

## 時間的予測が筋反応の特性に及ぼす影響

高瀬幸一<sup>1)</sup>・田口正公<sup>2)</sup>・柿本真弓

### Influence of estimation of time on muscle reaction times

Koichi Takase, Masahiro Taguchi, and Mayumi Kakimoto

#### 要 旨

本研究は、時間的な予測が可能な状態と視覚の遮断による制限を加え時間的予測が不可能にした状態においてEMDと各種筋反応時間を測定し、時間的予測の有無がEMDや各種筋反応時間に与える影響について検討した。被験者は健康な女性17人を対象とした。測定は、膝関節の伸展動作を対象に行った。その結果、EMDの値は時間的な予測が可能な試技(NOR-C)に対し視覚の遮断による制限を加え時間的予測が不可能にした試技(RES-C)が有意に遅延していた。同様に、総反応時間であるTRTおよび刺激から筋放電が生じるまでの時間であるPMTの値に関しても、NOR-Cに対しRES-Cが有意に遅延していた。しかしながら、トルクの発生からピークトルク値に到達するまでの時間には、NOR-CとRES-C間で有意な差は認められなかった。これらのことから、身体活動を遂行する際に予測が関与する場合は、筋-神経系におけるコーディネーションが適切に遂行されるが、予測が不十分であったり関与しなかったりする場合は、EMDやPMT、TRTに影響を及ぼし、パフォーマンスの低下や突発的なスポーツ障害の発生につながる可能性があるものと推察された。

**キーワード:** 時間的予測, EMD, 各種反応時間

#### Abstract

The purpose of this study is, by measuring electromechanical delay (EMD) and muscle reaction times in the condition that the sense of seeing is intercepted and the estimation of time is interrupted, to investigate how the restricted condition affects the electromechanical delay (EMD) and various reaction time. 17 healthy women subjects volunteered to participate in this study. Their average age, height, and weight are  $19.8 \pm 2.2$  years,  $160.0 \pm 5.8$ cm,  $50.8 \pm 5.2$ kg (mean  $\pm$ SD) respectively. The measurement is performed for extension movement of knee joint. And we investigated the trial both in normal condition (NOR-C) and the restricted condition (RES-C). The main results are as follows: EMD of RES-C ( $85.7 \pm 4.4$ ms) is significantly longer ( $p < 0.001$ ) than NOR-C ( $75.1 \pm 4.2$ ms). Similarly, total reaction time and pre-motor reaction time, there are significant difference ( $p < 0.001$ ) between NOR-C (TRT:  $213.4 \pm 19.2$ ms, PMT:  $138.4 \pm 17.5$ ms) and RES-C (TRT:  $280.0 \pm 22.4$ ms, PMT:  $138.4 \pm 17.5$ ms). Moreover, in movement time to the peak torque, there is no significant difference between NOR-C and RES-C. These results suggested that coordination in neuromuscular system is improved if the subjects are able to predict the time; the inability to predict the time affects EMD and reaction times and is considered to cause decline of sports performance, and occurrence of sports injuries.

**Key words:** estimation of time, EMD, various reaction time

<sup>1)</sup> 名桜大学人間健康学部 〒905-8585 沖縄県名護市為又1220-1  
Faculty of Human Health Sciences, Meio University, 1220-1, Bimata, Nago, Okinawa Japan

<sup>2)</sup> 福岡大学スポーツ科学部 〒814-0014 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1  
Faculty of Sports and Health Sciences, Fukuoka University, 8-19-1, Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka, Japan

## 目的

人の身体運動においてあらかじめ筋の伸張が予測される場合 (e.g.: ドロップジャンプなど) は、フィードフォワード制御系により無意識的に主働筋あるいは拮抗筋を予備緊張 (pre activity) (阿江ほか, 1979; 小宮山ほか, 1988; Aura and Viitasalo, 1989; 関子と高松, 1995) させ、適切な動作が遂行できるように調整している。しかしながら、実際の運動局面において予期せぬ外乱的な負荷 (伸張負荷) などが加わった場合や時間的な予測が十分に働かない場合は、筋-神経系の調整および制御の状態が適切でない (中枢神経機構の遅延、運動単位の調節、弾性要素の緩みなど) が考えられ、それに伴い反応開始から力を発揮 (収縮) するまでの筋反応時間に遅れが生じ、動作の開始やその後の動作の遂行などに影響を及ぼす可能性が考えられる。特に、運動動作の発現を左右する electromechanical delay (EMD) (Cavanagh and Komi, 1979; Vos et al., 1991) は、運動の開始時や停止時の状態に反映する重要な筋内部の反応時間であり、時間的な予測の有無が EMD に及ぼす影響について明確にすることはスポーツパフォーマンスの向上やスポーツ障害の予防との関連において必要不可欠であると考えられる。

