

厚生労働行政推進調査事業費補助金（化学物質リスク研究事業）
分担総合研究報告書

人工芝グラウンド用ゴムチップの健康リスク評価に関する研究

ゴムチップ関連物質の有害性 / 許容値評価

研究分担者	井上 薫	国立医薬品食品衛生研究所	安全性予測評価部	室長
研究協力者	吉田喜久雄	国立医薬品食品衛生研究所	安全性予測評価部	
	広瀬明彦	国立医薬品食品衛生研究所	安全性予測評価部	部長

研究要旨

国内で用いられている人工芝用ゴムチップ中の化学物質の健康リスクを評価することを目的として、既存の情報（先行研究及び欧州の関連研究報告）に基づく暫定的リスク評価及び日本人サッカー競技者を対象とした健康リスク評価を実施した。はじめに、先行研究により発がん性の懸念ありとされた 37 物質を対象に、米国有害物質疾病登録局（ATSDR）、日本産業衛生学会の許容濃度等の勧告等を対象に調査し、31 物質の許容濃度や参照用量等を得た。また、後に行う曝露量推定の参考とするため、ノルウェー及びオランダにより報告された人工芝ゴムチップ関連物質の曝露シナリオや曝露量の推定法について調査し、情報を得た。さらに、暫定リスク評価を実施するため、ノルウェーの曝露シナリオ及び先行研究により得たゴムチップ中多環芳香族炭化水素類（PAHs）16 化合物の濃度データを利用し、大人への経皮曝露を想定した曝露量推定と発がんリスク評価を実施した結果、各物質の発がんリスクは 10^{-5} より十分に低いことを確認した。国内運動場で使用されているゴムチップ中に含まれる揮発性有機化合物（VOCs）、金属、準揮発性有機化合物（SVOCs）に関するリスク評価については、まず、対象物質の経口及び吸入経路各々の許容値について調査した。本研究でのサッカー競技者を想定した曝露シナリオは、対象とする競技者を小学生（低学年または高学年）、中学生、高校生、大学生および大人の 6 年齢群と設定し、各年齢群の体重、年間活動日数、一日当たりの活動時間、年間の総活動時間等を設定した。曝露量として、他の分担研究により得た測定値を用いて、平均一日経口摂取量及び平均一日経皮摂取量並びに平均一日曝露濃度を求めた。許容値が得られた物質については、曝露量が許容値より十分低いことを確認するため、各曝露量を許容値で除してハザード比を求めた。今回、人工芝グラウンドのゴムチップに関連する測定値、及び先行研究で用いたゴムチップ製品の測定値を用いた解析では、許容値を得られたほぼ全ての物質は、いずれの曝露シナリオにおいてもハザード比は 1 未満であった。また、一部の曝露シナリオでハザード比が 1 を超えた物質についても、より現実的なシナリオによる評価あるいは毒性機序等に基づく検討の結果、これらの化学物質が日本人サッカー競技者に対し健康影響を及ぼす可能性は低いと判断した。以上より、

評価対象とした化学物質のうち、許容値を得ることができた人工芝ゴムチップ由来化学物質については、日本人サッカー競技者に対し、発がん性や刺激性を含む健康リスクに関する懸念は十分低いことが確認できた。なお、許容値を得ることができなかった対象物質については、リスク評価の対象外とした。

A．研究目的

国内で用いられている人工芝用ゴムチップ中の化学物質の健康リスクを評価することを目的として、平成29年度は、リスク評価に必要な情報を得るために、先行研究により「発がん性の懸念あり」と判断された37物質を対象に、耐容一日摂取量等を調査した。また、一部の物質については、試験的に既存の曝露情報から暫定リスク評価を行った。平成30年度は、日本人サッカー競技者を対象とした独自の年齢群別曝露シナリオを設定し、先行研究で用いたゴムチップ製品及び国内運動場において実際に使われているゴムチップに含まれる物質について曝露量を求め、それらの値を許容濃度や参照用量及び実質安全量等（以下、許容値）と比較することにより、人工芝用ゴムチップ中の化学物質に関する健康リスク評価を実施した。

B．研究方法

1．耐容一日摂取量等の調査

先行研究において、人工芝グラウンドで検出される、あるいは検出される可能性のある126物質について、それらの健康有害性情報を収集し、主に発がん性について評価結果を分類した。その結果、37物質(29%)が「発がん性に関して懸念あり」判断された。本研究では、これら37物質を対象に、

国内外のリスク評価機関等から公表されている耐容一日摂取量等を調査した。

調査の対象とした情報源は、以下の通り：

- ・米国産業衛生専門官会議 (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGHI)
- ・米国有害物質疾病登録局 (ATSDR)
- ・米国環境保護庁 (EPA)
- ・FAO/WHO合同食品添加物専門家委員会 (FAO/WHO Joint Expert Committee on Food Additives, JECFA)
- ・FAO/WHO合同残留農薬専門家会議 (JMPR)
- ・日本産業衛生学会 (2017年度) 許容濃度等の勧告
- ・食品安全委員会

2．海外のリスク評価機関における人工芝ゴムチップ関連物質の曝露量推定法に関する調査

現時点で入手可能な人工芝ゴムチップ関連物質の曝露量推定に関する既存の報告書は、オランダ国立公衆健康環境研究所 (RIVM) による報告書 Assessment of the product limit for PAHs in rubber articles

The case of shock-absorbing tiles (RIVM Report 2016-0184) とノルウェー公衆衛生研究所及びラジウム病院による報告書 Artificial turf pitches – an assessment of the health risks for football players

(2016)がある。本研究では、人工芝グラウンドにおいて運動した場合の曝露シナリオ及び曝露量推定法について各々の報告書から情報収集した。

3. ゴムチップ中多環芳香族炭化水素類 (PAHs) 濃度に基づく暫定リスク評価

先行研究において、国内で流通している人工芝用ゴムチップを入手し、金属類、多環芳香族炭化水素類 (PAHs)、ゴム添加剤及び揮発性有機化合物 (VOCs) 等の分析を行い、ゴムチップ中の各種化合物濃度を測定した。本研究では、ノルウェーの報告書に基づき検討した結果、先行研究で得たゴムチップ中濃度のうち、PAHsについては経皮曝露を想定した曝露量の推定が試験的に可能であると判断し、曝露量の推定及び発がんリスク評価を暫定的に実施した。本検索では、先行研究において「発がん性の懸念あり」と判断された37物質に含まれ、ゴムチップ中濃度の測定値が報告された16種のPAHsを対象とした。PAHsのゴムチップ中濃度データは、先行研究で測定された濃度の最大値を用いた。また、曝露シナリオは、ノルウェーにより報告された経皮曝露によるシナリオ5を用いた。シナリオ5は、室内サッカー場で体重70 kgの成人(曝露皮膚面積 7100 cm²) が1回4時間のトレーニングを週5回、1回6時間の試合を週1回、年間6か月実施した場合を想定している。その他、曝露量推定のために考慮すべき項目についても、ノルウェーの報告書を参考にし、皮膚上に沈着する粒子/ダスト: 1 mg/cm²、週当たりの粒子/ダストへの曝露量: 7100 cm²/回 × 1 mg/cm² × 6回 = 42600 mg粒状ゴム/週、体重 1 kg当たりの粒子/ダストへの曝露量/

週: 42600 mg粒状ゴム/週 ÷ 70 kg = 608 mg/kg/週、体重1 kg当たりの粒子/ダストへの曝露量/日: 608 mg/kg/週 ÷ 7日/週 = 87 mg 粒子ゴム/kg/日、最大溶出係数: 粒子ゴム重量の0.06%として計算した。発がんリスクについては、今回の検索対象化合物の一つであるベンゾ[a]ピレンに関するEPAの最新の評価書Toxicological Review of Benzo[a]pyrene (2017)を参照し、年齢(16歳以上)及び競技人生(20年と仮定)を考慮して計算し、10⁻⁵リスクとの比較を行った。

