



土 木 研 究 所 資 料

第 127 号

(天野アルミニウム株式会社委託)
耐食アルミニウム合金製
ガードレール実物実験解析報告書



昭和 40 年 11 月

建 設 省 土 木 研 究 所

アルミ・ガードレール
之 宛

昭和 40 年 11 月

1. は し が き

本報告書は、天野アルミニウム株式会社の委託により実施した耐食アルミニウム合金製ガードレール実物自動車衝突実験の解析に関するものである。この実験の目的は、本来我国最初アルミニウム合金製ガードレールの実物実験として、既に制定されたガードフェンス設置要綱の設計条件にできるだけ近い条件で試験を行うことにあった。実際には、要綱の設計荷重条件を実験条件において必しも満足することはできなかったが、その試験条件下では、ガードフェンスの機能を有していることは、先に土木研究所資料第 65 号アルミニウム合金製ガードレール実物実験資料(昭和 40 年 6 月)にその測定結果、実験条件、衝突時の一般的状況記述を行っておいたので、これより明らかである。ここでは、一応ガードレールの力学的基本問題に関する我々の考え方を述べ、設置要綱における検討方法をさらに進めた動的解析の立場から資料を整理し、測定結果の土木研究所資料第 65 号にもれたものをも追加して検討を加えたいと思う。土木研究所資料 65 号(以下土研資 No. 65)に既に掲載してある資料については、本報告中ではなるべく省略し、適宜引用することにする。本報告の当初主とし企図した所は、16 ミリ映画による衝突状況の完全な記録、解析とこれに対する動力学解析による検討であるが、後述のように 16 ミリによる記録は、必しも十分な成果を納めたとはいえなかった。しかしながらガードフェンスに関する動的解析は、我国においては初めての試みであり、最近の資料では、アメリカにおいても同様な研究が行われたようであるが、我々はこれと別個に独自の立場からこれを行ったものである。これによって、今回の実験程度の試験状況における車両とガードフェンスの挙動を一応明らかにすることができた。

2 ガードフェンスの基本問題

一応実物実験の単なる解析の立場をはなれて、ガードフェンスが本来どのような構造でなければならないかという点について考えよう。ガードフェンスは、単なる力学的検討のみではすまされない多くの問題を含んでおり、これについては既にその考え方を度々述べているのであるが、しかしやはりガードレールと自動車の衝突現象に関する完全な力学的検討がその解明において重要な位置を占めることはいうまでもないことである。

ガードレールの具備条件といわれる要件は、ガードレールの持つべき、力学的機能を総括的に表現するものである。

1. 路外逸脱の防止
 2. 衝突時における乗員および物的損害の極小化………これはしばしば1によって要求される所と相反する機能をもたねばならぬことになる。
 3. 離脱後において他交通に障害を与えないこと。
- これをさらに詳しく分類すれば次のようになる。

1. 路外逸脱発生の条件

次の1～4による車両の乗越し、あるいは突破

1. 支柱部の破壊
 1. 土の破壊
 2. 支柱の破壊
 2. レールの破壊（破断）
 3. 支柱、レールの倒壊
 4. 許容される以上の偏位の発生
 5. 車両の側方転倒
- ### 2. 乗員、物件に対する被害発生の条件
1. レールが剛なため発生する大きい減速度
 2. ポストが剛なために発生するボクシング
 3. 端末に対する衝突の場合の危険性
- ### 3. 離脱時における再衝突発生条件
1. 運動をそのまま継続する場合

2. 停止乃至は車道内への横転

これらの力学的検討要件の他、交通及び道路環境に対する最適性、施工の難易を含めた経済性について検討されねばならないことはいうまでもない（これらの中の若干については既に別の機会に述べた通りである）。この様に、ガードレールの設計の適否の検討は、極めてパラメーターの多い困難な問題であるといわざるをえない。すなわち、比較的实验条件が完全にコントロールしがたい、僅か数回の実物実験からそのガードレールの一般的な適否あるいは評価を議論することは、相当な冒険をとまなうといってもよいといえる。今日までに行われてきたそれと同様の試験レベルの結果は、はしがきに述べた通り土研資 No.65 において報告された通りであるので、以下においては、ガードフェンス—自動車系衝突現象の動的各析によって、少数の実験例の解析を、数値解析モデルによってより一般化することを試みることにする。

ガードレールの動力学的問題に対する最初の接近は、Jones Hopkins 大学の Roberts Ayre, Joel I. Abrams 等によって行われた。彼等は模型実験を行うに当り、自動車の運動方式を

$$\begin{aligned}\frac{W}{g} \frac{d^2 x}{dt^2} &= D \cdot \cos \theta - (L_1 + L_2) \sin \theta + R \cos \phi \\ \frac{W}{g} \frac{d^2 y}{dt^2} &= D \cdot \sin \theta - (L_1 + L_2) \cos \theta + R \sin \phi \dots\dots\dots (1) \\ \frac{W}{g} \rho^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} &= - (L_1 l_1 + L_2 l_2) + R \cdot r\end{aligned}$$

とおいた。しかしこれらの式を直接解くことを試みず、模型と実物間の相似律を導入して、模型から実物における現象を類推したのであった。他方、我国においては、近藤政市により、自動車の平面運動に関する広汎かつ詳細な研究が行われている。この2者の研究成果を参照するならば、数値解析的手段によって自動車—ガードフェンス系衝突現象を解明することが充分可能であると考えた。特に、システム構成材料の差異による自動車及びフェンスの挙動の変化に關して（今回の場合特に問題となる）、一層の理解を深める手だてになると考えられる。先に述べたガードフェンスの検討諸条件を理論的に解明するために

は、この様な解析に際して、現象を3次元的にとらえることが必要であることは明らかである。すなわち、自動車の3つの軸に関する直線運動、3個の回転運動とこれに應ずるガードレールの挙動を解かねばならない。これはかなり難しい問題であると考えられるので、R. Ayre 等及び、近藤政市の解析にならい、先ず水平面内の2次元運動として現象を検討することにする。

自動車がガードレールに接触し、これを外方に押しつつ前進している場合の平面運動は、次のような連立微分方程式にかける。自動車は剛体と仮定し、これに働く外力は、ガードレールからの反力、タイヤからのコーナリングフォース、ころがり摩擦抵抗のみとする。自動車の駆動力は、今回の実験における試験条件では、自力走行を行わなかったから、これを0とする。風荷重もこれを無視する。

R. Ayre 等にならい、衝突開始の瞬間の自動車の車体の中心線の方角を ϕ 軸に、それと直角に y 軸をとり、そのときの重心位置を原点にとる。(図-1)

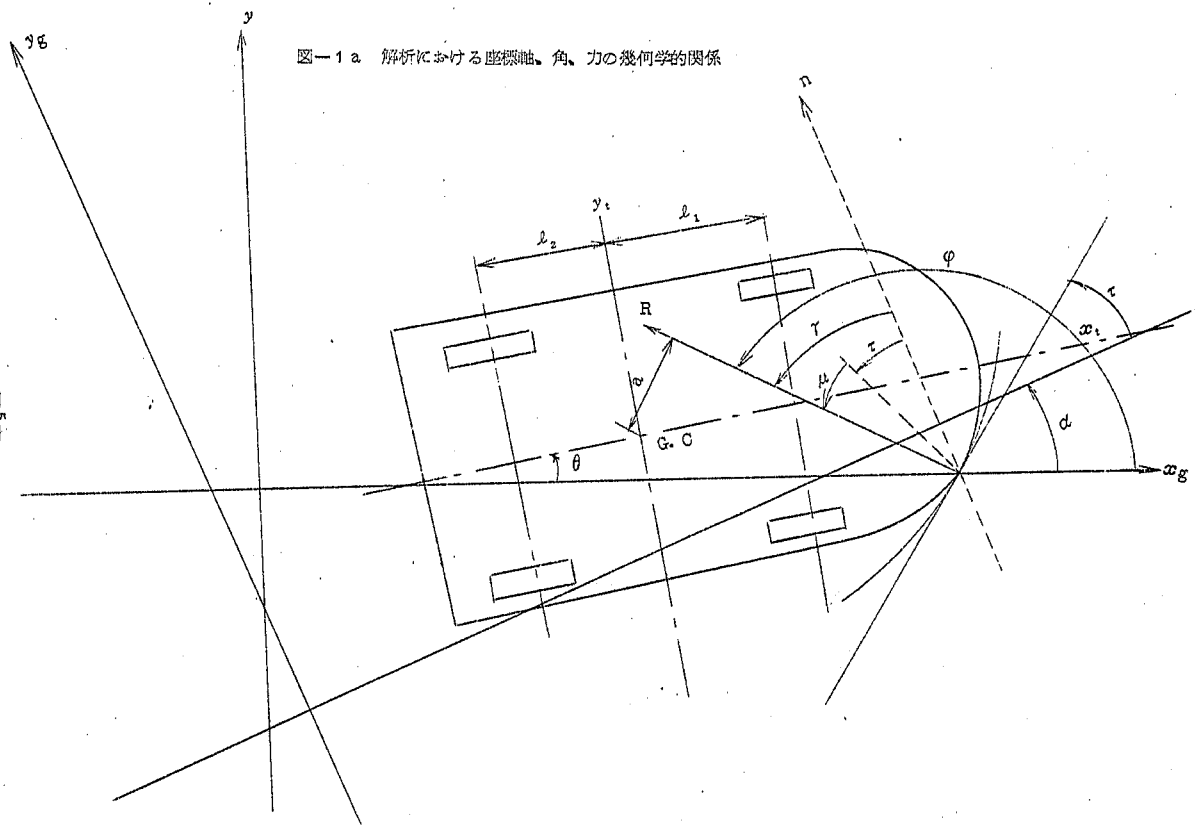
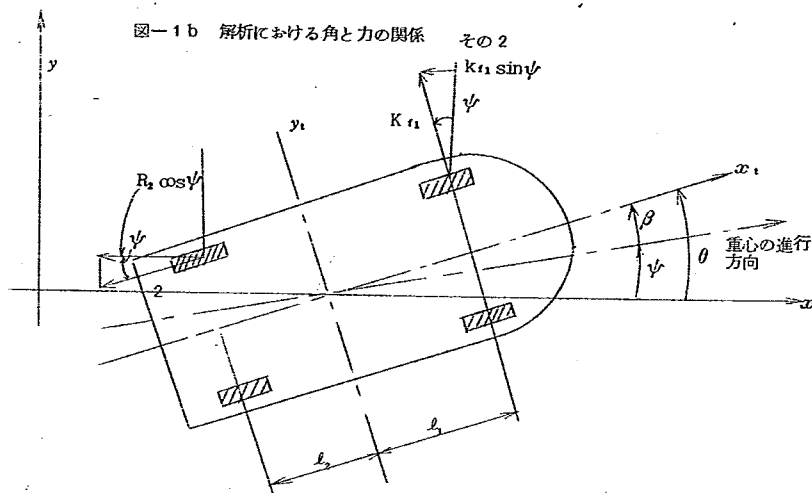


図-1 a 解析における座標軸、角、力の幾何学的関係



$$\begin{aligned} \frac{W}{g} \frac{d^2 x}{dt^2} &= -2K_{t1} \sin \psi - 2K_{t2} \sin \psi - 2R_{t1} \cos \psi \\ &\quad - 2R_{t2} \cos \psi + R \cos \varphi, \\ \frac{W}{g} \frac{d^2 y}{dt^2} &= 2K_{t1} \cos \psi + 2K_{t2} \cos \psi - 2R_{t1} \sin \psi \\ &\quad - 2R_{t2} \sin \psi + R \sin \varphi, \\ \frac{W}{g} \rho^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} &= 2K_{t1} \cdot l_1 \cdot \cos \beta - 2K_{t2} \cdot l_2 \cdot \cos \beta \dots\dots\dots (2) \\ &\quad + sn \cdot R \cdot a - Cm \dot{\theta} \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \frac{W}{V} \frac{d \theta}{dt} \end{aligned}$$

$$Cm \dot{\theta} = -\frac{2}{W} \frac{(K_{t1} l_1^2 + K_{t2} l_2^2)}{l_1 l_2},$$

$$\beta = \theta - \psi,$$

$$K_{t1} = k_{t1} (\beta + ds), \quad K_{t2} = k_{t2} \cdot \beta,$$

$$R_{t1} = 0.024 (1.0 + 0.16 (\beta + ds)^2) W_t / 2.0,$$

$$R_{t2} = 0.024 (1.0 + 0.16 \beta^2) W_t / 2.0.$$

とて、

t : 時間

x : 原点からの x 方向への自動車重心の移動距離
 y : 原点からの y 方向への自動車重心の移動距離
 θ : 自動車車体中心線の x 軸となす角
 ψ : 自動車重心の進行方向が x 軸となす角
 β : 自動車の横すべり角
 φ : 自動車の車体がガードフェンスから受ける反力が x 軸となす角
 δs : 操舵角
 W : 自動車の全重量
 W_f : 前車軸重量
 W_r : 後車軸重量
 K_{t1} : 前輪のコーナリングフォース
 K_{t2} : 後輪のコーナリングフォース
 R_{t1} : 前輪のころがり抵抗
 R_{t2} : 後輪のころがり抵抗
 k_{t1} : 前輪のコーナリングパワー
 k_{t2} : 後輪のコーナリングパワー
 V : 重心の速度
 G_{md} : 減衰係数
 R : ガードレールの車体に及ぼす反力
 a : R の自動車の重心に関する腕長
 sn : 符号
 l_1 : 重心、前輪車軸間距離
 l_2 : 重心、後輪車軸間距離
 ρ : 自動車の慣性半径

R. Ayre 等の与えた微分方程式では横方向力として与えられている L_1 , L_2 は、実はいわゆるコーナリングフォースでなければならない。 R はガードレールから自動車に与えられる反力で、これは、自動車の位置、姿勢、ガードレールの力学的な性質、すなわちシステム (連続梁、単純梁、ロープ、壁 etc.)、材料の弾、塑性係数、土の力学的性質等の関数である。ガードレールの動力学の主要点は、この R を如何に考えるにかかっている。我々はこれを車体の一点

に働くものとし、レールは塑性変形をする単純梁（連続梁効果は係数で導入する）、支柱は変位を y 、外力を P_p としたとき、 $P_p = k_p y_p^{1/n}$ (3)
なる n 乗べき形の変形－荷重関係を満足する性質をもつものと仮定した。なお
タイヤに働く諸力は、車軸が車体中心線と交わる点に働くことと仮定している。第
3式における s_n は、着力点が後輪に移動した場合の符号の変化を導入するた
めのものである。これ等に関しては、後で別に詳述することにする。

3 材料の基本的性質、梁の曲げ試験結果の考察

3-1 レール材料の応力、ひずみ曲線の検討

ガードレールは大別して梁と支柱の2部分から構成され、その各々の力学的性質について知る必要がある。供試ガードレールの材料は土研資.No.65
表-2 (p19)の通りであるが、特にここに再掲すると表-1の通りである。

表-1 供試アルミニウム合金製ガードレールの材料

	I 型	II 型
レール	61ST6	63ST5
支柱	ASIST6 相当品	61ST6

先ずレール材料の引張試験における荷重ひずみ曲線、応力ひずみ曲線を図-2 a, b に示す。アルミ合金材料は明らかな2直線形をなしており、銅 (SS-41) のそれとはかなり異った曲線を示している。

アルミの弾性係数を実験使用材（アルミ合金製高速道路用ガードレール）の

図-3のA、B、C3ヶ所からとった試験片について求めると、

$$E_A = 7.15 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_B = 7.33 \times 10^5$$

$$E_C = 7.20 \times 10^5$$



図-3 試料採取位置

平均 $= 7.23 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ (ただしアルミI型、高速道路用)。

がえられる。これに対して、銅は土木構造物の設計に一般に用いられるのは、 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、実験からでは $2.03 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ がえられ、供試ガードレールの弾性係数はこれに較べて低い値を示している。

図-2-a SS41の応力ひずみ曲線

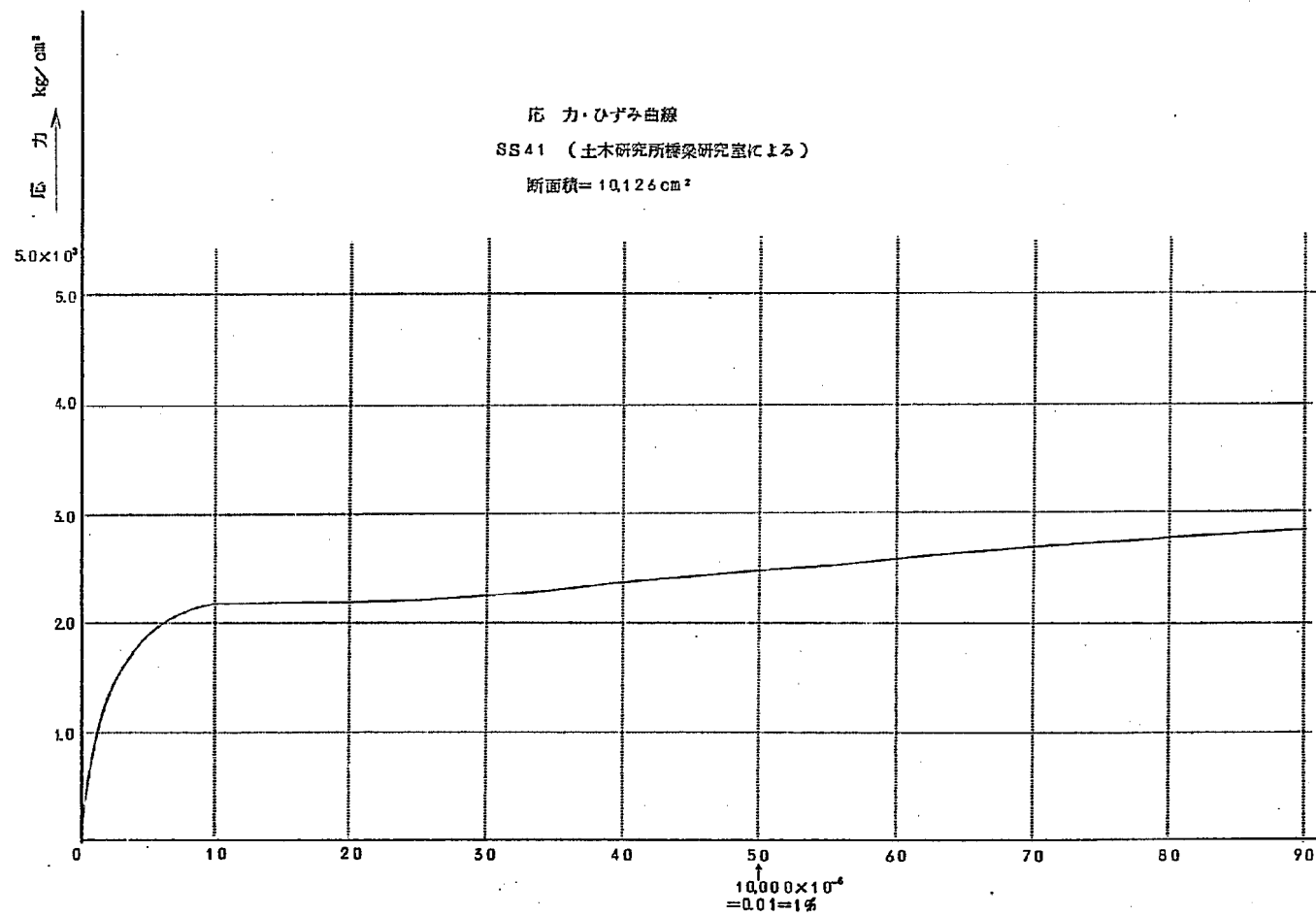
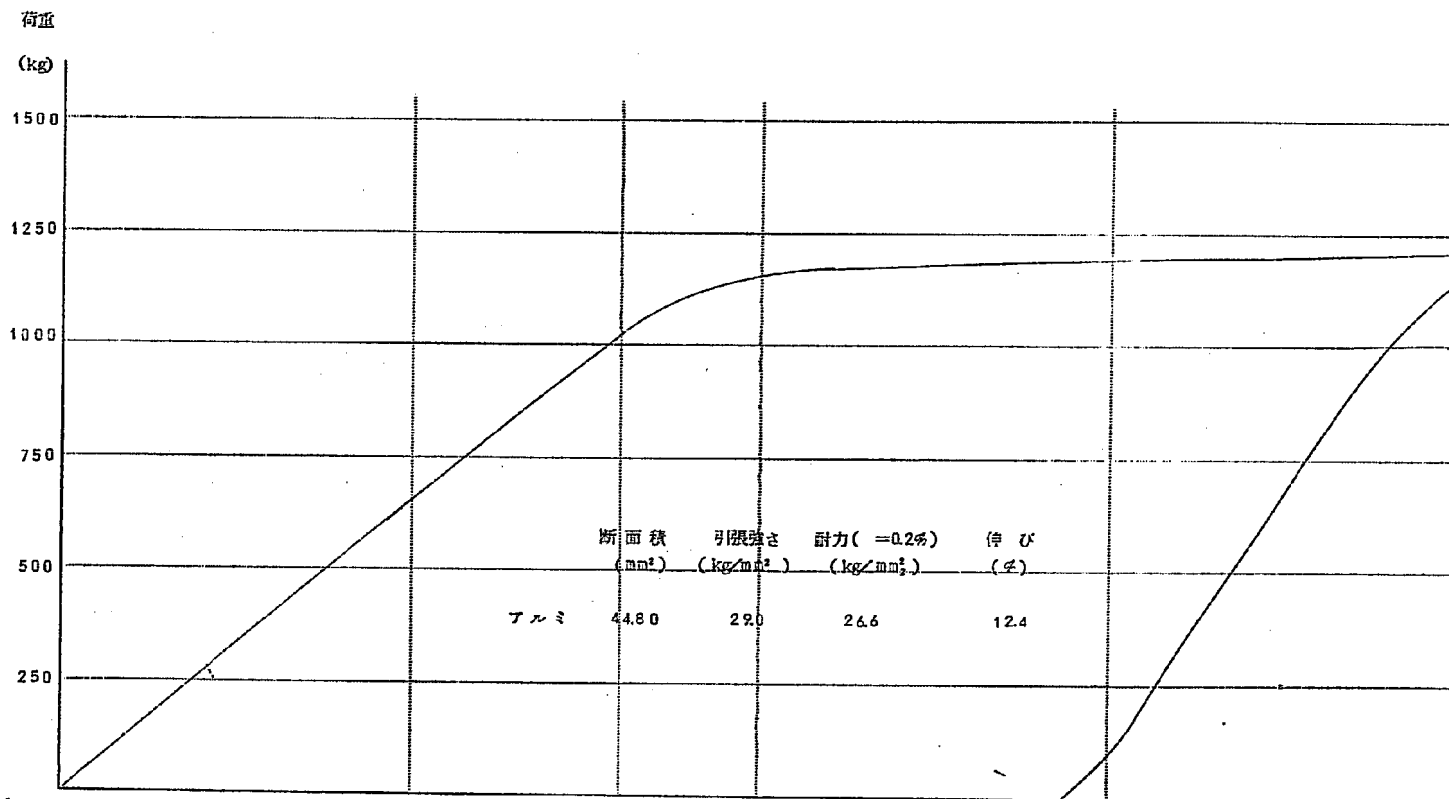


図-2-b アルミ合金の荷重ひずみ曲線



先ず、応力-ひずみ曲線に、 n 乗べき型の曲線をあてはめることを考える。
 塑性係数 F 、加工硬化指数 n を求めるために、両対数紙上に応力ひずみ曲線
 を画いてみる。

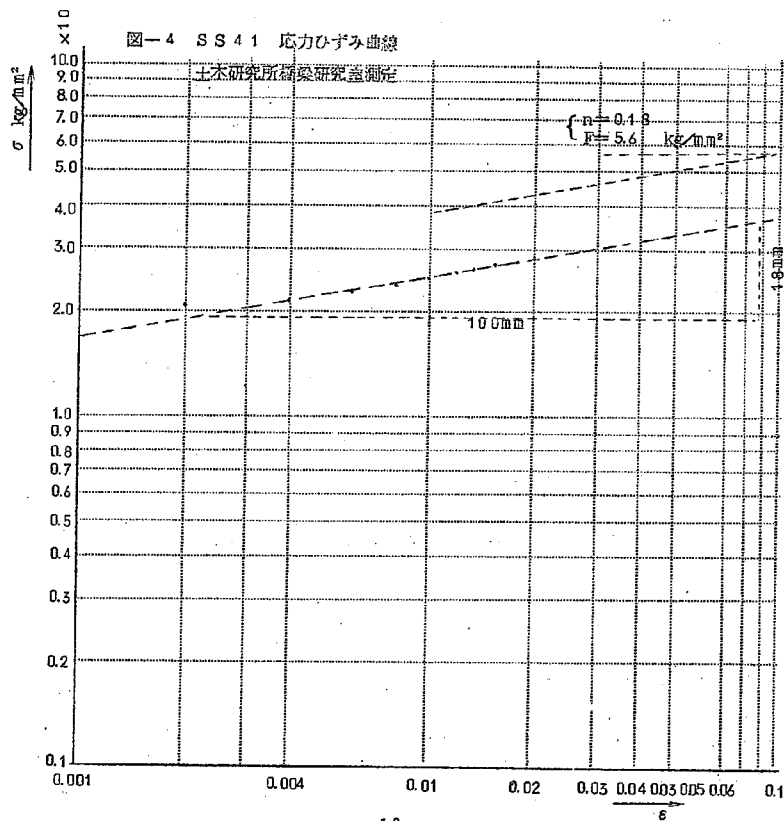
もし材料が n 乗べき型の応力ひずみ曲線を持つならば、

$$\sigma = F \epsilon^n, \quad \dots\dots\dots (4)$$

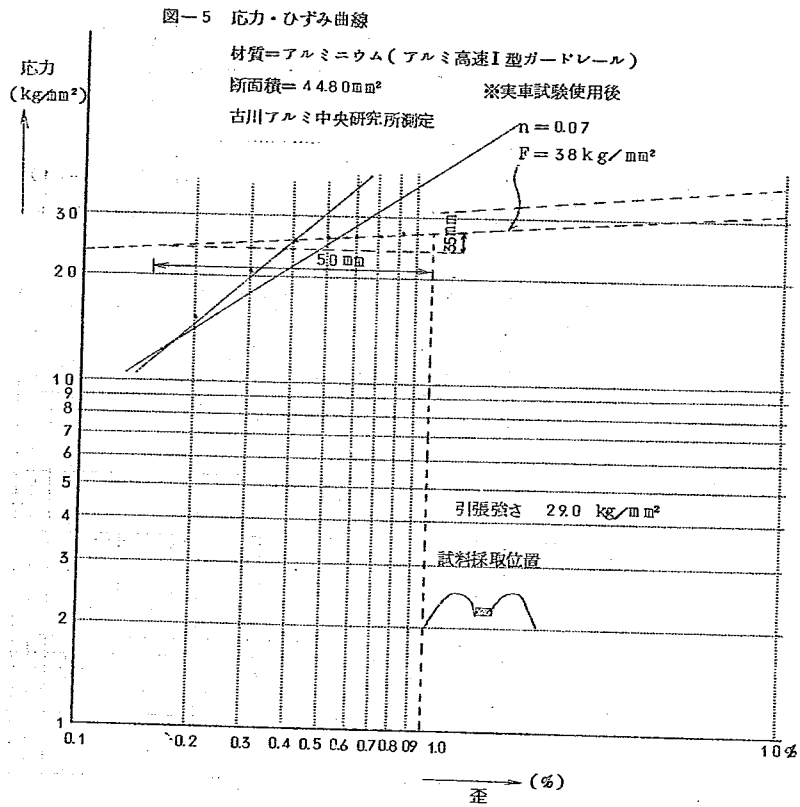
したがって、

$$\log_{10} \sigma = \log_{10} F + n \log_{10} \epsilon \quad \dots\dots\dots (5)$$

