

博士論文

自転車競技における離合集散ダイナミクス

奥村 文浩

目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	集団研究の概観	2
1.3	集団研究からみた自転車競技	11
1.4	ポイントレースの離合集散ダイナミクスへの接近方法	16
第 2 章	目的	18
第 3 章	ポイントレースにおける大域的状态遷移	19
3.1	背景	19
3.2	目的	22
3.3	方法	23
3.4	結果	26
3.5	考察	32
3.6	まとめ	36
第 4 章	自転車競技における制約に基づく機能的集団形成	38

4.1	背景	38
4.2	目的	41
4.3	方法	42
4.4	結果	50
4.5	考察	57
4.6	まとめ	61
第 5 章	離合集散の制御ダイナミクスと状態依存性	63
5.1	背景	63
5.2	目的	67
5.3	方法	67
5.4	結果	70
5.5	考察	79
5.6	結論	82
第 6 章	総合考察	84
6.1	本論文のまとめ	84
6.2	結言	89
参考文献		96

第1章

序論

1.1 はじめに

昨今のウクライナ軍事侵攻に象徴される世界情勢のように、人間の集団同士の均衡は、お互い誰と手を組むか微妙な関係で成り立っている。ソビエト連邦の崩壊の後、ウクライナは独立し、独立国家共同体（CIS）を経て、北大西洋条約機構（NATO）との関係を深め、それをロシアは懸念していた。このような事態におよび、従来中立の立場をとっていたフィンランドやスウェーデンは NATO への加盟を目指し、この背景には軍事侵攻に対する差し迫った危機感があるに違いない。このように実現していた均衡が崩れた場合、大きく揺らぎが生じ、再び秩序が形成されるのに長い時間がかかるかもしれない。

ヒトは協力する種であるという (Bowles & Gintis, 2011)。我々が現在過ごす社会は、高度な技術の蓄積によって作られた機械や大きな建物に囲まれており、これらは独力で作ることはできず、さまざまな人々が集まり、それぞれ役割をもって分業して協力することで出来上がっているだろう。また、協力には自分の利益を犠牲にして他者の利益となる行

動をする利他性が関連する。そして、どのようにしてヒトは協力するように進化したのかを明らかにすることは科学の大きなテーマである。

このテーマに対し、本論文では、集団スタートの自転車競技を題材にする。多くの自転車競技では、空気抵抗が選手たちの行動を拘束するが、選手たちは集団を形成し、お互いを風除けとすることで体力を温存する。この時、先頭となる選手は風を受けて、後方の選手より体力を消耗するため、選手たちは先頭を交代しあう行動が観察される。このように、自転車競技は、競争相手と利他的に協力し、体力を温存しながら、利己的に勝利を目指す特徴を持った競技である。自転車競技における選手たちの協力と競争の駆け引きの結果、どのような秩序が現れるのか、その秩序にはどのような規則性があるのか。これらを明らかにすることで、ヒトはどのように利己的になり、そして利他的になることができるのか新たな理解が得られるかもしれない。

1.2 集団研究の概観

ヒトは脳が発達し、胎内で十分に成長する前に産み落とされることにより、子供の世話の負担が増えたため、協同の育児が行われるようになったとされる。また、先史時代に洞窟に残された壁画や遺跡からの出土品から、ヒトが大型動物の狩りを行っており、集団で協力して狩りを行っていたと考えられる。他方、抱卵するつがいの元へ餌を運ぶ鳥、アリやハチなどの社会性昆虫やグルーミングしあう動物など、協力が観察される動物は他にもいる。しかしながら、これらの他種の協力の例と、ヒトの協力とでは大きな違いがあるように思われる。ヒト以外の生物で見られる協力は、血縁関係のあるもの同士の間で行われるが、ヒトの協力は見知らぬ他者との間でも行われ、さらに大規模になることが例外的である (Bowles & Gintis, 2011)。以上のような、ヒトの特徴的な側面である集団や協力に

ついでの研究を概観し、その課題を明らかにする。

1.2.1 集団の整理

社会を個人（の集まり）から成るとする社会学において、集団はどのように捉えられているか。人々の集まりは、(1) 集団、(2) 公衆、(3) 大衆、(4) 群衆、そして(5) 単なる集まり、といったまとまりの程度で分けることができる。集団は、共有された価値観や目標を持っており、まとまり方が最も強固である。ただし、この「集団」は狭義の「集団」であり、広い意味での「集団」は3つのレベルがある。第1は「未組織集団」と呼ばれるレベル、第2は狭い意味で「集団」と呼ばれるレベル、そして、第3は「組織」と呼ばれるレベルである。それぞれ、われわれ意識を持たない人間の集まり、お互いにわれわれ意識を持つ人の集まり、そして目的達成のため意図的な調整を受け存続する集まりである。狭義の「集団」において、土台となるのは持続的なコミュニケーションであり、その結果、共通の価値観やルールが現われ一体感となり、他の集団との境界が明確になる。集団のルールは、特定の方向付けに沿うべく設けられ、集団内の役割によって実践され、同一の役割を持つ行為者に共通の価値観を生み出す。社会学における代表的な集団類型を以下に3つ挙げる(木下, 2003)。

(1) ゲマインシャフトとゲゼルシャフト（テンニースらによる類型）

ゲマインシャフト（共同社会）とは、情緒的で非打算的な「本質意思」に基づく社会であり、家族などが典型的な例である。ゲゼルシャフト（利益社会）は打算的で合理的な「選択意思」に基づく社会であり、大都市などが典型例である。ゲゼルシャフトは機能組織体とも言われる。

(2) 第1次集団と第2次集団（クーリーらによる類型）

第1次集団は、家族など親密な自然発生的小集団で、人間の成長の基盤となる集団である。第2次集団は、企業や政党など特定の利害関心により結びついた、人為的な大集団である。社会の近代化は、第1次集団の弱体化と、それにもなう第2次集団の拡大として捉えられる。

(3) コミュニティとアソシエーション（マッキーヴァーによる類型）

コミュニティ（共同体）とは、強い「われわれ意識」で結びついた、地域性や共同性を基礎にした自然発生的集団である。典型的には、村落や地域社会である。アソシエーション（機能集団）とは、特定の共同関心を追求する人為的に構成された集団であり、コミュニティを土台に特定の機能を実現するために存在する。典型的には病院や学校、企業である。

これらの類型には共通点が見られ、親密で自然発生的な集団に対し、人為的な特定の機能を持った集団を区別していると考えられる。

1.2.2 社会心理学，集団力学によるアプローチ

社会心理学は、社会活動や他者の存在による個人への影響を研究する心理学の領域である。また、集団力学（グループ・ダイナミクス）は、人が集団となったときに現れる行動や現象を研究する領域である。

釘原（2011）は、集団の研究者による様々な定義を以下のように挙げた上で、集団の定義はこれらの要素を並べて記述することになっているとしている。レヴィンは「共通運命」、シェリフとシェリフは「役割や地位といった一定構造を持つ人々の集まり」、ベイルズは「対面による相互作用」、タジェフェルは「集団アイデンティティの存在」を、集団の定義の必要の不可欠なものであるとしている。これらの要素を強く持つ集団が、集団としての存在感

が強いことを意味し、キャンベルは集団実在性という言葉で表現した。リッケルらは集団実在性と相関が高い集団特性として①相互作用、②重要性、③類似性、④持続性、⑤共通目標、⑥共通結果、⑦浸透性、⑧サイズを挙げた。この中で⑦と⑧は集団実在性と負の相関がみられたとしている。さらに釘原 (2011) は、集団の定義は「上記 8 つの特性があり、かつ役割や構造が存在する複数の人々の集まり」としている。Tuckman (1965) は集団の発達には、形成 (forming) - 波乱 (storming) - 規律成立 (norming) - 課題遂行 (performing) - 離散 (adjourning) の段階があるとしている (Tuckman & Jensen, 1977)。

集団で作業を行うと、集団サイズが大きくなるのに従って、個人のアウトプットの総和と全体のアウトプットの差が大きくなる場合がある。このような社会的な手抜きに関して、Latané et al. (1979) は、個人で作業する場合と比較して、集団で作業をする場合の方が、1 人当たりの努力の量 (動機づけ) が低下するためであると考えた。

他方、他者の存在によって、パフォーマンスが向上する社会的促進が見られる場合もある。集団のパフォーマンスは、成員構成など内部の要因と、課題など外部の要因と関連すると考えられる。集団の構造は、規範、地位・役割やネットワークによって構成される。Deutsch (1949) は、集団内の相互依存関係を、集団の目標に対し促進的か阻害的なのものを分類した。集団全体の利益と個人的利益が競合関係となると、阻害的な相互作用になるとしている。

1.2.3 動物行動学，進化論的アプローチ

協力行動の進化は、現代の進化生物学で最も注目を集める研究テーマの一つである (Laland, 2017)。ヒトの遺伝子にも多様性があるが、ヒトの生活環境はそれを凌駕するほど多様であり、熱帯から寒帯までに適応している。特筆すべきなのは、集団でそれぞれの

環境に適した生活様式に対応できていることであり、その背景には集団を維持する仕組みがあるはずである。

群れを作ることは、ヒト以外の生物でも多く見られる。空を飛ぶ鳥の群れや、水族館で展示されるイワシの群れなど日常生活で多く目にすることができる。また、利他的に自分を犠牲にして他の個体の世話をする動物の例として、ハチなどの真社会性動物が挙げられるが、その進化を説明するものとして血縁選択説がある。

では、どのようにしてヒトは集団で他人と協力することができるのだろうか。そこには間接的互惠性、すなわち、「情けは人の為ならず」のことわざにあるように、直接的な見返りのない相手に対し、援助することが好まれることで協力することが促進されることが考えられる。また、フリーライダー、すなわち「ただ乗り」を許さないことも組み込まれている必要があると考えられる。

ゲーム理論は、自らの利得が他の利得に影響する状況での戦略について調べることができる。最後通牒ゲームでは、プレイヤーは提案者と応答者に分けられ、提案者は取り分の分配額を提案し、応答者は拒否する権利があるが、拒否すると両者には何も与えられない。この場合、応答者は少しでも配分されれば、それを受け入れ、提案者はなるべく少ない額を提示することが合理的である。しかしながら、不公平な配分は応答者によって多くの場合拒否される。これは、協力的でない人に対して得をさせない、罰を与えている可能性があると考えられている (De Quervain et al., 2004)。

1.2.4 力学的アプローチ

動物の群れの研究が、多くの注目を集めるようになったのは、Reynolds (1987) によるコンピューターグラフィックスであるとされる。Aoki (1982) による先駆的な魚の群れの

シミュレーションモデルもあるが、Reynolds (1987) によるボイド (bird-oid: 鳥もどき) 以降、動物の群れに関する研究が大きく発展した (郡司, 2013).

ボイドは、各個体に適用される 3 つの単純な規則によって、多数の個体が集まった群れを表現する. 1 つめの規則は衝突回避, 2 つめの規則は速度平均化, そして, 3 つめの規則は群れ誘引である. Vicsek et al. (1995) はより単純なモデルを導入した. その規則は, 一定速度で自己駆動する粒子を, 決まった範囲内にある粒子同士の方法を揃えようとする際にランダムなノイズを加えることである. Couzin et al. (2002) は, より生物学的により現実的, かつ単純なモデルを導入した. これは階層ボイドモデルと呼べるもので (郡司, 2013), 3 つの規則を ZOR (Zone of repulsion: 近づいた個体同士が衝突を回避する領域), ZOO (Zone of orientation: 個体同士の向きを揃える領域), そして ZOA (Zone of attraction: 離れた個体同士を近づける領域) と呼ばれる領域を, 個体から近い順に分けて階層的に適用した. これらが適用される距離によって, スウォーム (群れ), トーラス (回転する群れ), 動きのある並進運動, そして, 整列した並進運動といった異なる動きが現れることを示した. また, ZOR と ZOA を固定し, ZOO が適用される半径を変化させたときに, 近いところから遠くに変化させた場合と遠くから近くに変化させた場合とでは, 現れる群れの状態が異なる, すなわち, ヒステリシス (履歴依存性) があることを示した.

以上の例は, 個体間の相互作用を単純な規則によるモデルによって理解する群れの研究であるが, 群れの実態を捉えた研究もある. Ballerini et al. (2008) は, ステレオカメラを用いてムクドリの群れを撮影し, 各個体が周囲の個体とどのような関係にあるのかを検討した. その結果, 何メートル以内といった計量的な距離ではなく, 何番目に近い個体といった位相的距離による構造がムクドリにおいて観察された. また, Cavagna et al.

(2010) もムクドリの群れを観測し、群れの平均的な向きと強い相関を持つ個体が存在する領域（強相関領域）の大きさと、群れ全体の大きさの関係について調査し、スケールフリー性を見出した。これは「群れの中にできる群れ」のようなものの大きさと、群れ全体の大きさの割合が、群れの大きさが異なっても変わらない、すなわち群れの大きさが大きくなれば、「群れの中にできる群れ」の大きさも大きくなったことを示した。強相関領域は、群れに対する捕食者や音などの刺激に反応している領域を示し、その領域が群れの大きさに依存しており、群れ全体のパターンを維持する反応が見られたことを示唆している。また、生物の群れの研究として、群れで一方向に移動する様子から兵隊カニとも呼ばれるミナミコメツキガニの研究では、一匹では水に入らないが、水に入ることを躊躇している個体が集まって群れになると、一気に水に入っていく様子が観察された (Gunji et al., 2011)。彼らはこの現象を、各個体の遷移可能位置の相互予測によって能動的受動者と受動的能動者の遷移位置を決めるモデルで説明し、熱湯風呂に上島竜平さんが入ることになるコントに見立てて「ダチョウ倶楽部モデル」と呼んだ (郡司, 2013)。ここでは、多くの個体が集まった結果、お互いの行き場を探す中で、本来一匹では水を忌避し入ることはない水の中に入った個体と、その後が続く個体によって、一気に川を渡っていくのである。

生物の集合体には、個々の集まりがあたかも1つの生命体として働くものがある。これを superorganism（超個体）とよぶ。ハチの社会は、女王バチと生殖機能の無い働きバチで構成され、働きバチが蜜を集めたり、女王の生む子供の世話をしたりする。Reeve & Hölldobler (2007) は、tug-of-war ゲームの入れ子構造により、グループ間の競合とグループ内の協力から superorganism への発展をモデル化した。Tug-of-war ゲームは、ゲーム理論における二者間で行われるゼロサムゲーム*¹であり、実際の綱引き (tug-of-war) の

*¹ ゼロサムゲームはゼロ和ゲームとも言い、複数の人が関係しあう状況において、それぞれの利得の合計が

ように、片側がある長さ引っ張ると、反対側は同じ長さ引っ張られている。この綱引きの繰り返しで、どれだけ利得を得られるかを競うゲームである。グループ内で資源を奪い合う綱引きと、グループ間の奪い合いの綱引きの入れ子構造において、グループ内で協力的な戦略を取ったグループは、グループ間の綱引きで高い適応度を得られる。このことが、個々の集まりが1つになって強くなる仕組みを示していると考えられる。

Helbing et al. (2000) は群衆の歩行を、他人や壁との距離に応じた仮想的な力をモデル化した social force model によって分析した。人が集まった群衆の歩行を、各個人の目的方向への引力と、接近した他者や壁との反発力をモデル化することで、ボトルネックにおける滞留を予測したり、効率的な通路設計に適用したりすることができる。

ここで、力学系アプローチを用いた、ヒトの運動やスポーツにおける協調現象や、集団に関する研究を概観する。Haken et al. (1985) は、力学系アプローチを用いて、両示指の指振り運動における相転移現象を、指振りの周波数を制御変数、左右の位相差を秩序変数としたモデルを立てて説明した。Yamamoto et al. (2013) は、剣道の試合における1対1の二者間攻防の間合いに特定のパターンがあり、熟練者と非熟練者とは好むパターンが異なることを示した。Yokoyama & Yamamoto (2011) は3対1のサッカーのパス回しにおいて、3人の作る三角形のパターンにおいて熟練者と非熟練者の間で違いがあることを示した。Kijima et al. (2014) はサッカーの試合を分析し、選手の配置による支配領域から前線を算出し、前線移動の推移からその規則性を分析した。また、スポーツの領域では、集団についてはチームビルディング (Duarte et al., 2012) など、いかに強い集団を作るかという文脈で研究される。

ゼロになるゲームである。二者間のゼロサムゲームである tug-of-war ゲームでは、片方が引き寄せた分と同じだけ相手が引っ張られているため、それぞれの利得を合計するとゼロとなる。

1.2.5 集団，協力の研究の課題

ヒトの協力における他の動物に対する例外性は，間接互惠性やフリーライダーの排除，規律といった不正を許さない仕組みによってもたらされていることを示唆している．これらは，どのようにすれば協力が行われるかということに主眼があり，協力関係と競争関係が移り変わることに大きな関心は払われていない．

動物の群れの研究において，個々の相互作用をモデル化し，そこから現れるマクロな現象から得られる知見は多いが，群れの全体性について課題があった．Saber (2006) は，群れを結晶格子のようなネットワーク構造と捉えたが，格子点に位置する個体間の相互作用に，Reynolds (1987) による 3 つの規則を適用すると，断片化を起し，群れが形成されず，群れにあらかじめ全体の目的地を示すナビゲーションを加えると群れが形成されることを示した．郡司 (2013) は，この Saber (2006) の主張を，モノ（部分）とコト（全体）の未分化性や両義性と捉えている．また，群れの全体を捉えるアプローチの研究においても，動物の群れからヒトの特性を導き出すのには限界があると考えられる．

人間の裏切り行為も含む，他者がどう考えるかを考慮したヒトの行動に関する研究にはゲーム理論を用いたアプローチがあるが，多くは実験室実験に留まり，激しい身体運動は伴わない．激しい身体運動を伴うスポーツ研究において集団を取り扱う場合も，チームスポーツ分析ではホッケー，サッカーなど，誰が味方かはあらかじめ決定している．

つまり，外部環境が時々刻々変化する状況における人の行動の結果，どのようにして機能的な集団が形成され，違う集団に変化していくのかを明らかにするためには，新たな研究対象が求められると考える．

1.3 集団研究からみた自転車競技

1.3.1 自転車競技を取り扱う利点

国際自転車競技連合 (Union Cycliste Internationale: UCI) に管轄されている自転車競技は大きく分けて、ロードレース、トラックレース、マウンテンバイク、BMX (バイシクルモトクロス)、シクロクロス、トライアル、室内自転車競技 (サイクルサッカーやアーティスティック・サイクリング)、そしてパラサイクリングの 8 つの競技がある。さらにロードレースとトラックレースの競技の分類を図 1.1 に示す (一部、種目は省略している)。

自転車は、三輪車など一部例外もあるが、車輪が前後に直線状に並んだ、人によって駆動される二輪車である。その起源は、1817 年にドイツで発明された、足で地面をこぐドライジーネであると言われている。本格的な自転車競技大会は、1869 年に初めて開催された (Andrić, 1990)。この頃は非常に大きな前輪に、直接取り付けられたペダルを回すハイホイール型の自転車であった。着座位置が非常に高いため、バランスが悪く、急ブレーキをかけると、つんのめって前方に転倒してしまうことから、強く効くブレーキは搭載されていなかった。そのような危険性はあったが、スピードを出すために洗練された構造であり、スポーツ的要素の強い自転車であった。1870 年代には、現代の自転車競技用と似たトラックでのレースが、多くの観客を集め開催されていた (International Olympic Committee, 2023)。1880 年代後半に、現在の一般的な自転車に近い安全型自転車の登場により、自転車の普及が進む。1893 年には第 1 回の自転車競技の世界選手権大会が行われ、1896 年の第 1 回の近代オリンピック大会アテネ大会の競技種目として採用された。

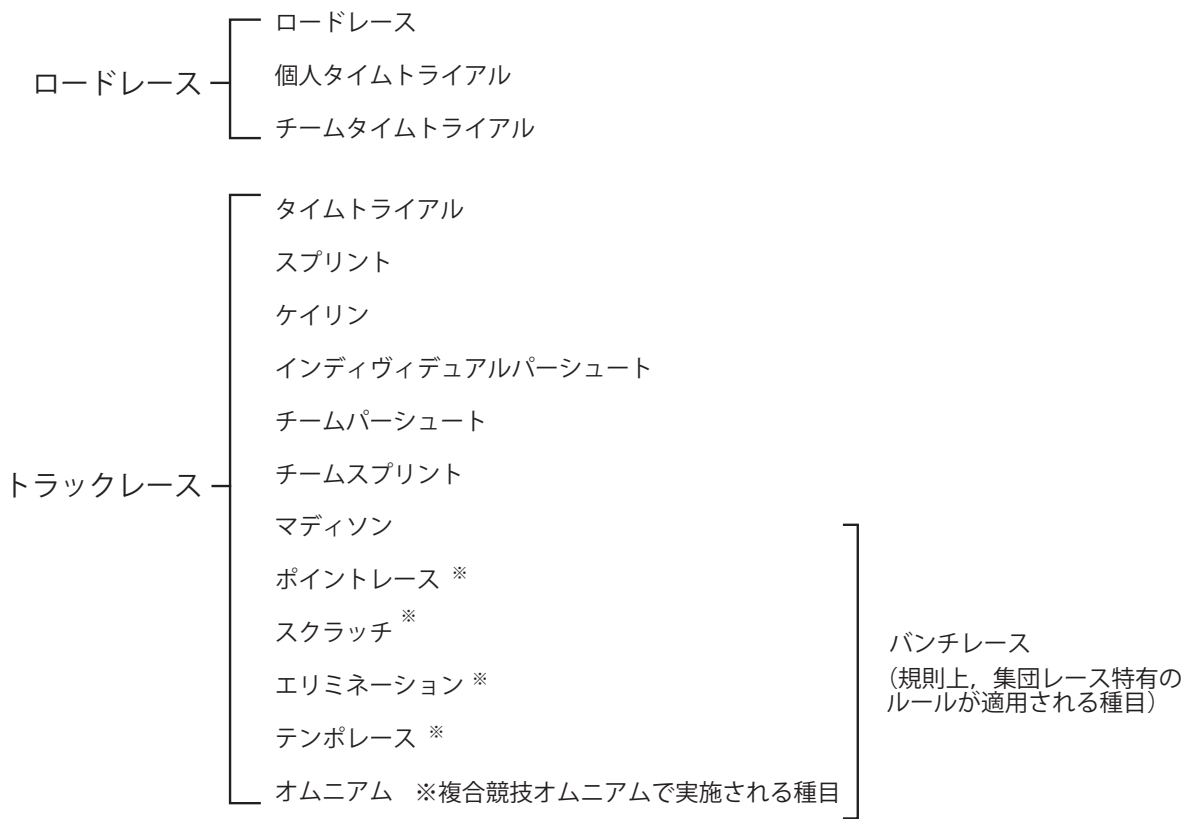


図 1.1 自転車競技の分類

1900年パリオリンピックにおいても自転車競技は採用され、実施種目の1つに、現在と形式は異なるがポイントレースがあった。

1903年にはツール・ド・フランスが始まった。文字通り、フランスを通常3週間かけて1周するレースである。世界で最も有名な自転車競技の1つであり、沿道の観戦者やテレビの視聴者の数など、あらゆるスポーツの中でも最も規模の大きいスポーツの1つであると言われている (Andreff, 2016)。ツール・ド・フランスは、ロードレースの中でステージレースに分類される。通常21ヵ所設けられたステージの、総走破時間の合計が最も少ない選手が総合優勝者となる。2022年は、総距離3,328kmを、総合優勝者は79時間33分20秒で走破し (Amaury Sport Organisation, 2022)、平均時速は41.8km/hになる。

各ステージは、平坦、丘陵、アルプスのような山岳や、タイムトライアルといった様々な特徴がある。総合優勝が最も栄誉があるが、各ステージにおける優勝や、スプリントポイント賞および山岳賞といった副次的な賞を目指して参加する選手も存在する。また、総合優勝は個人に与えられるものであるが、ツール・ド・フランスはチームスポーツである。約 20 チーム、200 人の選手が参加し、競技中には様々な集団が形成される。典型的な 4 つの集団が形成された例を挙げる。先頭からブレイクアウェー（逃げ）－追走－プロトン（主集団）－グルペットである。逃げは、主集団からあらかじめ先行し、逃げ切りによる勝利や、中間スプリントポイントを獲得する選手によって形成される集団であり、単独での逃げの場合もある。追走は、逃げ集団に追い付こうとしている（ブリッジをかける）選手（達）である。主集団は、最も人数が多い集団であり、大抵の場合、総合優勝争いをする選手を含む。グルペットは、そのステージでの着順上位は狙わず、翌ステージ以降のレースに向けて、体力を温存しながら、完走のみを目指す選手達で形成される集団である。グルペットでは同じような意図を持った選手同士で協力して、タイムアウトにならないように走行する。

