

厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）  
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多環芳香族炭化水素類の分析

研究分担者 西 以和貴 神奈川県衛生研究所 理化学部 技師

**研究要旨**

近年、各国で人工芝グラウンド用ゴムチップが含有する化学物質の健康リスクについて懸念が高まっており、米国では2016年2月に米国環境保護庁（EPA）などが連携して調査を開始することが発表された。多環芳香族炭化水素類（PAHs）は発がん性が疑われる化合物が多い化合物群であり、かつ海外ではゴムチップ中に様々な種類のPAHsが含有されていることが既に報告されている。しかし、国内で流通しているゴムチップ中のPAHsについては未だデータがない状況である。本研究では、人工芝グラウンド用ゴムチップの健康影響評価に向けて有用な情報を提供することを目的として、ゴムチップ中のPAHs及びその類縁化合物の測定方法を構築するとともに、国内に流通する人工芝グラウンド用ゴムチップの実態調査を行った。測定対象物質は、既報値及び各国の調査結果と比較できるように、国際がん研究機関（IARC）の発がんリスク分類2B以上、海外で規制対象となっているもの、発がん性に関する文献があるもの、及びEPAが調査対象としたもの等、合計46化合物を選定した。試料は人工芝メーカー10社から計46製品を入手した。これは、日本国内に敷設される人工芝グラウンドに使われるほとんどすべての種類のゴムチップを入手したことになり、これを分析したことで国内のゴムチップの実態がほぼ把握できたと考えた。試料の抽出はドイツの機器安全法に基づく製品安全認証に用いられるPAHs分析法を一部変更して実施した。ただし、試料の中には妨害物質の影響で、この方法では測定できないものがあったため、別途妨害物質を除去する方法を構築したところ、測定が可能となった。調査の結果、専用合成ゴム及び専用熱可塑性エラストマー（TPE）由来の試料からは測定対象の物質はほとんど検出されなかった。一方、廃タイヤ、工業用ゴム由来の試料からは、測定対象とした46化合物のうち、32化合物が検出された。廃タイヤ由来と工業用ゴム由来の試料を比較したところ、PAHsは廃タイヤ由来の試料の方がやや高い濃度で検出された。工業用ゴム由来の試料のほとんどにPAHsの検出されにくいエチレン・プロピレン・ジエンゴム（EPDM）が混合されている一方で、廃タイヤ由来の試料にはEPDMが混合されたものが無いことが原因と考えられた。本研究により、現在国内に流通している人工芝グラウンド用ゴム

チップ中の PAHs 等の濃度実態が明らかになった。欧州化学品庁 (ECHA)、オランダ国立公衆健康環境研究所 (RIVM) 及び既存文献で測定されている PAHs について、本研究と最高濃度を比較すると、本研究で得られたそれらの PAHs 濃度は同レベルもしくはそれ以下であった。また、ECHA は代表的な 8 種類の PAHs のゴムチップ中濃度の合計値を 20 µg/g として健康リスク評価を行っているが、その値を比較すると、本研究で得られた値の方が低かった。一方、EPA は 2017 年後半に調査結果を報告する予定であり、これらの海外の調査状況等を踏まえ、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。

## A. 研究目的

生活環境の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・リサイクル及び適正処分の推進は重要な課題である。使用済の廃棄タイヤは再生タイヤの原料としてリユースされるほか、資源リサイクルされている。破碎したゴムチップは弾性充填材としてスポーツ競技場の人工芝等に利用されている。

米国ではかねてから人工芝グラウンドで競技する選手の発がんリスクとゴムチップとの関連性について報道されていたが、2016 年 2 月に米国環境保護庁 (EPA) は米国消費者製品安全委員会 (CPSC) 等と連携して、人工芝に使われる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共同調査研究を開始すると発表した。<sup>1)</sup>

わが国においても、ゴムチップを用いた人工芝はサッカー場など競技場のほか、子供が利用する学校など多くの場所で使用されている。しかし、わが国で使用されている人工芝グラウンド用ゴムチップについて健康影響の観点から成分分析を行った例はなく、含まれる有害物質の種類や量はわかっていない。

多環芳香族炭化水素類 (PAHs) は、ベンゼン環を 2 個以上有する芳香族炭化水素類の総称であり、代表的な化合物としてベンゾ[a]ピレン等が挙げられる。タイヤの製造に用いられるカーボンブラック<sup>2)</sup>やエクステンダーオイル<sup>3)</sup>には、不純物として非意図的に PAHs 等が含有される可能性がある。なお、エクステンダーオイルについては、2010 年から EU の化学物質の登録、評価、認可及び制限に関する規則 (REACH 規則) により、含有される PAHs 量が制限されている。<sup>3)</sup>

廃タイヤからリサイクルされた人工芝グラウンド用ゴムチップ中の PAHs については海外で既に調査され、様々な種類の PAHs が検出されたと報告されている。<sup>4)9)</sup>しかし、国内に流通しているゴムチップ中の PAHs については未だデータがない状況である。

本研究では、人工芝グラウンド用ゴムチップの健康影響評価に向けて有用な情報を提供することを目的として、ゴムチップ中 PAHs 及びその類縁化合物の測定方法を構築するとともに、日本国内に流通する人工芝グラウンド用ゴムチップの分析を行った。

## B. 研究方法

## B-1. 測定対象物質の選定

既報値及び各国の調査結果と比較できるように、国際がん研究機関 (IARC) の発がんリスク分類<sup>10)</sup>で 2B (発がん性が疑われる) 以上のもの、海外で規制対象となっているもの、発がん性に関する文献があるもの、及び EPA が調査対象としたもの等、合計 46 種の PAHs 及びその類縁化合物を選定した。選定した PAHs 等は表 1 のとおりである。また、構造式は図 1 に示した。

## B-2. 試薬及び使用器具

### 試薬

標準物質及び内標準物質は、表 1 に示したメーカーから購入した。純度はいずれも 97%以上である。定量分析時には AccuStandard 社から購入した混合標準溶液である、多環芳香族炭化水素標準品 (ケベック州環境省・多環芳香族炭化水素混合物) (500 µg/mL ジクロロメタン:ベンゼン溶液)を用いた。この混合標準液に含まれる化合物は表 1 に示したとおりであり、当該製品に含まれない化合物は前述の標準物質を個別にトルエンに溶解したものをを用いた。トルエン、アセトン、ヘキサン及びエタノールは和光純薬工業株式会社製の残留農薬・PCB 試験用を用いた。水酸化カリウムは和光純薬工業株式会社製の特級を用いた。

1 mol/L 水酸化カリウム/エタノール溶液は水酸化カリウム 11.2 g を超純水 10 mL に溶解し、さらにエタノール 200 mL を加えて調製した。

### 器具等

シリンジフィルター (孔径 0.2 µm、フ

ィルター材質 PTFE)、ヘッドスペース用バイアル及びセプタム付クrimpキャップ (PTFE コーティング) はジーエルサイエンス株式会社から購入した。超音波洗浄機はシャープマニファクチャリングシステム株式会社製の UT-105HS (高周波出力 100 W、35 kHz) を用いた。

## B-3. 試料の抽出

### 試料

試料は人工芝メーカー 10 社から計 46 試料を入手した。これは、日本国内に敷設される人工芝グラウンドに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に相当し、入手した試料を測定することにより、国内の実態が把握できると考えられた。試料を由来別に分類し、表 2 に示した。試料の詳細は重金属分析の分担報告書を参照のこと。

### 抽出方法

#### [方法①]

試料の抽出方法は、ドイツの機器安全法に基づく製品安全認証 (GS マーク) における PAHs 分析法<sup>14)</sup>を一部変更して行った。

試料 0.5 g をヘッドスペースバイアルに採り、トルエン 5 mL 及び内部標準液 (ナフタレン-d8、アセナフテン-d10、クリセン-d10、ペリレン-d12 各 10 µg/mL トルエン溶液) 250 µL を加えた。セプタム付クrimpキャップで蓋をし、超音波洗浄機で 60°C、60 分間抽出を行った。超音波洗浄機から取り出した後、放冷し、シリンジフィルターでろ過した。試験は各試料につき 3 併行で行った。

## [方法②]

後述の理由により、方法①ではベンゾ[c]フルオレン、ベンゾ[c]フェナントレン、ベンゾ[a]アントラセン、シクロペンタ[cd]ピレン、トリフェニレン、クリセン、5-メチルクリセン、ベンゾ[b]フルオランテン、ベンゾ[k]フルオランテン、7,12-ジメチルベンゾ[a]アントラセン、ベンゾ[j]フルオランテンが測定できない試料が存在した。当該試料のこれらの物質については、次に示す方法で抽出を行った。

試料 0.5 g を 50 mL 遠沈管に採り、アセトン 10 mL 及び内部標準液（ナフタレン-d8、アセナフテン-d10、クリセン-d10、ペリレン-d12 各 10 µg/mL トルエン溶液）250 µL を加えた。蓋をし、30 分間超音波抽出した後、抽出液を別の遠沈管に移した。残渣にはヘキサン 10 mL を加え、さらに 30 分間超音波抽出を行った。また、抽出液には 1 mol/L 水酸化カリウム/エタノール溶液 5 mL を加え、30 分間アルカリ分解を行った。アルカリ分解後、超純水 10 mL 及び残渣のヘキサン抽出液を加え、10 分間振とう後、ヘキサン相をナスフラスコに採った。水相にさらにヘキサン 10 mL を加え、10 分間振とう後、前述のヘキサン相に合わせた。ロータリーエバポレーターで 10 mL 以下 5 mL 以上に濃縮した後、窒素気流下で約 0.5 mL になるまで濃縮した。これをトルエンで 5 mL に定容した。試験は 3 併行で行った。

## B-4. 分析方法

測定用試料 1 µL をパルスドスプリットレス方式で GC/MS に注入し、SIM 法を用いて定量を行った。内部標準法によりあ

らかじめ作成した検量線から試料中の各成分の濃度を算出した。

装置：Agilent Technologies 7980B GC System, 5977B MSD

カラム（定量用）：Restek Rxi®-PAH (40 m × 0.18 mmID、膜厚 0.07 µm)

カラム（定性用）：Agilent Technologies DB-5ms (30 m × 0.25 mmID、膜厚 0.25 µm)、

Agilent Technologies DB-35ms (30 m × 0.25 mmID、膜厚 0.25 µm)、

Agilent Technologies DB-17ms (30 m × 0.25 mmID、膜厚 0.15 µm)

注入方式：パルスドスプリットレス (80 psi, 0.7 分間保持)、1 µL

注入口温度：300°C

イオン源温度：300°C

カラム温度：100°C(1 分)→(30°C/分)→210°C→(2°C/分)→270°C→(15°C/分)→350°C(5 分)

キャリアガス：ヘリウム（カラム流量 1.2 mL/分 定流量モード）

定量・確認イオン：表 3 に示したとおり。

測定対象物質の保持時間：表 3 に示したとおり。

定量下限値：表 3 に示したとおり。値は Agilent Technologies Mass Hunter の Replicate Injection MDL-LOQ-LOD calculation を用いて算出した。

## B-5. 測定対象物質の定性

PAHs はマススペクトルがほぼ等しい

異性体が複数存在することが多いことや、フラグメントが少ないことから、定量イオン、確認イオンのみでの定性は困難な場合がある。そこで本研究では、定量イオン・確認イオンのみでの定性に加え、複数種類の GC カラムを用いて定性を行った。