本研究は、時間的な予測が可能な状態と視覚の遮断による制限を加え時間的な予測が不可能にした状態において EMD と各種筋反応時間を測定し、時間的な予測の有無が EMD や各種筋反応時間に与える影響について検討した。

## 方法

### 1. 対象

被験者は、健常な女子大学生11名および看護専門学校に在籍する学生6名 (年齢 $19.8 \pm 2.3$ 才, 身長 $160.0 \pm 5.8$  cm, 体重 $50.8 \pm 5.2$ kg), 計17名を対象とした。被験者全員に本研究の内容に対しインフォームドコンセントを実施し、実験参加への承諾を得た。

### 2. EMD および各種反応時間の測定

測定は筋力測定装置 KIN-COM500H (Chattecx Inc., USA) を使用し、座位の姿勢で上部、腰部、大腿部をシートベルトで固定し、膝関節伸展動作における伸張性 (ECC) 筋活動時の EMD および各種反応時間を測定した。

測定運動速度は  $60^\circ/\text{sec}$  の角速度で行い、可動範囲は膝関節の解剖学的完全伸展位を  $0^\circ$  として、 $30^\circ$  屈曲位から  $90^\circ$  屈曲位までの  $60^\circ$  の範囲で実施した。レバーアームアタッチメントの設定は、レバーアームアタッチメントの中心部が膝関節外側顆の中心部から下方25cmの部分にセットした。

動作を開始するための刺激 (スタート) の種類は、実際の日常場面で転倒等の際に不意に生じる外乱負荷に近い形での実施を想定するために、下腿部前面へのランダムな固有受容器反応で行った。固有受容器反応は、KIN-COMの他動運動モードにて、 $60\%/\text{sec}$  の運動速度で下腿を機械的に屈曲 (ECC筋活動) 方向に動かし、皮膚、筋紡錘および総腓骨神経などの受容器にてレバーアームアタッチメントの作動を認知したら即座に伸展方向に反応させた。その際、可能な限り速く強く行うよう指示 ( $100\% \text{MVC}$  強度) を出し、EMD および各種反応時間の測定を実施した。

筋の活動電位を導出するための被検筋は大腿直筋を対象とした。大腿直筋の活動電位は、剃毛およびエタノールによる消毒を実施した後、皮膚抵抗を下げるために電極ペーストを塗布し表皮を剥離させ、その後に直径10 mm の双極表面電極を極間20mm の間隔で貼付しEMGを導出した。活動電位は、POLYGRAPH SYSTEM RM-6000 (日本光電工業社製) を用いてモニタリングし、時定数0.03sec, 高域遮断周波数1.5kHz で記録した。

### 3. 測定手順

時間的な予測が可能な通常の試技を以下 NOR-C とし、視覚の遮断による制限を加え時間的な予測が不可能にした状態による試技を以下 RES-C とした。

NOR-C は、試技開始合図後10秒以内に予備刺激として光刺激を行い、その後約1秒後にレバーアタッチメントを作動させ、時間的な予測が可能な状態にして測定を行った。

RES-C は、試技開始合図後、目を閉じるように指示し、10秒か60秒のランダムな時間間隔でレバーアタッチメントを作動させ、時間的な予測が不可能な状態にして測定を行った (図1)。その際、被験者への指示は、できるだけリラックスした状態を作るよう指示した。

試技は十分なウォーミングアップおよび試技の練習を実施し、NOR-C および RES-C とも再現性の得られた試技 (失敗試技や顕著に対応が遅れた試技を除く) 3回を記録し、3回の平均値をデータとして採用した。

