

# 投球動作における運動連鎖の連続動作時間制御モデル

脇長 宏行・浦田 達也・野方 円

## A Continuous Motion Time Control Model for Open Kinetic Chain with Throwing Performance

Hiroyuki Wakinaga, Tatsuya Urata, Madoka Nokata

神戸医療未来大学紀要 第24巻 第1号

(令和5年12月)



＜原著＞

# 投球動作における運動連鎖の連続動作時間制御モデル

脇長 宏行<sup>1)</sup>・浦田 達也<sup>2)</sup>・野方 円<sup>3)</sup>

## A Continuous Motion Time Control Model for Open Kinetic Chain with Throwing Performance

Hiroyuki Wakinaga<sup>1)</sup>, Tatsuya Urata<sup>2)</sup>, Madoka Nokata<sup>3)</sup>

In this paper we consider a continuous motion time control model to improve a throwing performance where the angular velocities of upper limb are based on open kinetic chain in throwing motion. Our model consists of three motions of the kinetic chain which are upper torso left and right rotation, shoulder joint horizontal adduction abduction, and elbow joint extension flexion. We assume that a throwing performance can be calculated by timing to start the next motion. The optimal time control to maximize the total expected throwing performance value is driven by dynamic programming. For the finite motion of open kinetic chain model, we show that there exists an optimal time to reach a maximum angular velocity for the joint movement and that the total expected throwing performance value is concave in throwing motion time. We derive an optimal time control of a continuous motion with interlocking rate of motion, based on the inventory control model. We provide numerical examples from the actual data of throwing training to compute an optimal timing for first motion.

Key words : kinetic chain, throwing performance, joint angular velocity, timing, dynamic programming, time control, optimization problem  
運動連鎖, 投球パフォーマンス, 関節角速度, タイミング, 動的計画法, 時間制御, 最適化問題

## 1. はじめに

ヒト身体運動は、ロコモーションである歩行運動から走る、泳ぐ、跳ぶ、投げる、蹴るおよび打つなど日常生活からスポーツ場面まで多岐にわたる。陸上競技では、単純に走るや投げるなどの運動ではなく、走りながら勢いをつけて跳ぶ（走り幅跳び）や助走をつけて投げる（やり投げ）など、2つ以上の動作が組み合わさって1つの運動が行なわれている。また野球では、陸上競技とは異なり、助走を伴

わない投げるや打つなどの運動が見られる。この野球で見られる投げるや打つなどの運動は、助走による並進運動エネルギーを跳ぶや投げるなどの運動に変換することが出来ない。ので、最大限のパフォーマンスを発揮するために身体の各関節を効果的に下肢から体幹、体幹から上肢へと動作を連動させる運動連鎖が見られる。この運動連鎖は、現在（2023年8月）MLBで活躍している大谷翔平選手も効果的に利用している。

高いパフォーマンスを発揮するためには効

1) 神戸医療未来大学（Kobe University of Future Health Sciences）〒679-2217 兵庫県神崎郡福崎町高岡1966-5  
2) 関西学院大学（Kwansei Gakuin University）〒662-8501 兵庫県西宮市上ヶ原一番町1-155  
3) 中部学院大学（Chubu Gakuin University）〒501-3993 岐阜県関市桐ヶ丘二丁目1番地

果的な運動連鎖が必要不可欠である。この運動連鎖の見られる運動には、前述した歩行運動、走運動、跳運動、泳運動、投運動、蹴運動および打運動である。また運動連鎖には「Open」と「Closed」の2種類あるが、本研究における運動連鎖は、前者の四肢や下肢の末端が地面などに接地していない「Open kinetic chain」とする。この運動連鎖は、阿江と藤井<sup>1)</sup>により「身体の中心部あるいは大きな仕事のできる下肢によって生み出された力、エネルギー、速度などがタイミングよく順次加算されて、あるいは伝達されて末端に伝わり、末端のエネルギーや速度を大きくできる」と定義されており、このメカニズムに関する研究は多い。特に野球の投運動やテニスなどの打運動を対象とした研究が多く行われており<sup>2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)</sup>、高いパフォーマンスを発揮するだけでなく、傷害予防にもこの運動連鎖は効果的である。これらのことから、運動パフォーマンスとの関係において、運動連鎖は必要不可欠である。

これまで多く行われてきた投運動における運動連鎖の研究は、キネマティックス的研究あるいはキネティックス的な研究に分別できる。前者は、並進速度や関節角速度などのデータを基に分析し、後者は、並進加速度、関節角加速度および関節トルクなどのデータを基に分析を行う。先に述べた運動連鎖の原則に「生み出された力、エネルギー、速度など」とあるように後者の研究手法を用いる研究が多い<sup>2, 3, 4, 5, 9, 10, 11)</sup>。これらの研究では、関節トルクや力学的エネルギーを基に分析し、体幹や下肢で生成された力やエネルギーについて、ボールを握っている上肢に効率的に伝えるメカニズムについて考察している。しかしながら、これらの先行研究は、運動連鎖による効果について考察しているが、運動連鎖が効果的ではない場合について、議論されていない。つまり、エネルギーがどのように伝達され、増加

されているのかに着目しているが、各関節運動の開始タイミングなどについて、議論されていない。また運動連鎖の原則に「タイミングよく順次加算されて」とあるように、伝達だけでなく、運動を連鎖させるタイミングも重要な要因である。これらのことから、本研究では、エネルギーがどのように伝達されているのかではなく、関節運動における角速度がピークになるタイミングと次の関節運動が開始されるタイミングについて検討する。

## 2. 運動連鎖に適用する数理モデル

投球動作には、上腕左右回旋・肩関節水平内外転・肘関節伸展屈曲の3つの関節運動が速いボール速度を生み出すために重要である。その中で投球パフォーマンスを高めるポイントは、次の関節運動を開始するタイミングである。そのタイミングは、関節運動の角速度がピークに来るまでのある限られた範囲が良いとされている。しかし、その範囲は投球の目的により変動させる必要がある。さらに、投球動作にこの3つの関節運動が連動しているということは、ある関節運動から次の関節運動に入るタイミングが早かったり遅れたりすると、次の関節運動の開始から運動に負担がかかった状態であることを意味する。つまり、投球動作において、最初の関節運動である上腕左右回旋の角速度をピークに持ってくるまでの時間は、その後の肩関節水平内外転と肘関節伸展屈曲の角速度をピークに持ってくるまでの時間を考慮したものでないといけない。

