〈原　著〉

リレー競技の走者の選定に関する数理的一手法

廣津　信義*・奥野　　浩**

A mathematical method for assigning runners to a relay team

Nobuyoshi HIROTSU* and Hiroshi OKUNO**

Abstract

In this paper, we propose a mathematical approach to find the optimal assignment of runners to a relay team. Under the assumption that each runner's time follows a normal distribution, we have developed a mathematical formulation to maximize the probability of achieving an aiming time as a binary programming problem. In this formulation, we introduce not only each runner's performance level by the average of the distribution, but also his/her unexpectedness by the standard deviation. We illustrate this method using a hypothetical road relay and demonstrate how this approach may help to determine the assignment of runners, by showing the concrete assignment and the probability of its achieving the aiming time.

Key words: assignment, mathematical method, relay, runners

1. 緒　　言

陸上競技の中でも，4×100 m リレーや駅伝などに代表されるリレー競技では，多くの候補選手から誰を選抜するかという問題だけでなく，どの選手をどの順番（区間）に配置するかということも，監督・コーチにとって重要な問題である．選抜にあたっては，実力のある選手を単純に選べばよいともいえるが，どのような基準で選ぶかによって，選手の評価は異なってくる．また，単純にひとつの指標で選ぶのではなく，指標が複数になれば，その選び方はより複雑になる．例えば，選手の走力をベストタイムだけで評価するのではなく，コース状況や選手の特徴などを勘案して評価の指標を増やしていくほど，最適な選手を選定することは至難になるであろう．

最終的な選手選定は，監督・コーチの総合的な判断に委ねることとなるが，その判断に際して，複雑な現実をあえて単純化した数理モデルを用いて，計算上最適な選手選定を算出してみることも，参考情報を得る試みとしては無駄ではないであろう．例えば，数理的な手法による選手の最適配置問題[7]への応用としては，競泳の事例として考案されたものがいくつか報告されており，Hannan, E. L. ら[4)5)]は競泳におけるメドレーリレーで，選手の種目別タイムを利用し，チームとしての獲得ポイントが最大となるような選手配置を求めるための手法を提案している．

陸上競技においては，Heffley, D. R.[6]が，短距離のリレー競技において各走者のタイムと選手間のバトンパス局面の時間を仮に設定した際に，どの走順のときタイムが最短になるかという計算式を提示している．

このように，競泳・競走においていくつかの先

* 統計学研究室
Seminar of Statistics
** 医学部数学研究室
Department of Mathematics, School of Medicine

行研究はあるものの，これらは，選手のタイムが確定しているという前提で，合計タイムが最短となるように選手を選定するというモデルである．競泳など獲得ポイントの計算がやや複雑な場合は，このような手法を用いて最適解を求めることに意義があるかもしれないが，もし各選手のタイムが確定しているときに単純に合計タイムが最短となるように選手選定するだけならば，わざわざ数理的な手法に頼るまでもないであろう．しかしながら，各選手のタイムにばらつきがあり，その度合も選手選定の基準に入れるならば，問題は複雑になり，数理的な手法を用いて，最適解を算出することが必要となる．

本研究では，リレー競技において，従来のような各選手の確定したタイムの合計を最短とするような選手選定だけでなく，各選手のタイムにばらつきがあるときに最適解を求めるための数理的な一手法を提示する．ここでは，ある目標タイムを実現する確率を最大化するという意味での最適な選手選定の方法を例示する．具体的な評価の指標としては，選手のタイムの平均値を選手の競技力レベルを示す指標と考え，タイムのばらつきを選手の意外性を示す指標ととらえて，選手を選定する際にこれら2つの基準で評価するモデルを考える．スポーツにおいては一般に，競技力が高い者が勝つという必然的な面と，意外な選手が勝つという偶然的な面という2つの側面があると思われるが，今回はリレー競技を対象として両者を取り入れた形でモデル化した試みともいえる．

本方法を説明するためのひとつの計算例として，5区からなる駅伝競走で8選手から5名を選抜し，適切な区間に割り当てるという問題を想定した際の，最適な選手選定の計算方法と結果を，目標タイムと達成確率との関係を交えて定量的に示す．

いうまでもなく，現実には，競技当日の体調や天候，コース状況のみならず，相手選手との駆け引きなどのレース展開も影響し，モデルと現実との乖離は避けられないが，本手法を用いると計算前提の下での最適解が明示される．現場で監督・コーチが独自の考えを織り込みながら判断していく上でのひとつの参考情報となり得るのではないかと考えている．

