

第2章

— 総論 —

運輸運搬

車 両 日立製作所における鉄道車両製作の歴史は大正9年当時の鉄道省に納めた8620形蒸気機関車に始まり、続いて大正13年には国産として最初の本線用大形電気機関車1070形(のちにED15形)59トンを製作し、以来約50年の間、新技術開発の面についても、生産の面についても日本国有鉄道、私鉄、産業および輸出の各分野にわたり、鉄道の発展とその近代化に貢献してきた。

電気機関車については、わが国の電化が主として直流で行なわれてきたころより、上記のED15形電気機関車に続いて各種のものを日本国有鉄道、私鉄そのほかに納入してきたばかりでなく、昭和33年に戦後最初の電気機関車の輸出をインド国有鉄道に行なってきた。オーストラリアそのほかにも輸出してきた。

昭和30年に日本国有鉄道の交流電化が決定されるや、日立製作所はいち早くわが国最初の交流電気機関車ED441形(のちにED901)を製作してわが国交流電化の基盤を作り、その後約12年間に17機種約280両に及ぶ交流および交直流電気機関車を製作してきた。特に交流車両の技術的発展の中核ともいべきシリコン整流については、昭和33年にわが国最初のシリコン転流器式交直流電車を試作して以来、常に業界の先頭に立つて開発を進め、車両用シリコン整流器の累計出力はすでに1,000,000kWを越え、この分野においても世界で最も実績の多いメーカーの一つとなっている。さらにサイリスタを主回路に応用することは、これまで多くの技術者の願望であったが、日立製作所は昭和40年に世界最初の全サイリスタ式幹線用大形電気機関車ED93形を完成して本技術分野に先鞭(せんべん)をつけて以来、さらにこれをED77形として量産に移し、続いて全サイリスタ式電力回生ブレーキ付交流電気機関車ED94形、ED78形を完成した。これら交流車両の技術の優秀性は、昭和37年にインド国有鉄道より日本連合代表として45両の交流電気機関車の受注を成功せしめ、さらにアフリカコンゴBCK鉄道よりの受注も可能ならしめた。

電車についても、各種の新技術を開発して、日本国有鉄道、私鉄の通勤輸送増強、地下鉄の増設などに寄与してきたが、特に最新のエレクトロニクス技術を大幅に導入して自動化、無接点化を行ない、高圧インバータを開発し、続いてサイリスタによるチョップ制御についても、すでに帝都高速度交通営団に第2次の試験車を納入してその実用化の第一歩を進めつつある。今日までに日本国有鉄道に納入してきた交流および交直流電車は、北海道電化用サイリスタ式交直流電車および世界最初の寝台座席両用交直流電車などを合わせて十数形式の多きに及び、常に新形式の開発に努力してきた。

特にこの分野において特筆大書すべきは東海道新幹線電車の完成であろう。日本国有鉄道においてこの計画が発表されるや、日立製作所は各部署全機能をあげてこれに協力し昭和37年には試作車2両を製作し昭和39年の開業以来数多くの車両および電気

品を納入してきた。交流および交直流電車の数量はこの東海道新幹線を含めてすでに700両に達している。

電化とならんで動力の近代化の一翼をになうディーゼル化についても日立製作所は各種の車両を開発して貢献してきた。

ディーゼル電気機関車については昭和9年当時の南満洲鉄道に750PSの、また続いて昭和11年には日本国有鉄道に600PSのディーゼル電気機関車を納入して本分野におけるわが国での先鞭をつけた。昭和31年には狭軌では世界最大の出力をもつ1,900PSディーゼル電気機関車を独自の電気方式を織り込んで完成し、さらにディーゼルエンジンについては昭和32年に西ドイツM・A・N社と技術提携を行ない、すでに日本国有鉄道を始めとしタイ、台湾、ブラジル、スーダン、ポリビアおよびコンゴなどへの輸出向けを含めて、120両以上のディーゼル電気機関車を製作し、わが国で最大の実績を有するメーカーの一つとなっている。

さらにまた液体式ディーゼル機関車については国内向け輸出向けを合わせて総数680両以上を製作しており、また独自の技術で開発したトルクコンバータDW2A形、DW6形などの生産もすでに200台以上に達している。

ディーゼル動車については昭和35年にアラブ連合向けに350両の大形ディーゼル動車を大量受注して以来、同国郊外通勤用に100両を、西パキスタンに65両を納入するなど東南アジア、中近東、アフリカおよび南アメリカなどに合計600両以上を納入しており、この実績は国内においてはもちろん外国メーカーを含めても最大のものの一つである。

客車については軽量化、乗心地の向上およびデラックス化の要求にこたえ軽量客車ナハ10形を日本国有鉄道に納入し、また昭和33年には特急用編成客車あさかぜを、さらにさくら、はやぶさなどを製作してきたが、輸出についても、アルゼンチン向け冷暖房付優等車200両をはじめとしビルマ、タイおよびマニラなどにも納入してきている。

貨車については早くより大量生産の設備を完成し日本国有鉄道貨車、私有貨車などを大量に生産したほか、海外15個国に対し3,200両以上の貨車を納入してきた。

日立製作所は早くより都市交通緩和の一つの解決方法としてモノレールに着目し昭和35年に西ドイツアルウェーグ社と技術提携し昭和37年に交通機関としてわが国最初のモノレールを名古屋鉄道犬山遊園に建設して以来、小田急沿線の読売ランドに、また昭和39年には羽田空港と都心とを結ぶ本格的複線モノレールを建設して、この線だけでもすでに1,500万人以上を輸送してきた。

近時輸送量の急増に伴い道路輸送が急速に発達しつつあるが日立製作所は昭和34年に300t積ガーダー式トレーラを完成したのを始めとして15~40tの標準トレーラの生産を続け昭和42年には世界最大の500tトレーラを完成した。また、コンテナリゼー

ションの進展につれ、海上コンテナ用トレーラを開発し、すでにコンテナトレーラは650両の製作実績を持つに至った。大形ダンプトラックについても昭和36年に15tダンプトラックを開発して以来、昭和43年にはわが国最大の30tダンプトラックを完成しこの分野の需要に応じている。昭和41年には防衛庁向けのわが国では前例のない水陸両用の自走式渡河器材である自走浮橋を困難な三元合金の溶接技術を開発して完成しすでに2号車を完成している。

以上日立製作所における車両の開発および生産の歴史の大略を述べたが、絶え間ない技術革新の行なわれつつある鉄道業界にあって常に時流におくれぬよう努力を重ねて進んで来ており、来るべき山陽新幹線については目下試作を進めつつあり、昭和45年の万国博覧会には、場内交通機関として全自動運転によるモノレールを建設中である。そのほか将来の鉄道に対する基礎研究と広範囲の開発を正常に精力的に行ないつつあり、ますます高まりつつある高度の輸送需要にこたえんとしている。

後掲の論文は、車両発達史の現時点における精華ともいふべき、サイリスタ式電気車の開発について述べたものである。

昇降機 現在エレベータは都市への人口集中と建物の高層化とともに、ビル機能の枢軸をつかさどる輸送機関として時代の脚光を浴びつつ活況を呈しているが、わが国では明治23年浅草の凌雲閣に設けられた観光用エレベータが最初のもといわれている。

日立製作所におけるエレベータ製造の起源は大正13年ごろの小規模なリフト生産から始まる。昭和初期に本格的生産を開始し、順次社内の各種技術をエレベータへ結集するとともに試験塔を新設して新製品の開発につとめ、昭和7年に交流シングル・スピード荷物用エレベータ、昭和10年直流VVギャレス120m/min乗用、昭和13年に当時のわが国最高速度ギャレス150m/minを納めるなど急速に製品分野の拡大をとげた。

第二次大戦の激化に伴いエレベータの生産は休止のやむなきに至ったが、昭和20年に他品種製品にさきがけて再発展の第一歩を踏み出し、昭和26年および昭和34年に設置された試験塔および研究塔を駆使して独創的な速度制御方式、機器などをあいついで開発した。

すなわち速度制御の分野において、BCO形刷子電圧降下補償装置、TV制御方式、マグアンプによるセラコンスタック全静止形帰還制御方式などが開発され、迅速で乗心地よくしかも精密な着床を可能にした。運転方式の自由化、並設エレベータの群管理運転をはじめCTP方式による全自動群管理制御などの完成によって、グループ・エレベータの有機的な運転が実現し、輸送能力が飛躍的に向上した。制御の高級、高度化の原動力となる機器の開発も急ピッチで進められ、リレー、コンタクタ、スイッチ類をはじめ半導体を応用した高機能で高信頼度の電子装置があいついで出現した。

時あたかも都市への人口集中と経済発展の世相とあいまってエレベータの生産量は年々記録を更新したが、さらにシンガポール、香港をはじめとする東南アジア地区やアメリカにまで納入分野を拡大した。

昭和43年4月、わが国最初の本格的な超高層ビルとして世界の注目を浴びながら完成した霞が関ビルには、300m/min高速ギャレスをはじめとし、速度、台数、ストロークなど従来の国内実績のほぼ2倍に相当するエレベータ群を納入した。この成果は業界の認めるところで純国産技術を結集してエレベータ界の金字塔を打ち建てたものといえよう。

後掲の論文は現在の技術の頂点ともいふべき高速エレベータの開発に関する報告である。

エレベータ関係の品種はきわめて広範囲で、これら超高層ビル用高速エレベータをはじめとする直流エレベータ、規格化、量産化により多くの需要を得ているA形エレベータや、適用に特異の妙を持つ油圧エレベータにまで及んでいる。さらにC-NN形全透明エスカレータを頂点とするエスカレータ、エスカレーンなども国内はもとより海外市場で好評を得ている。

ビル機能の効率を高める機械式立体駐車場設備も、大形のバウザー式、フォーク式、ロータリー式、LP式と各種環境に応じて製作されている。

わが国経済の今後の進展とともに、これらエレベータ、エスカレータはますます需要が増加するものと思われるが、一方これら需要家のご期待にこたえ技術の飛躍的革新をめざして計画的に研究開発を展開しつつある。たとえば超高層ビルについては計画の時点から参画して効率的な設置計画を答申できるように、統計的な手法と電子計算機、グラフィック・ディスプレイを応用したエレベータリング技術の開発のほか回転機制御系へサイリスタなど半導体要素を織り込んで、よりかんぺきに近い乗心地と着床性能を確保するなどの努力を続けている。

運搬 運搬荷役の面における機械設備の進歩の跡を、この分野の代表であるクレーンを中心としてたどってみよう。

クレーンの技術的進歩は構造強度に関する研究、溶接技術の発達、需要家の設備の大形化などにより著しく促進された。溶接技術の進歩は鉄構のびょう接構造を溶接構造におきかえ、溶接に適した構造の発展を促してきた。すなわち、トラス形式からプレート構造、ボックス構造へと変遷し、さらに最近は補剛薄板構造の大断面ボックスガダの採用をみるに至り、軽量化、簡素化の面で注目すべき成果をあげている。また高抗張力鋼板やパイプ材などの活用も軽量化に役だっている。機械部分についても鋳造品から溶接構造におきかえられたものが多い。アルミ合金製のクレーンも製作され軽量化には成功したが、現在のところ経済性の点から特殊用途に限って使用されている。

また全体の形状の決定の際、風圧を少なくするための風洞実験の結果が大幅に利用されていることも見のがすことはできない。

用途の面からくるクレーンの大容量化や形式の変化も大きい。一例として造船所の船舶建造用クレーンでは、戦後従来の塔形クレーンに代わって大形船のブロック建造のため、自重、風圧ともに小さいスイングレバー形の引込クレーンが製作され、巻上荷重も50~80t級のものが、最近では120t級にまで増大した。またドック用として大形ガントリークレーンも採用されるようになり、200t、スパン102mのものが作られた。

また製鉄所においてもその能力の増大とともに、多量の鉄鉱石を一時に運ぶため大形の専用船が採用されるようになり、ふ頭荷役時間の短縮を目標にアンローダの大容量化が進められ、昭和33年にわが国で初めて1,000t/hの能力のものを製作したが、今日では1,500t/hのものも完成するに至った。この種のアンローダの制御方式の進歩改良も注目すべきものがあり、運転性能の向上、取り扱いの容易化をはかって、サイリスタを用いた静止レオナード制御や、プログラム方式の自動運転が採用され、さらにフィードバック式のつり荷の振れどめ制御も開発された。

他面、転炉製鋼法の採用に伴い、日立製作所ではこれに適した高性能のレードルクレーンを多数製作し、わが国の高速大容量レードルクレーンの大半を納入した。

ばら物ヤードの荷役機械としては、日立製作所が昭和35年に実用化したショベルホイール式の連続積取法を採用したヒタクレーマが、従来のバケット付橋形クレーンにとって代わった。現在新設されるばら物ヤード設備はスタッカとの組合せなどにより、こ

の形式のものが独占する状態となっている。これは荷役作業が連続的であるために、容量の大きい割合に設備費が安いためである。さらに最近ではスタッカおよびリクレーマに自動運転が採用され、省力と積付、採取の均一化に効果をあげている。これはさらに石炭や鉄鉱石のブレンディング(調合)の自動化につながるわけである。

次に雑貨荷役の面では、最近の海上コンテナ・システムの発展に伴う新しい荷役設備に注目したい。大形コンテナによる貨物の海上輸送は、昭和41年以来アメリカを中心として急速に普及しつつあり、世界各地の港湾にコンテナ・ターミナルの建設が進められている。これらのターミナルにおけるふ頭荷役時間を短縮し、船舶の輸送効率を高めるためには、橋形クレーン形式のコンテナ・クレーンが不可欠である。この種のクレーンについて、日立製作所は短期間に本場のアメリカ向け輸出を含めて多くの実績をあげた。これらの中にはコンテナ積み降ろしを主目的とし、さらにその他の雑貨、重量物、ばら物なども扱うことのできる多能クレーンも含まれている。

