



土木研究所資料

第962号

建設機械の自動化に関する調査試験（第2報）
—ブルドーザブレード操作の自動化—

昭和49年9月

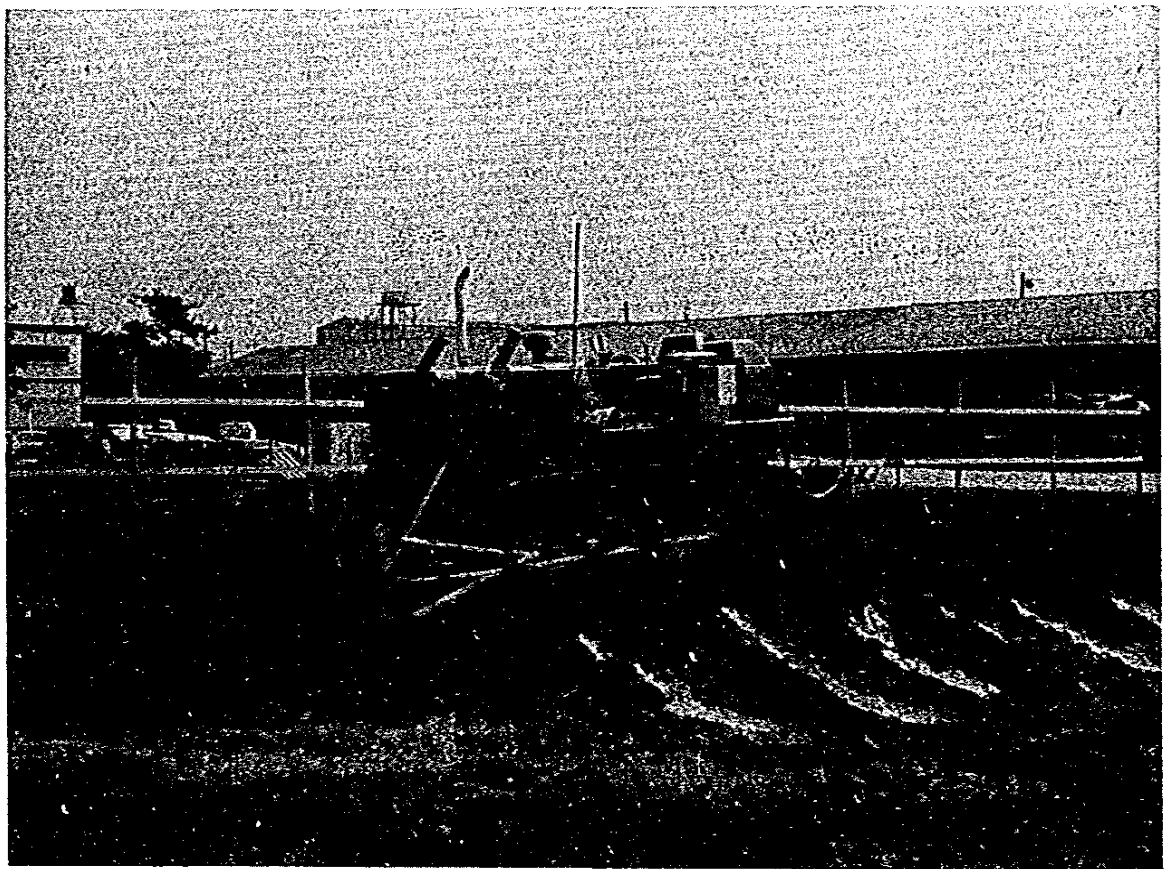
建設省土木研究所

要 旨

建設機械の自動化の一環として、ブルドーザブレード操作の自動化を目標に、実機ブルドーザに自動ブレードレベル制御及びスリップを検出する負荷制御装置を装着し、制御性の実験を行なった。この結果制御系は正常に働き、目標レベルに収束する傾向が認められた。また、制御方法としては、①ON, OFFの急速制御がよいこと。②ブレード動作設定角は 2° 程度が適切であること。③負荷制御においては、履帯スリップを検出してブレードを動作させるまでのホールド時間は2秒程度が良いことが分った。

一方、ブレード自動制御を行なうための適正な設計値を見出すために、ブレードレベル制御の理論計算を行なった。

この報告は主に昭和48年度に実施したブレード操作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2報)

ブルドーザブレード操作の自動化—

建設省土木研究所機械研究室

田 中 康 之

岡 崎 治 義

小 室 日出男

目 次

1	まえがき	1
2	調査目的と内容	2
3	ブレード操作の自動化に関する研究の動向	3
3.1	ブレード自動制御装置	3
3.2	レベリングメータ自動整地仕上装置	4
4	ブレード制御の理論解析	5
4.1	ブロック線図	5
4.2	レベル制御系	6
4.3	負荷制御系	11
5	傾斜角検出器の改良	12
6	負荷制御	16
6.1	ブルドーザの負荷及び負荷制御システム	16
6.2	負荷制御システムを導入したブロック線図	18
7	現地実験方法	20
7.1	試験機仕様	20
7.2	測定対象及び測定装置	21
7.3	実験場	24
7.4	土質条件	24
7.5	実験手順	25
8	現地実験結果	27
8.1	レベル制御実験結果	27
8.2	負荷制御実験結果	31
9	ブルドーザブレード自動制御の実用性及び今後の問題点	44
10	結 論	47
11	あとがき	47

1. ま え が き

建設工事量の増加に対して、工事の機械化、機械の大型化、高能率化を図ることにより、建設労務者不足の対策が行なわれてきたが、今後の工事量の増加、工事の安全化、省力化に対応するには、第一に最適化施工システムを確立すること、第二に施工の無人化が有力な手段として考えられてきている。無人化に至らないまでも、部分的な自動化で間接的なオペレータ不足の対策として役立ちうるものと考えられる。

機械研究室では、こうした見地から昭和45年度以来、主として文献調査や、模型実験を建設機械の操作性を取扱うテーマの中で実施してきた。昭和47年度からは、建設機械開発調査費を用いて本格的に取り組み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操作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なった。

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かなり地形は平坦化することが判明したが、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わかった。このため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出した。

本年度は、先年度に引き続き、ブレード操作の自動制御を図ることを目標に、ブレードのレベル制御の他、負荷制御として履帯スリップ制御に関する自動制御装置の開発を行ない制御性の実験を行なうとともにブレードのレベル最適制御方法及び条件を理論的に裏づけることも実施した。

2. 調査目的と内容

建設工事の省力化、建設機械の性能向上化としての建設機械の各種操作の自動化に関する試験調査の一環として、ブルドーザのブレード操作の自動化を図るために、ブレードのレベル制御、負荷制御（履帯のスリップ制御等）に関する自動制御機構の開発を行なうとともに、これらの機構を装着した試験機による制御性の実験を行なうことにより、その実用性等の見通しについて、検討することを目的とする。また具体的な実施項目は次のとおりである。

- (1) 建設機械の自動化に関連した文献、論文を調査し、検討する。
- (2) ブレードのレベル最適制御方法及び条件を理論的に究明する。
- (3) ブレードの負荷制御システムについて考察する。
- (4) 昭和47年度開発したブレードのレベル制御と(3)のシステムに基づく負荷制御装置を総合したブレード制御装置を試作開発する。
- (5) 上記ブレード制御装置を実機ブルドーザに取りつけ、土木研究所構内テストコースで制御性の試験を行ない検討する。
- (6) 上記の結果から実用性への見通しを立てる。

3. ブレード操作の自動化に関する研究の動向

ブルドーザブレード昇降自動制御装置は、各所で研究されているものと考えられるが、ここでは、日立製作所、日特金属工業の自動化例について、調査した結果を示す。

3.1 ブレード自動制御装置（日立製作所）²⁾

この装置は、日立製作所が開発したもので、ブレードによる土掘削面を基準面どおり追従させる自動制御装置であり、図3-1にその原理図（ブロック線図）、及び油圧回路を示す。この制御系は、ブレードを駆動する油圧シリンダ、電磁弁、ブレード高さ検出器、高さ設定要素比較器並びに電磁弁駆動回路から構成されている。本装置は、制御系の速応性を高めるために5値動作形のオンオフ制御系を採用し、その真理表を表-1に示す。

この装置による土掘削試験結果、初期盛土が17.5 cmの場合は、車速4km/hで±2.5 cm～±3.5 cmの凹凸に、車速6km/hで±3.5 cm～±4.5 cm程度の精度で掘削可能との報告がされている。又この装置の問題点としては、下記の事項が考えられる。

- (1) 実際の工事現場での掘削に際しては、ここで考えている基準面がとりにくい。
- (2) 初期盛土が17.5 cm以上、特にブレードにかかる負荷が過負荷であり、履帯スリップないしは、エンジンストップの発生時の検討がされていない。

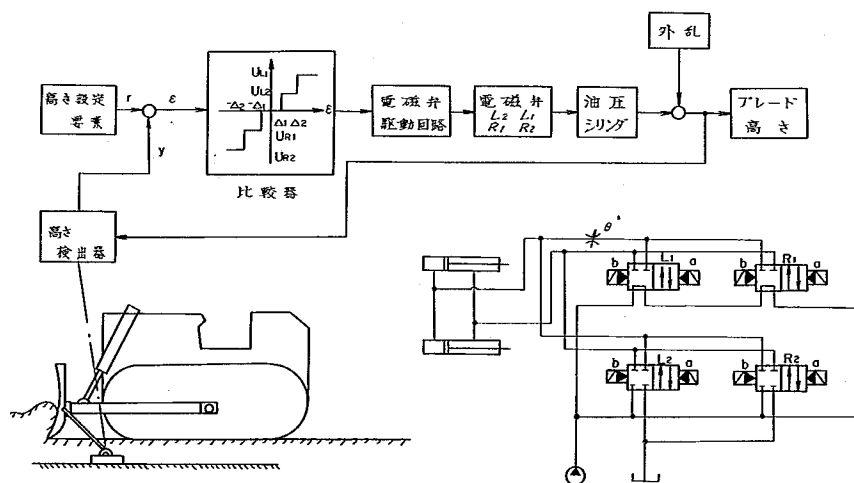


図3-1 自動ブルドーザ（日立製）

表-1 自動ブルドーザ真理表

動作信号	U_{L1}	U_{L2}	—	U_{R1}	U_{R2}
ϵ	$\epsilon \leq -d_2$	$-d_2 < \epsilon < -d_1$	$-d_1 < \epsilon < d_1$	$d_1 < \epsilon < d_2$	$d_2 \leq \epsilon$
電磁弁 L_2	0	1	1	1	1
“ L_1	0	0	1	1	1
“ R_1	1	1	1	0	0
“ R_2	1	1	1	1	0
動作の形	5 値	3 値 動作			5 値

0 : S_0L a 励磁

1 : S_0L b 励磁

3.2 レベリングメータ自動整地仕上装置（日特金属製）³⁾

この仕上装置(図2-3)は主として圃場整備の仕上に適用したもので、延長100mについて±5cm(0.05%)の精度である。このレベリングメータは、投光装置、受光装置、増幅器、油圧装置からなり、投光装置を地上に固定するほかはすべてブレードに搭載されている。

投光器から基準面に平行でかつ光束の極めて小さい光線を投射し、これを回転させ光線の描く軌跡すなわち、平行な光の平面を作る。この光束を排土板上の受光盤に取り付けた5個の光電管の内、中心の光電管③が浦えたとき排土板エッジは計画基準面上にあり、作業中ブルドーザのビッチングにより①、②の光電管が光束をとらえた場合は、排土板エッジは基準面より下り、④、⑤がとらえた場合は上る機構になっている。この装置の問題点としては3.1と同様、負荷制御がされていないこと、制御範囲が①、⑤の間に限られているため不陸の大きい地形は使用できないことがあげられる。

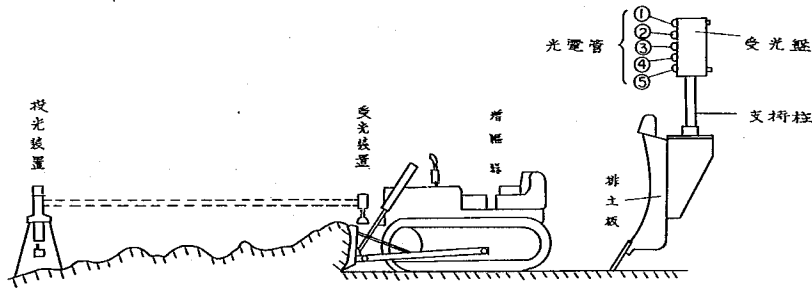


図3-2 レベリングメータ自動整地仕上装置（日特製）

4. ブレード制御の理論解析

4.1 ブロック線図

自動制御（レベル制御）装置を備えたブルドーザの概要を図4-1に示す。

図4-1の装置はブレードを目標の高さに制御するためにCフレーム傾斜角を一定にしておくという近似的方法をとっている。

従って、目標値はCフレーム傾斜角の値となる。

いま制御系を方程式で示すと以下のようになる。

$$\theta_e = \theta_r - \theta_o \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

$$e = K_p \cdot \theta_e \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$q = q_2(e) \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

$$\frac{dl}{dt} = A \cdot q \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

図4-2より

$$l_o^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos \theta_o$$

上式を θ_o で微分すると

$$d\theta_o = \frac{l_o}{l_1 l_2 \sin \theta_o} \cdot dl_o$$

ここで $d\theta_o$ 、 dl_o を改めて θ 、 l とおくと

$$\theta = \frac{l_o}{l_1 l_2 \sin \theta} \times l \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

$$\theta_o = \theta + \theta_u \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

ここに、 θ_e ：偏差（指示値で表している）

θ_r ：目標値

θ_o ：制御量（Cフレーム傾斜角）

e ：増幅器出力電圧

q_2 ：操作バルブの入出力関数

（図4-3参照）

q ：操作入力（流量）

l ：操作出力（シリンダ伸縮量）

θ ：ブレード制御量

θ_u ：ブルドーザ本体傾斜角

（前下りを正とする）

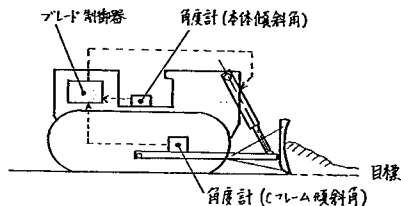


図4-1 実機試験機

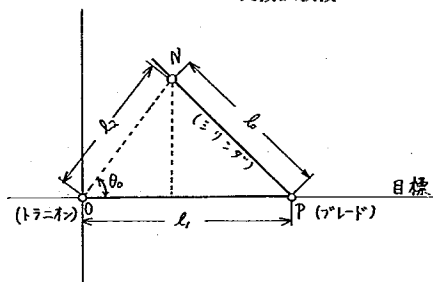


図4-2 ブレード上下機構

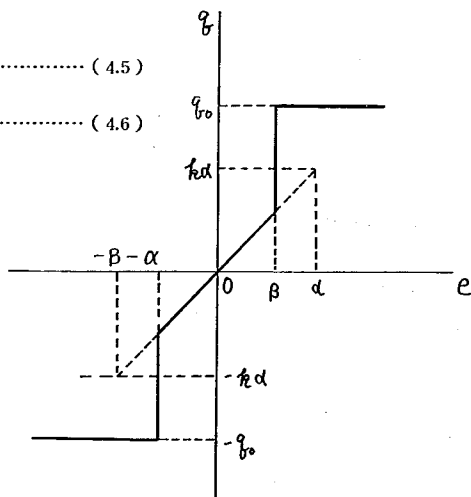


図4-3 電磁弁入出力関係

K_p, A, l_1, l_2 : 定数

θ_0 : 平衡状態における $\angle PON$

上式において θ_e, θ_u は角度計を用いて検出するが、その伝達関数は 1 と仮定している。また (4.3)

