

# 野 球 の O R

## 1. はじめに

4月はプロ野球が開幕する。われわれ草野球愛好家にとっても待ちわびた季節の到来である。プロ野球では悲願を達成したヤクルトの連覇なるか、巨人のペナント奪回なるかが多くの野球ファンの興味の中心であろう。あるいは題名に多少の期待を寄せて、ORで優勝の行方を占ってくれるのではと思われた方も多いかと思うが、しょせんヤクルトは広岡監督、巨人は長嶋監督が指揮するものであり、残念ながら筆者は広岡と長嶋の頭脳の差を数学的に記述できるほど新聞テレビにかじりついていたわけではないし、かじりついていたとしても無理であろうから、星占いは野球解説者諸氏の仕事と弁え、そちらにお任せしよう。すなわち、風当たりの強い江川問題は避けて通るのである。

満員の通勤電車で揺られながらも野球記事に食いつく真剣なサラリーマンの眼の数に比して、野球を数学的に取り扱った文献は多くない。さらに、その数少ない著述のほとんどが、野球というゲームは複雑であるからと、その解析を計算機に頼っている。確かに細かなルールまで考慮に入れば、野球は十分に複雑で、それゆえに見るスポーツとしても人気を保持し得るのであると思われるが、興味を限定すれば数学的表現が可能となるまで単純化して差し支えない場合もある。たとえば Bellman[1]の言うように、攻撃の面のみ

に着目すれば、野球をマルコフ決定問題として定式化し、無死満塁で0ストライク3ボールのときには打者はつぎの球を必ず見送れなどと結論を導き出すこともできよう。ただし、その際には攻撃を2592状態に分ける必要があり、スパースではあるが2592×2592の状態遷移行列を得るデータの信頼性がまず問題であり、彼自身も実践してはいない。さらに、攻撃側の最適戦略が知れると、守備側の作戦に影響を及ぼし、上述のケースでは打者は必ず見送るので投手は必ず真中に投げるように努力するようになる。それではと、攻撃、守備の両面から捉えて、マルコフゲームとして定式化すればと考えられるが、状態の桁数がさらにいくつ増し、定式化を実行に移す勇気はさらさらもち合わせていない。

ここではもっぱら手計算で論じられる程度まで野球モデルの単純化を進め、興味の焦点を絞り、たとえばバントはいかなる状況のときに行なうべきか、盗塁は効果的な作戦か、などといった問題を取り上げ、そういった野球の基本的な作戦に関してはこの単純化も差し支えないことを示し、いくつかの考察を加えてみる。

## 2. 平均得点の導出

プロ野球のORを考える場合、どのレベルに立って話を進めるかにより大分様相が異なる。ORという用語と経営者を連想し、球団側からみた最適戦略を思い浮かべ、1年間の野球興行による総利益

の最大化などという問題に走ってしまうと、これは入場料とかトレードや新人獲得等ストーブリーグ的な話になってしまうのでここでは扱わない。監督の立場となると優勝の確率を最大化することが目的と考えられる。これとまったく同等ではないが、年間のチームの勝率の最大化として捉えると、守備側の問題としては投手の試合中の交替およびローテーションの決定の問題がクローズアップされてくる。攻撃側の問題としては年間の勝率最大化イコール毎試合における勝つ確率の最大化と考えて差し支えなく、打順の決定および代打の選択の問題を無視すれば、1イニングにおける期待得点数の最大化問題とみなせる。打順の決定に関しては、経験的に知られている(俊足)巧打者、強打者、弱打者の順に並べる方法がほとんど最適であり、こねくり回しても心理的效果以上のものを期待はできないことが知られている ([2], [5], [7])。代打者選択の問題は面白そうであるがここでは取り上げない。ただ、左(右)投手には右(左)打者を選択することは、個人差もあるであろうが統計的には意味があるとされていることを指摘しておく ([6])。

1イニングの問題に帰着させると、バントや盗塁などの戦術を用いない通常の方法では1イニングに平均何点の得点を挙げることができるかを計算する必要が生ずる。そのために、つぎのような仮定を設ける。

- i) チーム内の打者の打撃能力は均一である。
- ii) 打者の打撃の結果によってのみ塁上の走者は変化する。すなわち、盗塁、暴投、牽制刺、捕逸、ボーク等は考慮しない。
- iii) 打者の打撃の結果は、アウト、四死球、単打、二塁打、三塁打、本塁打のいずれかである。それぞれの解釈は表1の通りである。

ヒットエンドランやダブルプレー、それにエラーなど試合を攪乱する要素をことごとく省略しているので、実際の試合がこのように進行するとしたらのはなはだ魅力に乏しいものであろう。これら

表1 打撃の結果の種類とその解釈

種類	解釈
アウト	アウト数が増し、走者は進塁せず
四死球	打者は一塁へ、他の走者は押し出されたときのみ一つ進塁
単打	打者は一塁へ、一塁走者は二塁へ、他の走者は生還
二塁打	打者は二塁へ、一塁走者は三塁へ、他の走者は生還
三塁打	打者は三塁へ、走者はすべて生還
本塁打	打者、走者すべて生還

の要素をモデルに組み入れることは可能ではあるが、それはただモデルをいたずらに複雑化し、しかも得点能力にそれほど影響を与えないと見られるので考慮に入れない。

これらの仮定の下では、チームの打撃能力は、

$$S = (p, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$$

で表現される。ここで  $p$  は打者がアウト以外の5つの打撃の結果 (以下  $p$  ヒットとよぶ) を生む確率、 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  は打撃の結果が  $p$  ヒットのいずれかであったときに、それぞれそれが四死球、単打、二塁打、三塁打、本塁打である条件付確率であり、したがって、 $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$  が成り立つ。

