

Tab.3.7 Testee's Data Base

	Sex	Height[cm]	Weight[kg]	Character
E	Female	154	45	<ul style="list-style-type: none"> ・健康で、不自由なく歩行ができる ・右方向に進む傾向が見られる
F	Female	150	40	<ul style="list-style-type: none"> ・足首のあたりに痛さを感じている ・前傾姿勢で歩行をしているため、足首への負担が大きい ・左方向に進む傾向が見られる
G	Man	160	55	<ul style="list-style-type: none"> ・何らかの支え又は介護者のサポートが必要である ・脊髄を中心として肩のあたりから左に傾いている
H	Female	155	45	<ul style="list-style-type: none"> ・健康で、不自由なく歩行ができる ・背中を少し丸めている
I	Female	155	40	<ul style="list-style-type: none"> ・健康で、不自由なく歩行ができる ・機器と共に右方向に進む傾向が見られる
J	Female	136	45	<ul style="list-style-type: none"> ・背中を丸まっており、歩く際には支えが必要な傾向がある ・遅いペースであるが普通に歩くことができる
K	Female	143	48	<ul style="list-style-type: none"> ・背中を少し丸めており、支えが必要な傾向が見られる ・遅いペースであるが普通に歩くことができる
L	Female	150	52	<ul style="list-style-type: none"> ・背中を少し丸めており、健康な方で綺麗な歩き方をしている
M	Female	136	45	<ul style="list-style-type: none"> ・綺麗な歩き方をしている ・進行方向に何の問題もなく普通に進める
N	Female	140	47	<ul style="list-style-type: none"> ・不自由なく歩行をしている ・少し右方向に進行してしまうという傾向が見られる

※Eye Measurement

支援機を前方に押す場合、 F_x は負の値を取り、下方方向に力を加える場合、 F_y は正の値をとる。また、図 3.19 のステップ関数の上がりは右足踵接地、下がりには右足爪先離地を示している。

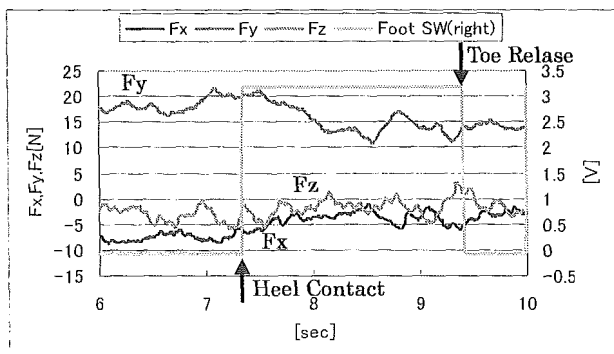


Fig.3.19 E The First (Load)

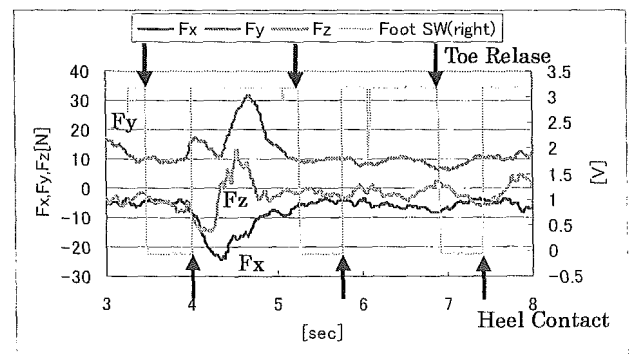


Fig.3.19 E The Second (Load)

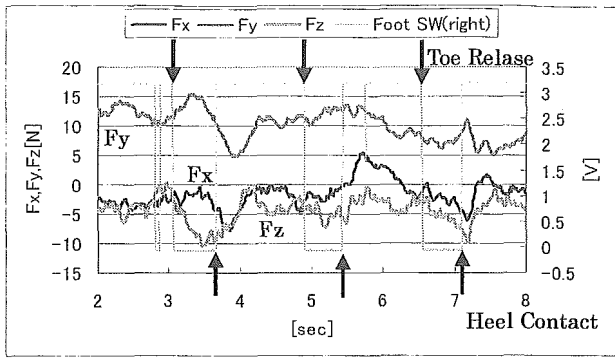


Fig.3.19 E The Third (Load)

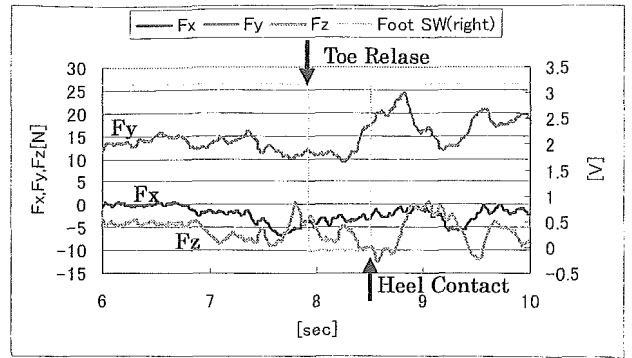


Fig.3.19 F The First (Load)

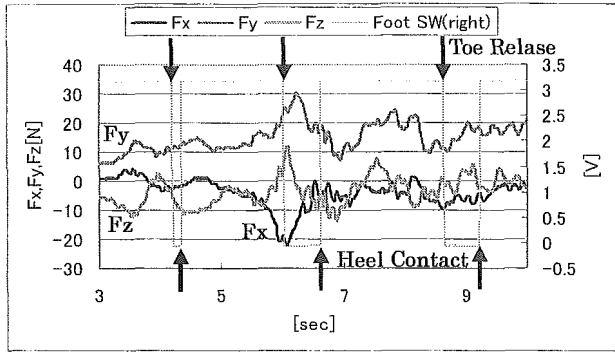


Fig.3.19 F The Second (Load)

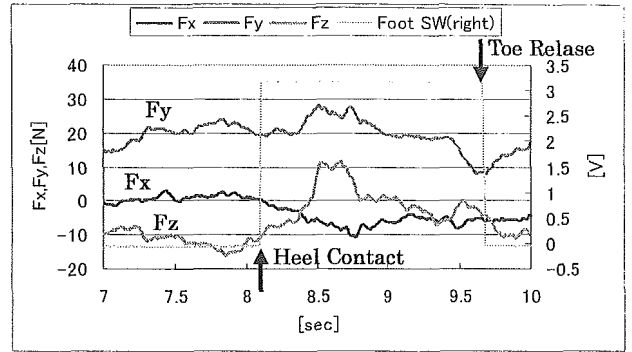


Fig.3.19 F The Third (Load)

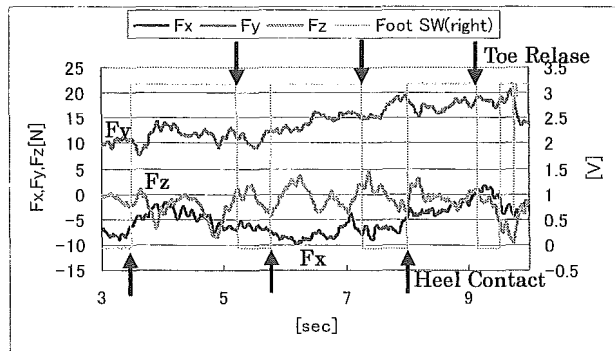


Fig.3.19 G The First (Load)

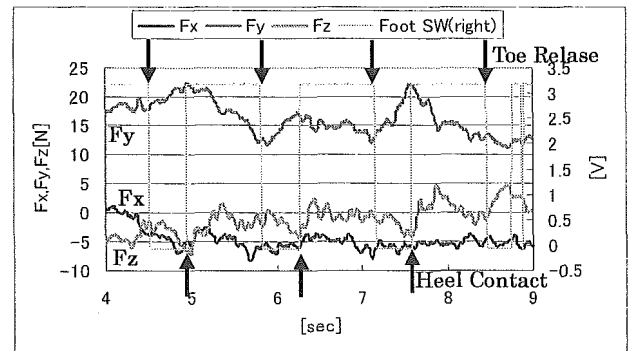


Fig.3.19 G The Second (Load)

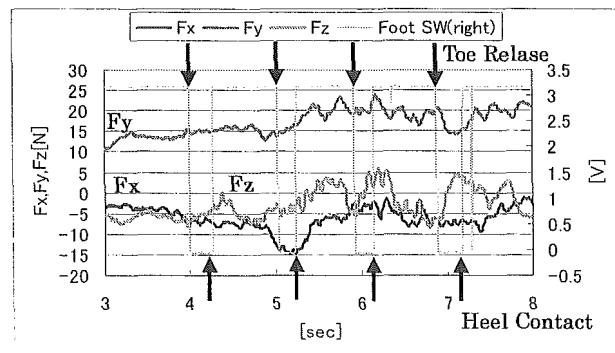


Fig.3.19 G The Third (Load)

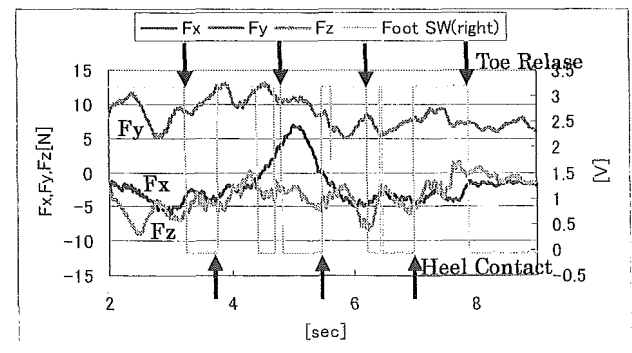


Fig.3.19 H The First (Load)

