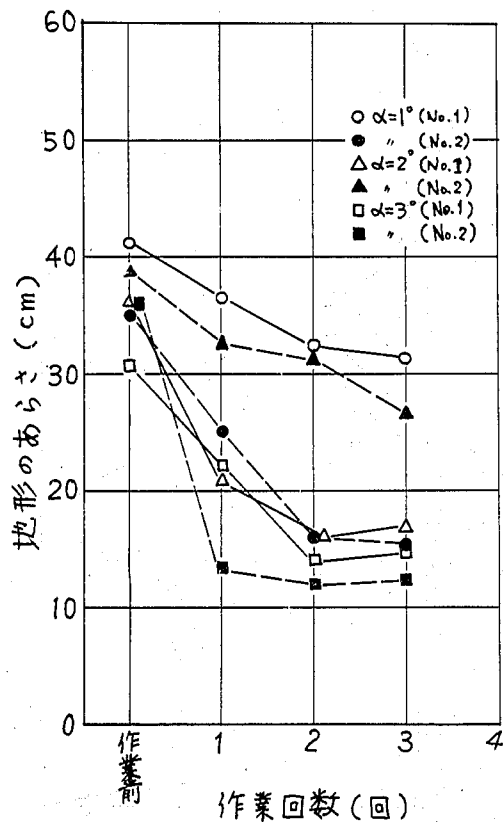


図-4.3.6 作業回数と平坦度

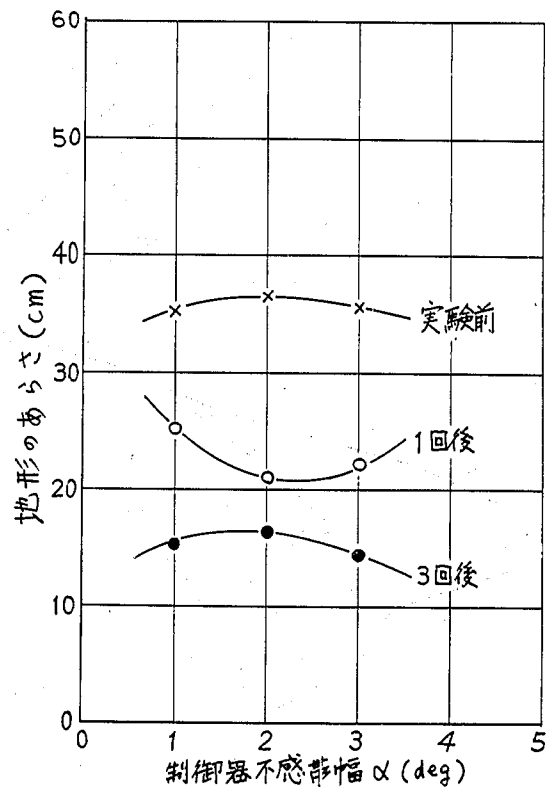


図-4.3.7 不感帯幅と平坦度

に示す。又、各作業終了後の地形あらさをまとめたものが図 4.3 6 ~ 4.3 7 である。これらの結果、今回の実験ではブレードCフレーム傾斜角不感帯幅 α の値にかかわらず、各条件共2回の作業でほぼ収束した。しかし、収束値は各実験ごとにランダムな値となった。今回行った実験のうち、最も仕上性が良い場合は $\pm 1.2\text{ cm}$ 程度の凹凸になった。

一方、ブルドーザの掘削押土作業中にかかる負荷制御（履帯スリップ制御）は良好に働き、一旦過負荷で履帯がスリップしても2~3秒後に、自動的にブレードを上げ前進した。²⁾ ブレード自動制御時におけるCフレーム傾斜角、制御前後の地形、ブルドーザ車速の時間経過ごとの値を示した一例を図 4.3 8 に示した。

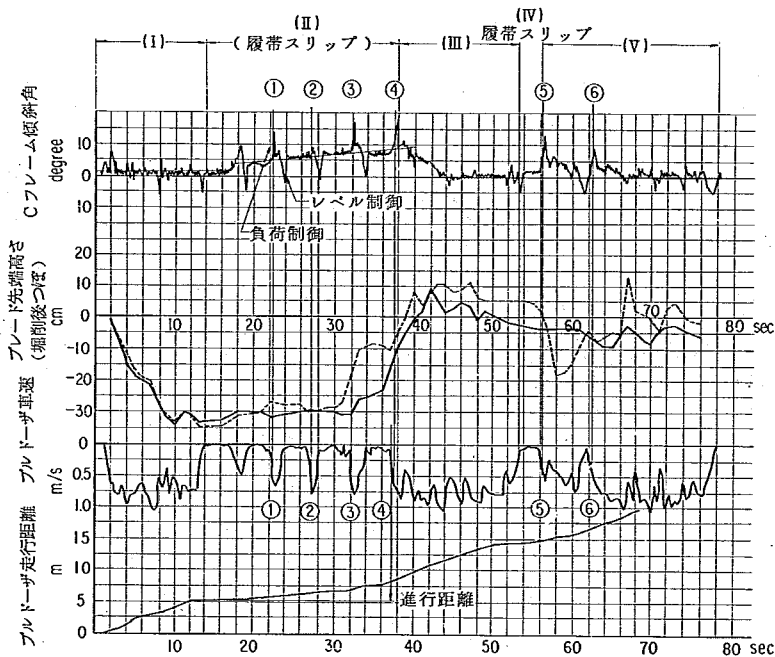


図-4.3 8 レベル&負荷制御実験結果

図 4.3 9 ~ 4.4 2 に示したように、手動にて掘削押土および埋戻し作業を行い、そのとき、Cフレーム傾斜角のパターンはどのようになるかを測定したが、そのパターンは単純であり、掘削作業では、前半においてCフレーム傾斜角は一定のくい込み量、後半は若干ブレードを上げきみで一定とするものである。プログラム制御による作業ではモデル掘削で得られたパターンを

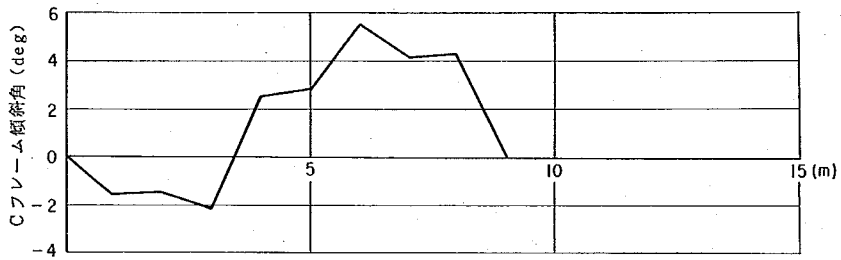
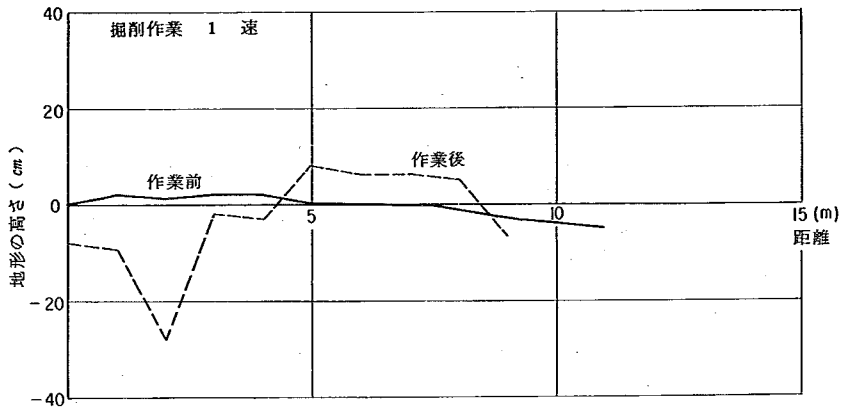


図-4.39 モデル掘削(1)

