サッカーにおけるヘディングの累積曝露と慢性外傷性脳症に関する最近の知見

臼井 直人^{1,2*}, 山代 幸哉³, 小島 将^{1,4}, 佐藤 大輔³

Chronic traumatic encephalopathy associated with cumulative soccer heading exposure: A review of the recent literature

Naoto Usui^{1,2*}, Koya Yamashiro³, Sho Kojima^{1,4} and Daisuke Sato³

¹医療法人社団嬉泉会嬉泉病院リハビリテーション科, 〒125-0041 東京都葛飾区東金町1-35-8 (*Department of Rehabilitation, Kisen Hospital, 1-35-8 Higashikanamachi, Katsushika-ku, Tokyo 125-0041, Japan*)

²順天堂大学大学院医学研究科腎臓内科学講座, 〒113-8421 東京都文京区本郷2-1-1 (*Department of Nephrology, Graduate School of Medicine, Juntendo University, 2-1-1 Hongou, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8421, Japan*)

³新潟医療福祉大学健康科学部健康スポーツ学科, 〒950-3198 新潟県新潟市北区島見町1398 (*Department of Health and Sports, Niigata University of Health and Welfare, 1398 Shimami-cho, Kita-ku, Niigata-shi, Niigata 950-3198, Japan*)

⁴新潟医療福祉大学大学院医療福祉学研究科, 〒950-3198 新潟県新潟市北区島見町1398 (*Graduate School of Health and Welfare, Niigata University of Health and Welfare, 1398 Shimami-cho, Kita-ku, Niigata-shi, Niigata 950-3198, Japan*)

Received: May 14, 2020 / Accepted: June 29, 2020

Abstract Soccer is the most popular sport worldwide, with over 265 million participants. Soccer is unique in that the ball can be directed deliberately and purposefully with the head, an act referred to as ‘heading’. In recent years, there has been concern about the association between repetitive subconcussive head impacts associated with heading and chronic traumatic encephalopathy. Heading causes immediate changes in biochemical and electrophysiological markers of traumatic brain injury, and some studies have reported brain structural changes and dysfunction in former soccer players. In 2019, it was reported that the mortality associated with neurodegenerative diseases was about 3.5 times higher among former professional soccer players. Following that, in early 2020, the guidance have been published to limit heading by age in some regions including England and Scotland. In this review, we will expound the immediate and long-term effects of heading associated with chronic traumatic encephalopathy and the measures that should be taken into consideration in the practice of soccer instruction, based on the latest findings.

Jpn J Phys Fitness Sports Med, 69(5): 361-370 (2020)

Keywords : soccer, heading, subconcussion, concussion, chronic traumatic encephalopathy

緒言

サッカーは2億6500万人以上の競技人口を誇る世界で最も人気のあるスポーツである¹⁾。サッカーは、上肢の使用を制限しボールを操る競技であり、なかでも特徴的な動作は、頭部でボールをコントロールする「ヘディング」である。ヘディングは得点に関わる重要な局面で多用されることが多く、サッカーの魅力を形成する動作である。しかし近年、ヘディングへの長期間の累積的曝露と神経変性疾患の関連性が指摘されている²⁻⁵⁾。

ボクシングを始めとする頭部への衝撃を伴うスポーツでは、100年近く前から脳の不良な転帰との関連が懸念されている⁶⁾。その後、多くの研究により外傷性脳損傷

の累積に伴う脳の構造的変化と機能障害は、慢性外傷性脳症として広く認知されている⁷⁻¹¹⁾。一方サッカーは、長い間外傷性脳損傷のリスクが高いスポーツには該当しないと考えられてきた^{12,13)}。しかしながら、近年では明らかな脳振盪症状を誘発しない程度の頭部への衝撃（亜脳振盪：subconcussion）の反復が、脳の微細構造の変化に関連することが報告されている¹⁴⁾。ヘディングは、亜脳振盪性の頭部衝撃を伴うスポーツ動作と考えられており、外傷性脳損傷のバイオマーカーや電気生理学的マーカーの変化、および高次脳機能への影響を認めることが報告されている⁴⁾。さらに、ヘディングに伴う頭部負担の累積が、脳の構造的変化をもたらす可能性が指摘されている¹⁵⁾。米国では社会的関心の高まりから、2016年に10歳以下の少年サッカー選手におけるヘディングの禁止を発表した^{16,17)}。2019年には、元プロサッカー選手を

*Correspondence: chokujin.70@gmail.com

対象とした大規模な調査において、一般集団と比較して心疾患や悪性腫瘍などに伴う死亡率は低いものの、神経変性疾患による死亡率が約3.5倍高いことが報告されている²⁾ (Table 1)。こうした背景から、2020年初めにはイングランドやスコットランドにおいて、18歳以下の練習中のヘディング頻度を年代別に制限する指針が発表され、ヘディングがもたらす不良な転帰についての関心がより高まっている。

米国の中高校生のサッカー選手においては、脳振盪の約30%がヘディングに起因し^{18,19)}、脳振盪の症状を有する選手のうち、半数以上が脳振盪の症状を抱えたまま競技を継続していることが明らかとなった¹⁸⁾。専門家によるステートメントでは、脳振盪症状のあるアスリートは競技を中止して医学的に評価されるべきであり、症状が消失し専門家の許可を得てから競技に復帰すべきであることが明記されている²⁰⁾。筆者自身も少年サッカーの指導に携わっているが、ヘディング後の軽微な脳振盪症状に対する現場の認識は未だに低く、その予防策に関する統一の指針も確立されていない。本総説では、ヘディングが脳にもたらす即時のおよび長期的な影響、ならびにサッカーの指導において考慮されるべき対策について、最新の知見を踏まえ解説する。

ヘディングに伴う外傷性脳損傷マーカーの変化

ヘディング直後には、大脳皮質運動野の皮質内抑制が増大し、同時に認知機能が一時的に低下することが報告されている^{21,22)}。皮質内抑制の増大は軽度の脳振盪において観察され、経頭蓋磁気刺激により評価される再現性の高い電気生理学的変化であり、脳振盪下の潜在的な脳

機能の急性変化を検出することができる^{23,24)}。生理学的機序は完全には明らかにされていないが²⁵⁾、ヘディング後に観察される皮質内抑制は、脳機能障害の重症化を防止するための保護メカニズムを反映する可能性がある²¹⁾。ヘディングに伴う一時的な皮質内抑制の繰り返しは、結果的に保護メカニズムの障害を引き起こし、脳の構造的な変性に至る病理学的プロセスを形成している可能性が指摘されている²¹⁾。

