

生態毒性予測システム「KATE2025」 技術文書（2025年3月27日版）



※ KATE2025 は、化学物質の生態毒性に関する

- ・ 魚類急性毒性試験における半数致死濃度（LC₅₀）
- ・ ミジンコ急性遊泳阻害試験における半数影響濃度（EC₅₀）
- ・ 藻類生長阻害試験における半数影響濃度（EC₅₀）
- ・ 魚類初期生活段階毒性試験における無影響濃度（NOEC）
- ・ ミジンコ繁殖試験における無影響濃度（NOEC）
- ・ 藻類生長阻害試験における無影響濃度（NOEC）

を予測するシステムです。

※ 本システムで得られた予測結果は、「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」に基づく届出に必要な生態毒性試験結果として利用することはできません。化学物質の生態毒性影響の程度についての参考としてご利用ください。

ご質問等がございましたら、下記までお問い合わせ下さい。

国立研究開発法人 国立環境研究所 環境リスク・健康領域 KATE担当

kate@nies.go.jp

Copyright(C) 2025 Ministry of the Environment, Government of Japan.

All Rights Reserved

KATE2025 技術文書 改訂履歴

バージョン	発行日	改訂履歴
第0.99版	2022年3月30日	KATE2020 (version3.0) 向け技術文書
第0.99.1版	2023年3月30日	KATE2020 (version4.0) 向け技術文書
第0.99.2版	2024年3月25日	KATE2020 (version5.0) 向け技術文書
第0.99.3版	2025年3月27日	KATE2025 (version1.0) 向け技術文書

目次

略語一覧

第1章 はじめに

- 1.1 生態毒性予測システム「KATE」：KAshinhou Tool for Ecotoxicity とは
- 1.2 KATE2025 技術文書の目的について
- 1.3 OECD QSARバリデーション原則について
- 1.4 log P について
- 1.5 免責事項
- 1.6 謝辞

第2章 エンドポイントの定義 – OECD QSAR バリデーション原則 1

- 2.1 KATE2025 で使用するエンドポイント
- 2.2 予測値の単位
- 2.3 従属変数
- 2.4 トレーニングセットデータのエンドポイントについて

第3章 アルゴリズム – OECD QSAR バリデーション原則 2

- 3.1 アルゴリズムの概要
- 3.2 ユーザによる化学物質の入力
- 3.3 log P 値の取得
- 3.4 部分構造の抽出
- 3.5 構造クラスの割当
- 3.6 QSAR クラスの割当
- 3.7 QSAR 式による毒性値計算
- 3.8 予測区間の計算（参考情報）
- 3.9 類似度の計算（参考情報）

第4章 適用領域の定義 – OECD QSAR バリデーション原則 3

- 4.1 適用領域
- 4.2 適用領域の判定方法

第5章 バリデーション – OECD QSAR バリデーション原則 4

- 5.1 内部バリデーション
- 5.2 外部バリデーション

第6章 メカニズムに関する解釈 – OECD QSAR バリデーション原則 5

Web 上の関連資料 (Appendix)

- 部分構造一覧 Substructures
<https://kate.nies.go.jp/nies/substructures.php>
- 構造クラス一覧 Structure Classes
https://kate.nies.go.jp/nies/structure_classes.php
- QSAR クラス一覧 QSAR Classes
https://kate.nies.go.jp/nies/qsar_classes.php

略語一覧

CDK: Chemistry Development Kit:

プログラミング言語JAVAで書かれた、ケモインフォマティクスやバイオインフォマティクスのためのオープンソースソフトウェア。化学物質の部分構造の抽出や物性の計算等を行うことができる[1]。

EC₅₀: 50% Effective Concentration (半数影響濃度)

試験水に溶解した化学物質などによって、半数 (50%) の試験生物に対して影響を与えると考えられる濃度。

KATE: KAshinhou Tool for Ecotoxicity

国立環境研究所 環境リスク・健康領域において研究・開発されている生態毒性QSARシステム。「ケイト」と読む。

KOWWIN™

US EPAなどが開発しているEPI Suite™ (Estimation Programs Interface: 化学物質を迅速にスクリーニングするためのアプリケーションなどで使用されることを目的としたツール) に含まれる、化学物質のlog P推定プログラム[2]。

LC₅₀: 50% Lethal Concentration (半数致死濃度)

試験水に溶解した化学物質などによって、半数 (50%) の試験生物を死亡させる濃度。

log P: The logarithm of the octanol/water partition coefficient (オクタノール/水分配係数)

ある化学物質について、1-オクタノールと水の2つの溶媒中の平衡状態における濃度比を常用対数で表したもの。化学物質の疎水性を表す指標とされている。log Pは対象物質のイオン化を無視した数値である[3]。

NOEC: No Observed Effect Concentration (無影響濃度)

最大無影響濃度、最大無作用濃度ともいう。対照区と比較して統計的に有意な(有害) 影響が認められなかった最高濃度であり、LOEC (最小影響濃度) のすぐ下の濃度区である(環境省 化学物質の環境リスク評価 第17巻 第1編 参考2 用語集 [4] 等より。)

OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development (経済協力開発機構)

(Q)SAR: (Quantitative) Structure-Activity Relationships ((定量的)構造活性相関)

化学物質の構造上の特徴又は物理化学定数と生物学的活性(毒性等)の相関関係を構造活性相関(SAR: Structure-Activity Relationship)といい、定量的なものを定量的構造活性相関(QSAR: Quantitative Structure-Activity Relationship)という。両者を併せて(Q)SARと記載することもある。構造活性相関は、例えば、特定の官能基の有無から物質の有害性の多寡を推測することを指し、構造を手掛かりに毒性等を定量的に算出する仕組みをいわゆるQSARモデルと呼ぶ(環境省 化学物質の環境リスク評価 第17巻 第1編 参考2 用語集 [4] 等より。)

SMARTS: SMiles ARbitrary Target Specification

SMILESを拡張した、部分構造を表現するための識別子 [5]。

SMILES: Simplified Molecular Input Line Entry System

化合物の分子構造等を印刷可能な文字で線形表記した識別子 [6]。

US EPA: United States Environmental Protection Agency (米国環境保護庁)

第1章 はじめに

1.1 生態毒性予測システム「KATE」：KAshinhou Tool for Ecotoxicity とは

KATE (<https://kate.nies.go.jp>) は環境省の請負業務（平成 16 年度から令和 6 年度）として、国立環境研究所 環境リスク・健康領域において研究・開発されている生態毒性 QSAR システムです。KATE は化学物質の構造をもとに生態毒性を予測します。KATE2025 で予測できる毒性値は以下の通りです。

- ・魚類急性毒性試験 (OECD TG 203) [7]における半数致死濃度 (LC₅₀)
- ・魚類初期生活段階毒性試験 (OECD TG 210) [8]における無影響濃度 (NOEC)
- ・ミジンコ急性遊泳阻害試験 (OECD TG 202) [9]における半数影響濃度 (EC₅₀)
- ・ミジンコ繁殖試験 (OECD TG 211) [10]における無影響濃度 (NOEC)
- ・藻類生長阻害試験 (OECD TG 201) [11]における半数影響濃度 (EC₅₀) 及び無影響濃度 (NOEC)

化学物質の CAS 番号検索や構造式エディタを用いた作図等を用いて SMILES 記法による入力を行い、log P を記述子とする回帰式によって QSAR 予測を行います。

KATE2025 の QSAR モデル構築に当たっては、環境省が実施した生態毒性試験結果 [12]（魚類急性毒性試験、ミジンコ急性遊泳阻害試験、魚類初期生活段階毒性試験、ミジンコ繁殖試験、藻類生長阻害試験）及び US EPA のファットヘッドミノール・データベースの魚類急性毒性試験結果 [13] を用いています。

1.2 KATE2025 技術文書の目的について

本技術文書は、KATE2025 の QSAR モデル導出に関する説明やモデルの性能評価について、OECD の QSAR バリデーション原則 [14] に基づいて説明するものであり、KATE2025 を使用したことのある方を対象としています。

KATE2025 の使用方法、開発の経緯や更新履歴等については、KATE2025 操作マニュアル (https://kate.nies.go.jp/doc/KATE2025_manual-ja.pdf) を参照してください。

1.3 OECD QSAR バリデーション原則について

OECD QSAR バリデーション 5 原則とは、OECD が 2004 年に策定した、QSAR モデルを化学物質の規制に適用する際に正当性・信頼性を確保するために QSAR モデルが満たすべき 5 つの原則です。

1. エンドポイントの定義
2. 曖昧さのないアルゴリズム
3. 適用領域の定義
4. 適合度、頑健性、予測性の適切な評価
5. 可能ならば、メカニズムに関する解釈

1.4 log P について

KATE2025 では、化学物質の毒性を予測する際に使用する log P として、US EPA が著作権を有する log P 推定モデル KOWWIN™ [5] を US EPA の許諾を得て使用しています。

利用者は下記に示す KOWWIN™ 使用許諾条件について遵守してください。

KOWWIN v1.69 (April 2015)

© 2000-2015 U.S. Environmental Protection Agency

KOWWIN is owned by the U.S. Environmental Protection Agency and is protected by copyright throughout the world.