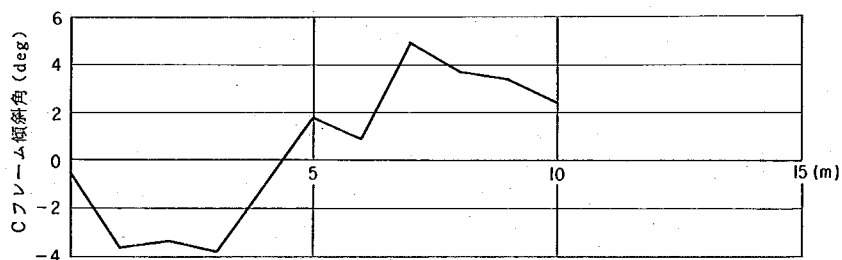
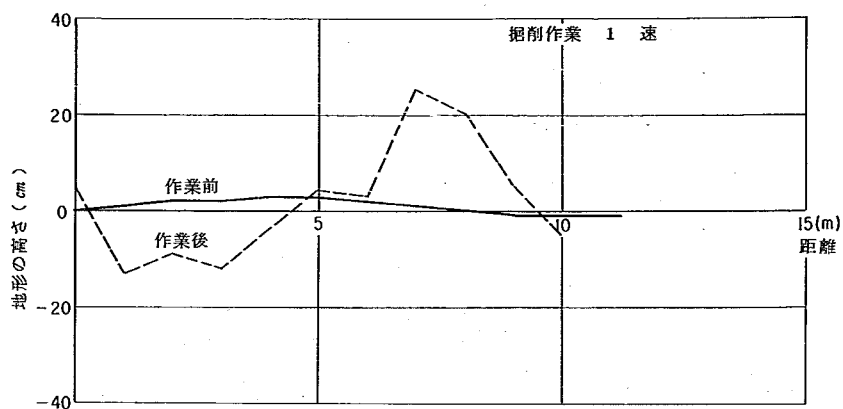


図-4.40 モデル掘削(2)

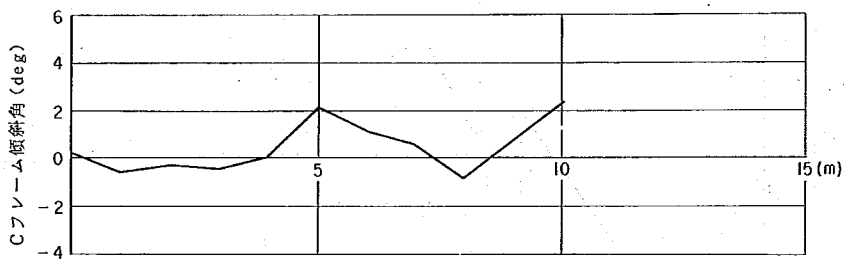
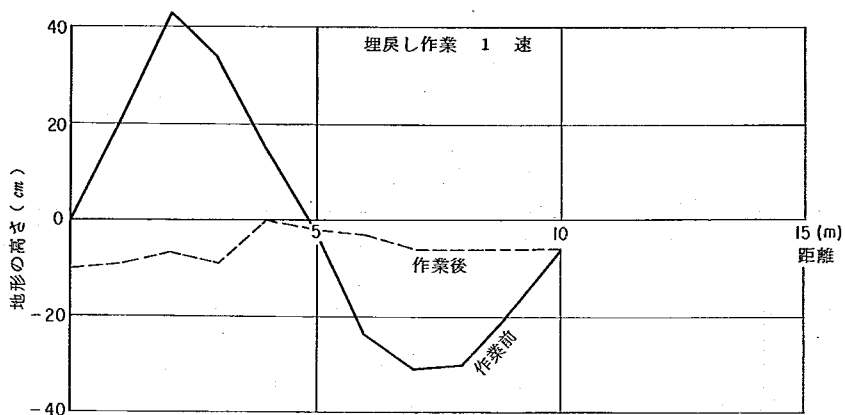


図-4.4 1 モデル掘削(3)

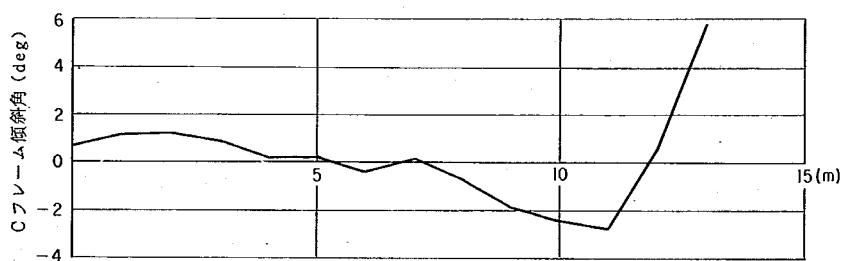
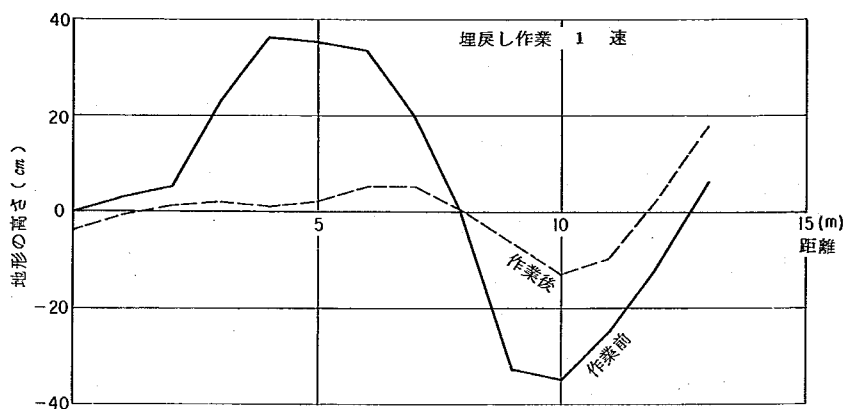


図-4.4.2 モデル掘削(4)

目標値として与えた。しかし、実験では、ブレードが目標パターンに追従しない場合が多く、必ずしも期待した成果を得ることができなかった。この原因は元地盤の激しい不陸により、外乱（本体傾斜角）が大きいためブレード制御が完全に追従できなかったためである。今回の掘削作業実験における最良のパターンは、図 4.4 6～4.4 7 であり、途中くい込み量を 0 とするような部分を設けると良好な結果が得た。埋戻し作業では凸部でブレードを少し上げるようなパターンを目標として与えたが、この結果、スリップ制御によるブレード操作は少なくなり、作業能率が若干向上した。また、仕上り性はレベル制御実験結果とほぼ同じであるが、凹部への埋戻しは多少よくなった。

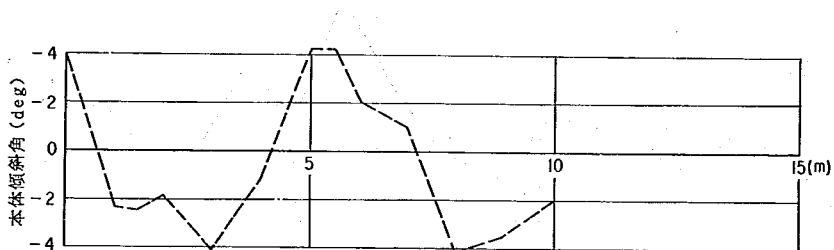
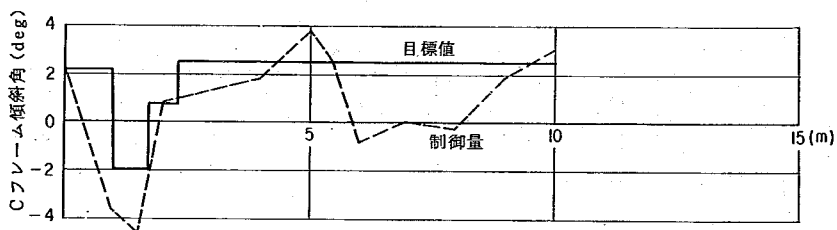
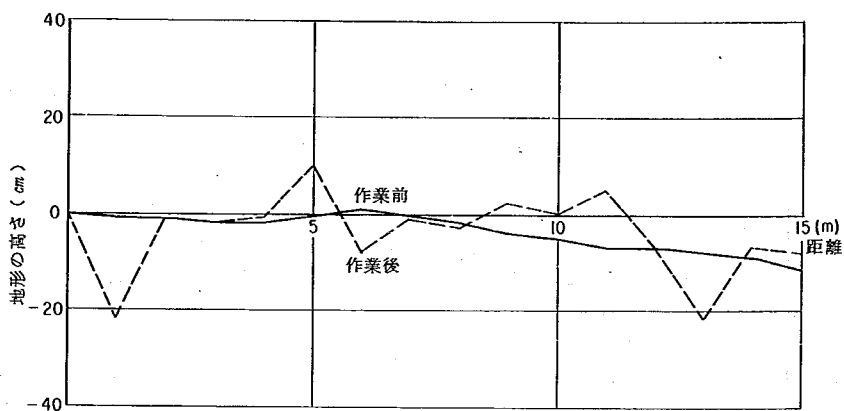


図- 4.4 3 プログラム制御 (掘削押土作業) 実験結果(1)

