マイクロプラスチックの生態影響評価の現状と課題
～タイヤ由来粒子を中心としたリスク評価研究の展開～

愛媛大学　沿岸環境科学研究センター

仲山　慶

https://www.aquatic-toxicology.com



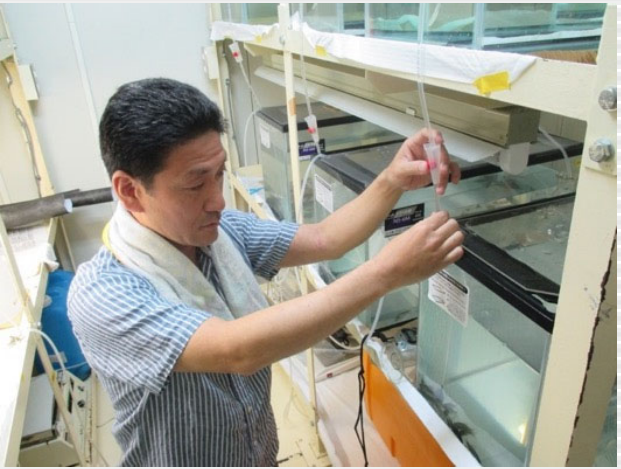
本研究は，環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（ no. 1-2204: JPMEERF20221004; 1-2502: JPMEERF20251002 ）により実施した。

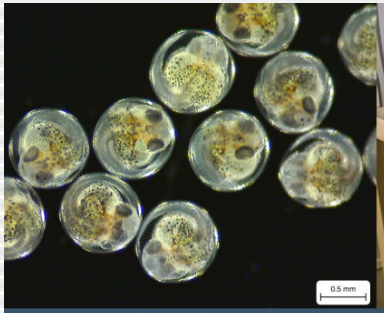
魚類を対象にした化学物質の毒性評価

対象生物種
- コイ
- メダカ
- クサフグ
- マダイ
- ヒラメ

淡水産、海産etc.

評価項目
- 免疫毒性
- 発生毒性
- 遺伝子発現
- 繁殖・内分泌
- 行動異常

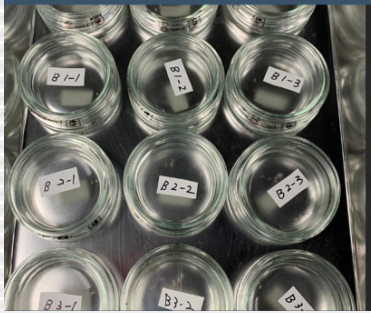


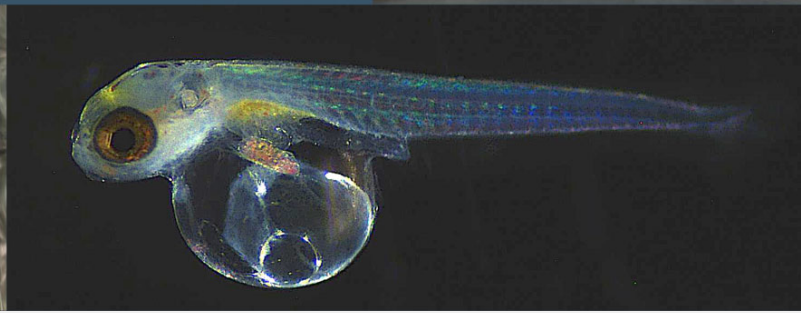




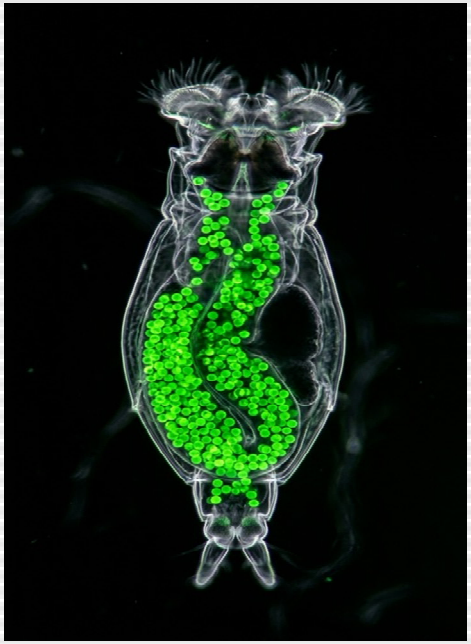
- 有害な影響（ハザード）の特定と閾値の決定
- 作用機序の解明およびバイオマーカーの探索
- 評価法の構築
- 曝露評価、生態リスク評価