2．方　　法

2.1　タイムが確定しているモデル

本節では，最適な選手選定のための数理モデルについて説明する．まず，各選手のタイムのばらつきの程度を考慮する前段階として，先行研究[4)～7)]と同様，タイムが確定しているモデルについて述べる．以下，説明を分かり易くするため駅伝を例に説明するが，短距離でのリレー競技などについても同様に定式化できる．

まず，選抜候補の選手が m 人，全区間数が n 区間あるとする．リレーは通常 $n=4$ であり，箱根駅伝は $n=10$ となる．ここで，走者 i が j 区を走ったとしたときの，タイムの予想値を T_{ij} とする．この予想値は，もしデータがあるならば，そのデータに基づいて統計的に導出したものでもよいし，データがないならば監督・コーチの主観的な予想値でもよい．トラック競技では同じ条件で，各選手のタイムを計測し，その平均値で予測することが自然であろう．

ここで，選手の選定を表現するために，もし選手 i が j 区に割り当てられたときに値1をとり，そうでないときに，値0をとるような変数 x_{ij} を考える．すなわち，

$$x_{ij}=\begin{cases}1：選手\ i\ が区間\ j\ に割り当てられるとき\\0：それ以外\end{cases}$$

とする．このとき x_{ij} を i 行 j 列に配置した $m\times n$ 行列

$$X=[x_{ij}]=\begin{pmatrix}x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn}\end{pmatrix}$$

を作ると，選手選定に応じて，この行列の要素 x_{ij} に1か0の値が入り，行列 X により選手選定の結果を表現することができる．ここで，ひとつの区間には必ず一人の選手が割り当てられるという条件から，行列 X の列和は1，すなわちすべて区間 j（$j=1\cdots n$）について，$\sum_{i=1}^{m}x_{ij}=1$ が成り立つ．また，選手は選ばれたとしてもひとつの区間しか走れないので，行和はたかだか1，すなわ

ち，どの選手 i（$i=1\cdots m$）についても，$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \leq 1$ となる．

さらに，選手 i が j 区を走ったときのタイムの予想値 T_{ij} を i 行 j 列に配置した $m \times n$ 行列 T を

$$T=[T_{ij}]=\begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ T_{m1} & T_{m2} & \cdots & T_{mn} \end{pmatrix}$$

と作ると，合計タイムを最短にするという問題は，行列 T の各列から一つづつ値をとりだして合計した値を最小化するという問題に帰着される．

このように行列 X と T を定義すると，最短の時間を実現するような選手選定は $T_s=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} T_{ij}x_{ij}$ を最小化するように行列 X の要素 x_{ij} の値 0，1 を決定する問題となる．一般にはこのような問題を 0–1 計画問題という．この問題を解く方法はいくつかあるが，ここでは詳述しない．興味ある方は，たとえば森ら[8]を参照されたい．まとめると，

目的関数：

$$\mathrm{Min}\ T_s=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} T_{ij}x_{ij} \tag{1}$$

制約条件：

$$x_{ij}=\begin{cases} 1：選手\ i\ が区間\ j\ に割り当てられるとき \\ 0：それ以外 \end{cases} \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \leq 1：すべての\ i\ について \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = 1：すべての\ j\ について \tag{4}$$

という最小化問題を解くことで，計算上最適な選手の選定が可能となる．

2.2　タイムのばらつきを考慮したモデル

前節では，各区間での選手の予想タイムを合計したものが最小となるような割り当てを見つけるだけでよかったが，現実には選手により程度の差はあるとしてもタイムのばらつきが存在する．狙ったタイムを安定して出すことができるような，ばらつきの小さな選手もいれば，悪いときと良いときの差が大きくタイムのばらつきの大きい選手もいるであろう．このようなばらつきは，悪く見れば安定していない選手であるといえるが，たまに予想以上の好タイムを出すことがあると考えると意外性のある選手というように好意的に見ることもできるであろう．

このようばらつきは，選手のタイムが正規分布に従うと仮定すれば，その標準偏差 $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ で表現できる．すなわち，選手の能力を平均 T_{ij} と標準偏差 $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ にて評価しようという訳である．もちろん，選手のタイムが正規分布に従うかどうかという議論は，別途データを集計して検討するべき課題ではあるが，たとえ正規分布に従わなくとも，分布が特定できれば，その分布に従った形で以下に説明する方法と同様のやり方で数理モデルを構築すればよい．

