

〔優 秀 賞〕

運動・スポーツが子どもの社会性に与える影響とその神経基盤 —fNIRS ハイパースキャンニング研究—

石 原 暢* 橋 本 紳之亮* 高 岸 治 人**

THE EFFECTS OF EXERCISE AND SPORTS ON CHILDREN'S SOCIAL DEVELOPMENT AND THEIR NEURAL BASIS: AN fNIRS HYPERSCANNING STUDY

Toru Ishihara, Shinnosuke Hashimoto, and Haruto Takagishi

Key words: prosocial behavior, reciprocity, trust, brain synchrony, prefrontal cortex.

緒 言

子どもの運動・スポーツは体力向上のみならず、脳の健全な発達を促し、認知機能を向上させる^{1,2)}。特に、学力と密接にかかわる前頭前野機能に焦点をあてた研究が盛んに行われ、子どもの運動・スポーツが前頭前野機能と学力を向上させることが示されている^{1,2)}。前頭前野はヒトの社会性ともかかわることが知られている^{3,10)}。例えば、前頭前野機能は柔軟な社会的意思決定とかかわる。他者との金銭の授受を行う経済ゲーム中の意思決定において、前頭前野機能の高い者は状況に応じて行動を柔軟に変えられることが示唆されている^{3,6,10)}。運動・スポーツが前頭前野機能の発達を促すことから、運動・スポーツは学力だけでなく社会性の発達ともかかわる可能性がある。

大学生を対象に運動・スポーツが社会的な意思決定の柔軟性とかかわるかを検討した研究⁶⁾では、運動・スポーツ習慣を有する大学生は、経済ゲーム中において、相手から搾取されるリスクがない条件においては向社会的行動を促進し、一方で搾

取されるリスクがある状況においては向社会的行動を抑制することが示されている⁶⁾。更に、その関係は機能的近赤外分光法 (fNIRS) を用いて計測された前頭前野背外側部の脳内機能結合および腹外側部の 2 者間脳活動同期に媒介されることが示唆されている⁶⁾。これらの結果から、運動・スポーツに伴う前頭前野機能の亢進は、自身の行動の制御や他者との感情の共有を介して向社会的行動の促進とかかわる一方で、リスクのある社会状況においては向社会的行動を抑えるといった、柔軟な社会的意思決定を可能にすると考えられている⁶⁾。

しかしながら、運動・スポーツと社会性の関係を検討したものは成人を対象としており⁶⁾、運動・スポーツが子どもの社会性の発達を促すかは不明である。更に、これまでの研究は横断的な検討に制限されており、因果関係については不明であるという課題が残されている。そこで本研究は、運動・スポーツが子どもの社会性の発達に及ぼす影響を縦断的研究デザインを用いて調べることを目的とした。

* 神戸大学大学院人間発達環境学研究所 Graduate School of Human Development and Environment, Kobe University, Kobe, Japan.
** 玉川大学脳科学研究所 Tamagawa University Brain Science Institute, Tokyo, Japan.

方 法

A. 対象者

13～17歳の男女40名（男性20名，女性20名）を対象とした。整形外科・循環器・内分泌代謝学的疾患、その他の疾患の既往歴がないことを参加の条件とした。対象者はおよそ半年の間隔を空け、ベースラインとポストテストの2回の実験に参加した。本研究は、神戸大学附属学校におけるヒトを直接の対象とする研究に関する研究内容審査委員会により承認され（承認番号：165）、対象者全員から書面によるインフォームド・コンセントを得た。

B. 運動・スポーツ習慣

身体活動および運動・スポーツ習慣は、質問紙とウェアラブルデバイス (Fitbit Charge 2, Fitbit 社) を用いて評価した。WHO Health Behaviour in School-aged Children survey の日本語版⁹⁾を用い、中高強度身体活動を評価した。1週間当たりの中高強度身体活動の日数、高強度身体活動の頻度と1週間当たりの実施時間を評価した。現在の運動・スポーツ習慣は、少なくとも1年間以上継続している運動・スポーツについて、種目、継続年数、実施頻度・実施時間を回答させた⁷⁾。Fitbit Charge 2から得られた心拍数データを用い、低強度身体活動 (57～63% HRmax)、中強度身体活動 (64～76% HRmax)、高強度身体活動 (> 77% HRmax) の実施時間を算出した。