## B-6. 統計解析

統計解析には統計解析ソフト EZR を用いた。<sup>15)</sup>

## C. 結果及び考察

### C-1. 抽出方法の検討

#### [方法①]

抽出溶媒量を検討するために、廃タイヤ由来でコーティングあり、なしの各 1 試料を、それぞれ溶媒量 5 mL 及び 10 mL で抽出した。抽出された測定対象物質の合計値は、コーティングありの試料で溶媒量 5 mL より 10 mL の方が有意に低く、コーティングなしの試料では抽出溶媒量による有意差が認められなかった(図 2)。コーティングありの試料で有意な差が認められた原因として、採取した試料の偏り又は溶媒量増加に伴う定量下限値の上昇が考えられた。本実験の結果から、溶媒量は 5 mL で十分に抽出できることが明らかとなったことから、試料の抽出はトルエン 5 mL を用いることとした。

続いて、超音波抽出を行う時間について検討を行った。前述の試料をそれぞれ 30 分、60 分、120 分間超音波抽出し、抽出された測定対象物質の合計値を比較した(図 3)。コーティングあり、なしともに抽出時間による有意な差は認められな

かったが、30 分間では抽出濃度がやや低い傾向が認められた。したがって、抽出時間を 60 分間とした。

抽出方法の妥当性を確認するため、トルエン 5 mL に対し、全測定対象物質が含まれた 5 µg/mL 混合標準液を 250 µL 添加して回収率の確認を行った。方法①の回収率を表 4 に示した。すべての物質で回収率は 92%を超え、変動係数は 2%未満であった。

#### [方法②]

工業用ゴムの 1 試料(以下、試料 X)において妨害物質の影響により、方法①ではベンゾ[c]フルオレン、ベンゾ[c]フェナントレン、ベンゾ[a]アントラセン、シクロペンタ[cd]ピレン、トリフェニレン、クリセン、5-メチルクリセン、ベンゾ[b]フルオランテン、ベンゾ[k]フルオランテン、7,12-ジメチルベンゾ[a]アントラセン、ベンゾ[j]フルオランテンの測定ができなかった。試料 X を GC/MS によりスキャン分析した結果を図 4 に示した。保持時間 18.5 分から 20.5 分にかけて非常に大きな妨害物質のピークが存在し、この影響で前述の物質が測定できなかったと考えられた。当該ピークのスペクトルを NIST ライブラリにより検索したところ、イソフタル酸ジ(2-エチルヘキシル)(DEHIP)が最も高い一致率であった(図 4)。以後、この妨害物質が DEHIP であると仮定して検討を行った。DEHIP はエステル類であるため、塩基性条件下で加水分解される。測定対象物質の中には塩基性条件で分解される性質のものはないため、試料抽出液に 1 mol/L 水酸化カリウム/エタノール溶液を加えて DEHIP を分解し、除去する

方法を検討した。この方法で試料を前処理したところ、妨害物質のピークは減少し（図 5）、方法①で測定できなかった物質の測定が可能となった。したがって、試料 X については方法①で測定できなかった物質の濃度を方法②で測定した。方法②の回収率は表 5 に示した。

## C-2. 調査結果

試料を分析した結果を、試料の由来別に表 6～10 に示した。専用合成ゴム及び専用熱可塑性エラストマー由来の試料からは 1 試料を除き、PAHs 等はほとんど検出されなかった（図 6）。専用合成ゴム由来の試料は EPDM、専用熱可塑性エラストマー由来の試料は TPE のみで構成されていることから、EPDM・TPE には PAHs がほとんど含まれていないと考えられた。専用熱可塑性エラストマー由来の 1 試料について、PAHs が比較的高く検出されたものがあつたが、当該試料には TPE 以外の材質も混合されている可能性が考えられた。

廃タイヤ、工業用ゴム、廃タイヤ等混合・不明に分類された 37 試料からは様々な PAHs 等が検出され、測定対象とした 46 種類中、32 種類が検出された。検出された PAHs 等のうち、ベンゾ[a]ピレンは IARC のグループ 1（発がん性が認められる）に分類されている。ベンゾ[a]ピレンは廃タイヤ、工業用ゴム、廃タイヤ等混合・不明に分類された 37 試料すべてにおいて検出された。また、グループ 2A（恐らく発がん性がある）に分類されているシクロペンタ[cd]ピレンも 37 試料すべてで検出された。

廃タイヤと工業用ゴムにおける PAHs 濃度の合計値を比較すると、廃タイヤの方がやや高かった（有意差あり）（図 7）。個別の PAHs では、シクロペンタ[cd]ピレンやベンゾ[a]ピレン等の濃度が廃タイヤ由来の試料で有意に高かった（図 8）。工業用ゴムは EPDM が混合されている試料が多いが、廃タイヤ由来の試料に EPDM が混合されているものは無い。前述のとおり、EPDM には PAHs がほとんど含まれておらず、工業用ゴムの PAHs 検出濃度が比較的低いのは EPDM が混合されているためと考えられた。一方、測定対象 PAHs の中でも比較的揮発性の高いナフタレン、1-メチルナフタレン等は工業用ゴムで比較的高かった（図 9）。廃タイヤの試料については、タイヤとして利用されている間に比較的揮発性の高い物質の一部が揮発していると考えられた。

## C-3. 文献値との比較

本研究の結果と、欧州化学品庁(ECHA)、オランダ国立公衆健康環境研究所(RIVM)及び既存文献で報告されている値との比較を表 11 に示した。既存の報告で値が報告されている PAHs について、本研究と最高濃度を比較すると、本研究で得られたそれらの PAHs 濃度は同レベルもしくはそれ以下であった。ECHA では代表的な 8 種類（ベンゾ[a]ピレン、ベンゾ[a]アントラセン、クリセン、ベンゾ[b]フルオランテン、ベンゾ[k]フルオランテン、ジベンゾ[a,h]アントラセン、ベンゾ[j]フルオランテン、ベンゾ[e]ピレン）の PAHs 濃度の合計値を用いて PAHs の健康リスク評価を実施しており、その値には

20 µg/g を用いている<sup>17)</sup>。そして、そのリスク評価に基づき、PAHs による健康リスクの懸念は低いとしている。本研究で得られた PAHs の最高濃度を用いて、ECHA と同様に 8 種類の PAHs 濃度の合計値を算出すると、16.3 µg/g となり、ECHA が健康リスク評価に用いた値よりも低かった。

本研究で検出された化合物で既報では濃度が報告されていない化合物のうち、ビフェニル、ジベンゾフラン、ジベンゾチオフェン、3-メチルフェナントレン、2-メチルフェナントレン、9-メチルフェナントレン、1-メチルフェナントレンは、EPA による調査対象物質に含まれており<sup>18)</sup>、必要に応じて今後発表される調査結果と比較する必要があると考えられた。

#### D. 結論

人工芝グラウンド用ゴムチップの健康影響評価に向けて有用な情報を提供することを目的として、人工芝用ゴムチップ中の PAHs 及びその類縁化合物の分析法を構築し、国内で流通している人工芝グラウンド用ゴムチップの実態調査を行った。

測定対象物質は、既報値及び今後発表が予想される各国の調査結果と比較できるよう、IARC の発がんリスク分類 2B 以上、海外で規制対象となっているもの、発がん性に関する文献があるもの、及び EPA が調査対象としたもの等、合計 46 化合物を選定した。試料は人工芝メーカー 10 社から計 46 試料を入手した。これは、日本国内に敷設される人工芝グラウンドに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したことになり、これを分析したことで国内のゴムチップの実態がほぼ把握できたと考えられた。

試料の抽出はドイツの GS マーク認証に用いられる PAHs 分析法を一部変更して実施した。ただし、試料の中には妨害物質の影響により、この方法では測定できないものがあつたため、別途妨害物質を除去する方法を構築したところ、測定が可能となった。

調査の結果、EPDM 及び TPE のみで構成されている試料からは測定対象物質はほとんど検出されなかった。一方、廃タイヤ、工業用ゴム由来の試料からは、IARC の発がんリスク分類でグループ 1 に分類されるベンゾ[a]ピレンやグループ 2A に分類されたシクロペンタ[cd]ピレンなど、測定対象とした 46 化合物のうち、32 化合物が検出された。

廃タイヤ由来と工業用ゴム由来の試料を比較したところ、測定対象物質は廃タイヤ由来の試料の方がやや高い濃度で検出された。工業用ゴム由来の試料のほとんどに EPDM が混合されている一方で、廃タイヤ由来の試料に EPDM が混合されたものが無いことが原因と考えられた。

本研究により、現在国内に流通している人工芝グラウンド用ゴムチップ中の PAHs 等の濃度実態が明らかになった。既存の報告で値が報告されている PAHs について、本研究と最高濃度を比較すると、本研究で得られたそれらの PAHs 濃度は同レベルもしくはそれ以下であった。また、ECHA で健康リスク評価の際に用いた 8 種類の PAHs 濃度の合計値を比較すると、本研究のほうが低かった。今後、EPA

等の調査結果を踏まえ、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。

## E. 研究発表

1. 論文発表  
なし
2. 学会発表  
なし

## F. 知的所有権の取得状況

1. 特許取得   なし
2. 実用新案登録   なし
3. その他   なし

## G. 参考文献

- 1) U.S.EPA: Federal Research Action Plan on Recycled Tire Crumb Used on Playing Fields and Playgrounds, <https://www.epa.gov/chemical-research/federal-research-action-plan-recycled-tire-crumb-used-playing-fields>
- 2) 一般社団法人 日本化学物質安全・情報センター: 初期評価プロファイル (SIAP) カーボンブラック, <http://jetoc.or.jp/safe/doc/J1333-86-4.pdf>
- 3) Commission of the European Communities: Commission Directive 2005/69/EC of 16th November 2005, amending for the 27th time Council Directive 76/769/EEC on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to restrictions on the marketing and use of certain dangerous substances and preparations (polycyclic aromatic hydrocarbons in extender oils and tyre-res), Official J. Eur. Communities L 323, 9/12/2005, pp. 51–54.
- 4) Gomes et al.: Toxicological assessment of coated versus uncoated rubber granulates obtained from used tires for use in sport facilities., Journal of the Air & Waste Management Association 60.6 (2010): 741–746.
- 5) Llompart et al.: Hazardous organic chemicals in rubber recycled tire playgrounds and pavers., Chemosphere 90.2 (2013): 423-431.
- 6) Marsili, Letizia, et al. "Release of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals from Rubber Crumb in Synthetic Turf Fields: Preliminary Hazard Assessment for Athletes." Journal of Environmental & Analytical Toxicology 5.2 (2014): 1.
- 7) Menichini et al.: Artificial-turf playing fields: contents of metals, PAHs, PCBs, PCDDs and PCDFs, inhalation exposure to PAHs and related preliminary risk assessment., Science of the total environment 409.23 (2011): 4950-4957.
- 8) Li et al.: Characterization of substances released from crumb rubber material used on artificial turf field