また、急性期の外傷性脳損傷後に上昇する血清S-100Bやニューロン特異的エノラーゼなどのバイオマーカーが、重症例のみならず、サッカーのヘディング後でも上昇することが報告されている²⁶⁻²⁸⁾。特に、血清S-100Bの変化は、試合中のヘディングや外傷イベントの頻度と正の相関を示す²⁹⁾。この即時的な変化のもつ臨床的意義は明らかではないが、軽微な外傷性脳損傷を反映している可能性がある。ただし、反復的な頭部への負担と外傷性脳損傷マーカーの変化について因果関係を考察する場合、前述した外傷性脳損傷のバイオマーカーおよび電気生理学的マーカーは、高強度の運動後でも上昇することを常に念頭に入れておく必要がある²⁹⁻³¹⁾。

最近ではヘディングと血清ニューロフィラメントやタウタンパクに焦点が当てられている。血清ニューロフィラメントは、軸索の細胞骨格蛋白であり、強い外力により頭部に回転力が生じて引き起こされるびまん性脳損傷において血清値が増加する³²⁾。血清ニューロフィラメントは、ヘディング後に即時に増加を示し、1か月後も高レベルな状態が持続するとされている^{33,34)}。タウタンパクは、軸索において微小管を束ねる役割があり、順行性の軸索内輸送にも関与する³⁵⁾。軽度の反復的な外傷性脳

Table 1. Primary Cause of Death among Former Soccer Players and Matched Controls.

Primary Cause of Death	Former Soccer	Matched Controls	Hazard Ratio for Death (95% CI)	P value*
	Players (N=7,676)	(N=23,028)		
	number (percent)			
Any cause†	1180 (15.4)	3807 (16.5)	0.87 (0.80-0.93)	<0.001
Ischemic heart disease	173 (2.3)	568 (2.5)	0.80 (0.66-0.97)	0.02
Lung cancer	74 (1.0)	362 (1.6)	0.53 (0.40-0.70)	<0.001
Neurodegenerative disease	134 (1.7)	120 (0.5)	4.10 (2.88–5.83)‡	<0.001

* P values were calculated with the use of a Cox proportional-hazards regression model.

† An analysis of all-cause mortality did not fulfill the proportional-hazards assumption and showed time-dependent variability.

‡ In an analysis that included adjustment for competing risks of death from ischemic heart disease and death from cancer, the subhazard ratio was 3.45 (95% CI, 2.11 to 5.62) (P<0.001).

(Mackay DF et al. N Engl J Med. 2019 Nov 7; 381(19): 1801-8. Copyright©2019 Massachusetts Medical Society. All rights reserved.)

損傷に起因した慢性外傷性脳症は、過剰なリン酸化タウの蓄積による進行性の神経変性が特徴であり、アルツハイマー型認知症の病理学的特徴としても知られている³⁶⁾。外傷性脳損傷後などの病的状態では、タウはリン酸化されやすく、過剰なリン酸化タウ分子は、neurofibrillary tanglesと呼ばれるフィラメント上の構造物に変化し、軸索機能障害を引き起こす³⁷⁾。この過剰なリン酸化タウの凝集体およびニューロフィラメントは、外傷性脳損傷の既往がある退役軍人やアメリカンフットボール選手、ボクサー、レスラーなどで検出されることが報告されており、慢性外傷性脳症に至る有力な病理学的プロセスの一つと考えられている^{38,39)}。近年では、この血清タウレベルが亜脳振盪性の頭部衝撃の強さと相関することが報告されている¹⁴⁾。サッカー選手における報告では、認知症の既往を持つ元サッカー選手の死後の脳で異常なリン酸化タウの蓄積が報告されている⁴⁰⁾。一方で、ヘディングと血清タウレベルの関連を検討した報告は少なく、現在のところその関連性は明らかになっていない^{34,41)}。基礎研究ではタウタンパクの減少は認知機能を改善することが示されており、慢性外傷性脳症、認知機能障害を予防する治療の標的となっている^{42,43)}。これらの外傷性脳損傷に関連したマーカーは、反復的な頭部への負担の影響を定量的に評価する臨床マーカーとして、慢性外傷性脳症の発症リスク判別への応用が期待される。

サッカー選手における脳の構造的変化

反復的な軽度の外傷性脳損傷の経験者では、慢性外傷性脳症の有症率が高く、乳頭体の萎縮、軽度の脳室拡大、及び脳梁の菲薄化などの構造的な変化が観察されており⁴⁴⁾、反復的な外傷性脳損傷は認知症の強い外的リスク要因として受け入れられている⁷⁾。一方で、軽微な外傷性脳損傷の反復が、認知症リスクを増加させるかどうかは明らかではないが、軽度の頭部外傷が十分に記録されておらず、後方視的な研究デザインのリコールバイアスに起因すると考えられてきた^{7,45)}。アメリカンフットボール選手を対象とした最近の前向き研究では、脳振盪を受傷した選手を除外した場合にも、反復的に頭部に生じた回転加速度の量に関連した脳の微細構造の変化が観察されている¹⁴⁾。

サッカー選手においては、1989年頃に元プロサッカー選手の約1/3において側脳室の拡大を伴う中程度の脳萎縮が報告された⁴⁶⁾。近年では、MRIを使用することにより、より詳細な脳の構造的変化について報告されている。アマチュアリーグの現役成人サッカー選手において、アンケートで推定した12か月間のヘディングへの曝露頻度は、大脳白質の微細構造の変化と記憶力の低下に関連していた¹⁵⁾。また、非接触型スポーツの元選手と比較して、元サッカー選手では年齢の増加とともにより大きな

大脳皮質の菲薄化が観察されており、皮質の構造的変化は認知能力の低下、ならびにヘディングへの推定曝露頻度と関連していた⁴⁷⁾。しかし、ヘディングへの曝露と脳の構造的変化を特定した多くは中高齢者を対象とした横断研究であり、ヘディングとの直接的な因果関係は示されていない。また、ヘディングの曝露頻度は自己報告で評価した推定値であり、このような評価手法はヘディングの頻度を過大評価する可能性がある⁴⁸⁾。現役プロサッカー選手では、ヘディングの頻度は脳の構造的変化に影響を与えず、過去の脳振盪の既往が脳の構造的変化に関連していた⁴⁹⁾。また中学生の試合中のヘディングによって頭部に生じた加速度とその累積を定量的に測定した研究でも、脳の構造的および認知機能の変化との関連は特定されなかった⁵⁰⁾。数少ない前向き研究では、少なくともプロキャリア開始後5年程度では脳の構造、知能、および認知機能の変化が観察されなかったことを報告しており⁵¹⁾、若手選手における脳の構造的変化を示した報告は今のところほとんどない。

ヘディングと脳機能障害

サッカー選手または、ヘディングの暴露頻度は、認知機能との関連性について多くの報告がなされているが^{47,51-60)}、さまざまな研究方法、母集団、評価バッテリーが使用されており、結果も一様ではなく、一定の見解は得られていない⁶¹⁾。

