

# 卒 業 研 究 論 文

2022 年度

題 目

陸上競技の長距離種目における  
最適な練習組合せ

英文題目

Optimal practice combinations  
for long distance events in track and field

指導教員 池辺 淑子准教授, 西田 優樹助教

氏 名 照永 詩恩

学籍番号 4619060

東京理科大学 工学部 情報工学科

# 卒業論文要旨

今日、学生や一般市民が多くスポーツ競技に参加しているが経験豊富な指導者の指導が受けられない人が存在する。その場合は、本人自らが練習メニューを決めなければならない。一方で試合で良い結果を出すためには、適切な量と質の練習を行う必要がある。しかし、試合で良い結果を出すためのトレーニングメニューの調整をするのが容易ではない。トレーニングに関する理論として1970年から1990年代にかけてBanisterを中心とした研究グループによってフィットネス、疲労、パフォーマンスを数理モデル化したフィットネス疲労理論というものがある。この理論はトレーニングをすると身体にプラスなフィットネスと身体にマイナスな疲労の2要素が引き起こされ両者の和をとるとパフォーマンスが算出されるという考え方に基づく理論である。本研究では、陸上競技の長距離種目を例にフィットネス疲労理論を用いて走力を向上させるためにパフォーマンスを低下させずにフィットネスを向上させると事を目的に最適なトレーニングメニューの作成のための定式化をシミュレーション等を通して行った。その定式化されたものを解き出力された練習メニューを実施して実際に行われた試合にどのような影響が出たのかを検証したところ、ピーキングはあったが走力を向上しなかったという結果が得られた。

# Abstract

Today, there are students and the general public who participate in sports but don't have access to experienced coaches. In the case, they must decide their own training menu. On the other hand, it is necessary to practice with appropriate amount and quality in order to achieve good results in games. However, it is not easy to adjust training menus to achieve good results in games. As a theory of training, the "Fitness-Fatigue" existed from the 1970s to the 1990s, when a group of researchers led by Banister developed a mathematical model of fitness, fatigue, and performance. This theory is based on the idea that training causes two factors: fitness, which is positive for the body, and fatigue, which is negative for the body, and that the sum of the two is used to calculate performance. In this thesis, using the example of long-distance track and field events, this theory was formulated through simulation to create an optimal training menu with the goal of improving fitness without decreasing performance in order to improve running ability. When the formulation was solved and the output practice menu was implemented to verify how it affected the actual game, the results showed that the peaking was correct but did not improve the running ability.

# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	問題設定	2
2.1	フィットネス, 疲労, パフォーマンス	2
2.2	トレーニング負荷	3
第3章	定式化	6
3.1	フィットネス, 疲労, パフォーマンス	6
3.2	記号の定義	7
3.3	陸上競技の長距離種目における最適なトレーニングメニューを求める定式化	7
第4章	数値実験	9
4.1	予備実験	9
4.1.1	メニューの確定	9
4.1.2	パフォーマンスの下限	11
4.2	設定	11
4.3	定式化	12
4.4	実行環境及び計算計測時間	14
4.5	結果	15
第5章	考察	16
第6章	まとめと今後の課題	17

# 図 目 次

2.1	フィットネス疲労理論の概念図 . . . . .	2
4.1	シミュレーション1 . . . . .	10
4.2	シミュレーション2 . . . . .	10
4.3	シミュレーション3 . . . . .	10
4.4	シミュレーション4 . . . . .	10

# 表 目 次

2.1	1km あたりのペースとランニング係数 . . . . .	4
2.2	路面係数 . . . . .	4
2.3	天候係数 . . . . .	5
3.1	各時刻におけるフィットネス関数 . . . . .	6
4.1	シミュレーションの結果 . . . . .	10
4.2	ポイント練習2週間前のパフォーマンス . . . . .	11
4.3	実施するトレーニングメニュー . . . . .	12
4.4	出力されたメニュー . . . . .	15
4.5	試合の結果と自己ベスト . . . . .	15