- s., Chemosphere 80.3 (2010): 279-285.
- 9) Sadiktsis et al.: Automobile Tires - A Potential Source of Highly Carcinogenic Dibenzopyrenes to the Environment., Environmental science & technology 46.6 (2012): 3326-3334.
  - 10) International Agency for Research on Cancer (IARC): Agents classified by the IARC monographs, [http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/List\\_of\\_Classifications\\_Vol1-14.pdf](http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/List_of_Classifications_Vol1-14.pdf)
  - 11) 神奈川県環境科学センター: 化学物質安全情報提供システム (kis-net) , <http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/kisnet/>
  - 12) 国立医薬品食品衛生研究所: 国際化学物質安全性カード (ICSC) – 日本語版 –, <http://www.nihs.go.jp/ICSC/>
  - 13) SRC, Inc.: FatePointers Search Module <http://esc.syrres.com/fatepointer/search.asp>
  - 14) Ausschuss für Produktsicherheit (AfPS), Prüfung und Bewertung von Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bei der Zuerkennung des GS-Zeichens, [http://www.baua.de/de/Produktsicherheit/Marktueberwachung/pdf/AfPS-GS-2014-01-PAK.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.baua.de/de/Produktsicherheit/Marktueberwachung/pdf/AfPS-GS-2014-01-PAK.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
  - 15) Kanda: Investigation of the freely available easy-to-use software ‘EZ-R’ for medical statistics., Bone marrow transplantation 48.3 (2013): 452-458.
  - 16) Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM): Evaluation of health risks of playing sports on synthetic turf pitches with rubber granulate, [http://www.rivm.nl/en/Documents\\_and\\_publications/Scientific/Reports/2017/February/Evaluation\\_of\\_health\\_risks\\_of\\_playing\\_sports\\_on\\_synthetic\\_turf\\_pitches\\_with\\_rubber\\_granulate](http://www.rivm.nl/en/Documents_and_publications/Scientific/Reports/2017/February/Evaluation_of_health_risks_of_playing_sports_on_synthetic_turf_pitches_with_rubber_granulate)
  - 17) European Chemical Agency (ECHA): Annex XV report an evaluation of the possible health risks of recycled rubber granules used as infill in synthetic turf sports fields. [https://echa.europa.eu/documents/10162/13563/annex-xv\\_report\\_rubber\\_granules\\_en.pdf/dbcb4ee6-1c65-af35-7a18-f6ac1ac29fe4](https://echa.europa.eu/documents/10162/13563/annex-xv_report_rubber_granules_en.pdf/dbcb4ee6-1c65-af35-7a18-f6ac1ac29fe4)
  - 18) U.S. EPA: Research Protocol: Collections Related to Synthetic Turf Fields with Crumb Rubber Infill, <https://www.epa.gov/chemical-research/research-protocol-collections-related-synthetic-turf-fields-crumb-rubber-infill>

表 1. 測定対象 PAHs 等の基本情報及び試薬購入元

No.	化合物名	CAS No.	沸点℃ (昇華点)	logPow ※2	物性値 参考文献	メーカー (単一化合物)	混合 標準溶液
1	Naphthalene	91-20-3	210-217.9	3.01-3.59	kis-net <sup>11)</sup>	Accu Standard	○
2	2-Methylnaphthalene	91-57-6	245	3.87	ICSC <sup>12)</sup>	Accu Standard	
3	1-Methylnaphthalene	90-12-0	241	3.86	ICSC	和光純薬工業	
4	Biphenyl	92-52-4	254-255	3.88-4.09	kis-net	関東化学	
5	2,6-Dimethylnaphthalene	581-42-0	262	4.31	SRC, Inc. <sup>13)</sup>	東京化成工業	
6	Acenaphthylene	208-96-8	280	3.93-4.07	kis-net	Accu Standard	○
7	Acenaphthene	83-32-9	277.5-279	3.92-4.18	kis-net	Accu Standard	○
8	Dibenzofuran	132-64-9	287-288	4.12-5.16	kis-net	Accu Standard	
9	Fluorene	86-73-7	295	4.18-4.67	kis-net	Accu Standard	○
10	Dibenzo[thiophene]	132-65-0	332.5	4.38	SRC, Inc.	東京化成工業	
11	Phenanthrene	85-01-8	339-340.2	4.47-4.57	kis-net	Accu Standard	○
12	Anthracene	120-12-7	339.9-342	4.34	kis-net	Accu Standard	○
13	3-Methylphenanthrene	832-71-3	350	5.15	SRC, Inc.	東京化成工業	
14	Carbazole	86-74-8	354-355	3.29	kis-net	Accu Standard	
15	2-Methylphenanthrene	2531-84-2	-	4.86	SRC, Inc.	Accu Standard	
16	9-Methylphenanthrene	883-20-5	-	-	-	CHIRON AS	
17	1-Methylphenanthrene	832-69-9	-	5.08	SRC, Inc.	Accu Standard	
18	Fluoranthene	206-44-0	367-382	4.9-5.29	kis-net	Accu Standard	○
19	Pyrene	129-00-0	399-404	4.88	kis-net	Accu Standard	○
20	Benzo[c]fluorene	205-12-9	-	5.19	SRC, Inc.	Dr. Ehrenstorfer	
21	Benzo[c]phenanthrene	195-19-7	-	5.52	SRC, Inc.	Accu Standard	○
22	Benz[a]anthracene	56-55-3	435	5.61	ICSC	Accu Standard	○
23	Cyclopenta[cd]pyrene	27208-37-3	-	5.19	SRC, Inc.	Accu Standard	
24	Triphenylene	217-59-4	425	5.49	SRC, Inc.	東京化成工業	
25	Chrysene	218-01-9	448	5.61-5.91	kis-net	Accu Standard	○
26	5-Methylchrysene	3697-24-3	-	6.07	SRC, Inc.	Accu Standard	
27	Benzo[b]fluoranthene	205-99-2	481	6.12	ICSC	Accu Standard	○
28	Benzo[k]fluoranthene	207-08-9	480	6.84	ICSC	Accu Standard	○
29	7,12-Dimethylbenz[a]anthracene	57-97-6	-	5.8	SRC, Inc.	東京化成工業	○
30	Benzo[j]fluoranthene	205-82-3	-	6.11	SRC, Inc.	Accu Standard	○
31	Benz[ <i>l</i> ]aceanthrylene /Benz[ <i>e</i> ]aceanthrylene※	202-33-5 /199-54-2	-	-	-	Carbosynth	
32	Benzo[ <i>e</i> ]pyrene	192-97-2	-	6.44	SRC, Inc.	Accu Standard	○
33	Benzo[ <i>a</i> ]pyrene	50-32-8	312-495	6.04	kis-net	Accu Standard	○
34	3-Methylcholanthrene	56-49-5	280	6.42	kis-net	Supelco	○
35	Dibenz[ <i>c,h</i> ]acridine	224-53-3	-	6.45	SRC, Inc.	Sigma-Aldrich	
36	Dibenz[ <i>a,h</i> ]acridine	226-36-8	-	5.73	SRC, Inc.	Sigma-Aldrich	
37	Dibenz[ <i>a,j</i> ]acridine	224-42-0	-	5.63	SRC, Inc.	Accu Standard	
38	Indeno[1,2,3- <i>cd</i> ]pyrene	193-39-5	536	6.584	kis-net	Accu Standard	○
39	Dibenz[ <i>a,h</i> ]anthracene	53-70-3	524	5.97-6.5	kis-net	Accu Standard	○
40	Benzo[ <i>ghi</i> ]perylene	191-24-2	278	6.58	ICSC	Accu Standard	○
41	7H-Dibenzo[ <i>c,g</i> ]carbazole	194-59-2	-	5.58	SRC, Inc.	東京化成工業	
42	Dibenzo[ <i>a,l</i> ]pyrene	191-30-0	-	7.71	SRC, Inc.	東京化成工業	○
43	Dibenzo[ <i>a,e</i> ]pyrene	192-65-4	-	7.28	SRC, Inc.	Accu Standard	
44	Coronene	191-07-1	525	7.64	SRC, Inc.	東京化成工業	
45	Dibenzo[ <i>a,i</i> ]pyrene	189-55-9	-	7.28	SRC, Inc.	Accu Standard	○
46	Dibenzo[ <i>a,h</i> ]pyrene	189-64-0	-	7.28	SRC, Inc.	東京化成工業	○
IS1	Naphthalene-d8	1146-65-2	-	-	-	C/D/N Isotope	
IS2	Acenaphthene-d10	15067-26-2	-	-	-	和光純薬工業	
IS3	Chrysene-d10	1719-03-5	-	-	-	関東化学	
IS4	Perylene-d12	1520-96-3	-	-	-	関東化学	

※ Benz[*l*]aceanthrylene/Benz[*e*]aceanthrylene = 70:30

※2 オクタノール/水分配係数

表 2. 試料の由来別分類

由来別	材質※	数
廃タイヤ	SBR、NR、NBRの 単独又は混合	24
工業用ゴム	SBR、NR、NBR、EPDMの 単独又は混合 (EPDM単独は別分類)	10
廃タイヤ・工業用ゴムの混合／不明	SBR、NR、BR、EPDMの 単独又は混合 (EPDM単独は別分類)	3
専用合成ゴム	EPDM	5
専用熱可塑性エラストマー	TPE	4
合 計		46

※略号については下記のとおり

SBR: スチレン・ジタジエンゴム

NR: 天然ゴム

BR: ブタジエンゴム

NBR: ニトリルゴム

EPDM: エチレン・プロピレン・ジエンゴム

TPE: 熱可塑性エラストマー

表 3. 測定対象物質の保持時間、定量イオン、確認イオン、及び定量下限値

No.	化合物名	保持時間 (分)	定量イオン (m/z)	確認イオン (m/z)	定量下限値 ( $\mu\text{g/g}$ )
1	Naphthalene	3.94	128	127 126	0.03
2	2-Methylnaphthalene	4.38	142	141 143	0.02
3	1-Methylnaphthalene	4.49	142	141 143	0.02
4	Biphenyl	4.76	153	154 152	0.02
5	2,6-Dimethylnaphthalene	4.82	156	155 141	0.02
6	Acenaphthylene	5.27	152	151 150	0.02
7	Acenaphthene	5.38	153	154 152	0.02
8	Dibenzofuran	5.51	168	139 84	0.02
9	Fluorene	5.92	166	165 163	0.02
10	Dibenzothiophene	7.26	184	139 185	0.02
11	Phenanthrene	7.51	178	176 179	0.02
12	Anthracene	7.59	178	176 179	0.02
13	3-Methylphenanthrene	8.41	192	191 189	0.03
14	Carbazole	8.42	167	166 139	0.02
15	2-Methylphenanthrene	8.54	192	191 189	0.02
16	9-Methylphenanthrene	8.85	192	191 189	0.02
17	1-Methylphenanthrene	8.90	192	191 189	0.02
18	Fluoranthene	11.09	202	200 203	0.02
19	Pyrene	12.31	202	200 201	0.02
20	Benzo[c]fluorene	14.30	216	215 213	0.02
21	Benzo[c]phenanthrene	18.57	228	227 226	0.02
22	Benz[a]anthracene	20.12	228	226 229	0.03
23	Cyclopenta[cd]pyrene	20.44	226	224 227	0.05
24	Triphenylene	20.61	228	226 229	0.02
25	Chrysene	20.70	228	226 229	0.02
26	5-Methylchrysene	24.42	242	241 239	0.02
27	Benzo[b]fluoranthene	29.83	252	250 253	0.02
28	Benzo[k]fluoranthene	30.06	252	250 253	0.03
29	7,12-Dimethylbenz[a]anthracene	30.07	256	257 239	0.02
30	Benzo[j]fluoranthene	30.20	252	250 253	0.02
31	Benz[j]aceanthrylene /Benz[e]aceanthrylene	31.40	252	253 250	0.06
32	Benzo[e]pyrene	32.89	252	250 253	0.03
33	Benzo[a]pyrene	33.38	252	250 253	0.02
34	3-Methylcholanthrene	35.69	268	266 267	0.03
35	Dibenz[c,h]acridine	37.70	279	278 139	0.06
36	Dibenz[a,h]acridine	38.44	279	278 139	0.03
37	Dibenz[a,j]acridine	38.58	279	280 277	0.05
38	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	38.97	276	274 138	0.02
39	Dibenz[a,h]anthracene	39.04	278	279 139	0.02
40	Benzo[ghi]perylene	39.75	276	274 277	0.02
41	7H-Dibenzo[c,g]carbazole	40.16	267	266 268	0.04
42	Dibenzo[a,i]pyrene	42.15	302	300 150	0.03
43	Dibenzo[a,e]pyrene	42.95	302	300 150	0.03
44	Coronene	43.12	300	150 301	0.03
45	Dibenzo[a,i]pyrene	43.44	302	303 150	0.06
46	Dibenzo[a,h]pyrene	43.68	302	303 150	0.05
IS1	Naphthalene-d8	3.92	136	135 134	
IS2	Acenaphthene-d10	5.35	162	164 160	
IS3	Chrysene-d10	20.44	240	236 241	
IS4	Perylene-d12	34.19	264	260 265	