C. 実験手順

実験は2名1組で行い、ベースラインとポスト

テストの実験は同一ペアで実施した。実験プロトコルを図1に示した。参加者は実験室来室後、実験の説明、同意書への署名、身体計測を行った。その後、向社会的行動を評価する経済ゲーム（信頼ゲーム）の練習を行った。練習は、対象者がゲームのルールを理解するまで繰り返された。練習終了後、5分間の休憩をとり、fNIRS装置による脳活動計測を開始した。その後、安静時の脳活動計測を行った。計測中はスクリーン上の固視点を見るように指示した。安静時の脳活動計測終了後、対面条件と顔刺激条件の2条件の課題を行った。対面条件では一緒に実験に参加したペア、顔刺激条件ではスクリーン上に表示された顔刺激と10分間見つめ合うように指示した。顔刺激は、中性表情を示す男女1名ずつの写真を作成し、ペアと同性のものを用了。見つめ合い終了後、対面条件では一緒に実験に参加したペアと、顔刺激条件ではスクリーンに表示された顔刺激の人物と行うことを想定し、信頼ゲームを行った。各条件の間に5分間の休憩を設け、条件の実施順序はペアの半数で無作為にカウンターバランスをとった。対面条件の見つめ合い時を除き、ペアの間にはパーテーションが置かれ、参加者はお互いが見えない状況であった。

D. 信頼ゲーム

向社会的行動を評価するために、コンピュータを用いた信頼ゲームを行った。信頼ゲームは、与えられた元手を相手に預ける預託者とお金を分ける分配者の役割に分かれて実施するゲームである。預託者は1000円の元手から相手にいくら預け、い

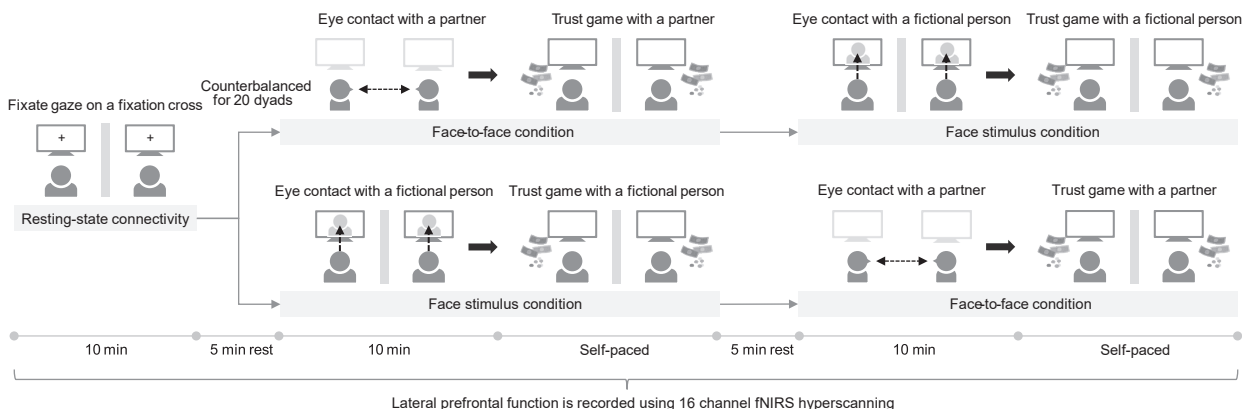


図1. 実験プロトコル
Fig.1. Experimental protocol.

