

筋肉の利用方法の違いが疲労の発生と 翌日の仕事量に及ぼす影響

鹿屋体育大学 田 卷 弘 之
(共同研究者) 同 倉 田 博
石 川 工 業 北 田 耕 司
高等専門学校

Effects of The Different Activation Patterns in the Synergistic Muscles on Muscle Endurance and Static Work After one Day of Fatiguing Exercise

by

Hiroyuki Tamaki, Hiroshi Kurata
*Department of Physiological Sciences,
National Institute of Fitness and Sports
Koji Kitada
Ishikawa National College of Technology*

ABSTRACT

We investigated the effects of the alternate activity in the synergistic muscles (AA) and the tremor (T) on 1) maximal muscle force, endurance performance and static work and 2) these parameters on the next day. Eight male subjects performed static contractions at an ankle joint angle of 110° or 130° plantar flexion under constant load of 10% maximal voluntary contraction till exhaustion as a fatigue test on days 1 and 2. Maximal isometric force of the ankle plantar flexors and endurance time of the fatiguing exercise were measured, and the surface electromyograms were also recorded from the triceps surae muscles, i. e. lateral gastrocnemius (LG), medial gastrocnemius (MG) and soleus (SOL) muscle. Endurance time in the AA group was significantly longer than that in the T group on both days ($p < 0.05$). The fatigue test significantly

reduced the maximal force in both AA and T groups on days 1 and 2 ($p < 0.05$), but the rate of decrease in the maximal force was greater in the T group than in the AA group. Endurance time and static work in the T group declined by 40% and 45% on day 2, respectively ($p < 0.05$). However, no significant differences in these parameters in the AA group were found between days 1 and 2. The results suggest that the type of the alternate activity in the synergistic muscles may reduce the development of muscle fatigue and have little effect on the static work on the next day.

要 旨

長時間作業中の筋活動様式の違いが筋持久能や仕事量に及ぼす影響について検討し、また、これら筋利用方法の異なる作業が翌日の仕事量にどのような影響を及ぼすのか検討した。被験者（8名、年齢21-31）は足関節角度を 110° もしくは 130° に保ち、10% MVCの負荷を保持しつづける下腿三頭筋の等尺性収縮を長時間持久テストとして行った。テスト前後に最大随意収縮による足関節底屈筋力を測定し、また、実験を通して下腿三頭筋各筋から表面筋電図を記録した。協働筋の間で活動が交代する現象が観察される場合（AA群）では活動の交代がほとんど観察されず、振戦が多くみられる場合（T群）より持続時間が長く、翌日の減少率も小さかった（ $p < 0.05$ ）。最大筋力は長時間持久テスト前後で両群とも低下したが（ $p < 0.05$ ）、その低下率はAA群の方が小さかった（ $p < 0.05$ ）。また、持久テスト中に下腿三頭筋がなした力積はT群では約45%減少した（ $p < 0.05$ ）。これらの結果より、低負荷強度で長時間作業を持続する場合、協働筋の間で活動を交代するような筋活動様式は、より長く作業を遂行することができ、翌日の仕事量にも影響が少ないことが示唆された。

緒 言

筋作業の持続能力については、これまでエネルギー供給や筋の酸化能力、代謝産物の除去能

力といった、筋線維タイプを含めたエネルギー代謝の面から多く報告されてきた⁸⁾。これに加え、筋の活動は神経系の活動に大きく依存するため、神経性の調節機構からも検討されうる。

発揮筋力の調節は主に、運動単位の recruitment と rate coding の2大機構により調節されている⁴⁾。一定強度で筋活動を持続し続けた場合、筋線維の機能的低下により筋線維自体の出力が低下し、それを補償するために運動単位が順次活動参加して、さらにその発火頻度も増加していく。これらはステレオタイプな筋活動様式であるが、このような活動様式とは異なる報告もなされている。すなわち低強度の負荷で長時間筋収縮を持続したとき、同一筋の中で運動単位の活動参加閾値変動³⁾や協働筋の間で全筋レベルで活動交代^{5,9)}が発現することが知られている。運動単位を順次 recruit するのではなく、活動参加している運動単位が疲労により機能低下が起こると、これまで活動参加していなかった運動単位と交代し、活動を休止するという利用の方が、長時間にわたって作業を持続するという課題に対してはより合目的であると思われる。