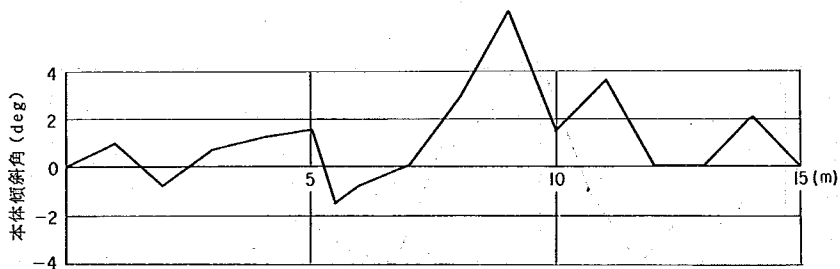
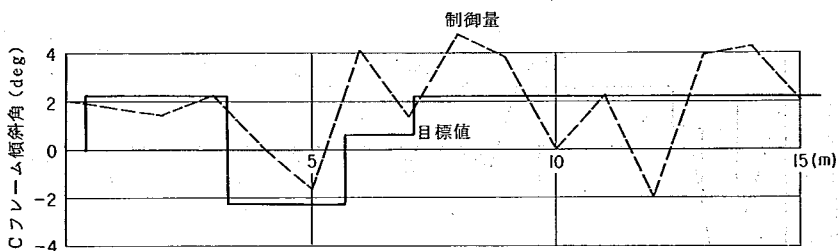
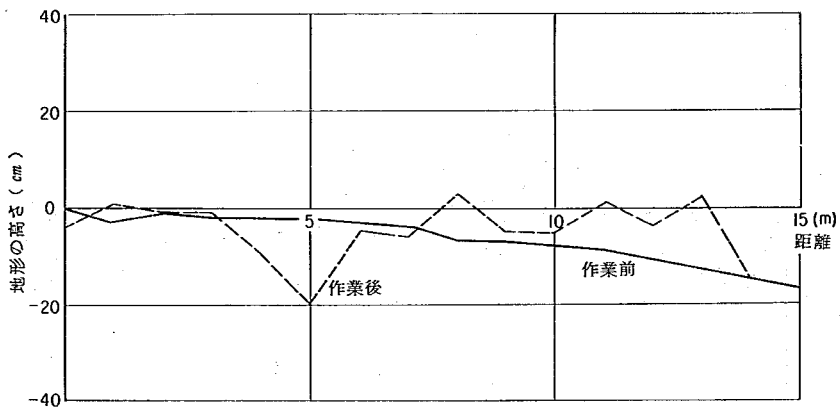


図-4.4.4 プログラム制御(掘削押土作業)実験結果(2)

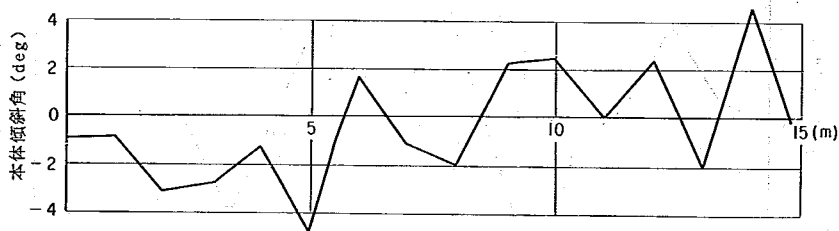
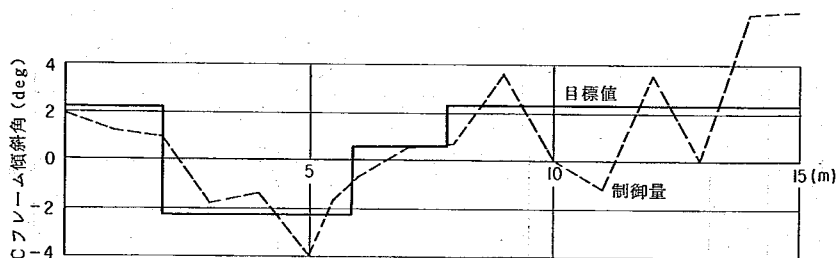
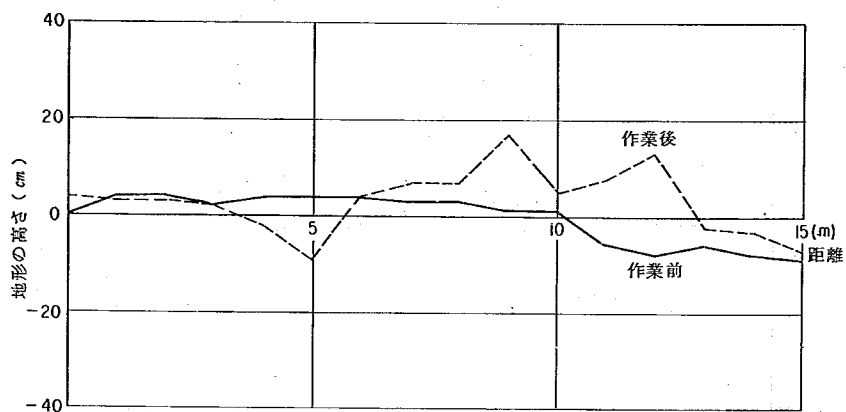


図-4.45 プログラム制御(掘削押土作業)実験結果(3)

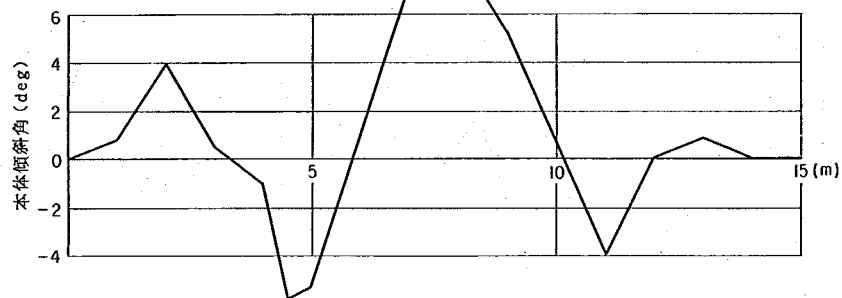
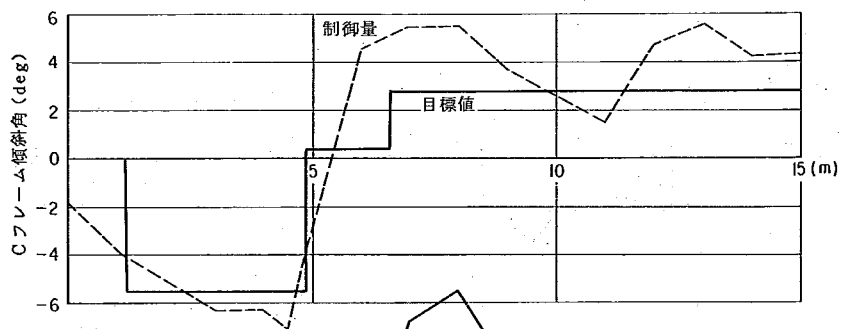
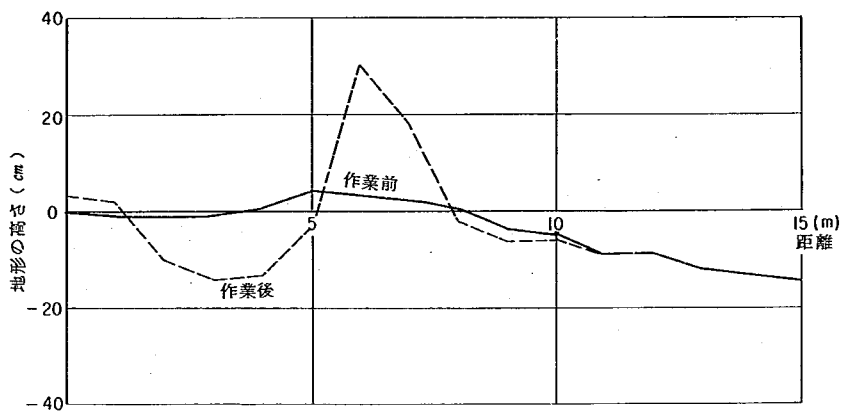


図-4.46 プログラム制御(掘削押土作業)実験結果(4)

