

1
2 **自転車競技ポイントレース中の集団動態解析の試み**

3
4 キーワード: 自転車競技, ポイントレース, ドラフティング, 個人間距離, 集団間距離

5
6 **【要旨】**

7 本研究は、自転車競技のポイントレースにおける集団動態を明らかにすることを目的に、
8 全日本選手権ポイントレースを対象とし、競技中の個人間距離と集団間距離を分析した。
9 競技場の観客席にビデオカメラを設置して、半周ごとの全選手の通過時刻を計測し、半
10 周ごとの全選手の平均速度および選手間の距離を換算した。また、ドラフティング効果に
11 基づいて集団を定義し、集団の推移を分析した。その結果、直前の選手との距離間隔は、
12 競技中の 90%以上で 3m 以下であり、ほとんどの時間で空気抵抗が低減されるドラフティ
13 ングの範囲内に位置することが分かった。また、集団の推移には、集団が一つのまま推移
14 する場合、スプリント前に集団が分離する場合、逃げが形成されそのまま逃げ切る場合、
15 逃げが吸収される場合があった。さらに、逃げが形成された場合において、先頭と主集団
16 の先頭との距離は、逃げ切りが成功するか、あるいは、主集団が逃げ集団を吸収して再
17 結合するかを決定づける距離と考えられた。選手やコーチは、逃げ切れるまたは逃げを
18 吸収することができる距離を把握し、競技中の逃げと主集団間の距離を調整することが重
19 要であることが示唆された。

20
21 -----

22
23 **Analysis of group dynamics during a cycling**
24 **competition points race**

25
26 Key Words: bicycle racing, points race, drafting, interpersonal distance, intergroup distance

27
28 **[Abstract]**

29 This study aimed to examine the group dynamics in a cycling points race, to this end we
30 analyzed the distances between cyclists and subgroups during the Japanese National Track
31 Championships points race. A video camera was located in the spectator seats on the
32 extension of the center line of the two straight sections of the cycling velodrome, and the
33 cyclists passing through the center line on both the home and back straights were filmed. The
34 time to complete a half lap was measured for each cyclist and used to obtain the average
35 speed. The distance between cyclists was calculated based on the difference in passing time.
36 The group was defined by the distance between cyclists based on the drafting effect, then,
37 the group dynamics was analyzed. In over 90% of cases, the distance between cyclists was
38 3 m or less. Most of the cyclists in the race were located within the drafting range where air

39 resistance is reduced. There were cases where the group remained as one, cases where the
40 group separated before the sprint, cases where an escape occurred and the escape group
41 remained ahead until the sprint, and cases where an escape occurred but the groups
42 recombined before the sprint. The distance between the leading escape group and the main
43 group is considered to be a critical distance to bifurcate success and failure for escape. It is
44 important for cyclists and coaches to understand the distance at which an escape group will
45 be sustained or absorbed, and to control the distance between the escape group and the main
46 group during a competition.

50 I. 緒言

51 自転車競技のうち、ロードレース種目やトラックレース種目は、舗装された道路や傾斜したコーナ
52 ーのバンクを備えた専用競技場で実施され、平均時速が 40 km/h を超えるような高い速度になる。
53 特に、集団同時スタートの種目では空気抵抗が大きな影響を与えるため (Kyle, 1979)、選手がお互
54 いに体力を温存しようとした結果、密集した集団が形成される。こうした集団では、前を走る選手の直
55 後に位置することで風を避け、自身に加わる空気抵抗を減らすドラフティングと呼ばれる行動によっ
56 て、自身が消費する体力を温存することができる。ドラフティング状態にある選手が体力を温存でき
57 ている一方で、先頭で風を受けている選手は、ドラフティング状態にある選手より体力を消費する。こ
58 のような関係から、数十分継続するような種目では、風を受ける先頭を分担して交代する行動が見ら
59 れる。この行動は、先頭に立った選手が横に逸れて、徐々に集団の後方に後退する間に次の選手
60 が先頭に立つことを次々と繰り返すため、ローテーションと呼ばれる (白崎ほか, 2019)。

61 自転車競技、特に競技時間が長い競技では、最高速度や持久力といった能力に加えて、体力を
62 いかにか温存するかといった駆け引きも競技結果に影響する。自転車競技の典型的な展開の一つに、
63 逃げ集団の形成がある。逃げ集団とは、着順を争うスパート (スプリント) 能力の選手間の違いによっ
64 て生じる駆け引きの結果形成される集団である、すなわち、スプリント能力に弱い選手が、単独でま
65 たは同様の意思を持った選手と協調して、あらかじめ先行して、スプリント能力が強い選手に対して
66 距離を取るために前に出ることを試みることによって形成される。他方、スプリント能力に優れた選手
67 は最終局面のスパートに備えて体力を温存するために、集団に残ることを選択する。このことによ
68 って大集団となるため、逃げと大集団に分離することが多い。なるべく後続の集団との距離を離してお
69 きたい逃げ集団と、体力を温存しつつ、最終的な局面で追いつくことが可能な距離にとどめておきた
70 い集団との駆け引きによって、この逃げ集団と後方の大きな集団との間隔は決定されると考えられる。
71 このように、自転車競技において、集団間の距離を認識し、適切な距離を維持することが、競技力の
72 一つであると考えられる。

73 しかしながら、自転車競技の研究の多くは、選手の生理学的な特徴 (石井ほか, 2014)、トレーニ
74 ング方法 (清水ほか, 2010) やペーシング戦略について (Abbiss and Laursen, 2008; Renfree et al.,
75 2013) のものである。自転車競技トラックレースにおける競技中の選手の位置取りを分析したものと
76 して、Dwyer et al. (2013) の研究がある。彼らはエリミネーションレースにおいて上位だった選手とそうで

77 なかった選手の位置取りを比較し、後方やアウトコースが不利であることを明らかにした。また、
 78 Trenchard et al. (2014)はポイントレースとスクラッチレースの観測データから、競技中に現れる低速で
 79 密集した状態と高速で引き延ばされた集団の状態を特定した。彼らは各選手の計測点通過時刻の
 80 クラスタ分析を行い、選手が並走し集団が密集している状態と集団が伸長し一列状になっている
 81 状態を区別した。さらに、彼らは自転車競技の集団の分離に関して、先頭を走行する選手の速度維持
 82 可能出力 (Maximal sustainable output) とドラフティング状態にある選手の速度維持可能出力の比
 83 (Peloton convergence ratio) が重要であることを、シミュレーションを用いて検証した (Trenchard et al.,
 84 2015)。Okumura et al. (2022)はポイントレース競技中の選手配置を、半周ごとの各測定点で1秒ごと
 85 の選手数により定量化し、競技開始から終了までの選手配置を主成分分析することで特徴を抽出し、
 86 集団を4つの状態に分類した。しかしながら、これらの研究は集団スタートの自転車競技において重
 87 要な指標である集団間の距離が定量化できておらず、集団の分離と再結合を含んだ集団動態は明
 88 らかになっていない。