2017年に報告されたシステマティックレビュー⁶²⁾では、認知機能について報告した14編の症例対照研究(N=929)のうち、6割程度がサッカー選手における注意力、実行(遂行)機能(executive function)、記憶力の低下を報告しており、対象者の平均年齢がより高い研究で認知機能の低下は顕著であった。しかし、認知機能との関連を報告した研究では関連を認めなかった研究と比較してtype I errorの割合が高いことも報告している。一方、ヘディングの頻度に焦点を当てた17編の研究(N=1173)では、認知機能低下との関連を報告したのは3割程度であった。関連を認めた評価項目は注意力、記憶力や知能などであったが、このような関連を報告した研究ではヘディング頻度の評価の質が低かった⁶²⁾。

最近では、認知機能とヘディング曝露頻度の関連性を前向きに調査した比較的大規模な報告がされている^{3,63,64)}。いずれの研究も、5年以上のサッカー経験のある平均(または中央値)20歳代のアマチュアサッカー選手を対象としており、2週間程度の比較的短期間におけるヘディングへの曝露頻度は、思考スピード(一定時間内の語想起など)、作業記憶(working memory)、および注意力の低下と関連することを報告している^{63,64)}。さらに長期間(12か月間)のヘディングへの高頻度な曝露は、言語学習(言語の即時記憶)および言語記憶(一定時間経過後

の語想起)の低下と関連する^{3,64)}。また、一部の報告ではアルツハイマー型認知症の遺伝的素因であるアポリポタンパク ϵ 4 (APO ϵ 4)との関連性について、興味深い検討を行っている。そもそもAPO ϵ 4と記憶機能との間に関連は認められないが、APO ϵ 4陽性者が高頻度のヘディング曝露を受けた場合、陰性者と比較して記憶機能低下のリスクが4~8倍高いことを報告している³⁾。日常生活に影響を及ぼすほどではないが、ヘディングへの累積曝露と認知機能との関連性は比較的若い世代の選手においても認めるようであり、加齢やAPO ϵ 4などの遺伝子的素因により促進される可能性がある。APO ϵ 4はリスクの高い選手のスクリーニングへの応用が期待される。

サッカー選手の長期転帰

元プロサッカー選手ではアルツハイマー病、その他の認知症、運動ニューロン疾患、パーキンソン病などの様々な神経変性疾患に関連した死亡率が高いことが報告されている²⁾ (Table 2)。一方、ヘディングへの累積曝露と神経変性疾患を関連づけるデータは横断的または後方視的な報告が中心であり^{15,46,47)}、ヘディングとの直接的な因果関係は示されていない。1957年に前向きに登録された約4000人の高校生を対象とした最近の研究において、サッカー経験者の60歳の時点における認知症発生率は、他の非接触型スポーツ選手やスポーツ未実施者と差がないことが報告され、学生時代の一時的なサッカーの経験は長期的な転帰には影響しない可能性が示唆されている⁶⁵⁾。この研究では、サッカーの継続年数が考慮されていない

ことや、当時と現在のサッカー選手が置かれる環境（競技頻度、プレースタイル）の違いが結果に影響している可能性があるとしている。

サッカー選手の脳の構造的変化は主に中高齢者で観察されている^{46,47)}。若年性アルツハイマーの好発年齢が40歳以降であるように、神経変性疾患の遺伝的要因を抱えている場合においても、構造および機能的な変化が顕在化してくるのは中高齢者である。ヘディングの影響は、高頻度のヘディングに暴露した長いキャリアのプロ選手に限定される可能性があり⁶⁶⁾、加齢や神経変性疾患固有のリスク因子（遺伝的要因、環境的要因）との相乗効果が、中高齢者において脳の構造的かつ機能的変化をもたらすことが想定される。一方、青少年期からのヘディングの累積が、元サッカー選手の中高齢者における、脳の構造・機能的変化の直接的な引き金となっているのかの因果関係については明らかではない。従って、今後はベースラインの対象者を青少年世代とした大規模な長期に渡る前向き観察研究が必要であるが、これには多大な労力と費用、そして時間を要すると考えられる。

一方、ヘディングに伴う外傷性脳損傷マーカーの増加や、認知機能の低下、元プロサッカー選手における脳の構造・機能的変化や、神経変性疾患に関連した死亡率が高いことを考慮すると、身体の発達段階にある青少年時代からのヘディングへの累積曝露が神経変性疾患発症の環境要因になっている可能性は排除できない。従って、現時点のエビデンスに基づいて現場における対策を講じる必要があると考えられる。

Table 2. Mortality with Neurodegenerative Disease Listed as the Primary or a Contributory Cause.

Primary or Contributory Cause of Death	Former Soccer Players (N=7,676) number (percent)	Matched Controls (N=23,028)	Hazard Ratio for Death (95% CI)	P value*
Any neurodegenerative disease	222 (2.9)	228 (1.0)	3.53 (2.72-4.57)	<0.001
Neurodegenerative disease subtype				
Dementia not otherwise specified	180 (2.3)	178 (0.8)	3.87 (2.86-5.24)	<0.001
Alzheimer's disease	64 (0.8)	47 (0.2)	5.07 (2.92-8.82)	<0.001
Non Alzheimer's dementias	121 (1.6)	133 (0.6)	3.84 (2.42-5.00)	<0.001
Motor neuron disease	22 (0.3)	17 (0.1)	4.33 (2.05-9.15)	<0.001
Parkinson's disease	28 (0.4)	44 (0.2)	2.15 (1.17-3.96)	0.01

* P values were calculated with the use of a Cox proportional-hazards regression model. (Mackay DF et al. N Engl J Med. 2019 Nov 7; 381(19): 1801-8. Copyright©2019 Massachusetts Medical Society. All rights reserved.)

ヘディングに伴う脳振盪の特徴

脳振盪に伴う一般的な自覚症状としては、頭痛、吐き気、バランス不安定/めまい、疲労、眠気、目のかすみ、集中困難、記憶困難、首の痛み、視力障害などが挙げられる⁶⁷⁾。中学生のサッカー選手を対象とした報告では、頭痛(89.3%)、めまい(67.8%)、集中力低下(42.4%)、眠気(33.9%)、悪心(32.2%)、光過敏(28.8%)、過敏性(27.1%)、混乱(23.7%)の順に症状の頻度が高く、脳振盪の約30%がヘディングに起因していた¹⁸⁾。少年または女性のサッカー選手では、半数以上がヘディング後に頭痛を経験し⁶⁸⁻⁷⁰⁾、中には症状が25日間持続した症例や健忘症状を呈した症例が報告されている⁶⁹⁾。指導者および選手は、ヘディングによって脳振盪が引き起こされる可能性があることを認識する必要がある。また、脳振盪の既往がある選手ほどヘディング時に脳振盪に関連した自覚症状を伴いやすいという特徴がある⁷¹⁾。脳振盪に関する教育を受けているサッカー選手は、コーチに症状を報告する可能性が高いことが示されており、その適切な教育は重要である⁷²⁾。脳振盪の自覚症状、症状が消失しないうちに2回目の脳振盪を受傷し重篤な脳損傷を引き起こすセカンドインパクト症候群のリスク、および軽度の自覚症状であっても症状消失後からプレーを再開するなどの脳振盪の教育は、サッカー選手の指導において考慮されるべきである⁷²⁾。

