

空 気 バ ネ 台 車

Air Suspension Truck

村 田 師 男* 別 府 忠* 平 塚 幸 哉*

Norio Murata Tadashi Beppu Kosai Hiratsuka

内 容 梗 概

空気バネは最近車輛界に脚光を浴びて登場してきた新しいバネであつて、

- (1) バネ常数を十分小さくとることができる。
- (2) バネ作用にあずかる空気容積または内圧を調節してバネ常数を変えることができる。
- (3) 第1項によるもののほか、そのバネ材の特質として高周波振動の遮断効果がある。
- (4) 空気バネ本体とそれの付加タンクとの間に絞りを設けてダンピングを与えることができる。

といった特長をもち、これを台車に適用すると、

- (1) 台車のバネ系の簡略化、ひいては台車構造または車輛構造の簡略化に役だつ。
- (2) バネの高さを一定に保ちながら、満員空車にかかわらず良好なしかもほとんど変らない乗心地を得ることができる。
- (3) 曲線において車体の傾きを修正する働きをもたせられる。

といった効果がある。本稿は、

- (1) 空気バネを使つた車輛の歴史の概観
- (2) 空気バネの特長と原理。
- (3) 空気バネの特長を生かして日立製作所において製作した路面電車用 KL-10 型台車の構造と試験結果の概要

について述べてある。

〔I〕 緒 言

車輛の振動性能向上、レールからくる衝撃の緩和に役だつ空気バネは、古くから使用されている自動車用空気入りタイヤおよび航空機脚装置のオレオ緩衝装置を除けば、まったく新しいバネである。しかしながら空気バネは特許の面においてはすでに1900年初頭にみられ、その作用効果についても、概念的には数多くの人々によつて理解されているところである。

第二次世界大戦を契機としたゴム工業技術の飛躍的な進歩と、車輛の乗心地に対する顧客とメーカーの強い関心が、アメリカにおいて1952年ゼネラル・モーターズ製作にかかるバスに空気バネの実用化を成功させ、その後数多くのバス会社で営業運転に繰り入れられて“Ride on the Air”と広く宣伝されている。これに刺戟され鉄道車輛界においても、地域的には欧米諸国はもとより日本へもその影響が波及し、試作車が走りすでに営業運転に入つたところもある。

日立製作所では戦後いちはやくこの点に着目し⁽¹⁾、1949年横浜市電向 KL-1 台車に空気バネを取り付けて試験を行つた。しかしながら当時は日本のゴム工業技術が貧困であつたので、金属ベローにたよらざるを得ず、材料の疲労その他の難関に突き当たり、問題点を指摘しただけに止まらざるを得なかつた。

昨年度より再度本格的にこの問題を取り上げ、空気バネ本体および高さ制御弁についての基礎的研究より、台

* 日立製作所笠戸工場

車構造と関連した空気バネ台車についての台車動的試験機および工場内専用線での走行試験を経て、路面電車用 KL-10 台車を製作し良好な結果を得ている。

〔II〕 空気バネの特長と原理

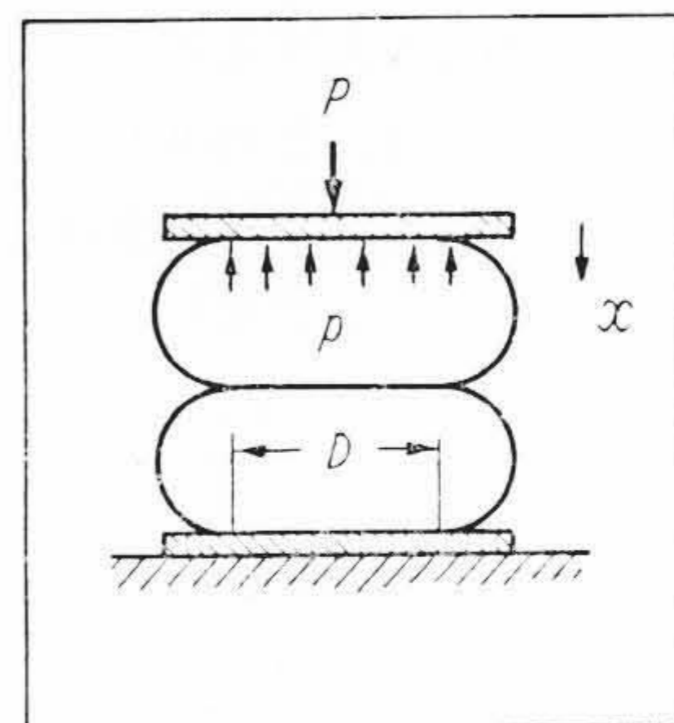
空気バネは次のような特長をもつている。

(1) バネ常数が小さくとれ、かつ簡単な装置で容易にバネ常数を制御できる。

以下の理解をたすけるためにバネ常数の計算式をあげる。第1図に示す円型の空気バネにかかる力を P 、バネの内圧 p (ゲージ圧力)、内圧が直接上板にかかる面積を A (直径を D とする) とし、ゴム被膜の曲げ剛性が無視できれば

$$P = Ap \dots\dots\dots (1)$$

がなりたち、したがつてバネの標準高さよりの変位を x とすればバネ常数 k は



第1図 空 気 バ ネ

$$k = \frac{dP}{dx} = A \frac{dp}{dx} + p \frac{dA}{dx} \dots\dots\dots(2)$$

となる。ここで第2式右辺第1項(k')は、バネの変位によつて内圧が変化することによるバネ常数の成分であり、おなじく第2項(k'')はバネの動きによつて有効面積が変化することによるものである。

バネ上の静荷重に対しては、空気の給排を行い、内圧を変えて高さを一定に保つ形式では、標準高さ付近で内圧によつてはバネ常数が変化するが、 x については定数と考へてもさしつかえない。このことはバネ常数の上記の成分についてもそれぞれいえることである。そこで $x=0$ における状態をサフィックス0をつけて表示し、以後これについて考へることとする。

現在までに知られている形式の空気バネ(第2図ピストン型, 第3図同変形, 第4図鉄研A型, 第5図鉄研B型)について第2式第1項は

$$k'_0 = A_0 \left(\frac{dp}{dx} \right)_{x=0} = \frac{m(1+p_0)A_0^2}{V_0} \dots\dots(3)$$

で表わされる。

ただし m : ポリトロープ指数 V_0 : バネ作用をする空気の体積で一般には付加タンク(容積 V_T)とバネ本体(容積 V_B)の容積の和

また第2項 k''_0 は第2図より第5図の形式に応じて0よりしだいに増大する(ただし第3図形式についてはバネの作動の全範囲にわたつて別途考へる必要がある)。一例として第4図形式について k''_0 を計算すると

$$k''_0 = p_0 \left(\frac{dA}{dx} \right)_{x=0} = p_0 \frac{\pi^2 D}{4n} \dots\dots\dots(4)$$

となる。

ただし n : ヒダ数

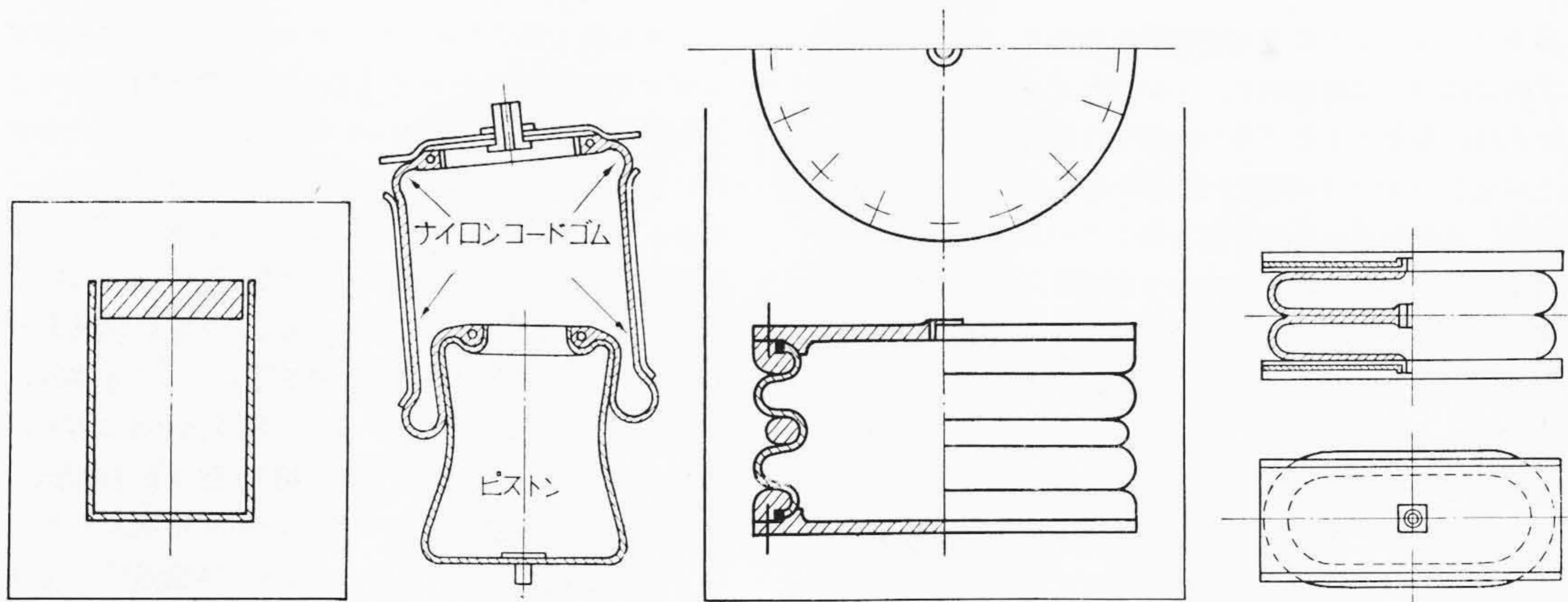
したがつて車輛用空気バネを設計する際に、最高荷重 W_{max} とコンプレッサ形式およびゴム膜の強度によつて

p_{0max} が決められるとき、われわれが自由にできるのはバネの形状の選択と V_0 である。なおポリトロープ指数 m の低いガス体(液相と気相の共存するものを含む)を選ぶことも興味ある問題である。