(4.5) 式は非線形であるが、解析を容易にするため次のように線形近似する。

$$q = K_p \cdot e \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

ここに、 K_p は周波数応答の場合、等価線形化法⁽⁴⁾により、等価ゲインとして、次式で与えられる。

$\alpha \geq \beta$ のとき、 e_i を入力振幅とすると

(i) $e_i \leq \beta$ のとき、 $K_p = k$

(ii) $e_i > \beta$ のとき $K_p = \frac{2k}{\pi} \left\{ \sin^{-1} \frac{\beta}{e_i} + \frac{\beta}{e_i} \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{e_i} \right)^2} \right\} + \frac{4(q_0 - k\beta)}{\pi e_i} \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{e_i} \right)^2}$

$\alpha < \beta$ のとき

(iii) $e_i \leq \beta$ のとき $K_p = k$

(iv) $\alpha < e_i \leq \beta$ のとき $K_p = \frac{2k}{\pi} \left\{ \sin^{-1} \frac{\alpha}{e_i} + \frac{\alpha}{e_i} \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{e_i} \right)^2} \right\}$

(v) $e_i > \beta$ のとき $K_p = \frac{2k}{\pi} \left\{ \sin^{-1} \frac{\alpha}{e_i} + \frac{\alpha}{e_i} \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{e_i} \right)^2} \right\} + \frac{4(q_0 - k\alpha)}{\pi e_i} \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{e_i} \right)^2}$

上式において、 α, k は定数として与えられる。

また (4.5) 式は θ の動きが微小であるとき $l_0 / l_1 l_2 \sin \theta$ を近似的に定数とみなすことができる。従ってそれを B とおくと

$$\theta = B \cdot l \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

となる。これより、系は線形系として表わされる。

4.2 レベル制御系

図 4-4 にブロック線図を示す。

いま、非線形コントローラの関数 $Q(\theta_e)$ を次のようにした場合、

$$Q(\theta_e) \begin{cases} \theta_e \geq \pm \alpha : \pm q_0 \\ |\theta_e| \leq \alpha : K_f \cdot \theta_e \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

その応答を求めてみると、図 4-4 の系の制御方程式は次のようになる。ただし、 $\theta_r = u_0 \cdot u(t)$, $\theta_u = 0$ とする。

$$T\ddot{\theta}_e + Q\{\theta_e(t-L)\} = 0, \quad t > 0 \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

従って (4.9) より

$$T\ddot{\theta}_e \pm q_0 = 0, \quad \theta_e \geq \pm \alpha \quad \dots\dots\dots (4.11) \quad (4.12)$$

$$T\ddot{\theta}_e + K_f \cdot \theta_e = 0, \quad |\theta_e| < \alpha \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

(4.11) (4.12) (4.13) を用いて、図 4-4 の系の位相面を描くと、図 4-5 のようになる。

図 4-5 を用いてインディシャル応答曲線を求めると図 4-6 或いは図 4-7 のようになる。

図 4-7 より q_0 / α を大きくし過ぎると、系はハンチングを起してしまう。この限界値を求め

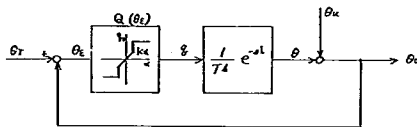


図 4-4 レベル制御系ブロック線図

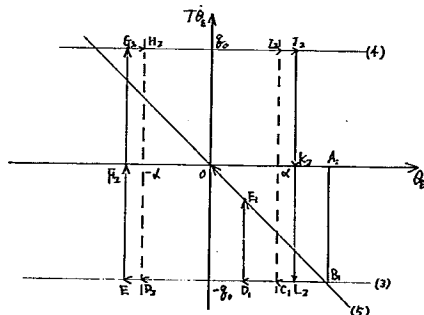


図 4-5 位相面

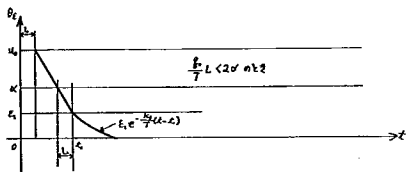


図 4-6 インディシャル応答

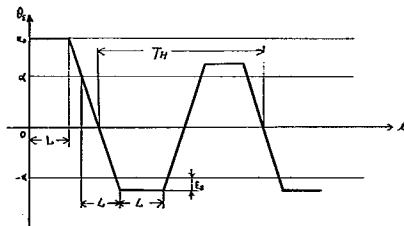


図 4-7 ハンティング周期

てみると、次のようになる。

$$\frac{q_o}{\alpha} = \frac{2T}{L} \dots\dots\dots (4.14)$$

また、図 4-7 のハンティング周期を求めてみると $T_H = 6L - \frac{4T\alpha}{q_o}$ (4.15)
となる。図 4-6 より、最適な q_o/α の値は、次のように与えられる。

$$q_o/\alpha = T/L \dots\dots\dots (4.16)$$

しかし、(4.16) 式は、急速制御に対して、与えられるもので、微小偏差時には、 $F. C. V$ 制御器による比例制御と考えられるので、そのゲインは別の方法で考えなければならない。しかし系としては制御対象が積分要素であるため、安定な系であることは明らかである。

さて、図 4-4 の系の周波数応答を求めてみる。非線形系においても、等価線形化法により、線形系と同様に扱える。すなわち、(4.9) 式で表される非線形要素の等価ゲイン K_s (位相差はない) は、

$$\theta_e \leq \alpha \text{ のとき, } K_s = K_f \dots\dots\dots (4.17)$$

$$\theta_e > \alpha \text{ のとき, } K_s = \frac{2K_f}{\pi} \left\{ \sin^{-1} \frac{\alpha}{\theta_e} + \frac{\alpha}{\theta_e} \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\theta_e} \right)^2} \right\} + \frac{4(q_o - K_f \alpha)}{\pi \theta_e} \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\theta_e} \right)^2}$$

$$= \frac{2}{\pi} \left\{ K_f \cdot \sin^{-1} \frac{\alpha}{\theta_c} + (2q_0 - K_f \cdot \alpha) \frac{1}{\theta_c} \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\theta_c} \right)^2} \right\} \dots (4.18)$$

となり、比例要素として扱われる。ただし、入力振幅の大きさによって、そのゲインが変わるところが線形系と異なる。

さて (4.17) (4.18) 式を図 4-4 の系に用いると一巡の周波数伝達関係 $G_o(j\omega, \theta_c)$ は、

$$G_o(j\omega, \theta_c) = \frac{K_s}{j\omega T} \cdot e^{-j\omega L} \dots (4.19)$$

となる。図 4-8 は入力振幅 θ_c に対する等価ゲインの変化を示したものである。従って、(4.19) から求められるゲイン曲線は、入力信号の振幅 θ_c によってかなり上下にずれる。しかし (4.18) 式は、ある値 (そのとき $\theta_c = \theta_{c0}$) で最大値 K_{smax} となる。

$\theta_c > \alpha > 0$ のとき

$$\begin{aligned} \frac{dK_s}{d\theta_c} &= - \frac{4}{\pi \theta_c^2 \sqrt{1 - (\alpha/\theta_c)^2}} \\ &\quad \times \left\{ q_0 - (2q_0 - K_f \alpha) \left(\frac{\alpha}{\theta_c} \right)^2 \right\} \\ \therefore \frac{dK_s}{d\theta_c} &= 0 \text{ とおくと } \theta_c = \alpha \sqrt{\frac{2q_0 - K_f \alpha}{q_0}} \end{aligned} \dots (4.20)$$

ただし $K_f < \frac{q_0}{\alpha}$

$$\therefore K_s'' \left(\alpha \sqrt{\frac{2q_0 - K_f \alpha}{q_0}} \right) < 0 \text{ より、上記条件で極}$$

大値、 $K_s(\alpha) = K_f$ 、 $K_s(\infty) = 0$

$$\therefore K_{smax} = \frac{2}{\pi} \left\{ K_f \cdot \sin^{-1} \sqrt{\frac{q_0}{2q_0 - K_f \alpha}} + \frac{1}{\beta \alpha} \sqrt{q_0 (q_0 - K_f \alpha)} \right\} \dots (4.21)$$

図 4-4 の系では、 $\theta_c \leq 2$ のとき $K_s = K_f$ であるから

$$|G_o(j\omega)| = \frac{K_f}{\omega T} \quad \therefore g = 20 \log K_f - 20 \log \omega T \text{ (dB)} \dots (4.22)$$

$$\phi = -\frac{\pi}{2} - \omega L \text{ (rad)} \dots (4.23)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_c, K_{fc} \text{ をそれぞれ、ハンチング周波数、限界感度とすれば } \omega_c = \pi/2L \text{ (rad/s)} \\ K_{fc} = \pi T/2L \end{aligned} \right\} \dots (4.24)$$

と与えられる。従って制御器のゲイン K_f は K_{fc} より小さくしなければならない。

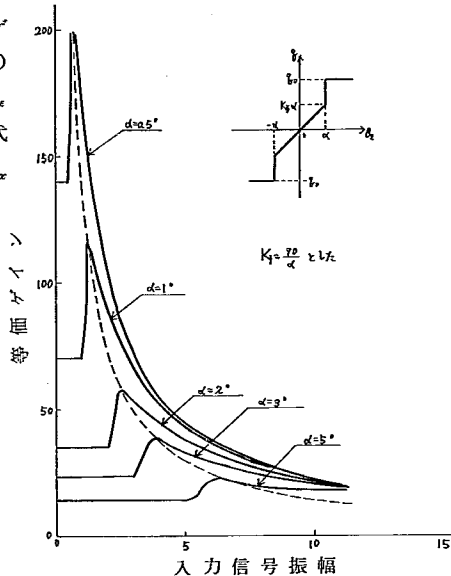


図 4-8 等価ゲイン曲線

また、その結果は、 $\theta_c > \alpha$ のときも同様で、安定であるためには、(4.21) 式で示される K_{smax} が K_{fc} より小さければよい。今、急速制御器の動作点 α を求めるために、 $K_f = 0$ (すなわち、3位置制御となる) とし、任意 α に対する等価ゲイン K_s の最大値 K_{smax} を求めると、次のようになる。

$$K_{smax} = \frac{0.635}{0.55} \frac{q_0}{\alpha} \dots\dots\dots (4.25)$$

また、このときの入力振幅値 θ_c は

$$\theta_c = \frac{1.4}{1.16} \alpha \dots\dots\dots (4.26)$$

となる。従って、安定限界点 α_c は、近似的に (4.24) (4.25) 式より

$$\alpha_c = \frac{\frac{4}{1.16} q_0}{\pi} \cdot \frac{L}{T} \div \frac{0.635}{0.55} q_0 \frac{L}{T} \quad (deg) \dots\dots\dots (4.27)$$

(等価線形化法・近似値)

となる。また (4.14) 式より

$$\alpha_c = 0.5 q_0 \frac{L}{T} \quad (deg) \text{ (位相面図解法)} \dots\dots\dots (4.14')$$

(4.27) と (4.14') 式を比較すると (4.27) 式のほうが、小さくなっているが、実際の設計では安全をとって (4.14') 式を用いた。

次に以上の理論結果を用いて設計してみると、制御対象の T および L は、

$$\left. \begin{aligned} T &= 23^{sec} \\ L &= 0.3^{sec} \quad q_0 = 174, \quad q_1 = 70 \end{aligned} \right\}$$

であるから、(4.14') 式より

$$\alpha_c = 0.5 \times 174 \times 0.3 / 23 = 1.13 \quad (deg)$$

従って $\alpha = 1.5 \quad deg$ とする。

また、 $F.C.V$ より得られる最大設定感度は $q_1 / \alpha = 70 / 1.5 = 46.5$ であるから

$$K_{fc} = \frac{\pi \times 23}{2 \times 0.3} = 120$$

より、 $K_f = 50$ とする。(もう少し、大きな感度を得られる $F.C.V$ を用いてもよい。)

図4-9は、 $\theta_c < \alpha$ および $\theta_c = 5^\circ$ のときの開ループ *Bode* 線図である。また、図4-10～4-11に閉ループ *Bode* 線図を示す。アナログ計算機によるシミュレーション結果を比較のためにプロットしたが、傾向的には一致している。しかし、共振値付近での値が異なるのは、シミュレーションではむだ時間 L がかなり小さくなっているためで、図4-10の位相特性曲線を見るとはっきり観察できる。このようなことから、いままでの近似計算による理論解析結果を実機的设计に用いることができると考えられる。図4-11では、3位置制御を用いた場合と(4.27)式で表される制御器を用いた場合の比較のために、その両方のゲイン特性曲線(シミュレーション値)を示した。この結果から(4.9)式で表わされる制御器を用いることによって、低周波域での特性が改善されていることが分る。

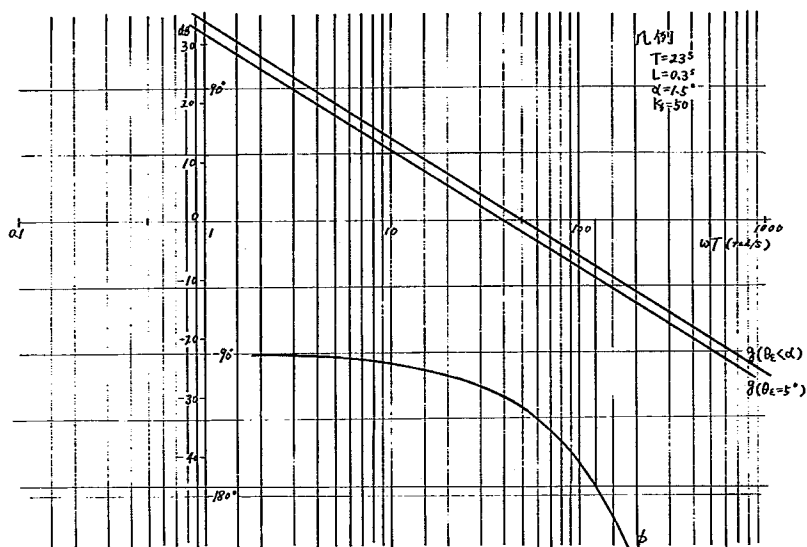


図 4-9 開ループBode線図 ($\alpha > \theta_e = 5^\circ$)

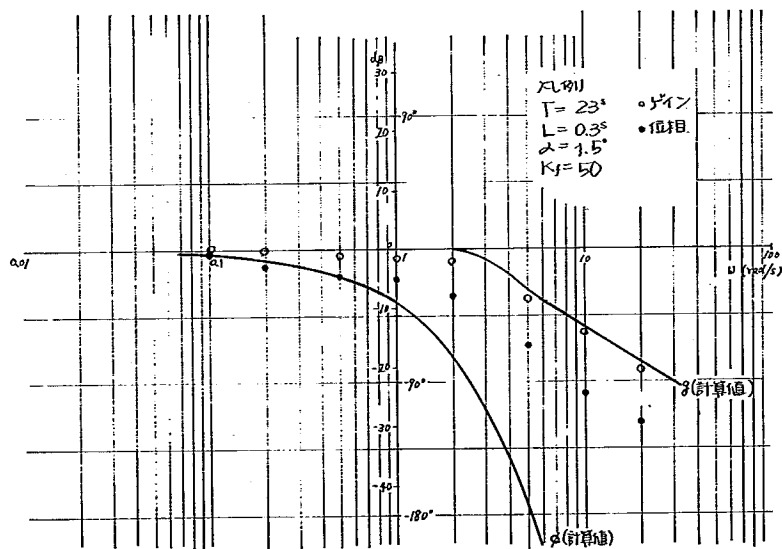


図 4-10 閉ループBode線図 (目標入力)

