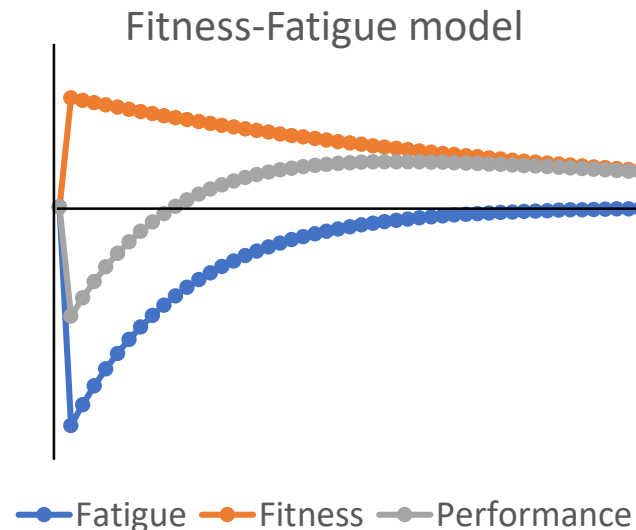


「フィットネス-疲労モデル」 を用いたトレーニング刺激と生体応答の モニタリングとパフォーマンス予測 ～トレーニング成果の推測から制御へ～



龍谷大学スポーツサイエンスコース 教授

長谷川裕, JATI-SATI



スポーツにおけるトレーニング指導

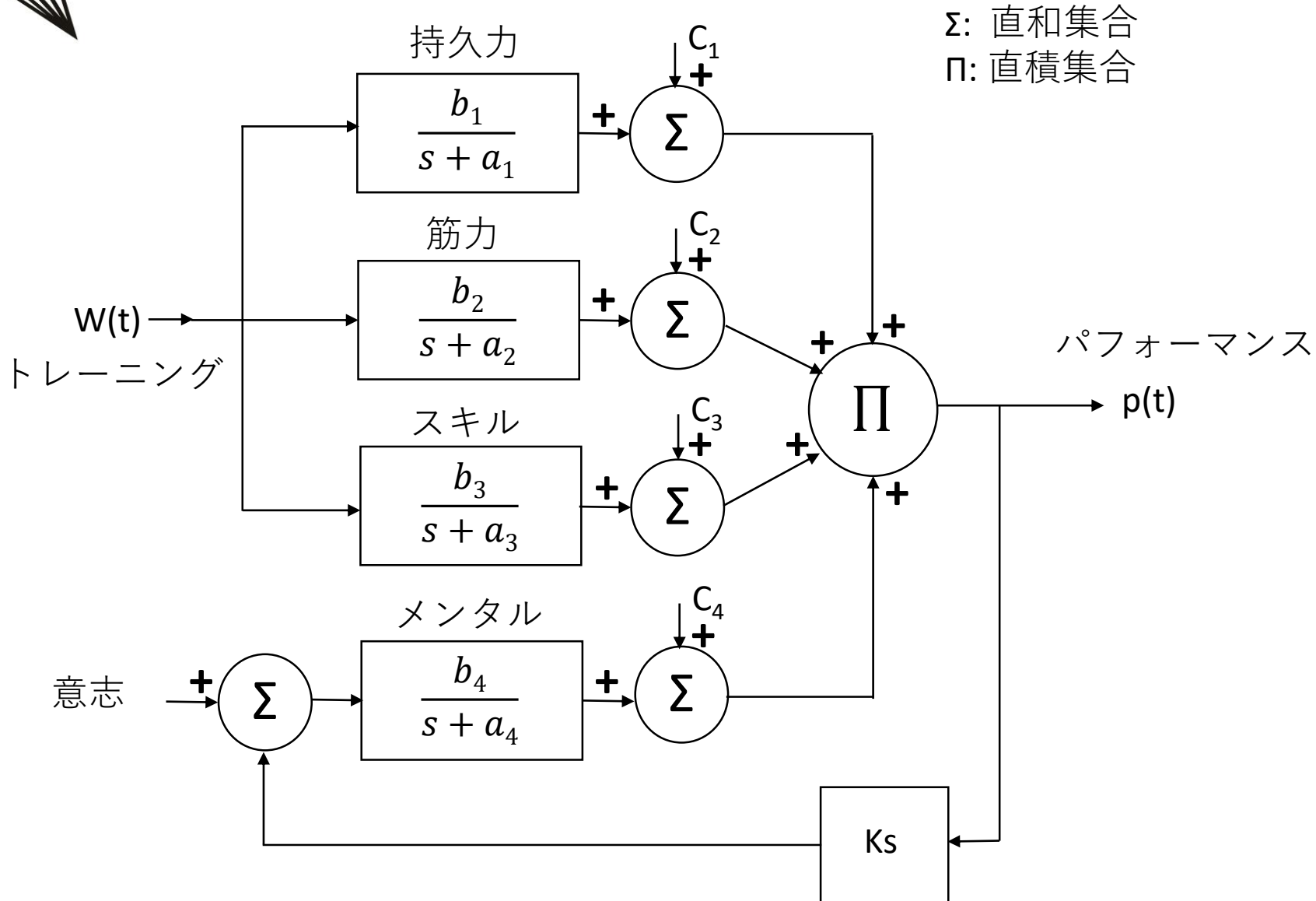
- アスリートのパフォーマンスを最大限に発達させること。
- 狙った試合で最高のパフォーマンスを発揮させること。
- オーバートレーニングとケガを防ぐこと。
- 上記の目的を達成するためのプログラムとピリオダイゼーション。
 - エクササイズ選択と配列
 - 負荷設定（強度・量・休息时间）
 - 頻度
 - 以上についての短期および長期計画
- トレーニング活動それ自体の指導と管理
- モニタリングに基づく目標値やプログラムの変更

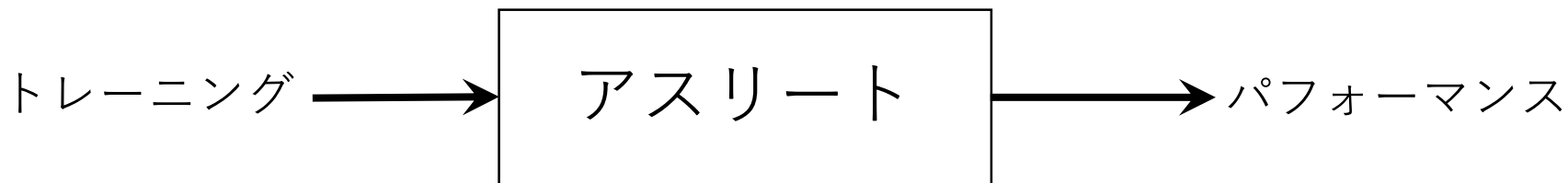
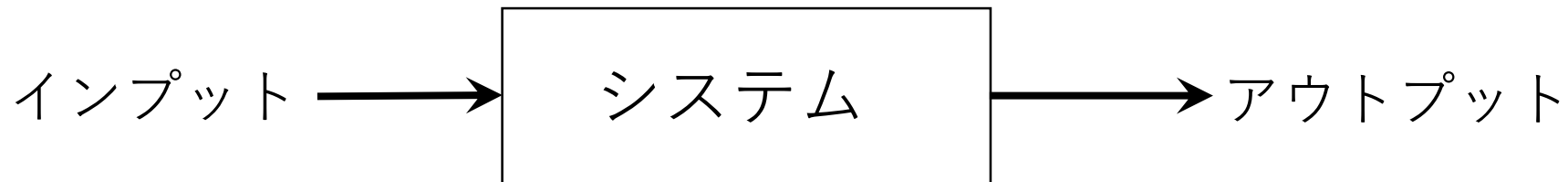
トレーニング≠エクササイズ

- スポーツパフォーマンスとは単一事象によって構築されるものではなく、多数の要因が複雑に絡み合い、有機的に影響し合って一つのシステムとして構築される。国際的には、この複雑で難解なスポーツパフォーマンスの向上を目指して行う思考や行為、作業の総称をトレーニングと定義している。これに対して、我が国では筋力やパワー、あるいは持久力など、狭義の体力要素のみに限定してトレーニングという用語が用いられる場合が多く、国際的な捉え方の普及が早急に求められる（図子、2015）

トレーニング手段（運動）

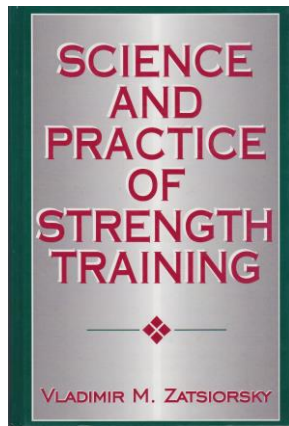
- トレーニング手段としての運動と要素的なトレーニング課題との対応関係は、スポーツ運動自体、多面的で統一的かつ全人的な活動であるので、トレーニング課題と手段との間が1対1の厳密な対応関係にあるのはむしろ稀である。例えば、目的とする運動の技術的並びに心理的側面を無視した筋力強化（体力的側面）トレーニングは、決して合理的なトレーニングとは言えない（村木、1994）。





トレーニングによってパフォーマンスが向上することの 原理的コンセプトとしての 『フィットネス-疲労モデル』

1998年: ザチオースキーの原理モデル(1995)の紹介



1995



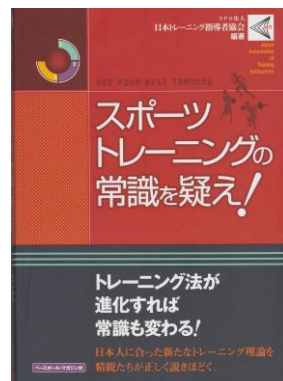
1998



2007a



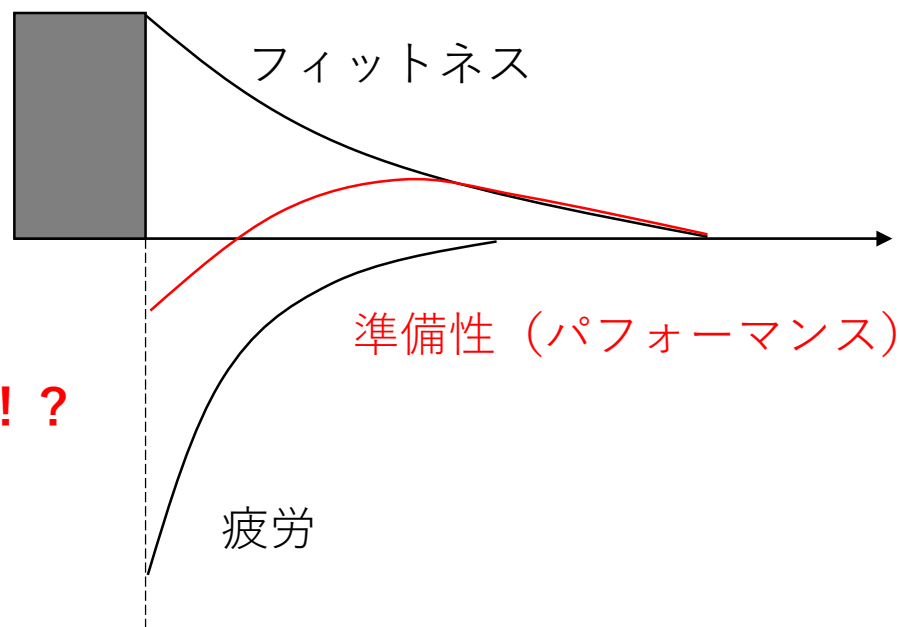
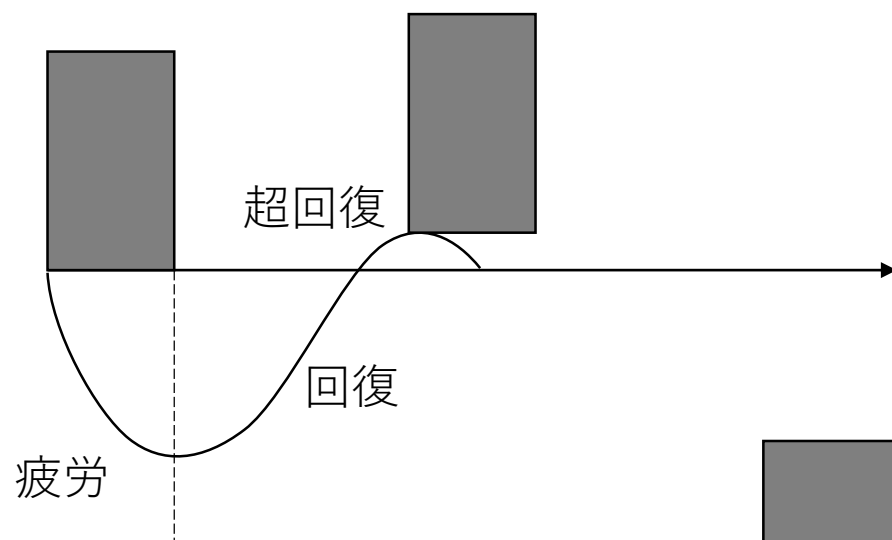
2009



2007b

- Zatsiorky V.M. (1995)
- 長谷川裕 (1998, 2005, 2007a, 2007b, 2009)

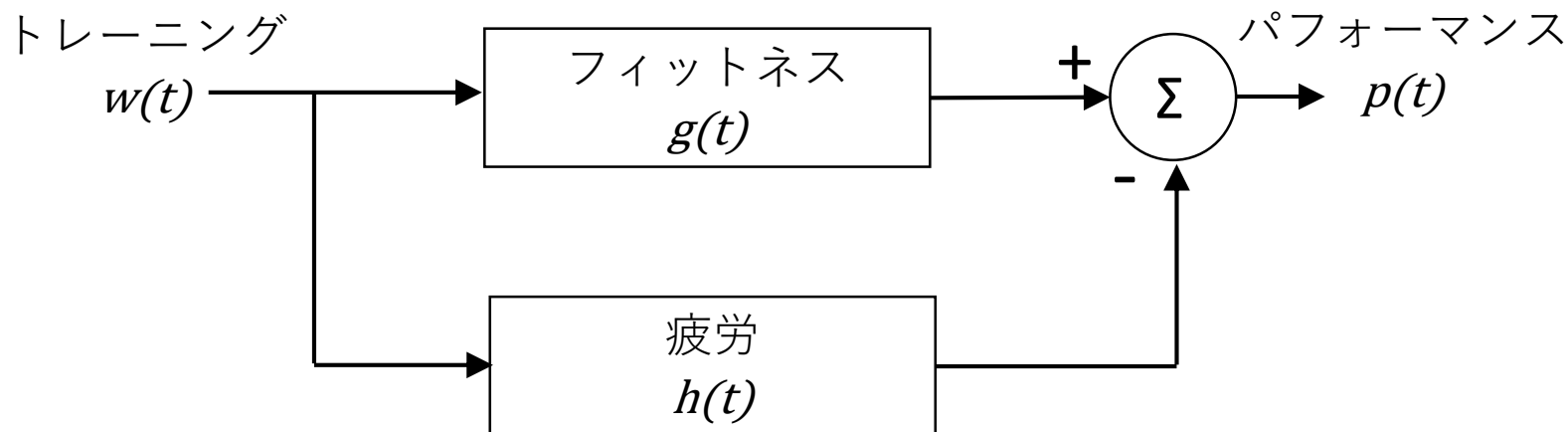
超回復とフィットネス-疲労



フィットネス-疲労理論のルーツは！？

フィットネス-疲労モデルの数学的説明

$$p(t) = g(t) - h(t) \quad (0)$$



時刻 t において投与されたトレーニング負荷のインプット $w(t)$ 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 $h(t)$ という拮抗する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。

パフォーマンス = フィットネス - 疲労

$$p(t) = k_1 g(t) - k_2 h(t) \quad (1)$$

$p(t)$: 時間 t におけるパフォーマンス

$g(t)$: 時間 t におけるフィットネス

$h(t)$: 時間 t における疲労

k_1 と k_2 : フィットネスと疲労の重みづけ係数（任意数）

→ ある負荷に対してそれぞれどれくらいの反応の違いがあるか？

いずれにせよ...