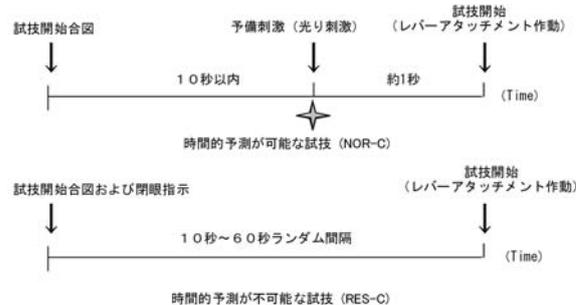


図1. 時間的な予測が可能な試技と時間的な予測が不可能な試技の実施方法

各種反応時間のデータは、大腿直筋からのEMGとKIN-COMからのforceおよびangleを同期させ、システムコンピュータでA/D変換し、解析データの計測を実施した(図2)。

4. EMDおよび各種筋反応時間の計測は、以下に記した。

(1) EMD: EMGシグナルの発現から筋トルクが出現するまでの時間とした。

(2) PMT (pre-motor reaction time): 刺激開始からEMGシグナルが発現するまでの時間とした。

(3) TRT (total reaction time): 刺激の開始から筋トルクが出現するまでの時間とした。

(4) MTPT (movement time to the peak torque): 筋トルクの発生からピークトルク値に到達するまでの時間とした。また、出力の特性を考慮し、短縮性筋活動において実施した。

以上の各種筋反応時間の計測は、図3に示した。

## 5. 統計処理

NOR-CとRES-C間の比較には、対応のあるt検定を用い、各パラメータすべての統計処理において危険率5%水準を統計学的有意とした。

## 結果

### 1. EMD

NOR-CとRES-CにおけるEMDの値を図4に示した。EMDは、NOR-C ( $75.1 \pm 4.2\text{ms}$ ) に対しRES-C ( $85.7 \pm 4.4\text{ms}$ ) の値が有意に長くなることが認められた ( $p < 0.001$ )。NOR-Cを基準にした場合、RES-CのEMDは14.1%遅延していた。

### 2. PMTおよびTRT

PMTおよびTRTの値を図5、6に示した。TRT、PMTにおいてもEMDと同様に、NOR-C (PMT:  $138.4 \pm 17.5\text{ms}$ , TRT:  $213.4 \pm 19.2\text{ms}$ ) に対しRES-C (PMT:  $194.4 \pm 21.7\text{ms}$ , TRT:  $280.9 \pm 22.4\text{ms}$ ) の値が有意に長くなることが認められた ( $p < 0.001$ )。NOR-Cを基準にした場合、RES-CのPMTは40.5%、TRTは31.6%それぞれ遅延していた。

### 3. MTPT

MTPTの値を図7に示した。MTPTは、EMD、PMT、TRTとは異なり、NOR-C ( $133.6 \pm 18.9\text{ms}$ ) とRES-C ( $142.1 \pm 15.4\text{ms}$ ) との間に有意な差は認められなかった。