攻撃の局面の状態は  $(i, x_1 x_2 x_3)$  で表わされる。ここで  $i (i=0, 1, 2)$  はアウト数、 $x_j (j=1, 2, 3)$  は  $j$  塁上に走者がいるとき1、いないとき0をとる。このときつぎの関数を定義する。一般にこれらの関数はチームの打撃能力  $S$  の関数でもあるが、今  $S$  を固定して考えているので改めて  $S$  の関数と書かない。

$\mu(i, x_1 x_2 x_3) : (i, x_1 x_2 x_3)$  を初期状態とし、イニング終了までの期待得点数

$r(i, x_1 x_2 x_3) : (i, x_1 x_2 x_3)$  を初期状態とし、イニング終了までに得点が入る確率

$\phi_n(i, x_1 x_2 x_3) : (i, x_1 x_2 x_3)$  を初期状態とし、イニング終了までに  $n$  点獲得

する確率

$p_n(m, i, x_1 x_2 x_3) : (i, x_1 x_2 x_3)$  を初期状態とし、イニング終了までに  $m$  本の  $p$  ヒットが生まれるとき  $n$  点得点する確率

$\mu$  と  $r$  を求めることが課題であるが、 $\phi_n$  を用いて、

$$\mu(i, x_1 x_2 x_3) = \sum_{n=1}^{\infty} n \phi_n(i, x_1 x_2 x_3) \quad (1)$$

$$r(i, x_1 x_2 x_3) = 1 - \phi_0(i, x_1 x_2 x_3) \quad (2)$$

と求まる。すなわち  $\phi_n$  を計算する必要があるが、 $i$  アウトを初期状態として、イニング終了までに  $m$  本の  $p$  ヒットを生む確率  $\prod_m^i$  :

$$\prod_m^i = \binom{m+2-i}{2-i} p^m (1-p)^{3-i} \quad (3)$$

を用いてつぎのように書き表わすことができる。

性質 1 :

$$\phi_n(i, x_1 x_2 x_3)$$

$$= \sum_{l=0}^3 p_n(n-k+l, i, x_1 x_2 x_3) \prod_{n-k+l}^i$$

ただし、

$$k = \sum_{j=1}^3 x_j, \quad p_n(m, i, x_1 x_2 x_3) = 0 \quad (m < 0)$$

これは走者が塁上に  $k$  人いるとき、 $n$  点獲得するためには少なくとも  $n-k$  本の  $p$  ヒットを必要とし、また  $n-k+4$  本以上の  $p$  ヒットは  $n+1$  点以上の得点を必ず生ずることを意味している。

性質 1 から  $\mu$  および  $r$  の値を計算できるが、実際には以下の性質を用いてさらに簡単な式を導くことができる。

性質 2 :

$$p_n(m, n, x_1 x_2 x_3) = p_n(m, 0, x_1 x_2 x_3) \quad i=0, 1, 2$$

仮定によりアウトでは走者は進塁しないため、アウト数によらず  $p$  ヒットの組合せが一意的に得点を決定する。

性質 3 :

$$\phi_n(i, x_1 x_2 x_3) = \phi_{n-k}(i, 000)$$

$$\text{ただし } n \geq k+1 \text{ で } k = \sum_{j=1}^3 x_j$$

塁上の走者  $k$  人のとき  $n+k$  ( $n \geq 1$ ) 点獲得する攻撃は走者なしのときには  $n$  点獲得する。またその逆も成り立つ。

上記の性質を利用すると、計算に必要な  $p_n(m, i, x_1 x_2 x_3)$  の値は実に以下の 8 個のみで済む。

$$p_0(1, 0, 000) = \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4$$

$$p_0(2, 0, 000) = \alpha_0(\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2) + \alpha_1(\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2) + \alpha_2\alpha_0 + \alpha_3\alpha_0$$

$$p_0(3, 0, 000) = \alpha_0 p_0(2, 0, 000)$$

$$p_0(1, 0, 100) = \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2$$

$$p_0(2, 0, 100) = \alpha_0(\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2)$$

$$p_0(1, 0, 010) = \alpha_0$$

$$p_0(2, 0, 010) = \alpha_0^2, \quad p_0(1, 0, 110) = \alpha_0$$

上記の 8 つの式は表 1 から容易に求まる。たとえば  $p(2, 0, 100)$  は走者一塁で 2 本の  $p$  ヒットを放ったときに得点が入らない確率であり、それは 1 本目の  $p$  ヒットが四死球か単打か二塁打で (確率  $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2$ )、2 本目が四死球 (確率  $\alpha_0$ ) の場合に限るから確率は  $\alpha_0(\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2)$  である。

途中の計算は省略して結果だけを示す。

<無走者>

$$r(i, 000) = 1 - (\prod_0^i + p_0(1, 0, 000) \prod_1^i + p_0(2, 0, 000) \prod_2^i + p_0(3, 0, 000) \prod_3^i)$$

$$\begin{aligned} \mu(i, 000) &= \sum_{n=1}^{\infty} n \prod_n^i - p_0(1, 0, 000) \sum_{n=1}^{\infty} \prod_n^i \\ &\quad - p_0(2, 0, 000) \sum_{n=2}^{\infty} \prod_n^i \\ &\quad - p_0(3, 0, 000) \sum_{n=3}^{\infty} \prod_n^i \end{aligned}$$

