

厚生労働科学研究費補助金（厚生科学特別研究事業）
分担研究報告書

人工芝グラウンド用ゴムチップの成分分析及びその発がん性等に関する研究

人工芝用ゴムチップ中の重金属類の分析

研究分担者 五十嵐良明 国立医薬品食品衛生研究所 生活衛生化学部 部長
研究協力者 久保田領志 国立医薬品食品衛生研究所 生活衛生化学部 主任研究官
研究協力者 小濱とも子 国立医薬品食品衛生研究所 生活衛生化学部 研究補助員

研究要旨

本研究では、日本国内で流通している人工芝用ゴムチップの発がんリスク等の健康影響評価に資する情報を収集することを目的として、人工芝施工業者からゴムチップ 46 製品を入手し、それらに含まれる金属を分析した。本研究では 28 元素を分析した。Hg は加熱酸化測定装置を用い、それ以外はゴムチップを硝酸及びフッ化水素酸の混液を用いてマイクロ波加熱分解したのち、ICP-MS を用いて定量した。

Zn は測定対象元素の中では濃度が最も高かった。Zn の濃度を試料材質別に比較すると、スチレン・ブタジエンゴム（SBR）を主としエチレン・プロピレン・ジエンゴム（EPDM）などとの混合試料に比べて、EPDM 単独及び熱可塑性エラストマー（TPE）単独では低かった。Fe と Al の濃度も他の元素に比べて高かった。Pb は TPE 以外のほとんどの試料に認められ、最大値は 29 µg/g であった。Hg は全ての試料で検出されたが、最大でも 0.1 µg/g 未満であった。Cr については、一部ゴムチップで高い濃度を示すものが認められた。

オランダ国立公衆健康環境研究所（RIVM）や欧州化学品庁（ECHA）はゴムチップからの金属類などの溶出性からそのリスクを評価している。ゴムチップに含まれているすべての元素がヒトに吸収されるわけではなく、今後リスクを評価するには、同様に溶出試験が必要である。米国環境保護庁（EPA）は現在、調査研究を進めており、2017 年後半に結果を報告する予定である。ECHA もその結果を踏まえ再評価を行うこととしている。海外の調査状況を踏まえ、我が国でも追加調査の実施の要否を検討することが望ましい。

A. 研究目的

近年コンディショニングの維持管理のし易さ、ランニングコストの面などからサッカー場や野球場には人工芝を敷設した競技場が増加している。日本サッカー協会は、サッカーの競技に適したロングパイル人工芝を長さ 50 mm

以上の合成樹脂製パイルの隙間に、弾性材を含む粒状材料を充填しパイルを安定させた人工芝複合製品であることと定義し、その公認規定を設けている。こうした人工芝フィールドに使われる充填剤は芝糸を立ててクッション性を高める役割があり、ゴムチップと珪砂が使わ

れている。

環境保全及び資源の有効利用の観点から廃棄物等の発生抑制、循環資源のリユース・リサイクルは重要である。ゴムチップは、現在トラックやバス等の使用済みタイヤ（廃タイヤ）から製造されたものが主となっているが、使用・廃棄された工業ゴム製品からも製造される他、専用の合成ゴムチップもある。2015年の日本国内における廃タイヤ発生本数は9500万本、重量では100万トンであり、再生ゴム・ゴム粉として原形加工利用される廃タイヤ重量は11%（10万5千トン）と報告されている。また、人工芝に使用される廃タイヤは国内発生量の2%（2万トン）とされている（日本自動車タイヤ協会調べ）。

タイヤはゴム（天然ゴム、合成ゴム）、カーボンブラック及びシリカ、配合剤（硫黄、酸化亜鉛などの加硫促進剤、老化防止剤、エクステンダーオイル等）、タイヤコード（テキスタイルコード、スチールワイヤー）、ビードワイヤーから構成される。合成ゴムとしては主に、ジエン系のスチレン・ブタジエンゴム（SBR）やブタジエンゴム（BR）が使われる。廃タイヤ由来ゴムチップは、廃タイヤを切断、タイヤコード（テキスタイルコード、スチールワイヤー）、ビードワイヤーを除き、細粒化して製造される。

ゴムチップから種々の化学物質が溶出し、水及び土壌環境への影響の可能性が懸念されたとの報告がある。よって、これを使用する人工芝フィールド上の選手への健康影響も懸念された。国際サッカー連盟（FIFA）は2006年に、人工芝フィールドに使われるSBRによる発がんリスクはそれまでに報告されている研究結果からは実証できないとしつつも引き続き情報を収集していくとした。イタリア、米国コネチカット州及びカリフォルニア州環境保健有害性評価局（OEHHA）などで行われたリスク評価の結果では、ゴムチップを使用したフィー

