論文・事例研究

野球チームのラインナップ選定のための数理的一手法—日本代表チームの選定を例として—

廣津 信義，宮地 力

1. はじめに

1980年以降，オリンピックへのプロ選手の参加が認められることとなり，各競技でプロ選手を主軸としたチームが結成されるようになった．中でも，1992年バルセロナオリンピックのバスケットボールでは，全米トッププロからなるドリームチームが結成され，当時大きな話題となった．野球についても，2002年に長嶋茂雄氏が日本代表監督に就任したことにより，2004年のアテネオリンピックでは，プロ野球の有力選手を大幅に起用したドリームチームが結成されるといわれている．しかしながら，優れた選手が多いため，逆にどのようなラインナップとすべきか，代表監督の判断は難しいといえる．

まず，選手の評価という点についていえば，「走攻守」三拍子揃った選手が優れているといわれるが，走・攻・守のどれを優先すべきか難しい．「攻」に当たる打撃能力だけをとっても，評価指標として，打率，打点，本塁打数，出塁率，長打率などがあり，どれに重きをおいて選抜すべきか，その判断は難しいであろう．さらに，選手個人の評価だけでなく，ラインナップとしての評価を考えると，問題としてはますます難しくなる．

このような問題に対しては，野球の試合を数理モデル化して検討するという手法が有効である．数理的な手法の野球への応用は，古くはLadany and Machol [1]などで，また最近ではBennett[2]により紹介されている．国内でも竹内・藤野[3]やオペレーションズ・リサーチ誌（上田・住舎[4]，武井・瀬古・穴太[5]，木下[6]，橋本[7]，間淵[8]）などで取り上げられている．

ひろつ のぶよし，みやじ ちから
国立スポーツ科学センター
〒115-0056 北区西が丘 3-15-1
受付 03.10.8 採択 04.5.18

打撃能力の評価という点に限っていえば，以前からいくつかの手法ならびに評価指標が考案されており，例えば，Lindsey[9]は，1塁打，2塁打，3塁打，本塁打の重みを，1：2：3：4とするのではなく，得点への寄与という観点から1：1.97：2.56：3.42とすることを提案している．同様の方法は，Pankin[10]やThone and Palme[11]により，補正ないしはさらに発展した形で提示されている．

一方，D'Esopo and Lefkowitz[12]は，同一選手が繰り返し打席に立ったときの1イニングでの期待得点値を評価指標としたスコアリング・インデックス(SI) を考案している．また，Cover and Keilers[13]は，同様な指標として，同一選手が繰り返し打席に立ったときの1試合での期待得点値で打者を評価するOERA (Offensive Earned Run Average) を提案しており，木下[14]による詳しい紹介もなされている．

しかしながら，これらのモデルは，選手個人の打撃能力の評価指標とはなるが，チームとしてどの選手を選抜しどのようなラインナップとすべきか，という問いには直接は答えてくれない．

このような問題に答えることが，本研究の主な目的である．すなわち，選手の打撃能力を評価し，それをチームとしてのラインナップの評価へとつなげるような選定手法を提示する．この目的を実現するため，本研究では，SIやOERAにより選手を評価するだけではなく，これらの指標を，9選手からなるラインナップによる1試合での期待得点値が計算できるように拡張する．このようにして得られた，「ラインナップとしてのSI」(以下「SIL (Scoring Index of the Line-up)」と略す) や，「ラインナップとしてのOERA」(以下「OERAL (OERA of the Line-up)」と略す) と呼ぶことができる期待得点値を基準にしてラインナップを評価し，それを最大化する最適ラインナップを求める手法を提案する．

適用事例として，アテネオリンピックの日本代表選

手をプロ野球選手から選抜すると想定した際の，最適なラインナップを，本手法を用いて具体的に提示する．当然，大会に際しての選手のコンディションや，関連する組織の意向など多くの要因も絡むため，選抜対象となる選手やその選抜基準を単純に決定することはできない．しかし，2002 年度の打撃成績を基に，主なプロ野球選手を網羅して評価し，具体的なラインナップとして明示することで，数理的な手法の有用性を論じる際の参考事例となれば幸いである．

2. スコアリング・インデックス（SI）

本節では，打撃能力の評価指標として従来から用いられているSIについて述べる．SIは，同一打者が繰り返し打席に立ったとしたときの1イニングでの期待得点値に相当する．SIの算出に当たっては，打撃に基づく走者の進塁がD'Esopo and Lefkowitzモデル[12]に基づくとしている．このモデルは，表1に示すようなわずか六つの打撃結果と進塁規則により定義される．現実には他の打撃結果や進塁が起こることはいうまでもないが，彼らのテストによると，この驚くほど単純なモデルにより，実際の得点が7%程度の誤差で予測できている．

SIは定義より，各選手の打撃確率（1塁打，2塁打，3塁打，本塁打，四球，アウトとなる確率）を決めれば計算できる．ただし，D'Esopo and Lefkowitzが提示している計算手法は，ラインナップとしての評価へと拡張することまでを視野に入れると，必ずしも簡便とはいえない．そこで本節では，選手の打撃確率に従う試合の進行を連立方程式にて表現し，それを解くことによりSIを算出するという別法を提示する．

表1　D'Esopo and Lefkowitz モデル

打撃結果	進塁規則
1塁打	打者は1塁へ．1塁走者は2塁へ進塁する．2・3塁の走者は得点する．
2塁打	打者は2塁へ．1塁走者は3塁へ進塁する．2・3塁の走者は得点する．
3塁打	打者は3塁へ．すべての走者は得点する．
本塁打	打者及びすべての走者が得点する．
四球	打者は1塁へ．それに伴い走者は進塁する．
アウト	どの走者も進塁しない．

表2　イニング内の状態の定義

		走者の状態							
アウト数	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	9	10	11	12	13	14	15	16
	2	17	18	19	20	21	22	23	24