# 第1章 はじめに

今日、学生や一般市民が多くスポーツ競技に参加している。近年、運動やスポーツをする人が減っているとはいえ、令和3年度の「スポーツの実施状況等に関する世論調査」によると20000件の標本のうち56.5%が週1日以上運動やスポーツをしていて、半分以上の人が実施しているといえる[4]。運動やスポーツをする目的は様々である。例えば運動不足解消であったり体力増進・意地をしたいなどの理由がある。その中でも自己記録や能力を向上させたいという人もいる。このような人たちは経験豊富な指導者を受けべきである。しかし、経験豊富な指導者の指導が受けられる人は少ない。令和3年度の中学校と高等学校の学校運動部活動の指導者をしている人の中で経験がない人が顧問をしている、経験はあるが実技指導力が不足しているという人が存在する。経験豊富な指導者の指導が受けられない場合は、本人自らが練習メニューを決めなければならない一方で試合で良い結果を出すためには、適切な量と質の練習を行う必要がある。一般的に強度が高い練習を継続していくほど疲労は蓄積し、試合で満足のいく結果が出せなくなってしまう。逆に、強度の低い練習ばかり実施したり全く練習をしなかったりすると競技力の不足によって同じく試合で満足のいく結果が出せなくなる。このように試合で良い結果を出すためのトレーニングメニューの調整をするのが容易ではない。トレーニングに関する理論として1970年から1990年代にかけてBanisterを中心とした研究グループによってフィットネス、疲労、パフォーマンスを数理モデル化したフィットネス疲労理論というものが存在する[1]。フィットネス疲労理論[1]は、トレーニングをすると身体にプラスなフィットネスと身体にマイナスな疲労の2要素が引き起こされ両者の和をとるとパフォーマンスが算出されるという考え方に基づく理論である。本研究では、陸上競技の長距離種目を例にフィットネス疲労理論[1]を用いて最適なトレーニングメニューの作成を定式化する。

## 第2章 問題設定

本研究ではフィットネス疲労理論 [1] を用いて陸上競技長距離種目を例にパフォーマンスを低下させずにフィットネスを向上させて走力を向上させる目的とする。

### 2.1 フィットネス，疲労，パフォーマンス

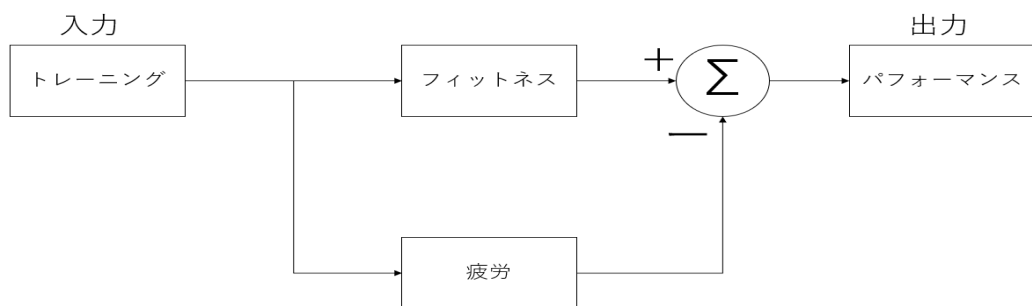


図 2.1: フィットネス疲労理論の概念図

フィットネス疲労理論 [1] は図で表すと図 2.1 になる，数式で表すと時刻  $t$  において投与されたインプット  $w(t)$  のトレーニング負荷は，正の効果をもたらすフィットネス  $g(t)$  と，負の効果をもたらす疲労  $h(t)$  が拮抗して生体応答を引き起こし，両者の和としてパフォーマンス  $p(t)$  がアウトプットされるというものである。

時刻  $t$  におけるトレーニング負荷関数  $w(t)$  は競技によって異なるが，フィット



ネスと疲労とパフォーマンスを表す関数  $g(t), h(t), p(t)$  は以下のとおりである.