マイクロプラスチックは有害なのか？



※画像はイメージです
（Nano Bananaで生成）

極端な条件での試験から
✓ 体内動態の理解
✓ 有害性（ハザード）の同定

実際の環境に即した（Environmentally relevant）試験

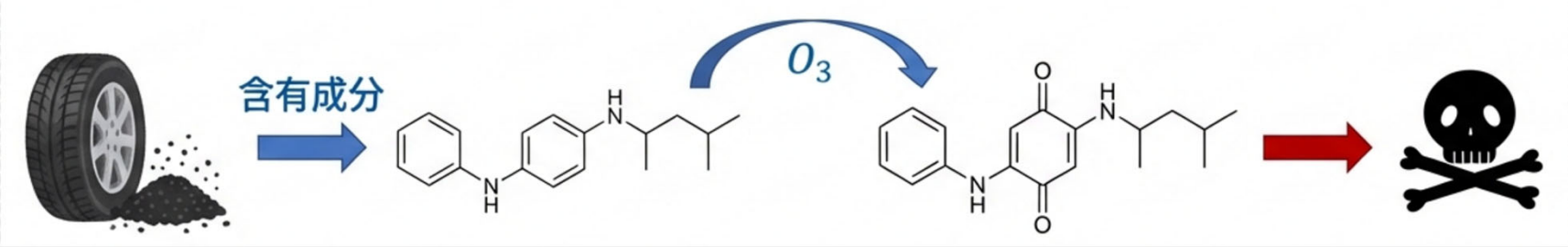
個人的モチベーション

1. マイクロプラスチックの毒性報告に対する疑念
2. マイクロビーズを使用した試験の経験（免疫系）
3. タイヤ問題に関する関心（粒子と化学物質）

研究の背景・目的：タイヤ特有の問題

タイヤ特有の問題

- 現代社会の基盤を支える技術のひとつであり、使用量の削減が困難であること
- 路面との摩擦で摩耗するため、粉塵の環境中への放出が前提の使用デザインであること
- 多くの添加剤（配合剤）が使用されており、その多くが速やかに溶出すること（変化物を含む）



タイヤ摩耗粉塵
（TWP）

6PPD
（老化防止剤）

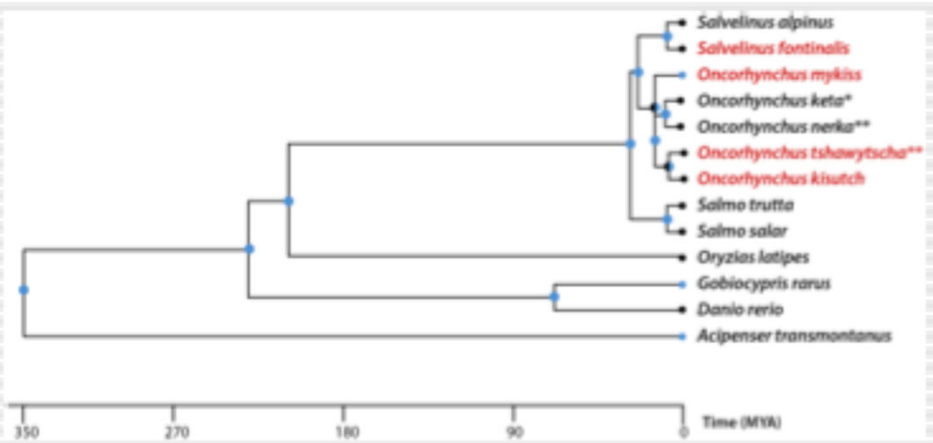
6PPD-キノン
（変化物）

サケ科魚類（＋α）を対象にした6PPD-Qに対する感受性比較

高感受性
- ニジマス
- カワマス
- アメマス
- ギンザケ

低感受性
- ホッキョクイワナ
- シロチョウザメ
- オショロコマ
- ヤマメ
- メダカ
- ゼブラフィッシュ

Brinkmann et al., 2022. ES&T Letters
Hiki et al., 2022. ES&T Letters



カワマス
ニジマス
マスノスケ
ギンザケ

(CC BY; Foldvik et al., 2022. Environ Toxicol Chem)

- 一部のサケ科魚類にたいして極めて強い毒性を示す。ただし、サケ科魚類の中にも低感受性の種が存在する。
- 毒性評価によく用いられるメダカやゼブラフィッシュには水溶解度の範囲内で急性毒性を示さない。
- 現在までのところ、6PPD-Qに対する感受性を決定している要因は不明。

環境研究総合推進費の先行課題から現行プロジェクトへの接続

【1-2204】海洋流出マイクロプラスチックの物理・化学的特性に基づく汚染実態把握と生物影響評価
（代表：国立環境研究所　鈴木　剛）

達成事項
- ✓ 底質中タイヤ摩耗粉塵のモニタリング法の構築
- ✓ タイヤ溶出液中の化学物質のノンターゲット分析
- ✓ 魚類および甲殻類におけるタイヤ（凍結粉砕したタイヤトレッド：CMTT）の毒性値の算出

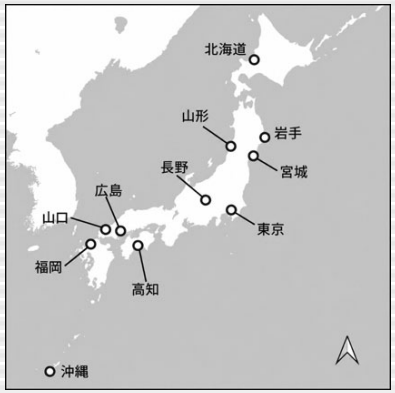
【5-2203】タイヤ摩耗粉塵を含む非排気由来の粒子排出実態に関する研究
（代表：日本自動車研究所　伊藤晃佳）

