

路線の勾配選定に関する研究

桑原 弥 寿 雄*

目 次

要 旨

1. 鉄道の使命と勾配選定の重要性
 - (1) 陸上交通における鉄道の使命とその将来
 - (2) 路線の価値決定に関する諸条件
2. 路線選定上路線の価値比較に関する在来の諸方法
 - (1) 平均抵抗による換算延長の比較法
 - (2) 荷重曲線およびスピードカーブによる方法
3. 線路運転抵抗図の提案
 - (1) 考案の趣旨
 - (2) 理論および仮定
 - (3) 計算と作図
 - (4) 各種動力車の線路運転抵抗図
 - (5) 線路運転抵抗図による換算延長の計算
 - (6) 動力消費量の計算

- (7) けん引定数の査定
- (8) 惰力勾配の選定に関する応用
- (9) 到達時分の簡易算出法
4. 線路運転抵抗図の応用と勾配選定に関する研究
 - (1) 路線選定上、線路運転抵抗図より読取られる種々なる事項
 - (2) 路線勾配選定に関する基本的考察
 - (3) 勾配改良における応用
 - (4) 幹線経路の比較
 - (5) 平均上り勾配の提案
 - (6) 全国幹線勾配改良の具体的研究
5. 結 言
- (付) 参考資料、規程、文献

要 旨 著者は多年路線選定の業務および研究に従事し、国鉄在職中、選定を研究または担当した路線の延長は、わが国の内外を通じて、20 000 km に近く、その後、多少高速自動車道の路線選定にも関係した。本論文はこの経験のもとづき、路線選定の主体をなす勾配の選定について、基礎的理論の抽出ならびに選定技術の体系化を試みたものである。

基礎理論として、まず最初に路線の価値を構成する要素と条件をあげ、ついで路線の価値比較に関する在来の諸方法について論じ、その批判にたつて新たに線路運転抵抗図なるものを提案し、選定技術に対する応用を論じた。勾配選定に関する基礎的な考察は路線の勾配を形成する要素の中から、始終点間の高低差、勾配の長さ、強度および配列、最高点、最低点の高きなどに着目し、經過地の地形に対する適合方法を述べたものである。

また幹線経路の比較、全国主要幹線の勾配改良について研究し、勾配選定の具体的研究例を示した。

なお、以上の路線勾配選定に関する研究は、理論的には、道路、特に高速自動車道の路線選定に応用し得るものである。

1. 鉄道の使命と勾配選定の重要性

(1) 陸上交通における鉄道の使命とその将来

陸上輸送機関として鉄道の特性は、大量の客貨を廉価に、迅速に、かつきわめて安全に運び得ることである。鉄道は、1830 年ごろ、英国における 発祥以来、当時としての高速度性、大能力、運河につぐ廉価の輸送機関としてまたたく間に、欧州より北米から、全世界に拡がり、わが国では明治 5 年の創業以来、急速に発達し、長らく

陸上交通機関の王座を誇って来たが、自動車の出現とその特性たる機動性による急激な発達、さらに近時道路の改良、発達、特に今後高速自動車道の発展の形勢とともに、その将来性が問題にされるようになった。

ここに大量、廉価の輸送機関として考えられるものは、陸上では鉄道および道路上の自動車と、水上の汽船および機帆船、ハシケなどがあり、このほかに索道とベルトコンベヤ(粉体、中小塊体)、パイプライン(流体、粉体、小塊体)などがある。この中パイプラインは今後、天然ガス、石油などの輸送に大量かつ遠距離に用いられると思われるが特殊で局所的なものであるから、本論においてはこれを除く。

これらの輸送機関を比較するのに同一の所要エネルギーで運び得る客貨の重量をくらべる方法があるが、これによると、経済速度で、陸上の良好な砂利道で、自動車により 1 t のものを運搬するに要するエネルギーで、同じ陸上の鉄道では 10 t、水上では 70 t のものが運べるといわれている。すなわち大量、廉価という点では水上輸送が最も優れているが、速さの点ではやや劣る。

陸上では、道路が舗装された最良の状態でも、自動車(乗用車)の固有の車面抵抗はその重量の約 1/100 程度であり、鉄道車両のそれは、往時 1/300 といわれていたが、最近では改良されて約 1/600 程度であつて、両者の間には数倍の差がある。従つて自動車のトン当り設計馬力は、乗用車で 15~30 HP/t、トラックで 10~20 HP/t 程度であるが、鉄道のそれは、旅客列車で 2~3 HP/t、貨物列車で 1~2 HP/t、電車で 6~10 HP/t、ディーゼルカーで 4~6 HP/t 程度と所要馬力が少ない。

しかし運転経費は、設備馬力および使用エネルギーによるだけでなく、輸送の単位によつても変わる。すなわ

* 正員 三井鉱山KK工務部

ち1回の輸送単位が、鉄道の場合はほとんど列車編成であり、個々の車両の単位も、現状では鉄道の方が自動車より大きい。このことは、トン当りの乗務員および運転経費と、営業関係経費を節約する要因である。

輸送の原価は、運転経費のほかに、保守、運営費と資本費などで構成され、さらにこのほかに積卸費および梱包費をふくむ。このうち資本費については、鉄道の複線（路盤の巾約10m）の建設費が平均1km当り2億円程度であるのに対して、4車線上下分離の高速自動車（路盤の巾約25m）の建設費は、平均キロ当り約5億円程度であるが、その輸送能力は、鉄道複線の場合、片方向通過トン数年間約3000万t（貨物の中味にして2000万t程度）であるのに対して、高速自動車道の輸送能力は、最大1日片道20000台とされているから、その半分をトラックとして、自動車もまた理論上は1日50000tすなわち年間1500万t程度まで運べるわけであって、道路の利用効率（軍事輸送などの計画輸送以外は低い）を抜きにすれば、最大能力はほぼ等しいことになるが、路線の建設費は自動車の方が割高である。

鉄道運賃は、現在距離によって異なり、近いところは割高であり、かつこのほかに梱包費と積卸費がかかるので、自動車と鉄道とは距離によってその相互の有利性に限界があるが、道路の改良および自動車の発達（性能および積載単位の増大）によりこの限界距離は延びつつある。

貨物輸送について結論的にいえば、陸上の遠距離、大量、低廉の貨物は永久的に鉄道に残るであろう。自動車の最も発達した国の一つであるアメリカ合衆国においても、陸上貨物の70%程度が鉄道によっているようである。

旅客輸送については、遠距離、高級の旅客は航空機に移り、近距離、中距離の旅客もバスに食われるであろう。しかしながら都市の生産活動に必要な通勤輸送については、路面上のバス、路面電車、将来はモノレールも考えられるが、その中で大量かつ集中的な通勤輸送に対しては、国鉄、私鉄、地下鉄道などの高速鉄道によらなければ解決できない。このことは国鉄電車の通勤輸送の能力が複線で2分ごとに（複々線ならば1分ごとに）1個列車約3000人、1時間当り9万人程度であることを見れば、容易に了解できることである。

なお、わが国の工業化の進展にともない、狭い国土が近郊化し、大量高速の近郊旅客交通が相当発展することも予想される。この例としては、近時の湘南型、こだま型電車、ディーゼル動車の発達が見られ、国鉄の新幹線も東京・名古屋・大阪間の近郊化を計る一種の急行郊外電車の建設であるといえる。

以上を要約すると、島国であるわが国の水上輸送の優位性はさることながら、陸上輸送においては、鉄道万能

の時代は去りつつあるが、将来も決して自動車万能ではなく、鉄道は、遠距離、大量、低廉の貨物輸送と、高速大量の近郊旅客輸送と、超大量の通勤輸送とをその主たる使命として、今後少なくとも100年から200年程度は生き残るものと思われる。

（2）路線の価値決定に関する諸条件

鉄道輸送の特性である大量、廉価、迅速、安全の諸性能を発揮するために、路線の備うべき本質的諸条件を記述すれば次のとおりである。

a) 距離（延長） 距離ないしは路線の延長は、一般に建設費、保守費を支配するとともに、運転費の主体をなす所要エネルギー、および到達時間の一つの主制因をなすものである。しかしてこの距離は、路線の結ぼうとする2点間の直線距離よりは短くならないが、できるだけこれに近いものが望ましい。

b) 到達時間（速度） 到達時間が短い、すなわち速いということの必要なのはいうまでもないが、このためには距離が最短であり、また路線の状況として、勾配ができるだけゆるやかで、曲線も少なくなるべくゆるやかで直線に近いことが必要である。これが高速度で走り得る路線の条件となるが、このほかに列車の加速度、減速度が大であることが必要である。ただし、高速度で走ると、到達時間は短いが、所要エネルギーが大きくなり、一長一短である。

c) 単位重量当りの所要馬力 輸送経費が廉価であるためには、まず運転経費を支配する所要エネルギーが少なく、かつ所要設備馬力が少ないことが必要である。このためには、運転抵抗が少ないことと、勾配、曲線などの線路抵抗量が少ない線路であることが必要である。また、勾配強度（制限勾配）のために、設備馬力を大にすれば、資本の償却費の負担を大ならしめる。

d) 輸送単位 大量の輸送を廉価に行なうには、輸送単位を大きくしなければならない。輸送単位を大きくするには、同一路線上では、機関車けん引の列車運転方式では、強力、大型の機関車を用いて、けん引定数を増すか、動力車両列車運転方式では、設備馬力を増さねばならない。

しかし、列車抵抗は、運転抵抗のほかに、勾配曲線などの路線の状態による線路抵抗を受け、このうち特に勾配強度が、けん引定数、もしくは設備馬力を支配し、輸送単位を支配することになるので、ゆるい勾配の路線であることが必要である。なお大型機関車を用うためには線路の構造強度を大きくする必要があり、これは線路の建設費を増すものである。

要約すれば、輸送単位を増大して、しかも設備馬力および所要エネルギーの小さくすむようにするには、線路抵抗、すなわち勾配のゆるく、かつ曲線の少ない線路の選定をすることが必要なのである。

e) 路線選定における勾配選定の重要性 以上のごとく、鉄道の特性を生かすために必要な路線の価値決定に関する諸条件を満たすための要素は、互いに関連するが、諸条件の要求に対して相反する要素もある。しかしこの中で単位重量当りの設備馬力、所要エネルギー、車両の資本費、輸送単位の増大、到達時間など大部分の条件を満たすために共通なのは線路抵抗すなわち勾配と曲線の少ない路線が必要で、このうち、曲線は主として速度を決定的に制するが、抵抗そのものは少ないから、簡単にいえば、路線の輸送力を主として支配するものは、勾配の量および強度である。

したがって路線選定に当たっては、距離がなるべく最短距離に近く、かつ建設費との兼ね合いで、曲線がなるべく少なくゆるやかで、上り下りの勾配の量も少なく、勾配強度の強くないような路線を選ばねばならないが、このうち特に勾配の選定が重要である。

2. 路線選定上路線の価値比較に関する 従来の諸方法

従来路線選定を行なうにあたり、路線の価値比較を行なう方法として次の二方法が行なわれている。

- (1) 線路換算延長による方法
- (2) 荷重曲線、スピードカーブによる方法

線路換算延長による方法は、列車抵抗による仕事量の大小で線路延長を換算し、線路の価値比較を行なうものである。

一方荷重曲線は勾配別にけん引重量と速度との関係を示したもので、けん引定数の査定に重要なものである。

またスピードカーブは列車の運転状況を速度—距離、時間—距離、燃料消費量—距離などの関係で表わし、運転計画、路線選定の用に供するものである。

(1) 平均抵抗による換算延長の比較法

a) 在来の方法 平均抵抗による換算延長の比較法には時代によって、多少内容を異にする二、三の方法がある。すなわち、国鉄には大 5.2.21 達 112、昭 9.1 に達 112 を建設局計画課がメートル法に改訂したもので、昭 34.6 建設局線増課の発表した線増課資料 22 などである。用いている数値、計算法などには多少の相違があるが基本的な考え方は同じである。

以下これらの方法に共通な考え方を略述しよう。

b) 仮定

① 機関車形式と列車編成の仮定：列車抵抗を計算するためには、車両の種類によって異なる走行抵抗、出発抵抗が異なるので、機関車の形式と編成を定める必要がある。そのため、まず対象とする線区を定め、その線区を走る標準的な機関車およびけん引トン数を定める。両線および簡易線を対象とした達 112 では C 11、C 12 を標準機関車とし、けん引定数は 9 と仮定している。線資 22 では 1.2 級線を対象とし、電化を考慮して C 61、D 51、EF 58、EF 15 の 4 種類の標準機関車を選びけん引定数は客 50、貨 100 と仮定している。

② 定加速度、定減速度、等速運転の仮定：列車が出発してから停車するまでの速度は刻一刻変化しており、これを正確に追跡するためにはスピードカーブ(後述)を用いる必要があるが、算式を簡単に誘導するため、運転区間を加速区間、等速区間、減速区間に分け定加速度、定減速度を仮定する。等速区間では線路の状態にかかわらず一定の標準速度で走行するものとする。

③ 列車抵抗の仮定：列車抵抗は、その原因により次の 5 種類に分けて考える。

- | | |
|-----------|----------|
| (a) 出発抵抗 | (d) 勾配抵抗 |
| (b) 走行抵抗 | (e) 曲線抵抗 |
| (c) 加速度抵抗 | |

この 5 抵抗について国鉄では理論式、実験式を作製し、運転計画、路線選定などの用に供しているが、換算延長を計算する場合も、この標準的な列車抵抗の算式を用いる。すなわちこの 5 抵抗による列車の仕事量を計算し、これを平均抵抗に換算して換算延長キロを算出する。

④ 仕事量計算上の仮定：換算延長を計算するためには列車が発車してから停車するまで行なう仕事量を計算する必要がある。この際に用いられる仮定は次のとおりである。

㉑ 下り勾配によって得られる仕事量を一部無視する。すなわち、均衡勾配 i_e (標準速度の走行抵抗に等しい) 以上の下り勾配区間で得られ仕事量は i_e に相当する走行抵抗の分以外は無視する。

㉒ 惰行によって利用できる仕事量を無視する。すなわち等速運転区間はすべて力行区間であると仮定する。

㉓ 下り勾配中にある曲線抵抗は無視する。これについては、均衡勾配より急な下り勾配中の曲線抵抗を無視する場合もある(線資 22)。

㉔ 勾配抵抗は上下を平均する。

㉕ 制動に要する仕事量は無視する。

㉖ 一般にある線区の駅間平均距離で計算する。

㉗ 標準速度の求め方：以上の諸仮定のほかに、等速区間の標準速度を与えないと仕事量の計算ができない。

標準速度は在来線または類似線の平均速度から計算により求める場合(達 112)とスピードカーブにより直接求める場合(線資 22)と二通りある。

c) 線路換算延長キロの計算 線路の換算延長キロは、各列車抵抗に対する仕事量の総和から平均抵抗を算出し、標準速度の走行抵抗との比から求められる。

すなわち、

$$A = A_s + A_r + A_a + A_g + A_c$$

$$R_m = \frac{A}{L}$$

$$L_e = \frac{R_m}{R_s} L = \varepsilon L$$

ここに A : 列車抵抗による列車トン当り総仕事量 (kg-m)

A_s : 出発抵抗 " (")

A_r : 走行抵抗 " (")

A_a : 加速度抵抗 " (")

A_g : 勾配抵抗 " (")

- A_d : 曲線抵抗による列車トン当り総仕事量 (kg-m)
- R_m : 平均抵抗 (kg/t)
- L : 計算の対象となる駅間距離 (km)
- R_r : 標準速度の走行抵抗 (kg/t)
- ϵ : 換算率
- L_e : 線路換算延長キロ (km)

次にこの計算を蒸気機関車 D51 が貨車 1000 t をけん引する列車を標準にとり、現行諸規程の諸数値により具体化したものが次のとおりである。

$$L_e = \left\{ L - \frac{1}{2} (\Sigma l_d + \Sigma l_u) + \frac{f}{R_r} + \frac{500}{R_r} (\Sigma h_u + \Sigma h_d) + \frac{10.5}{R_r} \left(\Sigma \theta - \frac{1}{2} \Sigma \theta' \right) \right\}$$

$$f = 118 - 0.045 V_0 + 3.91 V_0^2 - 0.00065 V_0^3 - 0.00044 V_0^4$$

$$R_r = 1.63 + 0.0011 V_0 + 0.00075 V_0^2$$

ここに、

- Σl_d : 均衡勾配 i_c より急な下り勾配間の合計延長 (m)
- Σl_u : i_c より急な上り勾配区間の合計延長 (m)
- Σh_d : " 下り勾配区間の合計高さ (m)
- Σh_u : " 上り勾配区間の合計高さ (m)
- $\Sigma \theta$: 曲線の中心角の和 (度)
- $\Sigma \theta'$: i_c より急な勾配区間中の曲線の中心角の和 (度)
- V_0 : 標準速度

標準速度 V_0 は、スピードカーブによって直接求める方法もあるが、一般には当該線区の平均速度から、次の計算によって求める (達 112)。

$$V_0 = 939.1304 \frac{L_m}{V_m} - \sqrt{\left(939.1304 \frac{L_m}{V_m} \right)^2 - 2 \times 939.1304 L_m}$$