表 4. 方法①の回収率 (n=3)

No.	化合物名	回収率 (%)	変動係数 (%)	No.	化合物名	回収率 (%)	変動係数 (%)
1	Naphthalene	95.5	0.08	24	Triphenylene	105.3	0.18
2	2-Methylnaphthalene	94.8	0.11	25	Chrysene	98.2	0.21
3	1-Methylnaphthalene	94.5	0.13	26	5-Methylchrysene	94.6	0.60
4	Biphenyl	95.7	0.80	27	Benzo[b]fluoranthene	93.8	0.35
5	2,6-Dimethylnaphthalene	95.2	0.13	28	Benzo[k]fluoranthene	94.2	0.39
6	Acenaphthylene	93.1	0.11	29	7,12-Dimethylbenz[a]anthracene	93.1	0.66
7	Acenaphthene	94.3	0.13	30	Benzo[j]fluoranthene	108.5	1.28
8	Dibenzofuran	96.0	0.13	31	Benz[j]aceanthrylene /Benz[e]aceanthrylene	93.1	0.44
9	Fluorene	94.9	0.11	32	Benzo[e]pyrene	98.7	0.56
10	Dibenzothiophene	95.7	0.04	33	Benzo[a]pyrene	96.7	0.32
11	Phenanthrene	95.6	0.07	34	3-Methylcholanthrene	93.3	0.68
12	Anthracene	94.8	0.05	35	Dibenz[c,h]acridine	97.1	0.31
13	3-Methylphenanthrene	96.2	0.12	36	Dibenz[a,h]acridine	96.0	0.17
14	Carbazole	93.9	0.15	37	Dibenz[a,i]acridine	97.9	0.75
15	2-Methylphenanthrene	96.3	0.07	38	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	97.2	0.37
16	9-Methylphenanthrene	95.3	0.26	39	Dibenz[a,h]anthracene	97.2	0.44
17	1-Methylphenanthrene	97.5	0.18	40	Benzo[ghi]perylene	96.1	0.77
18	Fluoranthene	95.9	0.02	41	7H-Dibenzo[c,g]carbazole	92.6	0.77
19	Pyrene	95.8	0.02	42	Dibenzo[a,l]pyrene	94.7	0.91
20	Benzo[c]fluorene	94.7	0.10	43	Dibenzo[a,e]pyrene	93.3	0.99
21	Benzo[c]phenanthrene	96.8	0.14	44	Coronene	92.4	0.95
22	Benz[a]anthracene	96.0	0.32	45	Dibenzo[a,i]pyrene	92.4	1.05
23	Cyclopenta[cd]pyrene	93.1	0.52	46	Dibenzo[a,h]pyrene	92.6	1.12

表 5. 方法②の回収率 (n=3)

No.	化合物名	回収率 (%)	変動係数 (%)
20	Benzo[c]fluorene	89.8	1.83
21	Benzo[c]phenanthrene	91.9	0.50
22	Benzo[a]anthracene	89.1	0.43
23	Cyclopenta[cd]pyrene	86.3	0.37
24	Triphenylene	90.2	0.47
25	Chrysene	91.2	0.34
26	5-Methylchrysene	92.4	0.58
27	Benzo[b]fluoranthene	89.7	0.43
28	Benzo[k]fluoranthene	101.2	0.32
29	7,12-Dimethylbenzo[a]anthracene	90.7	0.61
30	Benzo[j]fluoranthene	89.7	0.39

表 6. 廃タイヤ由来試料中の PAHs 等の濃度(μg/g)及び検出頻度

No.	化合物名	最大値	最小値	平均値	中央値	検出数	検出率(%)
1	Naphthalene	1.33	0.438	0.875	0.892	24	100
2	2-Methylnaphthalene	0.337	0.132	0.240	0.221	24	100
3	1-Methylnaphthalene	0.295	0.119	0.218	0.223	24	100
4	Biphenyl	0.267	0.0775	0.126	0.118	24	100
5	2,6-Dimethylnaphthalene	0.348	0.159	0.248	0.243	24	100
6	Acenaphthylene	1.79	0.386	1.04	1.03	24	100
7	Acenaphthene	0.208	0.0810	0.126	0.123	23	95.8
8	Dibenzofuran	0.269	0.153	0.196	0.193	24	100
9	Fluorene	0.422	0.0892	0.151	0.123	24	100
10	Dibenzothiophene	0.379	0.145	0.223	0.206	24	100
11	Phenanthrene	4.50	2.21	3.22	3.15	24	100
12	Anthracene	0.661	0.155	0.271	0.238	24	100
13	3-Methylphenanthrene	1.52	0.123	0.368	0.244	24	100
14	Carbazole	<LOQ				0	0
15	2-Methylphenanthrene	1.90	0.178	0.487	0.329	24	100
16	9-Methylphenanthrene	1.02	0.0866	0.317	0.219	24	100
17	1-Methylphenanthrene	1.01	0.0693	0.265	0.165	24	100
18	Fluoranthene	12.0	6.43	9.30	9.48	24	100
19	Pyrene	35.5	19.8	29.2	30.2	24	100
20	Benzo[c]fluorene	0.297	0.0229	0.134	0.133	6	25.0
21	Benzo[c]phenanthrene	<LOQ				0	0
22	Benz[a]anthracene	2.23	0.0406	0.322	0.121	24	100
23	Cyclopenta[cd]pyrene	6.19	1.83	3.31	3.30	24	100
24	Triphenylene	2.26	0.0799	0.494	0.276	24	100
25	Chrysene	3.13	0.0775	0.554	0.293	24	100
26	5-Methylchrysene	<LOQ				0	0
27	Benzo[b]fluoranthene	0.907	0.137	0.407	0.373	24	100
28	Benzo[k]fluoranthene	0.348	0.0484	0.134	0.115	24	100
29	7,12-Dimethylbenz[a]anthracene	<LOQ				0	0
30	Benzo[j]fluoranthene	0.340	0.0671	0.165	0.162	24	100
31	Benz[j]aceanthrylene /Benz[e]aceanthrylene	<LOQ				0	0
32	Benzo[e]pyrene	4.60	1.29	2.32	2.21	24	100
33	Benzo[a]pyrene	2.84	0.566	1.36	1.30	24	100
34	3-Methylcholanthrene	<LOQ				0	0
35	Dibenz[c,h]acridine	<LOQ				0	0
36	Dibenz[a,h]acridine	<LOQ				0	0
37	Dibenz[a,j]acridine	<LOQ				0	0
38	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	1.35	0.224	0.725	0.707	24	100
39	Dibenz[a,h]anthracene	0.317	0.317	0.317	0.317	1	4.17
40	Benzo[ghi]perylene	9.60	2.02	4.47	4.30	24	100
41	7H-Dibenzo[c,g]carbazole	<LOQ				0	0
42	Dibenzo[a,l]pyrene	<LOQ				0	0
43	Dibenzo[a,e]pyrene	<LOQ				0	0
44	Coronene	8.45	0.590	1.88	1.31	24	100
45	Dibenzo[a,i]pyrene	<LOQ				0	0
46	Dibenzo[a,h]pyrene	<LOQ				0	0

<LOQ:定量下限値未満

表 7. 工業用ゴム由来試料中の PAHs 等の濃度(μg/g)及び検出頻度

No.	化合物名	最大値	最小値	平均値	中央値	検出数	検出率(%)
1	Naphthalene	6.95	0.209	1.59	0.935	10	100
2	2-Methylnaphthalene	3.33	0.196	0.835	0.534	10	100
3	1-Methylnaphthalene	1.91	0.117	0.622	0.405	10	100
4	Biphenyl	0.703	0.0625	0.26	0.187	10	100
5	2,6-Dimethylnaphthalene	3.14	0.110	0.775	0.469	10	100
6	Acenaphthylene	0.946	0.143	0.517	0.544	10	100
7	Acenaphthene	0.192	0.0679	0.111	0.0864	6	60.0
8	Dibenzofuran	0.817	0.0555	0.317	0.194	10	100
9	Fluorene	0.360	0.0261	0.199	0.159	8	80.0
10	Dibenzothiophene	0.910	0.0642	0.332	0.214	7	70.0
11	Phenanthrene	3.47	0.907	1.74	1.54	10	100
12	Anthracene	0.456	0.128	0.246	0.235	7	70.0
13	3-Methylphenanthrene	4.29	0.0519	0.725	0.208	10	100
14	Carbazole	<LOQ				0	0
15	2-Methylphenanthrene	1.28	0.0606	0.384	0.245	10	100
16	9-Methylphenanthrene	0.998	0.0693	0.353	0.223	6	60.0
17	1-Methylphenanthrene	0.857	0.0562	0.265	0.162	6	60.0
18	Fluoranthene	8.71	2.12	4.82	4.52	10	100
19	Pyrene	32.1	9.55	19.7	19.8	10	100
20	Benzo[c]fluorene	0.200	0.200	0.200	0.200	1	10.0
21	Benzo[c]phenanthrene	<LOQ				0	0
22	Benz[a]anthracene	1.48	0.0369	0.298	0.0613	6	60.0
23	Cyclopenta[cd]pyrene	4.94	0.413	1.87	1.44	10	100
24	Triphenylene	2.88	0.0678	0.792	0.250	10	100
25	Chrysene	2.11	0.0765	0.434	0.292	10	100
26	5-Methylchrysene	<LOQ				0	0
27	Benzo[b]fluoranthene	1.09	0.0372	0.500	0.383	9	90.0
28	Benzo[k]fluoranthene	0.402	0.0447	0.147	0.104	9	90.0
29	7,12-Dimethylbenz[a]anthracene	<LOQ				0	0
30	Benzo[j]fluoranthene	0.476	0.0440	0.138	0.118	10	100
31	Benz[j]aceanthrylene /Benz[e]aceanthrylene	<LOQ				0	0
32	Benzo[e]pyrene	3.10	0.899	1.85	1.64	10	100
33	Benzo[a]pyrene	1.98	0.415	0.997	0.951	10	100
34	3-Methylcholanthrene	<LOQ				0	0
35	Dibenz[c,h]acridine	<LOQ				0	0
36	Dibenz[a,h]acridine	<LOQ				0	0
37	Dibenz[a,i]acridine	<LOQ				0	0
38	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0.808	0.353	0.621	0.659	10	100
39	Dibenz[a,h]anthracene	0.789	0.0682	0.309	0.0700	3	30.0
40	Benzo[ghi]perylene	6.59	2.88	3.98	3.90	10	100
41	7H-Dibenzo[c,g]carbazole	<LOQ				0	0
42	Dibenzo[a,l]pyrene	<LOQ				0	0
43	Dibenzo[a,e]pyrene	<LOQ				0	0
44	Coronene	2.99	0.971	1.63	1.31	10	100
45	Dibenzo[a,i]pyrene	<LOQ				0	0
46	Dibenzo[a,h]pyrene	<LOQ				0	0