このように正規分布に従うというモデルを考え，選手 i の j 区でのタイムを t_{ij} と表記すると，t_{ij} は平均 T_{ij} 標準偏差 $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ の正規分布に従う確率変数となる．前節と同様に x_{ij} にて選手の割り当てを表現すると，合計タイムは，割り当てられた選手の各区間でのタイムの和 $t_s=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} t_{ij}x_{ij}$ となる．ここでさらに，各選手のタイム t_{ij} がそれぞれ独立であると仮定すると，正規分布の和の分布が正規分布となるという一般的な性質から[3]，選手の割り当てが決まるとその合計タイム t_s は $T_s=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} T_{ij}x_{ij}$ を平均とし，$\boldsymbol{\sigma}_s=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} \boldsymbol{\sigma}_{ij}{}^2 x_{ij}}$ を標準偏差とする正規分布に従うこととなる．すなわち，$t_s \sim N(T_s, \boldsymbol{\sigma}_s{}^2)$ となる．ここで，目標タイムを T_A を設定すると，合計タイム t_s が目標タイム T_A を上回る確率は，

$$\Pr(t_s < T_A)=\int_{-\infty}^{T_A} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\boldsymbol{\sigma}_s} e^{-\{(t-T_s)^2/2\sigma\pi_s^2\}}\,dt \tag{5}$$

と計算することができる．これを図示すると図1のようになり，目標を達成する確率は，合計タイムの分布において T_A より小さい部分の面積に当たる．ただし，図1では1区が選手3，2区が選手2，3区が選手4，4区が選手5，5区が選手1となる場合（「走順32451」と記す）でのイメージを表している．

このように考えると，例えば，優勝ラインを目標タイムとして設定したら，優勝する確率を最大化するような選手の選定を定式化できる．現実には，目標タイムは競技中もレース展開により変わ

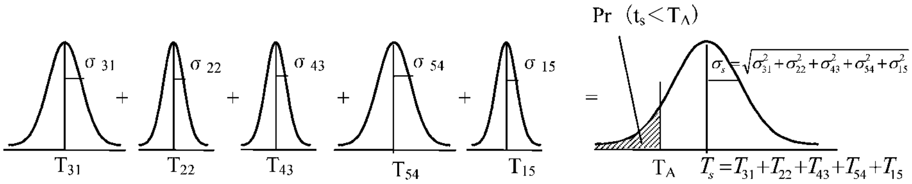

図１　各選手のタイム t_{ij} の確率分布と合計タイム t_s の確率分布のイメージ（走順32451の場合）

表１　選手の各区間のタイムの平均とばらつきの予想（平均 T_{ij} ± 標準偏差 σ_{ij}）

	１　区	２　区	３　区	４　区	５　区	計
選手１	64.20±0.50	69.60±0.54	64.50±0.50	55.50±0.43	70.20±0.54	324.00±1.13
選手２	65.27±0.50	70.76±0.54	65.58±0.50	56.43±0.43	71.37±0.54	329.41±1.13
選手３	65.27±1.49	70.76±1.61	65.58±1.49	56.43±1.28	71.37±1.63	329.41±3.37
選手４	66.34±0.50	71.92±0.54	66.65±0.50	57.35±0.43	72.54±0.54	334.80±1.13
選手５	66.34±1.49	71.92±1.61	66.65±1.49	57.35±1.28	72.54±1.63	334.80±3.37
選手６	66.34±2.48	71.92±2.69	66.65±2.49	57.35±2.14	72.54±2.71	334.80±5.61
選手７	67.41±0.50	73.08±0.54	67.73±0.50	58.28±0.43	73.71±0.54	340.21±1.13
選手８	68.48±2.48	74.24±2.69	68.80±2.49	59.20±2.14	74.88±2.71	345.60±5.61

単位：分

ってくるものであるかもしれないが，今回は事前に設定された値として考える．以上まとめると

目的関数：Max　$\Pr(t_s < T_s)$　　　　(6)

