

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

Formulation of the single container loading
problem with load balance constraints and
its computational evaluation

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。その中で経験豊富な指導者の指導が受けられる人は少ない。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Banistaer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[?]. フィットネス疲労理論[?]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を定式化し、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。

卒業論文要旨

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
4.2	設定	10
4.3	実験結果	12
第5章	考察	13
第6章	まとめと今後の課題	14

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	実施するトレーニングメニュー	11
4.3	トラックのパラメータ	11
4.4	コンテナのパラメータ	11
4.5	実験結果	12

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．その中で経験豊富な指導者の指導が受けられる人は少ない．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．一般的には，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り同じく試合で満足いく結果が出せなくなる．このように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

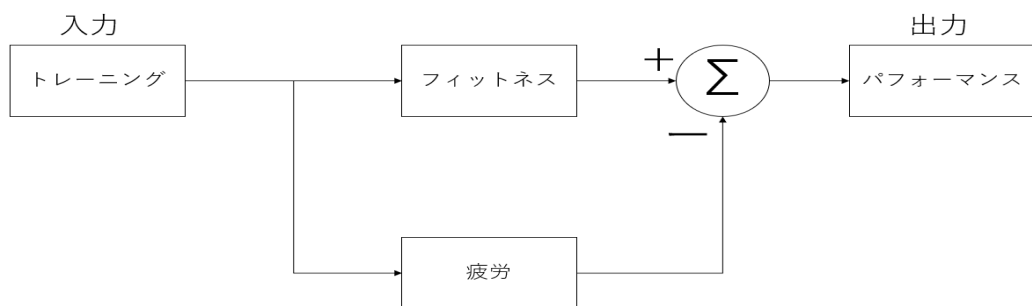


図 2.1: フィットネス疲労理論の概念図

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,

τ_1 : フィットネスの時定数であり $\tau_1 = 45$ と設定

τ_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

τ_1, τ_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"～5'00"	1.0	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