Permission is granted for individuals to download and use the software on their personal and business computers.

Users may not alter, modify, merge, adapt or prepare derivative works from the software. Users may not remove or obscure copyright, tradename, or proprietary notices on the program or related documentation.

KOWWIN contained therein is a tradename owned by the U.S. Environmental Protection Agency.

1.5 免責事項

KATE2025 の予測結果は十分な予測精度を保証できるものではありません。本システムは、化学物質の生態毒性影響の程度についての参考情報を得るためのツールの一つとしてご利用ください。環境省および国立環境研究所は KATE2025 による毒性予測値を保証するものではなく、また、KATE2025 による毒性予測値の使用により生じた損害については一切の責任を負いません。

現時点では KATE2025 による毒性予測結果を「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（化審法）」に基づく届出に必要な生態毒性試験結果に代替するものとして利用することはできません。

著作権、リンク等については、KATE2025 ウェブサイト内のサイトポリシー (<https://kate.nies.go.jp/spolicy-ja.html>) をご覧ください。

1.6 謝辞

KATE2025 は下記のソフトウェアまたはライブラリからの結果を使用させていただいております。ここに記して謝意を表します。

- Open Babel [15]
- JSME Molecular Editor [16, 17]
- CDK (Chemistry Development Kit) [1, 18-21]
- KOWWIN™ (included in EPI Suite™) [2]

第2章 エンドポイントの定義 – OECD (Q)SAR バリデーション原則 1

ここでは、KATE2025で予測するエンドポイントについての定義を行います。

2.1 KATE2025 で予測するエンドポイント

KATE2025 では、各予測毒性タイプに対して、化学物質の生態毒性に関する以下のエンドポイント（毒性の指標等）により毒性予測を行います。

表 2-1 KATE2025 で予測するエンドポイント

予測毒性タイプ		生物種（学名）	試験法	試験期間	毒性の指標
生物群	急性/ 慢性				
魚類	急性	ヒメダカ (<i>Oryzias latipes</i>)、 ファットヘッドミノー (<i>Pimephales promelas</i>) *1	魚類急性毒性試験 (OECD テストガイドライン 203) [7]	96 h	LC ₅₀
ミジンコ	急性	オオミジンコ (<i>Daphnia magna</i>)	ミジンコ急性遊泳阻害試験 (OECD テストガイドライン 202) [9]	48 h	EC ₅₀
藻類	急性	<i>Raphidocelis subcapitata</i> *2	藻類生長阻害試験 (OECD テストガイドライン 201) [11]	72 h	EC ₅₀
魚類	慢性	ヒメダカ (<i>Oryzias latipes</i>)	魚類初期生活段階毒性試験 (OECD テストガイドライン 210) [8]	胚期および ふ化後 30 日間*3	NOEC
ミジンコ	慢性	オオミジンコ (<i>Daphnia magna</i>)	ミジンコ繁殖試験 (OECD テストガイドライン 211) [10]	21 d	NOEC
藻類	慢性	<i>Raphidocelis subcapitata</i> *2	藻類生長阻害試験 (OECD テストガイドライン 201) [11]	72 h	NOEC

*1 1物質に対してヒメダカとファットヘッドミノーの両方の毒性値がある場合、ヒメダカの方を優先的に利用しています。KATE の予測モデル構築の当初、環境省のヒメダカ試験結果だけでは物質数が少なく精度良い QSAR 式が構築できなかったため、US EPA のファットヘッドミノー試験結果を含めて、魚類急性の QSAR におけるヒメダカ・ファットヘッドミノー生物種間に起因する差異の検討が行われました。その結果、ファットヘッドミノーの毒性値を加えて QSAR 式を作成することで、ヒメダカのみから作成するよりも精度が良くなることを確認しました。また、ヒメダカ及びファットヘッドミノー両方の実測毒性値が得られている物質について、毒性値に差異があるか確認を行った結果、10倍以上異なる物質はジメチルアミンのみでした（平成 21 年度化審法審査支援等検討調査報告書）。

*2 過去には *Selenastrum capricornutum* や *Pseudokirchneriella subcapitata* 等の名称が用いられていたことがあります。

*3 魚類初期生活段階試験は魚種やふ化日数によって試験期間が異なりますが、環境省が実施した生態毒性試験で用いられているヒメダカでは「胚期およびふ化後 30 日間」となっています。

2.2 予測値の単位

KATE2025 では、毒性の指標の予測値を[mg/L]の単位で出力します。

2.3 従属変数

KATE2025 では、毒性の指標の値の単位を[mg/L]から[mmol/L]に変換し、その逆数の対数を取った $\log_{10}(1/\text{毒性値}[\text{mmol/L}])$ を従属変数として使用しています。

2.4 データについて

KATE2025 のデータは、環境省が実施した生態毒性試験結果[12]（魚類急性毒性試験、ミジンコ急性遊泳阻害試験、魚類初期生活段階毒性試験、ミジンコ繁殖試験、藻類生長阻害試験）結果及び US EPA のファットヘッドミノー・データベース[13]の魚類急性毒性試験結果を用いています。各予測毒性タイプでの物質数は表 2-2 の通りです。

表 2-2 予測毒性タイプに対する物質数

		急性			慢性		
		魚類	ミジンコ	藻類	魚類	ミジンコ	藻類
回帰式の構築に用いられる物質	環境省データ	360	436	316	32	312	402
	US EPA データ	497					
サポートケミカル*1	環境省データ	205	134	207	1	60	115
	US EPA データ	1					
どの QSAR クラスにも分類されない物質*2	環境省データ	8	16	31	0	12	19
	US EPA データ	8					
合計		1079	486	554	33	384	534

*1 不等号付きデータ（限度試験等）、被験物質が異性体混合物である、もしくはlog Pが6より大きく、QSARクラスの回帰式の構築には用いられない物質。なお、全物質のlog PはKOWWIN™による推定値を使用します。

*2 KATE2025のどのQSARクラスにも該当しない物質。予測時にUnclassifiedクラスに分類され、毒性の予測は行われません。

第3章 アルゴリズム – OECD (Q)SAR バリデーション原則 2

ここでは、KATE2025のアルゴリズムについて説明します。3.1で概要を、3.2以降で詳細を説明します。

3.1 アルゴリズムの概要

KATE2025は化学物質（有機化合物）の毒性を予測する線形回帰に基づくQSARモデルです。化学物質の生体膜透過性や生物体内への蓄積性と毒性に相関があると考えられることより、log Pを記述子としています。

環境省の生態影響試験データおよびUS EPAのファットヘッドミノー急性試験データをトレーニングセットデータとして使用します。各物質に含まれる部分構造の種類と個数を特徴量とする決定木により、クラス分類を行っています。

KATE2025には表3-1に示す19の大分類およびその他の分類があります。いずれの分類も特有の部分構造を持っており、各大分類に関して反応性が高く毒性が強くなると考えられる部分構造の有無によりReactiveなクラスとUnreactiveなクラスに分類します。そしてさらなる条件分岐（ハロゲンの有無、芳香族原子の有無等）によって細分化された構造クラス（3章3.5参照）に対してQSARクラス（3章3.6参照）が割り当てられており、各QSARクラスに回帰式が立てられています。一部のQSARクラスは特定の生物群の毒性予測に特化するようにクラス分類しています。反応性が低く麻酔作用のみを有すると考えられる部分構造を持つ場合には、Narcotic groupクラスにも分類されます。皮膚感作性[22]などの特殊活性に関係する部分構造は、主に構造に関する適用領域の判定（4章4.2A参照）に使用され[23]、一部はクラス分類にも使用されます。

予測する化学物質の情報は分子の化学構造を英数字で文字列化したSMILES記法[6]で入力し、ケモインフォマティクスツールCDK[1]を用いて部分構造とその個数を取得します。部分構造はSMILESの拡張表記であるSMARTS記法[5]によって事前に定義されています。抽出された部分構造をもとに上述した決定木によってクラスの割り当てを行います。一つの予測毒性タイプに対して複数のクラスが割り当てられることもあります（KATE2025のどのクラスにも合致しない部分構造をもつ物質はUnclassifiedクラスに分類され、毒性予測が行われません）。その後、KOWWIN™ [2]によって推定されたlog Pをもとに、割り当てられた各クラスに対して予測毒性値を出力します。log Pの値をユーザが手動で入力することも可能ですが、QSARクラスの物質データのlog Pは全てKOWWIN™による推定値を使用しています。また、各クラスについて構造およびlog Pの適用領域の判定を行います。