(a) 圧縮空気の給排によるバネ常数と高さの制御

荷重のいかんにかかわらず空気バネの高さを一定に保つための、後述するような機構を設けるとき、すなわちバネ常数に關係する V_0 を一定に保つ場合には、第1式より明らかのように内圧 p_0 は荷重 $W(W=Mg)$ に比例し、またバネ常数 k_0 は第3式および第4式により p_0 の変化につれて直線的に変化する。車輛の振動特性および衝撃に対する特性は(簡單化するため1自由度系について考へる) $\sqrt{\frac{k_0}{M}}$ によつて決まるものであり、普通のコイルバネを使用すれば荷重に対して k_0 は常に一定であり、一方 M は満員一空車で2:1程度の変化があるので $\sqrt{\frac{k_0}{M}}$ は大きく変る。ところが空気バネでは満員一空車にかかわらず $\sqrt{\frac{k_0}{M}}$ はほとんど変らない、従来においても補助バネを用いてバネの特性曲線を変えて、乗心地を可及的に変らないよう試みたものはあるが満足すべきものはなく、その上バネを十分に軟く保つということはいろいろな制限より不可能に近いことであつた。車輛には連結器高さについての法規上の制限もあり、コイルバネを使つている限りその軟らかさには限度があるが、空気バネでは高さを一定に保てるので、 V_0 の取り方で十分軟いものが得られる。第6図はある条件のもとでのコイルバネと空気バネ(高さ制御装置付)のバネ常数の比較を示す。ただし同図内の空気バネのバネ常数は、後述する動的バネ常数 k_3 をとつてある。

次にこのような高さの制御に使われる制御弁には、電気接点で最高高さとして最低高さを決め、荷重が増加すれば一つの電気回路が閉じられ、荷重にみあつて圧力

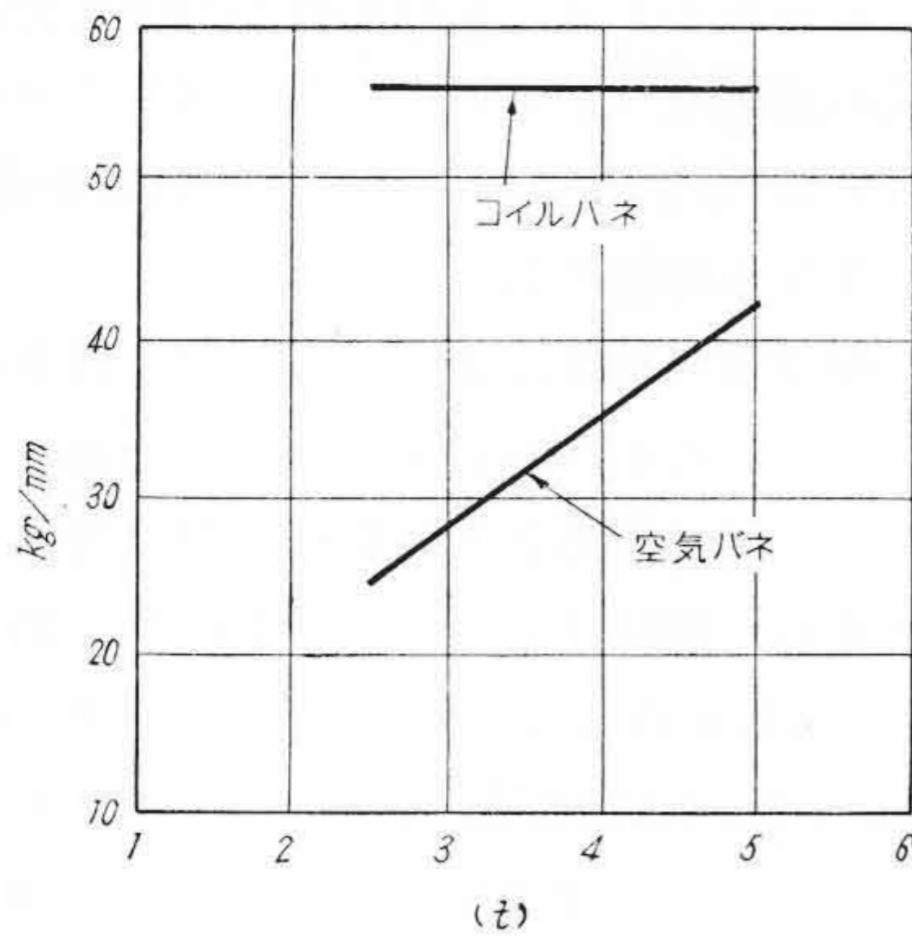


第2図 ピストン型空気バネ

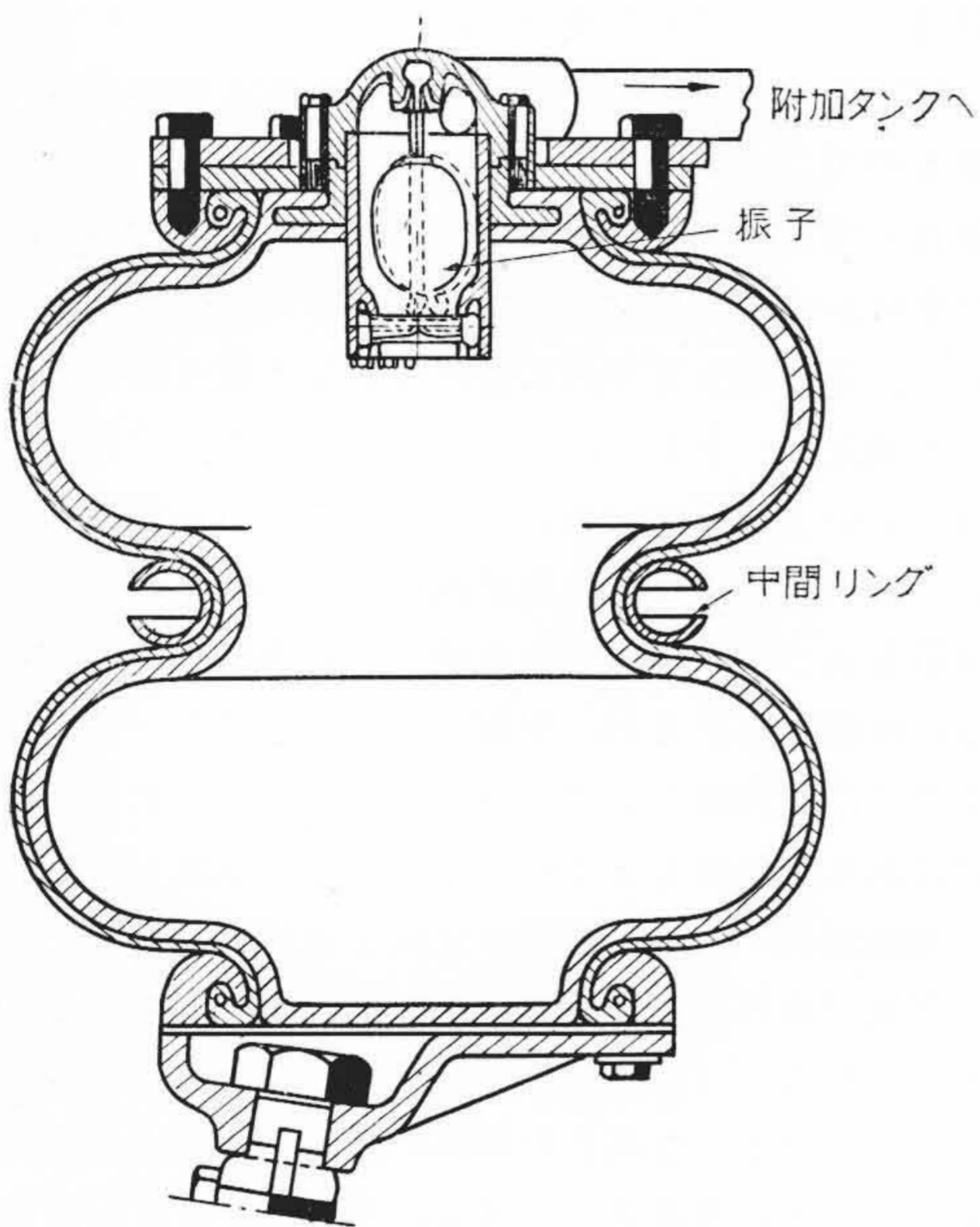
第3図 ピストン型変形空気バネ

第4図 鉄研A型空気バネ

第5図 鉄研B型空気バネ



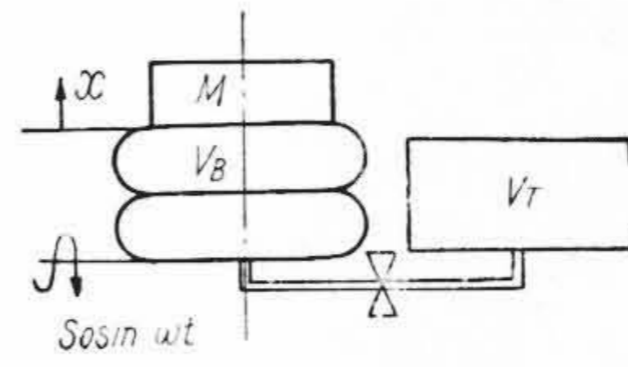
第 6 図 バネ常数とバネ上荷重の関係



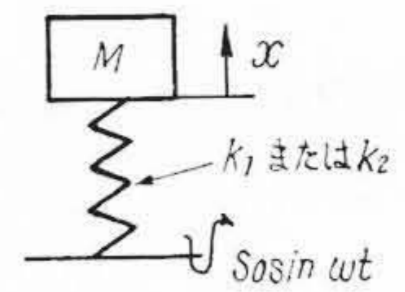
第 7 図 Firestone の空気バネ

が上げられるように空気圧縮機を駆動し、荷重が減少すれば他方の回路が閉じ、ソレノイドの働きで排気孔をあけ、振動によるバネの伸縮では給排作用をせぬように適当なおくれ装置を設けてある電気式のものがあり、またレバーとリンクを介してバネ上とバネ下を結び、給排両孔の開閉を行って荷重とみあつた圧力を保ち、同じく振動に際してはスプリングとダンパーの作用で働かないようにした機械式とがある。