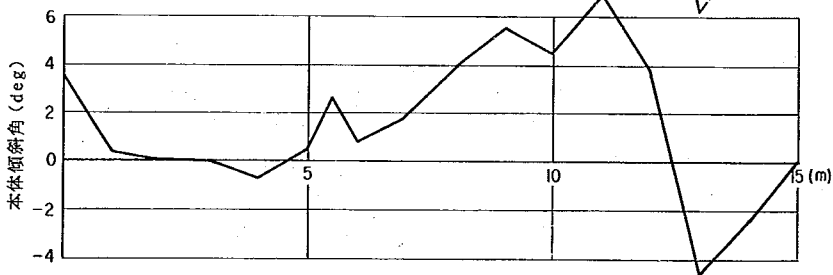
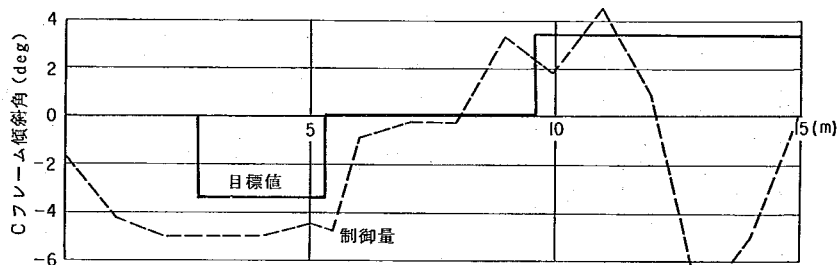
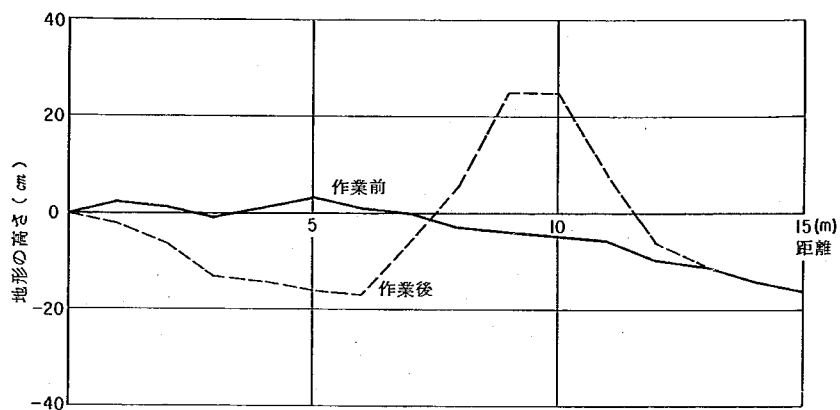


図-4.4.7 プログラム制御 (掘削押土作業) 実験結果(5)

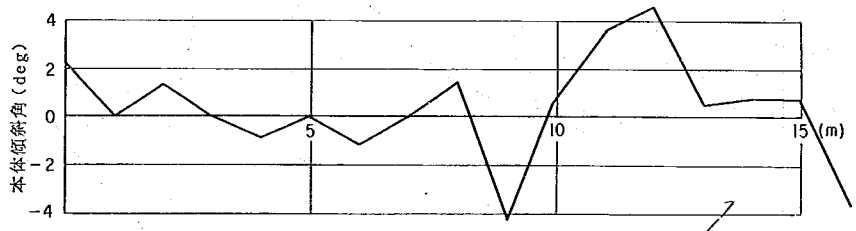
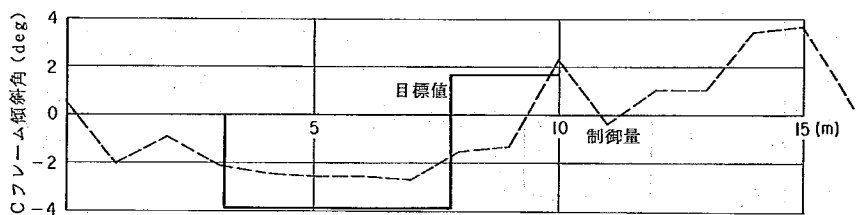
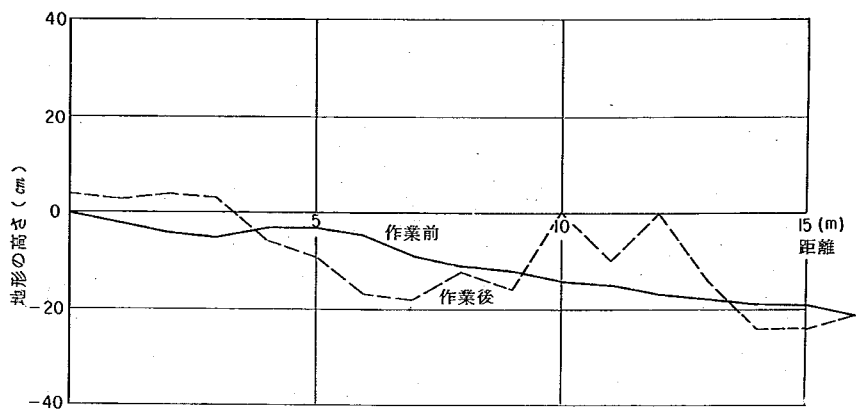


図-4.48 プログラム制御 (掘削押土作業) 実験結果(6)

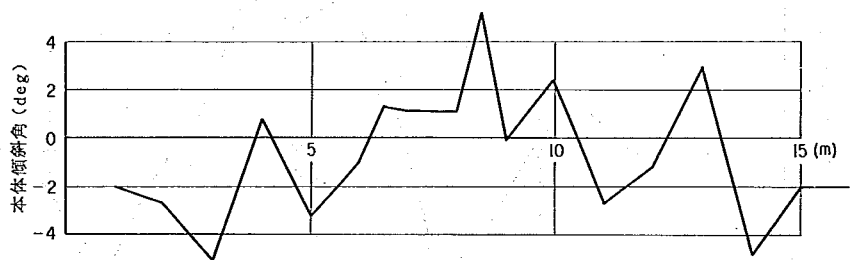
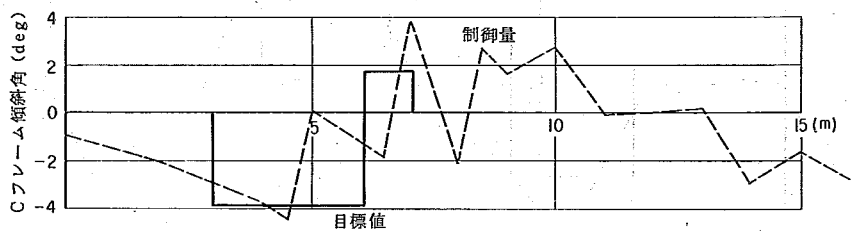
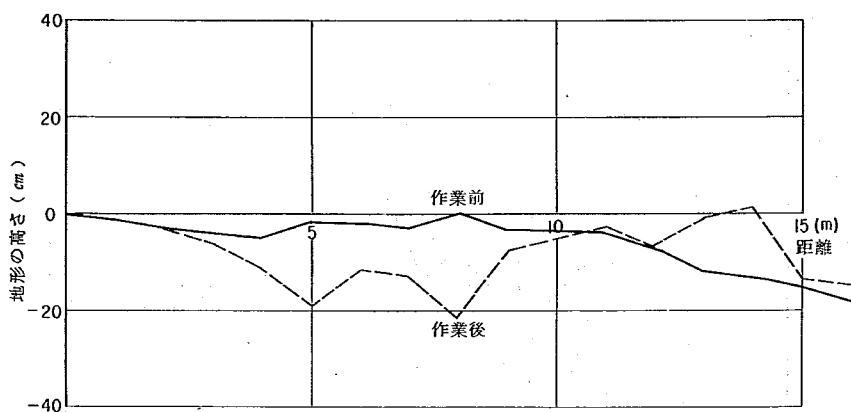


図-4.4.9 プログラム制御(掘削押土作業)実験結果(7)