ヘディングに伴う頭部の衝撃軽減への対策

米国を中心として、米国試験材料協会の定める性能基準を満たしたヘッドギア⁷³⁾が脳振盪の予防を目的として広く使用されており、本邦においても一部では使用されるようになっている。ヘッドギアには衝撃吸収層があり、頭部と頭部、地面やゴールポストなどの固い物質との接触時の影響を軽減するように設計されているが、頭部とボールの衝突時の衝撃軽減は想定されていない^{61,74-76)}。頭部との衝突時にボールは頭、またはヘッドギアよりも大きく変形をすることから、ヘッドギアがボールからの衝撃を軽減するためには、ボールと同程度の柔らかさが必要となる⁷⁷⁾。一部の報告では、女性においてヘッドギアがヘディング時の頭部の加速度を増加させることや⁷⁸⁾、ヘッドギアを着用した選手では、未着用の選手と比較してヘディング後に言語記憶が低下するなどネガティブな結果も散見される⁷⁹⁾。

一方、サッカーにおける明らかな受傷機転を伴う脳振盪の予防効果については、ヘッドギアの有効性が以前より報告されてきた^{80,81)}。しかし、最近の大規模な報告では、サッカー選手において、ヘッドギアはスポーツ関連脳振盪の発生率または重症度を減少させないとしており、その有効性についても未だ議論の余地がある⁸²⁾。

また、頸部の太さや筋力はヘディング時に頭部にかかる加速度に影響することが明らかにされている⁸³⁻⁸⁶⁾。ヘディングは、ボールからの外力に対抗するために頸部の筋を緊張させて衝撃に備え、身体全体を一塊に動かしボールとの接触を迎えるという一連の技術を適切に実行する動作である^{68,87)}。ヘディング中に頸部の筋が収縮すると、頸部の関節の剛性が増し、頭部へと生じた加速度エネルギーを体幹へ分散することができる⁷⁷⁾。従って、頸部の筋力を向上させるためのアプローチは頭部の衝撃を緩和する戦略となる可能性がある⁸³⁻⁸⁶⁾。しかしながら、頸部の屈筋群と伸筋群の等張性収縮を用いたレジスタンストレーニングでは、筋力の向上に伴う頸部の剛性増加とヘディング時の加速度の軽減は観察されなかった^{88,89)}。この研究では、頭部の加速度の減少は単純な頸部の筋力だけではなく、神経筋の制御に関連しているとしており⁸⁹⁾、頸部から体幹にかけた協調性、および瞬発力を意識したプライオメトリックトレーニングが頭部への負担を軽減するアプローチとして提案されている^{77,89)}。

ヘディングのシチュエーションと頭部の加速度

サッカーでは、シュート、クリア、パス、トラップ、ドリブルなどの様々な局面でヘディングが使用される。中でも、シュートやクリアを目的とするヘディングや、ゴールキックやゴールキーパーからのパントキックのヘディングは、頭部へのより高い直線および回転加速度を生じさせる^{90,91)}。特に、高い回転加速度の累積は、脳の微細構造の変化と関連することが明らかにされている¹⁴⁾。また、ゴールキーパーからのキックや30 m以上離れた位置からのクロスボールなど、飛距離の長いボールに対するヘディング頻度は、認知機能低下の遷延と関連する⁹²⁾。一方で、ボールと接触する部位に焦点を当てた場合、頭頂部にあたるような不適切な方法のヘディングでは頭部への加速度が高く、前頭部(額)に当てる適切なヘディングでは加速度が少なくなる⁹³⁾。パスやトラップ、ドリブルといった場面でのヘディングは、頭部への加速度は比較的少なく⁹⁰⁾、選手の制御下で適切なヘディングを実行し易いと考えられる。特に女性や年代の低いサッカー選手においては、リスクの高い場面を意識したボール処理の指導は、頭部への負担を軽減する有効な手段となり得る。

ヘディングの年齢制限

頭頸部の質量とヘディング時の頭部の加速度には負の相関があり、頭頸部の質量が大きいほど、加速度が小さくなる^{78,86)}。子供では身体サイズと比較した頭部の質量比率が大きいと、頸部の筋力が頭部の支持に対し不十分であり、ヘディング時により大きい加速度が頭部に生じる可能性がある⁷⁷⁾。従って、以前よりヘディングに年

代別制限を設けることが提案されており⁹⁴⁾, ヘディングに伴う脳振盪または亜脳振盪を予防する最も確実な手段の一つである。ヘディングは9~10歳の選手では試合あたり平均0~1本程度であり, 年齢とともに増加する傾向にある⁷⁰⁾。今年4月に報告された欧州サッカー連盟(Union of European Football Associations: UEFA)による大規模(欧州8か国が対象)な報告においても同様の傾向が示されており⁹⁵⁾, 10歳以下ではヘディングが試合において重要な局面を左右することは少ない。ヘディングの制限はリスクの高い場面において, 身体が未熟であり, 技術の伴わない不用意なヘディングへのチャレンジ防止に繋がる可能性がある。一方, ヘディング自体と急性および慢性脳機能障害との関連性に一定の見解は得られておらず, 青少年期におけるヘディングの制限は時期尚早な可能性も指摘されている⁶⁶⁾。米国では, 10歳以降に指導者の監督下でヘディングを教えることを推奨しており, 技術の習得と身体の成熟により, 選手が自信を持ち適切なヘディングができるようになるまで試合でのヘディングは遅らせる必要があるとしている⁹⁶⁾。

結 語

ヘディングの影響に関する研究は少なく, 慢性外傷性脳症などの神経変性疾患との直接的な因果関係は明らかではない⁶⁶⁾。元プロサッカー選手では神経変性疾患のリスクが高いことが明らかであり, 今後はプロサッカー選手に焦点を当て, ヘディングの曝露頻度と慢性外傷性脳症の関連を前向き研究によって明らかにする必要がある。同時に, 青少年期からのヘディングへの曝露が及ぼす影響についての前向き研究が推奨される。また, 軽度の脳振盪, または亜脳振盪に伴う脳の障害を反映する精度の高いバイオマーカーを明らかにする必要がある。慢性外傷性脳症発症に関連した各マーカーの閾値が明らかとされれば, APO ϵ 4などの遺伝子素因のリスク評価と合わせて慢性外傷性脳症発症リスクの判別に有用な臨床的マーカーとなる可能性がある。現在, サッカーの指導現場においてヘディングに伴う軽微な脳振盪または亜脳振盪への統一された対応は確立されておらず, 米国やイングランドにおけるヘディングを制限する指針についての是非は, その成果によって明らかになると考えられる。いち早く少年期のヘディングを制限した地域から前向き研究が報告されることを期待したい。

