

サッカー選手における体カトレーニングに伴う運動 パフォーマンス発達のシステムダイナミクスモデリング

西嶋 尚彦・三木 ひろみ・稲木 光晴*
岩本 もりえ**・菅野 淳***・川俣 則幸****

System Dynamics Modeling of Motor Performance Development correlating Physical Training in Soccer Player

NISHIJIMA Takahiko, MIKI Hiromi, INAKI Mitsuharu*,
IWAMOTO Morie**, KANNO Atsushi*** and KAWAMATA Noriyuki****

The purpose of this study was to determine the system dynamics (SD) model of motor performance development correlating to physical training in a soccer player. It was assumed that the behavior of the motor performance development curve approached to the limitation of development gradually, and that the amount of performance development for unit time correlated to the amount of physical training volume. The development data of 30 m sprint performance of a male collegiate soccer player and his physical training time for 25 weeks of successive training periods; 8 weeks for off-season, 9 weeks for pre-season, and 9 weeks for in-season were utilized to analyze sensitivity of the SD model. The time unit for simulation run was a week, and the simulation period was for 25 weeks. The system dynamics simulation software STELLA II was used to construct the model of motor performance development. It was found that the principal elements of motor development model were the function of the amount of development correlating to the training volume, the limitation of development, the delay of development, and that the delay period of motor performance development correlating to the physical training was 3 weeks in the SD model.

Key words: System dynamics modeling, Motor performance development, Physical training, Soccer player, Simulation.

1. 緒言

体格・体力・運動能力の発達特性を集約的に説明するために、発育・発達曲線に数学的関数を適用する試みがなされている。Kaplowitz et al.¹⁾は縦断的主成分分析を用いて身体発育パターンを記述している。Jolicœur et al.²⁾は、専攻研究に基づ

いて8種類の関数モデルを用いて発育曲線への適合性を比較検討している。日本人青少年を対象として Matsuura³⁾は身長および運動能力の発育発達曲線を記述し、その発育発達特性を記述するために男子の身長、背筋力、立ち幅跳び、ソフトボール投げ、100m 走の発育発達現量値曲線に対して

* 久留米大学保健体育センター Kurume University.

** 大妻女子大学人間生活科学研究所 Otsuma Women's University.

*** 株式会社ヤマハフットボールクラブ Yamaha Football Club Co., Ltd.

**** 株式会社名古屋グランパスエイト Nagoya Granpus Eight Inc.

ロジスティック関数, 4次多項式, 単純振動関数を段階的に用いて適合させた。國土ら^{5,6)}は縦断的な競技パフォーマンス変動にロジスティック関数を適用し, 平均値に対してではなく個々人の発達特性を同定している。

これらの研究は, 体格や体力・運動能力の長期間にわたる発達過程に数学的関数を適用して発達特性をパラメータの変動によって記述するものであるものの, 説明変数間の相互依存関係が考慮されていないために適用された諸関数のパラメータの変動特性を説明するまでには至っていない。また, 個体間変動を説明変数として組み込んでいないので, スポーツトレーニングで対象としているような個々の選手の単一事例における成長現象には適応することができない。

成長現象や生態系のような時間を独立変量として変化する現象における動態構造を検討する方法として, 近年システムダイナミクスモデリング^{1,2,3)}が適用されてきている。諺に「風が吹けば, 桶屋が儲かる・・・」というのがある。これは, 世の中は複雑に関連しており, 思いも掛けない結果を生ずることの例えである。システムダイナミクスモデリングは, 社会経済現象, 人口動態, 生態系動態, 成長現象などにおける複雑な仕組みをシステムと捉え, フィードバック機構によってシステムの挙動を動学モデルとして表す。システムを構成する要素間の相互関係をストック, フロー, コンバータ, フィードバックループによって構造化する。