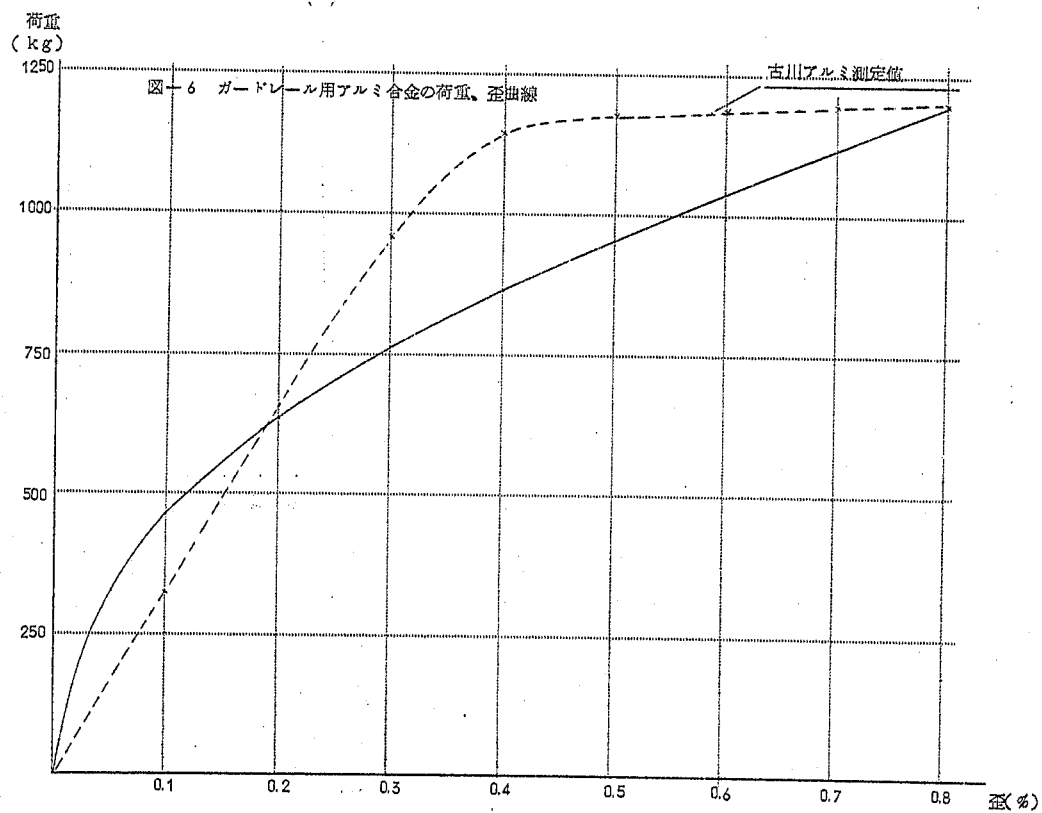
となり、両対数紙上では一直線で表現されなければならない。鋼 (SS-41)
 の場合は、図-4のごとく、図示の範囲内で良く一致しているが、一方アル



ミの場合には、2 直線に近くプロットされ一直線型で表わすには無理のあることが判る（図-5）。



(5)式から、銅については、 $n=0.18$ ， $F=5.6 \text{ kg/mm}^2$ 、アルミについては、無理のあることは明らかであるが、一応直線をあてはめると、 $n=0.45$ ， $F=22.0 \text{ kg/mm}^2$ がえられる。これらは（とくに後者は）かなり実際と異なる仮定となることは実際には、次の単純梁載荷試験結果より明らかとなった。アルミ合金に対するあてはめを、普通方眼紙にもどすと図-6の如くなる。



次に応力ひずみ曲線を2直線式であらわすことを考える。この場合、応力とひずみの関係は図-7を参照して、式(6)のごとくなる。

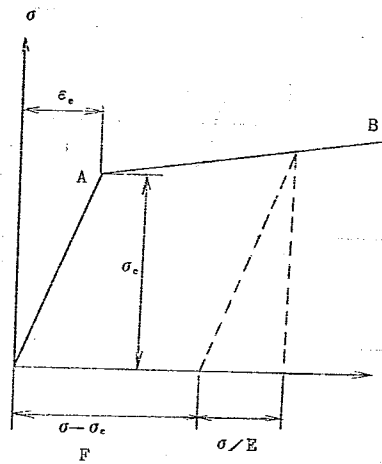


図-7 2直線型応力ひずみ曲線

$$\begin{cases} OA (\sigma \leq \sigma_0) : \varepsilon = \sigma / E \\ AB (\sigma \geq \sigma_0) : \varepsilon = \sigma / E + (\sigma - \sigma_0) / F \end{cases} \quad (6)$$

σ_0 : 降伏点応力

ε_0 : 降伏点ひずみ

E : 弾性係数

F : 塑性係数

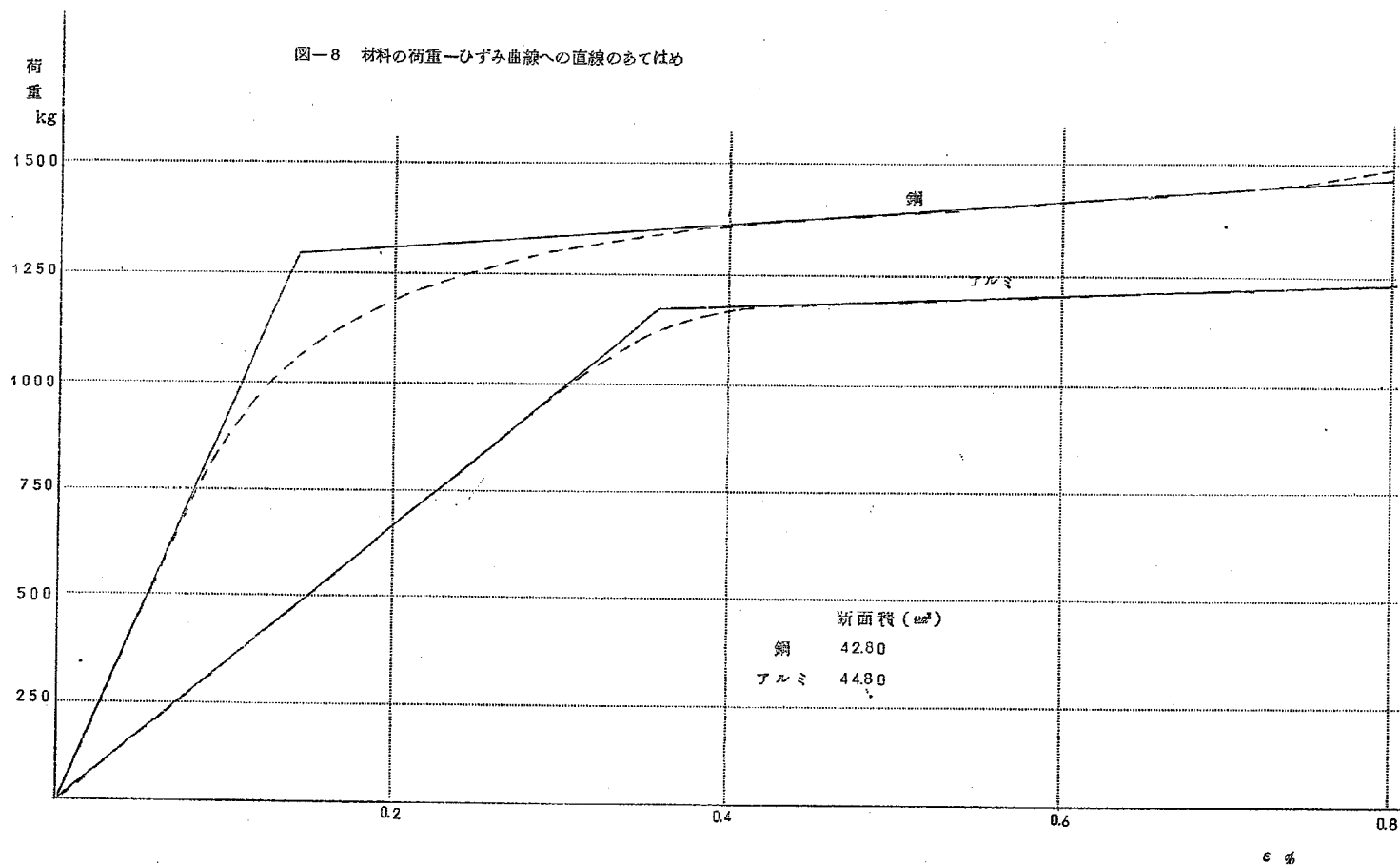
上式を書き直せば、

$$\begin{aligned} \sigma &= E \varepsilon & (\sigma \leq \sigma_0) \\ \sigma &= \lambda E \varepsilon + \sigma^* & (\sigma \geq \sigma_0) \end{aligned} \quad (7)$$

ただし

$$\lambda = F / (E + F), \quad \sigma^* = \sigma_0 (1 - \lambda) \quad (8)$$

図-8 材料の荷重-ひずみ曲線への直線のあてはめ



で λE は図-7 の直線 AB の勾配を表す。視察によりそれぞれ 2 直線をあてはめ、傾斜及び 2 直線の交点を求める (図-8)。これらから、

弾性限はそれぞれ、

$$\sigma_{e,Al} = 2610 \text{ kg/cm}^2 \quad \epsilon_{e,Al} = 0.355\%$$

$$\sigma_{e,St} = 3020 \text{ kg/cm}^2 \quad \epsilon_{e,St} = 0.142\%$$

弾性係数 E は

$$E_{Al} = 7.25 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{St} = 2.1 \text{ or } 2.03 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2,$$

塑性係数 F は

$$F_{Al} = 2.91 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{St} = 4.4 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$$

がえられる。

3-2 レールの曲げ試験結果の検討

供試高速度アルミ合金ガードレール (アルミ I 型) および鋼ガードレールの代表的ものの 2 種のレールについて、スパン 2.8 m の単純梁の中央に載荷した場合の荷重たわみ曲線について考察する。

実験結果の曲げモーメントたわみ曲線は、図-9 のようになるが、これを薄板の曲げ理論による理論曲線と比較してみる。

塑性薄板の単純曲げ理論において、純粋引張りおよび純粋圧縮の際の応力とひずみの関係が、

$$\sigma = \sigma(\epsilon) \quad \dots\dots\dots (8)$$

で与えられ、かつ、板の巾 b も

$$b = b(\eta) \quad \dots\dots\dots (9)$$

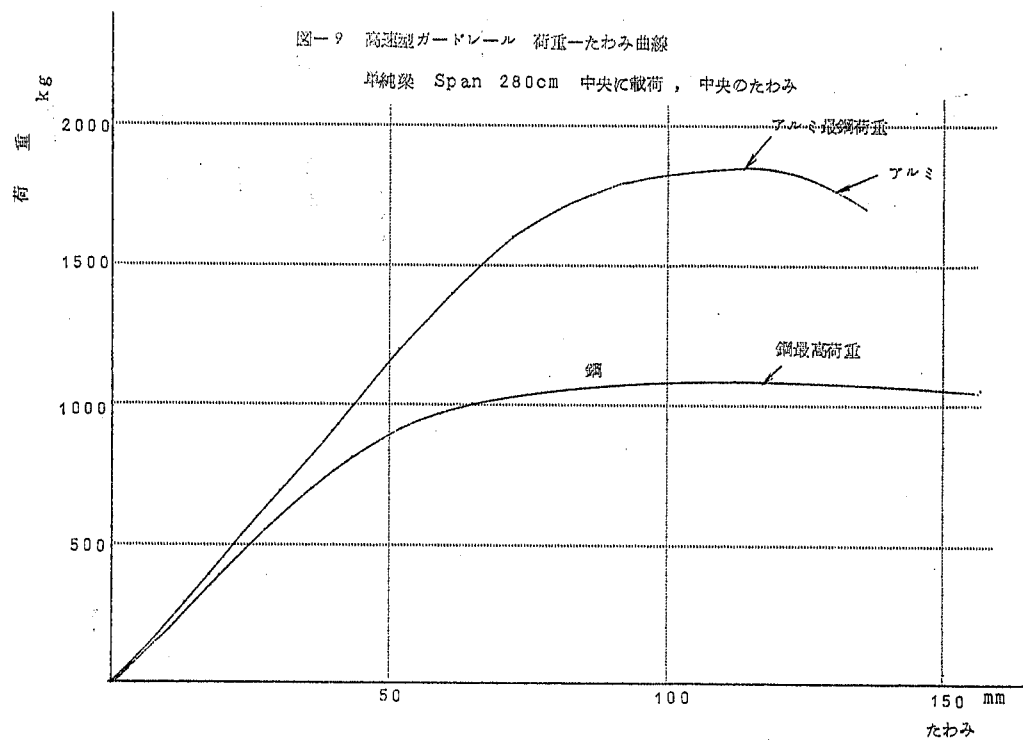
として判っていれば、断面内の応力と外力の釣合いの条件から、

$$\int_{-\eta_1}^{\eta_0} \sigma \cdot b \cdot d\eta = 0, \quad M = \int_{-\eta_1}^{\eta_0} \sigma \cdot b \cdot \eta \cdot d\eta \quad \dots\dots\dots (10)$$

とかける。

η_0 = 凸側表面の中立軸から最外センチまでの距離

η_1 = 凹側表面の中立軸から最外センチまでの距離



板厚をとすれば、

$$\eta_0 + \eta_1 = t \quad \dots\dots\dots (12)$$

これらと曲げの単純理論による

$$\varepsilon = \frac{\eta}{\rho} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ρ : 伸びのない面の曲率半径

から、任意の曲げモーメントに対して、 ρ , η_0 , η_1 等がとける。

長方形断面の場合には、

$$\int_{-\eta_1}^{\eta_0} \sigma \cdot d\eta = 0, \quad M/b = \int_{-\eta_1}^{\eta_0} \sigma \cdot \eta \cdot d\eta \quad \dots\dots\dots (14)$$

$\eta = \rho \varepsilon$, $d\eta = \rho \cdot d\varepsilon$ を入れれば

$$\int_{-\eta_1}^{\eta_0} \sigma \cdot d\varepsilon = 0, \quad M/b = \rho^2 \int_{-\varepsilon_1}^{\varepsilon_0} \sigma \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし $\varepsilon_0 = \eta_0/\rho$, $\varepsilon_1 = \eta_1/\rho$

引張りと圧縮が等しいときには

$$M/b = 2\rho^2 \int_0^{\varepsilon_0} \sigma \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon \quad \dots\dots\dots (16)$$

となる。

(a) 応力-ひずみ線図を

$\sigma = F \varepsilon^n$ で近似させる場合 (矩形薄板を仮定)

これは ε についてとけば

$$\varepsilon = (\sigma/F)^{\frac{1}{n}}, \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\therefore \frac{M}{b} = 2\rho^2 F \int_0^{\varepsilon_0} \varepsilon^{1+n} d\varepsilon = \frac{2\rho^2 F}{2+n} \varepsilon_0^{2+n} \quad \dots\dots\dots (18)$$

M : モーメント

となる。 $\epsilon_0 = t/2/\rho$ を代入すれば、

$$M = A \left(\frac{1}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$A = \frac{2 b F (t/2)^{2+n}}{2+n}$$

これを $\frac{1}{\rho}$ についてとくと、

$$\frac{1}{\rho} = \left(\frac{M}{A} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \dots\dots\dots (20)$$

となる。

曲率が比較的小さいと仮定して、 $\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 y}{dx^2}$ とし、これを2回積分すれば、荷重とたわみの関係がえられる。図-10のように単純梁の左端からaの距離に集中荷重Pのある場合には、座標を図中に示すようにとると、

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} &= \left\{ \frac{P(l-a)x}{A \cdot l} \right\}^{\frac{1}{N}} = \left\{ \frac{P(l-a)}{A \cdot l} \right\}^{\frac{1}{N}} x^{\frac{1}{N}} \\ &= C_1 x^{\frac{1}{N}} \\ \frac{d^2 Y}{dx^2} &= \left\{ \frac{P \cdot a \cdot x}{A \cdot l} \right\}^{\frac{1}{N}} = \left(\frac{P \cdot a}{A \cdot l} \right)^{\frac{1}{N}} x^{\frac{1}{N}} \\ &= C_2 x^{\frac{1}{N}} \end{aligned} \right. \quad \dots\dots\dots (21)$$

一回積分するとたわみ角がえられ

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= C_1 \left(\frac{x^{\frac{1}{N}+1}}{\frac{1}{N}+1} \right) + C_3 \\ \frac{dY}{dx} &= C_2 \left(\frac{x^{\frac{1}{N}+1}}{\frac{1}{N}+1} \right) + C_4 \end{aligned} \right. \quad \dots\dots\dots (22)$$

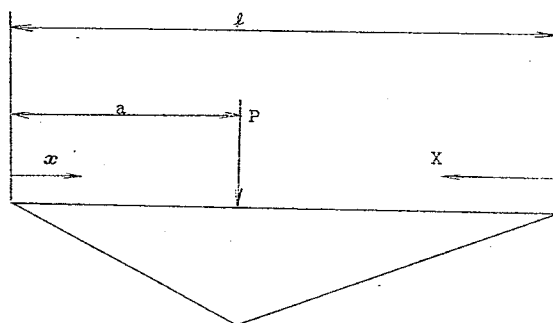


図-10 単純梁における座標

たわみは

$$\begin{cases} y = C_1 \frac{x^{\frac{1}{N}+2}}{(\frac{1}{N}+1)(\frac{1}{N}+2)} + C_3 x + C_5 \\ Y = C_2 \frac{X^{\frac{1}{N}+2}}{(\frac{1}{N}+1)(\frac{1}{N}+2)} + C_4 X + C_6 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

積分常数は次の条件から決まる。

$$x = a, \quad X = l - a,$$

$$\frac{dY}{dX} = -\frac{dy}{dx},$$

$$x = 0, \quad y = 0, \quad X = 0, \quad Y = 0, \quad C_5 = C_6 = 0,$$

$$x = a, \quad X = l - a, \quad Y = y.$$

すなわち

$$C_1 \frac{a^{\frac{1}{N}+2}}{(\frac{1}{N}+1)(\frac{1}{N}+2)} + C_3 a = C_2 \frac{(l-a)^{\frac{1}{N}+2}}{(\frac{1}{N}+1)(\frac{1}{N}+2)} + C_4 (l-a)$$

これより

$$G_4 = \frac{1}{l-a} \left\{ G_1 \frac{a^{\frac{1}{N}+2}}{(\frac{1}{N}+1)(\frac{1}{N}+2)} - G_2 \frac{(l-a)^{\frac{1}{N}+2}}{(\frac{1}{N}+1)(\frac{1}{N}+2)} + G_3 a \right\}$$

G_3 は、

$$\begin{aligned} (1 + \frac{a}{l-a}) G_3 = & -G_1 \left(\frac{a^{\frac{1}{N}+1}}{\frac{1}{N}+1} \right) - G_2 \left\{ \frac{(l-a)^{\frac{1}{N}+1}}{\frac{1}{N}+1} \right\} \\ & - \frac{1}{l-a} \left\{ G_1 \frac{a^{\frac{1}{N}+2}}{(\frac{1}{N}+1)(\frac{1}{N}+2)} - G_2 \frac{(l-a)^{\frac{1}{N}+2}}{(\frac{1}{N}+1)(\frac{1}{N}+2)} \right\} \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

からえられる。

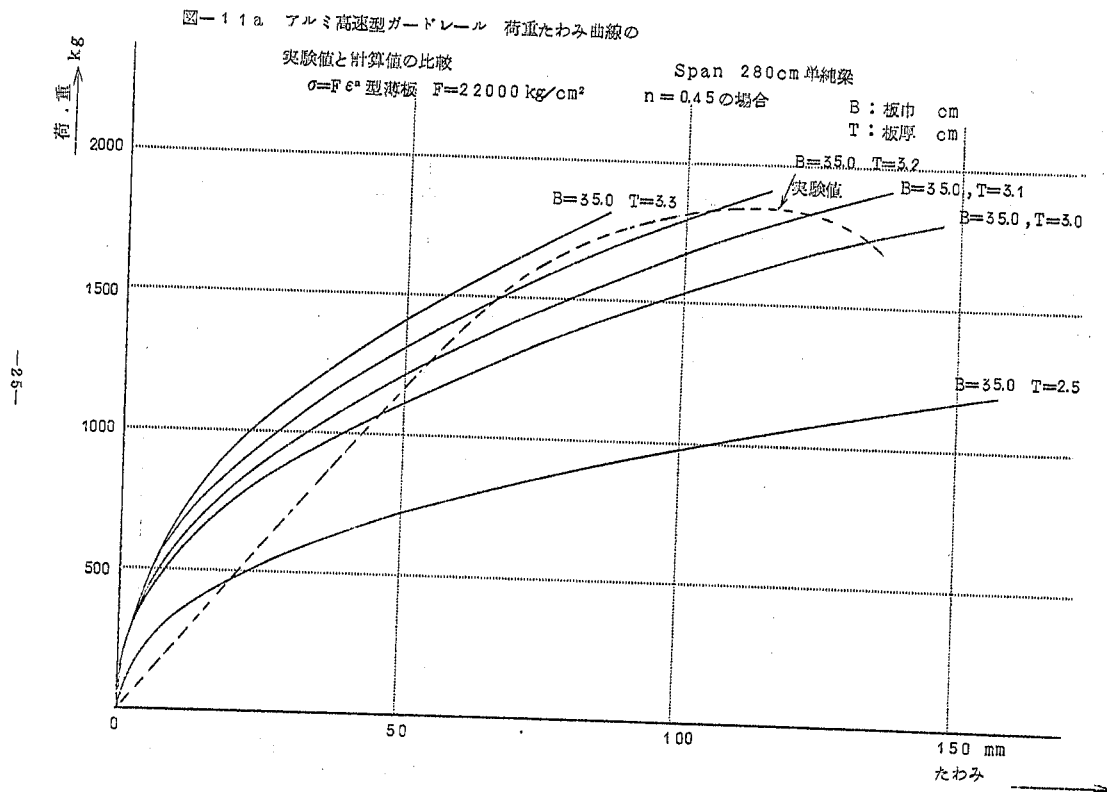
n 乗べき型薄板の一点に載荷し、荷重を一定の大きさに増加した場合の、一定の分割点でのたわみとたわみ角を求める電子計算プログラムを ALGOL でつくった(附録-1)。これによって荷重たわみ曲線図を、レールを矩形薄板とみなし、板巾を実際の板巾 35 cm に合せ、板厚を変化させて計算した場合を図にプロットしてみると、図-11 a、b のようになる。板厚の方を実際のレールの梁高に等しくして、板巾を変化させた場合は図-12 a、b のごとくなり、図-11 a、b と、荷重たわみ曲線の傾向はほとんど異ならない。