表 3 - 1 KATE2025 の大分類一覧

	大分類	キーとなる部分構造ID	部分構造名	SMARTS
1	acid	3034	carboxylic acid C(=O)O	[#6;\$([#6](=[#8])([#6])[#8H1])]
		4760	-SO3H, Sulfonic Acid, sulfo-, -sulfonic aci	[C,c,O]S(=O)(=O)[O;\$([OH1]),\$([O[Na,Li,K]])]
2	alcohol	3046	alcohol COH	[#6;\$([#6][#8;H]);!X3;v4]
3	aldehyde	3031	aldehyde	[#6H1;\$([#6](=[#8])[#6])]
4	ketone	3036	ketone CC(=O)C	[#6;\$([#6](=[#8])([#6])[#6])]
5	ester	3032	ester CC(=O)OC	[#6;\$([#6](=[#8])([#6])[#8][#6]);!\$([#6](=[#8])([#6])[#8][#6]=[O,S,N])]
		3145	acetal	[#6X4;\$([#6]([#8])[#8])]
6	ether	3044	ether general	[#8H0;!\$([#8]C=[O,N,S]);!\$([#8]C[#8]);\$([#8]([#6])[#6])]
7	phenol	3047	phenol cOH	[OX2H][cX3;\$([c1cccc1])]
8	amine primary	3100	amine CNH2	[#7X3H2;!\$([#7][*v6]);!\$([N[#6](~[#7,#8,#16])])]
9	amine sec, tert	3110	amine CNH1	[#7v3X3H1;!\$([#7][!#6]);!\$([#7][*v6]);!\$([#7][#6](~[#7,#8,#16])];!\$([#7r5H1](a)a)]
		3120	amine CNH0	[#7v3X3H0;!\$([#7][!#6]);!\$([#7][*v6]);!\$([#7][#6](~[#7,#8,#16])];!\$([#7r5H1](a)a)]
10	aromatic n	4911	aromatic n	[n]
11	hydrazine	3210	NN, hydrazine general, not in ring	[Nv3X3R0;\$([N][Nv3X3])]
12	nitrile	3104	nitrile C#N	[N;\$([#7X1]#[#6X2])]
13	amide	3123	amide	[#7v3X3;\$([#7][C](=O)[!N;!S;!O;!P]),\$([#7][CH1](=O));!\$([N~[N,S,O]);!\$([N(C=[N,O,S])C=O])]
14	carbamate	3041	carbamate general NC(=O,S)O,S	[#7v3X3;\$([#7][#6R0](=[O,S])[O,S])]
15	nitro	3231	nitro aromatic	[N;\$([N(c)(=O)=O]),\$([N+](c)(=O)[O-])]
16	phosphorus	5018	Phosphorus [P]	[#15]
17	sulfur	5016	Sulfur [S]	[#16]
18	halogen	4507	halogen	[F,Cl,Br,I]
19	heteroatomic	4911	aromatic n	[n]
		4912	aromatic o	[o]
		4913	aromatic s	[s]
Others		3106	azo N=N	[NX2;\$([N=N])]
		4541	epoxide monocyclic	[#8r3;\$([#8]1[#6R1][#6R1])]
		3108	imino C=N-, guanidine	[#7v3X2;\$([N=[Cv4X3]);!\$([N[N,O,S]])]
			etc	.
				.

毒性予測の流れは下記の通りです（図3-1 参照）。

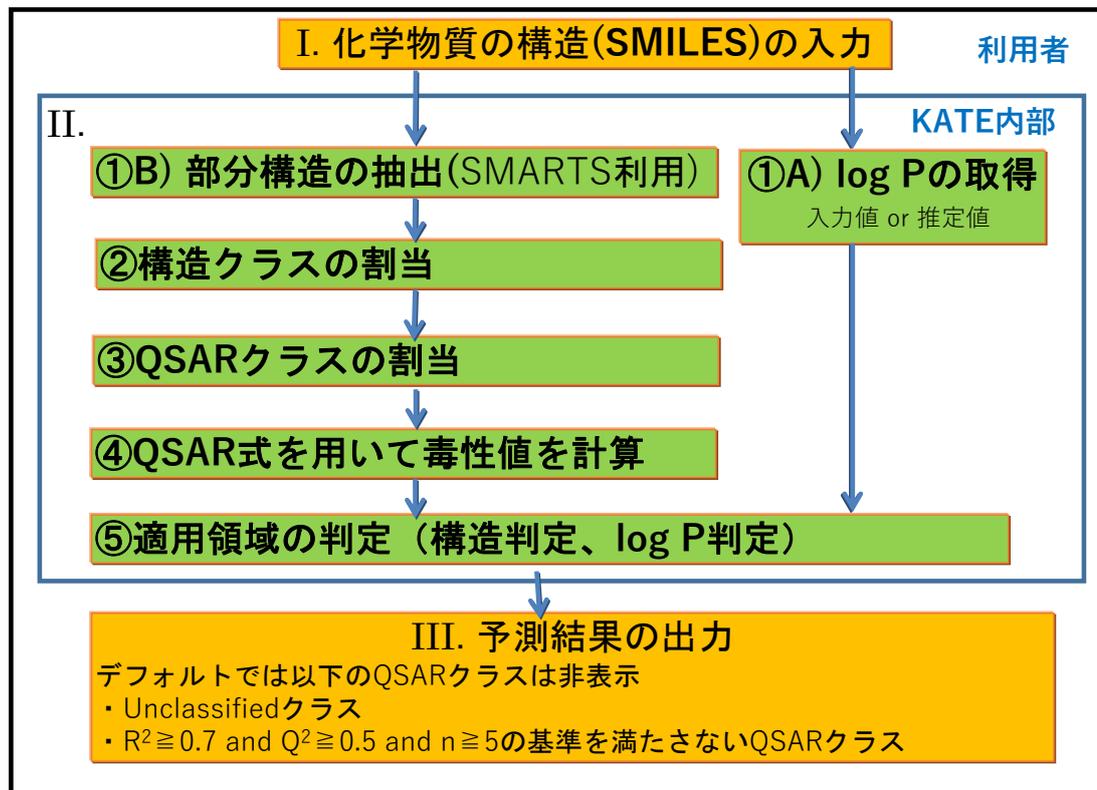


図3-1 KATE2025の毒性予測の流れ

I. 利用者による化学物質の構造（SMILES記法による）の入力、log P値の入力（任意）

II. QSAR式、毒性予測値の決定、及び適用領域判定に関する処理

- ① 予測対象物質（入力された化学物質）に対して
 - A) log P値を推定（又は入力値の利用）
 - B) 部分構造を抽出
- ② 抽出された部分構造の種類と数をもとに構造クラス*1を割当
- ③ 予測毒性タイプごとに、構造クラスに対応するQSARクラス*2を割当（複数のクラスに割当てられる場合もある）
- ④ 割り当てられたQSARクラスごとに、QSAR式*3を用いて毒性値を計算
- ⑤ 適用領域の判定（log P判定と構造判定）

*1 「3章3.5 構造クラスの割当」参照

*2 各予測毒性タイプでの物質の構造に基づいて定義された分類

*3 QSARクラスに含まれるデータで構築されたモデル。ここではlog Pを記述子とする単回帰式

Ⅲ. 予測結果の出力

デフォルトでは、統計指標の基準 ($R^2 \geq 0.7$ 、 $Q^2 \geq 0.5$ および $n \geq 5$) * を満たす QSAR クラスの結果のみが表示され、この基準を満たさないクラスおよび Unclassified クラスは非表示になっています。

* R^2 , Q^2 , n はそれぞれ決定係数、頑健性 (Leave-one-out法)、トレーニングセットデータ数であり、各 QSAR クラスに対してあらかじめ計算されています。

