

チームワークに必要な「見えない力」を確認 ～3者連携の数理モデルと練習道具の開発～

名古屋大学総合保健体育科学センターの横山 慶子講師、山本 裕二教授は、山梨大学の島 弘幸准教授、理化学研究所の藤井 慶輔研究員、ミズノ株式会社の田淵規之博士との共同研究で、洗練されたチームワークにみられる連携した動きを社会行動の数理モデル（Social force model）で再現することに成功しました。

社会行動の数理モデルは、環境や他者から個人に働く「見えない力」を定式化したもので、これまで主に、避難行動のシミュレーションなどで用いられていました。本研究ではこのモデルが、チームワークの再現にも応用できると考え、サッカーの3対1 ボール保持課題を行う3者のチームワークを題材として、「空間力」、「回避力」、「協調力」といった3種類の「見えない力」を仮定しました。その結果、洗練されたチームワークにみられる3者の連携した動きが再現できました。このことは、チームワークを上手く機能させるためには、3種類の「見えない力」を敏感に察知して行動に移す必要があることを示唆しています。また、「協調力」の一部を張力によって物理的にサポートする道具として、3者のプレイヤーをゴムバンドで繋ぐ練習道具を開発し、実験的に検証した結果、上級者に類似した動きが確認されました。今後、社会行動の数理モデルが、さらに複雑なチームの振る舞いの理解に応用されることが期待されます。

この研究成果は、平成30年2月20日日付(米国東部時間)米国科学雑誌「Physical Review E」オンライン版に掲載されました。

この研究は、科学研究費補助金の若手研究(B)『連携技能の制御・学習を支援する練習道具』、基盤研究(B)『環境の幾何学条件に応じた役割切替え能力の発達』、基盤研究(A)『競創ダイナミクスの統合的理解』の支援のもとで行われたものです。

【ポイント】

1. 社会行動の数理モデルを用いて、サッカーの3対1ボール保持課題における3者の連携した動きを再現しました。
2. 洗練されたチームワークを発揮するためには、個人が以下の3種類の「見えない力」を察知して動くことが必要であることが明らかになりました。
 - ◇ 空間力：プレイエリア内の自身の位置を察知して空間に留まる力
 - ◇ 回避力：相手プレイヤーとの相対的な位置関係を察知して相手から遠ざかる力
 - ◇ 協調力：チームの仲間との相対的な位置関係を察知して調整する力
3. 「見えない力」のうち、「協調力」の一部を物理的に再現する道具として、チームの3者のプレイヤーをゴムバンドで繋ぐ練習道具を開発しました。

【研究背景と内容】

優れたチームは、必ずしも優れた能力を持つ個人の集まりとは限りません。チームワークが上手く機能すれば、個人の能力の総和以上のパフォーマンスが発揮できる場合もありますが、上手く機能しない場合は、その逆もありえるため、その仕組みを理解することは重要といえます。しかしながら、チームワークとは、チームが置かれている環境やメンバー間の関係性などの複合的な要因によって変化するものと考えられるため、チームのために個人がどのように振る舞うべきかを検証することは難しいものでした。そこで本研究では、個人に働く「見えない力」を定式化する、社会行動の数理モデル（Social force model）に注目しました。このモデルでは、例えば混雑した人混みにおいて、個々の歩行者が他の歩行者や障害物との衝突を回避する際に働く「見えない力」を定式化することで、群集の避難行動のシミュレーションなどに応用されており、チームワークで必要な「見えない力」が整理できるのではないかと考えたためです。また、本研究では、スポーツを題材としました。これは、スポーツにはある一定のルールが存在し、そのルールのもとでトレーニングされたプレイヤーの「動き」が観察できるため、洗練されたチームワークとそれを支える個人の振舞いを実験的に検証するのに格好の題材と考えられたためです。

こうした背景のもと、本研究では、洗練されたチームワークを社会行動の数理モデルで再現することを目的としました。具体的な研究の対象は、サッカーの連携技能を高めるための練習として知られている3対1ボール保持課題としました。この課題のルールは、ある限られたプレイエリア（本研究では、6mの正方形領域）からボールが出ない範囲で、3人の攻撃側チームが、1人の守備側プレイヤーにボールを奪われないように、出来るだけ多くのパスを繋ぐというものです。我々は過去の研究において、上級者と初心者の連携の違いが3者を結ぶ三角形の角度変化の同期モードの違いであることを確かめており（Yokoyama & Yamamoto, PLoS Comp. Biol., 2011）、モデルによって再現したチームワークをこの同期モードを用いて評価することとしました。