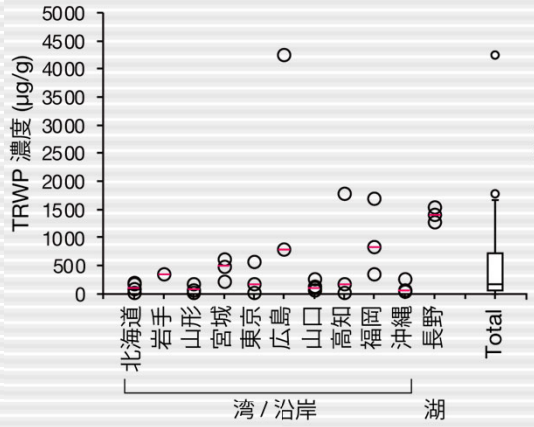
達成事項
- ✓ 主要道路ごとのタイヤ摩耗粉塵排出量の推計
- ✓ タイヤ運動モデルによる粉塵発生量予測
- ✓ 全国排出量の予測

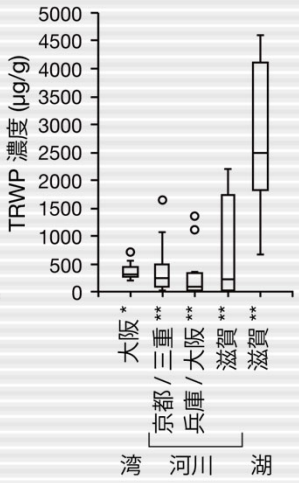
【1-2502】タイヤ摩耗粉塵の河川・海洋流出量の精緻な推計と、それに基づく生態リスクの評価と低減に係る研究
（代表：愛媛大学　仲山　慶）

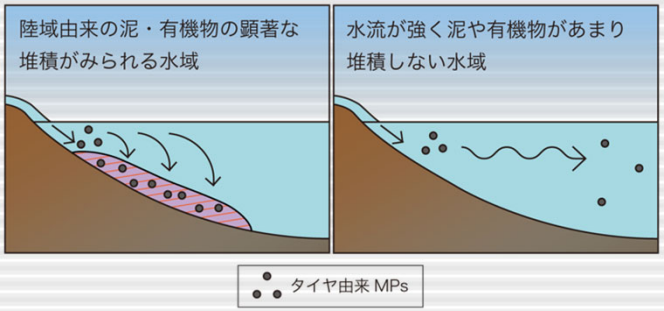
達成目標
- ☐ 流出インベントリに基づく曝露評価
- ☐ 生物影響評価に基づく毒性評価
- ☐ リスク評価とリスク低減策の提案

タイヤ・路面摩耗粉塵（TRWP）モニタリングの結果









- 36地点中32地点の堆積物試料からTRWP検出
- 最大値は広島湾の4,260 μg/g（乾重量）
- 中央値で最も高かったのは長野県諏訪湖
  →閉鎖性水域における TRWP汚染の進行を示唆
- 長期的には低減傾向にある

生物への影響は？
生態リスクは？

（**Tanaka et al., 2025. Wat. Res.**; Barber et al., 2025,. Mar. Pollut. Bull.; Unice et al., 2013, Environ. Sci. Technol.）