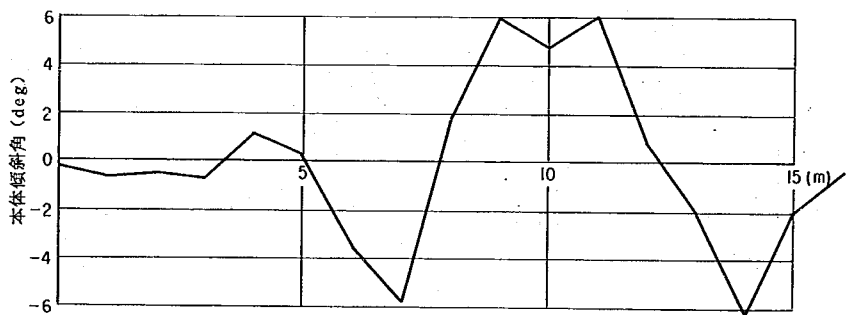
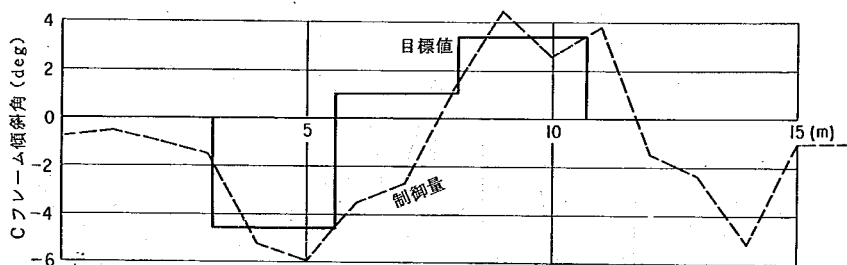
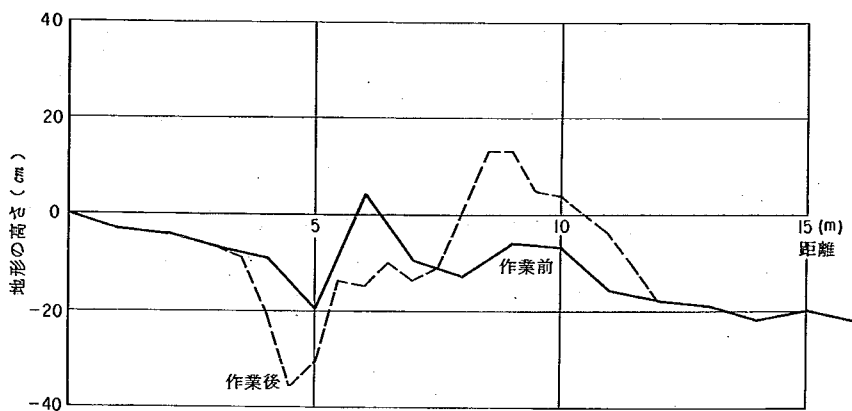


図-4.50 プログラム制御（掘削押土作業）実験結果(8)

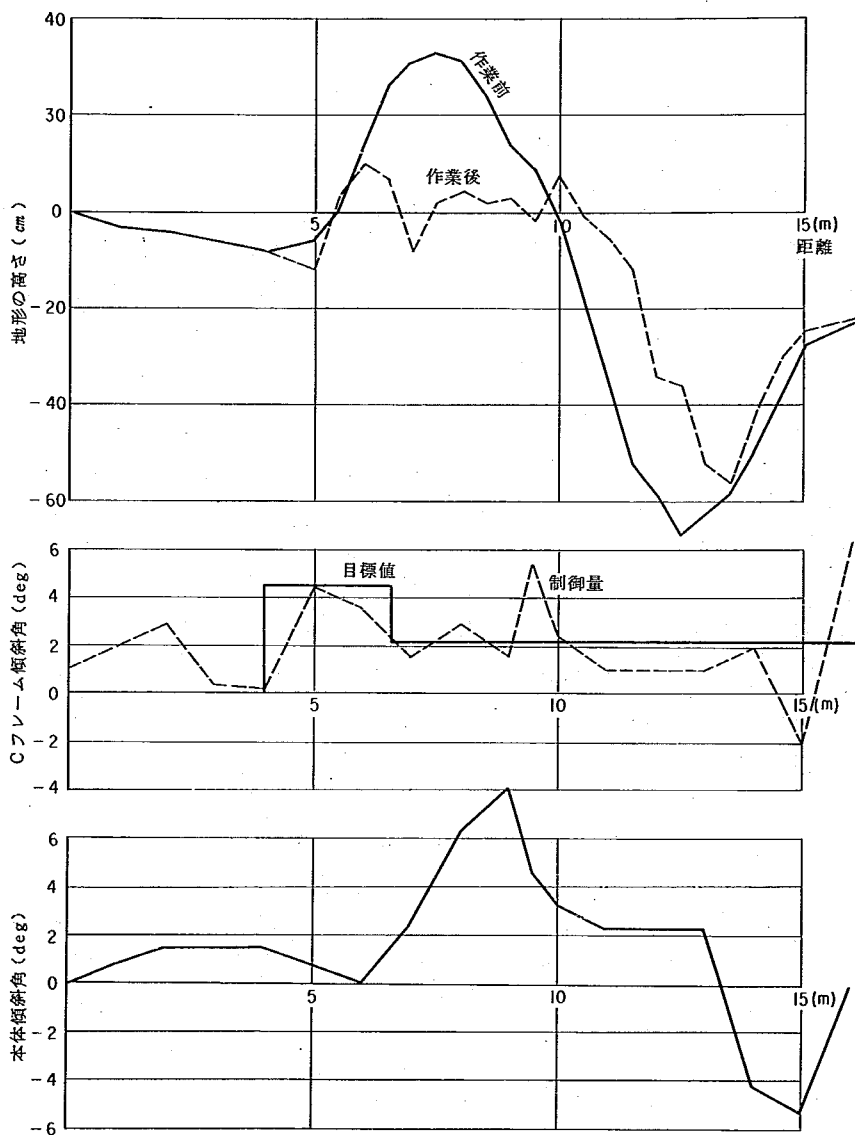


図-4.5 1 プログラム制御 (埋戻し作業) 実験結果(1)

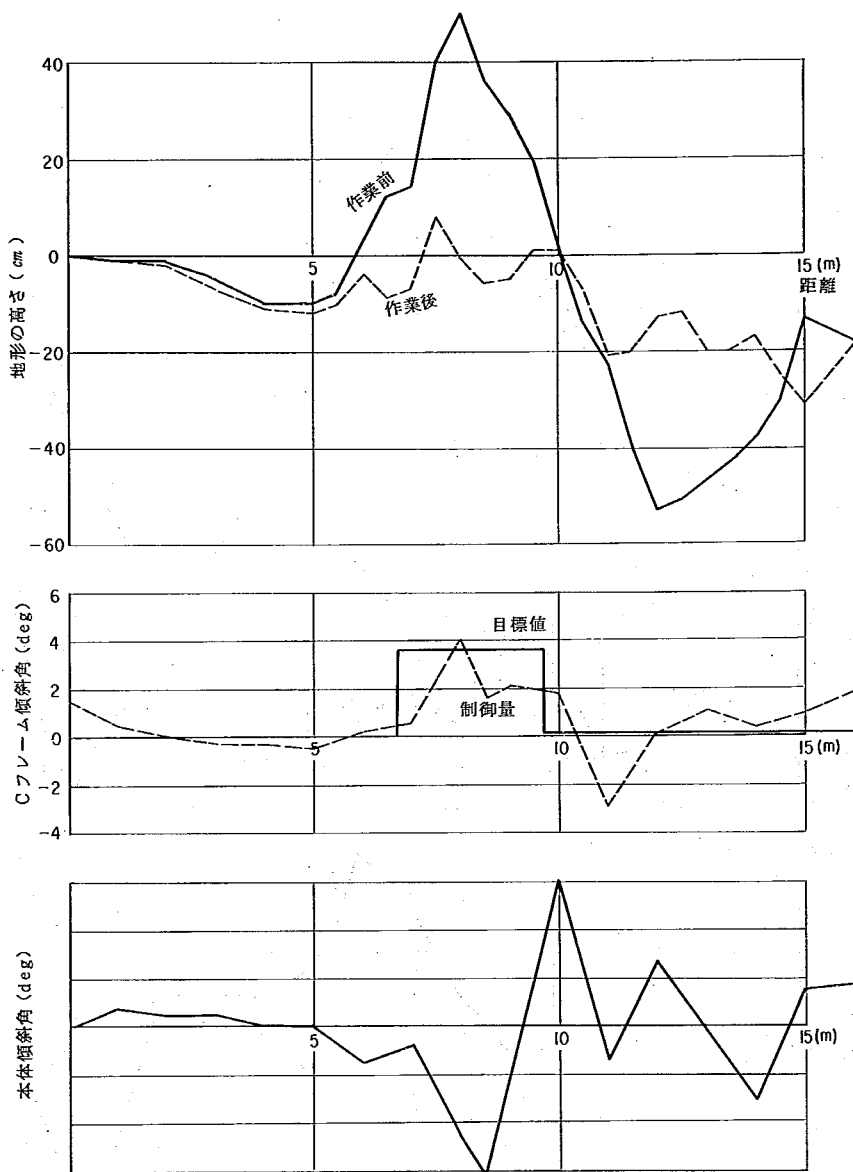


図-4.5.2 プログラム制御(埋戻し作業)実験結果(2)