生態系における成長モデルは, 対象システムを取り囲む環境の限界値あるいは収容力との関係に基づいて以下の4つにタイプに区別されている⁸⁾。

- ・連続的成長
- ・S字型成長
- ・行き過ぎと振動
- ・行き過ぎと破局

ロジスティック曲線, シグモイド曲線, ゴンペルツ曲線などを用いて記述されるS字型曲線は成長曲線の一般型としてよく知られている。多くの成長現象はロジスティック成長あるいはシグモイド成長として知られるS字型の成長を示す。具体的には, 生態系における動植物集団の個体数の成長, 人口の成長, ヒトの身体的および精神的発達, 学習曲線, 暴動, うわさ, ニュース, 伝染病の伝搬などの一定の人間集団における拡散現象な

どである。S字型成長は指数型増加と限界値への漸近型増加を組み合わせた行動の一般的形態である。

システムダイナミクスでは成長現象をシステムとして捉え, 成長システムを構成する要素間の相互依存関係をストック, フロー, フィードバックループおよび遅れによって構造化する。S字型成長構造は, 指数型増加を示す正のフィードバックと, それに続く漸近型増加を示す負のフィードバックによって記述される²⁾。

ヒトの成熟過程における体格, 体力・運動能力の発達はS字型成長であるものの, スポーツトレーニングにおける運動パフォーマンスの発達はS字型成長モデルが適切には当てはまらないことが考えられる。その理由として以下のことが考えられる。

- ・数十週間という成熟過程全体に比較すると非常に短い期間での成長現象であること,
- ・発達量はトレーニング量に依存していること,
- ・発達量の変動には遅れがあること,
- ・同じトレーニング量に対して発達量に個人差があること,
- ・トレーニング量は期間ごとに変動すること,

このようなスポーツトレーニングにおける成長現象の特徴とシステムダイナミクスの概念フレームワークおよび手法特性を考慮すると, シミュレーション結果の適合性を外的基準としてスポーツトレーニングにおける発達動態構造を確信的に検証できると考えられる。そこで本研究ではシステムダイナミクスモデリング手法を用いて, スポーツトレーニングに伴う運動パフォーマンス発達の動態モデル構築を試みることを目的とした。

2. 方法

1) 対象

オフシーズントレーニング期間からインシーズントレーニング期間にわたる25週間における, 20歳男子大学生サッカー選手の30m走パフォーマンスの発達を対象とした。30m走はコントロールテスト項目として用いられ, 原則的に毎週火曜日の夕方ほぼ同一時刻に測定された。対象者がスタートしてから30m地点を通過するまでの時間を計測した。図1に示されるように, 運動パフォーマンスはプリテストでは6.55m/secであった。以降9週目に一度低下するものの, 13週間の連続発達が

みられ、ピークでは7.75m/secであった。14週目以降では右下がり傾向ではあるが、ほぼ維持されたとみなせる。ポストテストでの成績は7.59m/secであった。25週間のトレーニング期間の内訳はオフシーズンが8週間、続いてプレシーズンが9週間、続いてインシーズンが8週間であった。体力トレーニング時間はオフシーズンでは週平均306±43.8分、プレシーズンでは171±98.5分、インシーズンでは180±0.0分であった。トレーニングシーズンを通してあらかじめ計画された体力トレーニングプログラムが実行されたので、体力トレーニング時間の変動はランダムなものではない。