利益相反自己申告: 著者全員が利益相反はない。

著者貢献

N.Uは原稿の草案を作成した。全ての著者が原稿を批判的にレビューし, 最終原稿を熟読した上で, 投稿を承認した。

引用文献

- 1) M Kunz. 265 million playing football. *FIFA magazine*, 2007.
- 2) Mackay DF, Russell ER, Stewart K, MacLean JA, Pell JP, Stewart W. Neurodegenerative Disease Mortality among Former Professional Soccer Players. *N Engl J Med* 381: 1801-1808, 2019. doi: 10.1056/NEJ-Moa1908483.
- 3) Hunter LE, Freudenberg-Hua Y, Davies P, Kim M, Lipton RB, Stewart WF, Srinivasan P, Hu S, Lipton ML. Associations of Apolipoprotein E ϵ 4 Genotype and Ball Heading With Verbal Memory in Amateur Soccer Players. *JAMA Neurol* 77: 419-426, 2020. doi: 10.1001/jamaneurol.2019.4828.
- 4) Rodrigues AC, Lasmar RP, Caramelli P. Effects of Soccer Heading on Brain Structure and Function. *Front Neurol* 7: 38, 2016. doi: 10.3389/fneur.2016.00038.
- 5) Rubin TG, Catenaccio E, Fleysher R, Hunter LE, Lubin N, Stewart WF, Kim M, Lipton RB, Lipton ML. MRI-defined White Matter Microstructural Alteration Associated with Soccer Heading Is More Extensive in Women than Men. *Radiology* 289: 478-486, 2018. doi: 10.1148/radiol.2018180217.
- 6) Martland HS. Punch drunk. *JAMA* 91: 1103-1107, 1928.
- 7) Hay J, Johnson VE, Smith DH, Stewart W. Chronic Traumatic Encephalopathy: The Neuropathological Legacy of Traumatic Brain Injury. *Annu Rev Pathol* 11: 21-45, 2016. doi: 10.1146/annurev-pathol-012615-044116.
- 8) Smith DH, Johnson VE, Stewart W. Chronic neuropathologies of single and repetitive TBI: substrates of dementia? *Nat Rev Neurol* 9: 211-221, 2013. doi: 10.1038/nrneurol.2013.29.
- 9) Johnson VE, Stewart JE, Begbie FD, Trojanowski JQ, Smith DH, Stewart W. Inflammation and white matter degeneration persist for years after a single traumatic brain injury. *Brain* 136: 28-42, 2013. doi: 10.1093/brain/aww322.
- 10) Omalu B, Bailes J, Hamilton RL, Kamboh MI, Hammers J, Case M, Fitzsimmons R. Emerging histomorphologic phenotypes of chronic traumatic encephalopathy in American athletes. *Neurosurgery* 69: 173-183, 2011. doi: 10.1227/NEU.0b013e318212bc7b.
- 11) Roberts GW, Gentleman SM, Lynch A, Graham DI. β A4 amyloid protein deposition in brain after head trauma. *Lancet* 338: 1422-1423, 1991. doi: 10.1016/0140-6736(91)92724-g.
- 12) Schmidt-Olsen S, Jørgensen U, Kaalund S, Sørensen J. Injuries among young soccer players. *Am J Sports Med* 19: 273-275, 1991. doi: 10.1177/036354659101900311.
- 13) Cantu RC. Athletic head injuries. *Clin Sports Med* 16: 531-542, 1997. doi: 10.1016/s0278-5919(05)70038-7.
- 14) Hirad AA, Bazarian JJ, Merchant-Borna K, Garcea FE, Heilbronner S, Paul D, Hintz EB, van Wijngaarden