<一走者>

$$r(i, 100) = 1 - (\prod_0^i + p_0(1, 0, 100) \prod_1^i + p_0(2, 0, 100) \prod_2^i)$$

$$r(i, 010) = 1 - (\prod_0^i + p_0(1, 0, 010) \prod_1^i + p_0(2, 0, 010) \prod_2^i)$$

$$r(i, 001) = r(i, 010)$$

$$\mu(i, x_1 x_2 x_3) = \mu(i, 000) + r(i, x_1 x_2 x_3)$$

$$\text{ただし } \sum_{j=1}^3 x_j = 1$$

<二走者>

$$r(i, x_1 x_2 x_3) = 1 - (\prod_0^i + p_0(1, 0, 110) \prod_1^i)$$

$$\text{ただし } \sum_{j=1}^3 x_j = 2$$

$$\mu(i, 110) = \mu(i, 000) + r(i, 100) + r(i, 110)$$

$$\mu(i, 101) = \mu(i, 110)$$

$$\mu(i, 011) = \mu(i, 000) + r(i, 010) + (i, 110)$$

〈満塁〉

$$r(i, 111) = 1 - \prod_0^4$$

$$\mu(i, 111) = \mu(i, 000) + r(i, 100) + r(i, 110) + r(i, 111)$$

アウトでの走者の進塁はないという仮定と、単打で必ず二塁走者は生還できる仮定により、走者二塁と走者三塁は同等であり、走者一二塁と走者一三塁は同等とみなされる。実際には二塁ゴロなどアウトでも三塁走者生還というケースもあり、ヒットで二塁走者が本塁上で刺されるケースもしばしば見られる。多少モデルと実際との差が現われていると言わねばならない。

セ・リーグ現役全打者の通算成績の平均

$$S = (0.336, 0.285, 0.495, 0.109, 0.013, 0.097)$$

を用いてこれらの値を求め、表2に示す。なお、 $\mu(0, 000)$  に関してはすでに D'Esopo & Lefkowitz [4] に結果が得られていることを付しておく。

### 3. いかなるときに盗塁すべきか

盗塁は積極的な作戦と言われる。果敢に盗塁して勝利につながり賞賛される場合もあれば、失敗してもっと慎重に攻撃しておけばと責められることもある。では、いかなるときに盗塁を試みるべきか。9回同点のときなどの盗塁と、初回における盗塁とではその目的意識が異なると思われる。前者は1点が欲しいときであり、後者はできるだけ多くの得点を獲得したいときである。多くの場合は後者であろうと思われるので後者をまず扱う。

攻撃の局面を  $(i, x_1 x_2 x_3)$  とする。盗塁は走者全員が試みることにし、盗塁失敗は最も進んでいる走者のみの盗塁刺と考える(注)。すると盗塁が成功すれば局面は  $(i, 0 x_1 x_2)$  と変化し、 $x_3=1$  ならば1点が得点される。盗塁失敗は  $(i+1, x_1' x_2' x_3')$

表2 各状況下での平均得点および得点の入る確率

アウト数	1点以上得点する確率			平均得点		
	0	1	2	0	1	2
無走者	0.273	0.169	0.075	0.535	0.292	0.113
一 塁	0.395	0.258	0.119	0.930	0.550	0.231
二 塁	0.607	0.463	0.267	1.143	0.755	0.379
三 塁	0.607	0.463	0.267	1.143	0.755	0.379
一二塁	0.624	0.475	0.273	1.553	1.025	0.504
一三塁	0.624	0.475	0.273	1.553	1.025	0.504
二三塁	0.624	0.475	0.273	1.766	1.230	0.652
満 塁	0.708	0.560	0.336	2.261	1.585	0.840

$=0, x_1 \cap (x_2 \cup x_3), x_2 \cap x_3)$  をもたらす。すなわち、アウト数が増し、塁上には盗塁前に一塁走者と、二塁ないしは三塁走者がいた場合に二塁走者が、二塁および三塁に走者がいた場合に三塁走者が残る。盗塁成功率を  $p_s$  とすれば、盗塁後の平均得点は、

$$p_s(x_3 + \mu(i, 0 x_1 x_2)) + (1 - p_s)\mu(i+1, x_1' x_2' x_3')$$

と表わされる。この値と盗塁をしない場合の平均得点  $\mu(i, x_1 x_2 x_3)$  とを比較し、各局面ごとに、盗塁という作戦が良策であるために要求される最低の盗塁成功率  $p_s^*(i, x_1 x_2 x_3)$  を、

$$p_s^*(i, x_1 x_2 x_3) = \frac{\mu(i, x_1 x_2 x_3) - \mu(i+1, x_1' x_2' x_3')}{x_3 + \mu(i, 0, x_1 x_2) - \mu(i+1, x_1' x_2' x_3')}$$

と求めることができる。チームの打撃成績としてセ・リーグの打者通算成績の平均を利用すると、 $p_s^*$  は表3ようになる。これを見て分かるように、ほとんどのケースで無死よりは一死、一死よりは二死のときに盗塁をすべきである。概して高成功率が要求されるが、走者一三塁のときの二盗

(注) 走者一三塁の場合には、経験的に盗塁成功はただ一塁走者の二盗を意味し三塁走者は動かず、盗塁失敗は一塁走者は二盗に成功したものの三塁走者が本塁で刺されることとした。