<LOQ:定量下限値未滿

表 8. 廃タイヤ等混合・由来不明試料中の PAHs 等の濃度(μg/g)及び検出頻度

No. 化合物名	最大値	最小値	平均値	中央値	検出数	検出率(%)
1 Naphthalene	1.42	0.540	0.919	0.792	3	100
2 2-Methylnaphthalene	0.427	0.288	0.341	0.307	3	100
3 1-Methylnaphthalene	0.381	0.190	0.268	0.231	3	100
4 Biphenyl	0.264	0.0885	0.169	0.154	3	100
5 2,6-Dimethylnaphthalene	0.520	0.259	0.353	0.280	3	100
6 Acenaphthylene	1.05	0.298	0.668	0.651	3	100
7 Acenaphthene	0.439	0.0940	0.214	0.111	3	100
8 Dibenzofuran	0.263	0.189	0.214	0.191	3	100
9 Fluorene	0.705	0.133	0.328	0.146	3	100
10 Dibenzothiophene	0.870	0.247	0.470	0.291	3	100
11 Phenanthrene	3.33	3.11	3.24	3.28	3	100
12 Anthracene	0.514	0.221	0.320	0.226	3	100
13 3-Methylphenanthrene	1.15	0.292	0.586	0.320	3	100
14 Carbazole	<LOQ				0	0
15 2-Methylphenanthrene	1.34	0.378	0.726	0.460	3	100
16 9-Methylphenanthrene	1.81	0.316	0.830	0.364	3	100
17 1-Methylphenanthrene	1.36	0.238	0.625	0.274	3	100
18 Fluoranthene	11.7	5.01	9.19	10.9	3	100
19 Pyrene	37.4	12.6	28.3	34.8	3	100
20 Benzo[c]fluorene	0.136	0.0472	0.0916	0.0472	2	66.7
21 Benzo[c]phenanthrene	<LOQ				0	0
22 Benz[a]anthracene	1.31	0.116	0.538	0.190	3	100
23 Cyclopenta[cd]pyrene	3.07	0.521	2.20	3.00	3	100
24 Triphenylene	1.16	0.312	0.645	0.457	3	100
25 Chrysene	1.70	0.278	0.825	0.500	3	100
26 5-Methylchrysene	<LOQ				0	0
27 Benzo[b]fluoranthene	1.52	0.479	0.832	0.500	3	100
28 Benzo[k]fluoranthene	0.578	0.146	0.290	0.146	3	100
29 7,12-Dimethylbenz[a]anthracene	<LOQ				0	0
30 Benzo[j]fluoranthene	0.583	0.176	0.320	0.201	3	100
31 Benz[j]aceanthrylene /Benz[e]aceanthrylene	<LOQ				0	0
32 Benzo[e]pyrene	3.07	2.43	2.68	2.53	3	100
33 Benzo[a]pyrene	1.86	1.52	1.65	1.58	3	100
34 3-Methylcholanthrene	<LOQ				0	0
35 Dibenz[c,h]acridine	<LOQ				0	0
36 Dibenz[a,h]acridine	<LOQ				0	0
37 Dibenz[a,j]acridine	<LOQ				0	0
38 Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0.933	0.815	0.864	0.842	3	100
39 Dibenz[a,h]anthracene	<LOQ				0	0
40 Benzo[ghi]perylene	4.91	2.31	3.87	4.38	3	100
41 7H-Dibenzo[c,g]carbazole	<LOQ				0	0
42 Dibenzo[a,i]pyrene	<LOQ				0	0
43 Dibenzo[a,e]pyrene	<LOQ				0	0
44 Coronene	1.49	0.613	1.09	1.17	3	100
45 Dibenzo[a,i]pyrene	<LOQ				0	0
46 Dibenzo[a,h]pyrene	<LOQ				0	0

<LOQ:定量下限値未滿

表 9. 専用合成ゴム由来試料中の PAHs 等の濃度(μg/g)及び検出頻度

No. 化合物名	最大値	最小値	平均値	中央値	検出数	検出率(%)
1 Naphthalene	0.267	0.0361	0.138	0.124	4	80.0
2 2-Methylnaphthalene	0.105	0.105	0.105	0.105	1	20.0
3 1-Methylnaphthalene	0.0630	0.0233	0.0432	0.0432	2	40.0
4 Biphenyl	0.0292	0.0292	0.0292	0.0292	1	20.0
5 2,6-Dimethylnaphthalene	0.0559	0.0559	0.0559	0.0559	1	20.0
6 Acenaphthylene	<LOQ				0	0
7 Acenaphthene	<LOQ				0	0
8 Dibenzofuran	0.0515	0.0515	0.0515	0.0515	1	20.0
9 Fluorene	0.0376	0.0376	0.0376	0.0376	1	20.0
10 Dibenzothiophene	<LOQ				0	0
11 Phenanthrene	0.0455	0.0261	0.0363	0.0371	3	60.0
12 Anthracene	<LOQ				0	0
13 3-Methylphenanthrene	<LOQ				0	0
14 Carbazole	<LOQ				0	0
15 2-Methylphenanthrene	<LOQ				0	0
16 9-Methylphenanthrene	<LOQ				0	0
17 1-Methylphenanthrene	<LOQ				0	0
18 Fluoranthene	<LOQ				0	0
19 Pyrene	0.0216	0.0216	0.0216	0.0216	1	20.0
20 Benzo[c]fluorene	<LOQ				0	0
21 Benzo[c]phenanthrene	<LOQ				0	0
22 Benz[a]anthracene	<LOQ				0	0
23 Cyclopenta[cd]pyrene	<LOQ				0	0
24 Triphenylene	<LOQ				0	0
25 Chrysene	<LOQ				0	0
26 5-Methylchrysene	<LOQ				0	0
27 Benzo[b]fluoranthene	<LOQ				0	0
28 Benzo[k]fluoranthene	<LOQ				0	0
29 7,12-Dimethylbenz[a]anthracene	<LOQ				0	0
30 Benzo[j]fluoranthene	<LOQ				0	0
31 Benz[i]aceanthrylene /Benz[e]aceanthrylene	<LOQ				0	0
32 Benzo[e]pyrene	<LOQ				0	0
33 Benzo[a]pyrene	<LOQ				0	0
34 3-Methylcholanthrene	<LOQ				0	0
35 Dibenz[c,h]acridine	<LOQ				0	0
36 Dibenz[a,h]acridine	<LOQ				0	0
37 Dibenz[aj]acridine	<LOQ				0	0
38 Indeno[1,2,3-cd]pyrene	<LOQ				0	0
39 Dibenz[a,h]anthracene	<LOQ				0	0
40 Benzo[ghi]perylene	<LOQ				0	0
41 7H-Dibenzo[c,g]carbazole	<LOQ				0	0
42 Dibenzo[a,]pyrene	<LOQ				0	0
43 Dibenzo[a,e]pyrene	<LOQ				0	0
44 Coronene	<LOQ				0	0
45 Dibenzo[a,i]pyrene	<LOQ				0	0
46 Dibenzo[a,h]pyrene	<LOQ				0	0

<LOQ:定量下限値未満

表 10. 専用熱可塑性エラストマー由来試料中の PAHs 等の濃度(μg/g)及び検出頻度

No.	化合物名	最大値	最小値	平均値	中央値	検出数	検出率(%)
1	Naphthalene	0.509	0.509	0.509	0.509	1	25.0
2	2-Methylnaphthalene	0.430	0.430	0.430	0.430	1	25.0
3	1-Methylnaphthalene	0.416	0.416	0.416	0.416	1	25.0
4	Biphenyl	<LOQ				0	0
5	2,6-Dimethylnaphthalene	0.567	0.567	0.567	0.567	1	25.0
6	Acenaphthylene	<LOQ				0	0
7	Acenaphthene	<LOQ				0	0
8	Dibenzofuran	0.664	0.664	0.664	0.664	1	25.0
9	Fluorene	<LOQ				0	0
10	Dibenzothiophene	<LOQ				0	0
11	Phenanthrene	0.395	0.395	0.395	0.395	1	25.0
12	Anthracene	<LOQ				0	0
13	3-Methylphenanthrene	0.457	0.457	0.457	0.457	1	25.0
14	Carbazole	<LOQ				0	0
15	2-Methylphenanthrene	0.605	0.605	0.605	0.605	1	25.0
16	9-Methylphenanthrene	1.15	1.15	1.15	1.15	1	25.0
17	1-Methylphenanthrene	0.579	0.579	0.579	0.579	1	25.0
18	Fluoranthene	<LOQ				0	0
19	Pyrene	<LOQ				0	0
20	Benzo[c]fluorene	<LOQ				0	0
21	Benzo[c]phenanthrene	<LOQ				0	0
22	Benz[a]anthracene	<LOQ				0	0
23	Cyclopenta[cd]pyrene	<LOQ				0	0
24	Triphenylene	<LOQ				0	0
25	Chrysene	0.229	0.229	0.229	0.229	1	25.0
26	5-Methylchrysene	<LOQ				0	0
27	Benzo[b]fluoranthene	<LOQ				0	0
28	Benzo[k]fluoranthene	<LOQ				0	0
29	7,12-Dimethylbenz[a]anthracene	<LOQ				0	0
30	Benzo[j]fluoranthene	<LOQ				0	0
31	Benz[j]aceanthrylene /Benz[e]aceanthrylene	<LOQ				0	0
32	Benzo[e]pyrene	<LOQ				0	0
33	Benzo[a]pyrene	<LOQ				0	0
34	3-Methylcholanthrene	<LOQ				0	0
35	Dibenz[c,h]acridine	<LOQ				0	0
36	Dibenz[a,h]acridine	<LOQ				0	0
37	Dibenz[a,i]acridine	<LOQ				0	0
38	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	<LOQ				0	0
39	Dibenz[a,h]anthracene	<LOQ				0	0
40	Benzo[ghi]perylene	<LOQ				0	0
41	7H-Dibenzo[c,g]carbazole	<LOQ				0	0
42	Dibenzo[a,l]pyrene	<LOQ				0	0
43	Dibenzo[a,e]pyrene	<LOQ				0	0
44	Coronene	<LOQ				0	0
45	Dibenzo[a,i]pyrene	<LOQ				0	0
46	Dibenzo[a,h]pyrene	<LOQ				0	0

<LOQ:定量下限値未満

表 11. 本研究の結果と、ECHA、RIVM の調査結果及び文献値との比較  
(検出濃度の最大値で比較、数字の単位は µg/g)