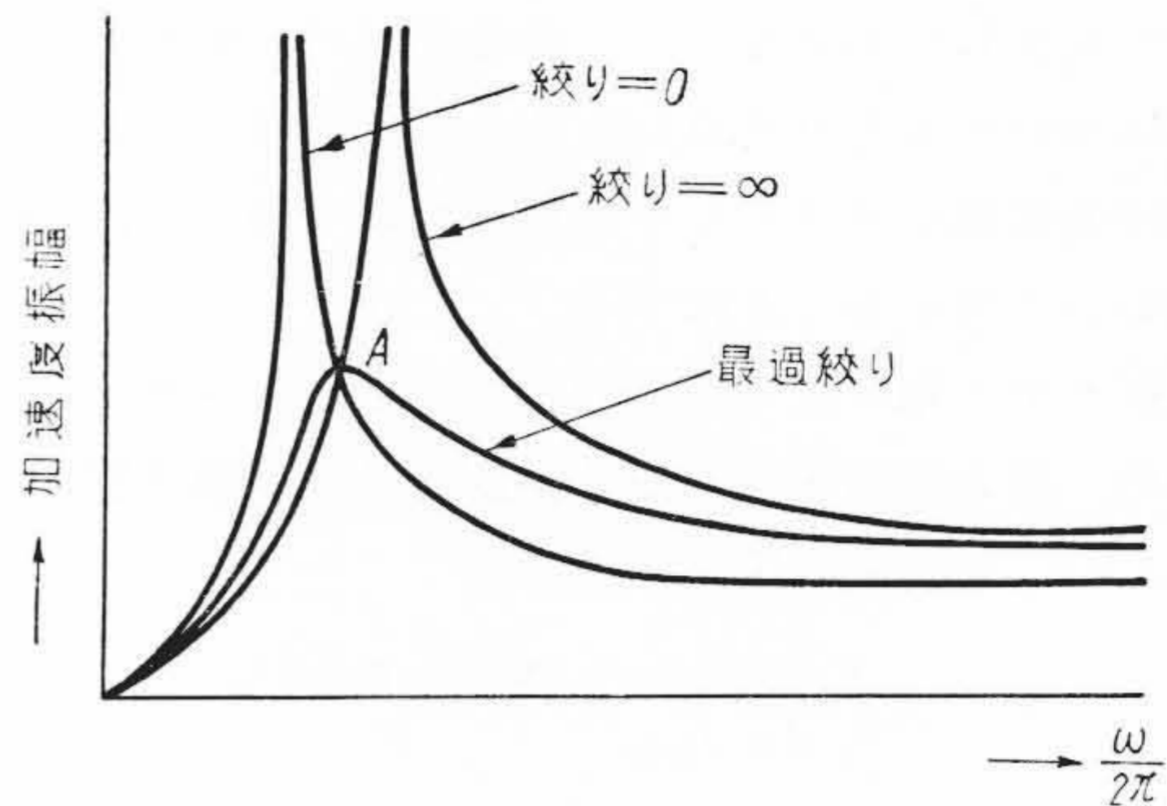
なおここでは空気バネを中心として考えているので荷重に対する高さの制御を空気の給排によつて行うことを述べたが、ドイツにおいては気体 (NH_3 , SO_2 , HCl など) と液体 (H_2O) をバネ体内部に閉じこめ、外部より内燃動車の排気ガスを使つて温度を制御し、ガスの液体に対する溶解度の差を利用して内圧を変え、高



第 8 図 絞り付空気バネ系構造図



第 9 図 第 8 図の系で絞り 0 および ∞ の場合の力学模型



第 10 図 路面よりの強制変位に対する質量 M の加速度の周波数応答曲線

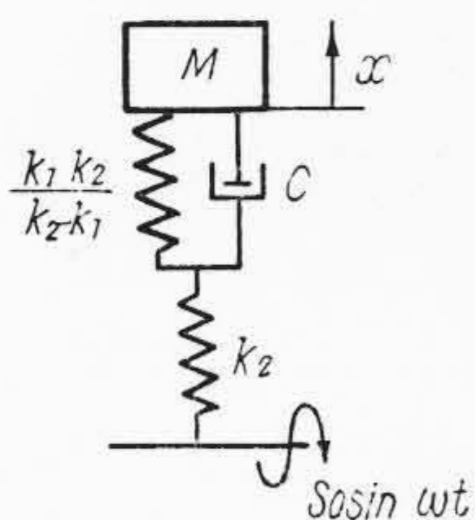
さの制御を行つたことが報告されている⁽²⁾。

(b) 付加タンクの容積を変化させて、曲線における回転剛性を増すことができる。

前述の高さ制御弁によつても、曲線において遠心力による車体の傾きを修正し得ることはもちろんであるが、興味深いものに Firestone の空気バネがある (第 7 図)。これは振子の働きにより曲線で付加タンクと空気バネ本体との通路を閉じて、すなわちバネ常数に関係する V_0 を減じてバネを剛くし、回転に対抗する力を増すものである。

(2) バネ本体と付加タンクとの間に適当な絞りを設けてダンピングを得ることができる。

バネを軟く保つための付加タンクは、またさらにダンピングを与えるためにも役だつ。第 8 図に示すような構造で路面に $S_0 \sin \omega t$ の強制変位を与えたときに、質量 M に現われる加速度について考えることにする。もし絞りが全開であるとすれば、 $V_0 = V_B + V_T$ (前出) とおいて計算されるバネ常数 k_1 が決まり、全閉すれば $V_0 = V_B$ とおいて k_2 が決まってくる。それぞれの場合に対する力学模型は第 9 図によつて示され、強制変位の振動数に対応する質量 M の加速度は容易に計算される。これを図示すれば第 10 図のようになる。これら 2 つの曲線の交点 A は、絞りのいかにかわらなく通る定点であり、この点において強制変位に対する質量 M の加速度の周波数応答が最高高さとなるように絞りを決定する。この定点 A に対応する振動数を固