4. リスク評価の対象とする物質の許容値の調査

各運動場から得たゴムチップサンプルを用いた解析及び先行研究による解析において、ゴムチップ中あるいは空気中の濃度の分析対象とした物質について、許容値の調査を実施した。調査は、経口及び吸入経路各々の許容値について、米国有害物質疾病登録局(ATSDR)、米国産業衛生専門家会議(ACGIH)、米国環境保護庁(EPA)、日本産業衛生学会の公表情報を中心に行い、情報収集した。対象とした物質には、先行研究により発がん性の懸念ありとされた37物質も含まれていたため、既に調査した許容値も活用した。

5. 日本人向け曝露シナリオの設定

日本人のサッカー競技者を対象とした独自の曝露シナリオを設定するため、はじめに、曝露評価の対象とする競技者を小学生(低学年)、小学生(高学年)、中学生、高校生、大学生および大人の6年齢群と設定した。対応する年齢はそれぞれ、6~9歳、9~12歳、12~15歳、15~18歳、18~22歳お

よび 22～35 歳となる。次に、各年齢群における体重、年間活動日数、一日当たりの活動時間、年間の総活動時間、呼吸量(平均呼吸量及び活動時の呼吸量)、ゴムチップ由来の PM₁₀ 濃度、人工芝との接触皮膚面積、活動時の皮膚へのゴム粒子付着量、ゴム粒子の直接経口摂取量について、公表されている情報を調査・収集した。得られた情報に基づき、各年齢群の曝露シナリオを設定した。この曝露シナリオは、各経路から曝露された対象物質が 100%吸収されると仮定する等、条件を過剰に見積もり、安全側のリスク評価が可能となるよう設定した。

6. 曝露量計算及びハザード比の算出

曝露量の計算は、経口、経皮、吸入経路毎に行った。経口経路の場合は平均一日経口摂取量、経皮曝露の場合は平均一日経皮摂取量、吸入曝露の場合は平均一日曝露濃度を求めた。各摂取量あるいは曝露濃度の計算式は以下の通り。

- ・平均一日経口摂取量($\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{day}$) = 活動時のゴム粒子の直接経口摂取量(g/day) × ゴム粒子からの最大溶出量($\mu\text{g}/\text{g}$) / 体重(kg bw) × 年間活動日数(day) / 年間の日数(day)
- ・平均一日経皮摂取量($\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{day}$) = 活動時の皮膚へのゴム粒子付着量(g/day) × ゴム粒子からの最大溶出量(汗)($\mu\text{g}/\text{g}$) / 体重(kg bw) × 年間活動日数(day) / 年間の日数(day)
- ・平均一日曝露濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$) = グラウンド上の空気中最大濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$) × 運動時呼吸量(m^3/hr) × 年間の総活動時間(hr) / 平均呼吸量(m^3/hr) / 年間の総時間(hr)

経口及び経皮曝露の場合は、各運動場から得たゴムチップサンプルから各物質が唾液、胃液及び腸液(経口)あるいは汗(経皮)へ溶出した量のうち、最大値を用いた。また、吸入曝露の場合は、各運動場から得たゴムチップサンプルの全量解析により得た濃度測定値(空気中濃度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: 20 の場合)のうち、最大値を用いた。また、濃度が定量下限値未満あるいは不検出で特定の数値を測定できなかった場合は、各物質の全量解析あるいは溶出試験における定量下限値を曝露量計算に用いた。

各計算における最大溶出濃度またはグラウンド上の空気中最大濃度以外の項目は、前述の年齢群毎の日本人サッカー競技者における曝露シナリオ設定で得た数値を用いた。

なお、本研究で設定した日本人の曝露シナリオによる曝露量計算の前に、RIVM (2007)により報告されたオランダ人サッカー競技者の人工芝ゴムチップの曝露シナリオに基づく曝露量の試算を行うことにより、曝露量計算方法の確認及びオランダ人シナリオに基づくリスク評価を行った。その結果、計算方法の妥当性を確認でき、オランダ人シナリオに基づいた場合は、各分析対象物質のリスクの懸念はないことを確認することができた。

○揮発性有機化合物 (VOCs)

揮発性有機化合物 (VOCs)は揮発した当該物質を吸入することによりヒトが曝露されるため、吸入経路による曝露シナリオに基づき曝露量計算(平均一日曝露濃度の算出)を行った。曝露量計算には、各運動場における各物質の測定値(空気中濃度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$:

20 の場合)のうち、最大値を用いて計算した。また、濃度が定量下限値未満で特定の数値を測定できなかった場合は、各物質の定量下限値を曝露量計算に用いた。なお、VOCs は空気中に揮発しない限りはヒトに曝露されないと考えられるため、先行研究で測定したゴムチップ中濃度のデータは曝露量の計算には用いなかった。許容値が得られた物質については、平均一日曝露濃度が許容値より十分低いかを確認するため、平均一日曝露濃度を許容値で除してハザード比を求めた。このとき用いた許容値は、収集した中で最も低い値を採用した。また、許容値が労働者曝露のために設定されたものであった場合(例: ACGIH の TLV-TWA、日本産業衛生学会の許容値)は、週 5 日 8 時間労働という条件下での許容値となるため、週 7 日 24 時間曝露と仮定した場合の一日当たりの値に換算し、健康な成人労働者と乳幼児や高齢者を含む一般人の間の影響への感受性の個人差の不確実性を考慮した係数 10 で除した値を、許容値として扱いハザード比を求めた。許容値が得られなかった物質については、平均一日曝露濃度を求めた。

○金属、準揮発性有機化合物 (SVOCs)

金属、準揮発性有機化合物 (SVOCs)は、経口、経皮、吸入すべての経路からヒトに曝露されるため、各々の経路の曝露シナリオに基づき曝露量計算(平均一日曝露濃度あるいは平均一日摂取量の算出)を行った。許容値が得られた物質については、リスク評価のために、VOCs と同様に、平均一日経口/経皮摂取量または平均一日曝露濃度を許容値で除してハザード比を求めた。この

とき用いた許容値は、収集した中で最も低い値を採用した。経皮経路の許容値については、多くの物質について既存の許容値がないため、経口経路の許容値を適用した。また、許容値が得られなかった物質については、平均一日曝露濃度を求めた。金属、SVOCs については、先行研究で得たゴムチップ製品サンプルを用いた全量分析または溶出試験により得た各物質の濃度を用いて、運動場サンプルと同様の曝露量計算及びハザード比の算出を行った。

○特定の物質について

・白血病あるいはリンパ腫を誘発することが知られる物質

オランダ RIVM の報告書において、白血病及びリンパ腫を誘発するスチレン、ベンゼン、2-メルカプトベンゾチアゾールについて言及しており、人工芝ゴムチップに由来するいずれの VOCs とこれら腫瘍発生について関連はないと結論づけている。本研究において、スチレン、ベンゼン、2-メルカプトベンゾチアゾールについて、解析対象としている。また、1,3-ブタジエンについても解析対象としているが、本物質もヒトに白血病を誘発することが知られる。そこで、本研究では、過剰発がん率が 10^{-5} の実質安全量(Virtually Safe Dose, VSD)と本研究で得られた上記物質の吸入曝露量とのハザード比を求め、当該腫瘍の発がん性に関するリスク評価を行った。

過剰発がん率が 10^{-5} の VSD については、米国 EPA の Integrated Risk Information System (IRIS) 及び米国ミシガン州の MDEQ (Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy)