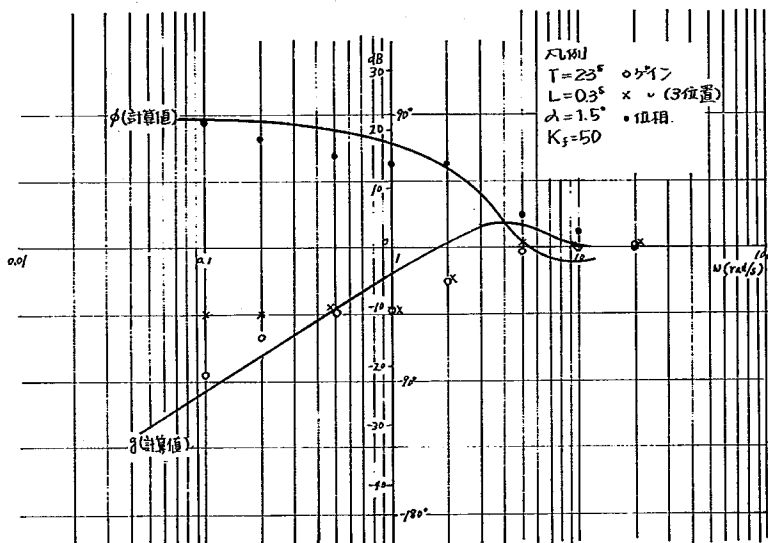


図4-11 閉ループBode線図（外乱入力）

2. 負荷制御（過負荷防止）系

48年度はブレードの完全自動化の第2段階として、前記のレベル制御の他に、ブレードの負荷制御を行う装置の試作をした。図4-12はその制御系のブロック線図であるが、これは、前記のレベル制御系と一体となる関係上、その負荷信号は、レベル制御系の一部へ入力するようにしてある。

このような方法で、信号切換による激しいサイクリングを防ぐことができる。

この系は解析的に解くことは困難であり、従って設定値の最適な調整は実験的に求めた。（現場実験結果を参照）

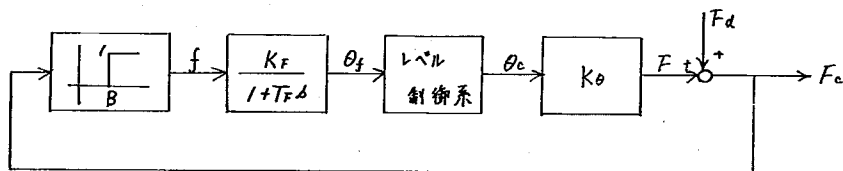


図4-12 負荷制御系ブロック線図

5. 傾斜角検出器の改良

ブルドーザブレード自動制御に使用される検出対象としてブレードCフレーム傾斜角，本体傾斜角をとる必要がある。傾斜角検出器としては，

- (1) ダッシュポット付振子（土木研究所式）
- (2) フロートベンドラム
- (3) ジャイロ式傾斜計

があり，それぞれの得失があるが，ここでは特に(2)のフロートベンジュラム，(3)のジャイロについて検討してみる。

○フロートベンジュラム⁵⁾

振子の原理を利用した傾斜計で，出力信号は，ポテンションメータの抵抗値変化として取り出すものであり，その仕様を表-2に，外観を写真-1に示す。

表-2

寸 法	165φ × 98.6
重 さ	3.4kg
検出角度範囲	± 4.0° ~ ± 5.0°
抵 抗 値	1.8kΩ
消 費 電 力	1.5kW DC or AC
分 解 能	0.1°
再 現 性	± 0.05°
ダンピング定数	0.6

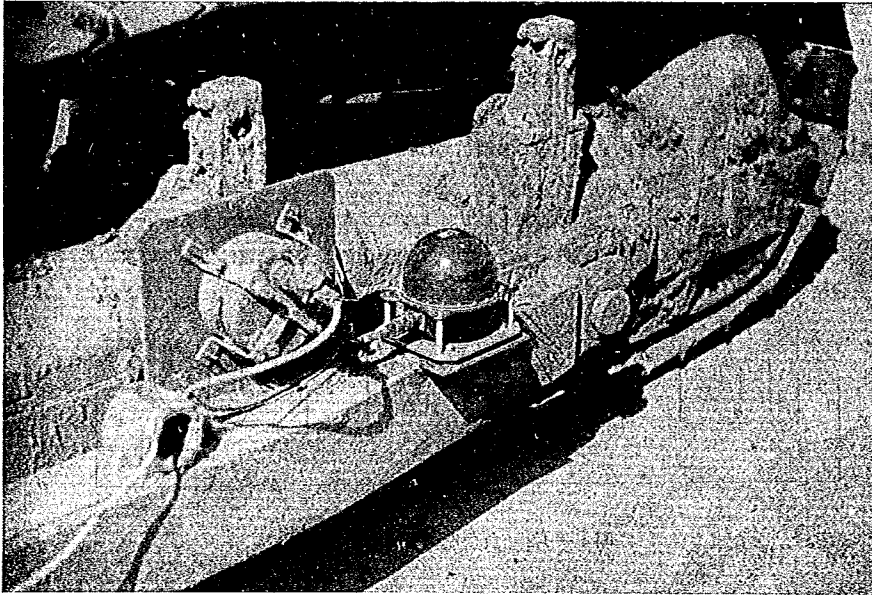


写真-1 フロートベンジュラム・パーチカルジャイロ

○ジャイロ（パーチカルジャイロ）

ジャイロの原理を利用した傾斜計で、ピッチ角、ロール角の2つを同時に検出できるパーチカルジャイロで、その仕様を表-3、外観を写真-1に示す。

表-3 パーチカルジャイロ仕様

駆 動 電 源	DC 24 V ~ 28 V 0.47 A
ロータ回転数	8000 rpm
ジンバル自由度	ピッチ軸±60°, ロール軸±80°
測 定 範 囲	ピッチ角±56°, ロール角±70°
検 出 素 子	ポテンショメータ
総 抵 抗 値	ピッチ1952Ω ロール2080Ω
直 線 性	0.5%
分 解 能	0.2°
自 立 精 度	ピッチ0.05° ロール0.06°
自 立 速 度	20°~1.5° まで 3~10分

このパーチカルジャイロは図5-1に示すように、ロータ、インナ及びアウトジンバル、自立装置、角度検出器、シンクロポテンションメータから成立っている2自由度のジャイロである。

これは、ロータの回転軸（スピン軸）が常に地球の重心位置を指している装置であるが、地球の自転により徐々に鉛直軸からずれ、これを補正するためボールトラッキング自立装置を使用している。この装置図5-2に示すようなもので、ロータスピン軸の上部に円盤型磁石があり、この外側にドラッグカップがとりつけられ、内部に鋼製ボールが入っている。

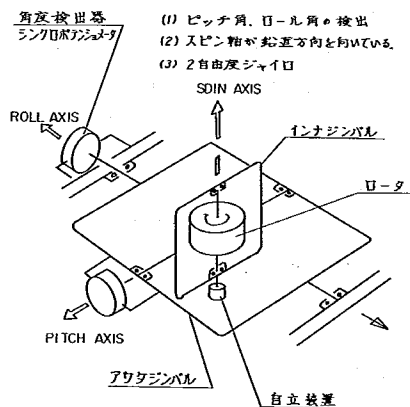


図5-1 パーチカルジャイロ

スピン軸に回転があると、このボールの重量によりモーメントを発生し、右手の法則に従ってプリセッション（歳差運動）が動く。これによりスピン軸の傾きを正す機構になっている。

又、これらの傾斜計に加速度が働いた時の挙動、及び傾斜角検出器としての機能並びに実用性について検討する。

フロートベンジラムに加速度 $A = a_x \times i + a_y \times j$ が加わった時の運動方程式を導くと次のようになる。（但し軸の摩擦を無視した）

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{C}{I + Ml^2} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{M}{I + Ml^2} \cdot \{(g + a_y) \sin\theta + a_x \cos\theta\} = 0 \dots (5.1)$$

θ : 傾斜計の指示角度 (rad)

M : 振子の質量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$)

l : 振子の回転軸と振子重心間の距離 (m)

I : 振子の回転軸に関する慣性モーメント ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

C : 傾斜計の減衰係数 (kgms)

α_x : 傾斜計に働く加速度の水平成分 (m/s^2)

α_y : 傾斜計に働く加速度の鉛直成分 (m/s^2)

g : 重力加速度 (m/s^2)

(5.1) 式を用いて、発進時、急加速度における傾斜角の動向を解析すると図5-3のようになる。ここでは発進時に $1\text{m}/\text{s}^2$ の ($\alpha_x = 1\text{m}/\text{s}^2$, $\alpha_y = 0$) 加速度を加えた時の傾斜角の指示誤差を示している。又 α_y の影響は θ が微小なので(5.1)式においては無視できる。

この図から、ベンジュラムは、加速度が働いている時間中その加速度入力がパルス状の場合、元の平衡点に戻るまでの時間は約0.5秒程度かかる。したがってこの対策法として、次のことが考えられる。

すなわち、水平方向に働く加速度を加速度計よりキャッチし、この加速度が働いた時に相当する傾斜角の指示誤差分を補正すれば、解決すると考えられる。

又このバーチカルジャイロに関しては、性能検定を模型の自動ブレード運転装置で行なった。

(1) キャリブレーション試験

傾斜台にジャイロを取りつけ、分度器により傾斜台の傾斜角を測ると同時に、ジャイロの出力信号をペンレコーダにより記録した。この結果図5-4に示すような、キャリブレーションカーブが得られ、ピッチ角、ロール角共、ほぼ直線性を有していることが判明した。

(2) 応答性試験

模型の自動ブレード運転装置の本体にジャイロを取りつけ、本体を油圧シリンダで強制的に上下

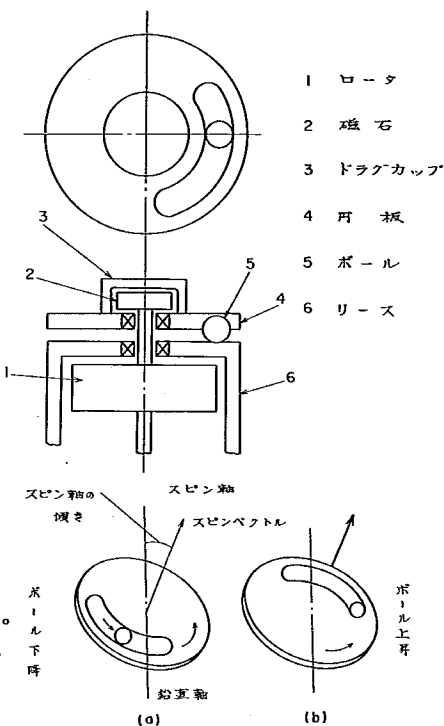


図5-2 ボールトラッキング装置

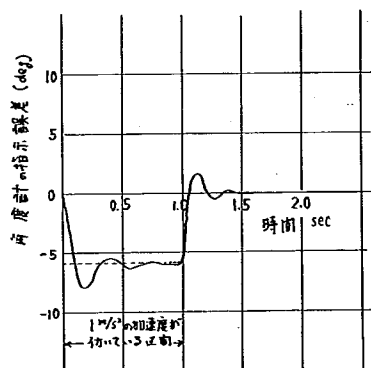


図5-3 フロートベンジュラム特性

動させ、三角波或いは台形波を与え、その時の本体傾斜角と、ジャイロの指示角とを同じタイムスケールで描かしたのが表-4である。

この実験では本体に周波数の異なる5種類の台形波を与え、本体傾斜角急変部における本体傾斜角とジャイロ指示角とのおくれ時間 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 、 ϕ_4 とジャイロ指示角のオーバースケール割合とを測定したものである。

これから判断するとジャイロは、本体に与えられた台形波の角速度の小さい、すなわち、緩慢な動きに対して、わずかではあるが0.1 sec ~ 1.5 sec程度の遅れが認められるが、殆んど問題にならない。又速い動きに対しては遅れは認められない。

ただし、速い動きに対しては、オーバースhootする傾向が認められ、このジャイロの適正角度変化検出範囲は

$$\omega = 4.17 \text{ deg} / \text{s} \text{ 程度と考えられる。}$$

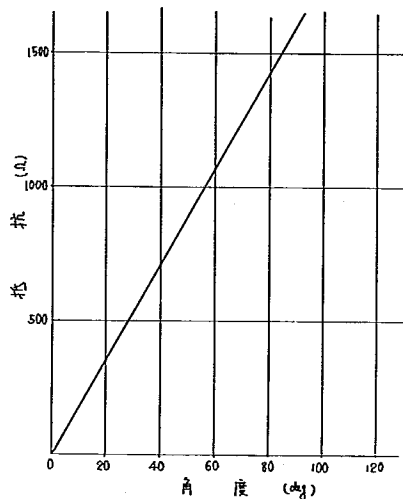


図5-4 キャリブレーション

表-4 ジャイロ試験結果

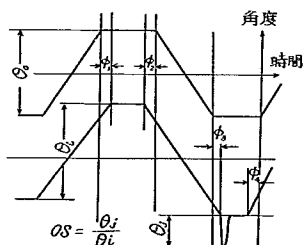


図5-5

ω / sec	θ_o / θ_i	$\phi_1 \text{ sec}$	$\phi_2 \text{ sec}$	$\phi_3 \text{ sec}$	$\phi_4 \text{ sec}$	$OS\%$
0.76	0.974	-0.08	+0.08	0	0	0
0.82	0.822	-0.15	+0.14	0	0	0
1.54	0.885	0	0	0	0	0
4.17	1.000	0	0	0	0	0
1.76	1.270	0	0	0	0	110

6. 負 荷 制 御

6.1 ブルドーザの負荷及び負荷制御システム

ブルドーザによる土工作業において、ブレードの制御は前述したレベル制御の他、ブレード前方にかかる土の負荷を制御する必要がある。

一般に直線路の掘削押土作業時のブルドーザにかかる負荷は次式のようになる。⁶⁾

$$F_{ct} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \dots\dots\dots (6.1)$$

ここで、

F_{ct} : ブルドーザの実けん引力

F_1 : 押土抵抗

F_2 : 掘削抵抗

F_3 : 走行抵抗

F_4 : 慣性抵抗

又、 F_{ct} はブルドーザのエンジン等の特性、及び履帯、土質等の条件より定まるものである。

$$F_{ct} = \mu W \dots\dots\dots (6.2)$$

W : ブルドーザの重量

μ : 粘着係数

表-5 装軌式車両の粘着係数

路面の条件	粘着係数 μ
舗装道路	0.6 ~ 0.9
乾燥したかたい土質の道路	0.8 ~ 0.8
柔軟な砂質の道路	0.6 ~ 0.7
深い泥ねい地	0.5 ~ 0.6
細かい砂土	0.45 ~ 0.55
刈り取った草地	0.7 ~ 0.9
開墾した畑	0.6 ~ 0.7
凍結した道路	0.2

