

集材トラクタの転倒・転落
事故防止のための力学的研究

集材トラクタの転倒・転落事故防止のための 力学的研究

I 試験担当者

生産技術部 林業機械科長

辻井辰雄

伐出機械研究室

朝日一司・上村巧・陣川雅樹

造林機械研究室

佐々木尚三・山田健

九州支所 育林部長

柴田順一

II 要旨

集材トラクタの転倒・転落事故について力学的検討を行った。まず、①国有林直営生産現場で発生した31件の事故例について、転倒に至る代表的な原因と型を分析した。次に、②つり上げ法により、クローラ（CT-35・D-30S）及びホイールトラクタ（T-50・T-40・T-30・T-20・T-10）の重心位置を調査・測定した。③アーティキュレートホイール形（T-50）については、屈折による安定性の変化が問題となるため、関節角ごとの安定範囲を求めるとともに、ウォーキングビームの働きを厳密に考えて重心位置の移動から安定範囲の検討を行なった。また、④T-50について関節角度ごとの各方向からの外力に対する安定性を実測した。⑤クローラトラクタについては、傾斜地走行や障害物乗り越え時の車体傾斜角の検討・試験を行った。⑥トラクタの安定限界は重力と外力の合力（重力+外力+慣性力）が、車体の安定基礎の境界を越えるときとして得られる。転倒に至る車体動的挙動の一部を取り上げ、それらの合力の大きさなど力学的検討を行った。

III 試験目白

集材作業中に発生するトラクタの転倒や転落事故を防止するためには、作業方法や機械自身の改良に加え、運転者への安全教育をこれまで以上に重視することが必要である。

集材トラクタの転倒・転落事故の原因としては、傾斜地走行における車体固有の安定性の問題、木寄・材の衝突などによる外力効果、障害物乗り越えなどによる動的効果などが考えられる。また、足まわりと地表の過度のストレス効果（スピードや傾斜などによる）や、

地表の摩擦不足（積雪・降雨・枝条や植生による）によってスリップが生じ、その結果、動的効果から転倒に至ることも考えられる。本研究ではこれらの問題のうち、固有の安定性、外力、動的効果について力学的検討を行い、やってはならない事項などについて運転者などの理解度を高める資料を提供することを目的とした。

（造林機械研究室・佐々木尚三）

IV 試験の方法と結果

1. トラクタ転倒転落事故の分析

トラクタ事故の形態とその原因を分析して発生頻度の多いものを抽出し、力学的に検討する必要のあるケースを明らかにする。トラクタ事故31例（表1）を収集し、分析した結果は次のとおりである。

1) 事故の形態

トラクタ事故の形態としては、「横転」（19例／31例：61.3%）、「滑落」（6例／31例：19.4%）、「その他」（6例／31例：19.4%）があった（図1）。

ここで、「横転」とはトラクタが外力によって引張られるか、地面の段差あるいは伐根などに乘上げることによってトラクタが転倒するような状態をいう。「滑落」は外力あるいは段差や伐根が原因となってトラクタが滑る状態をいう。「その他」としては、ステアリングの操作ミスあるいは路肩の崩壊などを原因として発生した林道・作業道などからの転落、ブレーキのかけ忘れによる逸走、外力によるトラクタの回転などがある。なお、外力とはけん引中あるいは木寄せ中の材が立木や伐根などに引っかかった場合などにトラクタに対して発生する引張力を指す。

2) 事故の発生原因

トラクタ事故の発生原因としては、「引張られ」（14例／31例：45.2%）、「乗上げ」（10例／31例：32.3%）、引張られと乗上げの「複合」したもの（2例／31例：6.5%）、「その他」（5例／31例：16.1%）がある（図2）。

「引張られ」は、けん引中あるいは木寄せ中の材が立木や伐根などに引っかかって、トラクタが引張られた状態をいう。「乗上げ」は、移動中に右または左の車輪の一方が段差、材あるいは伐根などに乘上げた状態をいう。また、「複合」とは「引張られ」に続いて「乗上げ」が発生した状態をいう。

（1）横転の原因

事故の形態として最も多い「横転の原因」について分析した結果は、次のとおりである

（図3）。「引張られ」（9例／19例：47.4%）、「乗上げ」（7例／19例：36.8%）、「複合」（2例／19例：10.5%）、「その他」（1例／19例：5.3%）。

表 1. トラクタ事故

発生月日	土質	傾斜	機種	場所	作業	原因1	原因2	内容
1965. 5. 26	雪	0	ブルドーザー	路上	除雪	路肩崩壊		転落
75.11. 5	**	**	ブルドーザー	沢状傾斜面	移動	乗上げ		滑落
75.12.27	**	**	ブルドーザー	路上	移動	乗上げ		滑落
84. 4. 27	**	**	トラクタ	路上	けん引	引張られ		横転
85. 2. 12	**	**	**	路上	補修	乗上げ		横転
85. 4. 8	雪上	0	T 50	路上	木寄せ	引張られ	乗上げ	横転
85. 4. 10	雪上	0	T 50	路上	木寄せ	乗上げ		横転
85. 4. 17	雪上	18	T 50	路上	木寄せ	引張られ		横転
85. 9. 24	裸土	8	T 50	路上	木寄せ	引張られ		横転
86. 1. 28	**	0	T 50	路上	木寄せ	引張られ		横転
86. 3. 4	路面凍結	15	T 50	路上	けん引	外力による滑落	乗上げ	横転
86. 6. 24	**	**	トラクタ	路上	停止	ブレーキせず		逸走
86. 8. 21	裸土	10	T 50	路上	木寄せ	引張られ	乗上げ	横転
86. 9. 5	埴壌土	14	CT 35	路肩	木寄せ	引張られ	路肩崩壊	転落
86. 10. 7	**	7	CT 35	路肩	木寄せ	引張られ		滑落
86. 10. 13	**	0	T 50	路上	道路補修	乗上げ		横転
86. 11. 13	軟弱	30	CT 35	山側路上	けん引	乗上げ		横転
86. 11. 25	雪上	14	T 50	路上	けん引	外力		回転
87. 4. 6	雪上	20	D 40	山側路上	移動	乗上げ		横転
87. 4. 28	裸土	17	T 50	路上	けん引	引張られ		横転
87. 9. 4	裸土	13	T 50	路上	けん引	引張られ		横転
87. 9. 30	裸土	10	T 50	路上	けん引	引張られ		横転
88. 2. 26	黒色火山	6	T 50	路上	けん引	引張られ		横転
88. 8. 10	八雲層	15	CT 35	路上	木寄せ	引張られ		滑落
88. 9. 6	普通土	8	CT 35	**	移動	乗上げ		転落
88.11.17	粘土質	17	D 4	路肩	けん引	引張られ		滑落
89. 5. 19	裸土	0	フォークローダー	土場	巻き立て	乗上げ		横転
**	熊笹	21	トラクションベル	斜面	木寄せ	引張られ		滑落
**	**	0	トラクションベル	路上	道路補修	踏み外し		転落
**	**	20	ブルドーザー	斜面	横断	乗上げ		横転
**	**	15	ブルドーザー	斜面	木寄せ	引張られ		横転

(2)滑落の原因

事故の形態として2番目に多い「滑落」の原因是、「引張られ」(4例／6例: 66.7%)と「乗上げ」(2例／6例: 33.3%)であった(図4)。

3)事故の考察

事故の形態・原因を分析した結果から、検討対象とするのが妥当と思われる原因是事故の発生件数の多い「引張られによる横転」(9例／31例: 29.0%)、「乗上げによる横転」(7例／31例: 22.6%)、「引張られによる滑落」(4例／31例: 12.9%)の3つである。

(1)引張られによる横転

これは、けん引中あるいは木寄せ中の材が立木や伐根などに引っかかることによってトラクタに対するモーメントが発生し、転倒に至ったというケースである。このような問題は、動的な影響が比較的少ないと考えられるので、静力学的に検討するだけでも十分実用的な安定範囲が分かることと思われる。従って、トラクタの重心位置を測定し、静力学的な計算に基づいてその安定範囲を明らかにすることが必要である。また、トラクタを様々な方向から引し、トラクタの安定を損なう引張力の大きさを測定することも重要である。これらのデータにより任意の方向からある大きさの引張力で引張られた場合、そのトラクタが横転するか否かが判定できるようになる。

(2)乗上げによる横転

走行中のトラクタが段差、材あるいは伐根に乗上げれば車体が傾斜する。静力学的な計算では、このようにして発生した傾斜角度によって重心位置が安定平面外に出れば転倒するし、出なければ転倒しないことになる。しかし、実際にはこのような運動に伴って、接地した側の前後輪の接地点を結んだ軸回りに角運動量が発生し、静力学的に計算した結果以上に車体が傾く。そのため、このような運動は静力学的にはトラクタの傾きが安定範囲内にある場合でも転倒に至る場合がある。従って、この場合は動力学的な検討が必要であると思われる。

(3)引張られによる滑落

けん引中あるいは木寄せ中の材が立木や伐根などに引っかかることによってトラクタが引張られ、滑落するケースである。このような場合は土壤とタイヤの間の摩擦係数を明らかにする必要がある。様々な土壤条件、地表条件における摩擦係数が明らかになれば、それぞれの条件の下でどの程度の引張力が発生すればトラクタが滑り出すかを計算することができ安全対策上有益である。

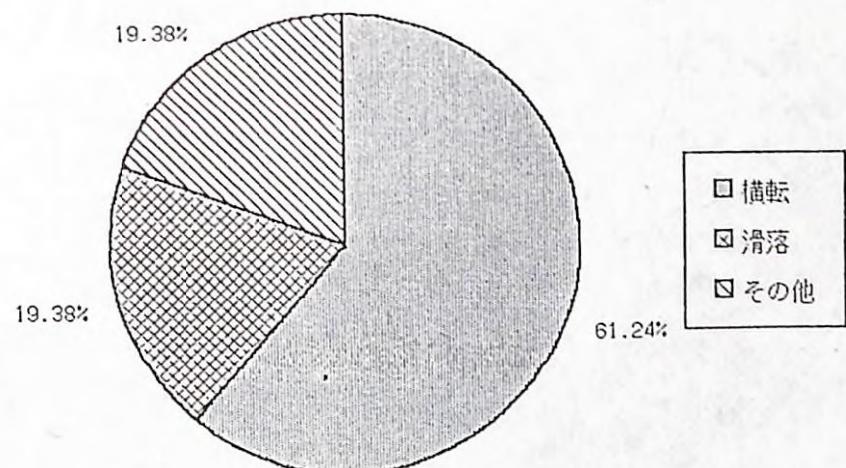


図1. トラクタ事故の形態

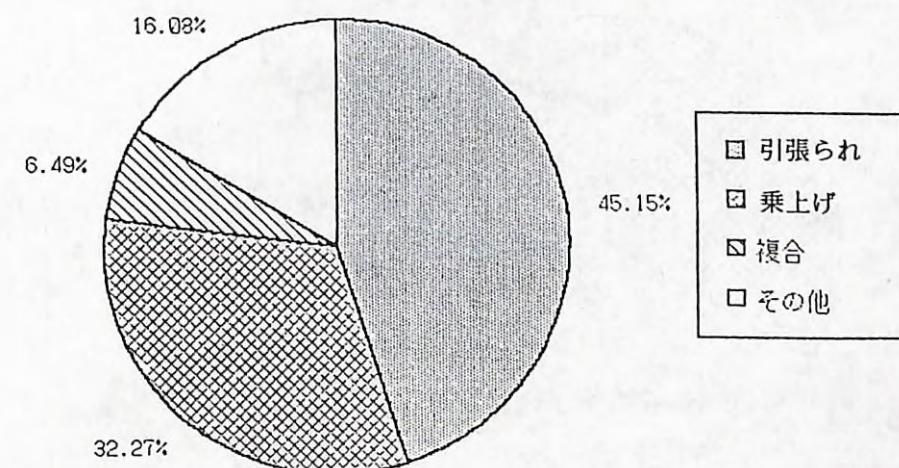


図2. トラクタ事故の原因

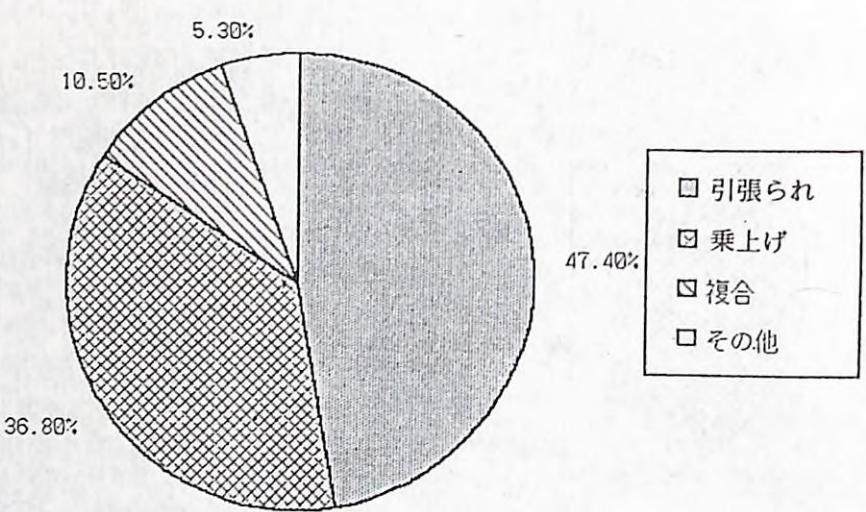


図3. 横転の原因

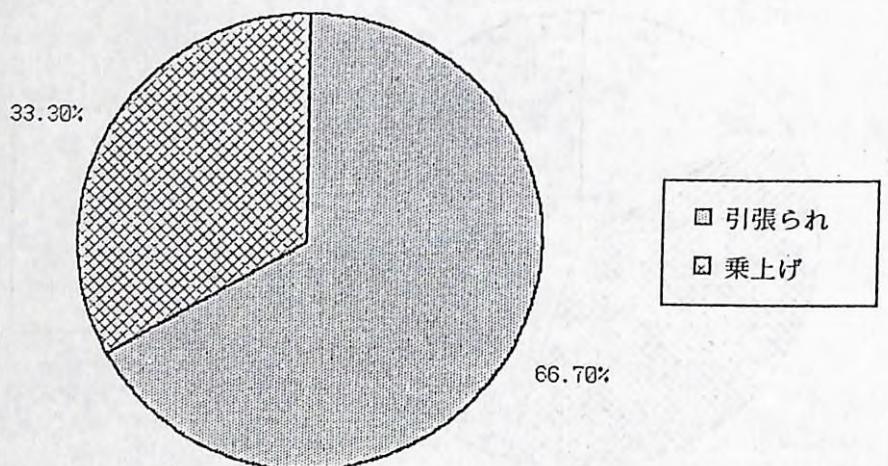


図4. 滑落の原因

以上まとめると、転倒・転落事故のきっかけは

- ①側方木寄せ作業中に材が障害物などに引っかかり、けん引抵抗が急激に増加した場合
 - (1)ウインチを解放するのが間に合わず、横転する。
 - (2)ウインチロープに引かれて横滑りし、路肩を踏み外す。
 - (3)木寄せによってロープと反対側の車輪が浮き上がり、ウインチを解放する。その結果、浮き上がった車輪の落下の慣性で反対側に横転する（アーティキュレート形では、屈折の外側の安定性が充分でないためこの現象が起こりうる）。
- ②走行中に車輪が路肩を踏み外す、または段差に乗上げ（特に後輪）、動的効果で横転する。
- ③曳行中材が障害物などに引っかかり、インテグラルアーチに安定を超える外力が加った。
- ④傾斜地と地表障害物が複合することで、車体が横滑りを起こし、動的効果で転倒する。

（伐出機械研究室・朝日一司）

2. 集材トラクタの安定特性

1) 重心位置の測定

トラクタの重心位置は、安定特性を判定する最も基本的データである。これまでに実施された測定値、メーカ資料などに加えて、新たな測定を実施した。

トラクタの重心位置を測定する方法には、以下の3方法などがある。

- ①全つり上げ法：車体を完全につり上げ、つり上げ点からおろした鉛直線を求める。このことを数回行い、交点から重心位置を決定する。この方法は、簡単で精度がよいが、車体全体をつり上げる施設が必要である。
- ②片側つり上げ法：車体の一端を数回つり上げて、車体の各傾斜角ごとに荷重と支点間距離の変化とを測定し、計算で求める。この方法も精度を上げるために傾斜角を大きくする必要があるが、施設の制約がある。
- ③傾斜荷重法：つり上げることができないとき、秤量計を傾斜地におき、車輪や履帶の荷重変化を測定して、計算で求める。精度は②とほぼ同様である。

(1) ホイールトラクタの重心位置測定

今回のホイールトラクタの重心位置測定は、②片側つり上げ法を車体前後それぞれについて行なうことから求めた。T-50の測定では森林総研の屋内施設（2.9トン容量天井走行クレーン）できりぎり可能であった。また、車体屈折による重心位置の移動は、車体を屈折させた状態で車輪を車重計上に乗せ、車輪荷重を測定して求めた。この場合、ピボット軸（車体屈折軸）は鉛直線と一致しているため、車体を屈折させても重心高さは移動しない。以上の結果を図5に、メーカ資料を図6に示す。