自転車競技は、人間が自らの力で行う運動の中では比較的高い速度で行われ、時速 40km を超える。そのため、運動する人に加わる抗力において空気抵抗が支配的であり、運動に大きな影響を及ぼす (Kyle, 1979)。そのため、前を走行する選手の直後を走ることによって風を除き、空気抵抗を低減し、体力を温存することが行われる。この行動はスリップストリームやドラフティングと呼ばれ (図 1.2)、集団スタートの自転車競技では選手同士による密集した集団が形成される。さらに、自転車競技の集団では、集団の先頭を順番に交代する行動が見られる。これは、列に並んだ選手達の先頭の選手が横に移動し、その直後を続いて走行していた選手が追い抜いていくことで先頭に位置する。先に先頭を走行して

いた選手は、隊列の側面を沿うように移動し、隊列の後方から隊列に復帰する。これらを繰り返すことで、集団内の選手が順番に先頭を交代する。このような行動は、ペースライン (Borysewicz, 1985) やローテーション (白崎他, 2019) と呼ばれる。先頭を走る選手は、風を直接受けるため、ドラフティング状態にある選手と比較して空気抵抗が大きくなるため体力をより消耗する。ここで、先頭を走るということは、他者の利益（体力を温存する）のために自らコストをかけている（後ろの選手より体力を消耗する）ことになり、利他的な行動であるといえる (Trenchard et al., 2015)。この利他的な協力が、同チームの選手に限らず、競争相手となる他の選手と行われることが自転車競技の大きな特徴である。例えば、陸上競技では定められた者以外による他者の手助けは、助力と見なされ失格の対象となる (日本陸上競技連盟, 2022)。自転車競技において、選手達は利他的に先頭交代をして他の選手と協調、協力をしながら、勝利のために利己的な行動をする。形成される様々な集団の中で、選手は、どの集団に所属するかを決め、所属する集団が他の集団に勝るように行動し、それと同時に、自らが集団内の他の選手に勝るように、集団内で駆け引きをする必要がある。そのような、各選手達の、利他的な行動と利己的な行動の組み合わせによって、自転車競技の集団は複雑に離合集散すると考えられる。

本論文では、自転車競技において選手の協力と競争によって起きる離合集散に着目する。協調－対抗関係を繰り返す個人間によって形成される機能的集団の離合集散ダイナミクスを通じて、ヒト集団の仕組みについて知見を得ることを目的とする。

1.3.2 自転車競技に関する先行研究

Triplett (1898) は、最初の社会心理学的実験に関すると言われる論文中で、自転車競技を取り扱っている。彼は自転車競技において、何もなく単独で走る場合より、ペースを

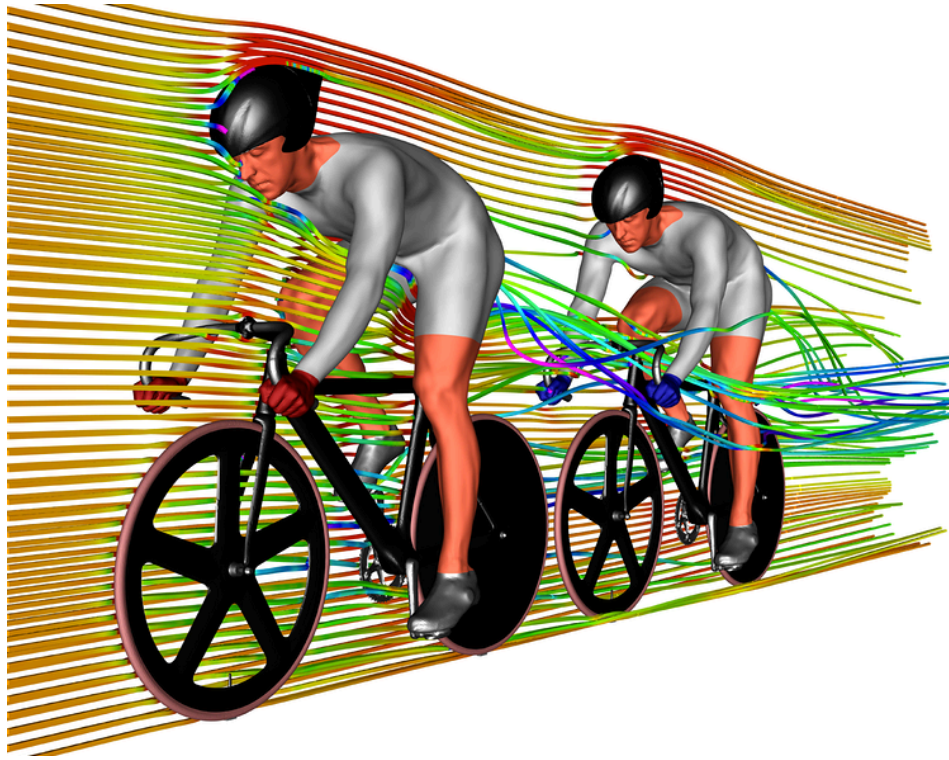


図 1.2 ドラフティングのイメージ図. Totalsim 社による数値流体力学シミュレーション. (出典:<https://pressreleases.responsesource.com/news/52360/winning-technology-for-uk-sport-gb-cyclists-go-faster-with/>)

知らされたり、他者と競争したりする場合の方が速くなることに着目した。そして、自転車競技の特徴、速さや大きな筋肉を用いた運動であることの影響を除くために、糸巻器を用いた社会的促進に関する実験室実験を行った。また、自転車競技に関する、生理学やトレーニング方法、さらにペース戦略に関する研究が多くある(石井他, 2014; 清水他, 2010; Abbiss & Laursen, 2008; Renfree et al., 2015)。Albert (1991) は自転車競技を社会的に分析し、選手のインタビューを通じ、自転車競技集団内での協力などに関する不文律の存在を示した。Phillips & Hopkins (2020) の自転車競技の先行研究に関するシステムティックレビューでは、自転車競技の成績を決定するのは4つの次元に分類できるとし

た。それらは、(1) 個々の選手に関する特徴、(2) 選手間の対人間のダイナミクスにより生じる戦術的特徴、(3) 競技形式やレース環境に関連する戦略的特徴、そして、(4) 社会的小および組織的制約に関連する全体的な特徴、の4つである。この中で、Mignot (2016) のロードレースにおいて実際に生じるジレンマ状況をゲーム理論によってモデル化した研究や、Hoenigman et al. (2011) による agent-based model を用い、強い選手の協力戦略や弱い選手の裏切り戦略による利益を示した研究は戦術的次元に分類された。また、機械学習を用いて、複合競技であるオムニアムの個別種目成績と最終成績の関係について分析した Ofoghi et al. (2013) の論文は戦略的次元に分類された。

Trenchard et al. (2014) は、複雑系科学の立場から自転車競技を捉え、自転車競技における集団を動物の群れなどと類似した集合的行動 (collective behavior) として取り扱った。彼と共同研究者達の一連の研究では、交通渋滞の研究手法を適用し、自転車競技における非線形現象であるヒステリシスを見出し (Trenchard, 2010)、先頭選手の速度と集団内の選手の能力によって生じる集団動態の相を特定した (Trenchard et al., 2014)。

以上のように、空気抵抗とドラフティングに影響を受け、複雑な自転車競技を取り扱った研究はいくつかあるが、自転車競技の集団のダイナミクスを取り扱った研究は少ない。その中でも、集団の分離と再結合を取り扱ったものはほとんどない。そこで、本論文では、自転車競技における集団の離合集散ダイナミクスを明らかにすることを目的とする。

1.4 ポイントレースの離合集散ダイナミクスへの接近方法

本論文では、自転車競技の中で、ポイントレースを研究対象とする。ポイントレースは、競技時間が比較的長く、自転車競技場で行われる集団スタートの種目である。さらに、レース中に規定周回数ごとの通過順位に応じて与えられるポイントの累積で最終順位

を争うため、協力的な利他的行動と利己的行動の切り替えが複数回現れ、ルールの制約下で選手が駆け引きを行う様子を観察することができ、ヒトの集団形成に関する新たな知見を得られると考えた。

Trenchard et al. (2014) の研究は、競技場の中心から 1 台のカメラで選手を追い、カメラの画角で捉えられた範囲で分析を行ったため、集団が大きく離れてしまったレースは分析していない。そのため、集団が分離し、集団同士が大きく離れたとしても、選手の位置を記録し、集団の状態を記述できるような測定手法を構築する必要がある。ロードレースにおいて、GPS を用いた測位データを利用することが行われているが (Kataoka & Gray, 2019), GPS を用いた測定は室内では行うことができない。室内の測位システムも、競技場における安全面の課題や、選手や自転車に発信機をどう取り付けるといった課題がある。そこで、なるべく簡便な方法で自転車競技における選手の位置とその秩序状態を定量化する手法を確立し、その秩序状態を制御する要因を調べることで自転車競技における離合集散ダイナミクスを明らかにする。

第2章

目的

第1章で述べた研究背景を受けて、本論文では自転車競技トラックレースの1種目であるポイントレースを題材に、選手達の利己的な行動と利他的な行動の結果、生起する離合集散ダイナミクスを明らかにすることを目的とする。

この目的を達成するために、以下の研究課題に取り組む。

1. ポイントレースにおける選手全体の集団の大域的な秩序を定量化することによって、大域的な配置状態を同定し、その推移を明らかにする。
2. ポイントレース中における個人間の関係を分析し、その結果をもとにポイントレース中に生じる部分集団を定義する。
3. 部分集団の特性値を示す変数と大域的な秩序変化との関係を調べ、ポイントレースの集団動態のメカニズムについて明らかにする。

第3章

ポイントレースにおける大域的状态 遷移

3.1 背景

空気抵抗は、自転車競技において選手が経験する支配的な抗力である (Olds, 1998). 集団スタート自転車競技において、選手は前を走行する選手の直後を走行することで、体力消費を抑える。この行動はドラフティングと呼ばれる。選手たちは隊列を作り、密集し、先頭を交代する。このことをローテーションと呼ぶ。なぜなら、先頭の選手は風を受け、ドラフティングの選手より多くの体力を消費するからである。このことから、ローテーションによって先頭を担当することは、利他的な協力的行動であるといえる。生理的な制約が、この自転車競技の特徴を生み出す。

生理的制約によって、自転車競技では利他的に協力し体力温存の利益を得るために集団を形成する。他方、選手は勝利のために利己的に行動するはずである。その方法は、集団

から飛び出したり、先頭交代に参加せず、ただ乗り（フリーライダー）をすることである (Mignot, 2016). このような利己的または利他的な行動、戦略や選手の意思決定が自転車競技を複雑にする。逃げは、単独または複数の選手が集団から前方に出て間隔を開ける、自転車競技における典型的な展開の1つである。逃げは、選手の能力や体力の温存に関連すると考えられる。すなわち、短期間のダッシュ力に優れた選手はゴールの直前で加速することを選び、タイムトライアルに強い、長期間高い出力を出すことに優れた選手は早めに仕掛け、他の選手との距離をあらかじめ開いておくことを選ぶことが考えられる (Padilla et al., 1999).

自転車競技では、選手の集団はプロトン (peloton) とよばれ、移動のためのエネルギーを抑えたり、捕食者から身を守るために鳥や魚が形成する群れと類似している (Trenchard et al., 2014). この動物の群れの形成のような集合的な行動では、明確なリーダーや設計図なしに集団が形成される。この現象は、個々が単純な規則に従うことで、複雑な集団の運動が生起する (Reynolds, 1987; Vicsek & Zafeiris, 2012). 加えて、全体を観察することから、個々の特徴や個体間の相互作用について推定することも、集団のダイナミクスを解明する上で重要である (Rio & Warren, 2016). そこで本論文では、後者のアプローチを適用し、自転車競技の生理的制約下での集団秩序形成について、全体の特徴を観察することで、明らかにする。

本論文では、自転車競技における集団の離合集散ダイナミクスを、ポイントレースを観察することによって、検討する。ポイントレースは集団スタートの自転車競技の1つで、あらかじめ決められた周回ごとの着順で与えられるポイントを蓄積することで、最終順位を競う。この規定周回ごとの競走を、スプリントと呼ぶ。多くの自転車競技は、ゴールでの着順によってのみ順位が決まるが、ポイントレースではポイントを獲得する機会が競技

内で複数回あることになる。従って、利他的な行動と利己的な行動の切り替わりを複数回観察することができる。Trenchard et al. (2014) は自転車競技の集団での動きを観察し、集団が伸長し縦に広がる相と、集団がまとまって横に広がる相を特定した。そして、それを選手の能力とドラフティング効果によって説明した。すなわち、ドラフティング効果による恩恵があまりない程度に低速の場合は、選手は横に広がり、速度が上がるとドラフティング効果の恩恵を得るために隊列は縦長一列になる。この隊列の横から縦の広がりへの変化によって、密度が高い状態から低い状態になる。この例から、集団スタートの自転車競技は集団の密度と集団の数によって特徴づけられると考えられる。

Trenchard et al. (2014) は選手の位置から、伸長した相 (“stretched”) とまとまった相 (“compact”) の特定を、k-means 法のクラスター分析によって行なった。しかしながら、彼らの分析は主集団の行動のみを対象とし、“stretched” や “compact” の相のみを特定したのであり、逃げといった分離した小集団も含んだ全体の分析はできていない。Hoenigman et al. (2011) は、自転車競技の協力と裏切り戦略の影響を、エージェントベースモデルを用いてシミュレーションを行い、高い能力のチームメートの協力行動が好成績につながることを示した。Konings et al. (2016) は、スピードスケートショートトラック競技 1500m における中間部分の位置取りと最終結果について調査し、最終周の位置取りが着順に最も影響が大きく、ラスト 5 周にペースを維持または加速できるように、序盤に体力を使いすぎないことが重要であることを示した。Moffatt et al. (2014) は、1 対 1 のスプリント種目の勝利戦略における位置取りについて統計的に検証した。その結果、レース全体を通した勝つための明確な戦術は見出せず、それはレース中最大速度で走り通すことはできず、残り距離やそこに至る展開といった環境がその都度異なるためだとしている。

本章では、ポイントレースにおける集団の秩序形成を明らかにするために、主成分分析 (PCA: principal component analysis) を用いる。PCA は、元のデータより少数の変数を以って特徴を抽出する方法である。例えば、Turk & Pentland (1991) は、顔認識を PCA により実施した。彼らは、教師画像データからいくつかの顔の特徴 (固有顔) を抽出し、その線形の組み合わせによって、個々の顔を近似できるとした。また PCA は、多くの自由度を持つ人の動作の分析にも用いられている (Chau, 2001; Daffertshofer et al., 2004; Forner-Cordero et al., 2005)。Forner-Cordero et al. (2005) は、PCA を上肢多関節協調解析によく用いられる位相差分析と比較して検討し、PCA はより少ない変数で、上肢多関節協調を表現できることを示した。Federolf et al. (2013) は、PCA を健常者と変形性膝関節症患者の検出に適用した。したがって PCA は、自転車競技のような複雑な現象の、時空間両方の特徴を抽出するのに有用な手法であると思われる。

3.2 目的

上に記述したようなことから、ポイントレース競技中の状態は集団の密度と集団の数で特徴付けられ、この二つの特徴は PCA によって抽出できると仮説を立てた。そして、PCA を用いて定義された状態の状態遷移はレース中の生じる変化の定量的な理解に役立つと考えられる。

本章では、ポイントレース中の大域的な配置状態を PCA を用いて定量化し、レース中の状態遷移を理解することを目的とする。これはコーチや選手がレースを分析し、いつ勝負し、いつ体力を温存するかといったことを決めることを計画し、パフォーマンスの向上に貢献すると考えられる。

3.3 方法

3.3.1 対象

201X年に開催された、全日本自転車競技選手権大会オムニウム男子エリート決勝（以下、R100と表記する）、全日本自転車競技選手権大会トラック・レース男子エリート決勝（以下、R120と表記する）、そして全日本大学対抗選手権自転車競技大会男子決勝（以下、R160と表記する）の3つのポイントレースを分析した。全参加者は男性、全ての種目に大学選手を含んでおり、彼らはエリートカテゴリーで争う競技力がある選手もいた。それぞれの総周回数はそれぞれ100、120、そして160周であった。これら3つのレースは、全て同じ1周250mの自転車専用競技場（ベロドローム）で行なわれている。すなわち、それぞれの走行距離はそれぞれ25、30、そして40kmであった。それぞれのレースの参加者数、年齢、そして平均速度は、R100では、20名、 20.9 ± 2.4 歳（平均±標準偏差）、49.6 km/h、R120では、24名、 20.3 ± 2.1 歳、49.3 km/h、R160では、16名、 20.6 ± 1.0 歳、48.5 km/hであった。参加者は研究に関するインフォームドコンセントを受け、ヘルシンキ宣言に基づく名古屋大学総合保健体育科学センター研究倫理委員会の承認(30-13)を受け本研究は実施された。

3.3.2 ポイントレースのルール

ポイントレースは、レース中に与えられるポイントの累積を争う集団スタートの自転車競技である。ポイントは以下のように与えられる。規定周回ごとにあるスプリントと呼ばれる周回終了時の通過順位によって、5、4、3、および1点がスプリント周回1位から4位

までにそれぞれ与えられる。また周回遅れに関してもポイントがあり、主集団を周回遅れにした選手には 20 ポイントが与えられる。逆に、主集団に周回遅れにされた選手は 20 ポイント減算される。同点の場合は最終周回の着順によって順位が決定される (日本自転車競技連盟, 2022)。3 レースとも、スプリントは 10 周ごとに行なわれた。R100 のみ、オムニアムの一部として行なわれたポイントレースである (図 1.1 参照)。オムニアムは、いくつかの種目を行う複合競技であり、各種目の順位に応じたポイントを累積し、最終種目のポイントレースの競技で獲得したポイントが加算され、順位を決定する。R100 は、ポイントレースの最終スプリントの得点が倍になるルール改正後に実施されている^{*1}。

3.3.3 測定系と分布ベクトルの定義

測定系

図 3.1A に示されるように、ビデオカメラ (Sony HDR-PJ450, 30pfs) を用いて競技を撮影した。カメラを直線部分のセンターラインの延長線上に設置し、2 つのバックストレート、ホームストレート両方の直線を通過する選手を捉えられるようにした。そして、選手の前輪先端が、ラインを横切る時間を計測した。選手の位置は、通過時刻の先頭選手からの遅れによって表される。先頭選手はレースの先頭を走る選手である。例えば、集団が逃げと主集団に分かれ、逃げた選手が主集団を周回遅れにして主集団の最後尾についた場合、最も長い距離を走った選手は逃げた選手であるが、レース先頭の選手は主集団の先頭になる。なお、周回遅れは、審判の判定を基準とした。同一走破距離に対する経過時間ではなく、周回遅れの判定を考慮したレース先頭選手からの時間遅れを測定する。そうすることで、周回遅れにした、または、周回遅れになった選手を、同じ集まりとして取り扱

^{*1} R120 と R160 はこのルール改正前であり、最終スプリントのダブルポイントは適用されない。

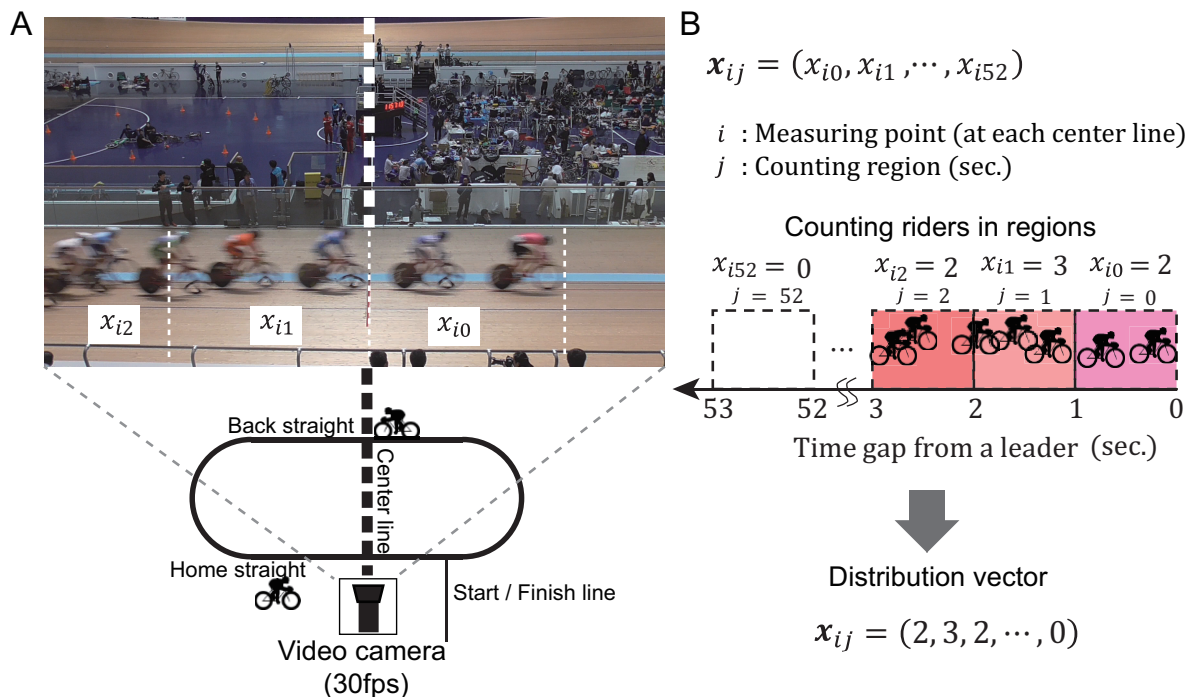


図 3.1 測定系の模式図と分布ベクトル. 両センターラインを通過する選手を撮影した画像 (A). 1 秒ごとの区間に入る選手数で定義した分布ベクトル (B).

うことができる.