89 集団スタートで行われる自転車競技には、屋外で行われるロードレースと、屋内で行われるトラック
 90 レースがある。ロードレースにおいてはさらに参加選手数も多く、競技時間が時には数時間に渡るた
 91 め、大集団が形成され、逃げ集団の形成や再結合が発生する。また、ロードレースでは最終順位に
 92 加え中間スプリントにおけるボーナスやポイント獲得の機会が設けられる場合がある。しかしながら、
 93 ロードレースは競技で通過する範囲が広く、風向きといった気象条件の影響や上り、下りといった地
 94 形の影響といった多くの要因が複雑に集団形成に影響を与え、また経過時間も長いため、集団の動
 95 態を測定することは困難である。

96 他方、屋内で行われるトラックレースは、1周250mのトラックを周回するために、同じ場所で計測
 97 ができ、集団の動態を観察するのに適している。中でもポイントレースは、競技中に規定周回ごとに
 98 行われるスプリント周回の着順に応じたポイントの累積得点を競う競技である。スプリントは250mの
 99 トラックの場合10周ごとに行われ、1位から4位までにそれぞれ5, 3, 2, 1点が与えられる。また、主
 100 集団すなわち最も人数が多い集団を周回遅れにした選手には20点が与えられる。ポイントレースは
 101 男子エリートでは15kmから40kmの距離で実施され、自転車競技のトラックレースの中では最も距
 102 離が長い種目の1つであり、スピードや持久力とともにペース配分を行い、体力を温存しながら、相
 103 手の状況を見た駆け引きが問われる種目である。したがって、ポイントレースはスプリント周回が複数
 104 回あり、同一地点での計測が可能のため、逃げ集団と主集団の分離と再結合を検討するのに適して
 105 いると考えられる。

106 そこで本研究では、トラックレースの中で最も走行距離が長く、複数回の獲得ポイントの累積によ
 107 って成績が決定される戦略要素の強い競技であるポイントレースを題材に、競技中に生じる個人間
 108 や集団間の距離を定量化し、個人間と集団間の時間差と距離の変化を分析する。そして時間差と距
 109 離の変化から、複雑なポイントレースにおける選手の駆け引きの実態、つまり集団動態を明らかにし、
 110 コーチングに有用なデータの解釈方法を提示することを目的とする。

111

112 II. 方法

113 1. 対象

114 本研究は201X年全日本自転車競技選手権トラック・レースポイントレース男子決勝を対象とした。

115 参加選手数は男性 24 名で年齢は 20.3 ± 2.1 歳 (mean \pm SD) であった. 競技は 1 周 250 m の自
 116 転車専用競技場で行われ, 距離は 30 km (120 周) で行われた. スタートからゴールまでの経過時間
 117 は 36 分 30 秒であり, 平均時速は 49.3 km/h であった. 参加者は研究目的として撮影されることのイ
 118 ンフォームドコンセントを受け, 本研究はヘルシンキ宣言に基づく名古屋大学総合保健体育センタ
 119 ー体育系研究倫理委員会の承認 (30-13) を受けて実施された.

120

121 2. 測定方法

122 レースにおける選手の行動を測定するために, ホームストレートのセンターライン延長線上の観客
 123 席上段に, 1 台のビデオカメラ (Sony HDR-PJ450, 30 fps) を設置して, 両ストレートのセンターライン
 124 を通過する選手を撮影した (動画 1). 撮影後, 映像を解析して, 自転車の前輪の前端が, 両ストレ
 125 トのセンターラインを通過する時刻を半周ごとに全ての選手について測定した (図 1-1). その後, 各
 126 半周のレース先頭選手からの通過時間差を全ての選手について算出し (図 1-2), 半周ごとの各選手
 127 の順位を求めた (図 1-3). なお, これらの測定および算出方法は, 先行研究 (Okumura et al., 2022)
 128 と同様の方法を用いた. 具体的には以下に示す通りである.

129

130 1) 各選手について, センターライン通過時刻 $t_0(n, l)$ を半周ごとに測定した. ここで, n は, 各選
 131 手を表す ($n = 1, 2, 3, \dots, 24$). また, l は 120 周分を半周ごとに順番に表している ($l =$
 132 $1, 2, 3, \dots, 240$).

133

134 2) 各半周について, レース先頭選手 n_{leader} と選手 n の $t_0(n, l)$ を用いて, 両者のセンターライ
 135 ン通過時刻の時間差 $t(n, l)$ を求めた.

136

$$137 \quad t(n, l) = t_0(n, l) - t_0(n_{leader}, l)$$

138

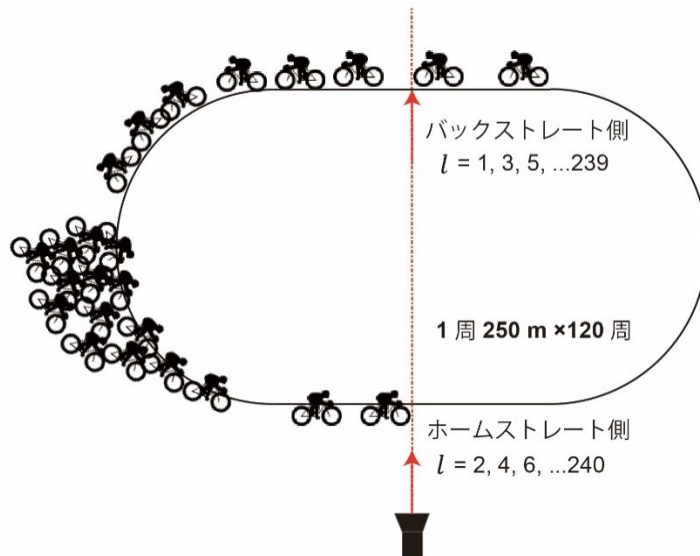
139 3) 2) で求めた時間差を用いて, 半周ごとの各選手の順位を求めた.

140

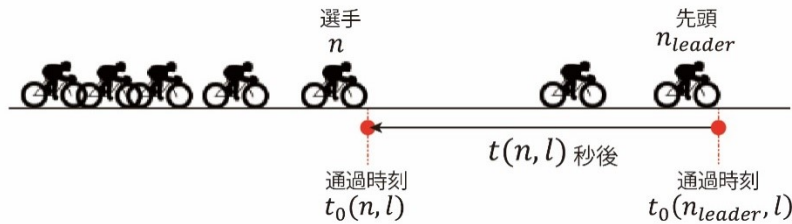
1) 各選手のセンターラインの通過時刻 $t_0(n, l)$ を半周ごとに記録

n : 選手番号 ($n = 1, 2, 3, \dots, 24$)

l : 半周ごとの番号 ($l = 1, 2, 3, \dots, 240$)



2) 各選手の先頭選手との通過時間差 $t(n, l)$ を半周ごとに求める



3) 各選手の半周ごとの順位を求める



図 1 測定方法.

141

142

143

144 3. 集団の定義と定量化

145 自転車競技の集団動態を定量化する指標は様々想定できるが、本研究では、次の 3 つの側面か
146 ら指標を定義した.