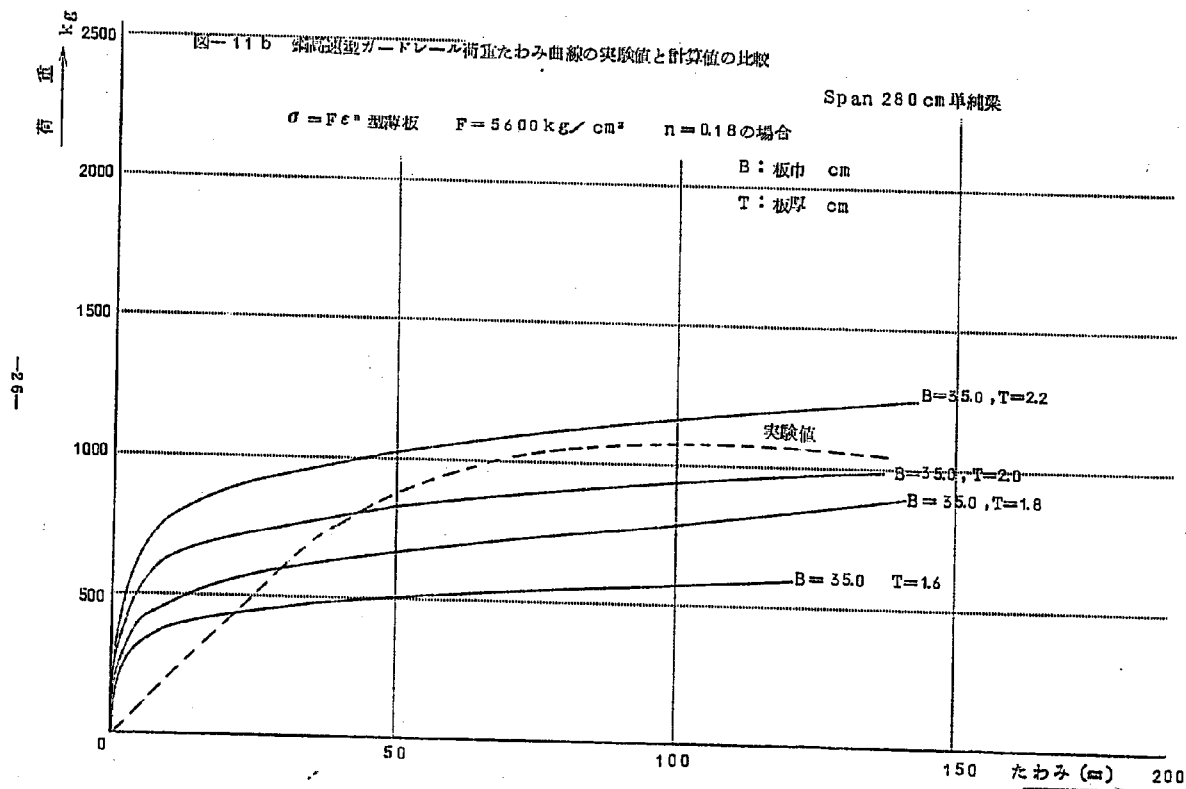
(b) 2 直線型の応力ひずみ曲線を仮定する場合

このときは断面全体が弾性変形をしている間は、曲げモーメントと曲率の関係は、

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \dots\dots\dots (25)$$

であらわされる。





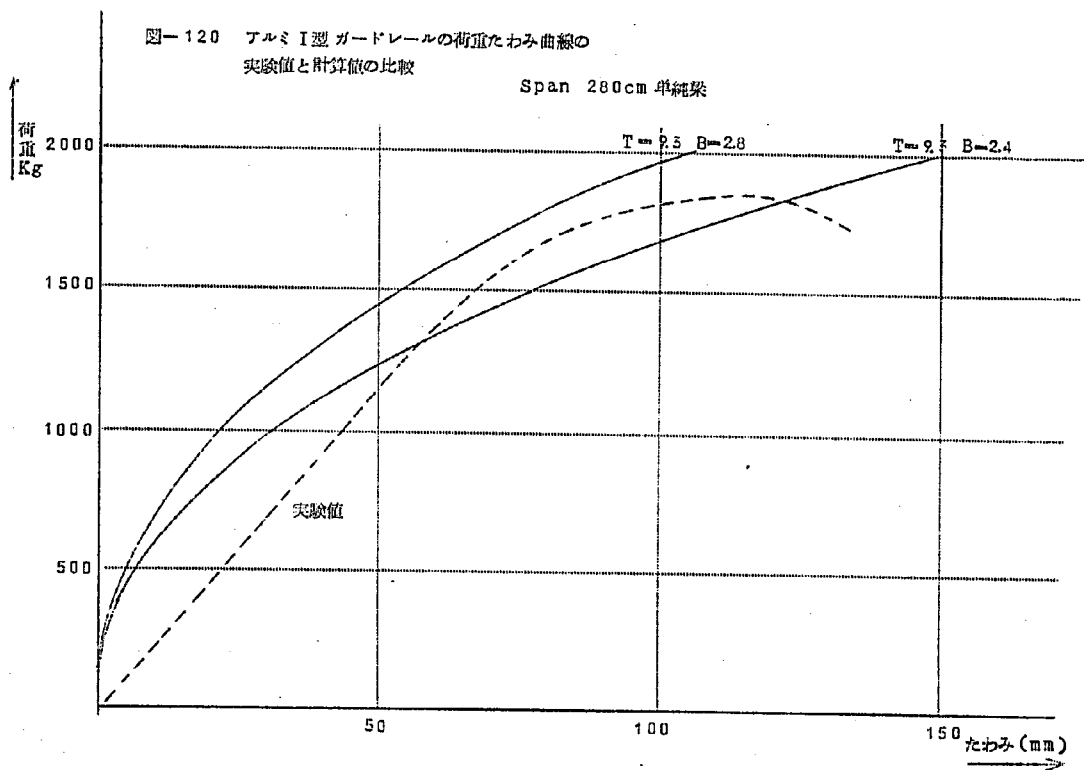
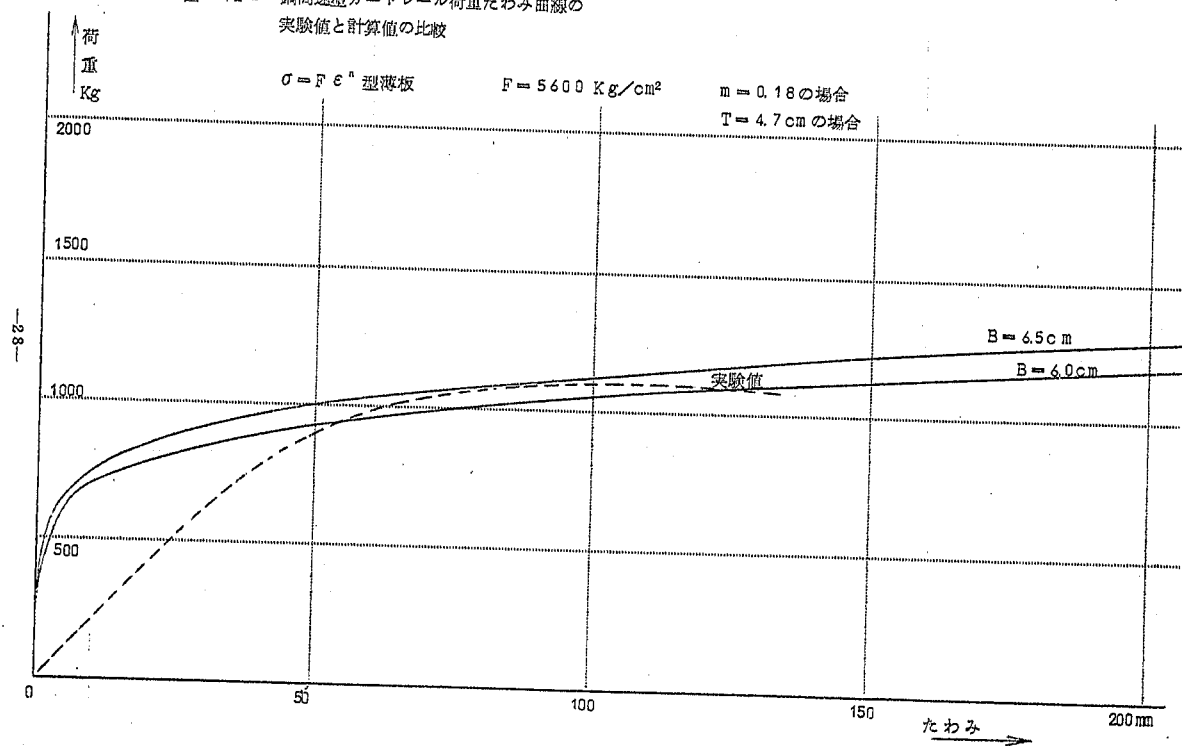


図-12 b 鋼高遮型ガードレール荷重たわみ曲線の
実験値と計算値の比較



板表面が、すでに塑性域に入った後は、

$$M = \int_{-\eta_1}^{\eta_0} \sigma \cdot b \cdot \eta \cdot d\eta, \quad \varepsilon = \frac{\eta}{\rho} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\text{と} \begin{cases} \sigma = E \varepsilon & (\sigma \leq \sigma_e) \\ \sigma = \lambda E \varepsilon + \sigma^* & (\sigma \geq \sigma_e) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\lambda = F/(E+F), \quad \sigma^* = \sigma_e \cdot (1-\lambda)$$

の関係から、 M_e を弾性限のモーメントとすると、

$$\frac{M}{M_e} = \frac{3}{2} (1-\lambda) + \lambda \frac{\rho_e}{\rho} - \frac{1}{2} (1-\lambda) \left(\frac{\rho}{\rho_e} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (22)$$

が導かれる。これは $\frac{1}{\rho}$ に関して 3 次式となり、我々の目的に対しては実用的でないので、これを $\frac{\rho}{\rho_e} \ll 1$ として、1 次式で近似すれば、

$$\frac{M}{M_e} \doteq \lambda \frac{\rho_e}{\rho} + \frac{3}{2} (1-\lambda) \quad \dots\dots\dots (23)$$

となる。2 直線形近似の場合は上式をつかい、

$$\frac{1}{\rho} \doteq \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{\rho_e} \cdot \left(\frac{M}{M_e} - n (1-\lambda) \right) \quad \dots\dots\dots (24)$$

n : 係数 ($\frac{3}{2}$ は矩形板の場合)

として Simpson 公式を用い、単純梁全スパンを 100 分割して 2 回積分し、荷重たわみ曲線を求める。ALGOL-H によるそのプログラムを附録-2 に示す。これを実際の曲げ試験結果にあてはめると、かなり良く一致している (図-13a, b)。しかしながら、鋼およびアルミ合金のいずれについても、応力-ひずみ曲線より求めたたわみは、実験値より小さくなる傾向を示す (弾性域において)。実際手計算によって弾性域についてチェックしたものを表-2 に示す。

n 乗べき型、2 直線型の両者を比較するならば、明らかに 2 直線型の応力ひずみ曲線の方が実際に一致することが判る。したがって以下の解析には、2 直線型近似を用いることにした。

図-13a アルミ高速型ガードレール荷重たわみ曲線
2直線型塑性梁のあてはめ

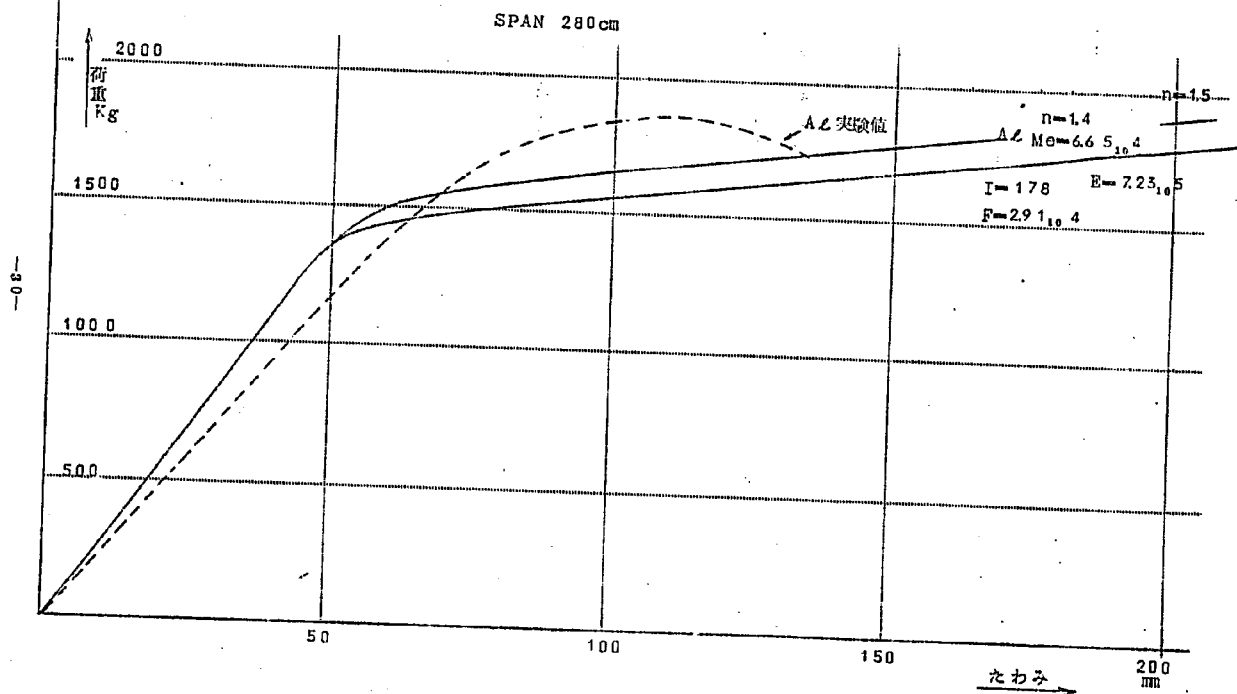


図-13 b 鋼高連型カードレール 荷重たわみ曲線

2直線型弾性梁のあてはめ

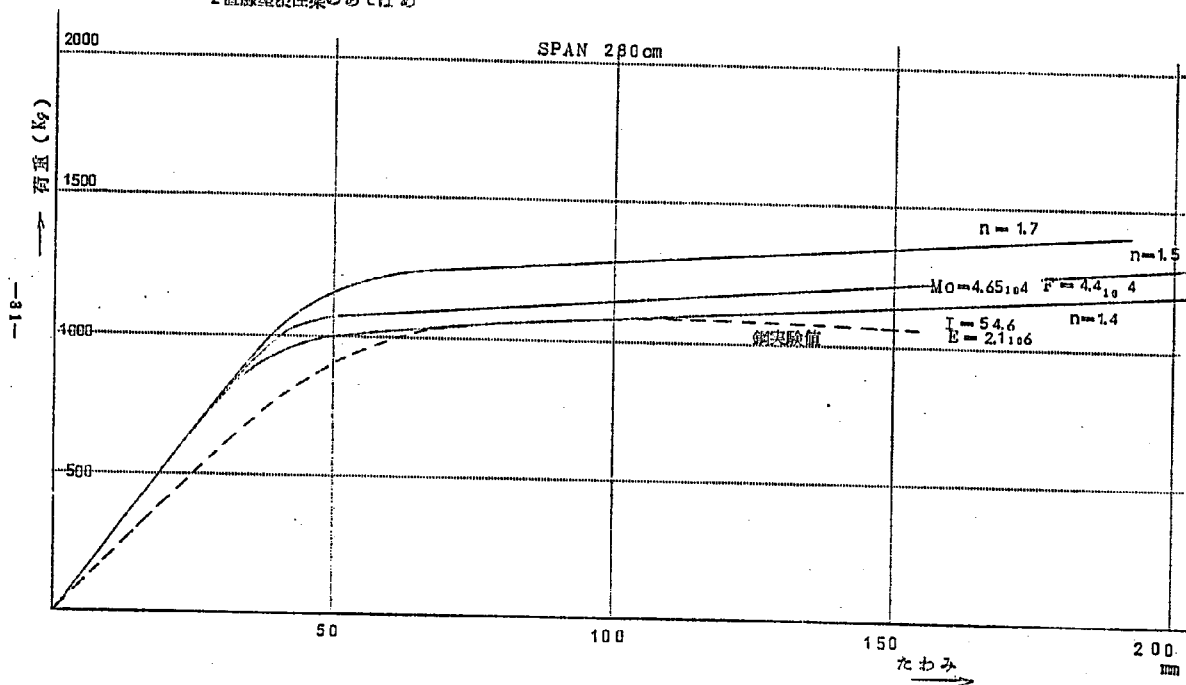


表-2 SPAN 280 cmのsimple beamのたわみ計算

$$\text{アルミ} \quad y = \frac{Pl^3}{48EI} = \frac{2.8^3 \times 10^6 \times P}{4.8 \times 7.23 \times 10^8 \times 178} = \frac{2830}{61.77} \times 10^{-3} = 3.551 \times 10^{-3}$$

$$\text{鋼} \quad y = \frac{Pl^3}{48EI} = \frac{2.8^3 \times 10^6 \times P}{4.8 \times 2.03 \times 54.6 \times 10^8} = 4.123 \times 10^{-3}$$

スパン中央のたわみ

P	銅レール	アルミレール
	計算 (実験)	計算 (実験)
100 kg	0.412	0.3551
200	0.825	0.7102
300	1.237	1.0653
400	1.649	1.4204
500	2.062 (2.46)	1.7755 (2.17)
600	2.474	2.1306
700	2.886	2.4857
800	3.298	2.8408
900	3.711	3.1960
1000	4.120 (4.43)	3.5551 (4.35)
1200	4.948	4.2612
1400	5.772	4.971
1600	6.597	5.682
1800	7.421	6.392
2000	8.246	7.102

4. 実験条件に関するその他諸資料の検討

4-1. 現場の土質分析等

実験現場は荒川上流右岸の高水敷であり、現場から持ち帰った土を、JIS-A 1204 に従って分析した結果を図 14 に示す。土の分類名では粘土質ロームに属し、粒径加積曲線は同図下方のグラフの通りである。

実験時には、支柱埋込位置のまわりを 1 田四方に掘削し、土を埋戻し、たこでつきかためた。ガードレール後方は、原地盤高のままとし、特に法面を復した傾斜をつくるようなことは行なわなかった。また土質分析試験の他一般道路の道路路肩における土の力学的性質との比較に供するため、スウェーデン式貫入試験を行ったが、その結果は、土研資 No.65, p23. 図 6 および本報告書の図-15 ~ 17 に示す通りである。

4-2. 支柱の横方向静的引張試験結果の検討

支柱横方向引張試験の結果のグラフは、土研資. 65号 p24 図-7 に既示してあるが、その原資料を表-3、4 左方、第 1 列、第 2 列に示す。

土中に埋めこまれた支柱を横方向に押した(引張した)場合の力学的機構をどのように考えるかは困難な問題である。今日まで主として杭の横方向抵抗に関して土質力学的に取り扱われたのは、土の弾性域内の問題、あるいは僅かに塑性域に入った場合もしくは、極限耐荷力に関してであるようである。ガードレール工学の立場からすれば、土質に関する諸情報と支柱の力学的諸条件および埋込長を与えた時の、支柱の変位と力の関係さらに一般的には外力に対する支柱の挙動が予測されることが望ましい。しかし、ガードレールにおけるような大きい変形を生ずる場合の土の挙動についてはこれまで殆んど研究されていないようであって、現在の段階では、土と支柱のそれぞれの力学的模型に立ち戻って詳細に検討することをせず、静的引張試験結果から、レールの取り付け位置に加わる力とその点における変位量の関係を実験式として求めることで満足することにする。

表-3、4 の結果を両対数紙にプロットしたのが図-18~図-19 である。両対数紙上での直線によってかなりよく近似されると考えられるので、

$$y = k P^a$$

..... (3)

y : 変位 (cm)

P : 支柱レール取付位置に加わる力 (kg)

の n 乗べき型の実験公式をあてはめると、アルミニウム I 型、II 型の支柱についてそれぞれ次のような値がえられる。

アルミ I 型 (高速型)		アルミ II 型	
No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
$k \quad 9.916 \times 10^{-6}$	2.355×10^{-5}	1.359×10^{-4}	8.691×10^{-4}
$n \quad 2.091$	1.862	1.732	1.460

(kg, cm 単位)

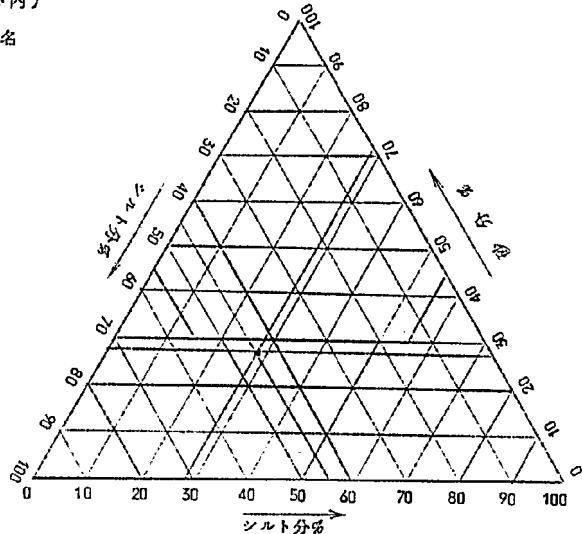
七
外
橋

図-14 土の粒度分析結果

調査名・目的 アルミニウム耐食合金ガードレール試験場
 (埼玉県川島村大字出丸下郷字北条橋)
 (荒川荒水敷ホンダエアーポート内)

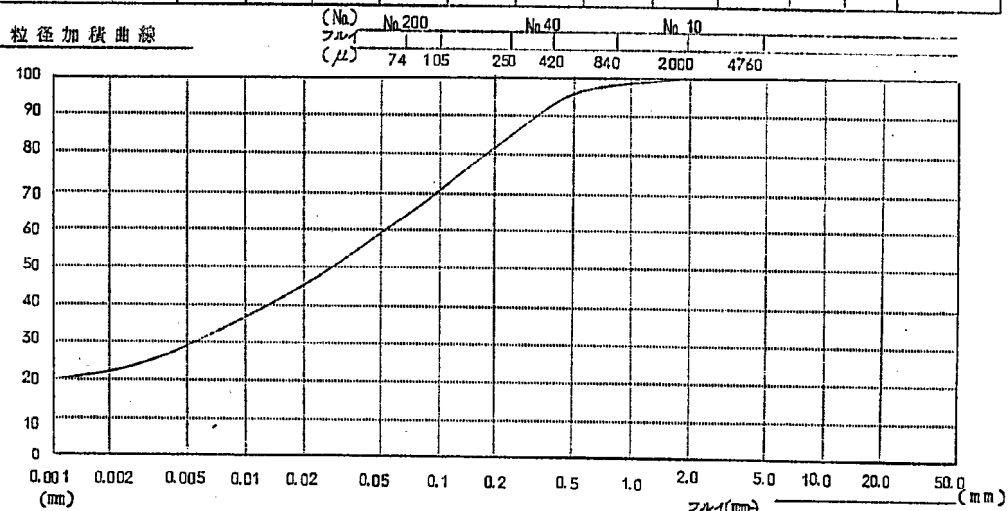
2000 μ フルイ通過試料の粒度による土の分類名

- a 粘土
- b 砂質粘土
- c シルト質粘土
- d 砂質粘土ローム
- ⑤ e 粘土質ローム
- f シルト質粘土ローム
- g 砂
- h 砂質ローム
- i ローム
- j シルト質ローム



試料番号	シルト分%	シルト分%	シルト分%	シルト分%	最大径mm	60%径mm	10%径mm	均等係数	2000 μ フルイ通過率%	420 μ フルイ通過率%	74 μ フルイ通過率%	三角座標上の記号	三角座標上の分類	備考
2	0	45	28	27	2.00	0.055			100	94	66			

粒径加積曲線



コロイド	粘土	シルト	砂	レキ

図-15 スウェーデン式サウンディングテスト結果

スウェーデン式サウンディングテスト結果

№ 2 サウンディング番号 5
 調査地点 埼玉県桶川町荒川上流（№10ポスト）
 本田技研エアポート地先 試験期日 40年4月24日
 アルミ実験場
 調査員 高 木 天 候

深 度 (m)	荷 重 (Kg)					100cm 貫入に要する半回転数		
	5	15	25	50	75	25	50	75
50								
100								
150								

スウェーデン式サウンディングテスト結果

深 度 (cm)	荷 重 (Kg)					100 cm 貫入に要する半回転数		
	5	15	25	50	75	25	50	75
50								
100								
150								

図-17 スウェーデン式サウンディングテスト結果

スウェーデン式サウンディングテスト結果

No. 1

サウンディング番号 7

(No. 7 ポスト)

調査地点 埼玉県桶川町荒川上流
本田技研エアポート地先
アルミ実験場

試験期日 40年4月26日

調査員 高 木

天 候

深 度 (cm)	荷 重 (Kg)					100cm 貫入に要する半回転数		
	5	15	25	50	75	25	50	75
50								
100								
150								