分布ベクトル

選手配置の定量化は以下のような手順で行った. 第 1 に, レース先頭選手がセンターラインを通過してから 1 秒ごとに区間を設定し, その中の選手の数数を数える. 1 秒の区間は, ロードレースのゴールの際, 前者と 1 秒以内であれば同タイムとするというルールを参考に設定した (日本自転車競技連盟, 2022). 分布ベクトル x_{ij} (図 3.1B) は, この選手の数数を続けて並べたものである. i は i 番目の測定点 ($i = 1$ は最初のバックストレートの計測点を示す) であり, j は区間番号を示し, $j = 0$ はレース先頭選手が通過してから 1 秒未満の区間を示す. レース先頭選手から最大の時間差を考慮し, j の範囲は $0 \leq j \leq 52$ で

あった。ただし、この j の範囲の最大値となる時間差は同一走破距離とした場合であり、周回遅れを考慮していない。

3.3.4 主成分分析の方法

1 周回の中で、ホームストレートとバックストレートのセンターラインで測定したので、R100, R120 と R160 では、それぞれ 200, 240, そして 320 の測定点があった。これらの分布ベクトルを並べ、3 レースをすべて含んだ 760×53 の行列と、各レースごとの行列 (R100: 200×53 , R120: 240×53 , R160: 320×53) を作成し、主成分分析を行なった。この計算は統計ソフトウェア R (R Core Team, 2022) を用いて行なった。

3.4 結果

3.4.1 レース全体

両センターラインにおいて 3 レースのスタートからゴールまで計測された分布ベクトルが、図 3.2A, B, C の下側に示されている。横軸は 0.5 刻みの周回数、縦軸は各 1 秒区間の選手数を示す。濃い色は密であることを示し、薄い色は疎であることを示す。白色は、選手がその区間にいなかったことを示す。例えば、図 3.2E に示す 21 周から 23 周の間において、最初の 2 秒に 3 人の選手が存在し、5 秒までは選手が存在せず、そして 5 秒から 9 秒までに 21 人の選手が存在したことを示している。分布ベクトルの先頭と最後尾までの間に白い区間がない場合は、集団が一つに集まった状態であったことを示し、白い区間があった場合は集団は分離していたと考えられる。選手たちは、1 つの集団から 2 つやそれ以上の数の集団に分離することが観察された。図 3.2A, B そして C の上段は状態遷移

を示す。次の節に示されるように、状態は図 3.2D の模式図のように定義されている。

3.4.2 主成分分析

3 つのレースをすべて含んだ分布ベクトルの主成分分析の結果の概要は表 3.1 に示す。R100, R120, そして R160 のそれぞれのデータを用いて行なった主成分分析の結果も、表 3.1 に示す。

図 3.3A は、R100, R120, そして R160 それぞれのデータを用いて行った、主成分分析の第 1 主成分 (PC1) と第 2 主成分 (PC2) を示す。図 3.3B は 3 つのレースをすべて含んだデータを用いた主成分分析結果である。すなわち、3 つのレースをすべて含んで主成分分析を行った後、分布ベクトルの PC1 と PC2 を R100, R120 および R160 とそれぞれの分布ベクトルが含まれたレースに分けて求めたものである。それぞれのレースのデータを用いた場合と、3 つのレースをすべて含んだデータを用いた場合の主成分分析の PC1 と PC2 の分布には、大きな差がないことが分かる。これは、3 つのレースに共通する特徴があることを示唆していると考えられる。そこで、3 つのレースをすべて含んだデータを用いた主成分分析の結果を、以後分析した。

PC1 と PC2 の固有値はそれぞれ 20.44 と 9.32 であり、2 つの主成分の累積寄与率は 54% であった。第 3 から第 5 主成分の寄与率は、およそ 25% 程度であり、第 1 主成分と第 2 主成分をポイントレースの選手配置を特徴づける変数と見なし分析した (Rein, 2012)。

PC1 と PC2 と選手配置を対応させ、PC1-PC2 平面の 4 つの象限に従って、4 つの状態を定義した。図 3.3A の一番左の図にそれぞれの状態の模式図を示す。左下の第 3 象限 ($PC1 < 0, PC2 < 0$) を 1 つの密集した配置の状態 1 (以下、DEN と表記する) と定義し

た。同様に、左上の第 2 象限 ($PC1 < 0, PC2 \geq 0$) を伸長した配置の状態 2 (以下, STR と表記する), 右上の第 1 象限 ($PC1 \geq 0, PC2 \geq 0$) を分離した状態 3 (以下, DIV と表記する), そして右下の第 4 象限 ($PC1 \geq 0, PC2 < 0$) を逃げが密集した集団から大きく離れた状態 4 (以下, ESC と表記する) と定義した。集団が 1 つの密集した状態から伸長して分離するのに従って, 図 3.3A の一番左の図, R100 において破線の矢印で示されるように, PC1-PC2 平面を左下の第 3 象限から時計回りに動く。

図 3.2A, B, C の下段で見られるように, ポイントレースは集団の数や集団内の密度を同時に変化させて進行する。従って, これらの特徴は, PC1 と PC2 によって抽出されるはずである。言い換えると, PC1 は集団の数を表し, PC2 は主集団の密度を表す。PC1 が負の場合, 集団は一つにまとまっており, 正の場合は二つかそれ以上に分かれる。PC2 が負の場合, 主集団は密で横方向に広がっており, 正の場合は主集団は前後に引き延ばされている。これらの結果は, 仮説を立てたように, 主成分分析を用いて選手の大域的な配置から, 二つの変数を抽出することができた。ポイントレースの競技局面の状況は, 集団の密度と集団の数で特徴づけることができるであろう。

3.4.3 状態遷移確率

図 3.3C は, 3 つのレースにおける 4 つの状態間の状態遷移図を示す。一部の DEN から DIV, DIV から DEN への遷移を除いて, 同じ状態を繰り返すか 1 つ隣りの状態へ遷移していた。

R100 では, DEN と STR の累積確率は 0.61 で, 全体の 60% 以上となった。すなわち, 60% 以上の周回で, 集団は分離していなかった。DIV から STR への状態遷移確率は 0.20 であり, DIV から ESC への遷移は 0.08 であった。図 3.2A によると, 逃げと主

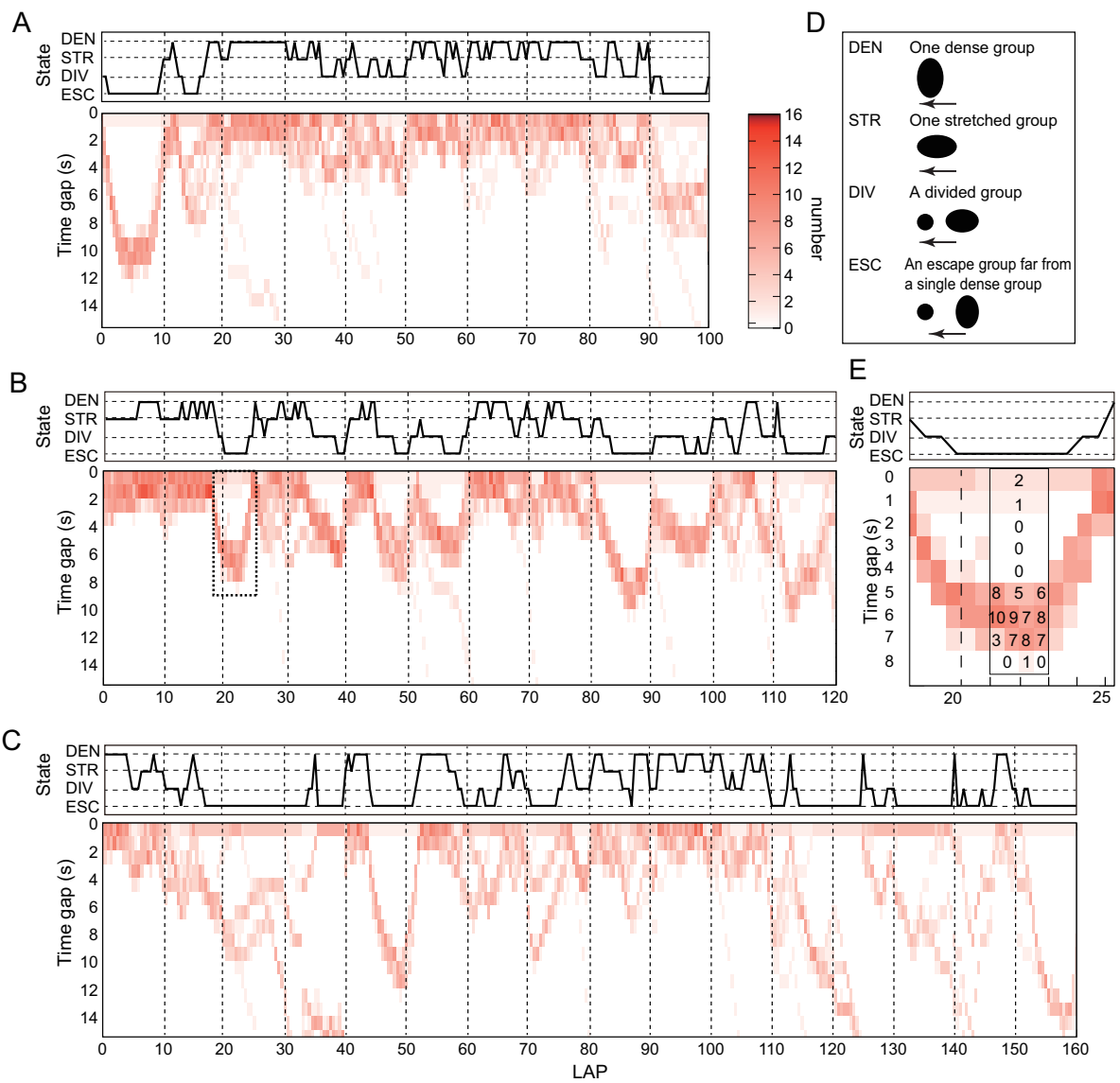


図 3.2 状態遷移の全体像. R100(A), R120(B), R160(C), 上段: 模式図 (D) のように定義される 4 つの状態, 下段: 分布ベクトルの推移, R120 において点線で囲まれている部分の拡大 (E). DEN: 1 つの密集した配置の状態, STR: 伸ばした配置の状態, DIV: 分離した状態, ESC: 逃げが密集した集団から大きく離れた状態.

表 3.1 主成分分析結果の概要

		Summary of PCA for each race			Summary of PCA using all 3 races
		R100	R120	R160	All
PC1	Eigenvalue	18.18	36.45	10.02	20.44
	Proportion	0.38	0.49	0.25	0.37
	Cumulative proportion	0.38	0.49	0.25	0.37
PC2	Eigenvalue	9.36	13.42	6.44	9.32
	Proportion	0.20	0.18	0.16	0.17
	Cumulative proportion	0.58	0.67	0.42	0.54
PC3	Eigenvalue	6.15	8.89	4.22	6.35
	Proportion	0.13	0.12	0.11	0.11
	Cumulative proportion	0.70	0.79	0.53	0.65
PC4	Eigenvalue	5.11	5.12	3.25	4.65
	Proportion	0.11	0.07	0.08	0.08
	Cumulative proportion	0.81	0.86	0.61	0.74
PC5	Eigenvalue	2.88	3.50	0.07	0.06
	Proportion	0.06	0.05	0.07	0.06
	Cumulative proportion	0.87	0.91	0.68	0.80

集団は、競技開始から 20 周までと 90 周から 100 周までは明確に集団は分離していたが、レースの大部分はそうではなかった。

R120 では、STR と DIV の割合はそれぞれ 0.30 と 0.28 であった。DIV での再帰確率は 0.71 で、他のレースより高かった。これは、より分離した状態であろうとする傾向が

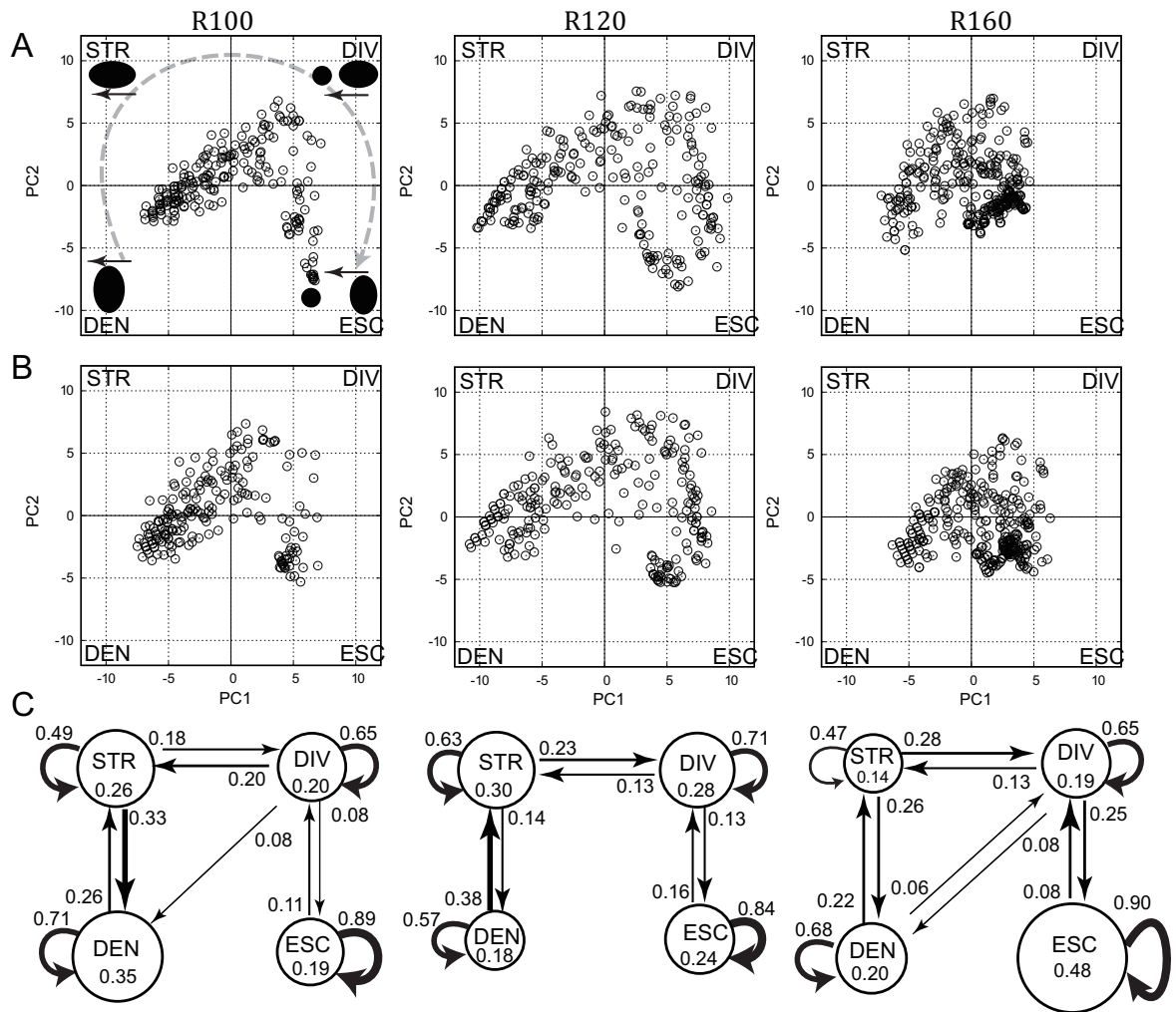


図 3.3 第 1 主成分 (PC1) と第 2 主成分 (PC2) の分布と状態遷移確率. R100, R120 および R160 それぞれのデータを用いた主成分分析結果 (A), 3 つのレースをすべて含んだデータによる主成分分析結果の PC1 および PC2 をレース別に示したもの (B), および, 状態遷移確率 (C)

強いこと示す. DIV から STR への状態遷移確率は 0.13 であり, DIV から ESC への遷移と同じ値であった. 図 3.2B で示されるように, 選手はスタートから 20 周まで, 60 周から 70 周の間のレースの中盤, そして, スプリントの直後といった時期に密な集団を形成している. その他の期間は, 先頭グループと主集団で分かれていた.

R160 においては、DIV と ESC の累積確率は 0.67 であった。即ち、レース中 67% の周回で集団は分離していたことを示す。もっとも頻度が多かった配置は、ESC であった。DIV から STR への状態遷移確率は 0.13、DIV から ESC へは 0.25 であった。図 3.2C によると、40 周から 50 周に典型的に見られるように、逃げは 10 秒以上、主集団と間隔が開いていた。

図 3.4A は、3 つのレースをすべて含んだ全体の状態遷移確率を示している。図 3.4B は、3 つのレースにおけるスプリント間の 10 周を 4 分割した (1/4, 2/4, 3/4, 4/4)、それぞれにおける状態遷移確率を示したものである。10 周のうちの前半においては、DIV から STR への遷移確率は STR から DIV への値より大きいか、ほぼ同じであった (1/4 : DIV から STR が 0.24, STR から DIV が 0.14, 2/4 : DIV から STR が 0.10, STR から DIV が 0.11)。加えて、10 周の後半では、DIV での再帰確率や ESC である割合が大きかった (1/4 : DIV の再帰確率が 0.52, ESC の割合が 0.27, 2/4 : DIV の再帰確率が 0.61, ESC の割合が 0.34, 3/4 : DIV の再帰確率が 0.67, ESC の割合が 0.34, 4/4 : DIV の再帰確率が 0.72, ESC の割合が 0.36)。言い換えると、10 周の後半では、分離した状態から一つの状態に再結合することは難しかった。これは、主集団はポイントを獲得することができない選手を含んでおり、そういった選手は次の機会に向けて体力を温存する必要があることを示唆している。

3.5 考察

ポイントレースの状態を特徴づける集団の数や密度を、主成分分析 (PCA) によって抽出できると仮説を立て、3 つのポイントレースを分析した。その結果、第 1 主成分の正負は集団の分離を説明し、同様に第 2 主成分の正負は主集団の密度を説明すると考えられ

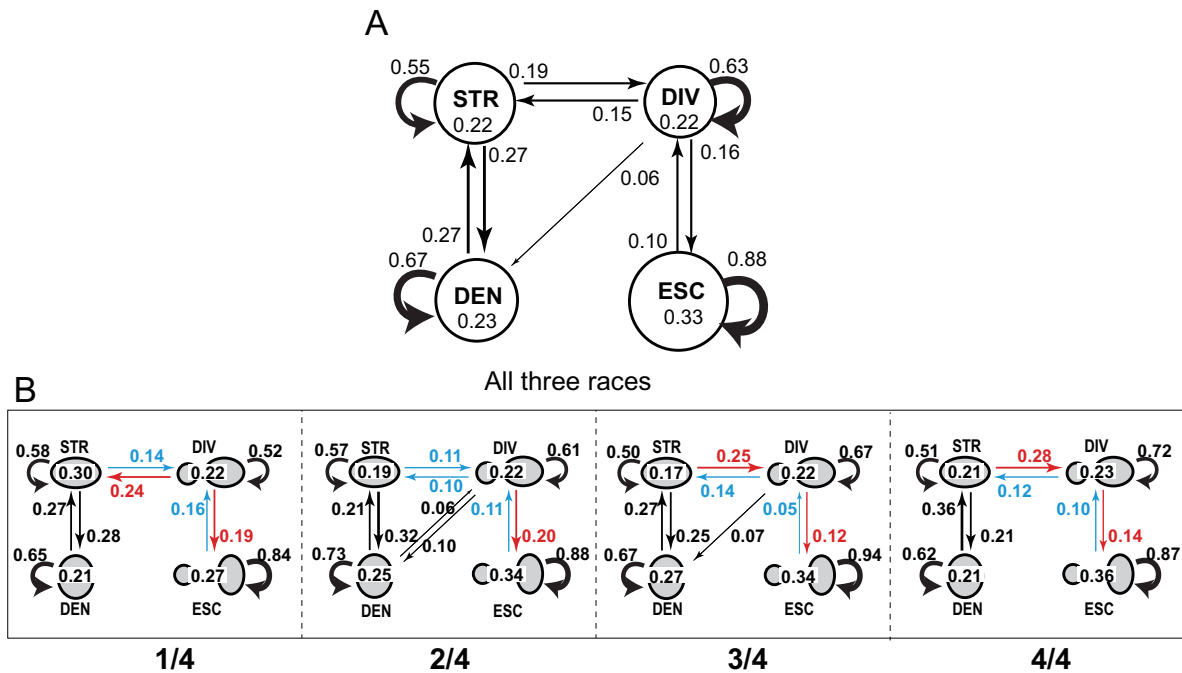


図 3.4 3つのレースをすべて含んだ状態遷移確率 (A). スプリント間 10 周を 4 分割した、それぞれの区間における状態遷移確率 (STR, DIV と ESC の間の遷移確率で大きい方が赤, 小さい方が青で示される.) (B).

た. 競技時間が長い, または選手の能力差が大きい場合, PC1 は正, PC2 は負となる傾向があったと考えられる. これは, 集団は分離しているが, 主集団は横方向に広がり密度が大きかったことを示す. 加えて, スプリント間の 10 周を 4 分割し, それぞれの区間における状態遷移確率を算出したところ, スプリント間 10 周の前半と比較して, 10 周の後半では, 集団が伸長した状態 (STR) や分離した状態 (DIV) から, 逃げが密集した集団から大きく離れた状態 (ESC) へ遷移する割合, また分離した状態における再帰確率や逃げが密集した集団から大きく離れた状態の割合が上昇していた.

各状態の割合と, レース距離の関係にも着目した. 特に 1 つの密集した状態 (DEN) と集団が伸長した状態 (STR) の頻度である. これらの状態は R100, R120, そして R160

で、それぞれ、61%、48%、そして33%であった。そして、図3.3Cで示される各レースにおける分離した状態からの遷移確率についても着目した。R100では、分離した状態から集団が伸長した状態への状態遷移確率は、分離した状態から逃げが密集した集団から大きく離れた状態への確率と比較して高かった（DIVからSTR：0.20、DIVからESC：0.08）。R120では分離した状態から集団が伸長した状態と逃げが密集した集団から大きく離れた状態へ遷移する確率は、同等であった（DIVからSTR：0.13、DIVからESC：0.13）。そしてR160では、分離した状態から集団が伸長した状態への遷移確率は、分離した状態から逃げが密集した集団から大きく離れた状態への確率と比べて低かった（DIVからSTR：0.13、DIVからESC：0.25）。

レース距離や選手の生理学的な能力差は、選手配置の状態遷移に影響を与えているはずである。自転車ロードレースのシミュレーション結果によると、強い選手の協力的な戦略の適用は、チームメイトにとって有益となる (Hoenigman et al., 2011)。距離が最も長いR160においてESCの割合が大きかったのは以下のように考えられる。すなわち、距離の長さから、多くの選手が主集団において協力的にローテーションを行い体力を温存する戦略を採用すると考えられるが、その戦略を採用せず逃げによって体力を消耗するリスクをとるのは相対的に強い選手と考えられる。他方、主集団においても逃げには参加しなかった別の強い選手が存在すれば、逃げとの間隔はスプリントに向けて追いつくことができると想定して、ある程度、逃げと主集団の間隔が広がることを許容していたと考えられる。これは自転車競技であるポイントレースの2つの特徴に関連すると考える。一つめは、自転車競技において選手は集団を形成することで体力を温存し、順番に先頭を担当すること、二つめは、ポイントレースは複数回ポイントを獲得できるスプリントがあることである。選手間の相互作用や環境は、選手的意思決定やペース行動に影響を与える (Hettinga

et al., 2017).