制約条件：(2)(3)(4)と同じ．

という 0–1 計画問題を解くことで，計算上最適な選手の割り当てが算出できることとなる．ちなみに，$z=(t_s-T_s)/\sigma_s$ と標準化してやると，(5)は標準正規分布において z 以下の値をとる確率と同様になるので，目的関数を Min z としても同じ結果を得ることができる．なお，ここでは目標タイム T_A はひとつの数値として設定しているが，目標タイム T_A も確率変数と考えた定式化も可能であるが，本稿ではこれ以上細かく立ち入らないこととする．

2.3　手法の説明のための数値例

上記の方法をより分かり易く説明するために，具体的な数値を用いて説明する．数値例としては，短距離のリレーでもよいのであるが，ここでは５区からなる駅伝競走を例として考える．候補選手は８名として，各選手の各区間での予想として平均 T_{ij} ならびに標準偏差 σ_{ij} を表１に平均±標準偏差という形で示している．

表１の右端の“計”の欄は，各選手について各区間タイムを合計した際の，平均と標準偏差を示しており，選手を総合的に比較する際の指標となる．すなわち，選手１は平均が324.00分と最短でありかつ標準偏差も1.13分と小さく安定した実力が期待できる．選手２と３は平均は選手１にやや劣り共に329.41分であるが，選手２の方が標準偏差が小さいので安定している．逆に選手３の方が意外性があるともいえる．他の選手についても同様に，平均と標準偏差が示されている．もし，平均の値が小さいほど優れており，平均が同じときは標準偏差が小さい方が安定性が高く優れていると考えるならば，表１で選手は優れている順に並んでいるといえる．この数値データを用いて，上述の手法に従い計算を行った結果を次節に述べる．

3．結　　果

3.1　タイムが確定しているモデルでの計算結果

まず，選手 i の j 区でのタイムの平均 T_{ij} のみに着目して，2.1節にて述べたタイムが確定しているモデルにて最適な選手の選定を試みよう．具

体的には，$m=8$，$n=5$ とおき(1)～(4)式を用いて，算出することとなる．計算の結果，今回の例では，最短時間は330.23分となる．最適な選手の割り当てとしては，走順32451が解のひとつとなり最短時間が得られる．これは，選手１から順に時間のかかる区間に配置していった場合の合計タイムと一致する．ちなみに今回の例では，他にも最短を実現する走順は存在し，走順23451や走順32651など全部で24通りある．

3.2　タイムのばらつきを考慮したモデルでの計算結果

次に，2.2節で述べたタイムのばらつきを考慮したモデルを用いた際の計算結果について述べる．具体的な計算は(2)～(4)式で $m=8$，$n=5$ とおいて，(5)式を最大化することで算出される．この場合は，前節と異なり，目標タイム T_A をどのように設定するかで，最適な選手の選定結果は変わってくる．目標タイムおける最適走順の例な

表２　目標タイムおける最適走順の例と合計タイムならびに目標達成の確率

目標タイム T_A（分）	最適走順例	最適走順でのタイムの平均 T_s（分）	最適走順でのタイムの標準偏差 σ_s（分）	目標達成の確率 Pr（$t_s < T_A$）	走順32451での目標達成の確率	最適と32451との確率の差
310	58316	334.20	4.38	0.000	0.000	0.000
311	58316	334.20	4.38	0.000	0.000	0.000
312	38126	332.98	4.15	0.000	0.000	0.000
313	38126	332.98	4.15	0.000	0.000	0.000
314	38126	332.98	4.15	0.000	0.000	0.000
315	38126	332.98	4.15	0.000	0.000	0.000
316	38126	332.98	4.15	0.000	0.000	0.000
317	53126	330.57	3.55	0.000	0.000	0.000
318	53126	330.57	3.55	0.000	0.000	0.000
319	53126	330.57	3.55	0.001	0.000	0.001
320	53126	330.57	3.55	0.001	0.000	0.001
321	53126	330.57	3.55	0.003	0.000	0.003
322	53126	330.57	3.55	0.008	0.000	0.008
323	53126	330.57	3.55	0.017	0.000	0.016
324	23156	330.42	3.47	0.032	0.002	0.030
325	31256	330.34	3.43	0.059	0.008	0.051
326	31256	330.34	3.43	0.102	0.026	0.076
327	36251	330.32	3.41	0.166	0.068	0.098
328	23651	330.23	3.31	0.251	0.152	0.100
329	23651	330.23	3.31	0.356	0.284	0.071
330	23651	330.23	3.31	0.472	0.456	0.016
331	32451	330.23	2.17	0.641	0.641	0.000
332	32451	330.23	2.17	0.794	0.794	0.000
333	32451	330.23	2.17	0.900	0.900	0.000
334	32451	330.23	2.17	0.959	0.959	0.000
335	32451	330.23	2.17	0.986	0.986	0.000
336	72431	331.45	1.65	0.997	0.996	0.001
337	72431	331.45	1.65	1.000	0.999	0.000
338	72431	331.45	1.65	1.000	1.000	0.000
339	72431	331.45	1.65	1.000	1.000	0.000
340	72431	331.45	1.65	1.000	1.000	0.000