No.	化合物名	本研究	ECHA <sup>(17)</sup> ※	RIVM <sup>(6)</sup>	Gomes et al. (2010) <sup>(4)</sup>	Llompert et al. (2013) <sup>(5)</sup>	Marsili et al. (2014) <sup>(6)</sup>	Menichini et al. (2011) <sup>(7)</sup>	Li et al. (2010) <sup>(8)</sup>	Sđiktsis et al. (2012) <sup>(9)</sup> ※※
1	Naphthalene	6.95	2.04		0.35	24.2	2.04		1.1	
2	2-Methylnaphthalene	3.33							2.1	
3	1-Methylnaphthalene	1.91							1.0	
4	Biphenyl	0.703								
5	2,6-Dimethylnaphthalene	3.14								
6	Acenaphthylene	1.79	1.10			13.4				
7	Acenaphthene	0.439	10.15		0.04	12.8	10.1			
8	Dibenzofuran	0.817								
9	Fluorene	0.705	11.03		0.18	47.7	11.0			
10	Dibenzothiophene	0.910								
11	Phenanthrene	4.50	8.60	7.1	1.58	25.5	1.56		4.6	
12	Anthracene	0.661	1.10	1.1	0.19	4.72	0.283			
13	3-Methylphenanthrene	4.29								
14	Carbazole	<LOQ								
15	2-Methylphenanthrene	1.90								
16	9-Methylphenanthrene	1.81								
17	1-Methylphenanthrene	1.36								
18	Fluoranthene	12.0	20.3	20.3	5.98	8.24	3.74		19	
19	Pyrene	37.4	37.00	28.7	21.1	29.5	10.3	15.1	9.0	
20	Benzo[c]fluorene	0.297	0.7	0.7						
21	Benzo[c]phenanthrene	<LOQ								
22	Benz[a]anthracene	2.23	15.3	2.2	0.82	2.02	1.61	0.43		
23	Cyclopenta[cd]pyrene	6.19	2.5	2.5						
24	Triphenylene	2.88								
25	Chrysene	3.13	6.80	3.5	2.70	9.16	3.42	2.38		
26	5-Methylchrysene	<LOQ								
27	Benzo[b]fluoranthene	1.52	11.10	3	<0.08	4.32	15.7	1.78		3.18
28	Benzo[k]fluoranthene	0.578	5.02	0.5	<0.08	1.69	3.62			0.833
29	7,12-Dimethylbenz[a]anthracene	<LOQ								
30	Benzo[j]fluoranthene	0.583	2.6	※※※						
31	Benzo[j]aceanthrylene /Benzo[e]aceanthrylene	<LOQ								
32	Benzo[e]pyrene	4.60	7.8	7.8						7.29
33	Benzo[a]pyrene	2.84	2.83	2.2	1.19	4.66	0.663	10.7		10.1
34	3-Methylcholanthrene	<LOQ								
35	Dibenz[c,h]acridine	<LOQ								
36	Dibenz[a,h]acridine	<LOQ								
37	Dibenz[a,j]acridine	<LOQ								
38	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	1.35	3.73		<0.08	2.77		3.73		0.102
39	Dibenz[a,h]anthracene	0.789	8.13	<0.5	<0.08	0.97	0.573	0.03		0.146
40	Benzo[ghi]perylene	9.60	29.20			11.9	0.902	29.2		33.1
41	7H-Dibenzo[c,g]carbazole	<LOQ								
42	Dibenzo[a,i]pyrene	<LOQ								0.0307
43	Dibenzo[a,e]pyrene	<LOQ								0.392
44	Coronene	8.45								26.4
45	Dibenzo[a,i]pyrene	<LOQ								0.72
46	Dibenzo[a,h]pyrene	<LOQ								0.0675

<LOQ:定量下限値未満  
※ RIVMの報告書等の値を含む  
※※ タイヤを測定した文献  
※※※ No.27と合算

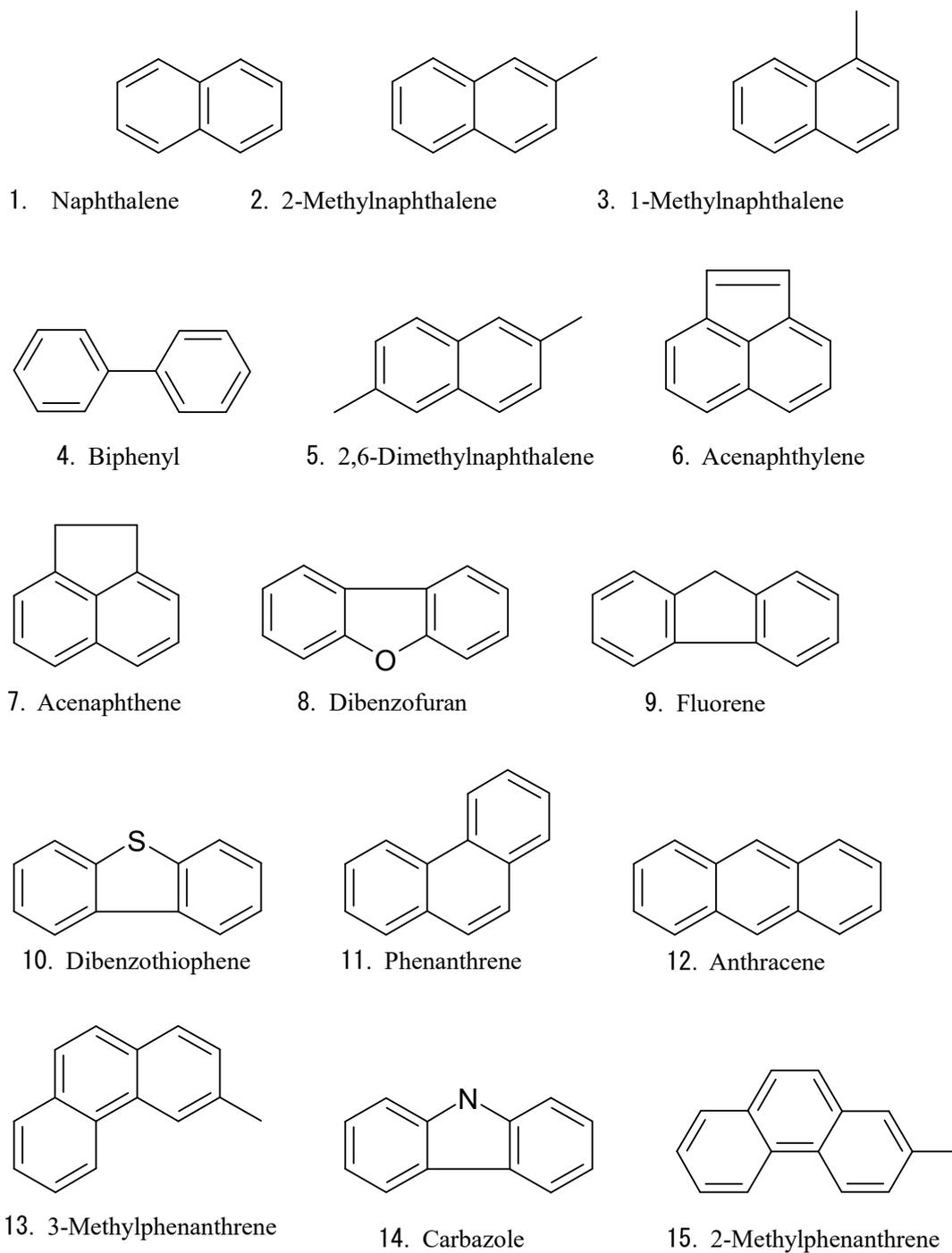
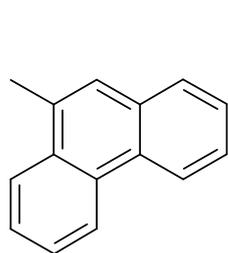
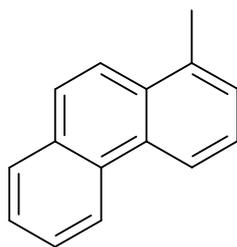


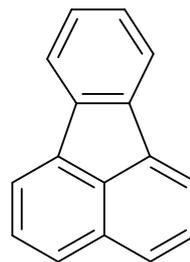
図1. 測定対象物質の化学構造式



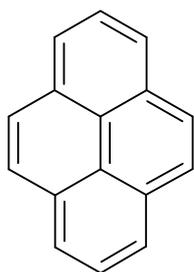
16. 9-Methylphenanthrene



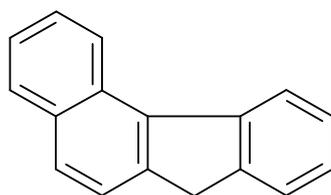
17. 1-Methylphenanthrene



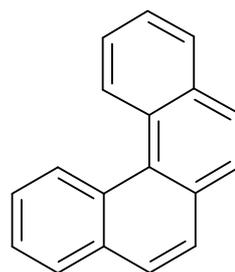
18. Fluoranthene



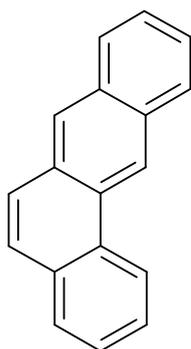
19. Pyrene



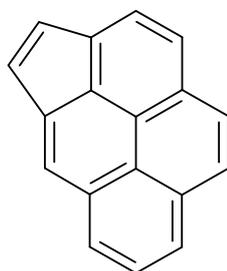
20. Benzo[c]fluorene



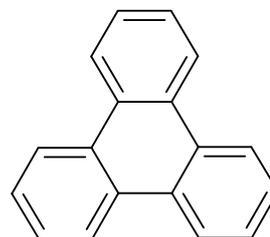
21. Benzo[c]phenanthrene



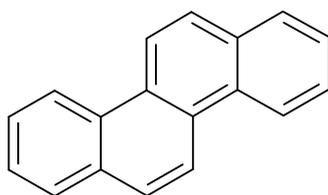
22. Benz[a]anthracene



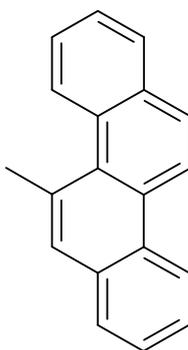
23. Cyclopenta[cd]pyrene



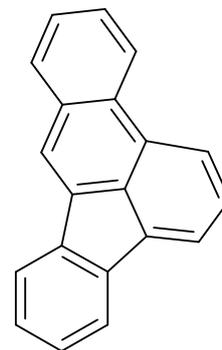
24. Triphenylene



25. Chrysene

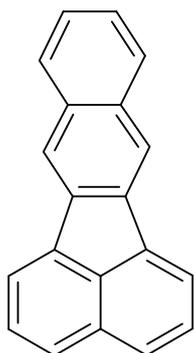


26. 5-Methylchrysene

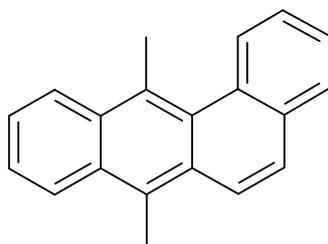


27. Benzo[b]fluoranthene

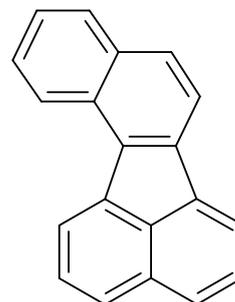
図1. 測定対象物質の化学構造式 (続き)