今、ブルドーザの出しうる最大のけん引力 F_{max} は、

$$F_{max} = 270 \eta_{tr} \cdot N_e / v_t \dots\dots\dots (6.3)$$

η_{tr} : パワーラインの伝達効率

N_e : 主エンジンの軸出力 PS

v_t : 履帯の進行速度 km/h

ここで(I) $F_{max} > F_{ct}$ の場合は、けん引力 F は

$$F = F_{ct} = \mu W \dots\dots\dots (6.4)$$

(II) $F_{ct} = F_{max}$ の場合は,

$$F_{ct} = F_{max} = 270 \eta_t N_s / v_t \dots\dots\dots (6.5)$$

負荷が無限大の場合を考えると

(II)の場合のエンジン回転数の時間的変動(ダイレクトドライブ)は図6-1のようになる。⁷⁾

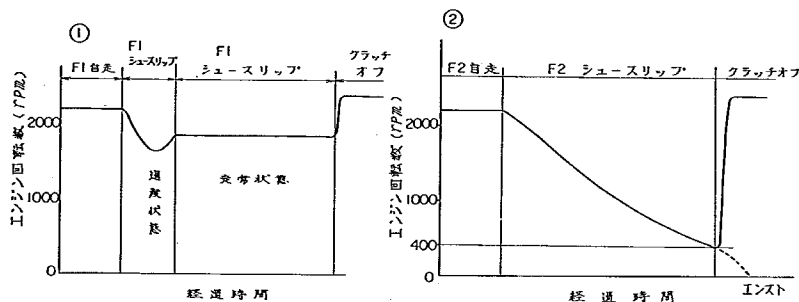


図6-1 エンジン弾性

すなわち、①の場合は履帯スリップのみを起し、エンジンストップには移行しない場合、②の場合は、ある時間履帯がスリップし、その後エンジンストップしてしまうケースである。

一般に1速の場合は、①のケース、2速以上の場合は②のケースになる。各土質条件における実最大けん引力 F を示す。(表-6)

表-6 各種土質におけるけん引力(D-50)

含水比	g/cm ³ 密度	土 質	けん 引 試 験			
			エンジン回転速度1500rpm		2000rpm	
			1 速	2 速	1 速	2 速
24.5	1.72	ローム締り土 乾燥	7194 ^{kg}	7095	7128	7227
32.1	1.37	ローム緩ぐし土 やや乾燥	9570	9389	9570	9537
3.8	-	砕石しまり 乾燥	9570	9735	9884	9735
41.5	1.45	ローム緩ぐし土 泥ねい	9540	6600	4950	6105

又、 F_1 , F_2 , F_3 の傾向は図6-2, 6-3, 6-4に示すとおりである。ここで、これらの各抵抗の割合と、トルクをパラメータとして図示すると図6-5⁸⁾のとおりで、特に掘削抵抗による負荷が大半をしめている。

したがって、ブルドーザの負荷制御を行なうには、主として掘削抵抗力、押土抵抗の制御を行なうのが最適である。またブルドーザの掘削作業は、一般に1速で行なうのが普通であるので、履帯のスリップを防止することが、第1の目標である。従って、負荷制御としては、履帯のスリップを制御系の検出部とし又、制御対象をブレードの上昇量とした。

ここで、掘削深さと掘削抵抗力の関係、押土重量と押土抵抗力の関係、走行速度と走行抵抗との関係をみると前者2つの掘削深、押土量は非常に負荷減少に影響することから上記の制御方式を

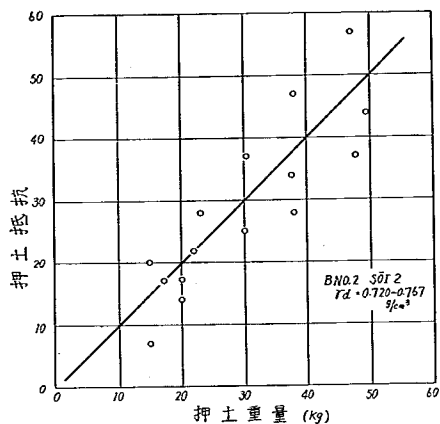


図 6-2 押土重量と押土抵抗

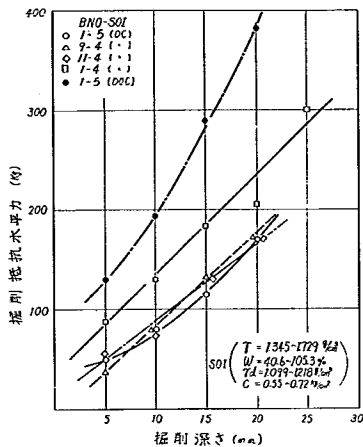


図 6-3 掘削深さと掘削押土抵抗

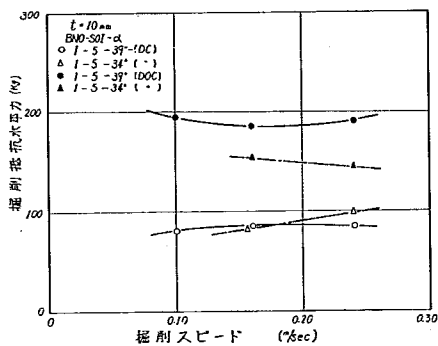


図 6-4 掘削スピードの変化と掘削抵抗

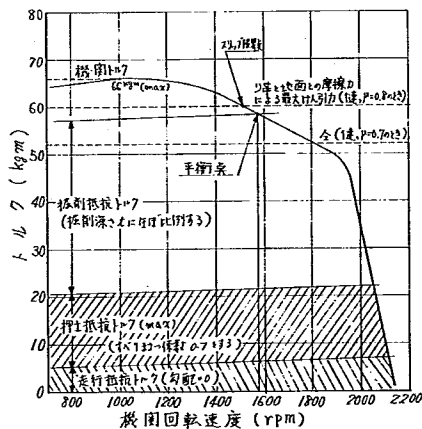


図 6-5 ブルドーザ掘削抵抗

6.2 負荷制御システムを導入したブロック線図

前述した負荷制御システムを昭和 47 年度開発したレベル制御システムに導入し、履帯のスリップを防止しながら、かつ、レベル制御を行なわせる総合的なブレード制御システムを開発した。このシステムをブロック線図に図示したものが図 6-6 である。

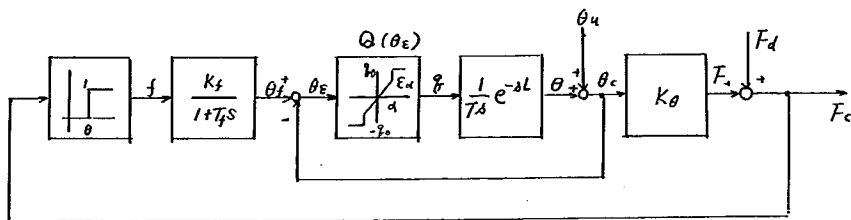


図 6-6 ブレード制御系ブロック線図

過負荷検出装置については、ブレードの負荷を直接検出することが困難であるため、履帯スリップによって過負荷であると判断し、制御する方法をとった。従ってこの装置は、形の上では停止検出装置となっている。ブルドーザの作業中の車速は非常に小さく、かつ地面に接している履帯の速度と車速は必ずしも一致せず、その速度検出は困難である。そこで、この解決方法として、ブレードの背後に第 5 輪を設け、その回転速度をカム、マイクロスイッチで検出し、当研究室で開発したパルス～アナログ量変換回路（積分回路の応用回路）で負荷の大小を判断するようにした。この総合的なブレード自動制御システムは、本質的にはブレード C フレーム傾斜角をあらかじめ設定した目標値に追従制御させるものであるが、ブレードにかかる負荷、すなわち負荷によりブルドーザ履帯スリップが発生した場合、この傾斜角の目標値を負荷が減少する方向に変化させ、負荷がなくなった時点では、又本来の傾斜角の目標値に自動的追従させるものである。

7. 現地実験方法

7.1 試験機仕様

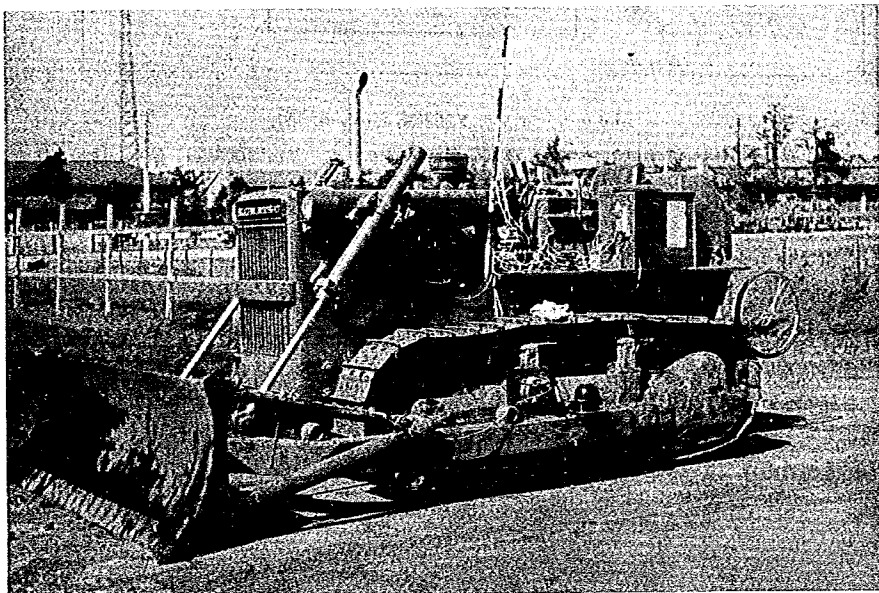
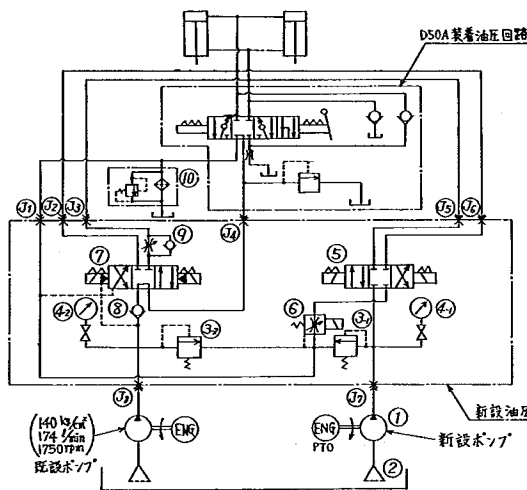


写真-2 自動ブレード操作ブルドーザ外観

試験機は昭和47年度製作した自動操作ブルドーザを使用した。外観を写真-2に示す。本機は、ベースマシンとして、小松D-50A-15型、アングルドーザを改造したもので、油圧系統を全面的に変えた。その油圧系統図を図7-1に示す。



番号	名称	形式	個数
1	ポンプ	Y30-IP25P-1A-B-1A-J	1
2	リレー	0FS-10-3A-J	1
3	リレー	CG-06-C-10-3A-J	2
4	圧力計	BS $\frac{1}{2}$ ×80×200K	2
5	圧力スイッチ	DQ454-02C-24DC-50A	1
6	圧力センサー	FCFG-03	1
7	圧力センサー	DQ354-05K-E-24DC-50A	1
8	圧力センサー	CDG-825-SF-3A	1
9	圧力センサー	FUG-10-B-3A	1
10	圧力センサー	FS5-P10-3A-10-J	1
11	圧力センサー	FT 1kg $\frac{1}{2}$ I	1
12	-	-	-
13	-	-	-
14	-	-	-
15	-	-	-
16	-	-	-
17	-	-	-
18	-	-	-

図 7-1 自動操作ブルドーザ油圧回路図

7.2 測定対象及び測定装置

自動操作ブルドーザのブレード制御を行なうために検出せねばならない測定対象また、試験に必要なデータをとるための測定対象並びに測定装置を以下に示す。

- (1) Cフレーム傾斜角 パーチカルジャイロ
フロートベンジュラム
- (2) 本体傾斜角 フロートベンジュラム
- (3) スリップ検出 第5輪パルス及び比較回路
- (4) 機関回転数検出器 (5) 車速検出装置
- (6) FMテレメータ送信器 (針測用) (6) Cフレーム傾斜角検出器 (フロートベンダム)
- (7) 本体傾斜角検出器 (フロートベンダム) (7) (ジャイロ)
- (8) 制御器 (8) 車速検出装置 (ジェネレータ付)

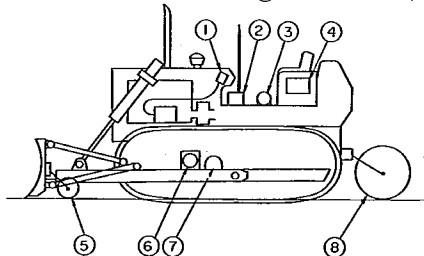


図 7-2 各種検出器取付位置

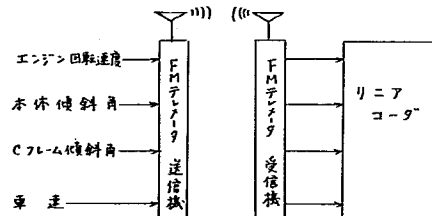


図 7-3 検出部ダイアグラム

(4) エンジン回転速度検出 タコジェネレータ

(5) 車速検出 第6輪+ジェネレータ

またこれらの出力信号をレコーダ等に記録させるためFMテレメータを使用した。

ここで、各ピックアップ取付部及び測定方法を図7-2、7-3に示す。

又FMテレメータの仕様を表-7、写真-3に、タコジェネレータ、ジェネレータの仕様及び性能を表-8、図7-4に示す。

また自動ブレード制御試験前及び試験後の地形は、スタッフ、レベルにより目読した。測定区間は50cm刻みで0~30mまで60点とった。

表-7 FMテレメータ仕様

	事 項	仕 様
送信部	変 調 方 式	FM
	測 定 点 数	単一方式 (1点測定)
	送 信 周 波 数	40.68, 42.89, 44.87, 47.27 MHz
	発 信 制 御	水晶発振子
	発 信 出 力	15mW
	応 答 周 波 数 範 囲	DC~500Hz ± 3 dB 以内
	使 用 温 度 範 囲	-10~50℃
	電 源	DC 9~12V 約35mA
	大 き さ	高83×幅24×奥行88mm
	重 量	約 350g
受信部	受 信 方 式	水晶発振子によるスポット受信
	中 間 周 波 数	4.5 MHz
	受 信 感 度	3μV/30dB以内
	低インピーダンス出力	30mA以上/30Ω 不平衡負荷
	高インピーダンス出力	1V以上/1kΩ 不平衡負荷
	低インピーダンス最大出力	±100mA
	高インピーダンス最大出力	±2V
	直 線 性	±3%以下
	出 力 負 荷 抵 抗	5Ω~1MΩ
	電 源	AC100V 約7VA
	大 き さ	高160×幅80×奥行200mm

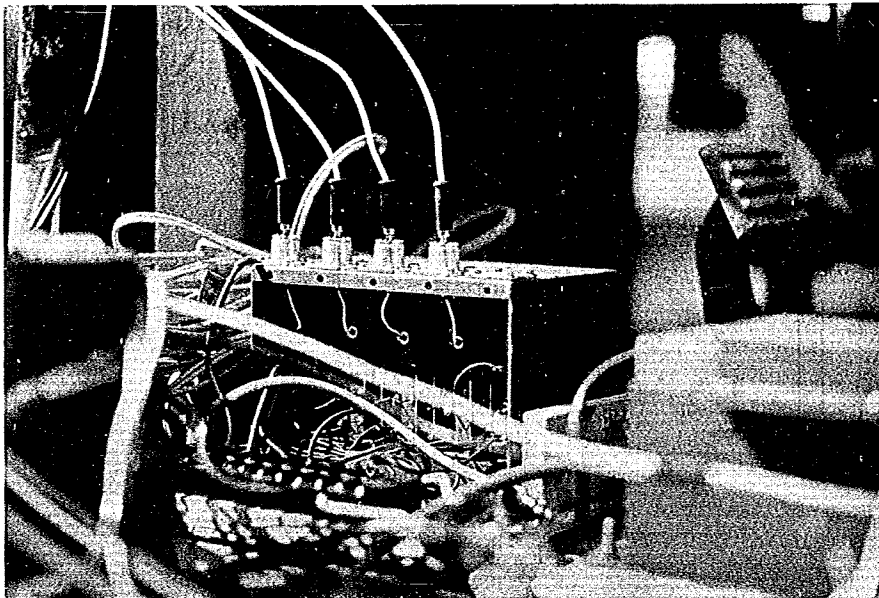


写真-3 テレメータ (送信部)