具体的な例として、化学物質“1-pyridin-3-ylethanone”を予測したときの予測フローを図 3-2 に示します。

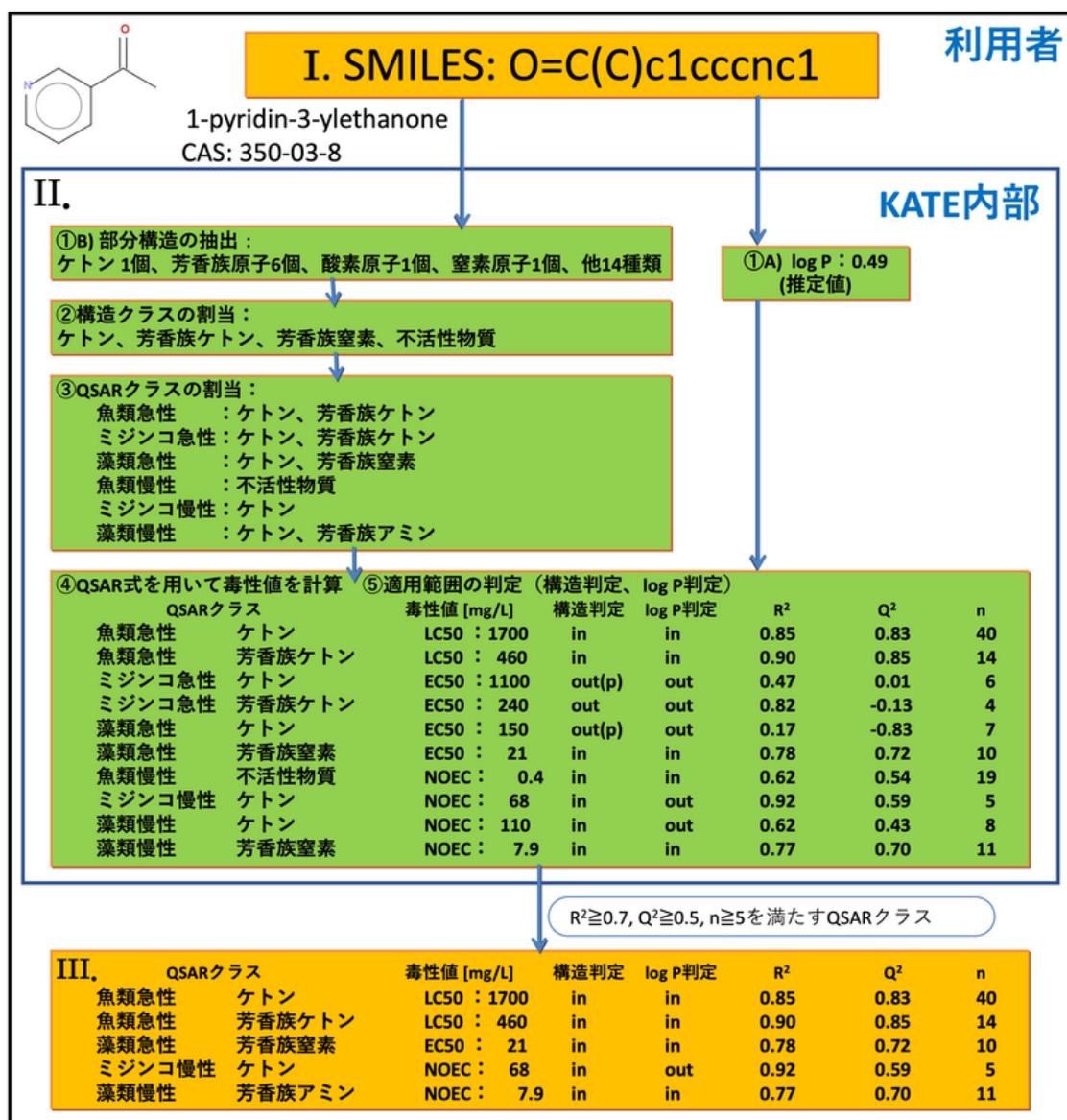


図 3-2 KATE2025のQSAR予測フロー (例)

※ 図 3-2 中の、ケトン、芳香族ケトン、芳香族窒素、低反応性物質の、KATE2025 における実際の名称は以下になっています。

ケトン : COns_X ketone unreactive

芳香族ケトン : COS_X ketone unreactive aromatic
 芳香族窒素 : CNOS_X aromatic n unreactive
 低反応性物質 : CNO_X unreactive Fish chronic, w/ N,O

以降でKATE2025における毒性予測の流れの詳細について、順番に説明していきます。

3.2 ユーザによる化学物質の入力

ユーザが SMILES を直接入力する、または描画した構造式や CAS 番号や物質名から SMILES に変換します。

3.3 log P 値の取得

毒性予測値の計算に使用する予測対象物質のlog Pの値は以下の優先順位で決定します。

1. ユーザ入力値（ユーザによる入力値がある場合に利用される）
2. 推定値（ユーザによる入力値がない場合にKOWWIN™による推定が行われます）

3.4 部分構造の抽出

部分構造定義一覧（表3-2。各行が1つの部分構造に対応し、SMARTS 記法により定義されています。）を元に、予測対象物質に含まれる部分構造の個数を計算します（表3-3）。部分構造個数計算にはCDKライブラリ[1]を利用しています。

表3-2 部分構造一覧（一部のみ）

部分構造ID	部分構造名	SMARTS
3031	Ketone	[#6;\$([#6](=[#8])([#6])[#6])]
3032	Ester	[#6;\$([#6](=[#8])([#6])[#8][#6]);!\$([#6](=[#8])([#6])[#8][#6]=[O,S,N])]
3033	Carbonate	[#6;\$([#6](=[#8])([#8][#6])[#8][#6])]
...		

部分構造一覧については以下を参照ください。

<https://kate.nies.go.jp/nies/substructures.php>

表3-3 予測対象物質に含まれる部分構造一覧
 (SMILES: O=C(C)c1cccnc1 の場合)

部分構造ID	部分構造名	SMARTS	個数
3001	elements other than CX	[!#6;!#9;!#17;!#35;!#53]	2
3002	elements other than CNX	[!#6;!#7;!#9;!#17;!#35;!#53]	1
3003	elements other than COX	[!#6;!#8;!#9;!#17;!#35;!#53]	1
3004	elements other than CSX	[!#6;!#16;!#9;!#17;!#35;!#53]	2
3009	elements other than COSX	[!#6;!#8;!#16;!#9;!#17;!#35;!#53]	1
3014	elements other than CnosX	[\$([!#6;!F;!Cl;!Br;!I;!n;!s;!o]),\$([n+])]	1
3022	Carbon	[#6]	7
3030	carbonyl C=O	[#6;\$([#6](=[#8]))]	1
3031	ketone CC(=O)C	[#6;\$([#6](=[#8])([#6])[#6])]	1
3059	C=O w/o electron donated o-, p- Nv3X3	[C;\$([C=O]);!\$([C(=O)c1c([Nv3X3])cccc1]);!\$([C(=O)c1ccc([Nv3X3])cc1])]	1
4504	>C=O or >C=S (sPilot4)	[CX3]=[OX1,SX1]	1
4543	MF: not C,c,O,F	[!C;!c;!O;!F]	1
4892	MF: not CHO (kPilotO)	[!C;!c;!O]	1
4893	MF: not CHOP	[!C;!c;!O;!P]	1

4910	aromatic	[a]	6
4911	aromatic n	[n]	1
5007	Nitrogen [N,n]	[#7]	1
5008	Oxygen [O,o]	[#8]	1

部分構造 ID の先頭が 5 で始まるものは構造判定用部分構造（構造判定のために使用される部分構造）としても使用されます（「4章 4.1 A) 構造の適用領域」参照）

3.5 構造クラスの割当

構造クラスの定義（図 3-3 に例としてケトンに関する構造クラスの定義を示しています）を元に、予測対象物質に合致する構造クラスを割り当てます。例えば、O=C(C)c1ccnc1 は表 3-3 より部分構造 3031 を 1 つ以上持つが R_00001（部分構造 3036, 3053, 3054, 3055, 3056, 3174, 4515, 4791, 6112 のいずれかを持つ）の条件および G1_00010（部分構造 3034, 4760 のいずれかを持つ）の条件には該当しないため、ketone unreactive であると判定されます。そして部分構造 3011 を持たないため、G1_21025 の構造クラスが割り当てられます。

Structure ID	Description	Decision tree
-	ketone CC(=O)C	ID:3031 > 0
-	ketone reactive	R_00001 = true
G1_21028	CNO_X ketone reactive	L ID:3006 = 0
G1_42027	CNO_X aldehyde, ketone	L ID:3173 > 0
-	ketone unreactive	L R_00001 = false and G1_00010 = false
G1_21025	COns_X ketone unreactive	L ID:3011 = 0
G1_21029	COS_X ketone unreactive aromatic	ID:4910 > 0
G1_21027	COns_X ketone unreactive aliphatic	L ID:4910 = 0

図 3-3 ケトンに関する構造クラスの定義

構造クラス一覧については以下を参照ください。

https://kate.nies.go.jp/nies/structure_classes.php

構造クラス定義の Decision tree 列の値をクリックすると当該構造クラスおよび部分構造の定義が表示されます。図 3-4 に”R_00001 = false and G1_00010 = false”をクリックしたときの例を示します。

R_00001 (ID:3036 > 0 or ID:3053 > 0 or ID:3054 > 0 or ID:3055 > 0 or ID:3056 > 0 or ID:3174 > 0 or ID:4515 > 0 or ID:4791 > 0 or ID:6112 > 0)			
FragID	Substructure Name	Count	SMARTS
3036	aldehyde	0	[#6H1;#([#6] (= [#2]) [#6])]
3053	carbonyl a-halo, ab-unsaturated	0	[#([#6R0] (=O) [#6H1, #6H2] [Cl, Br, I, F]), #([#6] (=O) [#6] = [#6: H 2]), #([#6] (=O) [#6] = [#6: H1] [a]), #([#6] (=O) [#6] = [#6] [#6] (=O) [a]), #([#6R0] (=O) [#6H2] [#6R0] (=O))]
3054	O-alkenyl, alkynyl, halogen, ketene	0	[#([#8X2] [C=O] [#6] =, # [#6]), #([#8X2] [#6H1, #6H2] [#6] =, # [#6]), #([#8X2] [#6H1, #6H2] [#6H1, #6H2] [#6] = [#6H2]), #([#8X2] [#6H1, #6H2] [#6H1, #6H2] [#6] # [#6]), #([#8X2] [#6H1, #6H2] [#6H1, #6H2] [Cl, Br, I]), #([#8X2] [#6H1, #6H2] [#6] [F]), #([#8X2] [#6H1, #6H2] [#6r3] [Or3])]
3055	CH2=CHC(=O)O	0	[#([#6H2] = [#6H1] [#6] (=O) [OH]), #([#6H2] = [#6H1] [#6] (=O) [O] [#6])]
3056	CH2=CC(=O)O	0	[#([#6H2] = [#6HO] [#6] (=O) [OH]), #([#6H2] = [#6HO] [#6] (=O) [O] [#6])]
3174	carbonyl a-C=O C=CC(=O)-a	0	[#([#6v4X3] [#6] (=O) [#6] = [#6] [#6] (=O) [#6v4X3])]
4515	o-disubstitued pix2, pi-n-pi	0	oOC(=O) [c;R] [c;R] C(=O) Oc
4791	Pro: a,b-unsaturated C=O (amine elimination)	0	[C;X4;#([CH2] [N;X3]), #([CH2] [OH;X2, SH;X2]), #([CH2] [Cl, Br, I])][C;X4;#([C;H1]), #([C;H2])][C;R0]=O
6112	pyrethroids-b	0	aa(a) [C, O] aaaCOC(=O) C