ある特定の日時のパフォーマンスはその瞬間のフィットネスと疲労の差によって予測できる！

フィットネス-疲労の数学モデル

時刻 t において予想される

パフォーマンス $p(t)$ =フィットネス $g(t)$ -疲労 $h(t)$

$$p(t) = k_1 g(t) - k_2 h(t) \quad (1)$$

時刻 t におけるフィットネス $g(t)$ と疲労 $h(t)$

はより詳しくより正確に表すと...

$$g(t) = w(t)e^{-1/\tau_1} \quad (2)$$

$$h(t) = w(t)e^{-1/\tau_2} \quad (3)$$

$$g(t) = w(t)e^{-1/\tau_1} \quad (2)$$

$$h(t) = w(t)e^{-1/\tau_2} \quad (3)$$

この意味するところは、
トレーニング日 t のフィットネスや疲労が
その後どのように変化していくかという
関数。

日々のフィットネス $g(t)$ と疲労 $h(t)$ の計算方法

$$g(t) = g(t - i)e^{-i/\tau_1} + w(t) \quad (4)$$

$$h(t) = g(t - i)e^{-i/\tau_2} + w(t) \quad (5)$$

- あるトレーニング日 t におけるトレーニング負荷: $w(t)$ に対するフィットネスの応答： $g(t)$ と疲労の応答： $h(t)$ （任意単位）
- i は、 t までのトレーニング期間（トレーニング間隔：通常1日）
- τ_1 と τ_2 は、指数関数的減衰の時定数
- e はネイピア数で指数関数の底、
- e の $-i/\tau$ 乗の関数
- $\{g(t - i)e^{-i/\tau_1}\}$ の部分は畳み込み積分 (convolution)

で、具体的にどうするの？

$$g(t) = g(t - i)e^{-i/\tau_1} + w(t) \quad (4)$$

$$h(t) = g(t - i)e^{-i/\tau_2} + w(t) \quad (5)$$

- $g(t)$ と $h(t)$ を計算するために、
- まず、 $w(t)$ をどうやって計算するか？
- i と t はその日とその日までの期間間隔なのでわかる。
- τ_1 と τ_2 は、指数関数的減衰の時定数。これって何？
- $\{g(t - i)e^{-i/\tau_1}\}$ の部分は畳み込み積分 (convolution)
畳み込み積分って何？

まずはトレーニング負荷(Load)

- 量(Volume)
 - 時間、距離、回数etc
- 強度(Intensity)
 - 物理的or外的（質量、高さ、衝撃力、スピード、パワーetc）
 - 生理的 or 内的（心拍数、血中乳酸濃度、 VO_2 、血中乳酸濃度etc）
 - 心理的（Rate of Perceived Exertion: RPE）これも内的負荷
- 絶対的or相対的 (%)
- 総体としての負荷 = Training Impulse (TRIMP)

任意単位(Arbitrary Training Unit: ATU)による トレーニング負荷の数量化 (水泳の例)

- アップ：100mにつき強度:1 = 1 ATU
- 低強度：100mにつき強度:2 = 2 ATU
- 高強度：100mにつき強度:3 = 3 ATU
- レジスタンストレーニング：500レップが高強度スイムの1000m(=30 ATU)に相当と想定
- ある日の計算例
 - ウェイト500レップ、500mアップ、8000m低強度、500m高強度
 - $30 + (1 \times 5) + (2 \times 80) + (3 \times 5) = 210 \text{ ATU}$

水泳選手の例

これがわかれば...

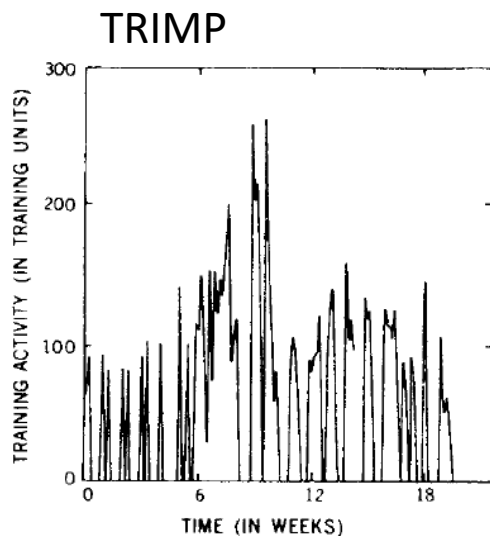


Fig. 3. Aggregate training activity of swimmer in 1970-1971 season. Training is measured in arbitrary training units (see text).

Performanceがわかる！

FitnessとFatigueが計算でき、

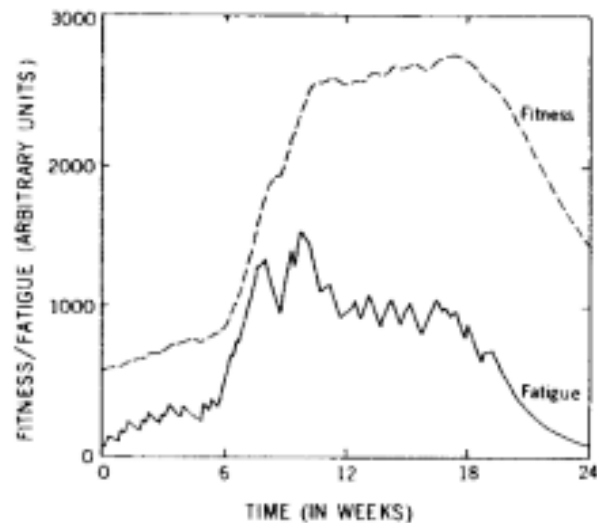


Fig. 6. Profiles of fitness and fatigue functions in 1970-1971 season. Units are arbitrary and depend on arbitrary training units.

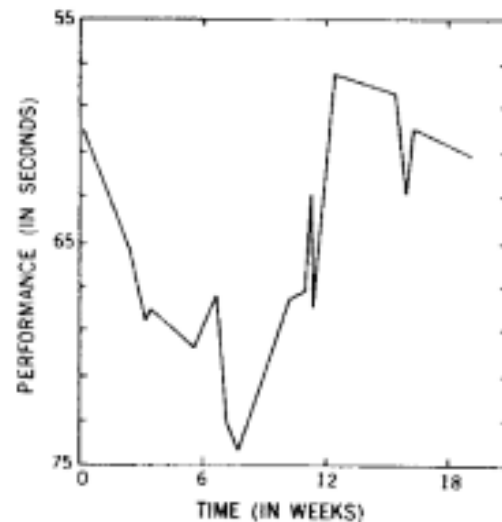


Fig. 4. Performance of swimmer on 100-m time trials in 1970-1971 season.

最大心拍数に対する割合によるレーニング負荷の 定量化法

Edwards法(1993)

- 最大心拍数に対する割合（％）で5つのゾーンに分割し、各指数を割り当て、それらの指数にそのゾーンでの活動時間（分）を掛けて合計する。

$$50-60\% \text{ HR}_{\max} = 1$$

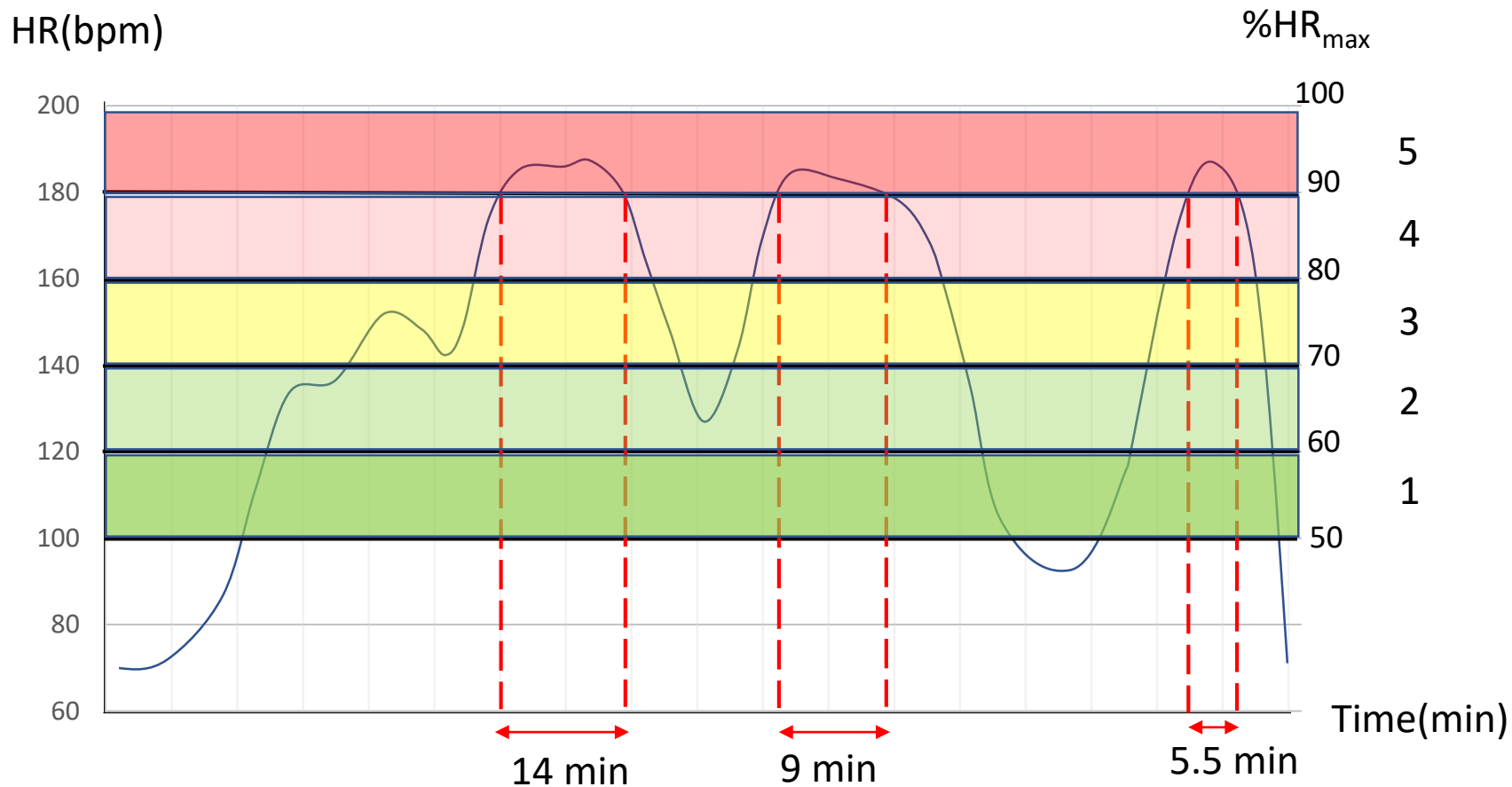
$$60-70\% \text{ HR}_{\max} = 2$$

$$70-80\% \text{ HR}_{\max} = 3$$

$$80-90\% \text{ HR}_{\max} = 4$$

$$90-100\% \text{ HR}_{\max} = 5$$

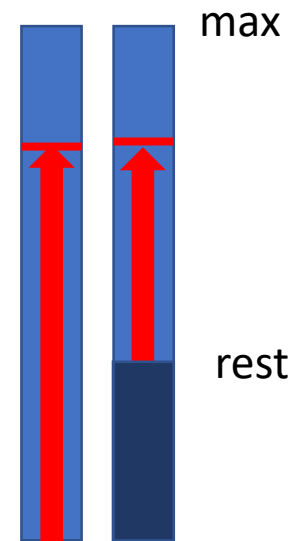
Edward法の計算法



5 x (14 min + 9min + 5.5min) = 142.5のように、各ゾーンでポイントを計算し合計する。

予備心拍数(HR)によるTRIMPの計算法

- 最大心拍数(HR_{max})と安静時心拍数(HR_{rest})の差に対する運動時心拍数(HR_{ex})の強度を計算する。
- 例えば180 HR_{ex} は単純計算すると...
 - $HR_{max} = 200 \rightarrow 90\%$
 - $HR_{max} = 190 \rightarrow 95\%$
- $HR_{max} = 200$ として...
 - $HR_{rest} = 70 \rightarrow (180-70)/(200-70) = 0.84$
 - $HR_{rest} = 50 \rightarrow (180-50)/(200-50) = 0.86$
- $HR_{max} = 190/HR_{rest} = 50$ の選手の $HR_{ex} = 180 \rightarrow 0.93$
- $HR_{max} = 200/HR_{rest} = 70$ の選手の $HR_{ex} = 180 \rightarrow 0.85$



予備心拍数を用いたトレーニング負荷(TRIMP)の定量化法 Banister法 (1991)

$$\text{TRIMP} = D(\Delta\text{HR ratio})e^{b(\Delta\text{HR ratio})}$$

トレーニング負荷 (Training Impulse: TRIMP) =

セッション時間(D:duration) × ΔHR 比 × 乗率 $\{e^{b(\Delta\text{HR ratio})}\}$

- ΔHR 比 = $\{(\text{平均セッションHR}_{\text{ex}} - \text{HR}_{\text{rest}}) / (\text{HR}_{\text{max}} - \text{HR}_{\text{rest}})\}$

- 乗率 $e^{b(\Delta\text{HR ratio})} =$

$e^{1.67 \cdot \Delta\text{HR比}}$ (女子)

$e^{1.92 \cdot \Delta\text{HR比}}$ (男子)

- はネイピア数と呼ばれる自然対数の底で ≈ 2.712

- エクセルでは、例えば女子で ΔHR 比が0.601ならば、乗率 = $\text{EXP}(1.67 \cdot 0.601)$

運動時間	HRmax	HRrest	HRex	$\Delta\text{HRratio}$	乗率	TRIMP
75	200	62	145	0.601	2.73	123.16

乗率を適用する理由は血中乳酸濃度の 上昇曲線に合わせたもの

女子 = $\text{EXP}(1.67)$

男子 = $\text{EXP}(1.92)$

心拍数によるTRIMP計算に用いる乗率

	female	male
0.1	1.18	1.21
0.2	1.40	1.47
0.3	1.65	1.78
0.4	1.95	2.16
0.5	2.30	2.61
0.6	2.72	3.16
0.7	3.22	3.83
0.8	3.80	4.65
0.9	4.50	5.63
1.0	5.31	6.82