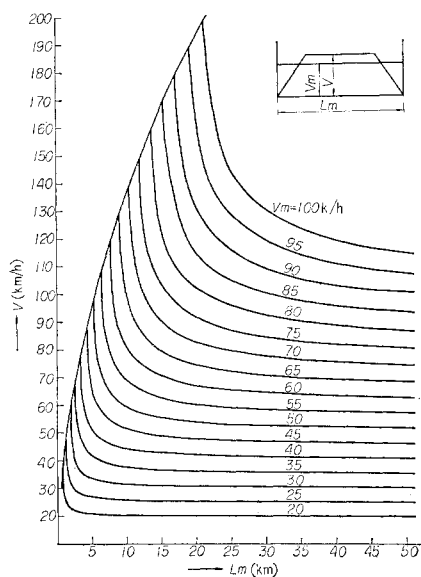
$$L_m \geq 0.00213 V_m^2$$

L_m : 停車場間平均距離 (km)

V_m : 平均速度 (停車時間を除く) (km/h)

この計算は手数を要するので、著者はこれをグラフ化

図一 標準速度 V と駅間距離 L_m の関係 (V_m パラメーター $a=0.4$ $D=0.75$ km/h/sec)



し、使用の便を計った (図一 参照)。

線路換算延長を路線選定に応用するのは幹線経路の比較、勾配改良の諸経路比較などであるが、特に列車抵抗の中で勾配抵抗の占める割合が大きいため、勾配区間は換算延長が長くなり、勾配の選定には必ず考慮に入らすべき手法である。

d) 本方法の問題点と欠点

1) 諸仮定に対する検討：在来の換算延長計算法において前提としている諸仮定には種々の問題点があり、これについて論じ、選定上必要な一面と改良すべき点を明らかにしよう。

① 機関車形式と列車単位の仮定：現行国鉄の建設規程によれば線路の等級は甲線、乙線および丙線の3種類が分れ、さらに甲線の特別なもの (特甲線)、丙線の特別なもの (簡易線) があり、実質上5種類が存在している。また昭和30年12月1日に発表された建設規程の改訂案 (日本国有鉄道構造規程案) では線路区間を主として輸送量および列車速度を考慮して1級線、2級線、3級線および4級線の4等級に区分している。これはそれぞれ、建設規程の特甲線、甲線、乙線、丙線以下の分類に相当する。

達 112 は丙線および簡易線を対象とし、代表機関車として C11, C12 を選び編成は客貨混合の 90 t けん引と想定している。線資 22 では1級線、2級線および3級線までを対象とし、代表機関車には電化を考慮して EF58 (電気旅客)、EF15 (電気貨物)、C61 (蒸気旅客)、D51 (蒸気貨物) を選び、編成は電気、蒸気ともに客車 500 t、貨物 1000 t と想定し、計算式を誘導している。

達 112 は C11 と C12 の各常数を平均して一種類の諸元となし、客貨についても混合して両者の常数が均等に入るよう平均化している。したがって平均抵抗の計算式は一種類だけでその係数も一種だけである。計算の目標は平均抵抗、換算延長の計算に限っている。ここで誘導された公式を現在用いるとすれば、4級線を対象とし諸数値を更新すればよいが、動力近代化の結果、4級線の旅客輸送は気動車が大部分となり、実情に合わなくなった。さらに近代化が進行すれば現在4級線の貨物列車をけん引している C11 はディーゼル機関車に置き換えられ、この計算式は根拠を失うので実情に合わせて更新する必要がある。

当時は機関車型式はほとんど蒸気に限られており、列車抵抗の値が近いことから計算式を1本にまとめることができたと考えられ、線路の良否を判断する尺度としては合理的であった。線資 22 で4種類の機関車を想定したことは、現在改良の対象になっている幹線が電化の途中であり、電気、蒸気が併用されていることに立脚し、計算を正確にすること、目標を平均抵抗、換算延長に

とどめず、動力消費量の算定まで拡張したことが主因と考えられる。

さらに注意すべき点は、達 112 では列車単位を仮定して誘導した公式をそのまま計算に用いるのに対し、線資 22 では機関車型式と列車単位の仮定は公式を誘導する場合に用いるだけで、その公式を実際に応用する場合は、その線区を走る機関車の種別(電気、蒸気、客、貨の4種)列車単位を改めて想定し計算する。この前提には、トン当り列車抵抗は機関車型式の違い、列車単位の違いによってさほど変化がないことが必要である。この誤差は実際 1/10 程度で線路選定上要求される精度としては許容し得る程度である。

しかし現在幹線を走る列車は、電化区間には電車が、非電化区間には気動車、内燃機関車が増加しつつあり、各種列車が混合して走る区間の動力消費量の算定にこの方法をふえんすることは問題である。

総じていえば多種多様な機関車型式、列車単位を、一種または数種類で代表し、概略の数値を計算して選定上の用に供することは本方法の特徴の一つであるが、適用の方法を誤ると、誤差が大きくなるから注意が必要である。

② 定加速度、定減速度、等速運転の仮定：公式誘導に必要な第2の仮定は加速度および減速度を一定と仮定することである。この仮定によって加速区間、減速区間の距離がただちに決まり、定速区間の距離も簡単に計算できる。事実は加速度、減速度共に刻一刻変化しており、線路条件、運転条件によってすべて異なった値となる。

国鉄においては線路選定、列車の運転計画策定などの必要からこれに対して基準を設け標準的な算出法を定めている(資料 運列 277 けん引定数および基準運転時分査定標準 参照)。

定加速度は、出発時から均衡速度に達するまでの加速力を平均して求めたものである。従って低速時には実際より小さく、高速時には大きく働くことになる。このような仮定は精密な速度変化を必要とする場合(次節スピードカーブの項参照)は用いられないが、マクロ的に線路の価値を論ずる選定理論上では必要かつ便利な仮定である。従ってその数値は現実によく用いられている値に近くえらぶことが肝要である。

等速運転の仮定が必要なゆえんは計算を簡単にすることにある。走行抵抗の計算や下り勾配の均衡勾配を決定するのに途中で速度が変化しては計算がいたずらに複雑になり、大数の把握を目的とする本法の趣旨に反する。

このため一定速度としてとる標準速度は、その線区の代表的な速度をとる必要がある。

③ 列車抵抗の仮定：動力車が引張力を発揮して後続車両を引いて走ろうとすると、後続車両ならびに動力車自身にも引張力に抗する力が発生する。すなわち車輪と

レール間の摩擦抵抗、車軸と軸受間の摩擦抵抗、速度を増加させるための抵抗、空気による抵抗、勾配線を上るための抵抗、曲線を通過するための抵抗などがあって、列車の進行を阻止しようとしている。これらの抵抗を総称して列車抵抗(Train Resistance)と称している。引張力を作用とすれば、列車抵抗は反作用である。

列車抵抗は非常に多くの因子が関係し、きわめて複雑であって、その実態をつかむことは困難である。例えば線路状態が列車抵抗におよぼす影響を考えると、勾配の大小、曲線の緩急、レールの大きさ、継目の数、まくら木丁数、締結方式、道床厚、保守状態の良否などが関係する。また車両についていえば、その構造、重量、保守状態、潤滑油の種類、気温による油の粘度の変化など多くの因子が関係する。

列車抵抗はこのようにきわめて複雑なものであるが、国鉄では次の5種に分類しており、これらの抵抗を組合わせて全列車抵抗を求めている。

- ㊸ 出発抵抗 ㊸ 勾配抵抗
- ㊹ 走行抵抗 ㊹ 曲線抵抗
- ㊺ 加速度抵抗

以上5種類の列車抵抗中、出発、走行、曲線の3抵抗は常に正であり、損失となるが、勾配、加速度の2抵抗はその全部が損失になることはない。上り勾配は列車に位置のエネルギーを与え、後に勾配を下る際にそのエネルギーを利用して惰行で下り得る。加速度抵抗は列車に運動エネルギーを与え、後にそのエネルギーを利用して惰行で走ることができ、主としてブレーキで失われたエネルギーだけが損失となる。

国鉄では以上のような諸点を考慮して試験により列車抵抗の数値を定め、運転計画上の基礎資料としている。換算延長の計算も、列車抵抗の値はこの規程で定められた値を用いる。

④ 仕事量計算上の仮定について：仕事量計算上特に問題になる仮定の一つは下り勾配によって得られる仕事量を一部無視することである。すなわち均衡勾配 i_c (標準速度に対する走行抵抗に等しい) 以上の下り勾配区間で得られる惰力は i_c に相当する走行抵抗の分以外すべて無視している。

$$A_g = A_a + A_d$$

$$= A_a - \sum_n i_c \cdot l_d$$

下り勾配のエネルギーは速度制限の規程によりすべて利用することはできないが、制限速度以下では惰力運転のために有効に使われる場合が多い。そのためこの仮定は A_g を大きく見積りすぎる結果となる。

これを修正するには次のように行なう。

$$A_g' = A_g - \Delta A_d$$

$$= A_a + A_d - \Delta A_d$$

$$= A_a - \sum_n i_c \cdot l_d - \sum_n \frac{1}{2} m (V^2 - V_0^2)$$

ここに、

- A_g : 勾配抵抗による仕事量
- A_g' : 修正された "
- A_u : 上り勾配による仕事量
- A_d : 下り勾配に "
- ΔA_d : 修正項 (下り勾配によって得られる運動エネルギー中利用しうる部分)
- i_c : 均衡勾配
- l_c : 均衡勾配以上の下り勾配の長さ
- V_0 : 勾配頂点における速度
- V : 下り勾配の下端における速度
- V_0, V はスピード カーブにより求めることができる。

問題となるもう一つの仮定は惰行によって利用できる運動エネルギーを無視していることである。すなわち走行抵抗による仕事量はブレーキ区間をのぞいた全区間について計算しているが、標準速度で走行する区間は、実際には力行区間と惰行区間に分けられる。したがってブレーキをかけるまで力行を続けるものと考えこの仮定は仕事量を過大に見積ることになる。

これを修正する場合は次のように行なう。

$$\begin{aligned} A_0 &= A_s + A_r + A_d \\ A_0' &= A_0 - \Delta A_d \\ &= A_0 - \sum \frac{r_0' l'}{n} \end{aligned}$$

ここに、

- A_0 : 出発抵抗, 走行抵抗, 加速度抵抗による仕事量の合計
- A_0' : 修正された A_0
- ΔA_d : 修正項 (惰行区間の走行抵抗による仕事量)
- r_0' : 惰行区間の平均走行抵抗
- l' : 惰行区間の距離
- r_0', l' はスピード カーブより求められる。

これらの仮定のために計算された動力消費量 (仕事量) の値は実績より多少大きくなる。より正確な結果を欲する時は上記の修正を施せばよい。

このほか下り勾配における曲線抵抗を無視すること、制動に要する仕事量を無視することは、いずれも影響が小さく、問題とするにおよばない。

仕事量計算上の仮定で注意すべき点を要約すると、この仮定はモーメンタム エネルギーを無視しており、計算値は実績値より大きくなることである。

2) 在来の換算延長計算法の欠点: 路線選定上から見た在来法の欠点を次にのべよう。

① 標準速度の決定法: 列車抵抗の計算ひいては仕事量の計算には標準速度 V が与えられなければならない。標準速度は平均速度から計算によって求めるが、平均速度の決め方としては次のような考え方がある。

- ㉔ 在来線はその線の平均速度をとる。
- ㉕ 新線の場合は類似線区の平均速度をとる。
- ㉖ 平均速度は、全列車を平均する場合、該当列車の平均を行なう場合、急行を除いて平均する場合などがある。
- ㉗ また標準速度をスピードカーブにより直接求める場合もある。

これらの方法は、平均速度の計算、スピードカーブをひく作業などに多大の労力を要し、繁雑であるのみならず、適用を誤ると理論上の問題が生ずる。

すなわち、勾配線区と平坦線区の2ルートを比較する場合を考えると、平坦線を高速で勾配線を低速で走ることとして計算すれば、平坦線の方が仕事量が大きくなる可能性がある。換算延長をとってもこの傾向は変わらず、速度が高い場合は平坦線が不利になる場合がありうる。エネルギー換算によって、線路の良否を判断する場合にこのような現象が生じては矛盾である。ゆえに換算延長を比較する場合は両ルートとも同一の標準速度を適用すべきである (動力消費量や所要時分の査定を行なう時はその線の条件に応じた速度をとってよい)。

この線路換算延長計算に使用する標準速度については、著者は、当該線区の線路等級あるいは種別の、標準けん引定数に対する標準的な制限勾配の場合の均衡速度を使用するのが適当であると考えられる。

② 上下方向を平均していること: 在来の換算延長計算方法では、上下方向が平均された値が得られるが、選定上はこれを上下別に分離した値が欲しい場合がしばしばある (例えば上下分離運転の場合)。

この点、選 112 では平均値しか計算できないが、線資 22 では上下別々に計算できるよう算式を導いてある。

③ 勾配強度が不分明であること: 勾配による仕事量は、線資 22 を例にとると上下方向を平均して次のように書ける。

$$\begin{aligned} A_g &= 500(\sum h_u + \sum h_d) \\ &\quad - (a + bV_0 + cV_0^3) \frac{\sum l_d + \sum l_u}{2} \end{aligned}$$

上り勾配に要する仕事量は高低差のみに関係し、勾配強度にはよらないが、下り勾配にかかる時、走行抵抗に相当するエネルギーは利用できる勾配強度がゆるいほど A_g は小さくなる。すなわち同一の h_u, h_d に対し l_d, l_u が大きいほど (勾配強度が小さいほど) 上式の右の項が大きくなり、 A_g は小さくなる。このように本法は勾配強度の影響が計算の中に間接的に現われるのみで直観的に表面に現われない。

④ 計算の手数を要すること: 計算に要する労力は勾配、曲線などを勾配表、曲線表、または線路平面図、縦断面図などから拾う手数が最大である。

これに関する手数はいずれの方法も同じであるが、作業に最も差をおよぼすのは標準速度の与え方であり、仕事量の計算がこれにつぐ。

(2) 荷重曲線およびスピードカーブによる方法

本節においては現在、国鉄で運転計画、路線選定などに使用している荷重曲線、スピードカーブなどの方法について略述し路線選定上のその得失を明らかにする。

a) 荷重曲線 けん引定数と、それに対する制限勾配と均衡速度の査定は、路線選定上最も重要な問題の一つである。けん引定数は列車の種類および運転速度、動力車の性能、運転線区の状態、けん引車両の種類によって

決定されるもので時代とともに変化して来た。一般にけん引定数は旅客列車のように到達時分の短縮が目的となるものについては、あまり大きくせずに速度の向上をはかり、輸送力を主とする貨物列車では、列車単位を大きくして経済的に運転するため、なるべくけん引定数を大きくするのが普通である。

このけん引定数と速度、勾配の関係を図に表わしたものが荷重曲線であり、けん引定数と制限勾配、および速度を査定する重要な基礎手法となっている。

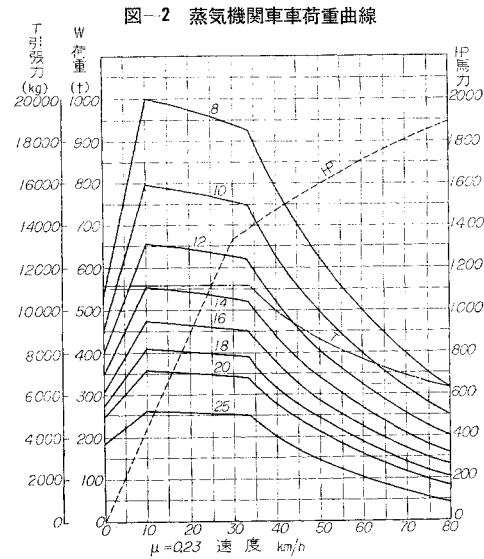
動力車が引いて走ることのできる客貨車の重量は引張力と列車抵抗との関係から次のようにして求められる。

$$W = \frac{T_d - R_e - R_{eg} - R_{ec}}{r + r_g + r_c}$$

W: けん引重量 (t) R_{ec}: 機関車曲線抵抗 (kg)
 T_d: 動輪周引張力 (kg) r: 客貨車走行抵抗 (kg/t)
 R_e: 機関車走行抵抗 (kg) r_g: 勾配抵抗 (%、kg/t)
 R_{eg}: 機関車勾配抵抗 (kg) r_c: 曲線抵抗 (kg/t)

この式により各機関車形式ごとに勾配別速度別にけん引重量を計算することができ、縦軸にけん引重量、横軸に速度をとり、勾配をパラメータ (単位 %) にえらび、けん引重量と均衡速度との関係を図示すれば荷重曲線が得られる。

その一例を示したものが図-2である。



機関車のけん引定数を支配する要素のうち、最も大きな影響を与えるものは、線路の勾配である。ある運転区間の上り勾配中、最大の引張力を発揮して上る勾配、すなわちその区間のけん引定数を支配する勾配を、制限勾配と称している。制限勾配は必ずしもその区間の最急勾配とは限らない。最急勾配でも長さが短かければ麓の速度を利用してモーメントで容易にその勾配が上り切れるからである。また同一区間であっても通過列車と停車列車とでは制限勾配が異なる場合がある。速度の相違がその原因であるが、同じ理由で旅客列車と貨物列車とで