G1_00010 (ID:3034 > 0 or ID:4760 > 0)			
FragID	Substructure Name	Count	SMARTS
3034	carboxylic acid C(=O)O	0	[#6;#([#6] (= [#2]) ([#6]) [#8H1])]
4760	-SO3H, Sulfonic Acid, sulfo-, -sulfonic acid	0	[C, c, O] S(=O) (O) [O;#([OH1]), #([O[Na, Li, K])]

図3-4 構造クラス R_00001 および G1_00010 の定義

表3-4 予測対象物質に合致する構造クラス (SMILES: O=C(C)c1cccnc1 の場合)

構造クラスID	大分類	構造クラス名
G1_21025	Ketone	COns_X ketone unreactive
G1_21029	Ketone	COS_X ketone unreactive aromatic
G1_25002	Hydrocarbon	CNO_X unreactive Fish Chronic, w/ N,O
GA_22075	aromatic n	aromatic n reactive Alga

構造クラス ID 先頭のアルファベットの意味は下記の通りです。

- 先頭が A で始まるもの : Acid に関係する構造
- 先頭が C で始まるもの : Carbon を含む構造
- 先頭が R で始まるもの : Reactive に関係する構造
- 先頭が U で始まるもの : Unreactive に関係する構造
- 先頭が GF で始まるもの : Fish に関連する QSAR クラスが設定されている構造
- 先頭が GD で始まるもの : Daphnid に関連する QSAR クラスが設定されている構造
- 先頭が GA で始まるもの : Alga に関連する QSAR クラスが設定されている構造
- 先頭が GFD で始まるもの : Fish と Daphnid に関連する QSAR クラスが設定されている構造
- 先頭が G1 で始まるもの : Fish, Daphnid, Alga のいずれかに関連する QSAR クラスが設定されている構造

3.6 QSAR クラスの割当

予測対象物質に含まれる構造クラスをもとに、対応する QSAR クラスを各予測毒性タイプに割当てます (表3-5)。1つの物質が同じ予測毒性タイプに対して、複数の QSAR クラスに割当てられることもあります。どの QSAR クラスにも分類されなかった場合、Unclassified クラスとなります (毒性の予測も行われません)。

QSAR クラス一覧については以下を参照ください。
https://kate.nies.go.jp/nies/qsar_classes.php

表 3-5 予測対象物質に対して割当てられる QSAR クラス一覧
 (SMILES: O=C(C)c1cccnc1 の場合)

QSAR ID	QSARクラス名	予測毒性タイプ	構造クラスID
12102541	CO _{ns} _X ketone unreactive	Fish Acute	G1_21025
12102941	COS_X ketone unreactive aromatic	Fish Acute	G1_21029
22102541	CO _{ns} _X ketone unreactive	Daphnid Acute	G1_21025
12102941	COS_X ketone unreactive aromatic	Daphnid Acute	G1_21029
32102541	CO _{ns} _X ketone unreactive	Alga Acute	G1_21025
32207541	aromatic n reactive Alga	Alga Acute	GA_22075
12500251	CNO_X unreactive Fish Chronic, w/ N,O	Fish Chronic	G1_25002
12102551	CO _{ns} _X ketone unreactive	Daphnid Chronic	G1_21025
22102551	CO _{ns} _X ketone unreactive	Alga Chronic	G1_21025
32207551	aromatic n reactive Alga	Alga Chronic	GA_22075

表 3-5 の QSAR クラス名の先頭の「COS_X」等は、その QSAR クラスの物質に含まれてもよい元素を示しており、大文字のアルファベットは脂肪族・芳香族の両方、小文字のアルファベットは芳香族のみを意味します。例えば、「COS_X」は脂肪族・芳香族の炭素、酸素、硫黄およびハロゲンを含んでも良いことを意味し、「CXnos」は脂肪族・芳香族の炭素、ハロゲン、および芳香族の窒素・酸素・硫黄を含んでも良いことを意味します。したがって、脂肪族の窒素を含む物質は、「COS_X」もしくは「CXnos」で始まる QSAR クラスには分類されないことになります。

QSAR ID (QSAR クラスの ID) の付け方のルールとしては以下のようになっています。

- ・ 8桁の数字で構成される。
- ・ 1桁目は1: 魚類、2: ミジンコ、3: 藻類を表す。
- ・ 2~6桁目は構造クラス ID の下5桁と一致する。
- ・ 7桁目は4: 急性、5: 慢性を表す。
- ・ 8桁目は記述子を表す。現在は1 (log P 推定値) のみ使用している。

予測対象物質の SMILES が O=C(C)c1cccnc1 である場合の、部分構造の抽出から QSAR クラス割当てまでの流れを簡単にまとめると図 3-5 のようになります。

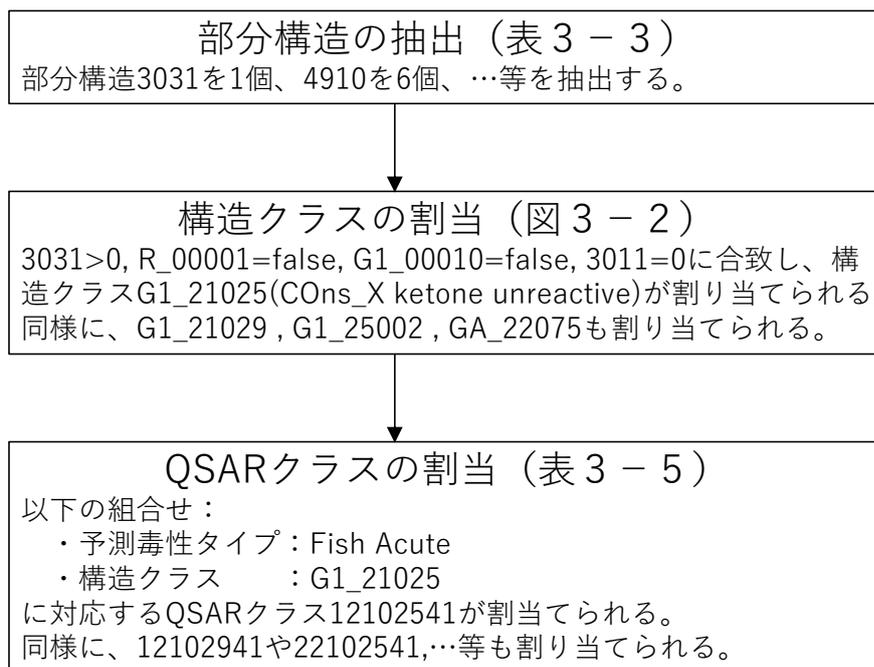


図 3 - 5 部分構造の抽出から QSAR クラスの割当までの流れ
(SMILES: O=C(C)c1cccnc1 の場合)

3.7 QSAR 式による毒性値計算

割当てられたQSARクラスごとに、下記(1)のQSAR式に、予測対象物質のlog P、および当該QSARクラスに対して予め計算された傾きと切片 (表 3 - 6) を代入することにより、 $\log_{10}(1/\text{毒性値}[\text{mmol/L}])$ を計算し、その後、予測対象物質の分子量*を用いて毒性値[mg/L]に単位変換します。

$$\log_{10}(1/\text{毒性値}[\text{mmol/L}]) = \text{傾き} \times \log P + \text{切片} \quad \dots (1)$$

* 予測対象物質の分子量の計算にはOpen Babel [15] を利用します。

3.8 予測区間の計算 (参考情報)

割当てられたQSARクラスごとに、予測対象物質のx (=log P)の値、および当該QSARクラスに対して予め計算された統計値 $t_{95}, n, V_{\varepsilon}, \bar{x}, \Sigma^{-1}$ (表 3 - 6、3 - 7) を代入することにより、下記で定義される $\log_{10}(1/\text{毒性値}[\text{mmol/L}])$ の信頼水準95%予測区間を計算します。その後、予測対象物質の分子量を用いて、(2)式の予測区間の下限値と上限値を毒性値[mg/L]に単位変換します。

$$95\% \text{予測区間} = [\log_{10}(1/\text{毒性値}[\text{mmol/L}]) - dy, \log_{10}(1/\text{毒性値}[\text{mmol/L}]) + dy] \quad \dots (2)$$