そこで本研究では、長時間作業中の筋活動様式の違いが疲労に関連する筋機能に及ぼす影響について検討した。また、その作業が翌日の筋作業の持久性や仕事量に及ぼす影響についても検討した。

1. 実験方法

1. 1 対象者及びプロトコル

被験者は健康な成人男子8名（年齢21-31歳）であった。被験者には予め実験の内容等に関して十分な説明を行い、その後、実験参加の同意を得た。

被験者はまず長座姿勢で、足関節角度を110°もしくは130°に保ち、背屈方向への一定負荷に抗して右脚足関節を保持し続ける、下腿三頭筋の等尺性収縮を実施し続け、長時間持久テストを行った。負荷は実験に先立ち、等尺性最大随意収縮時の足関節底屈筋力を測定し、その10%を設定した。加重方法は、木製の円盤の円周上に作成した溝の一部と荷重とをステンレス製のワイヤーロープで連結し、円盤を足関節を軸にして指示角度まで回転させ、その状態で常に一定の荷重がかかるようにした¹⁰⁾。エレクトロゴニオメーターにより足関節角度を求め、それをポリグラフのオシロスコープ上に表示し、一定速度で移動するbeamを所定の位置（110°もしくは130°）に合わせることで足関節角度を保持した。また、これと同様の実験を、同一条件で翌日の同時刻に再度実施した。

1. 2 最大筋力の測定

下腿三頭筋の長時間持久テストの前後に、足関節底屈の最大随意収縮（Maximal Voluntary Contraction, MVC）を行った。ロードセルを使用して、足関節角度を110°もしくは130°に設定し、長時間持久テストの時と同一の姿勢並びに装置を介して行った。5秒程度のMVCを各試行間に十分な休息をはさみ3回行い、最も高い値を最大筋力値とした。

1. 3 筋電図

最大筋力の測定および長時間持久テスト時に、同時に表面電極導出法により、下腿三頭筋（外側腓腹筋:LG, 内側腓腹筋:MG, ヒラメ筋:SOL）の

筋電図を記録した。また、それらの筋電図を検波整流し記録した。使用した電極は直径10mmのAg/AgCl双極誘導電極で、電極間距離30mm、時定数0.003秒であった。

1. 4 データ分析

1日目および2日目に実施された最大筋力の測定および長時間持久テストにおいて、1) 作業の持続時間、2) 足関節底屈筋力（相対値）、3) 力積、および筋電図の記録から確認される下腿三頭筋各筋における4) 活動交代数、5) 振戦を起こした回数を計測した。各計測項目について、平均値および標準偏差を算出した。平均値の差の検定には、有意水準5%で対応のあるt検定を行った。

2. 実験結果

長時間持久テスト中の下腿三頭筋の活動様式は特徴的な2つのパターンを示した。すなわち、1) 全ての筋が順次活動参加していくのではなく、協働筋間で活動を交代する（Alternate Activity, AA）、2) 各筋の放電が漸増し、振戦（Tremor, A

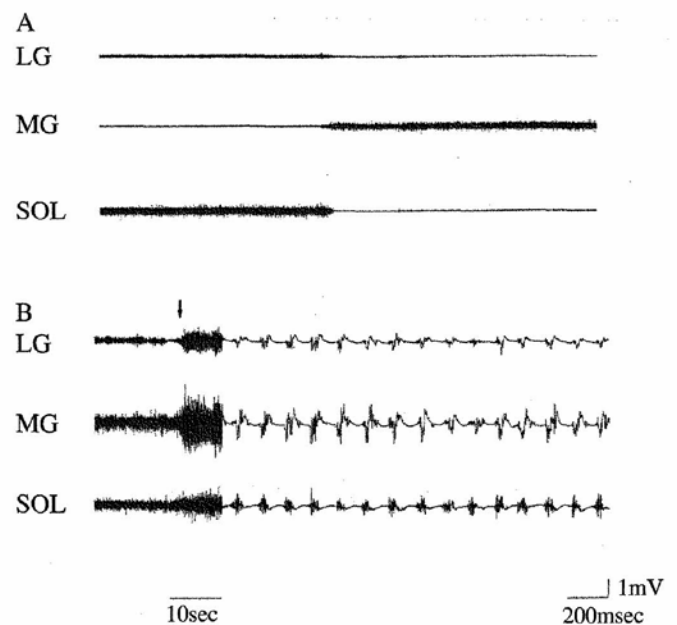


図1 長時間作業中に観察される下腿三頭筋のEMG典型例 (A) 協働筋間の活動交代, (B) 群化放電を伴った振戦が観察される。↓は振戦開始時点で、開始10秒後からtime scaleを変えて表示した。LG; 外側腓腹筋, MG; 内側腓腹筋, SOL; ヒラメ筋。