表 3 盗塁に必要な最低盗塁成功率

走者	アウト数	0	1	2
		$p_s^{\mu}$ ( $p_s^r$ )	$p_s^{\mu}$ ( $p_s^r$ )	$p_s^{\mu}$ ( $p_s^r$ )
一 塁		.750(.515)	.681(.472)	.610(.445)
二 塁		\(\backslash\)	\(\backslash\)	\(\backslash\)
三 塁		.684(.528)	.545(.420)	.341(.267)
一 二 塁		.790(\(\backslash\))	.759(\(\backslash\))	.773(\(\backslash\))
一 三 塁		.790(\(\backslash\))	.759(\(\backslash\))	.773(\(\backslash\))
二 三 塁		.729(.299)	.618(.284)	.473(.273)
満 塁		.671(.443)	.591(.394)	.509(.336)

ただし、\(\backslash\)は1.0を意味する。

は守備側が三塁走者の本盗を警戒するため成功率は8割以上あると思われるので一般に盗塁を試みるべきであろう。他のケースで三塁走者がいる場合、本盗の成功率は3~4割と考えられ、したがって考慮される状態は二死走者三塁の場合のみと思われる。走者一塁のケースでは、無死では.75の成功率を要求され、これを満たす俊足走者はさほど多くない。福本(急)、河埜(巨)、松本(巨)の8割組と、阪本(近)、島野(神)、柴田(巨)らがこれに該当する。無死では無理だが一死なら許される組は、大下(広)、高木(中)、高田(巨)、有藤(ロ)、飯塚(ロ)、弘田(ロ)らであり、二死一塁なら許される選手は、衣笠(広)、中塚(大)、山本(広)、小川(近)、基(ク)など年間5~10個盗塁する選手はほとんどここに属すると思われる。ただ、現在までのところ、高橋(広)、掛布(神)、ヒルトン(ヤ)は5割台で、得点力増大のためには走るという結果が出ているのが面白い。

どうしても1点が欲しいときの盗塁の決定に関しては、平均得点  $\mu$  の代わりに得点の入る確率  $r$  を用いれば良い。このときの最低盗塁成功率は、

$$p_s^r(i, x_1 x_2 x_3) = \frac{r(i, x_1 x_2 x_3) - r(i+1, x_1' x_2' x_3')}{\max\{x_3, r(i, 0 x_1 x_2)\} - r(i+1, x_1' x_2' x_3')}$$

で与えられる。表3のカッコ内の数字がこれを示す。同点で9回裏のときなど二盗を試みるべきであることが表から見てとれる。また、本盗に関し

ても、二死三塁の他に、二三塁のときと二死満塁のときに効果があることが結論される。

#### 4. バントやヒットエンドラン使用の効果

盗塁の積極性とは対照的にバントは消極的な作戦である。その意図するところは、自らを犠牲にして走者を確実に進塁させることにあるが、最近の守備技術の向上により必ずしもバントの成功率は高いとは言えなくなってきている。かつては高校野球と言えばバントを連想したものだが、近頃は打撃の進歩によるものか、好投手の数の減少によるものか、高校野球においてすらバントの使用頻度はかなり減ってきている。とは言え、記録によれば盗塁と同程度使用されている以上、バントに関してその効果を調べることは無意味ではなく、また否定的な結果が得られても、それはそれなりに意味をもつであろう。

モデルの単純化のために打者の成績を均一化しているが、実際にはバントは後続に比べて打者の成績が劣っている場合に使用されることが多い。その場合には適当な修正を施せば良いが、ここでは投手が打席に立つときなどのようにどうせ当たらないならバントでもしておけといった前述のケースは排除しておく。

バントとは、打者はアウトとなる代わりに塁上の全走者は一つ進塁するプレーと定義する。バント失敗は、最も進んでいる走者の刺殺と解釈し、他の走者および打者の進塁は認める。すなわち、現在の局面を  $(i, x_1 x_2 x_3)$  ( $i=0, 1, \sum_{j=1}^3 x_j \geq 1$ ) としバントを試みる時、成功率  $p_b$  で局面は  $(i+1, 0 x_1 x_2)$  と変化し、 $x_3=1$  ならば1点加算され、失敗すると(確率  $1-p_b$ )  $(i+1, x_1' x_2' x_3'=1, x_1 \cap (x_2 \cup x_3), x_2 \cap x_3)$  へと変化する。

バントは通常1点獲得の価値が大きいときにとられる戦法であり、したがって目的をまず1点以上取得の確率最大化に置く。バント戦法をとるときととらないときの1点以上獲得する確率を計算し比較することにより、各局面においてバント戦

表 4 パントに必要な最低パント成功率

アウト数	0	1
走者	$p_b^r$ ( $p_b^m$ )	$p_b^r$ ( $p_b^m$ )
一 塁	.668(\	.942(\
二 塁	\(\	\(\
三 塁	.471(.798)	.391(.595)
一 二 塁	\(\	\(\
一 三 塁	.283(.724)	.278(.596)
二 三 塁	.283(\	.278(.830)
満 塁	.336(\	.336(.918)

ただし \ 是成功してもパントは不利を意味する。

法を用いるのに要する最低のパント成功率  $p_b^r$  を以下のように得る。  $p_b^r > 1$  ならばパントは決して用いるべきではない。

$$p_b^r(i, x_1 x_2 x_3) = \frac{r(i, x_1 x_2 x_3) - r(i+1, x_1' x_2' x_3')}{\max\{x_3, r(i+1, 0 x_1 x_2)\} - r(i+1, x_1' x_2' x_3')}$$