表-3 アルミ型 支柱横方向引張試験結果 No. 1
支点地上より 600(mm)

y (mm)	P (kg)	log y	log P	
4	100	0.60206	2.00000	$y = k P^a$
7	200	0.84510	2.30103	$\log y = n \log p + \log k$
20	400	1.30103	2.60206	
43	600	1.63347	2.77815	{ $6.29547 = 5 \log k + 12.58433n$ $12.77820 = 5 \log k + 15.68470n$
82	800	1.91381	2.90309	
183	1000	2.26245	3.00000	
318	1200	2.50243	3.07918	$n = 2.091$
400	1400	2.60206	3.14613	$\log k = -4.00367 = \bar{5}.99633$
473	1600	2.67496	3.20412	$k = 2.916 \times 10^{-5}$
545	1800	2.73640	3.25527	

cm単位にすると

$$k = 2.916 \times 10^{-5}$$

アルミ型 支柱横方向引張試験結果 No. 2
支点地上より 580(mm)

y	x	log y	log x	
2	100	0.30103	2.00000	$y = k \cdot p^a$
4	200	0.60206	2.30103	$\log y = n \log p + \log k$
15	400	1.17609	2.60206	
30	600	1.47712	2.77815	{ $9.35519 = 7 \log k + 18.66351n$ $14.78181 = 6 \log k + 12.62916n$
52	800	1.71600	2.90309	
91	1000	1.95904	3.00000	
133	1200	2.12385	3.07918	$n = 1.862$
185	1400	2.26717	3.14613	$\log k = -3.62804$
232	1600	2.36549	3.20412	$k = 2.355 \times 10^{-4}$
274	1800	2.43775	3.25527	
326	2000	2.51322	3.30103	
374	2200	2.57287	3.34242	
422	2400	2.62531	3.38021	

cm単位にすると

$$k = 2.355 \times 10^{-4}$$

表-4 アルミⅡ型 支柱横方向引張試験結果 No. 1
支点地上より628(mm)

x(mm)	P(kg)	log y	log P	
6	100	0.77815	2.00000	$y = k \cdot P^n$
14	200	1.14613	2.30103	$\log y = n \log P + \log k$
34	400	1.53148	2.60206	
70	600	1.84510	2.77815	
126	800	2.10037	2.90309	$\begin{cases} 5.30086 = 4 \log k + 2.68124n \\ 6.95713 = 3 \log k + 2.98227n \end{cases}$
224	1000	2.35025	3.00000	
321	1200	2.50651	3.07918	$n = 1.732$
				$\log k = -2.86676$
				$k = 1.359 \times 10^{-3}$

cm単位にすると

$$k = 1.359 \times 10^{-4}$$

アルミⅡ型 支柱横方向引張試験結果 No. 2
支点地上より700(mm)

y(mm)	P(kg)	log y	log P	
9	100	0.95424	2.00000	$y = k \cdot P^n$
19	200	1.27875	2.30103	$\log y = n \log P + \log k$
46	400	1.66276	2.60206	
89	600	1.94939	2.77815	
151	800	2.17898	2.90309	$\begin{cases} 3.89575 = 3 \log k + 6.90309n \\ 6.49198 = 3 \log k + 8.68124n \end{cases}$
231	1000	2.36361	3.00000	

$$n = 1.460$$

$$\log k = -2.06092$$

$$k = 8.691 \times 10^{-3}$$

cm単位にすると

$$8.691 \times 10^{-4}$$

八
内
橋

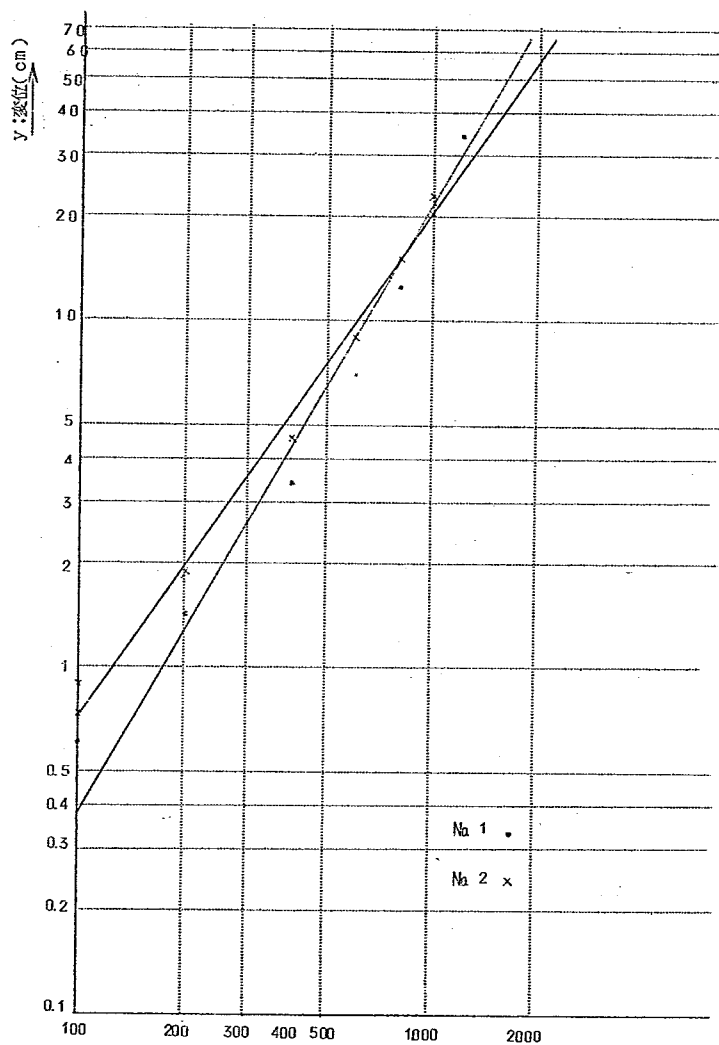


図-18 アルミⅡ型 支柱横方向引張試験結果，試験No. 1，No. 2 P:引張力 (Kg)

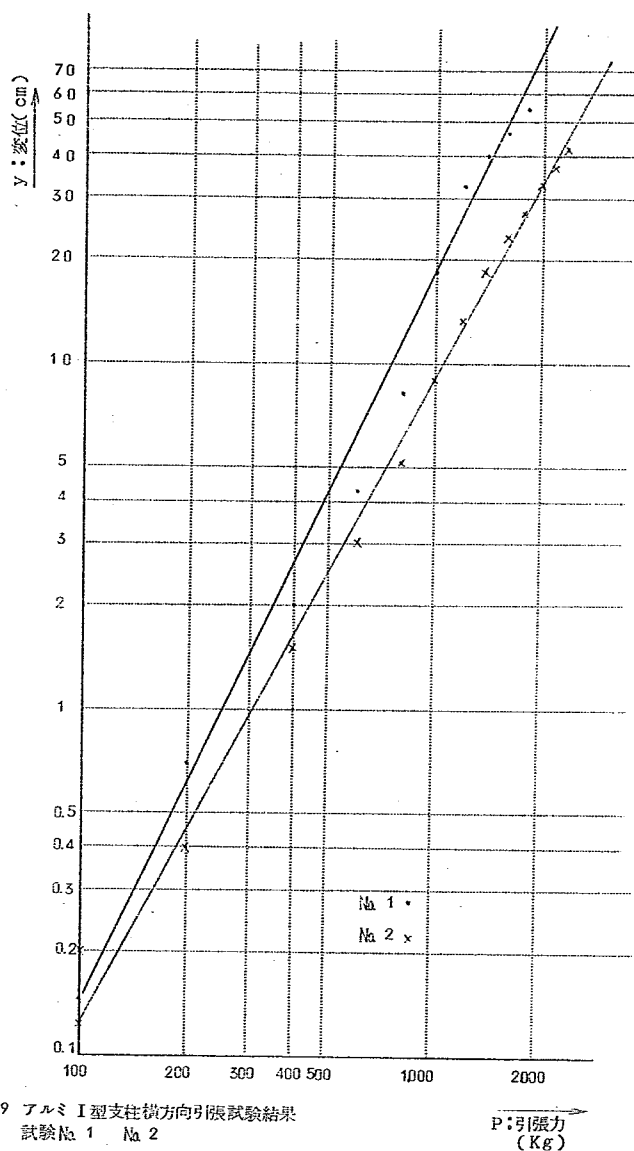


図-19 アルミ I 型支柱横方向引張試験結果
試験 No. 1 No. 2

4-3 路面摩擦係数の測定

すでに自動車の運動方程式を示してあるが、自動車が運動中路面から受ける諸力がある。これは車体進行方向に直角なコーナリングフォースところがり摩擦抵抗であるが、前者は横すべり角が大となると飽和し、一定の摩擦力となる。この値をしるためにガードレール前面に鋪設した簡易舗装路面の摩擦係数を測定した。土木研究所の試験車クライスラー1957年型を用い、路面の外方から路面上に走行してきて、ブレーキをかけ後輪をロックする。この際試験車に加速度計を積載しておき、車に生じた減速度から摩擦係数の値を知った。その結果を表-5に示す。

表-5 路面すべり摩擦係数の測定

自動車の速度 km/hr	読み gal	g すべりまさつ係数
10	780	0.795
20	770	0.785
20	760	0.775
25	760	0.775
30	750	0.765

4-4 車両諸元の測定と計算

4-4-1 一般諸元と重量

実験に使用した車両は、日野自動車製8トン積車であって、その諸元を再録すると表-6の通りである。

表-6 実験用自動車諸元

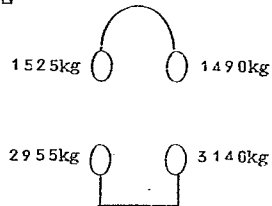
名称		日野自動車製TH-17型
		160HP 8ton 積
主要諸元		単位(mmおよびkg)
全 長		8,020
全 幅		2,470
全 高		2,680
ホイールベース		4,800
トレッド前輪		1,860
後輪		1,770
車輛重量		5,500

実験車には、同じ自動車を数回の衝突に繰返し使用するためプロテクター（外周 1.50 m）を前面にとりつけている。実験時の本実験車の重量は、携帯式ロードメーターによって測定を行った。その結果は図-20 の通りである。

図-20 自動車重量計測値

測定日

4月26日



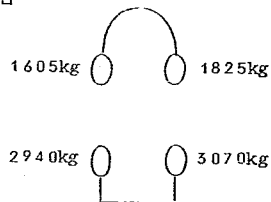
プロテクターなし

積荷 45俵 前輪重 3015 kg

9110kg

後輪重 6095kg

4月23日



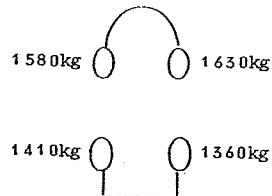
プロテクター付

積荷 45俵 前輪重 3430kg

9440kg

後輪重 6010kg

4月19日



プロテクターのみのとき

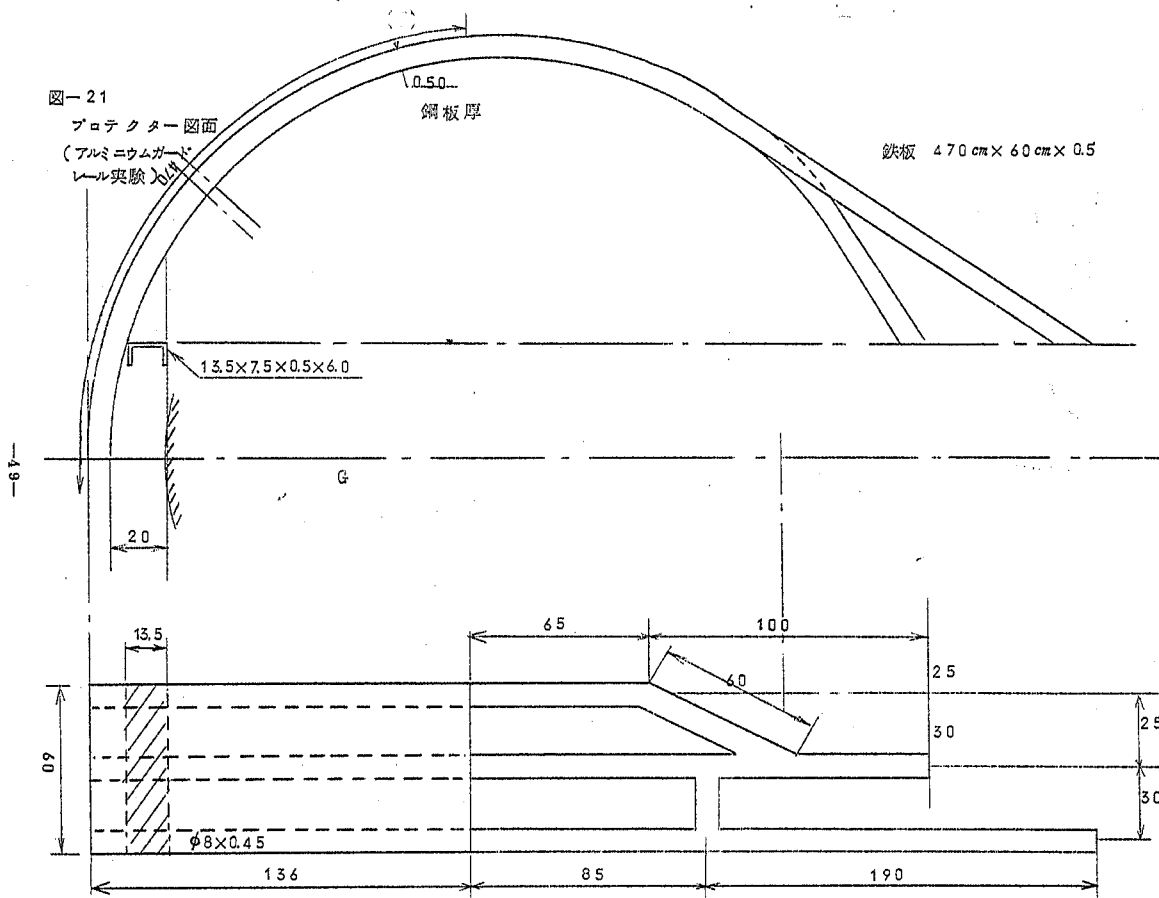
前輪重 3210kg

5980kg

後輪重 2770kg

プロテクター図面
(アルミニウムガード
レール実験)

鉄板 $470\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 0.5$

$$13.5 \times 7.5 \times 0.5 \times 6.0$$


4-4-2 慣性半径の計算

実験車前部にとりつけたプロテクターの略設計図は図-21の通りであ
って、これからプロテクターの重心および慣性モーメントを計算した。

プロテクター重量*	254.6kg
プロテクターの重心位置	先端より 92.10cm
慣性モーメント	4,791kg・cm・s ²

1. 車両及びプロテクターの場合の慣性モーメント

トラックのみ重量	5,980kg	慣性モーメント	4060.00kg・m・s ²
プロテクター重量*	254.6kg		47.91kg・m・s ²

重心位置 プロテクター先端より 3.73m

トラックおよびプロテクターの場合の慣性モーメント

$$4320.69 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

(※ 携帯式ロードメーターによる測定とかなり
異なるがそのまま用いるものとする)

2. 積荷45俵(3,465kg)でプロテクター付きの場合の慣性モーメント

$$\text{慣性モーメント} = 6707 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

3. 積荷45俵でプロテクターなしの慣性モーメント

$$\text{慣性モーメント} = 6279 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

慣性半径は

$$1. \text{ プロテクター付} \quad \rho^2 = \frac{I \times g}{W} = \frac{4320.7 \times 9.81}{5980 + 255} = 6.80$$

$$\rho = 2.61 \text{ m}$$

2. プロテクター付積荷45俵

$$\rho^2 = \frac{6707 \times 9.81}{6235 \times 3.465} = 6.80$$

$$\rho = 2.61 \text{ m}$$

1.2の場合 ρ は若干異なる筈であるが、かかる略算では殆んど異ならない結果となったので、この値を使うことにする。

5. 16ミリ映画による計測と解析

5-1 撮影計画と実際

今回の実験では、実験結果の記録の中心に当初16ミリ映画の記録を考えた。すなわち焦点距離10ミリの広角レンズをとりつけたBolexカメラ3台を地上高5.50mの箇所に間隔4m(レールと平行な方向)に配置した。これら3台のカメラのレールと直角方向の位置は、それぞれ、ガードレールの支柱中心を結んだ線から、720cm, 615cm, 660cm 役方となっている。これら3台のカメラの鉛直直下の地上表面には、杭を打ち込んだ上に十字マークを画いた10cm角アルミ板を打ちつけた。撮影時には、常にこの十字マークが写しこまれるようにした。これが地上鉛直点に相当し、画面において画面鉛直点を示すことになる。カメラは鉛直下方ではなく、若干前方を狙って設定したので、この画面鉛直点は、画面傾角計算上必要なものとなる。カメラに傾角を与えたのは、比較的低い撮影位置で、できるだけ広い撮影範囲を得ようとしたためである。カメラは毎日着脱を行ったので、カメラの傾角は実験の日々によって異っている。

カメラはねじ巻き駆動とし毎秒6コマで撮影した。始動は電磁シャッターにより、地上から遠隔操作できるようにした。またガードレール前面の簡易舗装路面には正確に測量して、土研資料65号p5図-2の如くペイントマークを入れたが、これは地上における軌跡計測に役立てる他、えられた16ミリフィルムによる位置計測のチェックを行うためである。

ガードレール前面にはスパン6等分点に黒色ビニールテープをはった。自動車のボンネットの中心線上には2ヶ所に鉄板を溶接して十字マークを附した。(図-22)。本来ならば、車両重心位置にマークを附すべきであるが、画面の撮影範囲がせまいため、ボンネット上としたものである。

実際の撮影結果はかなり不満足なものであった。

その原因は次の通りである。

1. 起動用電磁シャッターの信頼度の低い事
2. 第3カメラにおける画面ぶれ
3. 実験シリーズ中の相当のものが、衝突予想地点より前方、いいかえれば、浅い角度で衝突する場合が多かったため、第1カメラの撮影範囲では衝突

状態に入らない場合があった。

図-22 ボンネット上のマーク位置

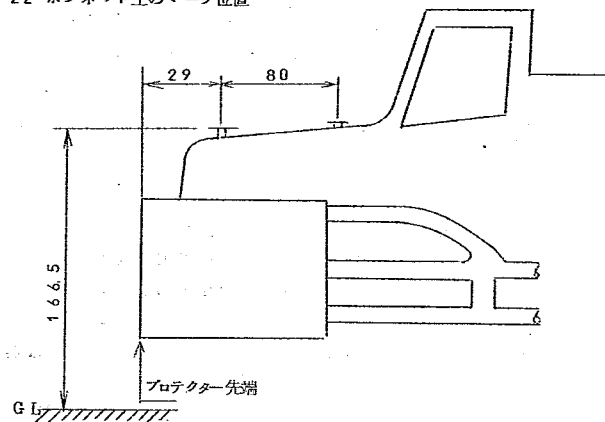


表-7 衝突時に生じた加速度の測定値

(運転席にとりつけた電気抵抗線型加速度計による)

方 向	単位(g)			
	前	後	左	右
	(1)	(2)	(1)	(2)
最大値別 測定日				
4月13日	0.61	0.27	0.80	0.41
20日	1.17	0.45	0.77	0.29
21日	≒ 0	≒ 0	≒ 0	≒ 0
22日	≒ 0	≒ 0	0.15	≒ 0
26日	2.87	0.90	0.93	0.47

5-2 解析方法

前述の如く、撮影したフィルム画像は、傾斜して撮影したものであるから、解析には、このことを考慮に入れる必要がある。

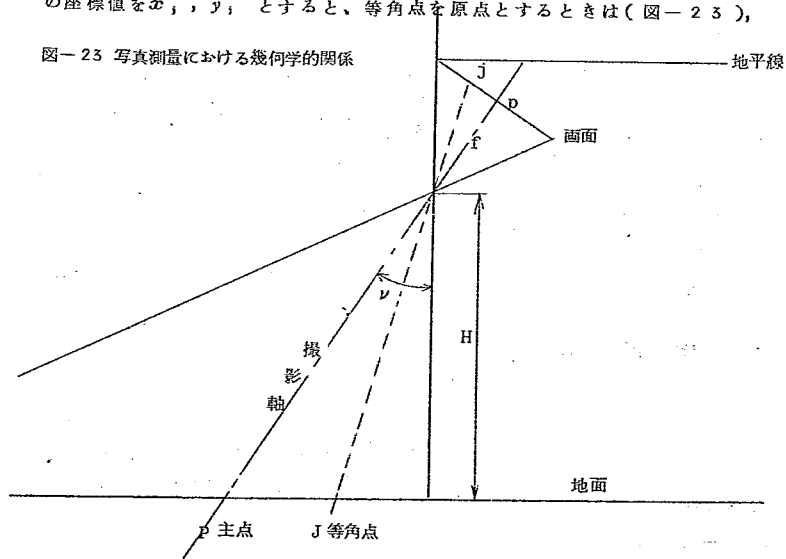
一般に航空写真測量では、レンズ中心 O を通る鉛直線と画面との交点を写真鉛直点（画面鉛直点）、地上との交点を地上鉛直点という。この鉛直線と撮影軸を含む平面（主切面）が写真面（画面）と交わる線が最大傾斜線となる。

今回撮影したフィルムには、総てカメラ鉛直直下地上に設定した地上鉛直点マークが写しこまれているので、これを利用して画面傾角を知ることができる。

モーションアナライザーによって、フィルム画面を15倍に拡大投影し、その平面座標値を読みとった。画面の中央点（主点）と画面鉛直点の座標をすれば、機高、レンズの焦点距離は判明しているから、これからカメラの傾角が計算される。

地上の任意の点 A の座標値を X_1, Y_1 とし、写真上の対応する点 A' の座標値を x_1, y_1 とすると、等角点を原点とするときは（図-23）、

図-23 写真測量における幾何学的関係



地上 A 点 X_1, Y_1

画面 A 点 x_1, y_1

$$X_1 = \frac{x_1 H'}{f' - y_1}, \quad Y_1 = \frac{y_1 H'}{f' - y_1} \quad \dots\dots\dots (23)$$

ただし

$$H' = H \operatorname{cosec} \nu, \quad f' = f \operatorname{cosec} \nu,$$

ここに ν : 傾角

H : 機高

f : レンズ焦点距離

主点を原点とするときは,

$$\text{地上} \quad \begin{cases} X_F = X_1 \\ Y_F = Y_1 - H \tan \frac{\nu}{2} \cdot \sec \nu \end{cases} \quad \dots\dots\dots (24)$$

画面

$$\begin{cases} x_F = x_1 \\ y_F = y_1 - f \tan \frac{\nu}{2} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (25)$$

の関係がある。

1.5 倍に拡大投影したフィルムの平面座標値を読みとりこれを座標変換した上で、地上座標に移す電子計算プログラムを作製した。

これによって、鉛直点、主点の基本データと、ガードレール上の黒色マーク、地上のペイントマーク、ボンネット上のマークの刻々の位置を入力として与えると、その地上座標と、速度、移動方向、加速度を計算し、一定様式で印刷することができる。このうちレールマークに関しては、これに最小自乗法で直線をあてはめ、移動方向（角度）計算に利用した。

6. 実験結果

6-1. 軌跡その他

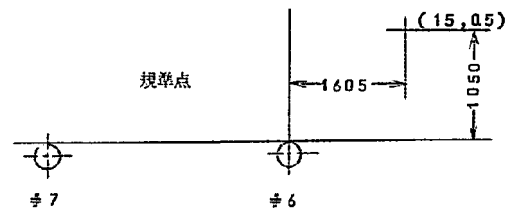
応力、残留変位、ずれ等については、すでに、土研資 65 号 に示したので、ここでは地上に石灰のラインをひいておいてそれから直接測定した試験車の走行軌跡を図-24~図-26に、また、変形を生じたスパンの残留たわみの例を図-27~29に示すにとどめる。

図-24 地上で計測した車の軌跡

注：

○車跡ノ測定ハ後輪ノ最外端ヲ行ッテイル。

○測定値ハ0.5ノXヲ零ニトッテアル。

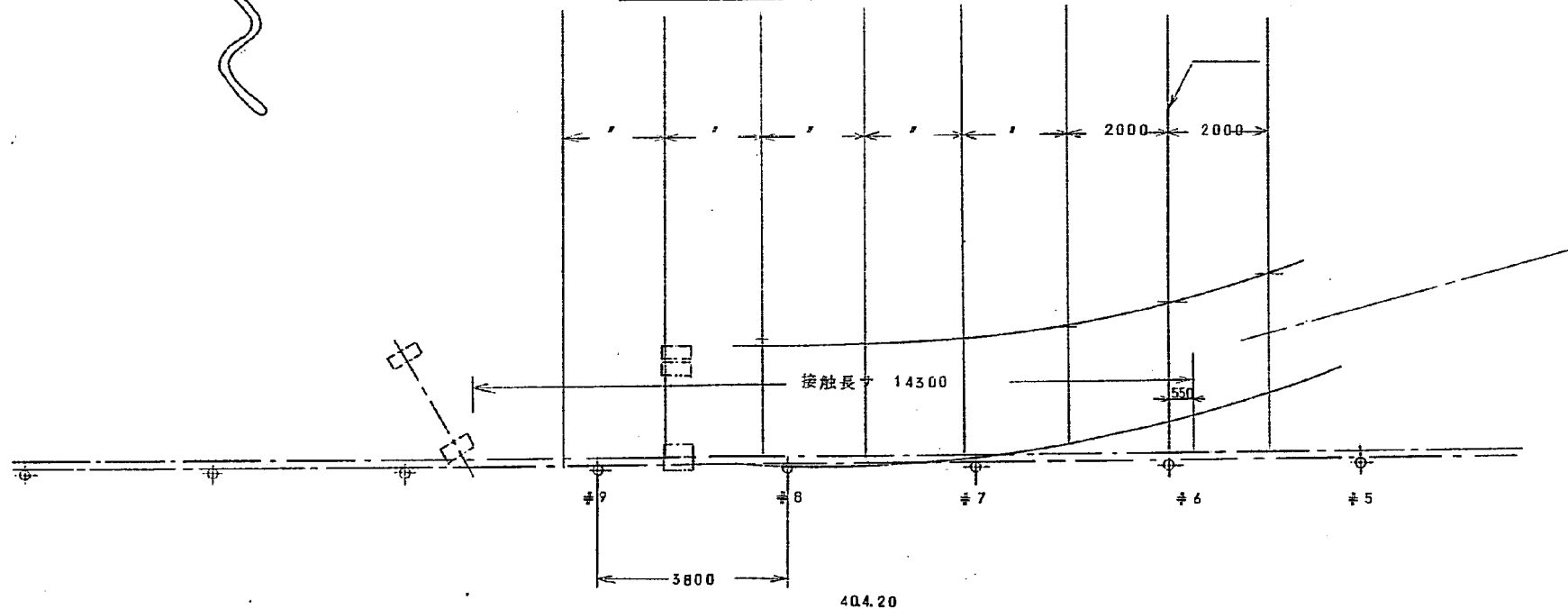


2.5m

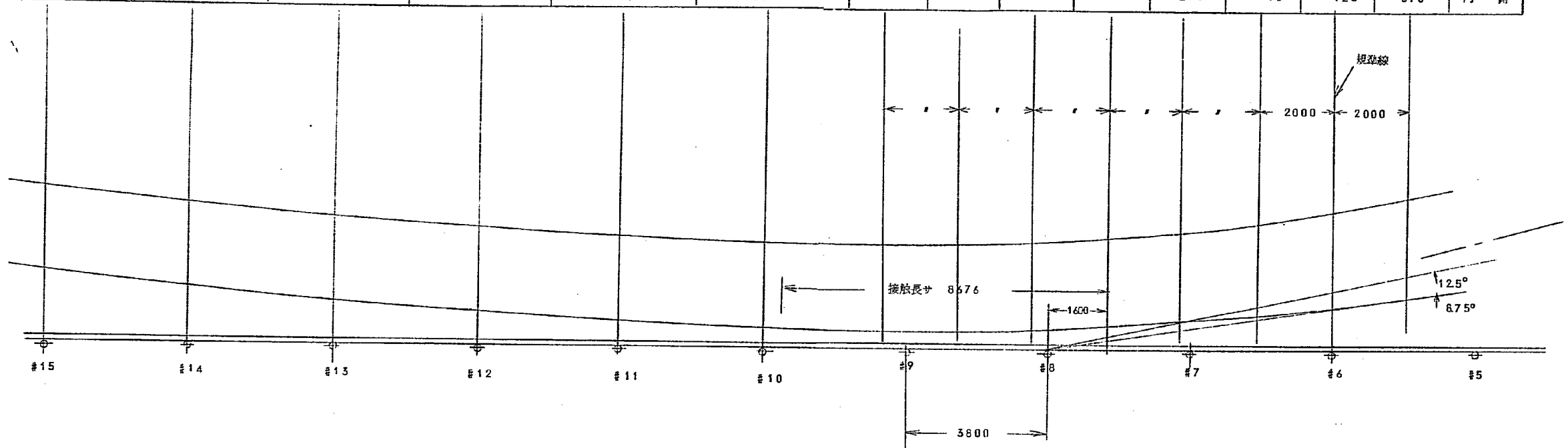


ガードレール
前面基準

外側	2355	2185	2305	2565	2975	3545
内側	-105	-145	25	265	635	1155
外側	1400	1230	1350	1610	2020	2590
内側	-1060	-1100	-980	-690	-320	200



