

## 林道の路線線形と車両の燃料消費率\*

岩岡正博\*\*・仁多見俊夫\*\*・南方康\*\*・小林洋司\*\*

### The Alignment of a Forest-Road and the Fuel Consumption of a Vehicle\*

Masahiro IWAOKA, Toshio NITAMI, Yasushi MINAMIKATA and Hiroshi KOBAYASHI

#### I はじめに

林道は素材搬出、機材及び人員輸送等の森林作業の実行や経営管理等に用いられる多くの車両の走行に利用されているが、開設地の地形条件等によって、複雑な線形となることが多い。その線形が、車両の走行速度や燃料消費率、さらには林道路面の損耗等に影響を与えることが考えられる。この影響を明らかにすることは、輸送エネルギーの低減や、作業の安全性を向上させるための方策を見出す上で重要であり、林道の路線線形の評価を行うにも有効である。

これまでに、路面状態の良否が燃料消費率へ及ぼす影響に関する研究<sup>1)</sup>が行われているが、ここでは路面状態の燃料消費率への影響を把握するために、データ採取のための走行路は直線区間を用いており、路線線形の燃料消費率への影響を捉える研究はまだ行われていない。

著者らは、ディレクショナルジャイロ及びバッチカルジャイロ(動揺測定装置)等を使用した、走行車両の挙動を自動的に計測するシステムを作成し、車両の走行軌跡を測量することなく、十分な精度で再現した<sup>2)</sup>。本報告では、ここから得られた走行軌跡を利用して、林道の路線線形が車両の燃料消費率に及ぼす影響について検討を行った。すなわち、まず走行路線の屈曲により車両の燃料消費率が増加することを確認し、曲線の特性を加味した燃料消費率モデルを作成した。このモデル式をもとに、走行路線の屈曲が車両の燃料消費率に及ぼす影響について定量的検討を行った。

#### II 実験の概要

##### 1. 走行試験を行った路線と車両

車両の走行試験は、路面状態、路線線形が異なる次の3路線で行った。

- (1) 東京大学農学部附属秩父演習林内入川林道
- (2) 勿来営林署管内国有林栃沢林道及び周辺の一般道
- (3) 東京大学農学部周辺の一般道及び構内

路線(3)は計測システムの精度確認実験として走行したもので、燃料消費率の計測は行っていない。各路線位置の略図を図-1に示す。解析対象とした各路線の特徴は次の通りである。路線

\* 本研究の一部は第39回日本林学会関東支部大会(1987年10月, 山梨)及び第99回日本林学会大会(1988年4月, 新潟)で発表した。なお研究費の一部は、文部省科学研究費補助金, 一般研究(A)60440014(昭和60~62年度)によった。

\*\* 東京大学農学部林学科

Department of Forestry, Faculty of Agriculture, University of Tokyo.

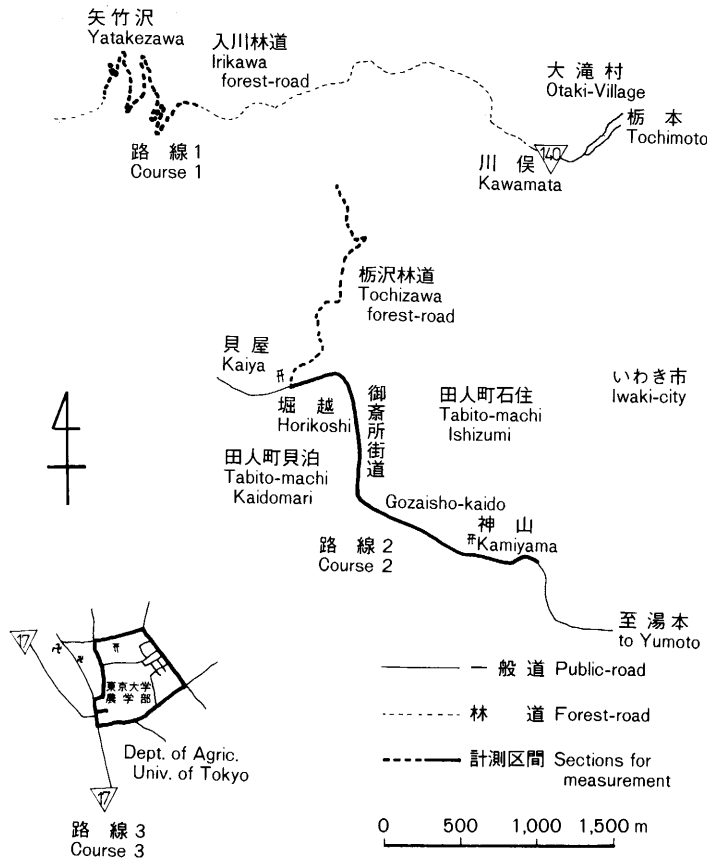


図-1 走行実験用路線略図  
 Fig. 1. The courses for measurement.

(1) 入川林道は勾配急で、路面状態は大部分が悪く、一部勾配の特に急な部分のみコンクリート舗装されており、ヘアピンカーブの多い線形となっている。路線(2) 栃沢林道は上半分は勾配急、下半分は勾配中であり、路面状態は全線未舗装で一部に河道の中を通る悪い部分もある。線形はヘアピンカーブも含み、平均的施業林道といえる。また、その周辺の一般道はほぼ平坦で全線舗装されており、線形は比較的半径の大きい曲線の続く郊外路である。路線(3) 東京大学農学部周辺の一般道及び構内道は上り下りのある市街路で、全線舗装されており、直角の交差点を含む唯一の循環路である。また、信号待ちの停止時間を含む。

実験車両として、ワゴン型普通乗用車(ニッサンキャラバン KHE23, 昭和57年式, 総排気量1.95L, ガソリンエンジン(Z20型), タイヤサイズ185R14, 車両総重量1900kg)を使用した。これは林業作業において、人員輸送に一般に使用されている車両と同種の車両である。

2. 計測した因子及び計測器

計測した因子は、車両の走行状態を示す因子として、

- (1) 車両の走行速度

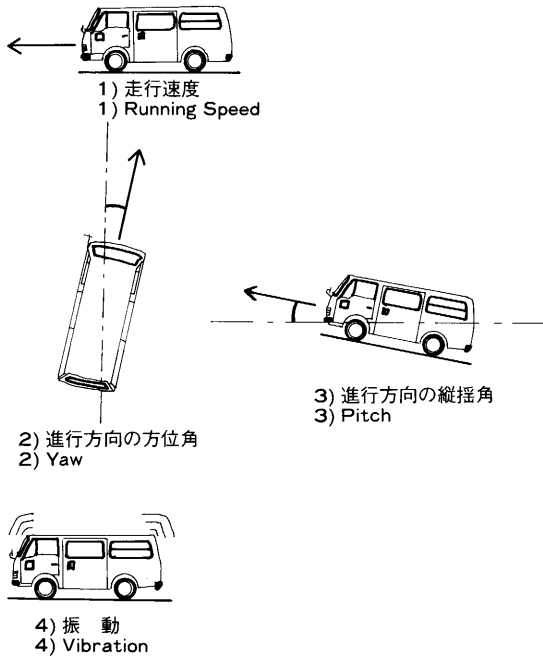


図-2 車両走行状態に関する因子

Fig. 2. Factors representing behaviors of the vehicle.