投球動作の関節運動に着目した数理モデルとして、1つの関節運動の動作時間を最適化する動作時間制御モデル<sup>12)</sup>がある。これは、有限時間内で上腕左回旋運動の角速度をピークに持ってくるまでの時間を決定することで、投球パフォーマンスを高めるだけでなく、

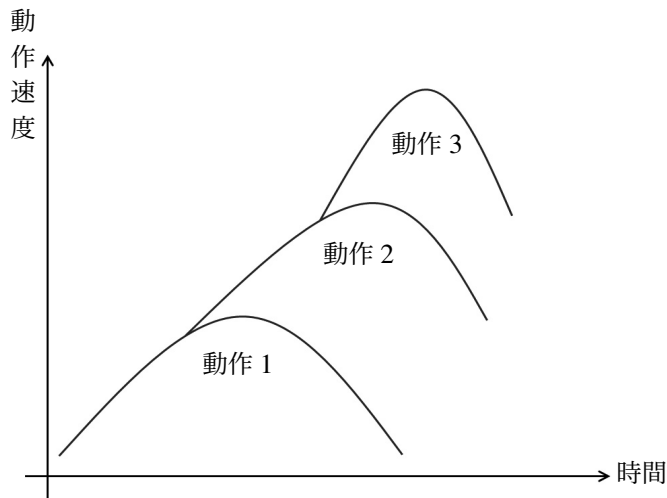


図1 投運動における運動連鎖のイメージ

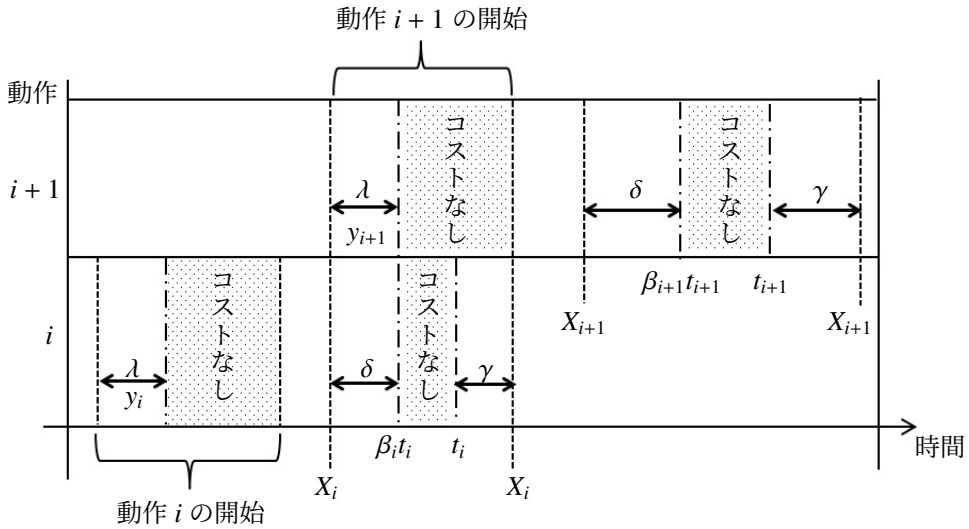
トレーニングメニューを組み立てるための指標とできるものである。しかし、このモデルは運動連鎖を想定していない。つまり、各関節運動を独立的に最適化しても、運動連鎖全体の最適化にはならない。そこで、本論文では運動連鎖のような連続する関節運動全体を最適化するモデルとして動的計画法を用いた在庫管理モデル<sup>13,14)</sup>を取り上げる。これらの在庫管理モデルは、有限期間内の需要量に応じて在庫に関わるコストを最小化する各期の発注量を決定する問題である。その際、各期の期末に残った在庫は、次期の期首で状態変数としている。これは、連続する関節運動では、タイミングを外した場合の時間にあてはめることができる。したがって、本論文では動的計画法を用いた在庫管理モデルを応用して、上腕左右回旋、肩関節水平内外転、肘関節伸展屈曲、の連続した動作の期待パフォーマンスを最大にする、角速度をピークに持ってくるまでの最適時間を決定する動作時間制御モデルを提案する。投球動作では投球速度などのパフォーマンスに重点が置かれるため、コスト最小化問題ではなく、パフォーマンス(利益)最大化問題として議論することが適

している。

### 3. 動作時間制御モデルの仮定と定式化

この節では、上腕左右回旋(以降動作1とする)、肩関節水平内外転(以降動作2とする)、肘関節伸展屈曲(以降動作3とする)の連続動作の時間制御モデルについて論じる。1つの動作の流れは、動作を開始して、その角速度がピークに達した後、その速度は降下していき、速度が0となった時点で動作終了となる。連動とは、動作1が開始された後、どこかの時点で次の動作2が開始される(動作3においても同様である)が、動作1は終了しているわけではないため、複数の動作が同時におこなわれていることになる(図1)。

本モデルでは前節の内容から各動作の終了時点までを定式化するのではなく、次の動作が開始されるまでの時間と各動作の角速度をピークに持ってくるまでの時間に着目して定式化をおこなう。定式化に入る前に、本モデルの仮定と記号の定義について説明する。まず、連続する動作を最適動作時間制御モデル


 図2 動作  $i$  から動作  $i+1$  までの流れとコストの関係

解析のため離散変数  $i = 1, 2, \dots, n$  とする。ただし、本論文の投球動作においては  $n = 3$  となる。動作  $i$  の角速度をピークに持ってくるまでの時間を  $t_i$  (決定変数) とする。実際におこなわれる動作において、動作  $i$  の開始から動作  $i+1$  が開始されるまでの時間を  $X_i$  とし、連続型確率変数とする。ただし、最後の動作である  $X_3$  は、次の動作が存在しないため、動作 3 の開始からボールをリリースまでの時間とする。この  $X_i$  の時間に対する単位あたりのパフォーマンス値を  $\rho$  とする。本モデルでは熟練者の投球動作改善トレーニングを基にしており、一般的に熟練者の投球動作は、関節運動の角速度をピークに持ってくる前に次の動作に入るため、モデルを論じる焦点はこの範囲に重きを置くこととする。したがって、 $\rho$  は  $t_i$  を上限として乗ずるものとする。さらに、動作  $i$  の動作連動率  $\beta_i (0 \leq \beta_i \leq 1)$  を設ける。これは前節で述べた、次の関節運動を開始するタイミングにあたり、関節運動の角速度がピークに来るまでのある限られた範囲 ( $\beta_i t_i \leq t_i$ ) を示すものであり、この範囲内で動作  $i+1$  が開始すれば ( $\beta_i t_i \leq X_i \leq t_i$ )、動作に対するコスト (負担) がかからないものとする。反対に、