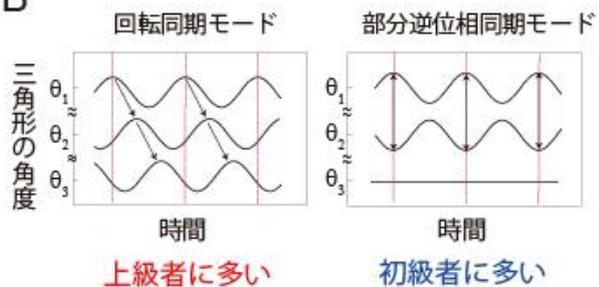
A

3対1ボール保持課題



図1 A 3対1ボール保持課題

B



B 3者を結ぶ三角形の3つの角度変化にみられる同期パターン（左：上級者に多い同期モード、右：初級者に多い同期モード）

モデルを定義するための準備として、課題における攻撃側プレイヤーの役割を定義しました。具体的には、パスをするプレイヤーをパッサー、パスを受け取るプレイヤーをレシーバー、パスに関係なく動く必要のあるプレイヤーをムーバーとして、これらの役割が、レシーバーがパスを受け取った時点で、ランダムに切り替わることとしました。また、問題を単純にするために、レシーバーはボールを保持せずにダイレクトでパスをすること、守備側のプレイヤーは予測能力を持たずにボールだけを追いかけること、ボールがプレイエリアの外に出た場合や守備側プレイヤーがボールに追いついた場合でも課題を続けることとしました。なお、パスの方向やパスの時間間隔、ディフェンダーの動く速さなどは、実験データに基づいて定義しました。

次に、3種類の「見えない力」を定義しました。1つ目は、プレイエリア内の自身の位置を察知して空間に留まる力、すなわち「空間力」です。これは、プレイエリアの中心からある程度、離れた場合に、中心から遠ければ遠いほどプレイエリアの中心へと強い力で引き戻される力が働くこととしました（図2左）。2つ目は、相手プレイヤーとの相対的な位置関係を察知して相手から遠ざかる力、すなわち「回避力」です。これは、守備側プレイヤーが接近すればするほど、強い力で離れる力が働くこととしました（図2中）。3つ目は、チームの仲間との相対的な位置関係を察知して調整する力、すなわち「協調力」です。これは、仲間のプレイヤーに接近すればするほど強い力で離れる力が働き、遠くなればなるほど強い力で接近する力が働くこととしました（図2右）。なお、図2下のグラフが示すように、3つの力の大きさは、距離に依存して線形に変化することとして、距離に応じて働く「見えない力」の度合いの違いをパラメータ (k_s , k_a , k_c) として定義しました。