も制限勾配が異なる場合がありうる。

制限勾配が比較的長く、その勾配を均衡速度をもって上らねばならないような場合には、速度を低くするほど定数を大きくすることができる。一方あまり低速にすると動輪空転するおそれもあり、輸送の迅速さという使命にも反するので、計画上の最低速度を 18 km/h 以上に押さえている。

制限勾配がある程度短かく、麓の速度を利用して上り切ってしまう場合のけん引定数は、均衡速度による場合よりも大きくすることができる。このような場合には速度が均衡せずに低下する一方であるから、運転計画上の勾配頂上における最低速度は、列車長なども考慮し、ある程度の安全さを見て、23 km/h 以上と決めている。けん引定数は、荷重曲線によって、大体の値を知ることができるが、これはあくまで一つの基準を示す計算値である。実際に定数を査定するには次のような事項も考慮して定める必要がある。

- ① 一般事項:
 - Ⓐ 列車の使命
 - Ⓑ 線路の状態
 - Ⓒ 線路および乗降場有効長
 - Ⓓ 機関車状態およびけん引試験
 - Ⓔ 使用燃料、変電所容量
- ② 気象条件
- ③ ブレーキ力
- ④ 経済運転
- ⑤ その他必要事項

② 勾配上の引出し条件: 勾配上に停車した場合は引出し得ることを原則とするが、特に必要があり、かつ安全と認められた時は引出し得ないけん引定数としても差し支えない。

③ 電気車モーターの温度上昇限度:

なお、けん引定数、制限勾配の査定には多少の弾力を持たすことが望ましい。

b) スピードカーブおよびその他の運転線図 列車の運転状況、すなわち速度、運転時分、走行距離、動力消費量などの相互関係を示す曲線を、一般に運転線図または運転曲線と称する。けん引定数、制限勾配が定まると次に各停車場間の各地点における列車速度を予知できれば、路線選定上非常に便利である。

すなわち、各地点の速度から惰力勾配の査定、曲線の配置、運転時分、動力消費量などを知り得れば、列車ダイヤの予定、運転費の算出、行違設備、給炭、給水設備などの要否を決定することができる。列車の運転状況を把握するには、現在次にのべるように、速度距離曲線 (スピードカーブ)、時間距離曲線、動力消費量曲線が用いられている。

① 速度距離曲線と時間距離曲線: 機関車の出力から列車の走行抵抗を引いたものを加速力といい、次式で与えられる。

$$f = \frac{T_d - (R_e + r \cdot W)}{W_e + W}$$

ここに、

f: 加速力または勾配 (kg/t, %) R_e: 動力車走行抵抗 (kg)
 T_d: 有効動輪周引張力 (kg) r: 客貨車走行抵抗 (kg/t)
 W: 客貨車総重量 (t) W_e: 動力車総重量 (t)

速度と距離の関係は加速力を媒介に次の式で計算する。

$$S = \frac{4.17(V_1^2 - V_2^2)}{f_m} \dots\dots\dots \text{一般列車}$$

$$S = \frac{4.3(V_1^2 - V_2^2)}{f_m} \dots\dots\dots \text{電車}$$

ここに、

S: 速度が V_1 から V_2 に加速するに要する距離 (m)

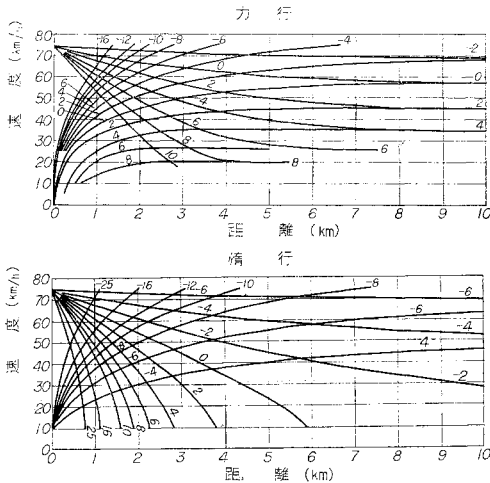
V_1 : 加速前の速度 (km/h)

V_2 : 加速後の速度 ()

f_m : V_1 から V_2 に速度が変化する間の平均加速力 (kg/t)

f_m としては実用上速度変化 5 km/h ほどの値を用いてよい。
 このようにして求めた速度-距離関係を順次加えて勾配別速度距離曲線を画く。これは力行、惰行別に作製する。一例として、D51 形の勾配別速度距離曲線を 図-3 に示す。

図-3 勾配別速度距離曲線
 D 51 (単機) 貨車 1200 t けん引



次に減速度は列車種別ごとに決められているので、あらかじめブレーキ初速度-ブレーキ距離関係を次式で計算し、図化しておけばよい。

$$S = \frac{V \cdot t}{7.2}$$

ここに、

S: ブレーキ距離 (m) V: ブレーキ初速度 (km/h)

t: ブレーキ時間 (sec) D: 減速度 (km/h/sec)

時間-距離曲線は、まず次の関係から時間-速度関係を求め、速度-距離関係とあわせて、作図することができる。

$$T = \frac{0.5(V_2 - V_1)}{f_m} \dots\dots\dots \text{一般列車}$$

$$T = \frac{0.52(V_2 - V_1)}{f_m} \dots\dots\dots \text{電車}$$

ここに、T: V_1 から V_2 まで加速または減速するに要する時間 (min)

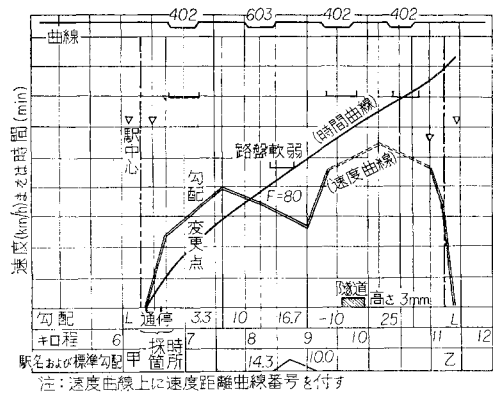
これにより勾配別時間-距離曲線が画ける。

速度-距離曲線 (いわゆるスピードカーブ) は線路勾配に応じて、各部分ごとに順次勾配別速度距離曲線を写しとってゆけばよい。

ブレーキ点および惰行点は停止位置から逆引きして見出すと便利である。時間曲線はこのスピードカーブをもとにし、それを適当に分割し、その間の平均速度を読み、時間定規によって順次画いて行けばよい。

この一例を 図-4 に示す。

図-4 スピードカーブの例



路線選定上スピードカーブと称するのは、このようにして画かれた速度距離曲線、時間距離曲線を総称することが多く、運転計画に重用されている。結果が非常に正確であり、個々の線路条件をよくもり込めるからである。

② 動力消費量曲線: 路線選定上、ある線区の動力消費量を知ることは、その線区の所要経費を推定し、工事費と見合わせて、経路比較を行なう場合の重要な問題である。多少工費を要しても、動力消費量その他の諸経費の少ない線区を作れば、長期間をおいてみた時経済的になり線路の使命達成に役立つことが多い。

動力消費量は、列車の運転経費の主体をなすもので、その計画数値の算出法は種々あるが、動力消費量曲線を用いるのが最も正確である。動力消費量曲線は運転線図にもなって動力消費量距離曲線の形で書かれることが多い。

c) 路線選定上本法の欠点 荷重曲線、スピードカーブに代表される運転線図は、列車の運転状態を正確に把握するのに欠くことのできないものである。路線選定に対する本法の応用は、昭和 10 年頃からストラール氏の方法を中心に行なわれ始め、その後次第に改良を重ねて現在にいたっている。

路線選定上本方法は、精度の高い資料を与えられることは大きな特徴であるが、あまりに分化し、精細化して、直観的、総合的判断を必要とする選定技術の面からはむしろ繁雑の感をまぬがれない。

しかも線路条件を与えてから結果としての速度距離関係、時間距離関係を得るのに多くの手数を要し、動力消費量曲線にいたってはもはや一般技術者の手元に資料もおかれていない。

路線選定においては、途中各部分の線路条件と運転条件との関連性の把握が重要であるが、スピードカーブをはじめとする運転線図は、最後の結果に片寄り、各部分の条件との関連が不分明になるきらいがある。また、路線選定は高級技術者がみずから行なう必要があるが、スピードカーブは機械的な作業なので一般に中級以下の技術者が行なうので、内容になじみがうすくなる欠点もある。

最近は運転線図の描画に電子計算機を用いる方法も開発され、容易に結果を得ることができるようになって来たが、すべての現場に電子計算機をおくことは不可能であり、このように細分化、専門化する反面に総合的判断を行なう手法の開拓が必要になって来た。

著者はこのような考えに立脚して、次の線路運転抵抗図を提案するものである。

3. 線路運転抵抗図の提案

(1) 考案の趣旨

本節では路線選定に用いられる在来の手法を改良し、その特徴をさらに発展させた線路運転抵抗図を提案し、その応用方法について論ずる。

線路運転抵抗図は、標準列車の水平直線の線路上の定加減速度、標準定速度による速度距離曲線をパラメータとし、横軸に距離を取り荷重トン当りの列車抵抗—距離曲線、同じく動輪周引張力—距離曲線を—図にまとめたものである。

線路運転抵抗図の用途は次のとおりである。

- (1) 線路換算延長キロの算出
- (2) 動力消費量の計算
- (3) けん引定数、制限勾配の査定
- (4) 惰力勾配の選定
- (5) 到達時分の簡易算出
- (6) その他路線選定上必要な事項

すなわち、本図はこれらの問題を総合的に把握し、路線選定上、路線の価値比較を行なう新しい手法である。

考案の趣旨は次の諸点にある。

a) 線路抵抗と運転抵抗 列車抵抗は出発、走行、加速度、勾配および曲線抵抗の5種類に分類されているが著者はこれを線路条件に起因するものと、車両や運転方法に起因するものとに大別し、運行方法のいかんにかかわらず勾配抵抗と曲線抵抗を線路抵抗とし、出発、走行および加速の3抵抗を運転抵抗と称することを提案する。

走行抵抗は車両、運転条件だけでなく軌道の良否にも左右されるが、路線選定上問題になるのは勾配、曲線などの線形であって、軌道構造の条件は標準的な状態であると考えられる。

運転抵抗は車両構造や運転方式によって変化するが、線路抵抗は線路に対して固有であり、このように分類すると線路条件と運転条件の関係を研究するのに便利である。

b) 引張力—距離曲線と列車抵抗—距離曲線 従来用いられて来た荷重曲線や、運転線図の類は引張力—距離関係および列車抵抗—距離関係を読み取ることはできない。

距離を横軸にとった既存の速度距離曲線、速度時間曲線に加うるに、上記の関係が定式化されれば、路線選定上に多くの利得を生ずる。路線選定は地形図、縦断面図

上において路線の延長すなわち距離を基準にして判断する場合が多く、在来の諸方法では、この点で意に満たない場合がある。

c) 線路運転抵抗図の特徴 選定技術上、本法の特徴は次の諸点にある。

① 直観性：線路運転抵抗図は、所要の関係がすべて図式化され、ただちに必要な関係、数値を読みとることができ、直接視覚に訴えるため、判断を誤るおそれが少ない。

② 総合性：線路運転抵抗図は、線路の価値比較に用いる引張力、加速度、速度、運転抵抗、距離などの諸変量ならびにその関数関係を—図にまとめて表現してある。選定上これらの関係を求める場合が生じた時は在来のように多種類の図表類を用いる必要がない。

③ 条件・結果の関連性把握：路線選定は線路条件が運転状況におよぼす影響を考慮しながら勾配、曲線、停車場位置などを種々変えて研究することが多い。この点在来の手法は多くの手数を要することや正確ではあるが結果にかたより、最初の線路条件が不分明になるなど意に満たぬ点があったが、概略の数値を即時に必要とする選定作業では線路条件、運転条件およびその関係がすべて表現されており、関連性の把握に好都合である。

(2) 理論および仮定

a) 理論 列車を力学的質点とみなすと、その運動方程式は次のようになる。

$$M \frac{dV}{dt} = T(V) - R_s(V) - R_r(V) \pm R_g(s) - R_c(s) - T_b(s)$$

$$\frac{ds}{dt} = V$$

ここに M : 列車質量 $R_s(V)$: 出発抵抗
 V : 列車速度 $R_r(V)$: 走行抵抗
 t : 時間 $R_g(s)$: 勾配抵抗
 S : 距離 $R_c(s)$: 曲線抵抗
 $T(V)$: 引張力 $T_b(s)$: 制動力

列車を力学的質点とみなして運動を論じてよいことは従来の経験から認められている。

次に加速度、減速度および標準速度を一定と仮定し、初期条件を与えれば、

$$\frac{dV}{dt} = \alpha \quad (0 < S < S_1) \quad \dots \dots \text{加速区間}$$

$$\frac{dS}{dt} = V_0 \quad (S_1 < S < S_2) \quad \dots \dots \text{等速区間}$$

$$\frac{dV}{dt} = \beta \quad (S_2 < S < L) \quad \dots \dots \text{減速区間}$$

から $V = F(s)$

と書くことができ、速度は距離の関数となる。これを用いて運動方程式をトン当りの値で書き直すと次のようになる。

$$k \frac{dV}{dt} = t(s) - r_s(s) - r_r(s) \pm r_g(s) - r_c(s) - t_b(s)$$

この関係を図上に表わしたものが、線路運転抵抗図なのである。

b) 仮定 線路運転抵抗図を画くに当たって必要な仮定は次のとおりである。

- ① 列車の標準編成を仮定する：各機関車、客貨の別

表-1 図表作成総括表

型 式	編 成	定加速度 (km/h ²)	定減速度 (km/h ²)	運 転 抵 抗			動 輪 周 引 張 力	抵 抗 図	仕 事 量	平 均 抵 抗	換 算 延 長	惰 力 勾 配	燃 費 曲 線	時 間 曲 線	備 考	
				出 発 抵 抗	走 行 抵 抗	加 速 度 抵 抗 (kg/t)										
SL	C 62	客 500 t	0.4	1.75	○	○	12.0	○	○	◎	○	○	○	○	○	
	C 57	客 300	0.4	1.75	○	○	12.0	○	○	—	—	—	—	—	—	
	C 11	客 100	0.4	0.75	○	○	12.0	○	○	◎	—	—	—	—	◎	
	〃	客 200	0.4	0.75	○	○	12.0	○	○	—	—	—	—	—	—	
	D 51	客 100	0.3	0.75	○	○	9.0	○	○	◎	—	○	○	○	◎	
							EL 総括	○	—	—	—	○	—	—		
EL	EF 58	客 500	0.5	1.75	○	○	15.0	○	○	◎	—	○	○	○	◎	
	EF 15	客 1000	0.4	0.75	○	○	12.0	○	○	◎	—	○	○	○	◎	
	EH 10	客 1200	0.4	0.75	○	○	12.0	○	○	—	—	—	—	—	—	
	ED 71	客 1000	0.4	0.75	○	○	12.0	—	○	◎	—	—	○	○	◎	
	〃	客 500	0.5	1.75	○	○	15.0	—	○	◎	—	—	○	○	◎	
							EL, DL 総括	○	—	—	—	—	—	—		
EC	モハ 70	6M6T	—	2.50	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	モハ 72	5M3T	1.4	2.50	○	○	42.0	○	○	◎	—	—	○	○	◎	山手, 京浜, 東北 湘 南 中 央 こ だ ま 新 湘 南 (東 海)
	モハ 80	4M6T	0.8	2.50	○	○	24.0	○	○	—	—	—	○	○	◎	
	モハ 101	6M4T	3.1	2.50	○	○	93.0	○	○	◎	—	—	—	—	—	
	モハ 151	6M6T	2.4	2.50	○	○	72.0	○	○	—	—	—	—	—	—	
	モハ 153	6M4T	2.1	2.50	○	○	63.0	○	○	◎	—	—	○	○	◎	
							電車総括	○	—	—	—	—	—	—		
DL	DF 50	客 300	0.4	1.75	○	○	12.0	○	○	◎	—	—	○	○	—	
	〃	客 500	0.3	0.75	○	○	9.0	○	○	◎	—	—	○	○	—	
	DD 50	客 200	0.4	1.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	〃	客 500	0.3	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
DC	キハ 17	5 両	0.8	2.00	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	キハ 20	〃	0.8	2.00	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	キハ 26	〃	0.8	2.00	○	○	24.0	○	○	◎	—	—	○	○	◎	
	キハ 55	〃	1.5	2.00	○	○	45.0	○	○	◎	—	—	○	○	◎	
	キハ26~55	26×2, 55×4	1.1	2.00	○	○	53.0	○	○	—	—	—	—	—	—	はつかり
							気動車総括	○	—	—	—	—	—	—		

にそれぞれ常用されている列車単位に最も近いけん引定数を仮定する。電車，気動車の場合は，動力車とけん引車との編成を明らかにする。

今回は蒸気機関車，電気機関車，ディーゼル機関車から客貨の別に代表的機関車をえらび電車，気動車についても代表的なものを数例取り上げた。今回取り上げた機関車と，その編成および作成図表の一覧表は，表-1のとおりである。

② 定加速度，定減速度，等速運転の仮定：列車は標準速度に達するまで同一加速度で運転し，停止する場合は同一減速度で停止するものとする。定加速度は仮定した標準編成に対する加速度曲線から求め，減速度は現行国鉄の規程によった。