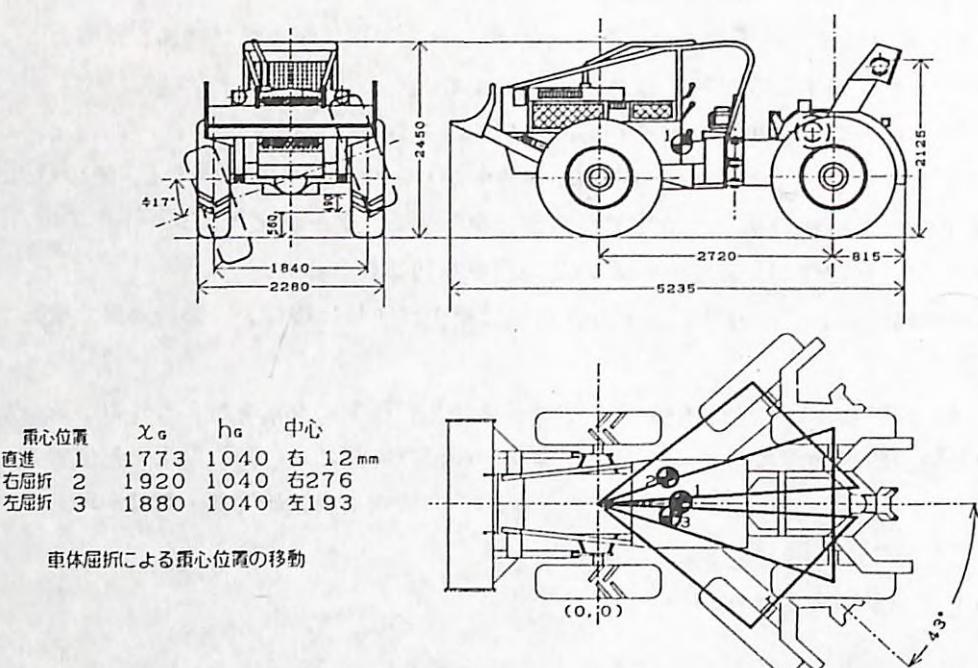
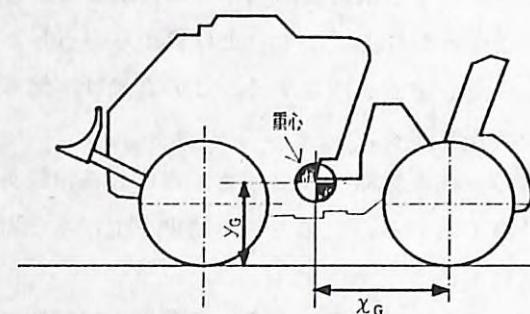


図5. T-50トラクタの重心位置



	T-10A	T-20A	T-30	T-40
車両総重量(kg)	1895	2800	3475	4765
x_G (mm)	1095	1275	1225	1385
y_G (mm)	700	835	775	945

図6. ホイールトラクタの重心位置
(イワフジ工業資料)

(2) クローラトラクタの重心位置測定

クローラトラクタの重心位置測定方法は JIS D6503「履帶式トラクタ性能試験方法」に規定されており、②片側り上げ法を用いて、傾斜角を θ_i ($i=1, 2$) 変えたときの荷重 P_i 及び支点間距離 S_i の変化から(1)式により求められる(図7)。ここでは測定条件(左右のグローサをそろえ、かつその接地点を遊動輪直下に設定する)の設定が容易なように新しい計算式(2)を導き、繰り返しの精度を向上させた。

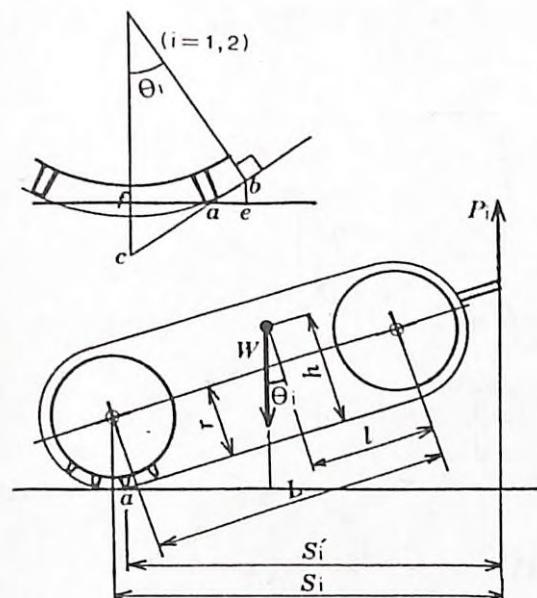


図7. 重心位置測定法

$$l = L - \frac{P_1 \cdot S_1 \cdot \sin \theta_2 - P_2 \cdot S_2 \cdot \sin \theta_1}{W \cdot \sin (\theta_2 - \theta_1)} \quad (1)$$

$$l = L + \frac{(S_2 \cdot P_2 / W + S_2 - S_2') \sin \theta_1 - (S_1 \cdot P_1 / W + S_1 - S_1') \sin \theta_2}{\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 - \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_1} \quad (2)$$

2) 静的安定範囲

(1) 静的安定角度の評価

斜面上のトラクタは、車体に作用する重力と外力・慣性力の合力が車両に固有の安定図形(三角形、長方形)内にある範囲で、安定といえる。安定性の評価の第一段階は、車体に働く重力が、安定図形内にある傾斜範囲(外力・慣性力=0)、すなわち静的安定範囲の判定によって行う。T-50について詳細に検討した。

① 重心着力点

重心位置から鉛直方向に延ばした直線が接地する点を重心着力点とする。車両の重心着

表2. 供試トラクタの重心位置

トラクタ	アタッチメント	ドーザー, バケット位置	重量 (kg)	接地長 (mm)	重心位置 θ_L h (mm)	θ_L 静的転倒角 (deg)	備考
CT-35TAD	—	下	6845	1710	942 631	0.55	56.2 計算値
CT-35TAD	ウインチ	〃	7275	1710	851 631	0.50	53.4 測定値
CT-35TAD	ウインチ,アーチ	〃	7485	1710	805 640	0.47	51.5 計算値
D30 S-15	—	下	6800	1875	972 739	0.52	52.8 引用(1)
D30 S-15	キャブ	〃	7625	1875	907 797	0.48	48.7 測定値
D30 S-15	キャブ,ウインチ	〃	8360	1875	741 806	0.40	42.6 "
D30 S-15	キャブ,ウインチ	中	8360	1875	750 940	0.40	38.6 "
D30 S-15	キャブ,ウインチ	上	8360	1875	730 1035	0.39	35.2 "

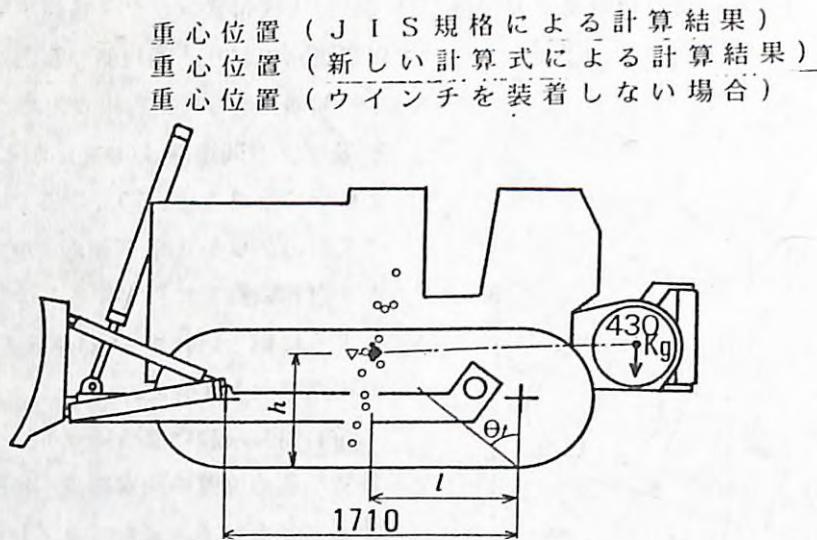


図8. 重心位置測定結果

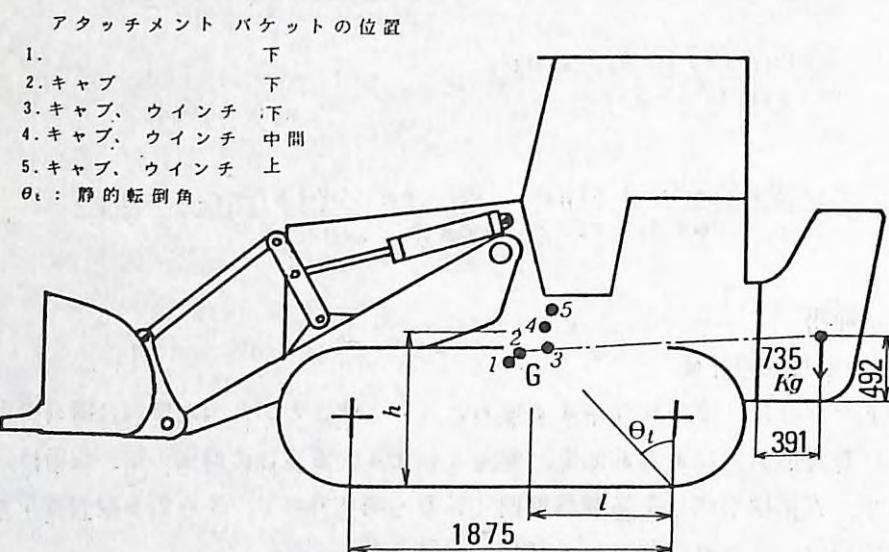


図9. アタッチメントによる重心位置の変化

力点の座標を (x, y) とすると車体の姿勢は、次の式から求められる（図10）。

斜面上の車体姿勢をピッチ角 α 、ロール角 β として表現すると

$$\alpha = \tan^{-1} (\pm (x^2 / (h^2 + y^2))^{-1})$$

$$\beta = \tan^{-1} (\pm (y^2 / (h^2 + x^2))^{-1})$$

車体姿勢を斜面傾斜 β 、最大傾斜方向から方位角 α で表現すると

$$\alpha = \tan^{-1} (x / y)$$

$$\beta = \tan^{-1} ((y^2 + x^2) / h^2)^{-1}$$

② 安定図形

車両の安定図形は足回り構造の形式や寸法によって決定する。4輪以上の車輪を持った車両は、通常車輪の揺動装置を持っているため、安定図形は長方形にならず、三角形となる。T-50は前輪アクスルを揺動するタイプ（ウォーキングビーム）の車体構造を持つ。従って、車体の安定図形は、後輪の接地点を底辺とし、ウォーキングビーム軸上・前輪軸との交点を頂点とする三角形である。実際に計算に使用する安定図形は、重心位置からながめて地上におろした投影三角形から、車軸より前方にはみ出した頂点部分を除いたものとなる（図11）。

転倒にいたる状態には前輪接地のまま後輪の片側が浮く第1ステージと、ウォーキングビームの揺動が最大となって前輪の片側も地面を離れる第2ステージがある。第2ステージの安定三角形は、頂点を揺動車輪（転倒の下側）の接地点、底辺は第1ステージと同様固定車輪接地点となる。

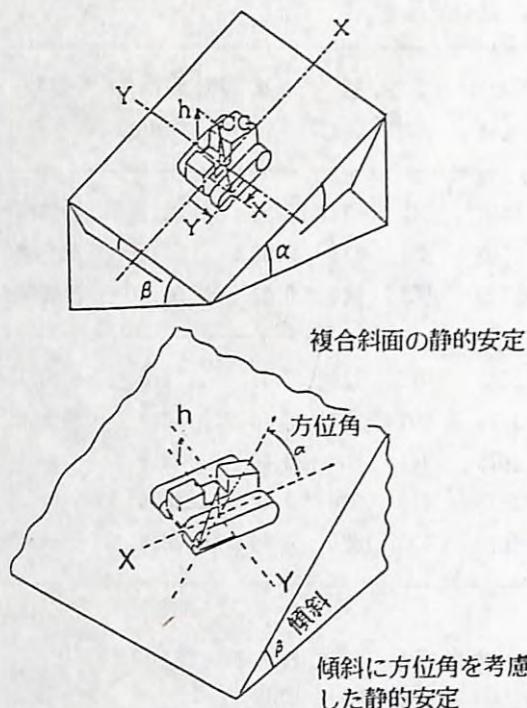


図10. 斜面上のトラクタの姿勢表現

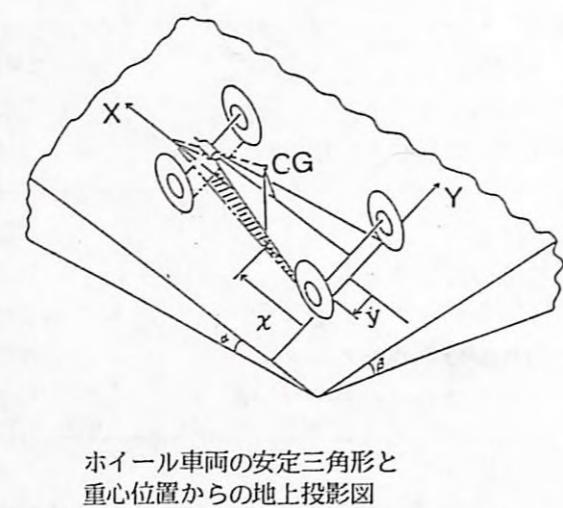


図11. ホイールトラクタの安定図形

③ 静的安定範囲

図12a) b)の閉曲線は、上記に従って求めたT-50トラクタの静的安定角度範囲を示す。図12a)は車体ピッチ角、ロール角で表される複合斜面上にある場合、図12b)は同心円で表される傾斜の斜面上で、車両が最大傾斜方向からある方位角の旋回を行ったときを示している。また、車体を直進状態と左最大屈折(43°)したとき範囲を同図に示した。ここで中程の太鼓形は第1ステージ転倒を、外側の三日月形は第2ステージ転倒角を示している。本図には右屈折時の範囲は示していないが、左屈折時のそれとほぼ左右対称となっている。

これらの閉曲線でT-50トラクタ特有の安定性を表している。一般に揺動車輪を持つ車両の場合、ロール(横)方向の安定性が十分でなく、また、アーティキュレート形車体の問題として屈折時の安定性低下がある。T-50でもこの傾向が見られ、静的安定範囲が(第1ステージ)、直進時でも左右方向で35°程度であり、左屈折時には左前・右後方向が30°程度まで減少している。