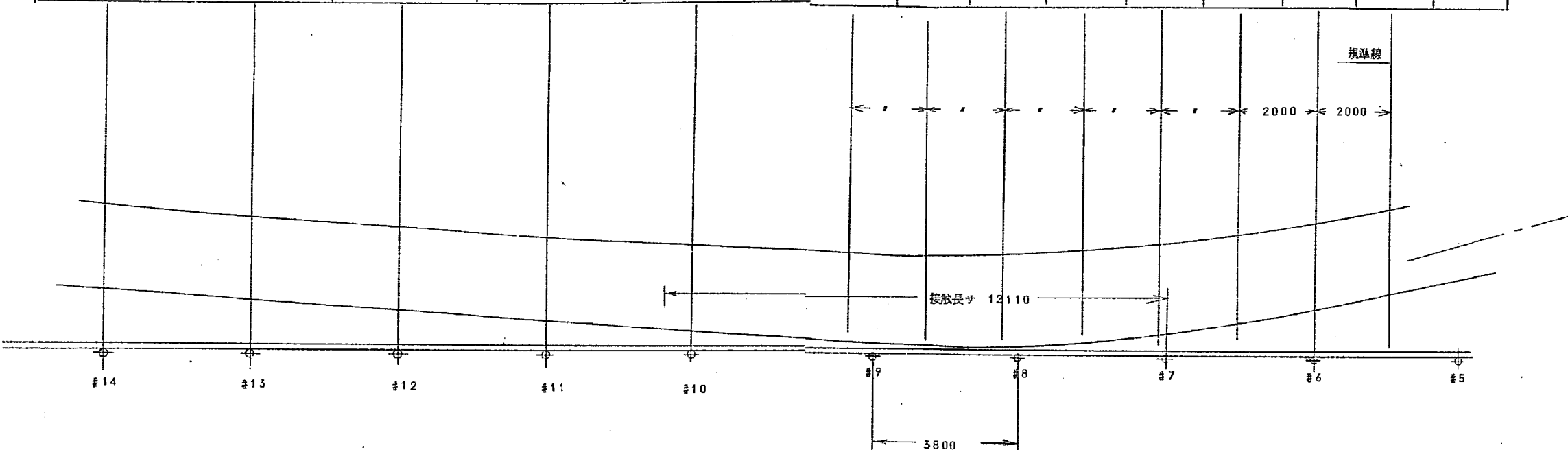
	3675	3325	3065	2855	2705	B	A	2685	2695	2735	2855	3035	3345	3575	3955	外 側
	1435	1095	835	645	410			395	315	305	555	755	865	1080	1325	内 側
4120	3770	3420	3160	2950	2800			1730	1740	1780	1900	2080	2390	2620	3000	外 側
1910	1530	1190	930	740	505			-560	-640	-570	-490	-200	-90	125	370	内 側



FURUKAWA ALUMINUM COMPANY			
FOR NIKKO WORKS			
TITLE		ガードレール実車テスト	CHECKED
車 防			APPROVED
DRAWNBY	小 松	DATE	40-4-26
TRACED BY		DATE	
SCALE		DWG.NO. TA-C 107	
1/100			

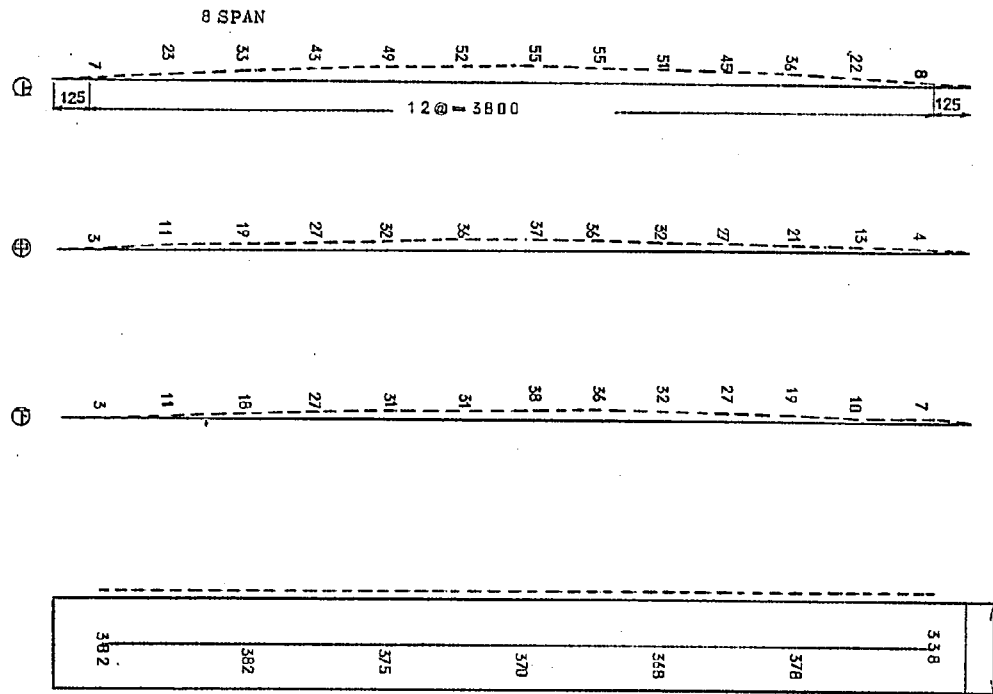
Figure 1 shows a horizontal line with two points, labeled 7 and 6. Point 6 is on the right, and point 7 is on the left. A vertical line segment of length 1605 is drawn from point 6. A horizontal line segment of length 1050 is drawn from the top of this vertical segment to the right. The point at the end of this horizontal segment is labeled (15.05). The text "規準点" (Reference Point) is written above the vertical segment.

3705	3435	3125	2945	2705		2615	2595	2535	2705	2815	3125	3485	3805	外 倒
1505	1205	995	805	435		295	195	145	255	595	925	1245	1595	内 倒
3800	3530	3220	3040	2800		1660	1640	1580	1750	1860	2170	2530	2850	外 倒
1600	1300	1090	800	530		-660	-760	-810	-700	-360	-30	290	640	内 倒



FURUKAWA ALUMINUM COMPANY FOR NIKKO WORKS			
TITLE ガードレール実車テスト		CHECKED	APPROVED
車 跡			
DRAWNBY 小 松	DATE 40-4-26		
TRACEDBY	DATE		
SCALE	DWG. NO. TA-C 108		
1/100			

図-27 4月27日 アルミガードレール実物実験残留偏位 高速1型



図一 29 4月22日 アルミガードレール実物実験残留偏位 高速1型

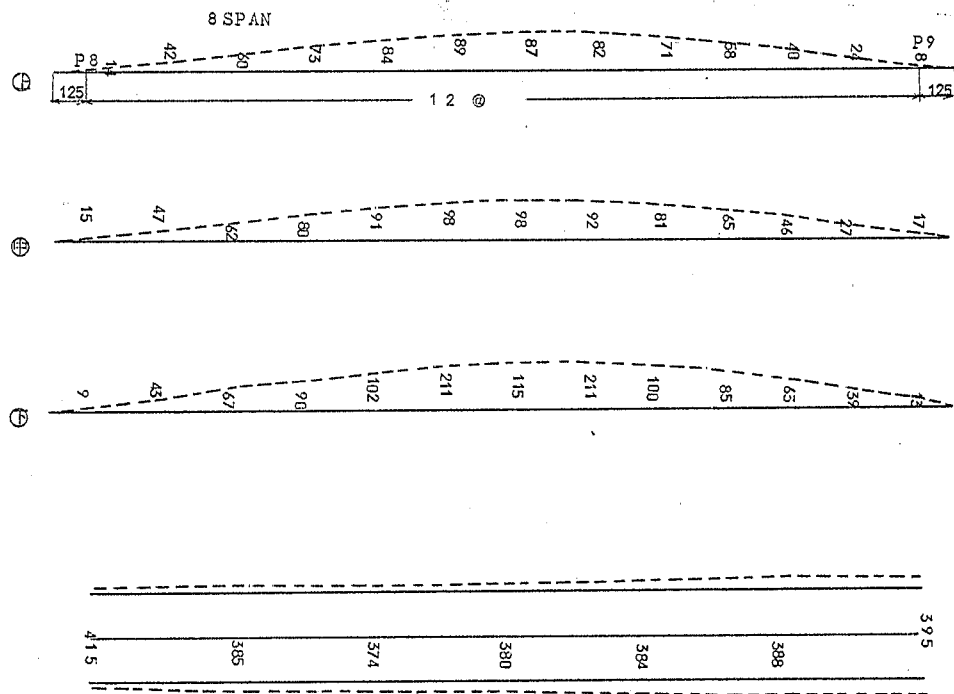
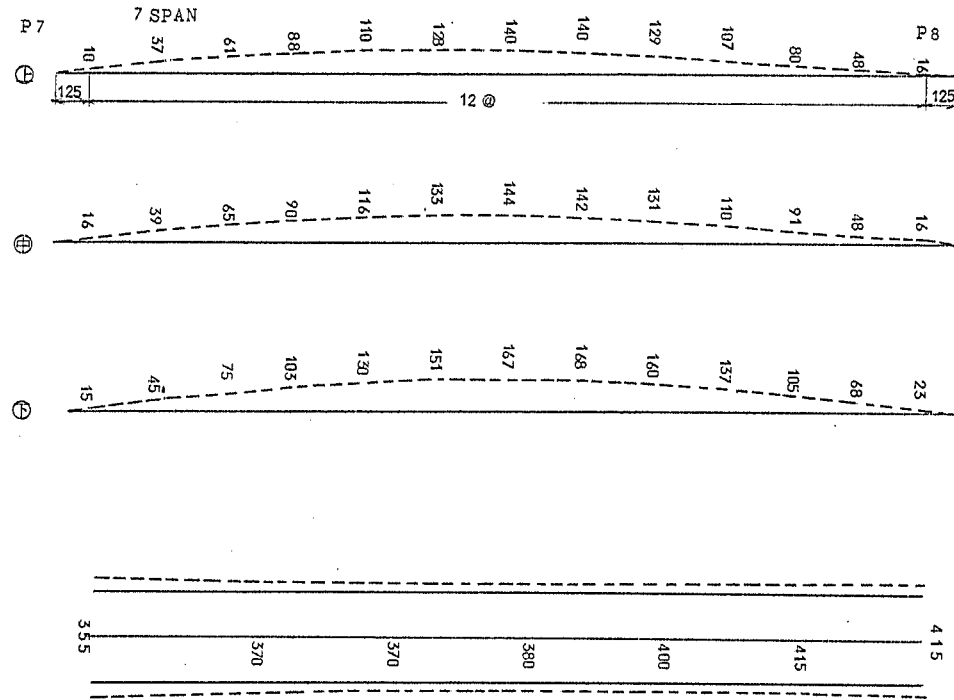


図-28 4月22 アルミガードレール実物実験残留偏位 高速1型



6-2 映画フィルム解析結果

映画のフィルムから求めたボンネット上のマークの軌跡を図-30~図-33に示す。図-30~図-33には地上のペイントマークをフィルム画面から計算して求めたものも同時に示してある。こうして求めたペイントマーク間の距離からこのような解析方法の精度をチェックすることができるが、実際の距離200 cmに対して5 cm程度までの誤差を生じているようである。映画の1コマ毎に速度変化を計算したものが図-34~図-37である。

図-30 先達マークの軌跡

4月20日

data No.1, No.2

SCALE 1/20

+は地上マーク

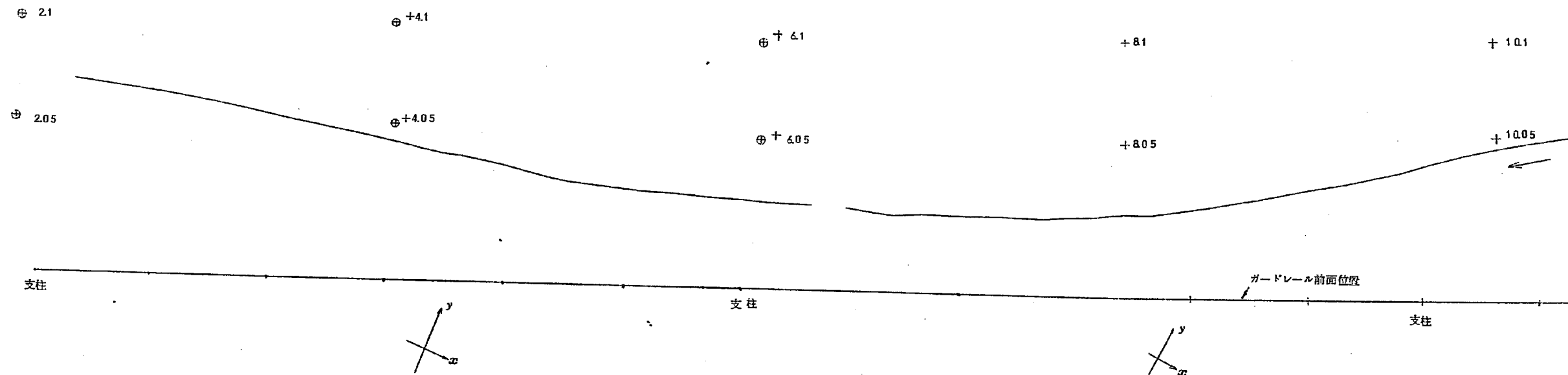


図-31 先端マークの軌跡 4月21日 data No. 4

(右方カメラでは接触せず)

SCALE 1/20

+は地上マーク

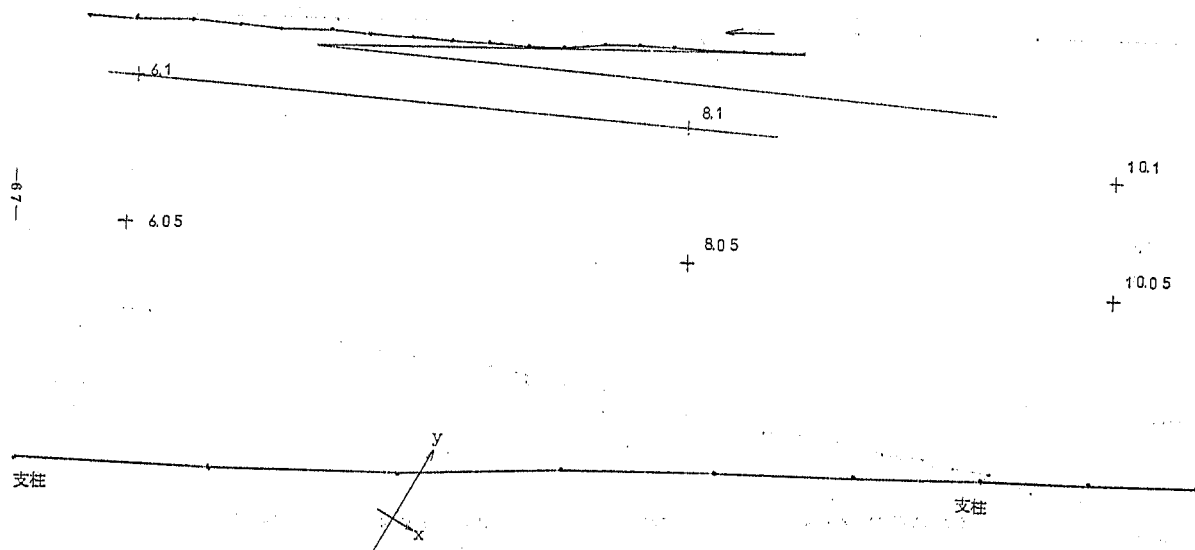


図-32 先端マークの軌跡 4月22日 data No.5 (右方カメラでは接触せず)

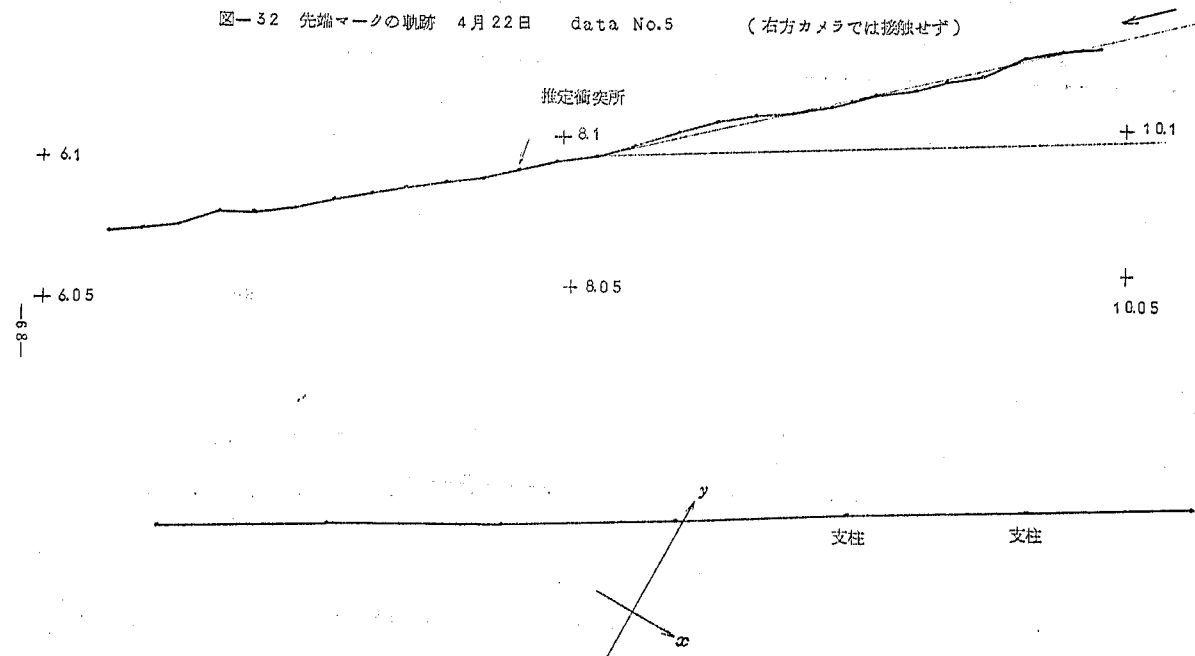


図-33 先端マークの軌跡 4月26日 data No.9 (右方カメラで既に衝突)
SCALE 1/20

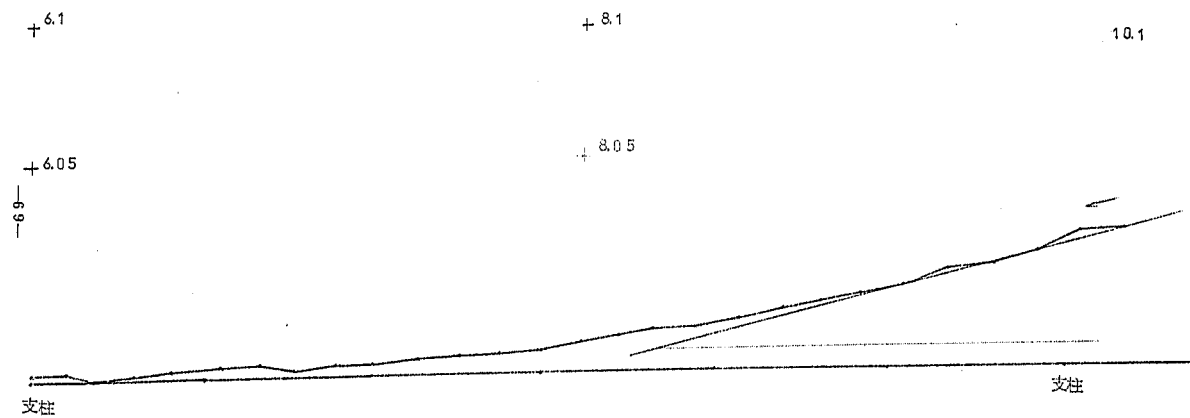
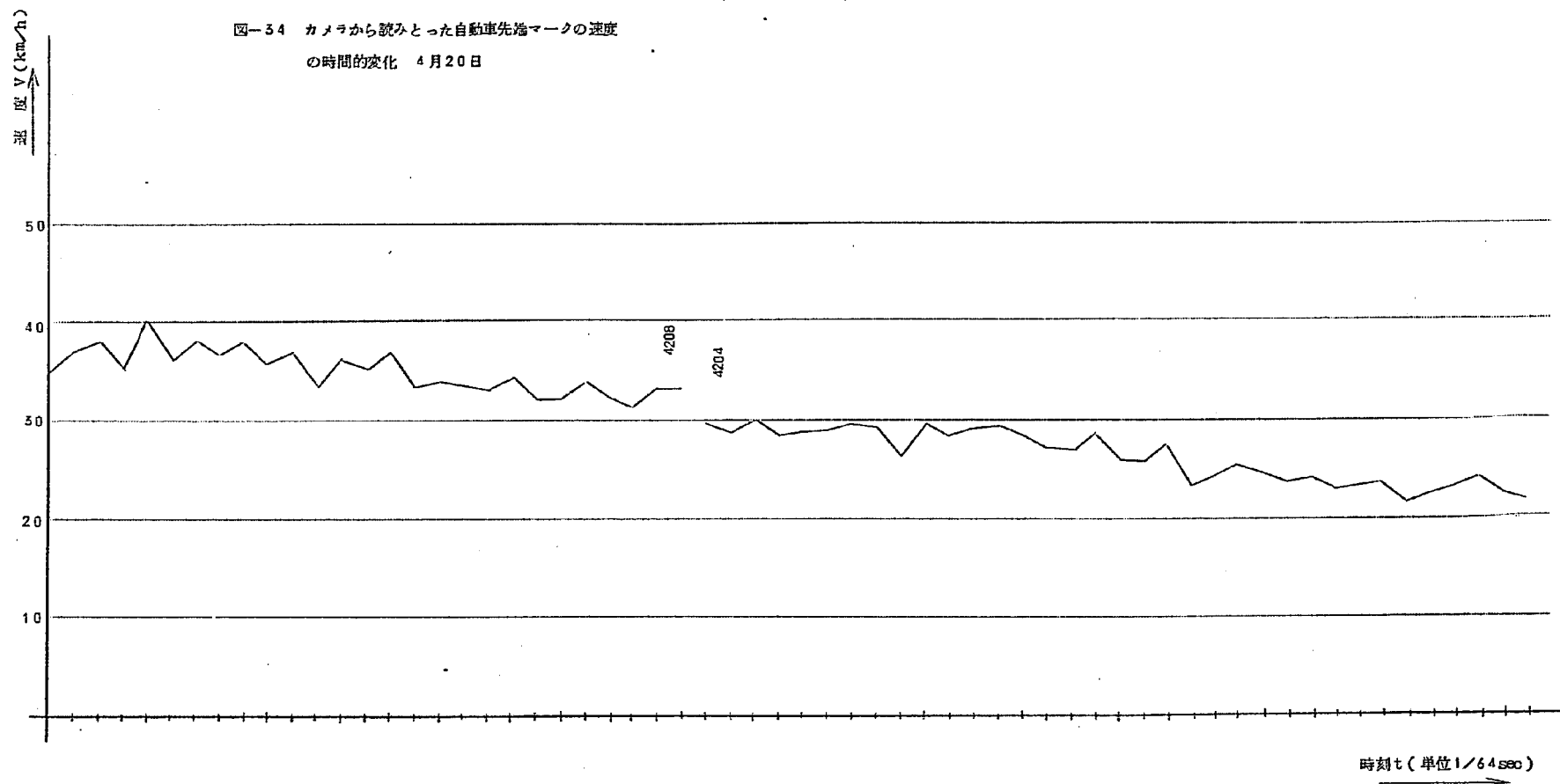
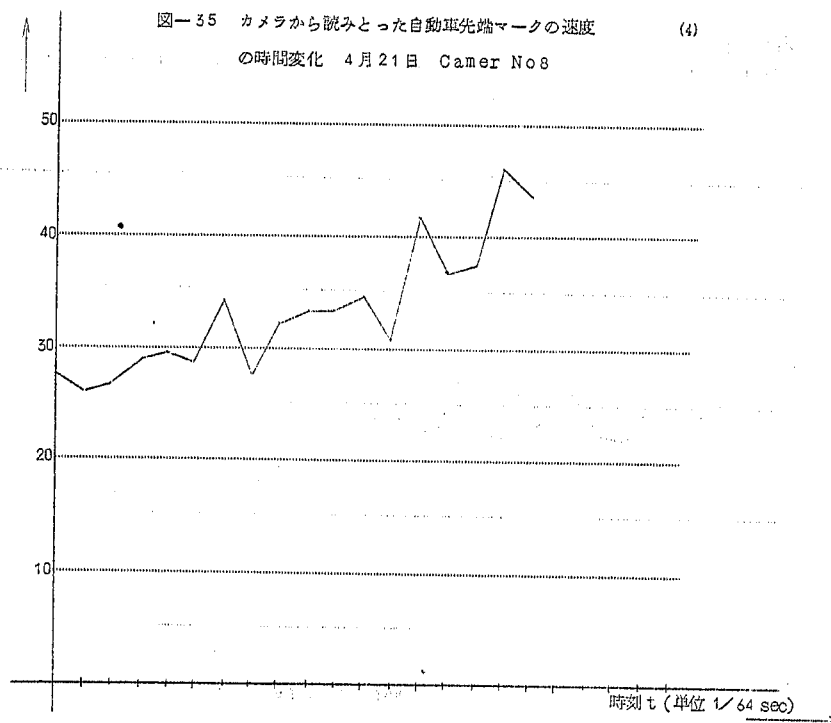
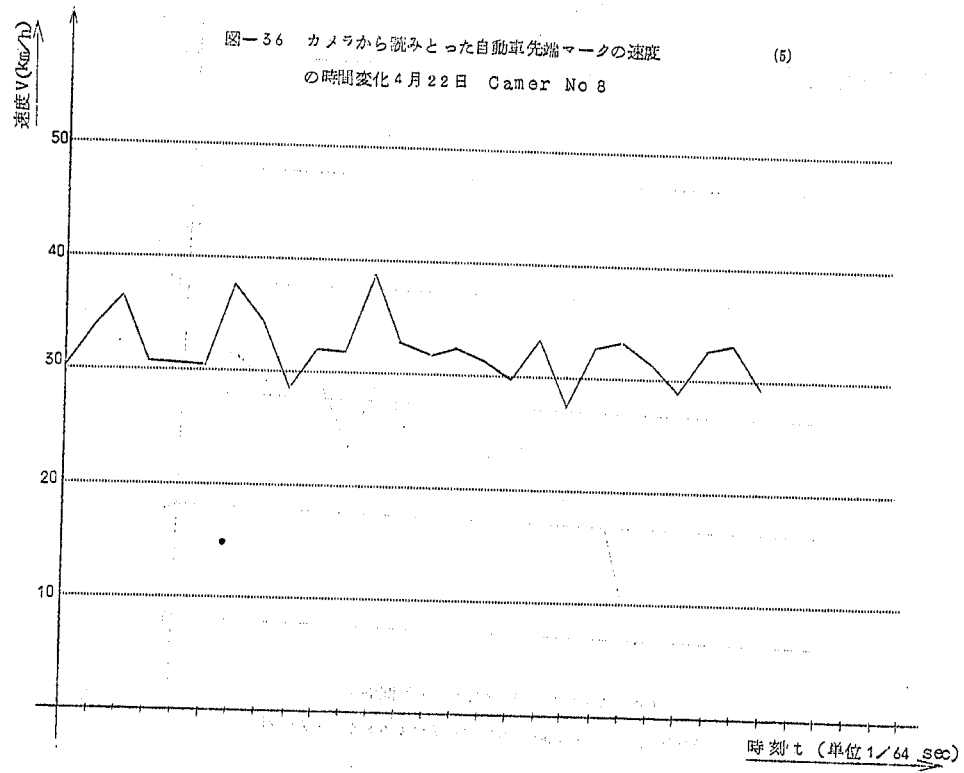
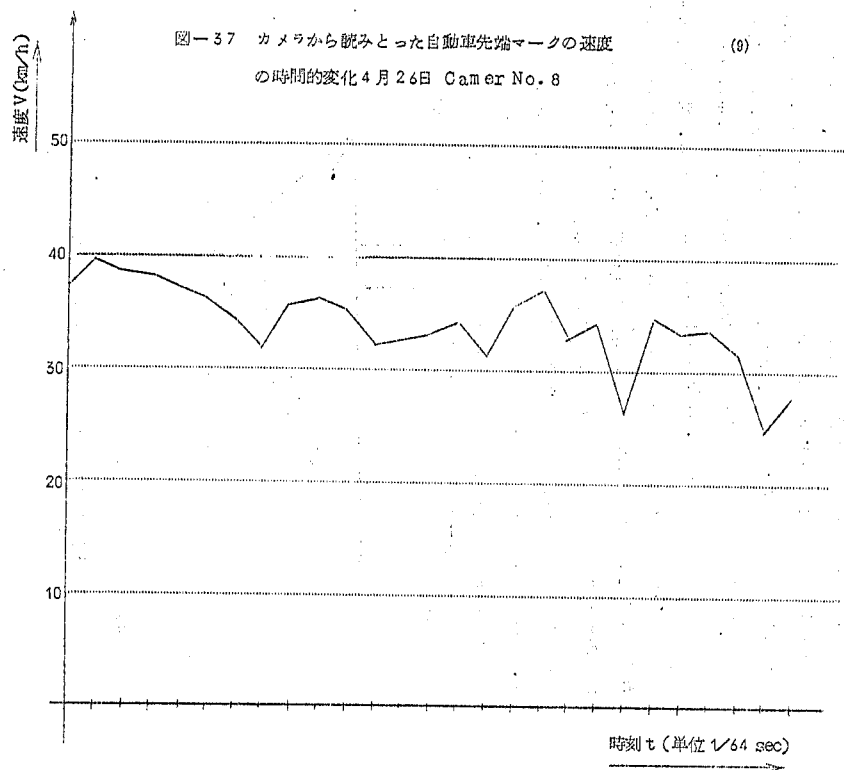