ルド上での競技による健康リスクの上昇は示されていないとしている。しかし、米国NBCテレビが2014年に、女子サッカー選手のがん発症と人工芝に使われるゴムチップの関連性について報じたところ、一般市民の間で廃タイヤ由来ゴムチップへの不安が高まった。2016年2月に米国環境保護庁（EPA）及び米国疾病予防管理センター／有害物質疾病登録局（CDC/ATSDR）は消費者製品安全委員会（CPSC）と連携して、人工芝の充填剤の廃タイヤからリサイクルされたゴムチップの安全性について調査研究を開始すると発表した。これを受けて欧州委員会は欧州化学品庁（ECHA）に人工芝充填剤のゴム中に健康リスクを生じる恐れのある化学物質が存在するかを評価するように指示し、ECHAは2017年初めに初期評価の結果を公表するとした。またオランダ国立公衆健康環境研究所（RIVM）でも同様の研究を進めてきている。

我が国でも人工芝は競技場のほか、学校などのサッカー場に使われるようになっており、国民の健康を守るためにも国内の状況を調査し、安全性を確認するべきである。化学物質の健康リスクはそれ自体の有害性と曝露量から求められる。本研究はゴムチップの成分分析として金属類を担当し、含有量の情報を得ることを目的とした。ゴムチップからは高濃度のPbが検出されることは既に報告されている。EPAは、収集したゴムチップの文献で測定されている元素は33種あるが、うち22種の元素を測定するとしている。医薬品の元素不純物ガイドライン（ICHQ3D）（平成27年9月30日付厚生労働省医薬食品局審査管理課長通知（薬食審査発0930第4号））では混入可能性や元素の毒性に応じ24元素のクラス分類とPDE（許容一日曝露量）を設定し、クラス1とクラス2Aの7元素はリスクアセスメントが必須としている。欧州規格 EN 71-3:2013+A1:2014 Safety of

toys – Part 3: Migration of certain elements (玩具の安全性—特定元素の移行) では改正前の 8 元素 から 17 元素 19 項目に検査項目が拡大された。本研究でもこれらを参考に、ゴムチップ中の金属類を ICP-MS、及び加熱気化水銀測定装置を用いて分析した。

B. 研究方法

1. 試料

ゴムチップ試料は、人工芝施工業者 10 社から 46 製品 (ゴムチップ納入業者 20 社) を経済産業省の協力を得て入手した。試料の材質、由来、色等について表 1 に示した。

2. ICP-MS 分析

2-1. 装置

ICP-MS は Agilent 7500ce (アジレント・テクノロジー) を用いた。マイクロ波分解装置は CEN 社製 MARS 5 を、分解容器には EasyPrep を用いた。

2-2. 酸分解

試料約 0.1 g に硝酸 5 ml または硝酸 5 ml 及びフッ化水素酸 0.5 ml の混液を加えて 30 分間～2 時間静置した後、マイクロ波を照射し 200°C で 20 分間加熱分解した。冷却後、超純水で 50mL に定容し、10000 rpm で 10 分間遠心した上清をメンブランフィルター (0.20 μm) でろ過したものを試験溶液とした。

2-3. 測定方法

Cd、Pb、As、Co、V、Ni、Ba、Cu、Cr、Zn、Al、Li、Be、Mg、Mn、Fe、Ga、Se、Rb、Sr、Mo、Ag、Sn、Sb、Cs、Tl 及び Bi の合計 27 元素を測定対象とした。試験溶液を ICP-MS に導入し、各元素の質量数のイオン強度を測定し、別に作成した検量線から濃度を求め、試料中の濃度 (μg/g) に換算した。各元素について、分析した試料のうち検出された試料の割合、検出された濃度の最大値、最小値及び中央値を求めた。

3. 加熱気化水銀分析

3-1. 装置

加熱気化水銀測定装置 MA-3000 (日本インスツルメンツ) を用いた。

3-2. 測定方法

試料約 0.1 g (n=4) をセラミックス製ボートに入れて加熱し、Hg を捕集管に濃縮、気化させ、原子吸光法により 253.7 nm におけるピーク強度を測定した。検量線は、原子吸光分析用 Hg 標準液を L-システイン溶液 (100 mg/L) で希釈して調製した 0.25～250 ng/ml の標準液 100 μl をそれぞれ測定し、得られたピーク強度とボート中の Hg 量 (ng) から作成した。各試料は別々に 4 回測定した。検量線から試料中の Hg 量 (ng/g) を計算し、最大値、最小値及び中央値を求めた。

C. 結果

1. ICP-MS 分析

1-1. 前処理条件の検討

入手したゴムチップを材質や由来によって分類した。組成や由来はメーカーの申告による。天然ゴム (NR)、スチレン・ブタジエンゴム (SBR)、ブタジエンゴム (BR) 及びエチレン・プロピレン・ジエンゴム (EPDM) など複数記載されたもの、材質の記載がないもののタイヤまたは工業用ゴム由来及びそれらの混合物、または由来が不明で黒色のものはいずれも混合材質 (Mix) として分類した。EPDM または熱可塑性エラストマー (TPE) 単独のものは、それぞれ別に分類した。結果 Mix に分類されたのは 37 試料、EPDM は 5 試料、TPE は 4 試料であった。Mix としたものについてのみ、廃タイヤ由来、工業用ゴム由来、これらの混合または不明の 3 区分とし、EPDM と TPE についてはそれぞれとした。