●：走者

まず，表2に示すようにイニング内の状態を，アウト数と走者の状態により区別し，24状態として定義する．各状態から別の状態へは，6通りの打撃結果に応じて推移するが，この状態推移は各打撃結果を導く確率に従う．進塁モデルとしてD'Esopo and Lefkowitzモデルを用いると，状態推移は，表2に示す24状態の番号を行・列の各々の順に対応させると，次の行列$\mathbf{Q}$で表すことができる．

$$\mathbf{Q}=\begin{bmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \mathbf{A} & \mathbf{B}\\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}\end{bmatrix} \tag{1}$$

ここで，$\mathbf{A}$と$\mathbf{B}$は

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}P_H & P_S+P_W & P_D & P_T & 0 & 0 & 0 & 0\\ P_H & 0 & 0 & P_T & P_S+P_W & 0 & P_D & 0\\ P_H & P_S & P_D & P_T & P_W & 0 & 0 & 0\\ P_H & P_S & P_D & P_T & 0 & P_W & 0 & 0\\ P_H & 0 & 0 & P_T & P_S & 0 & P_D & P_W\\ P_H & 0 & 0 & P_T & P_S & 0 & P_D & P_W\\ P_H & P_S & P_D & P_T & 0 & 0 & 0 & P_W\\ P_H & 0 & 0 & P_T & P_S & 0 & P_D & P_W\end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$\mathbf{B}=P_{out}\mathbf{I} \tag{3}$$

となる．$P_S, P_D, P_T, P_H, P_W, P_{out}$はそれぞれ，1塁打，2塁打，3塁打，本塁打，四球，アウトとなる確率であり，$\mathbf{I}$は8×8の単位行列である．例えば，状態15（1アウト，走者2・3塁）で，1塁打を放ったとき，2・3塁走者は本塁に生還するので，状態10（1アウト，走者1塁）に推移する．これは，行列$\mathbf{Q}$の第15行・第10列（$\mathbf{A}$の第7行・第2列に相当）の要素P_Sの確率にて実現する．

さらに，状態iからイニング終了までの得点の期待値をv_i，状態iでの打席で直接得ることができる得点の期待値をr_i，状態jに推移する確率をq_{ij}と定義する．ここで状態iでの打席に注目しよう．この打席ではまず直接r_i点が期待できる．その結果，確率q_{ij}で次は状態jでの打席となる．これを状態iから見ると，状態jを経由して$q_{ij}\cdot v_j$点がイニング終了まで期待できることとなる．次打席として可能な状態jをすべて考慮することにより，状態iからイニング終了までの得点の期待値は，その打席で直接期待できる得点r_iと，次打席以降に期待できる得点$\sum_j q_{ij}\cdot v_j$との和となる．すなわち，v_iは次の関係式を満たす．

$$v_i=\sum_j q_{ij}\cdot v_j+r_i$$

ここで，v_i(i=1, …, 24) を 24×1 ベクトル $\mathbf{V}=(v_1, v_2, \cdots, v_{24})^T$ の要素としてまとめると，

$$\mathbf{V}=\mathbf{QV}+\mathbf{R} \tag{4}$$

と表現できる．ただし，$\mathbf{R}$ は r_i を要素とする 24×1 ベクトルであり，

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix}\mathbf{r}\\\mathbf{r}\\\mathbf{r}\end{bmatrix},$$

$$\mathbf{r}=\begin{bmatrix}P_H\\2P_H+P_T\\2P_H+P_T+P_D+P_S\\2P_H+P_T+P_D+P_S\\3P_H+2P_T+P_D+P_S\\3P_H+2P_T+P_D+P_S\\3P_H+2P_T+2P_D+2P_S\\4P_H+3P_T+2P_D+2P_S+P_W\end{bmatrix} \tag{5}$$

というように，各要素が八つの走者状態の一つに対応する 8×1 ベクトル $\mathbf{r}$ を三つ並べることによって表現される．例えば，$\mathbf{r}$ の第 1 要素 r_1 は，“ノーアウト走者なし”から直接期待できる得点値に相当するので，本塁打を打つ確率 P_H(=1 点×P_H) となる．注目すべきところは，(4)式が v_i(i=1, …, 24) を未知数とする連立一次方程式と同等であり，$P_S, P_D, P_T, P_H, P_W, P_{out}$ が既知ならば解くことができる点である．なお，SI はイニング最初の状態での期待得点値 v_1 に相当する．

以上，SI について述べてきたが，同様な評価指標である OERA についても言及しておく．OERA は，同一選手が繰り返し打席に立ったときの期待得点値で評価するという点で SI と同じといえる．しかも，SI が 1 イニングでの期待得点値に対して，OERA は 1 試合での期待得点値という見かけ上の違いがあるが，実際の計算では 1 イニング当たりの期待得点値を 9 倍しているので，基本的に同等な指標である．SI と OERA との本質的な違いは，それらの進塁モデルの違いによる．具体的には，OERA では 1 塁打と 2 塁打を長打として扱う．すわなち，OERA の算出は，1 塁打で 1 塁走者は 3 塁まで進み，2 塁打では 1 塁走者は本塁に生還するという進塁モデルに基づく．本稿では SI を基に以下に検討を進めていくが，OERA 値も参考までに算出し考察することとする．なお，OERA の算出に当たっては，その進塁規則の違いに応じて，行列 $\mathbf{A}$ ((2)式) とベクトル $\mathbf{r}$ ((5)式) の要素を修正し，1 イニングでの期待得点値を求めた後に，それを 9 倍すればよい．

次節では，以上述べた計算法を，選手個人ではなく，チームとしての打撃能力を評価するために拡張していく．

3. ラインナップとしてのスコアリング・インデックス (SIL)

拡張に当たって，まず 9 イニングに対応できるように，216(=24×9)×216 行列 $\mathbf{P}$ を

$$\mathbf{P}=\begin{array}{c|c} & \begin{matrix}1 & 2 & * & * & * & 9\end{matrix}\\ \begin{matrix}1\\2\\*\\*\\*\\8\\9\end{matrix} & \begin{bmatrix}\mathbf{Q} & \mathbf{Q}_0 & & & & \\ & \mathbf{Q} & \mathbf{Q}_0 & & & \\ & & * & * & & \\ & & & * & * & \\ & & & & * & * \\ & & & & \mathbf{Q} & \mathbf{Q}_0\\ & & & & & \mathbf{Q}\end{bmatrix}\end{array} \tag{6}$$