が公表している CHEMICAL UPDATE WORKSHEET(Revision Date: September 16, 2015) を調査した。VSD を得られなかった場合は、ユニットリスク UR(ある有害物質の単位曝露量 (吸入曝露では $1\mu\text{g}/\text{m}^3$) にヒトが生涯にわたって曝露されたときに被ると思われる 特定の健康被害の起こる確率) を調査し、 10^{-5} を UR で除すことにより VSD を求めた。そして、本研究で得られた対象物質の平均一日曝露濃度を、得られた VSD で除し、ハザード比を求めた。本来、発がんリスクを評価する場合は、生涯平均一日曝露濃度(生涯 70 年とする) を求めてハザード比を導出するが、本研究では、サッカーは生涯しないこと、生涯平均一日曝露濃度は平均一日曝露濃度よりも小さくなることから、ハザード比の導出には本研究で得られた平均一日曝露濃度を用いた。

・水銀

先行研究におけるゴムチップ製品中の濃度分析において、材質がエチレン・プロピレン・ジエンゴム (EPDM) であったサンプルから水銀が比較的高濃度で検出された。そこで、EPDM に含まれる水銀の最高濃度 ($0.064\ \mu\text{g}/\text{g}$: 先行研究報告書 25 ページ表 6 より) を用いて、経口、経皮、吸入経路の曝露量計算を行った。経口及び経皮経路については、溶出試験による測定値が必要であるが、先行研究のゴムチップ製品を用いた全量分析により検出できた水銀量が微量であったため、溶出試験を実施しても検出されないと判断し、溶出試験は実施しなかった。したがって、経口及び経皮経路の曝露量の計算には、ゴムチップから全量溶出したと仮定して、全量分析の測定値である

$0.064\ \mu\text{g}/\text{g}$ を用いた。また、他の物質と同様、平均一日曝露量等を許容値で除して、各経路の曝露によるハザード比を求めた。

・刺激性物質

ECHA による報告書 AN EVALUATION OF THE POSSIBLE HEALTH RISKS OF RECYCLED RUBBER GRANULES USED AS INFILL IN SYNTHETIC TURF SPORTS FIELDS (2017) において、室内競技場ではゴムチップから放散する VOCs の濃度は気道・目・皮膚に対する刺激性を示す可能性があることが報告されており、物質例としてメチルイソブチルケトン、ホルムアルデヒド、アセトンが挙げられていた。そこで、本研究では、刺激性が懸念される上記 3 物質及びベンゾチアゾール、2-メルカプトベンゾチアゾールを対象物質に、刺激性に関するリスク評価を試みた。具体的には、各運動場にて測定された対象 5 物質の空气中濃度のうち最大値を確認した。また、刺激性を評価するための許容値である the Protective Action Criteria (PAC)* 値を各物質について調べ、各物質の最大空气中濃度を PAC-1 値で除したハザード比を求めた。

*米国エネルギー省 (DOE) の OFFICE of ENVIRONMENT, HEALTH, SAFETY & SECURITY が公表。事故等で突発的な有害化学物質の曝露事象が生じた場合、緊急対応として適切な防護措置を講じることができるよう設定された化学的防護基準値 (PAC)。PAC には、急性曝露ガイドラインレベル (AEGL)、緊急時対応計画ガイドライン (ERPG)、一時的緊急曝露限界レベル (TEEL) があり、本研究で

調査した PAC-1 値は、AEGL-1、 ERPG-1、 or TEEL-1 に基づく。PAC-1 値は、大気中濃度 (ppm または mg/m³) で示され、その値を超えると、感受性が高い人を含む一般人が、著しい不快感、刺激性または無症候で自覚しないレベルの影響を受けると考えられている。ただし、PAC-1 のレベルでは、人に認められる影響は一時的で可逆性がある。

以上の各物質に関する検討において、ハザード比が 1 を超えた物質については、より現実的なシナリオによる評価あるいは毒性機序等に基づいた詳細評価を行うこととした。

(倫理面への配慮)

本研究に、研究対象者に対する人権擁護上の配慮、不利益・危険性の排除や説明と同意(インフォームド・コンセント)への対応及び実験動物に対する動物愛護上の配慮等を必要とする内容は含まれていない。

C . 研究結果

1 . 耐容一日摂取量等の調査

調査結果を表1に示す。先行研究で発がん性に関し「懸念あり」と判断された37物質について調査した結果、産業衛生上の許容濃度 (ACGIHのTLV-TWA及び日本産業衛生学会の許容濃度等)を確認できたのは、14物質であった。また、経口または吸入経路の亜慢性～慢性曝露による反復投与毒性試験等の無毒性量等を根拠とした最小リスクレベル(MRL)あるいは参照用量/濃度(Reference dose, RfD または Reference concentration, RfC)等を調査した結果、対象とした情報源から37物質中31物質につ

て情報を得ることができた。ベンツ[a]アントラセン、ベンゾ[a]ピレン、ベンゾ[b]フルオランテン、ベンゾ[e]ピレン、ベンゾ[ghi]ペリレン、ベンゾ[k]フルオランテン、クリセン、フルオランテン、フルオレン、フェナントレン、ピレン、ベンゾ[j]フルオランテンについては、ATSDRにおいては多環芳香族炭化水素類 (PAHs)として一括して許容値が示されていた。MRLあるいはRfD/RfCについては、多くが非発がん影響を根拠とした無毒性量等を基に設定されていた。今回の調査で許容値の情報が得られなかったのは、6物質であった。

2 . 海外のリスク評価機関における人工芝ゴムチップ関連物質の曝露量推定法に関する調査

オランダ国立公衆健康環境研究所 (RIVM)による報告書 Assessment of the product limit for PAHs in rubber articles The case of shock-absorbing tiles (RIVM Report 2016-0184)

本報告書では、子供(2～12歳)を対象として、主に多環芳香族炭化水素類の経皮及び経口曝露によるシナリオ及び曝露量の推定が報告されていた。経皮曝露については、競技場のゴムタイルからのPAHへの子供の外部及び内部皮膚曝露量を導出するために3種の方法を比較し、拡散法が最も概念的に現実的なモデルであると判断していた。本報告書では、拡散法による曝露量評価は、ConsExpo(ソフトウェア)に搭載された皮膚拡散モデルにより、ゴムチップの皮膚への接触による経皮曝露を想定したPAH量の推定 (Delmaarら, 2005) が可能としてい

る。拡散法を用いた経皮曝露の計算は、タイルとの接触期間、タイル中のPAHの拡散係数、接触面積およびタイルの厚みに関する情報を必要とすることが示されていた。本報告書における曝露量計算に用いた各パラメーターは、以下の通り。

- ・ゴムタイル中PAH濃度：0.8、4、8 mg/kg
- ・競技場を訪問する頻度と期間：週5日、一日2時間（全年齢群に対して）。直接の皮膚接触は手（両素手）と仮定し、年間を通して261日、さらに気温20度を超える日数の平均93日間は、素足と脚も皮膚接触することを想定した。
- ・手、足、脚との接触時間：7.2分/時間（手または脚とタイルの接触時間）
- ・接触面積：11-13歳（体重44.8 kg）の場合、手0.064、脚0.421、足0.095 m²。ただし、曝露量計算の際は、実際のゴムチップとの接触部位が明らかではないので2で割る。
- ・タイルの厚さ：40 mm
- ・タイル中のPAHs拡散係数：10⁻¹¹ m²/s
- ・経皮吸収率：20%

経口曝露については、5歳までの子供に起こりうる曝露の要因として、経皮曝露後に手の皮膚上に存在するPAHの手から口への移動により起こる可能性を含めた検討をしていた。また、曝露量計算に必要なパラメーターについては、経口吸収率：30%、手から口への移行率：50%としていた。

一方、吸入曝露については、PAHsの揮発に関する情報が限定的であること、ノルウェーの研究により室内運動場での粒状ゴムから揮発するベンゾ[a]ピレン（BaP）の屋内空气中濃度がBaPの屋内空气中濃度限界