試料ゴムチップから選択した黒色ゴムチップ (ここでは A 及び B とする)、緑色ゴムチッ

プ (C とする) の計 3 種を用いて、マイクロ波分解に使う最適な酸組成について検討を行った。ゴムチップはさらに微細化、混和するような均一化は行わず、個々のゴムチップにばらつきがあることを念頭に 4 回の併行試験を行った。各酸でゴムチップを分解したときの液の性状を観察した。A 及び B を硝酸のみで分解したとき浮遊する不溶物が確認されたが、硝酸・フッ化水素酸混液では浮遊物が目視で確認できないくらい少なかった。一方 C は、硝酸のみで分解したときは浮遊物が少なかったが、硝酸・フッ化水素酸混液では軽度に白色に濁るような状態であった。

これら溶液中の元素濃度を定量した (表 2)。A は測定対象とした全ての重金属の濃度が硝酸のみに比べて硝酸・フッ化水素酸混液で高く、B は 11 元素中 6 元素が硝酸のみに比べて硝酸・フッ化水素酸混液で高かった。他の 5 元素については硝酸のみの方がわずかに高かった。C では硝酸と硝酸・フッ化水素酸混液で優劣はなかった。以上の結果より、ゴムチップのマイクロ波分解に使用する酸として、硝酸・フッ化水素酸混液を選択した。

1-2. ゴムチップ中の濃度

ゴムチップをマイクロ波加熱分解し ICP-MS で分析した。27 元素の定量限界濃度は 0.01~2 $\mu\text{g/g}$ であった。46 試料全てで検出されたのは Zn、Al、Fe、Mg、Pb、Bi 及び Tl で、90%以上の頻度で検出されたのは Cr、Ba、Mn、Co、V 及び Sr であった。一方、As 及び Se の検出率はそれぞれ 45.7%及び 32.6%であった (図 1)。ゴムチップ中に最も高濃度に含まれていた元素は Zn で、次いで Al 及び Fe の順であった。Hg を除く有害金属 7 元素の中では Pb が中央値で 20 $\mu\text{g/g}$ と濃度が高かった (図 2)。ゴムチップの材質別に各元素の濃度を比較した。Zn は Mix 試料で他材質試料よりも高濃度に検出された。Al は EPDM で高濃度に検出された。Cr

については EPDM の一部試料で高濃度検出されるものがあった (表 3)。今回検出されたゴムチップ中の各元素の濃度を ECHA が収集した論文の報告値と比較した (表 4、表 5)。

2. 水銀分析

Hg 専用測定装置を用いて、各試料 4 回測定した。今回用いた条件での試料中の Hg の定量限界は約 0.3 ng/g であった。中央値で 0.011 $\mu\text{g/g}$ 、最も高いものでも EPDM の 0.064 $\mu\text{g/g}$ であった。ECHA が収集した文献で検出された最大値よりも 1 桁少なかった。ゴムチップの材質・由来製品別に濃度を比較した (表 6)。EPDM 単独組成のものは Hg 含量が若干高い傾向があり、TPE の 1 試料の含有量は混合材質の Mix 試料と差はなかった。

D. 考察

今回、販売及び施工面積シェア上位 10 社の人工芝施工業者から 46 製品 (ゴムチップメーカー 20 社) を入手した。日本国内に敷設される人工芝グラウンドで使われるほとんどすべて (各人工芝施工業者の申告によると 95%以上) の種類のゴムチップを入手でき、国内のゴムチップの実態がほぼ把握できると考えられた。

ゴムチップは廃タイヤ等を切断、細粒化して製造され、特別な加工はされない。タイヤだけをとっても、タイヤメーカー、タイヤブランド、冬用・夏用、トラック・バス、乗用車と多くの種類があり、使用済みとなるまでの走行場所や走行期間、チップの製造環境も様々であるように、ゴムチップの原料にばらつきがある。廃タイヤに EPDM 製の工業用ゴムチップが混合されたものからゴムチップが製造されているものもある。そのため、1 製品から 3 回以上の測定用試料をとり、それぞれを分析して得られた値には幅が認められた。

EN 71-3 は玩具中の重金属類が接触や誤飲により健康に影響を与えるレベルで含まれてい

るか否かを調べる溶出試験であり、Al、Sb、As、Ba、B、Cd、Cr (Cr³⁺、Cr⁶⁺)、Co、Cu、Pb、Mn、Hg、Ni、Se、Sr、Sn (Sn, Organic Sn) 及び Zn の 17 元素 19 項目が検査対象になっている。今回 EPA は、収集した文献で測定されている元素は 33 種あるが、うち Al、Sb、As、Ba、Be、Cd、Cr、Co、Cu、Fe、Pb、Mg、Mn、Hg、Mo、Ni、Rb、Se、Sr、Sn、V 及び Zn の 22 元素を調査する計画である。本研究では 28 元素を定量した。