交流クレーンの制御方式はサイリスタやリアクタ方式、無接点化の方向に進んでおり、円滑な速度制御と高ひん度に耐えるものに進歩している。また無線操縦については、昭和35年に自社組立工場の天井クレーン用として完成以来、大小クレーン30台余の使用実績を持っている。

油圧装置は当初は走行用のブレーキのみに適用されたものが、逐次適用範囲を拡大して、ふ頭クレーンやヒタクレーマなどの各種の動作に採用され、運転性能の向上と機構の簡素化に役だっている。

以上のようなクレーンに関する技術の進歩は国際的にも高く評価されて、先進国に対する技術輸出の面でもすでに相当の成果をあげており、イギリス、アメリカ、オーストラリアなどに対して、転炉用レドールクレーン、アンロード、ヒタクレーマなどの技術供与が行なわれている。

クレーン製作上の残された問題としては、実働荷重の予測と、それに基づく疲労強度を考慮しての合理的設計という課題がある。実働荷重の測定法と応力波形合成法の開発および“疲れ被害法則”の究明により、各種クレーンの実働荷重に基づく疲れ強度設計が可能となり、クレーンのいっそうの軽量化が可能となって来た。これが実施に当たっては法規の一部改正も必要になるものと思う。後掲の論文はその目的の研究経過の報告である。

最後に空気輸送のことにふれておこう。乾燥した粉粒体の近距離輸送にはパイプによる空気輸送方式が機械的コンベヤに代わってかなり広く使用されるようになった。日立製作所が昭和25年セメント輸送用として双胴フラクソー式第1号空気輸送機を完成して以来、戦後の急速な復興による需要の増加に伴い、この種の装置の需要も着実な伸びを示し、今日までに輸出向十数件を含めて700台以上を完成し、取扱物の種類も60余種に及んでいる。

近年産業規模の拡大に伴い、1台当たりの輸送能力は大形化の傾向にある。特に船舶によるばら積穀物の荷揚用として大容量ニューマチック・アンロードの建設が盛んである。また石油化学工業においては、その構成や品質管理の面から空気輸送機が絶対的

に賞用されている。なお、昭和41年には西ドイツガティス社の技術を導入した日立=ガティス空気輸送機が完成し、いっそう効率のよい輸送が可能となり、空気輸送機の応用分野はさらに拡大されつつある。このように空気輸送機はクレーンと並んで産業界の荷役の合理化、ひいては生産の合理化に大きく寄与しているのである。

建設 わが国の建設工事は戦前は土木建築工事(あるいは土建工事)と呼ばれていたが、戦後アメリカ軍払下げ建設機械による国土復興工事や、アメリカ製重機械群による佐久間ダム建設工事などに刺激されてその機械化が大いに促進された。

現在では建設機械の年産額は2,500億円に達し、量的にはヨーロッパの各主要国を追抜くに至った。

一方、工事の性格はダム建設に代表される重掘削作業から、現在の主流はハイウェイ建設、ビル建設など都市周辺の工事へと移って来ている。

日立製作所においては戦前には受注生産形式による大形電気ショベルや、ラダー エキスカベータの製作経験があったとはいえ、近代的な見込生産方式での建設機械生産は同業数社と同じく、戦後の昭和24年に始まった。特に同年に完成したU05形パワーショベルは、クレーン製作技術と戦車製作技術を背景として、当時としては卓越した開発思想のもとで製作されたものであり、1年後にU06にモデルチェンジされ、その後U106となって建設業界の絶対的信頼を得て今日に至っている。とりわけ歯車および軸系統にこの種の機械で日本で最初に高周波表面焼入を実施し、今日の高周波焼入時代の先鞭をつけたことは特筆に値する。

一方、その原動機であるディーゼル・エンジンは昭和7年に亀戸工場で大形自動車用として開発され、終戦とともに生産を止めていたが、戦後昭和34年に建設機械用B形エンジンとして生産を再開し、エンジンの全所要量の大半を自家生産している。

現在の建設用重機械の主要機種はパワーショベル、トラック・クレーン、ブルドーザおよびトラクタ・ショベルであるが、パワーショベルは業界首位の座を保持しており、トラクタ系はそのがんじょうな足まわりに定評を得ている。

また最近10年間に急激に発達した油圧機器工業に呼応して開発した油圧式パワーショベルは、日立製作所の独創品として外国との技術提携による他社製品と優勢に競合中である。他方、小形トラクタ部門では、アメリカのジョン・ディア社と昭和38年に技術提携し、需要の開拓に努めている。

建設機械の輸出はその率においては今一步の段階であるが、海外ルートセールス網を強化中で、すでに東南アジア、カナダ、南アフリカ、オーストラリアに多数のブルドーザとパワーショベルを輸出している。またオランダには技術供与形、アメリカには国際分業形の国際事業を開始している。

最後に建設機械の今後の動向の一端を予見すると、まづ、熟練運転手の不足時代に対処するためのイージーオペレーション構造に始まり、プログラム運転あるいは、自動運転化が行なわれる一方、省力用小形機の普及、また人力では不可能な工事を可能とする地中および海底作業用機種の開発など、今後における建設機械の飛躍的發展は期してまつべきものがある。

サイリスタ式電気車の開発

Development of Thyristor Locomotives and Motor-train Sets

伊 沢 省 二*
Shōji Izawa

要 旨

電気車の主回路にサイリスタを導入することは、まず交流車両によって口火が切られた。昭和40年納入されたED77901(旧ED931)交流機関車およびその量産機によって実用にはいり、その後インバータ回生ブレーキを付加したED78が量産されるにおよび一つの時期を画したと言える。このサイリスタ応用技術は直流電気車にも適用されて、チョップ制御が実用にはいる段階も近い。

本稿はこれらの発展の路をたどり、その概要を紹介するものである。

1. 開発の背景

1.1 従来の交流電気車の制御

わが国の第1号機、交流機関車のED901(旧ED441)が昭和30年に製作されて以来、多くの交流機関車や電車が開発されたが、サイリスタ方式が開発される以前は、いずれも主変圧器のタップを切り換えるいわゆるタップ切換によって電圧制御を行なった。このタップ切換器はいずれも負荷時タップ切り換えの遮断器を有しており、この遮断器の動作ひん度が、車両の宿命として極度に高いことが技術的な問題であった。すなわち交流機関車のタップ切換ひん度は1ヶ月に約10万回、新幹線電車にあっては同じく1ヶ月に20万回以上に及ぶことが推定され、このため切換遮断器の構造や、材質に多くの研究改良が加えられたが、やはり車両において最も保守を要する部分の一つであることに変わりはない。

以上のタップ切換器の欠点をなくすために開発されたのが、無電弧タップ切換方式であり、昭和38年、常磐線、東北線に投入されたED75形交流機関車にはじめて採用された。この主回路方式は図1に示すように切換開閉器(図中の T_1 および T_2)は存在するが、約100V、2,400Aを制御可能な大容量磁気増幅器を使って無電弧切換を可能にしたものである。しかしこれをさらに一歩進めて、機械的動作部分をなくしてタップ切換器のまわりの保守を極小にすることが、サイリスタを主回路に導入する第一の目標であった。そしてこれを可能にしたのが次節で述べる高耐圧大電流サイリスタの実現であった。

1.2 サイリスタ素子の開発

1.2.1 高耐電圧化

電力用部品として、サイリスタ素子に第一に要求されたものは耐電圧特性の向上であり、その理由は

- (a) 装置の経済性の向上
- (b) 直列接続における保護協調上の要求と総合信頼度の向上
- (c) 装置の小形化と能率向上

がおもな因子であった。このため多くの改良が加えられ、現在は2,500V級素子が量産され実用されている。

1.2.2 大電流化

サイリスタ素子の電流化は上記の高耐圧化とともに、構成素子数の低減に伴う大きな利益をもたらす。一般に電流を規制するのは素子の接合温度であり、接合温度を決定するのは発生損失と、これによる熱を排除する効率を示す熱抵抗である。従来は大電流素子を得る手段として主として発生損失の低減が行なわれたが、最近の傾向としては熱抵抗の低減をねらう改良が行なわれている。図2に従来のスタッド形とともに、熱抵抗の低減を図った最近のユニットセル形を示した。前者では熱の流れは大部分下

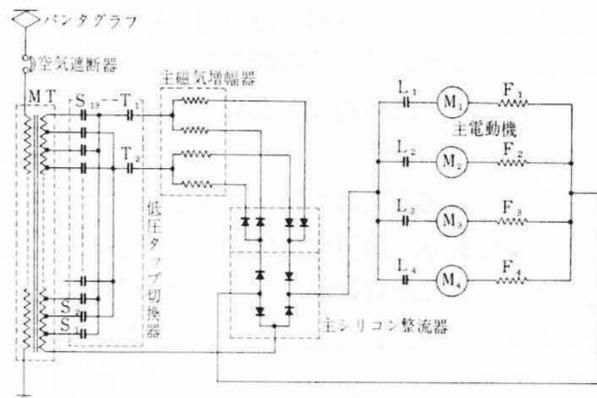


図1 ED75形交流機関車主回路方式

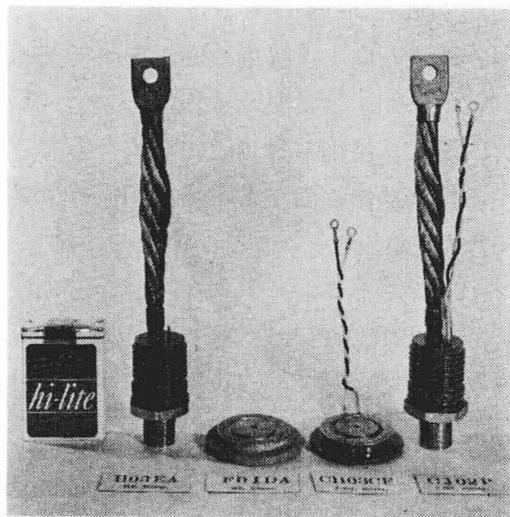


図2 サイリスタ素子

方に接続される冷却フィンを通して流出するが、後者ではほぼ接合体の両側に2分されてフィンに導かれ、このため同一の接合体でも電流容量を2倍程度に向上させることが可能となった。

1.2.3 高速化

サイリスタの応用領域が、交流車両のみでなく直流車両のチョップやインバータに及ぶにつれて、素子のスイッチング特性が大きな問題としてクローズアップしてきた。

(1) ターンオン特性

- サイリスタがターンオンする場合、下記の特性が問題である。
- (a) ターンオンするときの電力損失で素子が破損しないこと。
- (b) ターンオンする時間が素子間で一定の範囲にあること。

このためターンオン時の動作のひろがり速度を大きくし、損失耐量をあげる方法としてFIゲートと呼ばれる特殊な構造をNE層に採用して効果をあげた⁽¹⁾⁽²⁾。

(2) ターンオフ特性

インバータやチョップでは、その運転周波数をあげることが装置全体の価格や重量の低減に有効であり、使用素子のターンオフ時間を切りつめることが問題となってきた。しかし高耐圧化とターンオフ時間の短縮は、現在の技術では相反する要求であり、

$$\text{ターンオフ時間} (\tau_{\text{off}}) \propto \text{耐電圧 (V)}^{7/8}$$

の関係がある。このためライフタイム・キラーのドーピング技術

* 日立製作所水戸工場

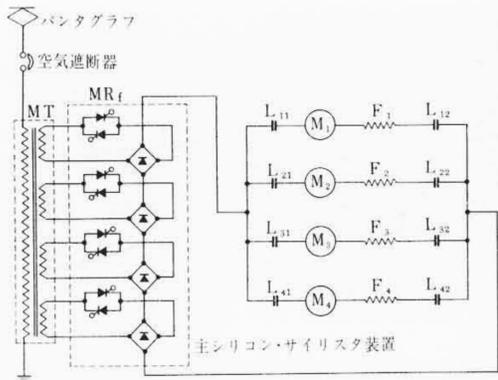


図3 ED77形
交流機関車主回路方式

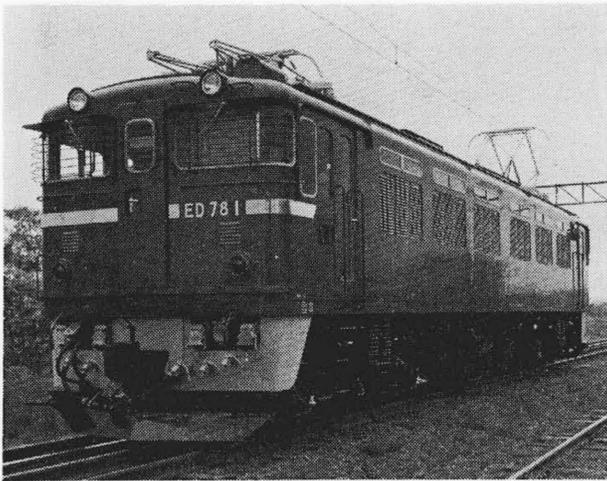


図4 ED78形
交流機関車

に努力が集中され、現在では1,300V級素子でターンオフ時間を、従来の1/4程度の50 μ sに短縮することに成功している。

2. 交流電気車

昭和39年12月、ED751号車に主磁気増幅器をサイリスタで置換した無電弧タップ切換器をとう載し、常磐線で行なわれた性能試験およびその後約1年間の長期試験において、すぐれた成績をおさめることができた。そこでサイリスタの主回路要素としての信頼が確認され、ED75と同じ性能を持つサイリスタ式交流機関車が計画された。これが日立製作所が製作納入した試作機関車ED77901(旧ED931)号車であり、わが国最初のサイリスタ式電気車である。