より低いことが明らかになったこと等を根拠に、吸入経路（粒子に結合したPAHの吸入を含む）を評価から除外していた。

経皮及び経口曝露の場合の、上記各パラメーターを用いた各年齢群におけるPAH曝露量の推定結果については、表2の通りであった。

ノルウェー公衆衛生研究所及びラジウム病院による報告書Artificial turf pitches – an assessment of the health risks for football players(2016)

本報告書からは、主に曝露シナリオについて情報を収集した。

ノルウェーの研究では、曝露経路毎（経皮、吸入及び経口）によるシナリオが設定されていた。さらに、人工芝グラウンドでのトレーニング・セッションと試合に対して、年齢群毎に4種類のシナリオタイプ：大人（20歳以上）、ジュニア（16～19歳）、年長の子供（12～15歳）および子供（7～11歳）が用いられた。曝露時間と活動の種類（トレーニングまたは試合）は、ノルウェー国内の4か所のスポーツホールで得られた情報に基づいていた。子供については、調査した競技場の使用状況に基づき、試合及びトレーニングをするパターンとトーナメント方式で試合をするパターンが示されていた。

ノルウェーの曝露シナリオ 12 パターンを表3に示す。吸入経路については、シナリオ1～4bの計5種が報告されていた。吸入容積は、トレーニング及び試合中の最も激しい運動を想定し設定されていた。経皮曝露（皮膚接触）については、シナリオ5～8bの計5種が報告されていた。各年齢群の曝露皮膚面積は、大人が曝露される皮膚面

積を：足（2070 cm² の 25%）、腿（1980 cm²）、腕（2570 cm²）、手（840 cm²）、頭（顔，1180 cm²）、全体で約 7100 cm² とし、体表面積が体重とほぼ相関すると仮定した場合の数値が用いられていた。また、皮膚からの吸収率は、より低い皮膚取り込みレベルが妥当（例えば、フタル酸エステルの場合 5%）という明確な証拠がない場合は、100% 吸収されるというワーストケースが用いられていた。経皮曝露量の計算に必要な皮膚上に沈着した粒子の量（mg/cm²）については、1.0 mg/cm² としていた。経口摂取については、シナリオ 9a および 9b の計 2 種が報告されていた。これらは、子供が試合又はトレーニング中に口に入った 1 g のゴムチップを噛んで飲み込み、100% が消化器官で吸収されたと仮定したシナリオであった。

3 . ゴムチップ中多環芳香族炭化水素類（PAHs）濃度に基づく暫定リスク評価

ノルウェーにより報告された経皮曝露による曝露シナリオ 5 を用い、先行研究において「発がん性の懸念あり」と判断された PAHs 16 物質を対象に、経皮曝露を想定した曝露量の推定を試験的に実施した。その結果を表 4 に示す。各化学物質の推定曝露量（ng/kg BW/day）は、0.016（ベンゾ[c]フルオレン）～1.957（ピレン）であった。また、年齢を考慮した発がんリスクは、最大で 2.8×10^{-7} （ピレン）、IARC による発がん分類が 1 であるベンゾ[a]ピレンは 2.1×10^{-8} であった。また、全物質の発がんリスクの合計は 7.0×10^{-7} であった。これらの値は、 10^{-5} 発がんリスクより十分低かった。

4 . リスク評価の対象とする物質の許容値の調査

VOCs は、測定対象とした 53 化合物のうち分離測定できない *m*-キシレンと *p*-キシレン、及び 3-エチルトルエンと 4-エチルトルエンについては、それぞれをまとめて 1 化合物として扱った。金属類は、測定対象とした 28 元素のうち、人工芝グラウンドから採取したゴムチップ試料から検出できた 20 元素に As、Se を加えた 22 元素の許容値を調査した。PAHs を含む SVOCs は、測定対象とした 74 化合物すべてについて調査した。各物質の許容値の調査をした結果、許容値が得られた物質は、VOCs については 51 化合物中 34 化合物、PAHs は 32 化合物中 20 化合物、ゴム添加剤等は 42 化合物中 8 化合物、金属類は 22 元素中 17 元素であった。各物質における経口及び吸入経路の許容値のうち最小の値を、後述するハザード比の導出に用いた。

5 . 日本人向け曝露シナリオの設定

1) 体重

経口および経皮経由の化学物質の摂取量を推定する際に使用する体重は、平成 29 年国民健康・栄養調査（厚生労働省、2018）の結果から上記年齢群に属する各年齢の男女の平均体重の 25 パーセントイルの平均値とした。設定した年齢群別の体重を表 5 に示す。

2) 年間活動日数と 1 日当たりの活動時間

(1) 小学生（低学年）

この年齢群に関しては、年間の活動（練習・試合）日数について、まとまった情報が無かったため、国内の小学校低学年を対象

としたサッカースクール等のホームページを調査した。15か所のサッカークラブ等における1週間当たりの練習日数、1日当たりの練習時間に関する情報を収集した結果、練習頻度は週1~3日または月3~11回、1日当たり1~4時間、年間の総活動時間は36~442時間であることがわかった。したがって、本研究では、調査した中で年間の総時間が最も長い数値を示したサッカースクールの練習条件を採用した。その結果、本年齢群の練習頻度を週3回、1日当たりの活動時間を2.83時間(8.5時間/3日/週)、年間の活動(練習・試合)時間については442時間とした。

(2) 小学生(高学年)

年間の活動(練習・試合)日数は、下記のように1週間当たり4回の練習回数を設定したことから、208日(=52週/年×4日/週)と仮定した。

木村ら(2011)によれば、1週間当たりの練習回数は4回以上と回答者の6%超が答え、1回の練習時間を4時間以上と回答者の約25%が答えたと報告されていることから、1週間当たりの活動日数を4日、1日当たりの最大活動時間を4時間とした。

(3) 中学生

年間の活動(練習・試合)日数は、日曜日(計52日)夏休み3日および年末年始休暇4日の計59日を除く306日と仮定した。

日本スポーツ振興センター(2010)により、1週間当たりの活動日数は6日、1日当たりの最大活動時間は平日で2~3時間、休日で4~5時間と報告されていることから、1日当たりの最大活動時間を平日で3時間、休日で5時間とし、土日を除く平日の日数(261日)と土曜日の日数(52日)の時間

加重平均値(3.33時間)を活動日の平均活動時間とした。

なお、木村ら(2011)によれば、1週間当たりの練習回数を4回以上と回答者の90%超が答え、1回の練習時間を4時間以上と回答者の17%が答えたと報告されている。

(4) 高校生

年間の活動(練習・試合)日数は、日曜日(計52日)夏休み3日および年末年始休暇4日の計59日を除く306日と仮定した。

日本スポーツ振興センター(2010)により、1週間当たりの活動日数は6日、1日当たりの最大活動時間は平日で4時間以上、休日で5時間以上と報告されていることから、1日当たりの最大活動時間を平日で4時間、休日で5時間とし、土日を除く平日の日数(261日)と土曜日の日数(52日)の時間加重平均値(4.17時間)を活動日の平均活動時間とした。

なお、蘆田と古満(2016)によれば、平均練習時間は平日で約3時間、休日で約5時間であったと報告されている。

(5) 大学生

年間の活動(練習・試合)日数は、日曜日(計52日)夏休み3日および年末年始休暇4日の計59日を除く306日と仮定した。

アスリートプランニング(2015)により、アンケートに回答した学生の85%が1週間当たりの活動日数を6日と回答し、さらに、84%の学生が1日当たりの練習時間は4時間以内と回答したと報告されていることから、1日当たりの最大活動時間を4時間とした。

(6) 大人

年間の活動(練習・試合)日数は、日曜日(計52日)夏休み3日および年末年始休

暇 4 日の計 59 日を除く 306 日と仮定した。

プロサッカー選手について、松山ら (2015) により、1 日当たりの練習時間は 2.5 時間と報告されていることから、1 日当たりの最大活動時間を 2.5 時間とした。