くらを手元に残すかを決定する。預けたお金は3倍の金額となって分配者に渡される。その後、分配者は受け取ったお金をいくら預託者に分配し、いくらを手元に残すかを決定する。対象者はまず預託者の役割として1000円の元手のうちいくらを相手に預け、いくらを手元に残すかを100円刻みで決定した。その後、分配者としていくら相手に分配し、いくらを手元に残すかを決定した。分配額の選択は、相手から預けられた額が100円刻みで提示され、各金額を預けられた場合にどのように分配するのかをそれぞれ決定した。そのため、相手が預託者として決定した金額にかかわらず、分配者は預けられた金額に応じた10種類の分配額の決定を行った。信頼ゲーム中は対象者の間はパーテーションで区切られ、お互いの決定を見ることはできなかった。本研究の謝金は信頼ゲームにおける預託者および分配者としての決定に基づいて算出され、そのことは実験開始前に対象者に知らされた。

E. fNIRS データ

16チャンネルのfNIRS装置（Spectratech OEG-16H, Spectratech Inc, Tokyo, Japan）を用い、サンプリング周波数0.76 Hzで血行動態信号を取得した。fNIRS装置は国際10-20法に従って、プローブの中心がFpzに位置するように、前頭前野の頭皮上に配置した（図2）。得られたデータは、修正 Beer-Lambert 則および血流動態分離法を用いてoxy-Hbの時系列データを取得した。得られた時系列データを用い、合計32チャンネル（16チャンネル×2名）間のウェーブレットコヒーレンスを算出した。その後、0.015～0.15 Hzの周波数帯域を抽出し、各フェーズ（安静、各条件の見つめ合い時および信頼ゲーム中）に分けて平均値を算出した。同一対象者内のチャンネルの組み合わせで得られたウェーブレットコヒーレンスを脳内機能結合、ペア間のチャンネルの組み合わせで得られたウェーブレットコヒーレンスを脳間同期の指標とした。

F. 統計処理

1名の参加者が2回目の実験への参加を辞退したため、そのペアを除いた38名を分析対象とした。線形混合モデルを用い、信頼ゲーム中の行動、脳

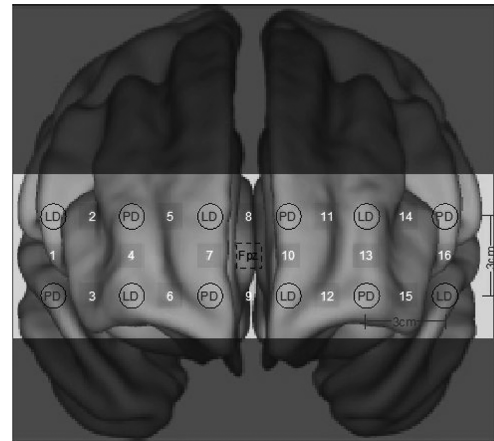


図2. fNIRS チャンネルの配置

Fig.2. Schematic diagrams showing the placement of the fNIRS channel.

LD = laser diode emitter, PD = photodiode detector.

内機能結合、脳間同期の発達変化を調べた。預託者として預けた額、分配者として分配した額の平均値について、時間（ベースライン、ポストテスト）、条件（対面、顔刺激）、およびそれらの交互作用の影響を検討した。脳内機能結合を目的変数とした分析については、フェーズ（安静時、見つめ合い、信頼ゲーム）ごとに、時間（ベースライン、ポストテスト）、条件（対面、顔刺激）、およびそれらの交互作用の影響を検討した。対面条件の脳間同期を目的変数とした分析については、フェーズ（見つめ合い、信頼ゲーム）ごとに、時間（ベースライン、ポストテスト）、条件（対面、顔刺激）、およびそれらの交互作用の影響を検討した。身体活動、信頼ゲーム中の行動、脳内機能結合および脳間同期の関係を調べるために、相関分析を行った。横断的な関係を検討する際には、ベースラインデータ同士の関係を分析した。縦断的な関係を検討する際には、目的変数にあたる変数のポストテストの値をベースラインの値で回帰した後に、説明変数のベースラインの値との関係を分析した。運動・スポーツ習慣と信頼ゲーム中の行動に関係が認められ、その両者とかかわる脳内機能結合または脳間同期指標が認められた場合には、身体活動→脳内機能結合または脳間同期→信頼ゲーム中の行動の媒介分析を実施した。すべての分析は性別、年齢、BMIを交絡因子として用いた。有意水準は $P < 0.05$ とした。