ゴムチップに高濃度に含まれていた元素は Zn、Al、Fe であった。酸化亜鉛はゴムの加硫に用いられるため、Zn の濃度が高いことは既存の報告と同様であった。Al の濃度は EPDM の 5 試料で他の材質のものより高く、EPDM 製造の際の添加剤と考えられた。

RIVM がゴムチップの健康影響の懸念の指標としている Pb、Co 及び Cd については、今回検出された値は ECHA が収集した文献でこれまで報告されている値と大きな差はないと考えられた。Pb は米国で懸念を示して報道している金属であるが、ハザードとしての発がん性ありとは評価されていない。今回、Pb は TPE 以外のほとんどの試料に認められたが、最大 29 µg/g であった。Ga、Ag、Cs 及び Bi の 4 元素は、ECHA が収集した文献等では取り上げられていない元素であった。Ag、Cs、Bi はいずれも数 µg/g であり、Ga は最大 32 µg/g を示す TPE 製チップがあった。Hg は全ての試料で検出されたが、最大でも 0.1 µg/g 未満であった。

Cr については、EPDM 製の 2 製品に高濃度認められた。酸化クロム (Cr₂O₃) はゴム等に使用される緑色顔料であり、今回検出された Cr はこれに由来すると考えた。Sb については RIVM や ECHA では健康影響の懸念のある元素とされていないが、一部の試料で ECHA が収集した論文で報告されているよりは高い値を示すものがあった。樹脂の難燃化には三酸化

アンチモンが使われているとの情報もあり、これが定量された可能性を推測する。

RIVM はゴムチップからの金属の溶出性を調査し、リスクを評価している。ECHA も金属の含有量の情報を収集しながらも溶出性を注視している。今回の研究ではゴムチップ中の金属の種類と含有量を求めた。しかし、ゴムチップに含まれているすべての元素が溶出し、ヒトに吸収されるわけではない。詳細な健康影響の評価には、含有量だけでは判定できず、溶出量の調査が必要となる。EPA は現在、調査研究を進めており、2017 年後半に結果を報告する予定である。ECHA もその結果を踏まえ再評価を行うこととしている。我が国においても、海外の調査状況等を踏まえ、追加調査の実施の可否を検討することが望ましい。

E. 結論

本研究では、日本国内で流通している人工芝用ゴムチップの発がんリスク等の健康影響評価に資する情報を収集することを目的として、ゴムチップ中の金属類の含有量を測定した。人工芝施工業者 10 社から 46 試料を入手し、28 元素を分析、検出した。同一製品であっても繰り返し測定で得られた値には大きな差があった。Zn は測定した元素の中で最も高濃度に検出された。Pb は TPE 以外のほとんどの試料に認められ、最大値は 29 µg/g であった。Hg は全ての試料で検出されたが、最大でも 0.1 µg/g 未満であった。Cr については、一部ゴムチップで高い濃度を示すものが認められた。

RIVM や ECHA はゴムチップからの金属類の溶出性からそのリスクを評価している。ゴムチップに含まれているすべての元素がヒトに吸収されるわけではなく、リスクを評価するには、溶出性についての評価が必要である。EPA は現在、調査研究を進めており、ECHA もその結果を踏まえ再評価を行うこととしている。海

外の調査状況を踏まえ、我が国でも追加調査の実施の可否を検討することが望ましい。

参考文献

Bocca B, Fortea G, Petruccia F, Costantina F, Izzob P. Metals contained and leached from rubber granulates used in synthetic turf areas. *Sci. Total Environ.*, 2009, 407, 2183–2190.

Kennedy P, Gadd J. Preliminary examination of trace elements in tyres, brake pads and road bitumen in New Zealand. Report prepared for the Ministry of Transport of New Zealand; 2000. revised in 2003.

F. 健康危機情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

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

なし

2. 実用新案特許

なし

3. その他

なし

表 1. 試験に供した 46 製品の概要

No.	Origin	Material	Color
1	Industrial rubber	SBR・EPDM	Black
2	Tire	NR・Synthetic rubber	Black
3	Industrial rubber	SBR	Green
4	Tire	Unknown	Black
5	Synthetic rubber	EPDM	Green
6	Industrial rubber	Unknown	Green
7	Tire	NR	Black
8	Tire	NR	Black
9	Mixture / Unknown	NR・SBR・BR・EPDM	Black
10	Synthetic rubber	EPDM	Beige
11	Synthetic rubber	EPDM	Green
12	Tire	NBR・SBR	Black
13	Tire	NBR・SBR	Black
14	Tire	NBR・SBR	Black
15	Mixture / Unknown	SBR	Beige
16	Synthetic rubber	EPDM	Green
17	Industrial rubber	NR・SBR・NBR・EPDM	Black
18	Industrial rubber	NR・SBR・NBR・EPDM	Green
19	Tire	SBR・NR	Black
20	Tire	SBR・NR	Black
21	Tire	Unknown	Black
22	Industrial rubber	SBR・EPDM	Black
23	Industrial rubber	SBR・EPDM・NBR・NR	Black
24	Industrial rubber	NR・SBR・EPDM	Black
25	Thermoplastic elastomers	TPE	Green
26	Thermoplastic elastomers	TPE	Beige
27	Thermoplastic elastomers	TPE	Brown
28	Tire	SBR	Beige
29	Tire	SBR	Brown
30	Tire	SBR	Green
31	Tire	SBR	Black
32	Tire	SBR	Black
33	Tire	SBR・NR	Black
34	Tire	NR・SBR	Black
35	Tire	NR・SBR	Black
36	Tire	NR・SBR	Black
37	Synthetic rubber	EPDM	Beige
38	Thermoplastic elastomers	TPE	Green
39	Industrial rubber	NR・EP・NBR	Black
40	Tire	NR	Black
41	Tire	SBR・BR・NR	Black
42	Tire	SBR	Black
43	Industrial rubber	NR・SBR・EPDM	Black
44	Tire	SBR・NR	Black
45	Tire	SBR・NR	Black
46	Mixture / Unknown	SBR	Black