その範囲外として非常に早い段階で動作  $i+1$  が開始した場合 ( $\beta_i t_i > X_i$ ) の時間余剰分に対する単位あたりのコストを  $\delta$  とし、関節運動の角速度のピークを超えてから動作  $i+1$  が開始した場合 ( $X_i > t_i$ ) の時間超過分に対する単位あたりのコストを  $\gamma$  とする。これらのコストは、投球動作の関節運動において、力みやフォームの崩れによりボールに伝える力が減少することを示している。さらに動作  $i$  は次の動作  $i+1$  と連動しているため、動作  $i$  で発生した余剰時間は、タイミングが早いため、動作  $i+1$  の円滑な関節運動の角速度の上昇に対してマイナス効果をもたらす。そのため、余剰時間 ( $\beta_i t_i - X_i > 0$ ) を  $y_{i+1}$  とし、

$$y_{i+1}(X_i, t_i) = \begin{cases} \beta_i t_i - X_i & \text{if } \beta_i t_i - X_i > 0 \\ 0 & \text{if } \beta_i t_i - X_i \leq 0 \end{cases}$$

と定義する。 $y_{i+1}(X_i, t_i)$  は、動作  $i+1$  開始時点において確定しているため、状態変数  $y_{i+1}$  としてあつかい、この状態変数に乗ずる単位あたりのコストを  $\lambda$  とする。上述のコストは全てパフォーマンスを落とすためのものであるが、パフォーマンス値とコストの関係性はなく、それぞれ独立していると考え、コストの

大小関係は、熟練者による投球動作から、関節運動の角速度のピーク前に次の動作に入るのが一般的であるため、 $\delta \geq \gamma \geq \lambda$  とし、ピーク前に次の動作を開始するコストの方を大きくしている。図2は、動作  $i$  から動作  $i+1$  までにおいて  $X_i$  もしくは  $X_{i+1}$  が取る値により発生するコストを表したものである。本モデルの投球動作では動作 1～3 までを想定しているが、図2から動作  $i$  と動作  $i+1$  の2動作の定式化をおこなえば十分であることがわかる。もちろん、動作  $i$  と動作  $i+1$  は連動しているで、動作  $i$  は動作  $i+1$  の最適時間制御を所与とする動的計画法に基づく定式化となる。そこで、動作  $i+1$  を最後の動作として、期待パフォーマンス値  $R_{i+1}(y_{i+1}; t_{i+1})$  を求めると、

$$\begin{aligned}
 & R_{i+1}(y_{i+1}; t_{i+1}) \\
 &= \rho E \left[ \min \{X_{i+1}, t_{i+1}\} \right] - \lambda E \left[ \min \{X_{i+1}, y_{i+1}\} \right] \\
 &\quad - \delta E \left[ \max \{0, \beta_{i+1} t_{i+1} - X_{i+1}\} \right] \\
 &\quad - \gamma E \left[ \max \{0, X_{i+1} - t_{i+1}\} \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

となり、問題は (1) 式を最大とするタイミング  $t_{i+1}$  を求めることである。(1) 式の右辺第2項において、 $X_{i+1}$  が  $y_{i+1}$  より小さくなる場合とは、余剰時間  $y_{i+1}$  内で、動作  $i+1$  が終了することである。さらに、(1) 式は動作  $i+1$  の開始時点でモデルの仮定より以下の  $a$  と  $b$  の2つの状態が存在する。

$$\begin{aligned}
 a: & y_{i+1} > 0 \\
 b: & y_{i+1} = 0
 \end{aligned}$$

ここで、 $y_{i+1} = (\beta_i t_i - X_i)^+$  である。これら状態  $a$  と  $b$  の期待パフォーマンス値の違いは、 $\lambda$  のコストが発生するか否かである。

次に、動作  $i$  の期待パフォーマンス値は、(1) 式から導出した動作  $i+1$  の角速度をピークに持ってくるまでの時間  $t_{i+1}^*$  以降

の最適パフォーマンス値を考慮するため、 $PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, \dots, t_n^*)$  は、

$$\begin{aligned}
 & PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, \dots, t_n^*) \\
 &= R_i(y_i; t_i) + E \left[ PR_{i+1}(y_{i+1}; t_{i+1}^*, t_{i+2}^*, \dots, t_n^*) \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

となる。ここで、 $R_i(y_i; t_i)$  は、(1) 式と同様になるが、 $i=1$  では  $y_1 = 0$  となるため、必然的に状態  $b$  となり  $\lambda$  の部分は0となる。 $i=n$  では次の動作がないため、

$$PR_n(y_n; t_n) = R_n(y_n; t_n) \quad (3)$$

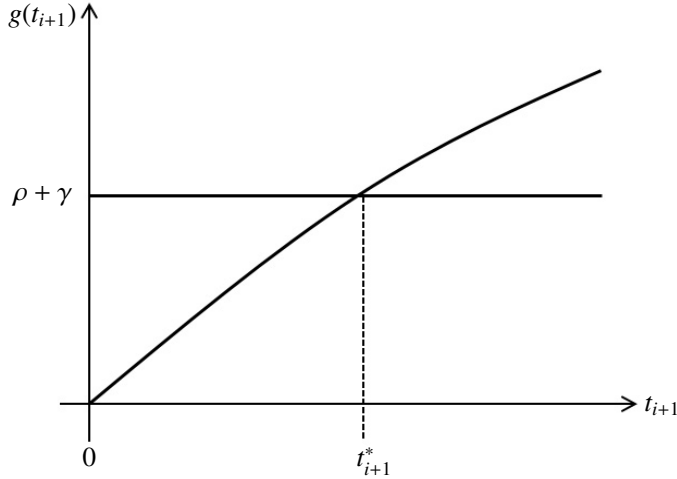
となる。(2) 式の  $E[PR_{i+1}(y_{i+1}, t_{i+1}^*, t_{i+2}^*, \dots, t_n^*)]$  は、状態  $a$  と  $b$  それぞれの期待値に分けるべきであることから、