- (2) 車両の進行方向の方位角 (Yaw 角)
  - (3) 車両の進行方向の縦揺角 (Pitch 角)
  - (4) 車体の振動
- 燃料消費率に関する因子として、
- (5) 燃料消費量

の6種である。車両の走行状態を表す因子を図-2に示す。各因子を計測した計測器(図-3)は次のとおりである。

走行速度：車両のプロペラシャフトの回転数をギヤボックスのスピードメーター用取り出し口からフレキシブルシャフトによって取り出し、羽根車、光電プローブ(Y社製)を介して、F/Vコンバータ(フリークエンシー・ボルテージコンバータ：Y社製, type 3152, 精度±0.5%)によって電圧の変化へ変換した。

Yaw角：車両内に設置したディレクショナルジャイロ(Tok社製, DG51, 精度±0.3 degree)により電氣的に計測した。

Pitch角及びRoll角：車両内に設置したバーチカルジャイロ(Ta社製, TA31N9, 精

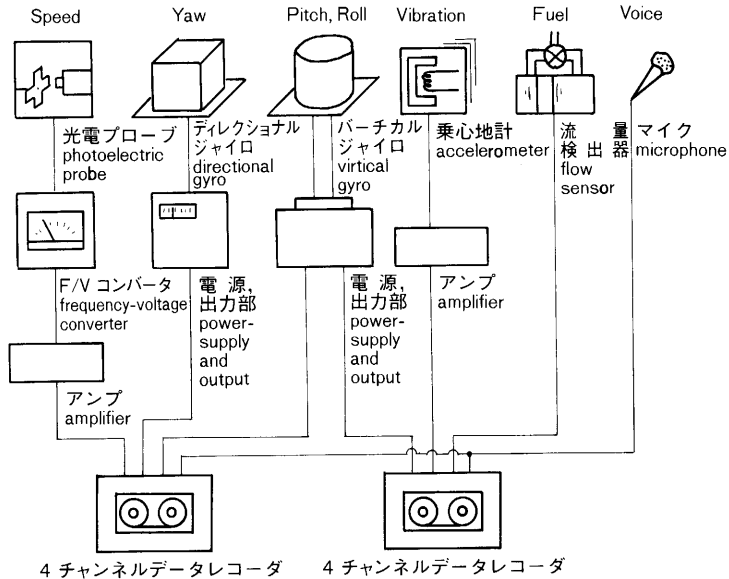


図-3 使用計測器ブロックチャート

Fig. 3. Block chart of the organization of measuring instruments.

度 $\pm 1.5$ degree)により電氣的に計測した。

車体の振動：車両内に設置した乗心地計 (S社製, SRC-D2)により電氣的に計測した。

燃料消費量：車両の燃料ポンプとキャブレターとの間に流量検出器 (Tos社製, TF501, 精度 $\pm 0.5\%$ )を取り付けて電氣的に計測した。

以上の出力を4チャンネルデータレコーダ (Te社製, R61, SN比50 dB)2台に電圧の変化として記録した。また同時に、試験地の状況、計測器の状態及び車両の走行状態をボイスメモとして各データレコーダに記録した。

### 3. 走行実験手順

走行実験の手順は次のとおりである。

- (1) 上記の計測器を車両に設置する。
- (2) 基準点 (主としてスタート地点)を定め、ディレクショナルジャイロのシンクロ (その時点の進行方向を0度とする)及びバーチカルジャイロの0点合わせを行う。
- (3) 走行直前にキャリブレーション (データレコーダに出力の基準値を記録する)を行う。
- (4) 走行中、運転者または助手席同乗者がボイスメモを記録する。
- (5) 基準点の勾配を測量する。

循環路となっている路線 (3)を除いて、各路線上りと下りの往復の計測を行った。

### 4. データサンプリング及び校正

計測したデータはデータレコーダに電圧の変化として記録してあるので、A/Dコンバータ (アナログデジタルコンバータ:C社製, 12ビット, 16チャンネル)を介してパーソナルコンピュータ (N社製, 16ビット)に取り込んだ。その時のサンプリング時間間隔  $\Delta t$  は走行軌跡算出時0.2秒 (5 Hz), 燃料消費率解析では0.05秒 (20 Hz)とした。一般に、林道を走行する際の走行速度は最大30 km/h程度, 一般公道の走行時も最大60 km/h程度であり, 0.2秒間に走行する距離は1.7 m~3.3 mで, 走行軌跡を算出するには十分小さい値であるといえる。また, 燃料消費率の解析においても, 車両に発生する20 Hz以上の振動は機開による2次または3次の弾性振動であり<sup>3)</sup>, 本研究ではこれらを考慮しないので, サンプリング時間間隔0.05秒は路面の状態によって発生する車両の振動を捉える上で十分小さい値であるといえる。

サンプリングしたデータはまず, キャリブレーションで記録した基準値をもとに校正した。基準値はOV,  $\pm 1V$ で, Yaw角だけはディレクショナルジャイロ付属のアンブ部からの出力を用い, その他の計測因子はデータレコーダ付属の基準値印加機能を用いた。校正法は, 始めにサンプリングデータからOVの基準値を減じた。このとき, 車速だけは停止時の記録値を基準値の代わりに使用した。これは, 計測器の性質から停止時にも微少な電圧が発生していたためである。サンプリングデータをsdata, 基準値をそれぞれ0Vをcal0, 1Vをcall,  $-1V$ をcalM1, 校正後のデータをcdataとして

$$\text{temp} = \text{sdata} - \text{cal0} \quad (1)$$

tempが正ならば

$$\text{cdata} = \text{temp} / (\text{call} - \text{cal0}) \quad (2)$$

tempが負ならば

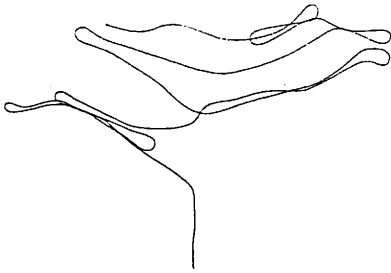


図-4 データ補正前の走行軌跡 (入川林道)  
Fig. 4. Uncorrected locus of the vehicle  
(Irikawa foret-road).

$$cdata = \text{temp} / (\text{cal0} - \text{calM1}) \quad (3)$$

とした。こうして得られた校正後のデータを以後の解析で使用した。

### Ⅲ 走行車両の挙動計測システム

#### 1. 走行軌跡の算出法

走行軌跡の算出法は、平面図、縦断面図とも従来のコンパス測量と同様に考えた。すなわち、走行速度とサンプリング時間間隔  $\Delta t$  との積を従来の斜距離とし、高低角と方位角を用いて測点 (サンプリング時の位置) の座標を算出した。I 番目