CMTTから溶出する化学物質とコイに対する血液毒性の紫外線照射前後での比較



凍結粉砕

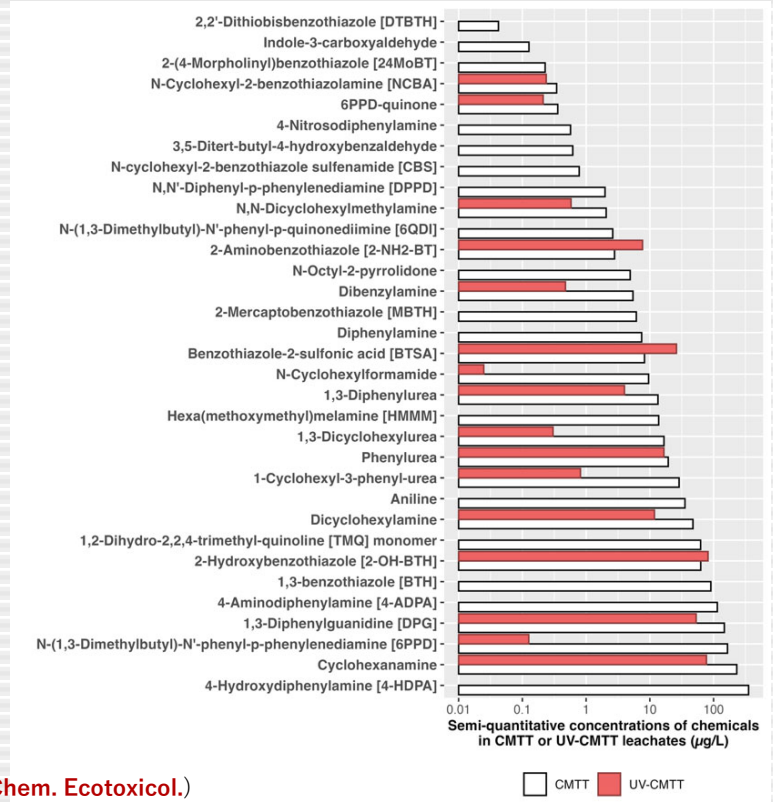


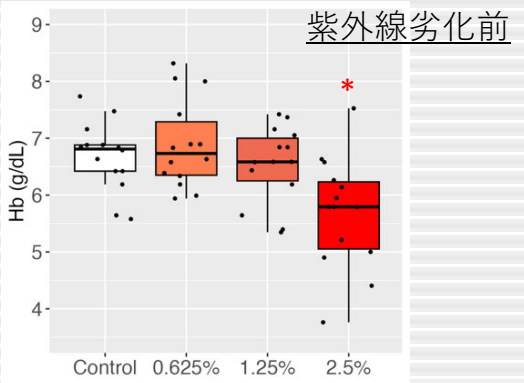
CMTT

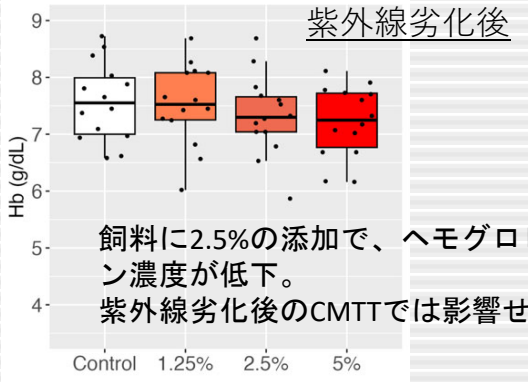
紫外線照射



UV-CMTT



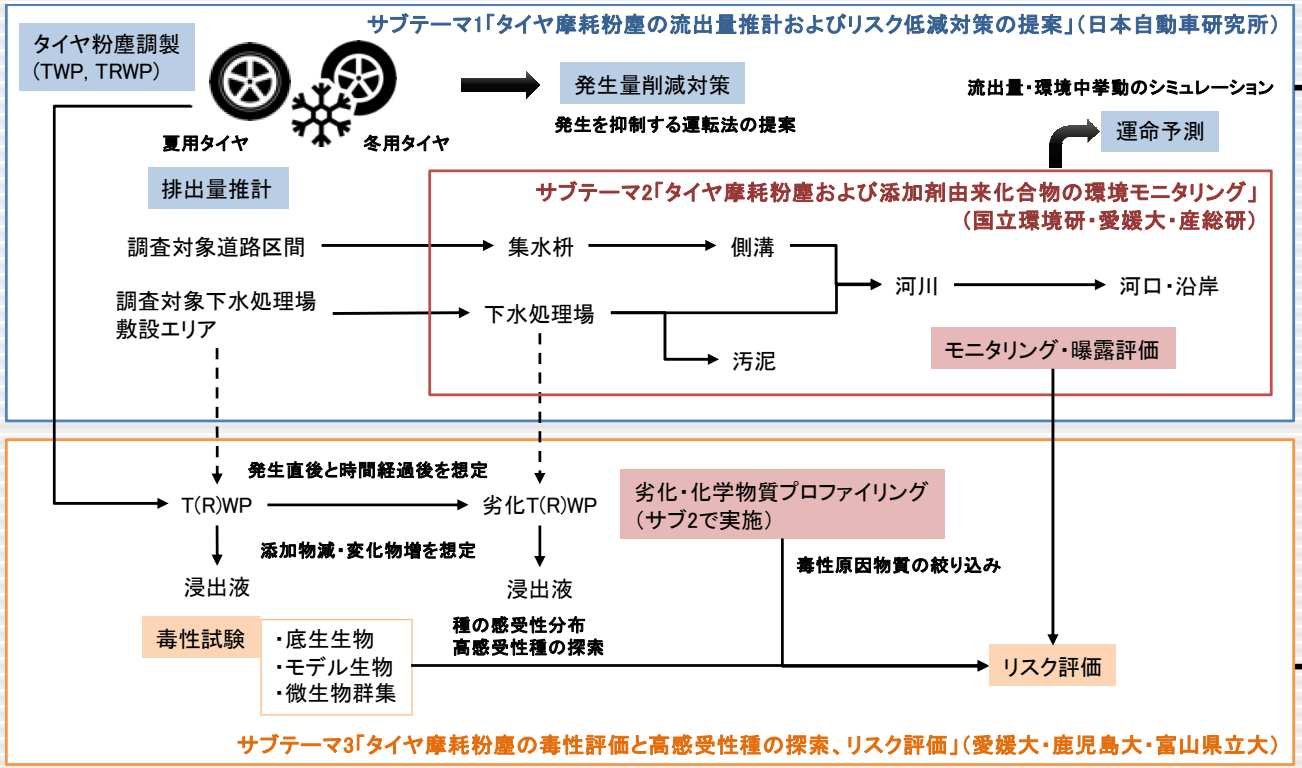




飼料に2.5%の添加で、ヘモグロビン濃度が低下。
紫外線劣化後のCMTTでは影響せず。

(Nakayama et al., 2026. Environ. Chem. Ecotoxicol.)