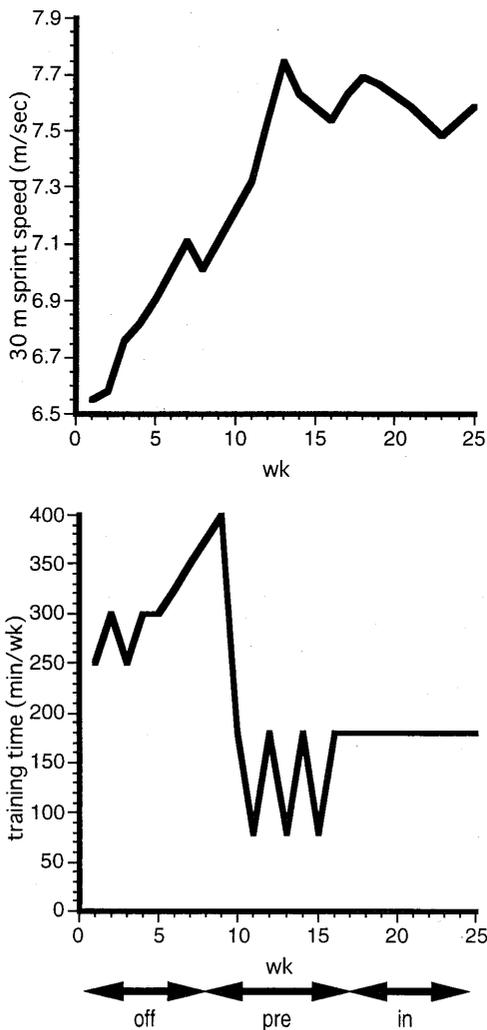


Fig. 1 Subjective motor development and physical training.

2) モデリングの条件

30m 走パフォーマンスの発達動態の構造モデルを構築するために考慮された条件は、以下の5つであった。

- ・発達量はトレーニング量に依存して決定される
 - ・トレーニング量の変化に対応して発達に遅れがある
 - ・トレーニングによる発達は可逆的である
 - ・運動パフォーマンスの発達は発達限界に漸近する
 - ・トレーニング量はシーズンに応じて変化する
- これら5つの条件は、因果フローを構築するときの前提条件とした。

システムダイナミクスでは成長現象をシステムとして捉え、成長システムを構成する要素間の相互関係をストック、フロー、フィードバックループ、遅れによって構造化する²⁾。本モデルでは体力トレーニング時間を要素として組み入れ、トレーニング時間と運動パフォーマンス発達量との関係をテーブル関数で記述し、トレーニング時間の推移と運動パフォーマンス発達量の推移との間に遅れを組み入れた。構造モデルの解析には連続型シミュレーションソフト STELLAII²⁰⁾を用いた。シミュレーション時間は週単位、シミュレーション期間は25週間とした。モデルの適合性は、決定係数を用いて運動パフォーマンス発達の現実値に対するシミュレーション値の適合性から判断した。

3) 手続き

システムダイナミクスを用いて運動パフォーマンス発達動態を記述するための手続きは、以下のような手順で行った。

- ・体力トレーニングに伴う運動パフォーマンス発達における理論的妥当性に基づいて因果ループを作成した。
- ・STELLA II の文法にしたがって因果ループをフローダイアグラムとして記述した。
- ・フローダイアグラムの構造変数の初期値を設定し、構造変数間の関係を対象者の発達データに基づいてテーブル関数で記述した。
- ・シミュレーションを実行し、適合性が向上するように構造変数の初期値、関数関係を調整した。

3. 結果と考察

1) 因果ループ

図2は体力トレーニングによる運動パフォーマンス発達動態の因果ループを示している。因果ループを構成する要素は以下の5つであった。

- ・運動パフォーマンス
- ・トレーニング量
- ・発達量
- ・発達限界
- ・発達限界との差

図中の「+」は2変量間に正の関係があることを示している。同様に「-」は負の関係があることを示している。運動パフォーマンスの発達量(Development)は体力トレーニング量(Training)および、現在の運動パフォーマンスと発達限界との間の差(Difference)に対応して決定される。運動パフォーマンス(Motor performance)は運動パフォーマンス発達量に対応して変化する。運動パフォーマンスの発達は発達限界(Limitation)まで漸近的に発達すると仮定されたので、運動パフォーマンスが発達すると現在の運動パフォーマンスと発達限界との間の差(Difference)は減少する(負の関係)。因果フロー構造は単純なモデルではあるが、負の関係が1つ(奇数個)存在するので全体として負のフィードバックループが形成されている²⁾。これによって、発達限界への漸増的接近による運動パフォーマンス発達動態の特性が記述された。