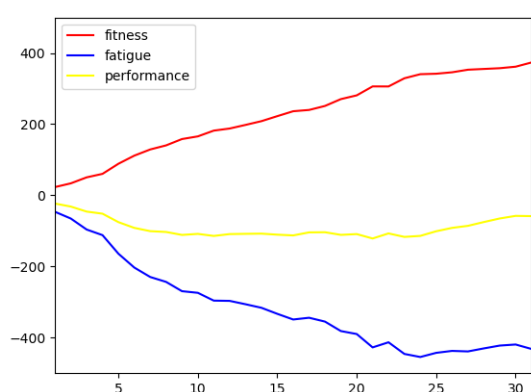


図 4.1: シミュレーション 1

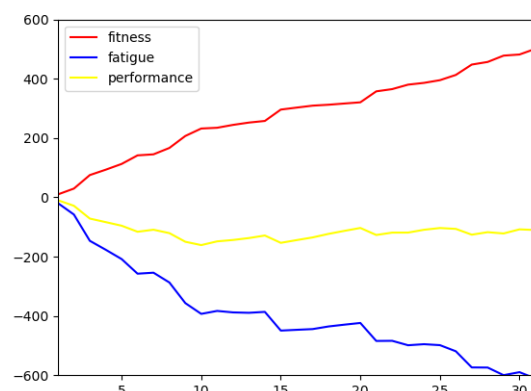


図 4.2: シミュレーション 2

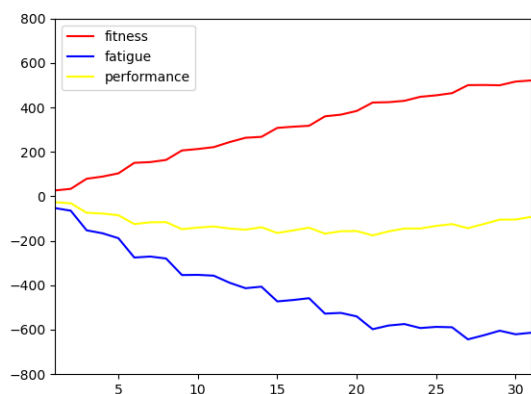


図 4.3: シミュレーション 3

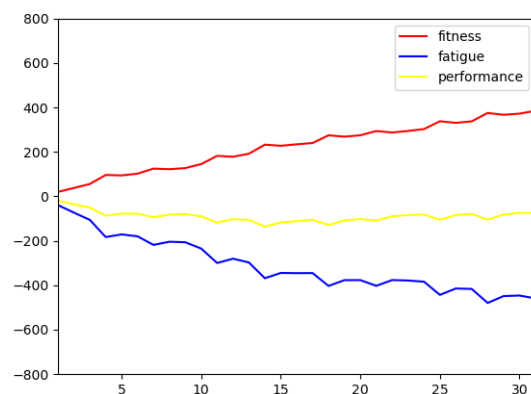


図 4.4: シミュレーション 4

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 4.1 のとおりである.

表 4.2: 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.

表 4.3:トラックのパラメータ

パラメータ	値	パラメータ	値
U	6.84(tnf)	FT_{max}	7.100
TWB	4.397(m)	RT_{max}	19.000
Hd	0.832(m)	S_{min}	25%
Hu	2.800(tnf)	T_{min}	25%
P_{max}	19.16(tnf)	LTR_{max}	10%

表 4.4: コンテナのパラメータ

コンテナ	D	W	H
	2.33(m)	5.87(m)	2.20(m)

4.3 実験結果

表 5.3 において、Ramos らの計算時間と充填率は 100 問解いた際の平均値を表しているが、本研究での実験結果は、計算時間の都合上、100 問のうち 5 問解いたものである。また、図 5.1 は詰め込む直方体の個数を 10~110 個まで変化させた際の計算時間の変化を示したグラフである。

case 1 から case5 にそれぞれ提案アルゴリズムを適用した。step.1 として選んで詰める定式化を行なったが、この定式化は最適解が出るまで計算を続けるため、解の改善が行われてから 600[s] の間に解の改善が行われない場合、そこで計算をやめ、暫定解として step.2 に進んだ。step.1 での計算時間は暫定解が算出されるまでにかかった時間を表している。

表 4.5: 実験結果

		Vol(%)	計算時間 (s)	
Ramos(case1~100)		94	60	
問題	直方体の個数	Vol(%)	Step1:計算時間 (s)	Step2:計算時間 (s)
case1	112 個	82	600	120
case2	138 個	87	404	2,085
case3	127 個	85	601	596
case4	197 個	53	1,238	778
case5	136 個	79	969	1,474

第5章 考察

計算時間、充填率ともに先行研究に勝ることはなかった。ヒューリスティックが優位であるが、充填率は80%付近まであり、変数の数が減るような定式化、またCPUの性能向上に伴い計算時間、充填率ともに向上していくと考えられる。

提案アルゴリズムでは、問題 case4 のように、入れる直方体の数が多くなると変数が増え計算時間も大幅に増えてしまう。しかし、case 1 と case2 を比較してみると case2 の方が直方体の個数が多いにもかかわらず充填率は case1 よりも高くなっている。これは case1 で扱われている直方体の大きさより比較的小さい直方体が case2 で扱われているためであると考えられる。個数の多寡によらず詰め込む直方体のサイズが小さい問題例に対して有効であると考えられる。また、図 5.1 より 80 個以下の少ない個数の直方体から成る問題例に対しては 60 秒以内に厳密解を求めることができおり、そのような問題例に対して提案手法は有効であると考えられる。

第6章 まとめと今後の課題

実用的な負荷分散まで考慮したコンテナ積み付け問題を混合整数計画問題として定式化することができた。その際、直方体の個数の増加によって求解が不可能になったが、全て詰め込む定式化と選んで詰め込む定式化の2種類を用いた、解の探索アルゴリズムを提案することで実用時間で求解することができた。先行研究には計算時間、充填率で勝ることはなかったが110個~140個の直方体から選んで詰め込む問題に対しては80%程度の充填率であった。また80個以下の直方体詰める問題では高速に厳密解を求めることができた。

今後の課題としては、提案手法を適用した問題例が少ないため、多くの問題に適用しどのような問題例に対して有効なのか示すことや、変数の数を減らすような上手い定式化をすることで計算時間の短縮を目指すことや、本研究での制約の他に、荷物の配送順や軽い荷物の上に重い荷物を載せないなど、より現実的制約を考慮した定式化を与えることが考えられる。

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] 「フィットネスイ疲労モデル」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 4 日