の測点の座標を  $(X(I), Y(I))$ 、その時点の速度を  $SP(I)$ 、YAW 角を  $YAW(I)$ 、Pitch 角を  $PIT(I)$  とすれば、

$$\text{走行距離 } L = SP(I) \times \Delta t \quad (4)$$

$$\text{水平距離 } LH = L \times \cos(PIT(I)) \quad (5)$$

となるので、平面図は

$$X(I+1) = X(I) + LH \times \cos(YAW(I)) \quad (6)$$

$$Y(I+1) = Y(I) + LH \times \sin(YAW(I)) \quad (7)$$

縦断面図は

$$X(I+1) = X(I) + L \times \cos(PIT(I)) \quad (8)$$

$$Y(I+1) = Y(I) + L \times \sin(PIT(I)) \quad (9)$$

となる。算出した座標を順につなぐことにより、平面、縦断面図が得られる。また、Yaw 角から角速度を算出することにより、各サンプリング点における曲率半径を算出できる。

$$\text{平均速度は } V = (SP(I+1) + SP(I)) / 2 \quad (10)$$

$$\text{角速度は } \omega = (YAW(I+1) - YAW(I)) / \Delta t \quad (11)$$

と表され、 $\omega = 0$  のときは曲率半径無限大すなわち直進状態であり、それ以外のときは、

$$\text{曲線半径 } R = V / \omega \quad (12)$$

となる。

#### 2. データ補正

計測データには誤差を生じさせる様々な因子が含まれているので、補正が必要である。補正を行う前の走行軌跡を図-4 に示すが、補正の必要性がよく分かる。走行軌跡に影響を及ぼす誤差を生じさせる因子を次に示す。

- (1) データレコーダの入力レベルの調整差
- (2) 各計測器の出力零レベルの誤差
- (3) パーチカルジャイロ出力零レベル調整地点 (基準点) の勾配
- (4) コリオリの力 (転向力)
- (5) ジャイロのフリードリフト

(1) 及び (2) を消去するため、先に述べた校正を行った。

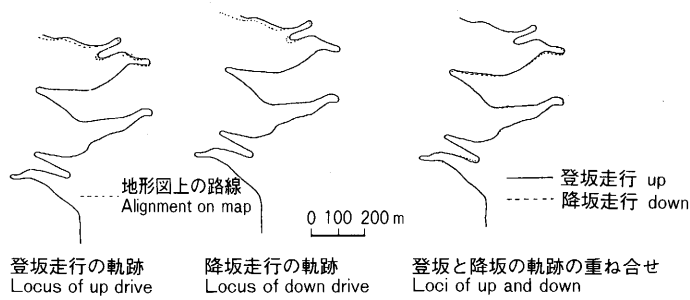


図-5 補正後の走行軌跡と地形図上の路線線形（入川林道）

Fig. 5. Corrected loci of the vehicle and the actual alignment of the road on map (Irikawa forest-road).

(3) の勾配は、現地においてトランシットまたはコンパスにより測量を行ったが、車体の傾きという非常に狭い範囲の測量となったため誤差が大きくなり、走行軌跡を算出してから往路と復路の平均勾配を比較して測量結果を修正した。また、バーチカルジャイロは出力レベルを以下の校正実験を行って求めた。すなわち、 $0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ$ における出力電圧を記録し、それを一回帰させて出力電圧から角度への換算係数  $h$  を算出した。その結果、

$$h = 15.43577 \text{ (}^\circ/\text{V)} \quad (13)$$

となった。

(4) は地球の自転の影響により、ジャイロがジャイロケースの中で回転して原点がずれていくもので、その回転の角速度  $\omega'$  は地球の自転の角速度を  $\omega$ 、測定地の緯度を  $\theta$  として、

$$\omega' = \omega \times \sin \theta \quad (14)$$

と表される。測定地が北緯  $35 \sim 37$  度であることからこの角速度は非常に小さいが、累積されていくため大きい影響力を持つ。

(5) は時間経過と共にジャイロが自然に回転していくもので、これを計測するためフリードリフト試験を行った。すなわち、1時間程ジャイロを連続運転し、一定時間毎の出力を記録した。それを1次回帰した結果から、先のコリオリ力による回転を減じてフリードリフトを算出した。

以上の補正により、後に示す軌跡が得られた。今後の計測に当たっては、計測路線上の一点でバーチカルジャイロ出力零レベルの調整を行った後、往復の走行を行うことにより、得られた縦断軌跡の平均勾配を往路と復路で比較するだけで基準点の勾配を決定することが可能である。この場合、基準点の勾配の測量は省略できる。

### 3. 計測システムの精度

計測システムより得られた走行軌跡の精度の判定は二種類の方法で行った。すなわち、地形図上の路線線形と重ね合わせる方法と、循環路線において閉合比を算出する方法である。

(1) 重ね合わせ法：路線線形 1/5000 地形図上で確認可能で、且つ 1/1000 の林道設計図の入手可能な、路線 (1) 入川林道で行った。走行軌跡を 1/5000 地形図上の路線線形と重ね合わせると、軌跡は道路の幅員の中にはほぼ納まった (図-5)。さらに、走行軌跡と路線線形とにずれが見え始める点を境に路線を分割して考えると、各々の区間毎に軌跡は路線の幅員の中に納まり、1/5000 地形図からは誤差の判断はできなかつた。登坂走行と降坂走行の軌跡はほぼ一致してい

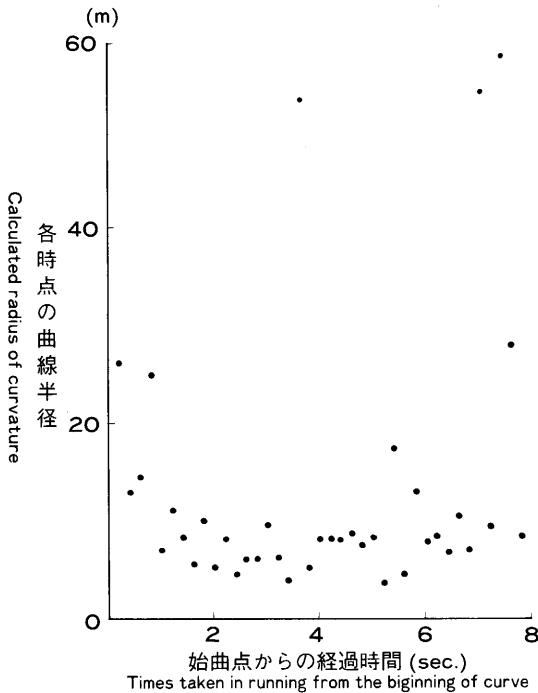


図-6 半径 12 m の曲線区間走行時における始曲点通過後の経過時間と採取データから算出した曲線半径

Fig. 6. The example of relations, times taken in running from the beginning of curve to points on it and the calculated radius of curvature on a curve with the radius of 12 m.

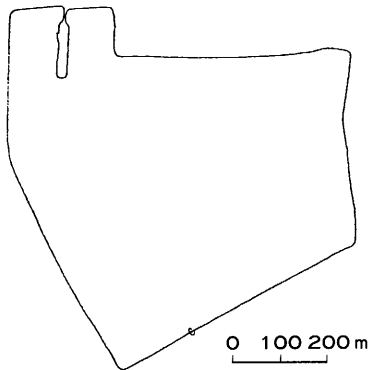


図-7 東京大学農学部周辺の一般道の走行軌跡

Fig. 7. Locus obtained from the data around Dept. of Agriculture, Univ. of Tokyo.