なお日立製作所は引き続き電力回生ブレーキ付サイリスタ式交流機関車ED78901(旧ED941)号車を製作納入し、ここにサイリスタ電気車の技術は高度な発達をとげた。

2.1 ED77形交流機関車

昭和40年納入されたED77901号車⁽³⁾を基本として、磐越西線用ED77形交流機関車が量産され、昭和42年納入された。図3はこの機関車の主回路方式を示すもので、主変圧器二次側に本機関車の特長がある。すなわち主変圧器二次巻線は4ユニットに分割され、このおのおのに逆並列接続のサイリスタとブリッジ結線の主シリコン整流装置が接続され、直流側は4ユニットを直列接続してある⁽⁴⁾。主変圧器二次側を4分割した理由は、

- (a) 高調波含有率を下げ、通信誘導障害を少なくする。
- (b) 主電動機回路の電流の脈流率を下げる。
- (c) 力率の低下を押える。
- (d) 1ユニット当たりのサイリスタ直列個数を1とする。

などである。

2.2 ED78およびEF71形交流機関車

昭和43年9月に交流電化された奥羽本線福島一米沢間の33%の急こう配区間における抑速ブレーキとして交流の電力回生ブレーキが必要となり、昭和42年電力回生ブレーキ付交流機関車ED78901が試作された⁽⁵⁾。その結果に基づきED78およびEF71形交流機関車が量産され、昭和43年奥羽線および仙山線に投入された。図4はED78の外観、図5はその主回路で、主変圧器二次側は前記ED77と同じく4分割され、各巻線にサイリスタブリッジが接続されて、

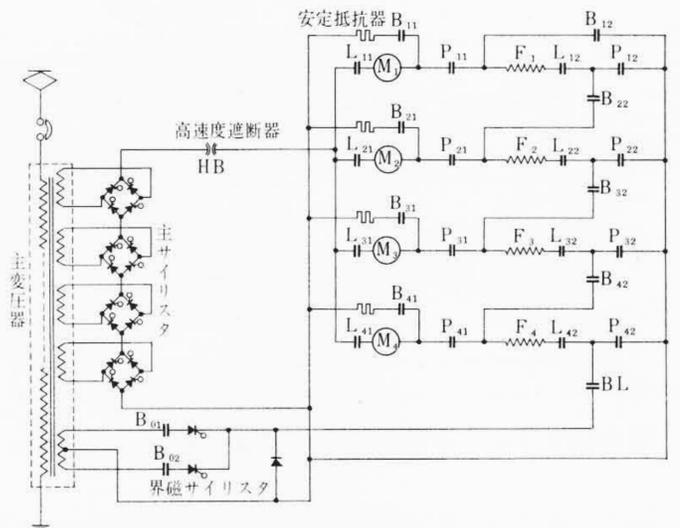


図5 ED78形交流機関車主回路方式

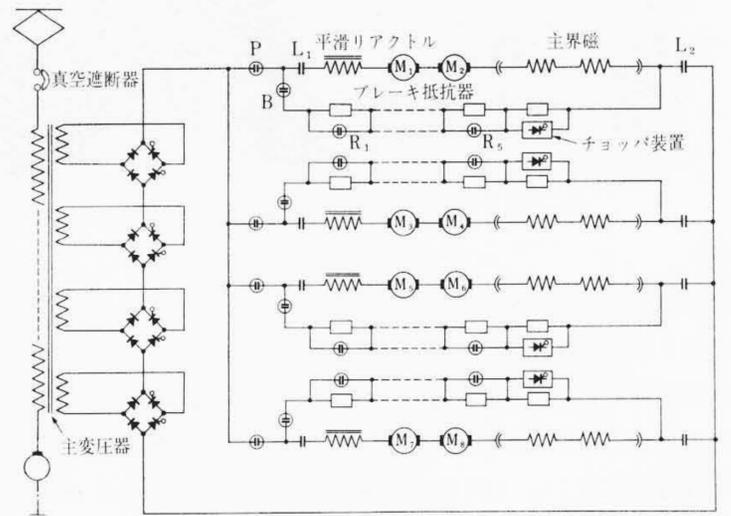


図6 新幹線試験電車主回路方式

回生ブレーキ時にはインバータとして運転される。

2.3 新幹線試験電車

日本国有鉄道においては現在の新幹線電車のモデルチェンジを検討するため昭和43年度に試験車2両(1ユニット)を製作するが、この主回路にもサイリスタ制御が大幅に採用されている。

図6に試験電車の主回路方式を示す。力行時の電圧制御はサイリスタとダイオードの混合ブリッジを4段積み重ねて順次位相制御することにより行なわれる。

電気ブレーキは、粘着限界いっぱいのブレーキ力を得るために、サイリスタ・チョップを採用し、ステップレスの発電ブレーキ制御を行なっている。このチョップの制御方式では発電ブレーキ抵抗器の一区分に並列にチョップを接続し、ほかの抵抗区分を接触器で短絡するたびにくり返しチョップを動作させる、いわゆるバーニア制御方式をとって、チョップの容量を低減している。

この試験電車用として昭和43年度、日立製作所は力行サイリスタ装置およびブレーキチョップ装置を製作したが、サイリスタおよびダイオードはいずれもユニットセル形で、サイリスタには力行用は2,500V、400A素子を、またブレーキ用チョップには1,300V、400A、ターンオフ時間50 μ sの素子を使用している。なおこのチョップ装置には耐雪の点から油冷構造を採用している。

2.4 711系交流電車およびED76形交流機関車

昭和43年北海道小樽一滝川間が電化されたのを機に、711系電車とED76形交流機関車が投入された。前者はED77形交流機関車あるいは新幹線試験電車と同様の電圧制御方式であるが、後者はさきにED751号車で長期試験を行なったサイリスタ式無電弧タップ切換と同様の方式である。

3. 直流電気車

3.1 電力回生ブレーキ付チョップ制御装置

帝都高速度交通営団(以下営団)では電力回生ブレーキ付チョップ

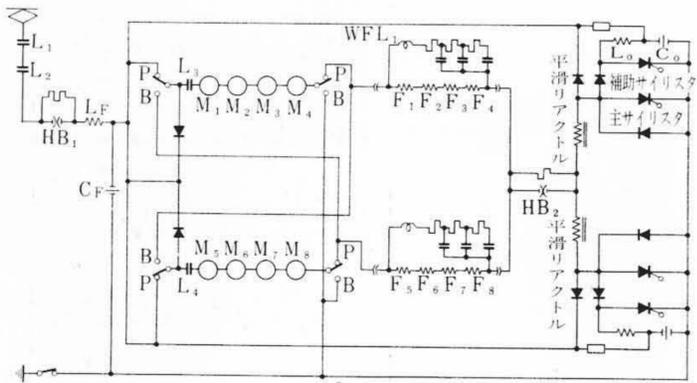


図7 電力回生ブレーキ付チョップ制御直流電車主回路ツナギ

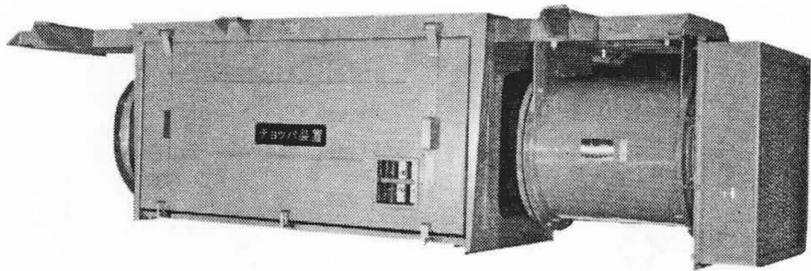


図8 チョップ装置

制御装置の現車試験を昭和41年5月に行ない、つづいて昭和43年試作電車1編成が製作された。

この試作電車の主回路は図7に示すように、誘導障害軽減のための電源フィルタ L_F , C_F が設けられている。またチョップ基本回路を2回路持ち、互いに180度の位相差を持たせて動作させることにより、電源側より見た運転周波数を高め、フィルタの小形化と主電動機電流の脈流率の低下をねらっている。

図8はチョップ装置の外観を、図9は現車試験のオシログラムの一例であり、直流1,500Vの高圧でかつ電力回生ブレーキ付と言う点で世界最初の装置である。また図10は同時に行なわれた空転再粘着試験のオシログラムであり、サイリスタ制御の速応性を利用することにより、従来の抵抗制御方式による直流電車に見られないすぐれた再粘着特性が得られることが証明された。

3.2 複巻電動機他励界磁用チョップ制御装置

従来抵抗制御方式の直流電車の電力回生ブレーキを行なう場合には、主電動機として複巻電動機を用い、他励界磁回路には直列抵抗器をそう入し、この抵抗をカム軸制御器(以下界磁制御器という)で加減することにより他励界磁電流を制御していた。しかし界磁制御器は動作ひん度が大きいため保守に手数を要し、またカム軸制御器であるため応答速度がおそいと言う欠点があった。この界磁制御器をサイリスタ・チョップで置換することにより、保守が容易になるばかりでなく、ここでもチョップの持つ大きい応答速度を利用して回生ブレーキ時の並直列切換をスムーズに行なうことができ、さらに新しい制御方式を可能とした。すなわち他励界磁を力行時にも使用し、複巻電動機を用いて直巻電動機の特長を得ることにより、従来の直巻界磁回路に存在した誘導分路、弱界磁抵抗器および弱界磁接触器を一掃し、高速域における定速運転も容易になった。

図11は複巻電動機他励界磁電流を電機子電流に比例するように制御して直巻特性を得た東京急行電鉄・田園都市線における現車試験オシログラムである。

4. 海外の情勢

4.1 電気機関車

電気機関車に対するサイリスタの導入は文献から見る限り、スウェーデンが最も活発で、日本とほぼ時を同じくして量産を開始しており、ドイツ、フランス、ソ連などもまた注目すべき試作機を発表している。

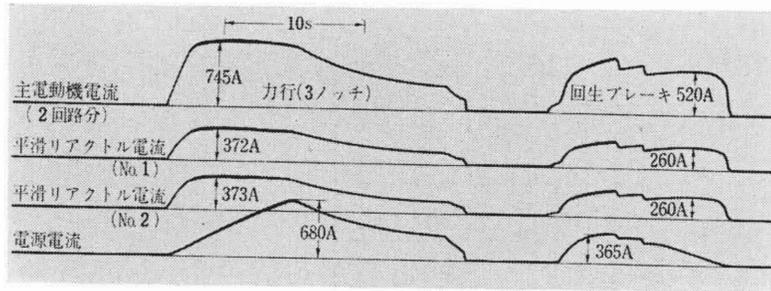


図9 チョップによる電力回生ブレーキ試験

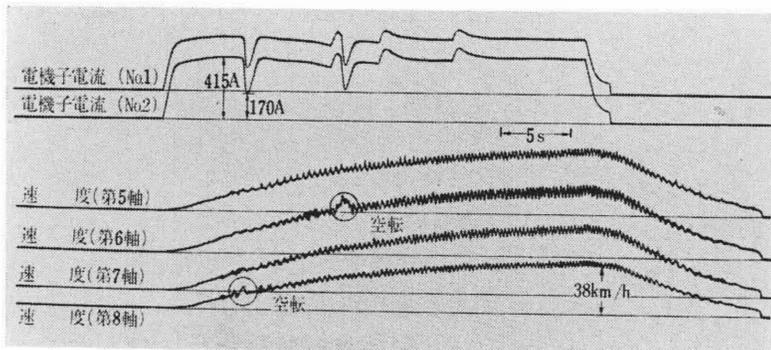


図10 チョップによる空転再粘着試験

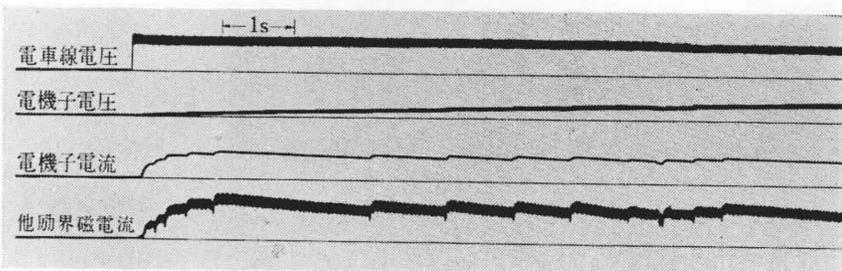


図11 他励界磁チョップ装置による力行制御試験

4.1.1 スウェーデンの情勢⁽⁷⁾

スウェーデン国鉄では ASEA 社が1962年製作した Rb 1 No. 1001号車を1965年に至り回生ブレーキ付サイリスタ方式に改造し一連の試験を実施した。その結果1時間定格3,600kWのRc形機関車60両が ASEA を主契約者として発注され、その最初の20両ロットの1号機が1967年納入された。主回路方式は主変圧器二次側を3分割したサイリスタ混合ブリッジで、界磁は主変圧器よりサイリスタを介して他励されているが、回生ブレーキは採用されていない。なお ASEA はルーマニアに輸出した38両のシリコン整流器式機関車中の1両(060-EB形)を上記Rc形と同様の方法で1967年に輸出している。