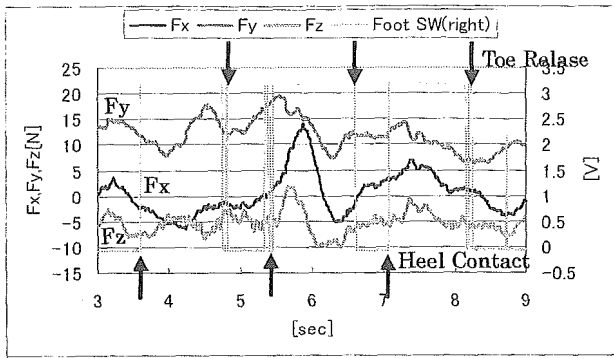


Fig.3.19 H The Second (Load)

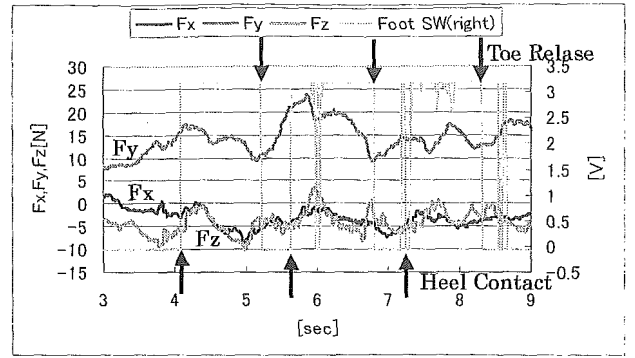


Fig.3.19 H The Third (Load)

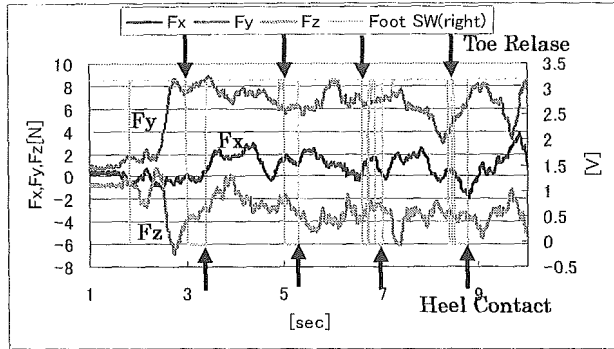


Fig.3.19 I The First (Load)

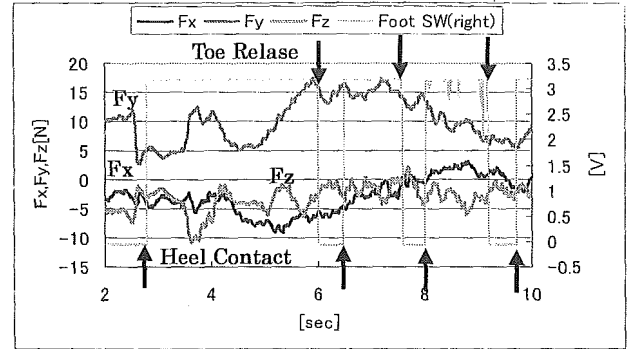


Fig.3.19 I The Second (Load)

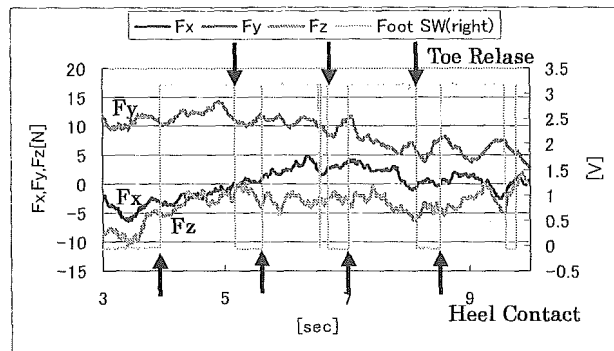


Fig.3.19 I The Third (Load)

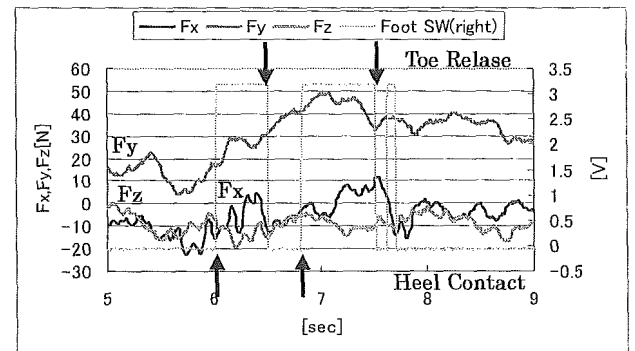


Fig.3.19 J The First (Load)

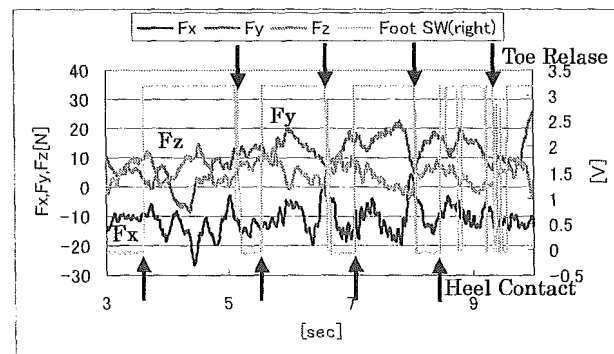


Fig.3.19 J The Second (Load)

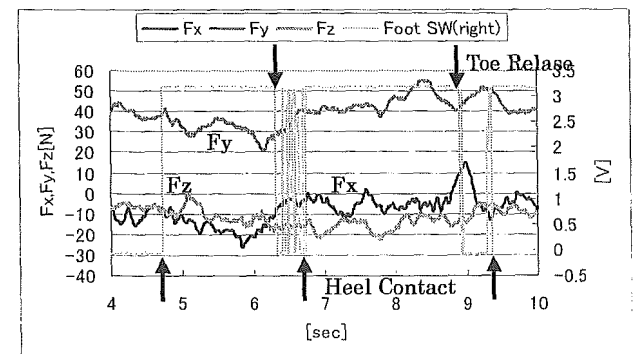


Fig.3.19 J The Third (Load)

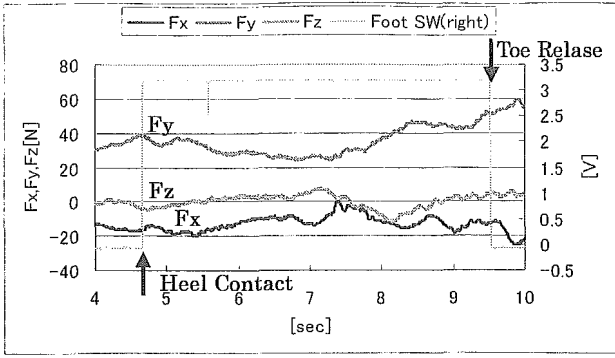


Fig.3.19 K The First (Load)

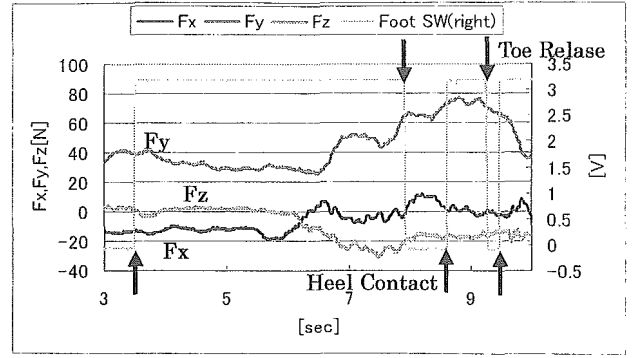


Fig.3.19 K The Second (Load)

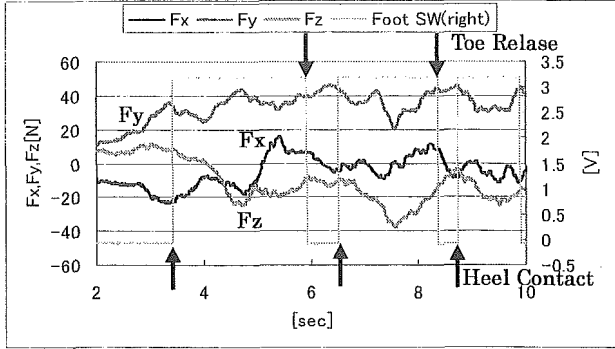


Fig.3.19 K The Third (Load)

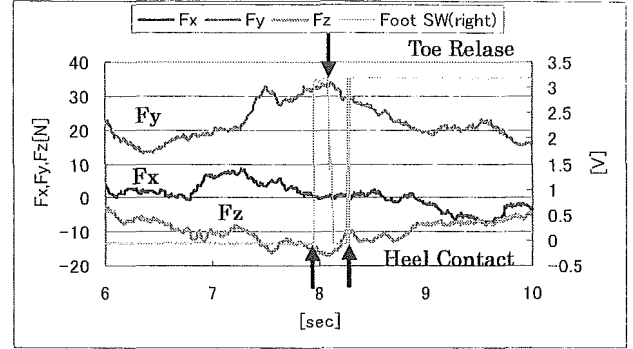


Fig.3.19 L The First (Load)

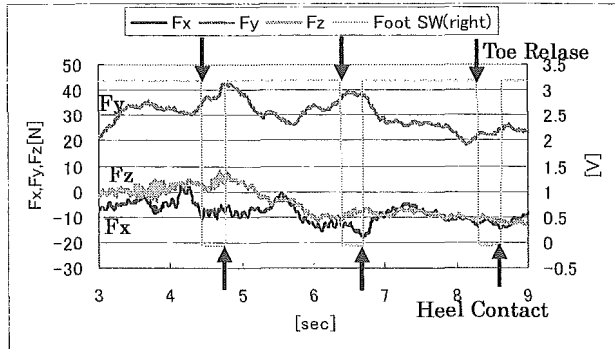


Fig.3.19 L The Second (Load)