147

148 3.1 個人間距離

149 集団の密集状態や、各選手のドラフティング状態の程度を定量化するための指標として、直前を
150 走る選手との個人間距離 $d(n, l)$ を指標化した. 選手 n の直前を走る選手 $n_{neighbour}$ との前輪間
151 の距離の算出手順は以下に示す通りである.

152

153 1) 各半周の全ての選手について、半周の距離(125 m)と半周で要した時間から、選手 n の半
154 周の平均速度 $v(n, l)$ を以下のように求めた(図 2-1).

155

$$v(n, l) = \frac{125}{t_0(n, l) - t_0(n, l - 1)}$$

156

157 2) 1)で求めた各選手の速度を用いて、全選手(24名)の平均速度 $v_{average}$ を各半周について
 158 求めた(図 2-2).

159

$$v_{average}(l) = \sum_{n=1}^{24} v(n, l)$$

160

161

162

3) 2)で求めた全選手の平均速度と、選手 n および選手 $n_{neighbour}$ のセンターライン通過時刻
 の時間差の積により、2選手の前輪間の距離 $d(n, l)$ を全ての選手について半周ごとに算出し
 た(図 2-3).

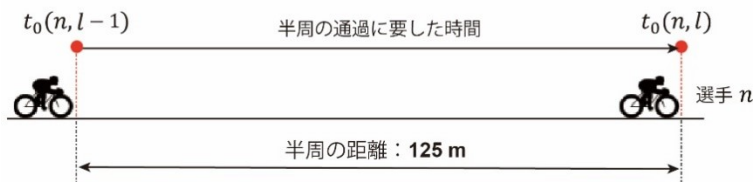
163

164

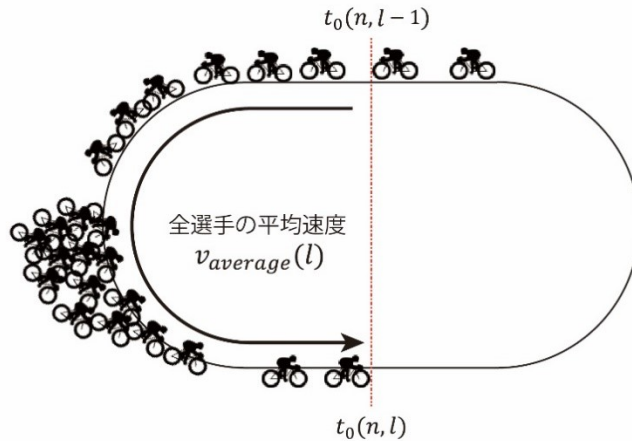
165

$$d(n, l) = (t(n, l) - t(n_{neighbour}, l)) \cdot v_{average}(l)$$

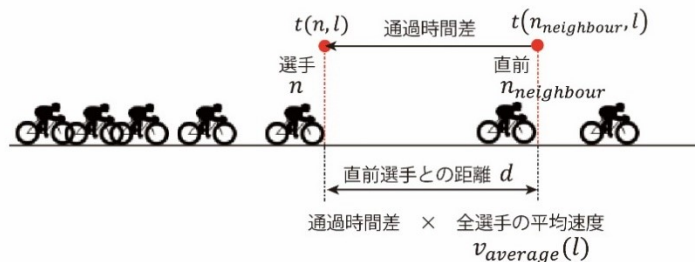
1) 各選手について、半周分の速度 $v(n, l)$ を半周ごとに求める



2) 全選手の平均速度 $v_{average}(l)$ を半周ごとに求める



3) 通過時間差と平均速度から直前選手との距離を求める



166

167

図 2 個人間距離の算出方法.

168
 169
 170
 171
 172
 173
 174
 175
 176
 177
 178
 179
 180
 181
 182
 183
 184
 185
 186
 187
 188
 189
 190
 191
 192
 193

3.2 集団の数および各集団内の人数

集団の数や、各集団を構成する選手の人数は、選手の協調の程度や逃げ集団や主集団の形成を表すと考えられる。こうした集団に関わる指標を定義するためには、まず集団を定義する必要がある。Olds(1998)は、単独で走行する場合とドラフティング状態にある場合の空気抵抗の割合を示すドラフティング係数を提案し、ドラフティングの効果を検討している。彼らは、前を走る選手の後輪後端と、後を走る選手の前輪前端の間隔 d_w を求め、 d_w が 3 m より大きくなると、ドラフティングによる空気抵抗の低減効果はなくなるとしている。この定義を参考にして本研究では、集団を定義した。手順の詳細は、以下に示した通りである。

- 1) 個人間距離で定義した前輪間の距離 $d(n, l)$ を用いて、選手 n の前輪と、その直前を走る選手の後輪間の距離 $d_w(n, l)$ を半周ごとに算出した。図 3-1 に示すように、前輪間の距離から、自転車の長さ 1.6 m を差し引いた値とした。

$$d_w(n, l) = d(n, l) - 1.6$$

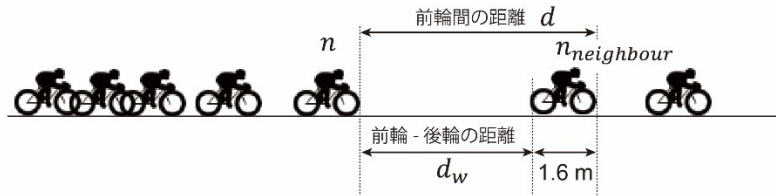
- 2) 1)で算出した d_w を用いて、順位の高い選手から d_w を検証し、 d_w が 3 m よりも大きい場合には、直前選手と別集団、 d_w が 3 m 以下の場合には、直前の選手と同一集団と判別した(図 3-2)。

$$d_w(n, l) > 3 \text{ の場合: 直前選手と別集団}$$

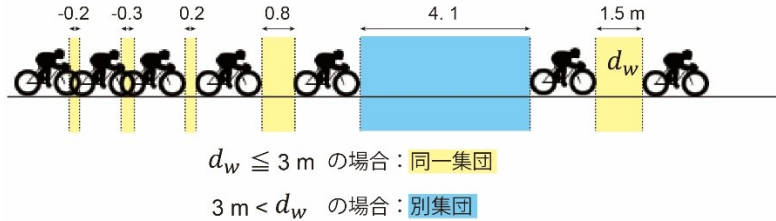
$$d_w(n, l) \leq 3 \text{ の場合: 直前選手と同一集団}$$

- 3) 各半周について、集団の数を算出した。また、全ての集団について、所属する選手の数を算出した。また、最も選手の数が多い集団を主集団と定義した(図 3-3)。

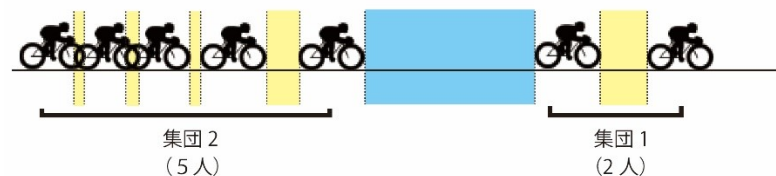
1) 各選手について、直前の選手の後輪からの距離 $d_w(n, l)$ を半周ごとに求める



2) 全選手の $d_w(n, l)$ を検証し、直前選手との集団関係を半周ごとに判別する



3) 各半周について、集団の数および各集団の人数を算出し、主集団を特定する



194

195

196

197 3.3 レース先頭選手と各集団の関係

198 レース先頭選手と各集団との関係や集団の大きさは、先頭選手の逃げの成功または失敗に影響
 199 するため、競技の成績に大きく影響する指標と考えられる. ここでは、これまで定義した指標を用い
 200 て指標化を行った. その詳細は、以下に記述するとともに、これらに対応する典型例は、図 4 の 1) ~
 201 3) に示した.