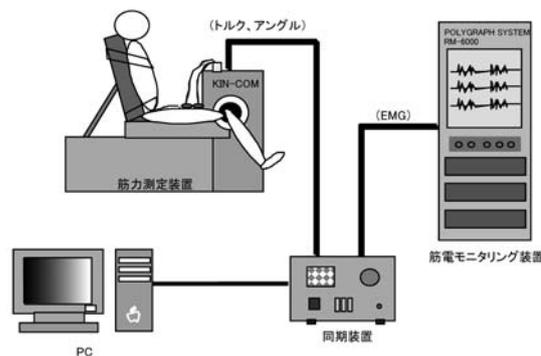


図2. EMDと各種筋反応時間の測定環境模式図

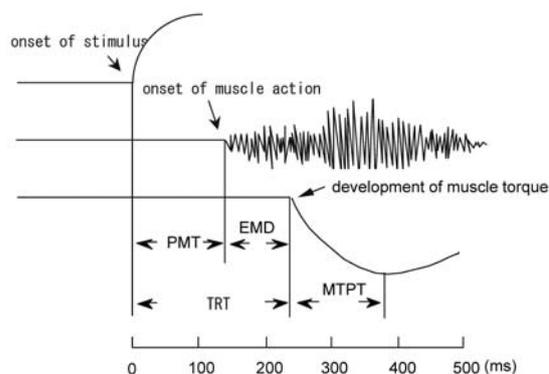


図3. 筋反応時間の計測

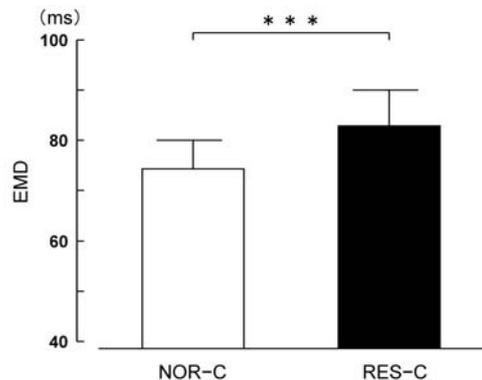


図4. NOR-CとRES-CのEMD (\*\*\*) :  $p < 0.001$

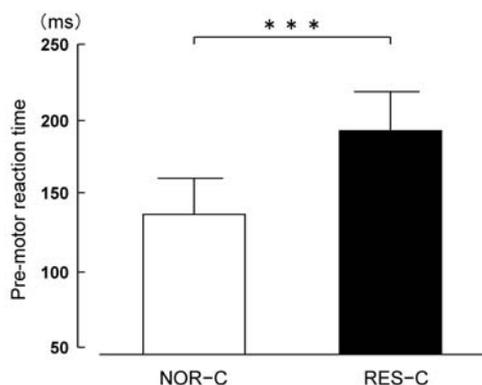


図5. NOR-CとRES-CのPMT (\*\*\*) :  $p < 0.001$

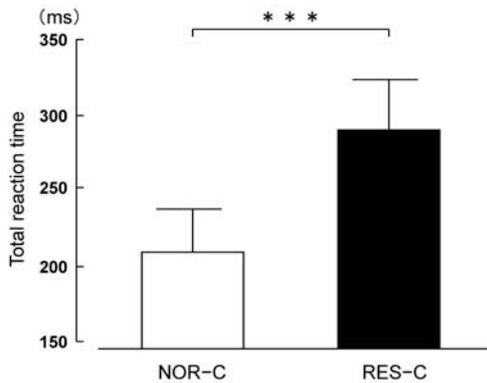


図 6. NOR-CとRES-CのTRT (\*\*\* : p<0.001)

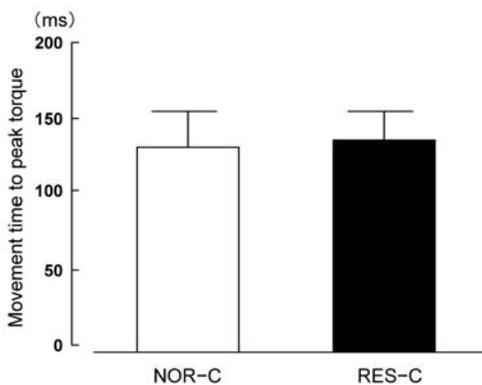


図 7. NOR-CとRES-CのPMT

## 考察

通常、人の随意運動は、身体各部位の時間的・空間的状態の調整や身体にかかる慣性、外力などの末梢情報を意識的および無意識的に調整してなされている。しかし、予測が不十分な反応動作および予測が関与しない外乱的な状態による反応動作などにおいては、通常の随意運動時の調整および制御機構とは異なり、反射および反応動作開始前の筋-神経系の興奮状態やその後の筋活動の状態が運動の遂行に反映してくる。

それらに関連して、図子と高松 (1995) は、リバンドドロップジャンプにおける時間的・空間的予測が踏切時間の短縮に及ぼす影響について調べ、視覚を遮断した試技は遮断しない試技に比較して、踏切時間は有意に増大し、滞空時間が有意に短縮したと報告し、本研究のEMDや筋反応時間を対象とした結果とは異なるパラメータ (予測と踏切のパフォーマンスとの関連) から予測の影響を指摘している。また、岡田ほか (2000)、浅井ほか (2004) らは、高齢者を対象として、不意に生じる加速度的な外乱的な負荷がその後の姿勢保持能力 (動的平衡性) に大きな影響を及ぼすことを指摘している。このように予測の有無は、身体運動における運動の遂行時間やパフォー