(2) ウォーキングビームの働きを加味した場合の評価方法

T-50トラクタの安定性の検討には、安定平面を三角形とするこれまでの考え方では、ウォーキングビームの働きによって発生する復元モーメントを除外することになる。特に

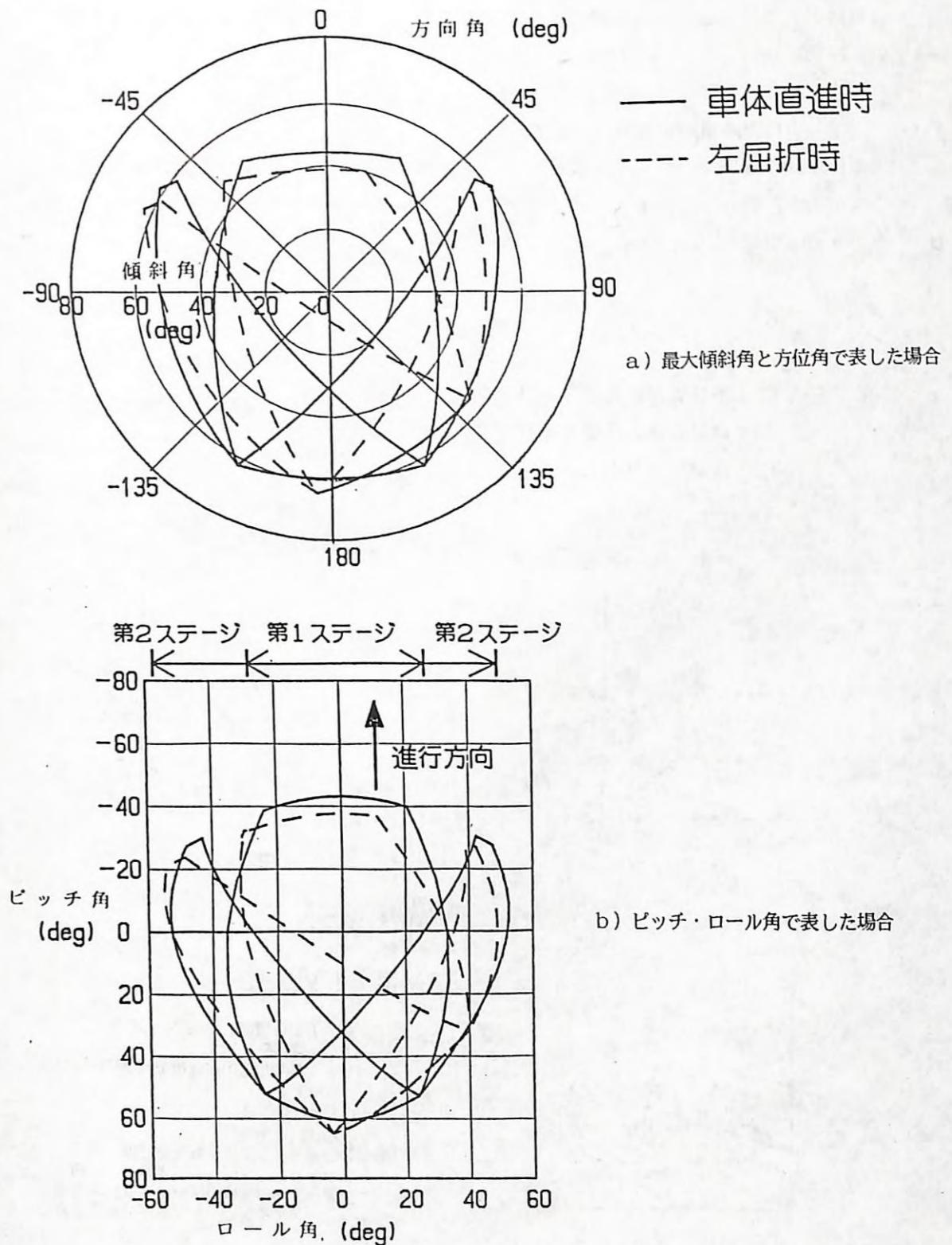


図12. 傾斜地における静的安定範囲

屈折時の安定性では、この影響が大きくなるため、これまでと異なった計算方法を用いて安定範囲を検討した。

①転倒に至る重心の動き

車体にはウォーキングビーム及びピボットの回転軸があり、車輪と地面の間にも回転自由度がある。従って、第1ステージ転倒における車体後部の座標は次の式から求めることができる（図13）。

$$V = T V_0$$

ここに V : 車体各部の座標マトリクス
 V_0 : 直進位置の座標マトリクス
 T : 変換マトリクス

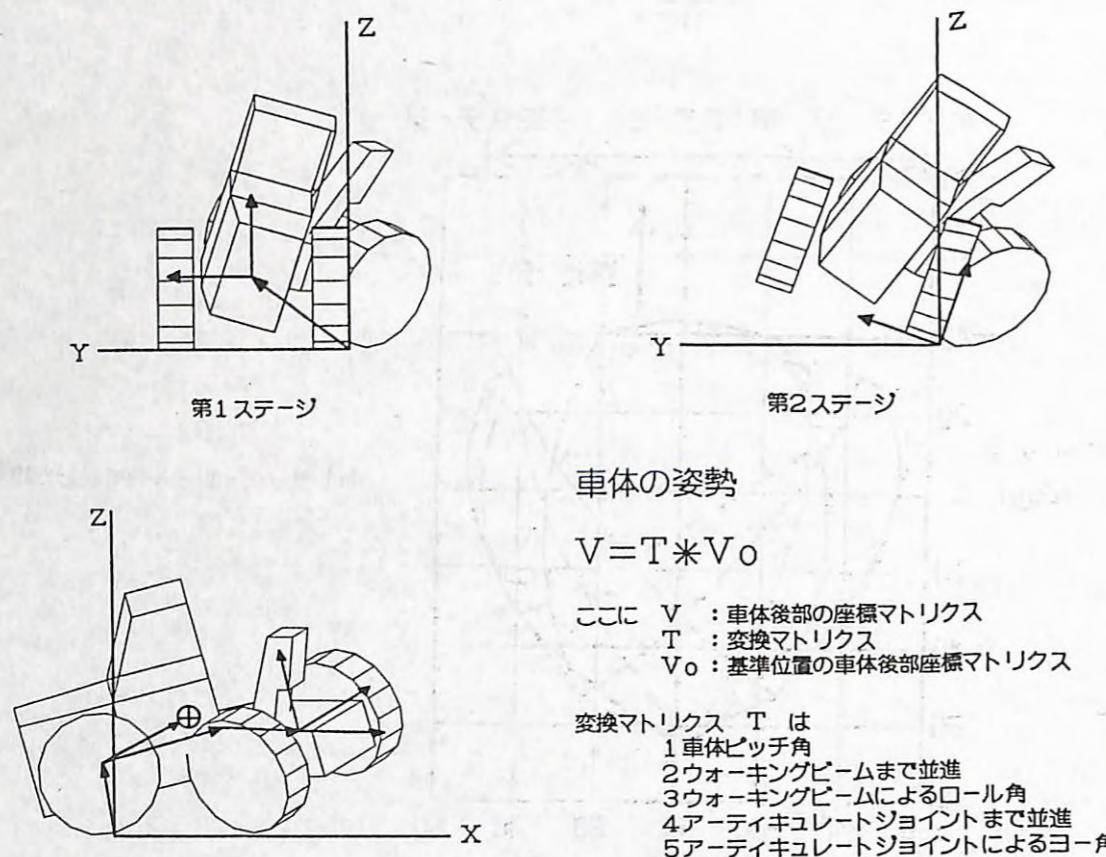


図13. マトリクスを利用した車体姿勢（重心位置）表現法

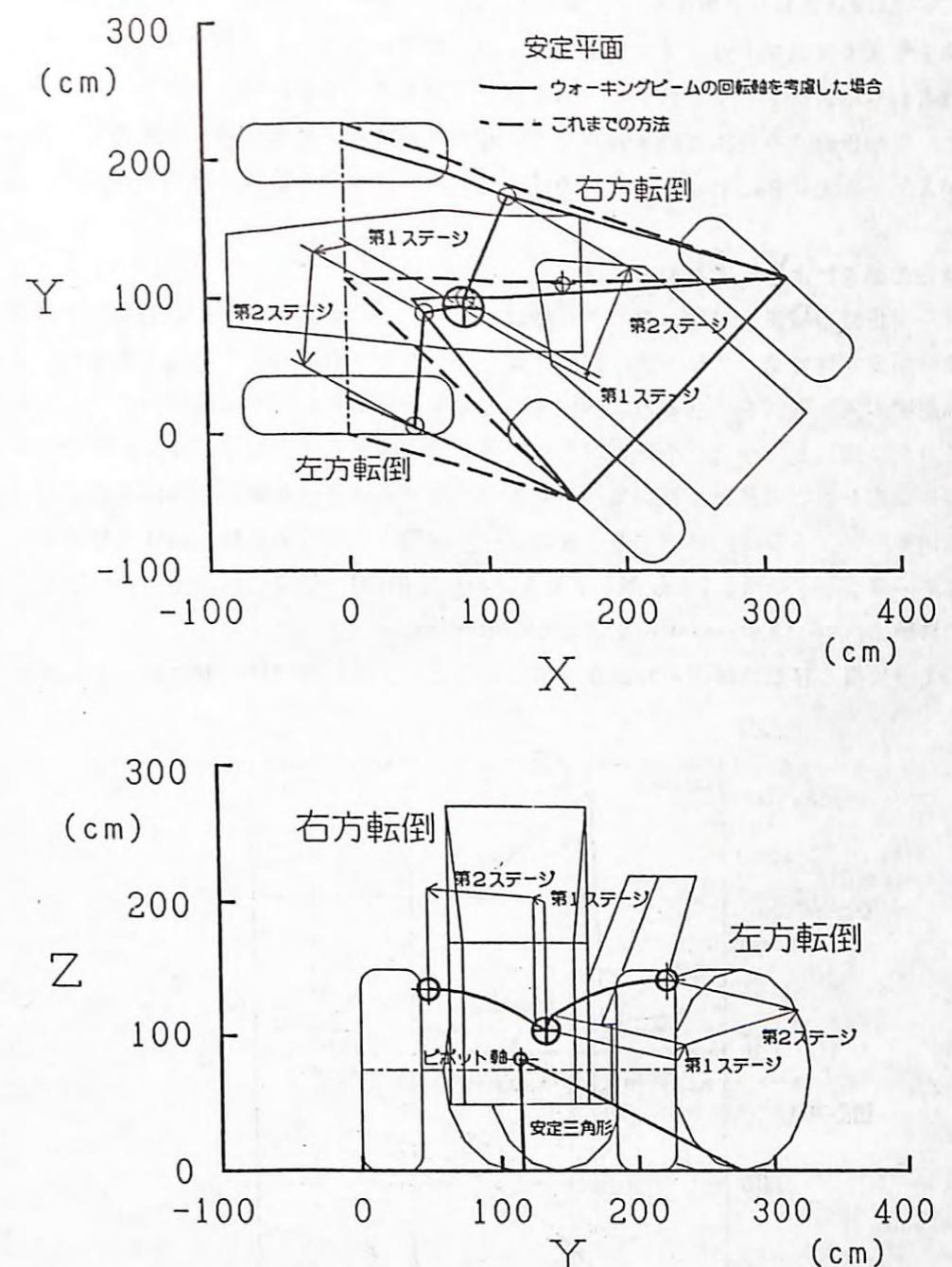


図14. 転倒時の重心位置移動（車体左屈折時）

ここに T は原点まわりに車体ピッチ角を与え、次にウォーキングビーム回軸まわりにロール角を与える変換マトリクス（前部車体・重心位置）であり、後部車体にはさらにピボット軸まわりにステアリング角を与える変換マトリクスである。第2ステージではさらに加えて、車輪接地点を結ぶ直線まわりにロール角を与える。前輪接地点が原点に、後輪接地点がXY平面上にあるとして、以上の式から転倒に至る重心位置の移動を求めた。

②重心の動きによる安定範囲の評価

図14に左屈折時の結果を示す。重心の移動は第2ステージが大きいが、動的効果を考慮すると車体の安定性は第1ステージの範囲で論じるべきとされており、ここでもそれに従う。車体屈折の内・外側を比べると、外側（右方）転倒時の重心移動距離は内側（左方）転倒のそれらに比較してかなり小さい。また、外側では高さ方向の重心移動がわずかである。図15には重心高さの移動と転倒モーメントを、前部車体ロール角との関係で示した。ここに転倒モーメントとは、転倒するときのロール回転中心からの距離と車体重量によって生じるモーメントをいう。外側転倒するときは内側転倒の1/4程度の転倒モーメントと重心高さの移動で、第1ステージを終えることが示された。

以上のように重心移動軌跡から安定性を検討すると、屈折外側には内側に比べて小さな

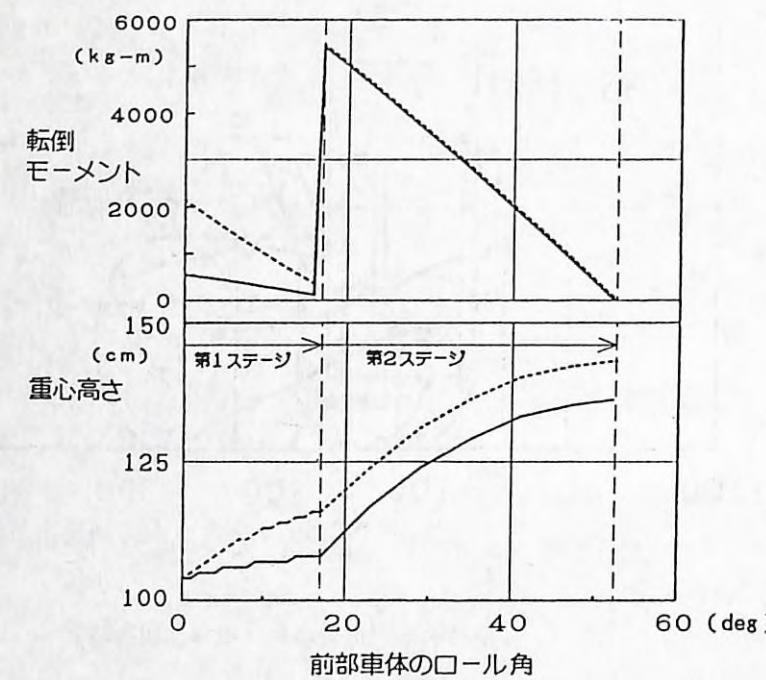
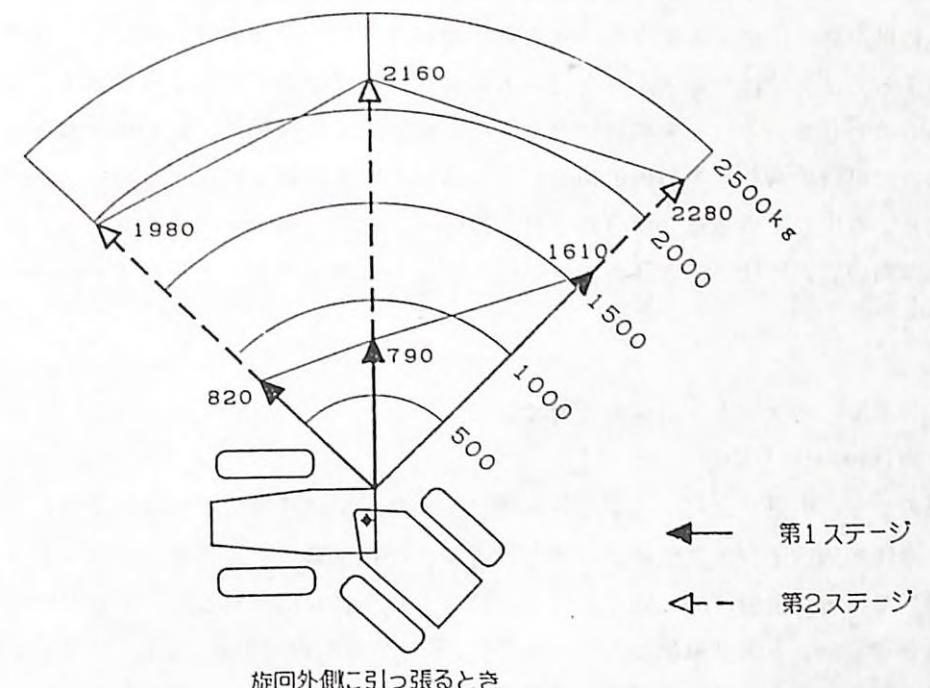
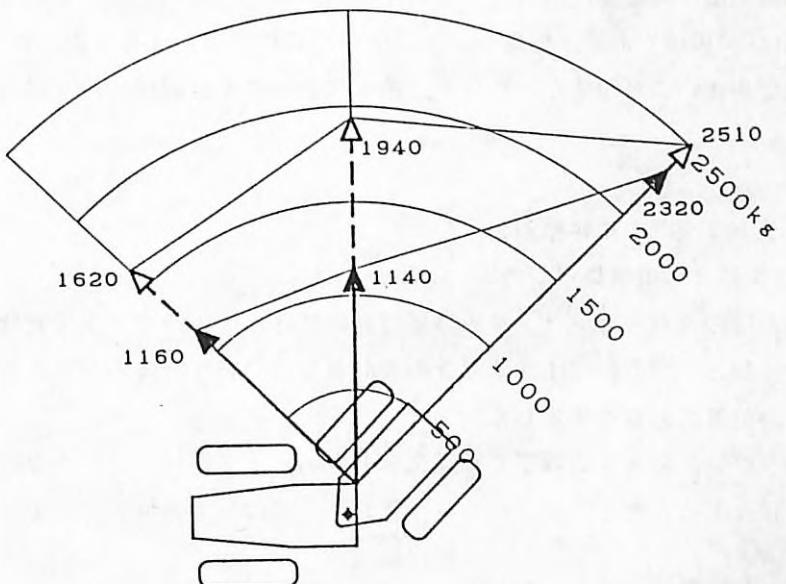


図15. 車体のロール角と重心位置の移動・転倒モーメント



旋回外側に引っ張るとき



引張点の座標

旋回内側に引っ張るとき
 $X: 1620$ (前輪から)
 $Y: 500$ (中心軸から)
 $Z: 2050$ (高さ)

図16. 側方引っ張りテスト結果

外力で転倒し、安定性が低いことが分かる。ところが、重心位置と安定図形から求めた安定性には、外・内側で大きな差が見られなかった。この結果の違いは、(7) 後者（安定図形による方法）ではウォーキングビーム軸をボールジョイントのように無方向性に回転できるものとしている、(1) 実際にはウォーキングビームの揺動は、回転軸（ロール方向）回りのみで可能であり、その他の回転が生じる場合には同時にピッチやヨー方向の回転も伴うことから生じていることが分かった。従って、特にT-50のようなアーティキュレート形車両の安定性は、前者（重心移動軌跡による方法）によって検討する必要があると思われる。

3) ホイールトラクタの外力に対する安定

(1) 側方引張り実験

側方からの引張りに対する安定性をテストした。供試機械はT-50造林用改造機であり、車体後部はインテグラルアーチとワインチが取り外され、三点リンク・PTO装置を装備している。重量は5800kgであり、改造なしの車体にはほぼ等しい。FOPSキャブ支柱（高さ2050mm）を前部車体に対して±45°、90°の右方向に引張り、第1ステージ開始（後輪浮上）及び第2ステージ開始（前輪浮上）直後のロープ張力を測定した。