Δ乳酸値

8.0

7.0

6.0

5.0

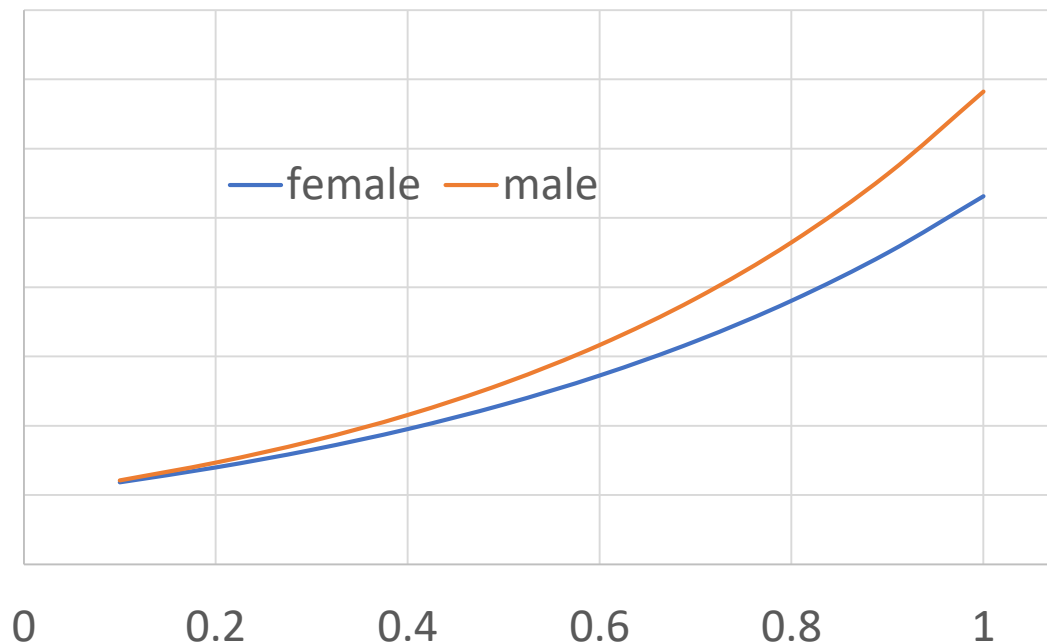
4.0

3.0

2.0

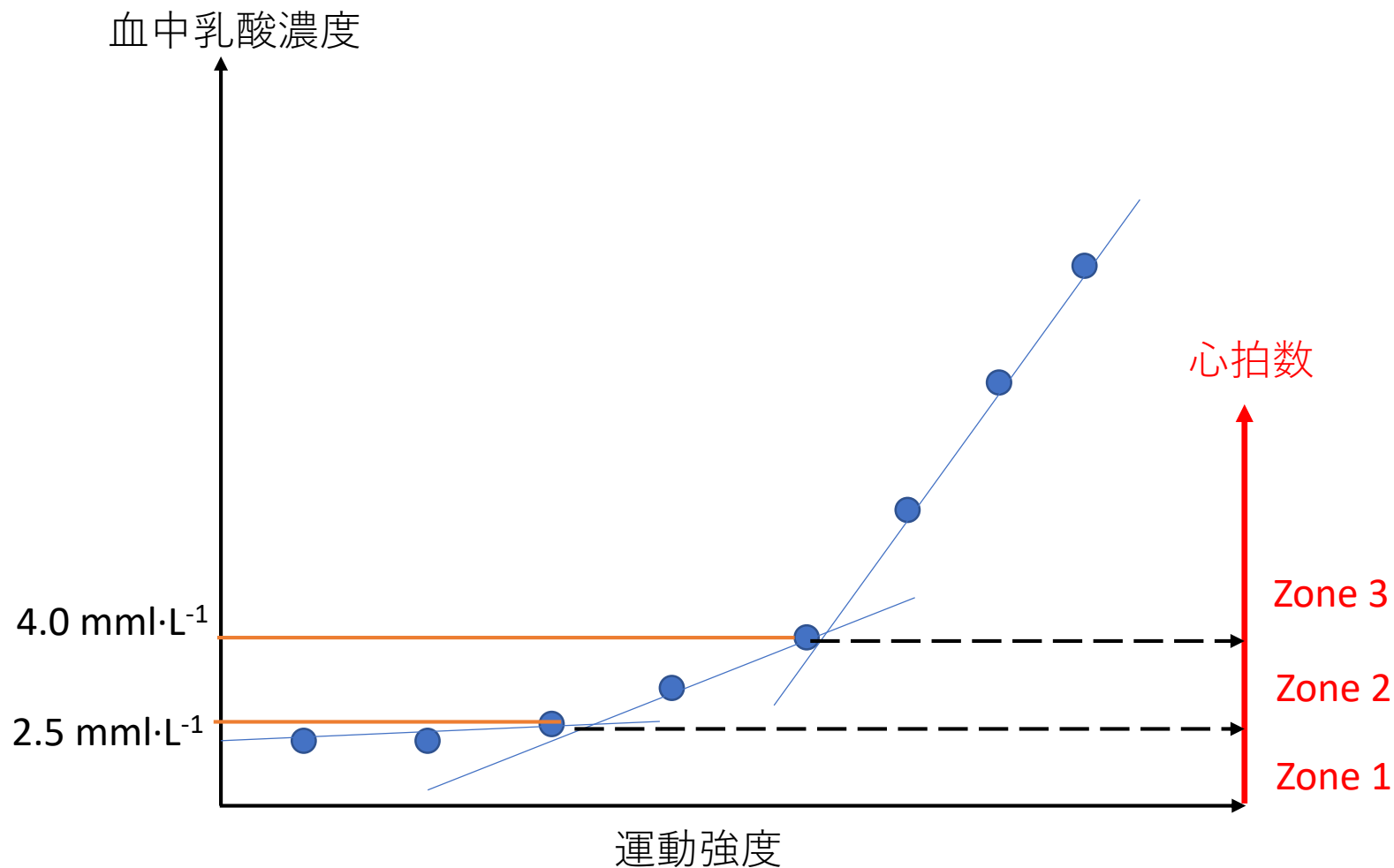
1.0

0.0



ΔHR ratio

血中乳酸濃度に基づく トレーニング負荷の定量化法 (3) Impellizzeriら(2004)の方法



ハンマー投げのTRIMP計算例

$$w_n = intst_n + 0.6 th_n + 0.1 ju_n$$

- 各種エクササイズの詳細レップ数
- 重みづけ係数
 - *st: strength* ウェイトトレーニング: 1.0
 - *th: throw* ハンマー投げ: 0.6
 - *ju: jump* ジャンプ: 0.1 (スプリントを含む)
 - *int: intensity* %1RM
- 投擲40本は、80%1RMの30レップに相当
- 100ジャンプは、50%1RMの20レップに相当

水泳におけるTRIMP例

$w = 1 * km + 2 * km + 3 * km + 4(5) * km + 5(8) * km + \text{レジスタンストレーニング}$

- プールセッションにおける強度係数
 - 強度1: 血中乳酸濃度 $2\text{mml}\cdot\text{L}^{-1}$
 - 強度2: 血中乳酸濃度 $2\sim 4\text{mml}\cdot\text{L}^{-1}$
 - 強度3: 血中乳酸濃度 $4\sim 6\text{mml}\cdot\text{L}^{-1}$
 - 強度4(5): 血中乳酸濃度 $6\sim 10\text{mml}\cdot\text{L}^{-1}$
 - 強度5(8): 最大強度 $\approx 16\text{mml}\cdot\text{L}^{-1}$
 - 各強度係数に距離 (km) を乗じる
- レジスタンストレーニングにおける強度係数
 - 強度1: アップとストレッチ
 - 強度4(5): 最大下強度
 - 強度5(8): 最大強度
 - 強度1時間のセッションを次の距離に相当すると仮定し距離を乗じる
 - 強度1は1.0km
 - 強度4(5)は0.5km
 - 強度5(8)は0.5km

Mujika et al. (1995)

Mujika et al. (1996)

トレーニングの定量化 カヌースプリントの例

Nakagaki and Onoto (2014)

Table 2 Training zone and weighting factor

強度係数

Training	Zone	Energy	Training Effect	Heart Rate	Lactate	Weighting Factor
Strength Training	St1	ATP-CP + La	Strength	—	—	14
	St2	Anaerobic ATP-CP + La	Hypertrophy	—	—	12
	St3	ATP-CP + La	Endurance/Power	—	—	10
On water paddling Ergometer paddling Ergometer cycling Running	An1	ATP-CP	Maximum Speed	—	—	14
	An2	Anaerobic ATP-CP	Anaerobic Power	—	—	12
	An3	ATP-CP + La (+ O ₂)	Anaerobic Capacity	180–	12.0–	10
	Ae1	O ₂ + La	Aerobic Power	170–185	5.0–8.0	8
	Ae2	Aerobic O ₂	Aerobic Conditioning	155–170	2.0–5.0	6
	Ae3	O ₂	General Endurance	140–155	–2.0	4

- 各エクササイズの心拍数と経験値をもとに6段階（各3段階）の強度係数を決め、
- 強度係数と運動時間（分）の積をトレーニング負荷TRIMPとする。

Table 3 Training zone and specific exercises (example) on water paddling

	Training Zone	Distance or Time	Reps	Rest
強度係数=14	An1	20 m	12	5-10 min
		25 m (running start)	6-12	5-10 min
		150 m	4-6	5-10 min
強度係数=12	An2	100 m	6-8	5-10 min
		75 m	6-12	5-10 min
		500 m	4-6	10-15 min
		350 m	6-8	5-10 min
		15 s on/off 30 s on/off 45 s on/off 60 s on/off 45 s on/off 30 s on/off 15 s on/off	3-4	5 min
強度係数=10	An3	500 m	9-12	1 min
		4 min	6-16	2 min
		3 min	10-15	1 min
強度係数=8	Ae1	4000 m	1-3	5 min
		2000 m	2-8	2 min
		1000 m	6-12	1 min
		10000 m	1	—
強度係数=6	Ae2	8000 m	1-2	5 min
		6000 m	1-2	5 min
		10000 m	1	—
強度係数=4	Ae3	8000 m	1-2	5 min
		6000 m	1-2	5 min

乗艇トレーニング の強度係数別内容

Nakagaki and Onoto (2014)

レジスタンストレーニングの 強度係数別内容

Table 4 Training zone and specific exercises(example) in strength training

Training	Zone	Exercise	Load	Reps	Sets
Strength Training	強度係数=14 St1	Bench pull	Male: 120 kg Female: 90 kg	6	6
		Chinning	Male: 60 kg Female: 25 kg	6	6
		One hand cable pull	Male: 60 kg Female: 40 kg	6	6
	強度係数=12 St2	Bench pull	Male: 80-90 kg Female: 65-75 kg	10	10
		Bench press	Male: 100 kg Female: 80 kg	10	5
		Bench press	Male: 40 kg Female: 30 kg	20	5
		One hand cable pull	Male: 50 kg Female: 35 kg	10	5
		One hand cable pull	Male: 30 kg Female: 20 kg	20	5
		Chinning	Male: 50 kg Female: 20 kg	6	5
		Chinning	Body weight	20	5
		Dumbbell Bench press	Male: 25 kg Female: 15 kg	12	6
		Arm curl	Male: 30 kg Female: 20 kg	10	6
	強度係数=10 St3	Chinning	Body weight	20	5
		Push up	Body weight	20	5
		Bench pull	Male: 65 kg Female: 50 kg	45	4
		Bench press	Male: 60 kg Female: 45 kg	45	4
		Cable crunch	individual	45	4
		One hand cable pull	individual	45	4

TRIMPの決定と工夫

- なんでもArbitrary Unit (AU)として数値化できる！
- 重みづけや係数の根拠は必要だが、感触や経験も仮説としては結構役に立つ。
- エクササイズの様々な測度による測定とモニターによってAUの数値化に根拠を持たせる。
- 計ってみないと分からない！

で、具体的にどうするの？

$$g(t) = g(t - i)e^{-i/\tau_1} + w(t) \quad (4)$$

$$h(t) = g(t - i)e^{-i/\tau_2} + w(t) \quad (5)$$

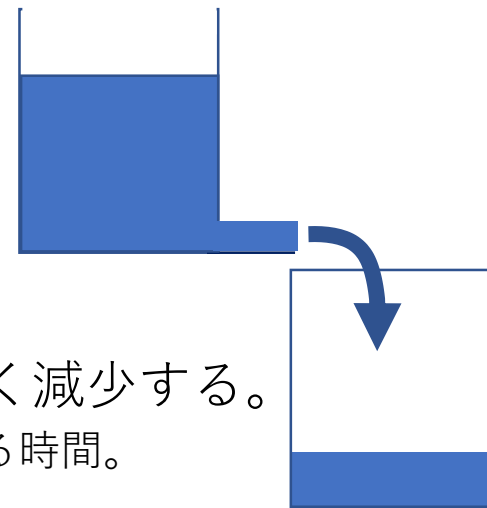
- $g(t)$ と $h(t)$ を計算するために、
- $w(t)$ をどうやって計算するか？ **これは分かった！**
- i と t はその日とその日までの期間間隔なのでわかる。
- τ_1 と τ_2 は、指数関数的減衰の時定数。**これって何？**
- $\{g(t - i)e^{-i/\tau}\}$ の部分は畳み込み積分 (convolution)?

指数関数的減衰 (exponential decay)

- ある量の減少する速さが減少する量に比例すること。
- 化学、物理学、生物学、医学などの自然科学の対象となる事象の多くで見られる法則。

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

- 時間が τ だけ経過すれば、 N は、
ネイピア数 $e \approx 2.72$ の逆数（約36.8%）にまで減少。
- τ を時定数と呼ぶ。
- この数値が大きいとゆっくりと減少し、小さいと早く減少する。
（例）100km/hの車が惰性走行で36.8km/hに減速するのに要する時間。



- では、フィットネスと疲労はどうなるか？

ネイピア数 e とは？

$$\lim_{n \rightarrow 0} (1 + \boxed{n})^{\boxed{\frac{1}{n}}} = 2.718281828459 \dots = e$$

Red annotations: A red arrow points from the text "∞に近づく" (approaching infinity) to the boxed $\frac{1}{n}$. Another red arrow points from the text "0に近づく" (approaching 0) to the boxed n .

$$n = 1 \quad \rightarrow 2$$

$$n = 0.1 \quad \rightarrow 2.593\dots$$

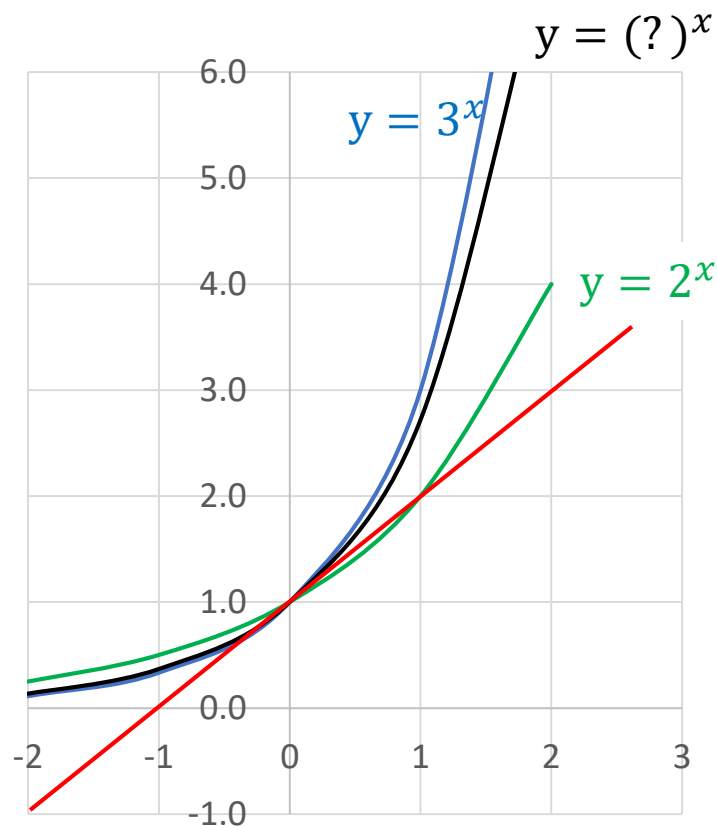
$$n = 0.01 \quad \rightarrow 2.704\dots$$

$$n = 0.001 \quad \rightarrow 2.716\dots$$

$$n = 0.0001 \quad \rightarrow 2.718\dots$$

17世紀のヨーロッパで、天文学や航海法の研究過程で生まれた。
・・・同じころ別の場所で・・・

$y = a^x$ のグラフの傾き



$y = 1$ のときの接線の傾きが1になるのは、 $y = 2.7182818 \dots^x$
すなわち、 $y = e^x$ の時。

自然対数： e を底とする対数 $\log_e x$ を用いることによって
多くの自然界の事象がよりよく理解できるようになった。

ネイピア数 e と時定数 τ

物質が崩壊（減少）していく過程は、

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

と書くことができ、時間が τ だけ経過すれば、 N は約36.8%（ネイピア数 e の逆数）まで減少することを意味する。

τ はフィットネスと疲労、それぞれ、人によって異なる。

で、具体的にどうするの？

$$g(t) = g(t - i)e^{-i/\tau_1} + w(t) \quad (4)$$

$$h(t) = g(t - i)e^{-i/\tau_2} + w(t) \quad (5)$$

- $g(t)$ と $h(t)$ を計算するために、
- $w(t)$ をどうやって計算するか？ **これは分かった！**
- i と t はその日とその日までの期間間隔なのでわかる。
- τ_1 と τ_2 は、指数関数的減衰の時定数。**これも O K**
- **では最後のこれはどういう意味？**
- $\{g(t - i)e^{-i/\tau}\}$ の部分は畳み込み積分 (convolution)?