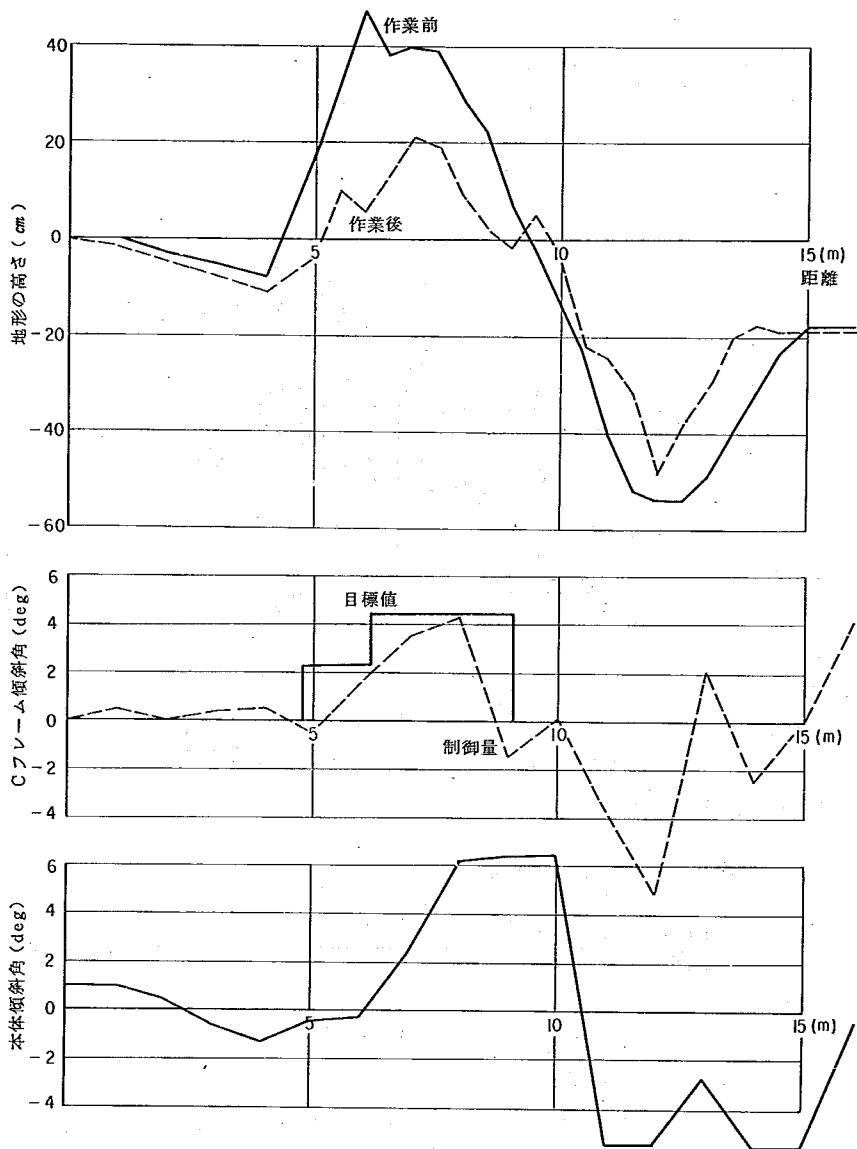


図-4.5.3 プログラム制御(埋戻し作業)実験結果(3)

4.3 操向制御のシミュレーション解析

操向制御については今後の実機（自動操向ブルドーザ）開発のための検討および基礎資料を得るためにアナログ計算機（シミュレーション）により解析を行った。装軌式トラクタの走行状態および各部の記号を図 4.5.4 のように定め、ブルドーザの走行運動基礎方程式を次のように求

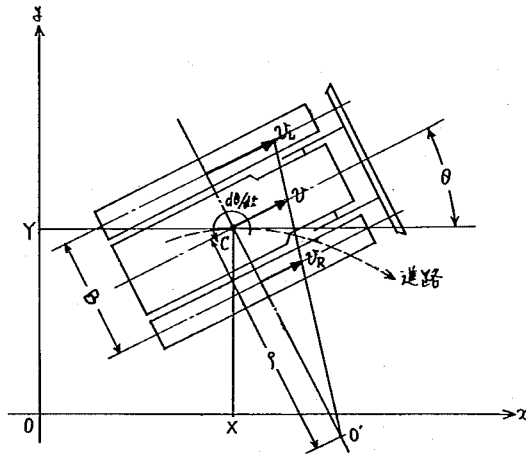


図-4.5.4 ブルドーザの操向

めた。

一般にブルドーザは極低速であるから、その運動は幾可学的に決まる。⁴⁾ 従って、瞬間回転半径 ρ は、図 4.5.4 より

$$\frac{v_R}{\rho - B/2} = \frac{v_L}{\rho + B/2} \quad (\text{右旋回時})$$

$$\rho = \frac{B(v_L + v_R)}{2(v_L - v_R)} = \frac{B \cdot v}{v_{def}} \quad (4.29)$$

ここに、

$$v_{def} = v_L - v_R \quad (4.30)$$

となる。また、トラクタの姿勢角の変化速度 $d\theta/dt$ は、

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v}{\rho} = \frac{v_{def}}{B} \quad (4.31)$$

となる。従って、平面位置 x, y は次式で与えられる。

$$x = \int v \cos \theta dt \quad (4.32)$$

$$y = \int v \sin \theta dt \dots\dots\dots (4.33)$$

(4.29)～(4.33)式が、ブルドーザの走行運動を与える式である。操向制御する場合、検出信号は、一般に x 、 y および θ である。また、操作量は、操向レバー、または、ペダルの操作により、増減される左右履帯速度 v_L 、 v_R である。従って、制御器の特性を表す式は、

$$\begin{aligned} v_L &= f_L(x, y, \theta) \\ v_R &= f_R(x, y, \theta) \end{aligned} \dots\dots\dots (4.34)$$

となる。いま、制御量として横方向の位置のみ考慮すると(操向制御では、コースからの横方向ずれについて修正する)、 x は無関係になる。しかし、 θ は、系を安定化するため省けない。いま、(4.34)式において、 v_L が増加(減少)すると、 v_R はそれに見合って減少(増加)するという関係を持たせると、車速 v は一定となり、操作量 v_{def} は、

$$v_{def} = v_L - v_R = f(y, \theta) \dots\dots\dots (4.35)$$

と、一つの式にまとめることができる。以上の結果より、操向制御系のブロック線図は、図4.55のようになる。実験(シミュレーション解析)では、(4.35)式の関数および係数をいろ

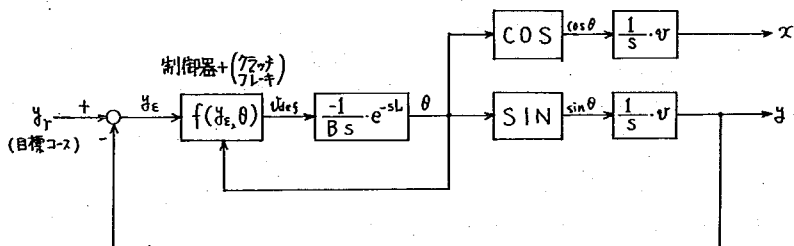


図-4.55 操向制御系のブロック線図

いろ変えた場合のトラクタの動向について解析した。

制御器(a)の場合、姿勢角制御の感度 K_1 / α_1 を大きくするに従って行き過ぎ量が少なくなり安定性はよくなるが、反対に整定距離が長くなり応答性は悪くなった。また、目標値変化量もしくは外乱の大きさがある程度大きくなるとブルドーザは逆の方向に走り、同じ箇所を旋回するようになってしまった。また、この制御器では常に α_1 / K_2 のオフセットがあった。このことから制御器(a)は、制御器として不完全であると思われる。図4.57～4.58は演算結果の1例を示したものである。

制御器(b)は横変位に対する制御関数に飽和関数を用い、姿勢角 θ を $-9.0^\circ \sim 9.0^\circ$ の範囲にあるようにしたもので、この場合、不感帯幅 α_1 (感度に相当)を種々変えても応答性、安定性は余

り変わらなかった。また、目標値変化量もしくは外乱が大きくなっても常に目標コースに収束した。この場合のオフセットは前記理由により、 α_1 を小さくした結果、図 4.5.9 に示されているとおり、非常に小さいものであることが分かった。

制御器(c)の場合、姿勢角 θ の検出が不要であるという利点はあるが全般的に制御器(a)、(b)に比べて整定距離が大きく、また、目標値変化量もしくは外乱がある程度大きくなると逆方向に走り、制御が乱れる傾向にあった。この場合も制御器(a)と同様、制御器として不完全であるように思われた。

従って、以上 3 種の制御関数

の中では、(b)が制御器として適しているように思う。しかし、この場合、検出信号として平面位置のほかに姿勢角 θ (たとえば、ジャイロコンパスにより) も検出しなければならない問題点はある。