各年齢群の年間の総活動時間は、年間活動日数と 1 日当たりの活動時間の積として計算した。設定した年齢群別の年間活動日数、1 日当たりの活動時間および年間の総活動時間を表 6 に示す。

3) 呼吸量

(1) 平均呼吸量

各年齢群の平均呼吸量 ($m^3/時$) は、体重 70 kg の人の一日呼吸量を $20 m^3$ とし、次式のように各年齢群の体重 (表 5) で補正して求めた。

$$\text{平均呼吸量} = 20 \times (\text{体重}/70)^{3/4}/24$$

(2) 活動時の呼吸量

以下に示す米国での年齢群別の高い活動時の呼吸量の 95 パーセンタイル値と体重データ (U.S. EPA, 2011) を基に上記の式により各年齢群の体重 (表 7) で補正して求めた。

Age Group, years	High Intensity, 95th percentile, m^3/h	Body weight, kg
6 ~ 11	3.54	31.8
11 ~ 16	4.20	56.8
16 ~ 21	4.38	71.6
21 ~ 31	4.56	80

4) ゴム由来の PM_{10} 濃度

人工芝競技場で日本人のプレーヤーが吸入し得るゴム由来の PM_{10} 濃度は、 $12 \mu g/m^3$ とした。この濃度は、ノルウェーの Manglerudhallen 屋内競技場で測定された PM_{10} 最高濃度の ($40 \mu g/m^3$) に PM_{10} に占めるゴム由来の割合 (30%) を乗じて得られた値である (Norwegian Institute of Public Health and the Radium Hospital, 2006)。オランダの RIVM (2017) も同じ濃度を彼らのリスク評価において使用している。

5) 人工芝との接触皮膚面積

(1) 体表面積と部位別体表面積

体表面積は、平成 29 年 国民健康・栄養調査 (厚生労働省, 2018) で報告された平均と標準偏差から計算した各年齢の男女の身長と体重の 95 パーセンタイル値から、以下の藤本ら (1968a) の式で推定した。

$$S = 88.83 \times W^{0.444} \times H^{0.663}$$

ここで、 S : 体表面積 (cm^2)、 W : 体重 (kg)、 H : 身長 (cm) である。

さらに、体表面積は、藤本ら (1968b) の性年齢別体表面積小部位別比率に基づいて、頭髮部、前額部、顔面部、耳部、顎部、胸前上部、胸前下部、胸後上部、胸後下部、臀部、上腕部、前腕部、手部、大腿部、下腿部および足部の 16 部位に割り振った。

(2) 接触体表面積

接触体表面積 (cm^2) は、オランダの RIVM (2017) での曝露評価を参考に、腿部 (大腿部 + 下腿部) の 1/4 と手部および腕 (上腕部 + 前腕部) のそれぞれの 1/2 が人工芝と接触するとした。

(3) 活動時のゴム粒子付着量

接触体表面積 (cm^2) に、皮膚 $1cm^2$ 当たりのゴム粒子付着量 ($1 mg/cm^2$) を乗じて、

活動時のゴム粒子付着量を計算した。1 mg/cm²は、Norwegian Institute of Public Health and the Radium Hospital (2006)の曝露評価で採用された値で、RIVM (2017)の曝露評価でも使用されている。設定した年齢群別の年接触体表面積とゴム粒子接触量を表 8 に示す。

6) ゴム粒子の直接摂取量

ゴム粒子の直接摂取量 (g) は、RIVM (2017)の曝露評価を参考に、米国での年齢群別の土壌とダストの合計量の 95 パーセントイル値とした。表 9 に設定した年齢群別のゴム粒子摂取量を示す。

以上の項目について、各年齢群別にまとめた(表 10) 以降に示す各化学物質の曝露量計算は、これらの数値を用いて行った。

曝露量計算及びハザード比の算出

○VOCs

各運動場における VOCs の最大空気中濃度(測定値)、年齢群別の平均一日曝露濃度、許容値、ハザード比を表 11 に示す。許容値が得られた物質のほとんどは、いずれの曝露シナリオ及び運動場においても、ハザード比が 1 未満であり、平均一日曝露濃度が許容値より十分低いことを確認することができた。したがって、許容値が得られたこれらの VOCs の吸入曝露により健康リスクは懸念されるレベルにはないことが確認できた。トリクロロエチレンについては、他のグラウンドに比して高濃度で検出された 1 か所のグラウンドを除き、いずれの年齢層の吸入曝露シナリオにおいても、ハザード比は 1 未満であった。一方、許容値が得られ

なかった物質については、ハザード比を求めることができず、平均一日曝露濃度を求めるに留めた。

○金属、SVOCs

曝露シナリオ毎に、各運動場における最大(溶出)濃度 (µg/g)あるいはゴムチップ製品中の最大(溶出)濃度(µg/g)、空気中濃度(µg/m³)(吸入曝露のみ)、平均一日経口/経皮摂取量または平均一日曝露濃度(吸入曝露)、許容値、ハザード比を、金属に関する結果は表 12-14(運動場サンプル)及び表 15-17(ゴムチップ製品サンプル)に、PAH に関する結果は表 18(運動場サンプル)及び表 19(ゴムチップ製品サンプル)に、ゴムチップ添加剤等に関する結果は表 20(運動場サンプル)及び表 21(ゴムチップ製品サンプル)に示す。運動場サンプル及び先行研究のゴムチップ製品サンプルに由来する測定値を用いた曝露量計算において、許容値が得られた物質の多くは、いずれの曝露シナリオ及び運動場並びにゴムチップ製品においても、ハザード比が 1 未満であり、平均一日曝露濃度が許容値より十分低いことを確認することができた。したがって、許容値が得られたほとんどの金属、SVOCs については、いずれの経路からの曝露であっても、健康リスクは懸念されるレベルにはないことが確認できた。先行研究のゴムチップ製品サンプルに由来する測定値を用いた解析において、SVOCs であるエチレンチオウレア (ETU)及び金属であるクロムについては、一部のシナリオにおいてハザード比が 1 を超えていた。ETU については、ゴムチップ製品サンプルに由来する測定値を用いた曝露量計算において、経口曝露(小

学校低学年及び高学年のみ)及び経皮曝露(全年齢群)のハザード比が1以上であった。また、クロムについては、緑色のゴムチップである一製品(C-8)に由来する測定値を用いた曝露量計算において、吸入曝露(全年齢群)のハザード比が1以上であった。ETUの経皮曝露については、この結果を受けて、経皮吸収量を勘案して曝露量を再計算した(後述)。

一方、許容値が得られなかった物質については、ハザード比を求めることができず、平均一日曝露濃度を求めるに留めた。

経皮吸収量を勘案した ETU の経皮曝露量計算及びハザード比の算出

ゴムチップ製品に由来する ETU は、経皮曝露の場合に全年齢群においてハザード比が1を超えた。前述の曝露量計算方法は、汗に溶出した化学物質を吸収率100%で皮膚から吸収すると仮定した計算であったため、本解析においては、米国 EPA の Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment), Final (2004)で推奨されている数式(式3.1)を改変した式を用いて、経皮吸収量の推定を行った。この式は皮膚と接触した水溶液からの有機物質の経皮吸収量の推定に適用できる。

$$DAD = \frac{DA_{event} \times EV \times EF \times SA}{BW \times AT}$$

DAD : 経皮吸収量 (mg/kg/day) ,
 DA_{event} : 事象毎の経皮吸収量 (mg/cm²/event) ,
 SA : 接触皮膚面積 (cm²) ,
 EV : 一日当たりの活動頻度

(events/day) , EF : 年間活動日数 (days/year) , BW : 体重 (kg) , AT : 平均化時間 (365 days)