- E, Schifitto G, Wright DW, Espinoza TR, Mahon BZ. A common neural signature of brain injury in concussion and subconcussion. *Sci Adv* 5: eaau3460, 2019. doi: 10.1126/sciadv.aau3460.
- 15) Lipton ML, Kim N, Zimmerman ME, Kim M, Stewart WF, Branch CA, Lipton RB. Soccer heading is associated with white matter microstructural and cognitive abnormalities. *Radiology* 268: 850-857, 2013. doi: 10.1148/radiol.13130545.
 - 16) Yang YT, Baugh CM. US Youth Soccer Concussion Policy: Heading in the Right Direction. *JAMA Pediatr* 170: 413-414, 2016. doi: 10.1001/jamapediatrics.2016.0338.
 - 17) U.S. Soccer recognize 2 recover concussion guidelines secondary U.S. 2017.
 - 18) O'Kane JW, Spieker A, Levy MR, Neradilek M, Polisarsar NL, Schiff MA. Concussion among female middle-school soccer players. *JAMA Pediatr* 168: 258-264, 2014. doi: 10.1001/jamapediatrics.2013.4518.
 - 19) Comstock RD, Currie DW, Pierpoint LA, Grubenhoff JA, Fields SK. An Evidence-Based Discussion of Heading the Ball and Concussions in High School Soccer. *JAMA Pediatr* 169: 830-837, 2015. doi: 10.1001/jamapediatrics.2015.1062.
 - 20) McCrory P, Meeuwisse W, Johnston K, Dvorak J, Aubry M, Molloy M, Cantu R. Consensus statement on Concussion in Sport 3rd International Conference on Concussion in Sport held in Zurich, November 2008. *Clin J Sport Med* 19: 185-200, 2009. doi: 10.1097/JSM.0b013e3181a501db.
 - 21) Di Virgilio TG, Hunter A, Wilson L, Stewart W, Goodall S, Howatson G, Donaldson DI, Ietswaart M. Evidence for Acute Electrophysiological and Cognitive Changes Following Routine Soccer Heading. *EBioMedicine* 13: 66-71, 2016. doi: 10.1016/j.ebiom.2016.10.029.
 - 22) Pearce AJ, Hoy K, Rogers MA, Corp DT, Davies CB, Maller JJ, Fitzgerald PB. Acute motor, neurocognitive and neurophysiological change following concussion injury in Australian amateur football. A prospective multimodal investigation. *J Sci Med Sport* 18: 500-506, 2015. doi: 10.1016/j.jsams.2014.07.010.
 - 23) Major BP, Rogers MA, Pearce AJ. Using transcranial magnetic stimulation to quantify electrophysiological changes following concussive brain injury: a systematic review. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 42: 394-405, 2015. doi: 10.1111/1440-1681.12363.
 - 24) Miller NR, Yassen AL, Maynard LF, Chou LS, Howell DR, Christie AD. Acute and longitudinal changes in motor cortex function following mild traumatic brain injury. *Brain Inj* 28: 1270-1276, 2014. doi: 10.3109/02699052.2014.915987.
 - 25) Chen R, Lozano AM, Ashby P. Mechanism of the silent period following transcranial magnetic stimulation. Evidence from epidural recordings. *Exp Brain Res* 128: 539-542, 1999. doi: 10.1007/s002210050878.
 - 26) Herrmann M, Curio N, Jost S, Wunderlich MT, Synowitz H, Wallesch CW. Protein S-100B and neuron specific enolase as early neurobiochemical markers of the severity of traumatic brain injury. *Restor Neurol Neurosci* 14: 109-114, 1999.
 - 27) Mussack T, Dvorak J, Graf-Baumann T, Jochum M. Serum S-100B protein levels in young amateur soccer players after controlled heading and normal exercise. *Eur J Med Res* 8: 457-464, 2003.
 - 28) Stålnacke BM, Tegner Y, Sojka P. Playing soccer increases serum concentrations of the biochemical markers of brain damage S-100B and neuron-specific enolase in elite players: a pilot study. *Brain Inj* 18: 899-909, 2004. doi: 10.1080/02699050410001671865.
 - 29) Stålnacke BM, Ohlsson A, Tegner Y, Sojka P. Serum concentrations of two biochemical markers of brain tissue damage S-100B and neurone specific enolase are increased in elite female soccer players after a competitive game. *Br J Sports Med* 40: 313-316, 2006. doi: 10.1136/bjsm.2005.021584.
 - 30) Straume-Naesheim TM, Andersen TE, Jochum M, Dvorak J, Bahr R. Minor head trauma in soccer and serum levels of S100B. *Neurosurgery* 62: 1297-1306, 2008. doi: 10.1227/01.neu.0000333301.34189.3d.
 - 31) Tremblay S, Pascual-Leone A, Théoret H. A review of the effects of physical activity and sports concussion on brain function and anatomy. *Int J Psychophysiol* 132: 167-175, 2018. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2017.09.005.
 - 32) 横堀将司, 山口昌紘, 藤木 悠, 五十嵐 豊, 橋詰哲広, 井上泰豪, 恩田秀賢, 布施 明, 横田裕行: 頭部外傷におけるバイオマーカーの有用性と今後の展望, 脳神経外科ジャーナル, 23: 973-980, 2014. doi: 10.7887/jcns.23.973.
 - 33) Wirsching A, Chen Z, Bevilacqua ZW, Huibregtse ME, Kawata K. Association of Acute Increase in Plasma Neurofilament Light with Repetitive Subconcussive Head Impacts: A Pilot Randomized Control Trial. *J Neurotrauma* 36: 548-553, 2019. doi: 10.1089/neu.2018.5836.
 - 34) Wallace C, Smirl JD, Zetterberg H, Blennow K, Bryk K, Burma J, Dierick J, Wright AD, van Donkelaar P. Heading in soccer increases serum neurofilament light protein and SCAT3 symptom metrics. *BMJ Open Sport Exerc Med* 4: e000433, 2018. doi: 10.1136/bmjsem-2018-000433.
 - 35) Ost M, Nylén K, Csajbok L, Ohrfelt AO, Tullberg M, Wikkelsö C, Nellgård P, Rosengren L, Blennow K, Nellgård B. Initial CSF total tau correlates with 1-year outcome in patients with traumatic brain injury. *Neurology* 67: 1600-1604, 2006. doi: 10.1212/01.wnl.0000242732.06714.0f.
 - 36) Braak H, Braak E. Neuropathological staging of Alzheimer-related changes. *Acta Neuropathol* 82: 239-259, 1991. doi: 10.1007/bf00308809.
 - 37) Katsumoto A, Takeuchi H, Tanaka F. Tau Pathology in Chronic Traumatic Encephalopathy and Alzheimer's Disease: Similarities and Differences. *Front Neurol* 10: 980, 2019. doi: 10.3389/fneur.2019.00980.
 - 38) Dale GE, Leigh PN, Luthert P, Anderton BH, Roberts GW. Neurofibrillary tangles in dementia pugilistica are