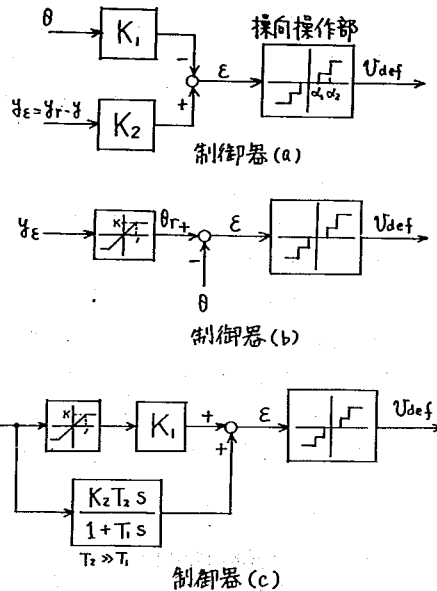


図- 4.5.6 制御器ブロック線図

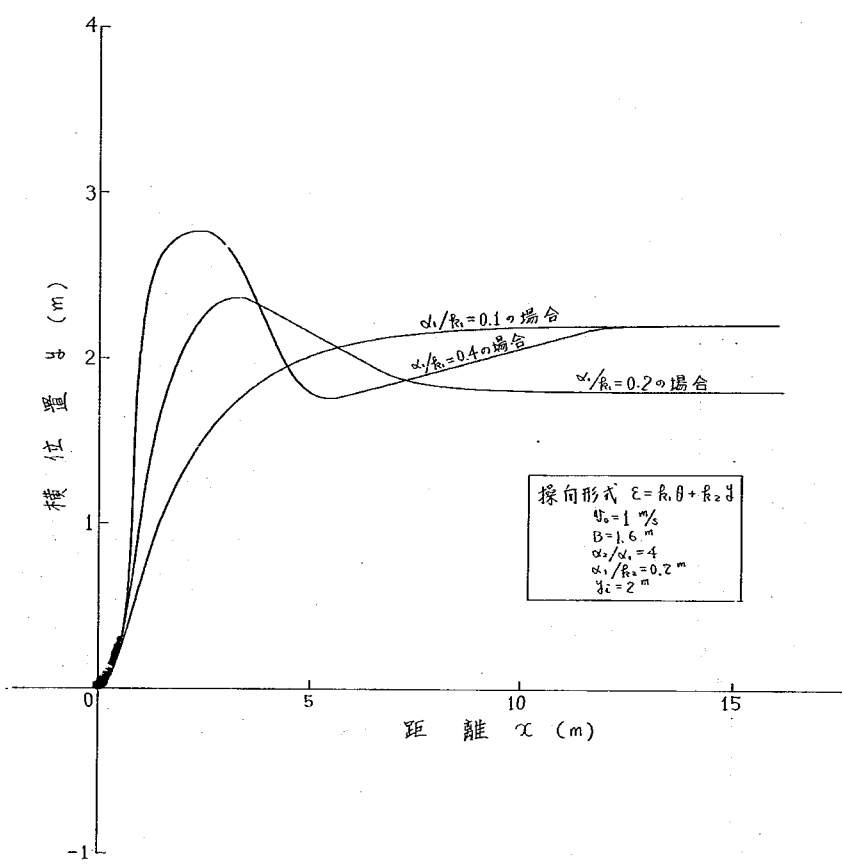


図- 4.5 7 操向制御演算結果(1)

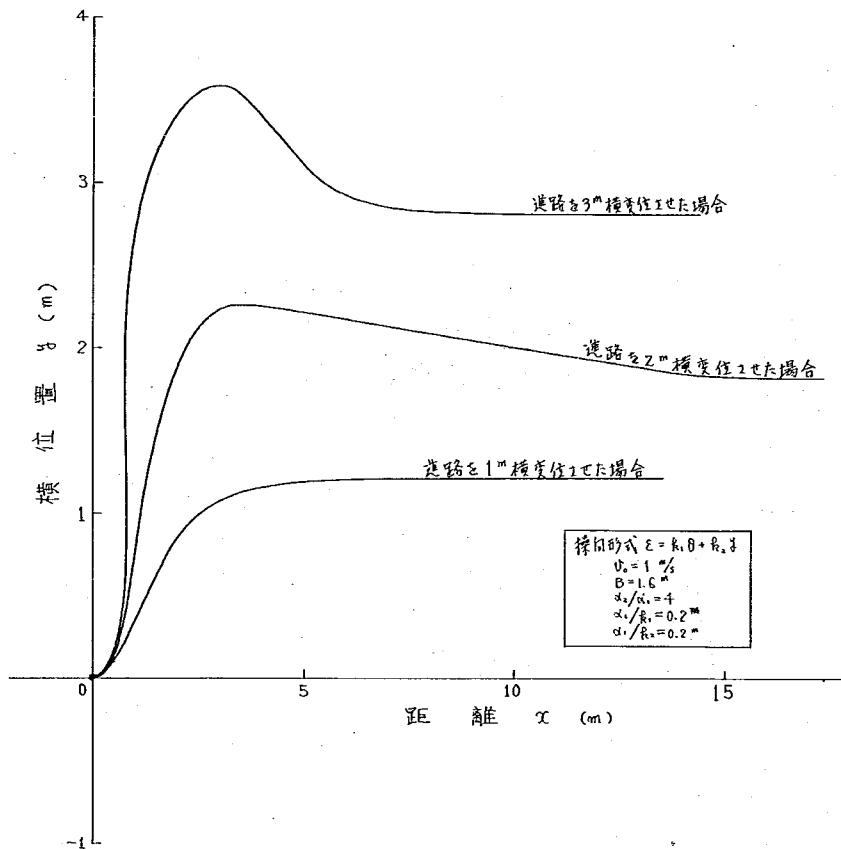


図-4.5.8 操向制御演算結果(2)

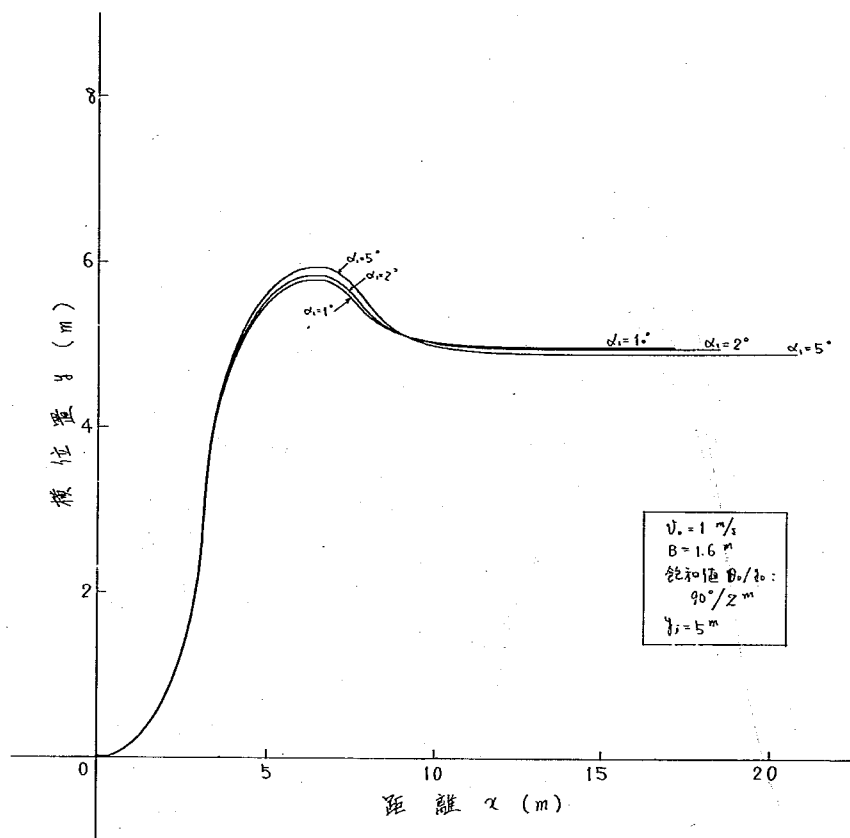


圖-4.5.9 操向制御演算結果(3)