$$g(t) = w(t) + g(t - i)e^{-\frac{1}{\tau_1}} \quad (2.1)$$

$$h(t) = w(t) + h(t - i)e^{-\frac{1}{\tau_2}} \quad (2.2)$$

$$p(t) = k_1g(t) - k_2h(t) \quad (2.3)$$

ここで,

$\tau_1$ : フィットネスの時定数であり  $\tau_1 = 45$  と設定

$\tau_2$ : 疲労の時定数であり  $\tau_2 = 15$  と設定

$k_1$ : フィットネスの重みづけ係数であり  $K_1 = 1$  と設定

$k_2$ : 疲労の重みづけ係数であり  $k_2 = 2$  と設定

$i$ :  $t$  までのトレーニング期間であり本研究では  $i = 1$  と設定

$\tau_1, \tau_2, k_1, k_2$  は Banister が 1991 年に設定すべきと提唱している [2].

## 2.2 トレーニング負荷

また, トレーニング負荷  $w(t)$  の算出方法はいくつかある. 例えば平均心拍数と最大心拍数を用いて求める方法や, サッカーにおいてそれぞれのトレーニングメニューの内容によって定められている強度と実施時間で求める方法などがある [3]. 本研究では対象とする陸上競技長距離種目とし以下のものとする.

$$w(t) = \text{ランニング強度 (au)} \times \text{距離 (km)} \times \text{路面係数} \times \text{天候係数} \quad (2.4)$$

それぞれの各係数については以下のとおりである.

### ランニング強度係数

1km あたりのペースによって値が定まり, 速ければ速いほど値は大きくなる

## 路面係数

走る路面によってそれぞれ値が定められている．走る路面の種類にはトラック，ロード，グラウンドがある

## 天候係数

晴か雨なのか，また暑いのか涼しいのかによって値が定まるものである  
これらの係数以下の表に示す．

表 2.1: 1km あたりのペースとランニング係数

ペース (1km)	強度	ペース (1km)	強度
～5'00"	1.0	3'05～3'01"	8.5
4'59"～4'00"	1.5	3'00"～2'56"	10.0
3'59"～3'41"	3.0	2'55～2'51"	11.0
3'40"～3'33"	3.5	2'50"～2'46"	12.0
3'32"～3'29"	4.0	2'45～2'41"	16.0
3'28"～3'21"	4.5	2'40～2'36"	20.0
3'20"～3'11"	5.0	2'35"～	24.0
3'10"～3'06"	8.0		

表 2.2: 路面係数

路面	路面係数
トラック	1.00
ロード	1.10
グラウンド	1.25

表 2.3: 天候係数

天候	天候係数
晴れ・暑い	1.30
晴れ・涼しい	1.00
雨・暑い	1.35
雨・涼しい	1.10

これらの値については文献 [3] に記載されていたものを利用している.

## 第3章 定式化

陸上競技の長距離種目における，トレーニングメニュー作成問題定式化の最適化問題として定式化する．

### 3.1 フィットネス，疲労，パフォーマンス

トレーニング日を $t$ 日としてフィットネス，疲労，パフォーマンスを表す関数 $g(t)$ ， $h(t)$ ， $p(t)$ を具体的に記述する．

まず，トレーニング開始時刻を1として $t$ 日目のフィットネスの関数 $g(t)$ を求めていく．1日目から順に(2.1)式についてを整理し展開していったものの以下の表に示す．

表 3.1: 各時刻におけるフィットネス関数

時刻	フィットネス
1	$w(1)$
2	$w(2) + w(1)e^{-\frac{1}{45}}$
3	$w(3) + w(2)e^{-\frac{1}{45}} + w(1)e^{-\frac{2}{45}}$
$\vdots$	$\vdots$
$t$	$w(t) + w(t-1)e^{-\frac{1}{45}} + \cdots + w(1)e^{-\frac{t-1}{45}}$