表-8 タコジェネレータ仕様

励磁電圧	100V
周波数	50/60Hz
極数	2p
励磁入力	2.5/2.2W
励磁入力電流	30/28mA
出力電圧	5/1000 V/rpm
残留電圧	0.05/0.05V
残留電圧の偏差	0.01/0.01V
直線性 (0~1500rpm)	1/1 %
位相 (1000rpm)	+20°
ロータ慣性モーメント	3 g-cm ²

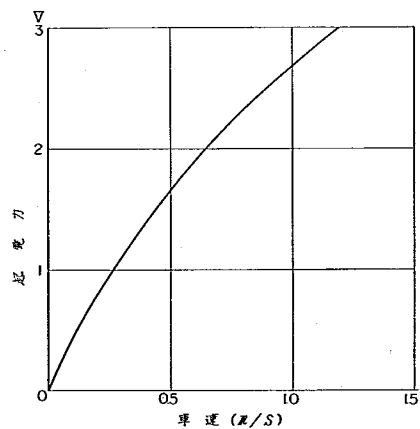


図7-4 発電ランプ速度特性

H1-SPEEDS 抵抗負荷

7.3 実験場

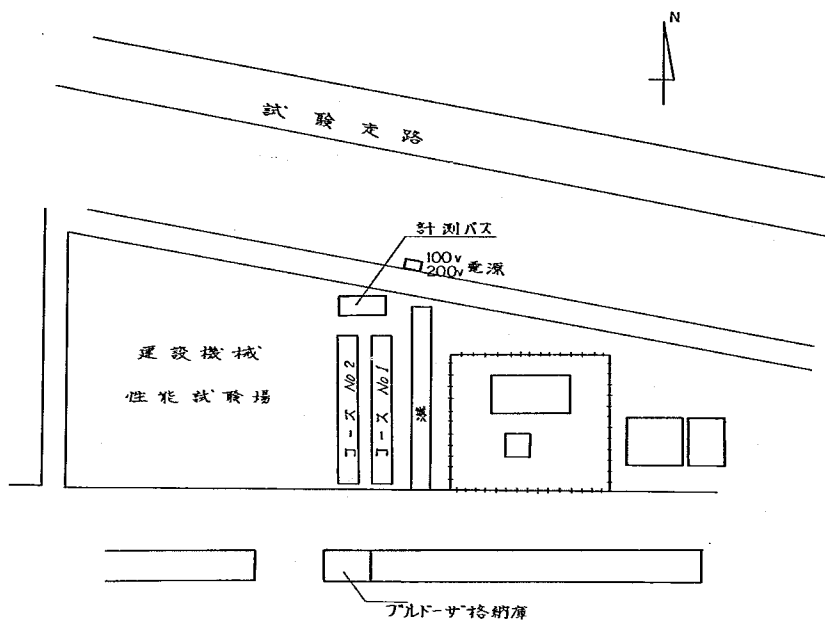


図7-5 実験場位置

現場実験場は、土木研究所千葉支所構内建設機械作業試験所内にテストコースを作り実験を行った。実験場の配置、実験コースのモードをそれぞれ図7-5、図7-6に示す。実験コースは、延長30m、幅員3m、厚さ40cmの盛土とし、所定モードの縦断面を作りこの上をブルドーザで数回締固めを行なって作った。実験コースのモードに関しては、(1)ステップ状のモード、(2)1つの山と1つの谷からなるモード、(3)2つの山と2つの谷からなるモードを作成した。

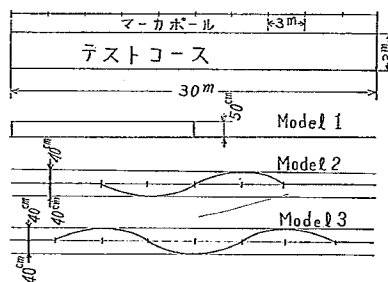


図7-6 テストコースモード

7.4 土質条件

現場テストコースの土質を下記の項目について調査した。

- (1) 土密度；テストコース上の任意の地点を3～4ヶ所選び500ccのサンブラでサンプルを採取し、サウタにより重量を測ることにより求めた。
- (2) 土の含水率；土密度と同じく、コース上の任意の2ヶ所の地点から土を採取し、採取直後の

重量と乾燥炉に2日間入れ乾燥後の重量をそれぞれサウタにより重量を測り求めた。

- (3) 土のコーン指数；テストコースの3ヶ所の地点をコーンペネトロメータで土のコーン指数を測定した。なお、コーンの先端角度は30°を使用した。

以上のテストを各実験所毎に調査した結果が表-9である。

7.5 実験手順

テストコースの造成、土質試験、地形測定、自動制御実験等を、図7-7のフローチャートの手順に従って行なった。

表-9 土質条件

実験番号	含水比	密 度	土 質	コーン 指 数
①	29.0	1.49	ローム やゝ締り土 やや乾燥	$80 \times 10^{-2} \text{mm} / 10 \text{cm}$
②	36.1	1.12	ローム ほぐし土 ,	$90 \times 10^{-2} \text{mm} / 10 \text{cm}$
③	32.7	1.13	ローム ほぐし土 ,	$85 \times 10^{-2} \text{mm} / 10 \text{cm}$
④	28.6	1.34	ローム ほぐし土 ,	$115 \times 10^{-2} \text{mm} / 10 \text{cm}$
⑤	28.8	1.22	ローム ほぐし土 ,	$40 \times 10^{-2} \text{mm} / 10 \text{cm}$

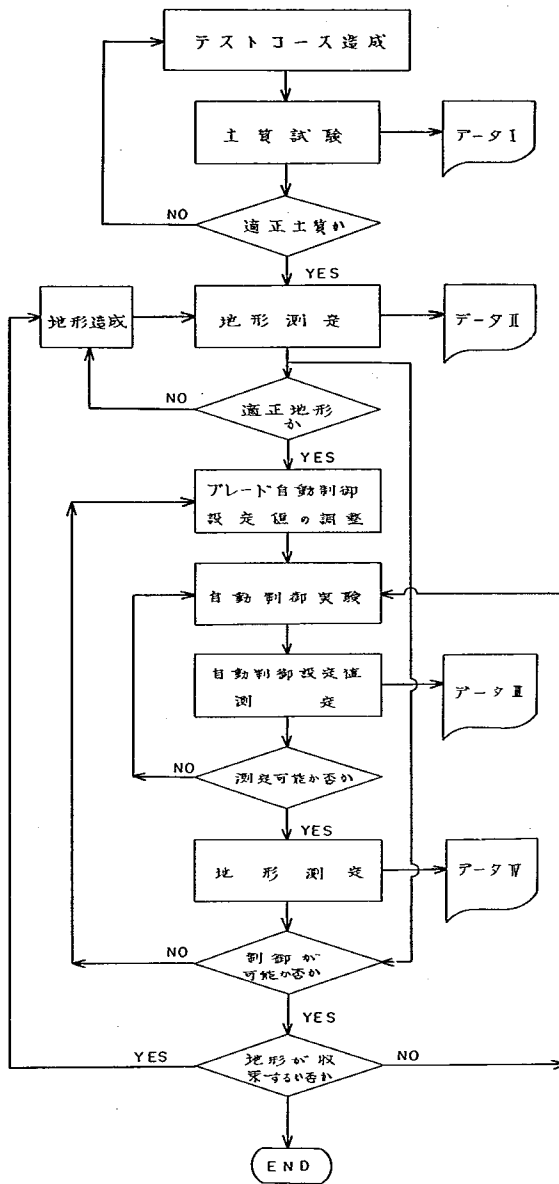


図7-7 実験手順フローチャート

8. 現地実験結果

8.1 レベル制御実験結果

以上の実験方法によりテストコースで行なった実験についてその結果を図8-1, 8-2のグラフに示す。これは、油圧操作を5値制御（急速上昇下降のオンオフ制御の2値, 微小比例制御操作2値, フロートの1値）にし、油圧バルブをフロートの状態に保持するCフレーム傾斜角 α 、をそれぞれ $\pm 0.5^\circ$, $\pm 1.5^\circ \pm 2.5^\circ$ と変化させた場合の制御性について実験した結果である。図から判断すると、 $\alpha = \pm 0.5^\circ$ から $\alpha = \pm 1.5^\circ$ の範囲では作業始めから0~10mの間の凸地盛土部は、かなり平坦になり、ブレードの制御効果が現われている。又、15m~30mの間の凹地に関しては、殆んど地形は変化していないことが分る。一方、 $\alpha = \pm 2.5^\circ$ では凸地、凹地共殆んど地形は変化していないが、これは初期の凸地の地形が+15cm程度で他の3者に対して小さい為であると推定される。

次に、作業回数毎の地形変化についてみると、各場合共盛土部は凹地に埋め戻され、漸次、右方に移動してくる傾向にある。なお、一旦、盛土部の高さが0の基準に掘削されれば、それ以上の作業でも殆んど地形変化が見られない。

上記のレベル制御は、油圧操作を比例制御を含む5値動作とし、油圧バルブのフロート状態を保持するCフレーム傾斜角 α 、いわゆる不感帯角を変化させた場合である。今度は、不感帯角をなくし、比例制御と急速のON-OFF制御との3値動作とし、かつ、急速制御の動作角 β を $\pm 2^\circ$, $\pm 4^\circ$, $\pm 7^\circ$ と変化させた場合の実験結果を図8-3, 8-4に示す。

この図より判断すると、 $\beta = \pm 2^\circ$ 、及び $\beta = \pm 4^\circ$ の比較的Cフレーム動作角の小さい範囲では、特に盛土部の凸地の掘削が良好に行なわれ、凸部の山の頂が平坦化され、作業回数を増すごとに基準レベルの方に収束している傾向が表われているが、一方、 $\beta = \pm 7^\circ$ の動作角が大きく、動作感度の鈍い範囲ではあまり凸地は平坦化せず、凸地の山が右方へ単に移動しているにすぎない。またこのような制御システムにおいては、一般にある程度の作業回数でその仕上げ程度が収束してくる傾向があるため、地形のあらさの各作業回数の標準偏差をとった図8-5から判断すると前述した急速制御動作角度 β が小さい程、早く収束してくる傾向が現われてくる。従ってソレノイドバルブの動作角は1~2°程度にとることが望ましい。

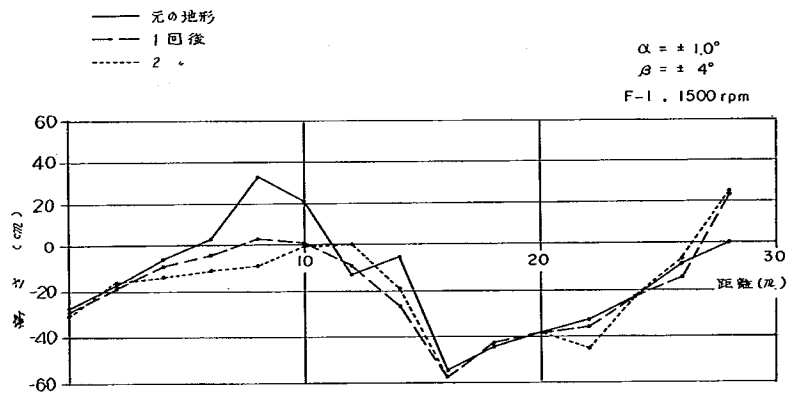
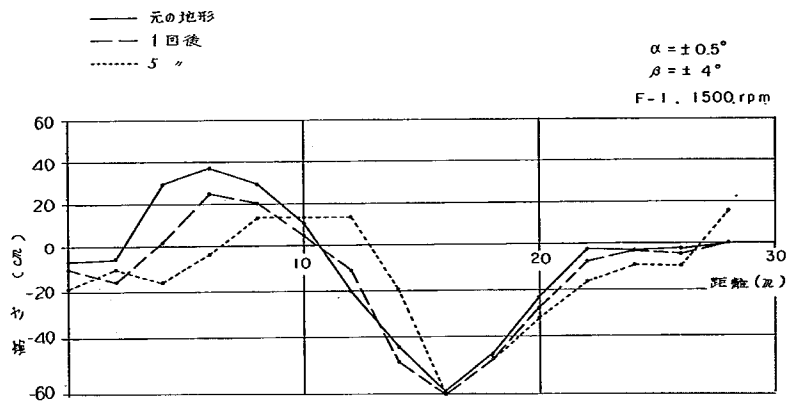


図 8-1 レベル制御結果

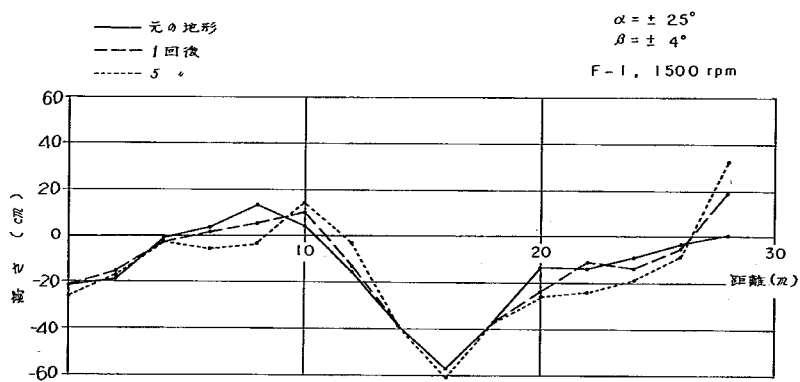
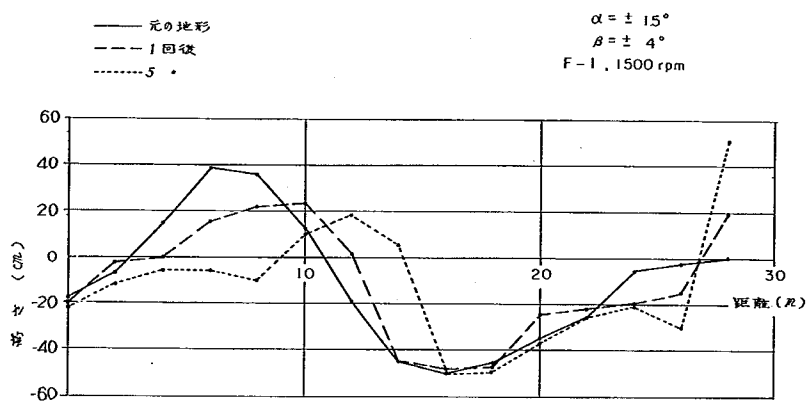