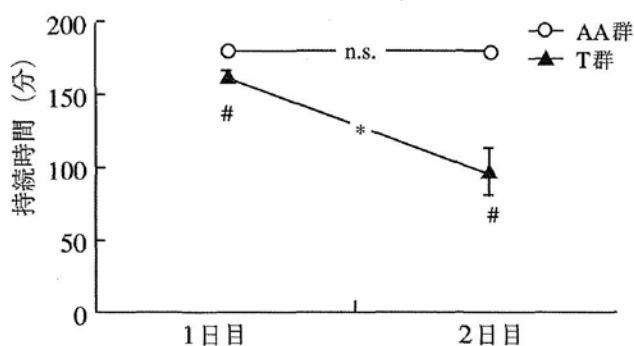


図2 作業持続時間の変化. 平均値±標準偏差. * $p < 0.05$, 1日目 vs 2日目; # $p < 0.05$, AA群 vs T群. AA; 協働筋の間で活動が交代する場合, T; 群化放電を伴った振戦が観察される場合.

T) を起こし, 群化放電を示すパターンである (図1). 10% MVCで足関節角度 110° で持久テストを実施した場合, 活動交代はよく観察され振戦は全く観察されなかった. 逆に 10% MVCで足関節角度 130° で行った場合, 振戦が多く観察され, 活動交代はほとんど観察されなかった. しかしながら, 10% MVC, 足関節角度 130° 条件で活動交代が多く観察され, また振戦も若干観察される被験者 (1名) もいた. 本研究では, 筋活動の様式の違いが筋疲労や仕事量に及ぼす影響を検討しようと試みていることから, 筋活動様式のタイプが大きく異なる2つのグループ (AA群およびT群) に分け, 1日目と2日目の各測定項目について比較した.

作業の持続時間については, 両日ともAA群の方がT群よりも有意に ($p < 0.05$) 長かった. しかしながら, 両群の1日目と2日目を比較すると, AA群では有意な差は認められなかったが, T群では40%有意に ($p < 0.05$) 短くなった (図2).

1時間当りの活動交代の発現回数は両日ともAA群が有意に ($p < 0.05$) 多かったが (図3), 1時間当りの振戦回数はT群の方が多かった (図4). AA群の活動交代回数およびT群の振戦回数は2日目の方が多くなる傾向にあったが, 有意な変化は認められなかった. また, AA群にお

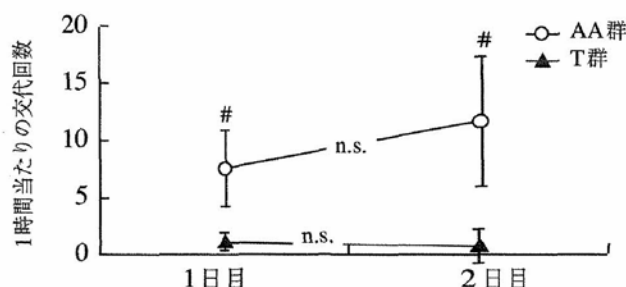


図3 1時間当りの活動交代回数の変化. # $p < 0.05$, AA群 vs T群. AA; 協働筋の間で活動が交代する場合, T; 群化放電を伴った振戦が観察される場合.