有機物質の DA_{event} は以下の式で計算する :

$$t_{event} \leq t^*$$

$$DA_{event} = 2FA \times K_p \times C_w \sqrt{\frac{6\tau_{event} \times t_{event}}{\pi}}$$

$$t_{event} > t^*$$

$$DA_{event} = FA \times K_p$$

$$\times C_w \left[\frac{t_{event}}{1+B} + 2\tau_{event} \left(\frac{1+3B+3B^2}{(1+B)^2} \right) \right]$$

FA : 吸収される水の割合 (-) , K_p : 水中の物質の皮膚透過係数 (cm/hr) , C_w : 水中の化学物質濃度 (mg/cm³) , τ_{event} : 事象毎の遅延時間 (hr/event) , t_{event} : 事象継続時間 (hr/event) , t^* : 定常状態到達時間 (hr , = 2.4 t_{event}) , B : 角質層を通過する化学物質の等価係数の真皮を通過する等価係数に対する比 (-)

有機化学物質の皮膚透過係数(K_p)は以下の式で推定できる :

$$\log K_p = -2.80 + 0.66 \log K_{ow} - 0.0056 MW$$

K_{ow} : 非イオン種のオクタノール/水分配係数 (-) , MW : 分子量 (g/mole)

DA_{event} の計算に必要な他のパラメータ (FA , τ_{event} , t^* , B) も物質特異的であるが、

上記の米国 EPA の Guidance の解説に記載されている方法で計算することができる。

エチレンチオウレアについては Guidance に計算値が既に記載されていた。

CHEMICAL	Ethylenethiourea
CAS No.	96457
K_p (cm/hr)	1.7E-04
B	0.0
τ_{event} (hr)	0.37
t^* (hr)	0.88
FA	1.0

小学低学年から大人の各年齢群の事象継続時間(一日当たりの活動時間)は定常状態到達時間より長い場合、エチレンチオウレアの DA_{event} は上記の 2 式の中の下式を使用して計算できた。

汗中のエチレンチオウレア濃度の計算

前述の推定法に従って、経皮吸収量を計算するには、水溶液(汗)中のエチレンチオウレア濃度を設定する必要がある。汗中のエチレンチオウレアの量は、皮膚に付着するゴムチップ量(2g)とその推定最大溶出濃度(10 µg/g)の積の 20 µg である。

一方、汗の量については、季節、運動量、その時の体調、個人差等があるものの；
 ・1200 mL：スポーツ少年団の夏期サッカー練習中の発汗量(大元の情報源：川原ら, 2002)
 ・1800 mL：女子サッカー(2.5時間)(大元の情報源：中井ら, 1993)
 と報告されていたため、小学低学年～中学生のサッカー活動中の発汗量を 1200 mL、高校生、大学生、大人のサッカー活動中の発

汗量を 2000 mL と仮定した。これは全身からの発汗であるので、ゴムチップと接触する可能性がある皮膚(手と腕の 1/2 + 腿部の 1/4)上の汗の量を全体表面積に対する割合で補正し、さらに、汗の水分は常に蒸発しているため、皮膚上に常に存在する汗の量を割振り量の 1/10 とした。また、20 µg のエチレンチオウレア付着量を接触皮膚上に常に存在する汗量で割った値を水溶液中濃度とした。

以上の汗中濃度を用いて、エチレンチオウレアの経皮曝露量及びハザード比を再計算した。その結果を表 22 に示す。経皮吸収率を考慮した方法による再計算の結果、エチレンチオウレアのハザード比は全年齢群においていずれも 1 未満となり、健康リスクは懸念されるレベルにはないことを確認できた。

○特定の物質について

・白血病あるいはリンパ腫を誘発することが知られる物質

スチレン、ベンゼン、1,3-ブタジエンの UR あるいは VSD は、以下の情報源から得ることができた。また、各物質の UR あるいは VSD は、以下の通りであった。

ベンゼン

https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0276_summary.pdf#nameddest=cancerinhal

UR=2.2×10⁻⁶ ~ 7.8×10⁻⁶ [1/(µg/m³)]

VSD at 10⁻⁵ = 10⁻⁵/2.2×10⁻⁶ ~ 10⁻⁵/7.8×10⁻⁶
 = 1.28 ~ 4.55 µg/m³

スチレン

<https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-rrd-chem->

[StyreneDatasheet_527586_7.pdf](#)

UR=5.7×10⁻⁷ [1/(μg/m³)]

VSD at 10⁻⁵ = 10⁻⁵/5.7×10⁻⁷ = 17.5 μg/m³

1,3-ブタジエン

[https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/documents/subst/0139_summary.pdf](https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0139_summary.pdf)

UR=2.8×10⁻⁴ [1/(μg/m³)]

VSD at 10⁻⁵ = 10⁻⁵/2.8×10⁻⁴ = 0.33 μg/m³

上記 3 物質の各年齢群におけるハザード比を表 23 に示す。いずれのシナリオにおいても、ハザード比は 1 未満であった。

2-メルカプトベンゾチアゾールについては、UR あるいは VSD に関する情報を得ることができなかったため、ハザード比を求めることはできなかった。

・水銀

先行研究において測定されたゴムチップ製品中の最大濃度を用いた水銀の曝露量及びハザード比を表 15-17 に示す。いずれの曝露シナリオ、投与経路においても、ハザード比は 1 より十分低く、国内のグラウンドに使用されるゴムチップ由来の水銀については、健康リスクは懸念されるレベルにはないことを確認できた。

・刺激性物質

本解析で対象とした刺激性を有する 5 物質について、各運動場において測定された各物質の空气中濃度の最大値、PAC-1 値及びハザード比を表 24 に示す。ハザード比からわかる通り、本研究で調査した運動場に

おける対象 5 物質による刺激性に関する懸念は、十分に低いことが考えられた。ホルムアルデヒドについては、国内で設定された室内濃度指針値 100 μg/m³ (25 の場合) とのハザード比を求めた結果、0.071 であったため、本研究において検出された空气中ホルムアルデヒド濃度は、室内濃度指針値と比べた場合であっても刺激性については懸念がないと考えられた。

D . 考察

平成29年度は、人工芝ゴムチップ中の化学物質のうち「発がん性の懸念あり」と判断された37物質に関する各種許容値及び海外機関による曝露量推定のためのシナリオ及び曝露量推定法を確認し、本研究における曝露量評価に必要な基本情報を得ることができた。また、試験的ではあるが、ゴムチップ中多環芳香族炭化水素類 (PAHs)濃度に基づき各物質の経皮曝露量の推定及び発がんリスクの評価を行い、今後の本研究におけるリスク評価に向けた環境を整えることができた。

平成29年度に収集した許容値については、先行研究により発がん性の懸念あるとされた37物質を対象としたが、フィールド調査から得たデータに基づく曝露量推定を行った後に、リスク評価のために用いることを見込んでいた。最終的に、平成30年度は、本研究の対象としたVOCs、金属及びSVOCsについて全て調査し、合計75物質の許容値を得ることができた。収集した許容値については、ハザード比を求めてリスク評価する際に活用することができた。

海外のリスク評価機関における人工芝ゴムチップ関連物質の曝露量推定法に関する

調査においては、オランダとノルウェーによる研究報告から、曝露シナリオ等の有用な情報を得ることができた。各国の曝露量推定は、子供のみを対象としたり、小学校等の教育機関が人工芝グラウンドを多用している、あるいは寒い気候のため室内運動場を多用する環境を想定するなど、各国の事情を反映したシナリオであった。本研究では、日本独自の曝露シナリオを設定するためのアンケート調査等を実施することは困難である。体重や体表面積等、既存の日本固有データがある場合は、それらのデータを利用し、海外の曝露シナリオの一部のパラメーターの数値を置き換えて曝露量を推定する必要がある。また、米国EPAによる研究報告が公表された場合は、米国による人工芝ゴムチップ関連化学物質の曝露シナリオや曝露量推定法を調査し、本研究による曝露量推定のために最も参考になる曝露シナリオ及び曝露量の推定法を検討する必要がある。したがって、今後は、パラメーターとして活用できる既存の日本独自データを調査及び米国EPAの研究報告の内容精査を実施し、本研究独自の曝露シナリオと各経路を想定した曝露量推定法を確立する。