結 果

ベースラインおよびポストテストの対象者の特徴を表1に示した。

A. 行動指標の発達変化

分配者として分配した額の平均値を目的変数とした分析の結果、時間の主効果が認められ、発達に伴い分配額が低下した ($P < 0.05$)。条件の主効果が認められ、対面条件において顔刺激条件と比べて分配額が高かった ($P < 0.05$)。時間 $\times$ 条件の交互作用が認められ ($P < 0.05$)、発達に伴う分配額の低下は対面条件で大きい傾向が認められた (図3)。また、預託者として預けた額についてはいずれの主効果、交互作用も認められなかった ($P \geq 0.05$)。

B. 脳血流動態の発達変化

脳内機能結合および2者脳間同期を目的変数とした分析の結果、すべての指標について時間の主効果のみが認められ ($P_s < 0.05$)、ベースラインから6か月後にかけて脳内機能結合および2者脳間同期に減少が認められた (図4)。

C. 身体活動、行動指標と脳血流動態の関係

ベースラインデータを用いた横断的分析の結果、対面条件では有意な相関関係は認められなかったが、顔刺激条件において中高強度運動の日数、運動・スポーツ経験年数、その頻度 (平日、休日)、1セッション当たりの時間 (休日)、と分配額の間に負の相関関係が認められた ($r_s = -0.39$ to

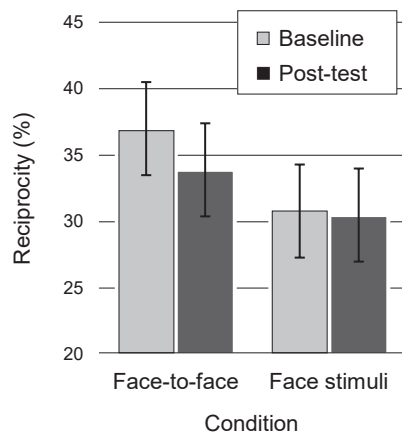


図3. 信頼ゲーム中の分配額の経時的変化

Fig.3. Temporal changes in reciprocity.

Values are presented as mean $\pm$ 95% confidence interval. Since these are paired tests, significant differences may exist even if the 95% confidence intervals overlap.

表1. 対象者の特徴
Table 1. Participants' characteristics.

	Baseline Mean (SD) or n (%)	Post-test Mean (SD) or n (%)
n	40	38
Sex		
Females	20 (50%)	19 (50%)
Males	20 (50%)	19 (50%)
Age in months	188.7 (12.2)	194.1 (12.6)
Height (cm)	163.1 (6.9)	163.5 (7.3)
Weight (kg)	52.7 (7.7)	54.1 (7.7)
BMI (kg/m ²)	19.8 (2.1)	20.2 (2.0)
MVPA at least 60 min/day		
0 day/week	2 (5%)	6 (16%)
1 day/week	2 (5%)	3 (8%)
2 days/week	7 (18%)	11 (29%)
3 days/week	5 (13%)	5 (13%)
4 days/week	3 (8%)	5 (13%)
5 days/week	14 (35%)	4 (11%)
6 days/week	4 (10%)	4 (11%)
7 days/week	3 (8%)	0 (0%)
VPA (frequency)		
Never	2 (5%)	1 (3%)
Less than once a month	0 (0%)	2 (5%)
Once a month	1 (3%)	3 (8%)
Once a week	6 (15%)	4 (11%)
2 to 3 times a week	7 (18%)	11 (29%)
4 to 6 times a week	19 (48%)	16 (42%)
Everyday	5 (13%)	1 (3%)
VPA (duration)		
None	4 (10%)	4 (11%)
About half an hour	3 (8%)	7 (18%)
About 1 hour	5 (13%)	4 (11%)
About 2 to 3 hours	12 (30%)	7 (18%)
About 4 to 6 hours	7 (18%)	7 (18%)
About 7 hours or more	9 (23%)	9 (24%)
Regular exercise and sports	29 (73%)	27 (71%)
Year	3.9 (4.1)	3.6 (3.6)
Session/week (weekday)		
Never	14 (35%)	15 (39%)
1 day/week	4 (10%)	4 (11%)
2 days/week	1 (3%)	2 (5%)
3 days/week	7 (18%)	3 (8%)
4 days/week	11 (28%)	14 (37%)
5 days/week	3 (8%)	0 (0%)
Hours/session (weekday)		
None	14 (35%)	15 (39%)
About half an hour	2 (5%)	3 (8%)
About 1 hour	4 (10%)	3 (8%)
About 2 to 3 hours	19 (48%)	17 (45%)
About 4 to 6 hours	1 (3%)	0 (0%)
About 7 hours or more	0 (0%)	0 (0%)
Session/week (weekend)		
Never	14 (35%)	15 (39%)
1 day/week	20 (50%)	21 (55%)
2 days/week	6 (15%)	2 (5%)
Hours/session (weekend)		
None	14 (35%)	15 (39%)
About half an hour	2 (5%)	2 (5%)
About 1 hour	1 (3%)	0 (0%)
About 2 to 3 hours	14 (35%)	18 (47%)
About 4 to 6 hours	7 (18%)	3 (8%)
About 7 hours or more	2 (5%)	0 (0%)