表2. マイクロ波分解条件の違いによってゴムチップの分解溶液に検出される元素濃度

試料名	分解条件	濃度	Pb	As	Cd	V	Co	Ni	Cr	Cu	Ba	Zn	Al
A	硝酸のみ	平均	76	2.9	2.0	2.3	64	4.4	4.1	69	65	8723	1768
		SD	28	0.78	0.27	0.28	5.2	1.3	1.0	3.6	32	693	40
		RSD	37	27	14	12	8.0	31	25	5.2	49	7.9	2.3
	硝酸+フッ酸	平均	82	4.3	4.4	5.6	108	6.5	7.2	125	123	11904	2901
		SD	31	0.65	1.3	1.1	19	0.46	0.88	19	53	523	738
		RSD	38	15	30	19	18	7.0	12	16	43	4.4	25
B	硝酸のみ	平均	15	0.32	0.25	0.19	6.5	1.8	0.57	3.1	5.8	11238	345
		SD	2.0	0.073	0.017	0.12	2.8	0.57	0.093	2.4	6.3	568	58
		RSD	13	23	6.8	62	43	31	16	77	108	5.1	17
	硝酸+フッ酸	平均	13	0.25	1.1	1.1	19	2.7	2.2	2.5	3.2	9499	373
		SD	2.6	0.066	0.022	0.089	13	0.26	0.42	0.94	0.36	355	17
		RSD	21	27	2.1	8.0	68	9.6	19	38	11	3.7	4.5
C	硝酸のみ	平均	0.49	0.44	0.094	0.81	ND	0.60	2.0	40.6	3.4	778	582
		SD	0.036	0.082	0.010	0.17	—	0.13	0.30	4.2	0.34	86	61
		RSD	7.3	19	10.8	21	—	21	15	10	10	11	11
	硝酸+フッ酸	平均	0.46	0.36	0.88	0.96	0.40	1.4	1.5	41	3.0	628	135
		SD	0.015	0.028	0.014	0.089	0.0095	0.61	0.14	0.85	0.18	8.8	33
		RSD	3.3	7.7	1.6	9.3	2.4	43	9.0	2.1	5.9	1.4	24

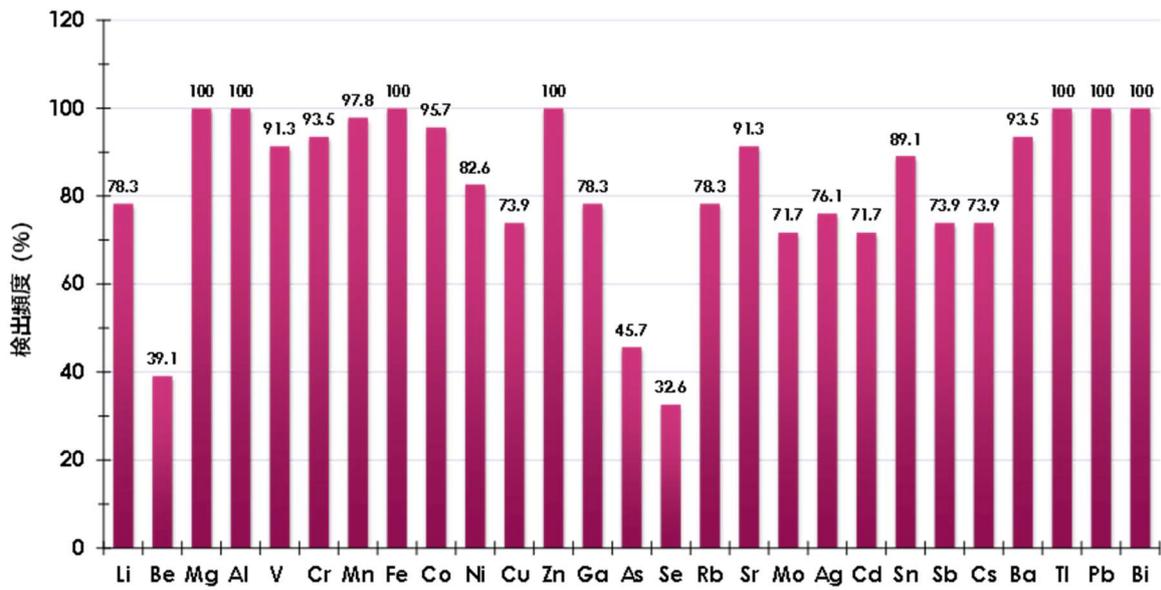


図1. ICP-MS 分析で各元素が検出された試料数の全 46 試料に対する割合 (検出頻度 (%))