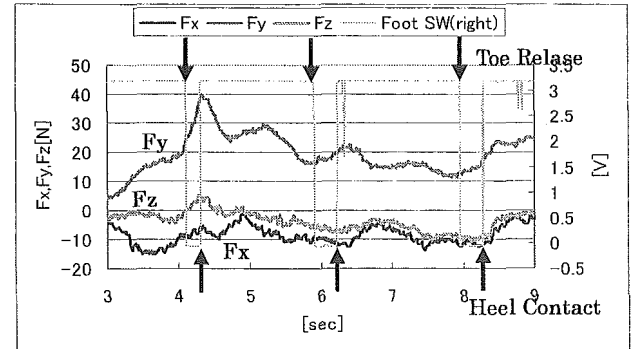


Fig.3.19 L The Third (Load)

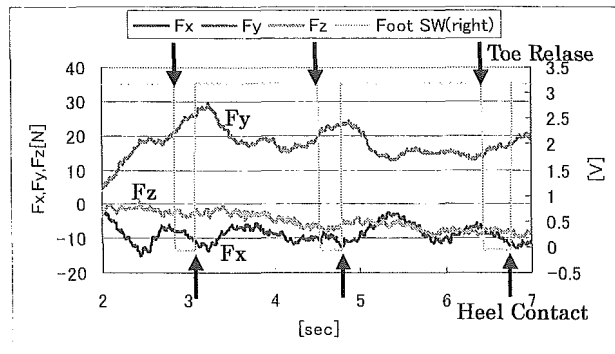


Fig.3.19 L The Fourth (Load)

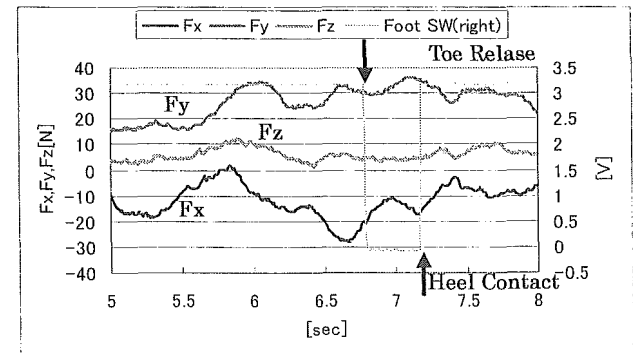


Fig.3.19 M The First (Load)

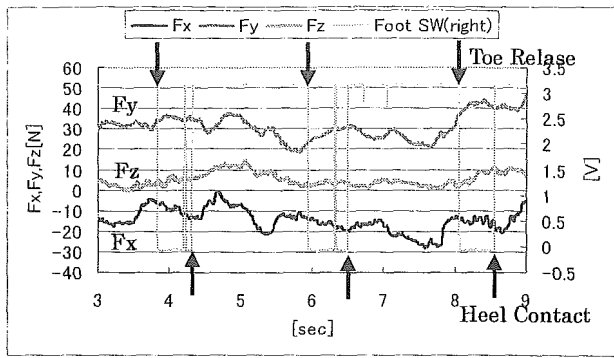


Fig.3.19 M The Second (Load)

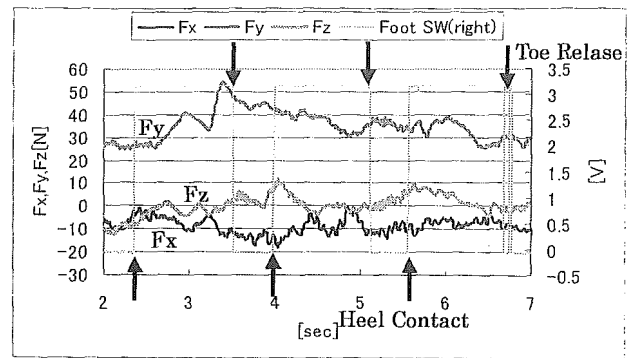


Fig.3.19 M The Third (Load)

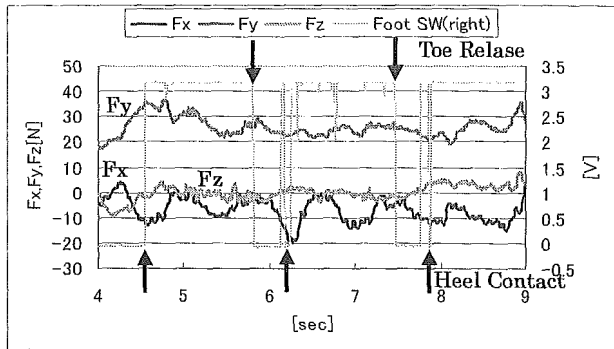


Fig.3.19 M The Fourth (Load)

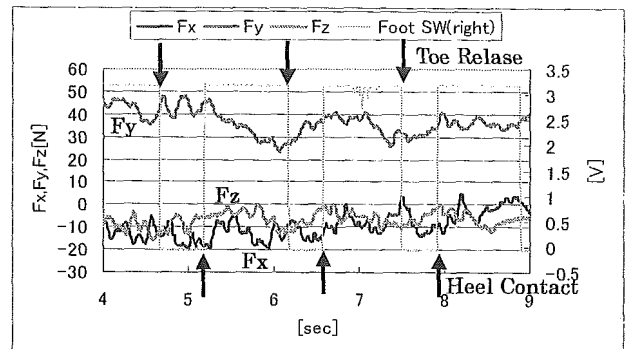


Fig.3.19 N The First (Load)

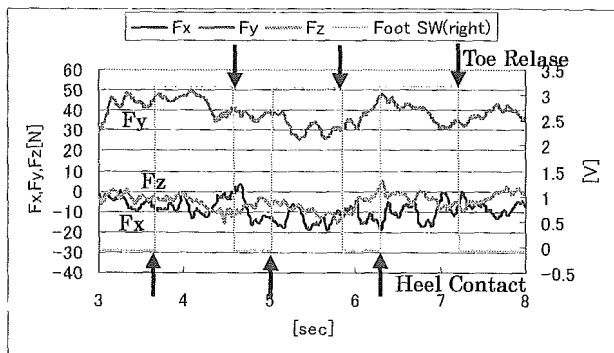


Fig.3.19 N The Second (Load)

3.3.7 考察

本実験において、被験者の人数分のデータが出たが、ここでは主に、分かりやすい歩行パターンについて述べることにする。

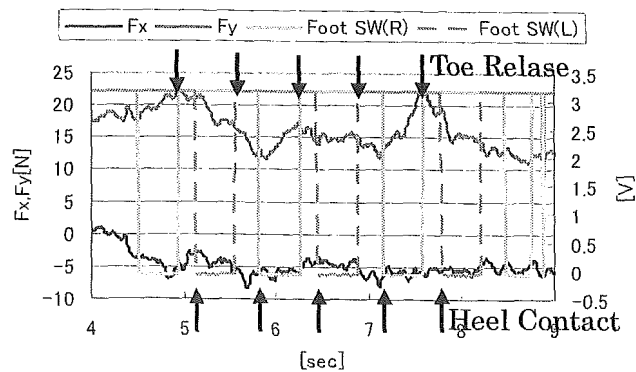


Fig.3.20 G The Second (Load)

図 3.20 に示すように F_x , F_y の変動幅は、被験者が学生と高齢者の場合を比較してみると、高齢者の方が学生と比べ発生する力も 1/4 と小さくなる傾向にあることが分かった。

F_x は足（踵）の接地と同時に前方向に働く。これは遊脚が接地する際に接地点を軸に前傾するトルクが発生し、実験機に力がのるためと考えられる。また、爪先の離地と同時に後方向に力が働く。これは両脚支持から単脚支持になる際に支持脚が蹴りだし動作に入るとハンドルを手前に引っ張る力が発生すると考えられる。しかし、今回実験にご協力いただいた高齢者の数人に爪先離地した際に前方向（進行方向）に押す力が働いていることが分かった。

F_y の歩行周期におけるパターンに関して言えば、学生と高齢者とでは同じことが言える。踵接地と同時に鉛直下方向に働く。これは遊脚が接地する際に接地点を軸に前傾するトルクが発生し、実験機に力がのるためと考えられる。また、爪先の離地と同時にハンドルにかかる力が、踵接地と比べ小さくなっていることが分かる。これは両脚支持から単脚支持になる際に支持脚が蹴りだし動作に入るとハンドルを手前に引っ張る力が発生しているからだと考えられる。

F_z の歩行周期におけるパターンに関して言えば、学生と高齢者とでは同じことが言える。右足が接地する時、左方向（+y）の方向に力がかかっていることがわかる。逆に、左足が接地する時に（右足が地面から離れる前に）右方向（-y）に力がかかっている。つまり、足に体重を乗せるために左にハンドルを押す力が生じていると考えられる。

3.3.8 まとめ

踵接地した場合に、押す力が加わり F_x , F_y は最大値をとる。これは、機器に体重の一部を預けるため、遊脚が接地する際に支持脚が蹴りだし動作に入る。そのため、接地した際に接地点を軸に前傾するトルクが発生すると考えられる。逆に爪先離地した場合には、引く力が加わり F_x , F_y は最小値をとっている(図 3.21)。これらの特徴は制御パラメータとして有用であると考えられる。