畳み込み積分(convolution)

合成積とも呼ばれる。

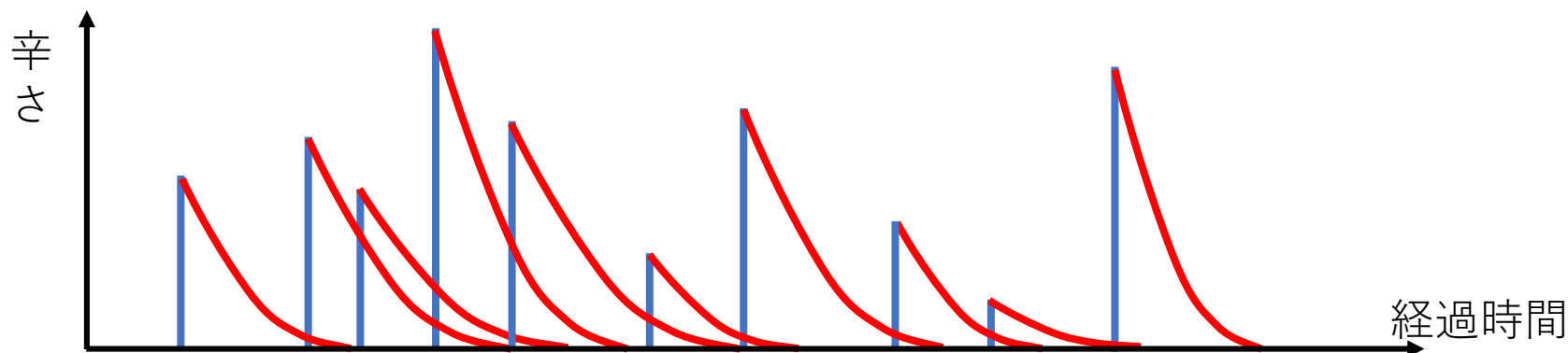
2つの異なる関数 $f(t)$ と $g(t)$ から、新しい関数

$$h(t) = \int f(\tau)g(t - \tau)d\tau$$

を作る操作。

電気回路なら、一瞬一瞬の電圧 $f(t)$ に対する回路の応答 $g(t - \tau)$ を掛けて
スイッチオンから今までを積分したもの。

畳み込み積分(convolution)



- 事件によるショックの関数 $f(t)$ とショック忘却の関数 $g(t)$
- 生まれてから今日までに起こった全ての事件とそれに対するショックが癒える(忘れる)までの連続を積分した現在の心境

$$\int_{\text{生れた日 } 0}^{\text{今日 } t \text{ まで}} f(\text{事件日 } T) w(\text{経過時間 } t) d(\text{事件日 } T)$$

$$\int_{T=0}^{T=t} f(T) w(t-T) dT$$

足し算による畳み込み積分

- あなたが今21才だとすると、
生後0年の事件 $f(0)$ は、すでに21年前の出来事。
生後1年の事件 $f(1)$ は、20年前の出来事。
生後2年の事件 $f(2)$ は、19年前の出来事。
⋮
生後19年の事件 $f(19)$ は、2年前の出来事。
生後20年の事件 $f(20)$ は、1年前の出来事。
生後21年の事件 $f(21)$ は、0年前の出来事。
- それぞれの事件 $f(\text{その年})$ に忘れ具合 $w(\text{経過時間})$ をかけて全部足すと、
$$f(0) w(21) + f(1) w(20) + f(2) w(19) + \dots + f(19) w(2) + f(20) w(1) + f(21) w(0)$$

$$\sum_{T=0}^{T=t} \{f(T)w(t-T)\}$$

で、具体的にどうするの？

$$g(t) = g(t - i)e^{-i/\tau_1} + w(t) \quad (4)$$

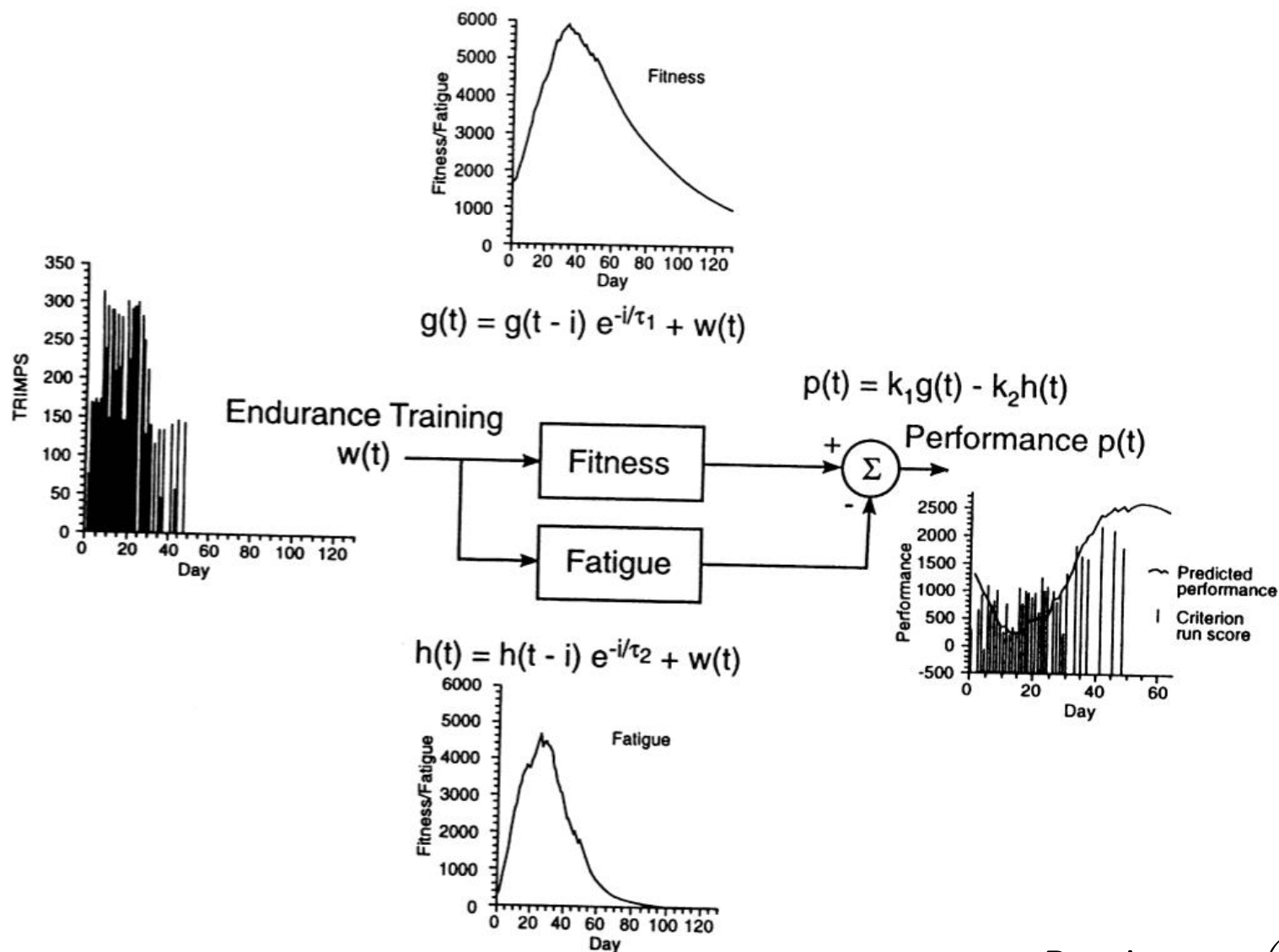
$$h(t) = g(t - i)e^{-i/\tau_2} + w(t) \quad (5)$$

- $g(t)$ と $h(t)$ を計算するために、
- $w(t)$ をどうやって計算するか？ **これは分かった！**
- i と t はその日とその日までの期間間隔なのでわかる。
- τ_1 と τ_2 は、指数関数的減衰の時定数。これって何？
- **では最後のこれはどういう意味？**
- $\{g(t - i)e^{-i/\tau}\}$ の部分は畳み込み積分 (convolution)?
- i は1日として、では、 e^{-i/τ_1} の時定数 τ は具体的に？

フィットネスの時定数 τ_1 と疲労の時定数 τ_2

- Banister (1991)の提唱する値
 - $\tau_1 = 45, \tau_2 = 15$
- Morton et al.(1990):男子1500m走
 - $\tau_1 = 40 - 50, \tau_2 = 11$
- Carvert et al.(1976):男子100m平泳ぎ
 - $\tau_1 = 50, \tau_2 = 10$
- Busso et al. (1994): 男子ハンマー投げ
 - $\tau_1 = 60, \tau_2 = 13$
- Mujika et al. (1996): 男女水泳選手
 - $\tau_1 = 41.4, \tau_2 = 12.4$
- Sanchez et al.(2013): 女子体操競技
 - $\tau_1 = 60.4, \tau_2 = 14.3$
- Banister et al.(1999): 男子トライアスロン
 - $\tau_1 = 45 - 52, \tau_2 = 15 - 21$ (ランニング)
 - $\tau_1 = 45 - 52, \tau_2 = 16 - 19$ (自転車)
- Nakagaki and Onoto (2014): 男子カヌースプリント
 - $\tau_1 = 45.8 - 51.5, \tau_2 = 12.4 - 14.7$

ここまでをまとめると・・・



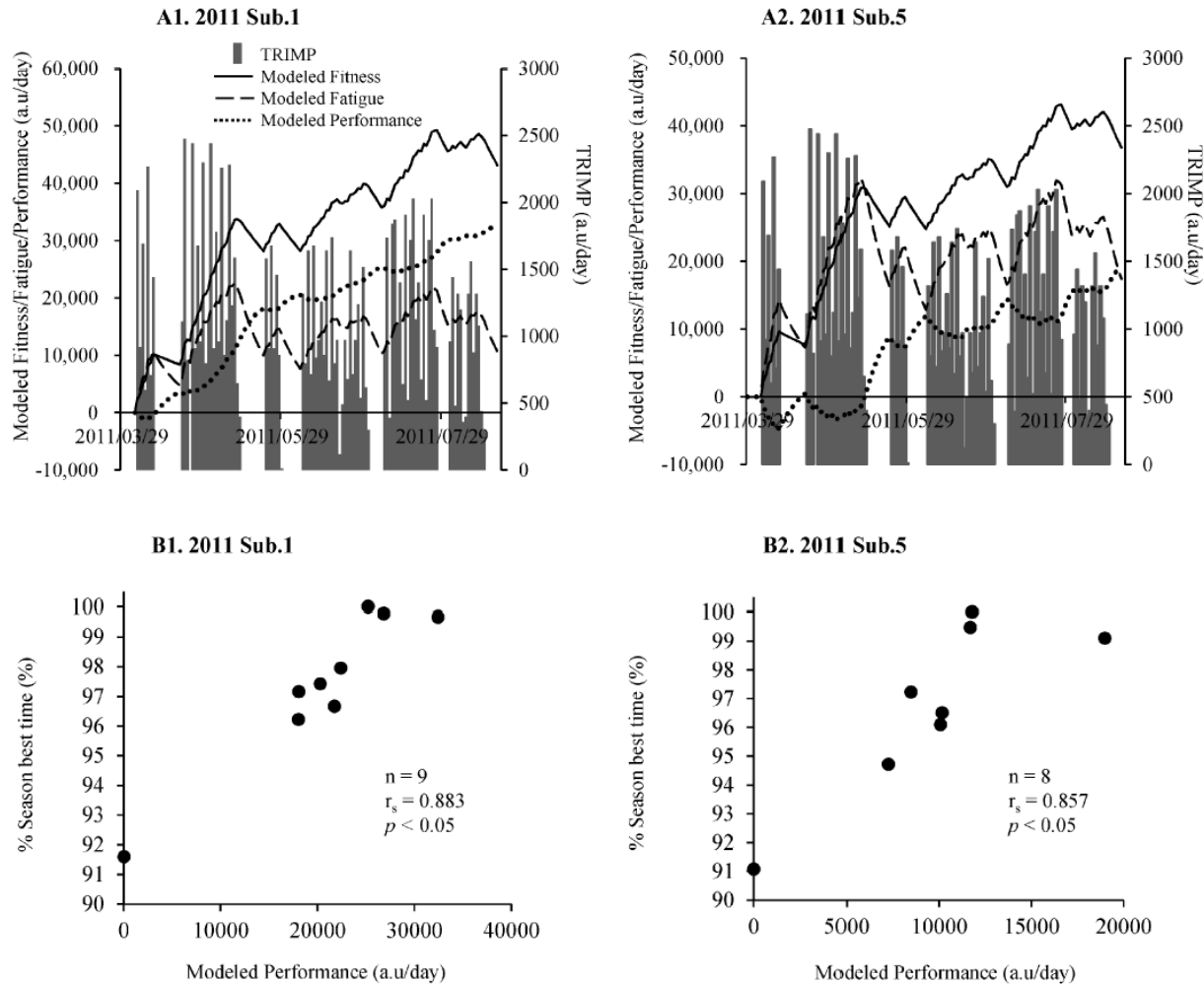


Fig. 4 Training (A1, Sub.1; A2, Sub.5) and performance (B1, Sub.1; B2, Sub.5) data in 2011. The TRIMP time course which determines the fitness fatigue and performance time course (A1 and A2). The relationships between modeled and actual performance (B1, Sub.1; B2, Sub.5).

重みづけ任意係数

フィットネス: k_1

疲労: k_2

- Banister (1991)の提唱する値
 - $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$
- Morton et al.(1990):男子1500m走
 - $k_1 = 1.0$, $k_2 = 1.8 - 2.0$
- Carvert et al.(1976):男子100m平泳ぎ
 - $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$
- Busso et al. (1994): 男子ハンマー投げ
 - $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$
- Mujika et al. (1996): 男女水泳選手
 - $k_1 = 0.062$, $k_2 = 0.128$
- Banister et al.(1999): 男子トライアスロン
 - $k_1 = 1.0$, $k_2 = 1.8$ (ランニング)
 - $k_1 = 1.0$, $k_2 = 2.0$ (自転車)
- Nakagaki and Onoto (2014): 男子カヌースプリント
 - $k_1 = 1.1$, $k_2 = 1.4 - 1.8$

ここまでの基礎知識と理解をもとに、
エクセルで具体的にモデルの計算をしてみよう！

1. 任意の方法で計算されたTRIMPを毎日エクセルに入力していく。任意単位（AU）でOK。
2. フィットネスと疲労をそれぞれTRIMPからの関数として計算できるように数式を指定する。
3. フィットネスと疲労の差としてのパフォーマンスを計算する。
4. 視覚的にわかりやすいようにグラフを作っておき、自動的にグラフ表示させる。
5. 重みづけ係数と時定数を操作して、実際のパフォーマンス（後述）にフィットする数値を見つける。
6. TRIMPによってどうなるかを予測する。

トレーニングday	TRIMP
1	10
2	0
3	0
4	20
5	20
6	0
7	0
8	10
9	10
10	0

(トレーニングday $t + 1$ の疲労) =

$$(\text{トレーニングday } t + 1) \text{ のTRIMP} + (\text{トレーニングday } t \text{ のTRIMP}) \times e^{-1/\tau^2}$$

時定数 $\tau = 15$ 、間隔 $t = 1$ 日とすると、 $e = 2.718^{(-1/15)}$ なので、 $e^{-1/15} = 0.9355$

day1の疲労= 10

day2の疲労= $0 + 10 \times e^{-1/15} = 0 + 10 \times 0.9355 = 9.36$

day3の疲労= $0 + 9.36 \times 0.9355 = 8.75$

day4の疲労= $20 + 8.75 \times 0.9355 = 20 + 8.19 = 28.19$

day5の疲労= $20 + 28.19 \times 0.9355 = 20 + 26.37 = 46.37$

day6の疲労= $0 + 46.37 \times 0.9355 = 43.39$

day7の疲労= $0 + 43.39 \times 0.9355 = 40.58$

day8の疲労= $10 + 40.58 \times 0.9355 = 10 + 37.96 = 47.96$

エクセルで疲労の値を計算

- 時定数 $\tau = 15$ 、 $t = 1$ で計算すると

C3					
	A	B	C	D	E
1	day	TRIMP	fatigue		
2	1	10	10		
3	2	0	9.36		
4	3	0	8.75		
5	4	20	28.19		
6	5	20	46.37		
7	6	0	43.38		
8	7	0	40.58		
9	8	10	47.96		
10	9	10	54.87		
11	10	0	51.33		
12					