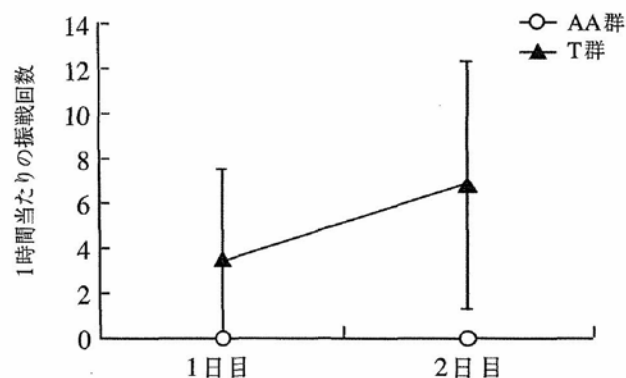


図4 1時間当りの振戦回数の変化. AA; 協働筋の間で活動が交代する場合, T; 群化放電を伴った振戦が観察される場合.

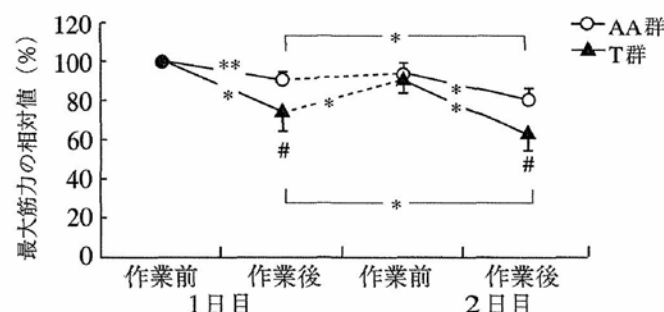


図5 足関節底屈最大筋力の相対値の変化. 1日目の作業前の値で標準化した. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$; # $p < 0.05$, AA群 vs T群. AA; 協働筋の間で活動が交代する場合, T; 群化放電を伴った振戦が観察される場合.

る活動交代発現までの時間およびT群における振戦発現までの時間は, 1日目より2日目の方が短く, AA群では平均26分51秒→8分46秒へ, T群では平均104分6秒→34分48秒へと, いずれも発現開始が有意に ($p < 0.05$) 早くなった.

最大筋力の経時的変化については, 両群で絶対値が異なるため, 群間比較できるように1日目の持久テスト前の成績で標準化し, 百分率で示した. まず, 持久テスト前後の最大筋力の変化を観察したところ, 両日, 両群とも持久テスト後に

有意に ($p < 0.05$) 低下した (図5)。また、その低下の程度はAA群で10-15%、T群で25-36%であり、テスト後の値を両群比較すると、1日目および2日目とも有意に ($p < 0.05$) T群の方が小さかった (図5)。

次に、本研究で行った作業は静的運動であるため、長時間持久テスト中の仕事を力積として評価した。1日目および2日目の力積はAA群の方が有意に大きい値を示した ($p < 0.05$)。しかしながら、足関節角度の違いが最大底屈筋力に大きく影響することから、両群での最大底屈筋力の差異が力積の差異に關与するため、絶対値で群間比較し、評価することができない。そこで、1日目から2日目への低下率を算出し比較検討したところ、AA群では6%程度の低下率であったが、T群では46%有意に ($p < 0.05$) 低下し (図6)、また両群間に有意な差 ($p < 0.001$) が認められた (図7)。

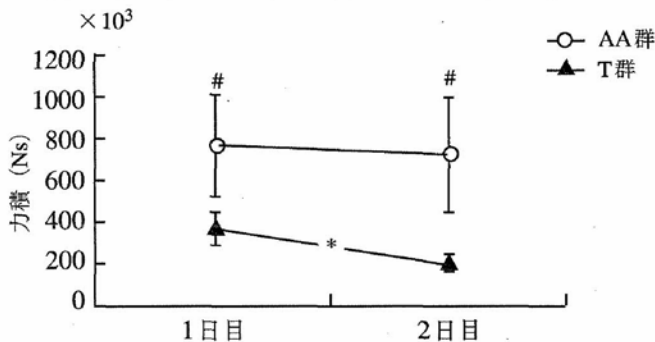


図6 力積の変化。* $p < 0.05$, 1日目 vs 2日目; # $p < 0.05$, AA群 vs T群。AA; 協働筋の間で活動が交代する場合, T; 群化放電を伴った振戦が観察される場合。