ゴムチップ中多環芳香族炭化水素類 (PAHs) 濃度に基づく暫定リスク評価については、試験的に経皮曝露による各PAHの曝露量推定を行った。先行研究で得た各PAHの最大濃度を用いたが、体格が異なるノルウェーの大人の曝露シナリオ5に基づき推定したため、推定値はおそらく日本人の実際の曝露量とは異なることが予想される。ノルウェーの報告書によると、同国における研究ではPAHsの経皮曝露による推定曝露量は、曝露シナリオ5に基づき生物利用

率 $1 \times 10^{-6} \%$ として計算した結果、0.87 ng/kg BW/dayであったと報告されている。本研究で推定した各PAHの経皮曝露量と比較したとき、ピレン以外はノルウェーの推定曝露量を下回っていた。また、発がんリスクは、米国EPAが最近公表した経口曝露によるベンゾ[a]ピレンの評価書を参考に、ベンゾ[a]ピレンのスロープファクター1 (mg/kg/day)⁻¹を全てのPAHsに適用し、さらに年齢(16歳以上)及び競技人生(20年と仮定)を考慮して計算した。今回対象とした各PAHの発がんリスク及び全PAHの発がんリスク合計は、 10^{-5} 発がんリスクより十分低いことが確認できた。経口曝露によるPAHs混合物の発がんリスクに関するSchneiderら(2002)によると、相対発がんポテンシーは、ベンゾ[a]ピレン及びベンゾ[b]フルオランセンが1に対し、ベンゾ[a]アントラセン、ベンゾ[k]フルオランセン及びベンゾ[j]フルオランセンが0.1、アントラセン、フルオランセン、クリセン、ベンゾ[ghi]ペリレンが0.01であると報告されている。また、IARCによる発がん性分類を比較したとき、ベンゾ[a]ピレンは今回対象としたPAHsの中で最も発がん性が強い。そのため、各PAHの発がん性の強さを考慮した発がんリスクを評価する必要があるが、本研究結果ではベンゾ[a]ピレンと同じ発がん性の強さを想定した結果、十分に発がんリスクは低いことが確認されたので、本研究条件下では相対発がんポテンシーを考慮する必要はないと考えられた。平成29年度は、PAHsの成人に対する経皮曝露という限られた条件下での曝露量推定及び発がんリスク評価であった。そこで、平成30年度は、その他の曝露経路及び対象とする物質を拡

大して試験的に計算した上で、フィールド調査から得たデータを用いた本研究独自の曝露シナリオと各経路を想定した曝露量推定及びリスク評価を行った。

国内の人工芝を使用した運動場から得たゴムチップサンプルの解析では、許容値を得たほとんどの対象物質については、いずれの曝露シナリオにおいても、健康リスクは懸念されるレベルにはないことを確認できた。先行研究で得たグラウンド充填前ゴムチップ製品に由来する解析対象物質についても、許容値を得ることができた多くの物質は、いずれの曝露シナリオにおいても、健康リスクは懸念されるレベルにはないことを確認できた。

一方、ハザード比が1を超えた物質については、詳細に評価した。トリクロロエチレンについては、1か所のグラウンドを除き、いずれの年齢層の吸入曝露シナリオにおいても、ハザード比は1未満であった。一方、他のグラウンドに比して高濃度で検出された1か所のグラウンドについては、小学校高学年～大学生を想定した吸入曝露シナリオにおいて、ハザード比が1をわずかに超えたが（USEPAがIRISにより設定したRfCを元に許容値を0.002 mg/m³と設定し、小学校高学年～大学生それぞれの曝露濃度（μg/m³）を2.5、2.3、2.5、2.4と推計した場合）このグラウンドについては、バックグラウンドとして測定したグラウンド外の大気中トリクロロエチレン濃度と、グラウンド内で測定した大気中トリクロロエチレン濃度が同程度であることが確認されている。よって、グラウンド内で検出されたトリクロロエチレンが人工芝に充填されたゴムチップに由来している可能性は極めて低い

と考えられた。

なお、トリクロロエチレンについては、ヒト及び動物の腎臓等に発がん性を有することが示唆されており、USEPA IRISが報告したユニットリスク（ 4.1×10^{-6} per μg/m³）から過剰発がん率 10^{-5} の実質安全量（VSD）を求めると2.4 μg/m³となる。このVSDをもとに、一生涯の発がんリスクを評価するための総ハザード比（USEPAの呼吸量に基づいて得た各年齢層の生涯一日曝露濃度に基づくハザード比の合計）を求めた結果、0.31と1未満であった。以上より、トリクロロエチレンによる発がん影響が、実際にサッカー競技者に発生する可能性は低いと考えられた。

グラウンド充填前のゴムチップ製品に由来するSVOCのエチレンチオウレア、金属のクロムについては、一部の曝露シナリオにおいてハザード比が1を超えた。

エチレンチオウレアについては、ゴムチップ製品に由来する溶出試験結果を用いた曝露量推定により、全年齢群を想定した経皮曝露シナリオにおいて、ハザード比が1を超えた。しかし、経皮曝露については、汗に溶出した当該物質が100%皮膚に吸収されると仮定した当初の曝露量計算法ではなく、米国EPAにより提案された皮膚からの吸収率を勘案したより現実的な計算法により、ハザード比は1未満となり、健康リスクは懸念されるレベルにはないことを確認できた。

一方、エチレンチオウレアの経口曝露については、小学生低・高学年を想定したシナリオにおいて、ハザード比が各々1.5、1.3となった。エチレンチオウレアの許容値は、米国EPAがIRISにより設定したThe oral

Reference Dose (RfD：参照用量)に由来する。
(参考)

https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0239_summary.pdf#nameddest=t=rfc

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/ethylene-thiourea.pdf>。RfD

は、非発がん影響に関して有害影響のリスクがないと推測される摂取量であり、一生涯人が毎日曝露を受けても有害影響が生じないと推測される摂取量の最高値をいう。

エチレンチオウレアの RfD 8×10^{-5} mg/kg/day mg/kg/day (1991 年設定) は、ラットを用いた 2 年間混餌投与試験 (Graham et al., 1975)において最低用量 5 ppm (0.25 mg/kg/day)でみられた甲状腺・濾胞上皮細胞の過形成の発生頻度増加を根拠とした最小毒性量(LOAEL)を POD とし、不確実係数積

3000 (種差 10、個体差 10、LOAEL を用いる 10、発生毒性及び多世代生殖毒性試験に関する情報不足 3) で除して得られたものである。また、エチレンチオウレアによるラット及びマウスの甲状腺への影響 (発がん性含む) は、種々の毒性試験において前述のラットを用いた 2 年間混餌投与試験の LOAEL より高い用量で認められている。

製品評価技術評価機構 (NITE) による初期リスク評価書 (https://www.nite.go.jp/chrip/chrip_search/dt/pdf/CI_02_001/risk/pdf_hyoukasyo/032riskdoc.pdf)

によると、エチレンチオウレアによる甲状腺毒性の発生機序は、以下の通りとしている：エチレンチオウレアは *in vitro* で甲状腺ホルモンのトリヨードサイロニン(T3)、サイロキシシン (T4) 産生のためのチロジンのヨウ素化とヨードチロシル残基との結合