EXP関数： 自然対数の底ネイピア数 $e(2.71828182845904)$ のべき乗を返す関数

同様にフィットネスも計算

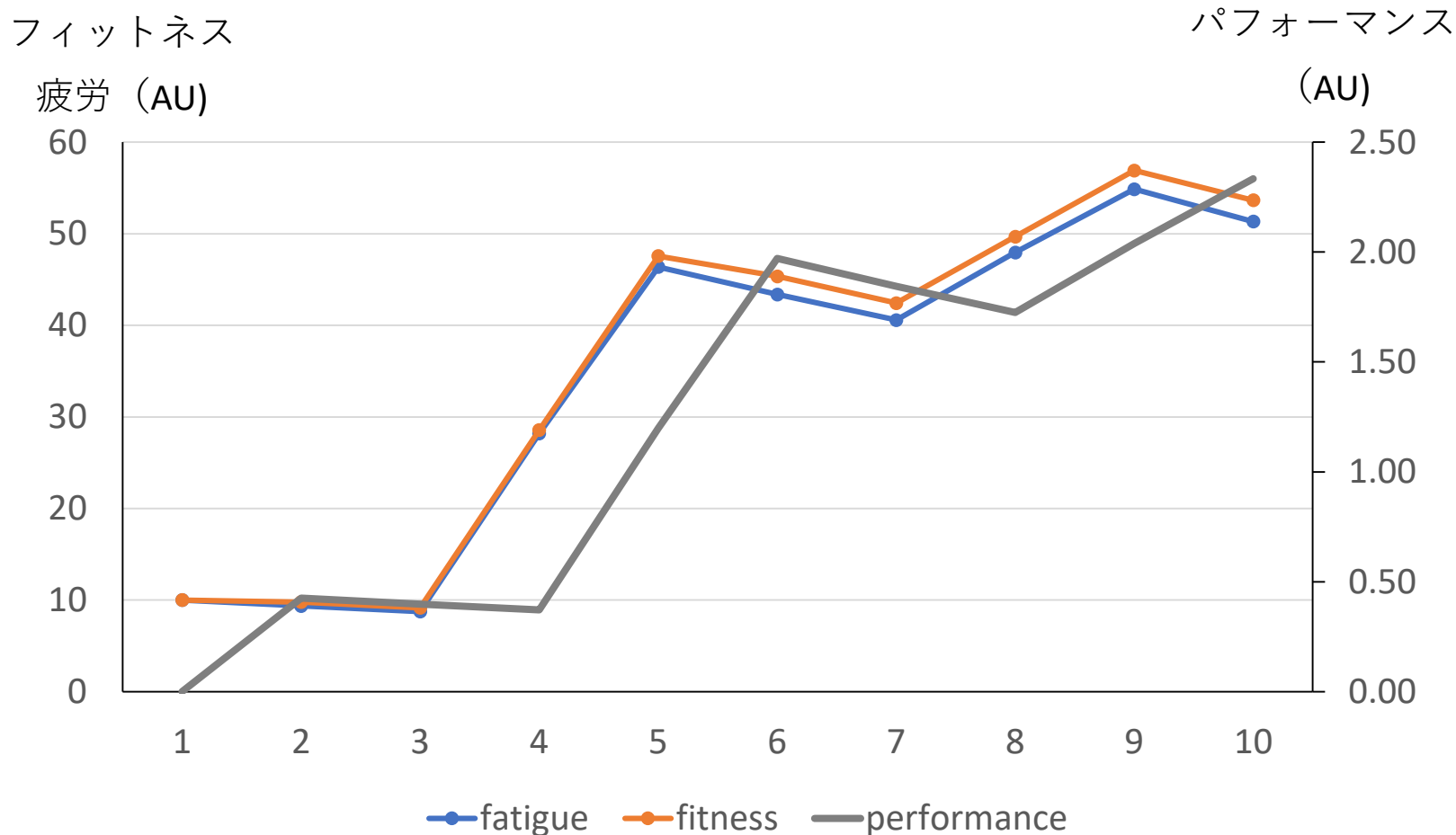
- 式は同じだが、時定数 $\tau = 45$ で計算すると

D3				$=B3+C2*EXP(-1/45)$	
	A	B	C	D	E
1	day	TRIMP	fatigue	fitness	
2	1	10	10	10	
3	2	0	9.36	9.78	
4	3	0	8.75	9.15	
5	4	20	28.19	28.56	
6	5	20	46.37	47.57	
7	6	0	43.38	45.35	
8	7	0	40.58	42.43	
9	8	10	47.96	49.69	
10	9	10	54.87	56.91	
11	10	0	51.33	53.66	
12					

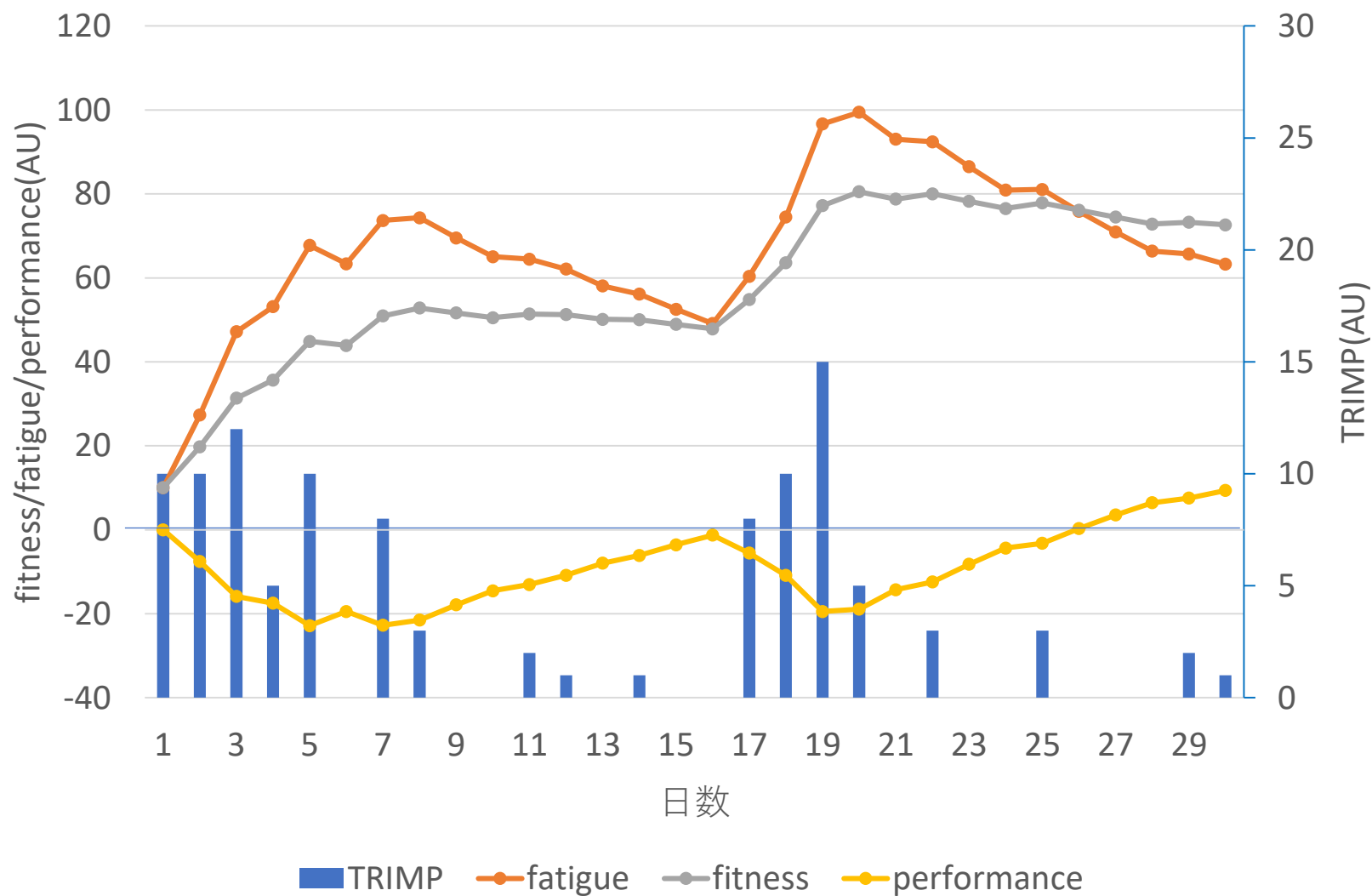
フィットネス－疲労＝パフォーマンス を計算する

E3					=D3-C3
	A	B	C	D	E
1	day	TRIMP	fatigue	fitness	performance
2	1	10	10	10	0.00
3	2	0	9.36	9.78	0.43
4	3	0	8.75	9.15	0.40
5	4	20	28.19	28.56	0.37
6	5	20	46.37	47.57	1.20
7	6	0	43.38	45.35	1.97
8	7	0	40.58	42.43	1.84
9	8	10	47.96	49.69	1.73
10	9	10	54.87	56.91	2.04
11	10	0	51.33	53.66	2.33
12					

フィットネス・疲労 パフォーマンスの関係をグラフ化



現実的なモデルの例



グラフ作成のヒント

グラフの種類の変更

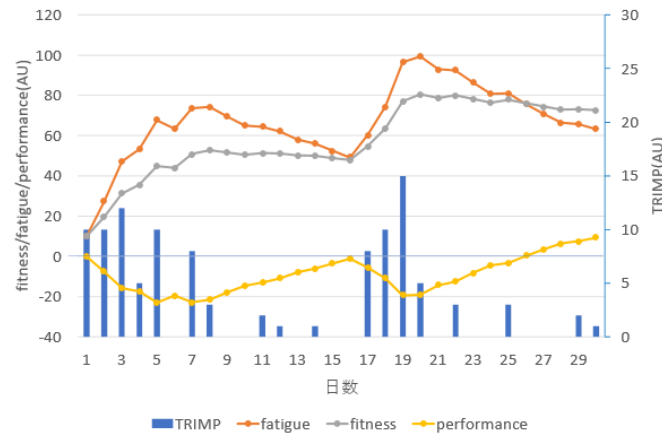
? ×

すべてのグラフ

-  最近使用したグラフ
-  テンプレート
-  縦棒
-  折れ線
-  円
-  横棒
-  面
-  散布図
-  マップ
-  株価
-  等高線
-  レーダー
-  ツリーマップ
-  サンバースト
-  ヒストグラム
-  箱ひげ図
-  ウォーターフォール
-  組み合わせ



ユーザー設定の組み合わせ



データ系列に使用するグラフの種類と軸を選択してください:

系列名	グラフの種類	第 2 軸
TRIMP	集合縦棒	<input checked="" type="checkbox"/>
fatigue	マーカー付き折れ線	<input type="checkbox"/>
fitness	マーカー付き折れ線	<input type="checkbox"/>
performance	マーカー付き折れ線	<input type="checkbox"/>

疲労に重みづけ係数 $k = 2$ を適用

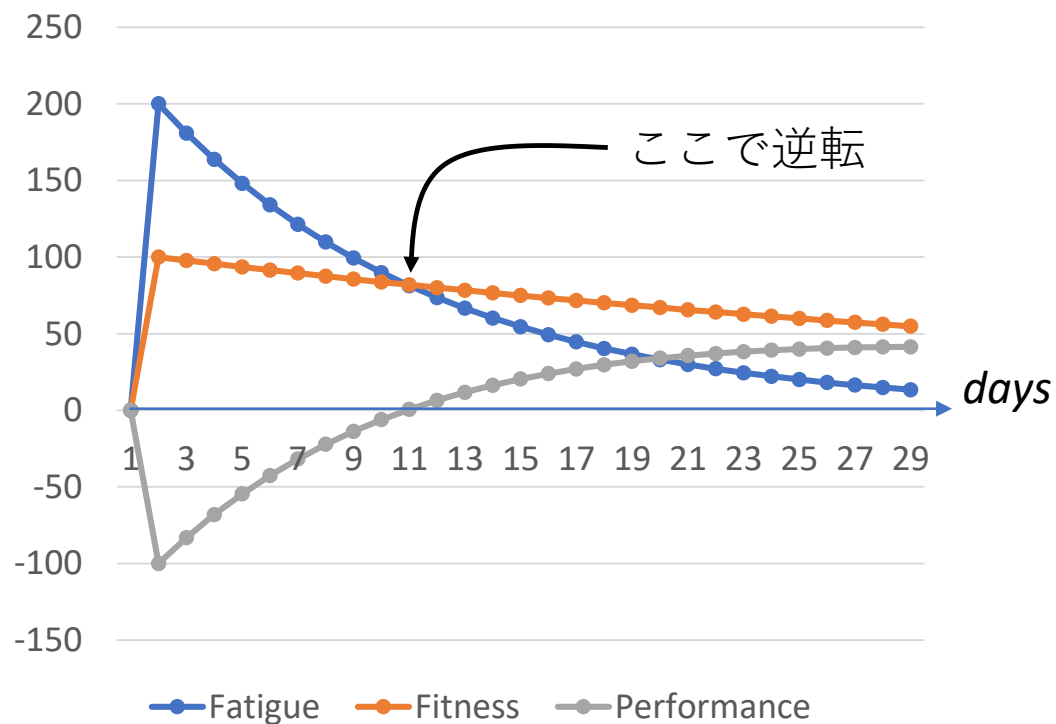
✓ fx =2*D6+E5*EXP(-1/10)

C	D	E	F	G
day	TRIMP	Fatigue	Fitness	Performance
0	0	0	0	0
1	100	200	100	-100
2	0	180.9675	97.80229	-83.1652
3	0	163.7462	95.65287	-68.0933
4	0	148.1636	93.5507	-54.6129
5	0	134.064	91.49472	-42.5693
6	0	121.3061	89.48393	-31.8222
7	0	109.7623	87.51733	-22.245
8	0	99.31706	85.59395	-13.7231
9	0	89.86579	83.71284	-6.15295
10	0	81.31393	81.87308	0.559143
11	0	73.57589	80.07374	6.497852
12	0	66.57422	78.31395	11.73973
13	0	60.23884	76.59283	16.35399
14	0	54.50636	74.90954	20.40318
15	0	49.31939	73.26325	23.94385
16	0	44.62603	71.65313	27.0271
17	0	40.3793	70.0784	29.6991