車体屈折の内・外側で比較した結果を図16に示す。内・外側とも第1ステージでは前方45°と90°の値がほぼ等しく、後方45°の値がやや大きい。外側の張力は三方向ともに内側のそれのほぼ2/3の値である。転倒モーメントの計算結果ほど大きな差はないが、屈折外側では安定性が小さいことが確かめられた。第2ステージでは屈折の内・外側で大きな差はなかった。

4) クローラトラクタの車体傾斜角

(1) 障害物乗越え時の車体傾斜角

障害物乗越え時のクローラトラクタ車体傾斜角の変化は、トラクタが障害物を上がりきるまでの静的運動と、地表に落下するときの動的運動に分けて考えられる。ここでは、前者に対する重心位置の影響を推定した。

登坂中のトラクタが丸太を両履帯で乗越えるときのピッチ角は、トラクタの重心位置が丸太と履帯の接点上にきたとき最大になり（図17）、式(3)で表すことができる。

$$r(1+\cos(D)) = ha(1-\cos(D)) + \sin(D)(l-h \cdot \tan(D+\theta)) \quad (3)$$

斜面傾斜と乗越え高さから計算されたトラクタの最大ピッチ角を図18に示した。通常オペレータが見落とすとされる高さ15cmの障害物を、傾斜20°斜面上で乗越える場合を考えると、CT-35TAD単体では最大34°のピッチ角となるのに対して、同機種ワインチ付

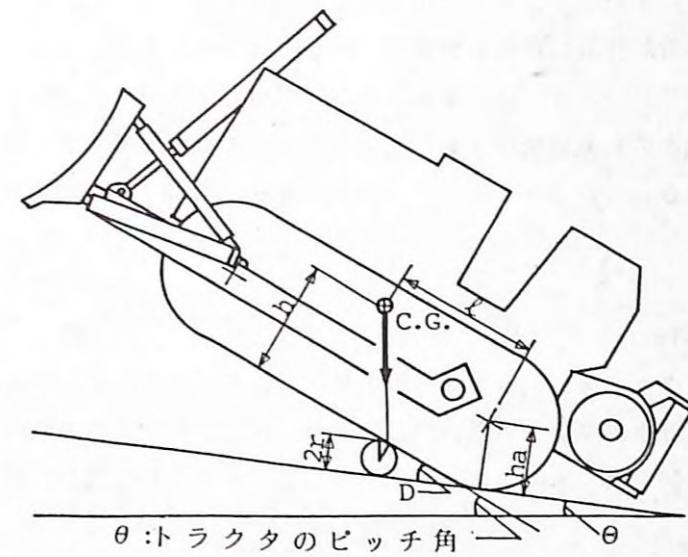


図17. 障害物乗越え時の模式図

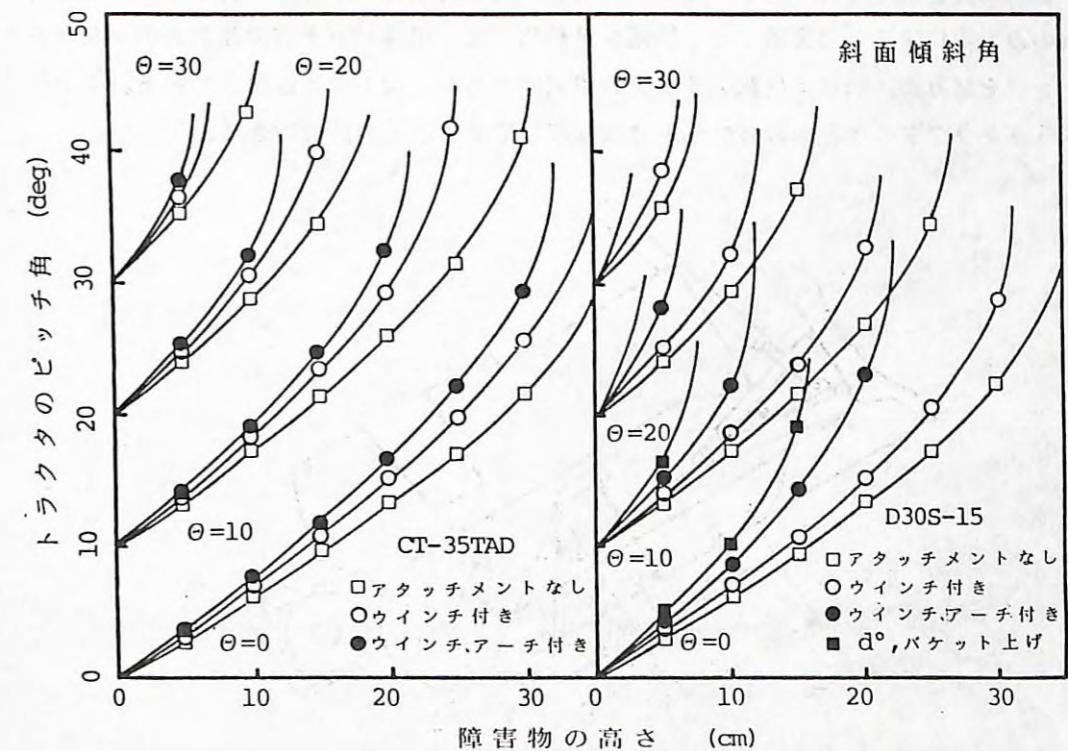


図18. 乗越え時ピッチ角の推定結果

きでは39°となり、アーチ付きではさらに増大して乗越え不能となった。このようにアタッチメント装着による重心位置の移動の影響は、かなり大きいことが分かる。

また、同条件でD 30 S-15では、単体でも37°傾斜し、アタッチメント付きでは乗越え不能となる。同機種の類似機械がフォークローダとして土場作業によく使われるが、掘削作業を主体に設計されているトラクタショベルであり、傾斜・不整地走行には適していないことが分かる。

(2)登坂時の車体傾斜角

傾斜地走行中のトラクタ車体の傾斜角は地形の変化に応じて大きく変化する。ここでは地形の変化に応じてトラクタ車体の傾斜角がどのように変化するか予測を試みるとともに、車体の急激な動きにも精度良く追随するセンサーとしてジャイロを使用し、傾斜角の動的測定を行った。

①登降坂時の車体傾斜角のシミュレーション

クローラトラクタは、その懸架方式によっても異なるが接地面が固定されているため、乗越えで生じる車体傾斜角が大きくなることが多い。このことは土に対するトラクタの静的挙動の問題として理解できる。そのため履帯の沈下と車体の慣性を無視し、地形は進行方向のみで変化すると考えることで問題を単純化して、車体ピッチ方向傾斜角のシミュレーションを試みた。図19は供試トラクタの模式図であり、図上G点は重心である。重心位置より本トラクタの後方への静的転倒角度は53°であることが計算できる。

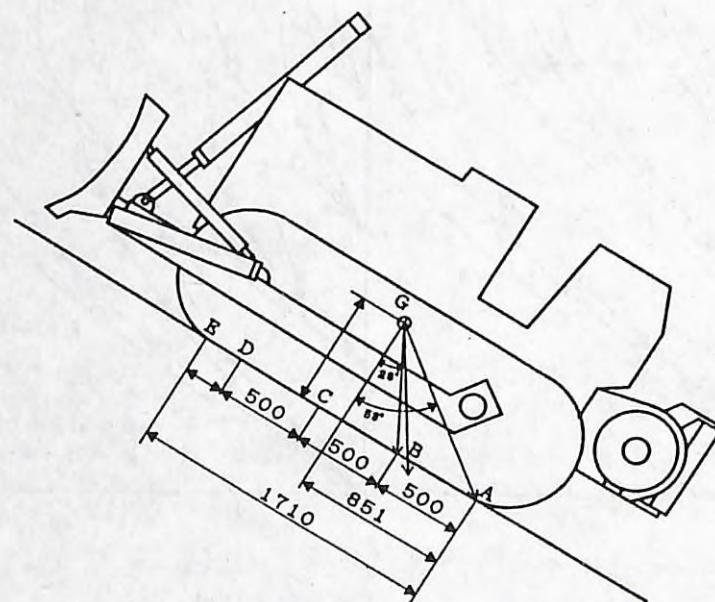


図19. トラクタ車体傾斜角シミュレーションの模式図

履帶上に地形データと同じく50cm間隔でA, B, C, Dの4点を考え、トラクタはこのうちの2点で接地すると考えると、車体傾斜角は地形に応じてどの2点が選択されるかによって決定される。図20が登坂時傾斜角決定の流れ図である。最初にA, D接地と仮定してC点の高さを求め、次に地形データと比較してC点の接地、否接地を決める。C点が接地していないければA, D接地としたままB点の高さを求めた地形データと比較するが、C点が接地であればA, C接地と仮定してからB点の高さを求め検討を進める。このことを繰り返すことによって2点の選択を行い、車体の傾斜角を決定した。ここに路面の傾斜角はトラクタ長さ間における平均傾斜で示した。

以上の手順で求めたトラクタ車体ピッチ角シミュレーション結果の一部を図21に示す。ここでは路面傾斜角26.0°地点での、小突起乗越えの前後3点について示しているが、登坂時には車体傾斜角が34.9°にもなり、小さな地形の変化でも車体が大きくピッチ運動することが予想される。しかし同地点で降坂時には、車体ピッチ角が21.0°にとどまることが示される。

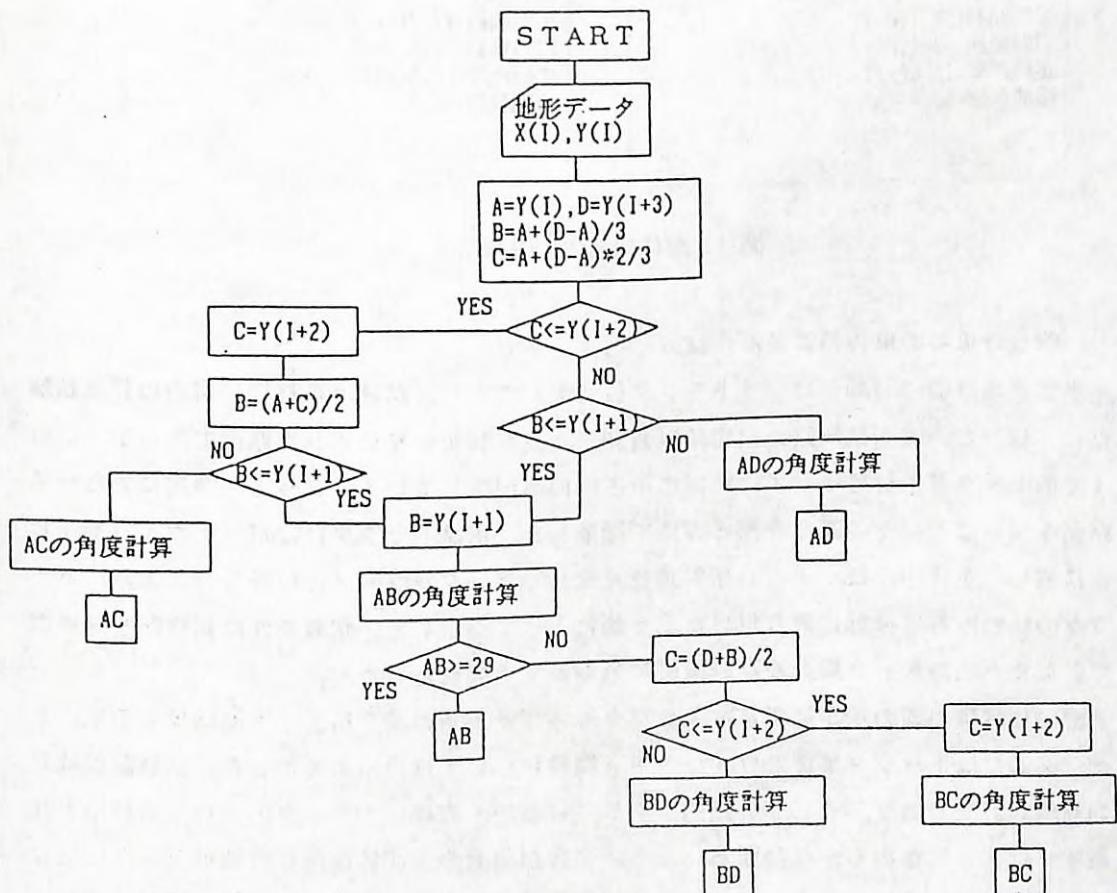


図20. トラクタ車体傾斜角予測の流れ図

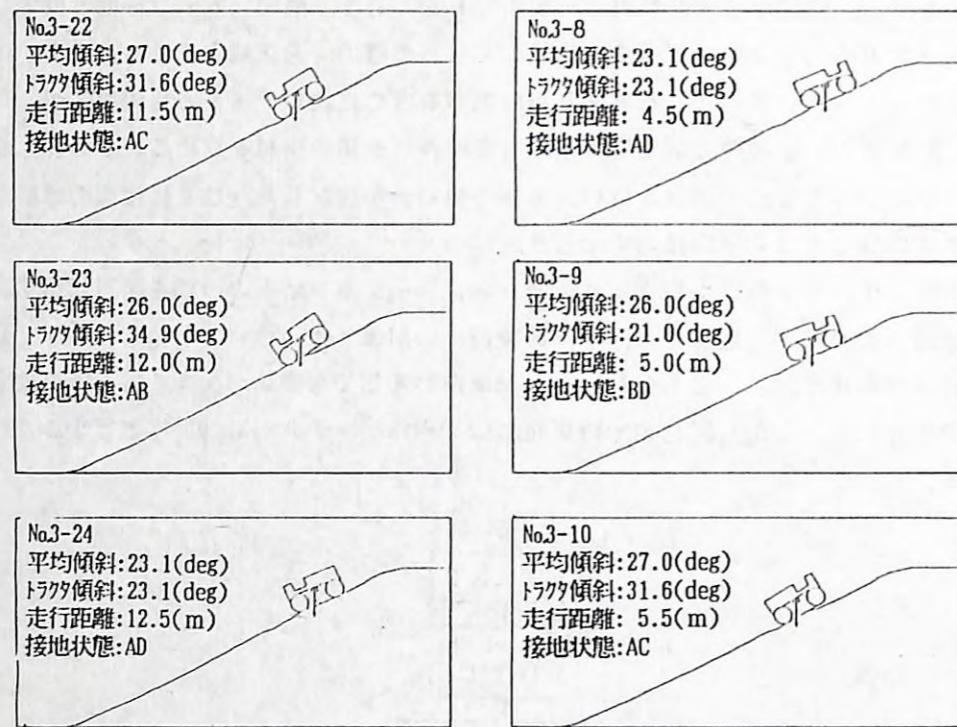


図21. 車体傾斜角の予測結果

②登降坂時の車体傾斜角測定試験

供試機種はCT-35TADクローラトラクタ(7.5t)であり、試験は森林総研構内の登坂試験路にて行った。該当試験路は設定傾斜角30°、長さ16mに整地された路面であるが、これまでのトラクタ走行によって、路面に小さい凹凸が生じている。従って、測定に先だって路面を50cmごとにその高さを測る方法で測量した。供試トラクタにはバーチカルジャイロを搭載し、走行中のピッチ方向傾斜角を連続してデータレコーダに記録した。また、トラクタの移動距離は後部に取り付けた第5輪によって測定した。試験条件は試験路を等速度で登坂または降坂した場合及び降坂時に急制動する場合とした。

図22に試験路面の測定結果及びトラクタ車体ピッチ角の測定結果、予測結果を示す。また、図23にはトラクタ単体とウインチ付き機種について推定結果を示した。試験路面は平均傾斜角27°であり、±15cmの凹凸が生じているが、実際にトラクタの走行する林地と比較すれば非常になめらかな路面といえる。車体傾斜角の予測に使用した地形データには左右わだちの平均値を用いた。図中、中段は登坂時の結果を、上段は降坂時の結果を示し、前者は左から右へ、後者は右から左へそれぞれ移動している。前後者とも、車体傾斜角の