また列車は途中の線路状態にかかわらず，加減速区間を除いて一定の標準速度で走行するものとする。

③ 引張力，列車抵抗の算式および諸係数：これらはすべて現行国鉄の規程による。

(3) 計算と作図

線路運転抵抗図の諸曲線の値を計算する順序は次のとおりである。

- (1) 動輪周引張力の計算
- (2) 列車抵抗の計算
- (3) 加速度曲線の計算および定加速度の計算

(4) 定減速度と減速力の決定

(5) 速度距離曲線の計算

今蒸気機関車 C 62 が客車 500 t をけん引した場合を例にとり，以下この計算の概略と作図の順序を述べる。ほかの動力形式の場合もほぼ同様である。

a) 動輪周引張力の計算 ボイラー引張力，シリンダー引張力および粘着引張力の3種について算出し，各速度における最小値を採って，有効動輪周引張力とする。

① ボイラー引張力：

$$T_b = PKY\eta$$

T_b ：ボイラー引張力 (kg) P ：ボイラー使用圧 (kg/cm²)

$Y\eta$ ：任意速度の [平均有効圧/ボイラ圧] × 機械効率

K ：シリンダー常数

② シリンダー引張力：

$$T_s = PKy\eta$$

T_s ：シリンダー引張力 (kg)

$y\eta$ ：最大縮切時の [平均有効圧/ボイラ圧] × 機械効率

③ 粘着引張力：

$$T_a = 1000 \mu W_d$$

T_a ：粘着引張力

V ：運転速度 (km/h)

μ ：粘着係数

W_d ：動輪上重量 (t)

$$= 0.251 - 0.0008 V$$

④ トン当り動輪周引張力：線路運転抵抗図ではトン当りの値になおして用いる。

$$t_d = \frac{T_d}{W_t + W}$$

t_d : 列車のトン当たり動輪周引張力 (kg/t) W : 客車重量
 W_l : 機関車重量

上式は単機の場合であるが、重連の場合を t_d' 、三重連の場合を t_d'' とすれば、

$$t_d' = \frac{2 T_d}{2 W_l + W} = \frac{T_d}{W_l + 1/2 W}$$

$$t_d'' = \frac{3 T_d}{3 W_l + W} = \frac{T_d}{W_l + 1/3 W}$$

b) 列車抵抗の計算

① 出発抵抗: 出発抵抗は次の値とする。ただし、速度の向上とともに直線的に減少し、10 km/h から走行抵抗に移行するものとする。

蒸気機関車 8 kg/t 客車 3 kg/t

② 走行抵抗: 走行抵抗は次の各算式による。

蒸気機関車

力行 $R_l = (2.0 + 0.012 V) W_l + 0.057 V^2$

惰行 $R_i = \{1.44 + 0.204(V/D)\} W_l + 0.057 V^2$

客車 $r_p = 1.24 + 0.0069 V + 0.000313 V^2$

式中 r_p は客車走行抵抗 (kg/t)

③ 加速度抵抗: 加速度と加速度抵抗との関係式

$$r_{ac} = 30 A$$

r_{ac} : 加速度抵抗 (kg/t) A : 加速度 (km/h/sec)

④ 勾配抵抗: 勾配抵抗は次式による。

$$r_g = \pm i$$

r_g : 勾配抵抗 (kg/t)

i : 勾配 (%), + は上り勾配, - は下り勾配

⑤ 曲線抵抗: 曲線抵抗は次式による。

$$r_c = \frac{600}{r}$$

r_c : 曲線抵抗 (kg/t) r : 曲線半径 (m)

⑥ トン当たり列車抵抗: 線路運転抵抗図では前述の列車抵抗の値をトン当たり列車抵抗に直して用いる。

出発抵抗

$$r_s = \frac{W_l r_{ls} + W \cdot r_{cs}}{W_l + W}$$

r_s : 列車トン当たり出発抵抗 r_{cs} : 客貨車トン当たり出発抵抗

r_{ls} : 機関車トン当たり出発抵抗
 走行抵抗

$$r_r = \frac{R_l + W \cdot r_{cr}}{W_l + W}$$

r_r : 列車トン当たり走行抵抗

r_{cr} : 客貨車トン当たり走行抵抗

R_l : 機関車走行抵抗

加速度, 勾配, 曲線の3抵抗は最初からトン当りの値になっている。

c) 加速力曲線の計算と定加速速度の決定 標準編成にえらんだ列車のトン当たり引張力(動輪周引張力, 以下同様)とトン当たり出発抵抗またはトン当たり走行抵抗との差が加速力となる。

すなわち、

$$f = t_d - r$$

これらは、通常速度の関数として与えられているが、定加速速度はこの加速力曲線を最高速度の70%の範囲で平均して定めた。

$$f_0 = \frac{1}{0.7 V_c} \int_0^{0.7V} f dV$$

$$\alpha = \frac{f_0}{30}$$

ここに、

f_0 : 平均加速力 (kg/t) V_c : 水平区間の均衡速度 (km/h)
 α : 定加速度 (km/h/sec)

この計算結果は表-1に示すとおりである。これは国鉄の車両設計に用いているものと、ほぼ同一となった。

d) 定減速度と減速力の決定 定減速度は国鉄の規程により次のように定められている。

$$\text{定減速度} \quad \beta \text{ (km/h/sec)}$$

客車列車(停車) 1.75

また減速力は次に示すとおりである。

$$f_b = 30 \beta$$

f_b : トン当たり減速力

e) 速度-距離曲線の計算 速度-距離曲線の計算は加速区間と減速区間に分けて次のように行なう。

$$S_a = \frac{V^2}{2 \times 3600 \alpha}$$

$$S_b = \frac{V^2}{2 \times 3600 \beta}$$

ここに、

S_a : 加速区間の距離 (km) α : 定加速度 (km/h/sec)

S_b : 減速区間の距離 (km) β : 定減速度 (km/h/sec)

V : 速度 (km/h)

速度距離曲線をこのように定めることにより、ほかの関係を容易に導くことができる。

f) 作図 線路運転抵抗図を画く順序は次のとおりである。

① 座標軸の設定: 横軸に距離 (km) をとり、縦軸にトン当りの力 (kg/t) と速度 (km/h) をとる。

距離の縮尺は 1/50 000 ないし 1/25 000 とするのが実用的である。縦軸の縮尺はグラフ用紙の目盛に合わせて適切にえらばよい。

② 速度-距離曲線: 標準列車の速度距離曲線を計算値に従ってプロットする。

③ 運転抵抗-距離曲線: 速度距離曲線を媒介として、出発時加速時、標準速度走向、減速時の各速度に対応する抵抗をプロットすれば、運転抵抗、距離曲線が画ける。減速区間には惰行時の走行抵抗を用いる。単機、重連別にこれを行なう。

④ 引張力-距離曲線: 速度距離曲線を媒介とし、各速度に対応する引張力をプロットすれば、引張力-距離曲線が画ける。単機、重連別にこれを行なう。

図-5 線路運転抵抗図 (C 62 客車 500 t けん引)

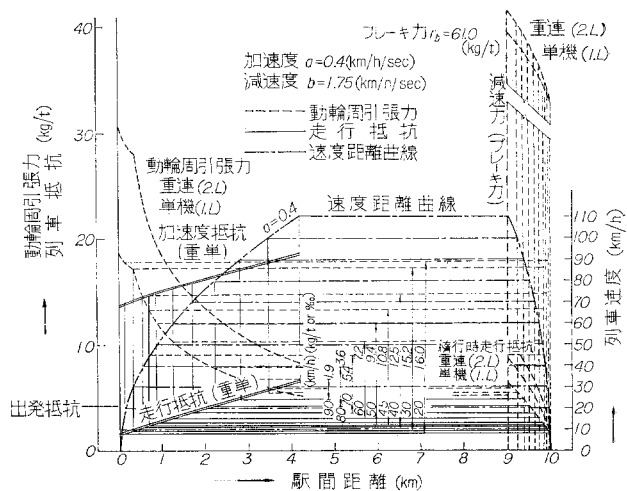
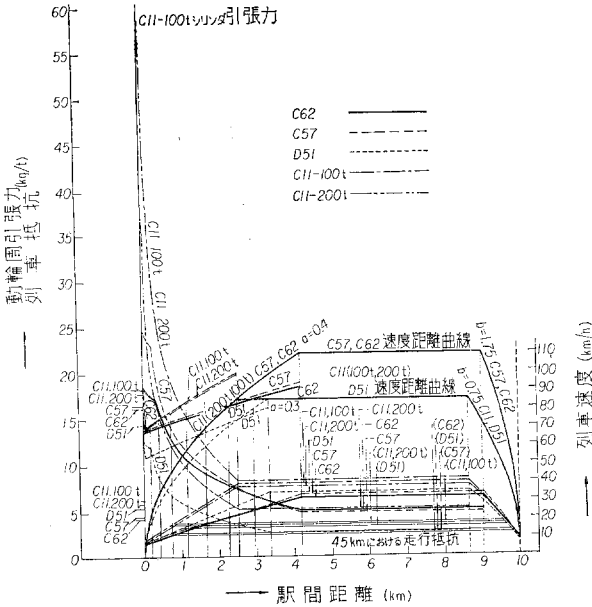


図-6 蒸気機関車比較図



⑤ 減速力-距離曲線：速度距離曲線の減速部分をパラメーターとし、各速度に対応する減速力をプロットする。減速力は惰行時走行抵抗の上に加える。この点を連らねて減速力距離曲線がかかる。

以上の諸曲線は、図-5のごとく各標準速度に対するものが1枚の図面に示すことができる。

⑥ 線路抵抗の記入：図-1のごとく各速度ごとに補助線を入れ、勾配抵抗と曲線抵抗を記入して、本格的な線路運転抵抗図となる。

この線路抵抗を記入しない図-5の状態でも、このままで、線路縦断面図と対比しつつ作業すれば、十分線選定の有用に供し得る。

(4) 各種動力車の線路運転抵抗図

今まで例として、C62形の蒸気機関車が客車500tをけん引した場合を述べたが、ほかの形式の機関車がそれぞれ標準の編成で運転した場合の運転抵抗図は図-6, 7, 8, 9のとおりである。

$V_0 = 45 \text{ km/h}$ の走行抵抗をくらべてみると、客車と貨車の場合約1kg/t程度の相違があるが、機関車の形式にはあまり関係がない。これは電気機関車の場合さらに顕著である。電車、気動車の場合には引張力は性能によって大きな差があるが、走行抵抗は0.3~0.4kg/t程度の差があるだけである。このことは走行抵抗については、動力形態別に代表的な形式と編成を決めておけば、他形式の異なった編成の場合に適用しても大

きな誤差がないことを示している。

(5) 線路運転抵抗図による換算延長の計算

線路運転抵抗図は横軸に距離をとり、縦軸に力をとっているのが、諸抵抗のかかむ面積は列車のなす仕事を表わしている。これによって線路の換算延長を算出することができる。

a) 仕事量算出上の仮定

- (1) 標準速度 V_0 の走行抵抗を r_c (kg/t) とすれば、 r_c に相当する下り勾配を均衡勾配 i_e と呼び、 i_e より急な下り勾配中の勾配抵抗(-)は無視する。
- (2) 均衡勾配 i_e より急な下り勾配中にある曲線抵抗(+)は無視する。
- (3) 停車に要する仕事量(ブレーキ力)は無視する。
- (4) 標準速度 V_0 は 45 km/h とする。
(これは例として C 62, 旅客 500 t けん引の場合であってほかの機種についてもこれに準ずる)。

この標準速度を一定とすることが、ほかの線路との比較上必要であることは、先に述べたとおりであるが、この場合、主として幹線の検討、改良を目標として、甲、乙線を対象として、かつ、そ

の標準的な制限勾配 10% の場合の均衡速度を採ったのである。もちろん、機関車の種類、線路等級(従ってその標準もしくは制限勾配)とけん引定数によってこの値は異なって来るものである(例えば電気機関車の場合、または丙線、簡易の局部比較線の場合などである)。

b) 仕事量の計算

① 総仕事量：総仕事量は運転抵抗による仕事量と、線路抵抗による仕事量とからなる。すなわち、

$$A = A_0 + A_1$$

$$= A_0 + A_2 + A_3$$

ここに、A：総仕事量 (kg-m)

- A_0 ：運転抵抗による仕事量 (kg-m)
- A_1 ：線路抵抗による仕事量 (kg-m)
- A_2 ：勾配抵抗による仕事量 (kg-m)
- A_3 ：曲線抵抗による仕事量 (kg-m)

図-7 電気機関車比較図

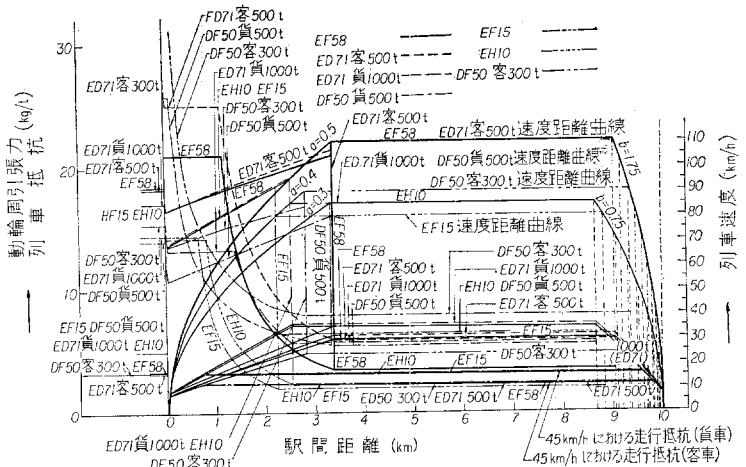
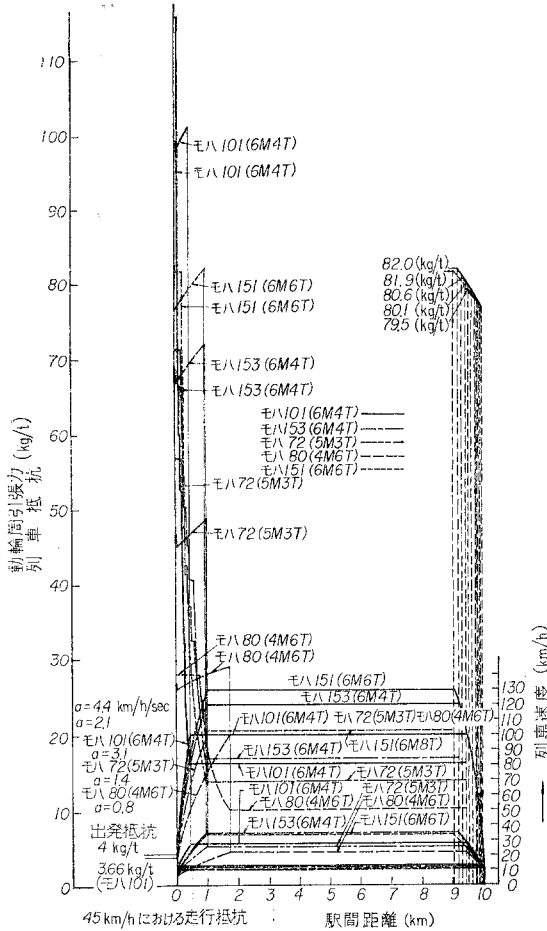


図-8 電車比較図



② A_0 の計算：運転抵抗による仕事量は次の三種よりなる。

$$A_0 = A_s + A_r + A_a$$

ここに、 A_s ：出発抵抗による仕事量 (kg-m)

A_r ：走行抵抗による仕事量 (kg-m)

A_a ：加速度抵抗による仕事量 (kg-m)

③ A_s の計算：

$$A_s = \frac{r_s + r_{10}}{7} S_1$$

$$S_1 = 0.139 \frac{10^2}{\alpha}$$

r_s ：出発抵抗 (kg/t)

r_{10} ：速度 10 km/h のときの走行抵抗 (kg/t)

S_1 ：出発から速度が 10 km/h に達するまでの距離 (m)

α ：定加速度 (km/h/sec)