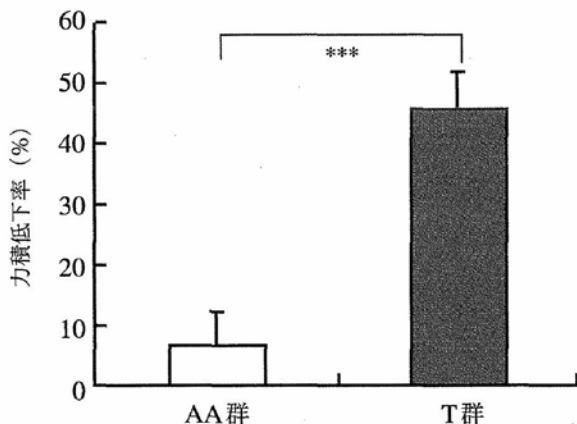


図7 力積低下率の比較。両群における1日目から2日目への低下率を算出し、比較した。*** $p < 0.001$ 。AA; 協働筋の間で活動が交代する場合, T; 群化放電を伴った振戦が観察される場合。

3. 考察

3.1 筋活動様式の差の影響

本研究では相対的な負荷強度が等しい状態でも長時間作業中の筋活動の様式が異なる典型的な2つのタイプを観察した。作業の持続時間について両タイプを観察した場合、1日目および2日目共に協働筋間で活動を交代しながら作業を持続する方が、群化放電を示し振戦を起こす活動様式よりも長く持続することが示された。筋作業の持続時間は相対的負荷強度に依存するといわれるが^{2, 7)}、本研究における相対的負荷強度はいずれも等しく、これまでの報告と趣を異にする。一方、作業中の関節角度が持続時間に影響するということが報告されており^{1, 6, 12)}、この際、筋活動様式が異なっていることも考えられる。下腿三頭筋において、協働筋間で活動交代を示す現象は比較的負荷強度が低い10% MVC程度で⁹⁾、また、振戦は30% MVC程度の強度で多く観察されている¹¹⁾。これら2つの活動様式は従来より報告されている筋活動の調節様式、すなわち運動単位の活動参加数および発火頻度の増加による調節様式とは大きく異なる。表面筋電図で観察される限り、活動交代では協働筋全てが等しく活動するのではなく、一方の筋が活動している時他方の筋は活動を休止している。また、振戦を起こしている際の群化放電においても、協働筋の全ての筋が活動しているものの、放電は約8-9Hz間隔であり¹¹⁾、その各々の間隔に約70msの放電休止期間が存在する。したがって、放電活動の休止期間が持続的な筋作業中にも存在し、その期間がより長い活動様式であるほど最終的な作業持続時間が長くなるのではないかと考えられた。

長時間持久テストによる最大筋力の低下率は1日目ではAA群で9%、T群で26%、2日目では同様に13%、31%であり、両日もAA群よりT

群の方が低下率は大きかった。作業時間においてはT群よりAA群の方が長かったが、各筋の活動を個別に観察すると、AA群の筋活動様式では個々の筋は活動と休止を繰り返す断続的収縮が行われており、総合的な筋活動時間はT群における3筋の活動時間より短いことが考えられる。AA群において最大筋力の低下率が小さかったことは、少なくとも協働筋の中で活動交代を示す活動様式は、各筋の実質的な収縮持続時間の減少につながり、その結果、関節を介した協働筋全体の機能的低下を抑えることが考えられた。すなわち、協働筋の間で活動する筋と休止する筋が順次交代することにより、筋疲労の発現が抑えられ、その結果、より長い時間作業を持続できたものと推察される。

3. 2 翌日の仕事に及ぼす影響

本研究では同様の作業を2日連続で実施し、1日目と2日目の作業における疲労の様相や仕事量について比較した。作業の持続時間については、AA群では有意な変化は観察されなかったが、T群では2日目の作業時間は有意に短くなった。このことは、協働筋の間で活動を交代しながら作業を持続する方が、翌日の同様の作業に影響しにくく、逆に、全ての筋を活動し、振戦を起こすような筋活動は、翌日の作業持続時間に負の影響を及ぼすことを示唆している。

長時間持久テスト前の最大筋力を1日目と2日目で比較すると、両群とも持久テスト後に有意に最大筋力が減少するものの、翌日のテスト前には1日目と有意な差が見られない程度に回復していた。すなわち、低強度、長時間作業において筋の活動様式が異なっても、最大限に5秒程度発揮されたときの筋出力については、どちらも翌日に大きな影響を及ぼさないことが示唆された。