2) フローダイアグラム

連続型シミュレーションソフト STELLA II の文法にしたがってフローダイアグラムを記述したものが図3である。体力トレーニングによる運動パフォーマンスの発達動態モデルの構成変数は以下の8つであった。

- ・週当たり体力トレーニング時間(VdTr),

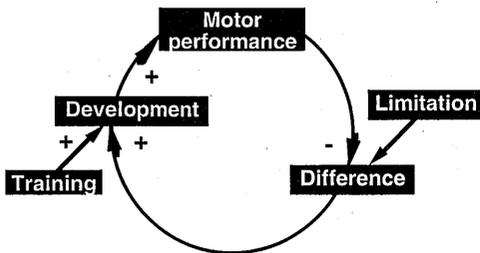


Fig.2 Causal loop of motor performance development.

- ・体力トレーニング時間(VTr),
- ・30m 疾走パフォーマンス(speed30m),
- ・発達量(Up),
- ・衰退量(Down),
- ・発達限界値(Limit),
- ・限界値との差(Dif),
- ・発達率(UpRate)

体力トレーニング時間(VTr)や30m 疾走パフォーマンス(Speed30m)の長方形はストックであり、システムで集積される量および現状水準を示す。週当たり体力トレーニング時間(VdTr)や発達量(Up)の円形はフローであり、単位時間当たりの流量およびストックの変化量を示す。発達限界値(Limit)や限界値との差(Dif)はコンバータであり、各フローにおいてなされる意志決定に必要な判断材料を提供する補助変数である。雲形はクラウドであり、長方形の左側はソースならびに右側はシンクを示す。シンクとソースはシステムの外側の環境を示す。矢印はコネクタであり、フローの方向および変量間の因果関係の方向を示す。

3) テーブル関数

図4に示されるように、システムを構成する要

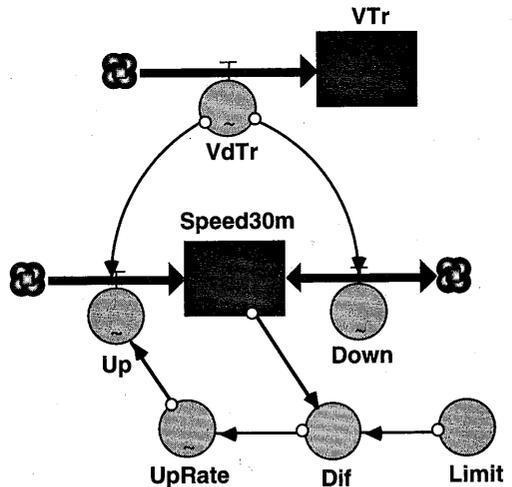


Fig.3 Flow diagram of 30 m sprint performance development correlating physical training using STELLA II.

VTr: volume of physical training, VdTr: flow of training volume, Speed30m: 30m sprint performance, Up: flow of increase rate of performance, Down: flow of decrease rate of performance, UpRate: increase rate of performance, Dif: difference between present and limitation of performance development, Limit: limitation of performance development.

素間の関係は対象者の運動パフォーマンス発達データに基づいて分析し、テーブル関数機能を用いて定義した。定義された関数は以下の3つであった。

- ・トレーニング時間と発達量との関係(Up)
- ・トレーニング時間と衰退量との関係(Down)
- ・発達限界との差と発達量との関係(UpRate)

トレーニング時間と発達量との関係(Up)は、体力トレーニング量(時間)と運動パフォーマンス発達量との関係を示している。図4上段グラフに示されるように、本対象者では週あたりの体力トレーニング時間250時間付近を臨界点として発達量が決定されていた。運動パフォーマンスの発達