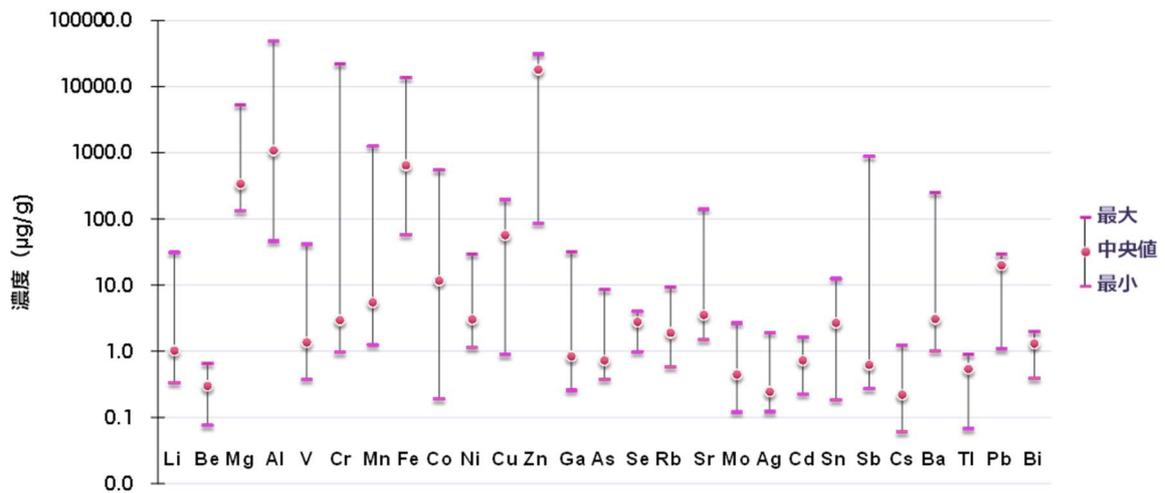


図2. ICP-MS 分析により定量された各元素の濃度
全 46 試料における最大、最小及び中央値をプロットした。

表3. ICP-MS分析による試料材質別の各金属濃度

Element	Mix (n=37)			EPDM (n=5)			TPE (n=4)					
	Detection number	Concentration (µg/g)		Detection number	Concentration (µg/g)		Detection number	Concentration (µg/g)				
		Min	Max		Median	Min		Max	Median	Min	Max	Median
Li	28	0.33	2.9	0.91	5	15	31	20	3	0.56	13	1.3
Be	15	0.076	0.46	0.16	3	0.42	0.65	0.52	0			
Mg	37	131	5270	306	5	349	1861	448	4	1605	3287	2339
Al	37	46	3322	1041	5	44873	49303	46991	4	64	687	386
V	34	0.38	3.0	1.4	5	21	41	30	3	0.55	0.73	0.68
Cr	34	0.97	20	2.5	5	17	22012	23	4	1.7	138	45
Mn	36	1.3	1254	5.1	5	4.4	38	18	4	6.6	12	10
Fe	37	58	13577	380	5	2283	10446	3382	4	165	9486	748
Co	36	0.19	548	148	5	1.3	2.7	2.1	3	0.23	0.29	0.24
Ni	32	1.6	29	3.0	5	6.4	10	9.2	1	1.1		
Cu	30	0.89	193	57	2	33	87	60	2	13	63	
Zn	37	11821	30816	20054	5	1172	4539	4139	4	87	1755	453
Ga	28	0.26	1.4	0.81	5	9.3	18	16	3	0.28	32	0.30
As	16	0.38	0.96	0.55	2	0.73	2.1		3	2.9	8.6	5.3
Se	12	1.6	4.0	3.0	1		1.5		2	0.98	1.0	
Rb	31	0.58	2.9	1.9	5	0.84	9.3	1.5	0			
Sr	33	1.5	35	2.7	5	28	140	86	4	17	61	26
Mo	25	0.12	2.7	0.43	5	0.50	1.0	0.56	3	0.23	0.30	0.27
Ag	31	0.12	1.9	0.28	1		0.25		3	0.21	0.22	0.22
Cd	29	0.31	1.6	0.80	1		0.23		3	0.40	0.42	0.42
Sn	32	0.59	12	3.0	5	1.3	4.4	1.3	4	0.19	0.62	0.27
Sb	30	0.28	879	0.60	1		1.8		3	0.27	409	221
Cs	26	0.06	0.62	0.22	5	0.11	1.2	0.16	3	0.22	0.24	0.22
Ba	34	1.23	6.51	2.93	5	35	70	57	4	1.0	249	2.3
Tl	37	0.095	0.897	0.544	5	0.067	0.61	0.079	4	0.48	0.54	0.52
Pb	37	3.62	29.2	20.8	5	9.4	20	12	4	1.1	1.6	1.2
Bi	37	0.699	2.00	1.49	5	0.39	0.92	0.46	4	0.61	0.73	0.71