第11図
絞り付1自由度空気バネ台車の力学模型

有振動数とするバネのバネ定数 k_3 は

$$k_3 = \frac{2k_1k_2}{k_1+k_2} \dots\dots\dots (5)$$

で計算される。

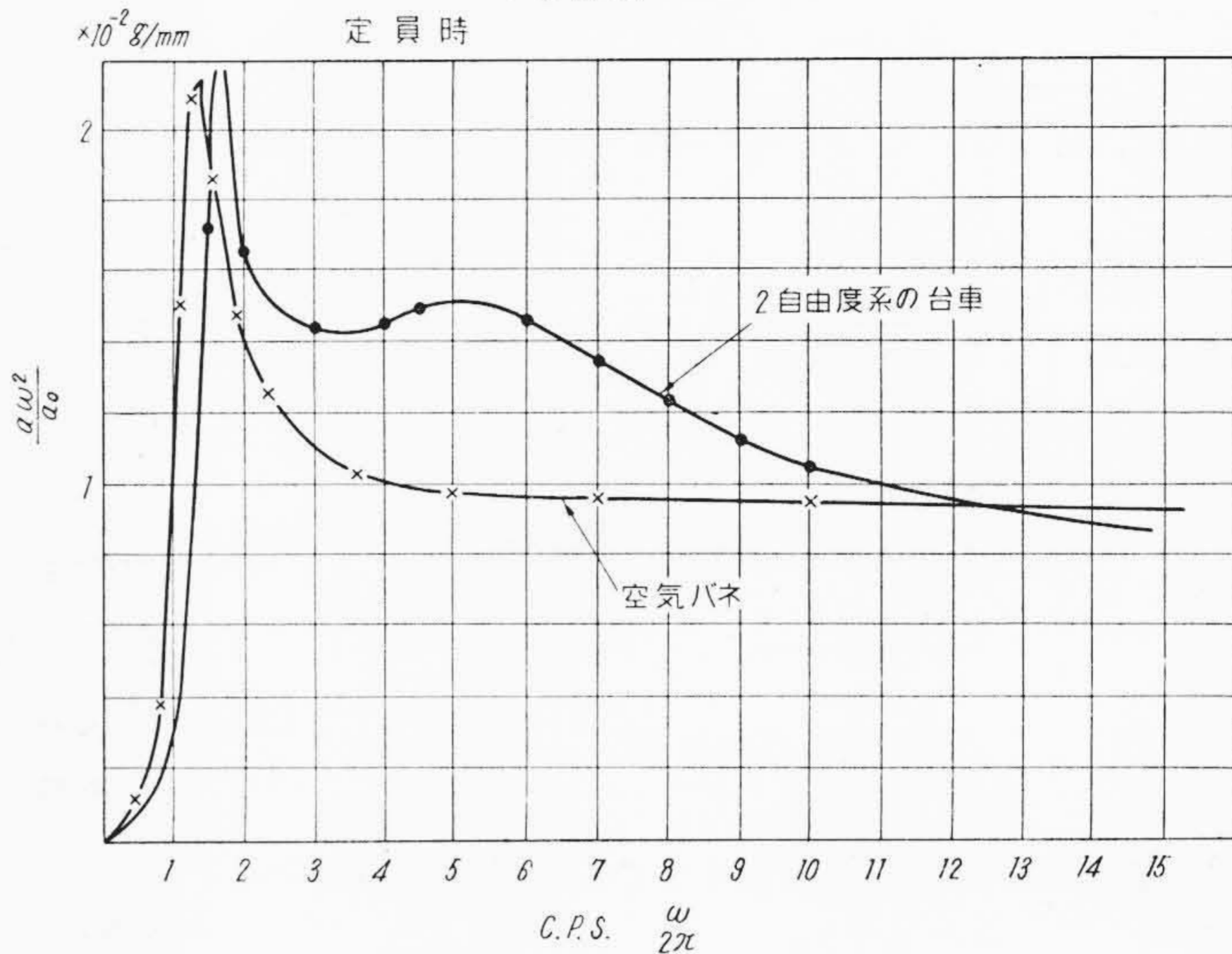
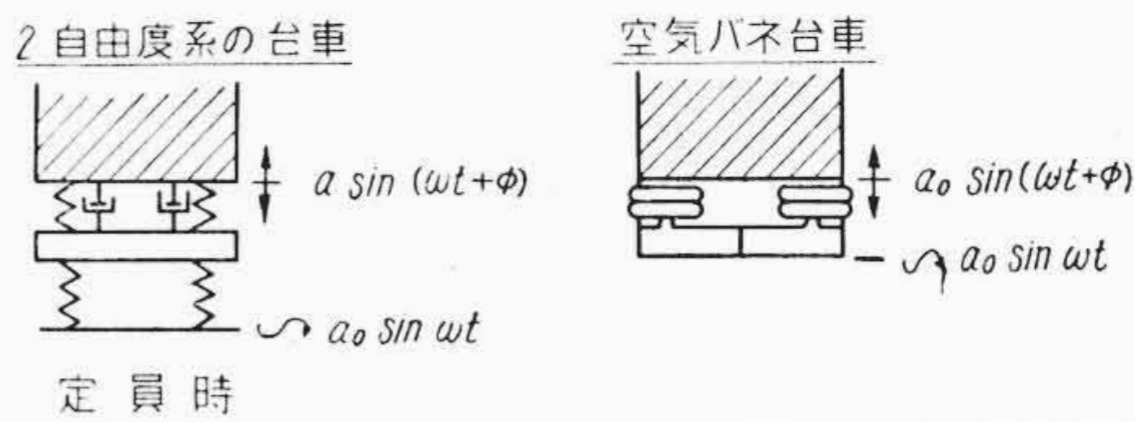
設計に際しては V_B を決めると k_2 が決まり、 $\frac{V_T}{V_B}$ の比によつて k_1 が決まり、これから最適ダンピングを与えた場合のA点の高さが決まってくる。また $V_B + V_T$ がまづ決められるときも同様である。これらの場合において最適ダンピングの応答曲線の最高高さと、共振点よりずっと高い周波数での応答曲線の高さによつて $\frac{V_T}{V_B}$ の比を決定すればよい。

ある質量 M について決定された最適絞りは、他の質量 M に対して厳密

には最適絞りとはいえないが、車輻における最大荷重と最低荷重の中間値で絞りを決定しておけば、近似的にはいづれの荷重においても最適絞りとみなし得ることがわかっている。

(3) 台車のバネ系が単純化できる。

車体の振動について考察をすすめるかぎりにおいて、台車のバネ系は単純化できる。すなわち現在一般化されている軸バネ、枕バネ、枕バネダンパーよりなる2自由度系コイルバネ使用台車と、枕バネのみの構造とし付加タンクを設けて、それとの間に絞りを設けた空気バネ台車と、1自由度系オイルダンパー併用台車（現実にはあまり使用されていない）との3者を比較すると、絞りでダンピングを与えた空気バネ台車は前後両者の中間に位し、2自由度系オイルダンパー使用台車のバネ間重量を0としたものに等しく、第11図に示すような力学模型となる。したがつてバネ系自体としては2自由度系におとるものであるが、空気バネを使用すればそのバネ定数を十分に軟くとり得ることとあいまつて、現実的には2自由度系コイルバネをしのご得るものである。第12図に2自由度系コイルバネ（枕バネダンパー使用）と、空気絞り付き1自由度系空気バネ台車に、路面より単位の正弦振動を加えたときの車体加速度の周波数応答を、現実の車輻について計算したものを示す。



第12図 1自由度系絞り付空気バネ台車と2自由度系コイルバネ台車との周波数応答の比較

(4) 衝撃および高周波振動を遮断する。

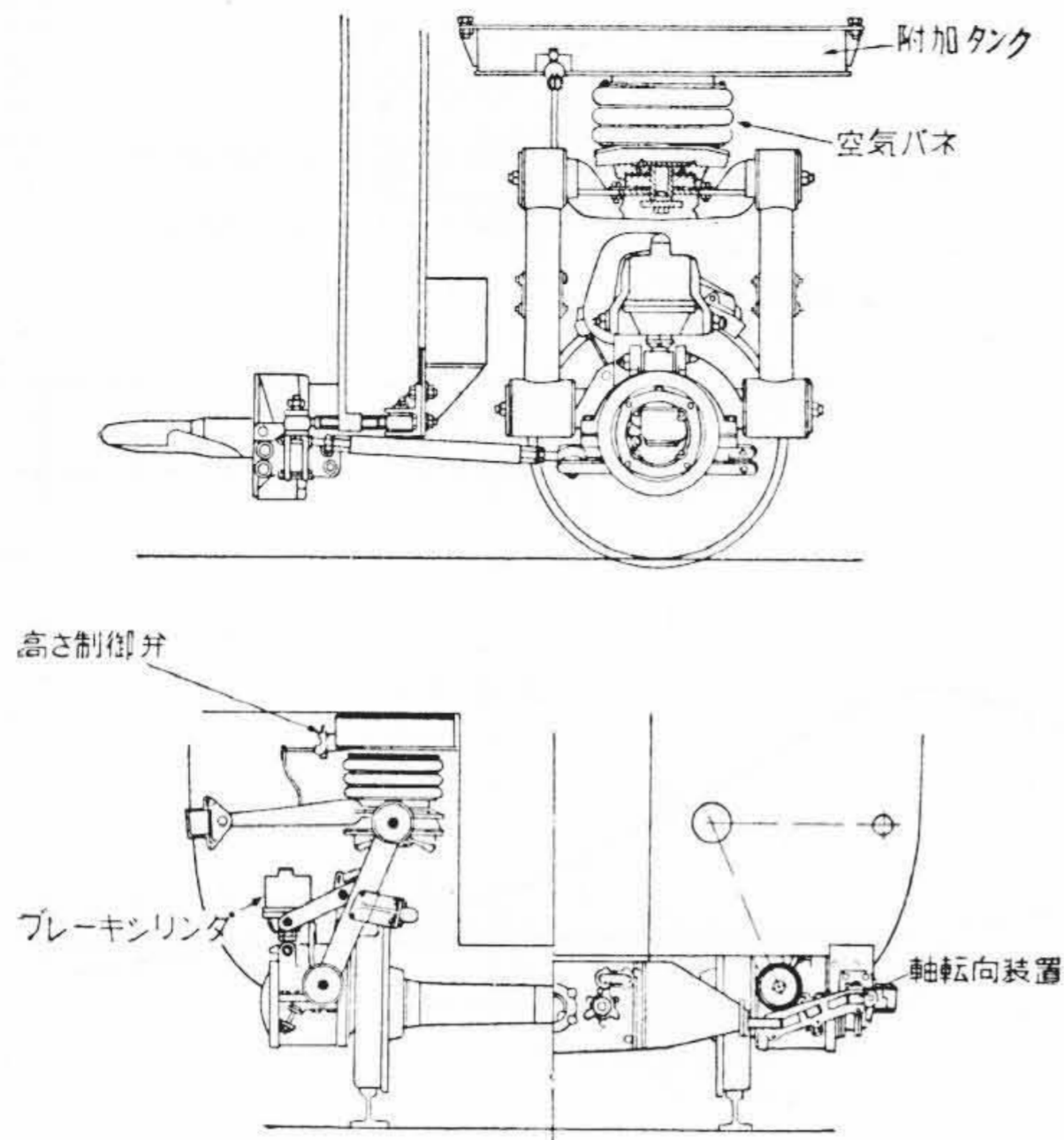
前項において考察した、2自由度系コイルバネ台車と1自由度空気絞り付き台車の周波数応答曲線は、理想化した場合のものである。すなわち現実には車体は弾性体であり、バネのサージング、バネの動きを拘束する摩擦力、オイルダンパーの作動、およびバネ材内部を通つての高周波振動の伝播があり、これらについては別に考察する必要がある。

車体を弾性体として扱つた論文⁽³⁾によれば、2自由度バネ系での2次の固有振動数と車体の曲げ剛性の関連が述べられているが、この点2次の固有振動数のない上述形式に使つた空気バネでは有利であり、構造の簡略化によつて摩擦力の介入する部分も少なくなり、上述のその他の点では空気バネはまったく理想どおりに働いて、その試験結果で見られる衝撃、高周波振動についてのよい結果を生んでいる。

【III】 空気バネの歴史と現状

(1) アメリカ

さきに述べたように、まず実用化の先駆者となつた G.M. がバスに空気バネを取り付けたのは、1952年のことである。その後数多くのバス会社で営業運転に使われ、空気バネの寿命と保守、維持について実績をもち、数十万軒（1車当り）で事故のほとんどなかつたことおよび



第13図 Train X

維持も簡単で従来のバネより安くつくことが報ぜられている⁽²⁾。

すこしおくれて、鉄道車輛界では列車編成方式、車体構造および台車構造について独特の構造をもつ、Aerotrains, Train X (第13図), Pioneer III (第14図)と、続々と試作車を出している。また貨車用として楕円形のバネを使つたものが見られる⁽⁴⁾。