図-34 カメラから読みとった自動車先端マークの速度
の時間的变化 4月20日









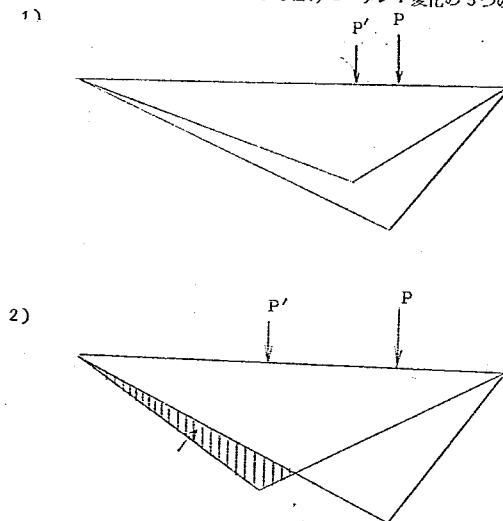
7. 動的解析概要

7-1. 梁、支柱に関する仮定

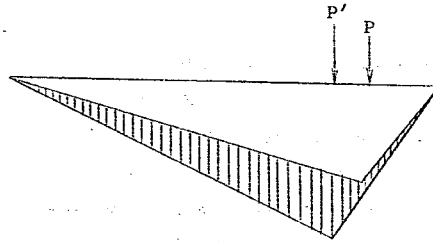
梁に関しては、3-2のように2直線型の応力ひずみ曲線を仮定することにする。実際のガードレールは各支柱位置において接手をもっており、一応連続桁に近い力学的性質を示すことが考えられる。しかし、これは今回の実験対象であるアルミガードレールの場合を含め、ガードレールの接手は比較的簡易な方式が用いられるから、必ずしもモーメントの伝達が、完全な連続桁のように行われるかは不明である。今回の実験では、このモーメントの伝達率を計測しなかったため、以下の解析モデルについては、梁に働くモーメント、支柱にかかる力の各々について、係数を仮定し、これでその効果を代表させることにした。基本的には、梁が支柱位置において単純に支持された、2直線型塑性変形をする梁と見なすことにする。

ところで梁の塑性域における性状を考える場合、自動車から梁の受ける力は、その位置と大きさを刻々変化することを考慮せねばならない。梁にかかるモーメントの変化形式には次の3つの場合が考えられる(図-38)。

図-38 単純梁における曲げモーメント変化の3つの場合



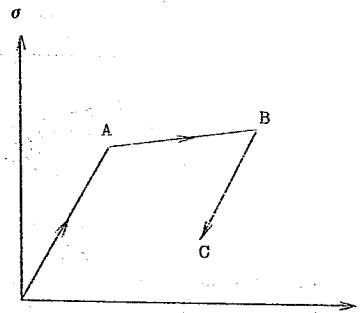
3)



1. 梁の全長にわたってモーメントの増加する場合
2. ある部分においてモーメント増加、他の部分においてモーメントの減少を生ずる場合
3. 全長にわたってモーメントの減少する場合。

材料が塑性域に入った場合には、応力の減少に際しては、図—39のBCの経路をたどる。これによって

上記2、3の場合において
は、梁にはいわゆるスプリ
ングバックの状態を生じる。
結局梁に生じている曲率に
関しては、モーメントの増
加する領域においては、式
—39の関係、モーメントの
減少する領域においては、



図—39 塑性変形の経路

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} - \left(\frac{M_0}{EI} - \frac{M}{EI} \right)$$

の関係がなりたっている。

ただし、

$\rho_0 =$ モーメント減少前の曲率半径

$M_0 =$ のモーメント

$\rho =$ モーメント減少後の曲率半径

$M =$ のモーメント。

単純梁においては、モーメントの増加領域と減少領域の両者が併存する場合（2の場合）の境界点の座標 x_p は、図-40において

$$x_p = \frac{P' \cdot a' \cdot l}{P(l-a) + P' \cdot a'} \quad \dots\dots\dots (50)$$

で与えられる。

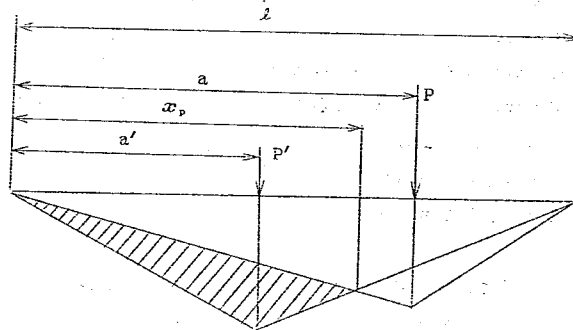


図-40

図-38の2)の場合のモーメントの
変化の点の位置

点 x_p における左右両側のたわみ及びたわみ角の一致を条件としてとけば、外力を与えた場合の変形がとける。以下の2直線形塑性梁の場合では、解析的方法をとらず梁の全長を100等分し、曲率半径とモーメントの関係から2回シンプソン公式による積分をくりかえし、たわみ曲線を求めることにした。

衝突現象が進行し、車の方向転換が進んで、後輪がレールに衝突する場合は、車がレールの変形前の原位置に平行となった時とし、この場合には、その位置において新たな梁と衝突したものと同じくすると仮定した。梁が車から受ける力は、レールと直角方向成分のみとし、梁の軸方向力成分は考慮し

なかった。

支柱に関しては、既に見たように、レール取付け位置における力と変位の関係は n 乗べき型の実験公式にひかよく一致するからこれをそのまま採用する。ただし、力が減少に転ずる場合には、変位は減少前の状態に止まるものと仮定する。すなわち図-41のように仮定したが、これは残留変位を実際よりはかなり大きく仮定することになっていると思われる。これに関しては、今後の実証が望まれる。後輪衝突時に関しては、梁と同様後輪衝突の瞬間その位置に新たな支柱が存在するように仮定した。

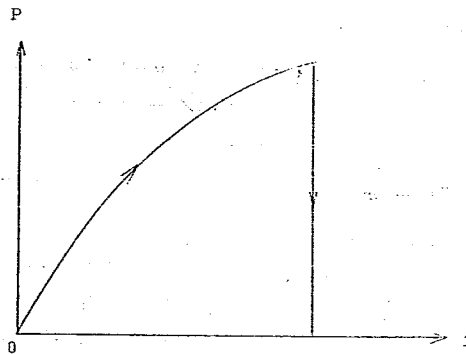


図-41 支柱の荷重と変位の関係の仮定

7-3 車輛に関する仮定

既に述べたように実験車はその前部にいわゆるプロテクターをつけている(26日をのぞき)。そこで、実験車は、このプロテクター上の一点で梁と接触するものと仮定する。車両は前進するとともに、その方向を漸次変換するが、ガードレールと車体が平行になったとき、瞬間的にプロテクターに働く力は0となり後輪に着力点が移行するものと仮定した。ただし、実際に計算してみるとガードレールを比較的に剛に仮定した場合にはガードレールと車体が平行になる以前において、プロテクターがレールから離脱し、車両の受ける外力はタイヤからのみとなる場合も起った。レールから車体の受ける力としては、梁の曲げによって生ずる反力の他、レール

ルとプロテクター間に働く摩擦力を考え両者を合成する。その方向は、車の姿勢角 θ 、梁のたわみ角 τ 、摩擦係数 μ の関数と考える。力の方向の直線の式は、式-38のようになる(図-1)。

すなわち、接触点の座標を $x_{t,cont}$, $y_{t,cont}$ とすると、

$$y_t - y_{t,cont} = -\tan(\pi/2 - (\tau + \alpha - \theta))(x_t - x_{t,cont}) \quad (38)$$

y_t , x_t : 車体座標

重心より反力の方向に下した直線の方程式は、

$$y_t = \tan(\tau + \alpha - \theta) x_t \quad (39)$$

これを連立させて解くと、

$$x_t = \frac{y_{t,cont} + \tan\{\pi/2 - (\tau + \alpha - \theta)\} x_{t,cont}}{\tan(\tau + \alpha - \theta) + \tan\{\pi/2 - (\tau + \alpha - \theta)\}}$$

$$y_t = \tan(\tau + \alpha - \theta) \cdot x_t$$

$$a = \sqrt{y_t^2 + x_t^2} \quad (40)$$

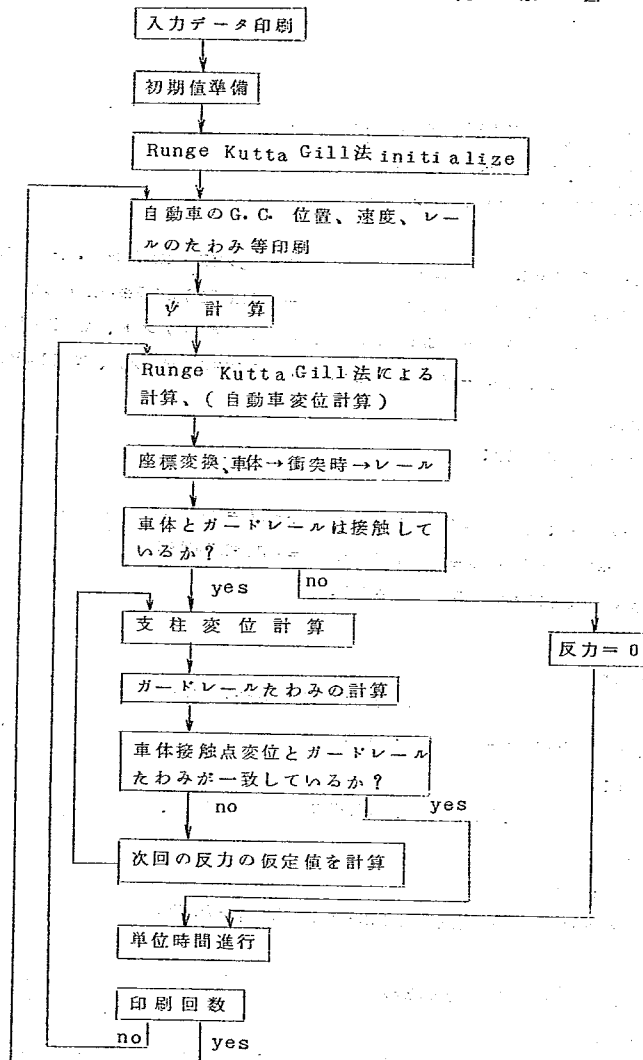
として、モーメントの腕長が求まる。

梁と車体間に働く摩擦力は、車体進行方向の減加速度に影響する。また、レールのたわみ角も車体進行方向の減加速度に影響を及ぼすファクターである。梁と車体間の摩擦係数としては、森口繁一『初等力学』p331付表9 摩擦係数を参照し、金属と金属の間の摩擦係数0.2をプロテクター-車体間に仮定する。

7-4. プログラム概要

計算プログラムは、土木研究所のOKITAG 5090HのためのALGOL, ALGOL Hで書いた。大略の流れ図は図-4'2の通りである。全体は長くなるので要点のみ説明する。2直線形塑性梁の $1/\rho$ の計算、Simpson公式、自動車の運動方程式はそれぞれprocedure LNF, procedure SIMPSON, procedure FUNCTIONとしてprocedureにしている。SIMPSONは、一般的なものであるから、LNF, FUNCTIONについて簡単に解説する。

図-42 流水図



```

procedure LNF:
begin
  for I=0 step 1 until 100 do begin
    if MOM1[I] ≥ MOMO[I] then begin
      if MOM1[I] ≤ NMATL*ME then
        INVROH[I] = MOM1[I]/E/IRL
      else
        INVROH[I] = 1.0/LAMDA/ROHE*(MOM1[I]/ME - NMATL*(1.0 - LAMDA));
      end else INVROH[I] = WSINVROH[I] - (MOMO[I])/(E*IRL) end end;
  end
  MOM1[I] は I 番目の分割点におけるそのときの曲げモーメント、MOMO[I] は
  その1ステップ前の曲げモーメントを意味する。INVROH は  $1/\rho$ 、WSINVROH
  は  $1/\rho_0$  である。

```

```

procedure FUNCTION;
begin
  THETA=Y[5]; BETA=THETA-PSI; DBETA=BETA*180.0/PI;
  CORNF1=KF1*(DBETA+DS); CORNF2=KF2*DBETA;
  if ABS(CORNF1) > FRICSF*WF/2.0
  then
    begin
      if CORNF1 > 0 then CORNF1=FRICSF*WF/2.0
      else CORNF1=-FRICSF*WF/2.0
      end;
    if ABS(CORNF2) > FRICSF*WR/2.0
    then
      begin
        if CORNF2 > 0 then CORNF2=FRICSF*WR/2.0
        else
          CORNF2=-FRICSF*WR/2.0
        end;
      RRF1=0.012*(1.0+0.16*DBETA↑2)*WF; RRF2=0.012*(1.0+0.16*
      DBETA↑2)*WR;

```

十
五
内
極

```

F[1]=Y[2]; F[2]=(G/W)*(-2.0*CORN1*SIN(PHI)-2.0*CORN2*
SIN(PHI)-2.0*RRF1*COS(PHI)-2.0*RRF2*COS(PHI)+RF*COS(PHI));
F[3]=Y[4];
F[4]=(G/W)*(2.0*CORN1*COS(PHI)+2.0*CORN2*COS(PHI)-2.0*
RRF1*SIN(PHI)-2.0*RRF2*SIN(PHI)+RF*SIN(PHI)); F[5]=Y[6];
F[6]=G/W/ROH+2*(2.0*CORN1*L1*COS(BETA)-2.0*CORN2*L2*
COS(BETA)+SG*RF*ARM-2.0/Y[2]*(KF1*L12+KF2*L22)*Y[6]);
end;

```

procedure FUNCTION は式-(1)を、Runge Kutta Gill 法 で解くため
に、6 箇の一階連立微分方程式に直したものを、ALGOL で表現したもので
ある。CORN1 は前輪のコナリングフォース、KF1 は前輪のコナリング
パワー、DBETA は BETA を角度で表したものの、DS は操舵角、FRICSF は
路面摩擦係数、RF は式-(1)における R、RRF1 は前輪のコロガリ抵抗であ
る。

ARM は式-(1)におけるモーメントの腕長、L1 は、前車軸— 重心間距離、
WF は前車軸重である。ROH は車体の慣性半径。

RONGE-KUTTA-GILL 法による微分方程式の解法は森口繁一編「ALGOL 入
門」を参照した。

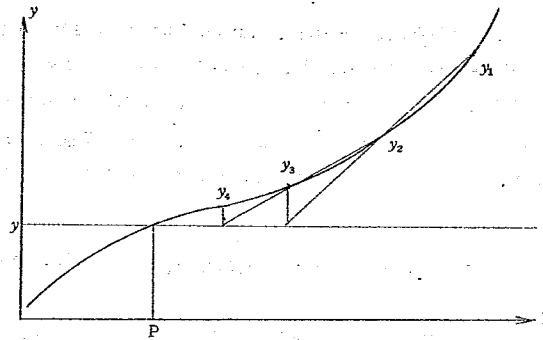
全体は要するに図-4.2 の通りであって、先ず、レールからの反力を仮定
して、車体の運動を計算し、プロテクターの接触点がガードレールの前面の
原位置から何 cm 侵入しているかを計算する。次にこの場合、レールは塑性
変形をするから、車体位置によっては、レールと車体が離れる状態になるの
でこれを吟味する。

ガードレールにかかる反力を同様仮定し、接触点に相当する点の変位を、支
柱とレールにそれぞれわけて計算してこれを合計して計算してみる。この場
合の支柱レールの挙動は、前前節において説明した通りである。この仮定反
力を順次変えて行き、先に計算した自動車側の変位と当初のガードレール前
面からの 1/100 以内の誤差 (50 cm に対して 0.5 cm) で一致するまで繰返した。
この繰返し計算の収束には、図-4.3 の各近似間の傾斜を利用する方法と図
-4.4 の 2 分法を併用した。図-4.3 による方が一般に収束は早い。場合

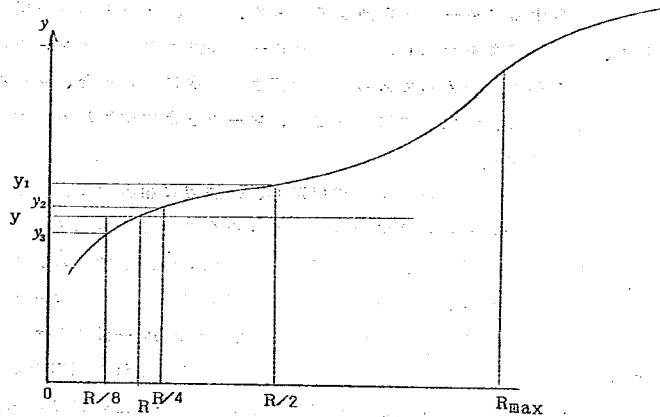
によっては発振する場合があります、ある限度以上くり返して収束しない場合は図一44の2分法にきりかえることにしている。

流れ図には表現していないが車体がレールと平行になった後、後輪が接触し始めた場合は、自動車の運動をきめる procedure FUNCTION において、接触点に関する各データを入れかえ殆ど同じルーチンで計算を続行する。

計算の単位時間には、 $1/100$ 秒を用い、衝突後1.5秒間の現象をシミュレートした。



図一43 漸近法(1)



図一44 漸近法(2)

8. 検 討

8-1. 動的計算結果の検討

これまでに述べてきた力学的仮定の全体に関して、各実験日毎の資料をまとめると表-8のようになる。II型については省略した。7章において説明した、動的計算法に従って求めた、各実験毎のボンネットマークの軌跡図の例として4月21日と4月22日のものを図-45および図-46に示す。これらにおいて、42103, 42203 は表-7の資料で、FC, FPOSTを1.0 と仮定(完全な単純梁)したもの、42153 は4月21日のデータに対しFC, FPOST各1.0 で、支柱の $k=7.404 \times 10^{-5}$, $n=1.694$ としレールに関しては、銅製レールを仮定したものである。

42104 は、42103 のデータで単にFCを0.8にFPOSTを0.9に変更したものである。42103, 42203 の軌跡図を実測値とくらべると、大体の傾向はあっているが、ポスト、レールのたわみが実際より大きく、かつ離脱角が大きい。このことは、車体とレール間に働く力が、実際より大きく計算されていることを意味する。

加速度の時間的変化の様態を図-47~図-52に示した。加速度計による実測値は既に土研資65号に示したが再録すると表-9の通りである。加速計の記録は、車体自身の高周波の振動を含んでおり、ガードレールの影響を分離し難かったが、要するに逐く小さいものであった。データ、42103, 42104, 42153 の意味は前記の通りであるが、図-47から見れば、これらの間においては加速度においても大差のないことが判る。

計算値と、実測値の不一致は今後の検討課題であるが、現在の所では、その相当部分は、自動車側の計測値、計算値に問題があるように想像される。特に21日、22日の場合は、かなり浅い角度で衝突しており、上記の計算では、車輪固定、舵角0としているが、その影響がかなり大きいと考えられる。

表-8 アルミガードレール実験計算基礎資料まとめ

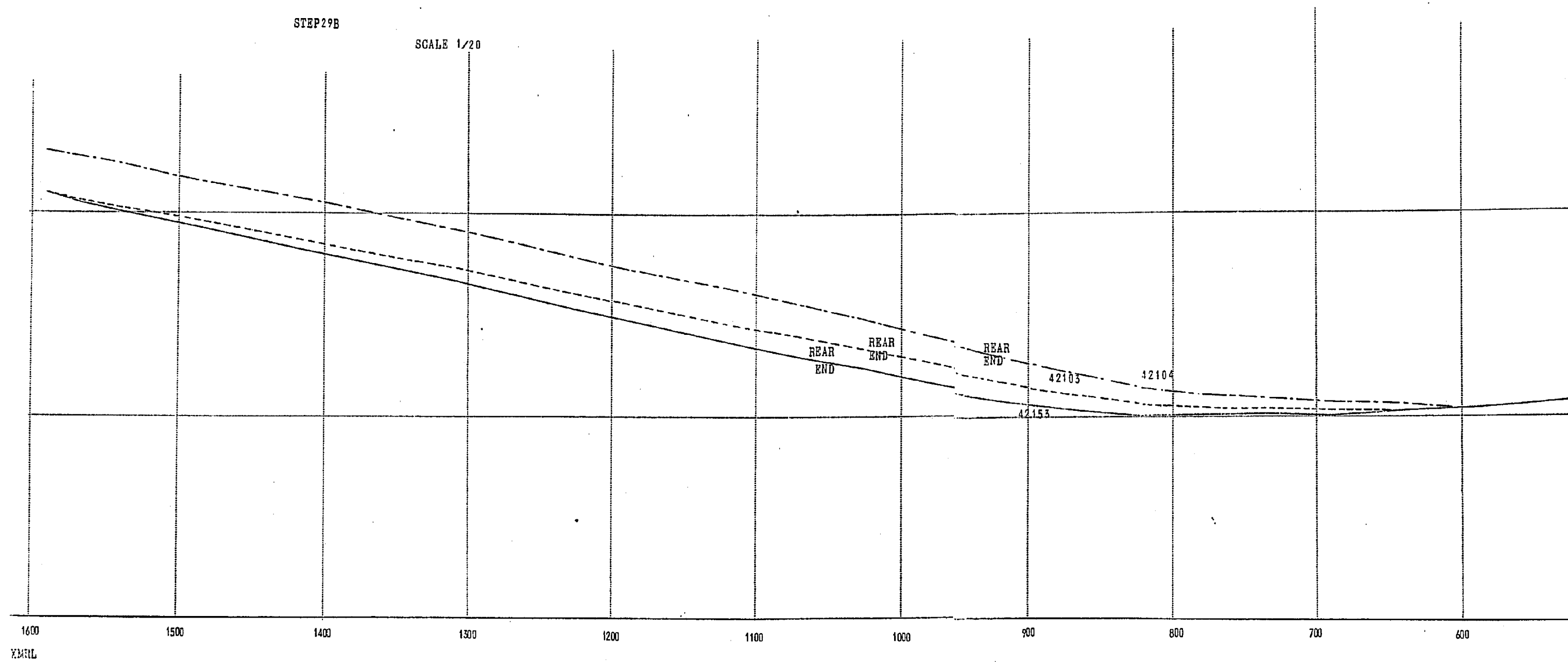
実 験 日 時	420	421	422	426
材 料 型 式	アルミⅠ型	アルミⅠ型	アルミⅠ型	アルミⅠ型
速度 {	25.5	32.45	33.05	—
ビシグラフk/h	30.9	32.1	31.8	—
サイクルカウンタ-k/h	7.08	9.03	9.18	10.82
フイルムm/S	8.58	8.93	8.84	—
ビシグラフm/S				
サイクルカウンタ-m/S				
角度 { 軌 跡 図(度)	16.5	8.75	12.0	
{ フ ィ ル ム				
角 度 採 用 値	同上	同上	同上	15.0
操 舵 角 推 定 値				
接 触 開 始 点 (cm)	P5+320	P7+220	P6+370	P6+23
支 柱 間 隔	380	380	380	380
2 次 率 cm	178	178	178	178
レール断面 巾 cm	35	35	35	35
矩 形 断 面 仮 定 厚 cm				
材 料 性 質	3800	22000		
$\sigma = F \varepsilon^0$ { F kg/cm ²	0.07	0.45		
{ n			左に同じ	
材 料 性 質	7.23 × 10 ⁵			
2 直 線 { E	2.91 × 10 ⁴			
{ F			左に同じ	
kg/cm				