で定義する．ここで，行列外の数はイニングを示す．$\mathbf{Q}$ と $\mathbf{Q}_0$ は 24×24 行列であり，それぞれイニング内での推移，次イニングへの推移を表現している．なお，D'Esopo and Lefkowitz モデルでは $\mathbf{Q}$ は(1)式で表され，$\mathbf{Q}_0$ は

$$\mathbf{Q}_0=\begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0}\\\mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0}\\\mathbf{F} & \mathbf{0} & \mathbf{0}\end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}=\begin{bmatrix}P_{out} & 0 & * & * & * & 0\\ * & * & & & & *\\ * & * & & & & *\\ * & * & & & & *\\ P_{out} & 0 & * & * & * & 0\end{bmatrix} \tag{7}$$

となる．ただし，上式で $\mathbf{F}$ は，2 アウトで打者が凡退した後，次イニングの最初の状態 (状態 1) へ移ることを表すための 8×8 行列である．

さらに，9 人の異なる選手 x_n(n=1, …, 9) の打撃を表現するため，216×216 行列 $\mathbf{P}_n$ を

$$\mathbf{P}_n=\begin{array}{c|c} & \begin{matrix}1 & 2 & * & * & * & 9\end{matrix}\\ \begin{matrix}1\\2\\*\\*\\*\\8\\9\end{matrix} & \begin{bmatrix}\mathbf{Q}_n & \mathbf{Q}_{0n} & & & & \\ & \mathbf{Q}_n & \mathbf{Q}_{0n} & & & \\ & & * & * & & \\ & & & * & * & \\ & & & & * & * \\ & & & & \mathbf{Q}_n & \mathbf{Q}_{0n}\\ & & & & & \mathbf{Q}_n\end{bmatrix}\end{array} \tag{8}$$

と定義する．$\mathbf{Q}_n$ と $\mathbf{Q}_{0n}$ の要素は，選手 x_n(n=1, …, 9) 固有の打撃確率で構成される．

ここで，選手 x_n(n=1, ⋯, 9)が，状態 i で打席に立ったとき，試合終了までの期待得点値を v_{ni}，直接期待できる得点値を r_{ni}，状態 j に推移する確率を P_{nij} とする．今，選手 x_n が状態 i で打席に入ったとすると，この打席でまず直接 r_{ni} 点が期待できる．その結果，確率 P_{nij} で次打者 x_{n+1}(n=9 のとき n+1=1)は状態 j での打席となる．これを，選手 x_n が状態 i で打席に立った場面から見ると，状態 j を経由して $P_{nij}\cdot v_{n+1j}$ 点が試合終了まで期待できることとなる．次打者の打席として可能な状態 j をすべて考慮することにより，選手 x_n が状態 i で打席に立ってから試合終了までの期待得点値は，直接期待できる得点 r_{ni} と，次打者以降に期待できる得点 $\sum_j P_{nij}\cdot v_{n+1j}$ の和となる．すなわち，

$$v_{ni}=\sum_j P_{nij}\cdot v_{n+1j}+r_{ni}$$

という関係式を得ることができる．ここで v_{ni}(i=1, ⋯, 216)を 216×1 ベクトル $\mathbf{V}_n$ の要素としてまとめると，

$$\mathbf{V}_n=\mathbf{P}_n\mathbf{V}_{n+1}+\mathbf{R}_n \tag{9}$$

となる．なお，$\mathbf{R}_n$ は r_{ni} を要素とする 216×1 ベクトルである．

野球では，9 人の打者が順番に打席に立つので，打順に従い(9)式を並べると，次の式を得ることができる．

$$\begin{bmatrix}\mathbf{V}_1\\ \mathbf{V}_2\\ \mathbf{V}_3\\ *\\ *\\ *\\ \mathbf{V}_8\\ \mathbf{V}_9\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{P}_1 & & & & & & \\ & \mathbf{0} & \mathbf{P}_2 & & & & & \\ & & \mathbf{0} & \mathbf{P}_3 & & & & \\ & & & * & * & & & \\ & & & & * & * & & \\ & & & & & * & * & \\ & & & & & & \mathbf{0} & \mathbf{P}_8\\ \mathbf{P}_9 & & & & & & & \mathbf{0}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{V}_1\\ \mathbf{V}_2\\ \mathbf{V}_3\\ *\\ *\\ *\\ \mathbf{V}_8\\ \mathbf{V}_9\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\mathbf{R}_1\\ \mathbf{R}_2\\ \mathbf{R}_3\\ *\\ *\\ *\\ \mathbf{R}_8\\ \mathbf{R}_9\end{bmatrix} \tag{10}$$

結局，上式は v_{ni}(n=1, ⋯, 9；i=1, ⋯, 216)を未知数とする 1,944 (=9×216) 元連立一次方程式と同等であり，各選手の $P_S, P_D, P_T, P_H, P_W, P_{out}$ が既知ならば解くことができる．具体的には，(10)式の行列が疎であるため，ガウス・ザイデル法などの数値解法を用いて解を求めることができる（例えば，戸川[15]）．SIL は，試合開始時に 1 番打者が状態 1（1 回ノーアウト走者なし）で打席に立ったときの試合終了までの期待得点値 v_{11} に等しい．