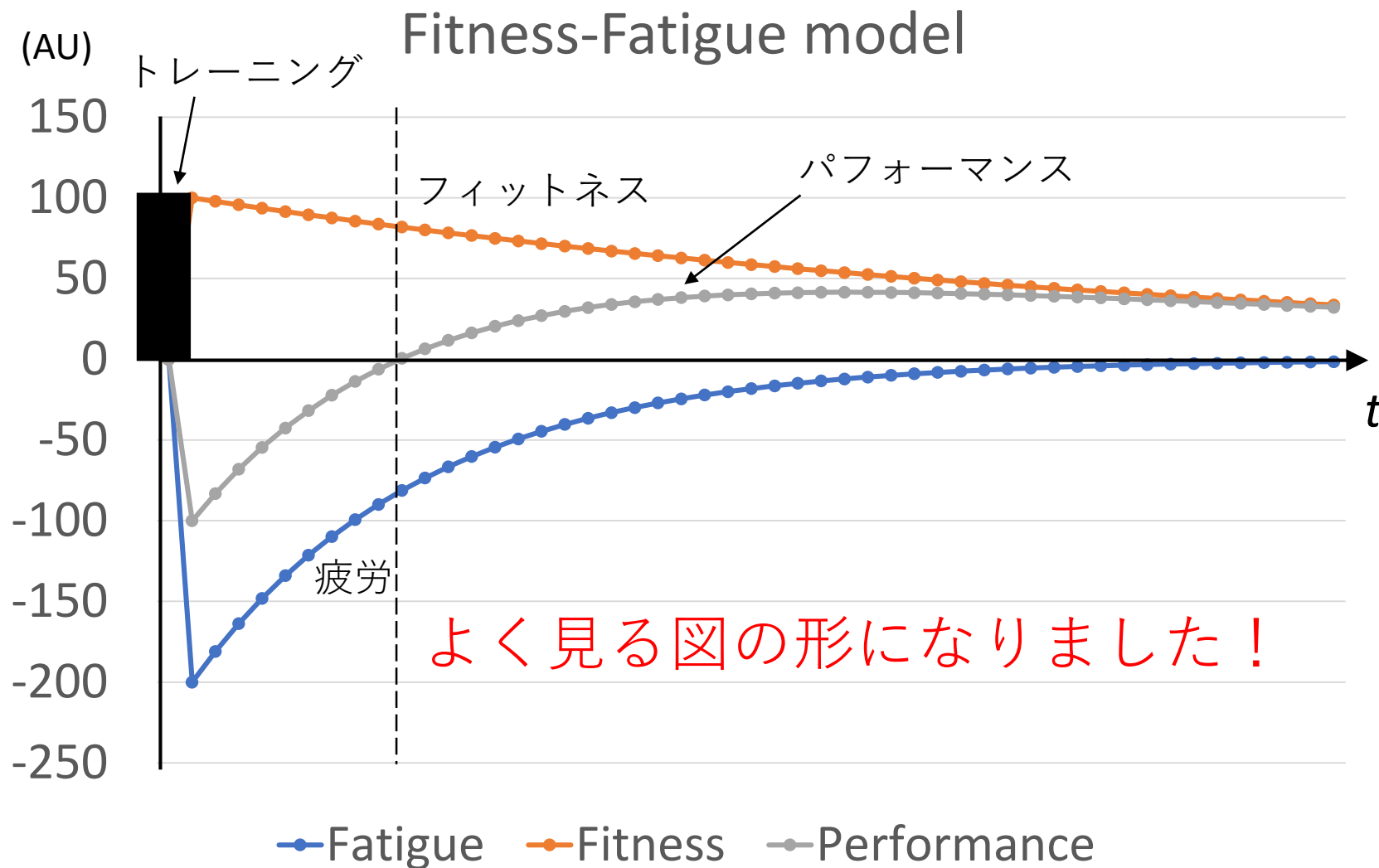
疲労の時定数 $\tau = 10$

フィットネスの時定数 $\tau = 45$

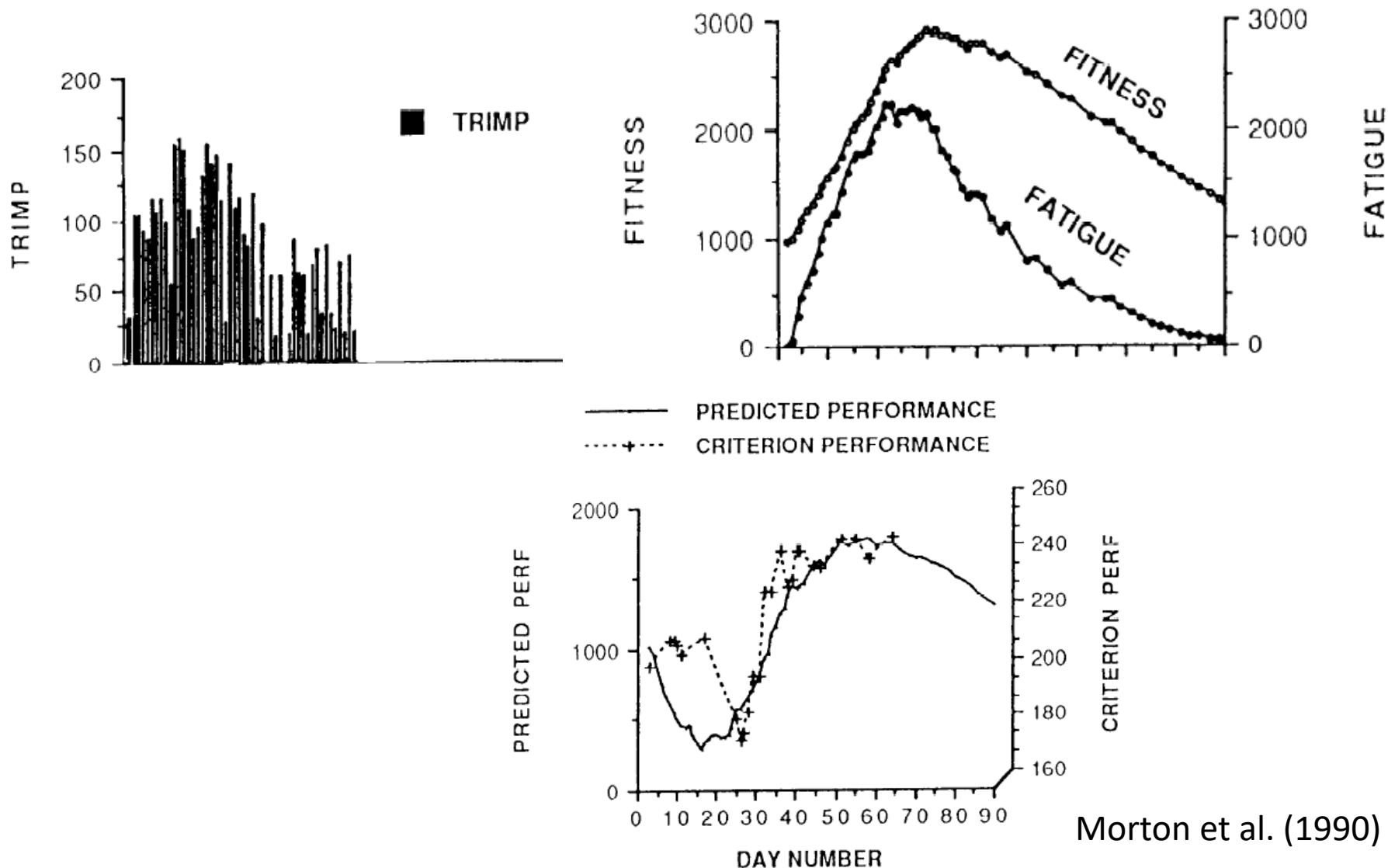
Fitness-fatigueモデルの概念図



疲労を負の値で示すと...



1500mランナーの結果



Morton et al. (1990)

係数と時定数を調整し、パフォーマンスに
当てはめてみると・・・

TRIMPを変えてどうなるか見てみると・・・

TRIMPを変えてどうだったか振り返ってみる
と・・・



種目（レベル）、性別、トレーニング期間 モデルとの整合性

著者	年	種目	N（性別）	期間	決定係数
Busso et al.	1990	重量挙げ(C)	6(m)	52週間	$R^2=.50-.97$
Morton et al.	1999	ランニング(R)	2(m)	4週間	$R^2=.71,.96$
Busso et al.	1994	ハンマー投げ(C)	1(m)	37週間	$R^2=.91$
Mujika et al.	1996	水泳(C)	18(10m, 8f)	50週間	$R^2=.45-85$
Nakagaki & Onoto	2014	カヌー(C)	2(1m,1f)	20週間	$R^2=.77, 74$
Sanchez et al.	2013	体操競技(C)	5(f)	12週間	$R^2=.81$
Busso	2003	自転車(U)	6(m)	15週間	$R^2=.86-94$

パフォーマンスは何で見るか？

- 定期的なタイムトライアル（ex.100mスイムタイム、10mスプリントタイム、YO-YOテスト、垂直跳び、リバウンドジャンプ指数etc.）
- 試合の記録
 - 水泳・陸上競技・自転車・トライアンスロン etc.

定期的測定

TRIMPとしても利用可能！

- スプリント
 - アジリティー
 - 持久走（間欠性持久走）記録
 - 跳躍高や距離
 - 反応脚筋力指数（バネ指数）
 - ウェイト挙上重量
 - ウェイト挙上時の発揮パワー・スピード
 - 投擲距離
 - 総走行距離
 - ハイスピードランニング
 - 平均スピード
 - 加速・減速回数
 - 技術的完成度（ポイント）
- その他競技特性やポジション特性を考慮した専門的測定
 - 野球の投球スピードとスウィング速度
 - バレーボールのジャンプ高と頻度

Fitness-疲労モデルに基づく トレーニングの”制御”

- エクササイズ毎のトレーニング負荷値の入力

予測 ↑ ↓

- セッション毎のトレーニング負荷値の計算

予測 ↑ ↓

- デイリートレーニング負荷値の計算

予測 ↑ ↓

- ウィークリートレーニング負荷値の計算

決定 ←

トレーニング負荷のモニタリングと パフォーマンス制御に役立つその他の指標

1. TRIMPの単調度(Monotony)と緊張度(Strain)
2. セッションRPE
3. 体調調査
4. 心拍変動
5. その他

MonotonyとStrain

- Monotony(単調度)
- Strain(緊張度)
- 各トレーニングの強度係数を決める
- エクササイズまたはセッションの平均強度係数にトレーニング時間を乗じてトレーニング負荷 (TRIMP) を求める
- トレーニング負荷の合計をデイリーTRIMPとする
- 週の平均ウィークリーTRIMPをそのSDで除して単調さMonotonyを求める
- 平均TRIMPにMonotonyを乗じて緊張度 (Strain) を求める

セッションRPE

- Rate of Perceived Expression
- Borgの10段階主観的運動強度スケール(CR-10)
- セッション終了後20-30分間時点で評価
- 個人情報守秘と意見交換の禁止
- 各種の競技におけるさまざまなエクササイズ、幅広い選手層において、セッション中のHRによって計算されたTRIMPとの高い相関関係が示されている。
- スマートフォンの普及とフリーソフトにより、「使える」アイテムとなっている（JATI第2回 科学的手法を用いたトレーニング指導で報告）。

Borg (1998)

Foster (2001)

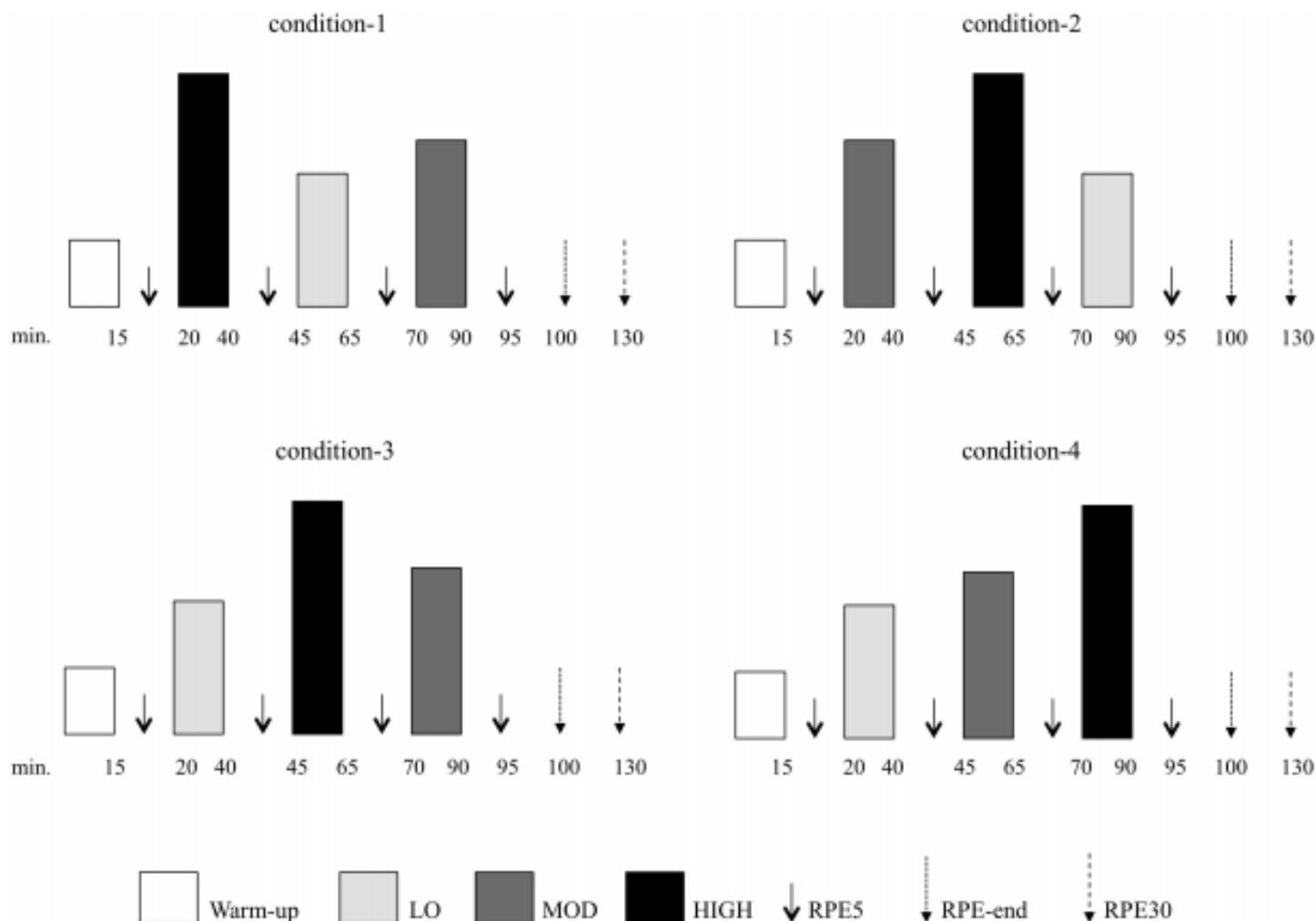
How hard was today's workout for you?