実 験 日 時	420	421	422	426
材 料 形 式	アルミ I 型	アルミ I 型	アルミ I 型	アルミ I 型
支 柱				
・ 横方向強度 ①	$\begin{cases} k \\ n \end{cases}$			$\begin{cases} 420 \\ 422 \end{cases}$
②	$\begin{cases} k \\ n \end{cases}$	$\begin{cases} 2.355 \times 10^{-5} \\ 1.862 \end{cases}$		に同じ
自 動 車 デ ー タ				
ハ ン ド ル	フリー	フィックス	フィックス	(計算はすべて フィックスと して行う)
前 輪 軸 重 kg	3430	3210	3430	3015
後 輪 軸 重 kg	6010	2770	6010	6095
前 輪 一 重 心 距 離 cm	306	222	306	321
後 輪 一 重 心 距 離 cm	174	258	174	159
慣 性 モーメント $\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	6707	6235	6707	6279
慣 性 半 径 cm	261	261	261	261
プ ロ テ ク タ 半 径 cm	150	150	150	(30) 仮定
重 心 - プ ロ テ ク タ 中 心 間 距 離 cm	299	215	299	(351)
プ ロ テ ク タ ー 中 心 距 離 cm	0	0	0	(240) 仮定
後部衝突点重心間距離(後輪)cm	174	258	174	159
後部衝突点車体中心線間隔 (片側)cm	150	150	150	150
レール、車体マサツ係数	0.2	0.2	0.2	0.3
車輪、路面マサツ 係 数	0.8	0.8	0.8	0.8
K F 1 , K F 2 (kg/度)	50 , 55	左に同じ		

図-45 ホンネット上のマークの軌跡計算例

STEP29B

SCALE 1/20



SCALE 1/20

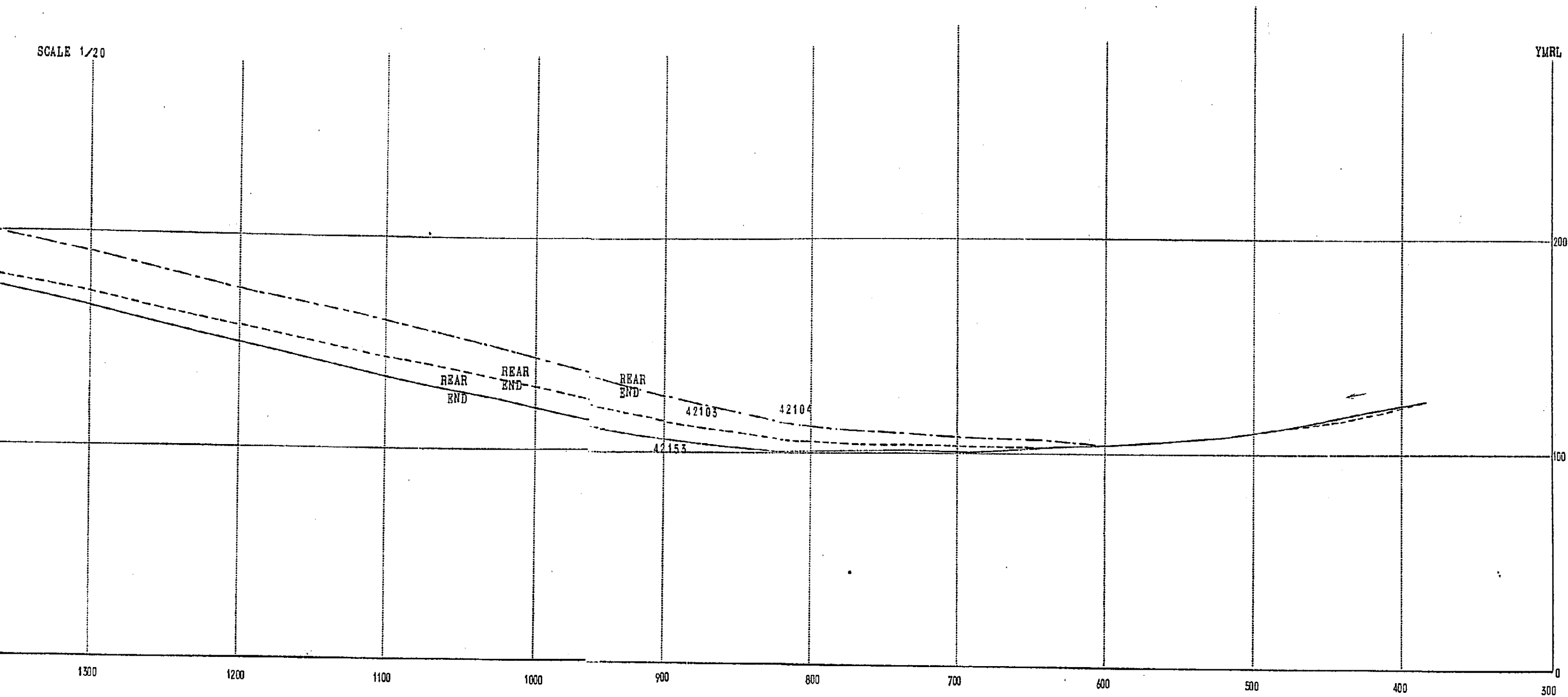
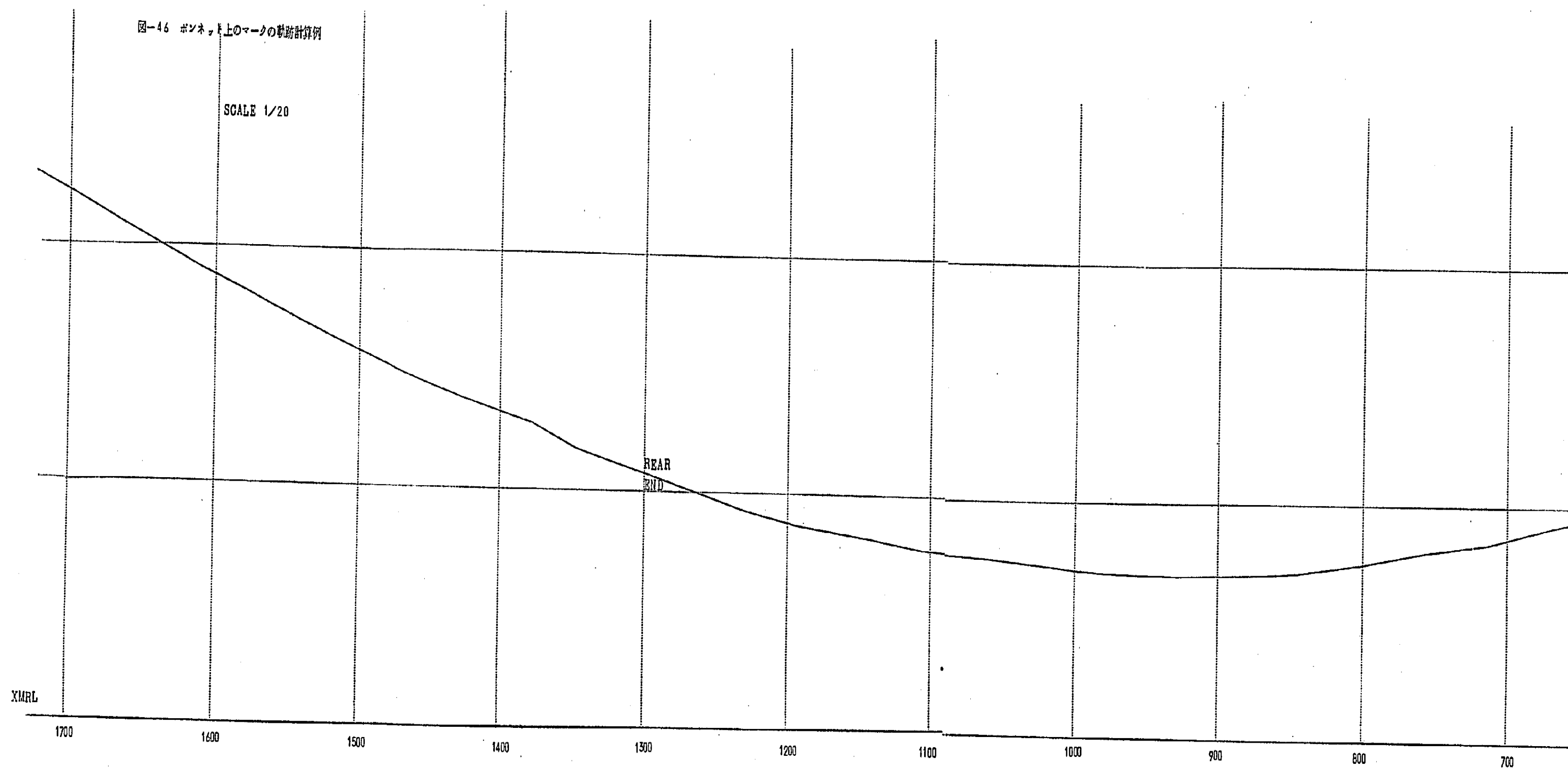


図-46 ボンネット上のマークの軌跡計算例

SCALE 1/20



計算例

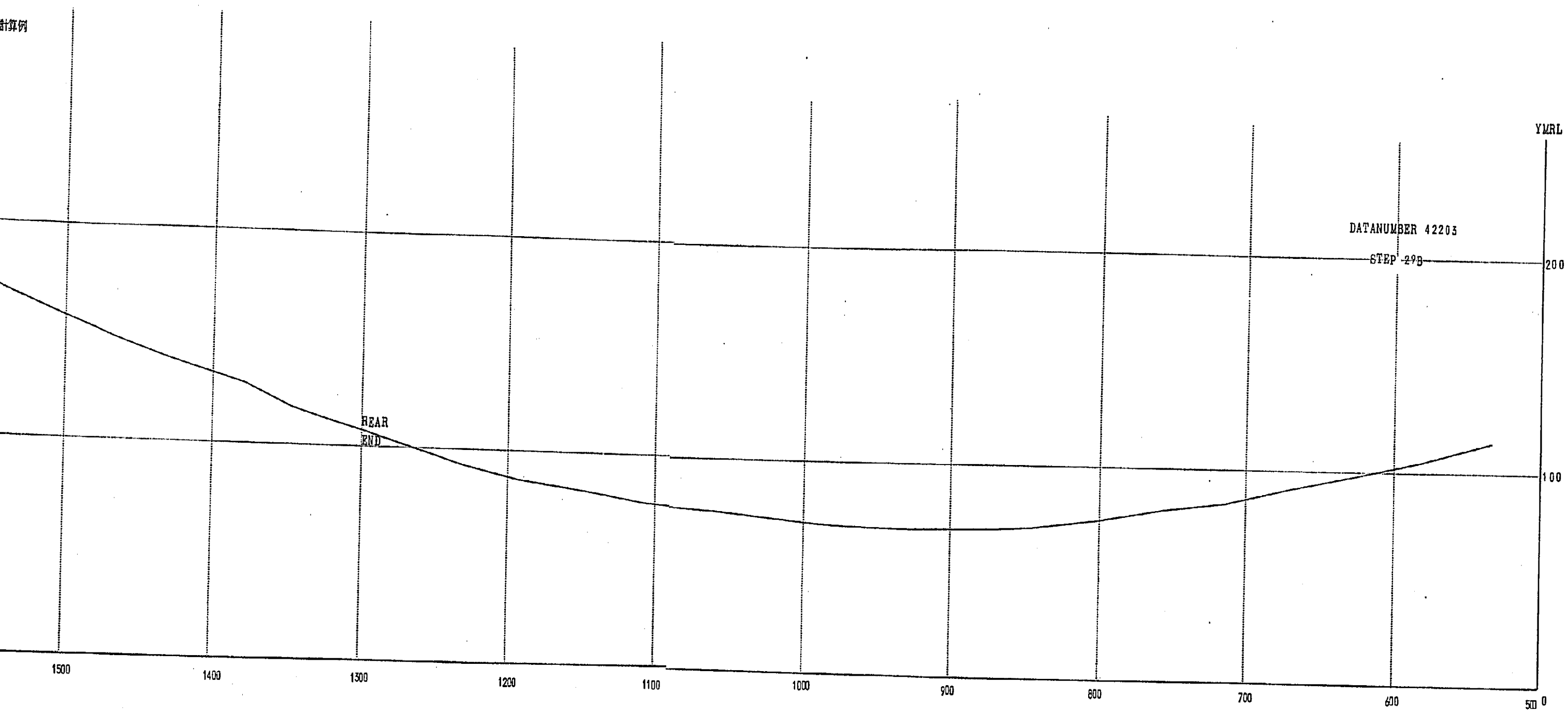
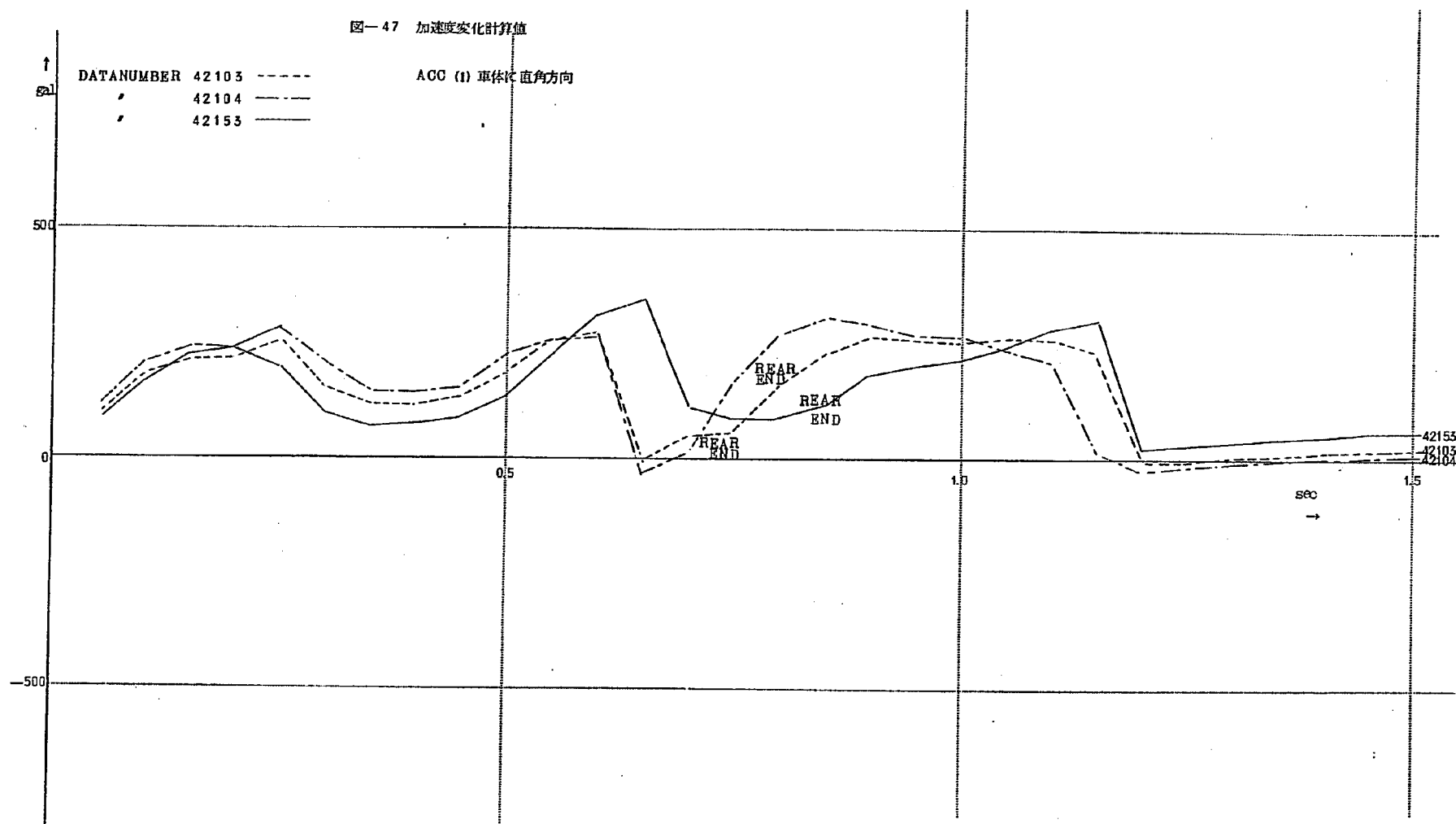


図-47 加速度変化計算値



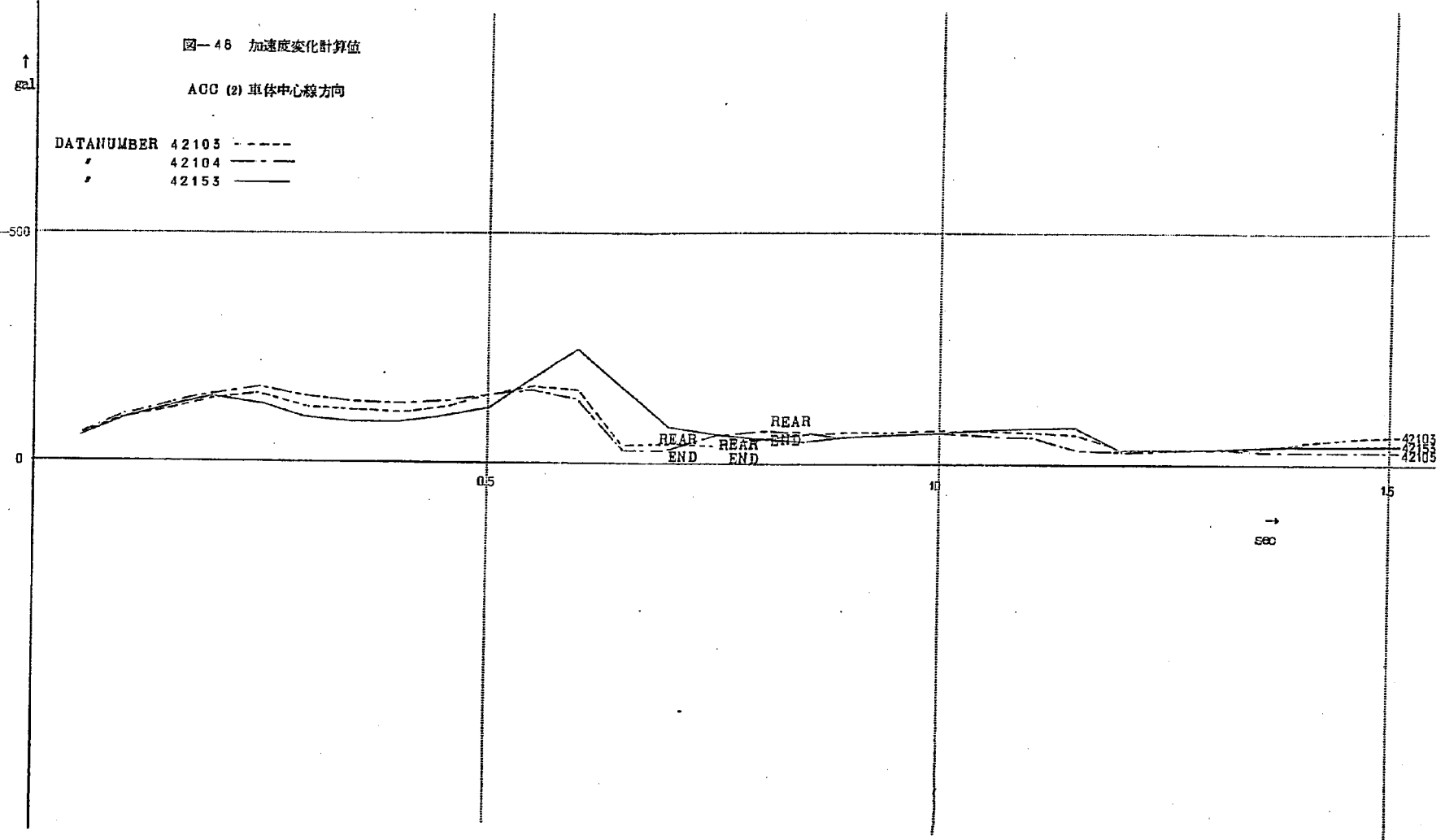


図-50 加速度変化計算値

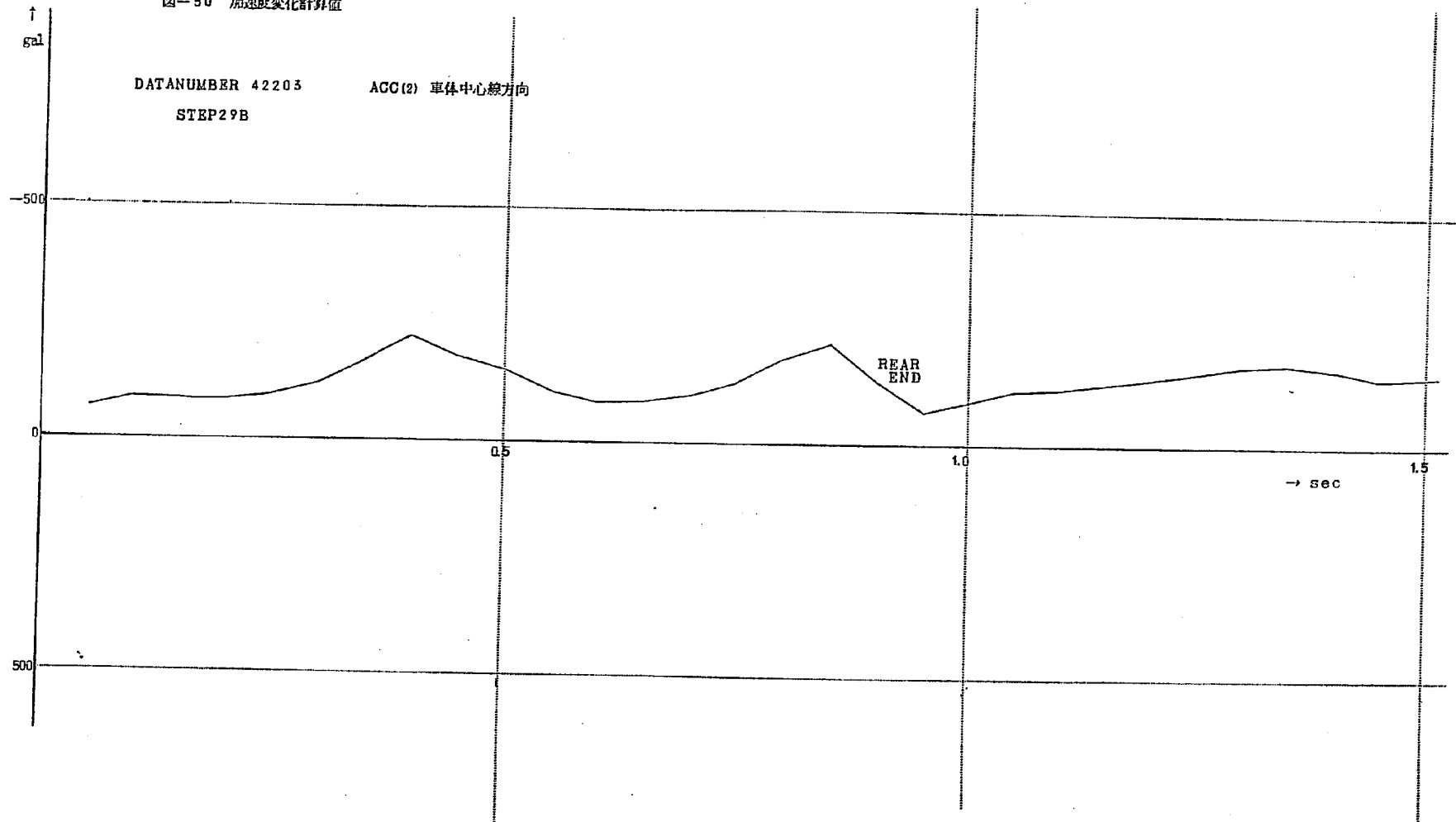
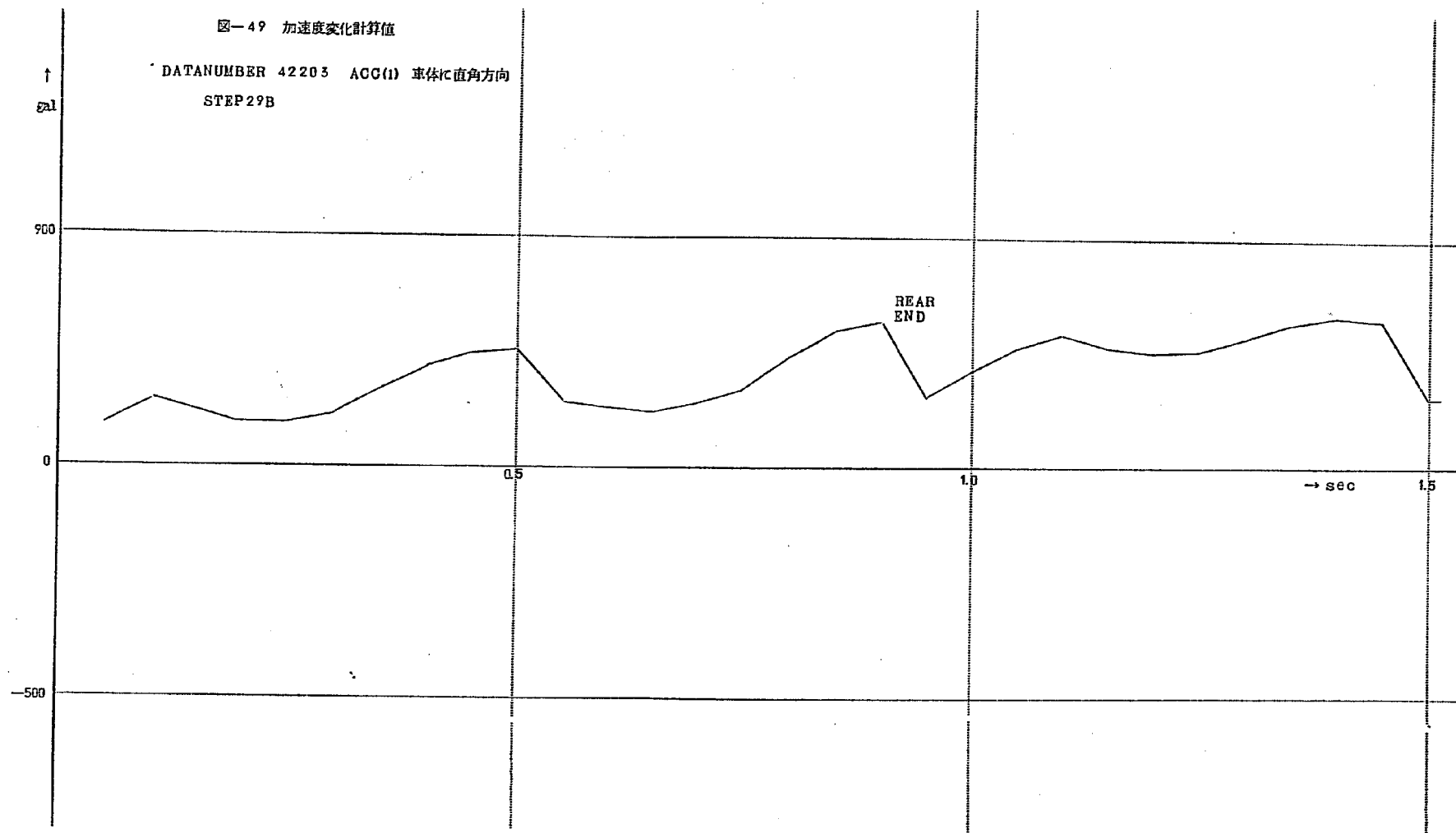