表 3.1 より時刻 $t$ におけるフィットネスの関数 $g(t)$ を整理すると，

$$g(t) = \sum_{i=1}^t w(i)e^{-\frac{t-i}{45}} \quad (3.1)$$

次に疲労であるがフィットネスと同じやり方で求められる．よって時刻 $t$ における疲労の関数 $h(t)$ は以下ようになる．

$$h(t) = \sum_{i=1}^t w(i)e^{-\frac{t-i}{15}} \quad (3.2)$$

最後にパフォーマンスであるが (2.3) 式に  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 2$  を代入するだけである。よって時刻  $t$  におけるパフォーマンスの関数  $p(t)$  は以下ようになる。

$$p(t) = g(t) - 2h(t) \quad (3.3)$$

## 3.2 記号の定義

定式化においては  $i$  日目の第  $j$  メニューについて、

$A_{ij}$  :  $i$  日目における第  $j$  メニューのランニング強度

$R_{ij}$  :  $i$  日目における第  $j$  メニューの路面係数

$W_{ij}$  :  $i$  日目における第  $j$  メニューの天候係数

を定数にする。そして変数を、

$x_{ij}$  :  $i$  日目における第  $j$  メニューを実施するか否か (バイナリ変数)

$D_{ij}$  :  $i$  日目のにおける第  $j$  メニューの距離 (整数値)

と設定する。

## 3.3 陸上競技の長距離種目における最適なトレーニングメニューを求める定式化

トレーニング期間を全体で  $T$  日とし、あらかじめ定める  $k$  種類のメニューの中から各日 1 つを選択するものとする。設定した定数、変数を用いて定式化すると次のようになる。

$$\text{maximize} \quad \sum_{i=1}^T \left( \sum_{j=1}^k A_{ij} D_{ij} R_{ij} W_{ij} x_{ij} \right) e^{-\frac{T-i}{45}} \quad (3.4)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j=1}^k x_{ij} \leq 1 \quad (i = 1, \dots, T) \quad (3.5)$$

$$p(i) \geq P \quad (i = i_1, \dots, i_s) \quad (3.6)$$

- (3.4) 式は目的関数である．フィットネスを最大化する
- (3.5) 式は各トレーニング日に高々1つのメニューに実施することを示している
- (3.6) 式は特定の  $i_k$  日目にパフォーマンスがあらかじめ定める定義  $P$  より下がらないことを示している

## 第4章 数値実験

2022年12月5日に開催された試合に向けた11月21日から12月4日のトレーニングメニューの作成を定式化し，実際にPythonとGurobiを用いて解き，出力された解を実施して12月5日の試合にどのような影響を及ぼしたのかを検証する．

### 4.1 予備実験

この実験ではトレーニングメニューの確定とパフォーマンスの下限を確定させた．

#### 4.1.1 メニューの確定

メニューの確定についてはPythonを用いてシミュレーションを行った．シミュレーションは日数を31とし4つのパターンを行った．

1. ジョグのみ
2. ペース走を導入
3. インターバル走を導入
4. 休みを導入

細かなメニューについては過去に実施したメニューの中から適当に選んだ．それぞれのシミュレーションを実行した結果は以下の通りになった．

表 4.1: シミュレーションの結果

	最終日のフィットネス	最終日の疲労	最終日のパフォーマンス
1	373.40	-431.92	-58.82
2	500.84	-611.18	-110.34
3	521.18	-613.47	-92.29
4	384.55	-459.22	-74.67