前記のセ・リーグ標準成績を用いてこれらの値を計算したものを表4に示す。無死一塁のときには3回に2度以上の成功を必要とし、一死一塁ではパントは良策でないことが分かる。また、走者二塁および一二塁ではパントは用いるべきでない。スクイズプレーは走者が2人以上のとき3割以上の成功が見込まれるならば望ましい作戦であるが、走者が三塁のみのときにはより高い成功率が必要であり、無死ならば5割近く、一死ならば4割近くが要求される。

期待得点数を最大にしたいときにはアウト数の確実にふえるパントは望ましい作戦とは思えないが、一応この基準下でパントが良策となるための最低パント成功率  $p_b^m$  を求め、表4のカッコ内にそれを示す。

$$p_b^m(i, x_1 x_2 x_3) = \frac{\mu(i, x_1 x_2 x_3) - \mu(i+1, x_1' x_2' x_3')}{x_3 + \mu(i+1, 0 x_1 x_2) - \mu(i+1, x_1' x_2' x_3')}$$

表4の数字でも得点を多く獲得したいときにはパントは良い戦法ではないことが示されている。強いて言えば一死で走者三塁あるいは一三塁のと

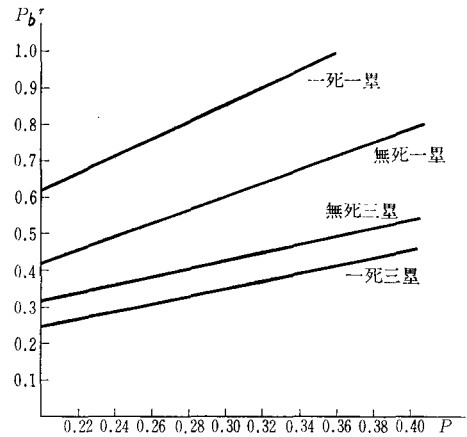


図 1 チームの打撃成績と必要なパント成功率との関係

き6割以上のスクイズ成功率が見込まれるときには望ましいが、スクイズで6割の成功は容易とは思えない。

なお、これらの最低パント成功率はチームの打撃能力にかなり影響される。  $p$  ヒットの確率  $p$  のみを変化させ  $p_b^r$  がいかに変化するかを調べ図1に表わす。計算によっても求まるが、  $\partial p_b^r / \partial p$  はほぼ一定で正の値をとり、弱チームほど、好投手に対するときほどパントをすべきであることが分かる。具体的には  $p=0.4$  程度の強打者を迎えるときには無死一塁でも8割以上の成功率が望まれないとパントをすべきではなく、また  $p=0.2$  程度の弱打者の場合には一死一塁でも6割程度の成功率が見込まれるならばパントをすべきであることが分かる。

つぎにヒットエンドランの場合について簡単に触れてみよう。無死一塁を例にとる。ヒットエンドランとは、走者を二塁に走らせ、二塁手あるいは遊撃手が二塁ベースカバーに入るその間隙の空いた塁間を打者が狙い打ち、走者を一挙に三塁まで進めるプレーと解釈でき、完全な成功は無死一三塁を生む(確率  $p_h^{(1)}$ )。そうならずともゴロ等で走者を二塁に進めれば一応の成功である(確率  $p_h^{(2)}$ )。ただし積極策には危険がつきもので、投手に外されあるいは空振りや走者が刺されたり

(確率  $p_h^{(3)}$ ), 飛球等を放ち走者を進塁させ得なかつたり (確率  $p_h^{(4)}$ ), 最悪ではライナー等でダブルプレーを生ずることもある (確率  $p_h^{(5)}$ ). 逆に本塁打を放つなどさらに良い結果を生むことも稀にはあるが, ここでは前記5ケースに限定をする. このとき容易に分かるように, 以下の不等式が満たされるときヒットエンドランは期待得点数を増加させる.

$$\begin{aligned} \mu(0, 100) < p_h^{(1)}\mu(0, 101) + p_h^{(2)}\mu(1, 010) \\ + p_h^{(3)}\mu(1, 000) + p_h^{(4)}\mu(1, 100) \\ + p_h^{(5)}\mu(2, 000) \end{aligned}$$

実際に成功率がいかほどであるのかデータを入力するすべもないのであとは仮定の話になるが, 表1を用い, また不成功の確率をまとめて4割程度としたとき, ヒットエンドランの完全な成功率3割4分が要求される. これはかなりの高率である. 実際には不成功率はさらに高いと思われ, その場合にはさらに高水準の成功率が要求される. また, 一死一塁のときには, 3割7分が望まれる. 無死の場合より高水準が要求されているが, これは失敗したときの得点能力の減少度がさらに大きくなることに起因していると思われる. これらのことから, ヒットエンドランは, するなら無死, 一般には「奇策」と言えようか.

その他, 犠飛やバントエンドラン等攻撃側作戦の効果, 守備側からは敬遠などの効果を同様な解析により論ずることができるが, 紙面の都合とデータ不足によりここでは割愛させていただく.

## 5. 四球, 本塁打などの重要度

つぎに, 四球は単打と比較してどのくらいの重要さをもっているのか, 単打率の増加は得点能力をどのくらい増大せしめるか, あるいは長打力のチームと高打率のチームではどちらに軍配が上がるかなどを調べてみよう.