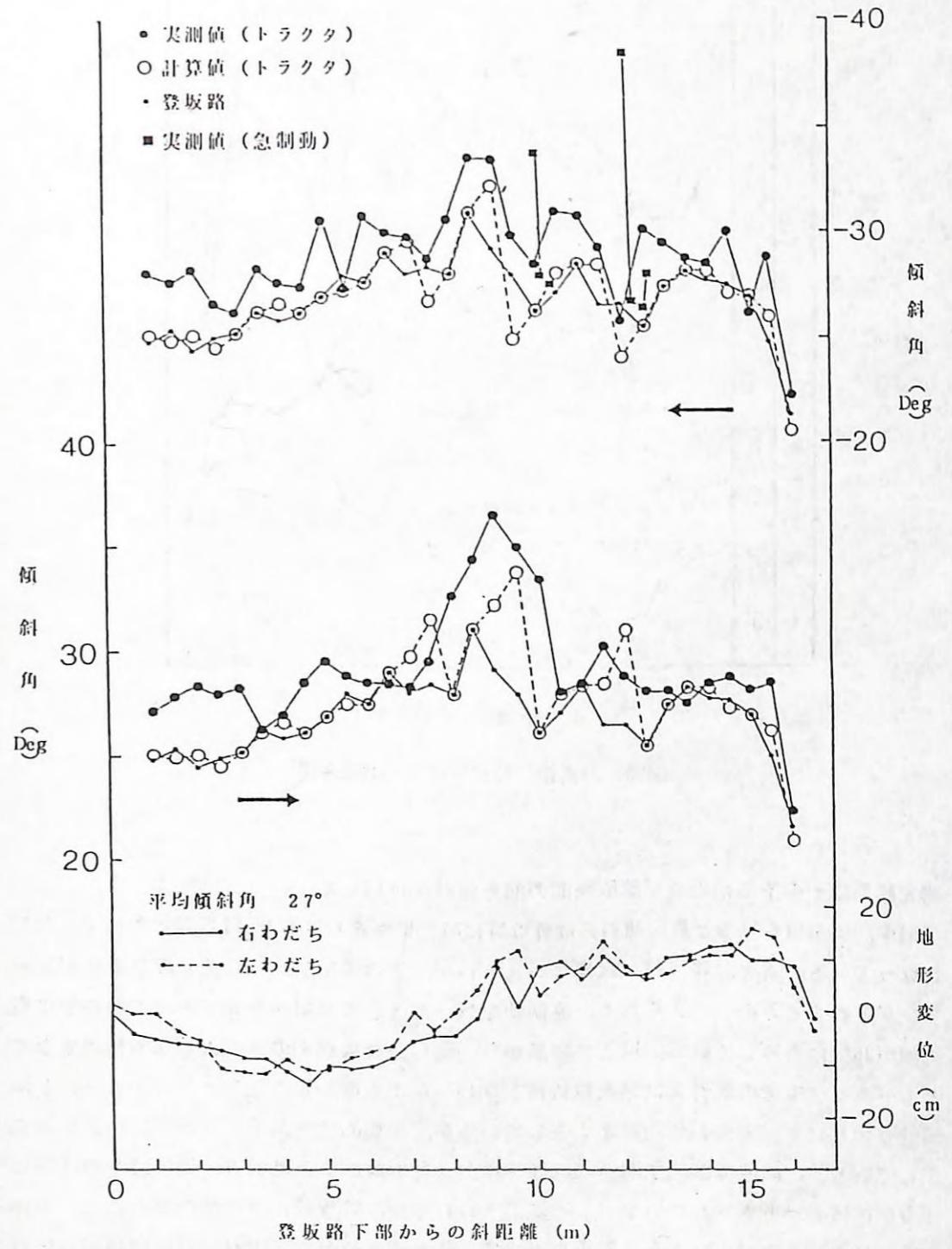


図22. 試験結果

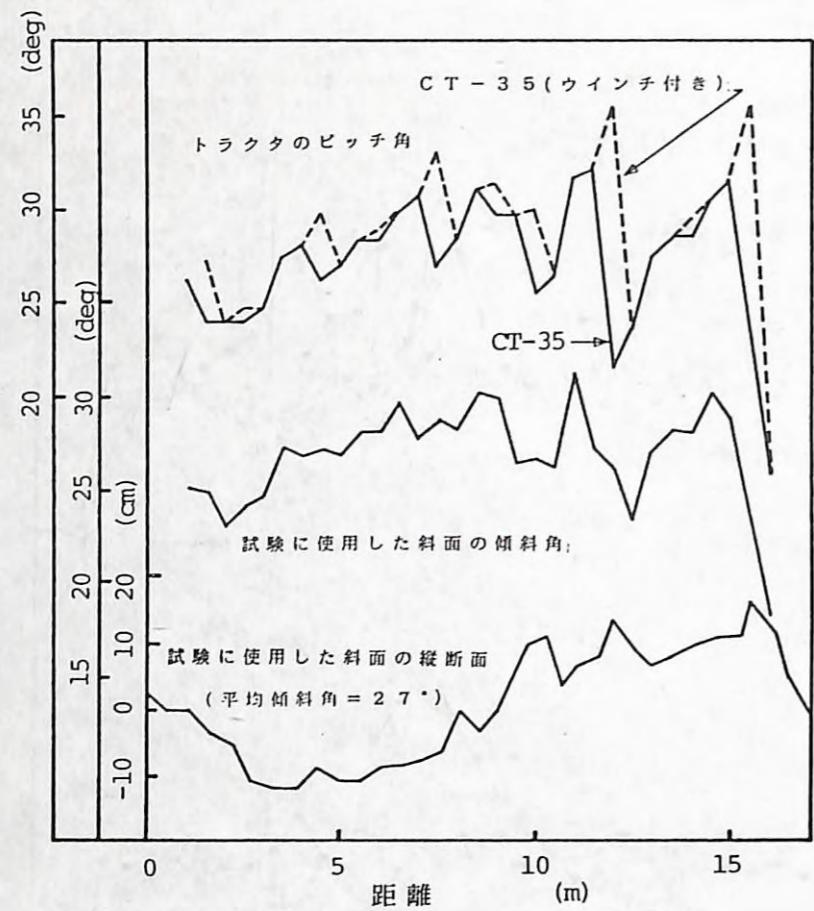


図23. 斜面走行時ピッチ角の推定結果

測定結果にその予測結果及び試験路面の部分傾斜を併記した。

図中、実測値を見ると最大傾斜角は登坂時に37°にも達しており、降坂時においても34°になっている。また、降坂時には変化が大きいが、走行速度が比較的速くなり車体がピッキング運動するためと考えられる。急制動を行ったときの傾斜角を見ると、1回目では最大値が39°にも達している。以上の結果から、明らかな乗越えのあるような不整地でなくともトラクタ車体の傾斜角は路面傾斜角より10°以上も増加しうることが分かった。予測値は全体として測定値の傾向をよく表しているが、平均的に実測地より2~3°小さな値を示している。この原因は、予測値には履帶後方（登坂時）または前方（降坂時）の沈下に伴う車体傾斜が考慮されていないことが考えられるが、降坂時や急制動の場合には、車体の慣性による運動がより大きく影響しているものと考えられる。図24は登坂時傾斜角に対する車体傾斜角の予測値及び実測値を表わす。直線は、車体と路面の傾斜角が一致する線を表わすので本図から車体傾斜角が路面傾斜角より大きくなる様子が明らかになる。

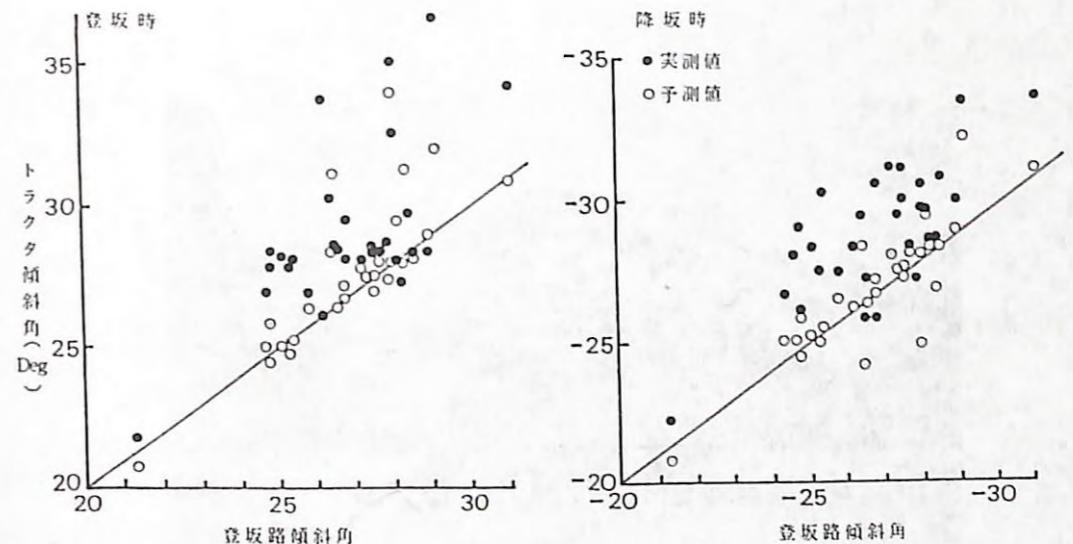


図24. 登坂路傾斜角と車体傾斜角の関係

(造林機械研究室・佐々木尚三)

3. トラクタ転倒に対する動的効果の検討

1) 目的

トラクタの安定性は、静的安定性+外力+動的効果の総合作用によって決定される。動的効果は車体の運動特性を把握し、いろいろな場面での運動方程式を定めることにより、求めることができる。トラクタ車体の運動方程式を定めるためには、車体の各方向に対する慣性モーメントを知る必要があり、さらにタイヤや土の動的挙動も考慮しなければならない。ところが、トラクタのような重量物の慣性モーメントの測定は非常に難しく、土やタイヤは非線形の挙動をするため、求めるべき運動方程式は非常に複雑である。

そこで動的効果の評価方法として、実験的にある場面の動的効果の大きさを把握する手法を用いる。今回は、トラクタ転倒に関して、特に問題となる動的効果として障害物乗越えを取り上げ、速度を上げて乗越えたときの跳ね上げられる車体ロール角度から、車両走行時の安定性を推定する。

2) 丸太の乗越え試験（ジャイロによる車体角度の測定）

(1) 試験方法

丸太を固定しその上をトラクタ（T-50）の片輪で乗越える（写真1）。このときのトラクタの車体角度、(Roll, Pitch), 走行方向 (Direction)をジャイロを用いて計測した。ジャイロは多摩川精機製TA31N10を用い、記録はデジタルデータレコーダ（T E A C: DRF 1）を用いた。ジャイロはウインチ上（後車軸よりやや前方）に取り付けた（図25）。



写真1. 丸太乗越え実験

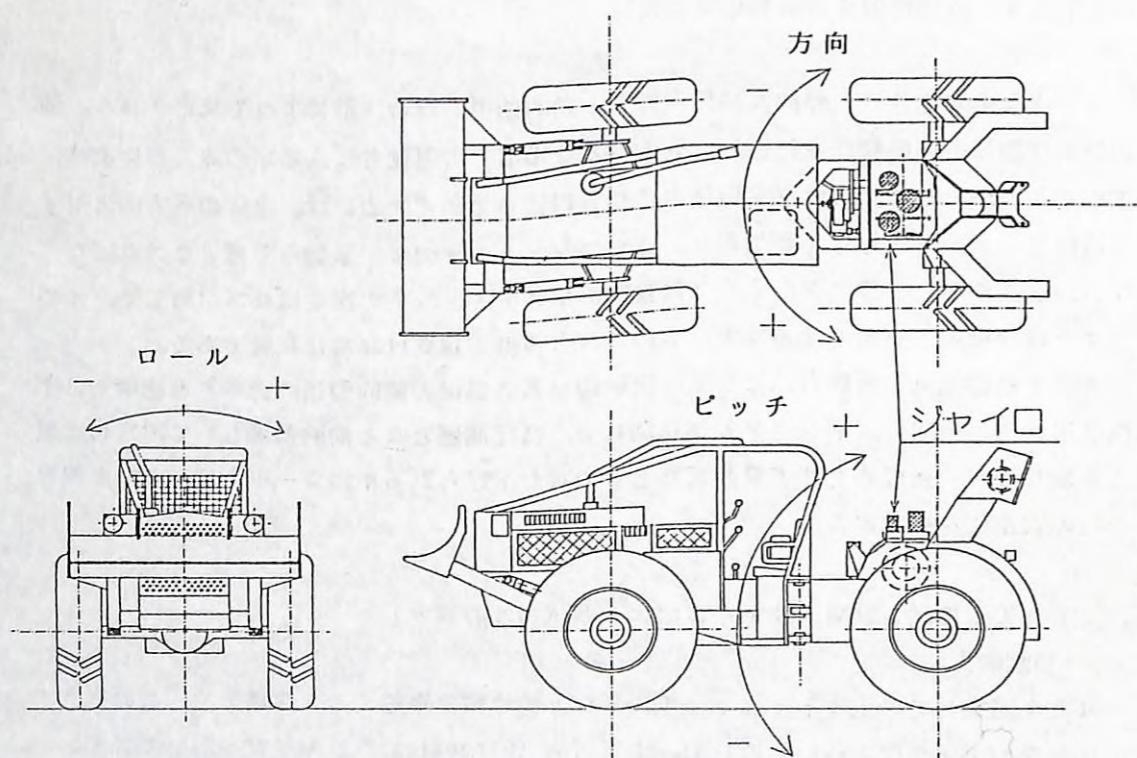


図25. ジャイロ取り付け位置と出力の正負

(2) 試験条件

乗越える丸太の太さを45cmと28cmの2種類とし、変速段数をそれぞれ1～3速、3～4速と変えて行った。エンジンの回転数は、いずれの場合も1500～2000rpmで走行した。

試験を行った場所は、森林総研構内の試験走行用草地で、トラクタの乗越え時に丸太が沈下しないように配慮した（地盤が十分に堅くないので多少の沈下は認められた）。

測定に用いたジャイロは、全て300°を10Vレンジで出力する。また、記録計DRF1は、±5Vの入力レンジを12bitで表現する。なお、サンプリング周期は10Hzである。

(3) ジャイロの出力からの分析結果

図25にジャイロの取り付け位置、及びジャイロの出力の正負を示す。次に、走行中の車体角度の変化を図26～34に示す。また、各測定条件などを表3に示す。

今回の測定では、車体の傾きが±30°以下であるため±1V以内の小さな範囲での記録となり、ノイズがかなり大きくなつた。そのため、記録された波形の違いから、各条件ごとの車体の挙動の細かい違いを見ることはできなかつた。まず、図26～34までを見ると、いずれもロール、ピッチ角の値はほぼ同様の傾向を示している。最初に前輪が丸太に乗上

表3. 丸太乗越え試験時の測定条件と跳ね上がり角度

測定番号	走行段数	丸太直径 (cm)	Max.Roll Angle (°)	Max.Height (mm)	備考
D11	1	45	15.612	495.2	
D12	2	45	18.243	576.0	
D13	2	45	20.136	633.4	丸太が移動
D14	3	45	22.350	699.7	
D21	3	28	9.987	319.1	
D22	3	28	11.175	356.6	
D23	4	28	7.803	249.8	丸太が沈下
D24	4	28	11.088	353.6	
D25	4	28	8.826	282.3	

※ 表3.の中で Max. Roll Angle (最大ロール角) と Max. Height (最大跳ね上げ地上高) はいずれも後輪の乗越え時の値である。

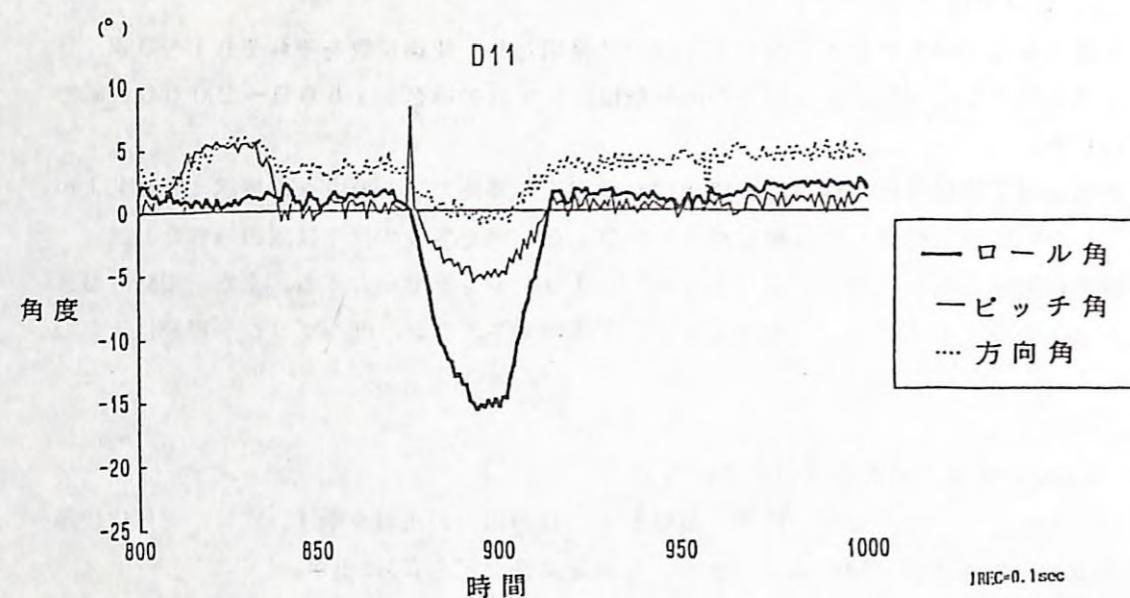


図26. ジャイロによる丸太乗越し時の車体角度の変化 (1速, 丸太の直径4.5cm)