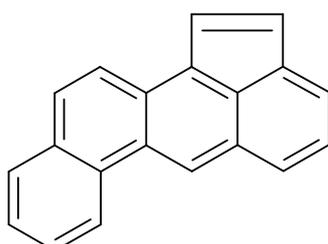
28. Benzo[k]fluoranthene



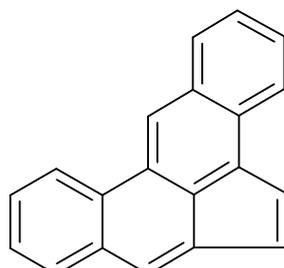
29. 7,12-Dimethylbenz[a]anthracene



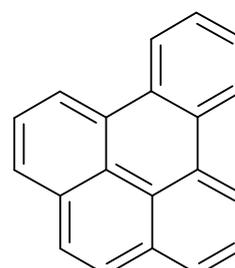
30. Benzo[j]fluoranthene



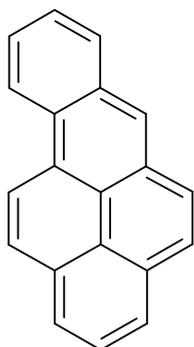
31-1. Benz[j]aceanthrylene



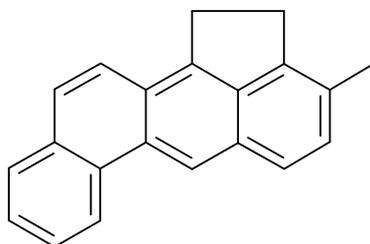
31-2. Benz[e]aceanthrylene



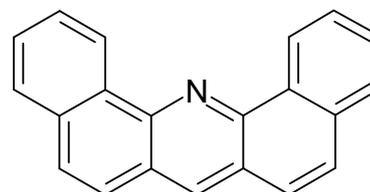
32. Benzo[e]pyrene



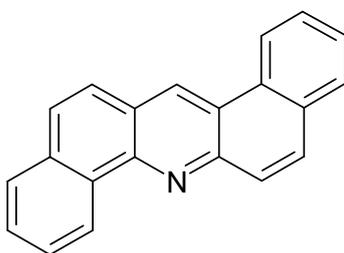
33. Benzo[a]pyrene



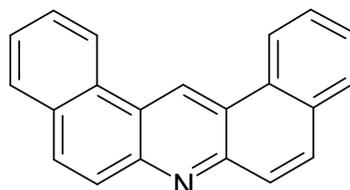
34. 3-Methylcholanthrene



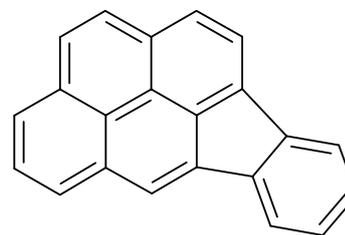
35. Dibenz[c,h]acridine



36. Dibenz[a,h]acridine

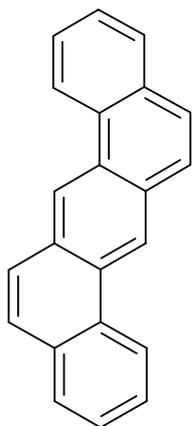


37. Dibenz[a,j]acridine

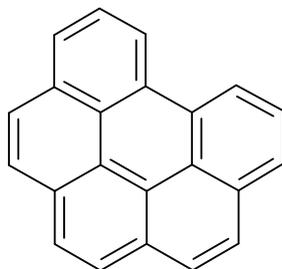


38. Indeno[1,2,3-cd]pyrene

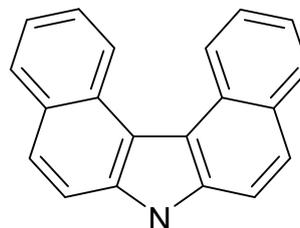
図1. 測定対象物質の化学構造式 (続き)



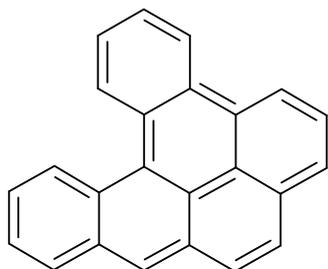
39. Dibenz[a,h]anthracene



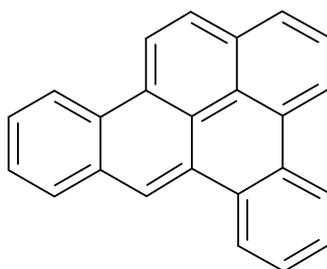
40. Benzo[ghi]perylene



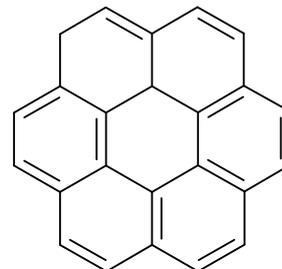
41. 7H-Dibenzo[c,g]carbazole



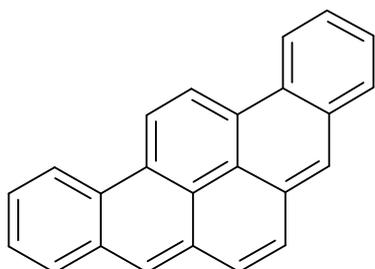
42. Dibenzo[a,l]pyrene



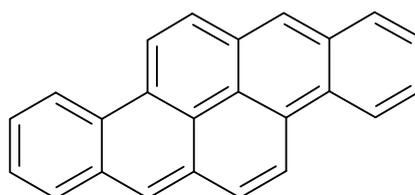
43. Dibenzo[a,e]pyrene



44. Coronene



45. Dibenzo[a,i]pyrene



46. Dibenzo[a,h]pyrene

図1. 測定対象物質の化学構造式 (続き)

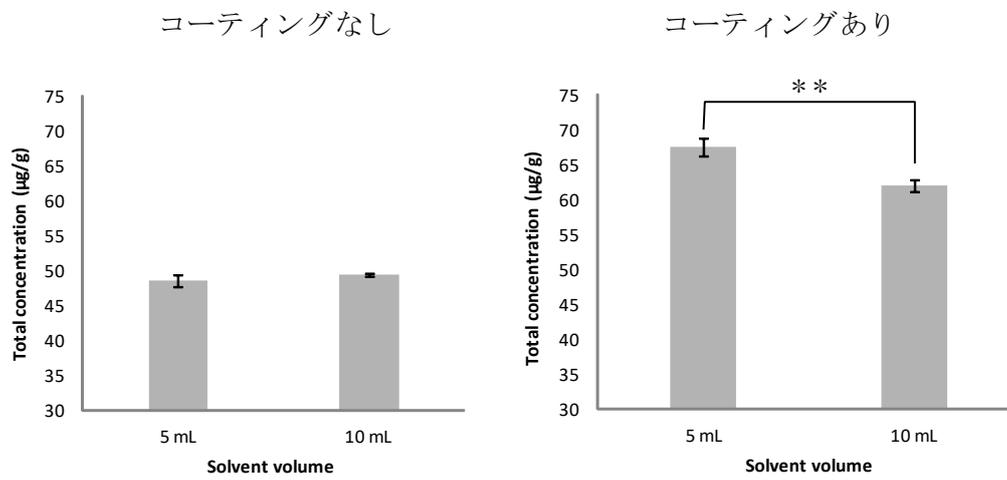


図2. 抽出溶媒量と測定対象物質濃度合計値の関係  
(t検定、コーティングなしは有意差なし、\*\* :  $p < 0.01$ )

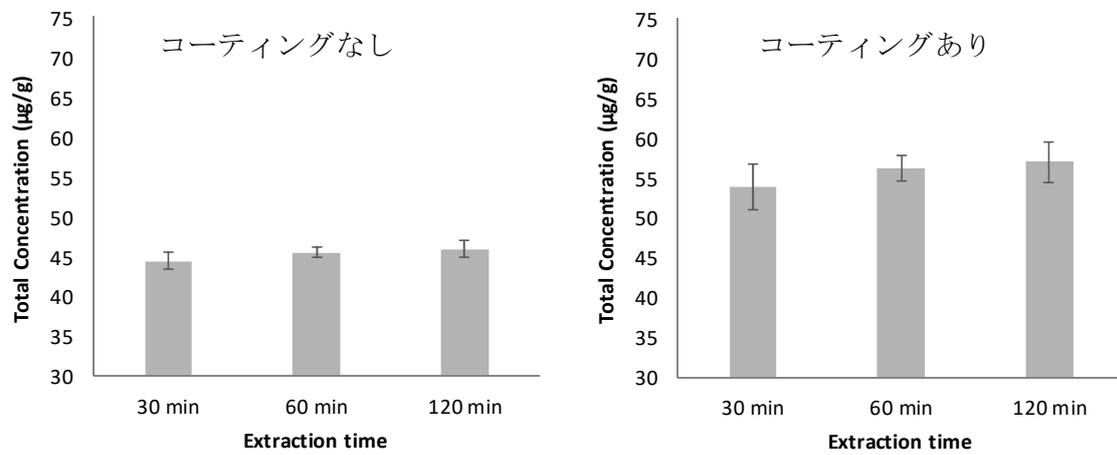


図3. 抽出時間と測定対象物質濃度合計値の関係  
 (テューキーの検定、すべての組合せで有意差なし)