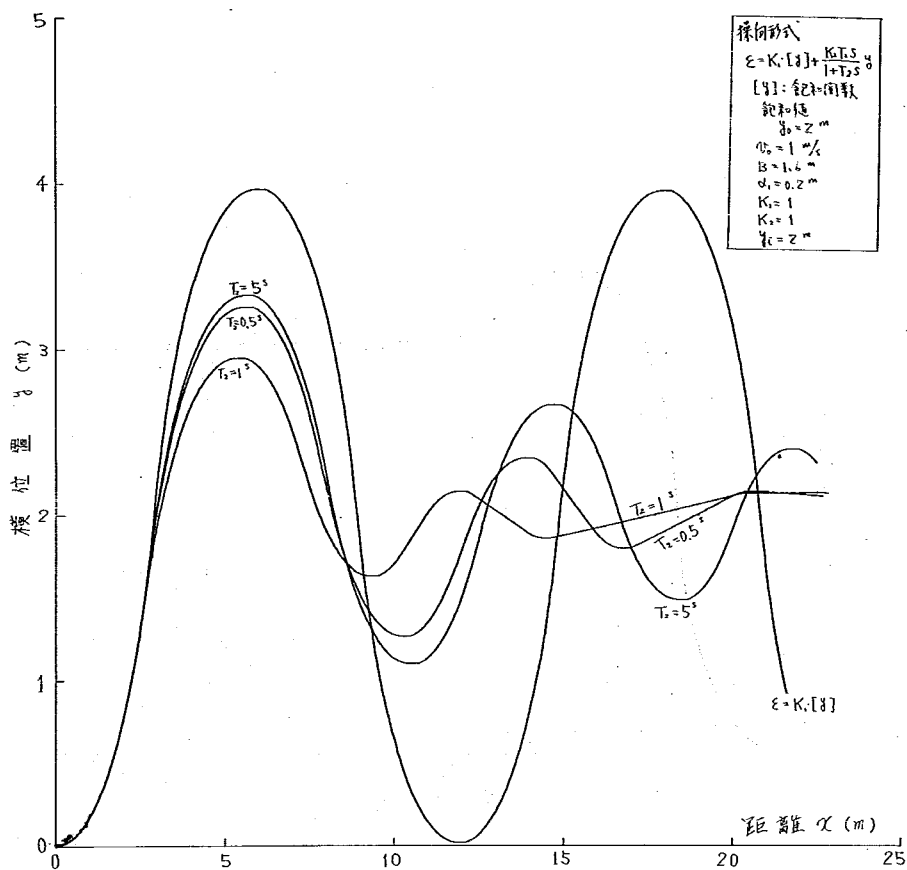


图-4.6.0 操向制御演算結果(4)

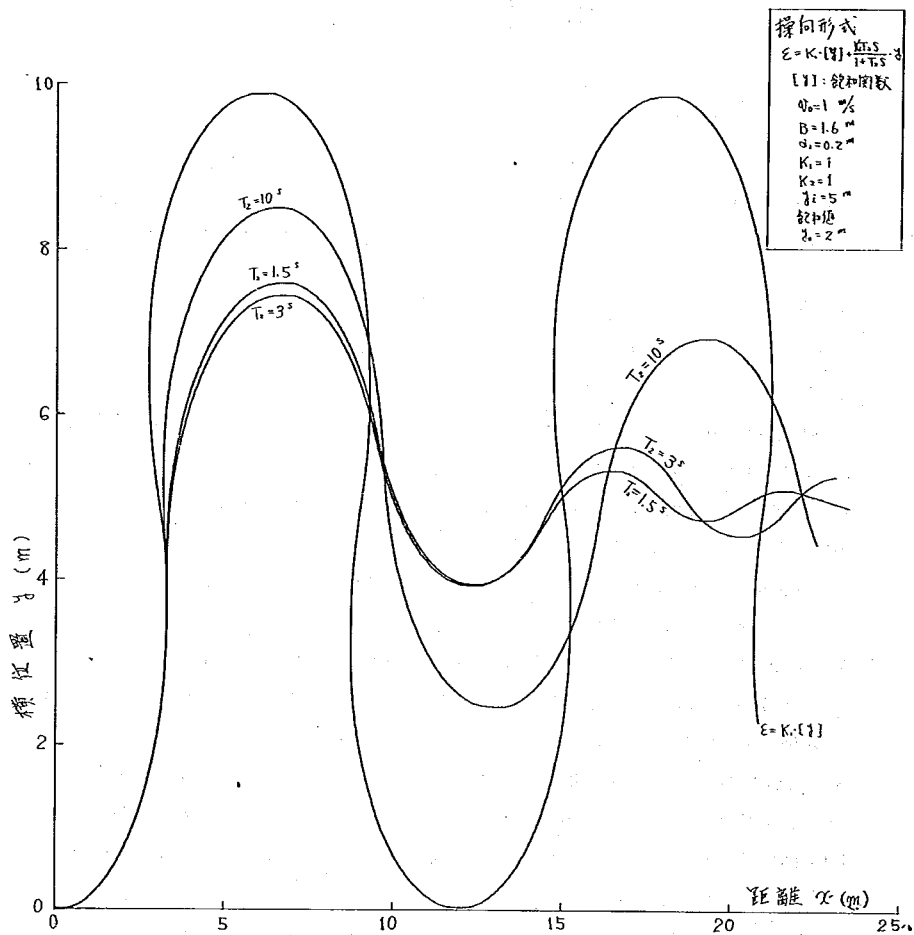


图-4.6.1 操向制御演算結果(5)

5. 結 論

以上の試験調査結果からブルドーザの自動化に関して次のことが解明された。

- (1) 理論的な方法（等価線形化法、位相面図解法）によって、ブレード制御系の特性を解析することが、比較的有効であることが判明した。
- (2) Cフレーム傾斜角検出器としては、価格上の問題があるとしても検出範囲の大きさ、外乱による影響の少なさ等の点からジャイロ式の傾斜角計が適当である。
- (3) ブレード制御器は、図 4.20 のような比例制御と急速制御（ON-OFF 動作）とを組み合わせたもの、および 5 値動作による制御の 2 種類を用いたが、制御性としては両者とも全く差異がなかった。
- (4) 凹凸が $\pm 50\text{ cm}$ 程度の地形を平坦にするという作業の場合、Cフレーム傾斜角検出にレベル制御方式でも比較の実用性があることが判明した。
- (5) 敷均し作業（平坦化）の場合、 $\pm 50\text{ cm}$ 程度の凹凸の地形では、2～3 回目の作業で $\pm 10\text{ cm}$ 程度に収束することがわかった。
- (6) 履帯スリップを検出し、ブレードを一時、上昇させ負荷を軽減させるという負荷制御方式の有効性が今回の実験で確認された。
- (7) 今回、試作した平面位置検出装置では回路の時間遅れや演算器の精度の低さから良好な結果が得られなかったが、超音波方式による平面位置検出は原理的には陸上に於いても $100\sim 200\text{ m}$ の範囲ならば可能であることが、今回の実験で確認された。
- (8) 操向系の自動化に関しては実機による実験は行わなかったが、シミュレーション実験により平面位置の検出、トラクタの姿勢角を高精度で検出できるセンサーさえ開発されれば比較的容易に制御できることが判明した。また、このときの制御器は図 4.56 の(b)のようなものとすれば良好であることが判明した。

最後に本研究の実施にあたり、先輩諸氏、メーカより多大なる御指導、御意見をうけたまわり、ここに感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 田中, 岡崎, 小室「建設機械の自動化に関する調査試験(第1報)」土木研究所資料第870号(48年7月)
- 2) 田中, 岡崎, 小室「建設機械の自動化に関する調査試験(第2報)」土木研究所資料第962号(49年9月)
- 3) 磯部孝他「自動制御理論」共立出版株式会社
- 4) 守田友義他「ブルドーザ」産業図書
- 5) 東京電機大学「自動制御の基礎」
- 6) 高井宏幸他「自動制御の基礎と応用」実教出版株式会社
- 7) D. P. Eckman, 萩原進他訳「プロセスの自動制御」株式会社近代科学社

建設機械の自動化に関する調査試験(第3報)
—ブルドーザブレード操作の自動化, 位置
検出装置の開発—

土木研究所資料第1062号
昭和50年9月(1975年)

建設省土木研究所機械研究室
本田宜史, 岡崎治義, 小室日出男

キーワード 建設機械, ブルドーザ, 自動制御

要旨 ブルドーザの自動化を目標に実機による位置検出装置の調査試験およびブレードのプログラム制御実験を行ったところ下記のことが解明された。

1. 超音波方式による位置検出の実用化の目途がついた。
2. プログラム制御により, 能率的かつ応用面の広いブレード制御が可能になった。



郵便はがき

2 8 0 - □ □

千葉県千葉市穴川

四丁目十二番五二号

建設省土木研究所

機械研究室 御中

十円切手
をはって
下さい

No.167

配布先氏名

配布先住所

No.197

土木研究所資料第1062号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印