らびにそのときの合計タイムの平均と標準偏差，目標達成の確率の計算結果を表２に示す．

表２では，目標タイムを厳しく設定すると目標達成の確率が小さくなり，低く設定すると達成の確率が高くなることが定量的に明示されている．例えば，この例では，目標タイムを318分以下とすると達成する確率はほぼ０であるが，目標タイムを337分以上とすると，ほぼ確率１で達成できる．また，目標タイム310分を達成する確率はほとんど０ではあるが，その中でも走順58316が最適であることなどが示されている．ちなみにこれは，走順58316は合計タイムの平均が334.20分と，前節の確定モデルでの最短値330.23分よりも劣るが，標準偏差が4.38分と大きく，意外性のある選手を積極的に起用することで，目標達成の確率が，極僅か高くなっていることによる．表２より目標タイムの設定が緩和されるにつれて，合計タイムの平均 T_A と標準偏差 $\boldsymbol{\sigma}_s$ の値が共に小さくなるような走順が最適となっている．ただ，目標タイムが336分より長く設定されると，平均が331.45分と増加しても，標準偏差がさらに小さくなるような走順72431が最適となっている．これは，平均値が大きくなってもより安定した意外性の小さい選手を選ぶことで目標達成の確率を高くすることによる．表２の計算結果を図示すると，図２のようになる．

4．考　　察

4.1　タイムが確定しているモデルとばらつきを考慮したモデルとの比較

以上で示したように，今回の例では，タイムが確定しているモデルで合計タイムが最短となる選手選定をした場合と，タイムのばらつきを考慮したモデルで目標達成する確率を最大にするような選手選定をした場合とで違いがあることがわかった．そこで，両者でどの程度の差があるか検討してみた．表２の右側２つの欄に，前者のモデルで合計タイムが最短となる走順32451を用いた際の目標タイム達成の確率，ならびに後者のモデルでの最適走順との目標達成の確率差を計算した結果