1-2502推進費課題の概要と実施体制



プロジェクトへのサポート

- NEXCO中日本
- NEXCO西日本

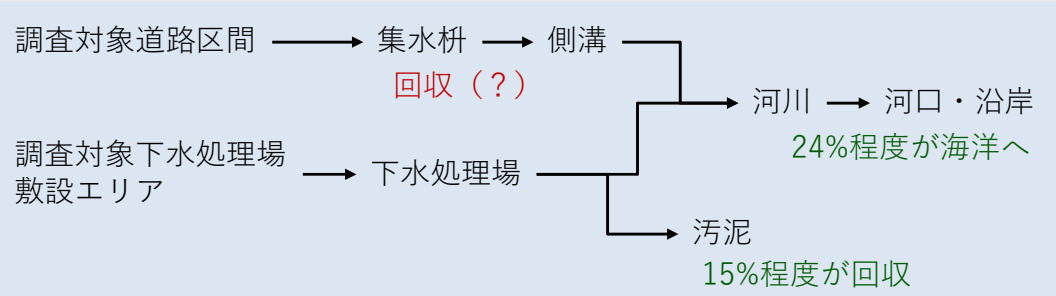
JATMA

一般社団法人
日本自動車タイヤ協会

- 地方自治体

解決すべき課題（タイヤ・路面摩耗粉塵）

- **環境中での挙動の理解**
  発生・流出・拡散・蓄積まで
  粒子と化学物質
- 添加剤由来の変化物
  網羅的な把握
  毒性についても不明
- 高感受性種の存在
  種の感受性分布に基づく毒性閾値
- 試料の代表性
  多数存在する製品
  TRWPか、CMTTか
- 試験法の妥当性評価
  溶出試験
  紫外線照射等による劣化
  毒性試験



経路別海洋流出率
国全体での見積もりであって、個別の地域ではない

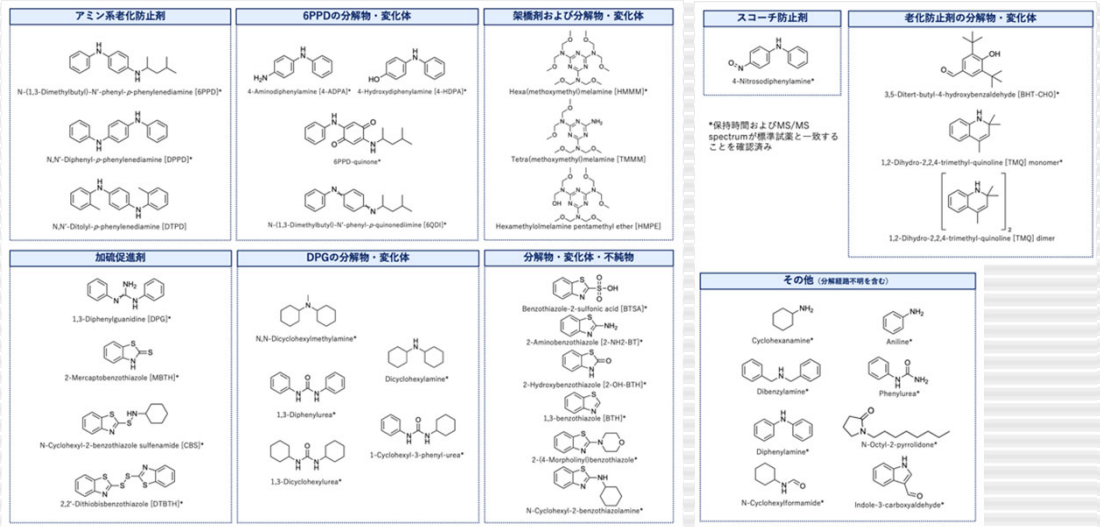
タイヤ摩耗粉塵の環境モニタリング
琵琶湖・淀川水系、東京湾等、一部の地域に限定

日本各地の汚染レベルは？

環境省．令和5年度検討結果　日本の海洋プラスチックごみ流出量の推計
https://www.env.go.jp/content/000255552.pdf

解決すべき課題（タイヤ・路面摩耗粉塵）

- 環境中での挙動の理解
  発生・流出・拡散・蓄積まで
  粒子と化学物質
- **添加剤由来の変化物**
  網羅的な把握
  毒性についても不明
- 高感受性種の存在
  種の感受性分布に基づく毒性閾値
- 試料の代表性
  多数存在する製品
  TRWPか、CMTTか
- 試験法の妥当性評価
  溶出試験
  紫外線照射等による劣化
  毒性試験



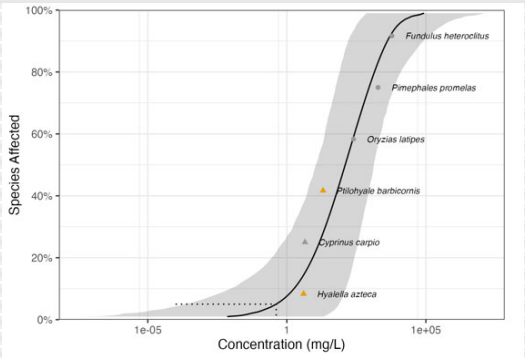
タイヤへの添加剤とその変化物の一部
本プロジェクトでは現在までに42種類の化合物を同定
添加剤の分解経路に関する研究が国内外で進行中

解決すべき課題（タイヤ・路面摩耗粉塵）

- 環境中での挙動の理解
  発生・流出・拡散・蓄積まで
  粒子と化学物質
- 添加剤由来の変化物
  網羅的な把握
  毒性についても不明
- **高感受性種の存在**
  種の感受性分布に基づく毒性閾値
- 試料の代表性
  多数存在する製品
  TRWPか、CMTTか
- 試験法の妥当性評価
  溶出試験
  紫外線照射等による劣化
  毒性試験