④ A_r の計算：

i) 加速区間の仕事量

$$A_{r1} = \frac{r_{10} + r_v}{2} S_2$$

$$S_2 = 0.139 \frac{V^2 - 10^2}{\alpha}$$

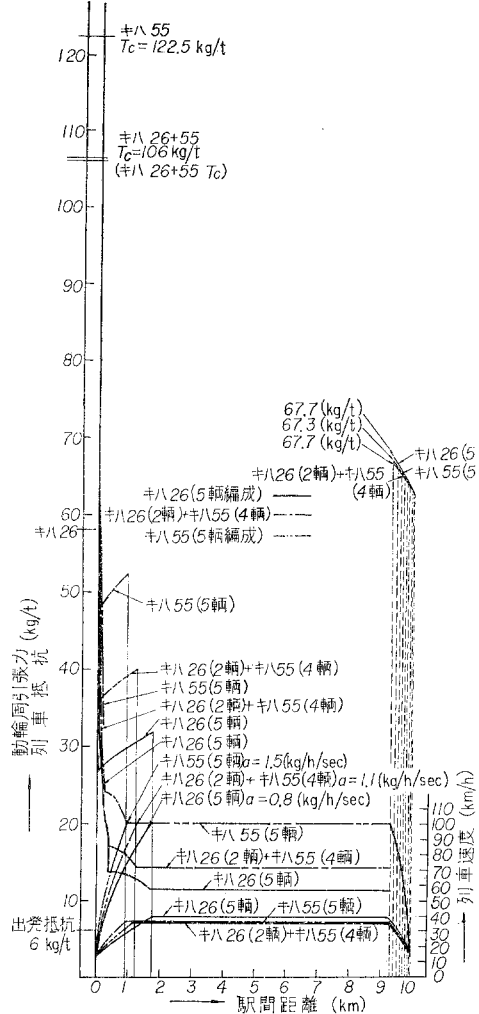
ここに、

A_{r1} ：加速区間の仕事量 (kg-m) S_2 ：加速区間の距離 (m)

r_v ：速度 V における走行抵抗 (kg/t)

ii) 標準速度区間の仕事量

図-9 気動車比較図



$$A_{r2} = r_v \cdot S_3$$

$$S_3 = L - (S_1 + S_2 + S_4)$$

$$S_4 = 0.139 \frac{V^2}{\beta}$$

ここに、 A_{r2} ：標準速度区間の仕事量 (kg-m)

iii) 合計 A_r ：

$$A_r = A_{r1} + A_{r2}$$

⑤ A_a の計算：

$$A_a = r_a \cdot l_a = 4.18 V^2$$

ここに、

r_a ：加速度抵抗の大きさ (kg/t), V ：加速終了時の速度 (km/h)

l_a ：加速区間の長さ (m)

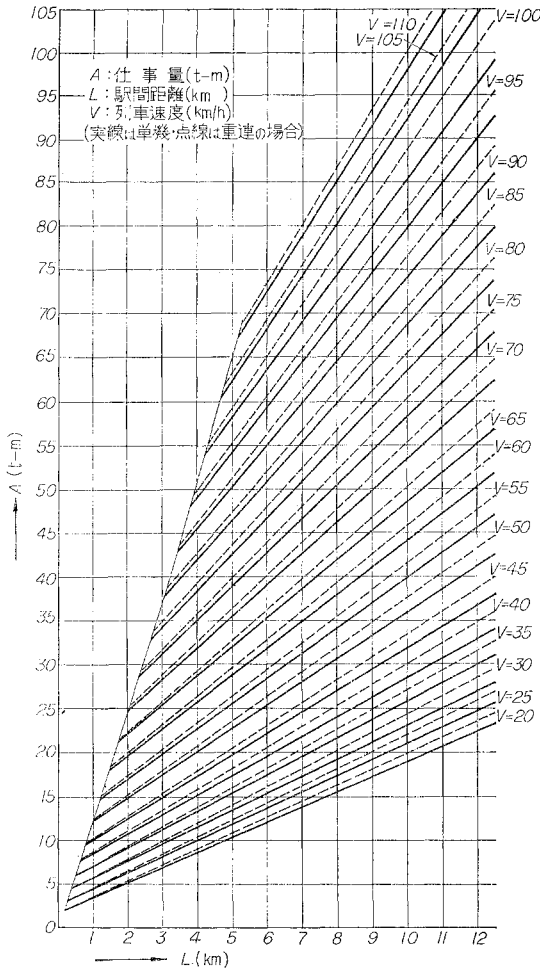
⑥ 合計 A_0 ：

$$A_0 = A_s + A_r + A_a$$

A_0 は標準速度 V と駅間距離 L との関数であるから V をパラメータにとってグラフ化しておけば簡単に求まる。この一例が図-10である(この図は、一般の駅区間の例をあげたものであるが、通過運転の区間数 10 km 以上の場合についても同様である)。

⑦ A_0 の計算： A_0 は一方向に対し、次式で与えられる。

図-10 運転抵抗による仕事量-I
(直線平坦区間 C 62 客車 500 t けん引)



$$A_g = 1000 \sum H_u - i_c l_{cd} - 1000 \sum h_d'$$

ここに、

$\sum H_u$: 上り勾配の合計高さ (m) i_c : 均衡勾配 (%)

l_{cd} : 均衡勾配より急な下り勾配区間の長さ (m)

$\sum h_d'$: 均衡勾配よりゆるやかな下り勾配の合計高さ (m)

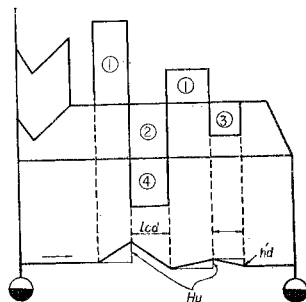
上式を線路運転抵抗図

図-11

で説明すると 図-11 で第一項は ① で示された部分の面積に相当し、第二項は ② で示された部分の面積、第三項は ③ で示された面積に相当する。④ で示された部分の仕事量 (-) は仮定(1)により無視する。

この計算を上下両方向に対して行なう。

この勾配抵抗 A_g の計算は、かくのごとく、図式で面積からも算出されるが、これは、 $g\%$ なる勾配の始終点間の高低差 h 、距離 l とすれば、



$$h = l \times \frac{g}{1000}$$

であるから、前記のごとく計算で出した方が便利である。特に勾配が途中に変化があっても、上りなら上り、下りなら下りが連続している場合は、その勾配連続区間の始終点間の高低差だけとれば用が足りるから簡便である。

④ A_c の計算：曲線抵抗による仕事量は次式で与えられる。

$$A_c = \sum r_c \cdot l_c - \sum r_c' \cdot l_c'$$

$$= 10.5(\sum \theta^\circ - \sum \theta'^\circ)$$

ここに、 A_c : 曲線抵抗による仕事量 (kg/m)

r_c : 曲線抵抗 (kg/t) l_c : 曲線長 (m)

r_c' : i_c より急な下り勾配中の曲線抵抗 (kg/t)

l_c' : i_c より急な下り勾配中の曲線長 (m)

θ° : 曲線の中心角 (度)

θ'° : i_c より急な下り勾配中の曲線中心角 (度)

曲線抵抗の量 A_c の計算は、 $r_c = 600/R$ (kg/t) の式より、線路運転抵抗図に記入して、その面積より出すこともできるが、これは上記のごとく計算式より算出した方が簡便である。

e) 換算延長の計算 換算延長の計算は第2節と同様に、

$$L_e = \frac{r_m}{r_0} L$$

$$= \frac{A}{r_0}$$

で与えられる。ここに r_0 は標準速度の走行抵抗である。

この L_e と A の関係は、両者を座標軸に取ってあわせれば、直線となるから、各標準速度ごとの r_0 に対する直線を図示しておけば、計算の手数がはぶける。

(6) 動力消費量の計算

すでに求めた仕事量 A は列車 1 t 当りに要する仕事量を kg-m で表わしたものである。従って A を用いて列車の動力消費量を次式により求めることができる。

$$F = \frac{2.343 AW}{E}$$

ここに F : 動力消費量 (kg, l または kWh)

A : 列車トン当り仕事量 (kg-m)

E : 有効発熱量

(cal/kg, cal/l または cal/kWh)

W : 列車重量 (t)

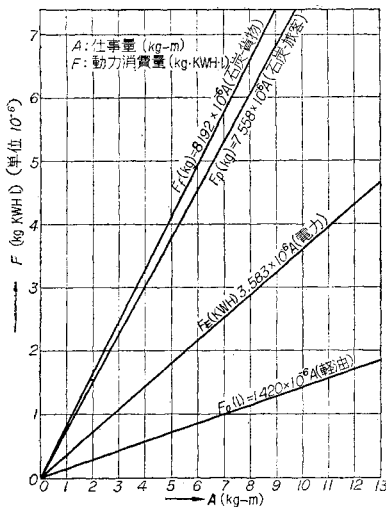
この関係をトン当りの値で図に表わしたものが、図-12 であり、この図によって仕事量 A が求めればただちに所要の動力消費量を求めることができる。また同一單位に換算した消費量も求まる。

(7) けん引定数の査定

路線選定上、けん引定数、制限勾配および均衡速度などの査定は重要な事項である。

線路運転抵抗図を用いれば、これらの関係を即座に読

図-12 動力消費量換算図表



み取ることができ、在来の荷重曲線の代りに用いることができる。

a) けん引重量の求め方 線路運転抵抗図において、引張力は次式で現わされる。

$$t_d = \frac{T_d}{W_i + W}$$

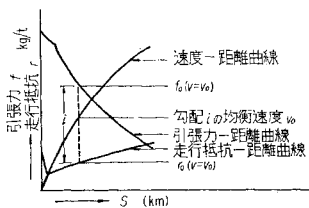
ここに、 t_d : トン当り引張力 W_i : 機関車重量
 T_d : 引張力 W : 客貨車重量

よって W をパラメーターにとって t_d の曲線をいくつか画いておけば、その定数ごとに制限勾配、均衡速度などが査定できる。

この場合 t_d はすべて標準編成の場合の速度距離曲線を媒介に画くので、 t_d-S 関係については、標準の定数から遠くなるとやや精度が落ちて来る（速度による走行抵抗はトン当りにするとほとんど変化が無い）。

しかし在来の荷重曲線から読みとれた $W-V-i$ の関係は全く同一の精度で、線路運転抵抗図から読みとることができる。

図-13



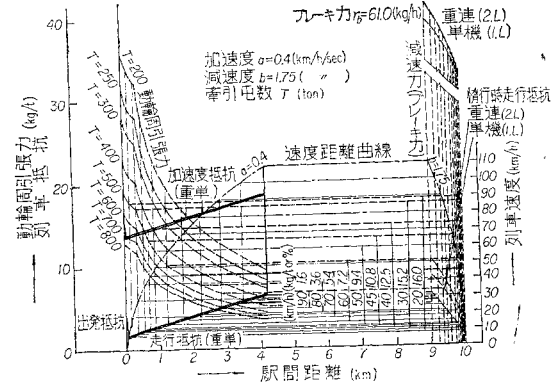
読み方を例示すれば 図-13 のとおりである。

b) 実例 C62 形の蒸気機関車を用いて画いた線路運転抵抗図を 図-14 に示す。

ここには $W=200$ t から $W=800$ t までの引張力が入っており、いずれも $W=500$ t の場合の速度距離曲線を媒介に画いてあるから、 t_d-S 関係を用いる時は前項の注意が肝要である。

すなわち定数が 500 t より小さい時は、距離はやや大きいためにでており、定数が 500 t より大きい時は図で

図-14 線路運転抵抗図 (C 62 客車 500 t けん引標準)



読むより小さめに出てくる。この場合 $W-V-i$ の関係は在来の荷重曲線と同様の精度である。在来の荷重曲線は i をパラメーターにとり $W-V$ の関係を表わしたものであるが、線路運転抵抗図では W をパラメーターにとり $V-i$ の関係を表わしている点が相違する。

なお、C-62、重速 500 t けん引の場合の引張力曲線は、C-62 単機 250 t けん引の場合の引張力曲線の場合と全く同一である。

(8) 惰力勾配の選定に関する応用

線路中に部分的に短い急勾配があっても列車は惰力を利用してその勾配を乗り越えることができる。また減速区間に入り勾配があれば、減速力を節約することができる。このように列車の速度による運動エネルギーを利用して登り得る勾配を惰力勾配 (Momentum Grade) と称する。

線路運転抵抗図は、列車の有する運動エネルギーを加速度抵抗による仕事量として表わしているため、惰力によって克服できる勾配とその長さを簡単に査定することが可能である。

惰力勾配 i 、その長さ x 、速度 V との関係を求めるには、次の方法による。

初速度 V_1 の力行運転で上り勾配 i に差しかかり速度が ΔV だけ低下して V_2 になったとする。この間兼行した距離を Δx とすれば、勾配抵抗と走行抵抗に打ちかつ仕事量は、失なわれたモーメント エネルギーと、速度低下による仕事量の増大分に等しい。

$$\frac{1}{2} m \Delta V^2 + \frac{1}{2} (f_1 + f_2) \Delta x = i \Delta x + \frac{1}{2} (r_1 + r_2) \Delta x$$

$$\Delta x = \frac{4.17 \Delta V^2}{i - \frac{1}{2} (f_1 + f_2) + \frac{1}{2} (r_1 + r_2)}$$

$$x = \sum_n \Delta x$$

ここに x : 勾配の全長 (m)

i : 勾配強度 (%)

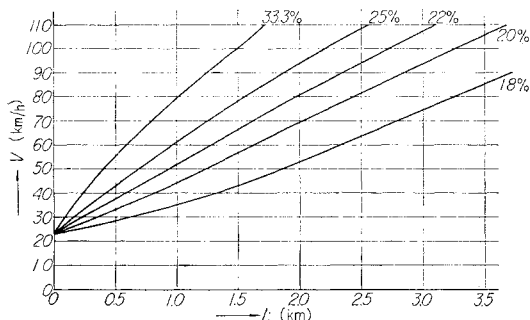
r_1 : 速度 V_1 に相当する走行抵抗

r_2 : 速度 V_2 " "

f_1 : 速度 V_1 に相当する引張力

f_2 : 速度 V_2 " "

図-15 モーメント エネルギーによる走行距離
C 62 (単機)客車 500 t けん引力行の場合



V の最低値は速度が均衡する場合は 18 km/h 以上、均衡しない場合は安全を見て 23 km/h 以上と定められているので、これを与えて $x-i-V$ の関係を計算し、グラフ化したのが 図-15 である。また前式の関係を線路運転抵抗図によって説明すると 図-16 のようになる。

(9) 到達時分

の簡易算出法

到達時分の正確な算定はスピードカーブを画き、時間曲線を引いてみないと判明しないが、選定上概略の値を得たい時は、線路運転抵抗図を応用して算出することができる。

ある線区の運転速度は、運転計画に従って定められ、必ずしも勾配

の多少によらない。そこで標準速度として在来線ならば平均速度を、新線ならば勾配条件などを考慮して定めると定加速度、定減速度の仮定により、簡単に時間の算出が可能になる。

時間は次式により与えられる。

$$T = T_a + T_c + T_b$$

$$= \frac{V}{60\alpha} + \frac{60S_c}{V} + \frac{V}{60\beta}$$

$$S_c = L - S_a - S_b$$

$$S_a = \frac{V^2}{2 \times 3600\alpha}$$

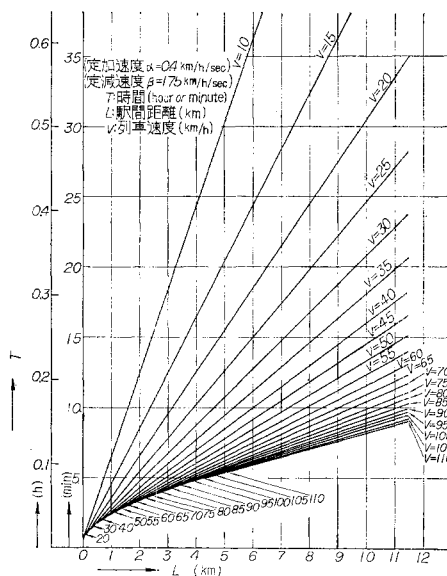
$$S_b = \frac{V^2}{2 \times 3600\alpha}$$

- ここに T_a : 加速区間の所要時分 (min)
 T_c : 標準速度区間の所要時分 (min)
 T_b : 減速区間の所要時分 (min)
 T : 到達時分 (min)
 V : 速度 (km/h)

- α : 定加速度 (km/h/sec)
 β : 定減速度 (km/h/sec)
 S_c : 標準速度で走行する区間の距離 (km)
 L : 区間の距離 (km)
 S_a : 加速区間の距離 (km)
 S_b : 減速区間の距離 (km)

このように計算すると T は α, β の組合わせが決まれば、 V と L だけの関数になり、グラフ化することができる。その一例が 図-17 である (この例は通常の駅区間の例であるが、通常運転の区間数 10 km の場合も同様である)。

図-17 時間距離曲線 I



4. 線路運転抵抗図の応用と勾配選定に関する研究

(1) 路線選定上、線路運転抵抗図より読取られる種々な事項

前述のように、線路運転抵抗図を用いれば、線路換算延長、動力消費量、けん引定数、惰力勾配、到達時分などを簡便に算出できるが、本図の特徴は、さらに次のとき事項が図面より読取られて、路線選定に役立つことにある。

① 運転抵抗について 運転抵抗については次の事項がわかる。

① トン当たり走行抵抗が、全列車抵抗の中に占める割合はあまり大きくない。補助機関車を用いても変化は微小で、実用上単機と同様とみなして差し支えない。また同一種類の機関車で、多少異なる荷重をけん引してもトン当たり走行抵抗の大きさはあまり変わらない。