今日の練習（試合・トレーニング）はどれくらいきつかったですか？

0	Rest	安静レベル	安静
1	Very, Very Easy	非常に楽である	めっちゃ楽だった
2	Easy	楽である	楽だった
3	Moderate	中くらい	中くらい
4	Somewhat Hard	ややきつい	ちょっときつかった
5	Hard	きつい	きつかった
6			
7	Very hard	非常にきつい	めっちゃきつかった
8			
9			
10	Maximal	最大	これ以上はない

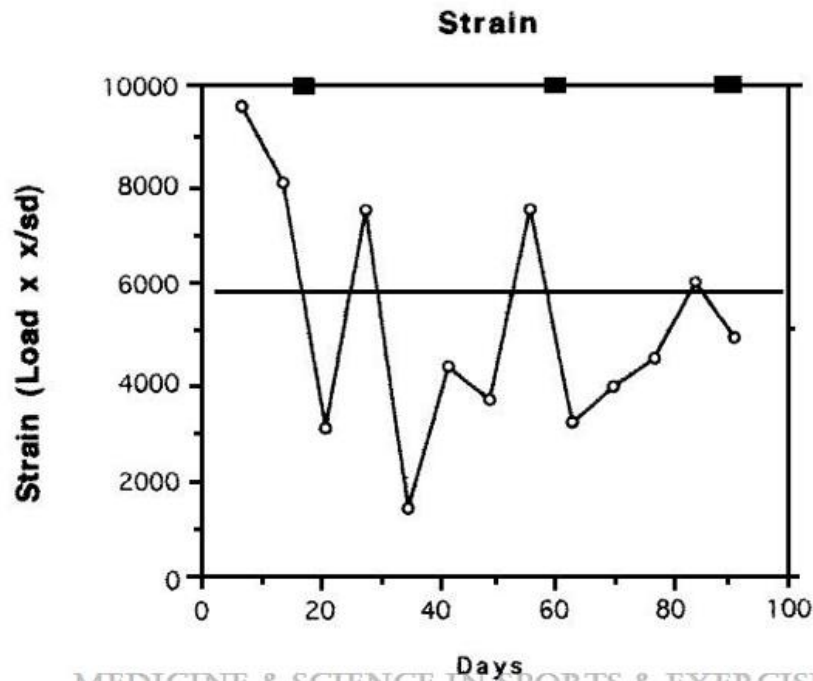
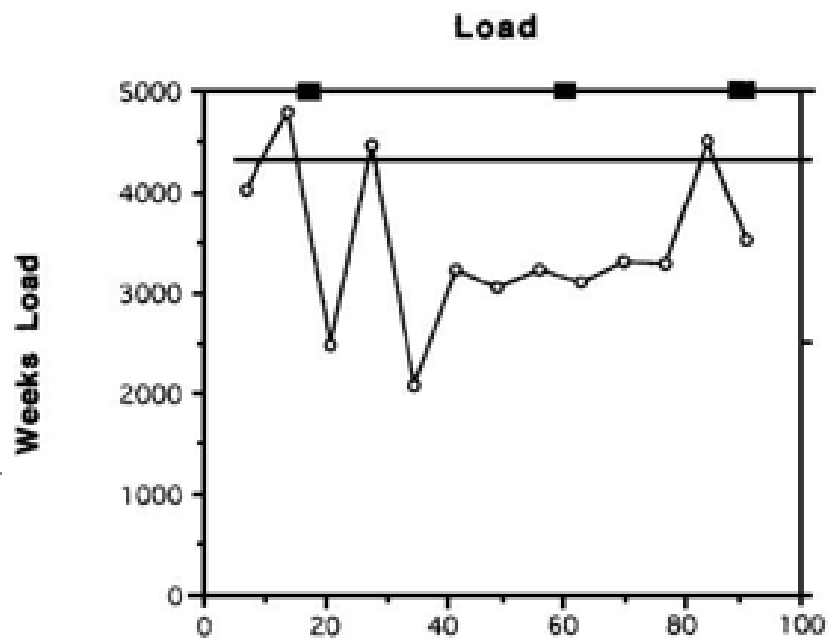
エクササイズ直後のRPEの違いはセッション終了30分後のセッションRPEに影響を及ぼさない

Maurizio et al.(2015)



セッションRPEを用いた負荷の絶対値、
単調度、緊張度の変化と発病との関係

Foster (1998)



コーチの予期する負荷と選手の受け止めとの ミスマッチ

- 客観的なTRIMPと推測した負荷との違い
- 選手の負担感を正確に把握すること
- 選手の負担感と客観的TRIMPの関係を知ること
- コーチと選手による感じ方の違い

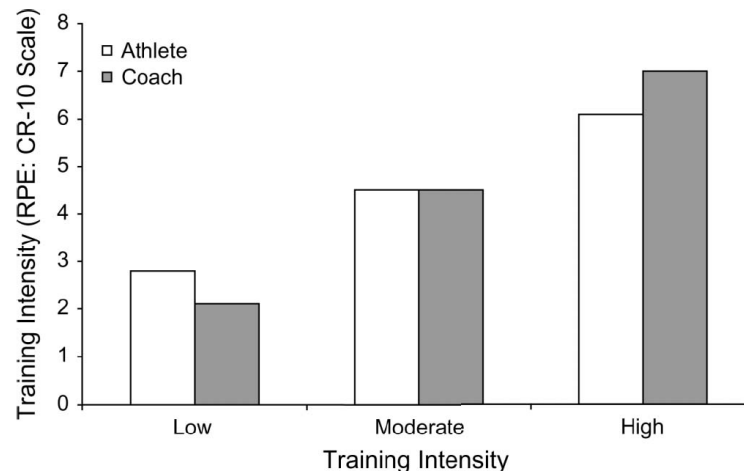


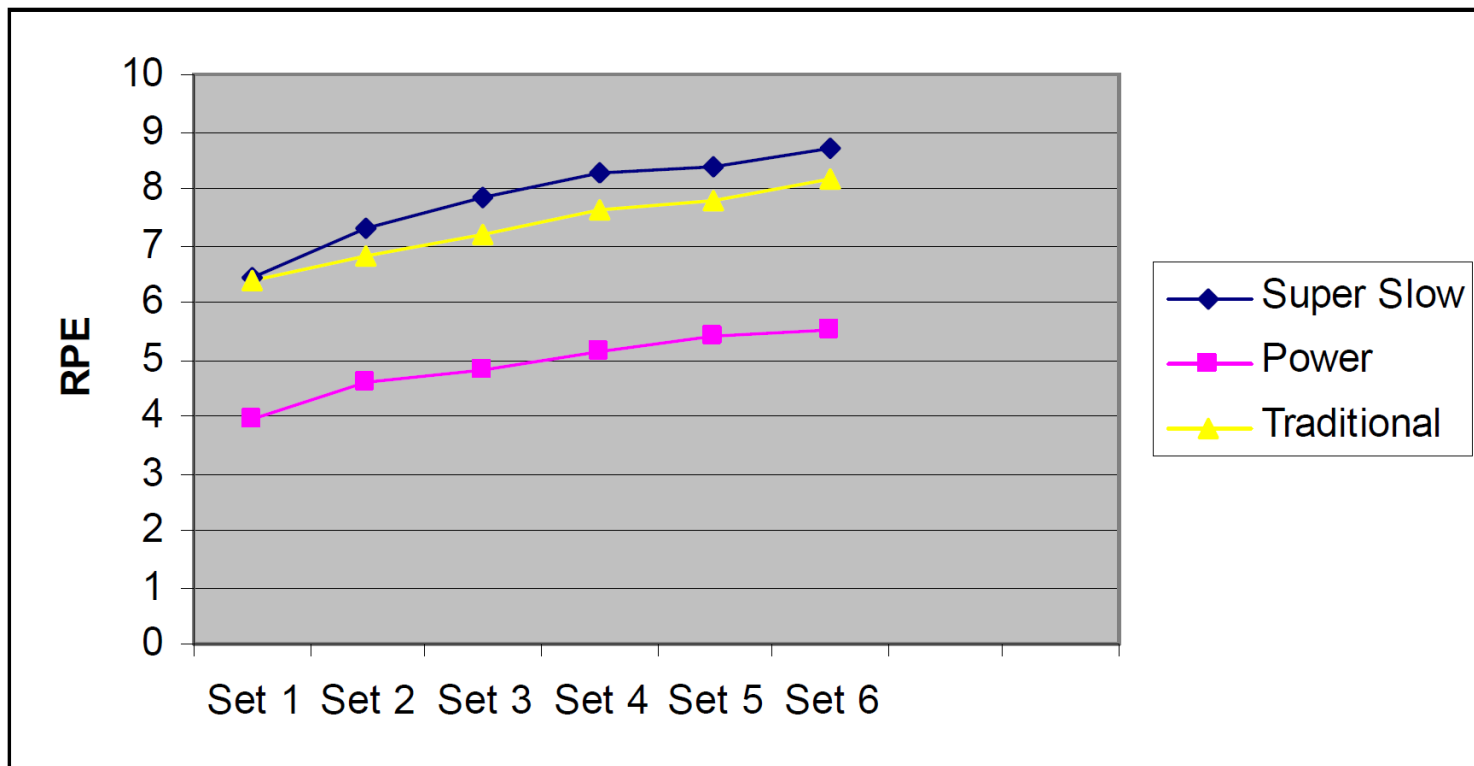
Figure 2. A graphical representation of the mismatch in training intensity which may occur between athlete and coach.

レジスタンストレーニングのプログラムの違い とセッションRPE

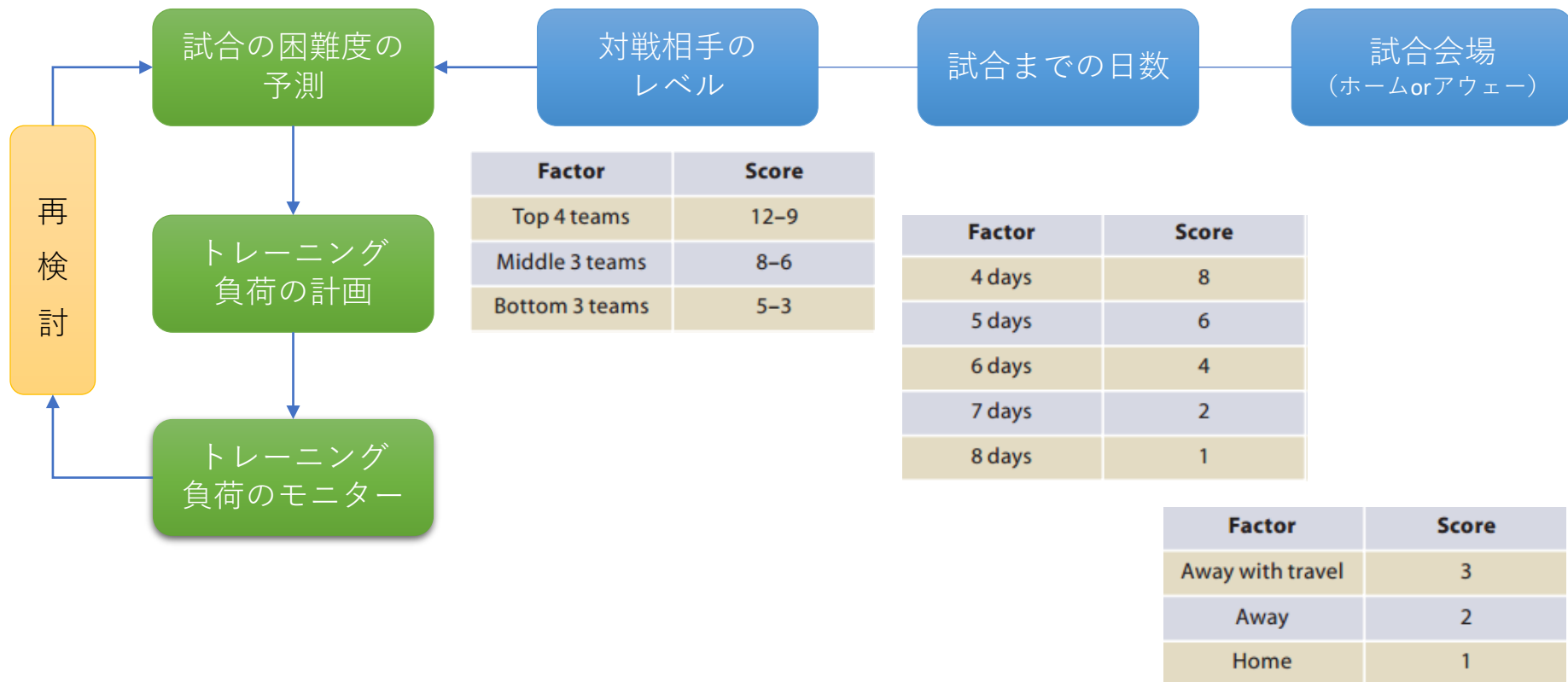
Alison et al. (2006)

- 伝統的な従来法: 6 sets x 6 rep @80% 1-RM
- スーパースロー: 6 sets x 6 rep @55% 1-RM (10秒-10秒)
- 爆発的パワー法: 6 sets x 6 rep @ 30% 1-RM

全てスミスマシーンで2分間のレスト



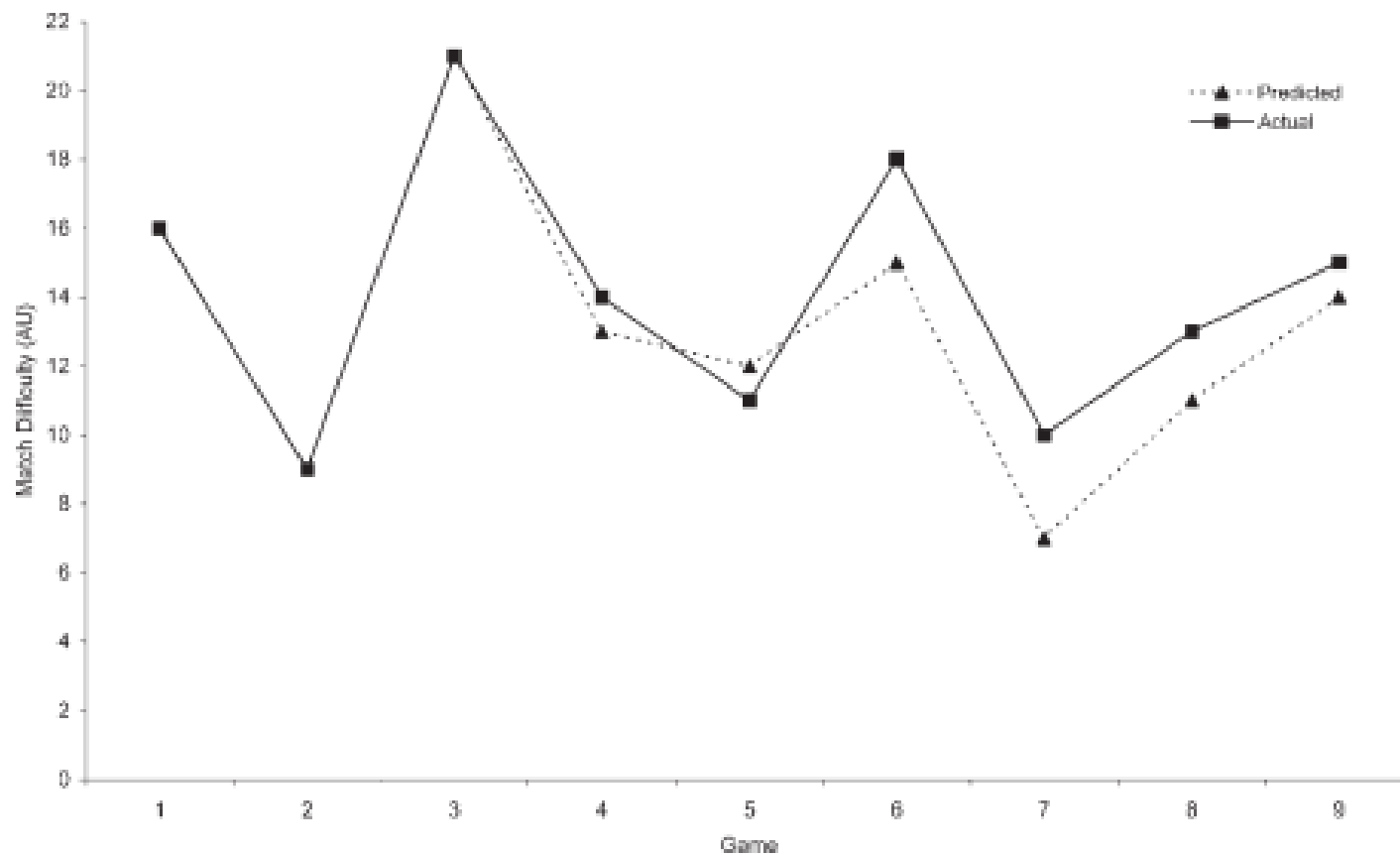
シーズン中のトレーニング負荷を いかにコントロールするか?