図8-2 レベル制御結果

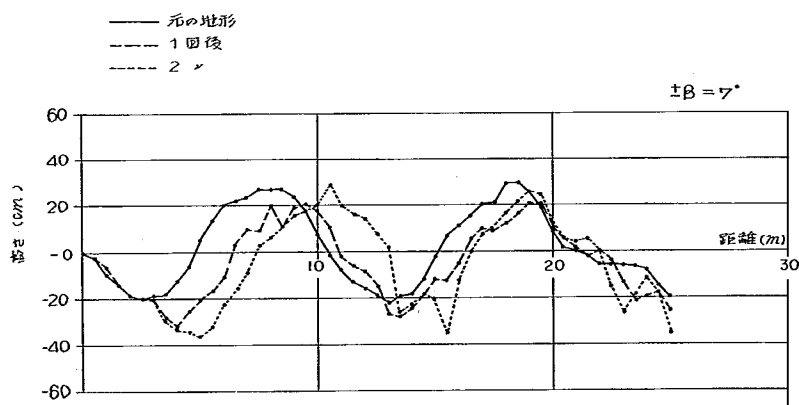
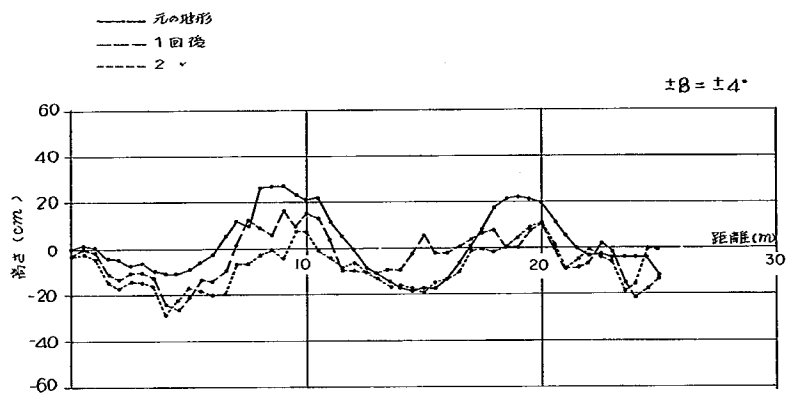


図 8 - 3 レベル制御結果

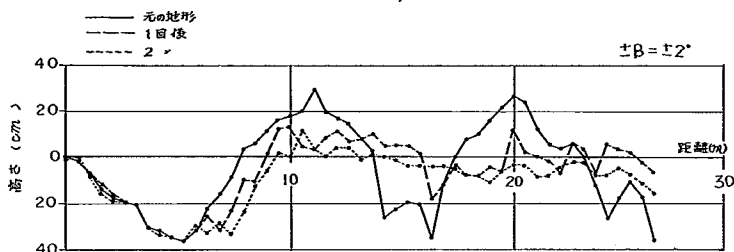


図8-4 レベル制御結果

8.2 負荷制御実験結果

(1) 負荷制御装置の動作実験

本年度開発した負荷制御装置（履帯スリップ、エンジン負荷）の作動を確認するために、試験コースに高さ約50cm程度のステップ状の盛土を作り、負荷制御を行なった場合のブレード先端の軌跡を掘削後の地形の後つばを測ることにより求めたものが図8-6である。これは負荷制御の負荷検出ホールド時間を1秒、かつブルドーザの速度を1速、エンジン回転速度を1800rpmにした時のものである。これにより、負荷制御の作動が正常に行なわれていることが認められる。

次に、負荷制御の作業回数と掘削後の平均傾斜角度の関係を示したものが図8-7である。これによると平均傾斜角度は作業回数を増すごとに減少してきている。また掘削前後の地形の平均傾斜角度を横軸、掘削後の平均掘削角を縦軸にとったものである。これによると掘削前の平均掘削角が大きい範囲では掘削後平均掘削角はかなり減少でき、効率的な掘削ができるが、平均掘削角が小さい場合は、急激な掘削角の減少は期待できない。

(2) 傾斜角及び負荷制御

傾斜角制御のみで行なった実験では、実際にはブレードがくい込み過ぎて過負荷になり、履帯がスリップを起し、それ以上前進することが出来ない。これを解決するための負荷制御装置を付けて行なった実験結果を図8-8に示す。

過負荷検出装置の設定係数Tを変えた場合の応答性、仕上性の良否について考察してみる。過負

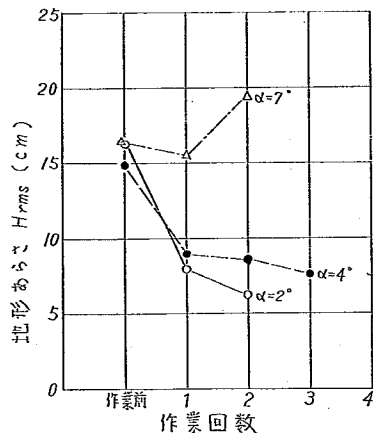


図8-5 作業回数と地形の変化

荷検出装置とは過負荷信号を発生しない最低車速を設定する装置で、この装置ではパルスの周期 T に換算している。これらの関係は次式で示され、その時の車速を V_L (km/h) とすると、次式のように

$$V_L = 3.17 / T \dots\dots\dots (8.1)$$

となる。

図8-8はCフレーム傾斜設定角を 0° とし、ソレノイドバルブの急速制御動作角 β 及び、設定係数 T を変化させた場合の制御作業前後の地形の凹凸をそれぞれプロットしたものである。図中①の場合は $\beta = 4^\circ$ 、 $T = 1\text{sec}$ ②、③の場合は $\beta = 7^\circ$ 、 $T = 4.2\text{sec}$ で、①の場合、制御実験一回後の地形から判断して領域Ⅱ、Ⅳ、Ⅵでは負荷制御によりブレードを上昇させている状態、一方領域Ⅰ、Ⅲ、Ⅴはブレードのレベル制御を行なっている状態である。なお、領域Ⅶは、ブルドーザの本体のピッチ角が急激に変化した状態である。

②の場合も同じく、領域Ⅱ、Ⅳ、Ⅵでブレードの負荷制御を行なっている状態、Ⅰ、Ⅲ、Ⅴはレベル制御の状態を示している。③の場合も、Ⅱはレベル制御、負荷制御の両方、Ⅲは負荷制御、Ⅳはレベル制御及びブルドーザ本体の急激な変化をした状態である。

ここで①、②を比較すると、①の場合すなわち $\beta = 4^\circ$ 、 $T = 1\text{sec}$ と、③の $\beta = 7^\circ$ 、 $T = 4.2\text{sec}$ に比べて制御動作角が少なく、かつ負荷動作設定係数 T の少ない方が応答性は良くなっているが、多少ハンチング気味になり、ブレードを上げ過ぎ、下げ過ぎの傾向が出ている。

逆に、 T を大きくすると、スリップする時間が長くなりそれだけ作業能率が低下する。従って T の適正值としては2秒程度が良好と考えられる。

次に、②、③の場合であるが、両者共、制御設定条件は同様であるが、初期地形の差異により(0~6m間、及び凸地の高さの相異により)掘削地形が大分異なってくる。

また制御作業回数を増すと両者共、地形は緩らくなる傾向を示している。

(3) ブレード自動制御時の検出値の挙動

ブルドーザブレード自動制御時における、Cフレーム傾斜角、制御前の地形及び制御時のブレード先端高さ、ブルドーザ車速、及びブルドーザ走行距離の経過の時間毎の値を示したものが図8-9~8-15である。