図-49 加速度変化計算値

DATANUMBER 42203 ACG(1) 車体に直角方向
STEP29B



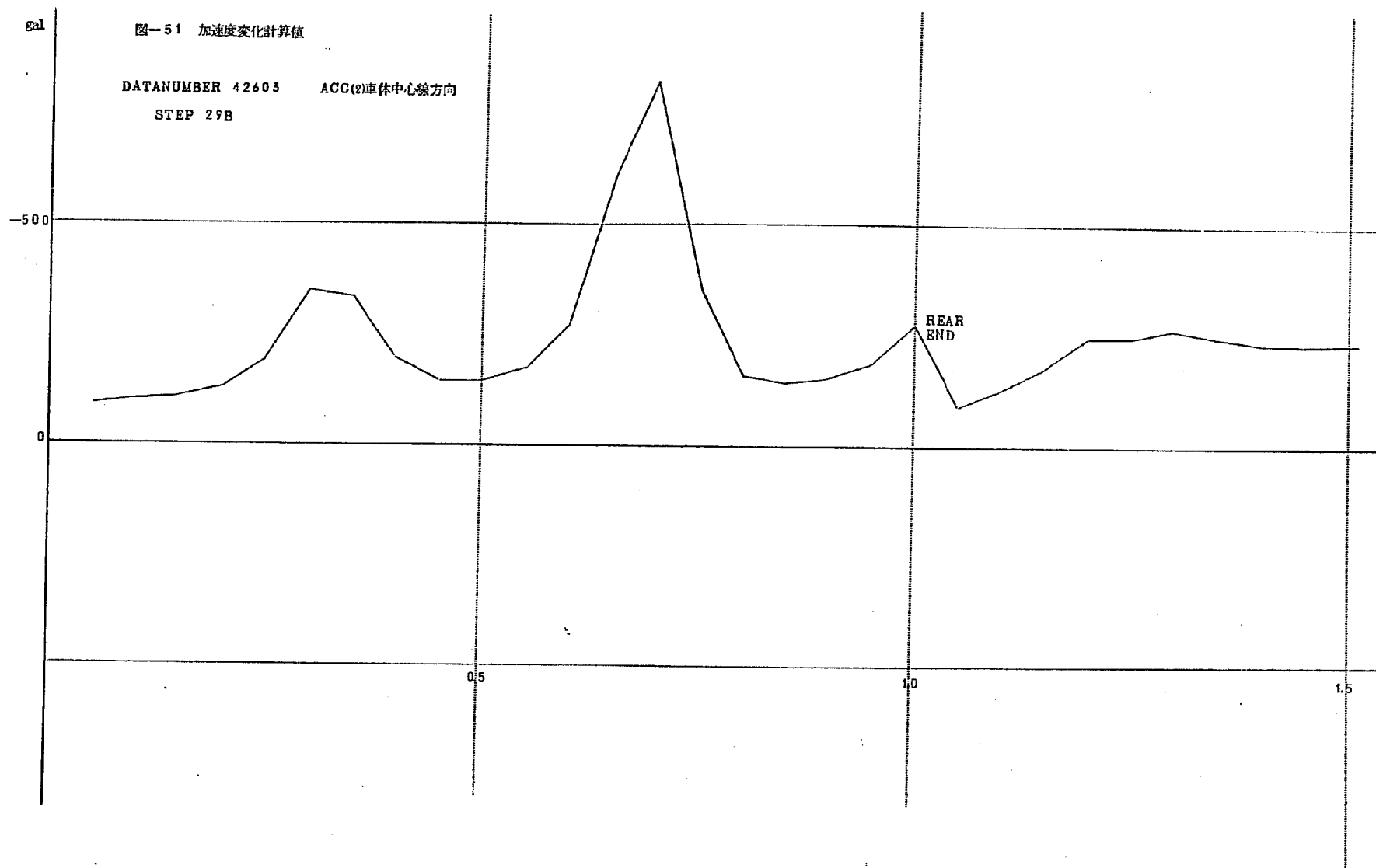
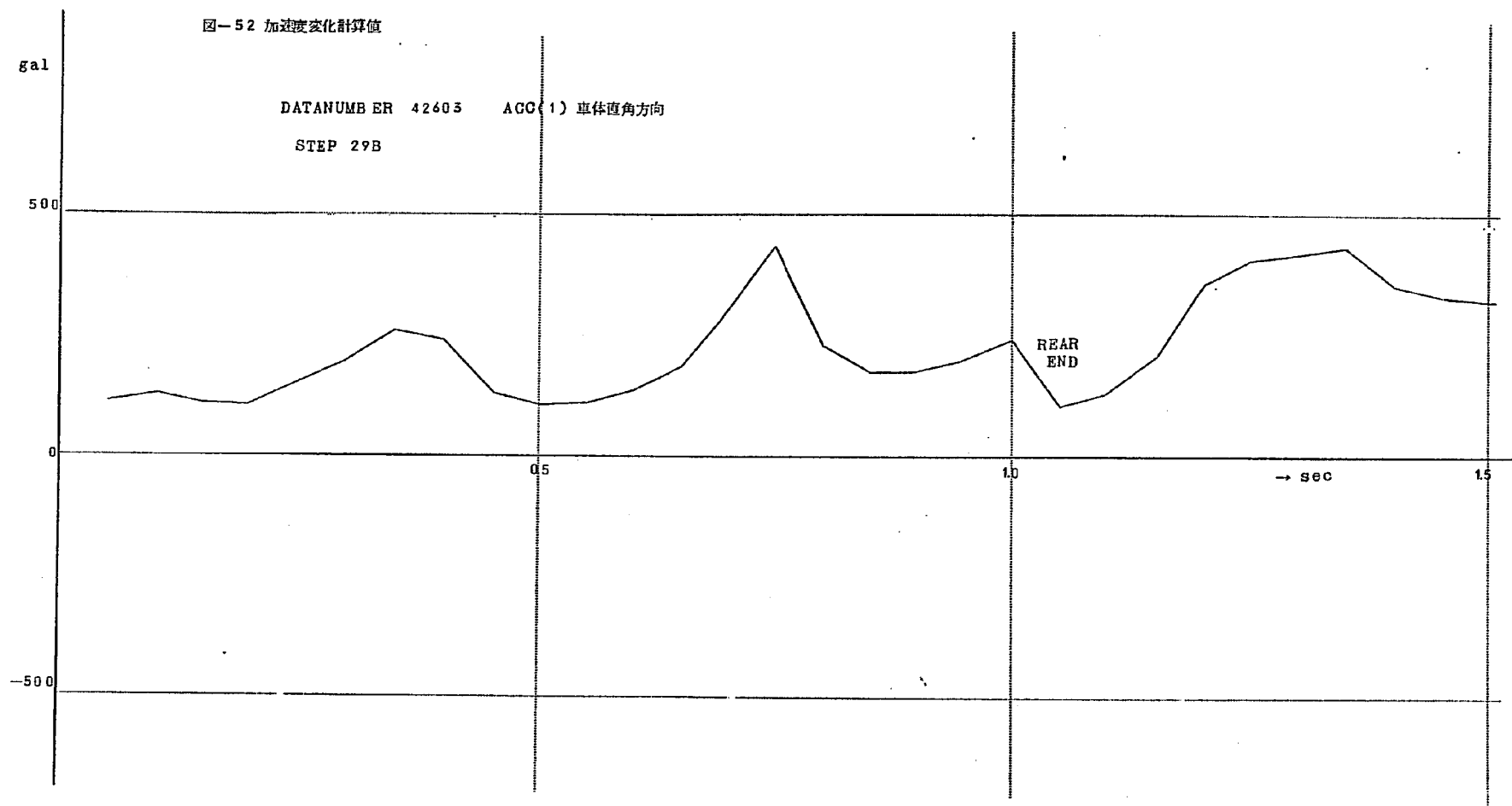


図-52 加速度変化計算値



8-2 全般的検討

はしがきにおいて既に述べた様に、実験した荷重範囲において、アルミニウムガードレールが、その機能を果たしたことは、実験において観察した通りである。

また動的解析計算において、鋼ガードレールを全く同じ荷重状態で仮定して計算した場合、差は余りないことが明らかとなった。しかし我々はお次のことに注意したいと思う。

- 1) 式(1)の微分方程式等から判断する限りにおいて、弾性係数(ヤング率)の低い材料がレール材料として必しも優れているとはいえない。

以上の解析で仮定しているように、レールの質量は車両に較べて本来小さく無視できるものである。これをいいかえれば、初期衝撃による車両側の減速度は問題にならないのである。弾性係数の低いこと(たわみやすいこと)は、逆にボクシングを生じやすい傾向を持つことに注意する必要がある。

- 2) 供試アルミガードレールは、梁背を高くすることによって、弾性係数および降伏点の低いことをカバーしているが、これの影響は、上記の解析に考慮されていない。断面2次率を高くすれば、梁の降伏点は高くなるが、局所的な破壊が進行しやすくなるか。ガードレールとしては、梁が塑性域に到達し、完全に破断するまでの、挙動が問題となる場合があるのではないか。破壊強度は他の材料と比較してどうか?これについても結論は今回の実物実験からはえられていないが、今後のガードレールの力学における一問題点であろうと思われる。

- 3) アルミ合金の硬度が鋼に比して問題とならないか。

- 4) 材料および製品の品質の安定性。

これらの点に関して、さらに検討が加えられた上では、結局問題は経済性に帰せられることになるであろう。アルミニウム合金の耐食性は、どのような環境でどのように効果的であるかについても検討する必要があると思われる。

9 む す び

昭和 41 年 4 月に実施した耐食アルミニウム合金製ガードレール実物実験の資料をとりまとめ、一応、現行ガードフェンス設置要綱の計算方式にこだわらないで、動的解析法によって検討を試みた。

計算結果と実験結果とは必しも完全に一致したとはいえない。これについて、今後検討を続ける余地が多分にあるようである。

しかしながら、動的解析を行うことによって、材料や構造を変化させた時の自動車や、レールの挙動解析に対する一応の目安をたてることが可能になったと信ぜられる。

供試アルミニウムガードレールそのものについては、試験荷重範囲では、ガードレールの機能を有していることが観察されたが、完全な解明には、これもなお若干の検討事項が残されているように思われる。

附 錄 1

B00312

```

begin external PRINTI , PRINTR , PRINTF , CRLF , SPACE;
    external integer FIX4;
    integer I,J,K;
    real c1,C2,C3,C4,T1,T2,N1,N2,AMATL,FMATL,NMATL,COMPIRF,
    L,XRLCP,D,TAU,X,T,B,YRLCPL,DP,MINP,MAXP;
    PRINT("CHIBA EDAMURA ");
    CRLF(2); PRINT("B00312"); CRLF(1);
    READ(B,T,L,FMATL,NMATL,XRLCP,D,DP,MINP , MAXP);
    PRINT("MINP"); PRINTR(3 , MINP); PRINT("DP"); PRINTR(3 ,
    DP); PRINT("MAXP"); PRINTR(3 , MAXP);
    PRINT("B"); PRINTR(3 , B); PRINT("T"); PRINTR(3 , T);
    PRINT("L"); PRINTR(3 , L); PRINT("F"); PRINTR(5 , FMATL);
    PRINT("N"); PRINTR(3 , NMATL);
    PRINT("A"); PRINTR(3 , XRLCP);
    PRINT("DX"); PRINTR(3 , D); CRLF(2);
    AMATL=2.0*B*FMATL*(T/2.0)†(2.0+NMATL)/(2.0+NMATL);
    for COMPIRF=MINP step DP until MAXP do
begin
    PRINT("P"); PRINTR(3 , COMPIRF);
    C1=(COMPIRF*(L-XRLCP)/(AMATL*L))†(1.0/NMATL);
    C2=(COMPIRF*XRLCP/(AMATL*L))†(1.0/NMATL);
    N1=1.0+1.0/NMATL;
    N2=2.0+1.0/NMATL;
    T1=XRLCP†N2/(N1*N2);
    T2=(L-XRLCP)†N2/(N1*N2);
    C3=(-C1*XRLCP†N1/N1-C2*(L-XRLCP)†N1/N1-(C1*T1-C2*T2)
    /(L-XRLCP))/(1.0+XRLCP/(L-XRLCP));
    C4=(C1*T1-C2*T2+C3*XRLCP)/(L-XRLCP);
    CRLF(2); PRINT("TAU"); CRLF(1);

```

```

for X=0 step D until XRLGP do
begin
    if X=0 then
    begin
        TAU=C3; go to L1
    end
    else
        TAU=C1*X↑N1/N1+C3;
    L1: PRINTR(8, TAU);
    end;
    CRLF(1);
for X=0 step D until L-XRLCP do
begin
    if X=0 then
    begin
        if X=0 then
        begin
            TAU=C4; go to L2
        end
        else
            TAU=-(C2*X↑N1/N1+C4);
        L2: PRINTR(8, TAU);
        end;
        CRLF(2);
        PRINT("Y"); CRLF(1);
for X=0 step D until XRLCP do
begin if X=0 then
    begin YRLCPL=0; go to L3 end
    else YRLCPL=C1*X↑N2/N1/N2+C3*X;
    L3: PRINTR(8, YRLCPL);

```

```

end;
CRLF(1);
for X=0 step D until L-XRLCP do
begin
if X=0 then begin YRLCPL=0; go to L4 end
else YRLCPL=C2*X↑N2/N1/N2+C4*X;
L4: PRINTR(8, YRLCPL);
end;
CRLF(3);
end;
PRINT("END"); CRLF(1);
end;

```

附 录 2

```

      BOO323
begin real E,IRL,FMATL,ME,NMATL,P,XRLCP,L,DX,MINP,MAXP,DP,
COMP1RF,LAMDA,ROHE,DRL;
integer I, J;
array MOM1,VECTAU,INVROH,VECYRL,VECTAU(0:100);
procedure SIMPSON(INTEG,N1,N2,FUNC,D); value N1,N2;
value D;
integer N1, N2;
real D;
real array INTEG, FUNC;
begin
integer JSIMP;
INTEG[0]=FUNC[0];

```

```

    for JSIMP=N1 step N1 until N2 do
    begin
        INTEG(2*JSIMP)=JNTEG(2*JSIMP-2*N1)+(FUNC
        (2*JSIMP-2*N1)+FUNC(2*JSIMP-N1)*4.0+FUNC
        (2*JSIMP))*D/3.0;
    end;
end;

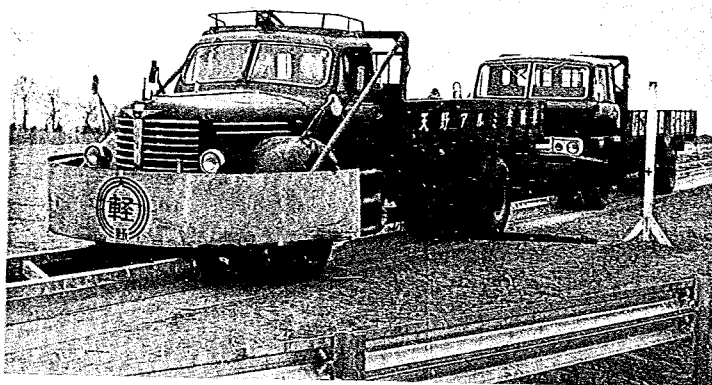
procedure LNF;
begin
    for I=0 step 1 until 100 do
    if MOM1[I] ≤ NMATL*ME then
        INVROH[I]=MOM1[I]/E/IRL
    else
        INVROH[I]=1.0/LAMDA/ROHE*(MOM1[I]/ME-NMATL*(1.0-
        LAMDA));
    end;
    READ(E,IRL,FMATL,ME,NMATL,XRLCP,L,DX,MINP,MAXP,DP);
    for I=0 step 1 until 100 do
        INVROH[I]=VEGYRL[I]=VECTAU[I]=MOM1[I]=0;
        PRINT('CHIBA#EDAMURA '); PRINT('B00323 '); PRINT
        ('LINEAR#TYPE#PLASTIC#DEFORMATION ');
        PRINT('DEFLECTION#OF#SIPLE#BEAM ');
        PRINT('E=', -D. 4D10-2D2B, 'IRL=', -D. 4D10-2D2B, 'FMATL=',
        -D. 4D10-2D2B, 'ME=', -D. 4D10-2D2B, 'NMATL=', -D. 4D10-
        2D2B, 'XRLCP=', -D. 4D10-2D2B, 'L=', -D. 4D10-2D2B, 'DX=',
        -D. 4D10-2D2B, 'MINP=', -D. 4D10-2D2B, 'MAXP=', -D. 4D10-
        2D2B, 'DP=', -D. 4D10-2D2B);
        E, IRL, FMATL, ME, NMATL, XRLCP, L, DX, MINP, MAXP, DP);
        LAMDA:=FMATL/(E+FMATL); ROHE=E*IRL/ME; DRL:=L/100.0;
    for COMP1RF=MINP step DP until MAXP do

```

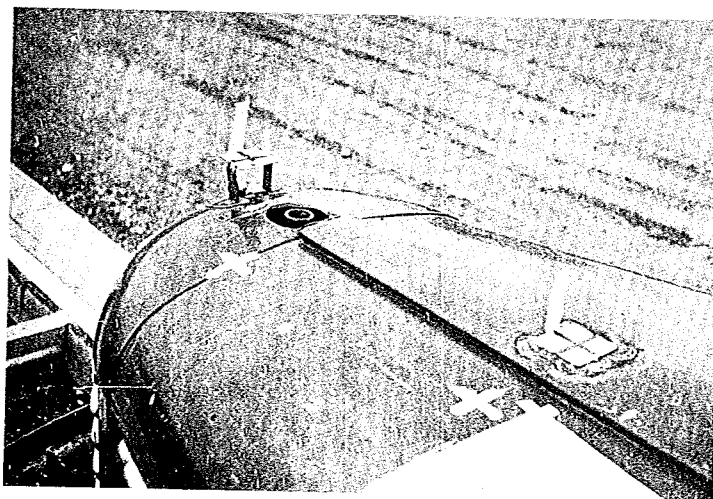
```

begin
  PRINT( "P= ',-D. 4D10-2D2B//', COMP1RF);
  for I=0 step 1 until 100 do
    if FLOAT(I)*DRL<=XRLCP
      then
        MOM1[I]=COMP1RF*(L-XRLCP)*FLOAT(I)*DRL/L
      else
        MOM1[I]=COMP1RF*XRLCP*(L-FLOAT(I)*DRL)/L;
      LNF;
    SIMPSON(VCTAU,1,50,INVROH,DRL);
    SIMPSON(VEGYRL,2,50,VCTAU,20*DRL);
    J=FIX(100*DX/L); PRINT( "MOMENT // ");
    for I=0 step J until 100 do
      PRINT( D. 3D10-2D2B , MOM1[I]);
    for I=0 step 1 until 100 do
      VEGYRL[I]=VEGYRL[I]-VEGYRL[100]*FLOAT(I)*DRL/L;
      PRINT( // Y // );
    for I=0 step J until 100 do
      PRINT( D. 3D10-2D2B , VEGYRL[I]); PRINT( 3// );
    end;
    PRINT( // END // );
  end;
end;

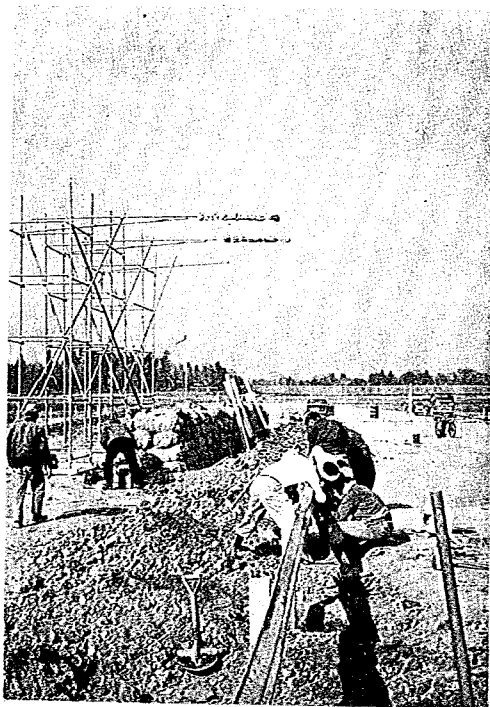
```



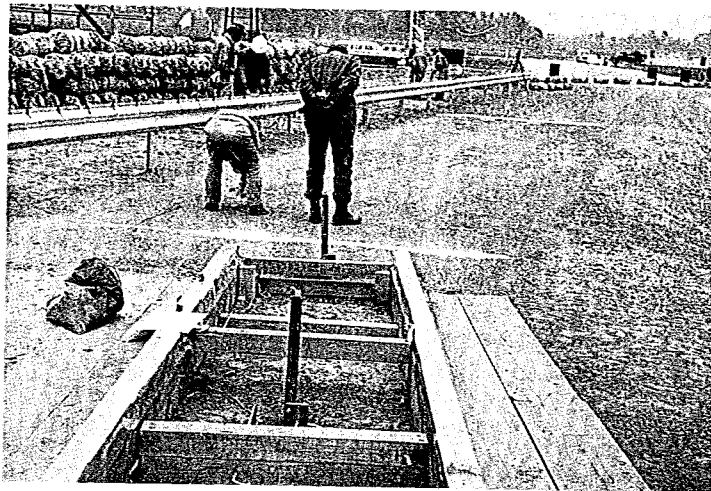
実験に使用したトラック



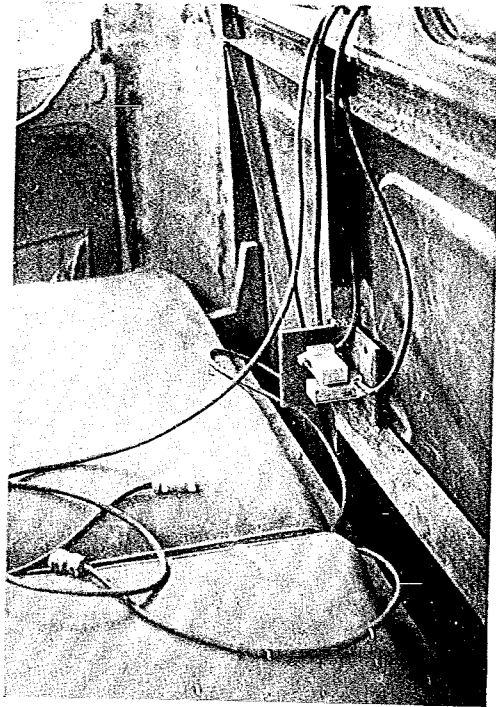
ボンネット上のマーク



II型レールの組立てと 16mm カメラ用パイプ足場



突入速度測定装置と木製軌道の先端



座席にとりつけた加速計



アルミニウムガードレール I 型 (高速道路用) の変形状況



アルミニウムガードレール II型の変形状況