マンスに大きく影響を及ぼしていることが伺えられる。

そこで本研究の結果から、EMDおよびPMT、TRTは時間的予測の影響を受け、時間的な予測ができない場合は、有意に遅延することが明らかになった。特に本研究におけるオリジナル性の高いところとしては、EMDが予測の影響を受けることが明らかになった点である。これまでにこのEMDは、筋-腱複合体における直列弾性要素 (SEC) の伸張や収縮要素 (CC) の収縮 (Cavanagh and Komi, 1979; Norman and Komi, 1979)、筋線維のタイプ (type II線維の比率) (Komi, 1979; Vitasalo and Komi, 1981)、T管に沿った活動電位の伝導 (Cavanagh and Komi, 1979)、筋小胞体からのCa<sup>2+</sup>の放出 (Cavanagh and Komi, 1979) などの複雑な生理的要因を介して生じ、その時の筋活動の状態: 筋活動様式 (Cavanagh and Komi, 1979; Norman and Komi, 1979; 高瀬ほか, 1997)、筋長 (Vos et al., 1991)、力の発揮レベル (Grabiner, 1985; Mercer et al., 1998)、疲労 (Zhou et al., 1996; Mercer et al., 1998) や加齢 (高瀬ほか, 2005) によって左右されることが明らかにされているが、予測の有無がEMDに及ぼす影響についての研究はこれまでになされていなかった。

EMDが予測の影響を受ける要因としては、予測が関与しない場合は筋-神経系の調整および制御機構が不適切な状態にあると考えられ、それにより筋のpre activityが適切に働かず、運動単位の動員の減少や、筋腱複合体におけるSECや並列弾性要素 (PEC) の弛みによって筋の弾性的な助長が得られなかったことなどが影響しているものと推察される。また、予測の有無による伸張反射感受性 (中澤と山本, 2002) の違いもEMDの遅延に影響を及ぼしている可能性が考えられる。さらにKubota et al. (1979) や笠井 (1980) は、運動ニューロンの興奮レベルとTRTとの間に負の相関関係があると報告しており、予測の有無による運動ニューロンの興奮レベルの違いも少なからずEMDの遅延に関与しているものと考えられる。反応開始時の力発揮に関わるEMDは、反応動作の適切な遂行に対し重要な役割を成す。従って、予測が不十分な反応動作および予測が関与しない外乱的な状態による反応動作などにおいては、このEMDの遅延をできるだけ押さえることが適切な動作の遂行に対し重要であると考えられる。

PMTは、感覚受容器の興奮から神経接合部までの神経伝達時間: 即ち刺激の開始から筋のEMGが出現するまでの時間である。このPMTは、予告刺激の有無や測定条件の変化で変動 (Kasai, 1982) することが知られている。従ってPMTの遅延に関しては、当然のことながら筋の内部的な要因よりも錐体路や錐体路細胞による中枢神経機構の遅延 (Kubota et al., 1979; 笠井, 1980) が大きく影響し、感覚受容器興奮から神経接合部までの

神経伝達時間が遅延したためであると考えられる。これらのことからTRT (TRT = PMT + EMD) は、EMDとPMTの遅延により有意に長くなったことが伺えられる。

一方、MTPTの値には予測の有無の影響が見られなかったことに関しては、PMTやEMDの遅延 (delay) が生じた後、筋出力が一旦発生してしまえば、NOR-CとRES-Cとの間における筋の運動単位の動員や筋腱複合体の調節機構の働きに差がないことが考えられる。従ってこれらの要因から、筋出力が発生し最大筋力 (ピークトルク値) に至るまでに要する時間には、予測の有無が影響を及ぼさないことが示唆された。

これらのことから、身体活動を遂行する際に予測が関与する場合は、筋-神経系におけるコーディネーション (機能の調整) が適切に遂行されるが、予測が不十分であったり関与しなかったりする場合は、EMDやPMT, TRTに影響を及ぼし、パフォーマンスの低下や突発的なスポーツ障害の発生につながる可能性があるものと推察された。また、今後の課題として、EMDやPMT, TRTは加齢による影響を受けることが明らかになっているので (高瀬ほか, 2005)、転倒防止との関連性から、高齢者における時間的予測の有無がEMD やPMT, TRTに与える影響について検討する必要があると考えられた。