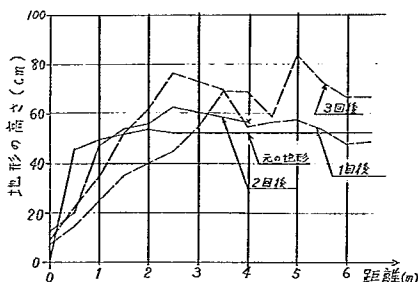


図8-6 負荷制御回数による地形の変化

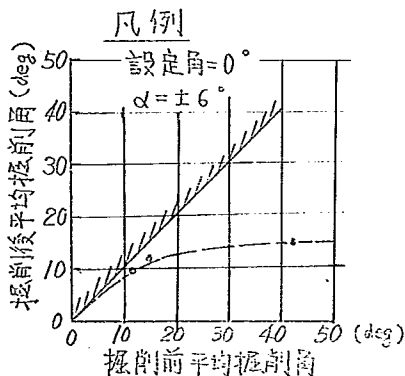


図8-7 掘削前後掘削角

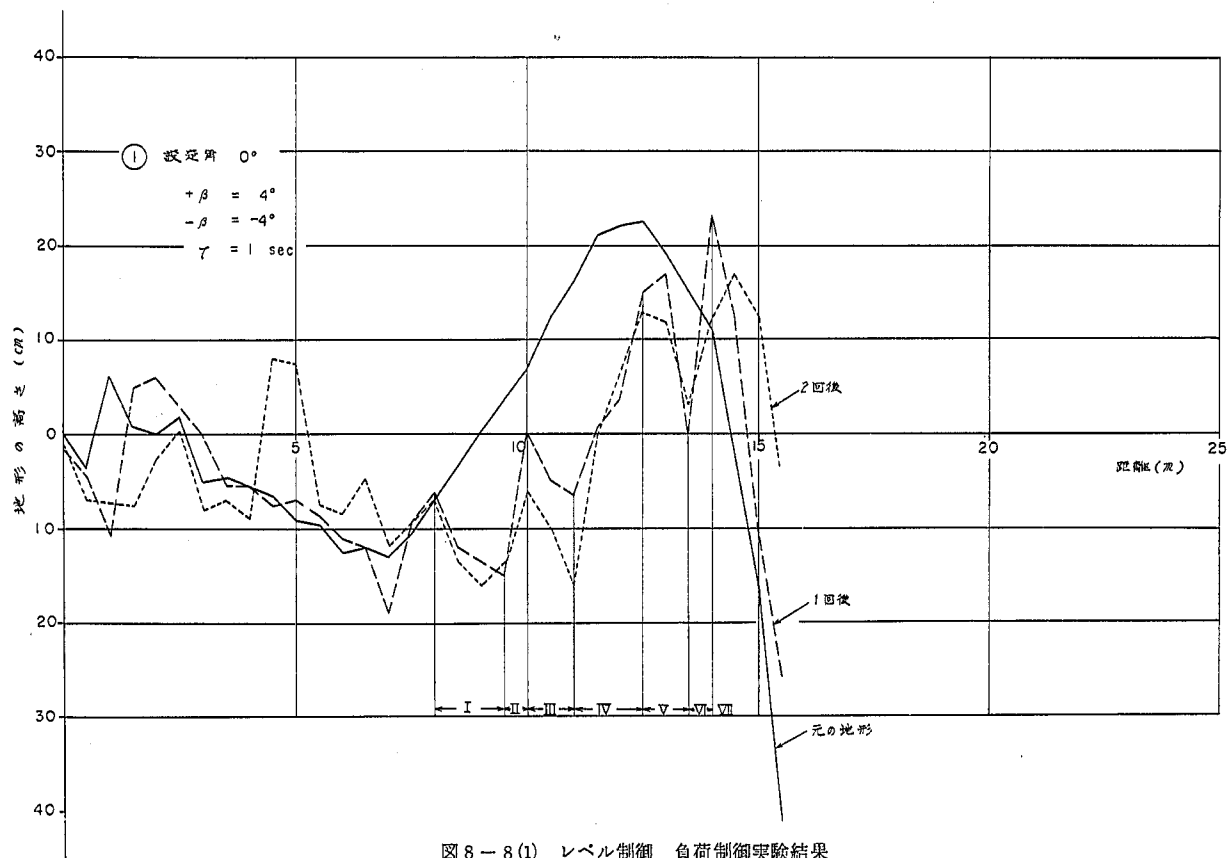


図 8-8(1) レベル制御 負荷制御実験結果

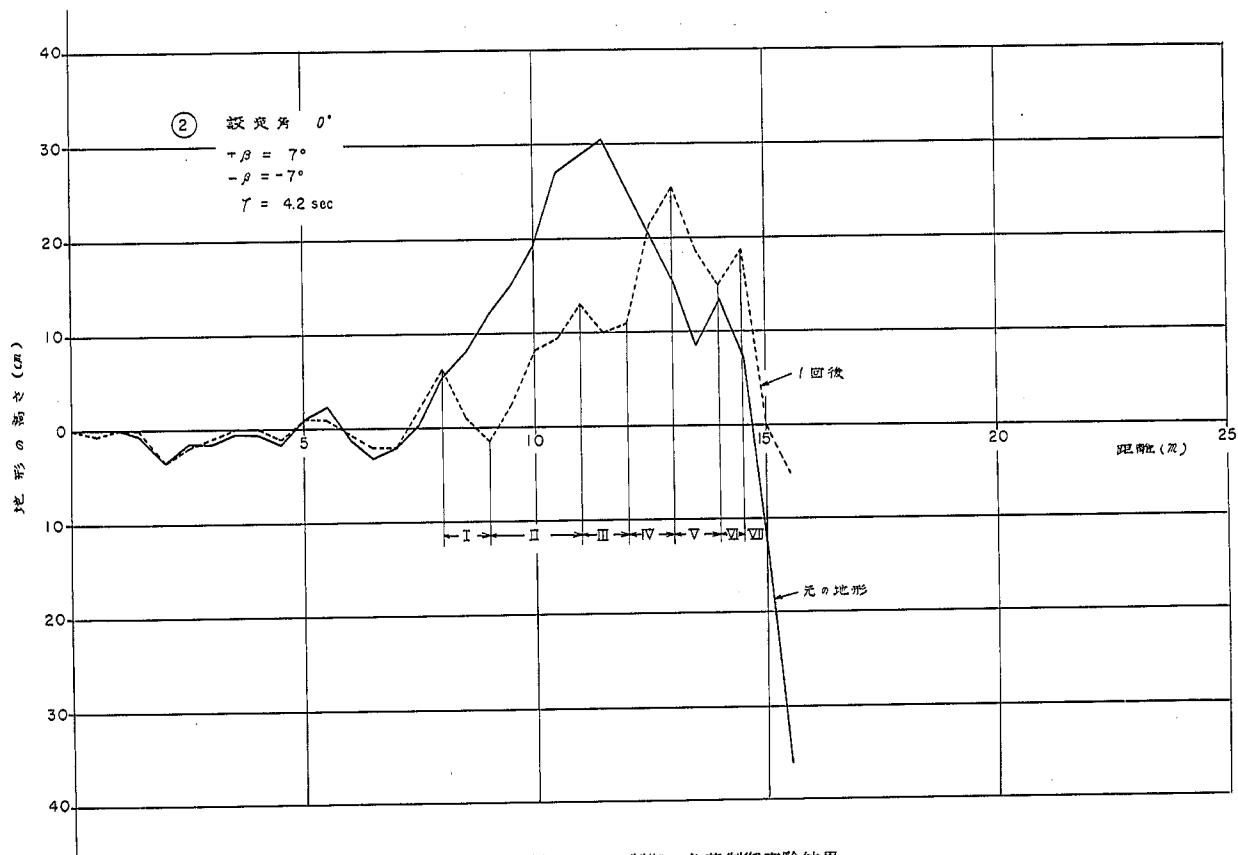


図 8-8 (2) レベル制御 負荷制御実験結果

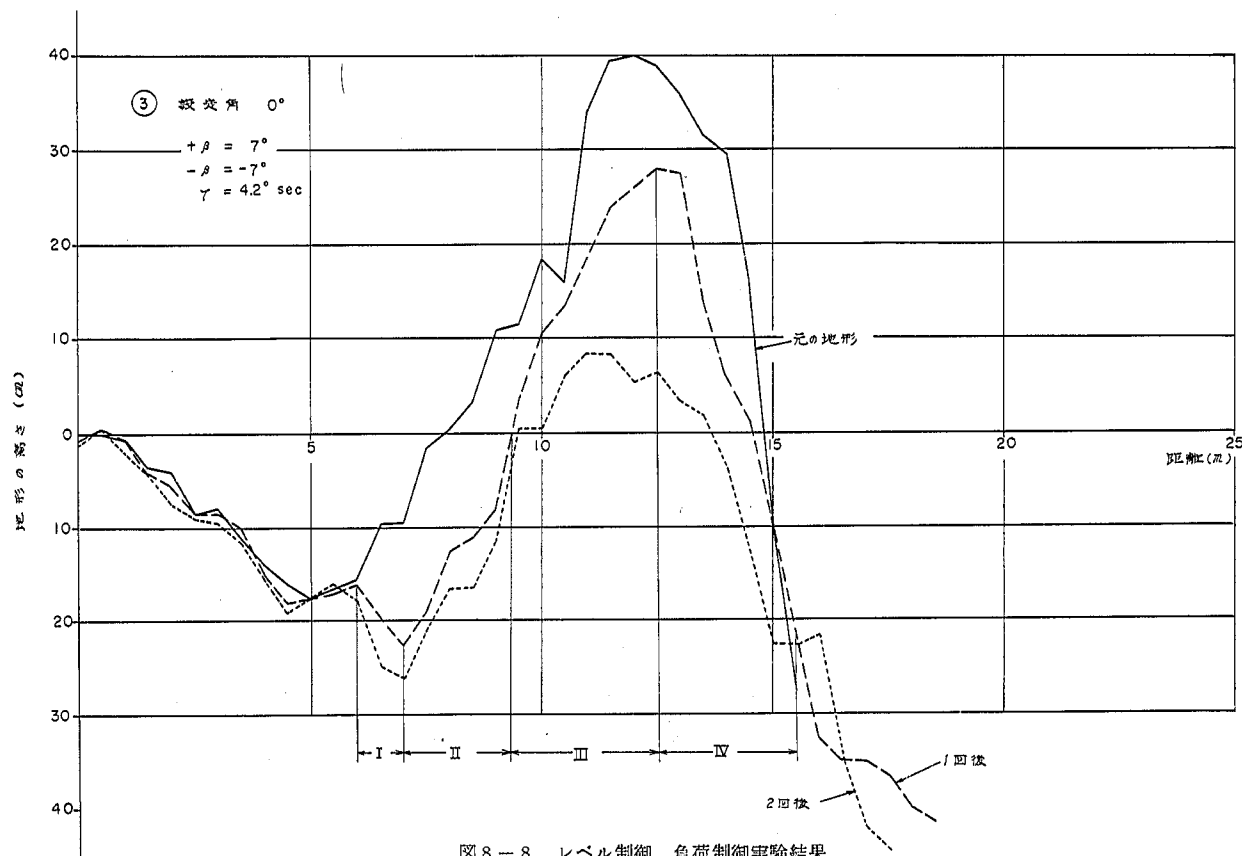


図8-8 レベル制御 負荷制御実験結果

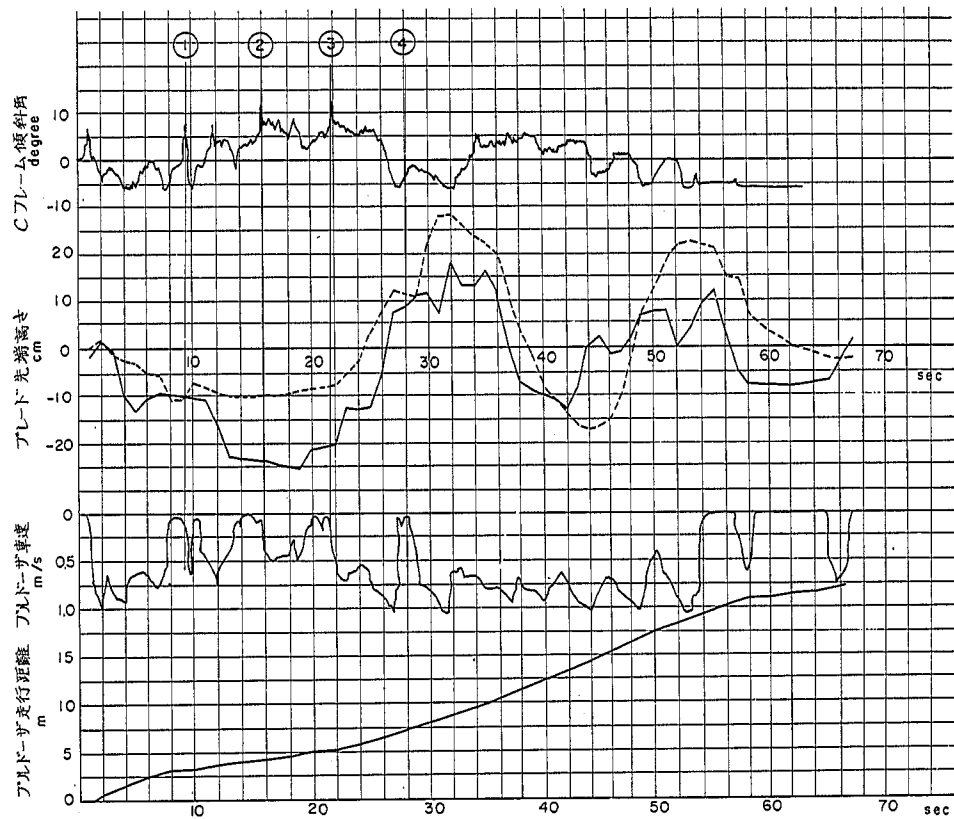


図 8 - 9 制御時各部検出値

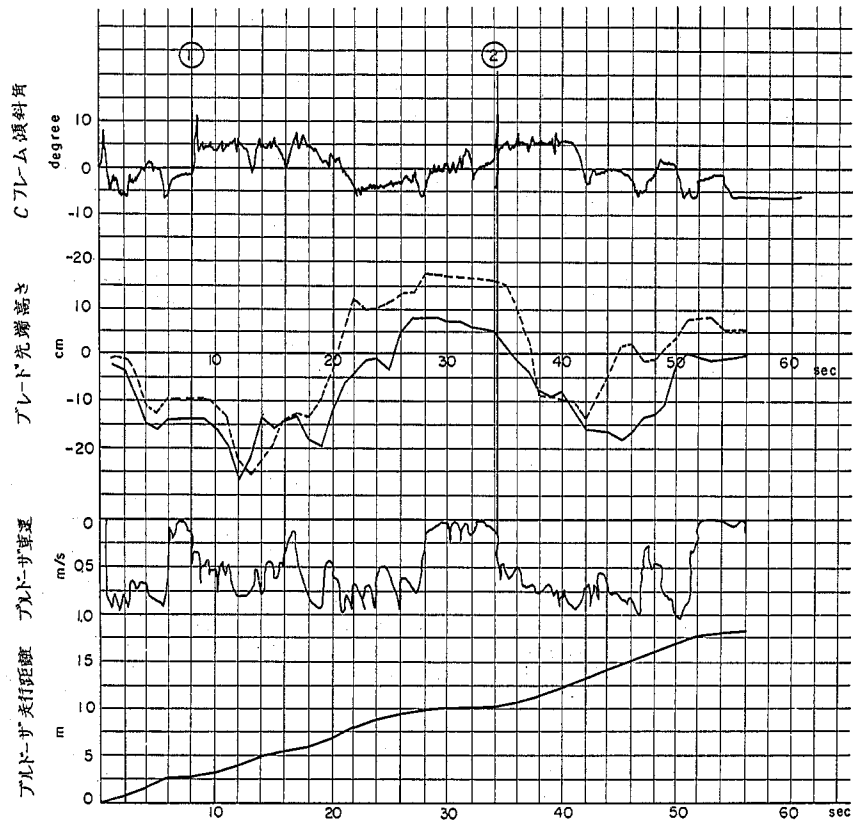


図 8 - 1 0 制御時各部検出値

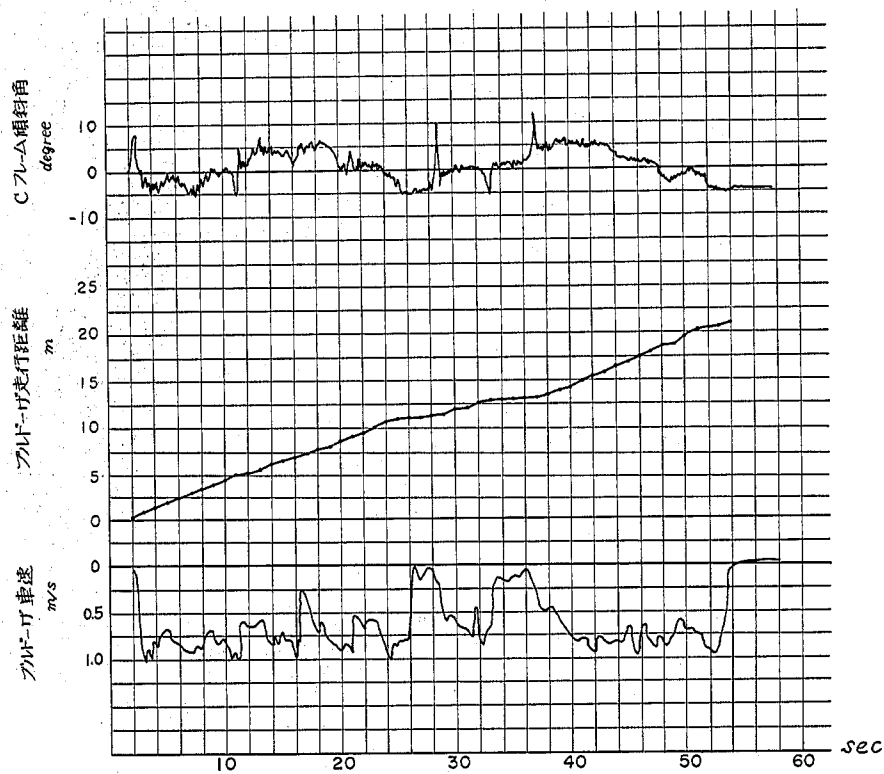


図8-11 制御時各部検出値

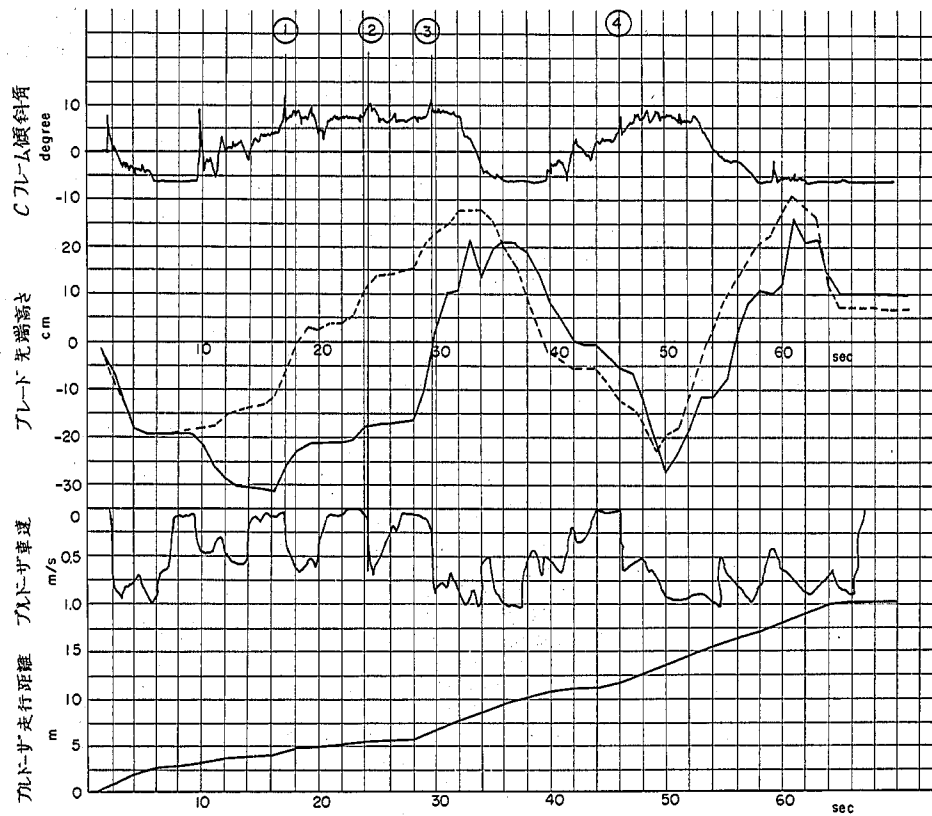


図 8 - 1 2 制御時各部検出値

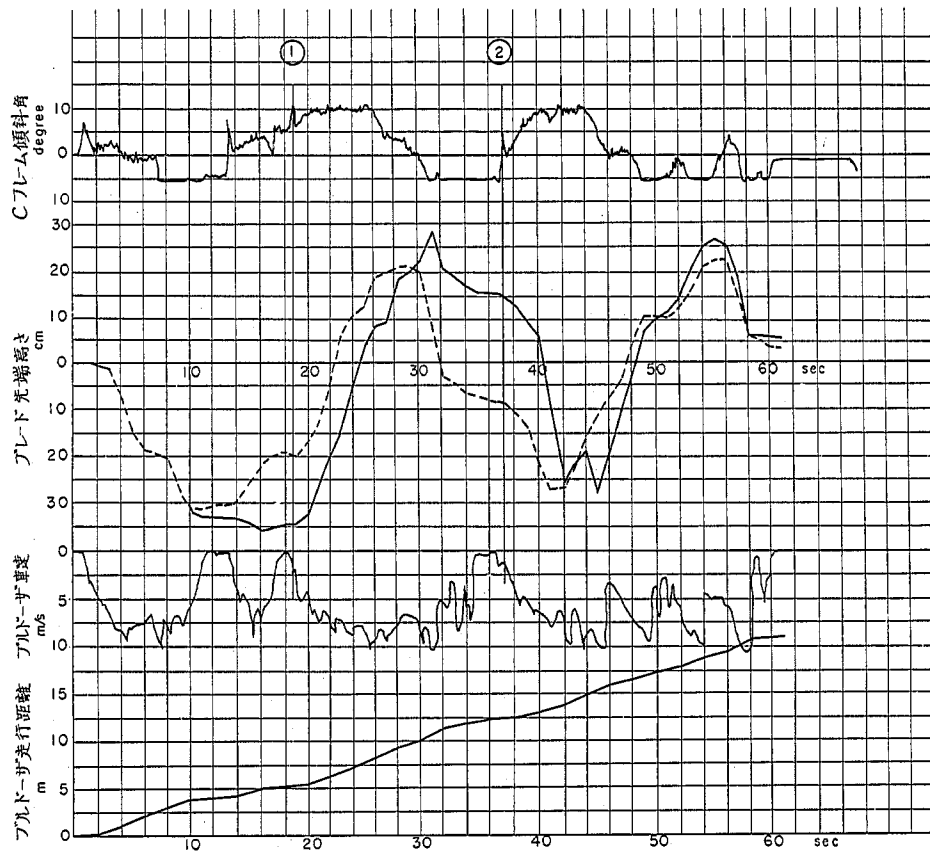


図 8 - 1 3 制御時各部検出値

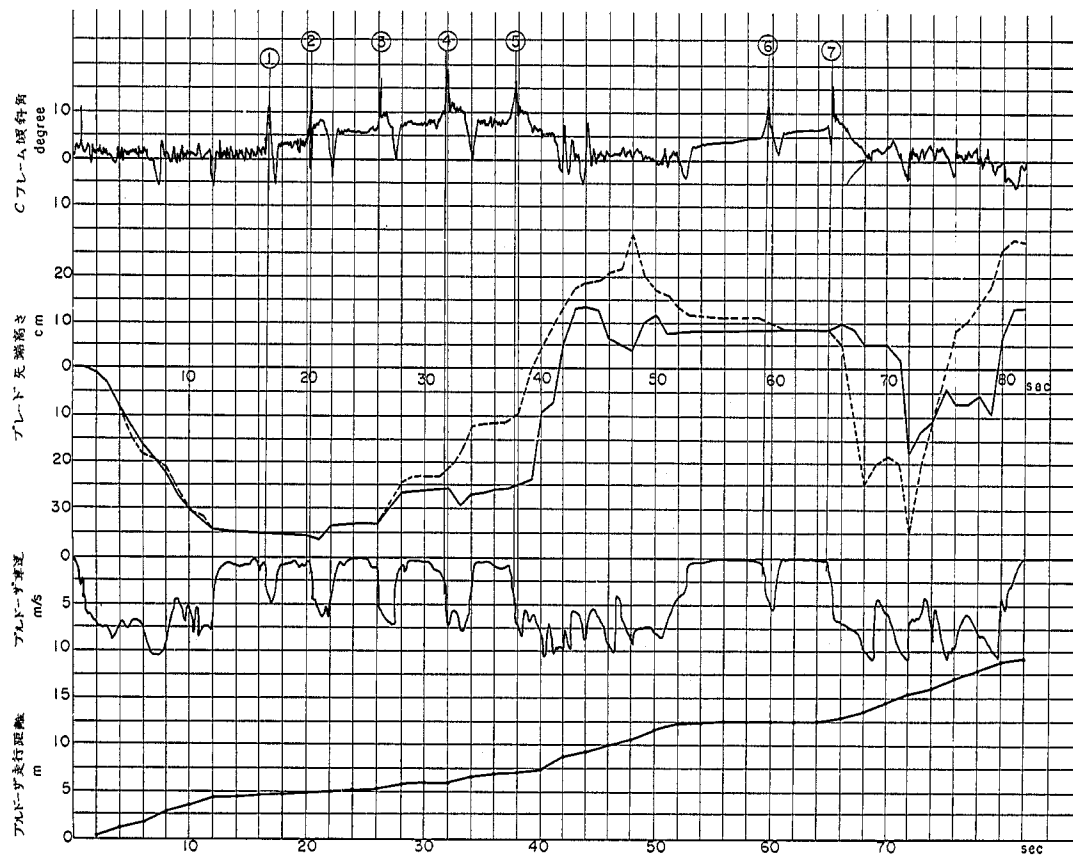


図 8 - 1 4 制御時各部検出値

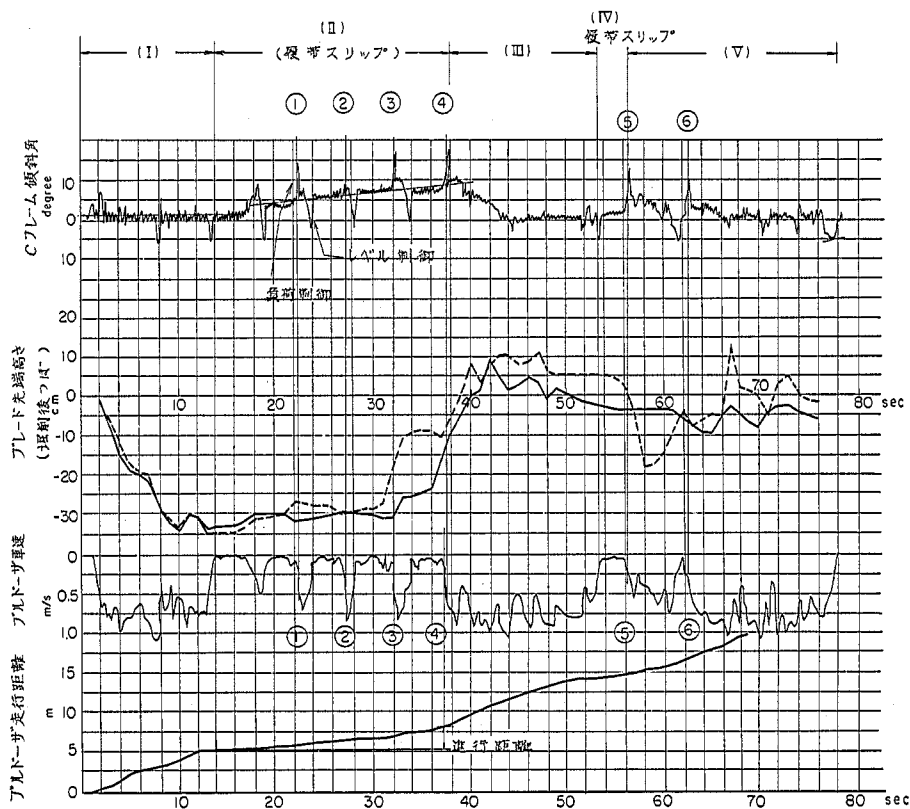


図 8-15 制御時各部検出値

これらの検出値は、制御実験前の地形の差異及び制御器の設定条件により、種々の挙動を呈しているが、代表的な一例について考察してみる。

図8-15に示すように、実験開始から14秒の間のⅠの区間は、Cフレーム角はほぼ水平を保ち、目標設定角度にならって追従している。

これは、ブレードは掘削、押土をせず水平を保っているからで、掘削後の地形が殆んど不変である。掘削前の地形が凹地になっており、又過負荷にもならずブルドーザ車速も良好な値を呈している。

次に $t=14\sim40$ secのⅡの区間では、掘削前地形が谷から山になっておりブレード前方の負荷が大きくなって、履帯がスリップしている状態である。これは、車速が0になっていること、この時点ではCフレーム傾斜角が少しずつ増加の傾向をみせていること、又、Cフレーム傾斜角制御、負荷制御により急に上げられるとブルドーザ車速は上昇する。

これは、①～④の各点のCフレーム傾斜角、ブルドーザ車速との対応をみると明らかである。すなわち車速が0になり、2～3秒たつと負荷制御が働く。これにより車速は急速に上昇している兆候が見られる。

ブレードが上がり過ぎるとレベル制御により急速にブレードを下げる動作をしている（図中フレーム傾斜角のグラフ参照）すると又、過負荷になり履帯スリップが始まり、ある時間たつと、又負荷制御が働く。

これらの収復をくり返す間に、Cフレーム傾斜角は除々に上昇してくる。

次にⅢ 3.8 秒 $<t<5.3$ 秒の区間では、ブレードが上り、ブレード前方の土の量（掘削前後のブレード先端高さの差）が小さくなり負荷が減少している。従って、車速も元に戻り増加し、かつ、負荷制御はなくなり、レベル制御により元のCフレーム設定傾斜角 0° にもどる。

この場合は又、同時にⅣで過負荷状態で履帯スリップが発生し、負荷制御を行ない、Ⅴで平衡状態を保っている。

一方、他のグラフに関しても、ほぼこれと同様な挙動を呈している。又、負荷制御の働いた点をマークすると（①～⑥）、Cフレーム傾斜角と車速はこの点がすべて対応している。

9. ブルドーザ・ブレード自動制御装置の実用性及び今後の問題点

以上の結果から判断すると、ブレードのレベル制御に関しては、適切な急速制御動作角をとることにより、地形の凹凸は、制御回数を増すごとに、収束する傾向が見出され、又ブレードにかかる負荷制御として、履帯スリップを制御する方法をとることが比較的有効であること、同時にその負荷制御装置も適切なブレード動作開始までの設定時間 T をとることにより、能率的なブレード作業の自動制御が可能であることが判明した。

このようなブレード操作の自動化したブルドーザの実用性について一つの土工作業例について検討し、かつ問題点を見出す。

(1) 図9-1は、ある地形を目標地形どおり切盛する場合の縦断面図であるが(1), (2), (3)の線、すなわち掘削地形傾斜角を θ_1 , θ_2 , θ_3 に設定し、順次切盛するもので、初期の元地形及び、目標の地形等の条件により適宜、目標設定角をプログラミングしていく方法が考えられる。

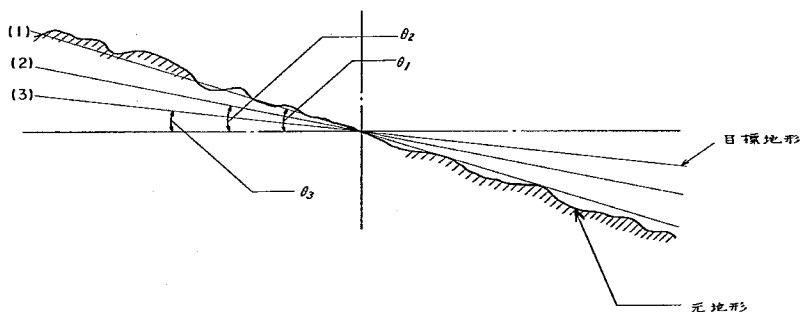


図9-1 目標地形

(2) 次の例は図9-2の地形を目標値どおり掘削、盛土する場合で、あらかじめ目標のパターンの地形にプログラミングしておき、これにならって、ブレードを自動制御させる方法である。これ

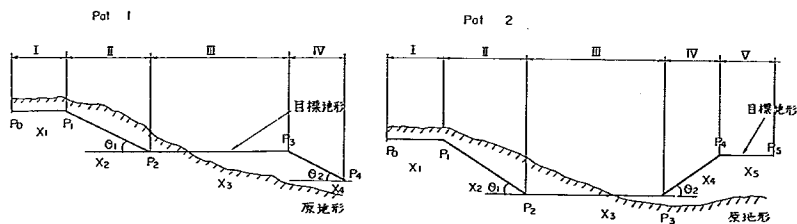


図9-2 目標地形

に関しては、次の方法が考えられる。

図9-3において、ブルドーザ本体の傾斜角 θ ，
スピードを v とすると、ブルドーザの位置 (x, z) は次式ようになる。

$$x = \int_0^t v \cos \theta dt \dots\dots\dots (9.1)$$

$$z = \int_0^t v \sin \theta dt \dots\dots\dots (9.2)$$

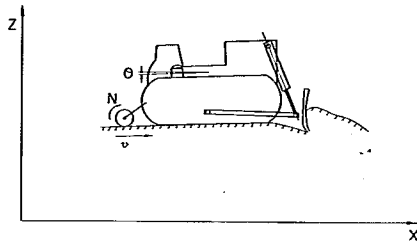


図9-3

従って、ブルドーザの走行方向の位置 x は
(9.1)式から求まる。

今、 $\theta(t)$ はベンジラムで、又 $v(t)$ は第5輪—ジュネレータでそれぞれ測定し、関数発生器、乗算器、積分器により演算し x を求め、傾斜角の設定値を自動的に変化させる方法が考えられる。すなわち