スプリント間 10 週の最初の 1/4 はスプリントが終わった後あたり、最後の 1/4 は逃げが密集した集団から大きく離れた状態の割合が多いため、次の 10 週の最初の 1/4 は、あらたな秩序が形成されると考えられる。分離した状態や逃げが密集した集団から大きく離れた状態であった 10 周の後半の場合、状態は継続する傾向があり、スプリントはそのままの状態ですべて完了すると考えられる。言い換えると、一度分離した集団が再結合することは簡単ではないということである。ポイントレースにおいて、スプリント直前だけではなく、スプリント間 10 週の 2/4 や 3/4 といった、集団が分離傾向にある時期の位置取りに、選手は注意を払わねばならない。選手は集団が分離するときに、意図する集団の中に入ることができることが重要である。Trenchard et al. (2014) によると、ドラフティングの恩恵をもってしても、集団に追従することができない選手が脱落していくことによって集団が分離する。従って、後方の集団に残りたくない場合は、そのような位置より前方にいることが必要となる。

本章では、レース中の選手の集合的な行動を検討するために、自己組織化の特徴を PCA によって抽出した。しかしながら、選手間の相互作用は記述できていない。従って、選手たちの意図について言及することはできない。個々の局所的な行動の集団形成への効果は、エージェントベースモデルのようなシミュレーションで評価されるだろう。しかしながら、PCA は自転車競技の大域的な配置のダイナミクスを理解するための効果的なアプローチであると評価された。例えば、位置データを用いた選手の大域的な特徴を基にした自転車競技の集合的な行動を説明することなどに用いることができる。

PCA の結果から、第 1 主成分と第 2 主成分がポイントレースの大域的な配置状態を特定することに用いられた。少なくとも第 3 から第 5 主成分は 25% の分散であった。PCA

は、主な特徴と同時に残差の情報も検知する。主な特徴と残差成分はランダム性や確率性を含み、本章ではその情報を無視しており、本章の限界の一つである (Daffertshofer et al., 2004)。加えて、PCA は自転車競技を分析する唯一のやり方ではなく、他の方法についても検討する必要がある。

近年、計測技術は大いに発展し、スポーツの観客に様々な情報が提供されている。自転車競技では、位置情報データをもとにした情報が、ツール・ド・フランスの中継で提供されている (Kataoka & Gray, 2019)。競技全体の状況を定量的に把握できることは、観客とともに選手やコーチにも、集団のダイナミクスの分析を通じて有益となるはずである。

3.6 まとめ

本章では、3つのポイントレースを選手の配置を先頭からの時間密度を用いて定量化し、主成分分析を用いて特徴を抽出した。集団の数が一つか複数かどうかを検証し、集団の密度をポイントレースの集団の状態を特徴づけるために用いられた。これらは主成分分析の第1, 第2主成分を用いて表現された。集団の状態は、2つの主成分による平面の4つの象限によって定義された。それぞれの主成分は、選手の配置の偏りと、選手の密度を説明していると考えられた。一つの密な集団から疎な伸びた集団となり集団が分裂し、さらに逃げと離れた密集した集団となる。これらの状態に関し、状態遷移確率を求めた。

またポイントレースのスプリント間の10周を4等分し、それぞれの期間に分けて状態遷移確率を算出し分析した。10周の後半は伸長した配置状態と分離した配置状態間の遷移で、分離した状態により遷移する傾向があることが示された。さらに、分離した状態での再帰確率や逃げと集団が大きく離れた配置の割合が多くなることが分かった。これは、スプリント直前の競争のみではなく、集団が分離する際の選手の位置取りの重要性を示

す。本章の結果は、選手やコーチにとって競技を分析する上で、いつ体力を温存するか、いつ仕掛けるかといった戦略を検討する参考となると考えられる。

以上のように、本章ではポイントレース競技中の選手の全体集団の大域的な配置を定量化し、主成分分析を用いてその特徴を抽出した。次章では、この選手達の個人間の位置関係がどのようになっているかその構造を明らかにし、またどのような部分集団に分かれているかを検討し、そのダイナミクスを明らかにする。

第4章

自転車競技における制約に基づく機能的集団形成

4.1 背景

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。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)、選手がお互いに体力を温存しようとするため、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(白崎他, 2019)。

自転車競技では、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、体力をいかに温存するかといった駆け引きも競技結果に影響する。その中で、自転車競技の典型的な展開の一つに、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。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、競技力の一つであると考えられる。

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(石井他, 2014)、トレーニング方法(清水他, 2010)やペースング戦略について(Abbiss & Laursen, 2008; Renfree et al., 2015)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、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クラスター分析を行い、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状態を区別した。さらに、自転車競技の集団の分離に関して、先頭を走行する選手によって設定される速度を維持するために必要な発揮出力とドラフティングによる空気抵抗低減の恩恵を受けた後続選手がドラフティング状態で発揮する出力との差の後続選手の最大維持可能出力（maximal sustainable output：MSO）に対する割合（peloton convergence ratio：PCR）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., 2015）。ある一定期間維持し続けることができる出力が高い、高 MSO の選手は、低い MSO の選手より高い速度を維持することができるが、維持可能な最高速度で走行する高 MSO 選手の後方をドラフティング状態で低 MSO 選手が追従する場合、ドラフティングの恩恵によって速度を維持するために必要な出力は低下するが、その低下した要求出力が低 MSO 選手にとっての MSO より低ければ、低 MSO 選手はそのまま追従を続けることができる。他方、ドラフティングの恩恵を受けたとしても、先頭選手が設定する速度を維持するために必要な発揮出力が MSO より高ければ追従できず、高 MSO 選手と低 MSO 選手は離れ、そこで集団が分離することになる。第 3 章で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、集団を 4 つの状態に分類した。そして、レースにおいては、集団全体が一つの状態から、いくつかの集団に分かれ、また再結合することが明らかになった。ここで、集団全体が分離してできる集団を、部分集団と呼ぶ。この部分集団には少数、あるいは一人で逃げる逃げ集団もあれば、その逃げ集団を大勢で追いかける主集団と呼ばれる部分集団もある。しかしなが

ら、これまでの研究では、集団スタートの自転車競技において重要な指標であるこれらの部分集団間の距離が定量化できておらず、集団全体の分離と再結合を含んだ集団動態は明らかになっていない。

自転車競技の中でポイントレースは、競技中に規定周回ごとに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。ポイントレースは、男子エリートでは 15 km から 40 km 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、相手の状況を見た駆け引きが問われる種目である。ポイントレースはスプリント周回が複数回あるため、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いると考えられる。

4.2 目的

そこで本章では、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や集団間の距離を定量化する手法を開発し、選手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、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。

4.3 方法

4.3.1 対象

本章では、201X 年全日本自転車競技選手権大会トラック・レース男子エリート決勝を対象とした。このレースは第 3 章の R120 のレースに相当する。このレースでは、R160 で発生した逃げが主集団に追い付く周回遅れがないため、周回遅れによる逃げと主集団の結合というレースの要素を除き、集団の離合集散について分析するために、このレースを選択した。他方、R100 では逃げと主集団が大きく離れる状況が多くなかったため、今回の分析からは除いた。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。

4.3.2 測定方法

第 3 章と同様に、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を通過する選手を撮影した。撮影後、映像を解析して、自転車の前輪の前端が、両ストレー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 4.1A)。その後、各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 4.1B), 半周ごとの各選手の順位を求めた (図 4.1C). なお, これらの測定および算出方法は, 第 3 章と同様の方法を用いており, その手順をまとめると, 次の通りである.

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 ($l = 1, 2, 3, \dots, 240$).
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ン通過時刻の時間差 $t(n, l)$ を求めた.

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

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.

4.3.3 部分集団の定義と集団動態の定量化

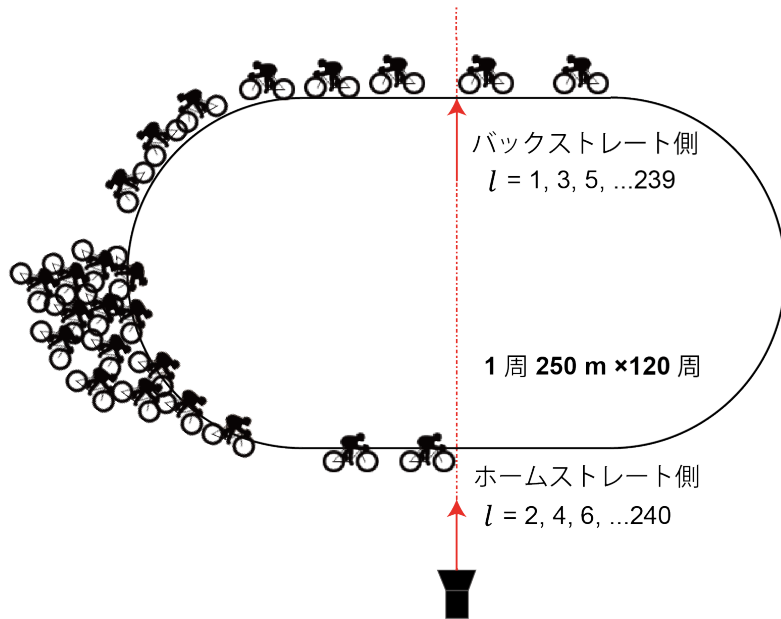
自転車競技の集団動態を定量化する指標は様々想定できるが, 本章では, 次の 3 つの側面から指標を定義する.

個人間距離

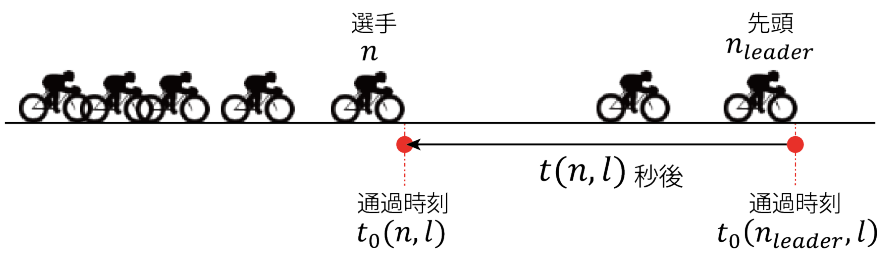
集団の密集状態や, 各選手のドラフティング状態の程度を定量化するための指標として, 直前を走る選手との個人間距離 $d(n, l)$ を指標化する. 選手 n の直前を走る選手 $n_{neighbour}$ との前輪間の距離の算出手順は以下に示す通りである.

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

- A 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 ($l = 1, 2, 3, \dots, 240$)



- B 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



- C 3) 各選手の半周ごとの順位を求める

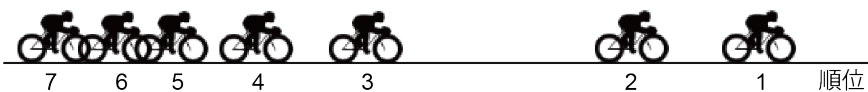


図 4.1 測定方法

n の半周の平均速度 $v(n, l)$ を以下のように求めた (図 4.2A).

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

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 $v_{average}(l)$ を各半周について求めた (図 4.2B).

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

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 4.2C).

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

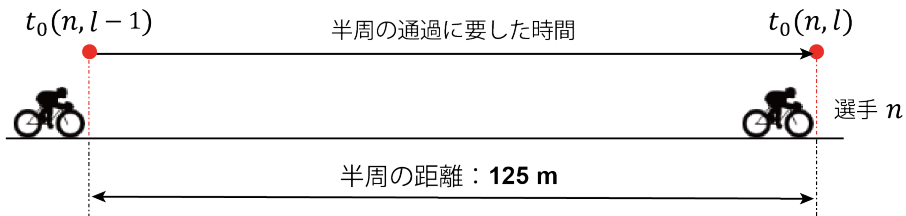
部分集団の数および各集団内の人数

部分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, まず部分集団を定義する必要がある. そのため本章では, ドラフティング効果に基づいて, 部分集団を定義することとする. 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 (CF_{draft}) を提案し, ドラフティングの効果を検討している.

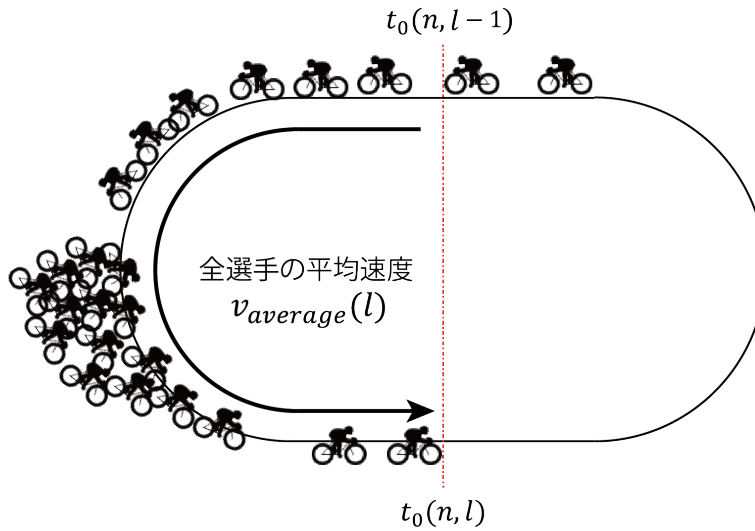
$$CF_{draft} = 0.62 - 0.0104 d_w + 0.0452 d_w^2$$

この研究では, 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

A 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



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



C 3) 各選手について、直前の選手との距離 $d(n, l)$ を半周ごとに求める

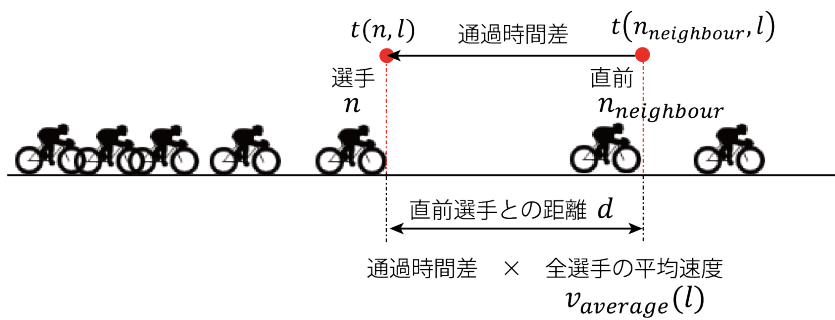


図 4.2 個人間距離の算出方法

としている (図 4.3). 本章ではこの定義を参考にして, 部分集団を定義する. その手順の詳細は以下に示すが, まとめると, まずは, 2 選手の前輪間の距離 d から, 2 選手間の自転車の長さを含まない距離 d_w を求める. そして, d_w が 3 m より大きい場合は, 2 選手は別の部分集団, 3 m 以下の場合は同一の部分集団と定義する. その後, 部分集団の数および各部分集団を構成する選手の人数を算出し, 最も選手の人数が多い部分集団を主集団として定義する. 手順の詳細は, 以下の通りである.

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 $d_w(n, l)$ を半周ごとに算出する. 図 4.4A に示すように, 前輪間の距離から, 自転車の長さ 1.6 m を差し引いた値とする.

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

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する (図 4.4B).

$d_w(n, l) > 3$ の場合: 直前選手と別集団

$d_w(n, l) \leq 3$ の場合: 直前選手と同一集団

3. 各半周について, 部分集団の数を算出する. また, 全ての部分集団について, そこに所属する選手の数を算出する. また, 最も選手の数が最も多い部分集団を, 主集団と定義する (図 4.4C).

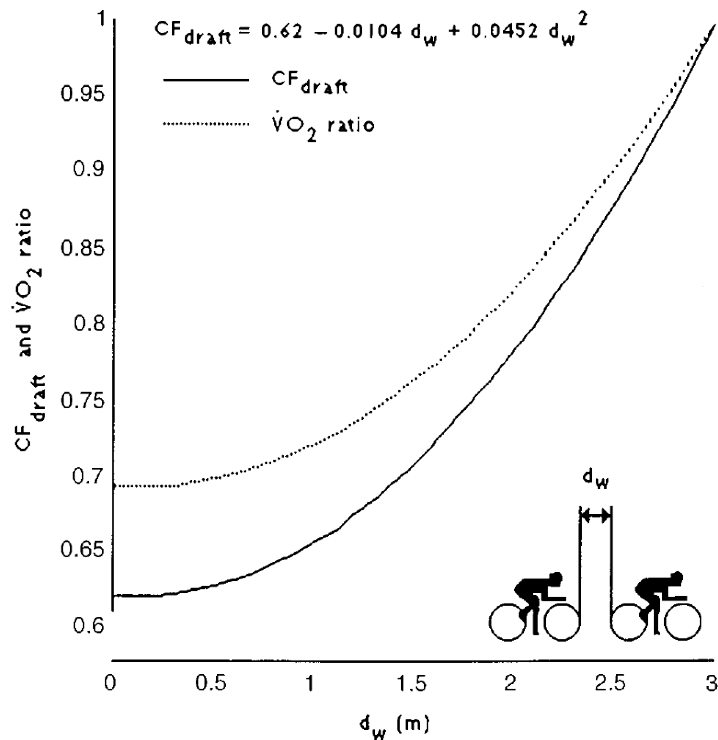


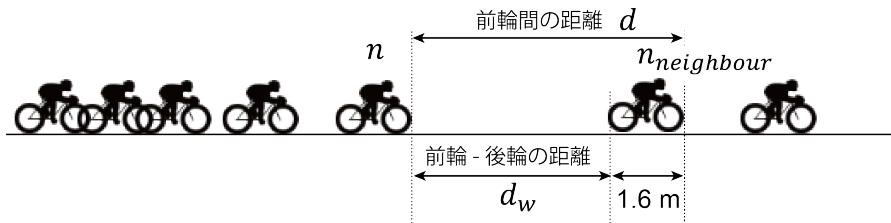
図 4.3 車輪間距離 d_w とドラフティング効果の係数 CF_{draft} (ドラフティング状態の時とそうでない時の空気抵抗の比率) との関係 (Olds, 1998 より)

レース先頭選手と各部分集団の関係

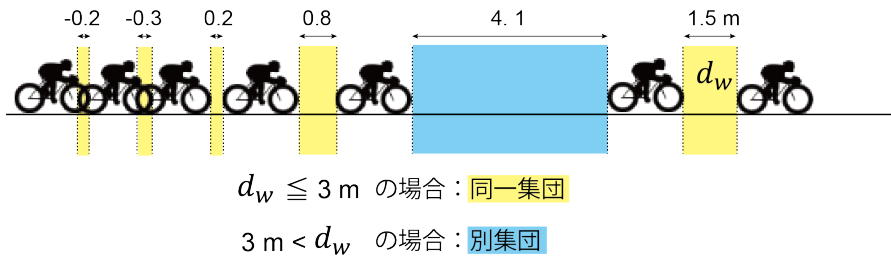
レース先頭選手と各部分集団との関係や部分集団の大きさは、先頭選手の逃げの成功または失敗に影響するため、競技の成績に大きく影響する指標と考えられる。ここでは、これまで定義した指標を用いて指標化を行った。その詳細は、以下に記述するとともに、これらに対応する典型例は、図 4.5 の 1)~3) に示している。

1. 各部分集団について、部分集団の先頭でセンターラインを通過した先頭選手と、部分集団の最後尾でセンターラインを通過した最後尾選手を特定する。その後、先頭選手と最後尾選手のセンターラインの通過時間差を求める。これは、各部分集団内

- A 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



- B 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



- C 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

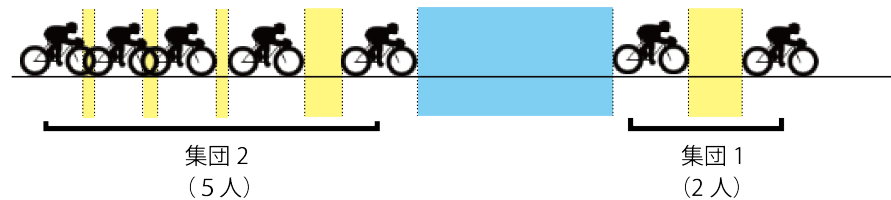


図 4.4 部分集団を定義する方法

の時間的な拡がりを表す指標となる。

2. 各部分集団について、レース先頭選手との時間差 $t(n, l)$ の部分集団内の平均を求める。これは、レース先頭選手と各部分集団との時間的な遅れを表す指標となる。先頭の部分集団については、その先頭集団の時間的な拡がりを表すことにもなる。
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} との距離を求める。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

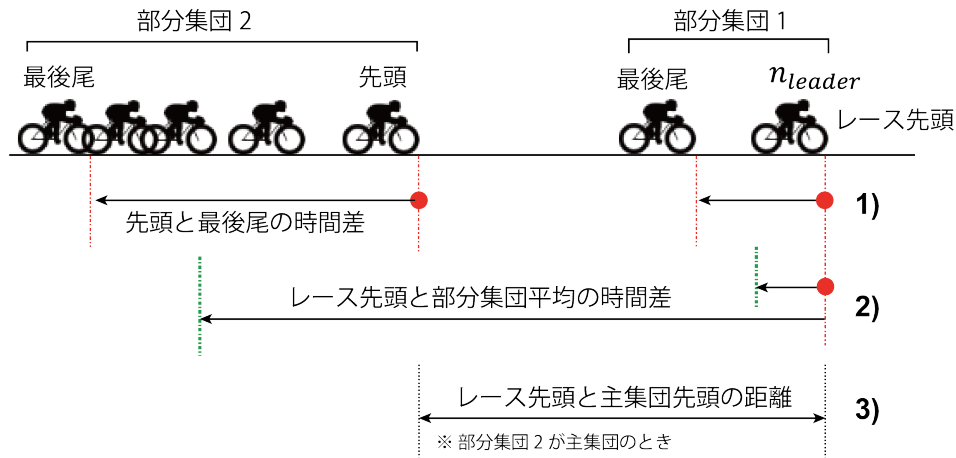


図 4.5 部分集団指標の詳細

を求め、この時間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する。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広がりを表す指標となる。

4.4 結果

4.4.1 各選手のレース先頭選手からの時間差

図 4.6 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 4.6A は、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。周回数の上にある矢印は、逃げ集団が形成された周回を示してある。図 4.6B は全周回のうち、10~20 周までを示したもので、10.5 周から 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られる。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 3 選手までがポイントを獲得

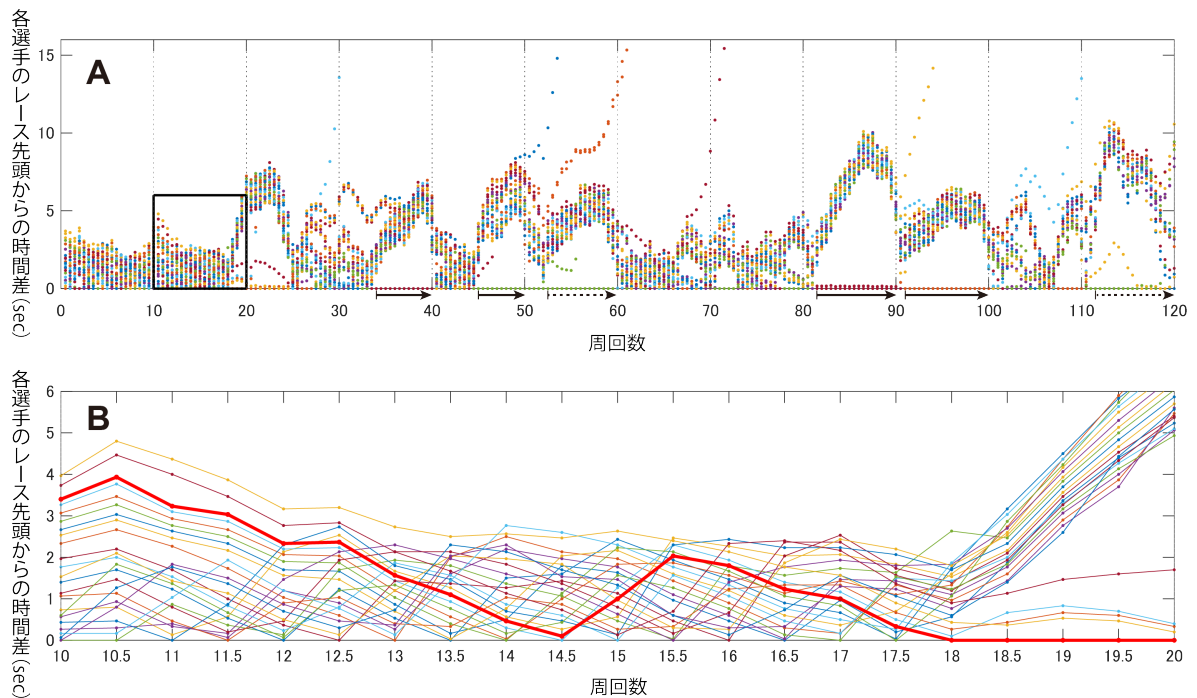


図 4.6 各選手のレース先頭選手からの時間差

し、それ以外の多くの選手は先頭選手との時間差が広がっていき、先頭の集団を追うのをやめていることがわかる。

4.4.2 個人間距離

図 4.7 は、競技中に生じた各選手の直前選手との個人間距離 (d) の頻度を示す。個人間距離は各選手の前輪前端間の距離として定義し (図 4.2C)、自転車 1 台分の長さは 1.6 m であるため、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 (図 4.4A)。

頻度分布は、0 m から 0.5 m 間隔で算出した (図 4.7 左軸)。なお、14 m 以上の間隔の頻度については、図を見やすくするため、合計して示してある。累積確率 (図 4.7 右軸) を見ると、約 90% 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った。また、個人間距離が 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、選手間の距離が離れるのに従って、指数関数的に減少していた。さらに、14 m の間隔というのは、平均速度が約 14 m/s (13.8 m/s) であることから、時間に換算すれば、およそ 1 秒であり、個人間距離の 95% 程度が 1 秒以内であったことを示している。

逆に、ドラフティング外に位置する選手は、集団が分離した際にその部分集団の先頭を走る選手、あるいは単独で走る選手であり、ドラフティング効果に基づいて部分集団を定義することが妥当であることを示している。

4.4.3 部分集団の数と部分集団内人数の変化

図 4.8A は、半周ごとの部分集団の数と部分集団内の人数を示している。集団は最大 10 個の部分集団に分かれていた (119 周から 120 周)。図 4.8A で、部分集団の数が 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、大きな一つの集団が先頭で形成されていることを表す。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から成る逃げ集団が形成され、そ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 人の逃げ集団が形成され、その後を大きな部分集団が追走している。他方、10 周、40 周、60 周、70 周のスプリント後にはそれまでいくつかに分離していた部分集団が、徐々に先頭を含む一つの集団として再結合していることがうかがえる。