BMI = body mass index, MVPA = moderate to vigorous physical activity, VPA = vigorous physical activity.

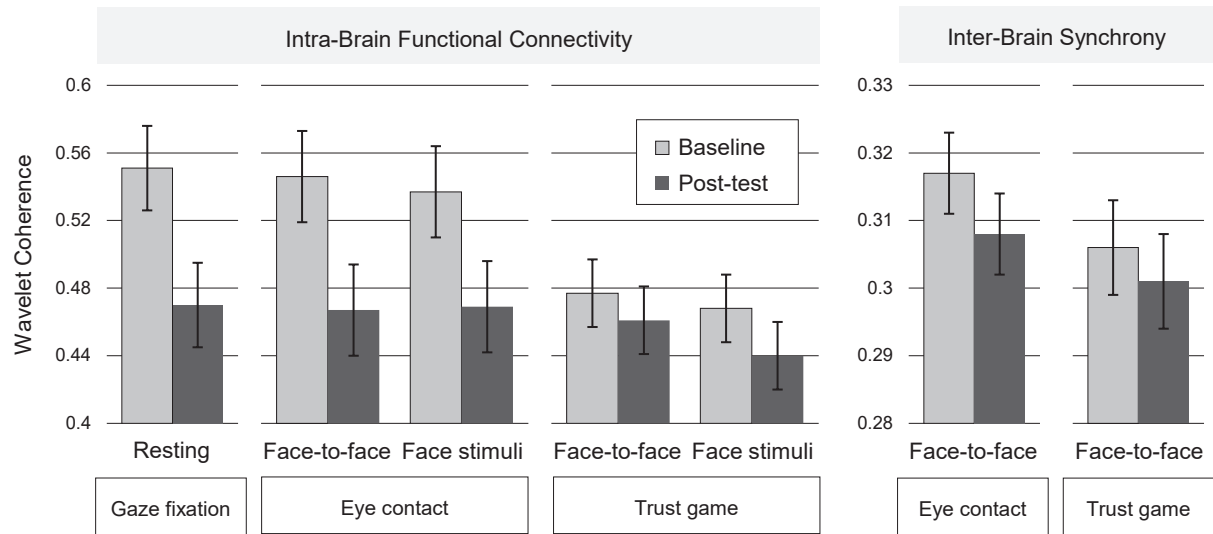


図4. 脳内機能結合および脳間同期の経時的変化

Fig.4. Temporal changes in intra-brain functional connectivity and inter-brain synchrony.

Values are presented as mean $\pm$ 95% confidence interval. Since these are paired tests, significant differences may exist even if the 95% confidence intervals overlap.

表2. 身体活動、運動・スポーツ習慣と分配額の関係

Table 2. Relationship between physical activity, regular exercise and sport, and reciprocity.

	Face-to-face		Face stimuli	
	Cross-sectional	Longitudinal	Cross-sectional	Longitudinal
Days of MVPA	-0.17	0.03	-0.33*	-0.17
Frequency of VPA	-0.12	-0.16	-0.31	-0.18
Duration of VPA	0.11	-0.18	-0.25	-0.25
Regular exercise and sports	0.14	-0.34*	-0.11	-0.38*
Years	0.13	-0.26	-0.35*	-0.37*
Session/week (weekday)	0.09	-0.07	-0.23	-0.06
Hours/session (weekday)	-0.05	-0.25	-0.39*	-0.19
Session/week (weekend)	-0.05	-0.24	-0.38*	-0.17
Hours/session (weekend)	-0.11	-0.27	-0.37*	-0.15
Fitbit LPA	-0.28	0.44*	-0.38*	0.21
Fitbit MPA	-0.30	0.08	-0.07	0.17
Fitbit VPA	-0.06	-0.17	0.16	-0.15

Values are presented as Pearson's correlation coefficient. LPA = light physical activity, MPA = moderate physical activity, MVPA = moderate to vigorous physical activity, VPA = vigorous physical activity, * $P < 0.05$.