6PPD-キノンに対する感受性

感受性グループ (Sensitive)	耐性グループ (Tolerant)
• ギンザケ (Coho Salmon)	• マスノスケ (Chinook Salmon)
• ニジマス (Rainbow Trout)	• 大西洋サケ (Atlantic Salmon)
• カワマス (Brook Trout)	• ブラウントラウト (Brown Trout)
• アメマス (White-spotted Char)	• ホッキョクイワナ (Arctic Char)

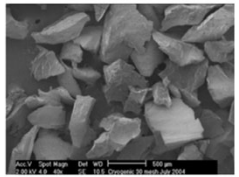
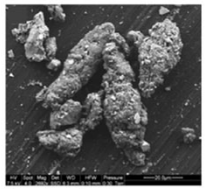
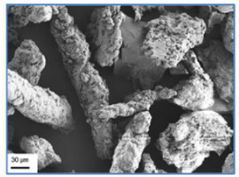


種間での感受性差を考慮した評価

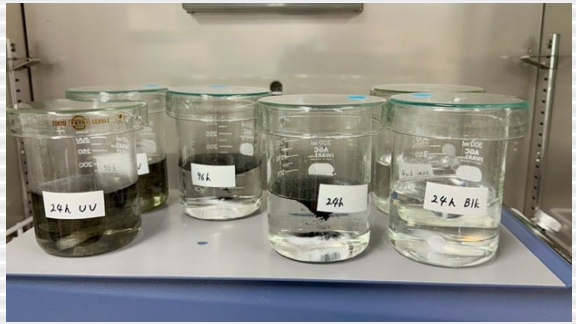
解決すべき課題（タイヤ・路面摩耗粉塵）

- 環境中での挙動の理解
  発生・流出・拡散・蓄積まで
  粒子と化学物質
- 添加剤由来の変化物
  網羅的な把握
  毒性についても不明
- 高感受性種の存在
  種の感受性分布に基づく毒性閾値
- **試料の代表性**
  多数存在する製品
  TRWPか、CMTTか
- **試験法の妥当性評価**
  溶出試験
  紫外線照射等による劣化
  毒性試験

Table 3
Comparison of materials currently used for testing regarding size, density, shape, composition, advantages and limitations.

	Cryogenically milled TPs [a]	TRWPs from road simulators [b] (ISO/TS 22638)	TRWPs from environmental samples [c]
Shape			
Size range	Microsize	Nano- to microsize	Nano- to microsize
Density range	1.2 g/cm^3	1.7–1.9 g/cm^3, to what extent low density particles are formed is unknown yet	1.3–1.9 g/cm^3
Shape	No elongated shapes, only irregular	Elongated, some irregular	Elongated, some irregular

(CC BY; Wagner et al., 2022. Chemosphere)



溶出試験


耐候試験機での紫外線照射

MicP有害性評価に関する環境省事業

① 行政的有害性評価に使えるデータを見極める
② 体系的な文献抽出・分類
③ 水生生物（魚類、甲殻類、貝類）中心に、個体群維持に関するエンドポイント
④ 実験室条件と実環境の乖離を課題として認識

令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度
評価枠組みの立ち上げ	**対象の拡大と評価軸の精緻化**	**データの「質の区別」の導入**	**統括と視野の拡張**
• 対象生物・粒径の基本的方針策定 • パイロット査読の実施と優先順位の整理	• 対象生物に「二枚貝」を追加 • エンドポイント（区分I～III）の明確化	• 標準試験法不在の中でのデータの階層化（〇、△、×） • 影響濃度データの粒径・生物種別マッピング	• 「粒子影響」評価の暫定まとめ作成 • 「吸着・添加化学物質を含む影響（ベクター効果）」の検討開始

報告事例は増えているが、行政での評価に直結するような高品質データは限定的
それでも、毒性値（LOECやNOEC）を提示する工夫

環境省事業におけるMicPによる影響の区分

I: Adverse effects on population viability（個体群の維持に関わる有害な影響）
Effects on maturation, reproduction, growth, and mortality 例）生存率の低下、成長の阻害、体重の減少、産仔数の減少、孵化率の低下、奇形率の上昇　等

II: Other than I and II（Ⅰ・Ⅲ以外の影響）
Individual-level effects with uncertain or indirect effects on population viability 例）行動異常、遊泳速度の低下、遊泳距離の減少　等 Sub-individual effects (tissue and cellular levels) 例）腸・肝臓・腎臓の病変・組織損傷、筋肉量の減少、生殖腺重量の減少　等

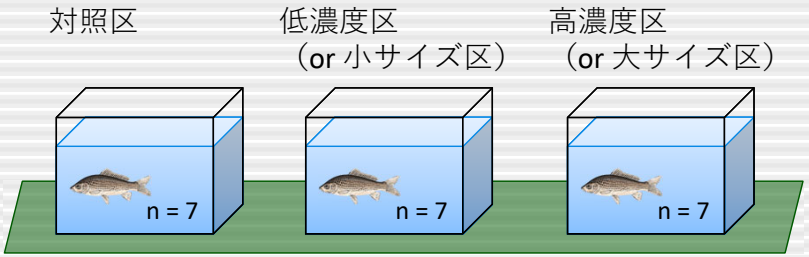
III: Molecular level effects（分子・遺伝子レベルの影響）
Non-individual-level effects (molecular and genetic levels) 例）ストレスマーカーの変動、遺伝子の発現　等