なお，期待得点値は，Bukiet et al.[16]が提示しているようなアルゴリズムでも算出できる．彼らの手法を要約すると次のようになる．まず，試合中のある得点とある状態に至る確率を，要素とする行列を作る．そのため，行として，各イニング時点の得点を 0～20 点とし 9 イニング分並べた 189 行 (=21 点×9 イニング) を設定する．列としては，イニング内の 24 状態を当て，3 アウトの状態を第 25 列目とする．このように行を得点数，列を状態とした 189×25 行列において，試合開始時の得点・状態を表した行列 $\mathbf{U}_0$ を，

$$\mathbf{U}_0=\begin{array}{cc} & \begin{array}{ccccc}1 & 2 & * & * & 25\end{array}\\ \begin{array}{cc}1 & 0\\ & 1\\ & *\\ & 20\\ 2 & 0\\ & 1\\ & *\\ & 20\\ * & 0\\ * & *\\ * & 20\\ 9 & 0\\ & 1\\ & *\\ & 20\end{array} & \left[\begin{array}{ccccc}1 & 0 & * & * & 0\\ 0 & 0 & * & * & 0\\ * & & & & *\\ 0 & 0 & * & * & 0\\ \hline 0 & 0 & * & * & 0\\ 0 & & & & *\\ * & & & & *\\ 0 & 0 & * & * & 0\\ \hline 0 & 0 & * & * & 0\\ * & * & * & * & *\\ 0 & 0 & * & * & 0\\ \hline 0 & 0 & * & * & 0\\ 0 & & & & *\\ * & & & & *\\ 0 & 0 & * & * & 0\end{array}\right]\end{array}$$

とする．ここで，試合は確率 1 で“1 回ノーアウト走者なし”から始まるので，試合開始時に当たる $\mathbf{U}_0$ は左上隅の要素のみ 1 で他要素は 0 である．

次に，n 番打者が攻撃終了したときの状態を 189×25 行列 $\mathbf{U}_n$ で表現する．n 番打者の推移行列は(8)式内の $\mathbf{Q}_n$ で表されるが，これをさらに得点 0，1，2，3，4 点を導く要素別に行列 $\mathbf{Q0}_n$, $\mathbf{Q1}_n$, $\mathbf{Q2}_n$, $\mathbf{Q3}_n$, $\mathbf{Q4}_n$ へと分解し（$\mathbf{Q}_n=\mathbf{Q0}_n+\mathbf{Q1}_n+\mathbf{Q2}_n+\mathbf{Q3}_n+\mathbf{Q4}_n$），$\mathbf{U}_n$ の要素に対して各イニング毎に

$$\begin{aligned}\mathbf{U}_{n+1}(\text{j 行})=&\ \mathbf{U}_n(\text{j 行})\cdot\mathbf{Q0}_n+\mathbf{U}_n(\text{j}-1\text{ 行})\cdot\mathbf{Q1}_n\\ &+\mathbf{U}_n(\text{j}-2\text{ 行})\cdot\mathbf{Q2}_n+\mathbf{U}_n(\text{j}-3\text{ 行})\cdot\mathbf{Q3}_n\\ &+\mathbf{U}_n(\text{j}-4\text{ 行})\cdot\mathbf{Q4}_n\end{aligned} \tag{11}$$

という演算を施せば，得点の積算を考慮した上での n 番打者の打撃による状態推移が表現でき，$\mathbf{U}_{n+1}$ が計算できる．なお，各イニングで 3 アウトとなったら得点の増減はなく，次のイニングの“ノーアウト走者なし”の状態へ移行するため，演算の際，

$$\mathbf{U}_{n+1}(\text{j}+21\text{ 行 1 列})=\mathbf{U}_{n+1}(\text{j 行 25 列}) \tag{12}$$

というように，各イニングで 3 アウトの状態に至った確率を 21 行下 24 列左に持っていく必要がある．

1 試合での得点分布は，1 番打者から始めて順に上記の演算を実行していくと，当初左上隅にあった 1 が行列内を分散していき，最終的には，試合終了時に当たる 9 イニング目（169～189 行）の第 25 列目に再集積されていく．ここの総和が 1 に近づいたとき，その

行番号に相当する得点値が試合終了時にその得点を得る確率に相当するので，結局，その試合での得点分布を得ることができる．得点の期待値はこの分布の平均値を求めることで導くことができる．

以上，Bukiet et al. の手法を紹介したが，上記のような演算でいったん1試合での得点分布を導出し，さらにその分布の平均値を求めるというやり方よりは，今回提示した手法の方がより直接的であり簡潔であるといえるであろう．

以上，SI ならびに SIL の算出法を詳述したが，今回のラインナップの選定に当たっては，対象となるプロ野球選手全員の SI を計算し，得点能力が高いといえる SI 上位の選手から選抜していきラインナップを選定した．次いで，ラインナップで9！通りのすべての打順について SIL を計算し，これを最大とする打順を策定することで最適ラインナップを求めた．

4. 適用結果

4.1 スコアリング・インデックス

前節で述べた方法に従い，2002 年度 100 打数以上あったプロ野球選手に，大リーグでプレーしているイチロー・新庄を加えた総勢 167 選手を対象として，ベースボール・マガジン社[17]および大リーグのウェブサイト（http://www.baseball-reference.com）のデータを基に SI を算出した．SI 上位 50 名を表3に示す．参考までに，各選手の打率，長打率，出塁率，および OERA とその順位も併記した．なお，選手の評価に当たっては，リーグ間の違いによる影響も考慮すべきかもしれないが，本研究では選手の所属リーグでの打撃成績をそのまま用いることとした．

同表からわかるように，SI 上位には，カブレラ（西武）や松井（巨人）をはじめとする両リーグ屈指の強打者が名を連ねている．概観すると，SI 上位には，出塁率と長打率が上位の選手が位置しており，打率の高い選手は必ずしも高く評価されてはいない．例えば，清水（巨人）は，セリーグで打率6位（規定打席以上），高橋（巨人）は8位であるが，SI という点では，それぞれ 43 位，32 位と必ずしも高くはない．これは，清水・高橋両選手を SI が同等の選手と比較すると，両選手とも打率の主因となる1塁打の確率は 0.2 を超えており高いものの，長打や四球となる確率が相対的に低いことによる．