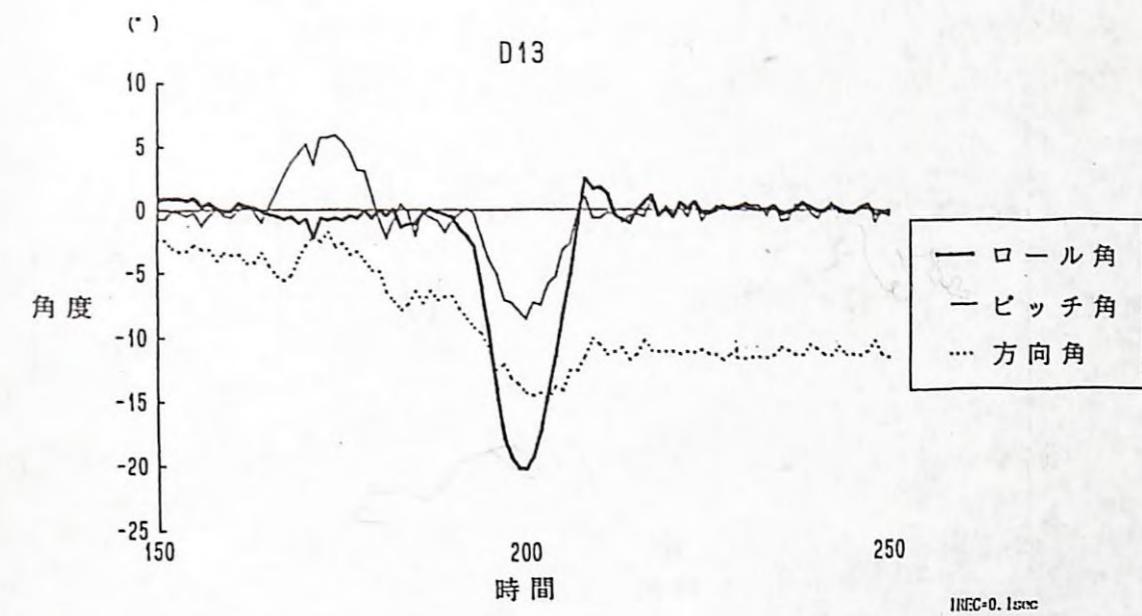


図28. ジャイロによる丸太乗越し時の車体角度の変化 (2速, 丸太の直径4.5cm)

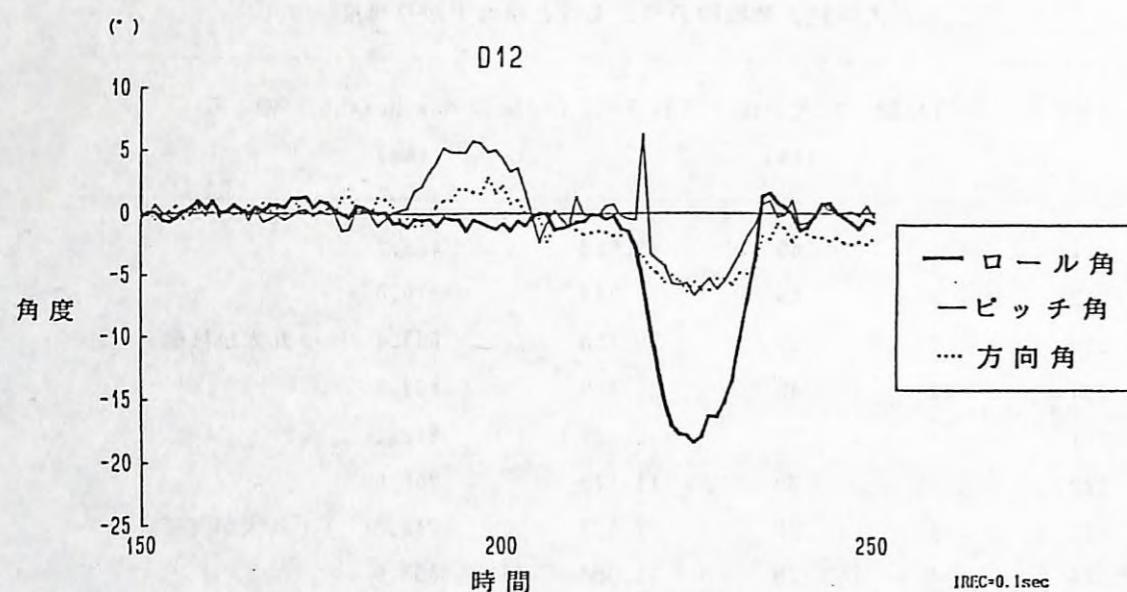


図27. ジャイロによる丸太乗越し時の車体角度の変化 (2速, 丸太の直径4.5cm)

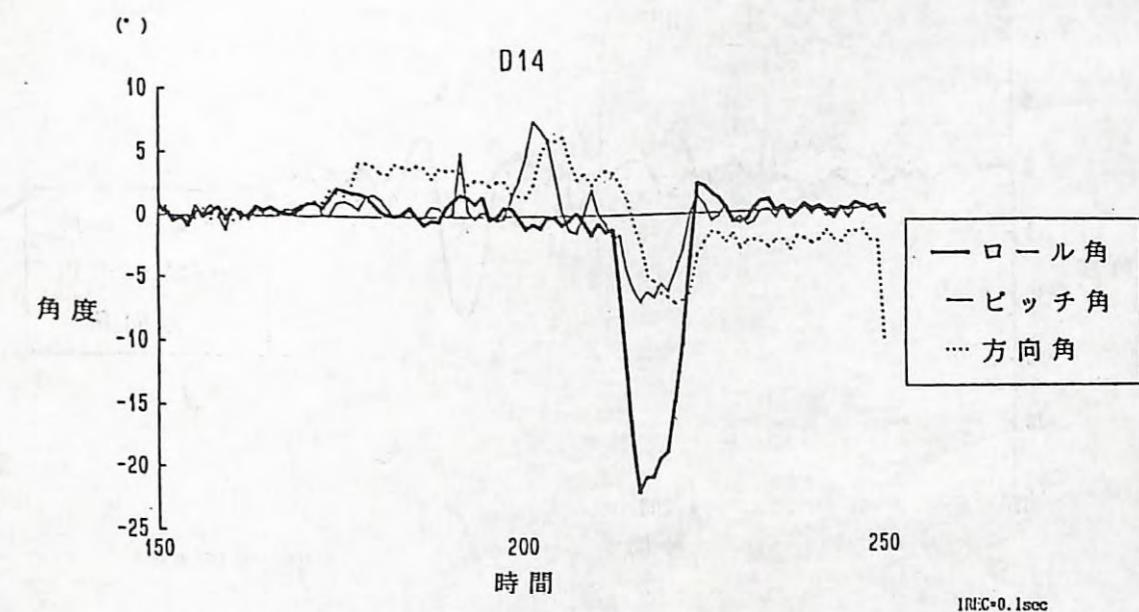


図29. ジャイロによる丸太乗越し時の車体角度の変化 (3速, 丸太の直径4.5cm)

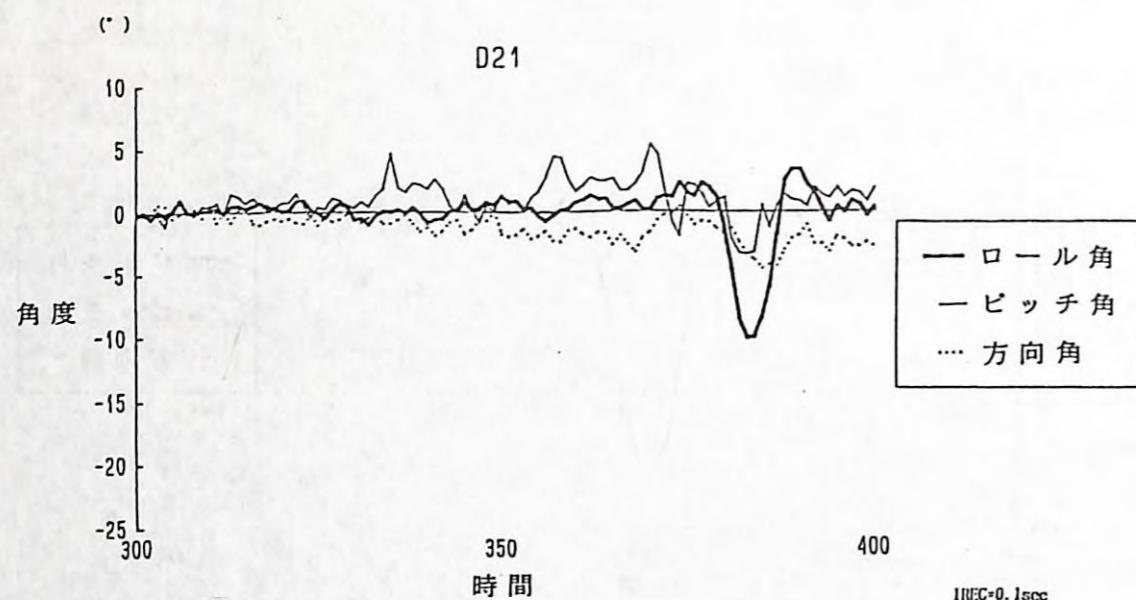


図30. ジャイロによる丸太乗越し時の車体角度の変化 (3速, 丸太の直径28cm)

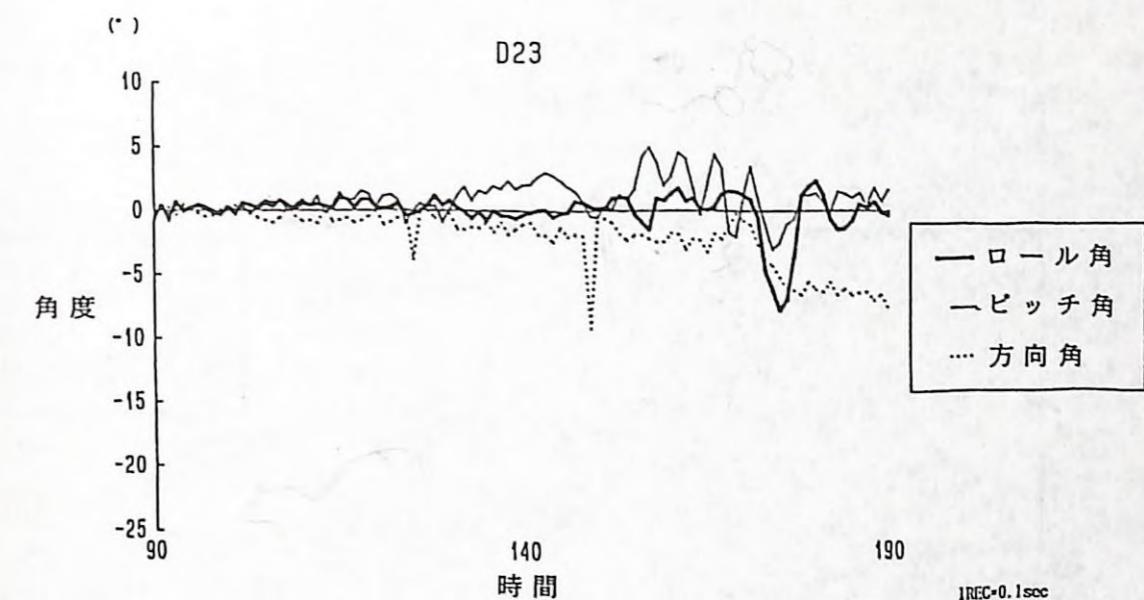


図32. ジャイロによる丸太乗越し時の車体角度の変化 (4速, 丸太の直径28cm)

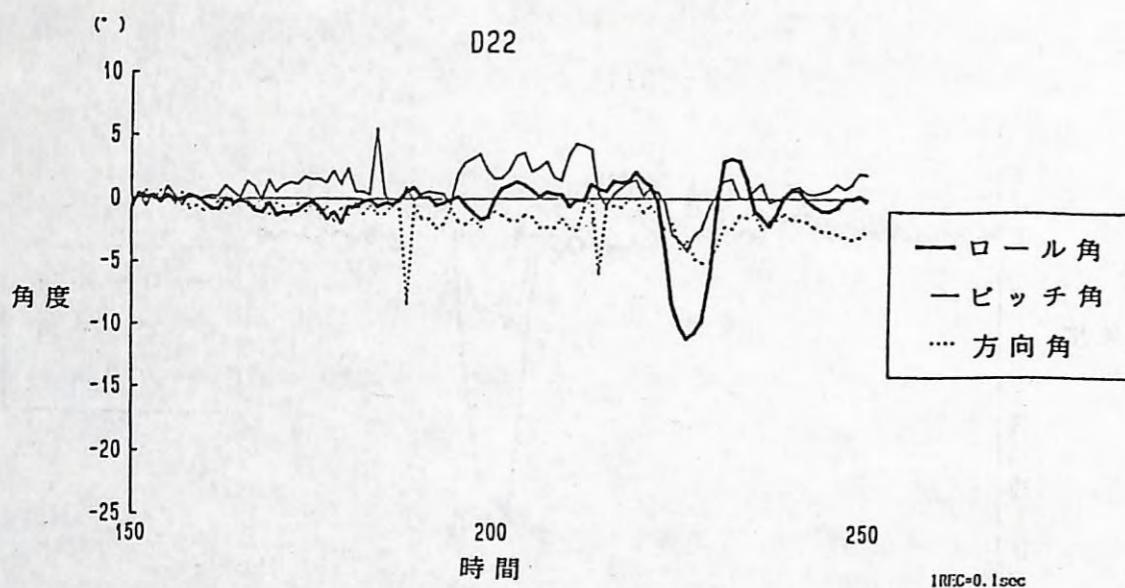


図31. ジャイロによる丸太乗越し時の車体角度の変化 (3速, 丸太の直径28cm)

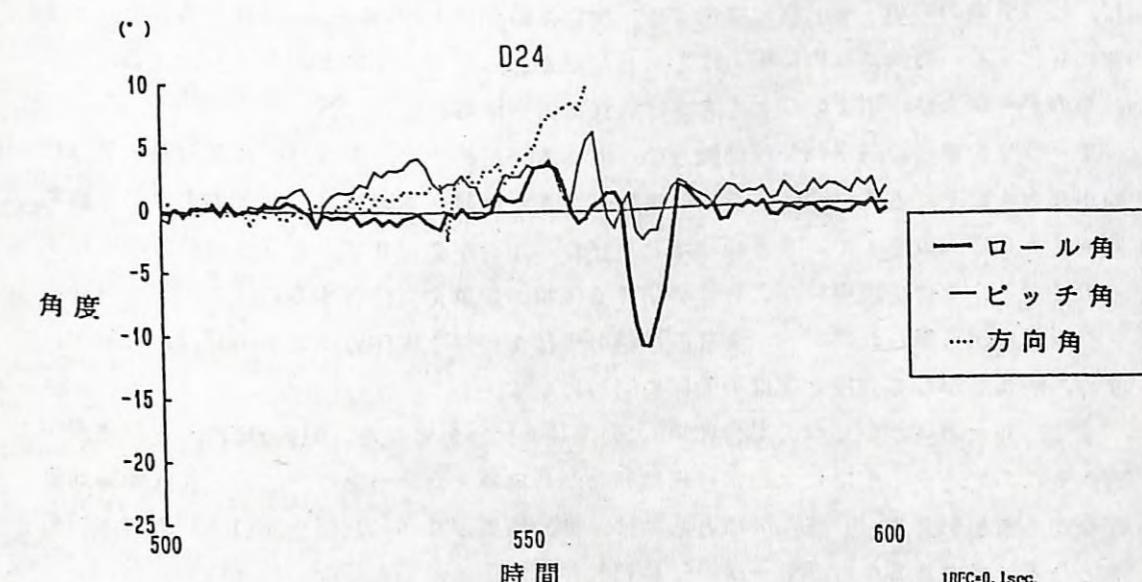


図33. ジャイロによる丸太乗越し時の車体角度の変化 (4速, 丸太の直径28cm)