るため、地形図上の路線線形とずれ始める点は両者で一致するが、計測開始点からその点の距離は登坂走行で約 2000 m (約 3300 秒)、降坂走行で約 800 m (約 90 秒) と、大きく異なっていた。また、ずれ始めた点の近辺に横断溝が多かったことから、このずれは累積誤差から生じたものではなく、横断溝の影響によって生じたと推測される。すなわち、

① 横断溝を横切る際の振動によって駆動輪がスリップし、走行速度の計測値に誤差が生じた。

② 車体の Pitch 角の変化が大きくなり、路線勾配との差が大きくなった。

③ 車体が横方向に傾き、Yaw 角の計測値に誤差が生じた。

といった原因が考えられる。

計測データより算出した曲線半径と、走行した路線の曲線半径とを比較した結果、車両走行時の最小回転半径は、路線の曲線半径よりも少し小さいということが分った。例えば、曲線半径 12 m のヘアピンカーブを走行中の車両の最小回転半径は 10 m 前後であった (図-6)。

(2) 閉合比による誤差判定: 路線 (3) 東京大学周辺の一般道 (図-7) は循環路であるので、閉合比  $\epsilon$  を算出した。その結果、

$$\epsilon = 0.000887 < 1/1000 \quad (15)$$

となり、誤差はコンパス測定の許容誤差以下であることが確認できた。

以上の結果より、林道上を走行する自動車の挙動を把握するには当面必要十分な精度が得られたといえる。よって、以下の検討にはこの計測システムによって計測したデータを用いる。

走行軌跡算出プログラムの主要部を後に掲載する (リスト-1)。

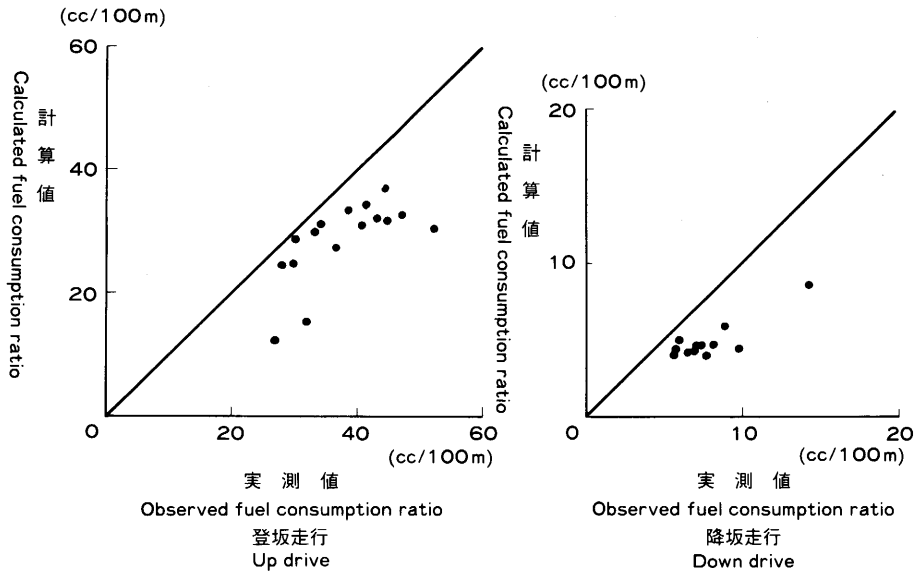


図-8 曲線走行時のデータを直線路モデルにあてはめた場合の計算値と実測値

Fig. 8. Observed fuel consumption ratio on curves and calculated one with the model for straight courses.

#### IV 路線線形と燃料消費率

##### 1. 曲線が燃料消費率に及ぼす影響

林道上を走行する車両の燃料消費率に関する研究として、1986年に南方・仁多見らが提唱したモデル式<sup>5)</sup>がある。これは、路面状態を乗心地係数<sup>1)</sup>をもとにした $\alpha$ 値と呼ぶ指標で表し、路面状態、走行速度、路線勾配の三つの因子から燃料消費率を算出するものであり、直線走行時において十分な精度をもって検討へ用いることができた。この式を直線路モデルと呼び、本研究ではこの直線路モデルをもとに検討を加える。

直線路モデルに曲線走行時データを代入した結果を図-8に示す。同図から、計算値よりも実際の燃料消費率が明らかに増大しており、同一の勾配、同一の路面状態の路線を同一の速度で走行した場合に、線形が曲線の時には直線の時に比べて燃料消費率が大きく増加することが分かる。

車両が走行している路線に曲線区間が存在すると、その手前で減速を行い、通過後に再加速を行う。つまり、曲線走行にはアクセル操作を伴うため、燃料消費率が增大すると考えられる。また、曲線走行時にかかる横方向の加速度によって引き起こされる駆動輪のスリップが、燃料消費率の増加に関わっていると考えられる。これらの影響を明らかにするため、まず曲線の特性を示す各因子と、燃料消費率の増加率との関係を調べた。

##### 2. 燃料消費率算出モデル式

燃料消費率に影響を及ぼすと考えられる曲線の特性として、曲線半径 $r$ と曲線長 $l$ が考えられる。曲線半径 $r$ が小さくなると減速の度合いが大きくなり、また横方向への加速度も大きくなって、燃料消費率が増加すると予想される。また、曲線長 $l$ が長くなることにより、曲線の影響を受け



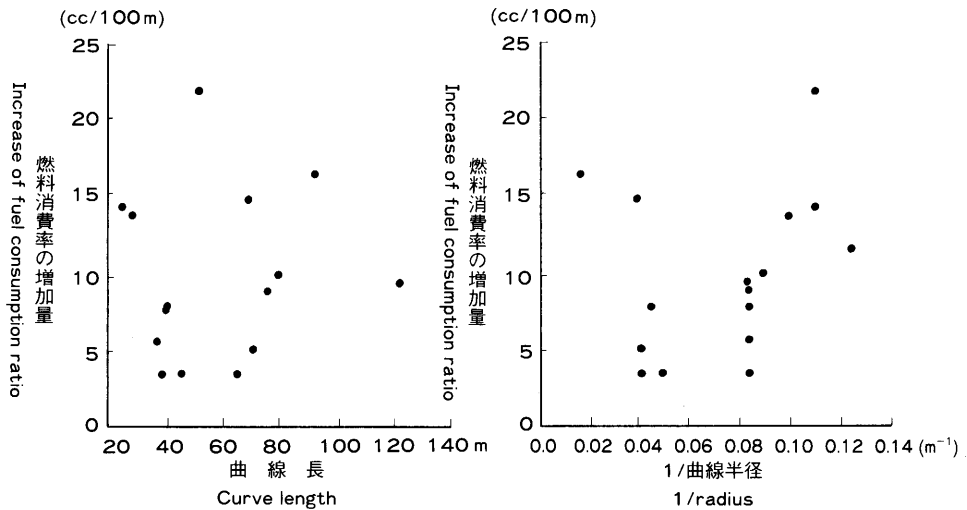


図-9 曲線長、曲線半径と燃料消費率の増加

Fig. 9. The effect of curve length and radius on fuel consumption ratio.