- ubiquitinated. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 54: 116–118, 1991. doi: 10.1136/jnnp.54.2.116.
- 39) Blennow K, Brody DL, Kochanek PM, Levin H, McKee A, Ribbers GM, Yaffe K, Zetterberg H. Traumatic Brain Injuries. *Nat Rev Dis Primers* 2: 16084, 2016. doi: 10.1038/nrdp.2016.84.
 - 40) Lee EB, Kinch K, Johnson VE, Trojanowski JQ, Smith DH, Stewart W. Chronic traumatic encephalopathy is a common co-morbidity, but less frequent primary dementia in former soccer and rugby players. *Acta Neuropathol* 138: 389–399, 2019. doi: 10.1007/s00401-019-02030-y.
 - 41) Sandmo SB, Filipcik P, Cente M, Hanes J, Andersen TE, Straume-Naesheim TM, Bahr R. Neurofilament light and tau in serum after head-impact exposure in soccer. *Brain Inj* 34: 602–609, 2020. doi: 10.1080/02699052.2020.1725129.
 - 42) Cheng JS, Craft R, Yu GQ, Ho K, Wang X, Mohan G, Mangnitsky S, Ponnusamy R, Mucke L. Tau reduction diminishes spatial learning and memory deficits after mild repetitive traumatic brain injury in mice. *PLoS ONE* 9: e115765, 2014. doi: 10.1371/journal.pone.0115765.
 - 43) Rosenmann H. Immunotherapy for targeting tau pathology in Alzheimer's disease and tauopathies. *Curr Alzheimer Res* 10: 217–228, 2013. doi: 10.2174/1567205011310030001.
 - 44) McKee AC, Stern RA, Nowinski CJ, Stein TD, Alvarez VE, Daneshvar DH, Lee HS, Wojtowicz SM, Hall G, Baugh CM, Riley DO, Kubitius CA, Cormier KA, Jacobs MA, Martin BR, Abraham CR, Ikezu T, Reichard RR, Wolozin BL, Budson AE, Goldstein LE, Kowall NW, Cantu RC. The spectrum of disease in chronic traumatic encephalopathy. *Brain* 136: 43–64, 2013. doi: 10.1093/brain/aws307.
 - 45) Shively S, Scher AI, Perl DP, Diaz-Arrastia R. Dementia resulting from traumatic brain injury: what is the pathology? *Arch Neurol* 69: 1245–1251, 2012. doi: 10.1001/archneurol.2011.3747.
 - 46) Sortland O, Tysvaer AT. Brain damage in former association football players: an evaluation by cerebral computed tomography. *Neuroradiology* 31: 44–48, 1989. doi: 10.1007/BF00342029.
 - 47) Koerte IK, Mayinger M, Muehlmann M, Kaufmann D, Lin AP, Steffinger D, Fisch B, Rauchmann BS, Immler S, Karch S, Heinen FR, Ertl-Wagner B, Reiser M, Stern RA, Zafonte R, Shenton ME. Cortical thinning in former professional soccer players. *Brain Imaging Behav* 10: 792–798, 2016. doi: 10.1007/s11682-015-9442-0.
 - 48) Harriss A, Walton DM, Dickey JP. Direct player observation is needed to accurately quantify heading frequency in youth soccer. *Res Sports Med* 26: 191–198, 2018. doi: 10.1080/15438627.2018.1431534.
 - 49) Jordan SE, Green GA, Galanty HL, Mandelbaum BR, Jabour BA. Acute and Chronic Brain Injury in United States National Team Soccer Players. *Am J Sports Med* 24: 205–210, 1996. doi: 10.1177/036354659602400216.
 - 50) Chrisman SP, Mac Donald CL, Friedman S, Andre J, Rowhani-Rahbar A, Drescher S, Stein E, Holm M, Evans N, Poliakov AV, Ching RP, Schwien CC, Vavilala MS, Rivara FP. Head Impact Exposure During a Weekend Youth Soccer Tournament. *J Child Neurol* 31: 971–978, 2016. doi: 10.1177/0883073816634857.
 - 51) Kemp S, Duff A, Hampson N. The Neurological, Neuroimaging and Neuropsychological Effects of Playing Professional Football: Results of the UK Five-Year Follow-Up Study. *Brain Inj* 30: 1068–1074, 2016. doi: 10.3109/02699052.2016.1148776.
 - 52) Rutherford A, Stephens R, Fernie G, Potter D. Do UK university football club players suffer neuropsychological impairment as a consequence of their football (soccer) play? *J Clin Exp Neuropsychol* 31: 664–681, 2009. doi: 10.1080/13803390802484755.
 - 53) Stephens R, Rutherford A, Potter D, Fernie G. Neuropsychological consequence of soccer play in adolescent U.K. School team soccer players. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci* 22: 295–303, 2010. doi: 10.1176/jnp.2010.22.3.295.
 - 54) Matser JT, Kessels AG, Jordan BD, Lezak MD, Troost J. Chronic traumatic brain injury in professional soccer players. *Neurology* 51: 791–796, 1998. doi: 10.1212/wnl.51.3.791.
 - 55) Matser EJ, Kessels AG, Lezak MD, Jordan BD, Troost J. Neuropsychological impairment in amateur soccer players. *JAMA* 282: 971–973, 1999. doi: 10.1001/jama.282.10.971.
 - 56) Vann Jones SA, Breakey RW, Evans PJ. Heading in football, long-term cognitive decline and dementia: evidence from screening retired professional footballers. *Br J Sports Med* 48: 159–161, 2014. doi: 10.1136/bjsports-2013-092758.
 - 57) Guskiewicz KM, Marshall SW, Broglio SP, Cantu RC, Kirkendall DT. No evidence of impaired neurocognitive performance in collegiate soccer players. *Am J Sports Med* 30: 157–162, 2002. doi: 10.1177/03635465020300020201.
 - 58) Zhang MR, Red SD, Lin AH, Patel SS, Sereno AB. Evidence of cognitive dysfunction after soccer playing with ball heading using a novel tablet-based approach. *PLoS ONE* 8: e57364, 2013. doi: 10.1371/journal.pone.0057364.
 - 59) Kontos AP, Dolese A, Elbin RJ, Covassin T, Warren BL. Relationship of soccer heading to computerized neurocognitive performance and symptoms among female and male youth soccer players. *Brain Inj* 25: 1234–1241, 2011. doi: 10.3109/02699052.2011.608209.
 - 60) Forbes CR, Glutting JJ, Kaminski TW. Examining neurocognitive function in previously concussed interscholastic female soccer players. *Appl Neuropsychol Child* 5: 14–24, 2016. doi: 10.1080/21622965.2014.933108.
 - 61) Putukian M, Echemendia RJ, Chiampas G, Dvorak J, Mandelbaum B, Lemak LJ, Kirkendall D. Head Injury in Soccer: From Science to the Field; summary of the