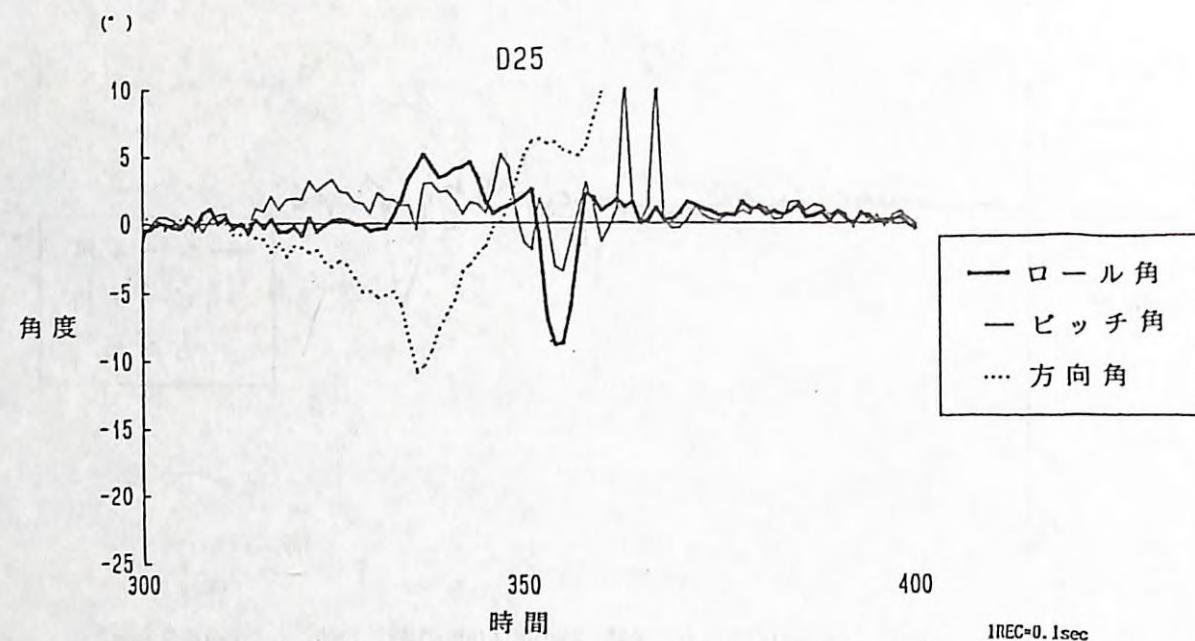


図34. ジャイロによる丸太乗越し時の車体角度の変化 (4速, 丸太の直径28cm)

げ, ピッチ角のみが「+」側に変化する。次に後輪が乗上げ, ロール, ピッチ角とも「-」側に変化する。方向は丸太に乗上げたあと左に変わってしまうことが多かった。各図のこれらのデータより, 以下のことを考慮にいれて考察する。

T-50の場合, 前車軸が揺動軸となっている。そのため, 車体ロール角の最大値は後輪が丸太を乗上げる際に発生する。前車軸が丸太を乗越える際には, 丸太の太さが揺動範囲内(560mm以下)であるため, ほとんどロール角が変化せず, ピッチ角のみが変化するのである。そこで, 車体が大きく挙動する後輪の乗越えに注目する。

ジャイロから得られたデータより, 後輪の乗越えに伴う車体の傾きを図35, 36に示す。また, 跳ね上がりの角度と速度の関係を図37に示す。

まず, 丸太の高さが45cmの場合(図35)の乗越えについて見る。D11の場合, 走行速度が遅かったので, タイヤは丸太に常に接触しながら乗越えた。つまり, このときは動的効果がなかったといえる。計算上の値としては, 動的効果がなかった場合は13.7°の車体の傾きとなるはずであるがこのデータでは約15°傾いている。

一方, D12~D14までは跳ね上がりが顕著に認められる。これらの走行速度は変速装置の段数から推測される。D12とD13は2速で乗越え, D14は3速で乗越えており, それぞれの速度は5.5km/hと10.3km/hとなる。跳ね上がりは速度の速いものほど, その角度が大きくなっている, 跳ね上がり方も衝撃的である。

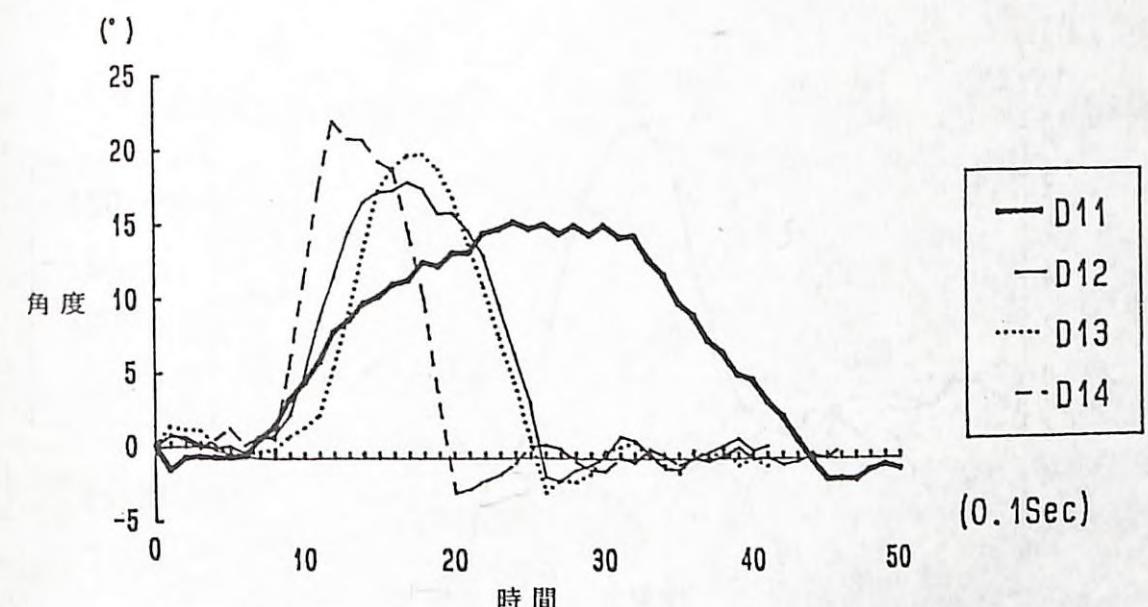


図35. 後車輪乗上げ時のロール角 (丸太直径45cm)

次に, 図36の丸太が28cmの場合についてみる。速度は10.3km/hと19.8km/hであったが, 速度と跳ね上がりの関係は明確でない。跳ね上がりの角度も丸太の高さによる角度8.7°を除くと2.5°以下で, 車体の安定に影響するような値ではなかった。また, 跳ね上がり方にも特徴は見い出せなかった。

図37を見ると, すでに述べたように45cmの丸太と28cmの丸太の場合は傾向がまったく違う。45cmの場合は跳ね上げ角度と走行速度は比例し, その角度は, ほぼ走行速度(時速)に等しい値となった。つまり, 時速5km/hで45cmの丸太を乗越えると5°跳ね上がるということになる。転倒しないように乗越えるには, 跳ね上げが起こったとしても安定な範囲内であるように走行しなければならない。特に静的に不安定な, 斜面のななめ下方向に向かって走行するときは, 跳ね上げが起こらないよう十分注意する必要がある。

28cmの場合は, 速度が速いので動的効果による跳ね上がりも大きいと考えられた。しかし, 実際にはほとんど跳ね上がりが生じなかった。これは, タイヤと丸太の相対的な大きさに起因すると考えられる。図38にタイヤと丸太の大きさを同じ比率にして示す。28cmの丸太の場合は相対的に小さいため, 低圧タイヤで乗越えたときに変形によって跳ね上がりの力が吸収されてしまうのである。丸太の太さの条件を2種類しか実験しなかったので, はつきりしたことはいえないが, ある程度以上の高さの障害物より跳ね上がりが生じるようになる。また, 跳ね上がりが生じる障害物の高さは, タイヤの変形による力の吸収力と, 相対的な大きさによって決まると思われる。

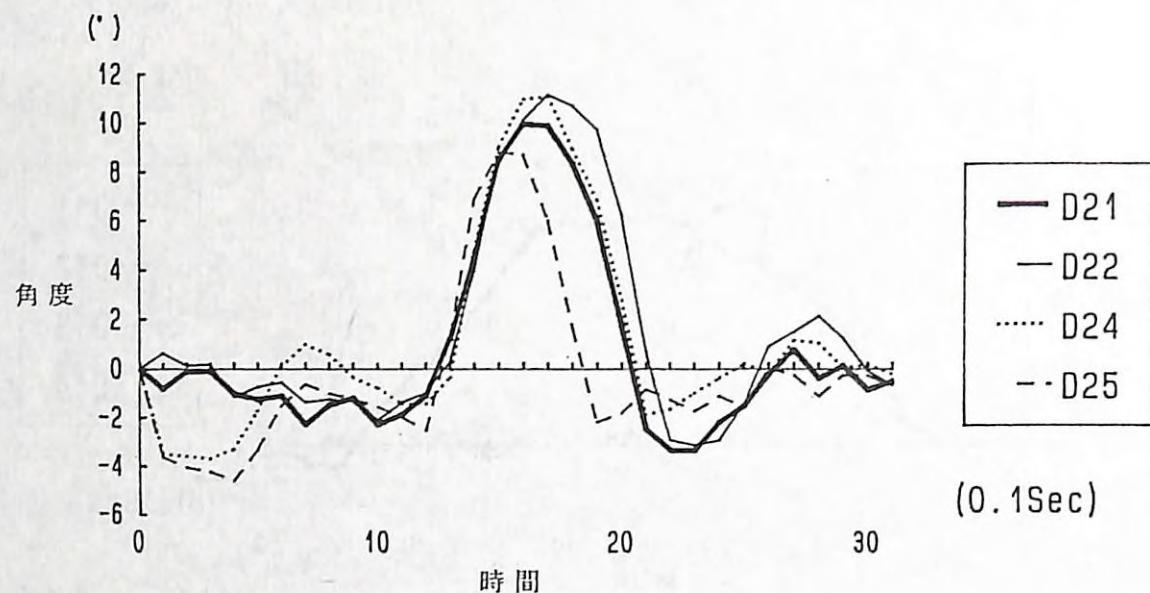


図36. 後車輪乗上げ時のロール角 (丸太直徑 28 cm)

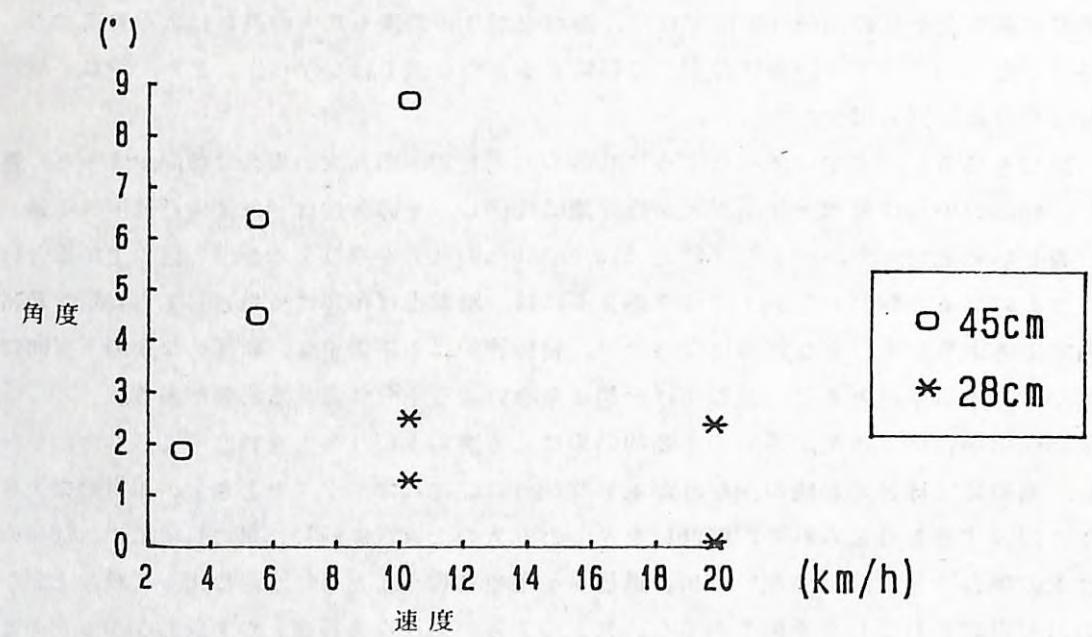


図37. 跳ね上げ角度と速度の関係

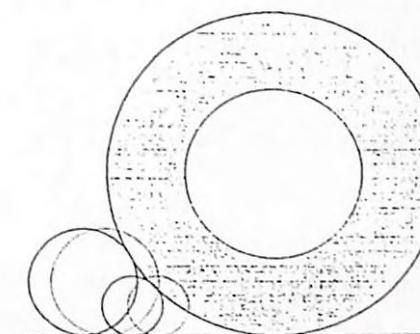


図38. 丸太とタイヤの接触角

(4) 実験の問題点

ジャイロを用いた実験では、ノイズの問題が分析の支障となった。測定レンジを小さく取る、サンプリングを速くするなどの対策が必要である。また、測定条件の中で障害物の形、高さ、車両の速度の組み合わせを多くしなければならない。また、障害物の固定の仕方、沈下の防止方法も検討を要する。

(伐出機械研究室 上村 巧)

3) 丸太の乗越え試験 (動態分析装置による車体角度の測定)

ジャイロを用いた分析では、トラクタが障害物を乗越えるときの車体の傾き、特に後車軸の傾きに注目した。しかし、ジャイロによるデータではノイズが入り、後車軸の傾きの変化が判然としない。そこで、これを測定するため、ビデオによる動態分析を行った。

(1) 試験方法

ジャイロを用いた測定試験と同じときに、トラクタのブレード中央の重心高さ(1040mm)の位置にマーキングし、これを走行するトラクタの後方からビデオカメラで撮影した。

(2) 試験条件

ジャイロを用いた測定試験と同じである。

(3) 分析方法

走行するトラクタの後方から撮影したビデオを n a c High Speed Video ((株) ナック製 モデル HSV-400) で再生し、その画面から X Y コーディネータ ((株) ナック製モデル V-78) を使用して重心位置・右後タイヤ接地点・右後タイヤ接地点を原点とする水平線上の任意の点の 3 点を入力し、障害物通過における時間ごとの角度 α (図39) の変化を n a

c MOVIAS VIDEO (Ver.3.00) ((株)ナック製)で分析した。その結果をプロッタ(HP社製7550A GRAPHICS PLOTTER)へ出力したものが図40, 41である。

なお、このビデオの場合1秒間のフレーム数は60フレームであり、図40a)では25フレームごとに、その他は10フレームごとにデータを取り込んだ。

(4)分析結果

静止状態の角度 α は実測値では48.5°であるが、図では43~45°となっている。これはレンズの歪や入力時の誤差によるものであるが、トラクタの傾きの変化が分かればよいので多少の角度 α のズレは関係がないと考える。

図40a)は1速で走行したときの角度 α の変化であるが、角度 α の軌跡は放物線状の曲線を描いており、タイヤが丸太に衝突してから丸太に沿って乗越え、着地していることが分かる。図40の障害物の高さは45cm・後車輪の輪距は184cmで最大傾斜角度は13.7°であるが、図40a)の場合はトラクタの最大傾斜は14°であり、トラクタが障害物を乗越えるときの静的変化と考えられる。図40b)・c)は2速、図40d)は3速での角度 α の変化である。いずれの図も障害物衝突時から最大傾斜までは直線的に変化しているが、最大傾斜から着地までは図40-a)と同じように放物線状に落下している。これは障害物に衝突した瞬間の跳ね上げられる力によって最大傾斜まで傾き、その後は自由落下していくものと考えられる。また、これらの最大傾斜は15~19°であることから、障害物の高さより高く跳ね上げられていることが分かる。