表4. ゴムチップ中の金属濃度に関する既存文献値との比較

Element	ECHA1		ECHA2		Kennedy and Gadd (2000)	Bocca et al. (2009)			This study			
	Min	Max	Min	Max		Min	Max	Median	Min	Max	Mean	Median
Al	603.0	876.0	1.2	6680	20.5	1.2	6680	755	46	49303	6015	1078
As	<3	<3	0.10	1.21	nd	0.10	1.21	0.24	0.38	8.6	1.4	0.72
Ba	5.0	12.0	2.4	4778	25.8	2.4	4778	22	1.0	249	15	3.1
Be	<3	<3	0.001	0.37	0.3	0.001	0.37	0.04	0.076	0.65	0.30	0.30
Cd	<3	<3	0.11	2.38	0.19	0.11	1.89	0.37	0.23	1.6	0.78	0.73
Co	99.0	268.0	0.7	268	1.05	3.5	234	15	0.19	548	108	12
Cr	3.0	12.0	0.4	56	<1	0.4	56	6.2	0.97	22012	709	2.9
Cu	39.0	111.0	0.8	111	1	0.8	12	60	0.89	193	58	57
Fe	451.0	2310.0	15	4318	105	15	4318	305	58	13577	2370	645
Hg	<3	<3	0.03	0.16	<0.01	0.03	0.16	0.07	0.0004	0.064	0.013	0.011
Li			0.6	11	0.2	0.6	11	1.5	0.33	31	4.3	1.0
Mg	288.0	507.0	123	966	11.2	123	966	456	131	5270	741	339
Mn	4.0	19.0	2.6	30	1.2	3.0	30	5.2	1.3	1254	35	5.5
Mo	<3	<3	0.04	6.6	1	0.04	6.6	0.2	0.12	2.7	0.57	0.45
Ni	3.0	8.0	0.6	26.12	1	0.6	5.8	2.0	1.1	29	5.0	3.0
Pb	11.0	25.0	10.76	308	2.72	12	46	22	1.1	29	16	20
Rb			0.7	26	<0.2	0.7	26	1.7	0.6	9.3	2.0	1.9
Sb			0.3	7.7	<0.2	0.3	7.7	1.1	0.27	879	47	0.62
Se	<3	<3	<0.3	<3	nd	<0.3	<0.3	<0.3	1.0	4.0	2.6	2.8
Sn			0.1	39.0	<0.5	0.1	3.0	1.2	0.19	12	3.1	2.7
Sr			0.6	90	0.6	3.2	90	12	1.5	140	19	3.5
Tl	<3	<3			nd				0.067	0.90	0.50	0.54
V	<3	<3	0.4	22	nd	0.4	22	2.2	0.38	41	4.9	1.4
W					nd				na	na	na	na
Zn	15000	20000	118	21000	8310	118	19375	10229	87	30816	15893	17863
Ag									0.12	1.9	0.54	0.25
Bi									0.39	2.0	1.2	1.3
Cs									0.060	1.24	0.32	0.22
Ga									0.26	32	3.6	0.84

nd: not detected. na: not analyzed.

Hg値は専用装置の結果から記載。

ECHA1: ECHAがヨーロッパタイヤ工業会(ETRMA)から入手したタイヤ中の元素データより抜粋

ECHA2: ECHAの収集した文献情報

表 5. European Chemicals Agency (ECHA)が収集した文献におけるゴムチップ中の金属濃度

ECHA (2017): ANNEX XV REPORT: An evaluation of the possible health risks of recycled rubber granules used as infill in synthetic turf sports fields. ANNEXES, p.19-20 より

Table I.5, Type A - Concentrations of metals in new recycled rubber granules, samples from manufacturer, stocks etc.