4.1.2 ドイツの情勢

サイリスタ・チョップについては最も早くから蓄電池式機関車に応用した実績があるが、その後DC600V、300kWの直流機関車に実施例を見る程度である⁽⁸⁾。その代わり交流あるいは多電流機関車に対する応用は積極的で、1965年、ラインの炭鉱に納入した140t、3,720kWの電力回生ブレーキ付交流機関車4両の製作が発表され⁽⁹⁾、引き続いてドイツ国鉄は1966年から67年にかけて、Trans Europe Express (T. E. E.) 列車けん引用にE410形4電流機関車5両を試作した⁽¹⁰⁾。電気部分は A. E. G. が3両分を、B. B. C. が2両分を製作したが、A. E. G. 製の主回路方式が図12である。交流区間ではサイリスタの位相制御によることは、わが国のED77などと同様であるが、注目すべきは直流区間において、DC3kV、1.5kVいずれにおいてもサイリスタ・インバータにより交流100Hzを発生し、主変圧器二次側以下の回路は交流区間と同じ動作を行う点である。B. B. C. 製は直流区間では従来の抵抗制御によっている。一方上記と時期を同じくして、ドイツ・フランス間の通し運転のため、サイリスタ式2電流機関車E310形4両が A. E. G. の電気品により製作された。4両中2両は発電ブレーキを、残り2両は回生ブレーキを採用している。

4.1.3 フランスの情勢

最近、交直両用機関車CC21000形において、交流区間ではサ

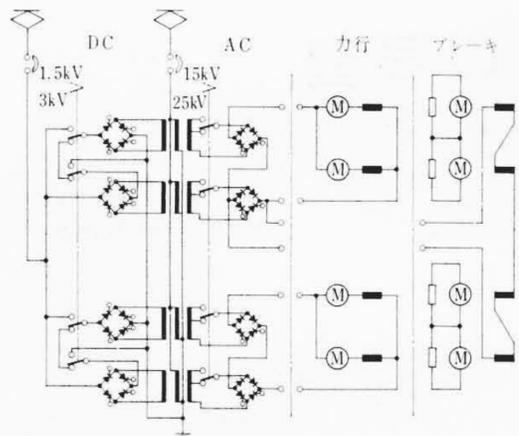


図12 A. E. G. 製 E410 主回路方式

表1 BARTD 試験車電気方式 (1966年)

試験車		A 車	B 車	C 車
電気方式		3相 AC 4,160 V, 60 Hz	DC 1,000 V	3相 AC 4,160 V, 60 Hz
主回路方式	力行	サイリスタ位相制御による直流直巻モータ	サイリスタ・チョップパによる直流直巻モータ	サイリスタ・インバータによる6相誘導電動機
	電気ブレーキ	サイリスタ・チョップパによる発電ブレーキ	サイリスタ・チョップパによる発電ブレーキ	サイリスタ・インバータによる回生ブレーキ
主電動機容量 (連続定格)		300 HP×2台	150 HP×4台	150 HP×4台
電気メーカー		Westinghouse Electric	Westinghouse Electric	Garrett

イリスタ混合ブリッジによる位相制御を行なうことが発表されたが、運転にはいったのは1968年秋のはずである⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

4.1.4 イタリアの情勢

イタリア国鉄が1時間定格 3,420 kW の 3,000 V 直流機関車 E444 の5両中1両のみにチョップパを試験的に採用し、製作中である旨1968年に発表した。

4.1.5 ソ連の情勢

量産形交流機関車 BЛ80K 車の機械部分を利用して、1時間定格 5,000 kW のサイリスタモータ式交流機関車 BЛ80B を試作したことが最近発表された⁽¹³⁾。同期機のような構造を持つ主電動機を使用し、界磁は主変圧器三次巻線よりサイリスタを介して他励されているが、電圧制御はタップ切換器によっている。

4.2 電 車

4.2.1 スエーデン

交流電車に対するサイリスタ導入はスウェーデン国鉄が最も早く、1964年の現車試験を経てストックホルム近郊用として、MT編成を1ユニットとする電車90ユニット(X₁形式)をASEAに発注した。この電車は1967年以来納入されており、主回路は主電動機が2台直列であるほかは前記 Rc 形機関車と同じである。

4.2.2 アメリカ

1965年、サンフランシスコ湾地区高速鉄道(BARTD)が試験線を建設し、各種試験車を走行させて量産形式を決定する試験を開始したとき、非常に積極的な方式が登場した。表1はBARTDにおける3両の試験車にとう載された電気方式の一覧表で、1年以上の試験の結果、量産形式はB車のチョップパ方式に決定された。またC車のGarrettの方式は、おそらく現時点での経済性その他の理由で量産形式に採用されなかったものと考えられるが12,000 rpmの油冷6相誘導電動機をサイリスタ・インバータで駆動するもので、遊星歯車を使用した減速機構とともに、アメリカのこの方面の実力をうかがわせるに足るものであろう。

4.2.3 ドイツ

ドイツ国鉄はサイリスタ式電力回生ブレーキ付交流電車ET45・01の試作を発表した⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。主変圧器二次巻線は二分割方式で、E310機関車と同じく界磁には他励方式を採用しており、電気品はSiemens製である。

5. 今後の課題と発展

5.1 今後の課題

サイリスタ式電気車の今後の課題はコストと誘導障害の問題をいかに克服するかにあると考えられる。コストの問題はさておくとして、狭い国土において、鉄道と通信回線が平行して走る場合の多いわが国では、誘導障害対策は外国におけるよりも重要な意味を持っている。現在においてもED78に採用された非対称制御と呼ばれる特殊なゲート制御方式や、車上に設置したフィルタにより一応の成果が得られているが、今後さらに誘導障害を軽減する回路方式とフィルタの研究により、車上装置の簡素化が必要と考えられる。

5.2 今後の発展

現在までの開発過程をふり返ると、整流子付直流電動機を使用する限りにおいては、方式の開発はほぼ一段階を画したものと考えられる。したがって今後の技術的発展は、無整流子電動機をサイリスタというすぐれた制御素子を使って、いかにして電気車の主回路に導入するかに集約されてくるであろう。そしてその開発速度を決定するものは、それを必要とする社会の経済的評価であり、ひいては将来の輸送機関としての電気車に対する社会的評価であろう。

無整流子電動機としてはサイリスタモータや誘導電動機、さらにはその変形としてのリアモータが考えられる。

6. 結 言

以上、わが国のサイリスタ電気車の発展の跡と海外の情勢を検討し、今後の方向を探ったが、結論として

- (1) わが国の電気車へのサイリスタ応用は交流電気車にはじまり、直流電気車に及んでいるが、いずれの面においても現状は世界の第一線をゆくものと言って差しつかえない。
- (2) このようにサイリスタ電気車が従来の電気車によって代わりつつあるのは、サイリスタを用いた無接点制御によって、保守費が低減されるという利点のほか、小さな制御入力でも速応性にすぐれ、かつ連続的に制御可能なサイリスタのすぐれた制御性能(Controllability)に基づくものである。この点は将来、車両の自動運転が広く導入される時代にはさらに威力を発揮するであろう。
- (3) サイリスタ電気車の開発は、今後研究すべき問題は残るにしても、現在までの段階で一応の定形化を終わり、今後は無整流子電動機の応用に向かって努力が集約されてゆくであろう。そして現在までの多くの成果も、この長い一連の過程の中で評価されるべきものとする。

最後にサイリスタ電気車の開発に当たって、ご指導を賜った、日本国有鉄道、帝都高速度交通営団および東京急行電鉄株式会社の各位に厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 和 島ほか：日立評論 48, 1999 (昭41-10)
- (2) 岩 田ほか：日立評論 48, 1205 (昭41-10)
- (3) 佐々木ほか：日立評論 48, 520 (昭41-4)
- (4) 川 上ほか：日立評論 48, 1220 (昭41-10)
- (5) 佐々木ほか：日立評論 50, 413 (昭43-5)
- (6) 刈 谷ほか：日立評論 48, 1229 (昭41-10)
- (7) Engineering, 1967, Aug. 4, p. 176
- (8) A. Wolski: Siemens REVIEW, 1966, Jan., p. 16
- (9) Elektrische Bahnen, Heft 8, 1965
- (10) E. Gierth: Elektrische Bahnen, Heft 11, 1966
- (11) Nouvionほか：Rev. Gén. Chemin des Fer, 86, 10, p. 517 (1967)
- (12) The Railway Gazette, May, p. 336 (1968)
- (13) Б. К. Барановほか：Электрическая и тепловозная тяга No. 10, 1968, p. 13
- (14) R. Fischerほか：Elektrische Bahnen, Heft 6, 1968
- (15) R. Fischerほか：Elektrische Bahnen, Heft 7, 1968

超高層ビル用高速エレベータの展望

A View of High Speed Elevators for Multi-storied Building

犬塚 績*
Isao Inuzuka

宮尾 英夫*
Hideo Miyao

早瀬 俊一郎**
Shun'ichirō Hayase

要 旨

超高層ビルでは高速エレベータ群の効率的な運転がビルの機能上最も重要な問題となるから、超高層化計画に際して、従来の十数階程度のビルに比べてさらに高性能、高信頼度化が必要である。特に300 m/min以上の高速エレベータでは速度制御、振動、騒音、安全性のほか全自動群管理に関する諸問題が150 m/min程度のエレベータに比べて飛躍的に増加するので、これらの諸問題を克服するためには種々の新技術の開発が必要である。日立製作所ではエレベータ研究塔において、すでに540 m/min級への高速化について研究推進中であるが、本稿では霞が関ビル納300 m/min高速エレベータ群の成果を主体に、主として制御性能について述べ、さらに超高層ビル用高速エレベータに関する将来への展望について言及した。

1. 緒 言

昭和43年4月、霞が関ビルの開館とともに、多年の懸案であったビルの超高層化計画もいよいよ本格的な発展段階に移行し、わが国の都市再開発に対して正に新紀元を画したというべきである。

超高層ビルの中核的な機能を果たす高速エレベータ群は、その計画、性能、運用などがビル管理上の経済性や機能上の効率に関して重要な役割を演ずることになる。特に収容人口の飛躍的な増大、昇降行程の増加などによって全自動群管理機能の重要性もますます高まることは明らかである。また、エレベータの性能の面では、まず高速化が最大の問題になるが、これに伴って速度制御、振動、騒音、安全性などに関する新技術の開発が必要である。従来はビルの規模や建築上の経済性などから150 m/min程度の定格速度が望ましい速度として選定されてきた。しかし、超高層ビルでは高階層グループと低階層グループ間の輸送能力やサービス状態をほぼ均等化する必要があるから、高階層グループの高速エレベータは急行区間に応じた高速化、すなわち300~500 m/min級への高速化が必要になる。

日立製作所は超高層ビル用高速エレベータに関する技術革新を図るため、エレベータ研究塔、専用シミュレータ、信頼度試験室などの研究設備を駆使して高速化の研究を推進してきた。また、わが国に地震が多いことやビル内外の交通需要、ビル管理上の問題など外国と違った国情をじゅうぶん織り込むことにも留意してきた。今回、霞が関ビルに300 m/minを含め合計17台の高速エレベータ群を納入したが、これらは柔構造化した超高層ビル向けの高速エレベータとして、日立製作所が独自の技術で新機軸を生み出したものである。本稿では、これらの成果を取りまとめて高速化に伴う制御性能について述べ、さらに将来の高速エレベータに関する展望を行なってみた。

2. 高速化と速度特性

2.1 制 御 目 標

エレベータの制御に必要な性能は、乗心地がよく、着床誤差が少なく、しかも目的階までの運転時間が短いことである。高速エレベータの制御目標も従来のエレベータと本質的に相違するものではないから、表1に示すとおり従来の目標と同等以上にこれらを設定した。高速エレベータでは高速化や高行程化に伴ってこれらの性能をさまたげる種々の外乱要因が増加するから、絶えず安定した性能を

* 日立製作所水戸工場

** 日立製作所日立研究所



図1 霞が関ビル全景

表1 速度特性の目標値

項 目	目 標 値
起 動 時 の 加 速 度	0.01 g
停 止 時 の 減 速 度	0.01 g
加, 減速時の加減速度	0.15 g
加, 減速時の加減速度変化率	1.5 m/s ³
着 床 誤 差	±5 mm

(注) g : 9.8 m/s²

維持するためには設計上種々のくふうが必要である。

エレベータの乗心地は加速度と加速度変化率であらわされるが、運転時間を短くし、かつ乗客に不快な重圧感や浮上感を与えることなく適度の速度感を与えるために、事務所ビル用では0.15 g程度の加減速度、1.5 m/s³程度の加速度変化率をもたせ、台形波加速度特性とすることが理想的である。起動および停止時の加減速度は0.03 g以下であれば人体にほとんど感じない程度であるが、超高層ビル用エレベータではロープが長くなりかごが上下振動を発生しやすくなるので、目標値をさらに小さくし0.01 g以下とする必要がある。