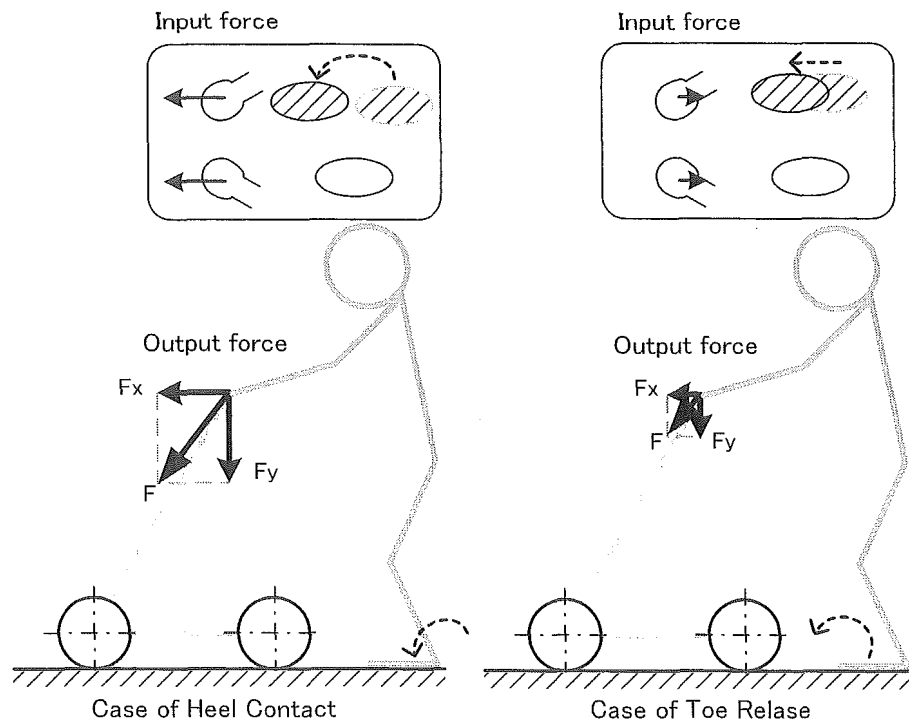


Fig.3.21 The move operation

4章 駆動・制動ユニットの設計

4.1 歩行支援機に必要なアシスト力

4.1.1 はじめに

現用の支援機では、使い手自らで駆動力のすべてを発生しなくてはならないので、体力的負担が大きく、機動性が決して良いものではないと言える。また、段差や凹凸路面、軟弱路面、傾斜路などの路面状況によっても使い手に大きな負担を生じさせる。ここでは、一般道路におけるガタ路調査結果から必要なトルクの算出。そして、駆動・制動ユニットの設計を行う。

4.1.2 段差乗越しにおける歩行支援機の運動

段差分布調査を行い、50[mm]の段差乗り越しを目標とすることにした（第2章）。そこで50[mm]の段差を乗り越すために必要な車輪の径、トルクを求める。

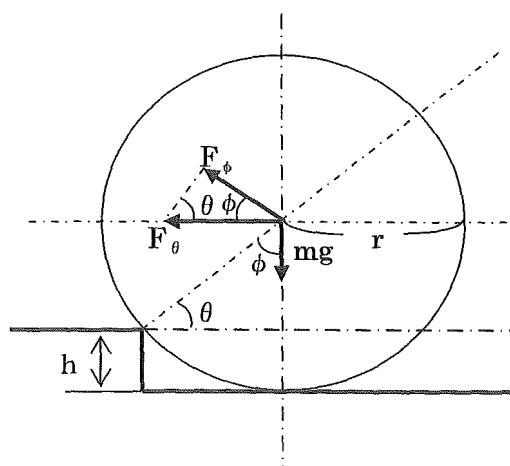


Fig.4.1 Mechanism that Gets Over Bump

このタイヤにおける F_ϕ は、

$$F_\phi = mg \sin \phi = mg \cos \theta \quad (4.1)$$

さらに、タイヤ中心において F_ϕ を前後方向に分ける。その分力は、

$$F_\theta \cos \phi = F_\phi = mg \cos \theta \quad (4.2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \cos \phi &= \sin \theta \text{ より,} \\ F_\theta \sin \theta &= mg \cos \theta \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$F_\theta = mg \frac{\cos \theta}{\sin \theta} = \frac{mg}{\tan \theta} \quad (4.4)$$

段差高さを h として、 θ は

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r}{r-h}\right)^2 - 1}} \right\} \quad (4.5)$$

各設定条件を表 4.1 に示す.

Tab.4.1 Setting Condition

Weight : m (Device : 20[kg]+Person : 20[kg] (Weight50×0.4))	10[kg] (By One Wheel)
Bump : h	50[mm]
Power that Person Pushes : F _h	70.2[N] (NEDO)
Motor Assistance Power : F _m	50N (By One Wheel)

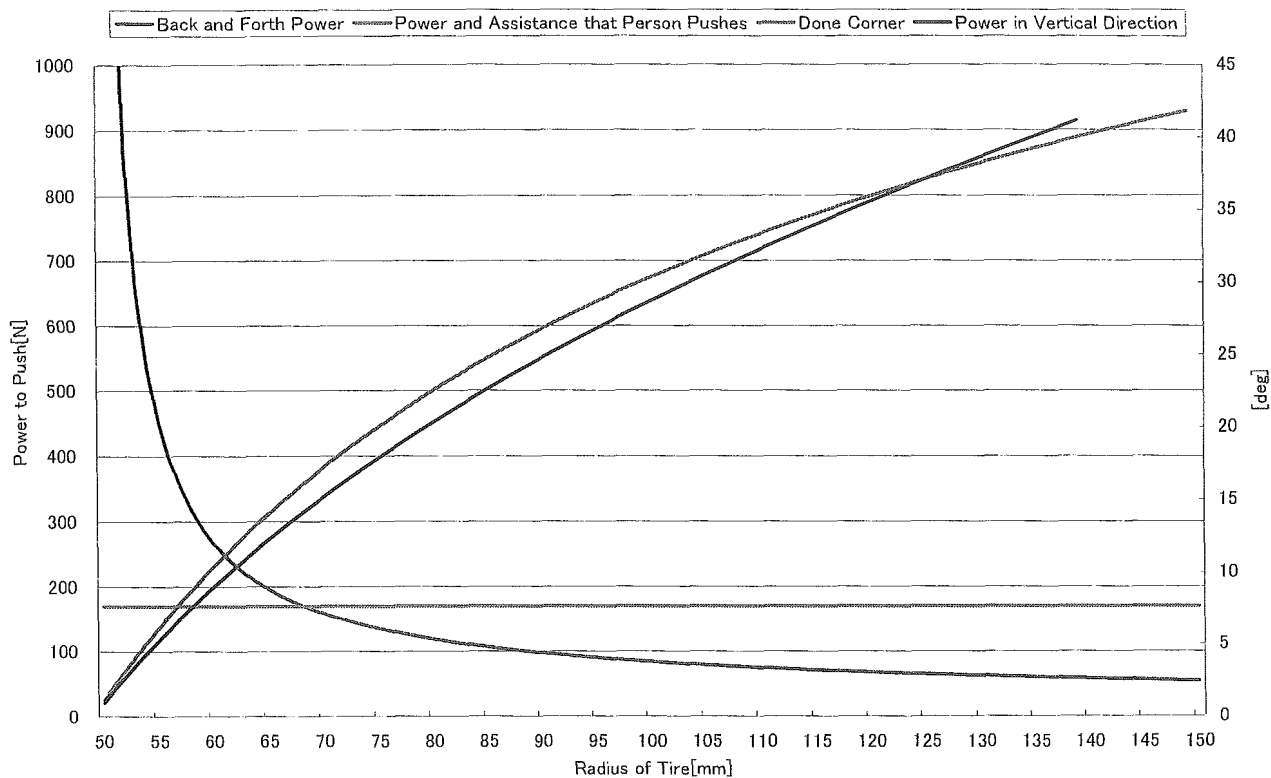


Fig.4.2 Change in Power to Push into Radius of Tire

ここで,

$$(モータ駆動力 : F_m) + (人が押す力 : F_h) - (水平方向の反力 : F_\theta) - (転がり抵抗) = ma$$

m : 支援機の重量 a : 加速度

また, 転がり抵抗は考えないものとする,

$$(人が支援機を押す力と駆動力を足し合わせた力 : F) - (水平方向の反力 : F_\theta) = ma$$

よって, 人が支援機を押す力と駆動力を足し合わせた力 $F = 170.2 (100) [N]$ が前後力 (F_θ) よりも大きくなければ, 高さ h の段差を乗り越えることができない.

図 4.2 に示すように,

- ・ $F = 170.2$ の場合 : タイヤ半径が 70mm 以上あれば高さ 50mm の段差を乗り越えられる.

現在, 量産用にて販売されている搬送用及び福祉機器用タイヤサイズは, $\phi 125$, $\phi 150$, $\phi 200$ である.

4.1.3 横断傾斜路における歩行支援機の運動⁽⁶⁾

まず、以下のようなモデルを考える。

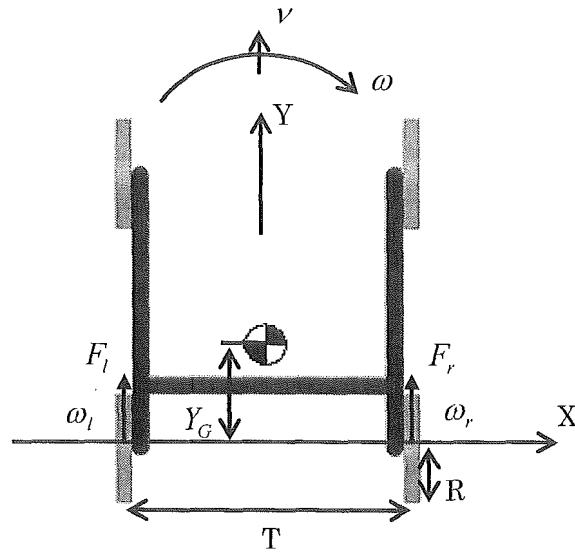


Fig.4.3 Model of Support Device

支援機の全体の速度は、

$$v = \frac{R}{2}(\omega_r + \omega_l) \quad (4.6)$$

支援機全体の角速度は、

$$\omega = \frac{2R}{T}(\omega_r - \omega_l) \quad (4.7)$$

と表すことができる。

一方、運動方程式は並進・回転運動それぞれ

$$M \frac{dv}{dt} = F_r + F_l \quad (4.8)$$

$$J_{CG} \frac{d\omega}{dt} = \frac{T}{2}(F_r - F_l) \quad (4.9)$$

J_{CG} は重心まわりの慣性モーメント、

M は使い手が加える荷重を含めた支援機全体の質量である。

駆動系の運動方程式は

$$\tau_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r + RF_r \quad (4.10)$$

$$\tau_l = J \frac{d\omega_l}{dt} + D\omega_l + RF_l \quad (4.11)$$

J は慣性モーメント、 D は粘性係数である。

横断傾斜路の走行における支援機の運動について説明する。支援機は構造上、後方への転倒防止のために後輪車軸よりも前方に重心位置がある。そのため、横断傾斜路では重心位置に谷側方向に落下の力が作用し、後輪軸の中心を軸に旋回トルクが生じる。