（令和5年度海洋プラスチックごみによる生物・生態系影響把握等業務　報告書）

コイを対象とした試験

項目	内容
体サイズ	試験開始前の平均体重約1.8 g
飼育水槽	45 cmガラス製水槽（32 L容）
水量	20 L
個体数	7個体/tank
換水	40 L/day（サイフォンで滴下）
水温	23～25°C
照明	明期15時間，暗期9時間
飼料	コイ用マッシュ（科学飼料研究所）
給餌量	魚体重の3%（1週間ごとに再計算）
給餌回数	1日に1回（10:00～11:00）
試験期間	5週間（順化：1週間，曝露：4週間）
投与物質	CMTT, PP, PET

OECD TG215に準拠

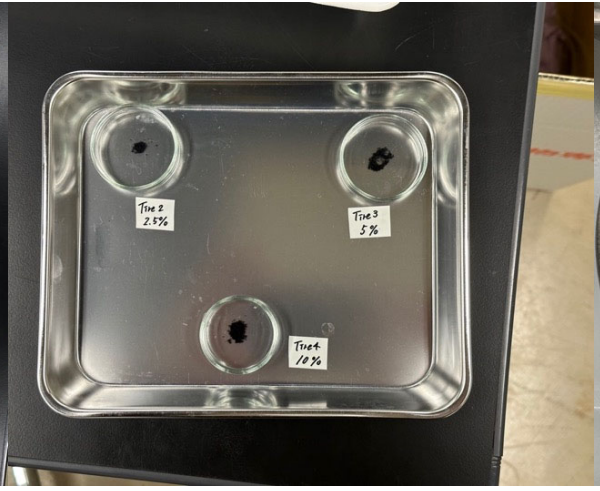


各濃度区を3連で実施

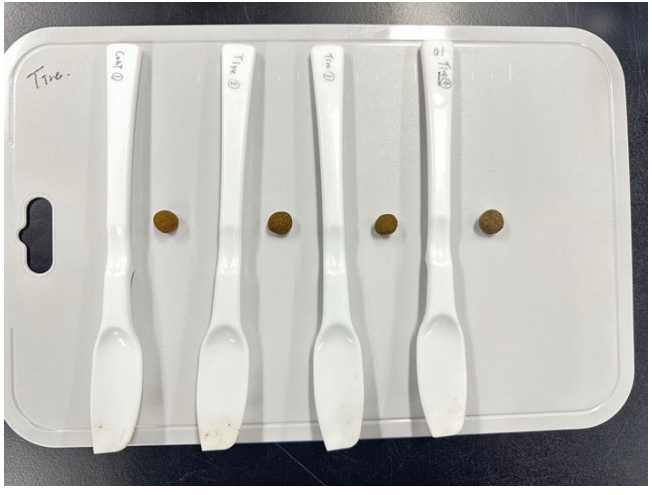
【測定項目】
- 体長
- 体重
- 全血球数（≒赤血球数）
- ヘモグロビン濃度
- ヘマトクリット値
- 消化管の組織学的観察

$$\text{成長率}\ (SGR) = \frac{\overline{\log_e W_2} - \overline{\log_e W_1}}{t_2 - t_1} \times 100$$




Tine 2
2.5%
Tine 3
5%
Tine 4
10%




Tine.



PP-MicPの毒性評価の結果と考察

評価・比較項目	結果	考察
PP-MicP曝露の影響	成長阻害、腸管における 粘液の過剰分泌と白血球の浸潤	✓ 観察された影響は既存の報告と一致するも、原因は不明
バージン vs 再生	バージン＝再生 （バージンでやや強い傾向） ただし、含有化学物質のプロファイルは大きく異なっていた。	✓ 形状と粒度分布はほぼ同じ ✓ 含有化学物質は成長阻害に関与しない可能性
粒子サイズ	粒径小＞粒径大	✓ 粒径が小さいものの方が影響が強いことは既報と一致
紫外線劣化	劣化前＞劣化後	✓ 形状と粒度分布は劣化後も変化しなかったため、それ以外の要因による寄与
種間比較	甲殻類でも同様の影響	✓ 同じメカニズムで作用している可能性

マイクロプラスチックの有害性を左右する要因

- ポリマーの種類
- サイズ
- 形状
- 表面の特性
- 化学物質（配合剤、吸着化学物質）



劣化

- 微細化
- 粗化
- 官能基・電荷の変化
- 化学物質の溶出

毒性の変化

メタアナリシスの結果…

✓ 新品のプラスチックからなるMicPのPNECの方が、風化したMicPのPNECよりも80倍低く、新品のMicPの毒性閾値を用いたリスク評価は過大評価になる可能性がある。
(Cui et al., 2024. J Haz Mat)

✓ MicPの経年劣化はその毒性を強める。Cuiらの解析は、エンドポイントを限定しており、解析に使用したデータ量も少ないことを指摘している。
(Bao et al., 2025. Sci Total Environ)