なお，表3より SI 順位と OERA 順位の傾向は同じであり，選手の評価としては概ね同様の結果を示しているといえる．

4.2 最適なラインナップ

最適なラインナップの策定に当たっては，表3に示した結果を基に SI 上位選手から選抜していった．具体的には，まず日本人選手上位9人を選び，ベースボール・マガジン社[17]で記載されている守備位置が，各選手の守備可能位置として，最適なラインナップを計算した．計算の結果を表4に示す．このとき，守備の要件である捕手 C，一塁手 1 B，二塁手 2 B，三塁手 3 B，遊撃手 SS，外野手 OF（左翼手 LF，中堅手 CF，右翼手 RF）と指名打者 DH のすべてを満たすことができ，SIL は 8.49 となった．

しかしながら，表4に示したラインナップを組むことは可能かもしれないが，守備可能位置という点で疑問が残る．例えば，2002 年度に小笠原（日ハム）は C として一度も守備しておらず，C としての守備力という点で問題がある．そこで，2002 年度に 10 試合以上で守備した位置を，各選手の守備可能位置としたときに，SIL を最大とするラインナップを策定した．その結果を表5に示す．

同表では，古木（横浜）・岩村（ヤクルト）が外れ，替わって立浪（中日）と矢野（阪神）が選抜されている．これは，古木・岩村両選手は 10 試合以上という制約では 3 B としてのみ守備可能であるが，3 B は既に SI 上位の中村が確保しているので，外れることとなった．一方，2 B としては立浪が，C では矢野が，それぞれ 2 B と C が守れる選手の中で SI 最上位であったため選抜された．

さらに，より守備に重点を置いたラインナップとして，ゴールデングラブ賞を受賞した選手でラインナップを組んだ際の最適な打順を策定した．ゴールデングラブ賞は，セ・パ両リーグで選ばれるが，ここでは OF は両リーグ合わせて SI 上位の日本人選手から3名，内野手と C は各守備位置で1名を選抜した．なお，DH は，ベストナインの DH で選抜された和田（西武）とした．表6に示すように，このときの SIL は 7.57 であった．

なお，参考までにベストナインを基とした最適ラインナップも求め，表7に示した．

以上の計算結果を見てまず目に付くところは，通常 3〜5 番に強打者を配するのに対して，表4・表5では，SI の最も高い松井(秀)が2番に，表6では1番に配置されていることであろう．これは，1試合での期待得点値という観点からは，打順の早い選手ほど打席に

表3　2002年度の打撃成績（スコアリング・インデックスの上位50人）

順位		選手名(球団)	P_S	P_D	P_T	P_H	P_W	P_{out}	SI	打率	長打率	出塁率	OERA	OERA順位	
1		カブレラ(西武)	.132	.042	.000	.101	.183	.543	1.42	.336	.756	.467	13.21	1	
2	(1)	松井秀喜(巨人)	.145	.044	.002	.081	.186	.542	1.34	.334	.692	.461	12.56	2	(1)
3		ペタジーニ(ヤクルト)	.151	.043	.002	.076	.158	.571	1.14	.322	.649	.438	10.74	3	
4	(2)	小笠原道大(日ハム)	.185	.048	.004	.057	.135	.571	1.08	.340	.601	.430	10.22	4	(2)
5	(3)	中村紀洋(近鉄)	.134	.045	.002	.070	.144	.605	.93	.294	.597	.400	8.84	5	(3)
6	(4)	松井稼頭央(西武)	.165	.072	.009	.057	.084	.613	.91	.332	.617	.389	8.82	6	(4)
7	(5)	清原和博(巨人)	.205	.006	.000	.072	.108	.608	.91	.318	.568	.414	8.25	8	(6)
8	(6)	福留孝介（中日)	.204	.070	.005	.032	.094	.595	.88	.343	.537	.406	8.61	7	(5)
9	(7)	古木克明（横浜)	.164	.058	.000	.087	.039	.654	.84	.320	.650	.343	7.96	9	(7)
10	(8)	和田一浩（西武)	.172	.054	.004	.071	.058	.642	.82	.319	.610	.357	7.83	11	(9)
11	(9)	岩村明憲（ヤクルト)	.181	.062	.004	.041	.102	.611	.82	.320	.531	.390	7.95	10	(8)
12		ローズ（近鉄)	.109	.051	.003	.076	.117	.643	.80	.272	.596	.361	7.63	12	
13	(10)	小久保裕紀(ダイエー)	.160	.044	.000	.056	.111	.630	.77	.292	.531	.375	7.32	15	(11)
14	(11)	矢野輝弘(阪神)	.184	.074	.008	.025	.098	.612	.76	.321	.502	.395	7.58	13	(10)
15		バルデス(ダイエー)	.161	.064	.004	.042	.104	.625	.76	.303	.525	.378	7.43	14	
16	(12)	緒方孝市（広島)	.180	.046	.000	.048	.088	.638	.71	.300	.508	.373	6.83	16	(12)
17		エバンス(西武)	.109	.049	.004	.053	.148	.637	.70	.252	.504	.378	6.82	17	
18	(13)	前田智徳（広島)	.214	.024	.002	.044	.081	.636	.69	.308	.481	.364	6.44	21	(16)
19	(14)	鷹野史寿（近鉄)	.214	.041	.006	.035	.069	.636	.68	.317	.484	.383	6.52	19	(14)
20	(15)	濱中おさむ(阪神)	.180	.048	.005	.046	.071	.650	.67	.301	.511	.356	6.49	20	(15)
21	(16)	阿部慎之介(巨人)	.181	.053	.000	.037	.094	.636	.67	.298	.478	.377	6.55	18	(13)
22	(17)	イチロー（シアトル)	.231	.038	.011	.011	.095	.614	.67	.321	.425	.388	6.42	22	(17)
23	(18)	城嶋健司(ダイエー)	.177	.040	.000	.056	.067	.659	.67	.293	.517	.348	6.35	26	(21)
24		ゴメス（中日)	.145	.036	.000	.058	.105	.656	.66	.267	.502	.344	6.30	28	
25	(19)	金本知憲（広島)	.145	.050	.003	.048	.100	.653	.65	.274	.498	.348	6.31	27	(22)
26	(20)	立浪和義（中日)	.183	.062	.004	.029	.082	.641	.64	.302	.472	.364	6.36	24	(19)
27	(21)	新井貴浩（広島)	.162	.051	.004	.051	.069	.664	.64	.287	.514	.342	6.20	30	(24)
28	(22)	谷佳知(オリックス)	.235	.054	.002	.009	.082	.618	.64	.326	.418	.383	6.36	25	(20)
29	(23)	今岡誠(阪神)	.197	.075	.000	.028	.053	.647	.64	.317	.485	.355	6.39	23	(18)
30	(24)	二岡智宏（巨人)	.155	.049	.002	.057	.064	.673	.63	.281	.520	.329	6.07	32	(26)
31	(25)	川口憲史（近鉄)	.179	.046	.000	.033	.102	.639	.63	.288	.450	.367	6.13	31	(25)
32	(26)	高橋由伸（巨人)	.206	.041	.000	.039	.062	.651	.63	.306	.474	.365	6.04	33	(27)
33		アリアス(阪神)	.116	.056	.002	.062	.083	.680	.62	.258	.526	.317	6.02	34	(28)
34	(27)	福浦和也（ロッテ)	.182	.073	.000	.017	.095	.633	.61	.300	.436	.384	6.24	29	(23)
35	(28)	松中信彦（ダイエー)	.138	.043	.002	.052	.097	.669	.60	.260	.485	.348	5.81	35	(29)
36		オバンドー(日本ハム)	.147	.037	.002	.054	.089	.672	.60	.263	.485	.335	5.73	39	
37		ディアス（広島)	.172	.042	.000	.044	.078	.663	.60	.280	.470	.347	5.75	38	
38	(29)	浅井樹（広島)	.218	.039	.006	.026	.064	.647	.59	.308	.445	.354	5.73	40	(31)
39		メイ（ロッテ)	.156	.048	.002	.043	.088	.663	.59	.273	.471	.346	5.78	37	
40	(30)	犬伏稔昌(西武)	.201	.054	.013	.020	.060	.651	.59	.307	.457	.351	5.78	36	(30)
41	(31)	吉岡雄二（近鉄)	.128	.072	.005	.047	.065	.684	.58	.269	.508	.324	5.71	41	(32)
42		シェルドン(オリックス)	.123	.057	.002	.053	.080	.685	.57	.256	.496	.322	5.59	43	
43	(32)	清水隆行(巨人)	.228	.041	.008	.022	.048	.653	.57	.314	.485	.355	5.52	48	(37)
44	(33)	木村一喜（広島)	.235	.039	.004	.018	.061	.644	.57	.314	.420	.362	5.53	47	(36)
45		ロドリゲス（横浜)	.145	.048	.006	.036	.107	.659	.57	.262	.448	.341	5.58	44	
46		セギノール(オリックス)	.081	.025	.000	.072	.125	.697	.57	.204	.479	.316	5.31	54	
47	(34)	田中幸雄(日ハム)	.155	.062	.008	.034	.073	.669	.57	.278	.471	.334	5.61	42	(33)
48		ラミレス（ヤクルト)	.196	.045	.000	.043	.039	.677	.56	.295	.475	.325	5.45	49	
49	(35)	大西崇之（中日)	.211	.052	.013	.009	.073	.642	.56	.307	.419	.374	5.56	45	(34)
50	(36)	出口雄大(ダイエー)	.160	.041	.006	.036	.095	.663	.56	.268	.444	.337	5.43	50	(38)