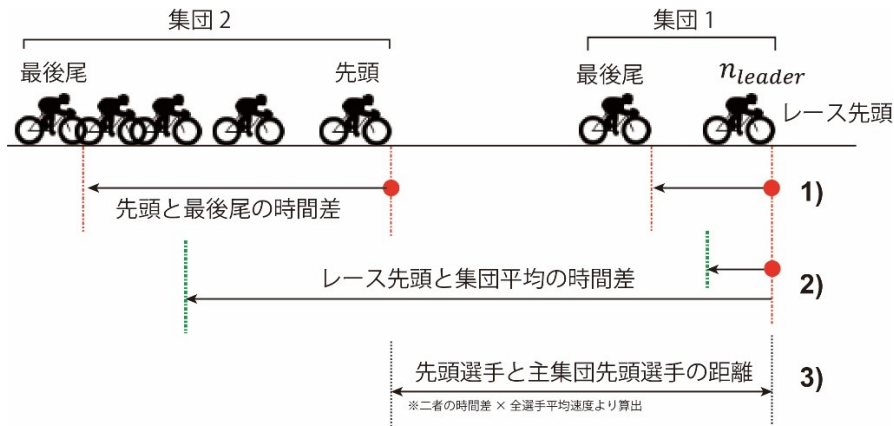
202

203 1) 各集団について、集団の先頭でセンターラインを通過した先頭選手と、集団の最後尾でセン
 204 ターラインを通過した最後尾選手を特定した. その後、先頭選手と最後尾選手のセンターライ
 205 ンの通過時間差を求めた. これは、各集団内の時間的な拡がりを表す指標となる.

206 2) 各集団について、レース先頭選手との時間差 $t(n, l)$ の集団内の平均を求めた. これは、レー
 207 ス先頭選手と各集団との時間的な遅れを表す指標となる. 先頭の集団については、その先頭
 208 集団の時間的な拡がりを表すことにもなる.

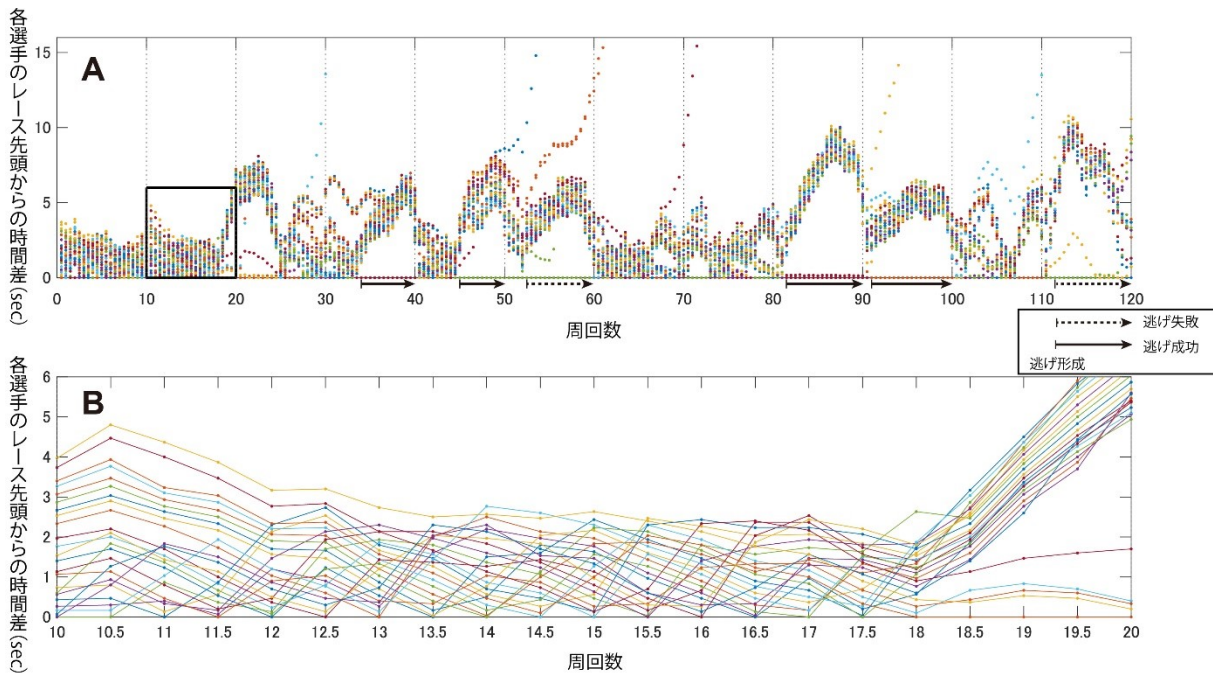
209 3) 各半周について、主集団の先頭選手を特定し、その選手とレース先頭選手 n_{leader} との距離
 210 を求めた. 具体的には、まずレース先頭選手と主集団の先頭選手の時間差を求め、この時間
 211 差と全選手の平均速度 $v_{average}(l)$ の積をレース先頭選手と主集団の先頭選手の距離とし
 212 た. これは、レース先頭選手に対して主集団がどこに位置しているかという空間的な拡がり
 213 を表す指標となる.

214 4) スプリント間の 10 周の前半 5 周までに、前スプリント時の先頭集団とは異なる集団が先行して
 215 分離し、先頭と主集団との差が1秒以上となり、3 周以上継続した場合、逃げと判定した。ロー
 216 ドレースの集団ゴール時に、前の選手との時間差が 1 秒以内は同一集団として判定されるた
 217 め、逃げと主集団との間隔が 1 秒以上となった計測点を逃げの形成とした。そして、逃げの集
 218 団の選手がスプリントで 1 着を獲得した場合を成功、それ以外の場合を失敗とした。
 219



220
221

図 4 集団指標の詳細.



222
223
224

図 5 各選手のレース先頭選手からの時間差.