いま、使い手が直進歩行を実現するために、この旋回トルクを補正する駆動力を発生するとしたら、以下のようなになる。

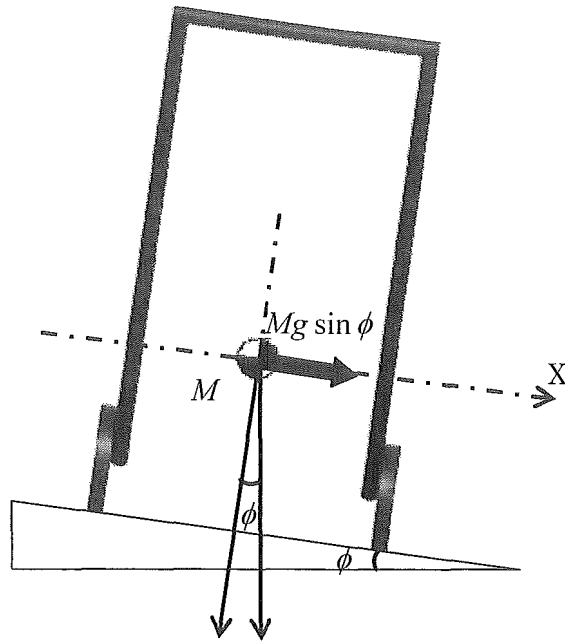


Fig.4.4 Crossing Inclination Road

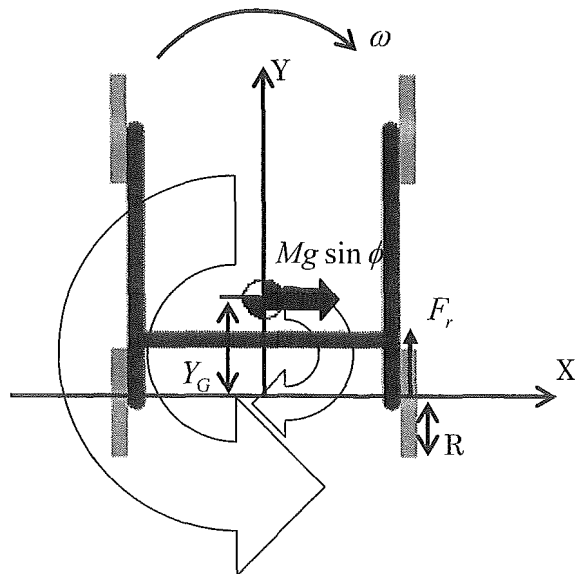


Fig.4.5 Crossing Inclination Road

傾斜によって生じた旋回トルク $\tau_{SIM-Device}$ は、横断傾斜角度 ϕ とすれば、

$$\tau_{SIM-Device} = Mg \sin \phi \times Y_G \quad (4.12)$$

なので、右側を谷側として、右側のみで補正するとしたら、

$$F_r = (\tau_{SIM-Device} / (T/2)) \quad (4.13)$$

今 $M=40\text{kg}$ (支援機重量: 20kg , 被支援者が鉛直下方向に加える力 $\text{max}: 20\text{kg}$), $\phi=5^\circ$ ならば、静止するだけの最低限のパワーは、 Y_G の位置関係によって変化する。 Y_G を変化させ必要となるパワー [N] を計算する。

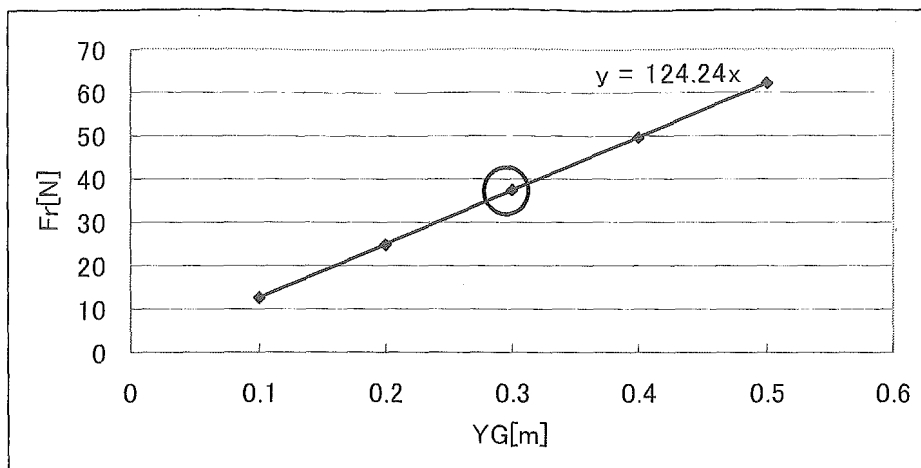


Fig.4.6 Position of Y_G and F_r

よって、 Y_G の位置は後輪に近い所つまり $Y_G : 0.3[m]$ 以下かつ、 $F_r : 40[N]$ 必要である。

4.1.4 縦断傾斜路における支援機の運動⁽⁷⁾

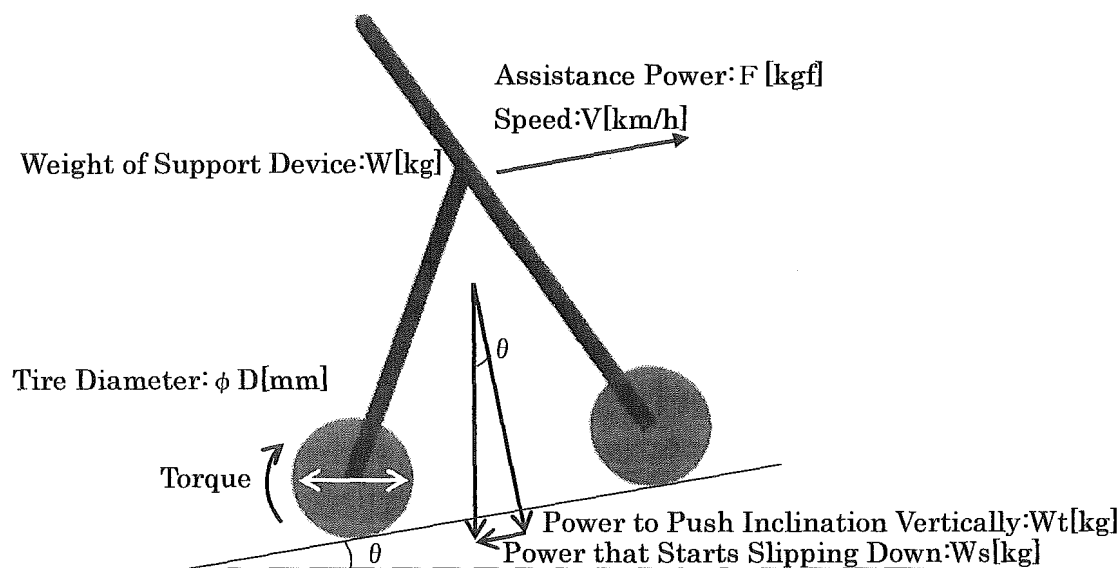


Fig.4.7 Pull Condition of Support Device

支援機が斜面を登るときのトルクは支援機の質量を斜面を垂直に押す力 W_t と斜面を滑り落ちようとする分力 W_s に分けて考えればよい。斜面を支援機を上らせる場合のトルクの大半は、斜面を引き上げる為に要するトルクである。

$$\text{斜面を垂直に押す力 } W_t \text{ (kgf)} = W \text{ (kg)} \times \cos \theta \quad (4.14)$$

この W_t (kgf) の値に転がり摩擦係数 μ を掛けた力 F_t (kgf) が斜面を支援機を転がす為に必要な力になる。

$$F_t \text{ (kgf)} = \mu \times W_t \text{ (kg)} = \mu \times W \text{ (kg)} \times \cos \theta \quad (4.15)$$

斜面の場合には、上記 F_t 以外に斜面を引っ張り上げる力 F_s が必要になる。

$$F_s \text{ (kgf)} = W \text{ (kg)} \times \sin \theta \quad (4.16)$$

結局、支援機を斜面を登らせる為には上記二つの力の合成力 F が駆動力として必要になる。

$$\begin{aligned} F \text{ (kgf)} &= F_t \text{ (kgf)} + F_s \text{ (kgf)} = (\mu \times W \text{ (kg)} \times \cos \theta) + (W \text{ (kg)} \times \sin \theta) \\ &= W \text{ (kg)} \times (\mu \cos \theta + \sin \theta) \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \text{トルク } \tau \text{ (kgf} \cdot \text{cm)} &= F \text{ (kgf)} \times \text{駆動輪の半径 } r \text{ (cm)} \\ &= W \text{ (kg)} \times (\mu \cos \theta + \sin \theta) \times D / 2 \text{ (mm)} \times 0.1 \end{aligned} \quad (4.18)$$

上記トルクが車軸を回転させる為に必要なトルクになる。実際は平坦地の例と同様に車軸をダイレクトに駆動せずに減速機やプーリーを用いる為にロスが生じる。この部分の効率を η (%) とすれば、必要なモータトルクは上記車軸トルクを減速比 G で割り、さらにその値を η で割れば良い。