（　）内は日本人選手のみでの順位を示す.

立つ回数が多くなるため，強打者を早い打順とした方がよいためと解釈できる．この結果は，大リーグのチームで同様の分析を行い，SI最高の打者を2～4番に置くラインナップが最適であったというBukiet et al. [16]の報告とほぼ一致する．

また，表4と表5を比較すると，選手の守備可能な位置の制約条件を緩和すると，期待値は増大している．すなわち，選手の守れる位置が増えると，得点力の点で有利になることが定量的に示されている．また，守備に重点を置いたラインナップ3と，ラインナップ2

表4 最適ラインナップ1 (SIL：8.49)

打順	選手	可能な守備位置	守備例
1	小笠原道大(2)	C 1B OF	RF
2	松井秀喜(1)	OF	CF
3	清原和博(5)	1B 3B	DH
4	中村紀洋(3)	1B 3B SS	1B
5	松井稼頭央(4)	SS	SS
6	福留孝介(6)	1B 2B 3B SS OF	2B
7	古木克明(7)	1B 3B OF	LF
8	和田一浩(8)	C 1B OF	C
9	岩村明憲(9)	3B	3B

( ) 内は日本人選手のみでのSIの順位を示す.

表5 最適ラインナップ2 (SIL：8.25)

打順	選手	可能な守備位置	守備例
1	小笠原道大(2)	1B	1B
2	松井秀喜(1)	CF	CF
3	清原和博(5)	1B	DH
4	中村紀洋(3)	3B	3B
5	松井稼頭央(4)	SS	SS
6	福留孝介(6)	RF, CF	RF
7	和田一浩(8)	LF	LF
8	立浪和義(20)	2B 3B	2B
9	矢野輝弘(11)	C	C

( ) 内は日本人選手のみでのSIの順位を示す.

表6 最適ラインナップ3 (SIL：7.57)

打順	選手	守備位置	備考
1	松井秀喜(1)	OF	
2	小笠原道大(2)	1B	
3	中村紀洋(3)	3B	
4	松井稼頭央(4)	SS	
5	福留孝介(6)	OF	
6	和田一浩(8)	DH	ベストナインから選抜
7	阿部慎之介(16)	C	
8	高木浩之(88)	2B	
9	谷佳知(22)	OF	

( ) 内は日本人選手のみでのSIの順位を示す.

のSILの差は8.25−7.57=0.68であるが，これより，両ラインナップを比較し，守備力という点で，ラインナップ2だと0.68点以上多く相手チームに得点されると考えるならば，ラインナップ3を選択した方が望ましいと考えることができる.