①のパターン

$0 \leq x \leq x_1$	$\theta = 0$
$x_1 \leq x \leq x_2$	$\theta = -\theta_1$
$x_2 \leq x \leq x_3$	$\theta = 0$
$x_3 \leq x \leq x_4$	$\theta = -\theta_2$
$x_4 \leq x \leq x_5$	$\theta = 0$
$x_5 \leq x$	ストップ

②のパターン

$0 \leq x \leq x_1$	$\theta = 0$
$x_1 \leq x \leq x_2$	$\theta = -\theta_1$
$x_2 \leq x \leq x_3$	$\theta = 0$
$x_3 \leq x \leq x_4$	$\theta = -\theta_2$
$x_4 \leq x \leq x_5$	$\theta = 0$
$x_5 \leq x$	ストップ

を、シーケンスに組んでおき、傾斜角の設定値を自動的に変化させることが可能である。

後はこれらの方法を平面に拡張して考えれば一応道路土工、宅地造成時の土工作業に適用できるものと考えられる。

これは平面位置の検出器の開発により可能となるもので、49年度開発を行なっている。

(3) 自動ブレード制御の問題点

前述したレベル制御、負荷制御を総括したブレード制御は、ブレードのCフレームの傾斜角を設定角どおり追従させることを目標とし、かつ過負荷の場合には一たん負荷を減少させるためにCフレームを上昇させ、定常の負荷になったら又元の設定傾斜角に追従させる方法をとったものであるが、ブル本体の高さ方向の変位、すなわち、トラクションの高さに変化すると目標としたレベルが一

様に変位してしまう欠点がある。

このように絶対高さを目標値とした場合は、ペンジュラムによる傾斜角制御だけでは絶対レベル制御は行えず、ここで絶対高さ検出装置が必要になってくる。

絶対高さ検出装置には次に示す種々の方式が考えられる。

- ① K.K日立方式 ; シュー方式
- ② K.K日特方式 ; 光電方式
- ③ 第5輪——傾斜角; 積分演算方式
(車速)
- ④ レーザ, ビーム式; ②の応用

10. 結 論

以上の試験調査の結果からブルドーザ（特にブレード）の自動化に関して次のことが解明された。

(1) ブレードCフレーム傾斜角検出装置に、バーチカルジャイロを使用したところ、始動時の横方向の加速度には殆んど影響されず、且つ応答性も良好であった。

(2) 制御性の問題として、フローコントロールバルブによる微小比例制御よりも、むしろ急速ON、OFF制御の方が良好となること、制御動作角が 2° 程度が最も制御性が良いこと等が解明された。

(3) 負荷制御としては、履帯スリップを防止する制御方法をとることによりブルドーザの作業が円滑化され、履帯スリップ検出からブレード上昇動作までのホールド時間が制御性に影響してくることが判明した。なお、 $\pm 20\text{cm}$ の凹凸の地形では、ホールド時間は2秒程度が適正であることが判明された。

(4) 傾斜角制御と負荷制御双方によるブレード総合制御を行なったところ、制御作業回数を増加させると $\pm 30\text{cm}$ 程度の初期地形は $\pm 5\text{cm}$ 程度に収斂する傾向が見出せた。

11. あ と が き

本報告書は、昭和47年度の報告書（第1報）に引き続き昭和48年度実施したブルドーザブレード操作の自動化、特に負荷制御装置の開発の成果について記載したものであるが、10の結論にも述べたように、適正なブレード動作設定角及び、スリップ検出時からブレード動作までの適正なホールド時間を設定することにより、制御性の向上が見出された。しかし、ブレード先端の絶対レベル制御を行なうための絶対位置検出方法、及び検出装置の開発、また、制御判断部としての土工システムの開発等下記の項目の検討及び開発が今後残された問題である。

- (1) ブレード先端部、絶対標高検出方法の開発
- (2) ブレードの制御目標値の設定方法の開発
- (3) ブルドーザ平面位置検出方法の開発
- (4) ブルドーザによる土工システムと自動化対策の問題
- (5) 自動ブルドーザの経済性
- (6) 自動ブルドーザの実用性

参 考 文 献

- 1) 田中康之, 岡崎治義, 小室日出男「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) 松崎淳, 河内政隆「ブルドーザ排土板のならい式レベル制御」日本機械学会講演論文集No. 730-14(48年10月)
- 3) 戸次益雄「レベリングメータの構造と試験成績について」日特金属工業株式会社報
- 4) 磯部孝「自動制御理論」共立出版株式会社
- 5) 丹後修一「自動制御技術と建設機械自動化への応用」建設機械(Vol.7, 1971, 46年9月)
- 6) 守田友義, 薩摩林和美「ブルドーザ」産業図書
- 7) 森育雄「ダイレクト駆動系ドーザショベルのねばりについて」小松技報第18巻第1号
- 8) 磯部金治, 斉藤栄一郎, 小室日出男「ブレードによる土の掘削押土抵抗についての一考察」土木研究所資料第665号(46年3月)
- 9) 東京電機大学「自動制御の基礎」
- 10) 高橋安人「自動制御理論」岩波全書

建設機械の自動化に関する調査試験(第2報)
—ブルドーザブレード操作の自動化—

土木研究所資料第962号
昭和49年9月(1974年)

建設省土木研究所機械研究室
田中康之, 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

ブルドーザブレード操作の自動化を目標に, 実機試験機
で実験したところ, 下記のことが解明された。

1. 負荷制御として履帯スリップ防止の制御方法をとることが可能
である。
2. 両制御による試験結果 $\pm 30\text{cm}$ の初期地形は $\pm 5\text{cm}$ に収束した。



No.

10

配布先氏名

配布先住所