② 加速度抵抗がきわめて大きく、出発抵抗は、強度が比較的大きいが量的には少ない。

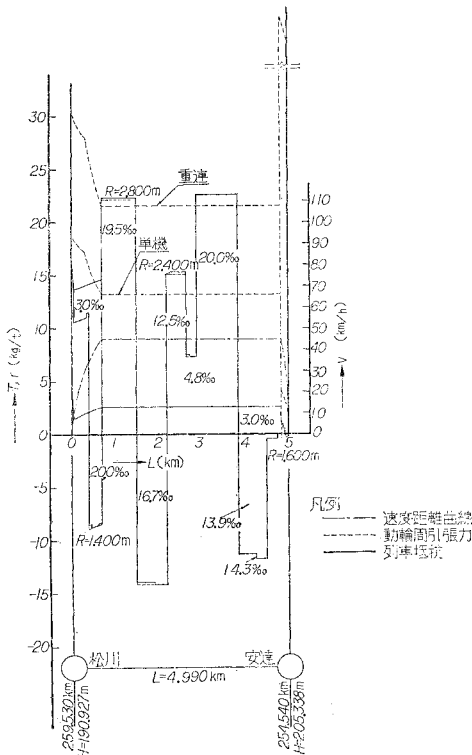
③ ある速度で走る場合の モーメント エネルギー

は、静止の状態から、その速度に達するまでの加速度抵抗の図上の面積に相当する。

b) 線路抵抗について

① 図-18 に示すように、勾配抵抗の強度は走行抵抗に比してきわめて大きい。勾配抵抗は走る方向により上り勾配の時は勾配抵抗となり、下り勾配の場合は加速力となる。

図-18 東北本線安達～松川間上り列車線路運転抵抗図
C 62 旅客 500 t けん引速度 45 km/h



なお、図のごとく、勾配強度が図示されることは、本図法の一つの特徴であって、在来の換算延長算出方法では、全体のエネルギーの量が出るだけで、勾配の強度が表面にでない。しかも路線選定の作業に当っては、必ずしもそのつど図示する必要はなく、縦断面図から、図-17のごとき勾配抵抗の強度と分布を頭の中に画きながら作業を進めればよい。

② 勾配の分布については、加速区間には上り勾配のない方がよく、減速区間には上り勾配が多少あった方がよいことが図上より読みとれる。すなわち、いわゆる Summit Station がよいことがわかる。しかし駅の前後の勾配は適当な方がよく、下りの速度制限でブレーキが必要になったり、上りが制限勾配となっては好ましくない。

③ 曲線抵抗は勾配抵抗にくらべると微少で大勢には影響ないが速度制限に注意する必要がある。

c) けん引力その他について

① 引張力曲線と、走行抵抗の曲線との間の縦距がこの列車のその位置に相当する速度における加速力であって、これが加速度抵抗や、勾配抵抗(勾配の克服力)、曲線抵抗などの線路抵抗に使われる。引張力曲線と走行抵抗曲線の交差する点に相当する速度が、その編成の列車でだし得る最高速度を示す。

② 補機をつけた場合の加速力は、ある限界速度以下で2倍より小さく、その速度以上で2倍より大きくなる。

③ 動力種別給捨区表を対照すれば、各種動力形式の列車の運転性能の相違が判然とする。

貨車列車は低速の性能に特徴を有し、旅客列車は一般に加速力が大きく、動力客車においていちじるしい。通勤電車、近郊電車、長距離動力客車はそれぞれ特徴のある加速力を有している。

④ 線路運転抵抗図を応用すれば、ある最高速度に対する最短駅間距離が読取れる。もちろんこれは非常に不経済な運転になり、駅間がこれより長くなると、漸次経済的な運転が可能である。

また勾配抵抗の大きさから均衡速度がただちに判読でき、曲線の位置から速度制限箇所の位置を知ることができる。

⑤ 運転抵抗仕事量計算図表によれば、各駅停車の場合と通過運転の場合の使用エネルギーの差がただちに読みとれる。

この図表を用いると高低差 10 m の上り勾配は換算延長で 4 km の水平距離に相当することがわかる(C 62 旅客 500 t けん引、 $V_0=45$ km/h の場合)。このことから路線選定上、上り勾配の影響の大きさ、Summit 低下の重要性がよく認識されよう。

(2) 路線勾配選定に関する基本的考察

路線の勾配を形成する基本的な要素は、幾何学的な2点間の高低差、上り下りの勾配の長さおよび勾配強度、勾配の排列および最高点、最低点の高さなどが考えられる。以下勾配の選定に際して、実際の地形条件に対するこれらの要素の適用方法についてのべよう。

a) 始終点間の高低差 この始終点間は、普通隣接する2駅間を指すが、場合によれば、ある運転区間、長い線路の始終点間を意味することがある。時には2駅間の途中の建設技術上とおらなければならない点を始点または終点と見なすことがあるが、以上いずれも次の議論があたりはまる。

始点の海拔標高を H_1 、終点を H_2 とすれば、2点間の高低差 ΔH は、

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

2点間の距離を L とすれば、

$$i_m = \frac{\Delta H}{L}$$

はこの2点間の平均勾配である。もし2点間を最短距離で結んだ時、その勾配が制限勾配より急となればゆる

み、う回線、またはループなどを用いて路線の延長を増さねばならない。平均勾配が制限勾配よりゆるければ、制限勾配の範囲内で各種の勾配を用い建設費の節減をなしうる。平均勾配がきわめてゆるやかな場合は、途中で山や谷があっても建設費をかければ、ゆるい規格の良い線路ができる。

b) 上り、下りの勾配の量と最高点、最低点の位置

勾配による仕事量は、上り勾配の仕事量から下り勾配の加速力のうち、均衡勾配 i_e を限度とする仕事量を差し引いたものとなるから、下り勾配のモーメントは一部しか利用できないことになり、主として上り勾配の量が線路抵抗を支配するようになる。ゆえになるべく上り勾配の少ない路線を選定するのが原則である。

最高点の高さあるいは最低点の高さと勾配による仕事量との関係を示すと、**図-19**において、

$$\sum h_u \rightarrow \min \quad \sum h_d \rightarrow \min$$

になすためには、

$$H_{\max} \rightarrow H_1 \quad H_{\min} \rightarrow H_2$$

とすることにより、勾配強度を最小にすることができる。すなわち最高点、最低点がそれぞれ、始時点の高さに近づくほど勾配による仕事量は少なくなる。

しかし最高点、最低点の高さだけが仕事量を支配するものではなく、上り下りの高低差を考慮しなければならない。

上りと下りの高低差の間には、次の関係がある。

$$\sum h_u \sim \sum h_d = \Delta H$$

すなわち上り勾配の高低差の合計と、下り勾配の高低差の合計との差は、始時点間の高低差になる。

仕事量は上り下りの高低差の関数であるから **図-20** に示すように

最高点が高い路線よりも上り勾配の合計が多い路線の方が仕事量が多くなる。

c) 勾配の配置とその強度 勾配の配置とその強度との関係は、始時点間の2点を結ぶ平均勾配の一本勾配を基本として種々の変化がある。平均勾配の勾配強度は、始時点と距離が決まれば与えられるもので、制限勾配一杯の場合が最も強度が強くなり、一本勾配となる。

平均勾配が制限勾配よりゆるい場合には、制限勾配の範囲内で地形に合わせて上り下りすることができるが、上り下りの勾配強度は、少なくとも一つ以上は平均勾配より急となる。

この例を **図-21** に示す。

このような勾配の配置は勾配抵抗が増し、仕事量が増すので **図-22** のごとく逆勾配を作らない選定が望ましい。この場合勾配抵抗による仕事量は平均勾配と同様に最小であるが、少なくとも1箇所以上は平均勾配より急な勾配が生ずる。

要約すれば、2点間を結ぶ勾配は、一本勾配が最も勾配強度がゆるく、仕事量も少ないので理想的であり、事前の策としては、種々の強度の片勾配だけで構成されたものがよく、途中に逆勾配のあるものは、勾配強度も大きくなり、仕事量が増して好ましくないものである。

d) 地形と勾配の型との関係

路線選定は、実際問題として上記のような、幾何学的、物理的な理論ばかりによって行なうことはできず、自然の地形に制約されるから、この自然の地形との調和をはかることが必要である。

以下にきわめて概略に自然の地形とそれに適合する勾配の型との分類にふれて見る。

- まず路線の通る地形を分類すれば、
 - 川に沿って上り、分水嶺を越えて他の流域に出る場合 (時には川上のある地点までで打切の場合をもふくむ)
 - 山間盆地を連ねて、いくつもの川とその流域を横断する場合
 - 大平野を河川の方角に溯り、または中央部を横断し、あるいは周辺山沿いに走る場合
 - 海岸沿いに、沖積平野あるいは狭小な平地、または鋸歯状海岸などで飛び飛びの平地を連ねる場合
- などがあるが、以下その各項についての路線勾配の選定について述べる。

① まず川(大川)に沿う路線については、河川そのものの縦断勾配は、全体として、大体一つの対数曲線あるいは放物線に似た形を取るものである。従って、路線の縦断勾配もほぼこれに沿い、局部的な狭搾部などを除いて、下流部から上流部に行くに従い急となり、そのある区間の河川平均勾配が、路線の制限勾配より急となれば、もはや、溯上は不可能であって、これから分水嶺の向側に越すのは、トンネル(一般に最大となる)を作らねばならない(例:上越線)。

この分水嶺トンネルの延長を短くするには、河川の平均勾配の行き詰る付近で、適当な地形を見つけてループを作るか、または途中で緩地形があればう回線(蛸坊主)を用いるか、あるいはまた、河川勾配のゆるい中から、制限勾配の範囲内で上り始めて、川床からの余裕を取るか(こういう川底から浮いた線路は一般に仕事量が多くなる)して勾配を克服して登らねばならない。

一般に建設費を支配する仕事量は、線路の縦断方向の地形の勾配と、これに直角な方向の地形の横断勾配に支配されるもの

図-21

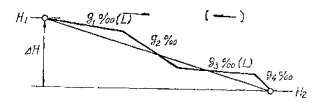


図-22

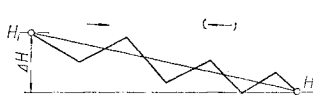


図-19

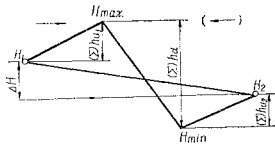
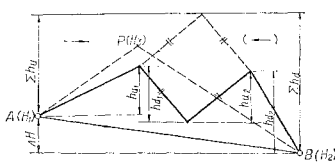


図-20



である。線路の制限勾配の決定は、その線路の利用価値(輸送量およびその質)と建設費との兼ね合いによって、されるべきである。

② 山間盆地を連ねていくつもの川とその流域を横断する線路は、流域の境目の分水嶺を越える際には、①の川沿い湖上の場合と同じく、また盆地内の平地を横断する場合は、次の平野をとる線路と同様であるが、この種の線路は、一般に内陸縦貫線であるから、時に大河川の峡谷部を横断することがあり、この場合、河川横断箇所前後に急な落込みを生ずることがある。要するに全線的に勾配を見れば、上り下りの頂点と落込みのある地形となりかねるのである(例:姫新線、芸備線)。

③ 大平野は一般に平で、地形の傾斜がきわめてゆるやかであるから、河川の方に進む場合や、平野を横断する場合は、全体的に勾配はゆるやかであるが、途中の河川の横断や、ほかの交通機関との立体交差の際に、工費の節約上、制限勾配が用いられることが多い。

また、大平野周辺の山添いに走る線路は、丘陵地形にも、急な上り勾配が用いられることがある(例:八高線)。

④ 海岸沿いの線路は、海岸沿いの沖積平地または海岸段丘下の狭小な平地を走るものと、飛び飛びの平地を連ねるものとある。

前者は大平野を横断する場合と同じで、河川のまたはほかの交通機関の横断の箇所にも局所的な急勾配ができるだけで、きわめて低平で水平に近い。後者には紀勢本線の西部のごとき、鋸齒状海岸で、山脚の海にせまった間に平地のあるものや、赤穂線のごとく、台地で境された盆地のあるものであって、平地または盆地の間には、分水嶺があるが、ここに一般にトンネルが設けられ、その工費の節約の程度で、制限勾配の強度が支配される。前者の例では、制限勾配は16~25%で上りが多いが、後者の制限勾配は10%で、割合ゆるやかである。

(3) 勾配改良における応用(戦時中実施された勾配改良の例)

既設線路の勾配改良に当っては、前述の基礎的な勾配選定の原則と同様に次の点を考慮すべきである。

- (1) 上り下りはなるべく少なくする
- (2) 最高点を下げる
- (3) 勾配強度をゆるくする
- (4) 加速区間の勾配はなるべくゆるくする
- (5) 距離をなるべく短かくする
- (6) 既設駅はなるべく動かさない

以下著者が国鉄在職中原案を作り、戦時中実施された勾配改良区間について解説する。

a) 函館本線石倉一野田間 これは石倉~落部間、落部~野田間において、いずれも線路は中小河川の平地にある各駅から、海岸段丘の上に一たん登って降りるもので、最急勾配(制限勾配)15.2%、最小曲線半径300mであった。これを一部トンネルを用いて海岸段丘下の海浜をとおり、最急勾配5%、最小曲線半径500mとしたもので、頂点が約20m近く低下し、距離もほとんど変わらない。

b) 函館本線軍川一森間 この区間のう回路線は制限勾配を6%とし、延長は約13kmほど延びるが、最高点が約40m下るので、換算延長はほとんど変化がな

い。この改良はけん引定数がいちじるしくふえるのが一大特徴であって、上り列車の実際運転時分も割合に速い。また森から尾白内まではほとんど平坦であるから加速区間としては理想的である。

c) 東北本線岩切一品井沼間 東北本線は、当時仙台付近から、岩切までが複線であったが、それ以北の単線区間の線路容量が不足したため、この複線化にともなってこの勾配改良が行なわれた。在来線の岩切一品井沼間では、利府一松島間に赤岩の台地を頂点とし、それぞれ上り16.7%、下り12.5%(いずれも下り方向に対して)の連続勾配があるので、それを松島海岸まわりの平坦線とし、松島一品井沼間の小さな峠は上下とも16.7%の勾配があるので、これも少しは位置変更してトンネルにより頂点を下げ、いずれも制限勾配10%とした。この区間の勾配改良は、経過地の変更による頂点の低下と勾配強度の低下が主眼点であって、路離はわずかに延びるが、換算延長は減り、けん引定数が増し(長大列車の補機がとれる)運転時分も多少短縮したほか、松島の観光、塩釜の発展などに貢献している。

d) 東海道本線大垣一関ヶ原下り通過線 東海道本線は丹那トンネル、大津~京都間の線路変更が終ってから、垂井~関ヶ原間の20%区間のみが、唯一の補機区間として残っていたが、これを戦時中勾配改良したものである。本路線は、大垣から南荒尾信号所までの平坦区間はそのままとし、南荒尾から垂井までの平坦区間を避けてただちに10%の勾配をとり、北方の丘陵裾をまわって関ヶ原に至り、在来線に合致するもので、下り線(上り勾配)の通過線である。頂点は下らないが、距離の延びは約3kmにとどまり、換算延長は多少のびるが、制限勾配の緩和により、多数の補機を節約した。

(4) 幹線経路の比較(東北諸幹線経路を例として)

幹線経路の比較の一例として、東北諸幹線の経路比較をするが、この東北諸幹線は上野、青森間において、

- (1) 東北本線
- (2) 常磐線經由東北本線
- (3) 東北本線、福島經由、奥羽本線
- (4) 東北本線(大宮まで)、高崎線、上越線(宮内、新津間)、羽越線、奥羽本線(秋田より)

の4経路がある。この4経路を比較するために、換算延長(参考として動力消費量、運転時分)を算出して見た。

この換算延長の計算に当っては、既述のごとく、一定条件の下における比較をするために、東北本線仙台以南、奥羽本線、福島~米沢間、高崎線、上越線などが現在電化されていることを無視して、C 62旅客500tけん引、標準速度45km/hとして計算した(補機区間もあるが、この計算にはほとんど関係がないことは既述のとおりである)。

表-2 上野-青森間線路比較表 (現在線) C 62 旅客 500 t けん引標準速度 45 km/h

線名	駅間距離 (km)	高低差合計 (m)		総仕事量 (kg-m)		換算率			換算延長 (km)			エネルギー-石炭換算			所要時分 (分)
		上り	下り	下レ	上レ	下レ	上レ	平均	下レ	上レ	平均	下レ	上レ	平均	
東北本線	737.053	2 059.560	2 062.096	3 689.000	3 481.000	2 002	1 889	1 946	1 475.6	1 392.4	1 434.0	27.89	26.14	27.02	(16 時 48 分) 1 008.2
常磐線 經由	751.193	1 916.897	1 927.485	3 512.000	3 405.000	1 870	1 810	1 840	1 404.8	1 362.0	1 383.4	26.51	25.57	26.04	(17 時 04 分) 1 023.8
奥羽本線	754.474	2 420.156	2 420.213	3 810.000	3 886.000	2 020	2 060	2 040	1 524.0	1 554.0	1 539.0	28.60	29.20	28.90	(17 時 07 分) 1 026.7
上越線經由 裏縦貫線	772.938	1 911.965	1 914.833	3 437.000	3 360.000	1 780	1 740	1 760	1 374.8	1 344.0	1 359.4	25.90	25.40	25.7	(17 時 29 分) 1 049.0

また、運転方式は、一運転区間通過方式とし、停車駅(運転区間)は、現行の普通急行列車の場合を参考とし、運転設備、支線の分岐などを考慮に入れて定めた。東北本線はあらかじめ福島、仙台で、また奥羽本線は秋田で分割して小計しておき、これを組合わせて、表-2 のごとく路線比較表を作った。

その結果、東北各幹線の換算延長は、現状では、

- (1) 上越、羽越經由の裏幹線が最も短かく
- (2) 常磐線がこれに次ぎ
- (3) 東北本線は常磐線より相当差があり
- (4) 奥羽本線經由は最も悪く、差が大きい