図 4.8B は部分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

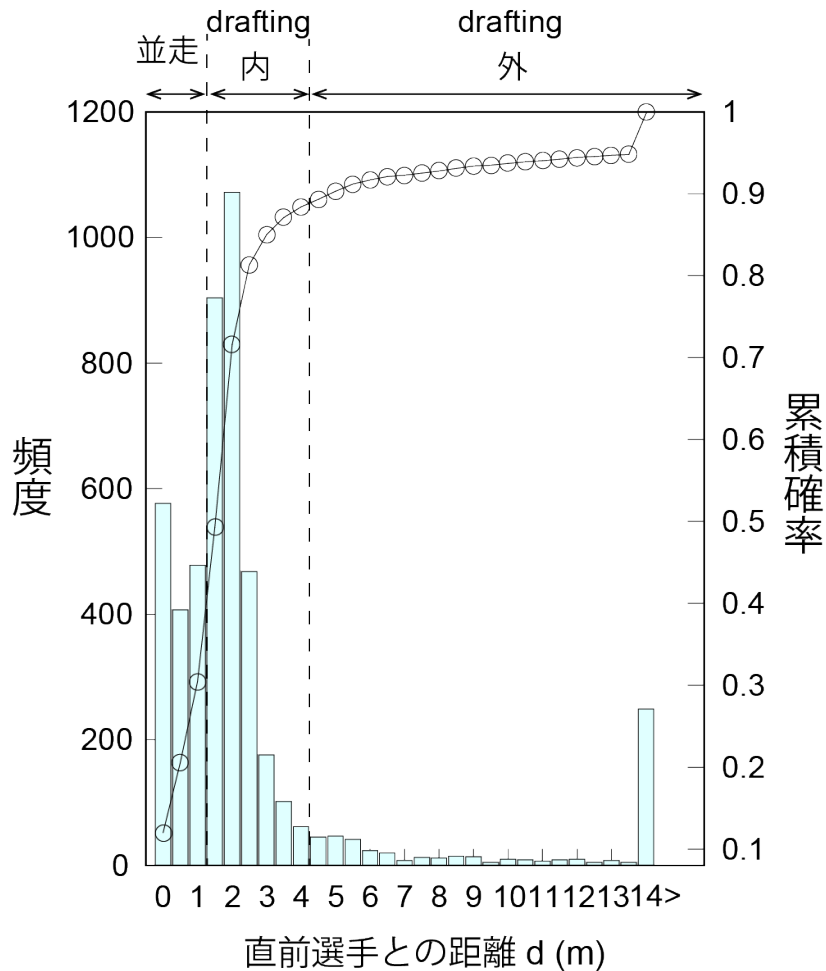


図 4.7 競技中に生じた直前選手との個人間距離の頻度

高かったのは、部分集団の数が 2 の場合であり (26.7%)、次いで部分集団数 3(20.4%)、1(16.7%) であった。部分集団の数の中央値は 3、平均値は 3.25 であった。これらのことから、ポイントレースでは部分集団の数は増減を繰り返しながらレースが展開され、集団全体として分離と再結合を繰り返しているといえる。

図 4.8C は各部分集団内の人数の分布を示したものである。部分集団内人数は 1 人から 24 人までであり、最も多かったのは 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 人までの部分集団が全体の 26.2% を占め、15 人以上の部分

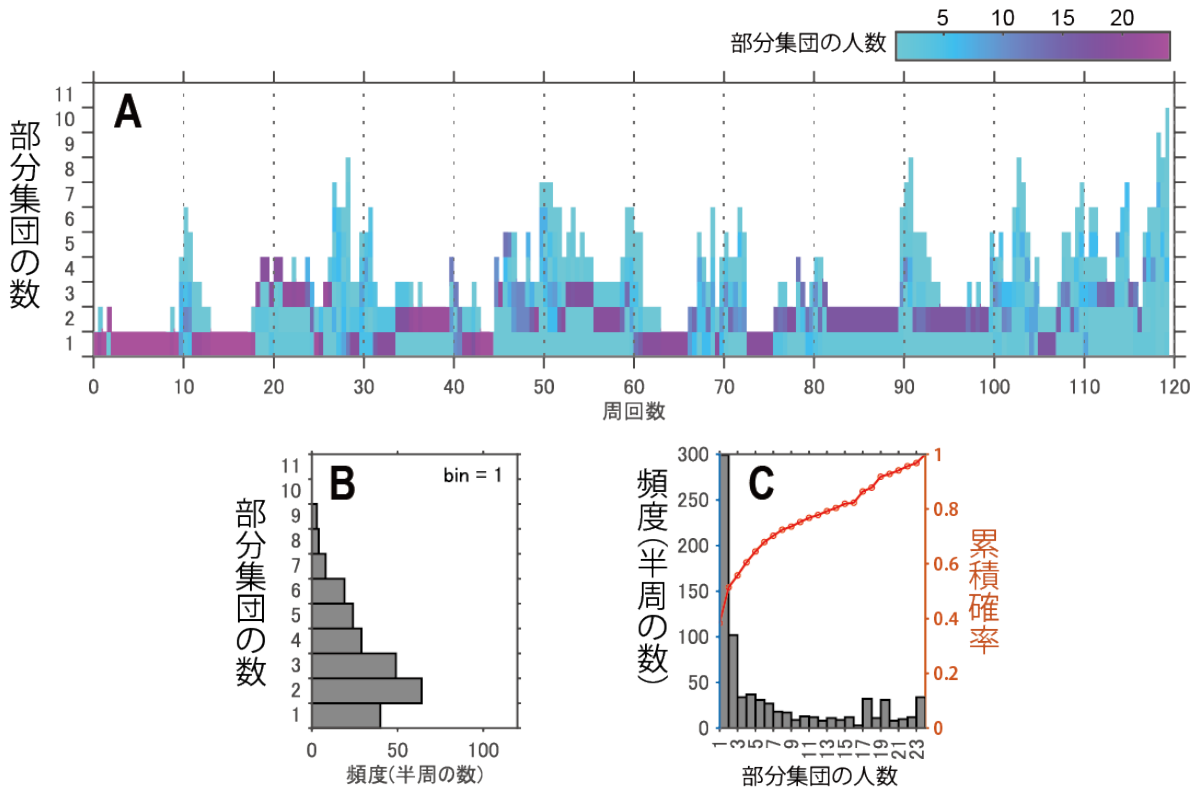


図 4.8 部分集団の数と部分集団内人数の変化. 部分集団数の推移 (A), 部分集団数のヒストグラム (B), 部分集団サイズのヒストグラム (C)

集団の場合も 20% 近く見られた.

4.4.4 各部分集団の時間的拡がりや先頭選手からの時間的遅れ

図 4.9A は、各部分集団の平均位置と先頭選手との時間差と、各部分集団の先頭と最後尾の時間差をエラー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. その選手たちの先頭から遅れていく様子が、図 4.9A に表れている.

図 4.9B は、先頭が 1 人の場合を除く各部分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。各部分集団は、長くとも 4 秒以内の時間的拡がりにとどまっている。レース全体の平均速度 (13.8 m/s) から距離に換算すると、55 m 程度になる。各部分集団の先頭と 0.2 秒以下の頻度が最も高く 21.7% であったが、2 秒程度のところにもピークが見られた。

図 4.9C は、レース先頭選手と各部分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。先頭選手と各部分集団の先頭選手との時間差の平均は 4.4 秒、標準偏差は 2.92 秒、最小値は 0.3 秒、最大値は 16.1 秒であった。

4.4.5 レース先頭選手と主集団先頭選手との空間的拡がり

図 4.10A 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推移を示している。部分集団の数が 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。

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は距離がみられた。さらに、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, 91, 111 周 : 図 4.10A 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 人で構成されており (図 4.10A)、それ以外の 5 回は、

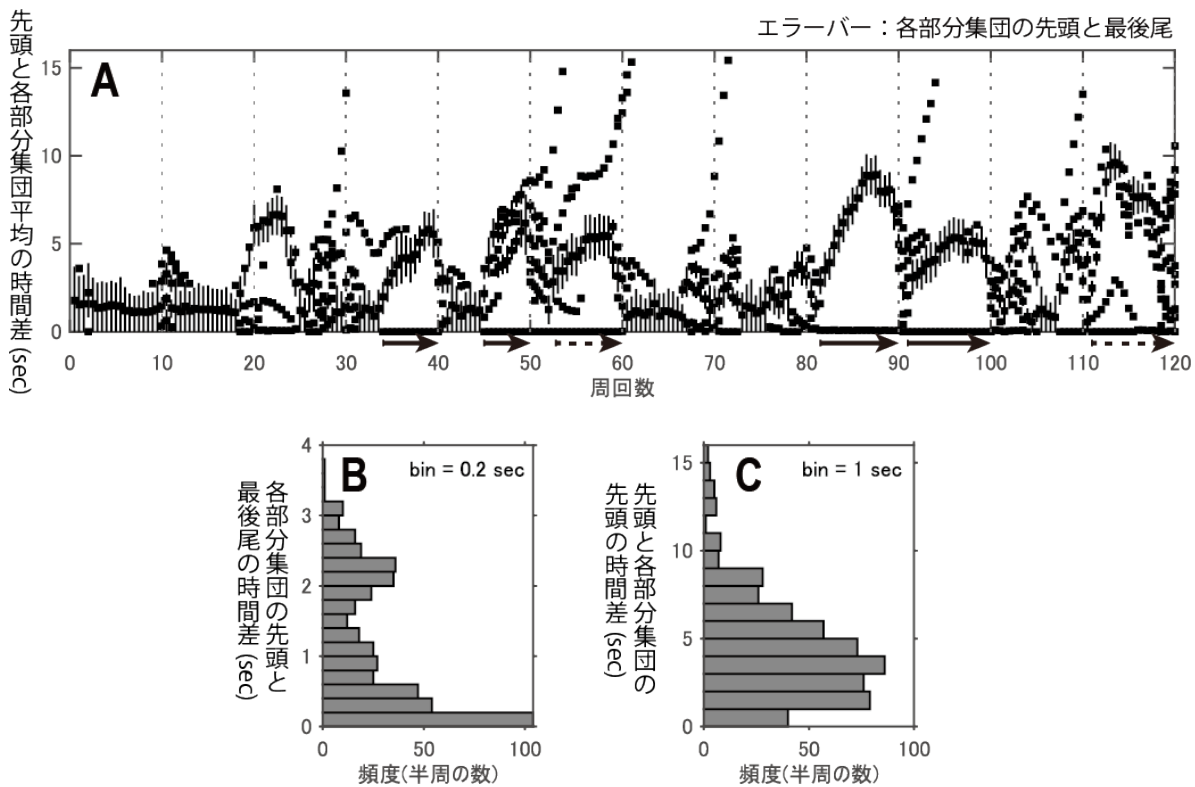


図 4.9 各部分集団の時間的拡がりや先頭選手からの時間的遅れ。レース先頭と各部分集団平均の時間差 (A)、各部分集団の先頭と最後尾の時間差のヒストグラム (B)、レース先頭と各部分集団先頭との時間差のヒストグラム (C)

いずれも単独 (1 人) での逃げであった。

これらの結果から、各周回のスプリント間のパターンは大きく分けて 4 つに分類できた。すなわち、(1) 主集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 4.10A 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) 逃げが形成されるが (52.5, 111 周：図 4.10A の横矢印点線)、スプリント前に主集団ではない集団に追走され吸収される (60, 120 周のスプリント) であった。

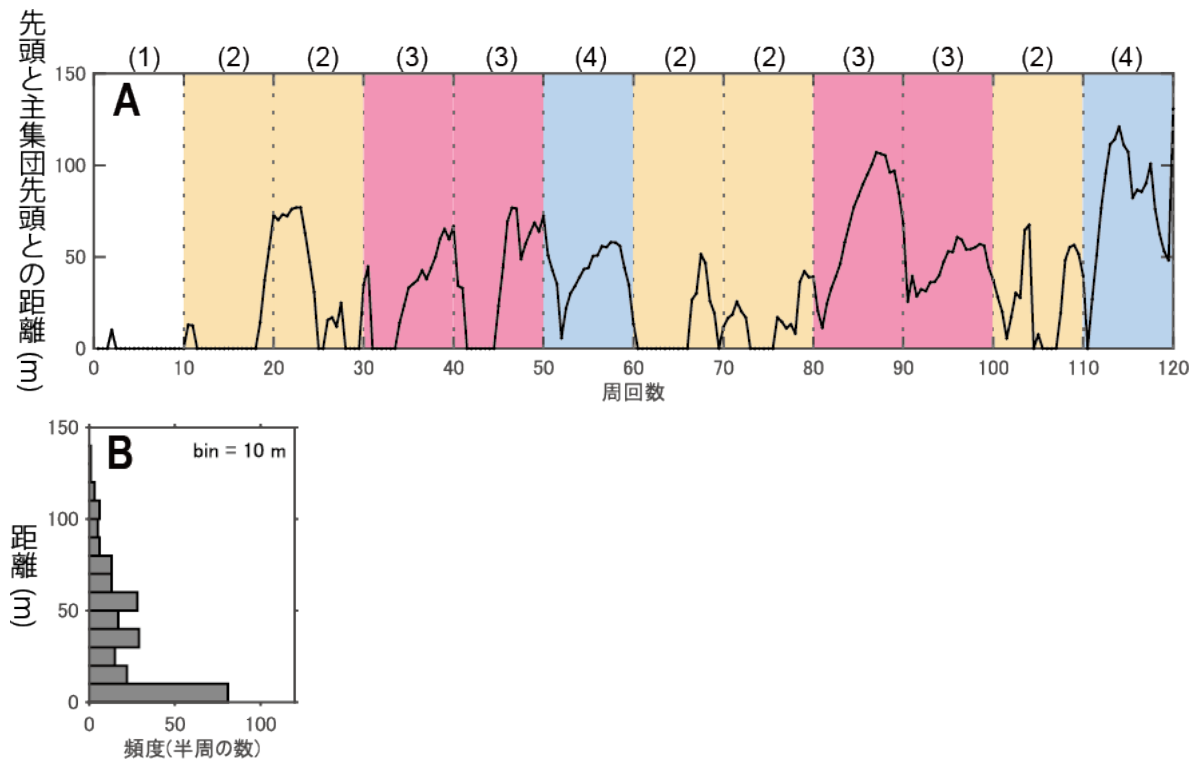


図 4.10 レース先頭と主集団先頭との距離とレースパターン. レース先頭と主集団先頭との距離 (A), および, レース先頭と主集団先頭との距離のヒストグラム (B)

4.5 考察

4.5.1 個人間距離に及ぼすドラフティングの影響

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内であった. 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る. 他方, ドラフティング外の選手は, 集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る。

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うため、瞬間的には体力を消耗するが、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いき、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効果によって生じたものと考えられる。このことから、ドラフティング効果を基準に部分集団を定義することが妥当であるといえよう。

4.5.2 ポイントレースにおける集団動態

ポイントレース競技中の部分集団間の距離をドラフティング効果に基づき定量化し、競技中の集団動態を分析した。部分集団の数と部分集団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、部分集団数が 3 までの場合が 63.8% であり、多くの場合に

は3つ以下の部分集団に分離していた。しかしながら、スプリント後に一つの集団に徐々に再結合する場合（10, 40, 60, 70周）が見られ、レースでは部分集団への分離と一つの集団への再結合を繰り返していることを示すことができた。部分集団内の人数は1人が最も多く全体の38.4%であり、これは逃げ、あるいは最後尾で脱落していく選手のものが多く含まれていた。他方、15人以上の部分集団も全体の20%近くあり、より大きな部分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、空気抵抗の負担を分散することによって、部分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。

分離した部分集団内の時間的拡がりや先頭選手からの時間的遅れを分析した結果、各部分集団は0.2秒以内が最も多く、2秒前後のところにもピークが見られた。これは部分集団内の人数が2人から5人の場合が全体の26.2%、また15人以上の部分集団が20%近く見られたことから、比較的少人数の部分集団の場合と比較的多い人数での部分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部分集団の先頭選手の時間差は、71.6%が5秒以内であり、距離にして70m以内で、多くは250mのトラック一周の約4分の1以内のところに位置していたことになる。

さらに先頭選手と主集団の先頭選手との空間的な拡がりやを検討した結果、スプリント間の周回の集団動態のパターンとして、4つのパターンが観察された（図4.10A）。もっとも多く見られたのは、スプリントの前に集団が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（52.5, 111周）、逃げ集団が主集団に追走され集団が再結合し、逃げが成功しない場合（60, 120周のスプリント）があった。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4.8C)、個人間距離においても14m以上の場合が5%程度見られた(図4.7)。逃げ集団は逃げ切りを成功させるために、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は必要であるし、他方、主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と考えられる。34, 45, 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50-80m程度となっていた(図4.10A)。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80m以下の場合、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100mの距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、集団が多くに分かれ、最終的には10個の部分集団で120周を迎え(図4.8A)、逃げ切りは成功していない。

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、体力を温存しつつも部分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、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、共同で逃げを形成す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、身体的な能力と同様に必要であると示唆された。

個人間距離の約 90% がドラフティングの範囲内であったことを考え合わせると、先頭から分離した場合でもその分離した選手たちは部分集団を形成し、スプリントに向けて体力を温存しながらレースを進めていると考えられる。したがって、ドラフティング効果に基づいて部分集団を定義し定量化することで、ポイントレースでの集団動態を検討することが可能になると考えられる。また、本章では、半周ごとの通過時刻を各選手について記録し、その通過時刻から部分集団を定義し、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。全選手の半周ごとの通過時刻を記録する必要があるが、必ずしも映像から求める必要はなく、ストップウォ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測定では時間分解能が十分ではなく、本章の限界である。

4.6 まとめ

本章では、全日本レベルの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の各選手の半周ごとの通過時刻を測定し、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き部分集団を定義した。そして、個人間距離、部分集団の数と各部分集団内の人数、レース先頭選手と最も人数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、直前選手との間隔の約 90% は 3 m 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部分集団を定義することによ

て、部分集団の数の増減や部分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部分集団への分離と一つの集団への再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つのパターンに分類することができ、逃げが成功する距離についても示唆を得ることができた。

半周ごとの通過時刻からドラフティング効果に基づいて部分集団を定義し、時間差と距離の変化から、複雑なポイントレースにおける選手間の駆け引きの実態をある程度明らかにできたといえる。したがって、本章で開発した、競技中に生じる個人間や部分集団間の距離を定量化する方法は妥当であったと考えられる。

しかしながら、本章は1事例であり、12回のスプリント周回を分析したもので、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を及ぼすため、さらに多くの競技を分析し、特徴的な距離やそこに至る過程を分析することができれば、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きると考えられる。

第5章

離合集散の制御ダイナミクスと状態依存性

5.1 背景

集団スタートの自転車競技において、選手は高速で運動するため、空気抵抗は競技の結果に大きな影響を与える決定的な因子である (Kyle, 1979). 従って、選手は風を除けるために密集した集団を形成する。選手はドラフティングを行い、風を除け体力を温存する。しかしながら、先頭を走る選手はドラフティング状態にある後ろの選手より大きな空気抵抗を受ける。その結果、利他的とみなされる協力的行動のローテーションが選手間で行われるが、勝つためには利己的な行動が必要である。ポイントレースは、規定周回ごとに繰り返すスプリントで得られる累積得点で順位を競うため、利己的、利他的行動が繰り返され、ここまでの章で見てきたように集団が離合集散を繰り返す。

多くの研究者が、昆虫や動物の群れの行動について注目してきた (Vicsek & Zafeiris,

2012; Couzin, 2009). これらの生物は群れを形成することで、行動のためのエネルギーを節約したり、捕食される確率を下げたりすることで生存の確率を高めていると考えられる。局所的な個体間の相互作用を表現する数理モデルが、動物の群れ形成の理解について用いられてきている (Vicsek et al., 1995; Couzin et al., 2002). 他方、集団全体を捉えることから、集団の中における各個体の動きの特徴を捉える研究も行われている (Ballerini et al., 2008; Cavagna et al., 2010). 群れの系には、群れ全体の状態を表す秩序変数とそれを制御する制御変数があると考えられる。

人間を群れとしてとらえた研究として、多くの人数の歩行者の分析がある。Helbing et al. (2005) は、ボトルネックや交差といった様々な環境下における歩行者流の social force model を用いたシミュレーションを、実測によって検証した。Social force model は、ヒトが到達したい目的地点から受ける誘因力と、他の歩行者や壁などの障害物から受ける斥力の合力によって計算するモデルである。歩行者の流れは、状況によって人が折り重なるなど深刻な状態となりうるが、それは通路の形状や人の密度といった変数に影響を受ける。Murakami et al. (2021) は、スマホ課題により注意を阻害された人の存在によってレーン形成が阻害され、相互予期が群衆の自己組織化に影響を与えていることを示した。以上のような研究は、ヒト集団においても集団の秩序状態を表す変数が存在し、それらを制御する変数によって影響を受けることを示している。

Trenchard (2013) は自転車競技の集団を、鳥の群れと同じような複雑系としてとらえ、集団の密度と位置変更の頻度の2つの視点から、集団の速度によって、以下の4つの相に分類し、自転車競技の集団の状態を定性的に記述した。(i) 弛緩 (Relaxed: 密度が高く、低い頻度の位置変更), (ii) 対流 (Convective: 密度が高く、高い頻度の位置変更), (iii) 同期 (Synchronized: 密度が低く、低い頻度の位置変更), そして、(iv) 崩壊

(Disintegrated: 密度がとても低く、低い頻度の位置変更) の4つである。

また、第3章では、分離と再結合を繰り返す、ポイントレースを撮影し、選手の配置を定量化し、主成分分析を用いてその状態遷移について分析した。第1主成分と第2主成分をそれぞれ横軸、縦軸とした平面上の各象限を集団の4つ状態（1つの密集した状態、伸長した状態、分離した状態、そして逃げ集団が大きく離れた状態）と対応させると、その状態遷移の多くは、その状態に留まりつつ隣の状態（隣の象限）へ遷移するが、半周の間には遠く離れた状態（2つ以上離れた象限）に遷移することはほとんどないことが示された。しかしながら、どのような変数が集団の秩序変化に影響を及ぼし、集団全体の分離と再結合がどのようなメカニズムで生じるかは明らかになっていない。

これまでの鳥の群れの集団の研究では、集団の秩序状態を表す変数として集団内の個体の速度が用いられている。例えば、集団の方向の偏りを示す指標として、各個体の速度ベクトルを足し合わせ、個体数で割ったものを示している (Couzin et al., 2002)。すなわち、3次元で運動する各個体の速度を平均化することで、群れ全体の運動の偏りが分かる。ベロドロームで行われる自転車競技では、集団全体の運動の進行方向は一方向に決まっている。そこで、自転車競技の各集団の運動を代表する速度として、その集団の先頭を走る選手の速度を用いることが考えられる。すなわち、全体の先頭に立つ選手の速度や、逃げ集団が生じている場合は、その後方の最も多くの選手が属する主集団の先頭選手の速度である。また、その相対速度である先頭選手と主集団先頭選手の速度差も、集団の秩序変化に影響がある制御変数の有力な候補であると考えられる。さらに、逃げ集団と主集団の関係性はその間隔、すなわち時間差によって代表されると考えられる。そこで、1つの密な集団が伸長し、分離した状態になり、さらに逃げ集団が一つの密な集団から大きく離れる状態への遷移、さらにはそこから1つの密な集団に戻るといった集団全体の秩序変化に対

して、部分集団を定義した際の先頭の選手の速度、主集団の選手の速度、そしてその速度差、及び時間差が制御変数であると仮説を設ける。

他方、自己組織化における秩序変化において、ヒステリシスが伴う場合が多くある (Scheffer et al., 2001; Rietkerk et al., 2004)。ヒステリシスとは、ある系におけるその履歴に対する依存性である。人間の運動では、Kelso (1984) が個人内の運動協調において、指振り運動の周波数を変化させることにより相転移が生じ、また、その周波数を元に戻しても元の状態には戻らない、すなわちヒステリシスがあることを示した。また Schmidt et al. (1990) は、お互い座っている 2 人が脚の運動を個人間で協調させる課題において、2 つの運動モード (同相同期と逆相同期) の切り替え時にヒステリシスが生じることを示した。Aoi et al. (2013) は、四足動物の歩行 - 速歩の歩容の相転移におけるヒステリシスをロボットを用いて検証した。また、スポーツ場面では、Yamamoto & Gohara (2000) が、テニスのフォアハンドとバックハンドストロークの連続切替動作において、ヒステリシスによる 3 次の系列効果を示した。また、Sørensen et al. (2001) は、卓球のフォアバックハンドストロークの選択においてヒステリシスが生じることを示した。