チームの1インニングの平均得点  $\mu(0, 000)$  は打撃能力  $S$  の関数でありこれを  $f(S)$  と表わすことにする. まず四球率 ( $p_0 \equiv \alpha_0 p$ ) の変化により平均

得点  $f(S)$  がいかに変化するかを調べる. チームの選球眼が良くなり, 四球を選択する率が  $\varepsilon$  増したとすると, 四球は  $p$  ヒットの種類であるから  $p$  ヒットの確率は  $p + \varepsilon$  へと移行する. ヒットの中での四球の割合は  $\alpha_0$  から  $\frac{\alpha_0 p + \varepsilon}{p + \varepsilon} \approx \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{p} \varepsilon$  となり, 他のヒットの割合は  $\alpha_i (i=1, 2, 3, 4)$  から  $\frac{\alpha_i p}{p + \varepsilon} \approx \alpha_i - \frac{\alpha_i}{p} \varepsilon$  に減少する. したがって四球率の増加による平均得点の増加率は,

$$\frac{df}{dp_0} = \frac{\partial f}{\partial p} + \frac{1 - \alpha_0}{p} \frac{\partial f}{\partial \alpha_0} - \sum_{j=1}^3 \frac{\alpha_j}{p} \frac{\partial f}{\partial \alpha_j}$$

与えられる. 同様に単打率 ( $p_1$ ), 二塁打率 ( $p_2$ ), 三塁打率 ( $p_3$ ), 本塁打率 ( $p_4$ ) の増加による平均得点の増加率はそれぞれ,

$$\frac{df}{dp_i} = \frac{\partial f}{\partial p} + \frac{1 - \alpha_i}{p} \frac{\partial f}{\partial \alpha_i} - \sum_{j=0, j \neq i}^3 \frac{\alpha_j}{p} \frac{\partial f}{\partial \alpha_j} \quad (i=1, 2, 3)$$

$$\frac{df}{dp_4} = \frac{\partial f}{\partial p} - \sum_{j=0}^3 \frac{\alpha_j}{p} \frac{\partial f}{\partial \alpha_j}$$

与えられる. セ・リーグ打者の通算成績をデータとしてこれらの値を計算すると,

$$\left( \frac{df}{dp_0}, \frac{df}{dp_1}, \frac{df}{dp_2}, \frac{df}{dp_3}, \frac{df}{dp_4} \right) = (3.0, 3.6, 4.5, 5.6, 8.1)$$

を得る. したがってたとえばチームの単打率が1分異なるチーム間の一試合における得点能力の差は,  $\frac{df}{dp_1} \times \frac{1}{100} \times 9 = 0.32$  である. また, 比をとると

$$\begin{aligned} \frac{df}{dp_0} : \frac{df}{dp_1} : \frac{df}{dp_2} : \frac{df}{dp_3} : \frac{df}{dp_4} \\ = 0.83 : 1 : 1.25 : 1.56 : 2.25 \end{aligned}$$

となるから, 四球1個の得点能力への貢献度は単打0.83本分に相当する. 長打になるに従い貢献度は高くなるが, たとえば本塁打1本は単打2.25本分であり4本相当ではない. すなわち, 得点への貢献度の面から見ると, 長打率は単打:二塁打:三塁打:本塁打=1:2:3:4と計算されるので必ずしも適切な表現法ではないことが分かる. また, ホームランバッターと巧打者の貢献度の比較も容易で, 本塁打率3分(年間15本相当), 打率3割2分の中距離の巧打者は, 本塁打率7分(年間

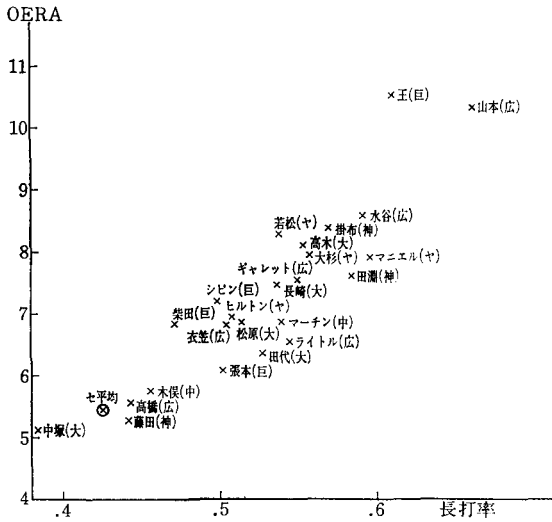


図 2 セ・リーグ主力打者1978年度成績

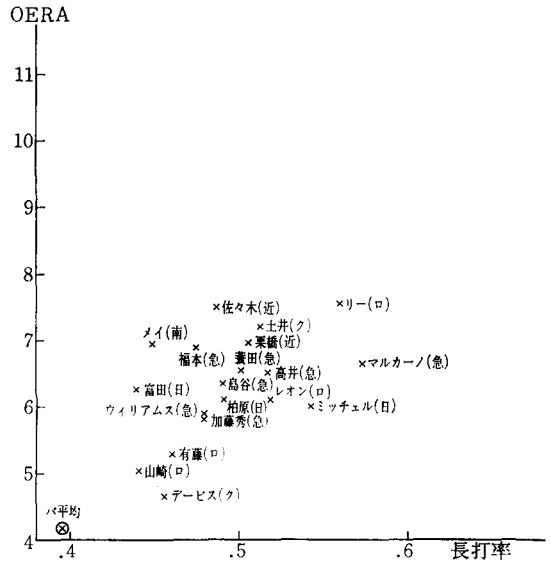


図 3 パ・リーグ主力打者1978年度成績

35本相当), 打率 2 割 7 分の ホームランバッターとほぼ貢献度が等しいと言えよう。

## 6. プロ野球選手の評価

オフシーズンとなるとオーナーは選手と契約更改を行なり。各選手の活躍が給料査定に強く影響するわけだが、ここで、一般に、打率、打点、本塁打数等多次的に表現される打者の成績を給料という一次的尺度に変換する問題が生まれる。また、オーナーでなくとも、選手の「良さ」を評価することは興味がある。