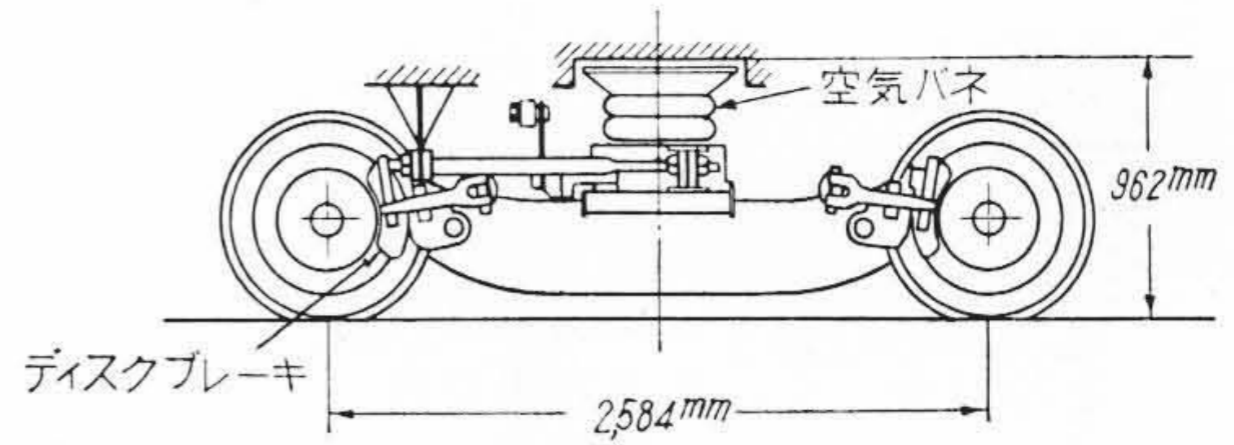
(2) 欧州諸国

フランスでは1954年 Citroën 社が特長ある油圧式ガスバネを自動車に付けている。これはコンパクトな油圧ポンプで油を加圧して車体重量と平衡させ、高さを一定に保ち、クッションは球状体の中に閉じこめられたガスによつて与えるというものである⁽⁵⁾。

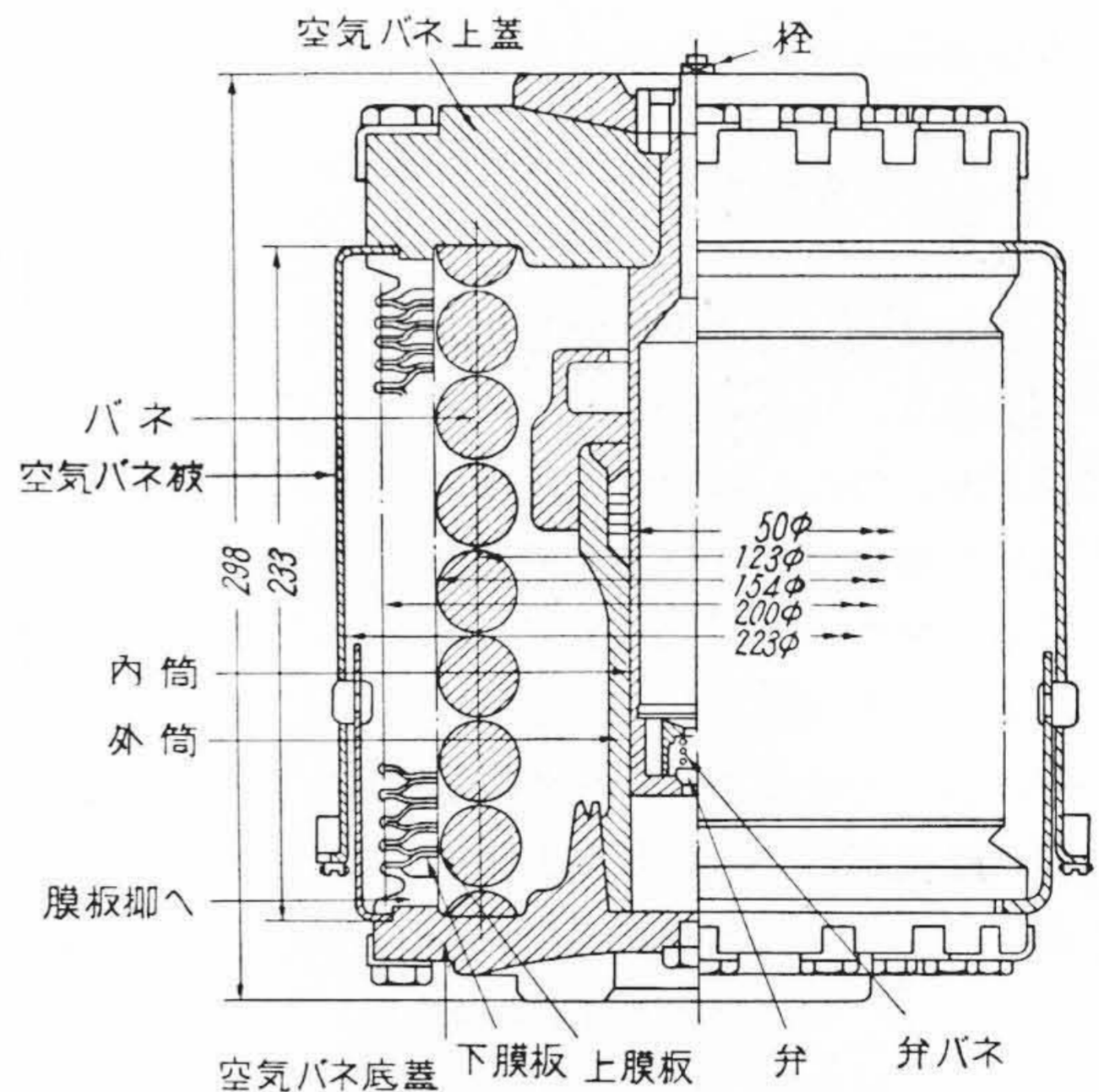
一方ドイツにおいてはこれと同一形式の空気バネをトレーラー (Strassenroller) に使つて、多くの軸にかかる荷重を均一化した振動性能の向上にも成功したことが報ぜられ、鉄道車輛ではこれまでの台車に空気バネを装着したもの、およびレールバス (2軸車) に使つたもの、および前述の熱的に高さの制御を行うガスバネなどが試験されている。文献⁽²⁾によると空気バネを使うことにより2軸車の振動性能が著しく改善されており、2軸車の再登場の可能性が走行試験の結果より報じられているのは注目に値することである。

(3) 日本

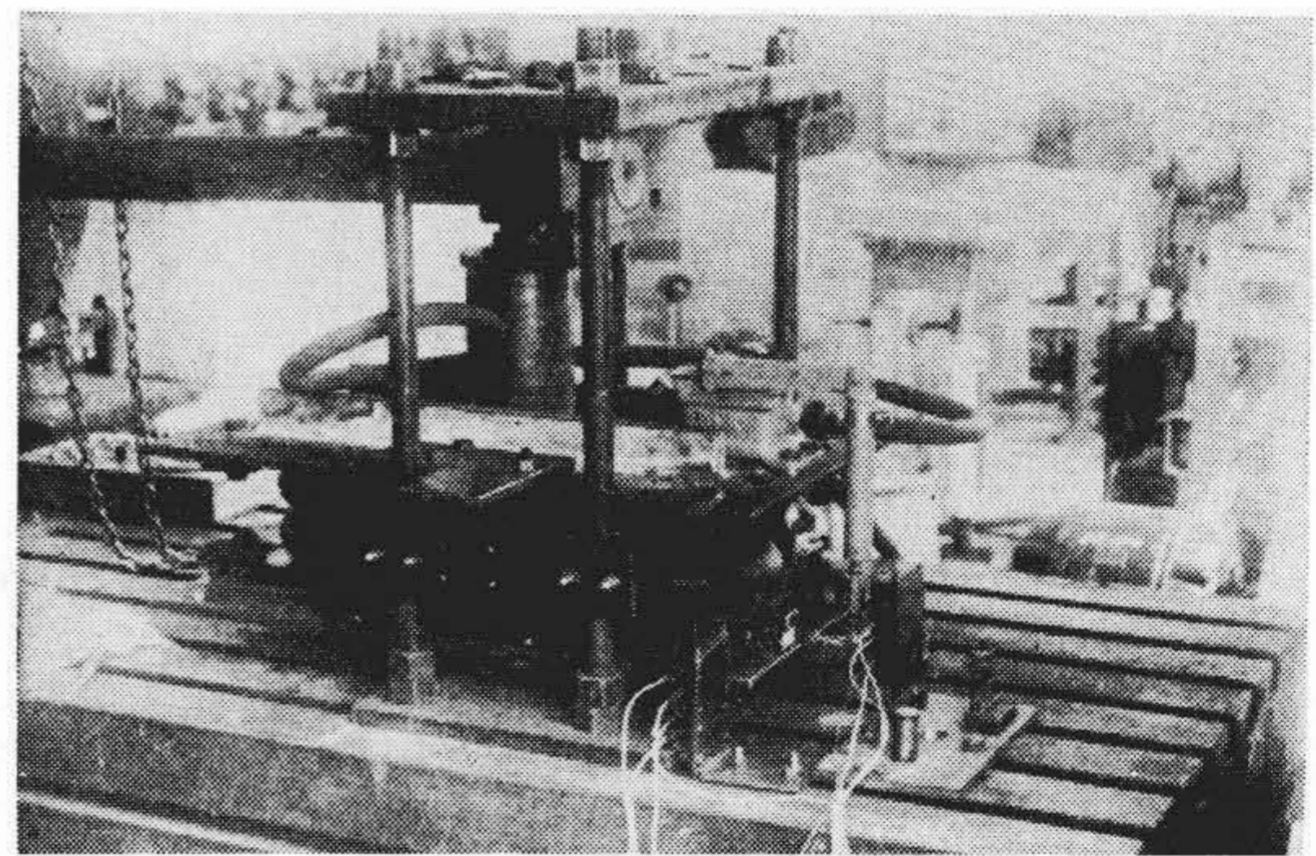
戦後の鉄道車輛業界の車輛振動性能向上に対する強い気運の中にあつて、日立製作所では空気バネを取り上げ、種々の制約によつて不完全な形ではあるが、空車時における荷重を支持するコイルバネを内蔵した金属ベローの空気バネ (第15図) を横浜市電向 KL-1 台車に試作し