III. 結果

1. 各選手のレース先頭選手からの時間差

227 図 5 は、分析の基となる各選手のレース先頭選手からの時間差を示したものである。図 5A は、
 228 120 周の全周回における全選手の時間差を示したものである。周回数の上にある実線の矢印は、逃
 229 げ集団が形成され、逃げが成功した周回を示し、点線の矢印は、逃げ集団が形成されたものの逃げ

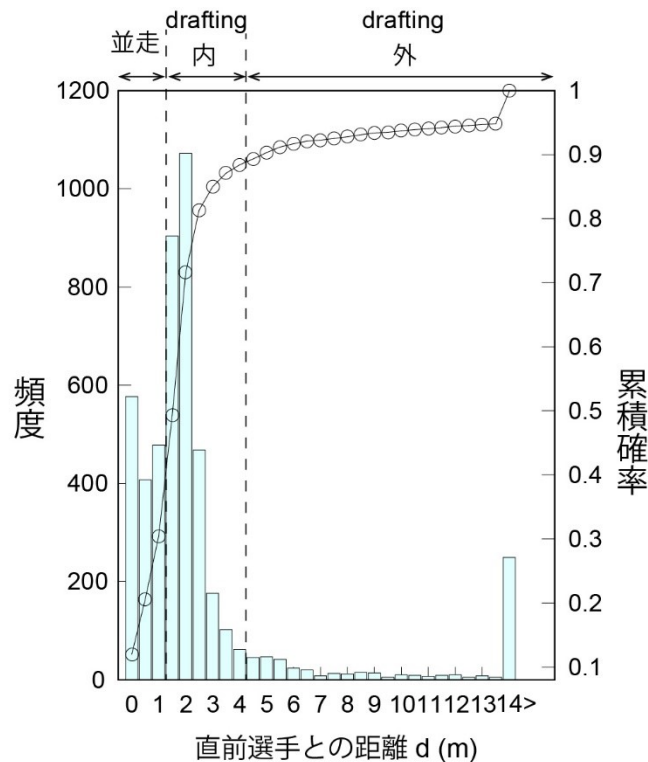
230 が失敗した周回を示している. 図 5B は全周回のうち, 10~20 周までを示したもので, 10.5 周から
 231 17.5 周まで半周ごとに先頭選手が入れ替わり, 先頭だった選手が後方に下がるローテーションが見
 232 られた. またスプリント周回の前の 18 周で先頭に立った選手がそのまま逃げ切り, それを追いかけた
 233 3 選手までがポイントを獲得した.

234

235 2. 個人間距離

236 図 6 は競技中に生じた各選手の直前選手との個人間距離 (d) の頻度を示したものである. 個人間
 237 距離は各選手の前輪前端間の距離として定義し(図 1-1), 自転車 1 台分の長さは 1.6 m であるた
 238 め, 直前の選手と 1.6 m 以下の間隔の場合は並走状態であることを示している. また前車後輪と後
 239 車前輪との距離が 3 m 以内をドラフティング状態にあると定義しているため (Olds, 1998), 前輪前
 240 端間の距離である個人間距離が 4.6 m 以下の場合にはドラフティング状態にあることを示している
 241 (図 3-1). 頻度分布は 0 m から 0.5 m 間隔で算出した(図 6 左軸). なお, 14 m 以上の間隔の頻
 242 度については, 図を見やすくするため, 合計して示してある. 累積確率(図 6 右軸)を見ると, 約 90%
 243 は個人間距離が 4.6 m 以内のドラフティングの範囲内であり, 全競技の平均速度が約 14 m/s (13.8
 244 m/s) であることから, 全競技中の選手間の間隔の 95%はおよそ 1 秒以下であった. また, 個人間距
 245 離が 4.6 m 以内のドラフティング内に位置する選手の頻度は, 選手間距離が離れるのに従って,
 246 指数関数的に減少していた.

247



248

249 図 6 競技中に生じた直前選手との個人間距離の頻度.

250

251 3. 集団の数と集団内人数の変化

252 図 7A は半周ごとの集団の数と集団内の人数を示している. 集団は最大 10 個の集団に分かれて

253 いた(119 周から 120 周). 図 7A で, 集団の数が 1 というのは, 全体が一つの集団でレース先頭選
 254 手も含まれている. 図の一番下に赤い部分がある場合は, 大きな集団が先頭で形成されていること
 255 を表す. 青い部分が一番下にあり, その上に赤い部分がある場合は少数の逃げ集団が形成され, そ
 256 の逃げ集団を大きな主集団が追走している状態を示している. 80 周から 90 周のスプリント間では 2
 257 人の逃げ集団が形成され, その後を大きな集団が追走していた. 他方, 10 周, 40 周, 60 周, 70 周
 258 のスプリント後にはそれまでいくつかに分離していた集団が, 徐々に先頭を含む一つの集団として再
 259 結合していることがうかがえる.

260 図 7B は集団の数のヒストグラムを示したものである. もっとも出現頻度が高かったのは, 集団の数が
 261 2 の場合であり(26.7%), 次いで集団数 3(20.4%), 1(16.7%)であった. 集団の数の中央値は 3,
 262 平均値は 3.25 であった. 図 7A 及び動画 2 の映像を観察すると, 集団数はレースの推移に伴い, 中
 263 央値を中心に増減を繰り返しながら展開されていた.

264 図 7C は各集団内の人数の分布を示したものである. 集団内人数は 1 人から 24 人まであり, 最も
 265 多かったのは 1 人の場合で全体の 38.3%, 次いで 2 人の 13.1%であった. そして, 2 人から 5 人まで
 266 の集団が全体の 26.2%を占め, 15 人以上の集団の場合も 20%近く見られた.

267

268 4. 各集団の時間的拡がりとは先頭選手からの時間的遅れ

269 図 7D は, 各集団の平均位置と先頭選手との時間差と, 各集団の先頭と最後尾の時間差をエラー
 270 バーによって示している. なお, 分析したレースにおいて, 30.5 周, 54 周, 72 周, 94.5 周, 110.5 周
 271 で 1 人ずつ, 61.5 周で 2 人が先頭との時間差が大きくなったことによって競技から除外されていた
 272 が, その選手たちの先頭から遅れていく様子が, 図 7D では先頭選手との時間差の拡大として表れ
 273 ていた.

274 図 7E は先頭が 1 人の場合を除く各集団の先頭と最後尾との時間差のヒストグラムを示している.
 275 各集団は長くとも 4 秒以内の時間的拡がりにとどまっていた. レース全体の平均速度(13.8 m/s)から
 276 距離に換算すると 55 m 程度になる. 各集団の先頭と 0.2 秒以下の頻度が最も高く 21.7%であった
 277 が, 2 秒程度のところにもピークが見られた.

278 図 7F はレース先頭選手と各集団の先頭との時間差のヒストグラムを示している. 先頭との時間差
 279 が 5 秒以内に位置する場合は 76.1%であり, 平均速度から換算すると 70 m 以内であった. 先頭選
 280 手と各集団の先頭選手との時間差の平均は 4.4 s, 標準偏差は 2.92 s, 最小値は 0.3 s, 最大値は
 281 16.1 s であった.

282

283 5. レース先頭選手と主集団先頭選手との空間的拡がり

284 図 7G はドラフティング効果に基づいて定義した, レース先頭選手と主集団の先頭選手との距離の
 285 推移を示している. 集団の数が 1 つの場合には, レースの先頭選手が主集団に含まれているためそ
 286 の距離は 0 m となっている. つまり, 主集団が先頭集団であることを示している. レース先頭選手と
 287 主集団の先頭選手との距離の平均は 33.7 m, 標準偏差は 32.3 m, 最大値は 130.8 m であった.