$$\begin{aligned}
 & E \left[ PR_{i+1}(y_{i+1}; t_{i+1}^*, t_{i+2}^*, \dots, t_n^*) \right] \\
 &= E \left[ PR_{i+1a}(\beta_i t_i - x_i; t_{i+1a}^*, t_{i+2}^*, \dots, t_n^*) \right. \\
 &\quad \left. + PR_{i+1b}(0; t_{i+1b}^*, t_{i+2}^*, \dots, t_n^*) \right] \\
 &= \int_0^{\beta_i t_i} PR_{i+1a}(\beta_i t_i - x_i; t_{i+1a}^*, t_{i+2}^*, \dots, t_n^*) f(x_i) dx_i \\
 &\quad + \int_{\beta_i t_i}^{\infty} PR_{i+1b}(0; t_{i+1b}^*, t_{i+2}^*, \dots, t_n^*) f(x_i) dx_i \quad (4)
 \end{aligned}$$

に書き換えられる。 $f(\cdot)$  は動作  $i$  の開始から動作  $i+1$  が開始されるまでの時間の確率密度関数とする。ここで、 $t_{i+1a}^*$  は動作  $i$  で決定される  $X_i$  により発生する  $y_{i+1} > 0$  を含めるため、 $y_{i+1}$  の関数となる。したがって、(4) 式から (2) 式の  $PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, t_{i+2}^*, \dots, t_n^*)$  は状態  $a$  と  $b$  に分けて、それぞれの最適解が考慮されていることがわかる。

#### 4. 最適動作時間制御

本モデルでは、前節から  $PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, \dots, t_n^*)$  を最大とする  $t_i^*$  を導出することを目的として


 図3 動作  $i+1$  での最適動作時間制御

いる。そのために、はじめに動作  $i+1$  の角速度をピークに持ってくるまでの時間を求める必要がある。(1) 式において、 $R_{i+1}(y_{i+1}; t_{i+1})$  が最大となる必要条件是、

$$\frac{\partial}{\partial t_{i+1}} R_{i+1}(y_{i+1}; t_{i+1}) = 0 \quad (5)$$

となり、 $R_{i+1}(y_{i+1}; t_{i+1})$  が最大となる十分条件は、

$$\frac{\partial^2}{\partial t_{i+1}^2} R_{i+1}(y_{i+1}; t_{i+1}) < 0 \quad (6)$$

である。そこで、(1) 式から期待パフォーマンス値は、

$$\begin{aligned} R_{i+1}(y_{i+1}; t_{i+1}) = & \rho \left[ \int_0^{t_{i+1}} x_{i+1} f(x_{i+1}) dx_{i+1} \right. \\ & + \left. \int_{t_{i+1}}^{\infty} t_{i+1} f(x_{i+1}) dx_{i+1} \right] \\ & - \lambda \left[ \int_0^{y_{i+1}} x_{i+1} f(x_{i+1}) dx_{i+1} \right. \\ & + \left. \int_{y_{i+1}}^{\infty} y_{i+1} f(x_{i+1}) dx_{i+1} \right] \\ & - \delta \int_0^{\beta_{i+1} t_{i+1}} (\beta_{i+1} t_{i+1} - x_{i+1}) f(x_{i+1}) dx_{i+1} \\ & - \gamma \int_{t_{i+1}}^{\infty} (x_{i+1} - t_{i+1}) f(x_{i+1}) dx_{i+1} \end{aligned} \quad (7)$$

である。最適な角速度をピークに持ってくるまでの時間  $t_{i+1}^*$  を見つけるため (7) 式を  $t_{i+1}$

について微分すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t_{i+1}} R_{i+1}(t_{i+1}) = & \rho + \gamma - (\rho + \gamma) F(t_{i+1}) \\ & - \beta_{i+1} \delta F(\beta_{i+1} t_{i+1}) \end{aligned} \quad (8)$$

となり、(5) 式から

$$(\rho + \gamma) F(t_{i+1}) + \beta_{i+1} \delta F(\beta_{i+1} t_{i+1}) = \rho + \gamma \quad (9)$$

を得る。 $F(\cdot)$  は動作  $i$  の開始から動作  $i+1$  が開始されるまでの時間の分布関数とする。本来 (7) 式は、状態  $a$  と  $b$  の2つの期待値が存在する。前節より、状態  $a$  と  $b$  における違いは、 $\lambda$  のコストを持つかどうかだけであり、さらに、 $\lambda$  の項には、 $t_{i+1}$  は含まれていないため、偏微分をおこなっても (8) 式より 0 となる。ゆえに、最適動作時間制御については、状態  $a$  と  $b$  は同じものとして議論すればよい。つぎに、(6) 式から (8) 式についても一度微分すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial t_{i+1}^2} R_{i+1}(t_{i+1}) = & -(\rho + \gamma) f(t_{i+1}) \\ & - \beta_{i+1}^2 \delta f(\beta_{i+1} t_{i+1}) < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

となり、 $R_{i+1}(t_{i+1})$  は  $t_{i+1}$  に関して凹関数となる。したがって、状態  $a$  と  $b$  において (9) 式を満たす  $t_{i+1}$  の値が (7) 式を最大とする最適な



表 1 数値解析のための各動作の平均時間と標準偏差

平均・標準偏差 1/1000 秒単位	動作 1		動作 2		動作 3	
	$\mu_x$	$\sigma_x$	$\mu_x$	$\sigma_x$	$\mu_x$	$\sigma_x$
100%	171	92	86	27	76	15
60%	256	102	79	79	104	21
20%	35	56	94	41	183	36

角速度をピークに持ってくるまでの時間である。(9) 式において最適な  $t_{i+1}^*$  は、左辺を

$$g(t_{i+1}) \equiv (\rho + \gamma)F(t_{i+1}) + \beta_{i+1}\delta F(\beta_{i+1}t_{i+1}) \quad (11)$$