図2は台形波加速度特性をもつ理想速度特性を階床運転ごとに示したもので、実効速度を高めるために走行距離に応じて絶えず最適

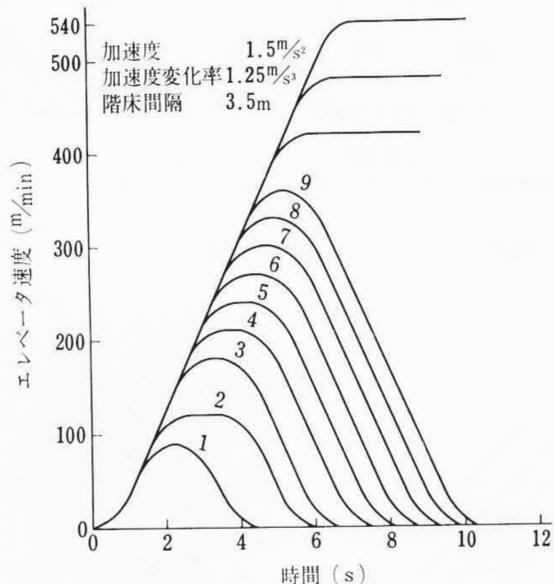


図2 階床運転ごとの理想速度特性

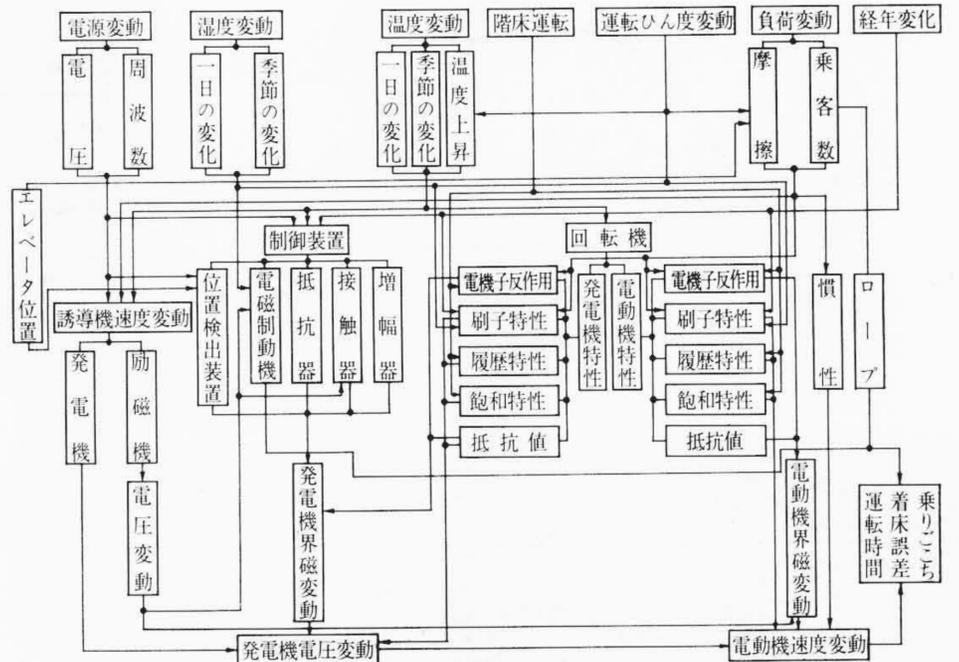


図3 制御系の外乱とその影響

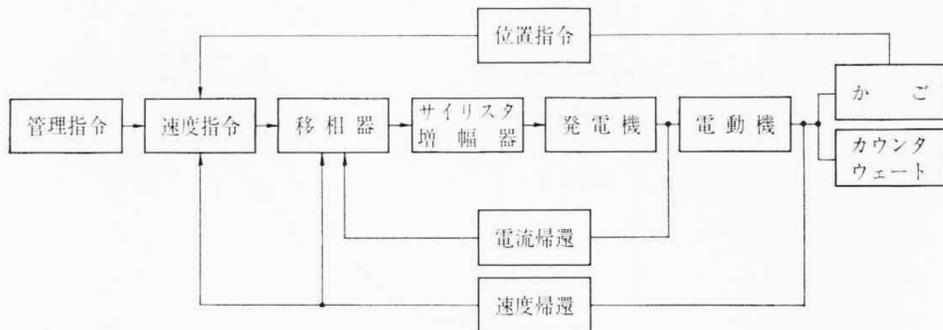


図4 速度制御方式のブロックダイアグラム

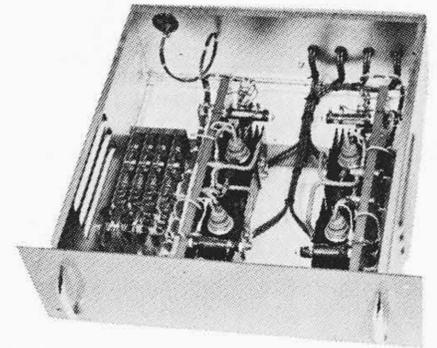


図5 サイリスタ増幅器

の速度を自動的に選択し運転効率を高めている。本図では、階床運転ごとの中間速度を 30 m/min ごとに区分したものを例示したが、これは加速度の最大値および階床間隔に応じて設計上任意に選定することができる。

着床精度の向上は乗客の出入りを円滑にし、エレベータの運転効率を向上するうえに重要な要素となるから、経年変化を含めて絶えず ±5 mm 以下の精密着床が必要となる。また、超高層ビルでは高行程であるから下層階ではかご内の負荷変化によりロープの伸縮が起り、停止中にもかごの床面が上下するので、ロープの伸縮を検出して微速度で自動的に補正することも必要になる。

2.2 制御系と制御機器

図3はエレベータ制御系に対する外乱およびその影響をブロック図化したもので、多種多様な因子が相互に関連をもってエレベータの性能に影響を与えることを示している。超高層ビル用エレベータでは、高速化によって速度制御範囲が 500~1,000:1 となるためこれらの外乱の影響度も当然増加する。また、輸送力強化のためかごの積載量を従来のエレベータに比べて増加するのが一般である。したがって、制御系の応答を早くして外乱の影響を少なくし、前項に述べた目標を常に安定に維持し高効率の運転特性を実現するためには、エレベータ制御系に適合した独特の帰還制御が必要である。

図4は速度制御方式のブロックダイアグラムである。速度指令装置は台形波加速度特性を基準として演算増幅器によりきわめて円滑な加速指令を与える。減速指令にはさらに位置指令、たとえばフロアコントローラや着床前の連続位置検出装置などによって基準値との速度偏差を検出して速度指令を自動的に補正する。これは、回転機の負荷変化による電機子反作用、刷子電圧降下や運転履歴による速度変動などのほか、演算増幅器や位置検出装置など、制御要素に対する外乱影響が複雑に関連して着床精度のばらつきが大きくなるからである。一方、変動因子を最少限に縮減する品質管理、日立

独特の変動要因に対する自動補正や速度帰還方式を開発し、制御要素の主要部分をすべてエレクトロニクス化して、負荷変化、電圧、温度などの外乱に対しても絶えず安定した速度特性を与えソフトな停止と精密着床の両者を満足できるよう考慮した。また、超高層ビルにおける運転条件は従来のビル以上に過酷になるから、温度上昇や経年的な特性変化に対して設計上の考慮をはらっている。エレベータ制御においては、定常的な速度変動のみならず速度過渡応答の変動およびその応答速度が高精度の速度特性をうるための重要な要素となる。図4の制御系は、増幅器、発電機、電動機などの時定数を含む多次系であるから、系の安定化のために適切なダンピング条件を選定する必要があるが、ダンピング条件の良否は制御性を左右することにもなるから、日立製作所はエレベータシミュレータを使用し、予測される外乱条件を導入したうえで最適制御条件を選定している。

このような帰還制御の効果により速度制御範囲の拡大した高速エレベータにおいても精密で円滑な速度特性で運転できるとともに、微速度(0.5 m/min 以下ゼロ速度まで)の制御を安定して行なっているため、起動、停止を含めて常に乗心地をよくすることができる。また、回転機のもつ変動因子も高い制御性により補償されるので、小形化、経済性の向上が図られるほか、過酷な運転条件でも安定した特性が維持できる。

2.3 速度特性

霞が関ビルに納入した 300 m/min ギャレスエレベータの速度特性について種々の観点から考察してみる。

図6は負荷を変化した場合の速度過渡応答を示したもので、適切な回路定数の選定と帰還制御の効果によってほとんど負荷影響を受けていない。図7は 300 m/min で走行した場合のオシログラム、図8は負荷および階床運転を変化した場合の着床誤差を示したものである。これらは、いずれも表1に示した制御目標を満足し、かつ

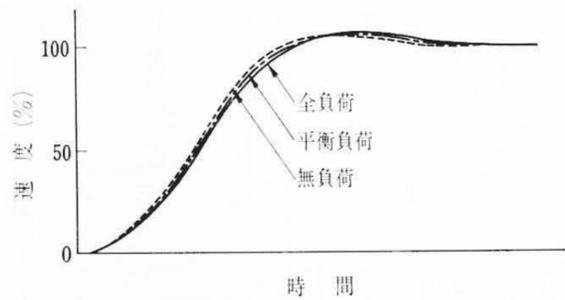


図6 速度過渡応答

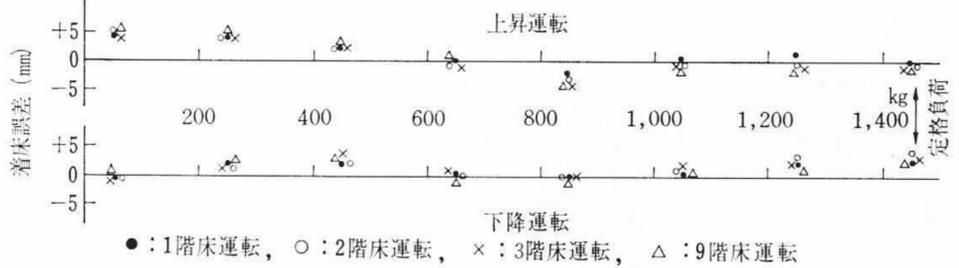
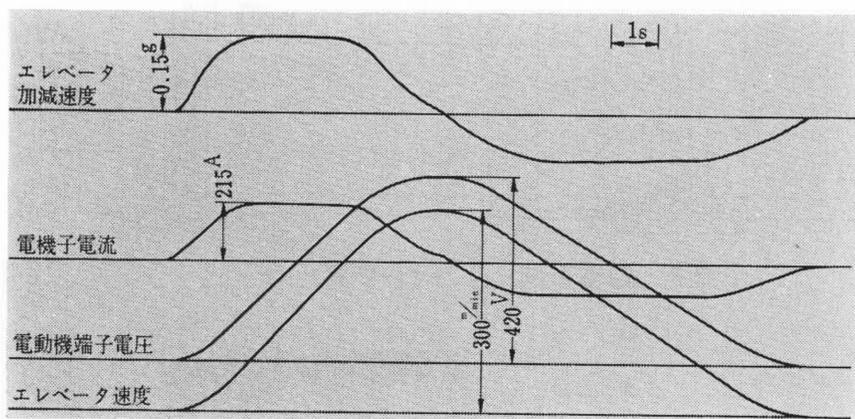


図8 300 m/min エレベータの着床特性



(平衡負荷9階床上昇運転)

図7 300 m/min エレベータ・オシログラム

加減速度も目標どおりの台形波加速度特性を示している⁽¹⁾。

3. かごの振動と騒音

図9は横振動と乗心地の関係を示したものである。人体が振動を感知する限界には若干の個人差もあるが、エレベータでは、かごの密室性、縦方向移動への不安感なども考慮しなければならないので、制御目標は5 Gal以下とする必要がある。参考のためこの値を鉄道車両と比較してみると、車両の乗心地基準で最もよいとされている値の $\frac{1}{5}$ ~ $\frac{1}{10}$ である。また、エレベータの横振動の主成分は3 c. p. s. 以下でありその他の成分は人体が感知できないほど微量である。

かごの横振動を発生する要因は、ガイドレールの真直度、ロープ、テールコードの振動、かご周囲の空気圧変化などである。かごはレールに沿ってガイドローラに支持されて昇降するので、横振動のほとんどはガイドローラを介して伝達される。したがって、ガイドローラの構造、ガイドレールの加工、据付法、かごの防振構造が目標を達成するための重要な課題となる。日立製作所では、ローラの支持構造、支持バネのバネ定数、ゴムタイヤの形状、硬度など総合的な試作研究を行ない、独特の防振形ガイドローラを開発した。またガイドレールの真直度は特に影響が大きいので特殊の加工法を適用し、きわめて高精度のレールを得るとともに、据付のためのレールクリップ、ブラケットの構造や据付精度にも細心の注意を払い、図10に示すように良好な結果を得た。

エレベータは狭い昇降路をピストン走行するため、高速になるとかご上下の空気圧差が増大し、かごと昇降路のすき間を流れる空気は乱流域にはいる。特に、かごが昇降路の出入口部を通過する場合には空気抵抗が急激に変化するため、断続的な風音を発生することも考えられる。したがって、走行中のかご内の騒音を低減するために、かご周囲の構造を渦流の発生しがたい構造とし、かご前面には流路抵抗の変化を小さくするよう特別の配慮を行なっている。

霞が関ビル納300 m/min エレベータでは、エレベータ研究塔における研究成果をもとに高速用として新たなかご構造としたため、かご内の騒音は55 ホーン以下となり従来のエレベータと同等程度に静粛な運転を実現することができた。