-0.33, $P_s < 0.05$) (表2)。縦断的な分析の結果、対面条件、顔刺激条件ともにベースラインの運動・スポーツ習慣の有無が分配額の変化と負の相関を示した（それぞれ $r = -0.34, -0.38, P_s < 0.05$) (表2)。一方で、Fitbitで計測されたベースラインの低強度身体活動は、対面条件での分配額の変化と正の相関関係を示した。運動・スポーツ習慣と信頼ゲーム中の行動の両者とかかわる脳内機能結合または脳間同期指標は認められなかったため ($P > 0.05$)、その後の媒介分析には進まなかった。

考 察

本研究は、子どもの運動・スポーツ習慣が向社会的行動の発達に及ぼす影響を縦断的に調べることを目的とした。この目的を達成するために、信頼ゲーム中の行動および社会的相互作用時の脳活動（脳内機能結合、脳間同期）の発達変化を調べ、それに対する運動・スポーツの影響を検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。①対面条件でのみ発達に伴い信頼ゲームにおける分配額

が減少し、②脳内の機能結合および脳間同期が低下した。更に、③運動・スポーツ習慣が信頼ゲームにおける行動の発達変化の促進とかかわっていた。一方で、④運動・スポーツ習慣と信頼ゲーム中の行動の両方とかかわる脳内機能結合または脳間同期指標は認められなかった。本研究の結果から、運動・スポーツは子どもの社会性の発達を促すことが示された。一方で、それらの関係を媒介する神経基盤の同定には至らなかった。

本研究は子どもを対象に運動・スポーツ習慣が経済ゲーム中の社会行動の発達に及ぼす影響を調べた初めての研究である。本研究の結果、信頼ゲームにおける対面条件での分配額が発達に伴い減少することが示された。この結果は、思春期に公平性に基づく意思決定や他者の視点・意図を理解する機能が発達することを示した過去の研究結果を支持している^{4,5)}。本研究の対象者は13～17歳であり、思春期中期にあたる。思春期は、社会的な学習や適応が高まる時期であり、経済ゲームにおける行動が適応的に発達する⁴⁾。例えば、公平性を考慮した意思決定は思春期に発達する⁵⁾。思春期には最後通牒ゲーム（提案者が提案した分配に対し、受け手が受け入れた場合は提案どおりの分配が行われ、拒否した場合には両者の獲得金額が0となる経済ゲーム）において、不公平なオファーの拒否率は発達に伴い増加する⁵⁾。本研究で認められた対面条件における分配額の低下は、不公平なオファー（少額の預託額）の際の分配額の減少を反映していると考えられる。また、本研究では信頼ゲームにおける行動の発達変化が対面条件においてのみ認められた。思春期には社会的意思決定場面において、他者の視点や意図、社会的状況を理解・考慮する能力が獲得される^{4,5)}。このような能力の獲得が対面での行動に選択的に影響を与えたと考えられる。本研究の結果は、運動・スポーツが思春期の公平性に基づく意思決定や他者視点・意図の理解の発達を促すことを示唆している。

本研究の結果、前頭前野の脳内機能結合と脳間同期は発達に伴い減少した。この結果は、脳内機能結合の発達変化を調べた過去の研究⁸⁾と一致する。機能的磁気共鳴画像法を用いて脳内機能結合の発達変化を調べた研究において、感覚運動領域