とすれば  $g(0) = 0$  から

$$\lim_{t_{i+1} \rightarrow \infty} g(t_{i+1}) = \rho + \gamma + \beta_{i+1}\delta > \rho + \gamma \quad (12)$$

である。したがって、 $g(t_{i+1})$  は  $t_{i+1}$  の増加関数であるから、

$$g(t_{i+1}^*) = \rho + \gamma \quad (13)$$

となる最適な  $t_{i+1}^*$  が存在する (図 3)。

動作  $i$  では、 $PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, \dots, t_n^*)$  の最大値を求めるため (2) 式を  $t_i$  に関して微分すると、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t_i} PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, \dots, t_n^*) \\ &= \rho + \gamma - (\rho + \gamma)F(t_i) + \int_0^{\beta_i t_i} \left[ (\lambda - \delta)\beta_i \right. \\ & \quad \left. - \lambda\beta_i \int_0^{\beta_i t_i - x_i} f(x_{i+1}) dx_{i+1} \right] f(x_i) dx_i \\ & \quad + \beta_i \left\{ PR_{i+1a}(\beta_i t_i) - PR_{i+1b}(\beta_i t_i) \right\} f(\beta_i t_i) \quad (14) \end{aligned}$$

となる。 $PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, \dots, t_n^*)$  が最大となる必要条件

$$\frac{\partial}{\partial t_i} PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, \dots, t_n^*) = 0 \quad (15)$$

を満たす  $t_i$  の値が動作  $i$  以降全体を考慮した最適な角速度をピークに持ってくるまでの時

間となる。 $PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, \dots, t_n^*)$  が最大となる十分条件は、

$$\frac{\partial^2}{\partial t_i^2} PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, \dots, t_n^*) < 0 \quad (16)$$

である。次節の数値例により  $t_i^*$  を求める。

## 5. 数値例

ここでは、実際に投動作における動作分析から得た上腕左右回旋 (動作 1)、肩関節水平内外転 (動作 2) および肘関節伸展屈曲 (動作 3) の 3 つの関節運動について、関節角速度を数値例として取り入れ、モデルの検証を行う。本モデルは、動的計画法に基づくモデルのため、最初の動作 1 は (2) 式からわかるように動作 2 と 3 を考慮して計算される。つまり、 $t_3^*$ 、そして  $t_2^*$  を求めた上で  $t_1^*$  を算出することになる。これは期待パフォーマンス値においても同様である。したがって、本節では動作 1 の数値解析を主とする。そこで、本モデルでは、動作  $i$  の開始から動作  $i+1$  が開始されるまでの時間が正規分布に従うもとで、唯一の  $t_1^*$  が存在し、 $PR_i(y_i; t_i, t_{i+1}^*, \dots, t_n^*)$  が凹関数であることを数値解析で示す。さらに、動作連動率  $\beta_i$  の変動が投球動作全体の角速度をピークに持ってくるまでの最適時間と期待パフォーマンス値にどのような影響を与えるかを調べる。

まず、野球の熟練投手 6 名 (野球経験年数 10 年以上) における全力投球 (以下「100%」

とする) と全力投球に対してボール速度が 60% および 20% となるような投球を行なわせた際の計 3 試技の関節角速度データを用いた。さらに、前述したように 3 関節の運動は、動作 1 から動作 3 の順で行われ、これらの関節運動の開始時から次の関節運動開始時までの時間もデータとして使用する。なお、動作 3 はボールリリースまでの時間をデータとして使用する。この 6 名のデータから算出された各動作の平均時間と標準偏差 ( $\mu_x, \sigma_x$ ) は表 1 のとおりである。各パラメータを  $\rho = 5, \lambda = 1, \delta = 10, \gamma = 2$  とする。動作連動率は、 $\beta_1 = 0.9, \beta_2 = 0.85, \beta_3 = 0.8$  重要度が高い動作 1 のコストがかからない範囲を最も狭く設定する。

図 4 は (14) 式を  $i = 1$  とし、データをあてはめ、 $t_1$  を 0 から 350 までの順に代入して数値計算をおこなった結果である。(15) 式より  $\frac{\partial}{\partial t_i} PR_1(y_1; t_1, t_2^*, t_3^*) = 0$  の位置が、最適な  $t_1^*$  となる。図 4 より、全ての投球動作 (100%, 60%, 20%) で  $t_1^*$  が存在し、それぞれの  $t_1^*$  は動作 1 の  $\mu_x$  に近い位置となっていることがわかる。図 5 は (2) 式を  $i = 1$  とし、図 4 と同じく  $t_1$  を 0 から 350 までの範囲として期待パフォーマンス値  $PR_1(y_1; t_1, t_2^*, t_3^*)$  を求めている。図 5 より、全ての投球動作 (100%, 60%, 20%) で (14) 式は  $t_1$  に関して凹関数であることがわかる。

次に、動作連動率を上述の  $\beta_1 = 0.9, \beta_2 = 0.85, \beta_3 = 0.8$  から 0.01 ずつ減少させていき、 $t_1^*$  と期待パフォーマンス値の最大  $PR_1(y_1; t_1^*, t_2^*, t_3^*)$  の変化を調べる。動作連動率の減少パターンは、

- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  を 0.01 ずつ減少させる (図 6, 10)
- $\beta_1, \beta_2$  を 0.01 ずつ減少させる (図 7, 11)
- $\beta_1, \beta_3$  を 0.01 ずつ減少させる (図 8, 12)

- $\beta_2, \beta_3$  を 0.01 ずつ減少させる (図 9, 13)

とする。減少させる上限は、減少させる動作連動率の最も小さい値が 0 になるまでとする。 $\beta_i$  を減少させるということは、減少させるほど  $t_i - \beta_i t_i$  の値が大きくなる。これは、パフォーマンス値を減少させない次の動作を開始するタイミングの範囲が広がるという意味でもある。直感的には、 $\beta_i$  を減少させるほど期待パフォーマンス値の最大は増加すると考えられる。そこで、 $\beta_i$  の減少量を横軸にし、最適時間や期待パフォーマンス値を縦軸にした結果を図 6～13 に示した。これらの図は、本モデルの特性を考察するというより、異なる努力度合い (ボール速度: 100%, 60%, 20%) によって、 $\beta_i$  の減少量による最適時間や期待パフォーマンス値を比較することで、各努力度合いによって関節運動の開始タイミングを変化させることがどのようにパフォーマンスに影響を与えるかを確認するという、運動連鎖のトレーニングを実際に行うための視点で解釈するためである。図 6, 7, 8 から 100% と 60% では、 $t_1^*$  はある程度の減少値までは上昇しているが、それ以降下降している。つまり、次の動作を開始するコストがかからないタイミングの範囲が広がっても、パフォーマンスの高い投球動作にはつながらないと解釈できる。最適な開始タイミングが存在する理由として、