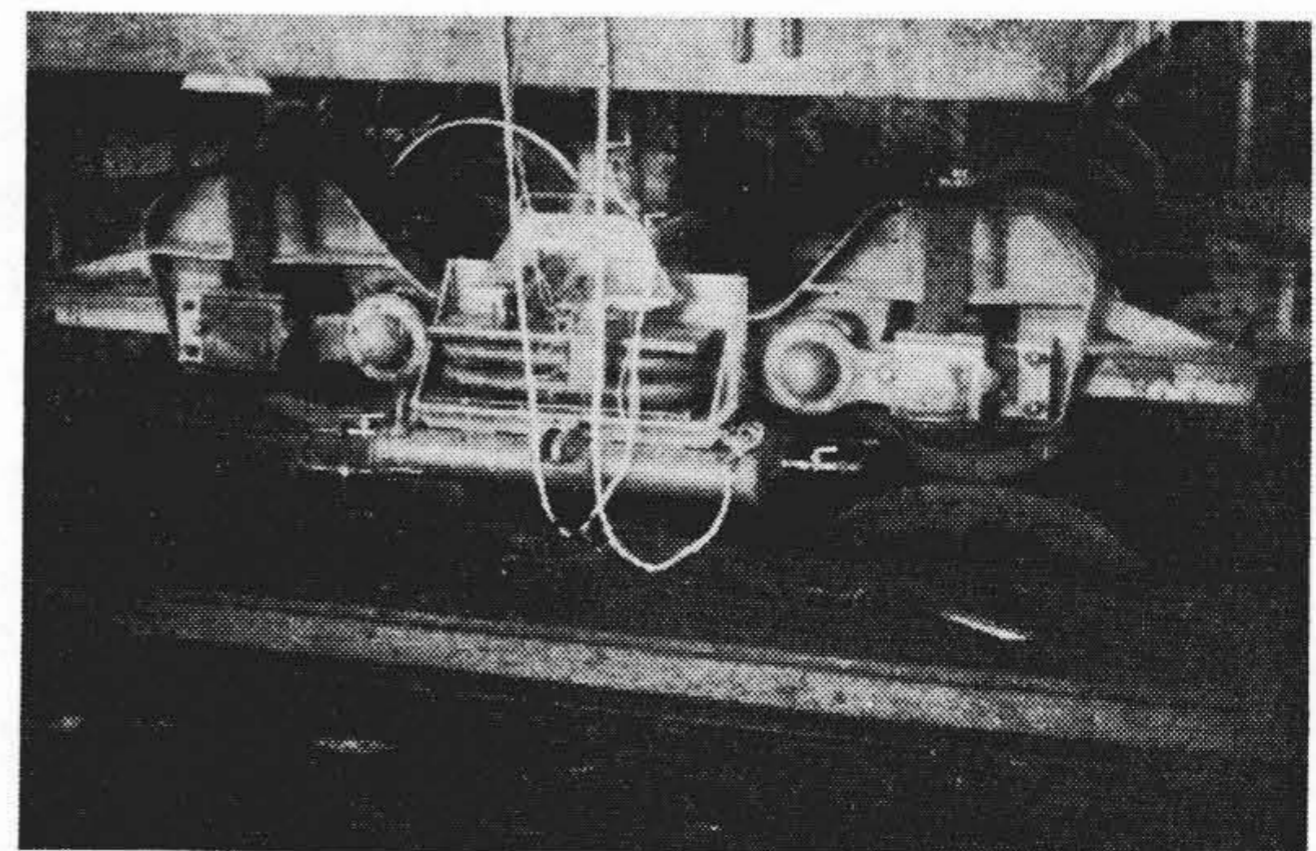
第14図 Pioneer III



第15図 KL-1 台車用空気バネ構造図

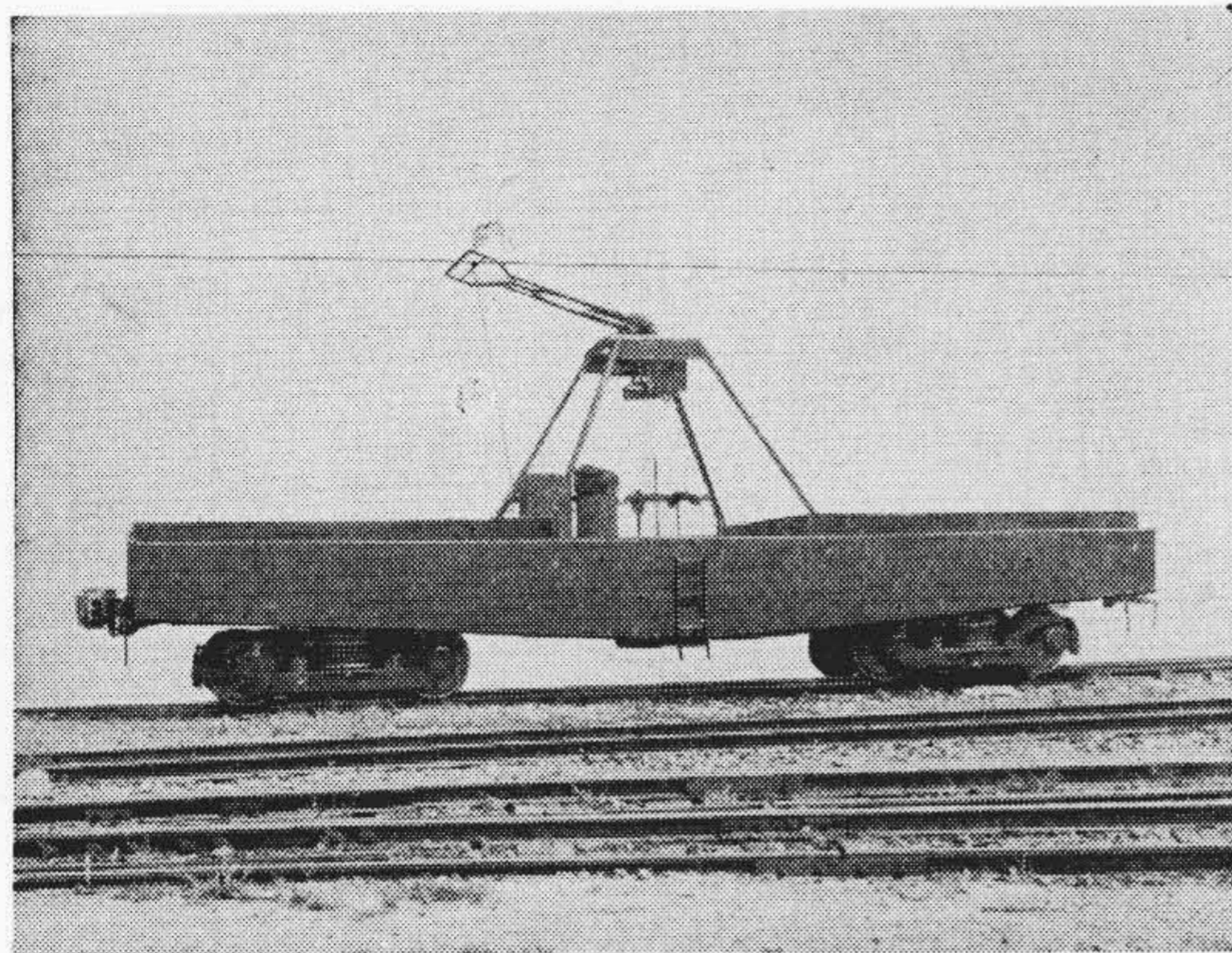


第16図 定置試験中の鉄研B型空気バネとおなじく鉄研式制御弁

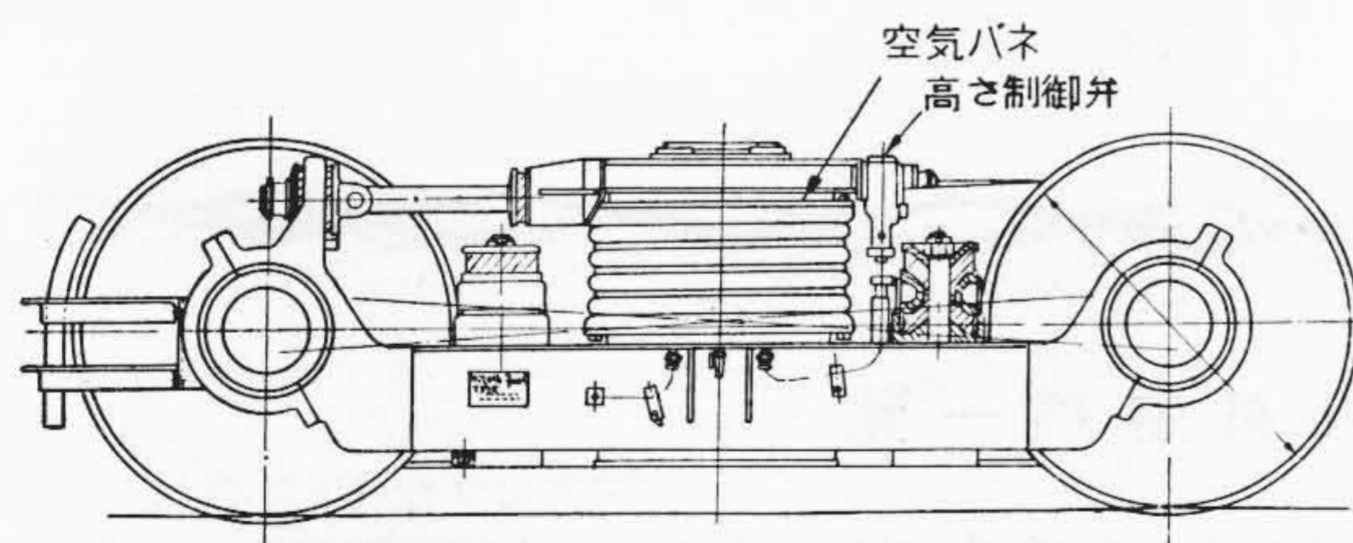
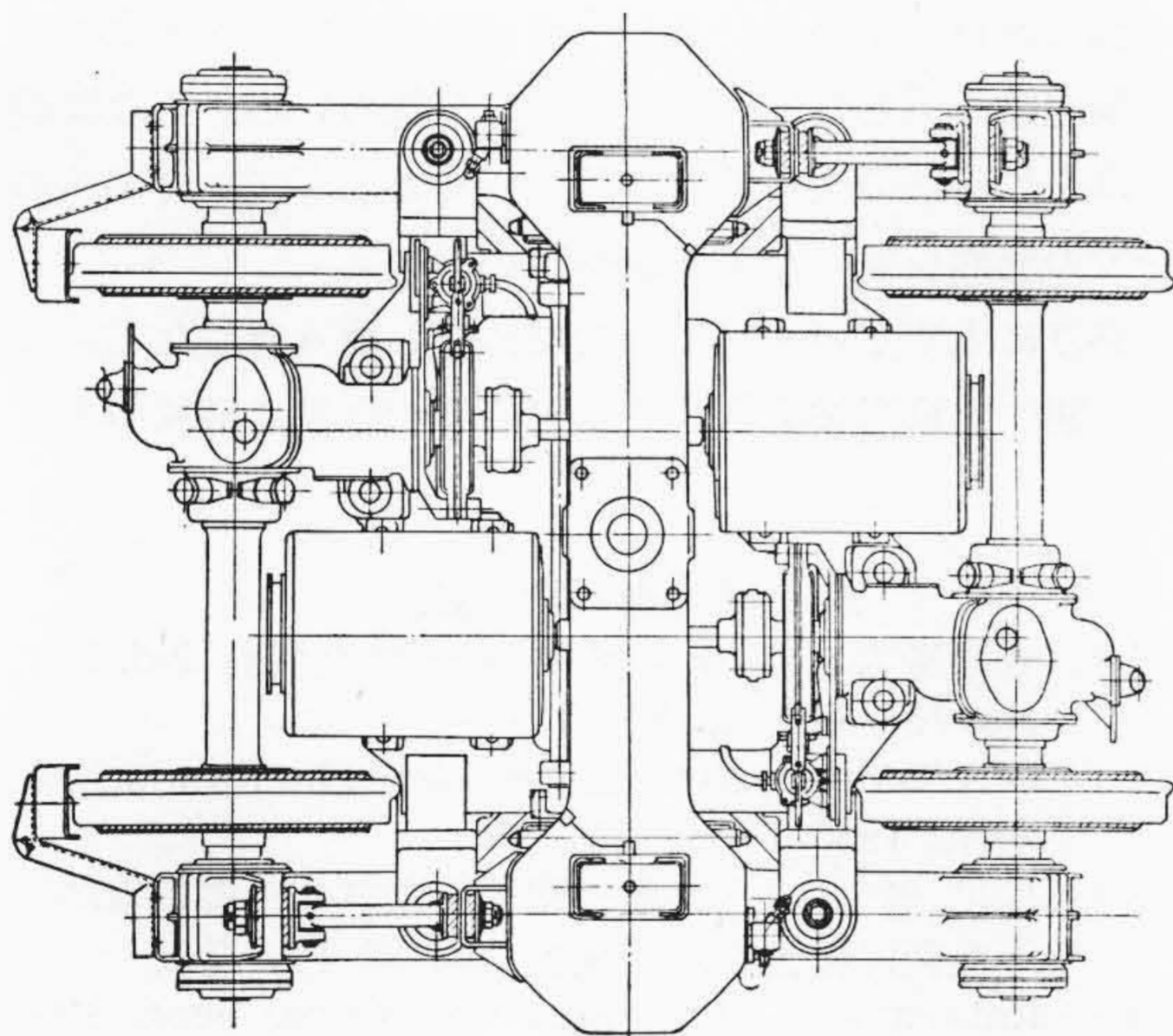


第17図 台車動的試験機で試験中の鉄研B型空気バネを装着した台車

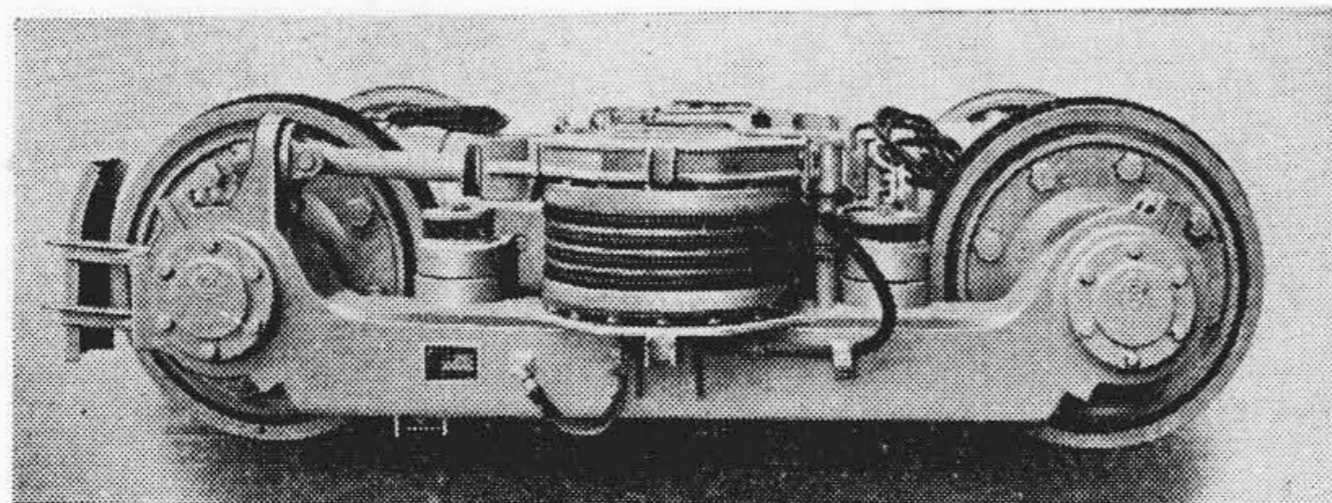
た。結果的には金属ペローの疲労，意外に剛い金属ペローの剛性，工作上の問題などのために，試験しただけで実用化するに至らなかった。



第 18 図 試験車体に装着した KL-10 台車