ている時間が長くなり、やはり燃料消費率が増加すると考えられる。曲線走行時の燃料消費率の直線路モデルからの増加量と、曲線半径の逆数及び曲線長との関係をプロットすると、走行速度、路面状態、路線勾配といった因子が一定でないのははっきりとは分からないが、極く弱い相関性が見られる（図-9）。

しかし、曲線半径にもとづいて燃料消費率モデルを考える場合

i) 曲線半径がどんなに小さくても、曲線長が非常に短ければ直線と見なしうる。

ii) 曲線が連続していたり緩急曲線がある場合に、曲線半径をどの様に扱うか。といった問題がある。また、曲線長にもとづいて燃料消費率モデルを考える場合、

iii) 曲線長が長くても、曲線半径が非常に大きければ直線と見なしうる。

iv) よって、曲線と見なすか直線と見なすか、曲線半径による区分を要する。

といった問題である。以上から、曲線半径のみあるいは曲線長のみでモデルを作成するには無理がある。そこで、曲線半径 $r$ の逆数と曲線長 $l$ の積をとることによって求められる曲線の中心角 $\phi$ によって路線の線形を捉えることを考える。

$$\phi = \frac{l}{r} \quad (16)$$

すなわち、中心角が大きくなると、曲線の影響が大きくなり、燃料消費率が増加すると考えられる。また、曲線半径が異なっても曲線通過時の走行速度が変化することにより、曲線の前後に於ける減速と再加速の割合は曲線半径に無関係に一定で、中心角によってのみ変化することが予想される。よって、燃料消費率の増加率は中心角を考えることにより説明できると考え、この曲線の中心角から燃料消費率を算出するモデルを想定した。

モデルを作成するに当たり、直線走行時には直線路モデルに帰着するようにモデルを考えた。直線路モデルでは燃料消費率を算出するのに走行速度、路線勾配、路面状態の三つの因子を考えていた。そこで、曲線の中心角の増加を燃料消費率の増加に結び付けるため、曲線の中心角を路線

勾配の増加として換算することにした。すなわち、実際の路線勾配を  $\theta$  として、

$$\theta' = \theta + k_3\phi \quad (17)$$

となる  $\theta'$  の勾配を持つ仮想路面上を走行することにより、燃料消費率が增加するというモデルとした。車両総重量  $M_g$  (kgw)、車両の転がり抵抗係数を  $\mu$ 、空気抵抗係数  $\lambda$ 、車両前面投影面積を  $G$  (m<sup>2</sup>)、走行速度を  $v$  (km/h)、 $\alpha$  値を  $\alpha$  として、燃料消費率  $F$  は、登坂走行時には、

$$F = k_1 \cdot \frac{1}{A - \mu} \cdot \{B \cdot \lambda \cdot G \cdot v^2 + M_g \cdot (A \cdot \sin(\theta_1 + k_3\phi) + \cos(\theta_1 + k_3\phi) + \mu \cdot (A \cdot \cos(\theta_1 + k_3\phi) - \sin(\theta_1 + k_3\phi)))\} \quad (18)$$

ただし、

$$A = \sqrt{\frac{k_2 \cdot v}{\alpha}} \quad (19)$$

$$B = \sqrt{\frac{k_2 \cdot v}{\alpha} + 1} \quad (20)$$

$k_1, k_2, k_3$  は係数

となる。

降坂走行時は、重力によって増加する車速をエンジンブレーキとフットブレーキを併用して一定に保ち、過度に減速したときだけ運転者が積極的にアクセル操作を行って低下した車速をなるべく速く回復させようとする走行状態を考慮して、

$$F = k_1 \cdot \frac{1}{A - \mu} \cdot \{M_g \cdot (B \cdot \gamma + g \cdot ((A \cdot \sin(\theta_1 - k_3\phi) + \cos(\theta_1 - k_3\phi)) \cdot \mu - (A \cdot \sin(\theta_1 - k_3\phi) - \cos(\theta_1 - k_3\phi)))) + B \cdot \lambda \cdot G \cdot v^2\} v \quad (21)$$

ただし、

$$A = \sqrt{\frac{k_2 \cdot v}{\alpha}} \quad (22)$$

$$B = \sqrt{\frac{k_2 \cdot v}{\alpha} + 1} \quad (23)$$

$k_1, k_2, k_3$  は係数

というモデル式を想定した。

実際の計算の際には、計測区間から 200 m 区間を抽出し、その区間に含まれる曲線の半径及び曲線長を計測して、式(16)より中心角を算出した。それとともに、その区間内の平均速度、平均勾配、 $\alpha$  値を算出して、最小二乗法により上記モデル式のあてはめを行った。

### 3. モデル式の検討

最小二乗法によって求めた係数  $k_1, k_2, k_3$  及びモデル式の適合の良さを表す残差の標準偏差  $\sigma$  の値を表-1 に示す。モデル式の適合度を  $\chi^2$  検定で調べた結果、登坂走行、降坂走行とも有意水準 10% 以上\*で適合していた。よって、このモデル式は走行車両の燃料消費率を非常に良く表して

\*  $\chi^2$  検定では、「両者の分布は同一の母集団より抽出されたものである」という帰無仮説を立てて検定するため、この結果は有意水準 10% でも仮説が捨てられず、両者の分布に差があるといえないということである。

表-1 モデル式のパラメータ値と実測値と計算値との残差の標準偏差  
Table 1. Parameters of the model and standard deviation of residuals

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$\sigma$
登坂車両 up driving vehicle	1.58231E-02	1.52473E+02	9.30936E-03	8.14337
降坂車両 down driving vehicle	3.53797E-04	2.26412E+02	3.45776E-02	2.97386

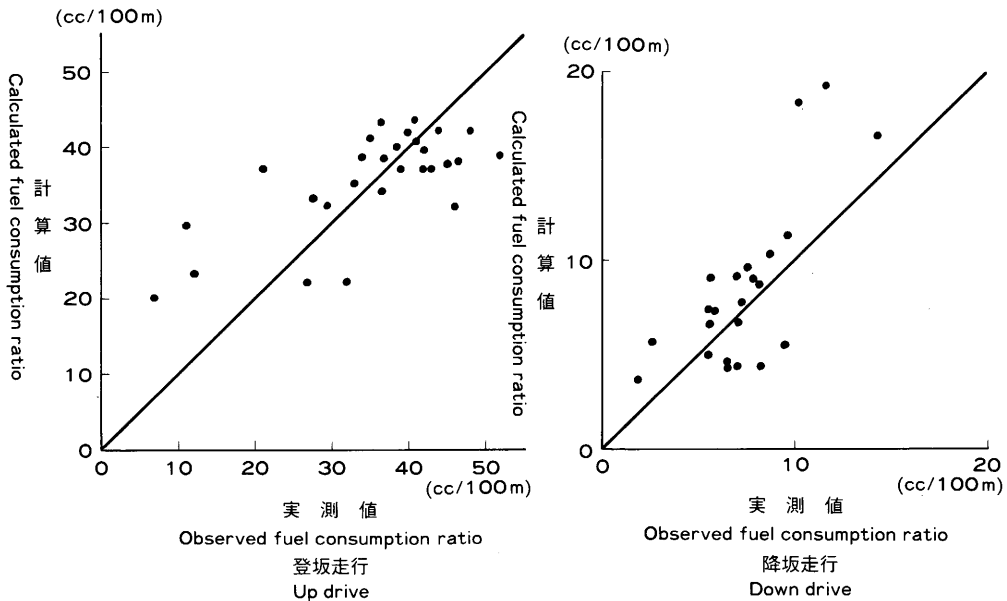


図-10 燃料消費モデルの適合

Fig. 10. Conformity of the model to the observed fuel consumption ratio.