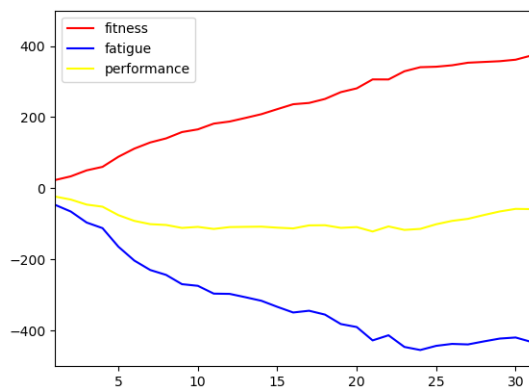


図 4.1: シミュレーション 1

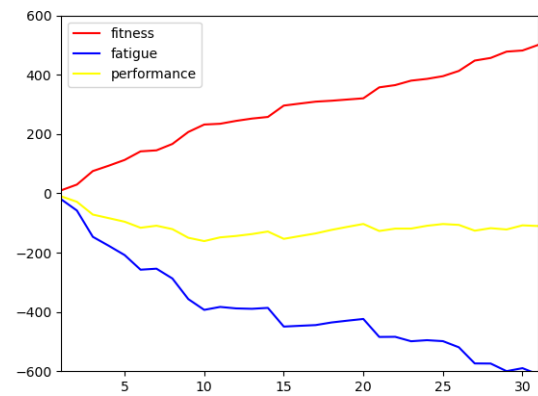


図 4.2: シミュレーション 2

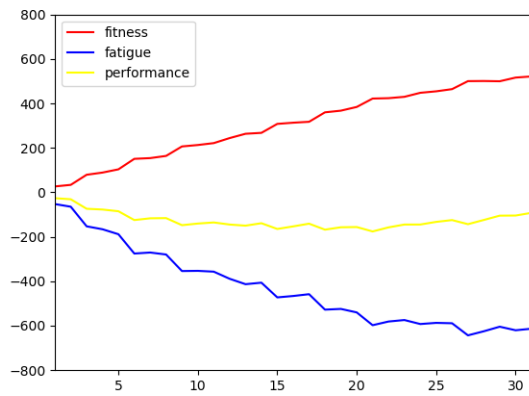


図 4.3: シミュレーション 3

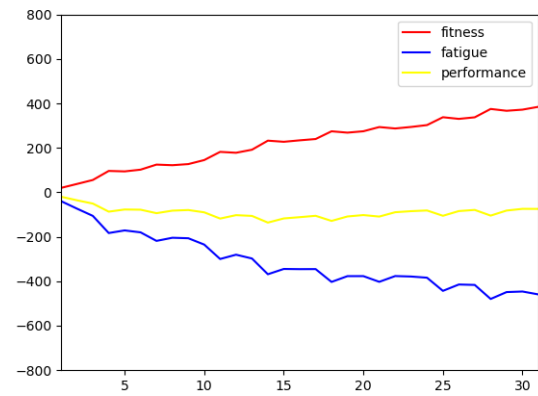


図 4.4: シミュレーション 4



結果からフィットネスを向上させるにはジョグに加えてペース走やインターバルといったポイント練習も加えることが大事だとわかった。しかし、その一方で疲労がたまりパフォーマンスが非常に低下している。トレーニングを実施しない日を作ることで疲労やパフォーマンスはトレーニングを毎日実施しているものと比べて疲労は溜まらずパフォーマンスも低下していない。したがって、メニューについてはジョグとペース走とインターバルをすべて用いかつ休みも導入するというようにした。細かなメニューについては、当時の体の状態を見てその時期付近で走り切れているメニューに絞った。

#### 4.1.2 パフォーマンスの下限

(3.6) 式の  $P$  の値を確定させる。試合で良い結果を出すためにはポイント練習が大事になる。なので、直近でポイント練習を走り切れたときと走り切れなかったときでその14日前のシミュレーションを行ってみた。出力された結果は以下のとおりである。

表 4.2: ポイント練習2週間前のパフォーマンス

	ポイント練習ができたか (Yes or No)	前日のパフォーマンスの値
1	Yes	-97.11
2	No	-101.06
3	No	-104.20

表 4.2 よりポイント練習を走り切れるときと走り切れないときの違いはポイント練習前日のパフォーマンスが約-100を下回らないことが分かった。

## 4.2 設定

トレーニングメニューについては、自身が実施したことのあるトレーニングメニューをまず準備し、シミュレーション等を通して検討した結果、4つに絞った。メニューの詳細は表 4.3 のとおりである。

表 4.3: 実施するトレーニングメニュー

メニュー	トレーニング強度 ( $A$ )	路面係数 ( $R$ )
速いジョグ	1.0	1.1
遅いジョグ	1.5	1.1
10000m ペース走 (ポイント練習)	3.5	1.0
1000m×5 (ポイント練習)	8.0	1.0