得点への貢献度という尺度から Cover & Keilers[3] が提案した OERA (Offensive Earned Run Ave.) をここで利用する。OERA とは、一選手のみが常に打席に立つと仮定したときに、その選手が一試合で獲得する期待得点数のことである。要するに  $S$  をその選手の打撃成績としたとき  $9f(S)$  で表現される量である。前節で触れたように、得点への貢献度という意味では  $f(S)$  は長打率より適当と思われる、また打順に左右される打点、得点よりも公平であると言えよう。

セ、パ両リーグの主力打者の1978年度の成績から OERA を求め長打率と比較して図 2, 3 に示

す[8]。王(巨)、山本浩(広)がズバ抜けて高いが、彼らはホームランバッターであるばかりでなく、四球がきわめて多いことも大きく作用している。パ・リーグの打者の OERA が全般的に低いのは投手層のレベルの高さによるものだろうか。なお、米大リーグ選手の生涯の成績による OERA の比較、および他のいくつかの評価方法に関しては増田氏が本特集で述べられているので参照されたい。

## 7. 投手交替およびローテーションの問題

今までは野球の攻撃面の問題ばかり扱ったが、最後に投手の交替時期の決定やローテーションの問題等守備面の話を論ぜねば片手落ちであろう。憶測の域を出ないが、監督が最も頭を悩ますのは投手の問題ではなからうか。いつリリーフを投入するか、明日以降を考慮してリリーフを選ぶか、まず行なわれている試合に全力を注ぐか等々、難しい問題であるし文献は見当たらない。したがってここでは簡単なモデルを作ることを目的とし、実際に投手交替に影響を及ぼすと見られるゲームの状況、敵味方の打順、左対左、右対右の問題、投手のブルペンでの調子および心理状態などは止



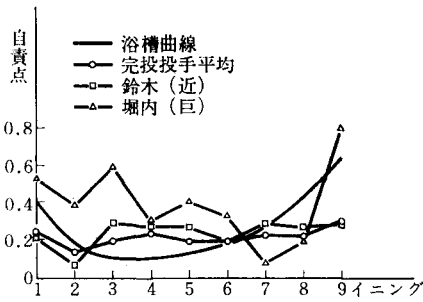


図 4 イニングごとの投手の平均自責点

むを得ず無視する。具体的には、疲労の面のみから話をする。信頼性の話で予防保全とは考慮の対象となる機械などが時の経過とともに劣化し故障率が増加していくときに、あらかじめ故障する前に取替等の保全を行なう発想であるが、機械を投手に、故障率を防御率に置き換えると投手交替の話ができそうである。

まず、短期決戦で試合前の投手陣の疲労など構ってられない試合、あるいはある特定の一試合における投手起用の試合前の最適戦略を考えよう。単純化のために投手交替は回の途中では行なわないことにする（この仮定は本質的でなく、拡張可能である）。チームに属する投手の集合を  $J$  とし、 $g_j(x)$  を投手  $j \in J$  が  $x$  イニング以上続投するとき  $x$  イニング目の平均自責点とすると、 $g_j$  は図 4 のように浴槽曲線を描くことが予想される。すなわち、危険な立ち上がり切り抜けることができれば疲労が蓄積されるまでしばらくは安定な状態が続くと見られる。これは理想で、現実はずしもこれに従っているとは断定できかねるが、この曲線を描くための正当なデータが得難いことにも起因していると思われる。一試合の期待失点最小化の問題は単に、

$$\min \sum_{j \in J} G_j(x_j) = \sum_{j \in J} \sum_{x_j \leq x} g_j(x')$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in J} x_j = 9, \quad x_j (j \in J) \text{ は非負の整数}$$

となり動的計画法で容易に解が得られるが、各投手の浴槽曲線の初期不調の部分を水平線で強引に近似すれば解は自明となる。すなわち全投手の近

似された  $g_j(x)$  の値を小さいほうから 9 点選び、 $j$  から  $n_j$  点選ばれば投手  $j$  に  $n_j$  イニング投げさせれば良い。

つぎに長期戦の場合の投手のローテーションの問題に移る。ここでは試合前の投手に蓄積された疲労度を考慮に入れ、非負の整数で表現する。0 を疲労のない状態とし、1 イニング投げるごとに疲労度は 1 増し、休養すると投手の疲労回復度に応じて整数  $(y_j, j \in J)$  ずつ減少する。たとえば完投後中 3 日の休養で元にもどる投手は  $y_j = 3$  と考えられる。 $g_j(a_j, x_j)$  を投手  $j$  が試合前に疲労度  $a_j$  で、 $x_j$  イニング以上投げるときに  $x_j$  イニング目に負う期待自責点とする。全試合数を  $N$  とすると、全試合の総期待自責点を最小にする問題は、

$$G_j(a_j, x) = \sum_{x' \leq x} g_j(a_j, x')$$

$$\min \sum_{n=1}^N \sum_{j \in J} G_j(a_j^n, x_j^n)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} a_j^{n+1} = a_j^n + x_j^n (x_j^n \geq 1 \text{ のとき}), \\ j \in J, 1 \leq n \leq N-1 \\ a_j^{n+1} = [a_j^n - y_j]^+ (x_j^n = 0 \text{ のとき}), \\ j \in J, 1 \leq n \leq N-1 \\ \sum_{j \in J} x_j^n = 9, \quad x_j^n : \text{非負整数} (j \in J), \\ 1 \leq n \leq N \\ a_j^1 = 0, \quad j \in J \end{cases}$$