おり、燃料消費率の検討に十分使用できるといえる。図-10 に燃料消費率の実測値とモデル式による計算値とを示す。

曲線中心角の路線勾配への換算係数  $k_3$  の値より、登坂走行において中心角  $90^\circ$  の曲線が存在すると路線勾配が約 1.5%、中心角  $180^\circ$  の曲線が存在すると路線勾配が約 2.9% もそれぞれ増加したのと同じことになる。

降坂走行においてはモデルの仮定から、路線勾配が大きいほど重力による加速が大きいため、アクセルを開ける回数が減少し燃料消費率が減少する。中心角を路線勾配に換算したので、中心角の増加により路線勾配は減少し、燃料消費率は増加する。中心角  $90^\circ$  の曲線が存在すると路線勾配が約 5.4%、中心角  $180^\circ$  の曲線が存在すると路線勾配が約 10.9% もそれぞれ減少したのと同じことになる。この結果より、降坂走行の方が換算係数が大きく、すなわち曲線の影響が大きいことが分かる。降坂走行においてエンジンブレーキ使用中は燃料消費率が小さいため、曲線における加速、減速によるアクセル操作の影響が、常にアクセルを開けている登坂走行に比して顕著に現れたものと推測される。

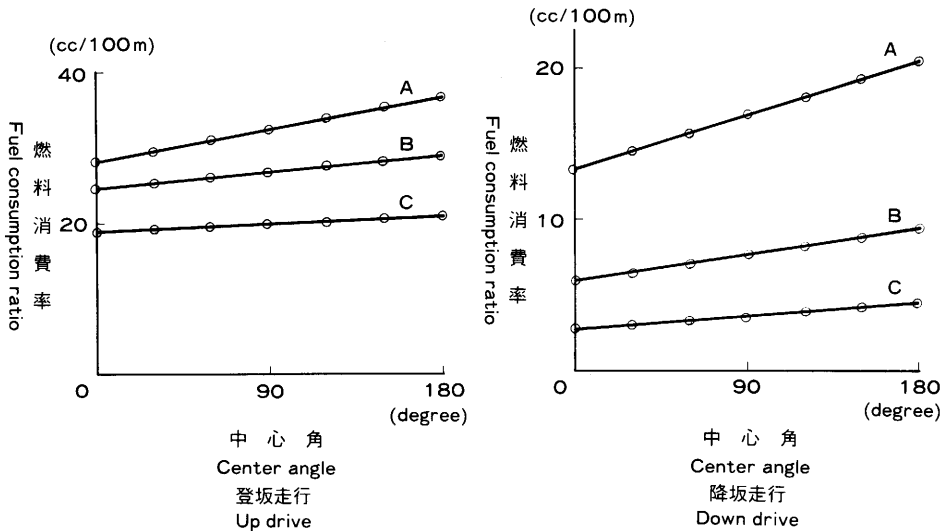


図-11 中心角の変化による燃料消費率の変化

Fig. 11 Fuel consumption ratio varied by increase of center angle.

- A: 車速 40 km/h, 勾配 4%,  $\alpha$  値 5  
speed grade  $\alpha$ -value
- B: " 20 km/h, " 9%, " 10
- C: " 10 km/h, " 14%, " 15

表-2 車速, 勾配,  $\alpha$  値の変化による曲線が燃料消費率に及ぼす影響の変化

Table 2. The effect of the center angle on fuel consumption ratio of a vehicle and running speed, road inclination, and  $\alpha$  value

車速 (km/h) running speed	勾配 (%) road inclination	$\alpha$ 値 $\alpha$ -value	燃料消費率の増加率 (%) increase in percentage of fuel consumption ratio		
			登坂走行 up driving	降坂走行 down driving	往復 up and down
20	9	10	17.5	61.5	25.9
20	9	5	19.6	66.7	28.8
20	9	15	16.2	58.0	24.1
20	4	10	25.3	47.8	32.1
20	14	10	13.4	85.3	21.7
10	9	10	15.4	55.4	22.9
40	9	10	18.7	66.4	27.6

車速, 勾配,  $\alpha$  値を一定にしたときの中心角の変化による燃料消費率の変化を図-11 に示す。標準的な走行状態を表す A, B, C 3 種類の架空路線を想定し, モデル式によって計算した。すなわち, 路線 A は車速 40 km/h, 勾配 4%,  $\alpha$  値 5 であって, 比較的平坦な路線状態の良い郊外路, 路線 B は車速 20 km/h, 勾配 9%,  $\alpha$  値 10 であって, 多少勾配はあるが路面状態はあまり悪くない幹線林道, 路線 C は車速 10 km/h, 勾配 14%,  $\alpha$  値 15 であって, 勾配急で路面状態の悪い低級林道を想定した。同図から, 路線 A では登坂走行で中心角 90°の曲線が存在すると 15.6%,

中心角 180°の曲線が存在すると 31.2%燃料消費率が増加し、降坂走行で中心角 90°の曲線が存在すると 26.7%、中心角 180°の曲線が存在すると 53.3%燃料消費率が増加することが分かる。路線 B では登坂走行で中心角 90°の曲線が存在すると 8.8%、中心角 180°の曲線が存在すると 17.5%燃料消費率が増加し、降坂走行で中心角 90°の曲線が存在すると 30.8%、中心角 180°の曲線が存在すると 61.5%燃料消費率が増加することが分かる。路線 C では登坂走行で中心角 90°の曲線が存在すると 5.6%、中心角 180°の曲線が存在すると 11.2%燃料消費率が増加し、降坂走行で中心角 90°の曲線が存在すると 33.7%、中心角 180°の曲線が存在すると 67.3%燃料消費率が増加することが分かる。ここでも先の換算係数の差を反映して降坂走行の方が燃料消費率の増加率が大きくなっている。以上の結果より、林道を開設する際に極力曲線の少ない線形にすることにより、消費燃料を節約することが可能である。

次に、車速、勾配、 $\alpha$  値をそれぞれ独立に変化させた時の、直線走行時の燃料消費率に対する、中心角 180°の曲線が存在した場合の燃料消費率の増加率を表-2 に示す。これもモデル式による計算結果である。勾配を変化させた場合、登坂走行では勾配が小さい方が、降坂走行では勾配が大きい方が曲線の影響が大きくなっている。また、往復で考えた場合、燃料消費率の絶対量の多い登坂走行の効果が強く、勾配が小さい方が曲線の影響が大きくなっている。 $\alpha$  値は登坂走行、降坂走行とも小さい方が曲線の影響が大きくなっている。以上より、これら 2 つの因子が燃料消費率に与える影響は、曲線半径が与える影響と独立していると考えられる。すなわち、これら 2 つの因子の変化によって燃料消費率が小さくなる時に、相対的に曲線の影響が大きくなると考えられる。よって、消費燃料の節約のためには路面状態の改善は言うまでもないが、路線勾配と路線線形の間には最適値が存在することが考えられる。これを求めることにより路線設計の一つの基準となりうるが、今後の課題として残される。