なお，単純にSI上位から選抜する方が，必ずSILが大きくなるのか，というと必ずしもそうとはいえず，打順の繋がりなど他の選手との関係により，SI下位から選抜した方が最適となるような“組合せの妙”と

表7 ベストナインベースでの最適ラインナップ (SIL：7.90)

打順	選手	守備位置	備考
1	小笠原道大(2)	1B	次点
2	松井秀喜(1)	OF	
3	中村紀洋(3)	3B	
4	松井稼頭央(4)	SS	
5	福留孝介(6)	OF	
6	和田一浩(8)	DH	
7	今岡誠(23)	2B	
8	阿部慎之介 (16)	C	
9	谷佳知(22)	OF	

( ) 内は日本人選手のみでのSIの順位を示す.
1Bについては，両リーグとも外国人選手が選ばれていたため，次点の小笠原とした.

いうものが存在する．本稿の例ではラインナップ3で，SIが0.34 (88位) の高木 (西武) が選抜されているが，実は2Bでは，仁志 (巨人) の方が，SIが0.36 (83位) と上位である．しかしながら，実際にSILを計算してみると，仁志の場合は7.52となり，高木の場合の7.57よりも小さくなる．このように，わずかではあるが，SI下位から選抜した方が最適となる場合もあるので，最適なラインナップを求める際はSI値の近い選手についても考慮しつつ選定する必要がある.

5. OERALを基準としたときの最適ラインナップ

前節では，SILを基準とした最適なラインナップについて述べてきたが，OERAの進塁モデルを基にした1試合での期待得点値であるOERALを最大とするラインナップも同様に検討したので，その結果を表8に示す．なお，同表のラインナップ1〜3は，表4〜6のラインナップ1〜3にそれぞれ相当している.

表8に示したOERALを，表4〜7のSILと比較すると，OERAの進塁モデルでは，期待得点値を大きめに評価する傾向があることがわかる．これは，D'Esopo and Lefkowitzモデルでは，1塁走者は2塁打で本塁までは戻れないなど，若干現実より低めに評価するのに対して，OERAの進塁モデルでは1塁走者は2塁打で必ず本塁まで生還できるなど，得点をより高く見積る傾向があることによる．また，OERALを基準とすると，ラインナップ1〜3どれも1〜3番の上位打順が松井(秀)，小笠原，中村というOERAの強打者順となっている点が面白い.

ちなみに，表4～7に示したSILを最大とする打順でOERALを求めると，表8に示した値と0.01以下の違いしかなかった．すなわち，SILでの最適打順とOERALでの最適打順の差の影響は極めて小さいといえる．

なお，表3より，立浪（中日）と今岡（阪神）は，僅差であるが，OERAについては今岡の方が上位となっている．しかし，表8のラインナップ2で，今岡を立浪と置き換えてOERALを最大化すると8.76となり立浪の場合よりも0.01小さくなってしまう．すなわち，わずかではあるが，表8に示した通り，立浪を入れたラインナップの方が優れている．このように，OERAを基にして最適なラインナップを求める際も，SIの場合と同様，“組合せの妙”が存在する．

6. 最悪の打順

以上，最適なラインナップについて述べてきたが，今回提案した手法で，9！通りのすべての打順から期待得点値を最小とするものを求めることもできる．表9に，表4～7それぞれのラインナップに相当する最悪の打順を示す．同表より，最適なラインナップとの差が，強打者揃いのラインナップ1が0.17と一番小さく，ラインナップ3が0.28と大きい．すなわち，強打者揃いだと打順の影響はあまり大きくないが，打力にばらつきがあるほど，打順の影響が大きくなることが定量的に示されている．各ラインナップ内での最適と最悪では守備力など他の要因が同等であることを考慮すると，粒ぞろいの9選手を決定した後，それら選手の打順の決定は，得点力として0.2～0.3点程度影響するといえる．この値を大きいと見るか小さいと見るかは監督やコーチの判断に負うことであろう．

7. おわりに

以上，野球チームのラインナップ選定のための数理的一手法について述べてきた．本研究では，数理的に扱いやすい「攻」の部分に焦点を当てて解を得たが，

表8　OERAL基準での最適ラインナップ

打順	ラインナップ1	ラインナップ2	ラインナップ3	ベストナイン
1	松井秀喜 (1)	松井秀喜 (1)	松井秀喜 (1)	松井秀喜 (1)
2	小笠原道大 (2)	小笠原道大 (2)	小笠原道大 (2)	小笠原道大 (2)
3	中村紀洋 (3)	中村紀洋 (3)	中村紀洋 (3)	中村紀洋 (3)
4	松井稼頭央 (4)	松井稼頭央 (4)	福留孝介 (5)	松井稼頭央 (4)
5	福留孝介 (5)	福留孝介 (5)	松井稼頭央 (4)	福留孝介 (5)
6	古木克明 (7)	和田一浩 (9)	和田一浩 (9)	和田一浩 (9)
7	和田一浩 (9)	清原和博 (6)	阿部慎之介 (13)	今岡誠 (18)
8	清原和博 (6)	立浪和義 (19)	髙木浩之 (89)	阿部慎之介 (13)
9	岩村明憲 (8)	矢野雅弘 (10)	谷佳知 (20)	谷佳知 (20)
OERAL	8.98	8.77	8.10	8.46

（ ）内は日本人選手のみでのOERAの順位を示す．

表9　最悪の打順（SIL基準）

打順	ラインナップ1	ラインナップ2	ラインナップ3	ベストナイン
1	和田一浩 (8)	立浪和義 (20)	髙木浩之 (88)	阿部慎之介 (16)
2	清原和博 (5)	清原和博 (5)	谷佳知 (22)	谷佳知 (22)
3	福留孝介 (6)	福留孝介 (6)	福留孝介 (6)	福留孝介 (6)
4	岩村明憲 (9)	矢野雅弘 (11)	阿部慎之介 (16)	今岡誠 (23)
5	中村紀洋 (3)	中村紀洋 (3)	中村紀洋 (3)	中村紀洋 (3)
6	古木克明 (7)	和田一浩 (8)	和田一浩 (8)	和田一浩 (8)
7	小笠原道大 (2)	松井稼頭央 (4)	松井稼頭央 (4)	松井稼頭央 (4)
8	松井稼頭央 (4)	松井秀喜 (1)	小笠原道大 (2)	松井秀喜 (1)
9	松井秀喜 (1)	小笠原道大 (2)	松井秀喜 (1)	小笠原道大 (2)
SIL	8.32	8.06	7.29	7.67
最適との差	0.17	0.19	0.28	0.23