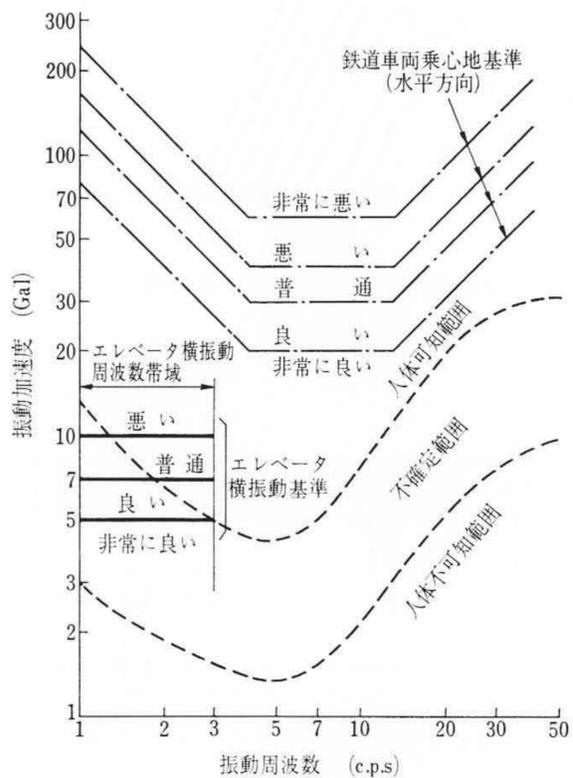


図9 横振動と乗心地

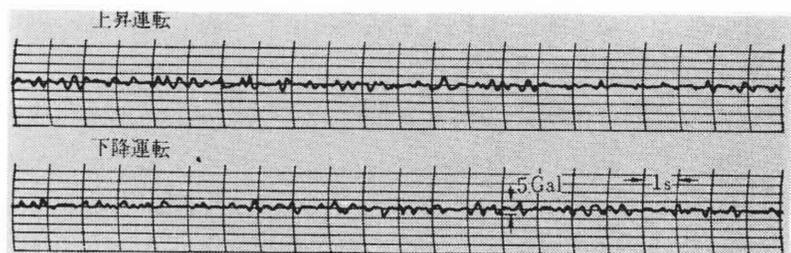


図10 300 m/min エレベータの横振動オシログラム

4. 高速化と安全性

4.1 非常止め装置と緩衝器⁽²⁾

非常時に際してかごを安全、確実に停止させるための装置は従来にもまして信頼度の高いものとする必要がある。高速エレベータではフレキシブルガイドクランプ式非常止め装置を用い、调速機による過速度検出から非常止めが動作するまでの遅れ時間をきわめて短くし、かつレール把握(はあく)力が制動中ほぼ一定となるようにしている。したがって、乗客に急激なショックを与えることもなく、短距離で確実にかごを停止させることができる。また、非常止め装置が動作するエレベータ速度は、従来のエレベータ(150 m/min)では定格速度の140%以内に設定していたが、高速エレベータでは安全性を高めるため120%以内に設定してある。このため、调速機も高精度が必要となり、設計上特別の考慮がはらわれている。

緩衝器は、かごの平均減速度を1g以下とするよう規定されている。緩衝器のストロークは速度の2乗に比例した長さが必要であるから、高速化によって緩衝器寸法は急激に増大し、非常に深いピットが必要となる。このため、次項で説明する端階強制減速装置を設

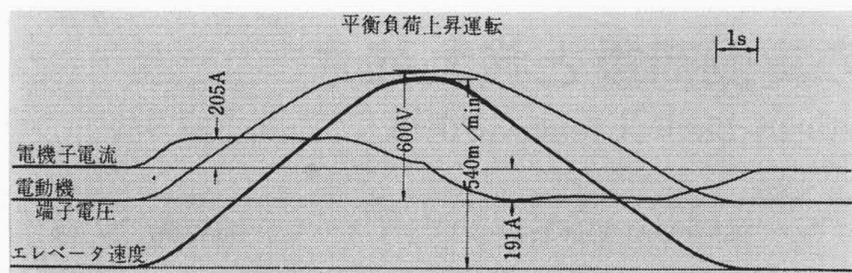


図 11 540 m/min エレベータ速度特性

け、ストロークの短い緩衝器を使用している。これらの安全装置は研究塔においてじゅうぶんな試験を行ない、動作の確実性を確かめてある。

4.2 端階強制減速装置

高速エレベータはその速度にみあったストロークをもつ緩衝器を使用すると、ピットが深くなり建築上非常に不経済である。したがって、かごが緩衝器に衝突する以前にあらかじめ強制的にかご速度を減速し、短いストロークの緩衝器でじゅうぶん安全な緩衝作用が行なわれるよう端階強制減速装置を開発した。従来、端階における減速装置は正副2重に設けられ、正規の減速装置を故意に殺した場合にも第2の減速装置が動作し、端階床面にじゅうぶん着床できるよう考慮されているが、本装置は高速エレベータの安全性をさらに高めるために、これら正副二つの減速装置を同時に不動作にした過酷な条件においても、異常速度で端階床に近づいたことを調速機で自動的に検出し、電動機に機械的制動力を加えて減速させるようになっており、緩衝器に衝突する際の速度をストロークにみあった速度まで安全、確実に減速させることができる。

霞が関ビル納300 m/min エレベータでは、本装置の開発によって緩衝器のストロークは1,081 mm (装置をつけない場合の64%)、ピットの深さは4 m (装置をつけない場合の約70%)とすることができ、建築上の経済性にも寄与している。

4.3 非常時の運転

超高層ビル用エレベータは、停電、火災、地震などの非常時においても乗客を適切に輸送したり、安全を確保するよう特別の考慮が必要である。もちろん、非常時態の発生は突発的なことであり、またその状況によってエレベータを利用する条件はいろいろ考えられるから、どのように運転するかは事態の状況をは握したビル管理者の判断が必要である。しかし、数十台の設備をもつ超高層ビルでは迅速な処置を行なうために非常時の自動管理運転も必要である。

超高層ビルのエレベータ群は、平常はすべて全自動群管理運転を行なっているが、火災などの非常時には監視室より指令を与え、たとえばロビー階にいったん帰着、停止させてかご内乗客を避難させ、引き続き運転を必要とする場合には任意のエレベータを選択起動できるようにしてある。また、停電時にはすべてのエレベータをいったん停止させたのち、自家発電設備からの給電開始と同時に乗客が脱出できなかったエレベータから順次選択起動してロビー階に帰着させるようにしてある。

地震が発生すると超高層ビルは従来のビルに比べて大きな層間変位が生ずる。エレベータは建築物の地震応答をもとに危険の生じないよう強度設計されているが、ロープの振れや乗心地への影響などは避けられない。したがって、乗客の不安を解消するためにもすみやかに停止することが望ましいので、管理者の指令あるいは自動的に地震検出などによってもよりの階に自動着床させるよう万全を期してある。

5. 超高層ビル用エレベータの将来

建築技術の進歩と経済基盤の拡大によってわが国にも多数の超高

層ビルが建設されようとしている。高速エレベータはこれらのビルの中核機能をつかさどるとともに配置上もビルの中核を占めるのが一般的である。したがって、建築上の経済性と運営上の効率の向上を図るために、さらに新技術の開発によってエレベータ技術の発展を図ることが必要である。ここでは、近い将来実現の見通しをえた課題のいくつかに触れ、超高層ビル用エレベータの将来を展望してみよう。

高階層サービス用エレベータにおいて、高速化は輸送能力を強化するための大きな要素である。アメリカにおいてはすでに60階程度のビルに510 m/minの高速エレベータを実用化しているが、わが国でもビル内の運転効率が次第に重要視されるようになり、特に高速化を必要とする高階層用エレベータでは将来300 m/minを越える定格速度が要求されることは明らかである。一方、技術的見地からも、より高速化することが技術水準のレベルアップに対して第一義的な要素となるから、日立製作所はエレベータ研究塔において図11に例示するとおり、昭和43年6月540 m/minへの高速化試験を行ない、高速化に伴う新技術の開発に対して鋭意研究を推進中である。

次に、超高層ビル内の収容入口の増加は当然交通需要の母集団とその変動量が従来のビル以上に増大するから、運転効率を主眼にした建築計画とエレベータリングの検討が必要である。しかし、エレベータのサービス状態に大きく影響する条件の中でテナントの分布、外来客による集団到着、昼食時の輸送条件など実際にビルが運営されたのちに若干の変動も考えられる。また、経済性が超高層ビル計画の基本的な問題であるから、必要最少限の設備台数、仕様で期待どおりの運転効率をあげるために、今後さらに高度の全自動群管理が必要である。すなわち、ビル内全交通需要の変動を監視する情報網と迅速な情報処理機能が重要な要素となる。したがって、情報管理システムに対して多次元的判断を行なう識別機能すなわち学習機械を導入し、絶えず変動する多数の情報を総合的に判断して有機的な管理指令を与えるよう考慮してゆかなければならない。

以上述べたとおり、制御性能と全自動群管理機能の両面において、全制御要素の積極的なエレクトロニクス化を促進するとともに、コンパクトな制御装置を開発して高速エレベータ群の高性能、高信頼度化を図ることが今後のエレベータ技術者に対して与えられる命題であると思う。

6. 結 言

わが国の経済成長、都市再開発計画の進展とともに、現在では霞が関ビルの完成を端緒としてビルの超高層化計画も新たな発展段階にはいったといえる。日立製作所は霞が関ビル内に設置されたわが国最高速(300 m/min)エレベータを純国産技術によって開発したが、さらにこれらの成果を発展させ、本稿で述べた新技術を織り込んで世界貿易センタービル、帝国ホテル、朝日東海ビルなどの超高層ビル用高速エレベータを今後相次いで納入する予定である。本稿では超高層ビル用高速エレベータについて主として制御性能に関する将来への展望を述べたが、高速化の必要性に応じて開発した新技術は当然従来の一般エレベータにも応用できるものである。これらはまた国際市場にも活躍する日立製作所独自の新技术として国内、外の関係者の期待に広くこたえたいと思っている。

参 考 文 献

- (1) 宮尾, 青木: 日立評論 50, 838 (昭 43-9)
- (2) 石塚, 高橋, 山腰: 日立評論 50, 846 (昭 43-9)

レードルクレーンガーダの実働荷重と疲れ強さ

Service Load and Fatigue Strength of Ladle Crane Girders

種 田 元 治* 鯉 淵 興 二**
Motoharu Taneda Kôji Koibuchi
赤 津 利 雄** 福 渡 一 郎***
Toshio Akatsu Ichirô Fukuwatari

要 旨

大形レードルクレーン3台について実働荷重と実働応力を測定し、プログラム疲れ試験などによる検討を加えて、次の結果を得た。

(1) 主ガーダの受ける衝撃荷重と慣性力はかなり小さい。

(2) 今回示したような応力ひん度分布の場合には、クレーン1作業あたりの実働応力波形は正弦波1サイクルと同じ疲れ被害を与えると考えてよい(両波形の最大応力と最小応力はそれぞれ等しいとする)。

またクレーンの諸動作を入力として与えれば、構造内各部の応力波形が電氣的に計算できる装置を開発し、実用できることを確認した。この装置はガーダの疲れ強さの検討に利用できる。

1. 緒 言

クレーン構造物の受けるくり返し荷重は、多くの場合大きさの変化するいわゆる実働荷重である。

クレーン構造物の軽量化を図るためには、(1)適切な構造形式と材料の選択、(2)精密な構造計算、(3)実働荷重(荷重の大きさとそのひん度)の正確な把握とそれをもとにした精密な強度検討などが必要と考えられる。これらのうち(1)、(2)に関する研究は従来から各方面でさかんに行なわれ、それぞれ軽量化への努力が払われてきた。しかし(3)に関する研究は少なく、最近になって注目されはじめた感がある。そのおもな理由としては、以前はこの種の研究を行なうために必要な計測器類や疲れ試験機が世の中になかったということがあげられる。

このようにクレーン構造物の受ける実働荷重については不明な点が多かったため、従来各国のクレーン計算基準^{*}ではいずれも実働荷重に対して比較的過度の安全率がとられていたように思われる。したがってクレーン構造物の大幅な軽量化を図るためには、上記(3)の検討を行なうことがぜひ必要と考えられ、各国ともその気運にある。

西ドイツでは、最近このための研究がO. Svenson, W. Schweer, E. Gassner氏ら^{(2)~(4)}により行なわれ、それらの結果をもとにしたクレーン構造物の新計算基準案⁽⁵⁾が昨年作成された。この基準案は従来の基準DIN 120を大幅に変更したものであり、かなり進歩的なものと考えられる。しかし、荷重ひん度を調査したクレーンが製鉄所用のものに限られていることなどなおいくつかの問題点が残されているようである。

そこで、われわれの実情に則した新基準の作成を目標として、筆者らは各方面から研究を進めている。すなわち変動荷重による疲れの基礎的な研究を行なうとともに^{(6)~(8)}、レードルクレーン、アンローダ、一般天井クレーンについて実働荷重(または実働応力)を測定してきた⁽⁹⁾。

さて上記のクレーンのうちレードルクレーン、アンローダなどは一般天井クレーンと異なり一貫した生産ラインの中にあってほぼ同じ動作をくり返しているクレーンである。このようなクレーンをプ

ロセスクレーンと呼ぶことにする。各種クレーンの中でプロセスクレーンの占める割合は大きく、またプロセスクレーンには比較的大形のものが多い。

プロセスクレーンでは、設計前にそのクレーンの作業内容などがだいたいわかるから、クレーンの衝撃値や構造寸法などを決めれば、構造内各部の応力波形もあらかじめ計算できるはずである。したがってこの応力波形から応力の大きさとそのひん度を求めるなどして、疲れ強さの検討を行なうことができる。しかし、これらの手順のうちクレーンの諸動作から応力波形を求める過程を手計算で行なうことは一般にかなりめんどうなので、この過程を電氣的に計算する装置(応力波形合成装置)を今回開発した。