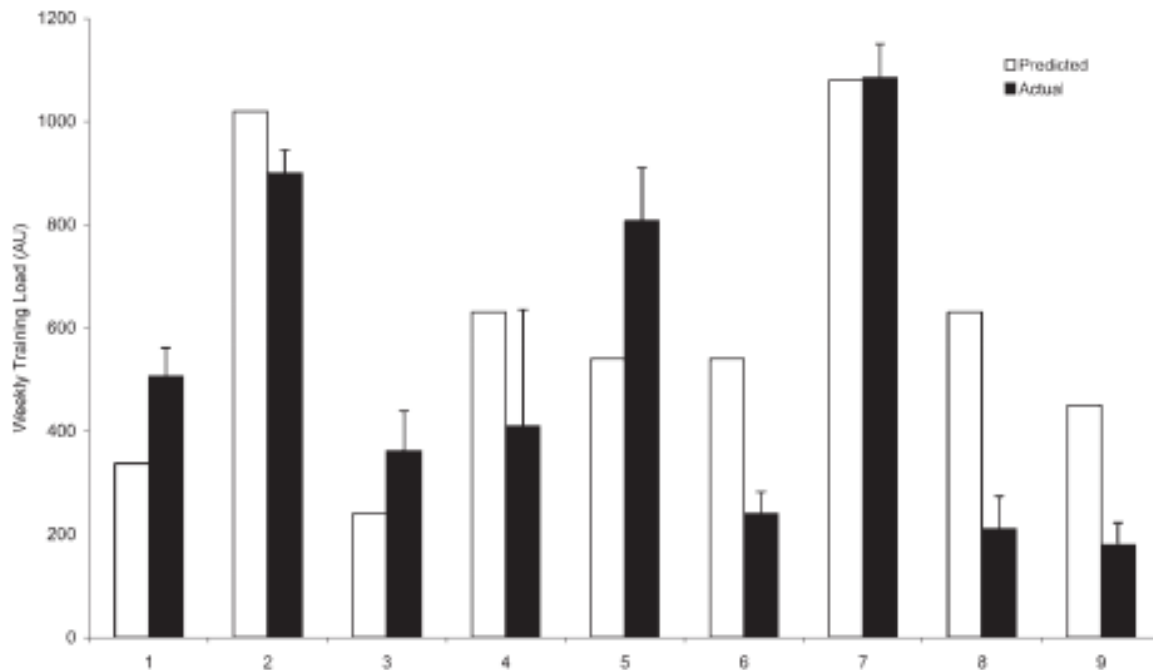
あらかじめ困難度を想定する

対戦相手	相手のレベル	試合までの日数	試合会場	トータル
Team 1	11	4	1	16
Team 2	3	4	2	9
Team 3	12	6	3	21
Team 4	10	2	1	13
Team 5	7	4	1	12
Team 6	5	8	2	15
Team 7	4	1	2	7
Team 8	6	4	1	11
Team 9	8	4	2	14

トータルポイントでトレーニングスケジュールの 予測を立てる



セッションRPEで週ごとのTRIMPを計画

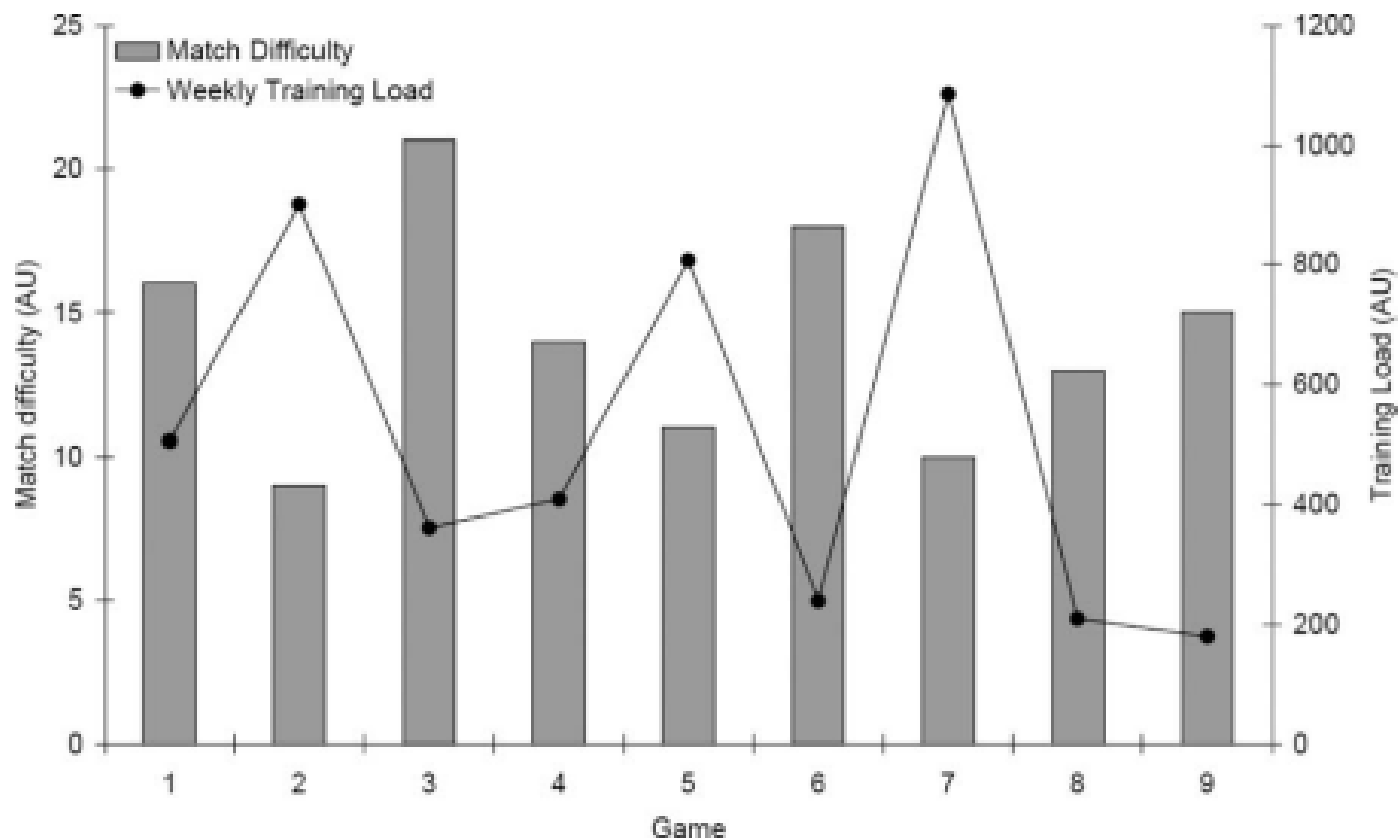


0	Rest
1	Very Easy
2	Easy
3	Moderate
4	Somewhat Hard
5	Hard
6	
7	Very Hard
8	
9	
10	Maximal

Day	Average RPE	Session duration (min)	Training load
Tuesday	4.9	120	589
Thursday	4.7	105	496
Weekly Load			1,086

RPE = rating of perceived exertion.

その週末の試合の厳しさと その週のトレーニング負荷の調整



TRIMPを普段実施しているエクササイズごとに決定する

Berdejo-del-Frezno and Gozález-Ravé (2012)

- 負荷の強度と量、密度、複雑性、危険度
- 認知領域、代謝領域（エネルギー）、神経・筋領域（コントロール）
- 心拍数、密度、対人数、広さ（距離）
- 実施しているエクササイズを列挙し、ポイントを決定する、または、
- 実施しているエクササイズを客観的に分析する

バスケットボールの例

HEART RATE *		DENSITY **		OPPOSITION		DISTANCE	
10	100%	10	Continuous	10	5x5	10	Continuous
9	95%	9	4/1	9	5x4 or 4x5	9	4 courts
8	90%	8	3/1	8	4x4	8	3 courts
7	85%	7	2/1	7	4x3 or 3x4	7	2 courts
6	80%	6	1/1	6	3x3	6	1 & 1/2 courts
5	75%	5	1/2	5	3x2 or 2x3	5	1 court
4	70%	4	1/3	4	2x2	4	2/3 court
3	65%	3	1/4	3	1x1, 2x1 or 1x2	3	1/2 court
2	60%	2	Much rest	2	3x0 and 2x0	2	1/3 court
1	55%	1	Much rest	1	5x0 and 4x0	1	1/4 court

* HRはそのエクササイズを 10分継続した時点のHR

$$** \text{ density} = \frac{\text{work time}}{\text{rest time}}$$

体調調査

1. 疲労度

非常に疲れている 普通 全く疲れていない

☐ ☐

2. 睡眠

全く眠れなかった 普通 よく眠れた

☐ ☐

3. 食欲

全くない 普通 かなりある

☐ ☐

4. ハムストリング筋肉痛

痛い やや張り気味 全く問題ない

☐ ☐

5. 大腿前面筋肉痛

非常に痛い やや張り気味 全く問題ない

☐ ☐

自律神経系のレベルも影響

6. ふくらはぎ筋肉痛

非常に痛い やや張り気味 全く問題ない

☐

7. 腰や背中での痛み

非常に痛い やや張り気味 全く問題ない

☐

8. ストレスレベル

強いストレス状態 普通 非常にリラックス

☐

9. 気分（やる気）

やる気が起こらない 普通 やる気に満ちている

☐

心拍変動（HRV）も同時に調べることが望ましい

まとめと課題

- スポーツ競技力向上に携わるこれからのトレーニング指導者の目指すべき方向性は、
 - 単なるカラダに詳しい人、体力トレーニングの指導者、メディカルに近い人という位置づけから、選手の身体運動能力にかんする専門家としてスポーツのトレーニング全般に責任を負う立場を目指すこと。
 - 技術・戦術トレーニングやゲームにおける身体運動能力に対する負荷の側面についてのモニタリングにより、監督・コーチに負荷のコントロールについて客観的なデータをもとにアドバイスすること。
- そのため、トレーニング負荷の客観的なモニタリングおよび選手のコンディションを正確に把握するための手法と、
- トレーニングの強度と量を細かく調整するための手法を身に着ける。



この「フィットネス-疲労」と
昨日の「セッションRPE」のPDFダウンロードは
こちらからどうぞ

S&Cスポーツ科学計測テクノロジー
<http://www.sandcplanning.com/>

原理モデルとしてのフィットネス-疲労理論に関する考察

- Zatsiorky V.M. (1995) Science and practice of strength training. Human Kinetics, Campaign IL.
- 長谷川裕 (1998) ストレngthス & コンディショニング. トレーニングスケジュールの構成. コーチングクリニック. 12(8): p43.
- 長谷川裕 (2005) トレーニング計画とその実際. 財団法人日本体育協会編. 『公認スポーツ指導者養成テキスト共通科目 III』 第1刷所収. pp 118-127.
- 長谷川裕a (2007) 「フィットネス-疲労」理論によるトレーニング計画のすすめ. コーチングクリニック. 21(8): 10-13.
- 長谷川裕b (2007) 「超回復」説を超えるトレーニング理論～世界の主流は「フィットネス-疲労」説. NPO法人日本トレーニング指導者協会編. 『スポーツトレーニングの常識を疑え』 所収. ベースボールマガジン社. pp 8-19.
- 長谷川裕 (2009) トレーニング計画の立案(総論). NPO法人日本トレーニング指導者協会編. 『トレーニング指導者テキスト理論編』 所収. 大修館書店. pp 26-37.

フィットネス-疲労モデルの数学モデル

- Calvert T. W., E.W. Banister, M.V. Savage, and T.M. Bach (1976) A system model of the effects of training on physical performance. Institute of Electrical and Electronics, Engineers. Transaction of systems, man, and cybernetics. 6(2):94-102.
- Morton R.H., J.R. Fitz-Clarke, and E.W. Banister(1990) Modeling human performance in running. J Appl Physiol. 69(3): 1171-1177.
- Busso T, R. Candau, and J-R Lacour(1994) Fatigue and fitness from the effects of training on performance. Eur J Appl Physiol. 69: 50-54.
- Busso T, K. Häkkinen, A. Pakarinen, C. Carasso, J.R. Lacour, P.V. Komi and H. Kauhanen(1990). A system model of training responses and its relationship to hormonal responses in elite weight-lifters. Eur J Appl Physiol.61: 48-54.
- 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.
- Banister E.W., J.B. Carter and P.C. Zarkadas (1999) Training theory and taper: validation in triathlon athletes. Eur J Appl Physiol. 79: 182-191.
- Sanchez A.M.J., O. Galves, F. Fabre-Guery, L. Thomas, A. Douillard, G. Py, T. Busso, and R. Candau(2013) Modelling training response in elite female gymnasts and optimal strategies of overload training and taper. J Sports Science. 31(14): 1510-1519.
- Mujika I., J-C. Chatard, T. Busso, A.Geyssant, F.Barale and L. Lacoste(1995) Effect of training on performance in competitive swimming. Can J App Physiol. 20(4): 395-406.

引用・参考文献

- Mujika I., T.Busso, L. Lacoste, F. Barale, A. Geyssant and J-C. Chatard(1996) Modeled responses to training and taper in competitive swimmers. *Med Sci Sports Exerc.* 21(2): 251-258.
- Busso T. (2003) Variable Dose-Resonse Relationsihp between Exercise Training and Performance. *Med Sci Sports Exerc.* 35(7): 1188-1195.
- Pfeiffer M.(2008) Modeling the Relationship between Training and Performance - A Comparison of Two Antagonistic Concepts. *Int J Computer Science in Sport* 7(2):13-32.
- Nakagaki K., and N. Onoto(2014) The utility of simplified quantification of training: The training of a Japanese national caue sprint team for the London Olympic Games. *Japan J Phys Educ Health Sport Sci.* 59: 283-295.

トレーニング負荷の数量化やセッションRPE

- Edwards S. (1993) High performance training and racing. In: Edwards S. ed. *The Heart Rate Monitor Book.* 8th ed. Sacramento, CA: Feet Feet Press: 113-123.
- Borg G. (1998) Borg's perceived exertion and pain scales. *Human Kinetics.* Human Kinetics, Campaign IL.
- Foster, C. (1998) Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Med Sci Sports Exerc.* 30(7): 1164-1168.
- Foster C., J.A. Florhaug, J.Franklin, L. Gottshall, L.A. Hrovatin,S.PARKER, P. Doleshal and C. Dodge(2001) A New Approach to Monitoring Exercise Training. *J Strength Cond Res.* 15(1): 109-115.
- Impellizzeri F.M, E. Rampinini, A.J. Coutts, A. Sasi and S.M. Marcora (2004) Use of RPE-based training load in soccer. *Med Sci.Sports Exerc.* 36(6): 1042-1047.
- Sweet W.T., C. Foster, M.R. McGuigan and G. Brice (2004) Quantitation of resistance training using the session rating of perceived exertion method. *J Strength Cond Res.* 18(4): 796-802.
- Alison D.E, J.B. Winchester, C. Foster and M.R. McGuigan (2006) Using Session RPE to monitor different methods of resistance exercise. *J Sports Sci Med.* 5: 289-295.
- Kelly V.G and A.J. Coutts (2007) Planning and monitoring training loads during the competition phase in team sports. *Strength Conditioning J.* 29(4): 32-37.
- Wallace L., C. Aaron, J. Bell, N. Simpson and K.Slaterry (2008) Using session-RPE to monitor training load in swimming. *Strength Cond J.* 30(6): 72-76.
- Berdejo-del-Frezno D. and J.M. Gozález-Ravé (2012) Development of a new method to monitor and control the training load in basketball: the BATLOC tool. *J Sports Health Res.* 4(1): 93-102.

引用・参考文献

- Lockie R.G., A.J. Murphy, B.R. SCOTT and X.A.K. Janse de Jonge (2012) Quantifying session ratings of perceived exertion for field-based speed training methods in team sport athletes. J Strength Cond Res. 26(10): 2721–2728.
- Buchheit M., S. Racinais, J.C. Bilsborough, P.C. Bourdon, S.C. Voss, J. Hocking, J. Cordy, A. Mendez-Villanueva and A.J. Coutts (2013) Monitoring fitness, fatigue and running performance during a pre-season training camp in elite football players. J Sci Med Sport. 16: 550-555.
- Maurizio F., R.Ghielmetti, A.J.Coutts, F. Schena and F.M.Impellizzeri (2015) Effect of Training-Session Intensity Distribution on Session Rating of Perceived Exertion in Soccer Players. Int J Sports Physiol and Perform. 10:426 -430.
- Berdejo-del-Frezno D.(2015) Development and validation of a new method to monitor and control the training load in futsal: the FUTLOC tool. American J Sports Sci Med. 3(1): 23-27.

その他

- 村木征人(1994) スポーツ・トレーニング理論. ブックハウス・エイチディ.
- 図子浩二 (2015) トレーニング理論と方法論. 財団法人日本体育協会編. 『公認スポーツ指導者養成テキスト共通科目Ⅲ』 第13刷所収. pp 104-117.