ここで、

$$dy = t_{95} \times \sqrt{(1 + 1/n + D^2/(n - 1)) \times V_{\varepsilon}} \quad \dots (3)$$

$$D^2 = (x - \bar{x})^T \Sigma^{-1} (x - \bar{x}) \quad \dots (4)$$

表 3 - 6 予測区間の計算に必要な統計値

変数	説明	式
n	当該QSARクラスのトレーニングセットデータ数	
\bar{x}	当該QSARクラスのトレーニングセット	$\sum x_i / n$

	データに対する記述子の平均値	\bar{x}_i : i 番目のトレーニングセットデータの log P 値
Σ^{-1}	記述子の共分散行列の逆行列 (ここでは単回帰なので分散の逆数)	$n/\sum(x_i - \bar{x})^2$ \bar{x}_i : i 番目のトレーニングセットデータの log P 値 \bar{x} : トレーニングセットデータの log P の平均値
V_ε	残差分散	$\sum(y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p - 1)$ y_i : i 番目のトレーニングセットデータの実測毒性値 \hat{y}_i : i 番目のトレーニングセットデータの予測毒性値 p : 記述子の数 (ここでは単回帰なので1)
t_{95}	当該QSARクラスの自由度に対する5% 有意水準(両側検定)での t 値	

表 3-7 QSAR式の傾きと切片、および予測区間の計算に必要な統計値の例

QSAR ID	傾き	切片	n	\bar{x}	Σ^{-1}	V_ε	t_{95}
12100241	0.847	-1.270	30	2.188	0.618	0.178	2.05
12101741	0.784	-1.397	25	2.803	0.963	0.033	2.07

3.9 類似度の計算 (参考情報)

Fingerprint を用いることにより、割当てられた QSAR クラスに含まれる物質に対して、予測対象物質との類似度 (ここでは、PubChem fingerprint [24] を用いた Tanimoto 係数) を計算します。KATE2025 に含まれる全物質の Fingerprint は予め計算されています。Fingerprint は、化学物質の情報を表現する固定長のビット列で、各ビットはそれぞれ化学物質の特徴の有無を示しており、1 の場合は化学物質に当該ビットに対応する特徴があること、0 の場合はないことを示しています。

Fingerprintの例: **1001001000000000110010110000101010000110**

QSAR クラスに含まれる物質のビット列 X と予測対象物質の Fingerprint のビット列 Y に対する類似度 T を以下の式により計算します。

$$T = N_c / (N_x + N_y - N_c) \quad \dots (5)$$

ただし、

N_x : X の中で 1 になっているビット数

N_y : Y の中で 1 になっているビット数

N_c : X と Y で共通して 1 になっているビット数

類似度の値は 0 と 1 の範囲を取り、予測対象物質との類似性が高いものほど 1 に近い値を取ります。図 3-6 に類似度計算のイメージを示します。

Fingerprint X:

0	0	0	1	1	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Fingerprint Y:

0	1	0	1	1	0	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---



$$\text{類似度 (Tanimoto係数)} = 3 / (4+5-3) = 0.5$$

図3-6 類似度 (Tanimoto 係数) 計算のイメージ

類似度は QSAR クラスの詳細表示画面 (Verify QSAR 画面) で確認することができます。Verify QSAR 画面については KATE2025 操作マニュアル[†]「6. QSAR クラス情報の詳細表示 (Verify QSAR 画面)」を参照してください。

第4章 適用領域の定義 – OECD (Q)SAR バリデーション原則 3

ここでは、KATE2025の適用領域およびその判定方法について説明します。

4.1 適用領域

KATE2025では、適用領域としてA) 構造の適用領域とB) log Pの適用領域があります。

A) 構造の適用領域

構造の適用領域はQSARクラスごとに設定されており、当該QSARクラスの回帰式に含まれる物質およびlog Pの適用領域内（4.2のBで説明）のサポートケミカルが持つ、構造判定用部分構造リスト（表4-1）によって定義されます。

表4-1 各 QSAR クラスの構造判定用部分構造のリスト（一部のみ）

QSAR ID	構造判定用部分構造のリスト
	...
12100241	5004,5007,5008,5016,5022,5023,5028,5081,5500
22100741	5074, 5075
32100541	5020,5021,5067,5155
	...

部分構造 ID の先頭が 5 で始まるものが構造判定用部分構造として利用されます。部分構造一覧は以下を参照ください。

<https://kate.nies.go.jp/nies/substructures.php>

B) log P の適用領域

各QSARクラスに対して、以下2つのlog P範囲が予め計算されています（表4-2）。

- ・ log P範囲 1：当該QSARクラスの回帰式に含まれる物質のlog Pの最小値と最大値 … ”in”または“out”の判定のために使用
- ・ log P範囲 2：当該QSARクラスに含まれる全物質（回帰式に含まれる物質およびサポートケミカル）のlog Pの最小値と最大値 … ”out(p)”の判定のために使用

log Pの適用領域は、上記のlog P範囲 1によって与えられます。

表4-2 各 QSAR クラスの log P 範囲

QSAR ID	log P範囲 1	log P範囲 2
	...	
12100241	0.09 ~ 4.84	0.09 ~ 4.84
22100741	3.77 ~ 6.17	3.77 ~ 6.89
32100541	1.46 ~ 3.48	1.46 ~ 4.63
	...	

4.2 適用領域の判定方法

KATE2025では、A) 構造に関する判定（構造判定）とB) log Pに関する判定（log P判定）の2つを行います。

A) 構造判定

「構造判定用部分構造」の比較により、予測対象物質の構造が当該QSARクラスの適用領域内であるかどうかについて判定します（図4-1）。判定結果には下記の3つの場合があり、「in」又は「in(p)」の場合に当該QSARクラスを「構造に関して適用領域内」と判定しています。

in : 適用領域内

予測対象物質が持つ「構造判定用部分構造」の全てが、当該 QSAR クラスの「構造判定用部分構造リスト」（表 4-1 参照）に含まれる場合（図 4-1 におけるピンク色の範囲）、または予測対象物質が持つ部分構造に「構造判定用部分構造」が 1 つも含まれていない場合。

in(p) : 条件付き適用領域内

「in」の条件には合致しないが、予測対象物質の「構造判定用部分構造」全てが、当該 QSAR クラスの「構造判定用部分構造リスト」、あるいは Narcotic Group*2 に含まれる物質の「構造判定用部分構造リスト」に含まれる場合（図 4-1 におけるピンク色と黄色の部分）。

out : 適用領域外

「in」と「in(p)」のいずれの条件にも合致しない場合。すなわち、予測対象物質が、当該 QSAR クラスの「構造判定用部分構造リスト」と Narcotic Group クラスが持つ「構造判定用部分構造リスト」に含まれない部分構造を持つ場合（図 4-1 において灰色部分の構造が含まれる場合）。

*2 反応性が低く特異的な生理活性作用に基づかないベースライン毒性（麻酔作用）。KATE2025 では、脂肪族炭化水素、スルホキド、脂肪族・芳香族エーテル、脂肪族・芳香族ケトン、アルコールといった単純な麻酔作用のみで毒性が説明できると考えられる QSAR クラスが予測毒性タイプ毎に用意されており、これらをまとめた QSAR クラスが Narcotic Group として各予測毒性タイプで再定義されています。