- head injury summit held in April 2017 in New York City, New York. *Br J Sports Med* 53: 1332, 2019. doi: 10.1136/bjsports-2018-100232.
- 62) Tarnutzer AA, Straumann D, Brugger P, Feddermann-Demont N. Persistent effects of playing football and associated (subconcussive) head trauma on brain structure and function: a systematic review of the literature. *Br J Sports Med* 51: 1592-1604, 2017. doi: 10.1136/bjsports-2016-096593.
 - 63) Stewart WF, Kim N, Ifrah C, Sliwinski M, Zimmerman ME, Kim M, Lipton RB, Lipton ML. Heading Frequency Is More Strongly Related to Cognitive Performance Than Unintentional Head Impacts in Amateur Soccer Players. *Front Neurol* 9: 240, 2018. doi: 10.3389/fneur.2018.00240.
 - 64) Levitch CF, Zimmerman ME, Lubin N, Kim N, Lipton RB, Stewart WF, Kim M, Lipton ML. Recent and Long-Term Soccer Heading Exposure Is Differentially Associated With Neuropsychological Function in Amateur Players. *J Int Neuropsychol Soc* 24: 147-155, 2018. doi: 10.1017/S1355617717000790.
 - 65) Deshpande SK, Hasegawa RB, Rabinowitz AR, Whyte J, Roan CL, Tabatabaei A, Baiocchi M, Karlawish JH, Master CL, Small DS. Association of Playing High School Football With Cognition and Mental Health Later in Life. *JAMA Neurol* 74: 909-918, 2017. doi: 10.1001/jamaneurol.2017.1317.
 - 66) Kontos AP, Braithwaite R, Chrisman SPD, McAllister-Deitrick J, Symington L, Reeves VL, Collins MW. Systematic review and meta-analysis of the effects of football heading. *Br J Sports Med* 51: 1118-1124, 2017. doi: 10.1136/bjsports-2016-096276.
 - 67) Randolph C, Millis S, Barr WB, McCrea M, Guskiewicz KM, Hammeke TA, Kelly JP. Concussion symptom inventory: an empirically derived scale for monitoring resolution of symptoms following sport-related concussion. *Arch Clin Neuropsychol* 24: 219-229, 2009. doi: 10.1093/arclin/acp025.
 - 68) Janda DH, Bir CA, Cheney AL. An evaluation of the cumulative concussive effect of soccer heading in the youth population. *Inj Control Saf Promot* 9: 25-31, 2002. doi: 10.1076/icsp.9.1.25.3324.
 - 69) Barnes BC, Cooper L, Kirkendall DT, McDermott TP, Jordan BD, Garrett WE Jr. Concussion history in elite male and female soccer players. *Am J Sports Med* 26: 433-438, 1998. doi: 10.1177/03635465980260031601.
 - 70) Salinas CM, Webbe FM, Devore TT. The epidemiology of soccer heading in competitive youth players. *J Clin Sport Psychol* 3: 15-33, 2009. doi: 10.1123/jcsp.3.1.15.
 - 71) Kaminski TW, Thompson A, Wahlquist VE, Glutting J. Self-reported head injury symptoms exacerbated in those with previous concussions following an acute bout of purposeful soccer heading. *Res Sports Med* 28: 217-230, 2020. doi: 10.1080/15438627.2019.1635130.
 - 72) Bramley H, Patrick K, Lehman E, Silvis M. High school soccer players with concussion education are more likely to notify their coach of a suspected concussion. *Clin Pediatr (Phila)* 51: 332-336, 2012. doi: 10.1177/0009922811425233.
 - 73) ASTM International. Standard specification for headgear used in soccer. West Conshohocken: ASTM International, 2011.
 - 74) Withnall C, Shewchenko N, Wonnacott M, Dvorak J. Effectiveness of headgear in football. *Br J Sports Med* 39 Suppl 1: i40-i48, 2005. doi: 10.1136/bjsm.2005.019174.
 - 75) Naunheim RS, Ryden A, Standeven J, Genin G, Lewis L, Thompson P, Bayly P. Does soccer headgear attenuate the impact when heading a soccer ball? *Acad Emerg Med* 10: 85-90, 2003. doi: 10.1111/j.1553-2712.2003.tb01983.x.
 - 76) Broglio SP, Ju YY, Broglio MD, Sell TC. The Efficacy of Soccer Headgear. *J Athl Train* 38: 220-224, 2003.
 - 77) Caccese JB, Kaminski TW. Minimizing Head Acceleration in Soccer: A Review of the Literature. *Sports Med* 46: 1591-1604, 2016. doi: 10.1007/s40279-016-0544-7.
 - 78) Tierney RT, Higgins M, Caswell SV, Brady J, McHardy K, Driban JB, Darvish K. Sex differences in head acceleration during heading while wearing soccer headgear. *J Athl Train* 43: 578-584, 2008. doi: 10.4085/1062-6050-43.6.578.
 - 79) Elbin RJ, Beatty A, Covassin T, Schatz P, Hydeman A, Kontos AP. A preliminary examination of neurocognitive performance and symptoms following a bout of soccer heading in athletes wearing protective soccer headbands. *Res Sports Med* 23: 203-214, 2015. doi: 10.1080/15438627.2015.1005293.
 - 80) Delaney JS, Al-Kashmiri A, Drummond R, Correa JA. The effect of protective headgear on head injuries and concussions in adolescent football (soccer) players. *Br J Sports Med* 42: 110-115, 2008. doi: 10.1136/bjsm.2007.037689.
 - 81) Niedfeldt MW. Head injuries, heading, and the use of headgear in soccer. *Curr Sports Med Rep* 10: 324-329, 2011. doi: 10.1249/JSR.0b013e318237be53.
 - 82) McGuine T, Post E, Pfaller AY, Hetzel S, Schwarz A, Brooks MA, Kliethermes SA. Does soccer headgear reduce the incidence of sport-related concussion? A cluster, randomised controlled trial of adolescent athletes. *Br J Sports Med* 54: 408-413, 2020. doi: 10.1136/bjsports-2018-100238.
 - 83) Caccese JB, Buckley TA, Tierney RT, Arbogast KB, Rose WC, Glutting JJ, Kaminski TW. Head and neck size and neck strength predict linear and rotational acceleration during purposeful soccer heading. *Sports Biomech* 17: 462-476, 2018. doi: 10.1080/14763141.2017.1360385.
 - 84) Peek K, Elliott JM, Orr R. Higher neck strength is associated with lower head acceleration during purposeful heading in soccer: A systematic review. *J Sci Med Sport* 23: 453-462, 2020. doi: 10.1016/j.jsams.2019.11.004.
 - 85) Gutierrez GM, Conte C, Lightbourne K. The relationship between impact force, neck strength, and neurocognitive performance in soccer heading in adoles-

- cent females. *Pediatr Exerc Sci* 26: 33-40, 2014. doi: 10.1123/pes.2013-0102.
- 86) Tierney RT, Sitler MR, Swanik CB, Swanik KA, Higgins M, Torg J. Gender differences in head-neck segment dynamic stabilization during head acceleration. *Med Sci Sports Exerc* 37: 272-279, 2005. doi: 10.1249/01.mss.0000152734.47516.aa.
 - 87) Kirkendall DT, Jordan SE, Garrett WE. Heading and head injuries in soccer. *Sports Med* 31: 369-386, 2001. doi: 10.2165/00007256-200131050-00006.
 - 88) Becker S, Berger J, Backfisch M, Ludwig O, Kelm J, Fröhlich M. Effects of a 6-Week Strength Training of the Neck Flexors and Extensors on the Head Acceleration during Headers in Soccer. *J Sports Sci Med* 18: 729-737, 2019.
 - 89) Mansell J, Tierney RT, Sitler MR, Swanik KA, Stearne D. Resistance training and head-neck segment dynamic stabilization in male and female collegiate soccer players. *J Athl Train* 40: 310-319, 2005.
 - 90) Lamond LC, Caccese JB, Buckley TA, Glutting J, Kaminski TW. Linear Acceleration in Direct Head Contact Across Impact Type, Player Position, and Playing Scenario in Collegiate Women's Soccer Players. *J Athl Train* 53: 115-121, 2018. doi: 10.4085/1062-6050-90-17.
 - 91) Caccese JB, Lamond LC, Buckley TA, Kaminski TW. Reducing purposeful headers from goal kicks and punts may reduce cumulative exposure to head acceleration. *Res Sports Med* 24: 407-415, 2016. doi: 10.1080/15438627.2016.1230549.
 - 92) Koerte IK, Nichols E, Tripodis Y, Schultz V, Lehner S, Igbinoba R, Chuang AZ, Mayinger M, Klier EM, Muehlmann M, Kaufmann D, Lepage C, Heinen F, Schulte-Körne G, Zafonte R, Shenton ME, Sereno AB. Impaired Cognitive Performance in Youth Athletes Exposed to Repetitive Head Impacts. *J Neurotrauma* 34: 2389-2395, 2017. doi: 10.1089/neu.2016.4960.
 - 93) Harriss A, Johnson AM, Walton DM, Dickey JP. Head impact magnitudes that occur from purposeful soccer heading depend on the game scenario and head impact location. *Musculoskelet Sci Pract* 40: 53-57, 2019. doi: 10.1016/j.msksp.2019.01.009.
 - 94) Punnoose AR. Study raises concerns about "heading" in soccer, but jury is still out on risks. *JAMA* 307: 1012-1014, 2012. doi: 10.1001/jama.2012.231.
 - 95) Beaudouin F, Gioftsidou A, Larsen MN, Lemmink K, Drust B, Modena R, Espinola JR, Meiu M, Vouillamoz M, Meyer T. The UEFA Heading Study: Heading incidence in children's and youth' football (soccer) in eight European countries. *Scand J Med Sci Sports* 26, 2020. doi: 10.1111/sms.13694.
 - 96) O'Kane JW. Is Heading in Youth Soccer Dangerous Play? *Phys Sportsmed* 44: 190-194, 2016. doi: 10.1080/00913847.2016.1149423.