	Norwegian Building Research Institute (2004) (three samples of recycled rubber from supplier, origin not known) (mg/kg)	Nilsson N. (2008) (mg/kg) (2 samples)	Marsili et al. (2014) (4 samples) (mg/kg)	Aliapur (2015) (batches of passenger car tyres and truck and bus tyres, elemental composition) (mg/kg)	Murfit Industries (submitted 2016) (mg/kg) (recycled rubber granules, several products, from consumer tyres)
Aluminium				603.0-876.0	25.7
Antimony					<0.05
Arsenic	<2-<3				<0.05
Barium				5.0-12.0	2.6
Beryllium				<3	
Boron					11.5
Cadmium	1-2		0.47-2.05		<0.5
Chromium	<2-<2		3.34-17.52	3.0-12.0	
Chromium III					<0.5
Chromium VI					<0.004
Cobalt				99.0-268.0	0.7
Copper	20-70		5.59-84.49	39.0-111.0	39.2
Iron			129.12-7256	451.0-2310.0	
Lead	15-20		13.97-33.58	11.0-25.0	<0.5
Lithium					
Magnesium				288.0-507.0	
Manganese				4.0-19.0	2.6
Mercury	<9.93-0.04			<3	<0.5
Molybdenum				<3	
Nickel	<1-<5		4.11-26.12	3.0-8.0	<0.5
Rubidium					
Selenium				<3	<0.5
Strontium					0.6
Tin					<0.5
Titanium				32.0-72.0	
Vanadium				<3	
Wolfram					
Zinc	7 300-17 000	16 200, 18 500	3 474-13 202	15 000-20 000	491

Table I.6, Type A - Concentrations of metals in recycled rubber granules, samples taken from the fields

	Nilsson N. (2008) (mg/kg) (1 sample)	Bocca et al. (2009) (mg/kg) (32 samples: black, white and coloured)	Menichini et al. (2011) (mg/kg) (4 samples, uncoated)	Menichini et al. (2011) (mg/kg) (2 samples, coated)	Menichini et al. (2011) (mg/kg) (2 samples, recycled scrap of vulcanised rubber)	Menichini et al. (2011) (mg/kg) (3 samples, recycled ground gaskets)	Ruffino et al. (2013) (4 samples) (mg/kg)	Marsili et al. (2014) (4 samples) (mg/kg)
Aluminium		1.2- 6 680	164-477	490, 1 028	3 260, 311	2 065- 5 922		68-94
Antimony		0.3-7.7	0.46-1.1	1.6, 6.4	1.2, 3.6	0.65-2.7		
Arsenic		0.10-1.21	0.10-0.41	0.12, 0.24	1.2, 0.11	0.28-0.54		<5.3
Barium		2.4- 4 778	2.4-23	4.7, 741	31, 10	22- 4 778		10.7-167
Beryllium		0.001-0.37	0.008-0.04	0.007, 0.04	0.37, 0.006	0.06-0.21		
Cadmium		0.11-1.89	0.62-1.9	0.12, 1.9	0.3, 0.17	0.17-1.1		<0.25 0.47-2.38
Chromium		0.4-56	<0.34.6	1.8, 6.2	6.2, < 0.3	2.5-20		<0.71 (tot) 1.91-5.37
Cobalt		3.5-234	8.8-116	5.0, 234	4.1, 3.5	8.4-21		97-125
Copper		0.8-60	8.7-22	12, 60	5.9, 13	3.4-11		29-60.5 5.49-65.11
Iron		15- 4 318	199-620	201, 465	637, 183	241-460		37-105 262.2- 1 577.4
Lead		12-46	12-26	<0.7, 28	14, < 0.7	14-35		19.7-308 10.76-38.99
Lithium		0.6-11	0.87-1.4	0.60, 7.4	11, 2.7	1-4.4		
Magnesium		123-966	235-653	668, 966	518, 186	123-286		36-53
Manganese		3.0-30	3.0-4.4	4.9, 5.2	10, 6.2	3.8-16		4-5.5
Mercury		0.03-0.16	0.05-0.16	0.07, 0.08	0.06, 0.03	0.07-0.09		
Molybdenum		0.04-6.6	0.12-0.29	0.09, 0.13	0.19, 0.11	0.3-6.6		
Nickel		0.6-5.8	1.3-2.5	0.67, 5.8	4.4, 0.61	2.4-5.5		<1.5 3.9-5.75
Rubidium		0.7-26	0.9-3.1	1.8, 3.0	26, 0.78	1.5-2.2		
Selenium		<0.3-<0.3	<0.3-<0.3	<0.3, <0.3	< 0.3	0-0		
Strontium		3.2-90	3.2-6.0	12, 19	17, 9.9	6.9-86		
Tin		0.1-3.0	0.65-2.4	0.58, 1.74	3, 0.32	0.98-1.4		13-39
Titanium		0.01-0.21	0.04-0.14	0.03, 0.07	0.21, 0.01	0.03-0.17		36-48.5
Vanadium		0.4-2.2	1.3-3.5	1.5, 1.5	9.6, 0.94	9.7-22		
Wolfram		0.02-2.0	0.06-0.12	0.07, 0.36	1.8, 0.13	0.15-0.79		
Zinc	21000	118- 19 375	10 229-17 772	1 063, 19 375	7 611, 1 408	9 488-14 187	1 220-1 530	4 168-6 006

表 6. ゴムチップ中の水銀濃度 (材質・由来ゴム製品別)

		Hg (ng/g)		
		Min	Max	Median
Mix	Tire	5.5	21.6	12.0
	Industrial rubber	2.3	23.0	4.9
	Mix/Unknown	7.8	9.3	10.0
EPDM		14.5	63.8	45.0
TPE		0.4	4.8	0.7