天候係数については季節は冬なので全て1とする．またトレーニングメニューにおけるポイント練習は走力の向上に直結する高強度の練習であり，ジョグはジョギングの略称であり長距離の基礎の部分を作るトレーニングである．表 4.3,(2.4) 式を基に  $w(t)$  は以下のように定めた．

$$w(i) = (1.1x_{i1} + 16.5x_{i2})D_i + 35x_{i3} + 36x_{i4} \quad (4.1)$$

各項ランニング強度，距離，路面係数，天候係数とそのメニューを実施するか否かの変数の積になるが，10000m ペース走，1000m×5 の距離は  $D_{i3} = 10$ ， $D_{i4} = 5$  で固定し，速いジョグ  $D_{i1}$  と遅いジョグの距離  $D_{i2}$  の距離は1種類のメニューのみとしたため  $D_{i1} = D_{i2} = D_i$  と設定した．また，それぞれのポイント練習実施の回数，日付をあらかじめ指定した．具体的には10000m ペース走を11月23日，11月27日に，1000m×5は11月30日に行うことにしたので， $x_{3,3} = x_{7,3} = x_{10,4} = 1$  とした．

### 4.3 定式化

定式化 (3.4) 式～ (3.6) 式を以下のように変更した．

$$\text{MAXIMIZE} \quad \sum_{i=1}^T \{(1.1x_{i1} + 16.5x_{i2})D_i + 35x_{i3} + 40x_{i4}\}e^{-\frac{t-i}{45}} \quad (4.2)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j=1}^4 x_{ij} \leq 1 \quad (4.3)$$

$$8 \leq D_i \leq 12 \quad (4.4)$$

$$p(i) \geq -100 \quad (i = 6, 8, 13) \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=1}^4 x_{i1} + x_{i2} \geq 5 \quad (4.6)$$

$$\sum_{i=1}^T x_{i1} \geq 1 \quad (4.7)$$

$$\sum_{i=1}^T x_{i4} = 2 \quad (4.8)$$

$$\sum_{i=1}^T x_{i7} = 1 \quad (4.9)$$

$$x_{i4} = 1 \quad (i = 2, 6) \quad (4.10)$$

$$x_{i5} = 1 \quad (i = 9) \quad (4.11)$$

- (4.5) 式は (3.6) 式をポイント練習の前日, もしくは当日に-100 を下回らないように設定した
- (4.4) 式はジョグの距離の範囲を 8km~12km に定めた
- (4.6) 式はジョグの実施回数を 5 回以上に定めた
- (4.7) 式は速いジョグの実施回数を 1 回以上に定めた
- (4.8) 式, (4.9) 式はそれぞれのポイント練習の回数の設定であり 10000m ペース走は 2 回, 1000m×5 は 1 回と定めた
- (4.10) 式, (4.11) 式はポイント練習の時刻設定であり上記設定のように定めた

(3.6) 式の定数  $P$  は, シミュレーションより-100 と定めている. 時刻については前日か当日に設定した.

## 4.4 実行環境及び計算計測時間

計算環境とプログラム計算計測時間を以下に示す.

OS... Windows 11

言語... python 3.8.5

CPU... Intel Core i7 (1.8GHz)

ソルバー... Gurobi 9.5.2

メモリ... 8.0GB

実行時間 (5 回の平均)... 0.354s

## 4.5 結果

表 4.4: 出力されたメニュー

日付	メニュー	日付	メニュー
11月21日	12km 速いジョグ	11月28日	9km 速いジョグ
11月22日	12km 速いジョグ	11月29日	8km(9km) 遅いジョグ
11月23日	10000m ペース走	11月30日	1000m×5
11月24日	12km 速いジョグ	12月1日	10km 遅い (9km 速い) ジョグ
11月25日	11km 遅いジョグ	12月2日	10km(9km) 遅いジョグ
11月26日	休養	12月3日	休養
11月27日	10000m ペース走	12月4日	試合