と定式化できる。ただし、 $[a]^+ = \max\{a, 0\}$ 。ここで上記最後の初期条件の代わりに疲労度  $a_j = (a_j)$  からスタートして  $m$  試合を最適に消化するときの最小期待総自責点を  $E(a_j, m)$  とおけば、 $1 \leq m (\leq N)$  のとき、

$$E(a_j^m, m) = \min_{\sum_{j \in J} x_j^m = 9} \left[ \sum_{j \in J} G_j(a_j^m, x_j^m) + E(a_j^{m-1}, m-1) \right]$$

が成り立つ。ただし、

$$\begin{cases} a_j^{m-1} = a_j^m + x_j^m (x_j^m \geq 1 \text{ のとき}), j \in J \\ a_j^{m-1} = [a_j^m - y_j]^+ (x_j^m = 0 \text{ のとき}), j \in J \end{cases}$$

初期条件  $E(a_j, 0) = 0$  の下で  $E(0, N)$  を動的計画法により求めれば、これが原問題の解となる。

実際のデータを用いての計算例がないので説得力に乏しいモデルであるのは止むを得ない。

## 8. おわりに

長々と駄文を連ねたがご覧の通りまだまだ問題は山積されているので、関心のある方は話を進めたりモデルを改良したりするのもまた一興と思われる。しかしながら、あまりに精巧なモデルを作ると、野球の面白さが減少する恐れがあるので注意されたい。

### 参 考 文 献

- [1] Bellman, R., "Dynamic Programming and Markovian Decision Processes, with Application to Baseball," in *Optimal Strategies in Sports(OSS)*, S. P. Ladany(eds.), North-Holland, Amsterdam(1977).
- [2] Cook, E., "Analysis of Baseball as a Markov Process," in *OSS*.
- [3] Cover, T. and C. Keilers, "An Offensive Earned-Run Average for Baseball," *Opns. Res.* **25**, 729-740(1977).
- [4] D'Esopo, D. A. and B. Lefkowitz, "The Distribution of Runs in the Game of Baseball," in *OSS*.
- [5] Freeze, R. A., "Monte Carlo Analysis of Baseball Batting Order," in *OSS*.
- [6] Lindsey, G. R., "An Investigation of Strategies in Baseball," *Opns. Res.* **11**, 477-501 (1963).
- [7] Peterson A. V., Jr., "Comparing the Run-Scoring Abilities of Two Different Batting Orders: Results of a Simulation," in *OSS*.
- [8] 日本プロ野球 1978 ベースボールマガジン社, 1978.  
(はとやま・ゆきお 東京工業大学 経営工学科)

### ■スポーツのOR■

## 野球とパーセンテージ

門 山 允

よく野球はパーセンテージのゲームだといわれる。他の集団スポーツとちがって、攻撃と防御がハッキリわかれ、その中でも各局面が流動的でなく非連続に変化する。他のゲームよりも監督の作戦というのがゲームの流れに介入しやすいので、個々の作戦の成功率というようなものが統計データとして残しやすいためである。

もちろん五味康祐氏の一刀斎のように打てば必ずホームランなどというバッターは現実にはいないし、27人の打者全部を三振させて毎試合シャットアウトするというピッチャーも存在しないから、どんなに成功の確率の高い作戦をとっても、必ず失敗の確率がゼロということはないので、100%の成功は期待できない。しかし成功したければ確率の高い作戦を選ぶのが常道であり、もしどの監督も常道の作戦をとれば素人目にはおもしろくないゲームになる。そのため川上式管理野球というのが評判が悪かったのであるが、それがひらめきを重視する(ように見える)長島野球に代わるとやはり失敗の率が高くなり、いまさら管理野球が正しいのだという議論にもどってくる。

パーセンテージ・ベースボールとして筆者の印象が深いのはやや旧聞に属するが一昨年の日本シリーズで9回裏1点をリードされた阪急が2死無走者のピンチに追いこまれたとき、代打藤井が四球を選び、代走蓑田が2盗に成功、代打高井がヒットして同点にもちこんだ場面である。これに対してある評論家がこの代打の起用順はまちがっている、もし藤井がアウトになればせっかくの長距離打者の高井を使わずじまいになってしまう、まず高井を起用してホームランで同点にすべきではないかと批評した。これに対する上田阪急監督の説明は「高井があの場面でホームランを打つ率は1%に満たない。しかし、藤井が塁に出る率は3割以上だからあの代打の起用順が正しい」ということであった。上田監督というのが非常にパーセンテージを重視するオーソドックスな人だということがこの回答でもよくわかり、このようなパーセンテージ・ベースボールだから4連覇というようなこともできたのであろう。それにひきかえ評論家氏のような人が監督になると一時期はうまくいっても長期戦では必ず失敗するであらう。