前述のレードルクレーンの測定はこの装置を検討するためのデータの取得および外力(衝撃荷重など)のは握などを目的として行なったものである。今回はそれらの検討結果について報告する。また実働応力の測定結果からレードルクレーンガーダの疲れ強さについて検討した結果も二、三報告する。

2. 実働応力および外力のは握

2.1 実験方法

大形レードルクレーン3台を供試クレーンとした(定格巻上げ荷重220~240 t, スパン12.5~25.0 m)。レードルクレーンは製鉄所の主として転炉工場において使用される天井走行クレーンである。作業内容から、溶銑を転炉に装入するクレーンと溶鋼をいくつかのインゴットケースに注入するクレーンとに分けられる。供試クレーンのうち1台は前者のクレーンであり、2台は後者のクレーンである。溶銑あるいは溶鋼のつり上げにはレードルを使用する。

図1は供試クレーンの構造の概略を示したものである。主クラブと補クラブはそれぞれ独立して横行と巻上げを行なうことができる。主クラブには左右より巻上げ用のワイヤロープが下がり、それらの先端のフックでレードルをつる。補クラブは主クラブでつったレードルの傾斜作業や雑作業に使用されるものである。主ガーダの外側にはNトラスと呼ばれる骨組構造物が取り付けられている。Nトラスは内部に走行装置などを置くためのものである(最近では、走行装置などを主ガーダ内部に納めNトラスを省略したものが製作されている)。主ガーダと補ガーダの各端は共通した1個のサドル(つなぎガーダ)に連結されている。このサドルが走行車輪を介して走行レール上にのっている。

主ガーダは補ガーダに比べて負荷が大きく、また構造部分で占め

* 日立製作所機械研究所 工学博士

** 日立製作所機械研究所

*** 日立製作所亀有工場

× たとえばDIN 120あるいは“クレーンのはがね構造部分計算基準(日本機械学会制定)”⁽¹⁾など。

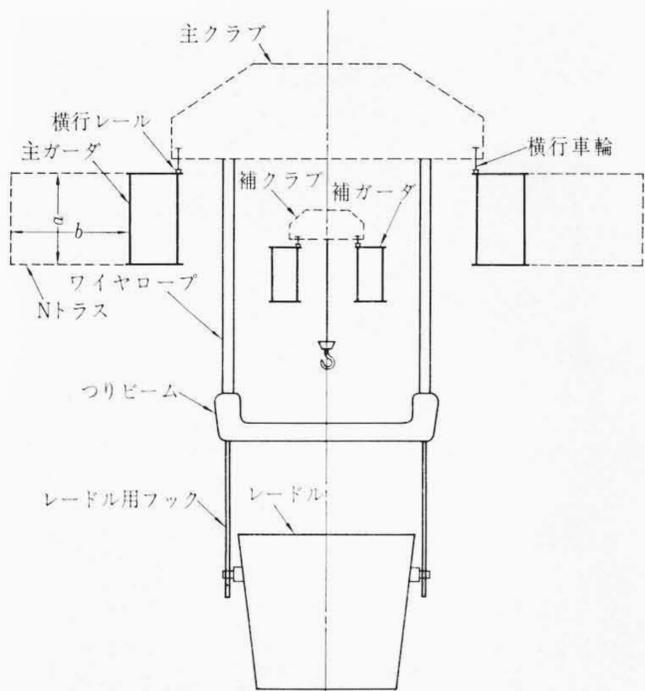


図1 レールクレーンの横断面の概略

る重量も大きいので、今回は主ガーダについて検討した。主ガーダはいずれもボックスガーダであり、内部には10枚前後の隔壁がそう入されている。

主ガーダの長手方向垂直応力(膜応力)、主クラブの巻上げ荷重および主クラブ巻上げ、横行、走行の各動作について、作業時の時間的な変化をいっしょに連続記録した。記録時間は各クレーンについて50~64時間である。記録には計測用テープレコーダ(周波数特性0~120 Hz, 4チャンネル)を使用した。巻上げ荷重およびクレーン各動作の検出には藤芳、赤津氏の考案した装置⁽⁹⁾を使用した。主ガーダの応力は各クレーンについて2点あて記録した。そのうちの1点はスパン中央付近の位置、ほかの1点はガーダ端付近の位置にある。

2.2 実験結果と検討

図2は主ガーダの実働応力、巻上げ荷重などの記録波形の一部を再生して示したものである。この図において(a)、(b)が実働応力であり、(c)が巻上げ荷重である。(d)は横行信号と走行信号とを同時に示したものである。横行信号については、主クラブがクレーンケーシング側に移動した場合が図の上側となり、転炉側に移動した場合が下側となる。走行は走行モーターへの通電の有無で検出した。図において、横行信号に重畳された波で示されている部分(30 Hz, 図では黒くぬりつぶされている)が通電のあった部分である。したがってほぼこの部分が走行動作を行なっている時間であるとみなすことができる。

クレーンガーダが受ける衝撃荷重としては、荷重巻上げ時のものと横、走行レール継目通過時のものとが考えられる。従来は一般に

レール継目通過時の衝撃荷重は比較的小さいが、荷重巻上げ時のものはかなり大きいと考えられていた。しかし図2の(a)~(c)の例にもみられるように、巻上げ荷重波形や応力波形を調べても、これらの衝撃荷重はほとんど検出されず、実際的にも無視してよいことがわかった。巻上げ時の衝撃荷重が小さい理由は、溶鋼が慎重に上げられるためである。

次にクレーンガーダの受ける慣性力としては、横行または走行の開始時と終了時のものが考えられる。しかし図2(a)、(b)の応力波形からも推定できるように、これらの慣性力はほとんど検出されなかった。

さてガーダの疲れ強さを検討するためには、まずその応力ひん度分布を求めるのが普通である。図2に示すような複雑な応力波形から応力ひん度を計数する方法としては種々の方法が提案されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。今回はこれらの方法のうちで物理的意味を比較的有している平均応力経過ピーク応力計数法 mean-crossing peak count method を採用した。

この方法は次のとおりである。たとえば図3のような波形の場合、波形が平均応力 σ_m の線をよぎる点から次によぎる点までの部分(たとえば区間A~Bの部分)を正弦波の1半波に置き換えて考える。この場合、半波の振幅はその区間での最大応力(または最小応力)と平均応力との差に等しいものとする。すなわちこの振幅の正弦波がその区間では1/2回ほどくり返されたものと等価とみなすのである。

連続記録した磁気テープを応力ひん度計(スライスレベル11段)にかけ、上記の方法でひん度を計数した。得られた応力ひん度分布の2例を図4に丸で示す。この図は縦軸に応力振幅を最大応力振幅で無次元化し、横軸に累積ひん度をクレーンの作業回数で無次元化して示したものである。すなわち図4は1作業における平均的な累積ひん度分布であると考えることができよう。ここで1作業とは溶銑または溶鋼の満たされたレール1個あたりの作業をさす。これらのひん度分布は図示の実線ではほぼ近似できるようである。

なお筆者らは以上の連続記録と並行して主ガーダの応力分布を静

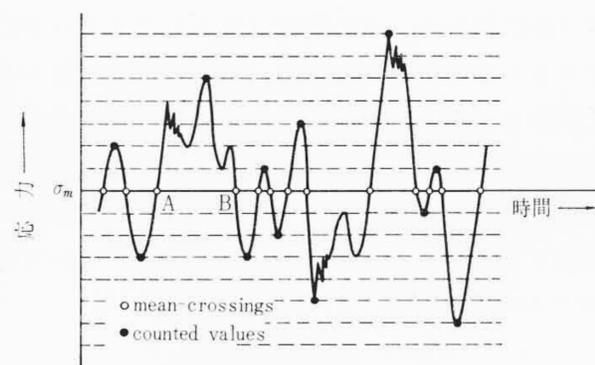


図3 平均応力経過ピーク応力計数法

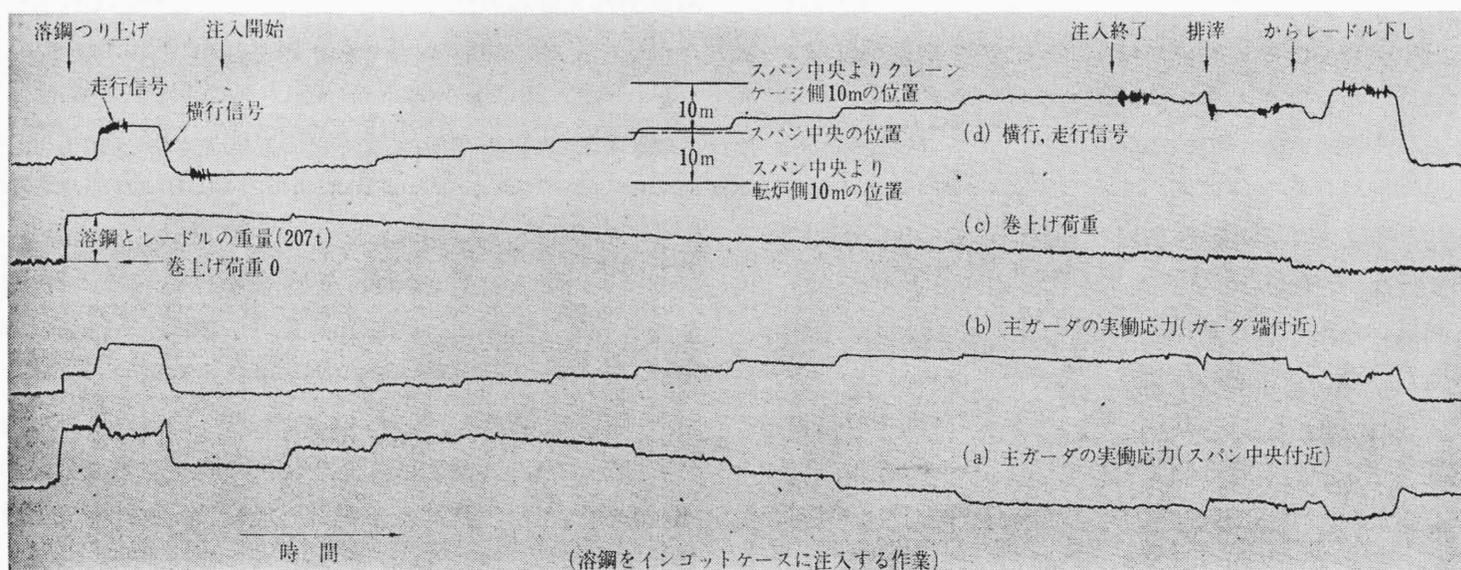


図2 実働応力などの記録波形の一例

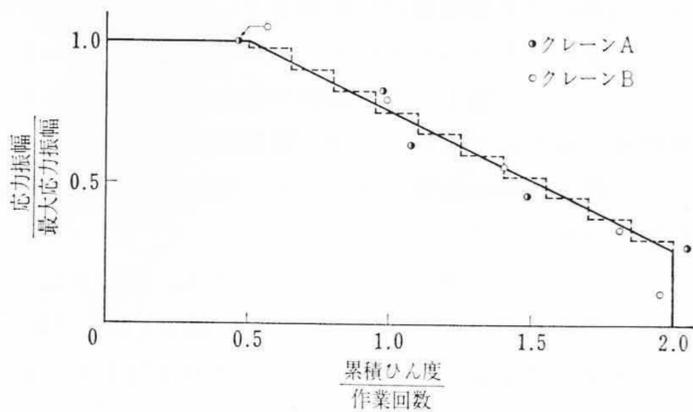


図4 主ガーダの実働応力の累積ひん度分布の例

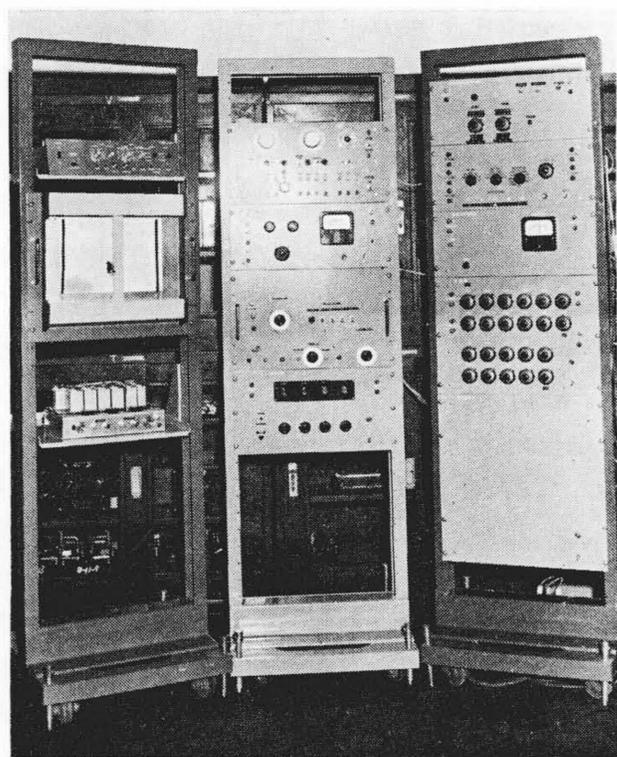


図5 応力波形合成装置

的に測定した。図1に示すように、主クラブからの荷重は主ガーダの内側ウェブ面に加わる。この荷重は主として主ガーダにより負担され両端のサドルまで伝達されるが、荷重の一部はNトラスを通して両端まで伝達される。応力測定の結果から、Nトラスを通して伝達される荷重量は b/a が小さいほどまた L/a が大きいほど大きくなることが判明した(図1, L : ガーダスパン)。また主ガーダ内の隔壁の剛性が主ガーダの応力分布に及ぼす影響についても検討したが⁽¹²⁾、ここでは省略する。