長時間持久テストにおける力積について、1日目と2日目で比較すると、AA群では有意な変化

は認められなかったが、T群では有意な減少が認められた。1日目から2日目の減少率を両群比較すると、AA群では6.4%、T群では45.8%であり、T群の減少率はAA群より極めて大きいことが認められた。したがって、群化放電を示し、振戦を生じるような筋の活動様式で長時間作業を続けることは、最大筋力のような短時間に大きな出力発揮を要求されるような筋の機能ではなく、低強度の出力を長く持続するような筋機能に対しては、翌日に悪影響を及ぼすことが示唆された。

4. 総括

本研究では、長時間運動中の筋活動を筋電図の記録から観察し、筋の活動様式と運動持続時間の関係、および各活動様式で持続した運動が翌日の筋作業にいかなる影響を及ぼすのかを検討した。その結果、以下の成績が得られた。

1) 長時間の静的筋作業持続中には2つのタイプの異なる活動様式が観察され、協働筋間で活動を交代するタイプ(AA群)は作業持続時間が長く、振戦を起こしやすいタイプ(T群)は作業持続時間が比較的短かった。

2) 長時間作業の前後に計測した足関節底屈の最大筋力は、AA群もT群も長時間作業後に有意に低下したが、その低下率はAA群の方が小さかった。しかしながら、翌日の作業開始前には1日目の作業前の値と有意な差が見られない程度に回復していた。

3) 各群の力積を1日目と2日目で比較すると、AA群では有意な変化は認められなかったが、T群では約45%有意に減少した。

以上の成績より、低強度の筋作業を長時間持続する場合、群化放電を伴った振戦を発現するような筋活動様式は、最大限の筋出力発揮を要求する機能の低下をより引き起こし、その機能は翌日には回復するものの、作業全体の総仕事量は回復されず、逆に、活動交代を示す活動様式は

これらの機能に影響が少なく、より長く作業を持続できることが示唆された。

謝 辞

本研究に対して助成を賜った財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Gandevia, S.C. and McKenzie, D.K.; Activation of human muscles at short muscle lengths during maximal static efforts. *J. Physiol.*, 407, 599-613 (1988)
- 2) Hagberg, M.; Muscular endurance and surface electromyogram in isometric and dynamic exercise. *J. Appl. Physiol.*, 51, 1-7 (1981)
- 3) Kurata, H. and Edgerton, V.R.; Variations in force threshold of motor units of vastus lateralis in humans. *Med. Sci. Sports*, 11, 77 (1979)
- 4) 倉田 博; Motor unit level における EMG, *Jpn. J. Sports Sci.*, 2, 696-707 (1983)
- 5) 神崎素樹, 篠原稔, 福永哲夫; 筋疲労が大腿四頭筋の相補的活動交替に及ぼす影響, *体力科学*, 47, 745 (1998)
- 6) McKenzie, D.K. and Gandevia, S.C.; Influence of muscle length on human inspiratory and limb muscle endurance. *Respir. Physiol.*, 67, 171-182 (1987)
- 7) Monod, H. and Scherrer, J.; The work capacity of synergic muscular group. *Ergonomics*, 8, 329-338 (1965)
- 8) 根本勇; 筋持久力トレーニングのスポーツ生理学, *スポーツ生理学*, 森谷敏夫, 根本勇編, pp160-171, 朝倉書店, 東京 (1994)
- 9) Tamaki, H., Kitada, K., Akamine, T., Murata, F., Sakou, T. and Kurata, H.; Alternate activity in the synergistic muscles during prolonged low-level contractions. *J. Appl. Physiol.*, 86, 1943-1951 (1998)
- 10) Tamaki, H., Kitada, K., Akamine, T., Sakou, T. and Kurata, H.; Electromyogram patterns during plantar flexions at various angular velocities and knee angles in human triceps surae muscles. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 75, 1-6 (1997)
- 11) 田巻弘之, 北田耕司, 赤嶺卓哉, 酒匂 崇, 倉田 博; 異なった負荷で等尺性収縮を持続したときの協働筋の活動変化, *体力科学*, 45, 627 (1996)
- 12) Weir, J.P., McDonough, A.L., Hill, V.J.; The effects of joint angle on electromyographic indices of fatigue. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 73, 387-392 (1996)