集団の秩序変化に関して、Couzin et al. (2002) は、群れの方向を揃えようとする領域の半径を増加させる場合と減少させる場合とでは、群れ全体の状態の遷移が異なることを示した。これは群れの状態遷移にヒステリシスがある、すなわち、群れの状態はその履歴に依存していることを示している。自転車競技においても、状態の秩序変化に関してヒステリシスのような現象が観察されることが考えられる。すなわち、自転車競技の集団の分離と再結合には非対称性があると考えられる。しかしながら、Trenchard et al. (2014) は、自転車競技のポイントレースを撮影し、競技中の速度と集団の分離について分析したが、彼らの分析は 1 つのカメラで 1 つの集団が捉えられる範囲でしか行われておらず、集

団が分離し大きく離れ、さらに再結合する過程については分析できていない。第3章では、分離する部分集団も含めて集団全体を大域的に定量化し、主成分分析の結果を用いて集団全体の状態を分類したが、自転車競技における集団全体の秩序状態の遷移、すなわち、集団の分離-再結合の遷移においても、ヒステリシスが生じているかどうかは明らかになっていない。そこで、自転車競技における集団の分離と再結合においてヒステリシスのような現象があると仮説を設ける。

5.2 目的

本章では、自転車競技のポイントレースにおける集団の分離と再結合の秩序変化の制御変数は、先頭選手の速度、部分集団の中で人数が最も多い主集団先頭の速度、またはそれらの速度差であるという仮説を検証することを目的とする。さらに、集団の分離と再結合にはヒステリシスのような非対称な現象が見られるという仮説も検証する。

5.3 方法

5.3.1 参加者

第3章と同様に、201X年全日本自転車競技選手権大会トラック・レース男子エリート決勝を分析した。参加者の人数と年齢（平均±SD）は、それぞれ24名と20.3±2.1歳だった。競技は室内ベロドローム（1周250m）で行なわれ、レースの総距離は30km（120周）であった。レースの平均速度は49.3km/hであった。

参加者はイ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いた名古屋大学総合保健体育科学センターの研究倫理委員会の承認（30-13）を得て行なわれた。

5.3.2 計測系

第3章、第4章と同様に、ビデオカメラ (Sony HDR-PJ450, 30 fps) を観客席から競技を録画した。バックストレートおよびホームストレート両方のセンターラインの延長線上にカメラを据え、全選手の自転車前輪前端がセンターラインを通過する時刻と、レース先頭選手の通過時刻との時間差を測定した。測定は1周につき、バックストレートとホームストレートの2か所で行なわれた。

5.3.3 集団の定義

Olds (1998) によると、ドラフティング時と単独走の時の空気抵抗の比率を示すドラフティング係数 CF_{draft} は、前車の後輪後端と後車の前輪前端の間隔 d_w の関数である。さらに、この関係式では、間隔が3 m より大きくなるとドラフティングによって空気抵抗が低減する効果はなくなることが導かれる (図 4.3 参照)。本章では第4章と同様に、間隔が3 m より大きくなった場合、その前後の選手は異なる部分集団に所属すると定義した。 d_w は前後の時間差とその周回の平均速度を掛け算し、自転車全長の概算値 1.6 m を引き算することで計算した。半周の平均速度は、半周 125 m の経過時間によって計算された。先頭と人数の最も多い主集団の間に少数の部分集団が生じる場合もあるが、本章では先頭選手と主集団のみを対象とした。

5.3.4 分析方法

Trenchard et al. (2014) は、自転車レースのプロトンの密 (コンパクト) と伸びた状態を特定した。また第3章のように、ポイントレースにおける4つの選手配置の状態を

定義した。それらは1つの密集した状態(以下, DEN と表記する), 伸長した状態(以下, STR と表記する), 分離した状態(以下, DIV と表記する), 逃げが主集団から遠く離れた状態(以下, ESC と表記する)であった。本章では, 半周ごとの状態を特定し, 制御変数候補について評価した。加えて, 選手配置の状態遷移に関連する制御変数を分析するために, 状態が遷移した測定点における制御変数について調査した。つまり, 状態が変化せず同じだった場合と状態が変化した場合の変数を比較し, 状態に影響を与える制御変数について分析した。

5.3.5 制御変数候補

レース先頭選手の速度 V_{leader} , 主集団の速度(主集団先頭選手の速度) V_{main} , レース先頭選手速度と主集団の速度の速度差 $\Delta V (= V_{leader} - V_{main})$, レース先頭選手と主集団の通過時刻差 ΔT を制御変数候補として評価した。主集団は最も多くの人数がいる部分集団で, この集団は d_w が 3 m より大きいかどうかで定義されたものである。これらの変数を全測定点と STR または DIV から状態が遷移した場合について分析した。

5.3.6 統計

1元配置分散分析(ANOVA)を, 各状態における変数を比較するために行なった。その後, Tukey の検定によって多重比較が実施された。さらに, 状態 STR と DIV において, 次の半周の状態によって, Welch の方法によって検定された。さらに, Steel-Dwass の方法により多重比較を行い, 効果量 (η_p^2) が計算された。多変量分散分析(MANOVA)が V_{leader} と ΔV に関して Wilks の Λ によって実施された。これは STR から DIV へ変化する場合(以下, STR \rightarrow DIV と表記する)と STR のままであった場合(以下, STR

→ STR と表記する) および DIV から STR へ変化する場合 (以下, DIV → STR と表記する) と DIV のままであった場合 (以下, DIV → DIV と表記する) の比較によって実施された. 統計計算は統計ソフトウェアの R を用いて実施された (R Core Team, 2022).

5.4 結果

5.4.1 各状態における制御変数候補

図 5.1 は, V_{leader} , V_{main} , ΔV と ΔT の, それぞれの 4 つの大域的状態において各制御変数候補を比較したボックスプロットである.

V_{leader} の各状態における平均と標準偏差は, DEN: 13.67 ± 0.73 (m/s), STR: 14.51 ± 1.28 (m/s), DIV: 14.43 ± 1.12 (m/s), ESC: 13.86 ± 0.71 (m/s) であった (図 5.1A). ANOVA の結果は, 状態に関して有意であった ($F(3, 236) = 9.239, p = 7.84 \times 10^{-6}, \eta_p^2 = 0.106$). Tukey の多重比較検定の結果, STR と DIV における V_{leader} の値は, DEN と ESC における値に対し有意に大きかった (STR vs. DEN: $t = 4.200, p = 2.199 \times 10^{-4}, r^2 = 0.137$, STR vs. ESC: $t = 3.567, p = 0.002, r^2 = 0.091$, DIV vs DEN: $t = 3.861, p = 8.35 \times 10^{-4}, r^2 = 0.120$, DIV vs ESC: $t = 3.196, p = 0.009, r^2 = 0.076$).

V_{main} に関して, 平均と標準偏差は, DEN: 13.67 ± 0.73 (m/s), STR: 14.26 ± 1.39 (m/s), DIV: 14.42 ± 1.11 (m/s), ESC: 14.18 ± 0.78 (m/s) であった (図 5.1B). ANOVA の結果は, 状態に関して有意であった ($F(3, 236) = 4.478, p = 0.004, \eta_p^2 = 0.054$). 多重比較は, DEN と STR, または DIV に関して有意な差があったがその他の組み合わせでは有意な差はなかった (DEN vs. STR: $t = 2.828, p = 0.025, r^2 = 0.067$, DEN vs DIV: $t = 3.588, p = 0.002, r^2 = 0.106$).

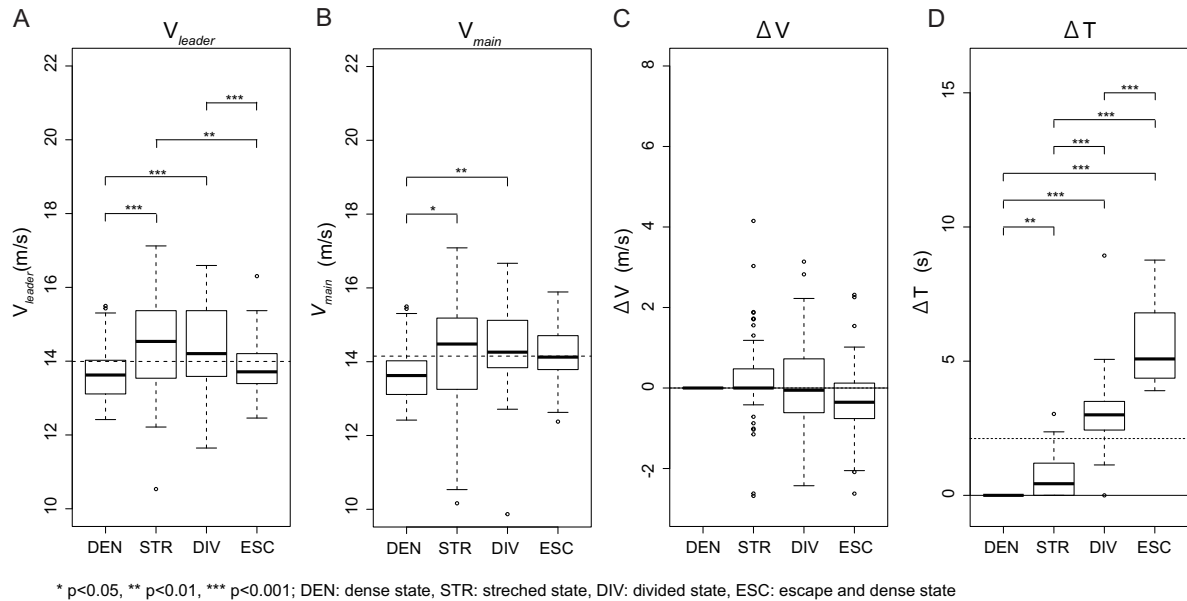


図 5.1 4 つ集団の状態 (DEN, STR, DIV, および, ESC) に対する候補制御変数の比較. V_{leader} (A), V_{main} (B), ΔV (C) および ΔT (D).

ΔV に関して, 平均と標準偏差は, DEN: 0 ± 0 (m/s), STR: 0.25 ± 1.00 (m/s), DIV: 0.02 ± 1.00 (m/s), ESC: -0.32 ± 1.25 (m/s) であった (図 5.1C). DEN において集団は分離していないので (図 5.2), ΔV の値は 0 になる. ANOVA の結果は, ΔV は状態間で有意であったが ($F(3, 236) = 3.667, p = 0.013, \eta_p^2 = 0.045$), 多重比較においては有意な差はみられなかった.

ΔT に関して, 平均と標準偏差は, DEN: 0 ± 0 (s), STR: 0.69 ± 0.80 (s), DIV: 3.00 ± 1.15 (s), ESC: 5.6 ± 1.43 (s) であった (図 5.1D). ANOVA の結果は, 状態間で ΔT は有意であった ($F(3, 236) = 332.1, p = 2.00 \times 10^{-16}, \eta_p^2 = 0.809$). 多重比較は, 全ての組み合わせで有意差がみられた (DEN vs. STR: $p = 0.004$, その他の組み合わせ: $p < 0.001$).

なお, 図 5.2 は, 10 周ごとの周回に分けて, 大域的な配置状態の変化と, 制御変数の候

補のうち、 V_{leader} , V_{main} , そして ΔV について示したものである。

5.4.2 集団分離と再結合および制御変数候補

ポイントレースの大域的な集団の分離と再結合の制御変数を明らかにするために、STR と DIV から他の状態に遷移する場合と留まる場合に着目した。つまり、STR \rightarrow DIV, STR \rightarrow DEN, STR \rightarrow STR と、DIV \rightarrow STR, DIV \rightarrow ESC, DIV \rightarrow DIV について検討する。図 5.3 は状態 STR または DIV から遷移または維持した場合の V_{leader} , V_{main} , ΔV および ΔT を示す。

伸長状態 (STR) からの分離

分散分析の結果、 V_{leader} については、STR からの遷移に関して有意に異なることが示された ($F(2, 25.1) = 3.644, p = 0.041, \eta^2 = 0.049$) (表 5.1)。多重比較において、STR \rightarrow DEN と STR \rightarrow DIV への変化の比較に有意な差がみられた ($t = 2.426, p = 0.040, r^2 = 0.197$)。しかしながら、 V_{leader} は STR のまま維持される場合と、遷移する場合、すなわち STR \rightarrow STR と STR \rightarrow DEN, または STR \rightarrow DIV との比較には有意な差は見られなかった (図 5.3A)。

他方、 V_{main} に関しては、どの状態へ遷移するかで有意な差はなかった ($F(2, 22.1) = 1.351, p = 0.279, \eta^2 = 0.055$) (図 5.3B)。

ΔV については、分散分析の結果、有意な差が見られた ($F(2, 21.7) = 8.143, p = 0.002, \eta^2 = 0.298$)。多重比較では、STR \rightarrow DEN と STR \rightarrow DIV と、STR \rightarrow STR と STR \rightarrow DIV との比較に有意な差がみられた (STR \rightarrow DEN vs. STR \rightarrow DIV: $t = 4.337, p = 4.292 \times 10^{-5}, r^2 = 0.439$; STR \rightarrow STR vs. STR \rightarrow DIV: $t = 4.019, p =$

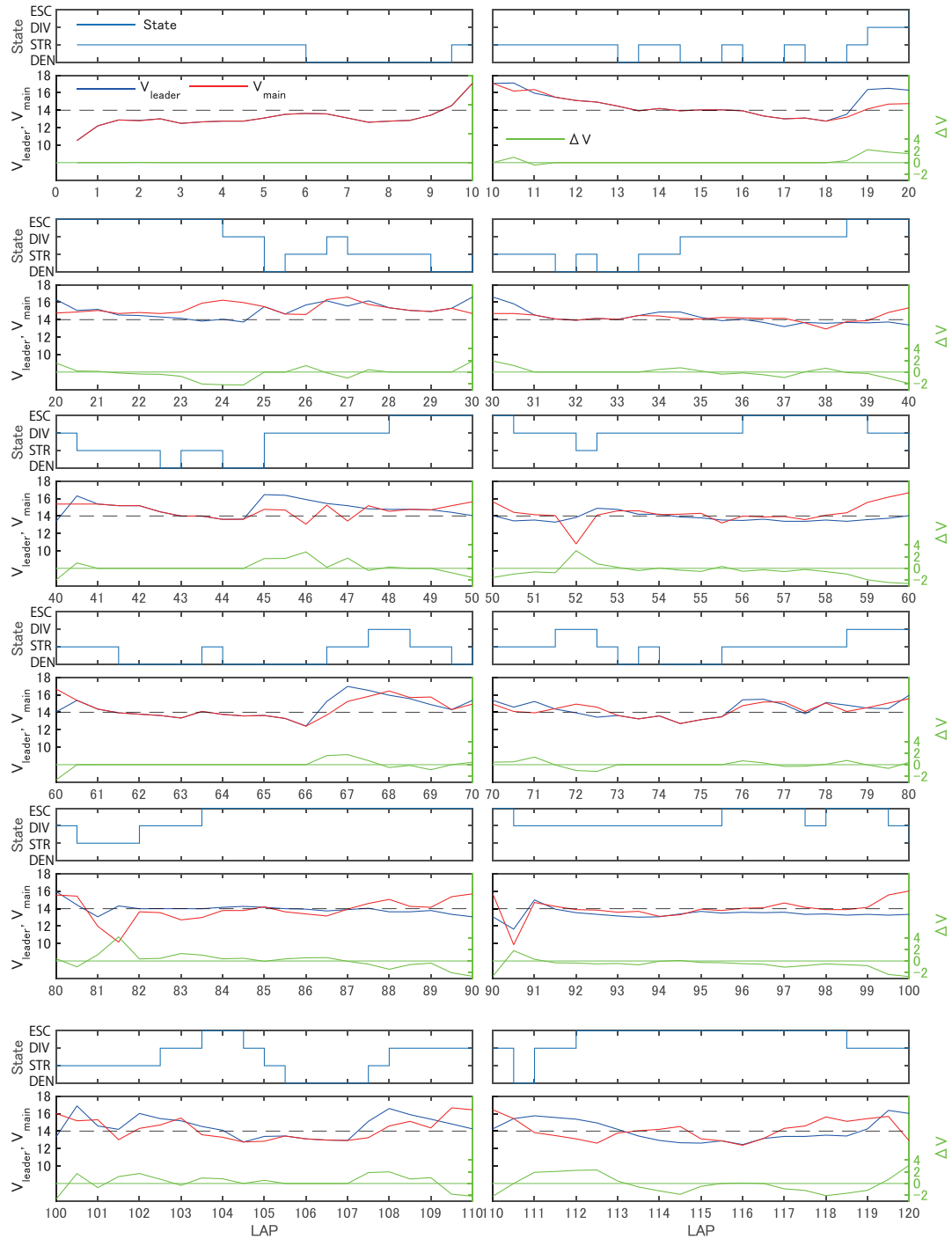


図 5.2 制御変数候補 V_{leader} , V_{main} , そして ΔV と大域的な配置状態の推移.

表 5.1 V_{leader} , V_{main} , ΔV と ΔT の各制御変数候補の分散分析および多重比較の結果

From	Comparison	V_{leader}		V_{main}		ΔV		ΔT	
		Welch F Value (df)	Steel-Dwass t Value (df)	Welch F Value (df)	Steel-Dwass t Value (df)	Welch F Value (df)	Steel-Dwass t Value (df)	Welch F Value (df)	Steel-Dwass t Value (df)
Stretched state (STR)	STR → DEN		1.361		-		0.929		2.443*
	STR → STR	3.644 *	(59)	1.351		8.143 **		14.929 ***	
	STR → DEN		2.426 *		-		4.337 ***		3.859 ***
	STR → DIV		(24)						
	STR → STR	(2, 25.1)	0.906	(2, 22.1)		(2, 21.7)	4.019 ***	(2, 26.3)	2.223
	STR → DIV		(53)						
Divided state (DIV)	DIV → STR		-		-		2.560 *		1.718
	DIV → DIV	0.079	(55)	3.01		5.045 *		4.829 *	
	DIV → STR		-		-		2.252		2.344 *
	DIV → ESC		(16)						
	DIV → DIV	(2, 13.7)	-	(2, 13.8)	-	(2, 14.6)	0.81	(2, 14.0)	2.758 *
	DIV → ESC		(55)						

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

1.724×10^{-4} , $r^2 = 0.439$) (図 5.3C).

ΔT に関して、分散分析の結果、有意な差が見られた ($F(2, 26.3) = 14.929$, $p = 4.639 \times 10^{-5}$, $\eta^2 = 0.049$). 多重比較では、STR → DEN と STR → STR との比較、STR → DEN と STR → DIV の比較において有意であった (STR → DEN vs. STR → STR: $t = 2.443$, $p = 0.039$, $r^2 = 0.919$; STR → DEN vs. STR → DIV: $t = 3.859$, $p = 3.350 \times 10^{-4}$, $r^2 = 0.383$)(図 5.3D).

分離状態 (DIV) からの再結合

DIV からの遷移に関して、分散分析の結果、 V_{leader} ($F(2, 13.7) = 0.079$, $p = 0.924$, $\eta^2 = 0.003$) (図 5.3E) と、 V_{main} ($F(2, 13.8) = 3.011$, $p = 0.082$, $\eta^2 = 0.110$) (図

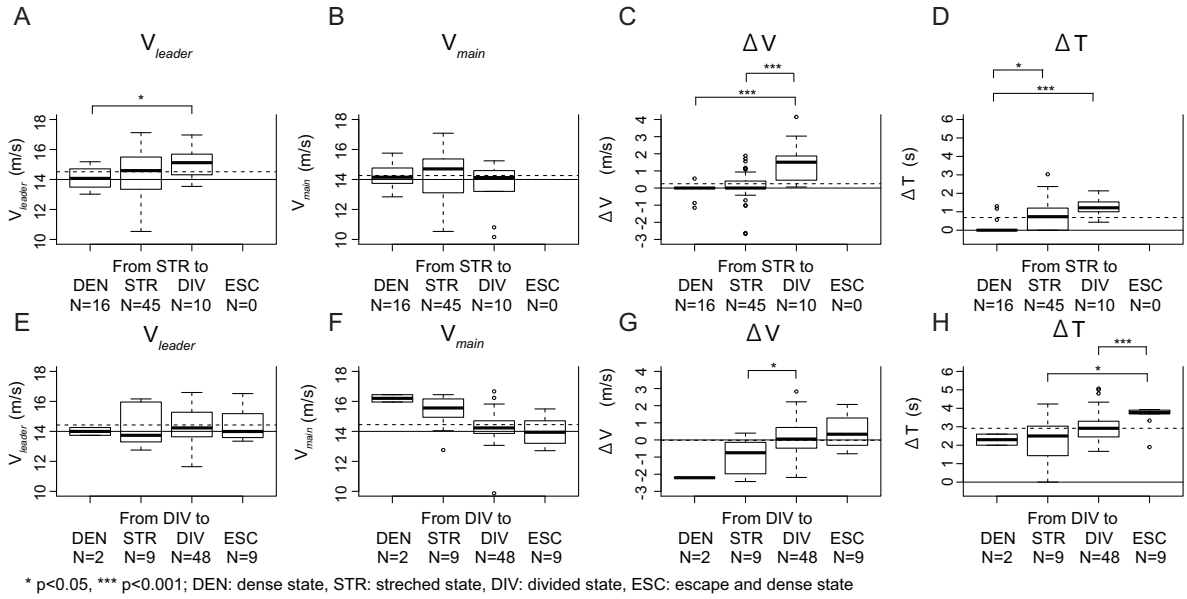


図 5.3 伸長状態 (STR) からの遷移 (A-D) と分離状態 (DIV) からの遷移 (E-H) における候補制御変数のボックスプロット (V_{leader} (A, E), V_{main} (B, F), ΔV (C, G), および ΔT (D, H)).