ことがわかった。

以上の計算は、線路勾配表および曲線表(国鉄に台帳あり)と、第3章に示したごとき線路運転抵抗図および一連の付属図表より計算したもので、この大量の計算が、中、下級技術者4人で約2週間のできたのである。

上越、羽越經由の裏縦貫線が一番よいのは、距離が一番長く、清水峠の大きな峠があるにかかわらず、それ以外は、平野または海岸の低平地をとおり、奥羽線の北部では、矢立峠および大釈迦の峠があっても低いからである。常磐線は、全く平野または海岸沿いであるが、平以北の丘陵地形で、上り下りが案外多い。東北本線は白河(白坂)の分水嶺と、福島~白石間に峠があり、仙台以北では有壁の小分水嶺と、北部に大きな奥中山の峠があり、かつ丘陵地形の上り下りの多いために、距離が一番短かいのに、換算延長は、割合長い。奥羽本線の秋田以南は、まず板谷峠の大きな峠と、雄勝峠(山形、秋田県境)とがあるほか、内陸縦貫線のため、川沿いでない区間の丘陵地帯に上り下りがあって、換算延長がいちじるしく長いのである。

(5) 平均上り勾配の提案

運転時分の略算に当っては、その区間の線路条件に適

合した標準速度を査定し、なるべく実際の運転状況に近い時分を求める必要がある。運転時分は2.(2)でのべたスピードカーブにより順次求めるのが普通の方法であるが、何らかの方法で標準速度が求まれば、3.(9)のべた略算法で計算できる。

この標準速度査定のためには、それに相当する均衡勾配を推定する必要がある。現在制限勾配における均衡速度を求めるのに、制限勾配の代用として、任意の1kmの最急勾配をとった標準勾配が用いられているが、著者はここに一つの提案として、運転時分の略算、動力消費量の査定に対して次にのべる「平均上り勾配」に対する均衡速度を査定速度として用いることを考案し、これを東北諸幹線の各区間に適用し、各経路の運転時分の略算比較を試みた。

平均上り勾配の定義は、区間の上り下りの高低差の合計をそれぞれ $\Sigma h_u, \Sigma h_d$ とし、またそのおのおのの距離の合計を $\Sigma l_u, \Sigma l_d$ 、水平区間の延長の合計を Σl_L とするとき、

$$g_0 = \frac{\Sigma h_u}{\Sigma l_u + \Sigma l_L} (\%) \text{ (下り方向)}$$

$$g_0 = \frac{\Sigma h_d}{\Sigma l_d + \Sigma l_L} (\%) \text{ (上り方向)}$$

を指すものである。これは標準勾配が、真の制限勾配に対して、略算的に代用されているのと同じの思想で、運転時分略算のためにある長区間について、大数的の近似値として使用し得るものと考えたものである。

もちろん1駅間などの短い区間については、勾配の配置の状況によっては、これを用いることは無理な場合もあり、相当な長区間でも、下り勾配の延長率 $\Sigma l_d/l_L$ % (l_L は区間延長)が大きい場合は、査定速度を補正せねばならない場合がある。

この平均上り勾配による査定速度で、東北諸幹線の運

表-3 上野-青森間平均上り勾配および運転時分比較表 (総括表)

線名	距離 (km)					高低差合計 (m)		平均上り勾配 (%)		時間	
	区間	上り勾配	下り勾配	A-C	A-B	上り勾配	下り勾配	F/D	G/E	下レ	上レ
	A	B	C	D	E	F	G	下り方向	上り方向		
東北本線	737.053	283.499	252.979	484.074	454.554	2 059 560	2 062 096	4.25	4.54	11°43'	11°34'
常磐線	751.193	264.511	236.100	515.093	486.682	1 916 897	1 927 485	3.72	3.96	10°55'	10°55'
奥羽本線	754.474	278.829	284.759	469.715	475.645	2 420 156	2 420 213	5.15	5.09	13°16'	12°50'
上越線經由 裏縦貫線	772.938	284.397	275.636	497.302	488.541	1 911 965	1 914 833	3.84	3.92	11°53'	11°23'

表-4 主要幹線

線名	区間	キロ程 (km)	工事里程 (km)	工事種別	線路状態					
					最急勾配(%)		最小半径(m)		施工基面最高点(m)	
					現在	改良	現在	改良	現在	改良
函館	栂根~軍川	20.8	15.6	線路変更	20.8	10.0	300	600	138	133
	*軍川~森川	22.5	—	(切取改良)	(下り)20.0 (上り)15.2	(下り)20.0 (上り)10.0	300	300	175	133
	森~石倉	12.6	12.6	勾配改良	18.2	10.0	300	600	14	133
	石倉~野田	9.3	8.8	線路変更	15.2	5.0	300	600	33	16
	長万部~黒松内	20.0	21.7	—	20.0	10.0	300	600	94	89
	黒松内~然別	91.8	78.1	—	22.7	10.0	240	600	193	118
	蘭島~南小樽	16.2	14.1	—	20.8	10.0	200	600	103	66
	蘭留~和寒	13.5	13.5	—	20.0	10.0	170	600	285	214
	富良野~落合	53.6	10.7	勾配改良	16.7	10.0	160	400	410	214
	宗谷	落合~新得	27.9	25.0	線路変更	25.0	16.0	170	400	535
落合~御影		47.5	33.8	—	25.0	10.0	170	400	535	439
御影~浦幌		75.8	21.4	勾配改良	16.7	10.0	300	400	158	439
浦幌~厚内		18.4	16.0	線路変更	16.7	10.0	240	400	92	75
厚内~剣路		58.3	10.1	勾配改良	16.7	10.0	220	400	34	—
郡山~松川		32.9	32.5	線路変更(増設)	20.0	10.0	400	600	245	75
松川~福島		13.3	16.2	—	25.0	10.0	400	600	191	189
福島~岩沼		61.7	64.2	—	25.0	8.0	400	600	201	79
盛岡~好摩		20.9	21.9	—	16.7	10.0	400	600	243	227
好摩~北福		49.5	25.0	線路変更	23.8	16.0	400	400	455	394
東北	北福岡~尻内	38.6	7.5	勾配改良	16.7	10.0	400	600	114	394
	尻内~乙供	38.4	15.2	—	16.7	10.0	600	600	46	394
	乙供~野辺	14.1	12.9	線路変更	16.7	10.0	400	600	90	68
	西平内~浅虫	6.4	2.3	勾配改良	16.1	10.0	400	600	33	32
	*福島~米沢	40.7	50.5	線路変更	40.0	12.5	300	400	626	352
	*真室川~院内	30.4	—	—	20.0	10.0	362	400	302	352
	白沢~碓ケ	17.8	17.9	—	25.0	10.0	400	600	240	195
	大釈迦~鶴ヶ坂	6.2	5.9	—	25.0	10.0	400	600	99	65
	水戸~石打	41.5	32.5	—	20.0	10.0	400	600	676	500
	*浅川~相模	9.5	9.4	—	25.0	10.0	400	400	269	230
上中北	水ノ本~敦賀	25.4	20.0	—	25.0	10.0	300	400	246	143
	敦賀~今庄	26.4	25.0	—	25.0	10.0	300	400	275	178
	津幡~石動	13.2	33.0	—	20.0	10.0	300	400	89	54
	龜山~新堂	26.2	27.4	—	25.0	10.0	300	400	293	240
	新堂~伊賀上野	8.4	2.0	勾配改良	16.7	10.0	300	400	182	240
	伊賀上野~笠置	19.7	17.8	線路変更	25.0	10.0	400	400	170	147
	笠置~奈良	19.7	4.0	勾配改良	16.7	10.0	300	400	73	147
	西条~広島	28.9	28.3	線路変更	22.6	10.0	300	600	257	222
	下関~小倉	12.5	10.0	—	20.0	12.5	600	800	—	-34
	鹿兒島	玉名~上熊本	28.0	27.6	—	12.5	10.0	400	600	79
川尻~子土		5.6	10.0	勾配改良	12.5	10.0	500	500	9	69
八代~佐敷		29.8	8.0	線路改良	16.7	10.0	300	400	28	28
湯浦~津奈木		8.7	7.0	線路変更	16.7	10.0	300	400	25	25
津奈木~米ノ木		18.9	12.0	勾配改良	16.7	10.0	300	400	42	25
出水~上川内		53.5	26.0	線路改良	16.7	10.0	300	400	46	25
上川内~串木野		12.0	11.0	線路変更	20.0	10.0	300	400	80	43
串木野~伊集院		16.8	10.0	線路改良	20.0	10.0	300	400	70	43
伊集院~西鹿兒島		17.3	16.0	線路変更	20.0	10.0	300	400	142	118
宇佐~中山		14.6	19.8	—	25.0	10.0	300	400	139	118
日豊	中山~大分	42.6	16.5	勾配改良	15.2	10.0	300	400	90	118
	喜々津~長崎	25.1	23.0	線路変更	20.0	10.0	300	600	80	39
	武雄~三間坂	7.8	7.8	—	25.0	10.0	300	400	102	105
	三間坂~佐世保	26.4	28.0	—	25.0	10.0	300	400	102	105
	(参) (山陰) (日豊)	横川~軽井沢	11.2	31.2	線路変更	66.7	20.0	300	400	941
豊野~新井		46.0	47.8	—	25.0	20.0	300	400	672	420
(湯沢山)		138.4	72.2	北陸、関東短絡	20.0	20.0	300	400	352	352
(上郡~智頭)		257.8	57.1	山陰、阪神短絡	15.2	20.0	300	400	211	402
(大分(三重町)~日向長井)		110.3	45.2	短絡兼勾配改良	20.0	16.0	300	250	219	269

注：年間旅客通過人員，年年貨物通過トノ数は 33 年度実績による。

勾配改良調

技師長室 昭和24年11月10日 (*印は35年10月補正)

トンネル ()内は最長 (m)	橋 梁 (m)	建設費* (34年換算) (100万円)	年間旅客通過人員* (1000人)			年間旅客通過トン数* (1000t)		記 事
			定 期 外		定 期	下	上	
			下	上				
3090(2500)	56	1660	2036	2001	987	2195	3188	工事一部完了
—	63	—	990	132	178	1968	—	在来線(下り本線)
—	90	221	1465	1460	137	2207	3181	
700(500)	320	443	1441	1435	161	2208	3185	工事完了
750(750)	404	1365	1164	1132	75	227	372	
11410	820	6836	1460	1430	267	243	336	(岩内線)
6630(1560)	127	3027	1924	1876	1148	304	281	
1400(1400)	35	932	627	653	209	610	1227	
—	—	602	643	702	107	921	1339	
5000(4500)	526	2901	583	647	39	1011	1116	(辺富内線)
7300(4500)	650	3963	723	788	174	1011	1116	(同上) } 比較線
—	—	894	914	995	416	992	1072	
1240(1160)	230	1208	461	504	67	1102	783	
—	—	963	506	544	161	1273	743	
650(600)	350	892	2810	2840	772	1859	2236	一線増設工事中
2695(1380)	307	1857	2727	2754	1030	1794	2209	一線増設工事中
3948(632)	1278	4143	1458	1453	654	1009	1427	(丸森線)
680(300)	93	1135	1909	1857	783	1287	2658	
4679(2080)	1267	3142	1425	1421	217	1253	2089	
—	—	274	1532	1507	711	1220	1958	
—	—	555	1491	1471	433	974	1460	
1800(1800)	16	1361	1522	1497	368	909	1382	
—	—	73	1634	1610	639	913	1186	
11640(7860)	—	—	1102	1147	359	658	872	飯坂経由
—	—	—	501	557	144	427	678	
3647(2690)	283	2514	629	598	327	1594	2357	
1850(1575)	46	728	1298	1283	1184	1405	1859	工 事 中
21800(11000)	—	8383	2000	1870	109	2934	3646	
3881(2583)	95	1198	3060	3063	2298	947	860	ほかに塩尻までの区間の調査あり
10284(5170)	254	1770	2088	1895	148	2906	3247	単線工事完了
11640(4960)	104	4475	2227	2005	164	3190	2903	工事中(線路位置異なる)
2469(2469)	58	1151	—	—	—	—	—	津幡~石動は10%に改良済, 複線工事中
5660(2928)	457	3295	1237	1166	281	538	861	(ほかに16% 案研究済)
—	457	97	958	871	268	287	468	
2820(800)	108	1585	1000	894	379	289	431	
—	—	153	1115	1016	562	288	429	
7390(3800)	332	6418	4008	4082	1390	3893	5303	(上り通過線増設案研究中)
5930(5580)	—	3320	4653	4691	1564	4196	4918	新関門トンネル
39	628	834	2252	2278	1097	2322	1865	
—	—	46	2541	2528	1799	1765	1734	
2200(1800)	—	934	1216	1184	459	821	614	(佐敷太郎)
2800(2650)	—	1160	1053	1030	276	818	580	(津奈木太郎)
1400(780)	—	914	889	867	306	817	579	
1500(1000)	140	1452	927	898	239	686	433	
2260(2260)	130	1105	962	934	443	605	295	こばな (木葉茶屋)
2200(1300)	130	1095	1099	1047	997	595	285	
4470(1670)	120	1726	1358	1330	1596	534	250	(饒頭石)
3500(1350)	200	1808	1503	1502	258	1087	693	
—	—	651	1520	1520	369	1088	688	
7390(2740)	332	3542	1572	1515	2187	403	366	
1840(1840)	102	1087	1334	1316	632	542	345	
3500(940)	757	3541	1335	1312	700	540	334	
16175(2550)	602	4056	—	—	—	—	—	現在線に沿って工事着工
8280(4000)	—	—	—	—	—	—	—	
14190(3600)	2007	—	1844	1844	814	978	—	新線建設
7560(3430)	635	4739	739	739	311	476	—	〃
11677(2800)	1234	3842	—	1937	—	—	1086	新線建設

転時分を比較してみると、表-3に示すごとくは現在の普通急行列車程度となり、妥当な結果と考えられる。東北諸幹線の上野～青森間の比較では常磐線経由が最も早く、東北本線と上越線幹線がこれにつき、奥羽本線がいちじるしく遅いのは、線路の実状とよく合っているとと思われる。

なお、下り勾配の区間も、延長の中に入れて、上り平均勾配を出すことも考えられやってみたが、これでは、あまりに平均速度が高くなるようである。しかし、特急列車などに適用されるかも知れないが、こんな精度の高いものは、スピードカーブを引いてやるべきである。

(6) 全国幹線勾配改良の具体的研究

a) 主要幹線勾配改良一覧表 著者は国鉄在職中、多年にわたって路線選定の業務と調査、研究に従事したが、この間ほとんど全国の幹線につき、勾配改良を研究したので、その一覧表を表-4に示す。

この表で線路変更というのは、路線の位置を現在線と全く別の位置に移すものであり、単に勾配改良をあげ、または切盛改良とあるのは、路線位置を現在位置にそって切盛の土工量をふやして、勾配強度を緩和するもので(この方法は線増の場合に行なうと一挙両得である)、後者の場合は、距離はほとんど変わらず一般に最高点は低下しないか、低下してもその差は微少である。

b) 勾配改良研究のおもな例 以下表-4より主要なものについて取り上げ、簡単な説明を加える。これらの各案にはそれぞれ詳細な資料がまとまっている。

① 東北本線沼宮内—戸間(奥中山峠)：これは現在線が、上り下り23.8%の勾配であるのを、経過地を一つ東側の旧道沿いに変更し、一案として16%の勾配で、あまりゆるみなしに勾配改良しようとするものである。

② 東北本線 福島—岩沼間(丸森線)：これは目下建設線として予定されているものであるが、現在の東北本線の白石経由線には福島～白石間に貝田の峠があって、最急勾配25%の上り下りの連続であるのを避け、在来線は現状通りとし、今後の輸送幹線を阿武隈川沿いに新設しようとするものである。この線はきわめてゆるい川沿いに下りだけの線路であるから最急勾配は河川および立体交差の付近だけで8%以下となり、曲線も最小半径800m以上とすることができる。

③ 奥羽本線 福島—米沢間(板谷峠)：奥羽本線の板谷峠は、峠の最高点は清水峠に匹敵し制限勾配は33%で、全部補機をつけており、下りのブレーキは電気再生制動を設備し保安度を維持している。線路位置はトンネルと雪覆が多く、トンネルはかぶり浅く崖壁の中を多くとっており、レンガ巻きであるため、ほとんど改築を必要としている。

この間の改良案としては、福島より、飯坂経由、豪士峠を越えて米沢に達すれば距離はややのびるが、最高点は300m近く下り最急勾配は12.5%となってこの隘路は打開される。

④ 奥羽本線 大館—大鰐間(矢立峠)：この区間は、現在着工中の大釈迦～鶴ヶ坂とともに、奥羽本線としてよりも、裏幹線の経路上にあり、その障害をなしている。

この区間は陣場、碓ヶ関間が、連続25%の上り下りで前後に18.2%、16.7%などの勾配がある。改良案の一例を示せば、白沢からやや西にう回して陣場にわたり、トンネルをおごって湯の沢付近にでて、再び西にゆるんで碓ヶ関にいたり、これよりほぼ現在線沿いに勾配改良するもので、最急勾配は10%、最高点も40mあまり下る。