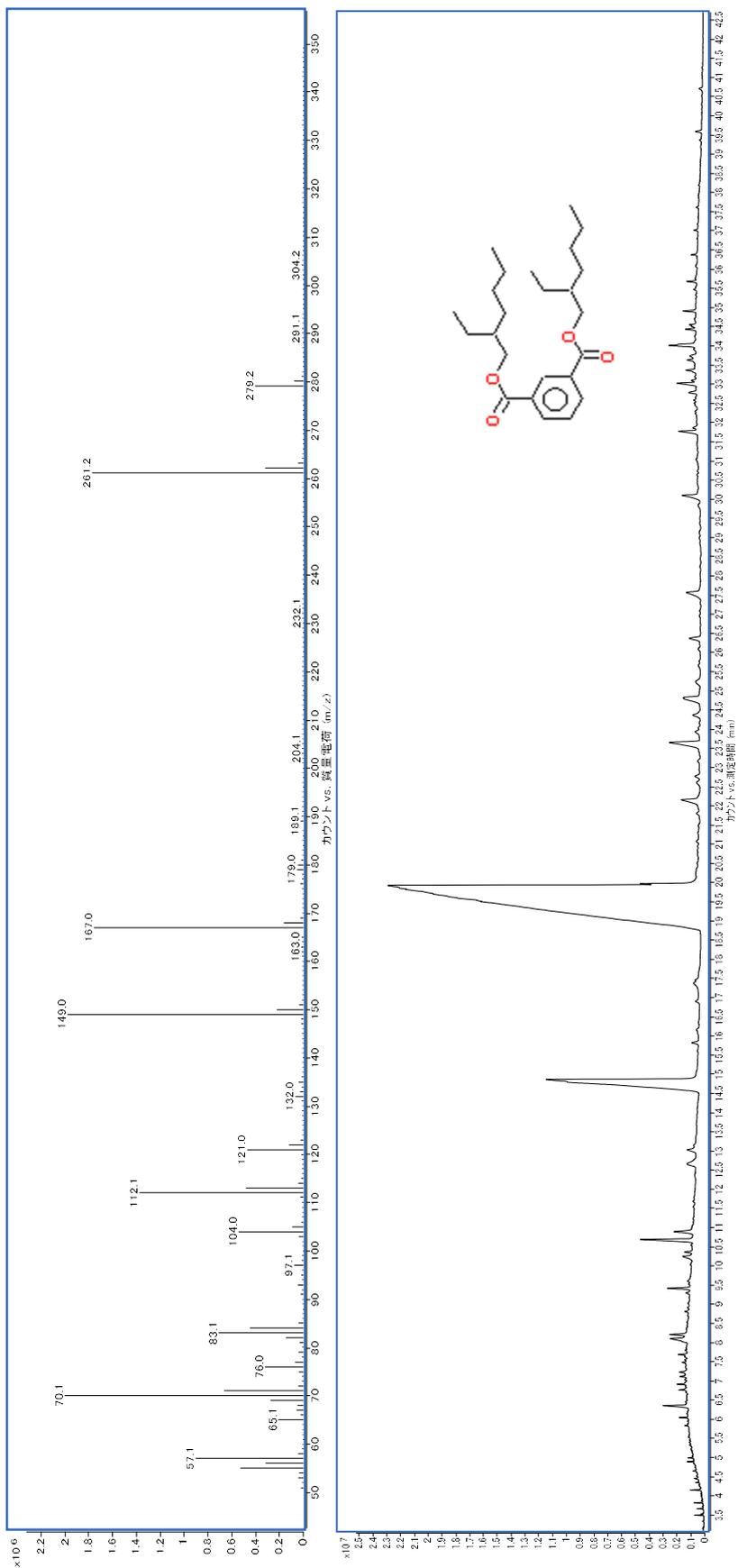


図4. 試料Xを方法①で抽出したときのTICクロマトグラム（上段）及び18.5~20.5分に出現するピークのマススペクトラム（下段）

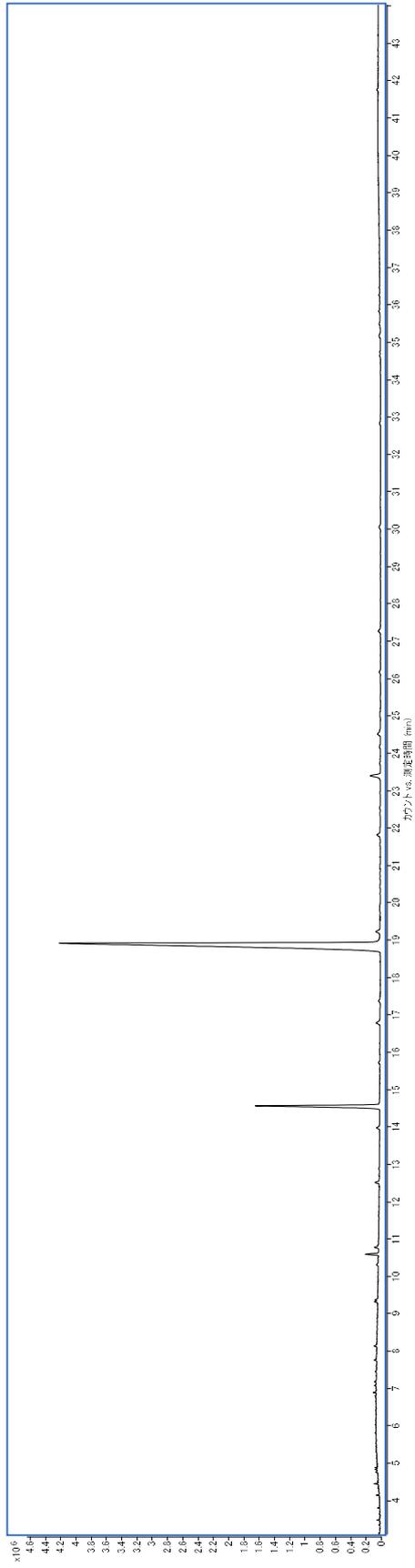


図5. 試料Xを方法②で抽出したときのTICクロマトグラム

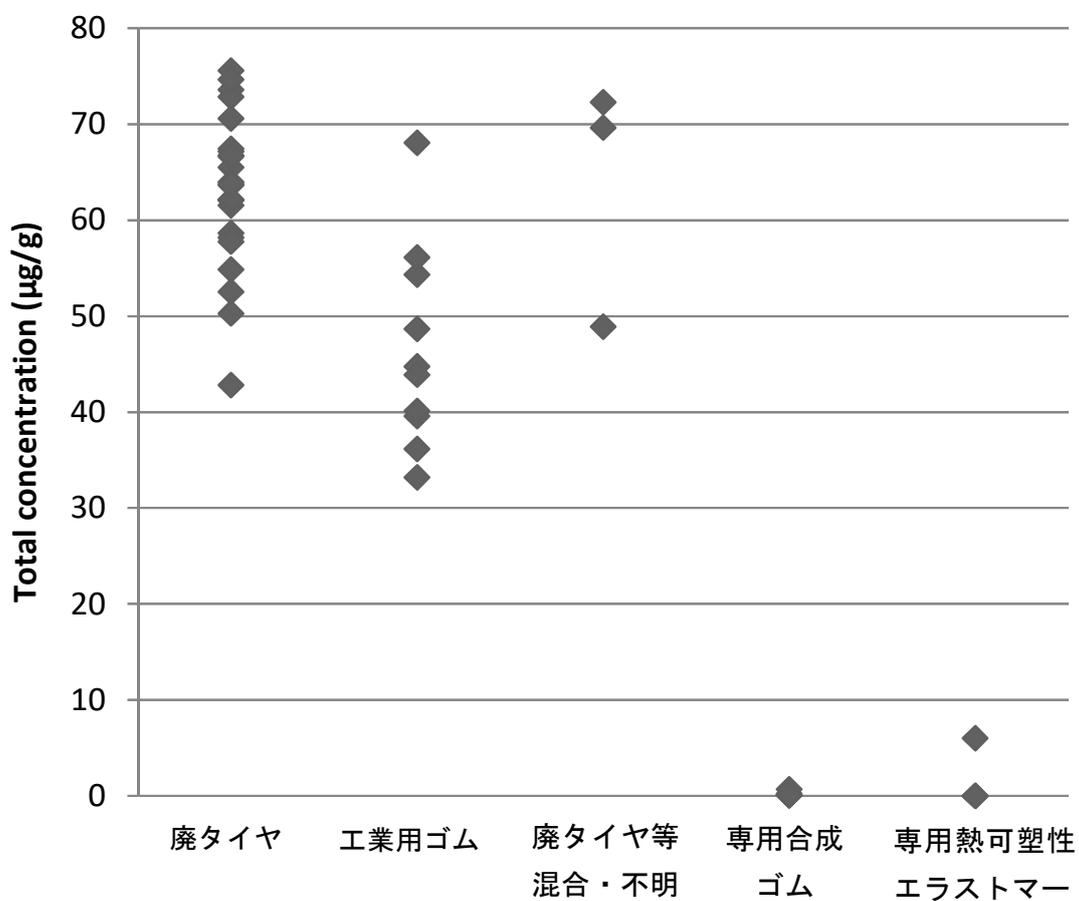


図 6. 由来ごとの試料中測定対象物質濃度の合計値の分布

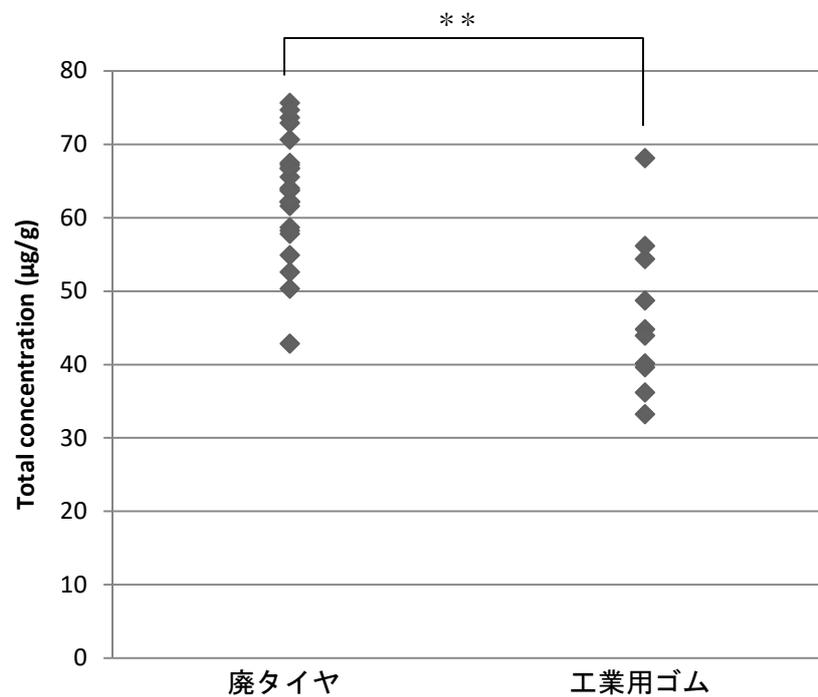


図 7. 廃タイヤ由来と工業用ゴム由来試料の試料中測定対象物質濃度の合計値の比較 (マン・ホイットニーの U 検定、\*\* :  $p < 0.01$ )

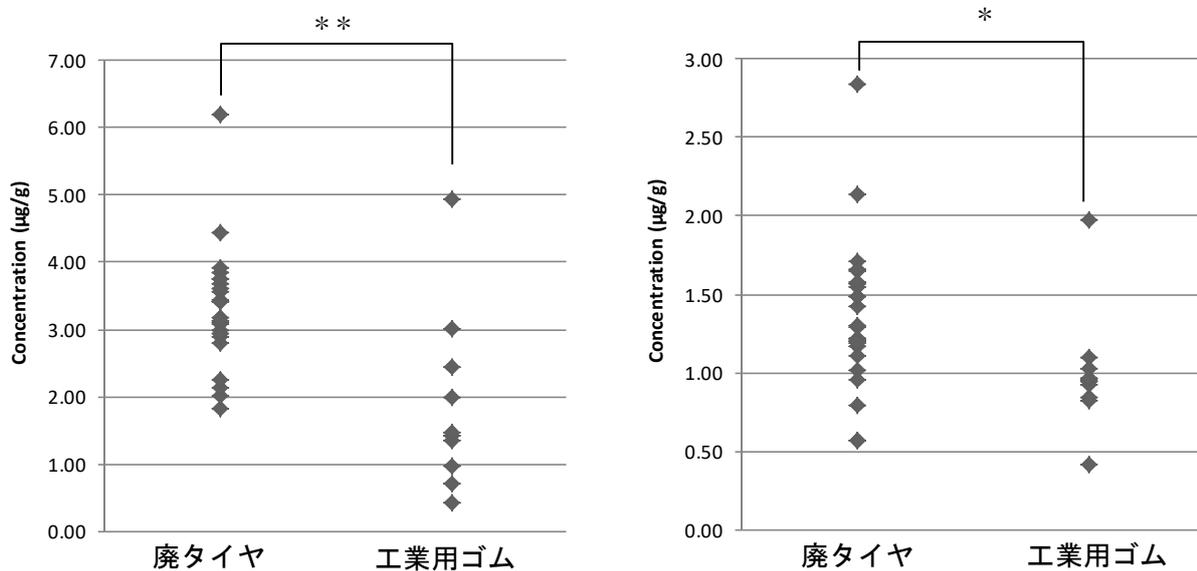


図 8. 廃タイヤ由来と工業用ゴム由来試料の試料中シクロペンタ[cd]ピレン濃度 (左) 及びベンゾ[a]ピレン濃度 (右) の比較 (マン・ホイットニーの U 検定、\* :  $p < 0.05$ 、\*\* :  $p < 0.01$ )

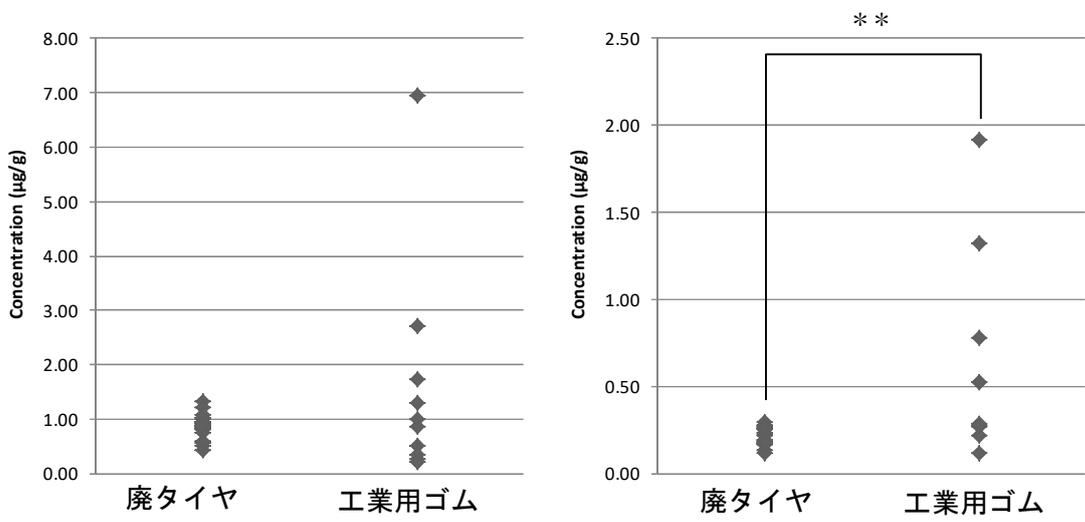


図 9. 廃タイヤ由来と工業用ゴム由来試料の試料中ナフタレン濃度（左）及び 1-メチルナフタレン濃度（右）の比較（マン・ホイットニーの U 検定、ナフタレンは有意差なし、\*\* :  $p < 0.01$ ）