の機能結合は発達に伴い増加する一方で、連合領域の機能結合は減少することが示されている⁸⁾。本研究は連合野に含まれる前頭前野の機能結合に焦点を当てたため、発達に伴う機能結合の低下が認められたと考えられる。脳間同期については、発達変化を調べた先行研究は見当たらない。したがって、発達に伴う脳間同期の減少については、本研究により新たに明らかになった点であると考えられる。このような脳間同期の変化が社会性の発達においてどのような意味をもつのかは現時点では不明であるが、今後の研究により明らかにされることが期待される。

運動・スポーツ習慣が分配額の発達に与える影響を媒介する脳内機能結合および脳間同期指標は認められなかった。この結果は、大学生を対象に信頼ゲーム中の脳内機能結合および脳間同期が運動・スポーツと社会行動の関係を媒介することを示した過去の研究⁶⁾と矛盾する。この原因として、対象とした年齢の違いが挙げられる。本研究は社会性の発達過程である思春期を対象としているため、脳内機能結合と脳間同期が運動・スポーツから受ける影響や社会行動に与える影響が成人と異なった可能性がある。また、本研究では預託額による分配額の違いや脳領域による媒介因子としての役割の違いを考慮せず、平均値を分析に用いたことが矛盾した結果の原因である可能性がある。上述の大学生を対象とした研究⁶⁾では、前頭前野背外側部の脳内機能結合および腹外側部の脳間同期が運動・スポーツ習慣と社会行動の関係を媒介すること、その関係は特に預託額が大きい場合で顕著であることが報告されている。今後は預託額や脳領域による違いを検討することで、運動・スポーツが社会性の発達を促す神経基盤が同定されることが期待される。

本研究にはいくつかの限界点がある。本研究の追跡期間は半年間であり、追跡期間が短かった。このような短期間では各指標の発達変化が限られており、そのことが結果に影響を与えた可能性がある。また、本研究は前頭前野の血行動態しか計測できていない。前頭前野以外にも側頭頭頂接合部や楔前部など、他の領域もヒトの社会性とかかわることが知られているため、他の脳領域にも焦

点をあてた研究が必要である。今後の研究ではこれらの限界点を踏まえた研究デザイン・手法を用い、運動・スポーツが社会性の発達に与える影響を検証していく必要がある。

総 括

本研究により、子どもの運動・スポーツが社会性の発達を促すことが明らかとなった。本研究の結果は、従来の研究で明らかにされてきた体力・学力向上といった効果に加え、社会性の発達という新たな視点から子どもの運動・スポーツを推進する一助となると期待される。

謝 辞

本研究をご支援いただいた公益財団法人明治安田厚生事業団に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Álvarez-Bueno C, et al. (2017): Academic achievement and physical activity: a meta-analysis. *Pediatrics*, **140**(6), e20171498.
- 2) Álvarez-Bueno C, et al. (2017): The effect of physical activity interventions on children's cognition and metacognition: a systematic review and meta-analysis. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*, **56**(9), 729-738.
- 3) Bellucci G, et al. (2020): Neural signatures of prosocial behaviors. *Neurosci Biobehav Rev*, **118**, 186-195.
- 4) Crone EA, et al. (2012): Understanding adolescence as a period of social-affective engagement and goal flexibility. *Nat Rev Neurosci*, **13**(9), 636-650.
- 5) Güroğlu B, et al. (2009): Fairness considerations: increasing understanding of intentionality during adolescence. *J Exp Child Psychol*, **104**(4), 398-409.
- 6) Ishihara T, et al. (2024): The links between physical activity and prosocial behavior: an fNIRS hyperscanning study. *Cereb Cortex*, **34**(2), bhad509.
- 7) Ishihara T, et al. (2021): Childhood exercise predicts response inhibition in later life via changes in brain connectivity and structure. *Neuroimage*, **237**, 118196.
- 8) Luo A, et al. (2024): Functional connectivity development along the sensorimotor-association axis enhances the cortical hierarchy. *Nat Commun*, **15**(1), 3511.
- 9) Tanaka C, et al. (2017): The validity of the Japanese version of physical activity questions in the WHO Health Behaviour in School-aged Children (HBSC) survey. *Res Exerc Epidemiol*, **19**(2), 93-101.
- 10) Tanaka H, et al. (2023): Right dorsolateral prefrontal cortex regulates default prosociality preference. *Cereb Cortex*, **33**(9), 5420-5425.