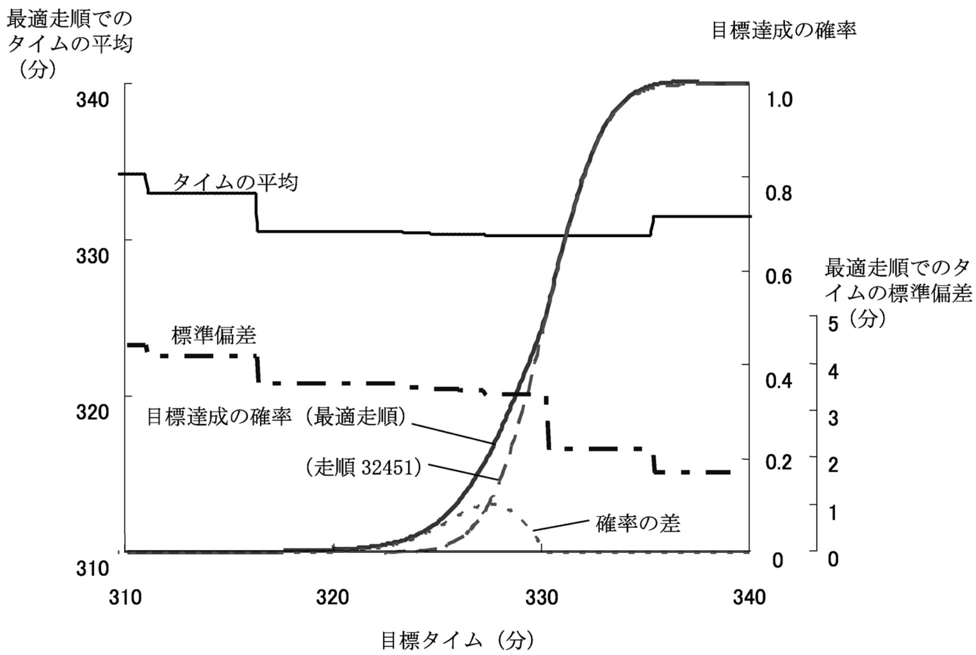

図２　目標タイムおける最適走順でのタイムの平均と標準偏差，および目標達成の確率

を示している．これより，目標タイムが320分以下ないしは331分以上の時は，両者の差はほとんど0に近いが，目標タイムがそれらの間にあるときは，両者に差がみられ，328分あたりでその差が最大で0.1となっている．この確率0.1の差が現場でどの程度の影響があると考えるかは，監督・コーチの判断によるであろう．なお，この328分前後では，合計タイムの平均を最短の330.23分に維持しながら，目標達成の確率が最大となるような標準偏差の大きさが適当な走順が最適となる．すなわち，目標タイムが厳しく設定されたときには，タイムが確定しているモデルでの最適走順32451は，標準偏差が2.71分と固定されているが，ばらつきを考慮したモデルでは，走順31256（$\boldsymbol{\sigma}_s = 3.43$），走順36251（$\boldsymbol{\sigma}_s = 3.41$），走順23651（$\boldsymbol{\sigma}_s = 3.31$）などの方が標準偏差の大きく意外性のある走順が選択でき，目標達成の確率が高くなる．逆に，目標タイムが易しく設定されたときには，意外性が小さく安定性の高い走順32451（$\boldsymbol{\sigma}_s = 2.17$）や走順72431（$\boldsymbol{\sigma}_s = 1.65$）が目標達成の確率が高くなる．このように，数理的手法を用いると定量的かつ具体的に結果を示すことができる．

4.2　数値化にあたっての工夫の例

今回の例では，選手を評価する際に各区間での選手のタイムの平均と標準偏差を予想する必要があった．もちろん，データが豊富にあり，統計的に平均値と標準偏差を推定することが可能ならば，その値を用いると客観性が増すと言える．現実的には，トラック競技ならばある程度同じ条件で計時したデータが得られるであろうが，駅伝などでは，コースの状況や天候などにも左右されるし，競技会と同じコースで練習できるとは限らない．長距離の記録は繰り返しデータを取ることも困難であろう．そういう意味では，駅伝などでは，予想値は主観的にならざるを得ないといえる．

このような場合は，例えば，選手のタイムを平均とばらつきの2つの基準で5段階に主観的に評価し，それぞれの値に，実際の数値を当てはめることで，T_{ij}，$\boldsymbol{\sigma}_{ij}$の予想値をつくるという方法が有効であろう．

例えば，図3に示すように，縦軸に選手の競技力レベルを確定的な要素と考えて5つのグループに分けて評価する．また，横軸に選手の意外性を5つのグループに分けて評価する．次いで，それ