これらとは逆に、車速は大きくなったときに曲線の影響も大きくなっており、車速と曲線の中心角の大きさは燃料消費率の増加に相乗効果があるといえる。よって、地形の関係で曲線が多くなることが予想される路線では、走行速度を低く保った方が燃料消費率が低くなるといえる。また、今後運行所用時間等と共に検討を加えることにより、林道上の車両の経済的に適切な走行速度が得られるであろう。

同表を総合的に見ると、登坂走行で曲線の影響が最大になるのは勾配が小さいときで、燃料消費率の増加率は 25.3%となっている。また、曲線の影響が最小になるのは勾配が大きいときで燃料消費率の増加率は 13.4%となっている。降坂走行で曲線の影響が最大になるのは勾配が大きいときで 85.3%となり、曲線の影響が最小になるのは勾配が小さいときで 47.8%となっている。このように、路線勾配の影響は登坂走行と降坂走行とで相殺するが、往復走行を考える場合、先にも述べたように燃料消費の絶対量に勝る登坂走行の効果が大きくなり、往復走行で曲線の影響が最大になるのは勾配が小さいときで 32.1%となり、最小になるのは勾配が大きいとき 21.7%となっている。すなわち、路線勾配が大きいときと小さいときでは曲線の燃料消費率への影響が 10%以上も変化している。よって、路線の平面線形の燃料消費率への影響を考える場合、路線勾配が重要な要素となる。例えば北海道のような比較的緩やかな地形では路線の平面線形が路線設計上重要な要素となるが、比較的急な地形では先の路線線形と路線勾配との最適値を算出することが重要となる。

## V おわりに

林道を走行する車両の燃料消費率は、路線の屈曲の仕方によって往復で4割近くも増加する場合があることが明らかになった。また、その影響は、走行速度が高いほど大きいことも明らかにすることができた。

林道経営において林道走行車両の燃料費が占める割合はあまり大きいものではないので個別的な作業では目立たないが、全国的規模で考えると決して小さいものではない。本研究において提案したモデル式によって、これまで別個に捉えられてきた林道の路線勾配、路面状態、路線線形を一つの指標で総合的に表すことができ、エネルギー消費の面から適切な林道の構造を検討することが可能となるので、極めて有益である。

本論では対象とした車両は乗用車であったが、今後運材車両も対象とすることにより、より実際の施業に近い検討を行うことが可能である。またこれによって林道の一つの評価基準を与えることも可能であり、林道開設時の計画路線の比較や、運材経路の決定等において指針となり得るであろう。例えば、運材作業では登坂走行時は空車で、降坂走行は実車であることが多いが、車両の積載荷重によって燃料消費率が増加することが考えられる。よって、降坂走行時の燃料消費率を中心に考えると、仮説ではあるが、路線勾配を大きくすることによって路線上の曲線区間を少なくすることで、エネルギー消費の面で有利になるということも考えられる。

本研究においてモデル式のパラメータ値の決定は、東京大学大型計算機センターのM-680計算機によって最小二乗法パッケージプログラムSALSを用いて行った。また、 $\alpha$ 値の算出及び基礎的な相関性の検討は、同センターのVAX8600計算機によって、UNIX上のシステムSを用いて行った。端末プログラムとしては、東京大学地震研究所のEterm<sup>4)</sup>を用いた。

なお、実験を行うに際し御協力いただいた東京大学農学部附属秩父演習林の平野氏他職員の方々、並びに再度にわたって御協力いただいた倭文林業(株)及び、貴重な計測器を御貸しいただいた森林総合研究所生産技術部に厚く御礼申し上げます。

## 要 旨

林道の路線線形が車両の燃料消費率に与える影響について検討を行った。まず、ディレクショナルジャイロ及びバーチカルジャイロ(動揺測定装置)等を使用した、走行車両の挙動を自動的に計測するシステムを作成した。そこから得られた走行軌跡は、1/5000地形図上の路線線形と重ね合わせた場合はほぼ一致した。また、循環路となっている路線で算出した閉合比は1/1000以下で、コンパス測定の許容誤差より小さいことが確認できた。この走行軌跡から路線上の曲線の中心角を算出し、平均速度、平均勾配、路面状態とあわせて、車両の燃料消費率を算出するモデル式を作成した。このモデル式を最小二乗法を用いて当てはめた結果、 $\chi^2$ 検定において有意水準10%以上という高い適合が得られた。またモデル式を用いて試算した結果、林道を走行する車両の燃料消費率は、路線の屈曲の仕方によって4割近くも増加する場合があることが明らかになった。

林業経営において林道走行車両の燃料費が占める割合はあまり大きいものではないので個別的な作業では目立たないが、全国的な規模で考えると決して小さいものではない。林道の路線勾配、路面状態、路線線形を一つの指標で表すことができたことは、エネルギー消費の面から適切な林

道の構造を検討することが可能となり、有意義である。今後、運材作業の工期まで含めて検討することにより、林道行時の経済速度等も考えられ、林道の総合的評価が可能になる。

**キーワード：** 路線線形, 車両挙動計測システム, 燃料消費率, モデル式, 路線中心角

#### 引用文献

- 1) 平尾 収・近藤政市・亘理 厚・山本峰雄：理論自動車工学, 346pp., 1958.
- 2) 岩岡正博・仁多見俊夫・南方 康：車両走行時の挙動計測に関する研究. 39回日林関東支論, 251-252, 1987.
- 3) 上飯坂実・南方 康・峰松浩彦：林道路面の良否に関する研究. 林業土木施設研究所報, 4, 3~22, 1974.
- 4) 額縁一起・鷹野 澄：その後の Eterm—Eterm # 第3版一. 東京大学大型計算機センターニュース, 19(12), 55-63, 1987.
- 5) 南方 康・仁多見俊夫・酒井秀夫・伊藤幸也：林道の路面状態と自動車の燃料消費率. 日林誌. 68, 95-104, 1986.

(1988年4月30日受理)

#### Summary

The effect of the forest-road alignment on the fuel consumption ratio of vehicles was investigated. First, the automatic measuring system with directional and vertical gyro was developed. The loci of the vehicle reproduced with the system were well-fitted to the actual alignment of the measured forest-road. As the ratio of closure calculated with the system was less than 1/1000, it was less than the maximum permissible limit of errors in the compass survey. Calculating the center angles of the roads from the loci, the theoretical model was developed, with which the fuel consumption ratio of the vehicle should be calculated from the center angle, the means of the vehicle's speed, the means of the measured road grads, and the roughness of the road surface. The least-squares fitting was applied to the model to fit. The model was well-fitted in 10% of the significant level in the chi-square examination. Calculating with the model, it becomes clear that the fuel consumption of the vehicle running up and down on forest-roads increases in the ratio of almost 40% by the arrangement of the curves on the road.

The ratio of fuel cost in the logging operation cost is not large, but the sum total of its fuel cost is not small in the scale of the whole country. It is worthwhile that we can judge the quality of the forest-road system with three factors, namely, road grade, road surface and road alignment, as it is made possible to structure of the forest-road with energy consumption. The forest-road would be evaluated considering the economical speed of vehicles by investigating log-transporting production.