## まとめ

本研究は、健康な若年の女性を対象に、時間的な予測が可能な状態と視覚の遮断による制限を加え時間的予測が不可能にした状態においてEMDと各種筋反応時間を測定し、時間的予測の有無がEMDや各種筋反応時間に与える影響について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

EMDは、時間的予測の有無の影響を受け、時間的な予測が可能な試技に対し、時間的な予測が不可能な試技が有意に遅延することが認められた。また、TRT, PMTそれぞれにおいてもEMDと同様な結果であった。しかしながら、MTPTは時間的な予測の有無の影響が認められなかった。

## 参考文献

阿江道良・洪川侃二・金原勇・山口幸雄 (1979) 跳躍の踏切における神経・筋の働きに関する研究 予備緊張を中心に . 日本バイオメカニクス学会編 身体運動の科学 運動の制御. 杏林書院: 東京, 322-345.  
浅井英典・大柿哲朗・小宮秀一 (2004) 中高年女性の転倒経験の有無による体力および動的平衡性の相違について. 体育学研究, 49: 447-456.

Aura, O. and Viitasalo, J. T. (1989) Biomechanical characteristics of jumping. *Int. J. of Sport Biomech.*, 5:, 7: 89-98.  
Cavanagh, P. R. and P. V. Komi (1979) Electromechanical delay in human skeletal muscle under concentric and eccentric contractions. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 42: 159-163.  
笠井達哉 (1980) 脊髄の興奮性と反応時間の関係-下肢底屈・背屈反応動作について-体育学研究, 25: 95-104.  
Kasai, T. (1982) Effect of warning signal on reaction time of elbow flexion and supination. *percept. Mot. Skills.*, 55: 675-677.  
Komi, P. V., (1979) Neuromuscular performance: Factors influencing force and speed production. *Scand. J. Sports Sci.*, 1: 2-15.  
小宮山伴与志・笠井達哉 (1988) 足関節底屈・背屈切り替え動作時の筋放電休止期-予備緊張量の違いと筋出力量の違いにおける影響-. *J. J. Sports Sci.*, 7: 235-268.  
Kubota, K. and Hamada, I. (1979) Preparatory activity of monkey pyramidal tract neurons related to quick movement onset during visual tracking performance. *Brain Res.*, 168: 435-439.  
Mercer, T. H., Gleeson, N. P., Claridge, S, and Clement, S. (1998) Prolonged intermittent high intensity exercise impairs neuromuscular performance of the knee flexors. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 77: 560-562.  
中澤孝孝・山本伸一郎 (2002) 伸張反射の合目的的利用. *バイオメカニクス研究*, 6: 53-60.  
Norman, R. W. and Komi, P. V. (1979) Electromechanical delay in skeletal muscle under normal movement conditions. *Acta Physiol. Scand.*, 106: 214-249.  
岡田修一・高田義弘・平川和文・濱 宏志・浅見高明 (2000) 高齢女性の加速度外乱に対する立位姿勢保持能力と日常生活活動量との関係. *体力科学*, 49: 111-120.  
高瀬幸一・田口正公・川上 貢・高柳清美 (1997) Concentric・Eccentric・Isometric筋活動時における運動速度とElectromechanical Delay. 日本バイオメカニクス学会13回大会論集: 身体運動のバイオメカニクス: 509-513.  
高瀬幸一・田口正公・柿本真弓 (2005) 高齢者におけるElectromechanical delayの特性. *九州体育・スポーツ学研究*, 19: 29-35.  
Viitasalo, J. T. and P. V. Komi (1981)

- Interrelationships between electromyographic, muscle structure and reflex time measurements in man. *Acta Physiol. Scand.*, 111: 97-103.
- Vos, E.J., Harlaar, J., and van, Ingen, Schenau, G.J (1991) Electromechanical delay during knee extensor contractions. *Medicine and Science in Sports.*, 23: 1187-1193.
- Zhou, S., McKenna, M.J., Lawson, D.L., Morrison, W.E., and Fairweather, I. (1996) Effects of fatigue and sprint training on electromechanical delay of knee extensor muscles. *Eur. J. Appl. physiol.*, 72: 410-416.
- 関子浩二・高松 薫 (1995) リバウンドドロップジャンプにおける踏切時間を短縮する要因: 下肢の各関節の仕事と着地に対する予測に着目して. *体育学研究*, 40: 29-39.