- (i) 動作 2 の開始タイミングが早くなると、動作 1 がピークにならない場合
- (ii) 動作 2 の開始タイミングが遅くなると、動作 1 と動作 2 に連動性がなくなり、効果的な運動連鎖ができなくなる場合

が考えられる。図 9 において、 $t_1^*$  はどの減少値においても一定であり、動作 1 が  $\beta_2, \beta_3$  の

投球動作における運動連鎖の連続動作時間制御モデル

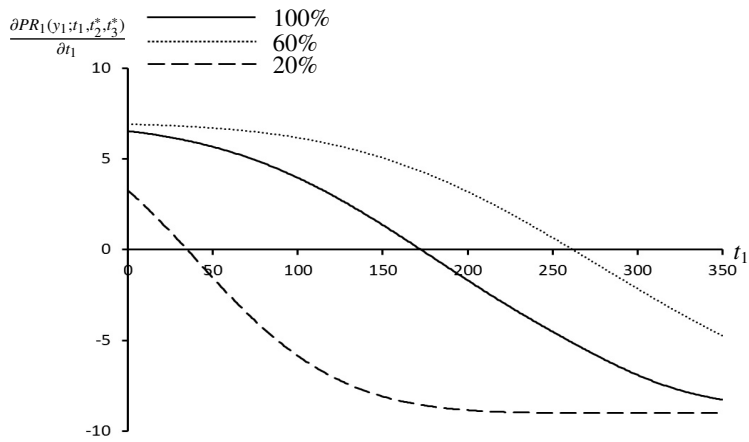


図4 動作1の角速度をピークに持ってくるまでの最適時間

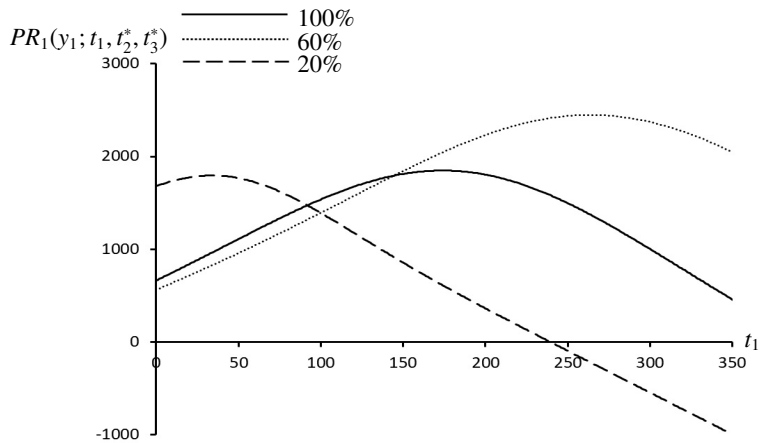


図5 動作1の期待パフォーマンス値

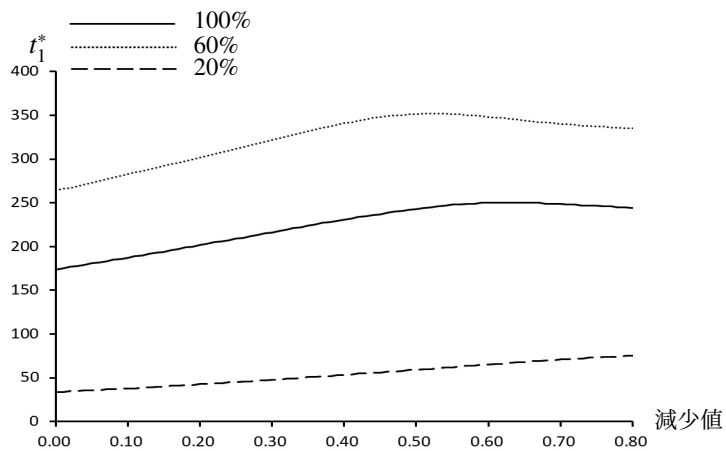


図6 動作1の角速度をピークに持ってくるまでの最適時間の推移 ( $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  を減少)

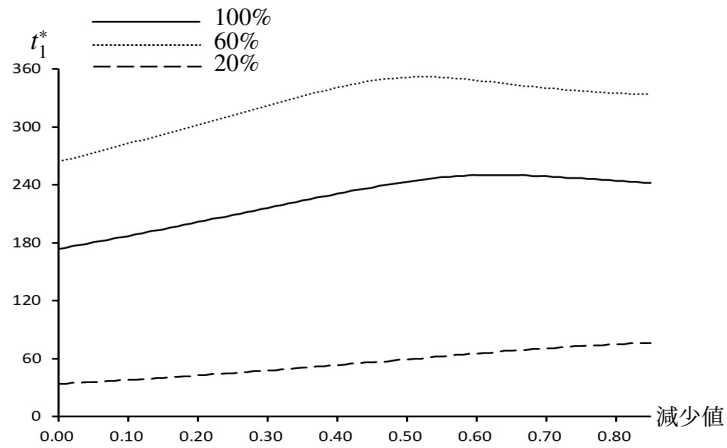


図 7 動作連動率の部分変動による動作 1 の角速度をピークに持ってくるまでの最適時間の推移 ( $\beta_1, \beta_2$  を減少)