288 レース先頭選手と主集団の先頭選手との距離の推移から, 最初の 10 周では一度レース先頭選手
 289 と主集団に分離するが, すぐに再結合し主集団の先頭選手がスプリント周回を迎えていた. それ以
 290 外の 11 回のスプリント周回では, レース先頭選手と主集団の先頭選手の間に距離がみられた. さ

291 に、各周回の途中から逃げ集団と主集団が分離している場合が 6 回見られた(34, 45, 52.5, 81.5,
 292 91, 111 周:図 5A, 7D の横矢印). この中で、81.5 周で形成された逃げ集団のみが 2 人で構成され
 293 ており(図 5A, 7D), それ以外の 5 回はいずれも単独(1 人)での逃げであった。
 294

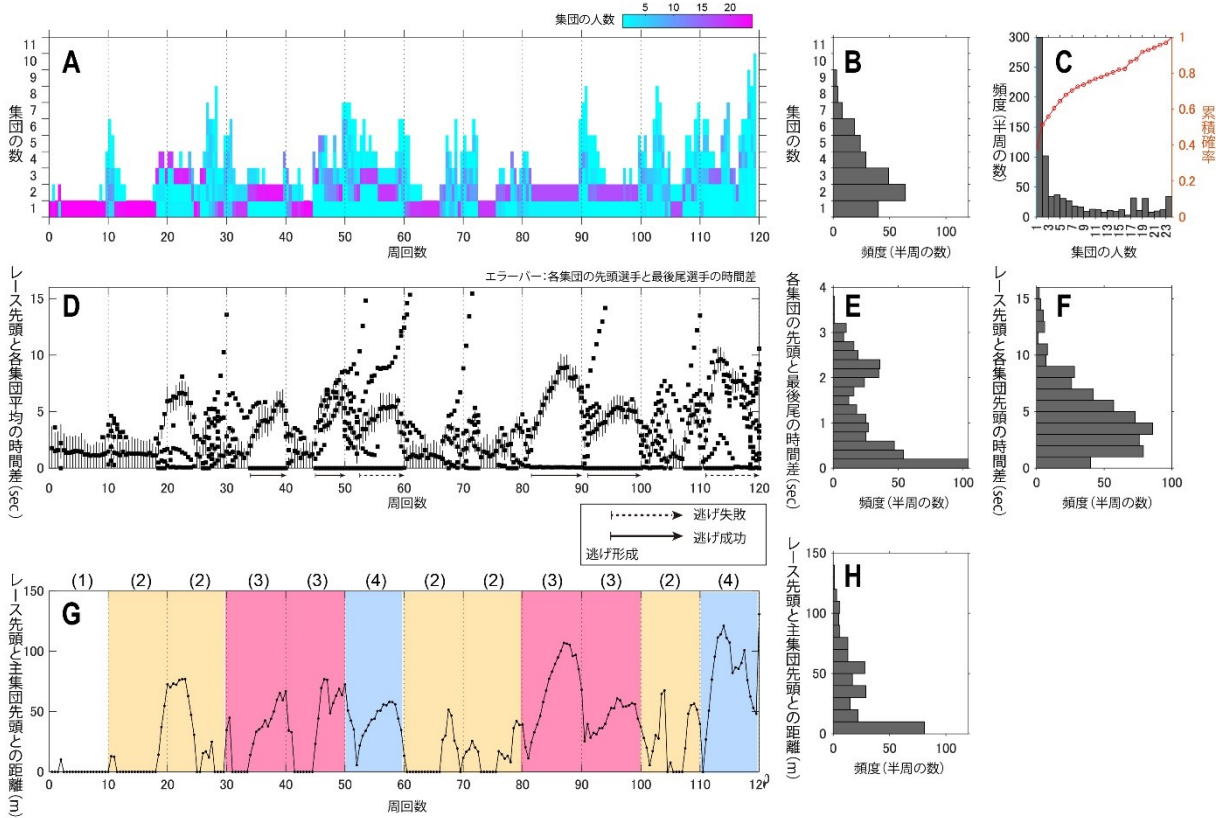


図 7 集団に関わる指標の時間変化および頻度分布。

295
 296
 297
 298
 299
 300

IV. 考察

301 1. 個人間距離に及ぼすドラフティングの影響

302 ポイントレース競技中の各選手の直前選手との距離の頻度は、前の選手との間隔が広がるのに
 303 従って減少し、約 90%は Olds (1998)の定義する前者との間隔が 3 m 以内のドラフティングの範囲
 304 内であった(図 6). ポイントレース中のほとんどの時間で選手達はドラフティングや並走をするような
 305 接近した位置取りをして、密集した状態であることを示していた. 他方、ドラフティング外の選手は、集
 306 団が分離した際に先頭を走行する選手や単独走の選手であると考えられた.

307 ドラフティングの範囲内に位置する場合は多いのは、ドラフティングによる空気抵抗の低減の効果
 308 が距離の広がりによって低下するためであると考えられる. Olds (1998)のドラフティング時と単独走と
 309 の空気抵抗の割合を示すドラフティング係数と前の選手との間隔に関する関係式では、ドラフティ
 310 ング係数は距離の 2 乗に比例して大きくなり、3 m を超えると単独走と空気抵抗の差がなくなることを
 311 示している. つまり、ドラフティング範囲内においても前の選手との間隔が広がるほど空気抵抗が大

312 きくなり、その状態に位置するのは選手にとって負担となるため頻度が少なくなったと考えられる。前
 313 を走る選手との間隔が少しでも広がると空気抵抗が大きくなってしまいうため、瞬間的には体力を消耗
 314 するが、加速してその間隔を縮め、より空気抵抗の小さい位置を走ろうとするため、直前選手との間
 315 隔はより小さくなっていくと考えられる。他方、一端広がった前車との間隔が積極的に維持されない
 316 場合、前車との間隔が広がるとより大きな空気抵抗を受けることになり、さらにその間隔が広がって
 317 き、集団が分離する原因となると考えられる。このように、各選手の直前選手との間隔の頻度は、空
 318 気抵抗が前車との間隔が広がるのにしたがって大きくなるという物理的特性、すなわちドラフティング
 319 効果によって生じたものと考えられる。

320

321 2. ポイントレースにおける集団動態

322 ポイントレース競技中の集団動態を検討するため、ドラフティング効果に基づき、集団の数と集団
 323 内の人数を分析した結果、集団は最大で 10 個に分離していたが、集団数が 3 までの場合が 63.8%
 324 であり、多くの場合には 3 つ以下の集団に分離していた(図 7A, B)。しかしながら、スプリント後に一
 325 つの集団に徐々に再結合する場合(10, 40, 60, 70 周)が見られ、レースでは分離と再結合を繰り返
 326 していることを示すことができた。集団内の人数は 1 人が最も多く全体の 38.3%であり、これは逃げ、
 327 あるいは最後尾で脱落していく選手のものも多く含まれていた。他方、15 人以上の集団も全体の
 328 20%近くあり、より大きな集団を作ることによって先頭を交代するローテーションを行いながら、空気抵
 329 抗の負担を分散することによって、集団として高いスピードを維持していたものと考えられる。