斜面に平行に走行する時に必要なトルクの式：

$$\tau_m \text{ (kgf} \cdot \text{cm)} = \tau \text{ (kgf} \cdot \text{cm)} / G \times 1 / (\eta \text{ (\%)} \times 0.01) \quad (4.19)$$

これらの式と表 4.2 を考慮して、タイヤ径 0.08~0.12[m]、重量 20[kg]、傾斜角度 15° の条件を考え、これを「良好な平滑アスファルト舗装路」で使用する場合と「ゆるい砂地・粘土質の道路」で使用する場合を考え、図 4.8 に表した。

Tab.4.2 Road Situation and Rolling Coefficient of Friction of Vehicle with Tire

Road Situation	Rolling Coefficient of Friction
良好な平滑アスファルト舗装路	約 0.01
良好な平滑コンクリート舗装路	約 0.011
手入れの良い平坦な未舗装路	約 0.04
手入れ不良の石の多い道路	約 0.08~
新しく砂利を敷いた道路	約 0.12
ゆるい砂地・粘土質の道路	約 0.2~0.3

出典：自動車をはかる（日本規格協会）

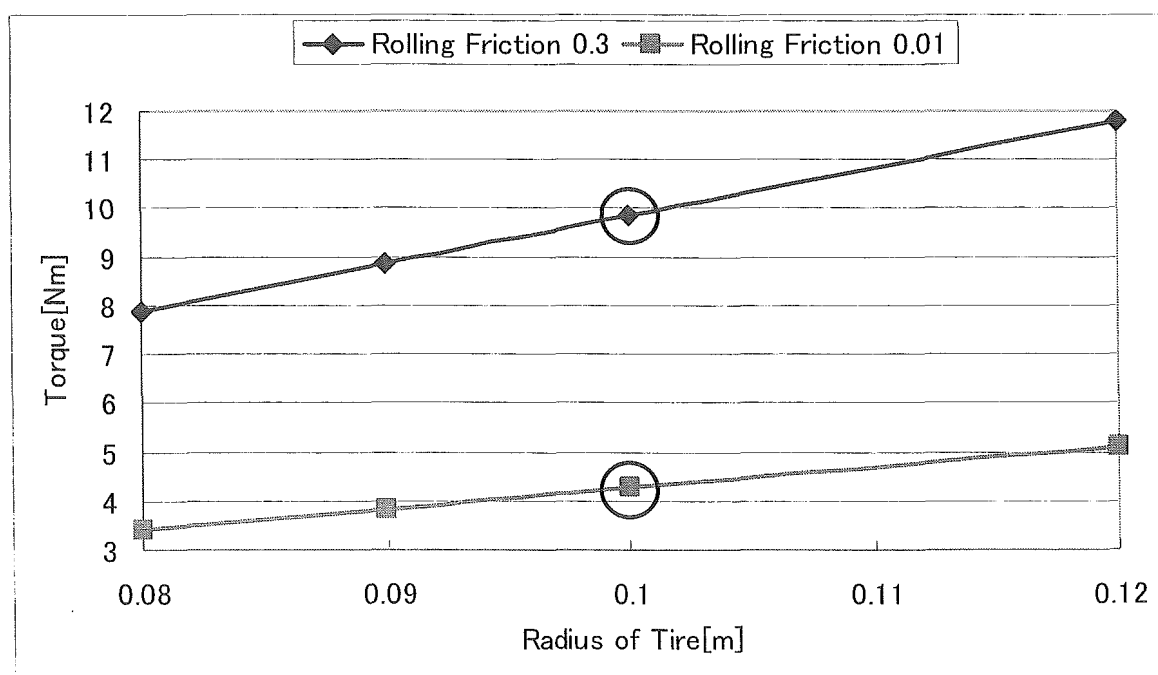


Fig.4.8 Tire-Torque Relation

4.1.5 平坦路における支援機の運動⁽⁷⁾

支援機が路面に平行に走行する場合は、必要駆動力が車軸に発生すれば良い事になるので下図の様に考えれば良い。

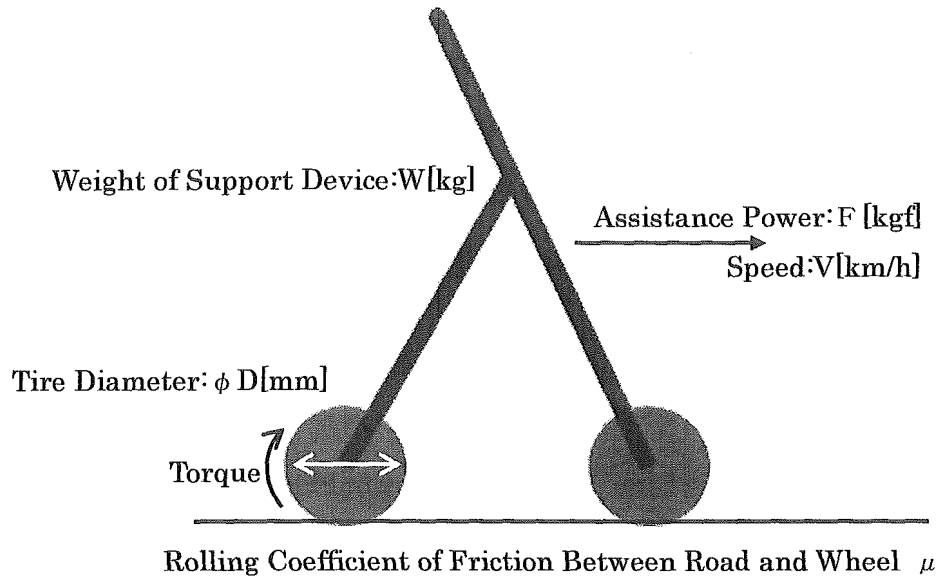


Fig.4.9 Pull Condition of Support Device

トルク τ (kgf/cm) = F (kgf) \times 駆動輪の半径 r (cm) = W (kg) $\times \mu \times D/2 \times 0.1$
半径に換算 cmに換算

上記トルクが車軸を回転させる為に必要なトルクになる。実際は車軸をダイレクトに駆動せずに減速機やプーリーを用いる為にロスが生じる。この部分の効率を η (%) とすれば、必要なモータトルクは上記車軸トルクを減速比 G で割り、さらにその値を η で割ればよい。

路面に平行に走行する時に必要なトルクの式：

$$\tau_m \text{ (kgf} \cdot \text{cm)} = \tau \text{ (kgf} \cdot \text{cm)} / G \times 1 / (\eta \text{ (\%)} \times 0.01) \quad (4.20)$$

これらの式と表 4.2 を考慮して、タイヤ径 0.08~0.12[m]、重量 20[kg]の支援機を考え、これを「良好な平滑アスファルト舗装路」で使用する場合と「ゆるい砂地・粘土質の道路」で使用する場合を考え、結果を図 4.10 に示す。

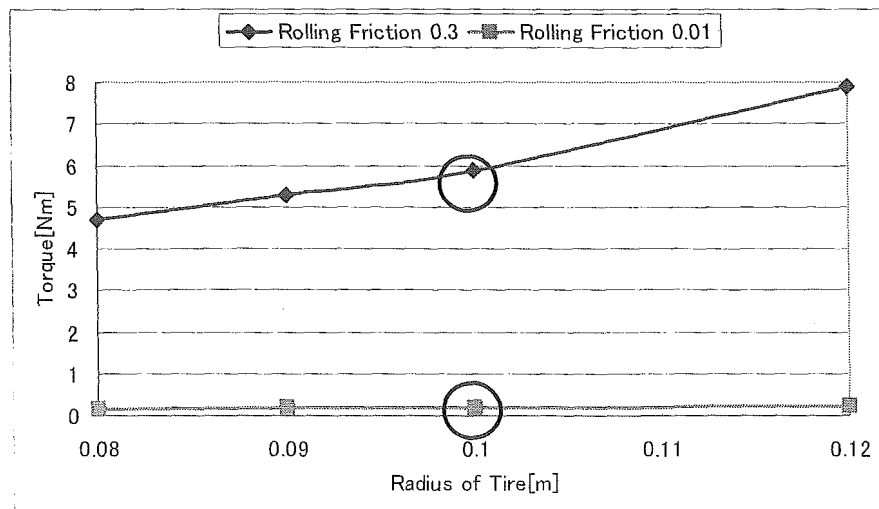


Fig.4.10 Tire-Torque Relation

4.1.6 まとめ

以上より、高さ 50mm の段差、横断傾斜路、縦断傾斜路において必要なモータアシスト力（トルク）、タイヤ径は、

- ・モータアシスト力：50[N]（片輪）
- ・タイヤ半径：200[mm]
- ・モータトルクは 5[N.m]

また、モータの出力[W]を算出するために、下記の式を使って走行動力をもとめる⁽⁸⁾。

$$P = 9.8(W \sin \alpha + \mu W \cos \alpha)V / \eta(W) \quad (4.21)$$

P：モータの出力（W）

W：荷重（kgf）

V：速度（m/sec）

μ ：走行抵抗係数

- ・車輪を利用して良好な路面を走行するとき $\mu = 0.01 \sim 0.03$
- ・車輪を利用して砂利路など悪路面を走行するとき $\mu = 0.1 \sim 0.2$