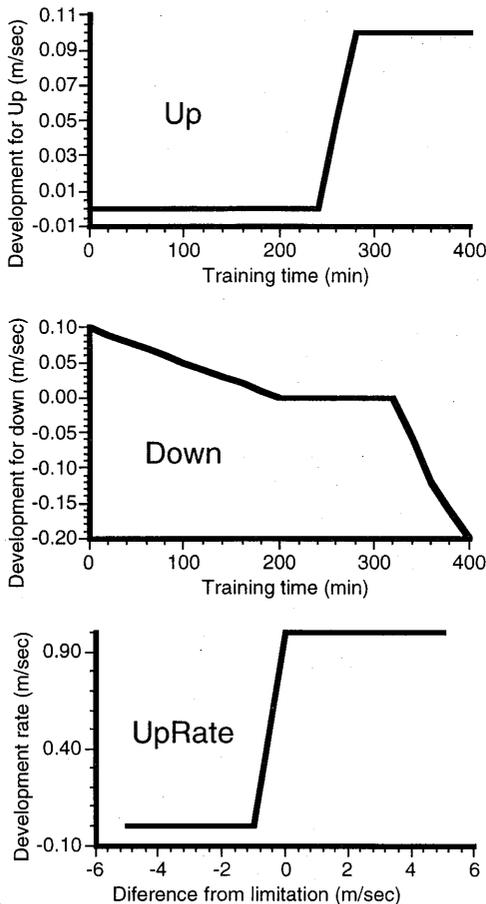


Fig. 4 Table functions of flow variables of Up, Down and UpRate in motor development model.

Up: flow of increase rate of performance,
Down: flow of decrease rate of performance,
UpRate: increase rate of performance.

量はトレーニング量との間にステップ関数型の関係がみられた。

トレーニング時間と衰退量との関係(Down)は運動パフォーマンス発達の可逆性の仮定に基づいた体力トレーニング量(時間)と運動パフォーマンス衰退量との関係を示している。図4中段グラフに示されるように、本対象者では週あたりの体力トレーニング時間200時間付近を臨界点として衰退量が決定されていた。運動パフォーマンスの衰退量はトレーニング量との間には直線的な関係がみられた。

発達限界との差と発達量との関係(UpRate)は運動パフォーマンス発達の発達限界への漸近性の仮定に基づいた発達量の調整補助変数である。本研究では対象者の発達限界が正確に推定されたわけではなく、発達動態の因果構造上仮定されたものである。これらのテーブル関数関係にしたがってそれぞれのフロー変数の値が決定された。

10週目から13週目ではトレーニング時間量が減少したにもかかわらず、運動パフォーマンスの連続発達が継続した。このような遅れ現象を記述するために時定数を定義するディレイ(Delay)関数を用いてトレーニング時間の推移と運動パフォーマンス発達量の推移との間に遅れを組み入れた。

4) 適合性

図5は30m走パフォーマンスの現実値およびシミュレーション値の動態を示している。全シミュ

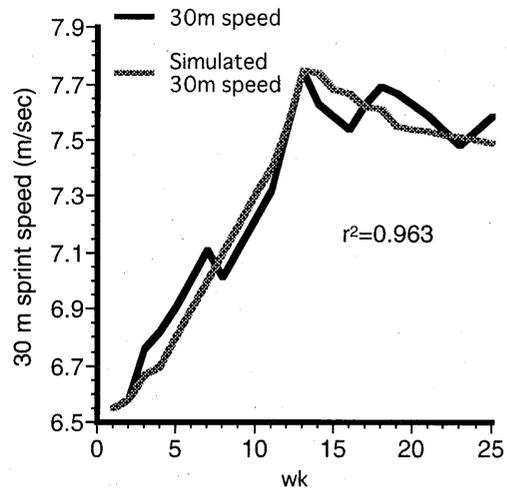


Fig. 5 Fitting of simulated performance to 30m sprint performance development during 25 weeks.