330 分離した集団内の時間的広がりや先頭選手からの時間的遅れを分析した結果、各集団は 0.2 秒
 331 以内が最も多く、2 秒前後のところにもピークが見られた(図 7E)。これは集団内の人数が 2 人から 5
 332 人の場合が全体の 26.2%、また 15 人以上の集団が 20%近く見られたことから、比較的少人数の集
 333 団の場合と比較的多い人数での集団が形成されていたことがうかがえる。また、レース先頭選手と各
 334 集団の先頭選手の時間差は、5 秒以内が 71.6%で、距離にして 70 m 以内となり、多くは 250 m の
 335 トラックの約 4 分の 1 以内のところに位置していたことになる。

336 先頭選手と主集団の先頭選手との空間的な広がりやを検討した結果、スプリント間の周回の集団動
 337 態のパターンとして、以下の 4 つのパターンに分類できると考えられた(図 7G)。すなわち、(1)主集
 338 団の先頭選手がスプリント周回を迎える(10 周のスプリント)、(2)スプリントの前に集団が分離しスプリ
 339 ントが行なわれる(20, 30, 70, 80, 110 周のスプリント)、(3)逃げが形成され(34, 45, 81.5, 91 周:図
 340 5A, 7D の横矢印実線)、逃げ切りが成功する(40, 50, 90, 100 周のスプリント)、そして、(4)逃げが
 341 形成されるが(52.5, 111 周:図 5A, 7D の横矢印点線)、スプリント前に主集団にいた選手に追走さ
 342 れ吸収される(60, 120 周のスプリント)であった。もっとも多く見られたのは、スプリントの前に集団が
 343 分離しスプリントが行われるパターンで、12 回のスプリント周回において半数近い 5 回がこのパター
 344 ンであった。次に多く見られたのが、逃げ集団が形成され(34, 45, 81.5, 91 周)、逃げ切りが成功す
 345 るパターンで、4 回のスプリント周回(40, 50, 90, 100 周)で見られた。また、逃げ集団が形成されるも
 346 (52.5, 111 周)、後続の集団に追走され、逃げが成功しない場合(60, 120 周のスプリント)があった。
 347 今回 6 回観察された逃げ集団は、単独の逃げが 5 回と 2 人による逃げ集団が 1 回であった。そのた
 348 め、集団内の人数が 1 人の場合が多くなったと考えられ(図 7C)、個人間距離においても 14 m 以
 349 上の場合が 5%程度見られた(図 5)と考えられる。

350 スプリント間の周回の集団動態を 4 つのパターンとして類型化することで、レース全体の展開との
351 関係を考察することができる。今回分析対象としたレースでは、最初の 3 回のスプリント(10, 20, 30
352 周)は主集団が先頭となったスプリントまたはスプリント前に集団が分離するスプリントが行われるパ
353 ーンであった。次の 3 回のスプリント(40, 50, 60 周)は逃げが形成された。これは、レースの序盤で
354 ある 30 周までは、ゴールまでの残り距離を考え、体力を温存するために主集団にいることを選択し、
355 体力を消耗する逃げを形成しようとする選手がいなかったためと考えられる。その後のレース中盤で
356 ある 40 周から 60 周までは、逃げることによってポイント獲得を狙う選手と、主集団に残り、引き続き体
357 力を温存する選手、またはスプリント前に逃げを吸収することでポイントを狙うといった選手達の駆け
358 引きによって、逃げが形成される展開になったと推察される。そして、レース後半に入る 70 周と 80 周
359 においては、逃げは形成されなかった。Dwyer et al. (2013) は同じく集団スタートのトラックレースで
360 あるエリミネーションレースの分析において、レース後半は選手の疲労が増し、競技の展開が変化す
361 るとしている。本研究で分析したポイントレースでは、70 周や 80 周目は競技の半分を終え、選手達
362 の疲労の程度が高く、集団で体力を温存しようとする傾向が高かったためと推察される。さらに、その
363 後のレース最終局面の後半 3 回のスプリント(90, 100, 120 周)では、それまでの得点獲得状況を踏
364 まえ、各選手が上位成績のためのポイント獲得に向けた駆け引きによって逃げが形成されたと考えら
365 れる。これらのように、スプリント間の 10 周内の集団動態は、レース全体の状況に影響を受けている
366 と考えられ、選手やコーチは状況に応じて起こりやすい展開を見極める必要がある。

367 特に逃げ集団が形成され、主集団と分離した際には、その先頭と主集団の先頭との距離が、逃げ
368 が成功するか否かを決定づける距離になると考えられる。なぜならば、逃げ集団は逃げ切りを成功さ
369 せるために、スプリント前の段階で主集団に対し距離を十分開けておくことが必要である一方で、主
370 集団はスプリントにおいて逃げ集団を捉えるために、距離を開けすぎないことが必要である。そのた
371 め、先頭と主集団先頭との距離が、逃げる成否と関係すると考えられる。今回のレースでは、34, 45,
372 52.5, 91 周では単独選手の逃げが形成され、先頭と主集団の距離が最大でも 50-80 m 程度となっ
373 ていた(図 7G)。その中で 40, 50, 100 周のスプリントでは逃げ切りが成功していたが、60 周では主
374 集団に追走され逃げ切りは成功していない。つまり、この先頭と主集団の距離が 80 m 以下の場合
375 は、逃げ切りと主集団への再結合の可能性が拮抗している距離であると推測される。他方、81.5 周
376 で逃げ集団が形成され 90 周のスプリントで逃げ切りが成功していた場合では、最大で 100 m の距
377 離が先頭と主集団の間で開いていた。これは、ここでの逃げ集団は 2 人で構成され、お互いの先頭
378 交代による体力温存がうまく機能し、主集団との距離を単独選手による逃げより大きく確保できたた
379 めと考えられる。なお、111 周で始まった逃げも単独走であったが、これは最後のスプリント周回で、
380 集団が多くに分かれ、最終的には 10 個の集団で 120 周を迎え(図 7A)、逃げ切りは成功していな
381 い。

382 つまり、単独走で逃げ切るには常に空気抵抗を一人で受け続けなければならない、それに対し追い
383 かける主集団はローテーションを行いながら空気抵抗の負担を交代しながら分散することによって、
384 体力を温存しつつも集団として高いスピードを維持できるものと思われる。他方、複数人で逃げ集団
385 を形成した場合には、逃げ集団内でローテーションを行うことによって空気抵抗の負担を分散させ、
386 高いスピードを維持しながら逃げるができるものと思われる。選手は逃げを意図する場合は、ロー
387 テーションに参加しながら、同様の意図を持つ選手と近接した位置にいられるように調整し、逃げよう

388 として選手がいた場合は協力する態度を明確にしてローテーションに参加し、共同で逃げを形成す
 389 ることが重要であると考えられる。このような集団間の距離の調整も、自転車競技選手の能力として、
 390 身体的な能力と同様に必要であると推察される。