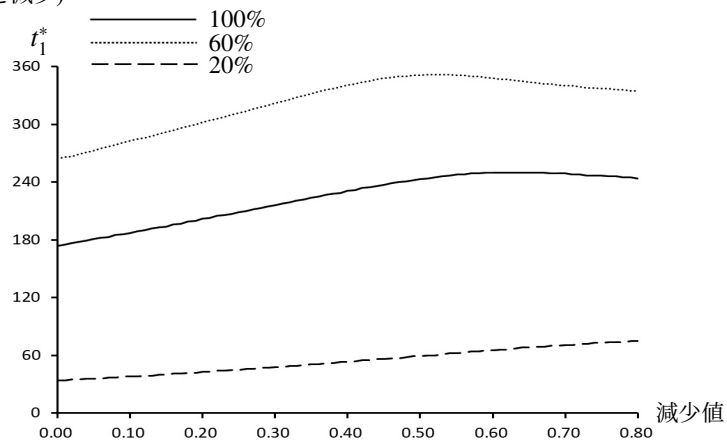


図 8 動作連動率の部分変動による動作 1 の角速度をピークに持ってくるまでの最適時間の推移 ( $\beta_1, \beta_3$  を減少)

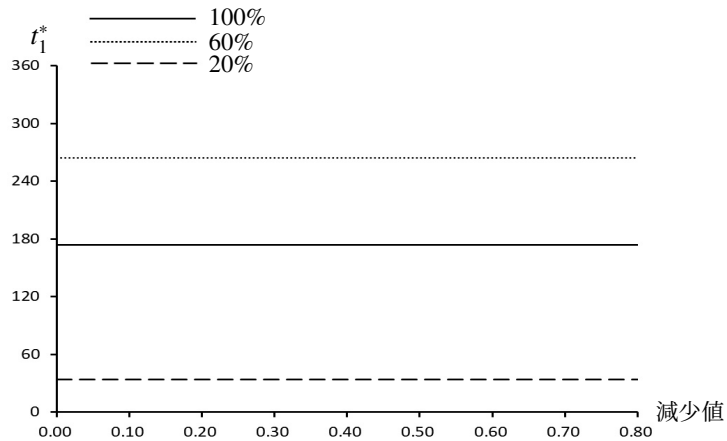


図 9 動作連動率の部分変動による動作 1 の角速度をピークに持ってくるまでの最適時間の推移 ( $\beta_2, \beta_3$  を減少)

投球動作における運動連鎖の連続動作時間制御モデル

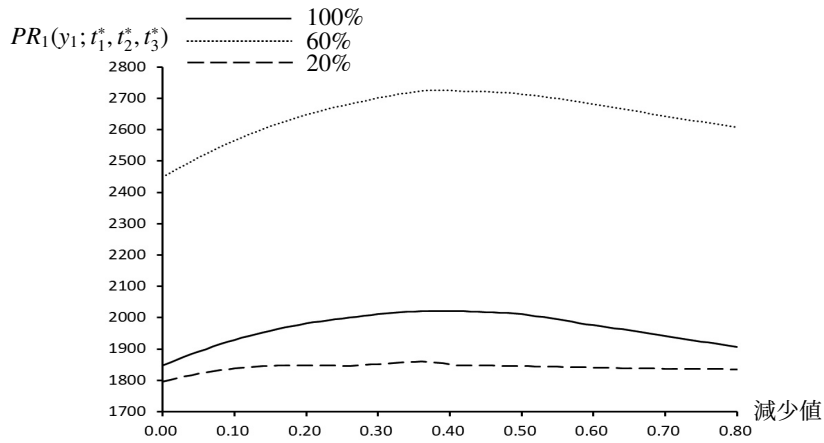


図 10 動作 1 の最大期待パフォーマンス値の推移 ( $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  を減少)

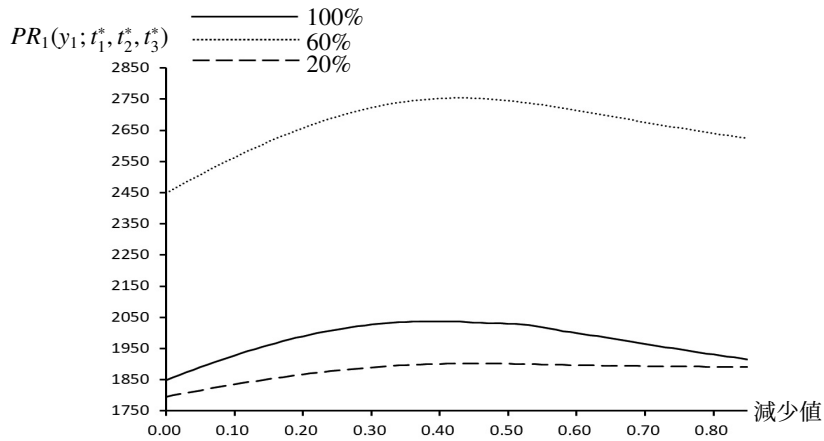


図 11 動作連動率の部分変動による動作 1 の最大期待パフォーマンス値の推移 ( $\beta_1, \beta_2$  を減少)

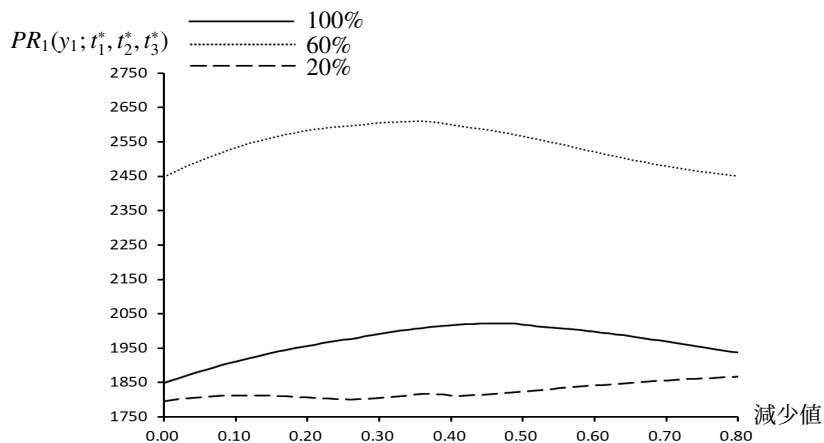


図 12 動作連動率の部分変動による動作 1 の最大期待パフォーマンス値の推移 ( $\beta_1, \beta_3$  を減少)