⑤ 上越線 水上一石打間(清水峠)：上越線は東北の裏幹線の一部であるとともに、今後裏日本の工業的発展と、対ソ貿易の増大を見込まれる東京～新潟間の連絡路であり、また一覧表の末尾に示した湯沢～直江津間の新線建設ができれば、近接化する京浜、北陸間の主要交通路となるので将来非常に大きな輸送量を予想せられる線である。

従って著者はここに思い切った勾配改良を一案として提案する。

すなわち、水上よりただちに大トンネルに入り、途中〔〕宇成りに曲って、越後中里の北方で顔を出し、湯沢に至り、これより上り線を単線で新設、途中でループを用いて石打に達する。勾配は、大きなトンネルの中央まではゆるく、これより10%の下り一本勾配である。これにより最高点は約160m下り、補機がとれる。本トンネルは輸送量が多く、地質が良いから、水上～湯沢間は当然複線で新設すべきである。

なお、ほかに北海道根室本線の狩勝峠と、山陽本線西条(八木松)瀬野間についても、特に研究したが、表-5に結果のみを示す。

⑥ 山陽本線 西条—瀬野間上り通過線：

⑦ その他短絡新線建設による幹線改良：表-4の末尾に追記した線路の中で、上郡、智頭間の線路は山陰線の増強のため、山陽本線上郡から因美線智頭までの新設線であり、これは大阪～鳥取間を約50km短縮するとともに、山陰と備前工業地帯および神戸とを直結し、上り下りの多い山陰線、福知山線に比して、分水嶺に20%の急勾配と峠に約400mの最高点があるが、

表-5 主要勾配改良区間線路

運 転 区 間	駅間距離 (km)	標準勾配(%)		最急勾配(%)		最急勾配最大延長 (km)		高低差合計(m)		平均上り勾配(%)		
		下	上	下	上	上	下	上	下	下	上	上
落 合—新 得	現在線	27.690	25.0	25.0	25.0	1.163	3.057	129.167	351.733	13.86	16.78	
	改良線	25.200	10.0	16.0	10.0	3.550	5.992	36.500	259.067	6.69	12.19	
沼宮内—戸	現在線	32.500	23.8	23.8	23.8	1.975	3.260	204.968	304.395	12.50	15.81	
	改良線	34.240	16.0	16.0	16.0	3.187	5.500	145.104	244.615	8.61	11.02	
福 島—岩 沼	現在線	61.700	25.0	25.0	25.0	3.387	3.064	172.342	240.358	5.74	4.90	
	改良線	64.100	7.3	8.6	8.0	0.870	0.519	67.437	136.777	2.46	2.89	
福 島—米 沢	現在線	40.680	33.3	33.3	33.3	5.687	3.584	553.218	376.120	22.34	21.75	
	改良線	50.500	12.5	12.5	12.5	5.300	1.600	285.983	108.785	8.64	4.38	
大 館—大 鰐	現在線	32.390	25.0	21.4	25.0	1.408	0.678	184.771	172.375	10.17	10.06	
	改良線	32.700	10.0	10.0	10.0	7.230	4.140	142.406	126.360	7.64	7.75	
水 上—石 打	現在線	41.520	20.0	20.0	20.0	3.550	3.083	185.346	419.909	13.51	15.67	
	改良線	36.300	1.6	10.0	2.5	0.369	13.860	11.288	245.851	0.97	9.61	
西 条—瀬 野	現在線	16.580	10.0	22.5	10.0	1.513	0.144	37.360	204.151	5.98	16.75	
	改良線	17.300	0	10.0	0	16.700	0	166.791	0	9.64	9.64	

表一6 東北諸幹線経路比較総括対照表 (現在線および主要区間勾配改良後)

線名	距離 (km)	仕事量 (kg-m)		換算延長 (km)			運行時分				記事	
		下り	上り	下レ	上レ	平均	速度一定 (45 km/h)		査定速度			
							下り時分	上り時分	下り時分	上り時分		
東北	現在線	737.053	3 689.000	3 481.000	1 475.6	1 392.4	1 434.0	16°48'	16°48'	11°43'	11°34'	福島-岩沼}改良 沼宮内-戸
	改良線	741.193	3 388.246	3 323.169	1 355.3	1 329.2	1 342.3	16°54'	16°54'	11°39'	11°26'	
常磐	現在線	751.193	3 512.000	3 405.000	1 404.8	1 362.0	1 383.4	17°04'	17°04'	10°55'	10°55'	沼宮内-戸}改良
	改良線	752.933	3 373.229	3 353.821	1 349.3	1 341.5	1 345.0	17°07'	17°07'	11°03'	11°07'	
奥羽	現在線	754.474	3 810.000	3 886.000	1 524.0	1 554.0	1 539.0	17°07'	17°07'	13°16'	12°50'	福島-米沢}改良 大釈迦-鶴ヶ瀬
	改良線	764.410	3 496.903	3 478.441	1 398.8	1 391.0	1 394.9	17°20'	17°20'	13°19'	12°41'	
上信羽越奥羽線経由	現在線	772.938	3 437.000	3 360.000	1 374.8	1 344.0	1 359.4	17°29'	17°29'	11°53'	11°23'	水上一石打}改良 大釈迦-鶴ヶ瀬
	改良線	767.834	3 161.151	3 059.316	1 265.3	1 223.7	1 244.5	17°23'	17°23'	11°32'	11°20'	

換算延長はもちろん短くなる。

また日豊本線 大分～日向長井間は、三重町～日向長井間を新設し、豊肥線の三重町以東を部分改良することにより、大分～延岡間で約36km短縮するとともに最急勾配を20%から16%に改良し、かつ宗太郎峠の20%勾配の災害区間を避けるものである。

函館本線の黒松内～然別間は、岩内線を建設して小沢付近で、現在線に短絡すれば、黒松内～小沢間の最急勾配20%、最小曲線半径240mが、それぞれ10%以下、600mとなり、長万部～岩見沢間が現在室蘭線の方が約9km近いのが、逆に函館本線の方が6kmあまり近くなる。

⑦ 幹線主要勾配改良後の換算延長および運転時分略算：前記の主要勾配改良案に対する換算延長その他を本法により計算したものを、一括表示すれば、表一5のごとく、勾配強度が減じ、けん引定数が増すほか、いずれも換算延長を減ずる。

次にこれらに対して上り平均勾配による運転時分の略算を行なえば、時間短縮が見られる(表省略)。

⑧ 主要勾配改良区間完成後の東北幹線経路の換算延長比較および運転時分比較：

以上の主要勾配改良区間のうち関係あるものを入れて、東北幹線経路の比較および運転時分の略算を行なったものが表一6である。

これを見れば、主要区間改良後は、上野～青森間の換算延長は最短なものから並べれば、

- ㊤ 上越裏幹線経由 ㊤ 常磐線経由
- ㊤ 東北本線 ㊤ 奥羽本線

の順となる。東北本線が常磐線経由よりやや良くなるの

は、丸森線新設の効果であり、また奥羽本線が板谷峠をなおせば、現在の東北本線経路と大差無くなり、将来東北諸幹線がつまって来た時は、奥羽本線も幹線として使用し得ようになる。

運転時分の略算は改良後も、

- ㊤ 常磐線経由 ㊤ 東北本線経由
- ㊤ 上越裏幹線 ㊤ 奥羽本線

の順となり、旅客列車の速さとして常磐線の優位は変わらない。改良後に時間がやや遅くなるのもできるのは補機が取れるためである。以上、東北幹線の諸経路を例にとり、勾配改良の影響を例示したが、輸送の隘路をなす峠の区間の勾配改良がいかに有効かが明白である。

5. 結 言

以上を要約するに、序説に述べたるがごとくに、鉄道の特性は、大量、廉価、迅速、安全の輸送にあり、その使命を将来ともに発揮するためには、距離が最短で、輸送単位が大きく、しかも単位当り設備馬力とエネルギー消費量が少なく、かつ到達時間が短いことが必要であり、この中で、線路の保有すべき本質的諸条件のうち、距離以外はいずれも線路の勾配が主要な制因となるから、路線選定における勾配の研究ははなはだ重要である。

この勾配選定の基礎的研究については、在来、線路の平均抵抗による換算延長比較の方法と、スピードカープによる方法とがある。

比較表(未着工のもの)

(C 62, 500 tけん引, 標準速度 45 km/h の場合)

最小曲線半径 (m)	総仕事量 (kg-m)		換 算 率			換 算 延 長 (km)			エネルギー-石炭換算 (kg)			所要時分 (分)
	下レ	上レ	下レ	上レ	平均	下レ	上レ	平均	下レ	上レ	平均	
200	205.230	449.360	2.69	6.49	4.73	82.09	179.74	130.92	1.54	3.39	2.47	38.0 (補機)
400	67.676	325.492	1.07	5.13	3.105	27.07	129.40	78.24	0.51	2.43	1.47	35.0
400	335.000	364.000	4.123	4.480	4.302	134.0	145.6	139.8	2.71	2.74	2.73	44.5 (補機)
400	196.223	312.821	2.29	3.65	2.97	78.49	125.13	101.81	1.47	2.36	1.92	47.0
300	332.000	388.000	2.152	2.515	2.33	132.80	155.20	144.0	2.68	2.94	2.81	83.0 (補機)
600	170.017	281.348	1.06	1.76	1.41	68.01	112.54	90.28	1.27	2.10	1.685	86.5
250	632.000	438.000	6.214	4.309	5.26	252.8	175.2	214.0	4.75	3.29	4.02	55.6
400	383.770	179.046	3.040	1.418	2.23	153.51	71.62	112.565	2.90	1.34	2.12	67.5
400	242.385	221.817	2.993	2.739	2.866	96.954	88.727	92.841	1.82	1.65	1.74	4.51 (補機)
400	198.189	176.322	2.424	2.157	2.290	79.276	70.529	74.903	1.48	1.31	1.39	4.51
400	235.000	509.000	2.24	4.90	3.57	93.2	203.6	148.4	1.8	3.8	2.8	56.4 (補機)
400	38.018	289.971	0.419	3.195	1.807	15.207	115.968	65.588	0.29	2.18	1.235	49.5
300.12	61.220	250.527	1.501	6.045	3.781	24.880	100.230	62.690	0.46	1.88	1.17	23.5 (補機)
600	7.250	221.860	0.168	5.130	2.649	2.900	88.744	45.822	0.06	0.67	0.365	24.5

換算延長比較法については、その諸設定条件については、機関車の型式、加速度などの仮定に多少無理な点がある。また、上下方向を平均しているが、これは元来別物である。しかも計算が面倒であり、また勾配強度は路線選定に最も重要な要因であるのに、これが表面に現われないので、直観を主体とする路線選定の業務に対して適当であるとはいいいにくい。

これに対してスピードカーブの方法は、理論的には全く正しいが、結果は端からの連続作業の結果でなければ現われず、しかも別の原因によって同一の結果が現われることがあり、かつ作業員自身は、路線の諸条件がよくわかるが、一般に路線選定を担当する高級技術者は、スピードカーブ作図の作業を自らはしないので、役立つたないことが多い。

そこで、著者の考案により、加速度一定の場合の速度距離曲線が一定なることを利用し、この速度をパラメーターとして、けん引トン当りの列車の動輪周引張力と、同じくけん引トン当りの運転抵抗と線路抵抗とを同じ距離の座標の上に載せた線路運転抵抗図を作り、またこれに関係の計算を図表化して、線路上の運転に関するほとんどあらゆる性質を知ることができた。これによって、簡単に線路換算延長を計算し得るとともに、本図により直

接路線選定に関する諸種の事項を知り得て、勾配の選定が合理的にかつ容易にできる道を開くことができた。

最後にこれを展開し、まず勾配選定の基本的問題を解明し、次に戦時中、著者が原案を作り実施した幹線の勾配改良の例について、本法により解明した。また本法によって簡単化された線路換算延長の計算を、東北諸幹線の線路比較に適用して、その意義を明らかにした。なおここに運転時分および、動力消費量の、より実際の算出の方法として「平均上り勾配」なる新定義を作り、東北諸幹線の例について計算に利用した結果、運転時分の略算法として適当らしきことを実証した。

最後に著者の発案、研究した全国幹線の勾配改良一覧表につき、その重要なものを取り上げて解説し、これと将来実施した場合、東北幹線の経路の変容を示し、幹線の勾配改良の意義あることを明らかにしたのである。

以上本法を利用する科学的な路線勾配の選定方法は、今後の鉄道ならびに交通技術の発展に役立つものであることを信ずるものである。

【付記】 以上の本論文の作成に関しては、その構成に対し東大教授 八十島義之助氏の御指導、また作成作業については、当時国鉄建設局の野沢太三氏をはじめ、線増課 菊田氏、建設課 石崎氏、阿部氏、角田氏その他関係各位の絶大なる御協力を得たことに対し、ここに厚く謝意を表するものである。

参考資料、規程、文献

著者	論文名	発行所	年月
達 112:	列車走行抵抗及線路換算延長算出法	国 鉄	大 5. 2.21
建設局計画課:	列車抵抗による線路換算延長算出法	"	"
達 414:	運転取扱心得(運転篇)	"	昭 23. 8. 5
運輸省令第5号:	日本国有鉄道運転規則	"	昭 30. 3.12
鉄道省令第2号:	日本国有鉄道建設規程	"	昭 4. 7.15
国鉄建設規程調査委:	日本国有鉄道構造規程(案)	"	昭 30.12. 1
達 815:	国有鉄道線路の曲線及勾配標準	"	大 15.10. 1
達 63:	列車の設定及び指令手続	"	昭 31. 2.10
運列第277号:	けん引定数及び基準運転時分査定標準	"	昭 33. 6. 6
線算22:	換算線路延長算出法	"	昭 34. 6
国鉄各支社:	基準運転時刻表	"	"
各支社総支配人:	機関車牽引定数表	"	"
工 作 局:	国鉄車輛諸元一覧表	" 昭 35 年版	昭 35. 6
"	ディーゼル動車諸元一覧表	"	昭 32. 2
臨時車両設計事務所:	" 追録	"	昭 34. 2
動力近代化委員会:	動力近代化委員会資料	"	昭 34. 6
運輸調査局:	ドイツ連邦鉄道列車運行費計算規程 Dienstvorschrift für die Berechnung der Kosten einer zugfahrt 略称 Zuko	運輸調査第9集	昭 31. 3
中部支社 機関車課:	運転時分査定上の経済的基礎について(2) (運転経費よりみた経済速度)	運転業務研究会第2部資料	昭 35. 9
運輸局列車課:	機関車荷重曲線	"	昭 31.
機関車工学会:	機関車の構造及理論 上下	交友社	昭 25. 4
桑原弥寿雄:	路線測量	オーム社	昭 26.11.15
桑原弥寿雄:	鉄道建設技術講座	土木学会誌	昭 28.4~29.8
桑原弥寿雄:	線路選定小史	"	昭 31. 3
小野諒兄:	鉄道線路選定及び建設	鉄道時報局	昭 31. 9.12
大木利彦:	線路選定	鉄道工学会	昭 31.10.12
内田富彦:	輸送計画論	交通書房	昭 31. 8.10
野原英四郎:	列車運動力学入門	電気書院	昭 33.11. 1
一色左右門:	実務運転理論	中央書院	昭 31. 3.15
横堀進:	鉄道車輛工学	共立全書96	昭 30. 2. 5
片平信貴:	道路工学	共立全書116	昭 31. 5.15
Wilhelm Muller:	Eisenbahnanlagen und Fahrdynamik	Springer Verlag Zweiter Band	1953
Clement C. Williams:	The Design of Railway Location	John Wiley & Sons Inc.	1924
Erich Giese		N.Y. Second Edition	
Otto Blum:	Linienführung	Julius Springer Berlin	1925
Kurt Risch:		Verlag	

(原稿受付: 1961. 5. 6)

STUDY ON DETERMINATION OF GRADE IN RAILWAY LOCATION

By Yasuo Kuwahara, C.E. Member

The characteristic of service required for railway is to supply a speedy and safe mass transport (freight and passengers) at a low cost. To locate a route capable of displaying this characteristic, it is necessary to make the distance as short as possible, grades and curves as few and gentle as possible according to the given geographical conditions, and especially the grades have a greatest effect on the comparison of proposed routes.

In ascertaining the relationship between such route conditions (especially grades) and requirements of train operation, it has hitherto practised to use a method of comparing equivalent length as converted by the mean resistance and a method of load-speed curve. In spite of several merits, these methods are liable to some inconveniences when they are actually applied to route location. The author, therefore, proposes a new method the method using route and operation-resistance diagram.

The route and operation-resistance diagram is

a graph consolidating train resistance-distance curve and tractive effort at wheel-distance curve by the parameter of speed distance curve on straight and level track. This graph enables us to calculate and elucidate various matters concerning the route location (such as equivalent length of route, power consumption, nominal tractive capacity of locomotive, momentum grade and running time) intuitively and easily.

Using this method, the author elucidates fundamental matters of grades in location of route. He takes note, among several factors constituting a grade, of the difference of heights at the starting and ending points, the difference of heights of the up and down train routes, strength and arrangement, the maximum and the minimum height, and makes a careful study of them. Practically, the author also studies the comparison of J.N.R main trunk lines and gives concrete examples for route location study relating to the grade improvement of important trunk line.