η ：機械効率 0.7～0.9

α ：傾斜角度（deg）

- ・水平走行の場合は $\sin \alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$ となる。

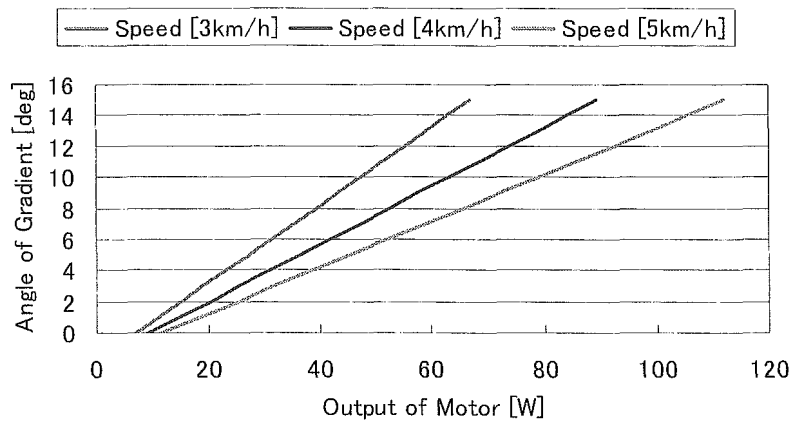


Fig.4.11 Case with Excellent Load

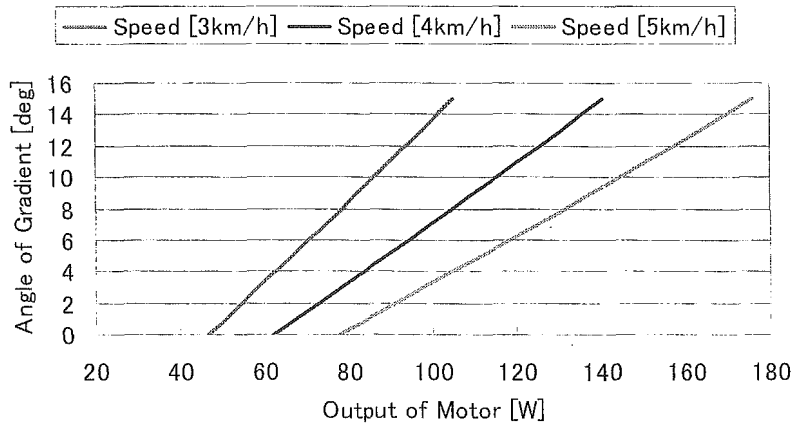


Fig.4.12 Case with Bad Load

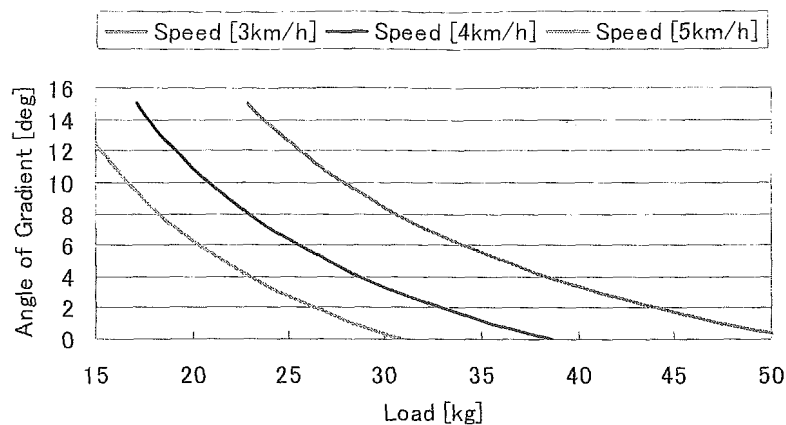


Fig.4.13 Case with Bad Load

以上のことから、モータ出力を 120[W]として、Maxon Motor EC40, ブラシレス, 120W と Maxon Gear, プラネタリギアヘッド GP42C を選定した。モータデータについては表 4.3, ギアヘッドデータについては表 4.4 を参照していただきたい。

Tab.4.3 Motor Data

低格出力	120 [W]
交称電圧	12.0 [Volt]
無負荷回転数	5900[rpm]
停動トルク	606[mNm]
最大許容回転数	18000 [rpm]
最大連続電流 (5000rpm 時)	6.00[A]
最大連続トルク (5000rpm 時)	100.7[mNm]
最大効率	79[%]
トルク定数	19.1[mNm/A]
回転数定数	500[rpm/V]
重量	390[g]

Tab.4.4 Gear Head Data

減速比	43 : 1
慣性モーメント	15[gcm ²]
重量	460[g]

4.2 歩行支援機に必要なブレーキ力

4.2.1 平坦路における歩行支援機の運動⁽⁹⁾

ここではブレーキの運動について考察する。

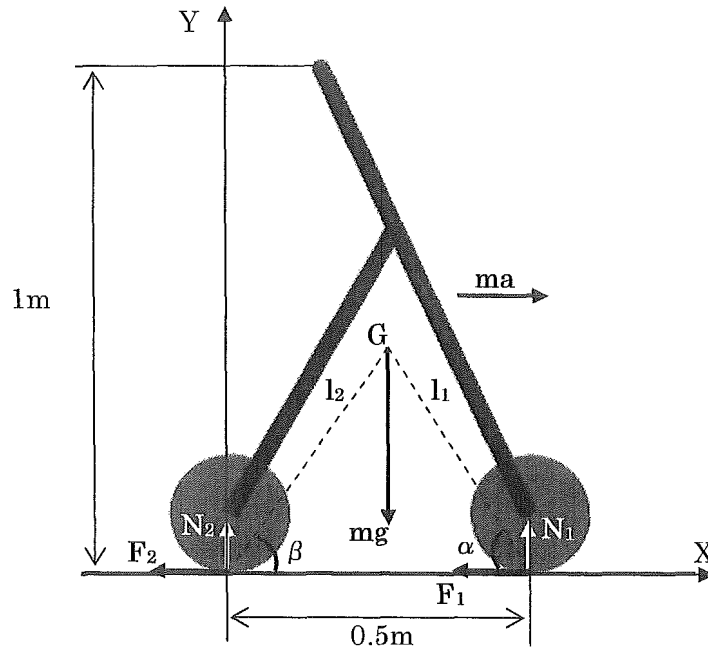


Fig.4.14 Figure of Support Device

前に進もうとする力 $F=ma$ に対し摩擦 F_1, F_2 が働き、タイヤの垂直抗力はそれぞれ N_1, N_2 、支援機の重心 G とする。

$$ma = -F_1 - F_2 \quad (4.22)$$

垂直成分は抗力と等しく、

$$mg = N_1 + N_2 \quad (4.23)$$

となる。

はじめにブレーキをかけない状態を考える。車そのものはそれぞれのモーメントがつりあって回転しないものとして考えられるので各成分と1の長さの力のモーメントの総和が0になる。

$$F_1 l_1 \sin \alpha - N_1 l_1 \cos \alpha + F_2 l_2 \sin \beta + N_2 l_2 \cos \beta = 0 \quad (4.24)$$

次に前輪の移動分の回転角を ϕ 、慣性モーメントを I_1 、半径 R_1 とし、後輪の移動分の回転角を θ 、慣性モーメントを I_2 、半径 R_2 とおく。

$$I_1 \phi'' = F_1 R_1 \quad (4.25)$$

$$I_2 \theta'' = F_2 R_2 \quad (4.26)$$

となる。また、移動距離はそれぞれ半径×回転角で求められ、それは等しい値になるので、

$$R_2 \theta = R_1 \phi \quad (4.27)$$

$$\phi = \frac{R_2}{R_1} \theta \quad (4.28)$$

加速度は2階微分より

$$\phi'' = \frac{R_2}{R_1} \theta'' \quad (4.29)$$

$$I_1 \phi'' = I_1 \frac{R_2}{R_1} \theta'' = F_1 R_1 \quad (4.30)$$

よって

$$F_1 = I_1 \frac{R_2}{R_1^2} \theta'' \quad (4.31)$$

$$F_2 = \frac{I_2}{R_2} \theta'' \quad (4.32)$$

進もうとする力 $F=ma$ に対して摩擦 F_1 , F_2 が働くので

$$mR_2 \theta'' = -F_1 - F_2 = -I_1 \frac{R_2}{R_1^2} \theta'' - \frac{I_2}{R_2} \theta'' \quad (4.33)$$

この式では $\theta'' = 0$ のとき等速円運動を行う。そのときは摩擦も働かないことになる。

次に後輪にブレーキがかかり逆向きの回転運動が働くような場合を考えると、後輪に働いていたモーメントに $-F_3 R_3$ のモーメントが加わる。よって

$$I_2 \theta'' = F_2 R_2 - F_3 R_3 \quad (4.34)$$

式(4.22), 式(4.31), 式(4.34)を連立させると

$$\theta'' = -\frac{R_3}{M} F_3 \quad (4.35)$$

$$F_1 = -\frac{I_1 R_2 R_3}{M R_1^2} F_3 \quad (4.36)$$

$$F_2 = -\frac{R_3}{R_2} \left(\frac{I_2}{M} - 1 \right) F_3 \quad (4.37)$$

が得られる。ただし、 $M = I_2 + mR_2^2 + I_1 \frac{R_1^2}{R_2^2}$ とする。

これらにおいて、ブレーキをかけたときに摩擦がかかってもスリップしてしまうような場合はブレーキの力が最大摩擦力を越えてしまう場合である。それは $F_2 \geq \mu_0 N_2$ (μ_0 : 静止摩擦係数) のような場合である。求めた値を残りの二つの式に用いてスリップの条件を求める。

式(4.24)に式(4.23), 式(4.35), 式(4.36), 式(4.37)を代入すると

$$-\frac{I_1 R_3 R_2}{M R_1^2} F_3 l_1 \sin \alpha - \frac{R_3}{R_2} \left(\frac{I_2}{M} - 1 \right) F_3 l_2 \sin \beta = (mg - N_2) l_1 \cos \alpha - N_2 l_2 \cos \beta \quad (4.38)$$

$$-\frac{R_3 F_3}{M} \left\{ \frac{R_2}{R_1^2} I_1 l_1 \sin \alpha + \frac{1}{R_2} (I_2 - M) l_2 \sin \beta \right\} = mgl_1 \cos \alpha - N_2 (l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta) \quad (4.39)$$