レーション期間での実測値とシミュレーション値との間の決定係数は0.963と高いものであった。

シミュレーション時間で3週間の遅れを組み入れたことによって10週目以降のトレーニング時間の減少に対応した13週目の最高値の出現時点を再現することができた。さらに、構造変数間の関係を組み入れたことによって13週目までの連続発達局面および以降の発達停滞局面における運動パフォーマンス発達の挙動を再現することができた。スポーツトレーニングにおいてはオフシーズントレーニング期間においてフィジカルコンディションを発達させ、インシーズンで維持することは一般的な現象である。このような曲線は本研究の対象事例と同様、発達局面と維持局面との間に変曲点が存在し、多くの線形構造方程式を用いて記述することは困難である。

以上の結果は、本研究で用いられたシステムダイナミクスはサッカー選手における体力トレーニングに伴う運動パフォーマンス発達動態を構造的に取り扱うことができることを示すものである。スポーツトレーニングに伴う体力・運動能力および運動パフォーマンスの発達動態は、

- ・競技水準の向上に伴って個性が強くなっていくこと、
- ・単一事例に対する統計的方法が不十分であること、
- ・時系列現象であるので因果関係を直接取り扱わなければならないこと、

などの理由によって未だ説明されていない部分が多く残されているのが現状であった。システムダイナミクスはこれらの問題を解決し、さらに政策変数パラメータを変化させることによって異なる条件でのトレーニング効果に対するシミュレーションの可能性を示唆するものである。

4. まとめ

サッカー選手におけるトレーニングに伴う運動パフォーマンスの発達動態モデルは、システムダイナミクスの概念フレームワークと手法を用いて図3に示されるように30m疾走パフォーマンス(speed30m)、限界値(Limit)、限界値との差(Def)、発達率(UpRate)、トレーニング量(VTr)および発達量(Up)の諸変数を構成要素として構築された。図5は25週間における30m走パフォー

マンスの現実値およびシミュレーション値の動態を示している。システムダイナミクスモデリングを用いた成果として、3週間の遅れを組み入れることによって10週目以降のトレーニング時間の減少に対応する13週目までの連続発達と最高値の出現、および以降の発達停滞を再現することができた。テーブル関数を定義する過程で、構造変数であるトレーニング時間と運動パフォーマンス発達量との関係、およびトレーニング時間と運動パフォーマンス衰減量との関係が明らかとなった。これによって、スポーツトレーニングに伴う運動パフォーマンス発達現象の特徴である単一事例の時系列データにおける構造変数間の動態関係を取り扱う可能性を示唆することができた。

引用文献

- 1) Bowker D W (1993): Dynamic models of homogeneous systems. (Ed)Fry J C (In) Biological data analysis: a practical approach. Oxford Univ Press, New York, pp. 313-343.
- 2) 福田 敦, 小山 茂, 轟 朝幸, 武田晋一(1993): システムダイナミクスの基礎. (編)国際システムダイナミクス日本支部「STELLA II 入門テキスト」株式会社パーシティウェブ, 東京, pp. 1-21.
- 3) Jolicoeur P, Pontier J and Abidi H (1992): Asymptotic models for the longitudinal growth of human stature. Am J Human Biol 4: 461-468.
- 4) Kaplowitz H J, Cronk C E, martorell R and Rivera J (1991): Longitudinal principal components analysis of patterns and predictors of growth in Guatemalan children. Am J Human Biol 3: 169-180.
- 5) 国土将平, 西嶋尚彦, 松浦義行: 陸上競技選手における競技成績の達成確率を用いた競技力特性の評価(1991). 体育学研究36: 27-38.
- 6) 国土将平, 松浦義行, 西嶋尚彦, 山中邦夫(1994): 跳躍運動習熟過程における競技力特性の評価. 体育学研究38: 447-457.
- 7) Matsuura Y (1988): A study on prediction of future status of physique and physical fitness of Japanese boy: using the annual data from 1964 through 1985. Bull Health & Sport Sci, Univ Tsukuba 11: 239-252.
- 8) メドウズ D H, メドウズ D L, ランダース J: 限界を超えて. (監訳)茅 陽一(訳)松橋隆治, 村井昌子. ダイヤモンド社, 東京, pp. 1-376.