第 19 図 KL-10 台車構造図



第 20 図 KL-10 台車

その後長い空白が続いたが昨年某社によつて軸バネに空気バネを装着したキハの改造台車で試験が行われ，本年に入つて空気バネを枕バネに使用した台車が営業運転に使用されている。

われわれも昨年度よりふたたびこの問題を取り上げ，KL-1台車用空気バネ研究の実績の上になつて種々の試験研究を行つた。第 16 図は定置試験中の鉄研 B 型空気バネと，同じく鉄研式制御弁，第 17 図は台車動的試験機で試験中の鉄研 B 型空気バネを装着した振動試験台車，第 18 図は試験車車体に装着して走行試験を行つたときのものである。

〔IV〕 空気バネ台車の構想と試験結果

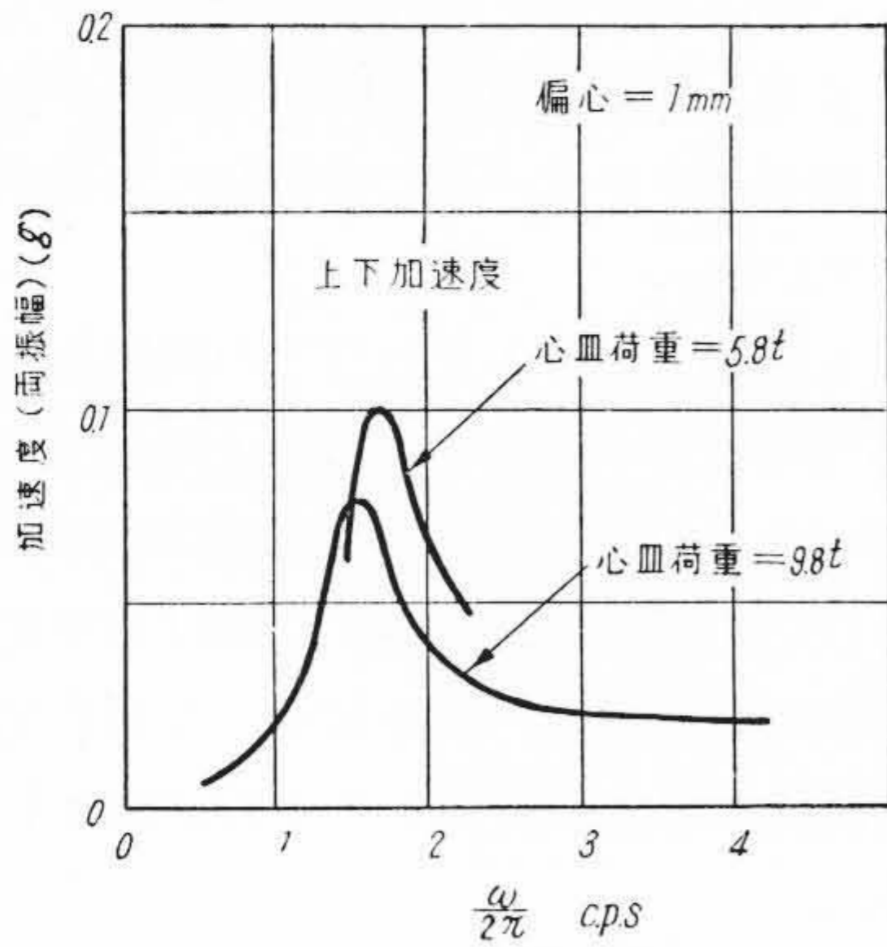
研究および走行試験の結果をもとにして，KL-10 台車(第 19, 20 図)には本格的空気バネ台車として次のような特長をもたせてある。