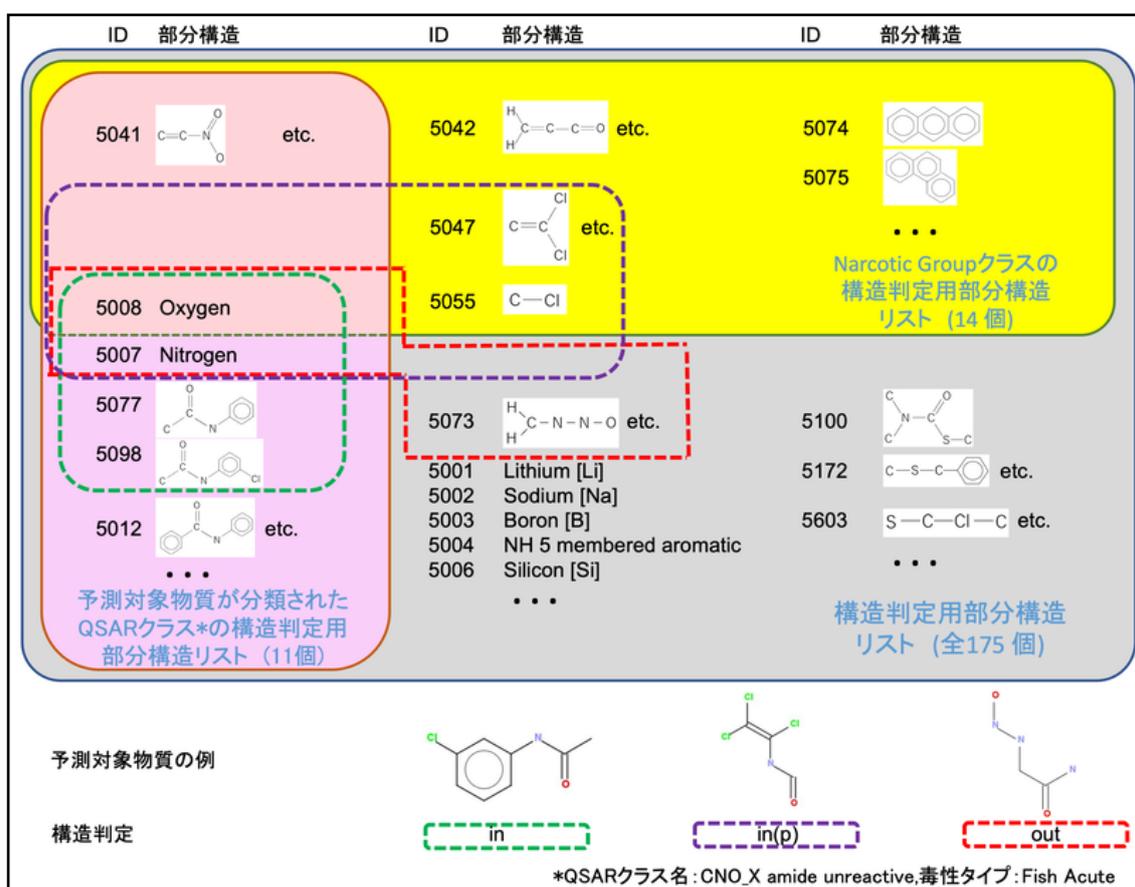


図 4-1 構造判定の例

B) log P判定

予測対象物質のlog P値が当該QSARクラスの回帰式に含まれる物質のlog Pの最小値と最大値（表4-2の当該QSARクラス行の「log P範囲1」欄）の間にあるかどうかで適用領域内かを判定します。なお、KATE2025では、log P>6.0*の物質は全て適用領域外としています。

* ここで閾値として設定した 6.0 は、ECOSAR の多くのクラスにおいて急性毒性予測値のカットオフ値が 5.0（一部は 6.4 に設定）、慢性毒性予測値のカットオフ値が 8.0 に設定されていること、log P と log BCF との線形性の上限（たとえば、Dimitrov et al. SAR QSAR Environ Res., 13, 177-184, 2010 では上限値として 6.1 ~ 6.5）、疎水性の高い (log P > 4) 物質について log P を実測する HPLC 法（OECD Test Guideline 117 で規定）の適用範囲の上限が 6 であること等を総合して設定しました。

in : 適用領域内（図4-2参照）。

out : 適用領域外（図4-3参照）。

out(p) : 適用領域外（図4-4参照）。ただし、予測対象物質の log P 値は当該 QSAR クラスに含まれる全物質（回帰式に含まれる物質およびサポートケミカル）の log P の最小値と最大値（表4-2の当該 QSAR クラス行の「log P 範囲2」）の内側に存在します。

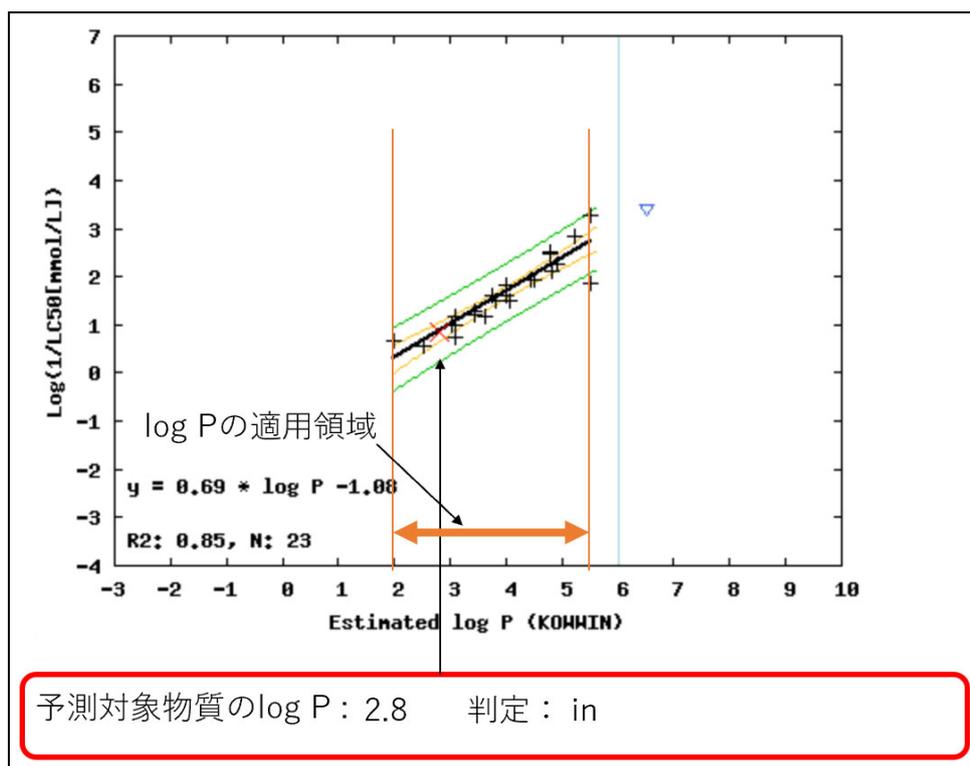
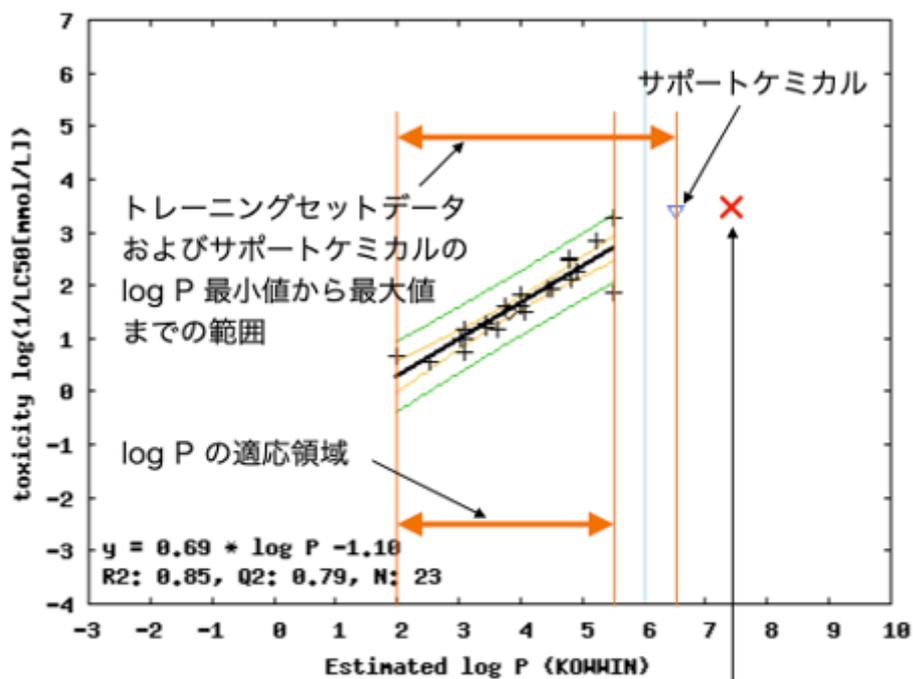
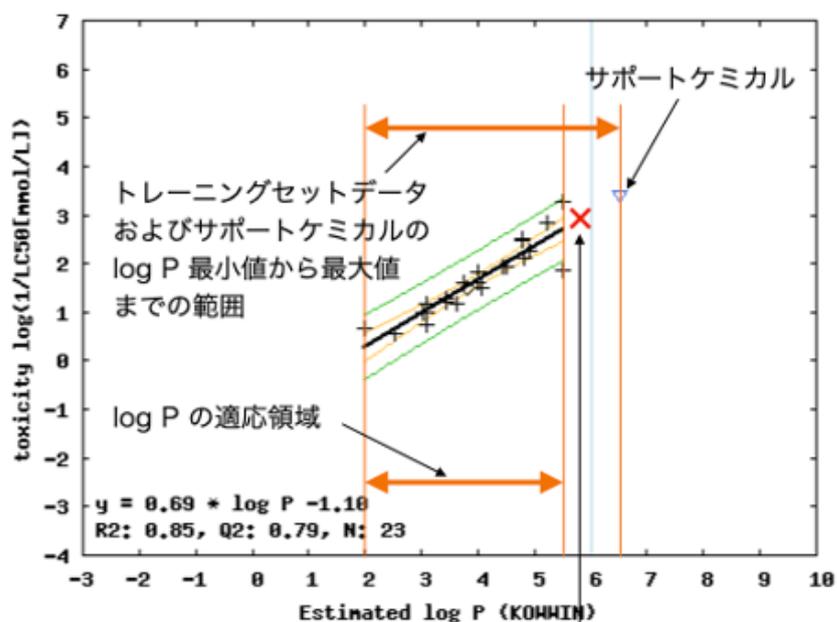


図4-2 log P判定が in の例



予測対象物質の $\log P$: 7.5 判定 : out

図 4 - 3 $\log P$ 判定が out の例



予測対象物質の $\log P$: 5.8 判定 : out(p)

図 4 - 4 $\log P$ 判定が out(p) の例

第5章 バリデーション – OECD (Q)SAR バリデーション原則 4

5.1 内部バリデーション

ここでは、KATE2025のQSARモデルの適合度（モデルが測毒性値の分散をどれくらいよく説明しているか）および頑健性（モデルから一つ以上のデータを取り除いた時の予測の安定性）の評価結果について説明します。