実施した試合の結果と自己ベストについては以下の表のとおりである。

表 4.5: 試合の結果と自己ベスト

	試合の結果	自己ベスト
距離	8.4km	5km
タイム	28分7秒	16分00秒
1kmの平均ラップタイム	3分20秒	3分12秒

実施したメニューは定式化のミスがあり最終的に出力されたメニューとは若干違うものになってしまった。その差異は表 4.4 のカッコ内で示している。試合に出場した結果、現在の自分の持っている力をすべて出し切ることができた。したがって、ピーキングはあったとみなすことができる。一方では表 4.6 より自己ベストの平均ラップタイムより8秒遅く距離は長いが目標にしていたペースは3分15秒だったので走力が向上しているとは言えなかった。

## 第5章 考察

試合で現在の自分の持っている力をすべて出し切ることができたことから、出力された結果はピーキングには非常に適したものだということが考えられる。定式化するうえでいろいろと試してみた。ジョギングの距離やポイント練習の内容、日付、その期間に実施する回数を指定しなければ2日間や3日間でポイント練習が一塊となってバランスの悪いメニュー構成になったりジョグの距離が今のレベルでは走ることができないような距離が出力されたりと納得のいくトレーニングメニュー構成を出力することができなかった。そのため定式化においては、経験に基づくある程度の事前の決定は必要である。試合ではピーキングはあったものの走力が向上しているとはいえなかったので短期間では走力は向上するものではないため定式化する際のトレーニング期間を  $T = 30$  などといった長い期間での実施をするべきであり、それに応じて自分のレベルをシミュレーションや過去のトレーニングデータを基にして知り、制約条件を設定していくべきだと考えた。

## 第6章 まとめと今後の課題

本研究では、フィットネス疲労理論を用いてパフォーマンスを低下させすぎずにフィットネスを向上させていくことを目標にしてきた。ポイント練習が散らばっており、ジョグの距離が走り切ることが可能なトレーニングメニュー構成となる解を得るためには自分のレベルをシミュレーションを通して知り、トレーニングメニューの種類を絞り、日付や距離の範囲を絞るっただうえで定式化することが大事である。また、実験結果より最終的な出力結果とは若干違うメニュー構成のトレーニング実施になってしまったがピーキングにはあったいた。その一方で、走力が向上するというようなメニュー構成ではなかった。

今後の課題としては走力を向上させるために定式化を変更させる必要がある。期間の増加、ジョグの距離の増加が考えられる変更点である。また、それに応じて納得のいくメニュー構成が立てられるようにシミュレーションや過去のデータの分析を通して制約式を考えていくことが大切になる。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なご指導、ご助言をいただいた池辺淑子准教授、西田優樹助教には大変お世話になりました。心より感謝と御礼申し上げます。



## 参考文献

- [1] Morton R.H.,Fitz-Clarke J.R. , and Banister E.W. (1990) Modeling human performance in running. J Appl Physiol. 69(3): 1171-1177.
- [2] Banister E.W. (1991) Modeling elite athletic performance. In: Green H.J., McDugal J.D., and Wenger H. (ed). Physiological testing of elite athletes. Human Kinetics, Campaign IL. pp 403-424.
- [3] 「フィットネスー疲労モデル」を用いたトレーニング刺激と生体応答のモニタリングとパフォーマンス予測, URL(<https://system5-site-one.ssl-link.jp/sandcplanning/uploads/solution/20/5b14a2d1f169020.pdf>), 閲覧日 2023 年 1 月 20 日
- [4] 「令和 3 年度スポーツの実施状況等に関する世論調査」結果の概要, URL([https://www.mext.go.jp/sports/content/20220222-spt\\_kensport01-000020451\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/sports/content/20220222-spt_kensport01-000020451_1.pdf)), 閲覧日 2023 年 1 月 20 日
- [5] 学校運動部活動指導者の実態に関する調査報告書,url([https://www.japan-sports.or.jp/Portals/0/data/katsudousuishin/doc/R3\\_houkokusho.pdf](https://www.japan-sports.or.jp/Portals/0/data/katsudousuishin/doc/R3_houkokusho.pdf)), 閲覧日 2023 年 1 月 20 日