- (1) バネ系はすべて枕バネに集中してある。
- (2) オイルダンパーは使用せず，側梁内部を利用した付加タンクと空気バネ本体との間に絞りを設けて減衰を与える。
- (3) ボルスターアンカーを使つて摩擦力が加わらないようにし，かつ横方向には適度な復元力を与え，上下方向にはほとんど効かない特殊構造にしてある。
- (4) 弾性車輪を使つてバネ下重量の低減を計り，台車枠は側梁と側梁ツナギに分割して，これらの間および軸箱と側梁の間に緩衝ゴムを介在させてあり，モーターへの衝撃には十分留意してある。またこのようにして構成された台車はレールの変形，凹凸によつて過度の応力を受けることなく，かつ水平面内においては十分な剛性をもち，1 軸蛇行を防いでいる。
- (5) 制御弁は電車の停止した際にのみドアエンジン

と電磁操作により連動して働く構造の簡単なもので，日立製作所笠戸工場において製作したものである。また空気バネへの配管はブレーキ系統よりとつていますが，いかなる故障に際してもブレーキおよびその他の制御操作に支障のないよう

配慮してある。

以上のような構想で製作された KL-10 台車についての，台車動的試験機および専用鉄道線での走行試験結果は，上下動について特にビビリ振動の点できわめてすぐれた性質を示している。第 21 図は KL-10 台車の台車動的試験機による試験結果で，心皿荷重 9.8 t および 5.8 t での周波数応答を示し，第 22 図は同台車の走行試験に



第 21 図 振動加速度の周波数応答曲線

における上下方向加速度の一例であり、第 23 図は同台車の速度に対する振動加速度の関係である。なお左右動については、吊リンクなしの本形式でも、2 自由度系吊リンク付きの台車と差異はみられない。

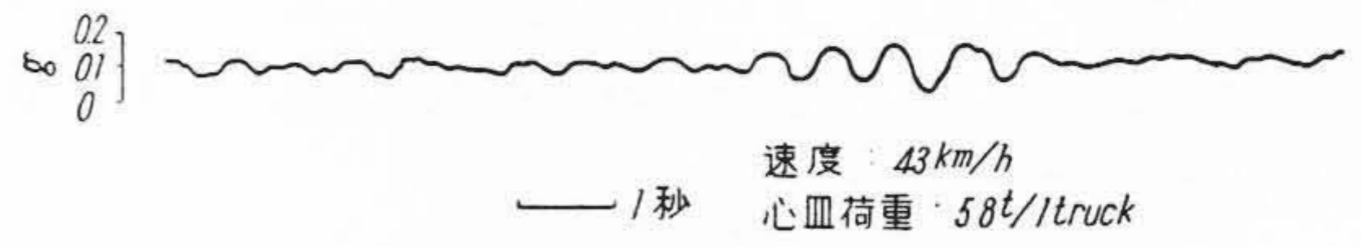
この台車は名古屋市交通局にて試用されることになっており、現地での試験結果はこれまで述べてきたことの正しさを裏書きしている。この結果は工場内試験の結果とともに後日詳報することにした。

[V] 結 言

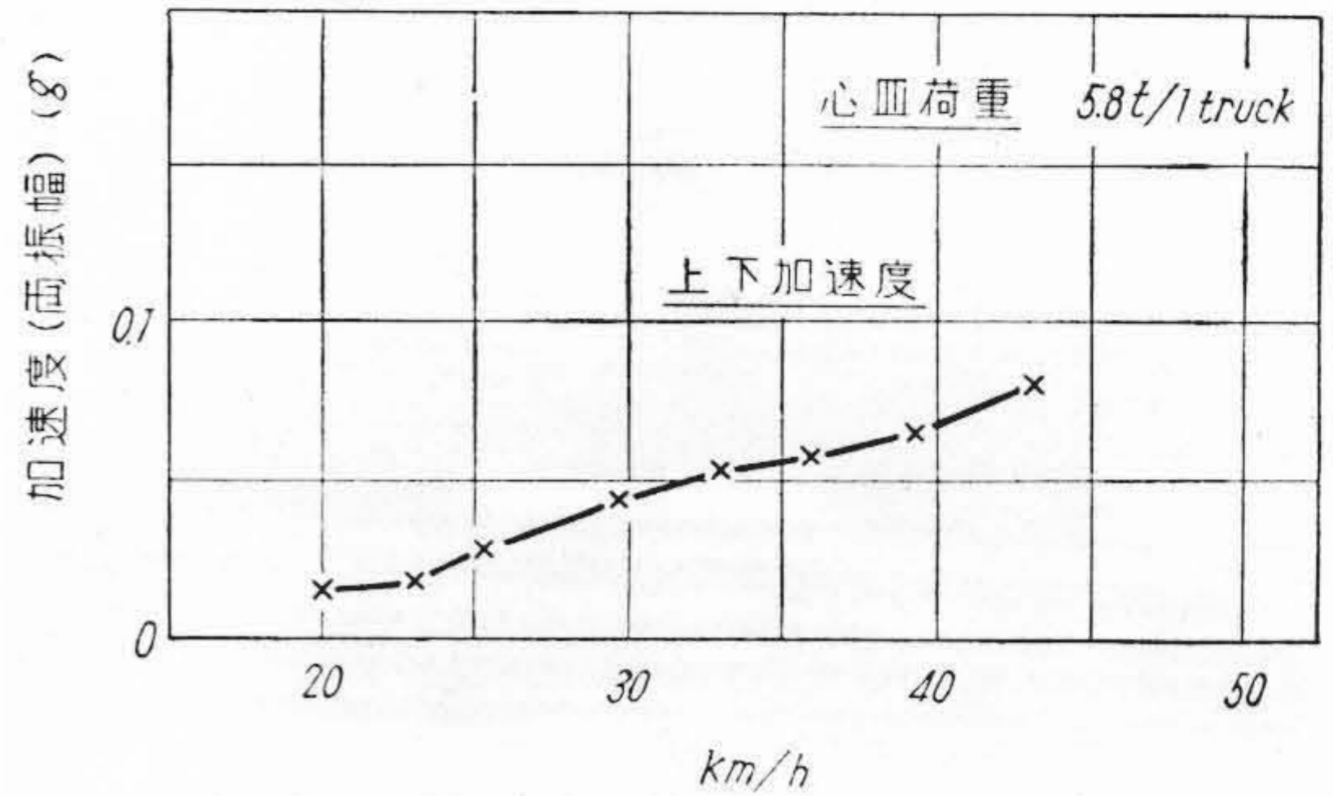
以上を総括すると空気バネは

- (1) 車輛のバネ系の簡略化、ひいては台車および車輛構造にまでも影響をもつものである。
- (2) 振動性能の向上、衝撃の緩和に役立つ。
- (3) ビビリ振動の緩和に卓効があり、前項とともに乗心地を快的とする。
- (4) 曲線での車輛の傾きを簡単な機構で修正する作用をもたせられる。

という特長をもっている。このような確認されているす



第 22 図 上下振動加速度の一例



第 23 図 車速と上下振動加速度の関係

ぐれた性質をもっているが、現在においては実用化への一歩を踏み出したばかりであり、今後のいろいろな問題にはそれぞれ万全の策を講じて行くとともに、将来への一段の発展を期したいと思っている。

終りに本空気バネ台車の設計に際し種々有益なる御助言を賜った鉄道技術研究所松平精博士に厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) 青木喜六：高速度台車振動研究会資料 No. 72, No. 75 (昭和 22-11, 12)
- (2) G.A. Gäbler : Eisenbahntechnische Rundschau, Sept. 1956 (Page 351-367)
- (3) 佐川 健：車体の曲げ剛性を考慮した客電車の上下振動，機械学会講演会 昭 32-10 発表
- (4) Railways Locomotives and Cars, Sept. 1953 (Page 90)
- (5) Automobile Engineer, Aug. 1955 (Page 327-330)



日立製作所社員社外寄稿一覧

(昭和 32 年 10 月受付分)

寄 稿 先	題 目	執筆者所属	執 筆 者
協 和 商 事 K K	真 鋤 と 軟 鋼 と の 溶 接 に 関 す る 低 温 溶 接 棒 の 効 果	日 立 工 場	妹 島 五 彦 永 井 孝 彦
日 本 技 術 士 会 自 動 制 御 研 究 会	蒸 気 タ ー ビ ン の 新 し い 方 向 動 力 用 BWR 自 動 制 御 系 の 検 討	日 立 工 場 日 立 研 究 所	糸 野 幸 三 小 林 栄 二 鈴 木 守 光
自 動 制 御 研 究 会	Bode 線 図 よ り 自 動 制 御 閉 回 路 過 渡 応 答 近 似 式 を 得 る 方 法	日 立 研 究 所	小 野 田 芳 光
日 刊 工 業 新 聞 社	ス テ ン レ ス 鋼 溶 接 棒 の 品 種 と 選 び 方	日 立 研 究 所	小 野 健 二 渡 辺 潔

(第 90 頁へ続く)