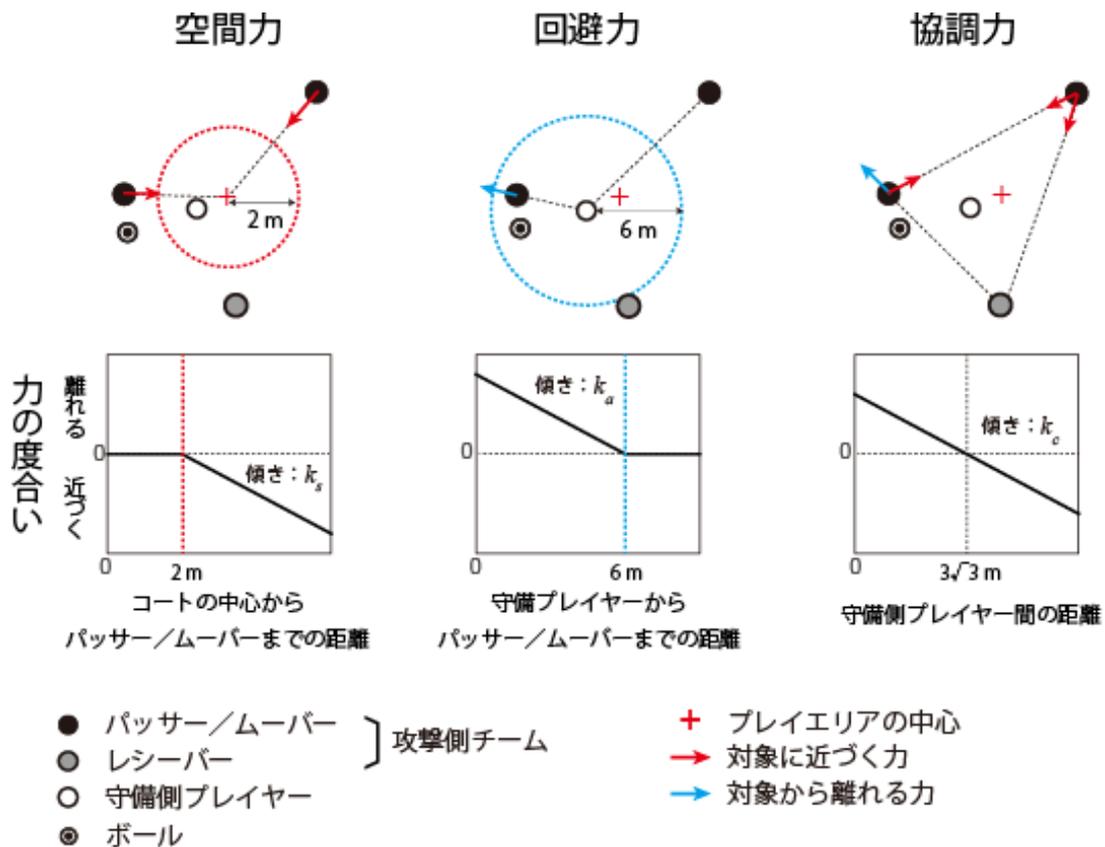


図2 パッサーとムーバーに働く3種類の「見えない力」
(上：模式図、下：対象との相対的な距離と力の度合いの関係)

以上のように定義した社会行動の数理モデルを用いて、3対1ボール保持課題のプレイヤーの動きを力の度合いのパラメータ (k_s , k_a , k_c) を変更して再現しました。その結果、図3に示すように、3種類の力のパラメータが共に小さい場合 (80N/m以下) には、上級者に多いモ

ードよりも初級者に多いモードの出現頻度が有意に高く、3種類のパラメータが共に大きい場合（120 N/m 以上）に、初級者に多いモードよりも上級者に多いモードの出現頻度が有意に高くなることが確かめられました。つまり、力の度合いのパラメータ (k_s , k_a , k_c) の大きさが、上級者と初級者のモードの違いに関わっていることが分かりました。実際に、3種類のフォース・パラメータが 120 N/m である場合の三角形の角度の時系列変化の一例をみると、実測値の時系列変化と類似していることが分かります（図 3B）。このことは、上級者のような洗練されたチームワークの実現には、空間や相手プレイヤー、仲間プレイヤーとの相対的な位置関係から生じる「見えない力」を、初級者よりも敏感に察知して動いていることを示唆しています。

さらに、3種類の「見えない力」のうち、空間力パラメータと回避力パラメータを 120 N/m で固定して、協調力パラメータを変化させたところ、協調力パラメータの変化が、技能レベルに依存した同期モードの出現に関わっていることが分かりました（図 3A 下）。このことは、洗練されたチームワークを実現するためには、3種類の「見えない力」のなかでも、仲間のプレイヤーからの「協調力」を察知する能力が重要であることを示唆しています。

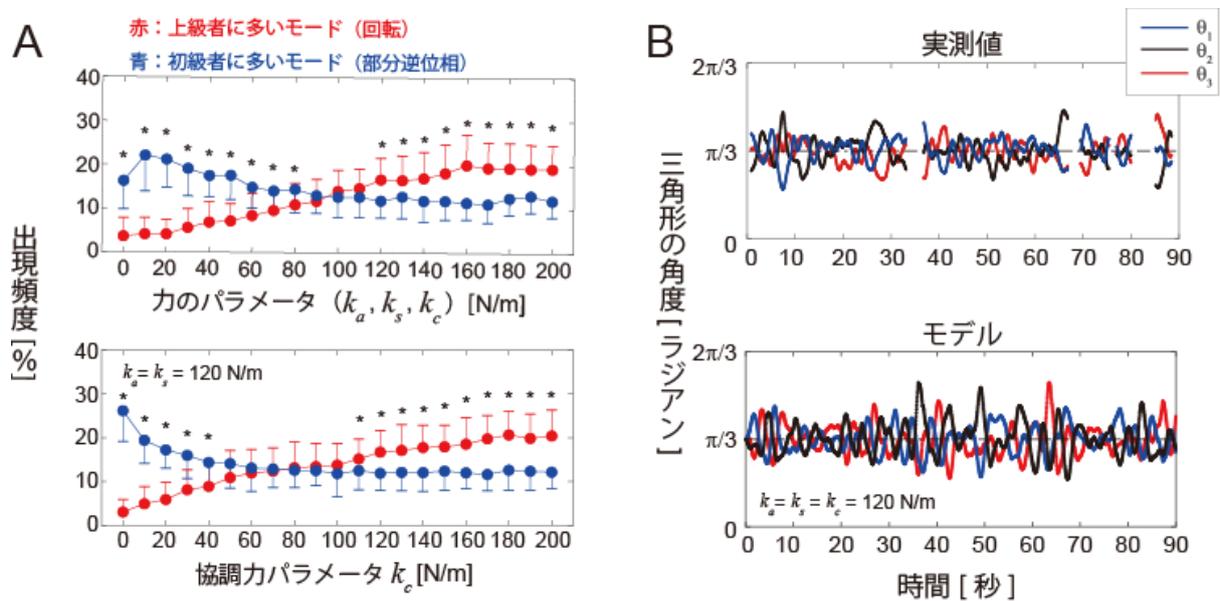


図 3 A：力のパラメータを変更した場合における同期モードの違い
 （上：3種類のカパラメータを同時に変更した場合、下：協調力パラメータのみを変更した場合）
 B：3者を結ぶ三角形の角度の時系列変化の一例
 （上：上級者の実験で得られたデータ、下：モデルによる再現で得られたデータ）