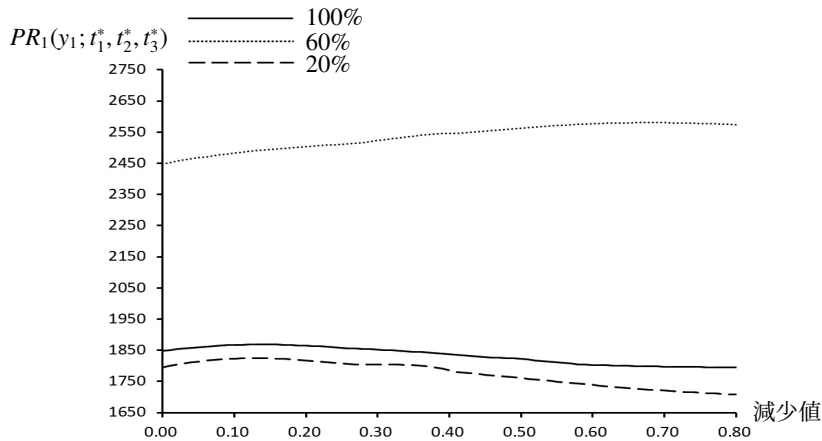


図 13 動作連動率の部分変動による動作 1 の最大期待パフォーマンス値の推移 ( $\beta_2, \beta_3$  を減少)

減少に対して、影響を受けていないことがわかる。つまり、この現象は、ある関節運動より後から開始される関節運動の開始タイミングを変化させてもある関節運動のピークに達する時間は変化しないことを意味する。図 10, 11, 12 は  $t_1^*$  の変動 (図 6, 7, 8) に合わせた推移をしているように見えるが、図 13 では、 $t_1^*$  の動き (図 9) とは反対に、 $PR_1(y_1; t_1^*, t_2^*, t_3^*)$  は、減少させる動作連動率により、異なる動きをしている。つまり、異なる努力度合いの投球動作では、次の動作に入る最適なタイミングが異なると考えられる。これらのことから、このモデルは、それぞれトレーニングを実施する選手によって、最適な開始タイミングを導きだせる可能性があると考えられる。

## 6. おわりに

本論文では、投球動作で起こる運動連鎖に関して動的計画法を用い、投球パフォーマンスを最大にするような関節運動の角速度をピークに持ってくる時間決定モデルを提示した。さらに、スポーツ科学の視点から「関節運動の角速度をピークに持ってくる前に次の動作に入る」ということを考慮するため、動作連動率を取り入れ、数値例にて動作連動率の

変動が、期待パフォーマンスの最大値に与える影響を可視化することができた。

本研究で提案したモデルの特徴として、関節運動における関節角速度のピーク値とそのタイミング、そして各関節運動の開始タイミングを基に最終的なパフォーマンスであるボール速度に対する影響を考慮できる点である。例えば、ある投手をモーションキャプチャシステムなどで動作分析したデータを基にこのモデルを当てはめると、上腕左回旋運動に対して、肩関節水平内転運動を開始するタイミングは最適なタイミングなのかという判断ができる。また動作連動率が最適化されている場合、その投手の現状レベルではこれ以上ボール速度を高めることはできないので、体力向上のためのレジスタンストレーニングなどが必要であると判断できる。これらの判断は、どのようなパフォーマンスレベル (ボール速度) でも対応できるため、幅広いパフォーマンス層で応用可能であると考えられる。

今回は投運動について最適化をおこなったが、連続する動作数については制約がないため、他の運動についても本モデルは有効である。ただし、運動によりトレーニングする目的が変化するため、決定変数や確率変数に置く項目はしっかり検討する必要がある。モデル

の拡張性については、独立した複数の運動連鎖が同時に起きた場合の期待パフォーマンス値を求めることが考えられる。

## 参考文献

- 1) 阿江通良, 藤井範久: スポーツバイオメカニクス 20 講 第 6 版, 朝倉書店, pp.119-130, 2006
- 2) Atwater, A.E.: Biomechanics of overarm throwing movements and of throwing injuries, *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 7, pp.43-85, 1979
- 3) Fleisig, G.S., Barrentine, S. W., Escamilla, R.F. and Andrews, J.R.: Biomechanics of overhand throwing with implications for injuries, *Sports Medicine*, 21, pp.421-437, 1996
- 4) Hirashima, M., Yamane, K., Nakamura, Y. and Ohtsuki, T.: Kinetic Chain of Overarm Throwing in Terms of Joint Rotations Revealed by Induced Acceleration Analysis, *Journal of Biomechanics*, 41(13), pp.2874-2883, 2008
- 5) Hore, J., Debicki, D.B., Watts, S.: Braking of elbow extension in fast overarm throws made by skilled and unskilled subjects, *Experimental Brain Research*, 164, pp.365-375, 2005
- 6) Kibler, W.B.: Biomechanical analysis of the shoulder during tennis activities, *Clinics in Sports Medicine*, 14, pp.79-85, 1995
- 7) Marshall, R.N., Elliott, B.C.: Long-axis rotation: the missing link in proximal-to-distal segmental sequencing, *Journal of Sports Sciences*, 18, pp.247-254, 2000
- 8) Nicholson, K. F., Collins, G. S., Waterman, B.R. and Bullock, G.S.: Machine Learning and Statistical Prediction of Fastball Velocity with Biomechanical Predictors, *Journal of Biomechanics*, Vol. 134, 110999, 2022
- 9) Hong, D.A., Cheung, T.K., Roberts, E.M.: A three-dimensional. Six-segment chain analysis of forceful overarm throwing, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11, pp.95-112, 2001
- 10) Putnam, C.A.: A segment interaction analysis of proximal-to-distal sequential segment motion patterns, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23(1), pp.130-144, 1991
- 11) Putnam, C.A.: Sequential motions of body segments in striking and throwing skills: descriptions and explanations, *Journal of Biomechanics*, 26(Suppl), pp.125-135, 1993
- 12) 脇長宏行, 浦田達也, 野方円: 投球動作における関節運動の動作時間制御モデル, 神戸医療未来大学紀要, 第 23 巻, 第 1 号, pp.79-89, 2022
- 13) Cheng, F. and Sethi, S.: A Periodic Review Inventory Model with Demand Influenced by Promotion Decisions, *Management Science*, Vol. 45, No. 11, pp.1510-1523, 1999
- 14) Matsumoto, H. and Tabata, Y.: A Note on a Periodic Review Inventory Model with Uncertain Demand in a Random Environment, *Scientiae Mathematicae Japonicae*, Vol.59, No.3, pp.535-545, 2004