（ ）内は日本人選手のみでのSIの順位を示す．

付表 アテネオリンピックアジア予選選抜選手（2003年9月29日付）での最適ラインナップ（SIL：7.31，OERAL：8.27）

打順	選手	守備例	P_S	P_D	P_T	P_H	P_W	P_{out}	SI	OERA
1	谷佳知（5）	CF	.217	.058	.002	.032	.097	.594	.86	8.38
2	小笠原道大（1）	1B	.177	.063	.002	.057	.173	.529	1.36	12.98
3	和田一浩（2）	DH	.176	.060	.010	.056	.120	.578	1.07	10.22
4	福留孝介（3）	LF	.153	.051	.019	.056	.126	.595	.97	9.26
5	城島健司（4）	C	.181	.067	.003	.055	.087	.608	.91	8.80
6	高橋由伸（6）	RF	.173	.063	.002	.056	.082	.624	.83	8.03
7	松井稼頭央（7）	SS	.162	.058	.006	.050	.088	.635	.75	7.30
8	二岡智宏（8）	3B	.206	.029	.002	.048	.048	.668	.60	5.66
9	宮本慎也（11）	2B	.222	.035	.002	.011	.066	.664	.45	4.40
	木村拓也（9）		.198	.043	.000	.029	.063	.667	.53	5.15
	赤星憲広（10）		.247	.028	.012	.002	.071	.640	.51	4.93
	井端弘和（12）		.203	.034	.000	.012	.068	.684	.38	3.78
	谷繁元信（13）		.118	.041	.002	.032	.095	.713	.38	3.76

（ ）内は選抜選手内でのSIの順位を示す．

現実には守備力・走力など他の能力も考慮しなければならない．このような要求に関しては，例えば，DEA（Data Envelopment Analysis）や統計的な手法などを用いて，盗塁，犠打なども考慮した多角的な視点で貢献度を指標化するという試みもなされている（橋本[7]，間淵[8]）．応用上，複数の指標をどのようにラインナップ選定に反映していくかという点で課題はあるが，このような手法を発展させることで，その他の要因もある程度数値化でき，さらに現実に即したモデルを作っていくことが可能であるかもしれない．当然，選手能力を数値化して解を得るという手法だけですべての問題が解決できる訳ではないが，このようにして得た解があれば，監督はこれを参考にして，数値化できない部分に自らの主観を加えて，より良い総合判断を下すことができるかもしれない．本研究で提案しているような手法が，監督の裁量をより生かすためのツールとなれば幸いである．

8．付録

2003年9月29日に，アテネオリンピックアジア予選の日本代表選手が発表された．そこで，参考までに2003年度の当日までの打撃成績を基にSILおよびOERALを最大とするラインナップを求めてみた（付表参照）．

なお，現在大リーグ機構はオリンピック出場を認めていないため，2003年に大リーグに移籍した松井（秀）は選抜から外れている．また，表では，宮本がSI・OREAともに木村・赤星より下位であるにもかかわらず，ラインナップ入りしている．これは，両選手が外野手として選抜されており，内野手としては起用されないという前提で算出したことによる．

参考文献

[1] Ladany, S. P. and Machol, R. E. (Eds) : "Optimal Strategies in Sports", North-Holland, 1977.

[2] Bennett, J.: "Baseball", In *Statistics in sport*, Bennett, J. ed., Arnold, 1998.

[3] 竹内啓，藤野和建：「スポーツの数理科学」，共立出版，1988.

[4] 上田徹・住舎俊宏：「どの野球選手の攻撃力が優れているだろうか」，オペレーションズ・リサーチ，47(2002)，137-141.

[5] 武井貴裕・瀬古進・穴太克則：「野球の最適打順を考えてみよう」，オペレーションズ・リサーチ，47(2002)，142-147.

[6] 木下栄蔵：「野球における打者・投手の評価」，オペレーションズ・リサーチ，32(1987)，689-697.

[7] 橋本昭洋：「DEAによる野球打者の評価」，オペレーションズ・リサーチ，38(1993)，146-153.

[8] 間淵重昭：「野球の打者・投手の貢献度評価のための新しい指標」，オペレーションズ・リサーチ，34(1989)，96-101.

[9] Lindsey, G. R.: "An investigation of strategies in baseball", Operations Research, 11(1963), 477-501.

[10] Pankin, M. D.: "Evaluating offensive performance in baseball", Operations Research, 26(1978), 610-619.

[11] Thorn, J. and Palmer, P. (Eds.): "Total Baseball", Warner Books, 1989.

[12] D'Esopo, D. A. and Lefkowitz, B.: "The distribution of runs in the game of baseball", In *Optimal Strategies in Sports*, Ladany, S. P. and Machol, R. E. eds, North-Holland, 1977.

[13] Cover, T. M. and Keilers, C. W.: "An offensive earned-run average for baseball", Operations Research, **25**(1977), 729-740.

[14] 木下栄蔵：「野球に勝てる数学―数字から見た勝つための条件」, 電気書院, 1992.

[15] 戸川隼人：「マトリクスの数値計算」, オーム社, 1971.

[16] Bukiet, B., Harold, E. R. and Palacios, J. L.: "A Markov chain approach to baseball", Operations Research, **45**(1997), 14-23.

[17] ベースボール・マガジン社編：「2003ベースボール・レコード・ブック」, ベースボール・マガジン社, 2003.