391 本研究では、ドラフティング効果に基づき集団を定義することによって、ポイントレースにおける周
 392 回内での集団動態を分析した。その結果、集団の分離や再結合、集団動態の類型化、逃げ集団の
 393 形成や逃げの成否を決める先頭と主集団との距離などが明らかになった。したがって、ドラフティン
 394 グ効果に基づき集団を定義することで、ポイントレースでの集団動態を検討でき、現場への還元もで
 395 きると考えられた。また、本研究では、半周ごとの通過時刻を各選手について記録し、その通過時刻
 396 から集団を定義し、様々な指標を定量化することによって集団の動態を分析することができた。全選
 397 手の半周ごとの通過時刻を記録する必要はあるが、必ずしも映像から求める必要はなく、ストップウ
 398 ヌッチ等での記録であれば現場での計測も十分可能であると考えられ、集団動態を検討する方法と
 399 して簡便である。他方、逃げが形成された時期を正確に捉えるには、今回の分析のような半周ごとの
 400 測定では時間分解能が十分ではなく、本研究の限界である。

401

402 3. コーチングへの示唆

403 本研究は1試合のポイントレースを分析し、12回のスプリント周回内の集団動態を分析したもので、
 404 研究結果の一般化には慎重にならざるを得ない。しかしながら、本研究での分析結果から、対象とし
 405 たレース全体の展開と各ポイント周回での集団動態が読み取れる。まずレース全体を10周からなる
 406 スプリント周回に注目してみると、周回の後半まで集団が分離しない場合と、周回の前半から逃げ集
 407 団が形成される場合が観察された(図7G)。そして、周回後半まで集団が分離しない場合は、レース
 408 序盤のお互いの状況を探っていると思われるところ(0~30周)と、疲労が出てくると思われるレース
 409 後半に入るところ(60~80周)であった。そして、レース前後半の中盤以降(30~60周と80~120周)
 410 では、周回前半で逃げ集団が形成される場合が多かった。つまり、レース前後半とも、最初は集団が
 411 分離せずにポイント周回を迎えるパターンが見られ、その後逃げ集団が形成される展開となっていた。
 412 今回のレースで見られたレース前後半での類似した展開が偶然かどうか、他のレースも分析すること
 413 によって、レース全体の展開が予想でき、各選手の能力にあった戦略を考えることが可能になるかも
 414 しれない。また、周回内で逃げを成功させるためには、後続の主集団との距離をある程度離しておく
 415 必要があり、できれば2人以上で逃げ集団を形成するのが重要であると考えられる(図7Gの80~
 416 90周)。そのためには、集団でのローテーションの中で、逃げを意図する選手を察知し、ローテーシ
 417 ョンを利用しながら2人以上で逃げるタイミングを測ることが大切になると思われる。

418

419 V. まとめ

420 本研究では、全日本選手権ポイントレースを対象に、ホーム・バック両直線部の中心線を各選手
 421 が通過する時刻を半周ごとに測定し、各選手の直前選手との距離を求め、ドラフティング効果に基づ
 422 き集団を定義した。そして、個人間距離、集団の数と各集団内の人数、レース先頭選手と最も人数
 423 が多い主集団との距離を定量化し、分析した。その結果、個人間の距離については、直前選手との
 424 間隔の約90%は3mより小さく、ほとんどの選手は空気抵抗が低減されるドラフティングの範囲内に
 425 位置していることが明らかになった。そして、そのドラフティング効果に基づき集団を定義することによ

426 って、集団の数の増減や集団内の人数の変化を捉えることができ、レース中に繰り返される分離と再
 427 結合を示すことができた。また、先頭選手と主集団との距離の変化からレース展開を4つのパターン
 428 に分類することができ、逃げの成否を決定づける距離についても示唆を得ることができた。

429 本研究で用いた計測・解析方法によって、複雑なポイントレースにおける選手間の駆け引きの実
 430 態をある程度明らかにできたといえる。しかしながら、本研究は1事例であり、12回のスプリント周回
 431 を分析したもので、どのような逃げ集団が逃げ切りに成功したり失敗したりするのかを分析するには
 432 ケース数が十分ではない。自転車競技において、逃げと主集団の距離は競技の結果に大きな影響
 433 を及ぼすため、さらに多くの競技を分析し、個人間・集団間距離やそこに至る過程を分析することが
 434 できれば、選手やコーチが競技中の状況を理解し、どのように対処するべきかの示唆を得ることがで
 435 きると考えられる。

436

437 謝辞

438 本研究は、JSPS 科研費 20H00572 の助成を受けたものです。

439

440 VI. 参考文献

- 441 ・Abbiss, C. R., & Laursen, P. B. (2008). Describing and understanding pacing strategies during athletic
 442 competition. *Sports Medicine*, 38(3), 239-252.
- 443 ・Dwyer, D. B., Ofoghi, B., Huntsman, E., Rossitto, D., McMahon, C., & Zeleznikow, J. (2013). The
 444 elimination race in track cycling: patterns and predictors of performance. *Journal of Science and*
 445 *Cycling*, 2(2), 6-12.
- 446 ・石井泰光, 木村亜美, 黒川剛, 山本正嘉. (2014). 自転車競技選手におけるパワークリーンおよび
 447 スクワットの最大挙上重量と短距離走行能力との関係. *スポーツパフォーマンス研究*, 6, 175-183.
- 448 ・Kyle, C. R. (1979). Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners
 449 travelling in groups. *Ergonomics*, 22(4), 387-397.
- 450 ・Okumura, F., Yokoyama, K., & Yamamoto, Y. (2022). State transitions among groups of cyclists in
 451 cycling points races. *European Journal of Sport Science*, 22(6), 790-798.
- 452 ・Olds, T. (1998). The mathematics of breaking away and chasing in cycling. *European Journal of*
 453 *Applied Physiology and Occupational Physiology*, 77(6), 492-497.
- 454 ・Renfree, A., Crivoi do Carmo, E., Martin, L., & Peters, D. M. (2015). The influence of collective
 455 behavior on pacing in endurance competitions. *Frontiers in Physiology*, 6, 373.
- 456 ・清水都貴, 安藤隼人, 黒川剛, 山本正嘉. (2010). 高度に対する個人内および個人間での適応状
 457 況の違いを考慮した低酸素トレーニング処方成功事例; 自転車ロード競技選手を対象として. *ス*
 458 *ポーツパフォーマンス研究*, 2, 259-270.
- 459 ・白崎啓太, 山辺芳, 明石啓太, 高嶋渉. (2019). 自転車競技の隊列構成人数の違いが並走者に
 460 与える空気力学的な影響. *体育学研究* 64(2), 637-645.
- 461 ・Trenchard, H., Richardson, A., Ratamero, E., & Perc, M. (2014). Collective behavior and the
 462 identification of phases in bicycle pelotons. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 405,
 463 92-103.

- 464 • Trenchard H., Ratamero E., Richardson A., & Perc M. (2015). A deceleration model for bicycle peloton
465 dynamics and group sorting. *Applied Mathematics and Computation*, 251, 24-34.