これらの結果をもとに、チームの仲間との相対的な位置関係を察知して調整する「協調力」を物理的にサポートする練習道具として、3者のプレイヤー間をゴムバンドで繋ぐ練習道具を開発し、小学生を対象として道具の効果を検証しました（図 4A）。この練習道具は、仲間のプレイヤーから離れすぎた場合に、ゴムバンドに繋いだベルトを通じて、腰に張力が働く構造となっています。したがって、「協調力」という「見えない力」を察知できない初級者であっても、物理的な張力で引っ張られることによって、協調力を察知して動くことができると考えました。ただし、モデルでは、仲間のプレイヤーに接近した場合に遠ざかる力も働くことになっていましたが、この道具では、その構造は含まれていません。しかしながら、バンドの張りが緩やかになっていることをプレイヤーが視覚的に察知できれば、その力が間接的に働くと考えました。実験では、小学生の3つのグループに対して、それぞれバンドを利用した条件と利用しない条件を実施し、課題中において3者を結ぶ三角形の角度の分布を調べました。その結果、バンドを利用した場合に、上級者の特徴と類似する動きの特徴が確かめられました（図 4B）。

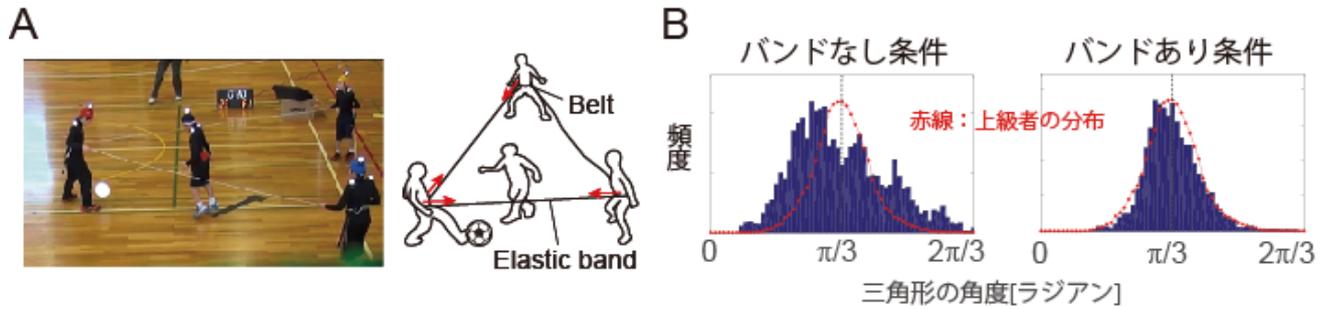


図4 A 協調力の一部を物理的に再現する練習道具
 (左：実験の様子、右：道具の構造を表す模式図)
 B 1つのグループで得られた角度分布の例
 (左：バンドを利用しない条件、右：バンドを利用した条件)

【成果の意義】

本研究では、サッカーの3対1ボール保持課題における3者の同期的な振る舞いを社会行動の数理モデルで再現しました。社会行動の数理モデルは、これまで群集における歩行者の動きのような自然発生的に生じた現象を中心に応用されてきましたが、本研究の結果は、スポーツにおけるチームワークのような目標志向的な現象にも適用できることを示唆しています。今後、社会行動の数理モデルが、さらに複雑なチームの振る舞いにも応用されることが期待されます。

【論文情報】

雑誌名：Physical Review E

タイトル：Social forces for team coordination in ball possession game

(ボール保持ゲームにおけるチーム協調のための「見えない力」)

著者：Keiko Yokoyama^{1*}, Hiroyuki Shima², Keisuke Fujii³, Noriyuki Tabuchi⁴, and Yuji Yamamoto¹

(横山 慶子^{1*}, 島 弘幸², 藤井 慶輔³, 田淵 規之⁴, 山本 裕二¹)

1. 名古屋大学 総合保健体育科学センター, 2. 山梨大学 大学院総合研究部, 3. 理化学研究所 革新知能総合研究センター, 4. ミズノ株式会社, * : 責任著者

DOI: [10.1103/PhysRevE.97.022410](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.022410)