5.3F) は、有意な差は見られなかった。 ΔV ($F(2, 14.6) = 5.045, p = 0.022, \eta^2 = 0.133$) と ΔT ($F(2, 14.0) = 4.829, p = 0.025, \eta^2 = 0.147$) (表 5.1) については、有意な差が見られた。 ΔV の多重比較では、DIV \rightarrow STR と DIV \rightarrow DIV との比較において有意な差が見られた ($t = 2.560, p = 0.028, r^2 = 0.107$) (図 5.3G)。 ΔT の多重比較では、DIV \rightarrow STR と DIV \rightarrow ESC, および DIV \rightarrow DIV と DIV \rightarrow ESC の比較において有意な差が見られた (DIV \rightarrow STR vs. DIV \rightarrow ESC: $t = 2.344, p = 0.050, r^2 = 0.256$; DIV \rightarrow DIV vs. DIV \rightarrow ESC: $t = 2.758, p = 0.016, r^2 = 0.122$) (図 5.3H)。

5.4.3 集団の分離と再結合に関するレース先頭速度と主集団先頭速度との時間差

さらなる検討のため、レース先頭速度 V_{leader} と主集団の速度差 ΔV と、状態遷移の関係を分析した。横軸に V_{leader} 、縦軸に ΔV を取り、状態が遷移しなかった場合 (STR → STR, DIV → DIV) と遷移した場合 (STR → DIV, DIV → STR) に関して、図 5.4A と B に、それぞれの場合を分けてプロットした。

図 5.4A では、このレースの平均速度であった $V_{leader} = 14.0$ m/s と、レース先頭選手と主集団先頭選手の速度差がない $\Delta V = 0$ によって領域が 4 つに区切られている。赤いプロットで示される STR から DIV に遷移する場合 (STR → DIV) は、青いプロットで示される STR に留まる場合 (STR → STR) と比較して、4 つに区切られた領域の右上に分布した。対して、図 5.4B では、黒いプロットで示される DIV から STR へ再結合する場合 (DIV → STR) は、緑のプロットで示される DIV のままだった場合 (DIV → DIV) と比較して、上記の $V_{leader} = 14.0$ m/s と $\Delta V = 0$ の領域の下側に分布した。 V_{leader} と ΔV に関する MANOVA の結果は、STR から DIV への遷移と STR の維持に関して (Wilks' $\Lambda = 0.718(F(2, 104) = 9.361), p = 1.828 \times 10^{-4}, \eta^2 = 0.282$), および DIV から STR への遷移と DIV の維持に関して (Wilks' $\Lambda = 0.848(F(2, 108) = 4.632, p = 0.012, \eta^2 = 0.152)$), それぞれ有意な差があることを示された。

しかしながら、 ΔV が 2.0 m/s という比較的大きな値でも、伸長した状態のままだった場合があった (図 5.4A)。この時、部分集団は分離の間際にあり、その次の測定点では分離した状態になったと思われる。また、伸長した配置の状態であっても、部分集団は第 4 章 3 節の“集団の定義”で示されたように別の部分集団として定義されている。従って、

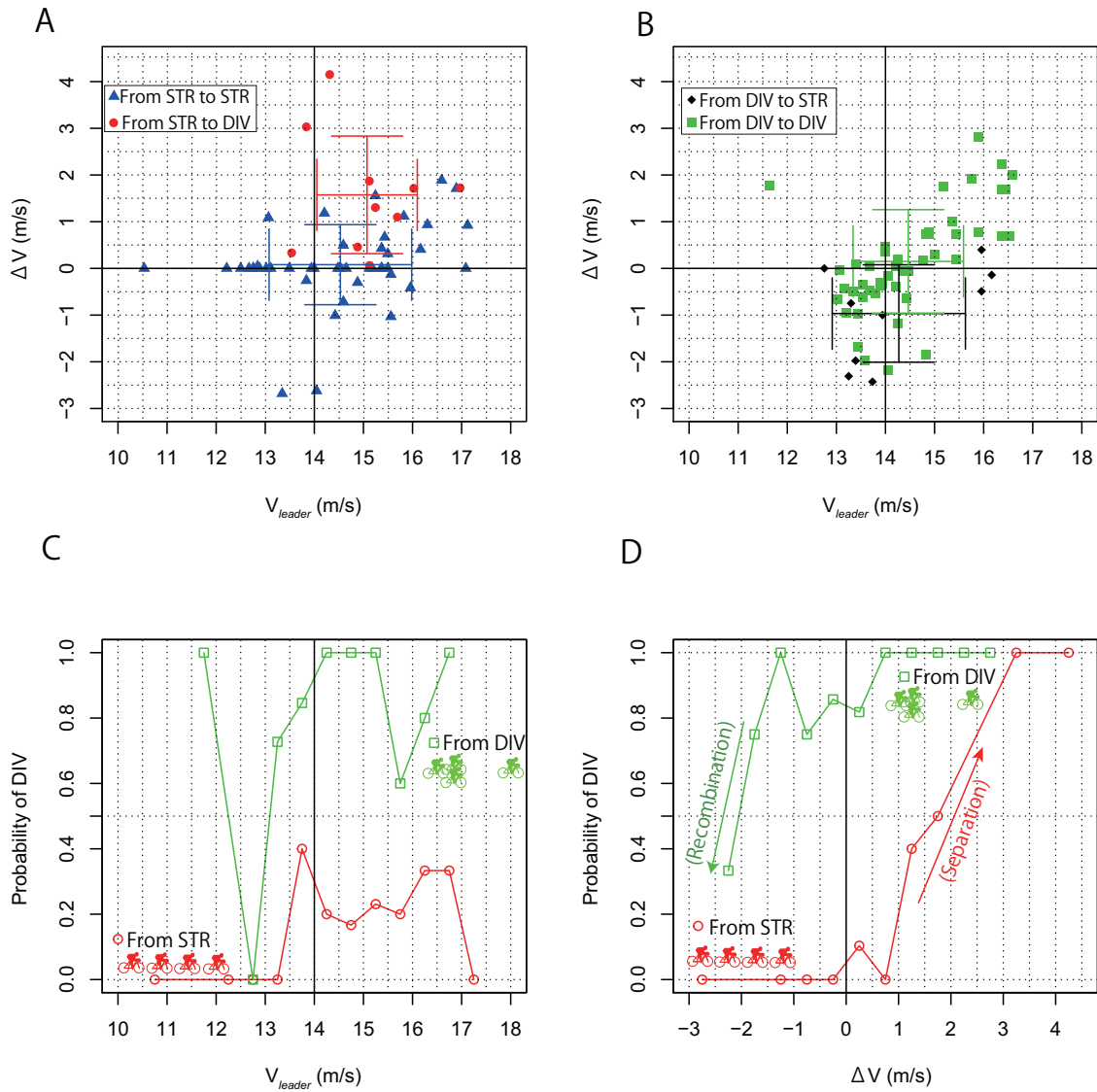


図 5.4 伸長状態 (STR) および分離状態 (DIV) からの遷移における V_{leader} と ΔV の関係. (A) V_{leader} と ΔV (STR 継続 (青) および STR から DIV への遷移 (赤)). (B) V_{leader} と ΔV (DIV 継続 (緑) および DIV から STR への遷移 (黒)). (C) V_{leader} に関する DIV の確率 (STR からの遷移 (赤) および DIV からの遷移 (緑)). (D) ΔV に関する DIV の確率 (STR からの遷移 (赤) および DIV からの遷移 (緑)).

先頭と主集団の間隔は大きな ΔV によって広がったとしても、中間に追走する部分集団のようなものが存在すると、集団全体の配置としては、伸長状態のままであると分類された可能性も考えられる。

図 5.3C と G で示されるように、それぞれ STR から STR と STR から DIV および DIV から DIV と DIV から STR の比較において ΔV は有意な差があったが、特に、図 5.4A で示されるように、STR から DIV への遷移に関して、 V_{leader} と ΔV の両方の分布が異なっていた。以上のことから、 V_{leader} と ΔV の組み合わせが、STR から DIV へ、または DIV から STR へ、といった遷移に関する制御変数であることを示唆する。そして、 V_{leader} と ΔV は単独では制御変数と見なすことはできない。

5.4.4 ポイントレースにおける分離と再結合のヒステリシス

ヒステリシスのような非対称性が、ポイントレースの集団の分離や再結合にみられるであろうという仮説を検証するために、本項では、分離 (STR \rightarrow DIV) と再結合 (DIV \rightarrow STR) における、レース先頭速度とレース先頭と主集団の速度差に関して検討した。

図 5.4C と D は、現在の状態からそれぞれ V_{leader} と ΔV に関して、次に部分集団が分離した状態 (to DIV) となる確率を示したものである。例えば、図 5.4A において、14 m/s 以上 14.5 m/s 未満の範囲には、青の三角のプロットが 4 つ、赤の丸のプロットが 1 つがある。すなわち、この速度の範囲では、伸長した状態からの変化において、次に分離した状態となる割合は 1/5 つまり 0.2 であり、図 5.4C の赤の丸のプロットの 14.25 m/s 値は 0.2 となっている。他方、図 5.4B において、14 m/s 以上 14.5 m/s 未満の範囲は、すべて緑色の四角のプロットである、すなわち、分離した状態からの変化において、この速度の範囲では、次に分離した状態となる割合は 1 であり、図 5.4C の緑の四角のプロッ

トの 14.25 m/s 値は 1 となっている。このように、図 5.4C は、同じ V_{leader} が 14 m/s であっても、次に部分集団が分離した状態 (to DIV) となる確率は、もとの状態が分離 (STR → DIV) と再結合 (DIV → STR) であるかどうかで異なっていることを示す。さらに、図 5.4D も同様なヒステリシスを示す。例えば、次に部分集団が分離した状態 (to DIV) となる確率は、STR から DIV へと、DIV から STR とでは同じ $\Delta V = 1.75$ m/s において異なっている。

これは、 V_{leader} と ΔV の制御変数だけでは分離や再結合の過程を決定されず、その時の集団の状態に依存していることを示している。

5.5 考察

本章は、ポイントレースにおける集団の分離と再結合といった、大域的状態遷移に関する制御変数や分離と再結合に関するヒステリシスについて検討した。

伸長状態や分離状態を含む大域的状態における制御変数候補の分析において、レース先頭速度 (V_{leader}) は、伸長状態と分離状態で他の状態より高かった (図 5.1A)。集団が伸長し分離するような状況においては、最大維持可能出力 (MSO) を発揮することによって維持可能な速度に近いレース先頭速度になっていたと考えられる。Trenchard et al. (2014) によると、自転車競技における集団の分離は、ドラフティング状態にあっても後続の選手が前の選手が設定するペースを維持できない場合に発生する。従って、集団の伸長と分離は、後続選手の MSO に至るレース速度の上昇の結果生じる。レース先頭選手と主集団の時間差 ΔT は、4 つの大域的状態が密の状態から伸長し分離し、間隔が大きくなるといった状態が変化するのに従って大きくなっていった。これは先頭と主集団の時間差が、大域的配置の状態に対応した秩序変数と見なすことができることを示唆している。

分離と再結合に着目すると、レース先頭速度と主集団の速度との速度差 (ΔV) は有意な差が認められた。すなわち、集団全体の状態が変わらなかった時と、状態が伸長した状態から分離した状態、または分離した状態から伸長した状態へ再結合をした場合で有意な差が認められた (図 5.3C, G)。しかしながら、レース先頭速度は、分離と再結合において有意な差は認められなかった (図 5.3A, E)。つまり、レース先頭と主集団の速度差は、レース先頭の速度と主集団の速度の相対的な関係を示している。

レース先頭速度と主集団の速度の関係を調べるために、本章では、レース先頭速度と、レース先頭速度と主集団速度の速度差に着目して、集団が分離する場合、集団が伸長状態のままである時、集団が再結合する時、そして集団が分離したままの状態の 4 つのケースについて調べた。集団が分離する時、レース先頭の速度は高く、速度差は正である傾向が高かった。すなわち、状態が伸長したままで分離しなかった場合と比較して、レース先頭は主集団より速くなる傾向があった。これは、集団が分離することに関して、速度差を大きくするために、速度を上げることが必要であることを示唆する。逃げの速度が、後続選手の能力にとって、維持可能な速度よりも低い場合、選手がアタックをして集団から逃げることは挑戦的である。なぜなら、後方の選手は逃げた選手を追走して、生じたギャップを縮める余力があるからである。14 m/s、またはそれ以上に加速し集団から逃げるためには、少なくとも速度差にして 1.0 m/s かそれ以上必要である (図 5.4A)。即ち集団から抜け出すためには、アタックした選手は、後方の選手たちより 1.0 m/s 速い速度を維持しなければならない。しかしながら、我々の観察したレースは男子エリートレベルであったため、この知見が適用できる範囲は狭いかもしれない。Trenchard et al. (2015) は、自転車競技シミュレーションに 0.0-2.0 m/s の範囲の RAP を導入した。RAP は random acceleration parameter で、鳥の群れのシミュレーションを基にした自転車競技のシミュ

レーション (Trenchard et al., 2014) に、個々の選手のランダムな加速を加えるために加えられた。Trenchard et al. (2015) のシミュレーションにおいて、RAP は比較的低い速度において、選手の追い越しを再現し、かつ RAP は集団が分離するほどの値ではないとされる。これらは、レース先頭速度と、レース先頭と主集団の速度差が、集団の分離と再結合に関して決定的な制御変数であるという第 1 の仮説を部分的に支持するものである。

第 2 の仮説に関して、分離と再結合の遷移にヒステリシスを見出すことができた。Trenchard (2010) は、自転車競技集団のヒステリシスにおいて集団の分離を考慮していない。しかしながら、今回の結果は彼の結果を支持している。例えば、9.5 周から 10 周に至るまで、集団が伸長した集団になった急加速があり、これに続き 10 周から 13 周まで減速があり、この間、集団は伸長した状態を継続した (図 5.2)。これは、Trenchard により特定された、非対称の加速と減速期間を含むヒステリシスを確認したことになる。集団の分離は、レース先頭選手の加速により、主集団との速度差が生じた結果発生する。そして、集団が再結合する場合は、レース先頭と主集団の速度差には有意な差が見られた。これは、すなわち、主集団の前方のレース先頭部分集団より、主集団の方が相対的に速い速度での追走により生じていると考えられる。しかしながら、これらの変数の値が同じであったとしても、常にこれらの分離や再結合が生じるとは限らない (図 5.4D)。すなわち、集団全体の状態は、レース先頭と主集団の速度差によって一意に決まるものではなく、その時の集団の状態、すなわち伸長した状態なのか、分離した状態なのかに依存していた。これは、集団の「分離」と「結合」は、異なるメカニズムで生じていることを示唆している。レース序盤では選手の疲労は少なく、中盤では疲労が始まっているといった違いがある。この要素もヒステリシスに影響すると考えられる。例えば、図 5.5 に示すように、18.5 周における伸長した状態から分離した状態への遷移は、レース先頭選手と主集団の正

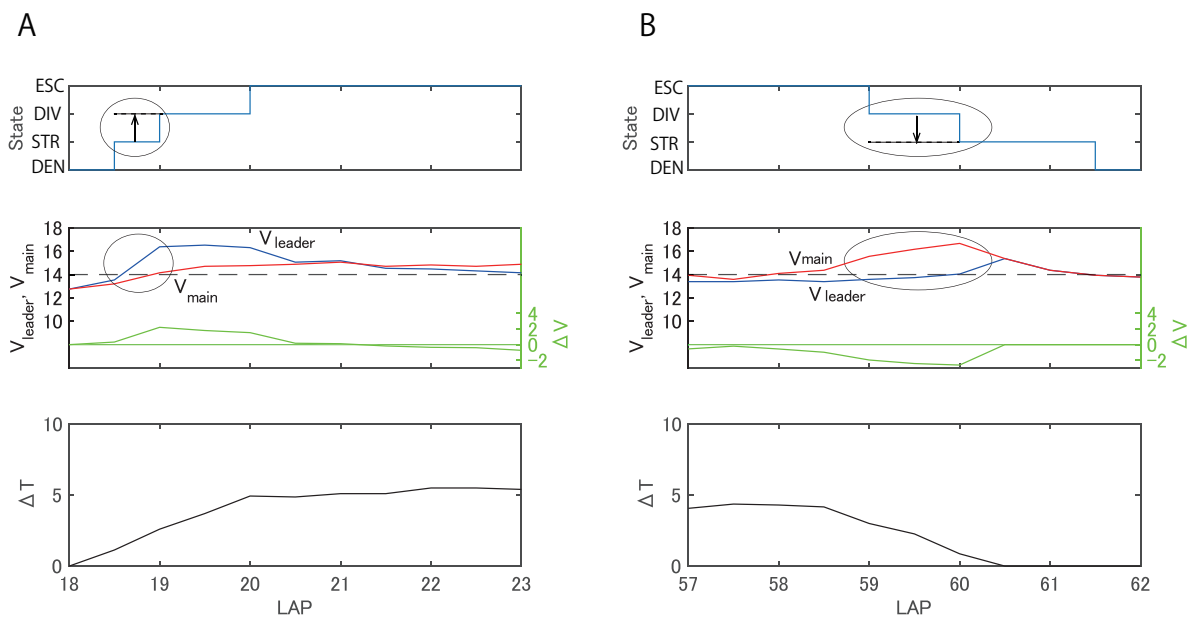


図 5.5 集団の分離と再結合の非対称. A: 集団の分離 (LAP18.5). B: 集団の再結合 (LAP60).

の速度差によって半周で起こっている. 対して, 60 週の再結合は, 部分集団間の間隔が負の速度差によって短くなるが, 1 周で縮まらないほど部分集団間の間隔は大きかったため, 1 周継続したあと, ようやく伸長した状態への遷移が起こった. これは得点を獲得するスプリントに関連し, 状態の遷移はその時の全体集団の状態に依存し, 状態の変化は自己組織的なダイナミクスと競技のルールによるトップダウンの制約の組み合わせによって生じると考えられる.

5.6 結論

ポイントレースにおける集団の分離は, 10 周のスプリント間の後半での得点を獲得する試みにおける利己的な行動の結果生じる. 集団の結合は, スプリント後, 利己的な非協力行動が終了し, スプリント間の 10 周における利他的な協力行動の再開の結果生じる.

体力温存を考慮すると、レース先頭選手は主集団との距離を必要以上に広げる必要はなく、後方の大きな部分集団はレース先頭部分集団との間隔をスプリント時に追いつくことができる程度に広げすぎず、エネルギー消費を抑え体力を回復できる程度に、速度を抑制し、間隔を縮めすぎないようにしていると考えられる。これは、集団が分離したままにする必要な時間差は、レース先頭と主集団の相対的な疲労に依存する。このように時間差をコントロールするために、選手は戦略的な技術と素早く切り替わる競技状況に対応できるように十分な体力を身に着けなければならない。これらは、選手は適切な速度を選び、他の選手と適切な距離を、例えば残り走行距離、スプリントまでの周回数や全体集団の状態が分岐するような局面といった、状況に応じた戦術を選択できる能力が必要である。

本章では、1つのポイントレースだけを取り扱った。今後、本章での結果を確認するため、様々なレースを分析する必要がある。また、計測の正確性も研究の限界の1つである。例えば、速度は、半周 125 m を走破した時間から計算している。しかしながら、選手は左右に動いたり、バンクの上の方へ登ったりして走行距離が異なっているはずである。より精細に速度を測定できる機器を使う必要がある。そして、選手は瞬時の判断を要求されるため、選手の動きをより解像度が高く捉えられるような計測系により分析することが今後の課題である。

第6章

総合考察

6.1 本論文のまとめ

本論文では、ヒトのヒトらしさの一つは、集団となって関係の強くない人とも協力することであるという立場に立ち、空気抵抗による制約から利他的な行動と利己的な行動を繰り返す集団スタートの自転車競技の1種目であるポイントレースを題材として、そこで生じる集団動態について検討した。その結果、集団の離合集散を繰り返す選手達は、前を走る選手の直後に位置することで、空気抵抗を低減するドラフティングの効果に対応した部分集団を形成していた。選手全体の集団のダイナミクスを、レース先頭と最も人数の多い部分集団である主集団について着目し、集団の分離と結合はその速度差に影響を受けるが、その時の状態に依存したヒステリシスを示す非対称性があることが分かった。

第1章では、人文系科学、社会系科学、理・工学系といった様々な領域で行われてきている集団に関する研究について概観した。社会学では、集団は様々な分類をされているが、集団が分業や役割といった目的のために分かれることを示した。また、動物行動学や

進化生物学における知見から、ヒトの協力について、関係の浅い他者と行われる特殊性と、それが実現する互恵性について記述した。他方、動物などで見られる大規模な群れに関する研究を概観し、各個体間の相互作用の単純な規則により、大規模な群れの運動が自己組織的に生起することに着目した研究や、群れ全体の観察から各個体の振る舞いについて調べる研究から、全体のみや個のみでなく、全体と個や全体と部分について調べる必要があると考えた。さらに、人間の群衆や人間同士の競争であるスポーツにおける集団や対人間の相互作用に関する研究を概観すると、研究の多くは、あらかじめ決まった敵と味方の間の攻防のダイナミクスや、いかにチームを構築するかに関してであった。そして、競争相手との協調があり、駆け引きの結果、複雑な展開が見られる自転車競技を研究対象として着目し、その先行研究を概観した。その結果、自転車競技の研究において集団が分かれ、大きく離れた状態になって再び合流するような現象を捉え、分析するような研究はなかった。そこで、自転車競技における離合集散ダイナミクスを、協力的な行動と利己的な行動を繰り返すことが想定されるポイントレースを題材にし検討することとした。そして、第2章で、本論文の目的を以下のように整理し、記述した。(1) ポイントレースにおける選手全体の集団の大域的な秩序を定量化することによって、大域的な配置状態を同定し、その推移を明らかにする。(2) ポイントレース中における個人間の関係を分析し、その結果をもとにポイントレース中に生じる部分集団を定義する。(3) 部分集団の特性値を示す変数と大域的な秩序変化との関係を調べ、ポイントレースの集団動態のメカニズムについて明らかにする。

第3章では、両センターラインを通過する選手を撮影し、3つのポイントレースを分析した。自転車競技の全体集団の大域的秩序を定量化するために、顔認識等で用いられてきた主成分分析を適用し、選手の配置の特徴を抽出した。その結果、第1主成分は集団の分

離といった選手の配置の偏りを説明し、第 2 主成分は多くの選手が位置する領域の密度を説明すると考えられた。そこで、横軸に第 1 主成分、縦軸に第 2 主成分を取り、その 4 つの象限により、集団の状態を以下の 4 つの状態に分類した。4 つの状態は、第 3 象限が 1 つの密集した配置の状態、第 2 象限が伸長した配置の状態、第 1 象限が分離した配置の状態、そして第 4 象限が逃げが密集した集団から大きく離れた状態にそれぞれ対応する。定義した状態に対し、半周ごとの状態遷移確率を算出した。その結果、同じ状態を繰り返す場合が最も多かった。状態が遷移する場合は、象限 3 と 4 を遷移する場合を除き、1 つ隣の象限に対応する状態へ遷移することが分かった。これは、第 3 象限の 1 つの密集した状態、第 2 象限の伸長した状態、第 1 象限の分離した状態、第 4 象限の逃げが密集した集団から大きく離れた状態の 4 つの状態間を順番に遷移することを示していた。このように、半周ごとの状態遷移をたどりながら、離合集散を繰り返すことが分かった。4 つの状態の中で、逃げが密集した集団から大きく離れた状態における再帰確率が最も大きく、1 度大きく離れた集団を再結合することは簡単ではないことが示された。また、3 つのレースを含めたスプリント間の 10 周を 4 等分し、それぞれの区間での状態遷移確率を計算した。その結果、10 周のうち、前半と後半とでは伸長した状態と分離した状態の間での状態遷移が、分離した状態の方に遷移する傾向が高くなる、すなわち、集団が分離する傾向が高くなることを示している。そして、逃げが密集した集団から大きく離れた状態は最後の 1/4 の区間において最も頻度が多かった。これは、ポイントが 10 周ごとのスプリントで得られるというポイントレースのルールによって、後半に向けてポイントを取る選手たちの利己的行動が現れた結果だと考えられる。また 10 周の最後の 1/4 は、次の 10 周の最初の 1/4 とつながっているため、スプリントが終了した後、集団内での秩序が再構築されていると考えられる。これは Tuckman (1965) の集団の発達、形成 - 波乱 - 規律成立 - 課題

遂行 - 離散の過程と類似していた。

第 4 章では、第 3 章でポイントレースの大域的な全体集団の秩序を明らかにしたのに対し、集団内で生じるサブグループ、部分集団について分析した。自転車競技において選手達は、ドラフティングによって空気抵抗を減らすために集団を形成する。そこで、ドラフティングに基づいた集団について検討した。Olds (1998) は、選手がドラフティングによって得られる空気抵抗の低減率を、選手間の間隔に関する式で表した。その式によると、3 m でドラフティングの効果が得られなくなる。そこで、直前の選手との距離 3 m を基準に同じ部分集団に属するかどうかを判別した。各選手の直前選手について分析した結果、90% 以上において 3 m 以内のドラフティングの効果が得られる範囲内であることが分かった。また、その範囲内で距離の頻度を分析すると、距離が離れるのに従って頻度が少なくなり、Olds (1998) の車輪間隔とドラフティング効果の関係式と対応していた。従って、選手達はドラフティングに基づき、集団を形成していることが確かめられた。このように定義した部分集団の中で最も人数の多い集団を主集団とし、先頭部分集団と主集団との間の時間差や距離について分析し、10 周のスプリント間で 4 つの展開があることが分かった。それらは、スプリントの前に集団が分離しスプリントが行われる展開、逃げ集団が形成され逃げ切りが成功する展開、逃げ集団が形成されるも主集団に追走され逃げが成功しない展開、主集団の先頭選手がスプリント周回を迎える展開の 4 つであった。このように、個々の選手の他の選手とどのような距離をとるかという駆け引きの様子が明らかにできたと考えられる。

第 5 章では、第 3 章で定義した全体集団の状態遷移を引き起こす制御変数として、第 4 章で定義した部分集団の変数（レース先頭の数、主集団の数、レース先頭と主集団の速度差および時間差）を用いて、ポイントレースにおける集団の離合集散ダイナミクス