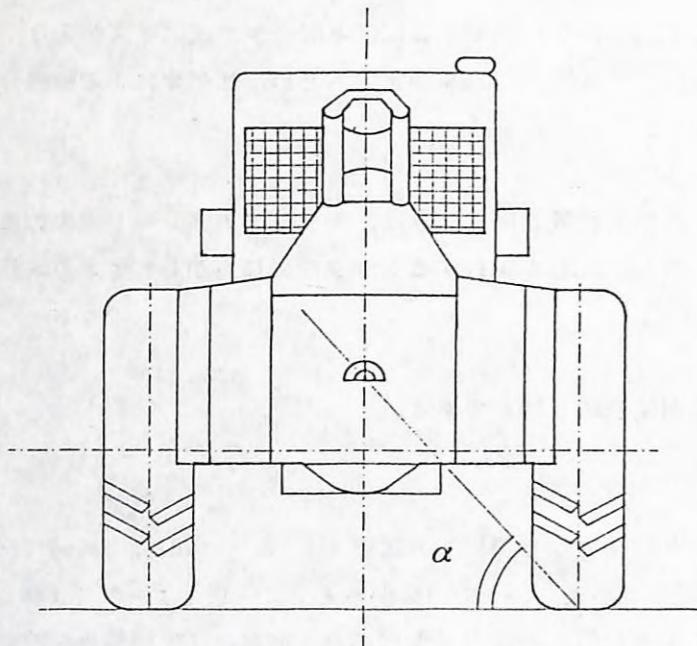


図39. 車体後方図と角 α

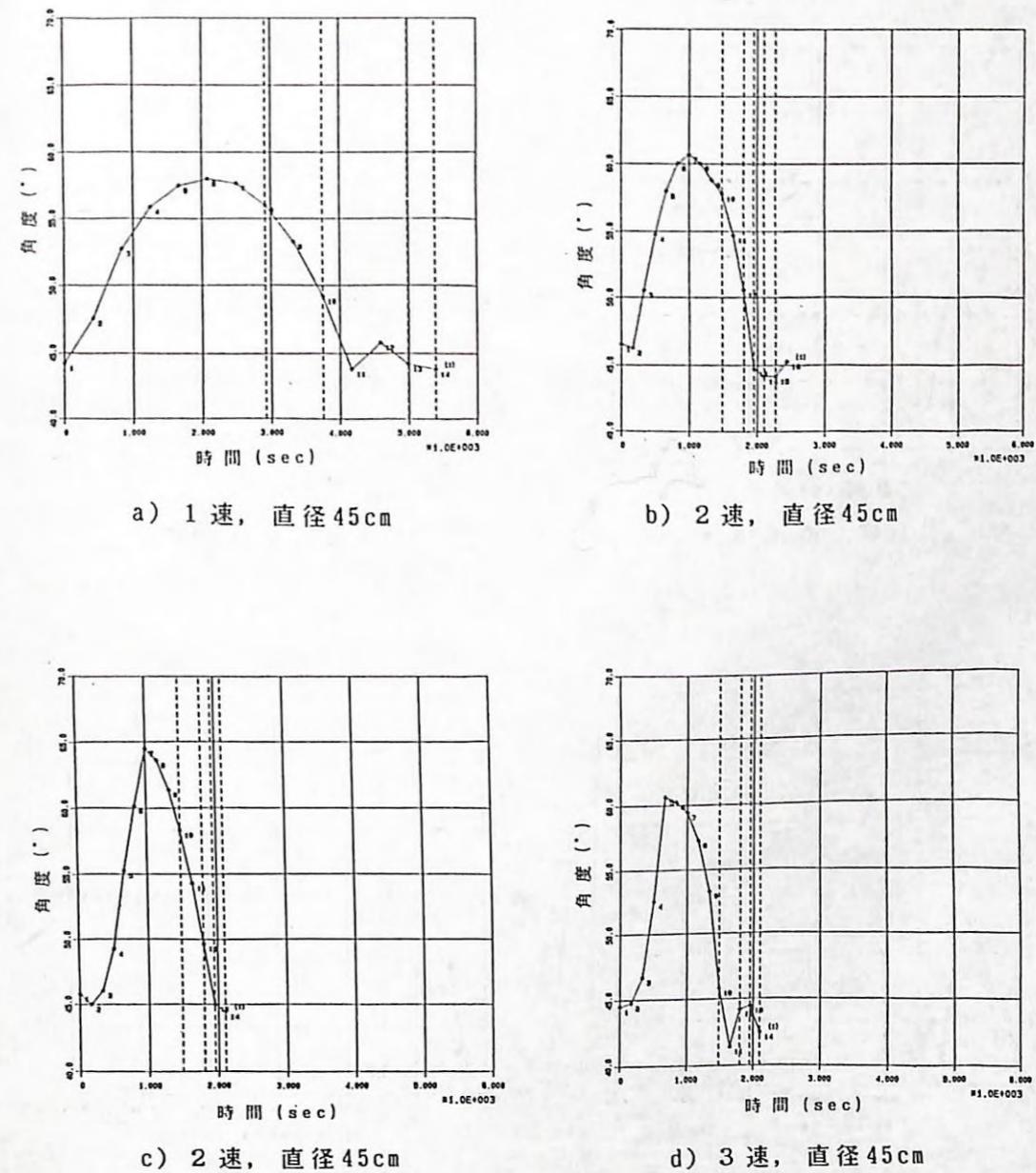
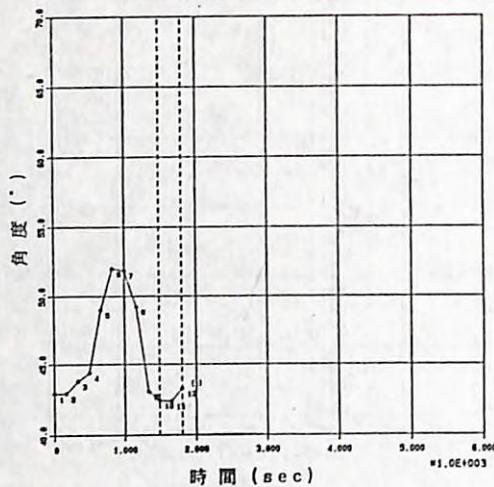
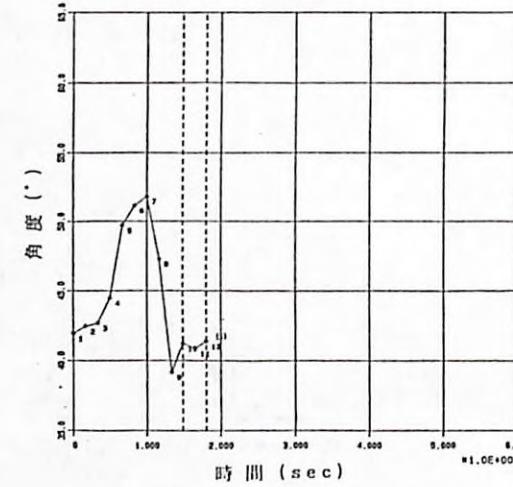


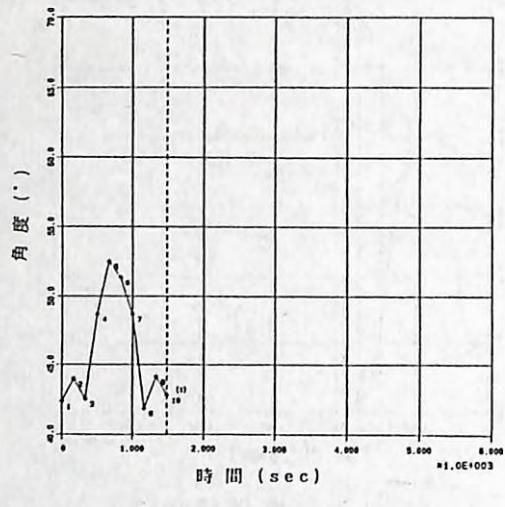
図40. 動態分析による丸太乗越し時の角度 α の変化



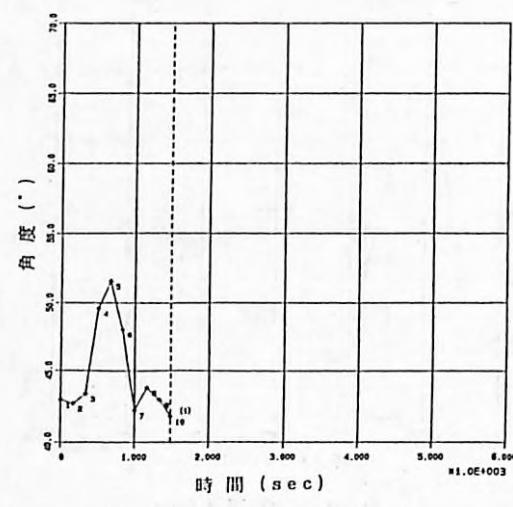
a) 3速, 直径28cm



b) 3速, 直径28cm



c) 4速, 直径28cm



d) 4速, 直径28cm

図41. 動態分析による丸太乗越し時の角度 α の変化

図41は障害物の高さが28cmであり最大傾斜角度は8.7°である。図41a)b)は3速, 図41c)d)は4速で走行したときの角度 α の変化である。トラクタの最大傾斜は9~11°であり障害物の高さより高く跳ね上げられていることが分かる。しかし、角度 α の軌跡は、速度が速いことと障害物の高さが低いことから測定ポイント数が少なくなり、詳細な変化を見ることができなかった。

これらのデータから動的効果を分析するため、角度 α の変化を一つのグラフに重ね合わせてみた。図42は丸太の高さが45cmのとき、図43は丸太の高さが28cmのときである。図中の横線はタイヤが丸太に接触したときの角度 α の実測値に障害物の高さだけ傾いた車軸の角度を加えたものの平均値である。つまり、静的効果の最大値である。図42から1速で走行したときには静的効果であることがよく分かる。しかし、2速・3速では跳ね上げられていることは分かるが動的効果があるとはこの図からはいえない。また、図43でも速度の速い4速のほうが着地までの時間は短いものの動的効果に関してみると3速と4速の間には差はないと考えられる。

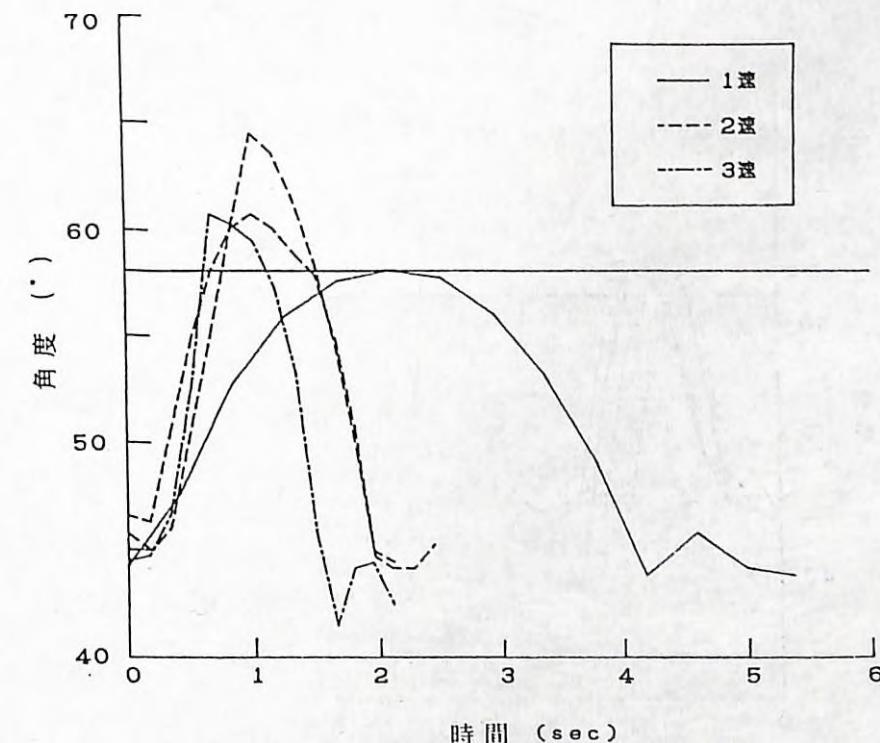


図42. 丸太乗越え時の角度 α の変化 (直径45cm)

つぎに、障害物通過前後の角度 α の変化を見てみる。図40c)と図40d)、あるいは図41a)と図41c)の障害物通過後の角度 α の変化を見ると、速度が速いほど角度 α の乱れが大きくなっている。つまり、着地時の衝撃が大きいということである。また、同じ速度で高さの違う障害物を通過したときの図40d)と図41a)を比較すると、障害物が大きいほど角度 α の乱れは大きいと考えられる。また、図41c)d)では障害物衝突前に角度 α の乱れがあるが、これは速度が速いため前輪の揺動が鎮静化する前に後輪が障害物に衝突するからと考えられる。

(5) 実験の問題点

- ① 実験数が少なかったことと、ビデオ撮影にnac専用ビデオを使用しなかったため詳細なデータ分析ができず、動的効果を調べるに十分なデータが揃わなかった。
- ② 障害物を今回は丸太としたため、樹皮がある場合となくなった場合とによってタイヤと障害物間の摩擦が異なり、同じ条件で走行しても跳ね上げられる力が摩擦力に吸収され跳ね上がらない場合があった。また、トラクタが通過するときに丸太が沈下したり移動してしまったりしたので、伐根のように多少の力がかかるても動かない障害物を使用しなければならない。

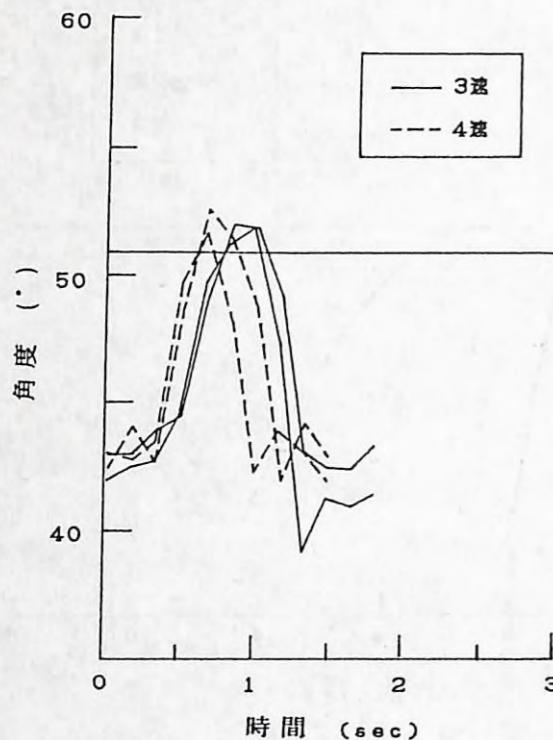


図43. 丸太乗越え時の角度 α の変化 (直径28cm)

(伐出機械研究室 陣川 雅樹)

4) まとめ

ジャイロと動態分析装置を用いた分析結果から次のようなことが明らかになった。

まず、ジャイロのデータから、T-50の場合走行時の安定性で問題となるのは、後輪の障害物乗越えであった。45cmの高さの障害物の乗越えのとき、後輪は低速でも跳ね上がりを起こし、走行速度に比例して跳ね上がり角度も大きくなつた。今回の実験では最大8.7°も跳ね上がりが生じた。しかし、障害物の大きさが28cmとタイヤに比べ小さい場合ほとんど跳ね上がらなかった。

動態分析の結果、ジャイロと角度に違いのあるものがあったが、ほぼ同様の傾向を示した。ジャイロでははっきりしなかった跳ね上がり方は、衝突後直線的に跳ね上がり、最大角度に達した後は自由落下に近い形で落下することが分かった。つまり、跳ね上がりの力の成分は衝突時の状況にのみ影響を受けるといえる。障害物が比較的小さい場合に跳ね上がらないのは、衝突時の力の跳ね上がりの成分がタイヤの変形により吸収されるか、ほとんど生じないかのどちらかである。

今回の実験から、跳ね上がりによる車体角度の増加は最大9°近くにもなることが分かった。また、その角度は走行速度に比例していた。トラクタの静的安定角度はすでに前の項で明らかである。走行中は斜面の傾斜角と、障害物による車体角度の増加分と、さらに跳ね上がりによる角度の増加を加え合わせて、静的安定範囲内に重心があるようにしなければならない。また、転倒の第1ステージから動的効果により第2ステージに移行した場合、慣性などの影響から第2ステージの安定範囲を超えて転倒するという報告もある。

安全な走行のためには、転倒の第1ステージの限界まで走行し、しかも大きな障害物を乗越える際には、十分に速度を落として乗越さなければならない。

(伐出機械研究室 上村 巧, 陣川雅樹)

Ⅴ まとめ

トラクタの転倒・転落事故防止に役立てるため、トラクタの挙動の力学的検討を行った。

(1) 集材トラクタの転倒・転落事故の原因としては、以下のようなものがある。

① 静的安定範囲からの逸脱

(傾斜地走行、障害物乗越え、路肩踏み外しなど、それらの複合効果)

② 外力効果

(過大負荷の木寄、曳行中材の引っかかりなどによる過大負荷、材の衝突など)

③ 動的効果

(不整地走行、障害物乗上げ・乗越え、路肩踏み外しなど、それらの複合効果)

④ 足まわりの滑りがきっかけとなり、①～③につながる。

(傾斜地走行、障害物乗越え、木寄・曳行など外力効果、それらの複合効果)

(2)集材用トラクタ（ホイール5機種、クローラ2機種）の重心位置を調査・計測した。

(3)T-50について屈折による静的安定範囲の変化を求めた。また、転倒時の重心位置の移動から車体の安定性を検討した。

(3)ホイールトラクタの外力に対する安定性を調べるため、側方からの引張り実験を行った。アーティキュレート形では、屈折の外側に対する安定性が小さいことが明らかになった。

(4)傾斜地走行や障害物乗越え時の、クローラトラクタ車体傾斜角をシミュレーションと実験の両面から検討した。傾斜地走行では小さな地表突起の通過でも、車体が大きく揺動することが示された。

(5)動的効果の定量把握を目的として、T-50による丸太の片輪乗越え実験を行った。直径45cmの丸太を比較的高速で乗越えた場合、ロール角の動的効果部分は約9°になった。残された問題点として以下のことがあげられる。

(1)車体の滑りについて検討するため、車体を横方向にけん引して土質・地表状態・天候別に車輪や履帯の横滑り係数を求める。

(2)動的効果の定量把握実験を、丸太乗越え以外について実施する。

(3)車体の動的挙動を理論的に明らかにするため、慣性モーメントなどを求め、各場面の運動方程式を作成する。

引用文献

(1)佐々木尚三・鈴木皓史：トラクタの登坂時傾斜角について、36回日林関東支論、1984

(2)佐々木尚三・三村和夫：クローラトラクタの重心位置に関する考察、96回日林論、1985

(3)佐々木尚三・朝日一司・上村 巧・山田 健：ホイールスキッダの側方安定性について、102回日林論（投稿中）、1991