劣化で毒性は強まる？弱まる？変化しない？
解析に使用するデータの種類と量によって結果が変わり得る。

今後の課題（環境省事業の報告書から）

1. データギャップの補完
   魚類の慢性毒性試験
   二枚貝を対象とした試験データ



2. 室内実験と実環境の乖離
   形状・素材の偏り、劣化状態
   モデル試料と環境中試料とのギャップ
   試験の再現性と環境反映のジレンマ



3. ベクター効果
   含有化学物質（添加剤、配合剤）
   吸着化学物質
   溶出の評価をどうするか？



4. 底質からの曝露
   底質に蓄積したMicPの影響（二枚貝の試験とも関係？）



底生魚の底質摂取量の見積：曝露量の推計への適用

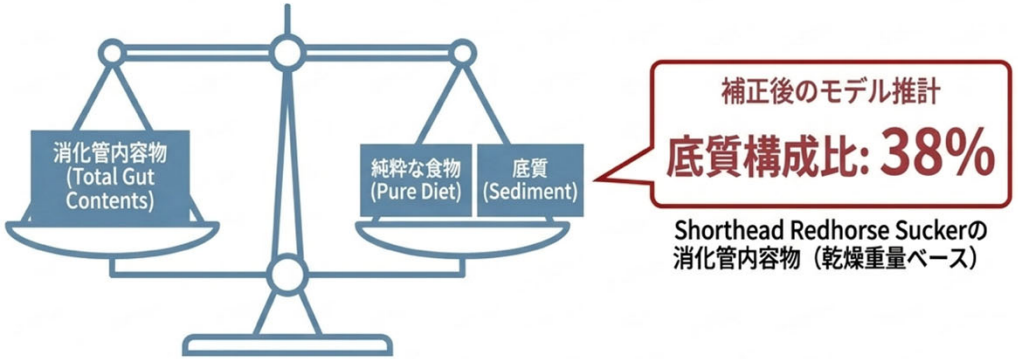
- 放射性同位体でのトレース（Doyle et al., 2011. Aquat. Toxicol.）
- 元素でのトレース（Beyer & Pinkney, 2024. Environ. Toxicol. Chem.）

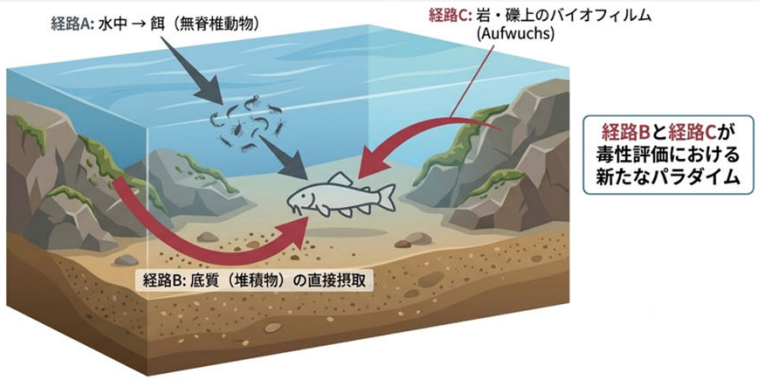
測定法や魚種に依存するが、消化管内容物の3〜5割を底質が占める

経口での曝露量から求めた毒性閾値を、底質濃度と比較することでリスク評価を試行（Nakayama et al., 2026）

底質中タイヤ・路面摩耗粉塵濃度
400〜155,000 mg/kg (0.04%〜15.5%)
最大4260 mg/kg (0.426%)

コイの血液毒性のNOEL（TRWP相当）
2.5%





今後の展望

経口曝露のデータが底質由来の曝露の影響評価に使えそう

試料の代表性は難しい問題
- 市販のマイクロスフィア vs 実環境中を模したもの
- 素材、形状、サイズ、劣化、化学物質
- 共通の試料（標準試料）で研究室横断的な試験（国内だけでも）

ナノプラスチックの評価
- 経口摂取から多臓器への移行、次世代への移行（ほ乳類での報告）
- 水生生物でも同様のことは起こり得るが、曝露評価が課題

標準化へ向けた展開・国際連携
- 標準試料の必要性
- 測定法
- OECD TGの適用可能性と改良の必要性
- 前段階として、最低限の要件（Minimum Requirements）に関する合意形成

謝辞

愛媛大学
国末　達也
田上　瑠美
後藤　哲智

鹿児島大学
宇野　誠一
國師　恵美子
山﨑　雅俊

日本獣医生命科学大学
倉田　修
和田　新平

日本自動車研究所
伊藤　晃佳
森川　多津子
利根川　義男
冨田　幸佳

国立環境研究所
鈴木　剛
田中　厚資
宇智田　奈津代

産業技術総合研究所
板木　拓也
天野　敦子
飯塚　睦
高橋　勇介

富山県立大学
坂本　正樹
端　昭彦

CMTTの分譲

U. S. Tire Manufacturers Association
Mr. Neil Kotras
Ms. Sarah Amick
Ms. Jamie McNutt

研究協力

一般社団法人　日本自動車タイヤ協会（JATMA）
西日本高速道路株式会社（NEXCO西日本）
中日本高速道路株式会社（NEXCO中日本）

研究費

- 環境研究総合推進費（1-2204: JPMEERF20221004; 1-2502: JPMEERF20251002）

敬称略

連絡先

愛媛大学　沿岸環境科学研究センター

仲山　慶

kei_n@ehime-u.ac.jp

https://www.aquatic-toxicology.com

AQUAT_TOXICOL