に關与するヨウ化物ペルオキシダーゼの作用を阻害する (Graham and Hansen, 1972)。

Rose らは、2-イミダゾリジンチオンは、ヨウ化物ペルオキシダーゼを阻害することにより、甲状腺ホルモンの産生を阻害して血中の甲状腺ホルモン濃度を低下させ、それにより下垂体へのネガティブ・フィードバック作用とそれに続く甲状腺刺激ホルモン (TSH) 濃度の増加が惹起されると考察している (Rose et al., 1980)。また、O'Neil 及び Marshall は、この増加した TSH により、甲状腺が持続的に過剰刺激され、病理学的変化として、び漫性の小濾胞性過形成、次いでび漫性の結節状過形成、更に乳頭状またはのう胞状の変化を伴ったび漫性の結節状過形成が惹起され、腫瘍形成が助長されるとしている (O'Neil and Marshall, 1984)。

IARC (2001)は、エチレンチオウレアの発がん性分類をグループ 3 (ヒトに対する発がん性については分類できない物質) としている (<http://www.inchem.org/documents/iarc/vol79/79-18.html>)。その根拠は、マウス及びラットでみられる甲状腺腫瘍は、前述の甲状腺ホルモンの不均衡が起因する非遺伝毒性的機序によるものであり、ヒトが当該物質に曝露されるレベルは甲状腺ホルモンの恒常性に影響を及ぼす濃度ではないため、ヒトでは甲状腺腫瘍の発生は考えられないとしている。また、IARC は、疫学研究及び動物を用いた毒性試験の結果から、甲状腺ホルモンの不均衡による腫瘍発生に対する感受性は、げっ歯類 (ハムスターを除く) の方がヒトより高いためとしている。EPA は、ヒトでの一生涯の曝露量が RfD を超えた場合、必ずしも健康影響が生

じるわけではない (Lifetime exposure above the RfD does not imply that an adverse health effect would necessarily occur.) としている。本解析における経口曝露シナリオは、唾液、胃液及び腸液に溶出した当該物質が100%吸収されることを想定しており、実際よりも過剰に曝露量が見積もられる。エチレンチオウレアは、先行研究において46種のゴムチップ製品(工業用含む)のうち3種のみから検出され、当該3製品はいずれも工業用であり、人工芝グラウンドに高頻度に使われる廃タイヤ由来ではなかった。また、本年度実施した国内4か所の運動場由来ゴムチップでは、エチレンチオウレアは検出されていない。以上を踏まえて検討した結果、ゴムチップ製品に由来するエチレンチオウレアの小学生への経口曝露シナリオにおいて、ハザード比がわずかに1を超えたが、ラットやマウスにみられた甲状腺への影響が、実際に小学生サッカー競技者に発生する可能性は低いと考えられた。

なお、エチレンチオウレアに関するその他の許容値あるいは評価値は、FAO/WHO合同残留農薬専門家会議(JMPR)が1993年に設定した一日摂取許容量(acceptable daily intake, ADI) 0.004 mg/kg/day (イヌを用いた13週間反復経口投与試験の無毒性量0.39 mg/kg/day、不確実係数積100、根拠: 150 ppmでみられたヘモグロビン、ヘマトクリット値、赤血球数の減少及び血清コレステロール値の上昇)であった。この値でハザード比を求めた場合、ゴムチップ製品に由来するエチレンチオウレアの小学校低学年及び高学年への経口曝露によるハザード比は、各々0.029、0.025となった。以上を

踏まえて検討した結果、ゴムチップ製品由来エチレンチオウレアが、経口曝露により、小学生サッカー競技者に対し健康影響を及ぼす可能性は低いと考えられた。

金属のクロムについても、ゴムチップ製品1種(C-8)に由来する測定値を用いた曝露量推定において、全年齢群を想定した吸入曝露シナリオによるハザード比が1を超えた。当該ゴムチップ製品にクロムが多く含まれていたのは、同製品(エチレン・プロピレン・ジエンゴム製)は緑色で、緑色の顔料にクロム(酸化クロム)が含まれていたためであると考えられる。本解析においてクロムのハザード比の導出に用いた許容値は、得られたクロム関連の許容値のうち最小であった六価クロムの値(ATSDR, 2012)を用いて、安全側に立った評価を行った。しかし、一般的に、前述の顔料に含まれていたのは金属及び三価クロムであると考えられ、金属クロム及び三価クロムは六価クロムより毒性が低い。そのため、金属及び三価クロムの許容値について再検討した。金属及び三価クロムの許容値は、日本産業衛生学会(https://www.nite.go.jp/chem/chrip/chrip_search/dt/pdf/CI_04_002/OEL_7440473.pdf)及びACGIH(https://www.jisha.or.jp/international/topics/pdf/201805_01.pdf)が設定した0.5 mg/m³がある。この値は労働者を対象とした許容値であるため、前述の通り、週7日24時間曝露と仮定した場合の一日当たりの値に換算し、労働者曝露から一般人への曝露の間の不確実性を考慮した係数10で除した値(11.9 µg/m³)を求め、ハザード比を導出した。その結果、ハザード比は小学校低学年0.0086、小学校高学年0.016、中学生

0.015、高校生0.017、大学生及び大人0.015となり、最終的に、当該製品に由来する金属及び三価クロムの吸入曝露による健康リスクに対する懸念はないことを確認できた。なお、結果で示した通り、クロムは、本研究で実施した国内の人工芝運動場における解析において検出されたが、いずれのシナリオにおいても、最小であった六価クロムの許容値に基づくハザード比は1未満であった。この結果は、国内の人工芝グラウンドにおいて、クロムがサッカー競技者に対し健康影響を及ぼす可能性が低いことを示している。

以上、ハザード比が1を超えたトリクロロエチレン、エチレンチオウレア及びCrについては、より現実的なシナリオによる評価あるいは毒性機序等に基づく検討の結果、これらが日本人サッカー競技者に対し健康影響を及ぼす可能性は低いと判断した。

白血病及びリンパ腫を誘発することが知られるスチレン、ベンゼン、2-メルカプトベンゾチアゾール、1,3-ブタジエンについて、当該腫瘍のリスクを評価するために、各物質の過剰発がん率が 10^{-5} の場合のVSDを求め、本研究で得られた上記物質の吸入曝露量とのハザード比を求めた結果、2-メルカプトベンゾチアゾール以外の3物質については、ハザード比が1未満であり、本研究で設定した曝露シナリオの条件下であれば、日本人サッカー競技者が人工芝ゴムチップ由来の各物質により白血病あるいはリンパ腫が発生する可能性は低いことが確認できた。オランダRIVMの報告書でも、同様の結果が報告されている。2-メルカプトベンゾチアゾールについては許容値を得ることができなかったが、各運動場における本物質の空気

中濃度は定量下限値未満であったので、人工芝ゴムチップ由来の本物質にサッカー競技者が曝露される量は十分に少なく、本物質に起因する腫瘍発生の可能性は低いと考えられた。

なお、許容値を得ることができなかった対象物質については、ハザード比を求めることができないため、リスク評価の対象外とした。これらの物質については、今後国内外において許容値等が設定されるのを待ってリスク評価を実施することが望ましい。

E．結論

本研究の結果、情報収集や暫定的リスク評価により人工芝ゴムチップ関連化学物質の曝露量推定及びリスク評価を実施するための環境を整備し、最終的には、人工芝用ゴムチップ中の化学物質の健康リスクを評価することを目的として、日本人サッカー競技者を対象とした独自の年齢群別曝露シナリオを設定し、先行研究で用いたゴムチップ製品及び国内のグラウンドにおいて実際に使われているゴムチップに含まれる物質について曝露量を求め、それらの値を許容値と比較することにより、健康リスク評価を実施することができた。許容値を得ることができた対象物質については、いずれの曝露シナリオにおいても、日本人サッカー競技者に対し、発がん性や刺激性を含む健康リスクに関する懸念は十分低いことが確認できた。なお、許容値を得ることができなかった対象物質については、リスク評価の対象外とした。

F．健康危険情報

特になし

G . 研究発表

1. 論文発表

特になし

2. 学会発表

特になし

H . 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

1. 特許取得

特になし

2. 実用新案登録

特になし

3.その他

特になし