さらに移項すると次のような結果になる。

$$N_2 = \frac{mgl_1 \cos \alpha + \frac{R_2 R_3 F_3}{M} \left\{ \frac{I_1 l_1}{R_1^2} \sin \alpha - \left(m + \frac{I_1}{R_1^2} \right) l_2 \sin \beta \right\}}{l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta} \quad (4.40)$$

これを $F_2 \geq \mu_0 N_2$ に代入して計算した結果、次のように求まった。

$$F_3 \geq \frac{\mu_0 M m g l_1 \cos \alpha}{R_2 R_3 (m + \frac{I_1}{R_1^2})(l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta - \frac{\mu_0 I_1}{m R_1^2 + I_1} l_1 \sin \alpha + \mu_0 l_2 \sin \beta)} \quad (4.41)$$

結果より、ブレーキの力 F_3 を式 (4.41) で与えられる値以上にかけると支援機は止まり切れずにスリップする。

支援機が何らかで減速するとき、支援機は従来進んでいたときのもとの速さで進もうとする慣性力が働く。減速するときにもこれと同様に減速する支援機自体に慣性力が働き、前の方に押し出されるように力が働く。

そうすると支援機は極端にいうと後方が浮き上がるような感じになり、支援機の重心は前方に移動する。それにより前輪にかかる鉛直成分 mg も大きくなり、それに伴い N_1 も大きくなる。そしてその分後輪側の N_2 は、 $mg = N_1 + N_2$ のこともあり、小さくなるといえる。

N_2 が小さくなるということは、 $F_2 \geq \mu_0 N_2$ の条件においてスリップしやすくなるということで、ブレーキ F_3 が大きくなる程 (急ブレーキである程) N_2 は小さくなり $F_2 \geq \mu_0 N_2$ になってしまいやすくなる。

4.2.2 ブレーキ力の最適条件の検証

図 4.14 に示してあるモデルの諸条件は表 4.5 の通りであり、式 (4.41) を使い、表 4.6 に示す要因と水準を直交表によって組み合わせた条件を計算させる。その最適結果を表 4.9 に示す。

Tab.4.5 Various Conditions

Direction of Length	0.5[m]
Direction of Height	1[m]
Weight	20[kg]
μ	0.3
g	9.8

Tab.4.6 Factor and Level

Factor/Level	①	②	③
Center of Gravity Position(Length)[m]	0.15	0.25	0.35
Center of Gravity Position(Height) [m]	0.3	0.5	0.7
Radius of Tire(Front)[m]	0.08	0.1	0.12
Radius of Tire(Rear)[m]	0.08	0.1	0.12

Tab.4.7 Orthogonalization Table and Result

	Length	Height	Radius of Tire (Front)	Radius of Tire (Rear)	Brake Power[N]
NO.1	0.15	0.3	0.08	0.08	38.5875
NO.2	0.15	0.3	0.1	0.08	44.31957
NO.3	0.15	0.3	0.12	0.08	57.54276
NO.4	0.15	0.5	0.08	0.1	34.27922
NO.5	0.15	0.5	0.1	0.1	36.10526

NO.6	0.15	0.5	0.12	0.1	40.76373
NO.7	0.15	0.7	0.08	0.12	31.67568
NO.8	0.15	0.7	0.1	0.12	32.24284
NO.9	0.15	0.7	0.12	0.12	34.08153
NO.10	0.25	0.3	0.08	0.1	26.78064
NO.11	0.25	0.3	0.1	0.1	28.16092
NO.12	0.25	0.3	0.12	0.1	31.74404
NO.13	0.25	0.5	0.08	0.12	24.56481
NO.14	0.25	0.5	0.1	0.12	24.97002
NO.15	0.25	0.5	0.12	0.12	26.35862
NO.16	0.25	0.7	0.08	0.08	23.21053
NO.17	0.25	0.7	0.1	0.08	26.73927
NO.18	0.25	0.7	0.12	0.08	34.81887
NO.19	0.35	0.3	0.08	0.12	16.12066
NO.20	0.35	0.3	0.1	0.12	16.35967
NO.21	0.35	0.3	0.12	0.12	17.24211
NO.22	0.35	0.5	0.08	0.08	15.12
NO.23	0.35	0.5	0.1	0.08	17.3946
NO.24	0.35	0.5	0.12	0.08	22.62026
NO.25	0.35	0.7	0.08	0.1	13.53127
NO.26	0.35	0.7	0.1	0.1	14.27184
NO.27	0.35	0.7	0.12	0.1	16.13487

Tab.4.8 Effect Value

	次数	自由度	変動	分散	分散比	危険率	純変動	寄与率
重心位置 (長さ方向)	1次	1	2.24E+03	2.24E+03	2.45E+02	**	2.23E+03	76.08%
	2次	1	2.53E-01	2.53E-01	2.77E-02		0.00E+00	0.00%
重心位置 (高さ方向)	1次	1	1.40E+02	1.40E+02	1.53E+01	**	1.31E+02	4.45%
	2次	1	6.83E+00	6.83E+00	7.46E-01		0.00E+00	0.00%
後輪半径	1次	1	1.79E+02	1.79E+02	1.95E+01	**	1.70E+02	5.79%
	2次	1	7.73E+00	7.73E+00	8.44E-01		0.00E+00	0.00%
前輪半径	1次	1	1.83E+02	1.83E+02	2.00E+01	**	1.74E+02	5.94%
	2次	1	1.07E+01	1.07E+01	1.17E+00		1.55E+00	0.05%
誤差		18	1.65E+02	9.16E+00			2.25E+02	7.69%
合計		26	2.93E+03				2.93E+03	100.00%
			F(0.05) = 4.413872		F(0.01) = 8.285419			

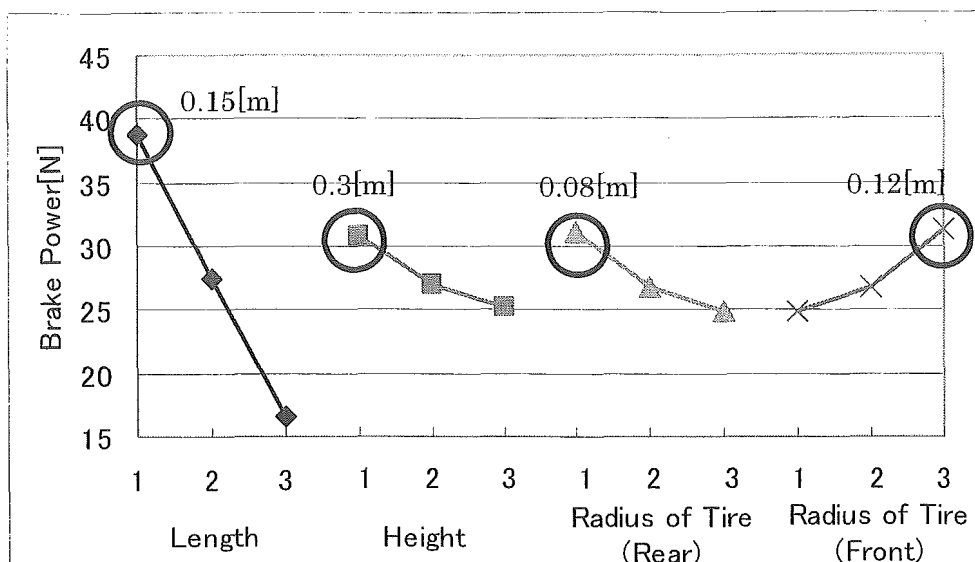


Fig.4.15 The Optimum Condition of Brake Power

Tab.4.9 The Optimum Condition Value

Length	Height	Radius of Tire(Rear)	Radius of Tire(Front)
0.15	0.3	0.08	0.12

効用値の表 4.7 と図 4.15 はブレーキをする際に最適な重心位置とタイヤの径がどの属性に影響し、どの水準の組み合わせが最適であるかを評価する分析結果である。また、図 4.15 は効用値をグラフにしたもので、傾斜の大きいものほど範囲が大きいのでブレーキ力に与える影響が大きい。グラフの上が最適方向を表しているの、各属性とも上になっている水準を選択すれば、最適水準（表 4.9）になる。分散の寄与率の値から「重心位置（長さ方向）」でブレーキ力の評価をしていることがわかる。特に重心長さの分散の寄与率は 76.08%と高く、最適なブレーキ力に重視点であることがわかる。

表 4.9 のときのブレーキ F_3 は 37.6[N] であり、ブレーキトルクはブレーキ $F_3 \times$ 後輪半径 R_2 より 3[Nm] である。

4.2.3 まとめ

4.1.3 の横断傾斜路面 5° の理論値より重心位置（長さ方向）を 0.3[m] と設定した場合、重心位置（高さ方向）とそのときに必要になるブレーキ力を求める。また、前後輪のタイヤ径を 0.2[m] とする。

Tab.4.10 The Optimum Condition of Brake Power

Length	Height	Radius of Tire(Rear)	Radius of Tire(Front)	Brake Power[N]
0.3	0.1	0.2	0.2	22.76

表 4.10 のときのブレーキ F_3 は 22.76[N] であり、ブレーキトルクはブレーキ $F_3 \times$ 後輪半径 R_2 より 2.28[N.m] である。

よって、重心位置（長さ方向）を 0.3[m] に設定した場合には、重心位置（高さ方向）を 0.1[m] に設定するとアシスト力・ブレーキ力が稼げることが分かった。

また、約 6N.m のブレーキ力が得られれば、体重 60kg の人が全体重を支援機にかけて 12 度の坂道を降りる際に制止できる強さであることが分かっている（井上昭夫，エレクトロロジロジー（ER）流体，「未来材料」第 2 巻第 8 号 27～34 頁，2002）。