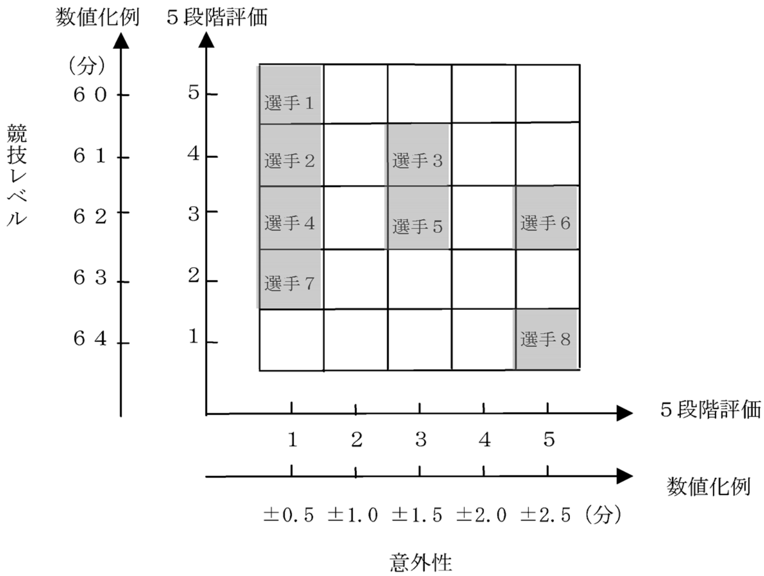

図3　主観的な選手評価を数値化するための一例

ぞれのグループを主観的でよいので数値化する．例えば，競技力レベルが5点の選手は，20 km に換算して，60分，4点の選手は，61分というように，値を決めてやるとよい．意外性についても同様である．このように，選手を5段階評価でマッピングしたものを数値化して，予測値として利用してもよい．この数値化への変換の仕方は，おそらく監督・コーチにより違いがでてくるので，この変換自体がひとつのノウハウになると考えられる．例えば，坂道に強いなどというような選手の特長をうまく数値化するノウハウを作ることなどが重要であろう．ちなみに今回は，図3に示した数値化例にて変換することで，表1の予測値を作成している．

5．結　　論

本研究では，候補選手からどの選手を選抜し，どのように配置するかという問題について，従来のタイムが確定しているモデルで最適な選手配置をするだけでなく，他の指標を考慮した際にどのように選抜するかということを提案した．他の指標としては，ここでは，選手のタイムのばらつきを考慮したうえで，選手を選定した際に，ある目標タイムを実現する確率を最大化するという意味での最適な選手を選定する方法を提示した．

数値例として，5区からなる駅伝があり8選手から5名を選抜し，区間に割り振るという問題を想定した際の，最適な選手配置を，本手法を用いて具体的に提示した．

今回，タイムが正規分布に従い，また独立であるという前提でモデル化したが，データを充実させることにより，現実的な確率分布などが得られ，実際の試合データとの比較などを通じて，モデルの妥当性を検討することが可能になる．現状では，同一選手のタイムの分析については，トレーニング論の視点でなされている例[1]などがあるものの，タイムの分布がどのようになるかというような研究は少ないので，モデル改善のための今後の課題となるであろう．

また，今回説明用の例として駅伝を挙げたが，他のリレー競技にも同様の手法を適用することができると考えている．ただし，リレー競技の場合は，選手の走力だけでなくバトンパスも影響してくることが知られているので[2]，Heffley, D. R.[6] が提案しているバトンパス局面の時間を考慮した計算式を本モデルに繰り入れる必要があろう．なお短距離では，同条件で繰り返しデータを取ることが長距離と比較して用意であるあるため，データの客観性・信頼性は高まると思われる．

また，選手間のタイムの分布の独立性については，ある走者の活躍が次の走者に影響するか否か，その効果がどの程度かというような検討も，本モデルに共分散の項の導入の可否の検定などにより，議論することが可能となるかもしれない．

今回示した数理的手法は，現実の複雑な状況を単純化することで，ある程度現実との乖離は出るものが，数値的に計算の前提の下で最適な解が明確に算出されるという利点もある．このような手法を基に算出された選手選抜・配置を参考にしながら，監督・コーチは独自の考えを織り込むことができると思われる．今後，このような数理的手法が競技現場で広く活用されるよう工夫していきたいと考えている．

文　　献

1） 魚住廣信編（2001）*L. P. マトヴェーエフ論文集*．東京，H.S.S.R. プログラムス．

2） 杉浦雄策，吉儀　宏，佐久間和彦，松永成旦，花岡　大（1998）国内一流選手のバトンパス局面における時間・速度および疾走能力が 4×100 m リレーのレースタイムの及ぼす影響．*陸上競技研究* 33, 36–46.

3） 宮川雅巳（1998）*統計技法*．東京，共立出版，25–26.

4） Hannan, E. L.（1979）Matching Swimmers to Events in Championship Swimming Meet. Computers & Operations *Research* 6, 225–231.

5） Hannan, E. L. and Chen, C. D.（1981）Assigning swimmers to events in a dual swimming meet. *INFOR* 19, 162–171.

6） Heffley, D. R.（1977）Assigning Runners to a Relay

Team. In *Optimal Strategies in Sports*.（S. P. Ladany and R. E. Machol, eds.）, Amsterdam: North-Holland, 169–171.

7）　Machol, R. E.（1970）An application of the Assignment Problem. *Operations Research* 18, 745–746.

8）　森　雅夫，森戸　晋，鈴木久敏，山本芳嗣（1991）*オペレーションズリサーチＩ*．東京，朝倉書店，121–149.

（平成18年10月10日　受付）
（平成18年12月７日　受理）