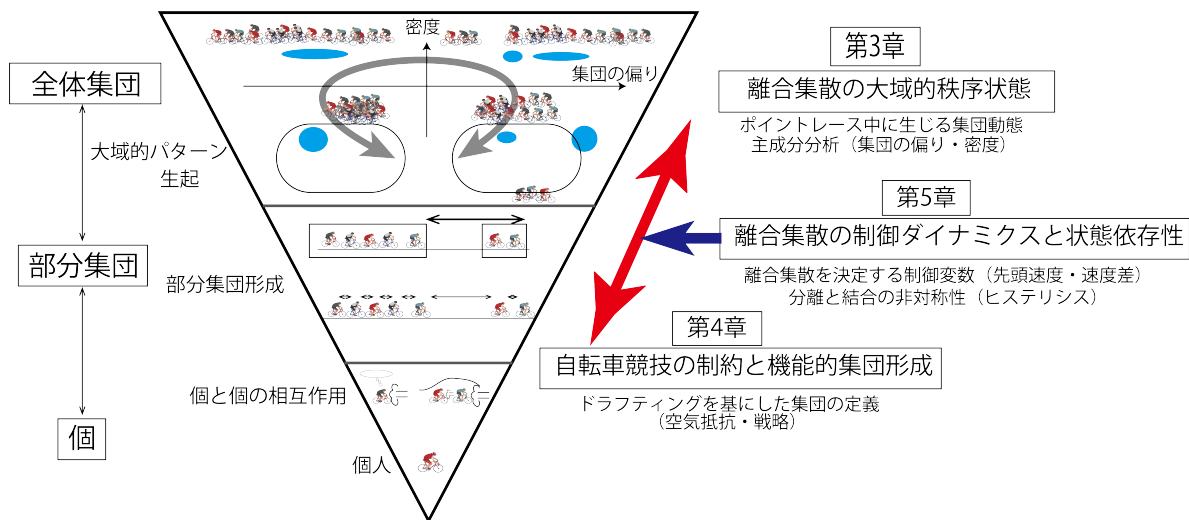


図 6.1 本論文の概要図

を明らかにした。全体集団が分離または結合する場合と、状態が変化しなかった場合とでは、レース先頭のと主集団との速度差に有意な差があった。他方、レース先頭速度およびレース先頭と主集団の速度差の関係を、集団が分離または結合する場合と遷移しなかった場合とについて、多変量分散分析によって比較した結果、有意な差が見られた。これは、全体集団が分離する場合では、結合する場合と比較して、速度差とともに、レース先頭速度も高い傾向があった。さらに、全体集団が、分離する場合と結合する場合では、同じレース先頭速度およびレース先頭と主集団の速度差であっても、全体集団が分離している確率が異なっていた。つまり、全体集団の分離と結合の過程は非対称であり、その時の状態に依存するヒステリシスが見られた。

本論文の概要をまとめると図 6.1 のようになる。第 3 章において、ポイントレース全体の集団の大域的な配置の特徴を抽出した。第 4 章では、ポイントレースの中で形成される部分集団について、ドラフティングを基に定義し、第 5 章でその両者の間を関連付ける離合集散のダイナミクスについて検討した。

6.2 結言

ポイントレースの集団は離合集散を繰り返し、部分集団への分離と結合には、速度差が影響し、ヒステリシスがあることが分かった。集団の分離には、先頭の加速によって後続を振り切る必要があるが、ドラフティングの効果で追従に必要なパワーは先頭を引っ張るパワーより少なくすむため、伸長した状態を経由し、分離するためにはさらに大きな努力が必要である。離れかけた集団は、前車との距離が遠くなればなるほどドラフティングの効果は得られなくなり、体力を使って集団を再び結合させるより、協力して体力を温存しながら開いた差を維持する規律ができたのだと考えられる。その結果、一度分離した部分集団は、その状態で安定し、容易に結合されない。そして、ポイントレースの10周ごとにポイントを獲得する機会があるというルールのため、スプリント周回が近づくという外的な環境の変化により、集団は協力的な行動から利己的な行動へ変化する。さらに、分離した部分集団間の距離は、近づけば近づくほどドラフティング効果が得られ、近づいた集団は再び結合する。集団を大きく分離させないためには、離れようとする他者と近い距離を維持し続ける必要がある。そして、再び結合するためには、残された個体同士で協力して大きく離されすぎないように追従しなければならない。

また本論文では、ポイントレースにおいて、部分集団に分かれた集団のダイナミクスについて分析した。集団の状態遷移確率の分析では、スプリント間の10周の前半と後半を比較して、後半の方が分離した状態である傾向が高かった(図3.4B)。また、部分集団間の距離の分析では、120周のうち30周が終了した後、逃げが形成される展開が生じ、また中間の60~80周はほぼ一団で進み、90周からはまた再び逃げが形成されるような展開となった(図4.10A)。柿木(2012)は自転車競技のトレーニングにおいて、パワーメー

ターの進歩により、従来の心拍数による管理から、発揮パワーによってトレーニング強度を定量化してトレーニングを行う手法が可能になってきていることを述べた。さらに、実際のレース中に選手が発揮したパワーを記録することで、実戦において想定されるパワーを考慮してトレーニングをすることが重要であり、特に、自転車競技の環境が大きく日本とは異なる、競技の本場ともいえるヨーロッパなど世界で競うために重要であると述べている。そのような観点から、本論文で明らかになったように、レースがある程度進行し、疲労が始まってからの独走による逃げを想定し、14 m/s を維持できるようなトレーニングが有効であると考えられる。日本国内のエリートレベルにおいて、この辺りの速度が、維持可能な発揮出力によって単独で走行できる速度であり、ローテーションを行いドラフティングをすることで体力を温存でき、また最大維持可能出力 (MSO) が低い選手にとってはローテーションに参加せずに集団に追従することができる速度であると推測されるが、今後の検証が必要である。

本論文で観察したポイントレースでは、得点を獲得することができるスプリントを繰り返す中で、選手達の利己的な行動と利他的な行動によって集団が離合集散していた。集団のダイナミクスについて分析した R120 のレースでは、逃げが形成される展開になった 6 回のうち、5 回が単独選手による逃げで、1 回が複数名 (2 名) の逃げであった。この中で、唯一、複数人の逃げが成功したケースでは、逃げと主集団の距離が最も離れており (図 4.10A)、協力により先頭の負荷を分担することの効果を示していると考えられる。また、単独選手による逃げが 5 回と多かったのは、主集団に残る選手達が、複数人で構成された逃げと比較して主集団から大きく離れることは難しいと考え、逃げを容認した可能性がある。事実、5 回の単独選手による逃げのうち、2 回は主集団が最終的には逃げに追いつき、結果的に、逃げは成功していない。しかしながら、残る 3 回は、主集団の選手が、

スプリント前に逃げに追い付くために体力を消耗しすぎてしまうことを懸念して、結果的に逃げの成功につながってしまったと考えられる。

そして、ポイントレースにおける、離合集散の特徴として、スプリント間の10周間の前半と後半で集団全体がどの状態であるかの傾向が異なった。これは、スプリントにおいて得点を獲得するための行動と、スプリント周回が終了した後に、次のスプリントに向けた集団全体の秩序が再び整えられるためであると考えられる。ここでは Tuckman (1965) の集団発達の過程のように、混沌とした波乱の状態から、部分集団に分かれ、それぞれの集団がローテーションによる規律によって安定し、ポイント獲得や体力温存といった課題遂行に向かい、集団間の間隔が保たれ、全体の秩序が安定すると考えられる。ローテーションによる協力を継続するには、自らが風を受ける先頭に立つことを示すことが重要である。それによって、他者の同調を促し、ローテーションを行う規範によって協力しあう集団が成立する。この他者のために風除けとなるという、互恵的な利他行動が集団の協調には重要である。他方、ミナミコメツキガニが、一匹では水に入らない個体が群れになると一斉に川を渡り出すのは、受動的能動によって水に入った個体の存在のためであった (Gunji et al., 2011)。しかしながら、このような利他的な行動を意図的に行うことができるのがヒトの特筆すべき特徴であろう。いじめ、気候変動、貧富の差や世界情勢に至るまで、世界には人が集まって行動することによってもたらされる問題が多くある。それらの解決には、自ら率先して矢面に立つリーダーたる行動が必要であるが、他方、リーダー足り得なくても良きフォロワーとして、利他的な行動をつなぎ、また次のフォロワーへつなぐことの大切さを示唆しているだろう。

本論文では、3つのポイントレースを分析し、選手の大域的配置の特徴を抽出した。部分集団に関してはそのうちの1つのレースについて検討した。分析したレース数も少な

く、また、ポイントレースという限定された自転車競技におけるサンプルであり、より自転車競技全般に普遍的またヒトの性質として一般化されるには、より多くのレースを調査し分析する必要があるであろう。その為にも、現在の測定系から自動的に選手を区別し記録する手法を開発する必要がある。この課題は、もう一つの課題である、測定の解像度についても関連する。本論文では、計測は半周に1度であり、その間に起こった現象を捉えることができない。逃げ集団の形成の成功と失敗は分岐現象と考えられ、その瞬間に潜むメカニズムは新たなヒトの行動に関する知識を与えてくれるかもしれない。

さらに本論文は、ポイントレースを外部から撮影し分析したものである。そこで生じた現象は、選手の意思決定による行動の結果である。しかしながら、本論文では選手達が競技中に実際にどのように考えているかについて取り込んでいない。集団に関する先行研究で行われているように、自転車競技における集団ダイナミクスを数理モデル化し、シミュレーションによる再現によって得られた知見をヒトの意思決定や行動と関連付けることで、本論文で得られた知見を社会へ実装できる可能性がある。

付記

本論文に関する主要学術論文は以下のとおりである。

第3章

“State transitions among groups of cyclists in cycling points races”, *European Journal of Sport Science*. **22(6)**, pp. 790-798, 2022.

第4章

“自転車競技ポイントレース中の集団動態解析の試み”（改訂中）

第5章

“Descriptive parameters and its hysteresis of the group separation and recombination in bicycle points races: Leader’s velocity and speed difference between leader and main group”, *Applied Sciences*. **13(3)**:1315, 2023.

謝辞

本論文は、まさしく多くの方々のご協力をいただいて書き上げることができた。論文の締めくくりとしてここに感謝の気持ちを述べさせていただきたい。

指導教員である山本裕二先生には、門外漢である私を受け入れ、バックグラウンドの無い私に心理学、スポーツ心理学、運動学習、運動制御やダイナミカルシステムについて導入していただきました。さらに、心理学やスポーツといった領域にとらわれない、幅広い知識を取り込み、本質に迫るための基盤となる様々な分野について学ぶ機会を与えてくださった。また、実験に臨む姿勢に加え学会活動や社会貢献といった目の前の研究にとどまらない精力的なお働きに多大な影響を受けました。ご退職の間際の最後の最後までご心配とご迷惑をおかけしました。ご指導ありがとうございました。

横山慶子先生には、要所要所で研究の方向性に関する的確な助言をしていただきました。同期の院生を含め研究室の生活において多大なサポートをしていただきました。これまで本当にお世話になりました。

竹之内隆志先生、佐々木康先生にも、タイトなスケジュールの中で学位論文を精査し、ご指摘をいただいたことに感謝申し上げます。

毎週の研究会では、筒井清次郎先生、平川武仁先生、長谷川弓子さん、藤井慶輔さん、

向井香瑛さんなどの皆さんと研究に関して議論させていただき、様々な重要なアドバイスをいただきました。運動学習研究会においても木島章文先生、奥村基生先生、平田智秋先生、山田憲政先生といった先生方から有益なご指摘や温かい励ましをいただきました。

同じ時期に研究室に所属していた方々、村瀬大希さん、加納岳拓さん、松下陸君にも感謝の言葉を申し上げたい。特に、同期入学だった高御堂良太君、張点雨さん、工藤璃子さんには多様な背景を持つ皆さんが研究に励む姿を見て大きな刺激を受けました。

先生とお呼びすべき方もいらっしゃるが、お会いした当時の呼び方で記させていただいたことについてはご容赦頂きたい。

南山大学の学生課と体育教育センターの皆様にも、満期退学後、職員として勤務させていただくことで、名古屋大学での研究を継続しながら生活を維持することができたことに感謝申し上げたい。論文投稿や学位論文執筆の期間には無理を聞いていただいた。

そして、本研究に関わっていただいた選手、競技運営団体そして自転車競技に携わる人々に御礼申し上げたい。危険も伴い、また大変厳しい競技に取り組む選手達には尊敬の念を禁じ得ない。この魅力的なスポーツが日本において発展するきっかけに私の研究が少しでも寄与することができていれば幸いです。

2015年4月に他界された、瑞陵高校弓道部で顧問をしていただいた渡部智恵先生には当時のご恩とスポーツ科学に興味を持つきっかけをいただいたことに対してこの場をお借りして感謝申し上げます。

最後に、妻や両親家族には長い間心配をかけ、様々な面でサポートしてくれたことに心からお礼を言いたい。今まで本当にありがとうございました。

2023年3月29日

奥村 文浩

参考文献

- Abbiss, C. R. & Laursen, P. B. (2008). Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Medicine*, **38**, 239–252.
- Amaury Sport Organisation, (2022). Official classification of Tour de France. <https://www.letour.fr/en/rankings>. (2023年2月22日閲覧).
- Andreff, W. (2016). The Tour de France: A success story in spite of competitive imbalance and doping. In D. Van Reeth & D. Larson (Eds.), *The Economics of Professional Road Cycling*, 233–255. Cham: Springer.
- Andrić, D. (1990). *The 200 years of the bicycle*. (古市昭代訳 (1992). 『自転車の歴史：200年の歩み…誕生から未来車へ』. 東京：ベースボール・マガジン社).
- Aoi, S., Katayama, D., Fujiki, S., Tomita, N., Funato, T., Yamashita, T., Senda, K., & Tsuchiya, K. (2013). A stability-based mechanism for hysteresis in the walk-trot transition in quadruped locomotion. *Journal of the Royal Society Interface*, **10**, 20120908.
- Aoki, I. (1982). A simulation study on the schooling mechanism in fish. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, **48**, 1081–1088.
- Ballerini, M., Cabiboo, N., Candelier, R., Cavagna, A., Cisbani, E., Giardina, I., Lecomte, V., Orlandi, A., Parisi, G., Procaccini, A., Viale, M., & Zdravkovic, V. (2008). Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather metric distance: evidence from a field study. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**, 1232–1237.
- Borysewicz, E. (1985). *Bicycle road racing: complete program for training and competition*. Brattleboro, Vt: Velo-News. (中野浩一監訳 小林信也 皆木伸彦 訳 (1994). 『ニュー・スポーツ・トレーニング 3 勝つための自転車レーステクニック』. 東京：並木書房.)
- Bowles, S. & Gintis, H. (2011). *A Cooperative Species*. Princeton, NJ: Princeton University Press. (竹澤正哲 監訳, 大槻久・高橋伸幸・稲葉美里・波多野礼佳 訳 (2017). 『叢書“制度を考える” 協力する種: 制度と心の共進化』. 東京：NTT 出版).
- Cavagna, A., Cimarelli, A., Giardina, I., Parisi, G., Santagati, R., Stefanini, F., & Viale, M. (2010). Scale-free correlations in starling flocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107**, 11865–11870.
- Chau, T. (2001). A review of analytical techniques for gait data. Part 1: fuzzy, statistical and fractal methods. *Gait & Posture*, **13**, 49–66.
- Couzin, I. D., Krause, J., James, R., Ruxton, G. D., & Franks, N. R. (2002). Collective memory and spatial sorting in animal groups. *Journal of Theoretical Biology*, **218**, 1–11.
- Couzin, I. (2009). Collective cognition in animal groups. *Trends in Cognitive Sciences*, **13**, 36–43.
- Daffertshofer, A., Lamoth, C. J., Meijer, O. G., & Beek, P. J. (2004). PCA in studying coordination and variability: a tutorial. *Clinical Biomechanics*, **19**, 415–428.
- De Quervain, D. J.-F., Fischbacher, U., Treyer, V., Schellhammer, M., Schnyder, U., Buck, A., & Fehr, E. (2004). The neural basis of altruistic punishment. *Science*, **305**, 1254–1258.
- Deutsch, M. (1949). A theory of co-operation and competition. *Human Relations*, **2**, 129–152.
- Duarte, R., Araújo, D., Correia, V., & Davids, K. (2012). Sports teams as superorganisms: Implications of sociobiological models of behaviour for research and practice in team

- sports performance analysis. *Sports Medicine*, **42**, 633–642.
- Dwyer, D. B., Ofoghi, B., Huntsman, E., Rossitto, D., McMahon, C., & Zeleznikow, J. (2013). The elimination race in track cycling: patterns and predictors of performance. *Journal of Science and Cycling*, **2** (2), 6–12.
- Federolf, P., Boyer, K., & Andriacchi, T. (2013). Application of principal component analysis in clinical gait research: identification of systematic differences between healthy and medial knee-osteoarthritic gait. *Journal of Biomechanics*, **46**, 2173–2178.
- Forner-Cordero, A., Levin, O., Li, Y., & Swinnen, S. P. (2005). Principal component analysis of complex multijoint coordinative movements. *Biological Cybernetics*, **93**, 63–78.
- 郡司 ベギオ-幸夫 (2013). 『群れは意識をもつ：個の自由と集団の秩序』. 東京: PHP 研究所.
- Gunji, Y.-P., Yuta, N., & Adamatzky, A. (2011). Robust soldier crab ball gate. *Complex Systems*, **20**, 94–104.
- Haken, H., Kelso, J. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, **51**, 347–356.
- Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A., & Werner, T. (2005). Self-organized pedestrian crowd dynamics: experiments, simulations, and design solutions. *Transportation Science*, **39**, 1–24.
- Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, **407**, 487–490.
- Hettinga, F. J., Konings, M. J., & Pepping, G.-J. (2017). The science of racing against opponents: affordance competition and the regulation of exercise intensity in head-to-head competition. *Frontiers in Physiology*, **8**, 118.
- Hoeningman, R., Bradley, E., & Lim, A. (2011). Cooperation in bike racing—When to work together and when to go it alone. *Complexity*, **17**, 39–44.
- International Olympic Committee, (2023). History of Cycling Track. <https://olympics.com/en/sports/cycling-track/>. (2023 年 2 月 22 日閲覧).
- 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.
- 柿木 克之 (2012). 『自転車競技のためのフィロソフィー：自転車競技のためのトレーニングを根本から変える』. 東京: ベースボールマガジン社.
- Kataoka, Y. & Gray, P. (2019). Real-time power performance prediction in Tour de France. In U. Brefeld, J. Davis, & J. Van Haaren (Eds.), *Machine Learning and Data Mining for Sports Analytics. MLSA 2018. Lecture Notes in Computer Science*, 121–130. Cham: Springer.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology*, **246**, R1000–R1004.
- Kijima, A., Yokoyama, K., Shima, H., & Yamamoto, Y. (2014). Emergence of self-similarity in football dynamics. *The European Physical Journal B*, **87**, 41.
- 木下 謙治 (2003). 『社会学：基礎概念と射程』. 福岡: 九州大学出版会.
- Konings, M. J., Noorbergen, O. S., Parry, D., & Hettinga, F. J. (2016). Pacing behavior and tactical positioning in 1500-m short-track speed skating. *International Journal of Sports*

- Physiology and Performance*, **11**, 122–129.
- 釘原直樹 (2011). 『グループ・ダイナミックス: 集団と群集の心理学』. 東京: 有斐閣.
- Kyle, C. R. (1979). Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners travelling in groups. *Ergonomics*, **22**, 387–397.
- Laland, K. (2017). *Darwin's Unfinished Symphony: How Culture Made the Human Mind*. Princeton, NJ: Princeton University Press. (豊川航訳 (2023). 『人間性の進化的起源: なぜヒトだけが複雑な文化を創造できたのか』. 東京: 勁草書房).
- Latané, B., Williams, K., & Harkins, S. (1979). Many hands make light the work: The causes and consequences of social loafing. *Journal of Personality and Social Psychology*, **37**, 822–832.
- Mignot, J. F. (2016). Strategic behavior in road cycling competitions. In D. Van Reeth & D. Larson (Eds.), *The Economics of Professional Road Cycling*, p. 207–231. Cham: Springer.
- Moffatt, J., Scarf, P., Passfield, L., McHale, I. G., & Zhang, K. (2014). To lead or not to lead: analysis of the sprint in track cycling. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, **10**, 161–172.
- Murakami, H., Feliciani, C., Nishiyama, Y., & Nishinari, K. (2021). Mutual anticipation can contribute to self-organization in human crowds. *Science Advances*, **7**, eabe7758.
- 日本自転車競技連盟 (2022). 2022 年版 日本自転車競技連盟競技規則集. https://jcf.or.jp/wp2012/wp-content/uploads/downloads/2022/10/JCF_Rule_2022_draft_modified_0930.pdf. (2023 年 2 月 22 日閲覧).
- 日本陸上競技連盟 (2022). 『陸上競技ルールブック 2022 年度版』. 東京: ベースボール・マガジン社.
- Ofoghi, B., Zeleznikow, J., Dwyer, D., & Macmahon, C. (2013). Modelling and analysing track cycling Omnium performances using statistical and machine learning techniques. *Journal of Sports Sciences*, **31**, 954–962.
- Olds, T. (1998). The mathematics of breaking away and chasing in cycling. *European Journal of Applied Physiology*, **77**, 492–497.
- Padilla, S., Mujika, I., Cuesta, G., & Goiriena, J. J. (1999). Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, **31**, 878–885.
- Phillips, K. E. & Hopkins, W. G. (2020). Determinants of cycling performance: a review of the dimensions and features regulating performance in elite cycling competitions. *Sports Medicine-Open*, **6**, 1–18.
- R Core Team, (2022). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Reeve, H. K. & Hölldobler, B. (2007). The emergence of a superorganism through intergroup competition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 9736–9740.
- Rein, R. (2012). Measurement methods to analyze changes in coordination during motor learning from a non-linear perspective. *The Open Sports Sciences Journal*, **5**, 36–48.
- Renfree, A., Crivoi do Carmo, E., Martin, L., & Peters, D. M. (2015). The influence of collective behavior on pacing in endurance competitions. *Frontiers in Physiology*, **6**, 373.

- Reynolds, C. W. (1987). Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, **21** (4), 25–34.
- Rietkerk, M., Dekker, S., de Ruiter, P., & van de Koppel, J. (2004). Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems. *Science*, **305**, 1926–1929.
- Rio, K. W. & Warren, W. H. (2016). Interpersonal coordination in biological systems: the emergence of collective locomotion. In P. Passos, K. Davids, & J. Y. Chow. (Eds.), *Interpersonal Coordination and Performance in Social Systems*, 3–16. Milton Park, Abingdon, Oxon: Routledge.
- Saber, R. O. (2006). Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **51**, 401–420.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J., Folke, C., & Walker, B. J. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, **413**, 591–596.
- Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **16**, 227–247.
- 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. 『スポーツパフォーマンス研究』, **2**, 259–270.
- 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与える空気力学的な影響. 『体育学研究』, **64**, 637–645.
- Sørensen, V., Ingvaldsen, R. P., & Whiting, H. T. A. (2001). The application of co-ordination dynamics to the analysis of discrete movements using table-tennis as a paradigm skill. *Biological Cybernetics*, **85**, 27–38.
- Trenchard, H. (2010). Hysteresis in competitive bicycle pelotons. *2010 AAAI Fall Symposium Series: Complex Adaptive Systems*, 130–137. Arlington, VA, USA:
- Trenchard, H., Ratamero, E., Richardson, A., & Perc, M. (2015). A deceleration model for bicycle peloton dynamics and group sorting. *Applied Mathematics and Computation*, **251**, 24–34.
- Trenchard, H., Richardson, A., Ratamero, E., & Perc, M. (2014). Collective behavior and the identification of phases in bicycle pelotons. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **405**, 92–103.
- Trenchard, H. (2013). Peloton phase oscillations. *Chaos, Solitons & Fractals*, **56**, 194–201.
- Triplet, N. (1898). The dynamogenic factors in pacemaking and competition. *The American Journal of Psychology*, **9**, 507–533.
- Tuckman, B. W. (1965). Developmental sequence in small groups. *Psychological Bulletin*, **63**, 384–399.
- Tuckman, B. W. & Jensen, M. A. C. (1977). Stages of small-group development revisited. *Group & Organization Studies*, **2**, 419–427.
- Turk, M. & Pentland, A. (1991). Eigenfaces for recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **3**, 71–86.
- Vicsek, T., Czirók, A., Ben-Jacob, E., Cohen, I., & Shochet, O. (1995). Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles. *Physical Review Letter*, **75**, 1226–1229.

- Vicsek, T. & Zafeiris, A. (2012). Collective motion. *Physics Reports*, **517**, 71–140.
- Yamamoto, Y. & Gohara, K. (2000). Continuous hitting movements modeled from the perspective of dynamical systems with temporal input. *Human Movement Science*, **19**, 341–371.
- Yamamoto, Y., Yokoyama, K., Okumura, M., Kijima, A., Kadota, K., & Gohara, K. (2013). Joint action syntax in Japanese martial arts. *PloS ONE*, **8**, e72436.
- Yokoyama, K. & Yamamoto, Y. (2011). Three people can synchronize as coupled oscillators during sports activities. *PLoS Computational Biology*, **7**, e1002181.