**Key words:** forest road alignment, automatic measuring system, fuel consumption ratio, model, center angle

リスト-1 A/D データから走行軌跡を算出するプログラム

List 1. Program to calculate loci of vehicles from A/D data

```

/* *****
*      A/Dデータから走行軌跡を算出するプログラム      *
*      (主要部分)                                       *
*      (C)by Masahiro Iwaoka 1988.4 *
***** */

/* *****a_d.h A/Dデータを扱うヘッダーファイル***** */
#define  MAXD  2500      /*Maximum of data */
#define  MAXCAL 100     /*Maximum of calibration data */
#define  ICH   6        /* Number of input channel */
#define  OCH   4        /* Number of output channel */
#define  INTVAL 0.2     /* Sampling interval */
#define  PIE   3.141592654 /* Value of Pie */

/* *****A/D データから走行軌跡を算出する***** */
#include "stdio.h"
#include "a_d.h"
double a_dd[ICH][MAXD];
int    xy[OCH][MAXD];

main(){
    void value();
    void zahyo();
    int m,i,j;

    printf("\n 取り扱うデータ\n");
    m=infld(a_dd);          /* ファイルからintデータをdoubleとして配列に読み込む */

    printf("\n  キャリブレーション\n");
    calib(a_dd,m);        /* キャリブレーションを行う */

    value(a_dd,m);        /* 電圧をデータの値に変換 */

    zahyo(a_dd,xy,m);     /* 座標を算出 */

    locus(m,xy);         /* 軌跡を描く */

    outfli(xy,m);        /* 算出した座標をファイルに書き出す */

```



```

/* ****calib.c calibration を行う**** */
calib(a_dd,m)
    double a_dd[ICH][MAXD];
    int m;
{
    void cal_lev();
    double cal_0[ICH],cal_1[ICH],cal_m1[ICH];
    double hcal_0[ICH],hcal_1[ICH],hcal_m1[ICH];
    register int i,j;

    printf(" データレコーダーによるキャリブレーション %n");
    cal_lev(cal_0,cal_1,cal_m1);
    printf("%n ホリゾンタルジャイロによるキャリブレーション%n");
    cal_lev(hcal_0,hcal_1,hcal_m1);

    for(j=0;j<m;++j){                /* Speedの校正 */
        a_dd[0][j]-=hcal_0[0];
        if(a_dd[0][j]>=0.0)
            a_dd[0][j]/=(cal_1[0]-cal_0[0]);
        else
            a_dd[0][j]/=(cal_0[0]-cal_m1[0]);
    }

    for(j=0;j<m;++j){                /* Yaw角の校正 */
        a_dd[1][j]-=hcal_0[1];
        if(a_dd[1][j]>=0.0)
            a_dd[1][j]/=(hcal_1[1]-hcal_0[1]);
        else
            a_dd[1][j]/=(hcal_0[1]-hcal_m1[1]);
    }

    for(i=2;i<ICH;++i){              /* その他の校正 */
        for(j=0;j<m;++j){
            a_dd[i][j]-=cal_0[i];
            if(a_dd[i][j]>=0.0)
                a_dd[i][j]/=(cal_1[i]-cal_0[i]);
            else
                a_dd[i][j]/=(cal_0[i]-cal_m1[i]);
        }
    }
}

```

```

    }
}
return(0);
}

/* ****ファイルから calibration データを読み込んで平均**** */
void cal_lev(level_0,level_1,level_m1)
    double *level_0,*level_1,*level_m1;
{
    FILE *fpi,*fopen();
    int fclose();
    char fname[80];
    int m;
    register int i,j;
    int ch0,ch1,ch2,ch3,ch4,ch5;
    int cal[ICH][MAXCAL];
    double heikin();
    double level[ICH];

    printf(" ファイルの名前は? ");
    scanf("%s",fname);

    if((fpi=fopen(fname,"r"))==NULL)
        perror("          File %s can not open!\n",fname);

    for(i=0 ; i<3 ; ++i){
        fscanf(fpi,"%d",&m);
        for(j=0;j<m;++j)
        {
            fscanf(fpi,"%d %d %d %d %d %d",&ch0,&ch1,&ch2,&ch3,&ch4,&ch5);
            cal[0][j]=ch0 ; cal[1][j]=ch1 ; cal[2][j]=ch2 ;
            cal[3][j]=ch3 ; cal[4][j]=ch4 ; cal[5][j]=ch5 ;
        }
        for(j=0 ; j<ICH ; ++j){
            level[j]=heikin(cal[j],m);
            switch(i){
                case 0 :
                    level_0[j]=level[j];
                    break;
                case 1 :

```

```

                                level_1[j]=level[j];
                                break;
                                case 2 :
                                    level_m1[j]=level[j];
                                    break;
                                }
                            }
                    }
                fclose(fpi);
            }

/* ****平均値を求める**** */
double heikin(hen,m)
    int *hen,m;
{
    int i;
    int sum=0.0;
    double lev;

    for(i=0;i<m;++i)
        sum+=hen[i];
    lev=(sum+0.0)/(m+0.0);
    return(lev);
}

/* ****電圧をデータの値に変換**** */
#include "a_d.h"
#include "math.h"
void value(hen,m)
    double hen[ICH][MAXD];
    int m;
{
    register int i;
    double sin();
    double fai;
    double huko,sita;

    printf("\n 実験地の北緯? (度) ");
    scanf("%lf",&fai);
    fai*=PIE/180.0;

```

```

huko=0.000023148148*sin(fai);

printf("%n スタート地点の傾斜? (度) ");
scanf("%lf",&sita);

for(i=0;i<m;++i){
    hen[0][i]=68.00511802/0.36;          /* 0.1mmプロッターで1/1,000 */
    hen[1][i]+=(huko-0.00001033349541)*INTVAL*i; /* xπラジアン */
    hen[1][i]*=PIE;
    hen[2][i]-=0.00003754249*INTVAL*i;
    hen[2][i]=(hen[2][i]*15.43577+sita)*PIE/180.0;
}
}

/* ****deg_rad.h 度とラジアンの相互変換**** */
#define deg_to_rad(x) ((x)*PIE/180.0)
#define rad_to_deg(x) ((x)*180.0/PIE)

/* ****座標を算出する**** */
#include "a_d.h"
#include "math.h"
#include "deg_rad.h"

void zahyo(hen,xy,m)
    double hen[ICH][MAXD];
    int xy[OCH][MAXD];
    int m;
{
    int i,j;
    double sin(),cos();
    double length,sum_leng=0;
    char c;
    register double hol_length,tan_length,sita;

    for(j=0;j<OCH;++j)
        xy[j][0]=0;

    for(i=0;i<m-1;++i){
        length=hen[0][i]*INTVAL;
        sum_leng+=length;

```

```
hol_length=length*cos(hen[2][i]);
xy[0][i+1]=xy[0][i]+hol_length*sin(hen[1][i]);
xy[1][i+1]=xy[1][i]-hol_length*cos(hen[1][i]);
xy[2][i+1]=xy[2][i]+hol_length;
xy[3][i+1]=xy[3][i]-length*sin(hen[2][i]);
}
tan_length=(double)xy[3][m-1]/(double)xy[2][m-1];
sita=rad_to_deg(atan(tan_length));
printf("%n 斜距離 %f m 水平距離 %d m 高低差 %d m 勾配 %f 度%n      OK?(y/n)",sum_
leng,xy[2][m-1],xy[3][m-1],sita);
while((c=getchar())!='y');
}
```