3. 応力波形合成装置の開発

図5は開発した応力波形合成装置の外観を示したものである。1.に述べたように、この装置はプロセスクレーン構造内の応力波形を計算して作り出す装置である。装置にはあらかじめ荷重巻上げ時とレール継目通過時の衝撃値の大きさ、衝撃波形の減衰率、構造寸法などを設定しておくようになっている。クレーンの巻上げ下げ、横行、走行の各動作信号と巻上げ荷重の大きさを表わす信号とを装置に手動で適宜与えることにより、装置はこれらの信号に従った構造計算を電気的に行ない、任意点の応力波形を作り出すことができる。

前述の連続記録から得られた動作と荷重の信号(たとえば図2(c), (d)の信号)をこの装置に与えて応力波形を作り出し、この波形を実測波形(図2(a)または(b)の波形)と比較した。その結果、両者の応力値は $\pm 3\%$ の誤差範囲内で全般的によく一致し、この装置が実用できることがわかった。なおこの場合の動作と荷重の信号は手動ではなく、記録テープから直接与えられた。この装置にはそのような操作を行なう回路もつけ加えてある。

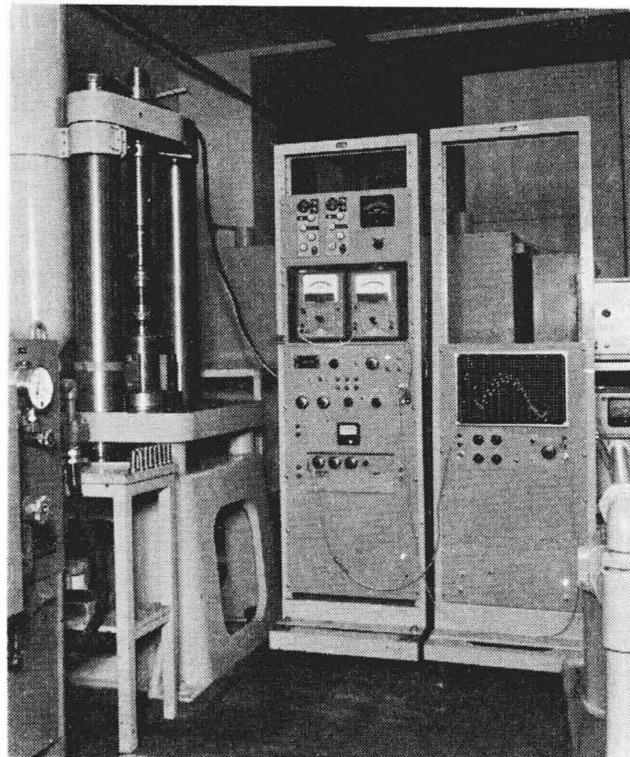
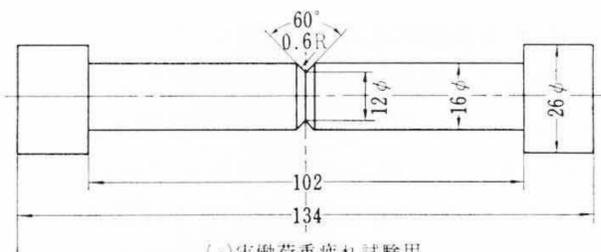
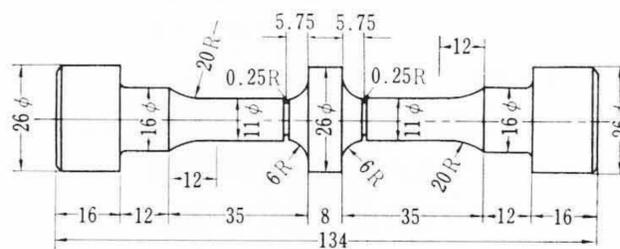


図6 ± 10 t 油圧式実働荷重疲れ試験機(左)と実働荷重関数発生器(右)



(a) 実働荷重疲れ試験用



(b) プログラム疲れ試験用

図7 試験片形状

4. 疲れ試験による実働応力波形の検討

2.に述べたように、筆者らは応力ひん度の計数法として平均応力経過ピーク応力計数法を使用した。したがってまず、この計数法の妥当性を確認するための実働荷重疲れ試験を行なった。次に、図4の応力ひん度分布に従ってプログラム疲れ試験を行ない検討を加えた。以下にその概略を述べる。

4.1 実験方法

試験には日立製作所機械研究所で開発した ± 10 t 油圧式実働荷重疲れ試験機⁽⁷⁾⁽¹³⁾と実働荷重関数発生器⁽¹³⁾またはプログラム信号発生器⁽⁶⁾を使用した(図6)。

ガーダは通常材質 SS 41 または SM 41 の薄板溶接構造物として製作されることが多い。そこで S 30 C 鋼材より溶接継手の止端部を模擬した切欠き試験片を製作し、実験に使用した。図7(a)および(b)は試験片形状を示したものである。(a)および(b)の応力集中係数はそれぞれ3および3.5である。表1は供試材料の化学成分と機械的性質を示したものである。なお試験片は購入のままの素材より加工したが、熱処理は行なわれなかった。

試験はいずれも引張り圧縮の両振りとした。

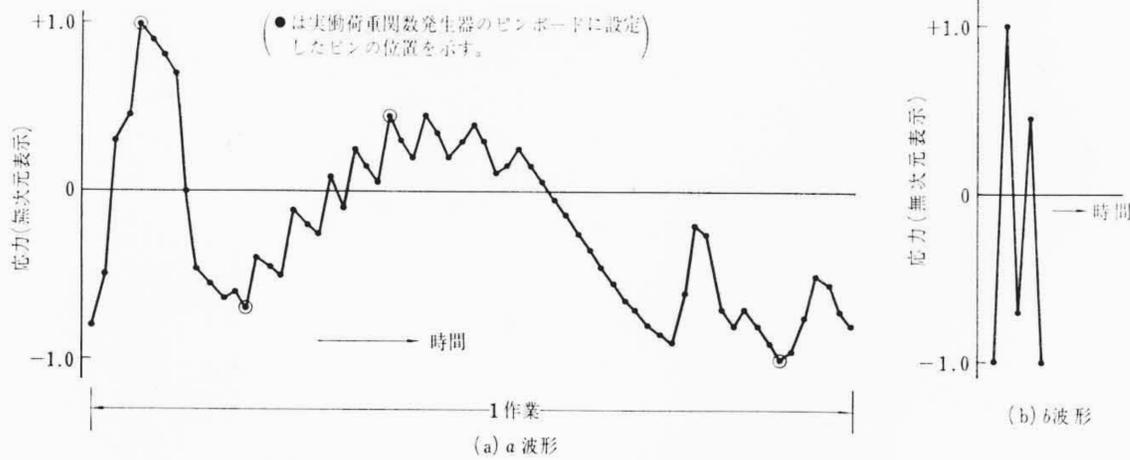


図8 実働応力波形のプログラム

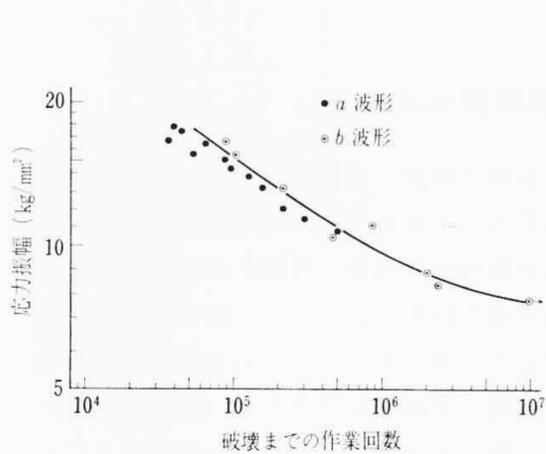


図9 a波形とb波形の疲れ試験結果

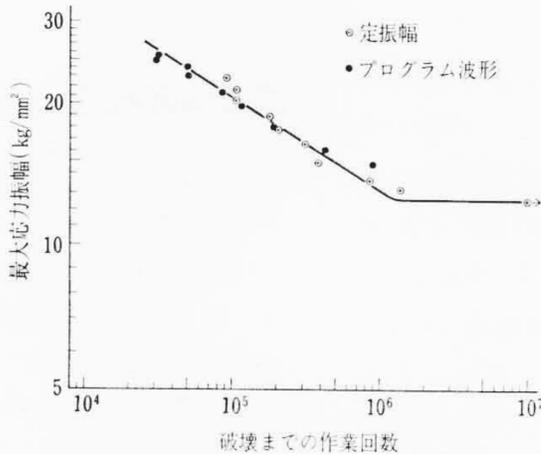


図10 プログラム疲れ試験結果

4.2 実験結果と検討

4.2.1 実働荷重疲れ試験

図8(a)に示すa波形は測定した実働応力波形の中から比較的複雑な部分を選び出し、これを実働荷重関数発生器のピンボード上にプログラムしたものである。この波形の場合平均応力経過ピーク応力計数法では、白丸で示すピーク応力のみを計数し、二次的な応力変動を無視することになる。したがって図8(b)に示すb波形と等価であると仮定することになる。

このa, b両波形を使用し、それぞれ疲れ試験を行なった。図8の各波形をそれぞれ1サイクルとすると、試験速度はa波形が2 Hz, b波形が30 Hzである。

試験結果を図9に示す。縦軸は応力振幅〔(最大応力-最小応力)/2〕であり、横軸は破壊までにくり返される作業回数である。a波形は試験速度が遅いため長寿命の試験点がないが、両試験結果はかなりよく一致しており、a波形のような場合には平均応力経過ピーク応力計数法が妥当なことがわかる。

4.2.2 プログラム疲れ試験

図4に丸で示した応力ひん度分布を階段状に変化するひん度分布(図に破線で示す分布)で近似し、この分布についてプログラム試験を行なった。

図10は試験結果を両振り定振幅疲れ試験結果と比較して示したものである。図において縦軸は最大応力振幅であり、横軸は破壊までにくり返される作業回数(定振幅の場合はそのくり返し数)である。両試験結果はきわめてよく一致している。したがって図4に示されるようなひん度分布の場合には、1作業の実働応力波形は最大応力振幅での正弦波1サイクルと同じ疲れ被害を与えることになる。

なお以上の試験は溶接継手を模擬した標準試験片について行なったものであるが、現在は溶接継手試験片を用い±40 t 疲れ試験機による実働荷重試験を進行中である。

表1 供試材料の化学成分と機械的性質 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.30	0.27	0.45	0.018	0.018
上降伏点 (kg/mm ²)	下降伏点 (kg/mm ²)	引張り強さ (kg/mm ²)	真破断力 (kg/mm ²)	絞り (%)
32.6	29.1	54.3	87	60.3

5. 結 言

おもな結果を要約すれば次のとおりである。

- (1) 主ガーダの受ける衝撃荷重(荷重巻上げ時のものおよび横、走行レール継目通過時のもの)と慣性力は、実測の結果、従来考えられていた値よりもかなり小さかった。
- (2) 応力波形合成装置から作り出した実働応力波形と実測から得られた波形とはよく一致し、この装置が実用できることがわかった。
- (3) 連続記録した主ガーダの実働応力波形から応力ひん度分布を求め、プログラム疲れ試験を行なった結果、図4のひん度分布(2例)の場合には、クレーン1作業あたりの実働応力波形は、最大応力と最小応力がその波形と同じ値を持つ正弦波1サイクルと、同じ疲れ被害を与えることがわかった。

なお、この結果はもちろん図4に示されるようなひん度分布の場合に適用できるものであり、レールクレーンの主ガーダ一般にそのまま適用できるとは限らない。クレーンによって作業経路も異なるであろう。現在は、上記の応力波形合成装置を使用して、種々の作業経路についてガーダ内各点の応力波形を求め、ガーダの疲れ強さを一般的に検討中である。

実働荷重などの測定にあたっては、富士製鉄株式会社名古屋製鉄所ならびに八幡製鉄株式会社堺製鉄所の関係者のかたがたから多大のご援助と懇切なご配慮をいただいた。関係のかたがたに深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 機械学会第180回講習会教材, 1 (昭37-12)
- (2) O. Svenson, W. Schweer: Stahl u. Eisen, 80, 79 (1960-1)
- (3) W. Schweer: Stahl u. Eisen, 84, 138 (1964-1)
- (4) E. Gassner, F. W. Griese, E. Haibach: Archiv für Eisenhüttenwesen, 35, 255 (1964-3)
- (5) DIN 15018 (クレーンをはがね構造計算基準, 1967年)
- (6) 鯉淵, 山根: 機械学会論文集, 31, 1803 (昭40-12)
- (7) 鯉淵, 山根: 機械学会論文集, 34, 261 (昭43-2)
- (8) K. Koibuchi, M. Yamane: Papers of JSME Semi-international Symposium held in Tokyo, Experimental Mechanics, 1, 81 (1967-9)
- (9) 藤芳, 赤津: 機械学会講演論文集, No. 197, 69 (昭43-9)
- (10) W. Barrois, E. L. Ripley: Fatigue of Aircraft Structure—Proceedings of the Symposium held in Paris (1963, Pergamon Press)
- (11) 河本, 鯉淵: 機械学会論文集, 30, 475 (昭39-4)
- (12) 種田, 太田: 機械学会講演論文集, No. 197, 73 (昭43-9)
- (13) 米田, 山根, 鯉淵: 機械学会講演論文集, No. 188, 65 (昭43-4)