5.1.1 内部バリデーションで使用する指標

内部バリデーションは表 5 – 1 の指標を利用しています。

表 5 – 1 内部バリデーションの指標

指標	説明
R^2	<p>適合度の指標（決定係数）。0から1の間の値を取り、1に近いほど適合度が高い。</p> $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ <p> y_i : i 番目のトレーニングセットデータの実測毒性値 \hat{y}_i : i 番目のトレーニングセットデータの予測毒性値 \bar{y} : トレーニングセットデータの実測毒性値の平均値 n : トレーニングセットデータ数 </p>
Q^2	<p>頑健性の指標（leave-one-out法）。1に近いほど頑健性が高く、負の値を取ることもある。</p> $Q^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,-i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ <p> y_i : i 番目のトレーニングセットデータの実測毒性値 $\hat{y}_{i,-i}$: i 番目のトレーニングセットデータを除いた残りのトレーニングセットデータで構築した回帰式による予測毒性値 \bar{y} : トレーニングセットデータの実測毒性値の平均値 n : トレーニングセットデータ数 </p>

5.1.2 内部バリデーションの結果

内部バリデーションの結果、統計指標の基準（ $R^2 \geq 0.7$ and $Q^2 \geq 0.5$ and $n \geq 5$ ）[25-30]を満たすQSARクラスを表 5 – 2 に示します。KATE2025では、これらのQSARクラスによる予測値がデフォルトの予測結果画面に表示されます。

表5-2 統計値基準を満たすQSARクラス一覧
(同じ生物群、急性/慢性の中ではnの順)

QSARクラス	生物群	急性/慢性	R ²	Q ²	n
narcotic group Fish Acute	魚類	急性	0.87	0.87	152
CNOS_X halogen unreactive	魚類	急性	0.77	0.75	96
phenol unreactive unhindered	魚類	急性	0.88	0.87	58
phenol unreactive unhindered w/o bisphenol, HRAC Ea	魚類	急性	0.87	0.86	57
CO_X alcohol unreactive w/o EO Fish	魚類	急性	0.89	0.88	46
CO_X ether unreactive	魚類	急性	0.87	0.86	44
COns_X ketone unreactive	魚類	急性	0.85	0.83	40
CNOS_X aromatic n unreactive excl. triazine Fish	魚類	急性	0.76	0.74	39
CNO_X ester unreactive	魚類	急性	0.72	0.68	37
phenol unreactive unhindered w/o X	魚類	急性	0.89	0.88	37
Cnos_X heteroaromatic unreactive	魚類	急性	0.84	0.81	30
CNO_X nitro mono unreactive	魚類	急性	0.74	0.70	28
amine primary unreactive NH ₂ =1 aliphatic	魚類	急性	0.84	0.81	26
COns_X ketone unreactive aliphatic	魚類	急性	0.88	0.86	26
C_X hydrocarbon unreactive aliphatic w/ X, excl. Halomethane	魚類	急性	0.87	0.86	24
C_X hydrocarbon unreactive aromatic fused R=0 w/o X	魚類	急性	0.85	0.79	24
amine primary unreactive aromatic w/ NO ₂ ,SO	魚類	急性	0.82	0.79	24
CO_X primary alcohol	魚類	急性	0.92	0.90	22
CNOS_X amine sec,tert w/o n	魚類	急性	0.91	0.89	21
CNO_X amide unreactive	魚類	急性	0.80	0.76	21
C_X hydrocarbon unreactive aliphatic w/o X	魚類	急性	0.73	0.68	21
Cnos_X heteroaromatic unreactive Fish, Daphnid	魚類	急性	0.82	0.78	21
CNOS_X amine aromatic w/ aliphatic carbon	魚類	急性	0.77	0.66	19
CNO_X aldehyde normal aromatic	魚類	急性	0.85	0.81	19
CN_X amine sec,tert unreactive aliphatic	魚類	急性	0.73	0.64	16
CNO_X amine sec,tert unreactive aliphatic	魚類	急性	0.91	0.86	16
CN_X nitrile unreactive	魚類	急性	0.87	0.84	15
COS_X ketone unreactive aromatic	魚類	急性	0.90	0.85	14
amine primary unreactive NH ₂ >1	魚類	急性	0.82	0.75	14
CNOS_X amine primary reactive w/o ortho,para-OH,NH ₂	魚類	急性	0.83	0.76	14
CNOS_X acid unreactive	魚類	急性	0.77	0.63	12
CN_X amine sec,tert unreactive aromatic	魚類	急性	0.84	0.78	12
Cnos_X heteroaromatic reactive Fish	魚類	急性	0.72	0.59	12

QSARクラス	生物群	急性/慢性	R^2	Q^2	n
n+, N+	魚類	急性	0.75	0.61	11
CNOS_X aromatic n reactive excl. nitrile	魚類	急性	0.73	0.53	11
phenol reactive w/o ortho,para-OH,NH2, w/o nitro	魚類	急性	0.75	0.64	10
urea unreactive	魚類	急性	0.95	0.87	9
CNOS_X carbamate unreactive Fish	魚類	急性	0.9	0.68	8
CS_X sulfide unreactive	魚類	急性	0.7	0.59	8
ester reactive methacrylate	魚類	急性	0.76	0.54	8
COS_X methacrylate	魚類	急性	0.87	0.66	7
CN_X nitrile unreactive aliphatic	魚類	急性	0.97	0.95	7
CNOS_X N-hetero unreactive w/o amine, aldoxime, carbamate	魚類	急性	0.79	0.55	6
COS_X thiol	魚類	急性	0.96	0.92	6
CNOSP_X phosphorus unreactive	魚類	急性	0.94	0.87	6
CNOS_X sulfur unreactive w/o thiol	魚類	急性	0.98	0.91	6
CNOS_X amine tert unreactive w/ C=O	魚類	急性	0.88	0.61	5
CO_X alcohol unreactive w/ EO	魚類	急性	0.98	0.97	5
COS_X sulfoxide unreactive	魚類	急性	0.99	0.91	5
phenol unreactive bisphenol	魚類	急性	0.87	0.63	5
C_X hydrocarbon unreactive halomethane	魚類	急性	0.94	0.85	5
narcotic group Daphnid Acute	ミジンコ	急性	0.71	0.70	82
CNOS_X halogen unreactive	ミジンコ	急性	0.86	0.85	46
phenol unreactive unhindered	ミジンコ	急性	0.82	0.78	28
phenol unreactive unhindered w/o bisphenol, HRAC Ea	ミジンコ	急性	0.80	0.76	27
phenol unreactive unhindered w/o X	ミジンコ	急性	0.87	0.83	19
C_X hydrocarbon unreactive aromatic fused R=0 w/o X	ミジンコ	急性	0.80	0.74	17
CNOS_X aromatic n unreactive Daphnid	ミジンコ	急性	0.85	0.82	17
CO_X ether unreactive	ミジンコ	急性	0.83	0.74	15
C_X hydrocarbon unreactive aliphatic w/ X	ミジンコ	急性	0.82	0.77	14
CO_X alcohol unreactive w/o EO Daphnid	ミジンコ	急性	0.78	0.72	14
phenol unreactive hindered	ミジンコ	急性	0.76	0.64	11
Cnos_X heteroaromatic unreactive	ミジンコ	急性	0.94	0.90	11
CNO_X amine sec mono w/o n Daphnid	ミジンコ	急性	0.75	0.58	9
CNO_X ester unreactive Daphnid	ミジンコ	急性	0.93	0.86	8
CNO_X nitro mono unreactive Daphnid	ミジンコ	急性	0.85	0.74	8
C_X hydrocarbon unreactive aliphatic w/ X, excl. gem,vic-Cl,TCE	ミジンコ	急性	0.98	0.97	7
Cnos_X heteroaromatic unreactive Fish, Daphnid	ミジンコ	急性	0.96	0.90	7

QSARクラス	生物群	急性/慢性	R ²	Q ²	n
CNOS_X N-hetero unreactive w/o amine, aldoxime, carbamate	ミジンコ	急性	0.78	0.63	6
CNO_X amide unreactive Daphnid	ミジンコ	急性	0.88	0.70	6
CN_X amine sec,tert unreactive aromatic	ミジンコ	急性	0.97	0.92	6
CN_X amine sec,tert unreactive aliphatic	ミジンコ	急性	0.89	0.64	6
n+, N+	ミジンコ	急性	0.87	0.77	6
CO_X primary alcohol	ミジンコ	急性	0.95	0.76	6
CNO_X imide unreactive	ミジンコ	急性	0.78	0.59	5
ester reactive methacrylate	ミジンコ	急性	0.82	0.60	5
CNOS_X sulfur unreactive w/o thiol	ミジンコ	急性	0.97	0.86	5
narcotic group Alga Acute	藻類	急性	0.76	0.73	51
phenol unreactive unhindered w/o bisphenol, HRAC Ea	藻類	急性	0.80	0.77	26
aromatic n reactive Alga	藻類	急性	0.78	0.72	10
CO_X ether unreactive excl. HRAC Ea Alga	藻類	急性	0.92	0.82	9
CNOS_X sulfur reactive excl. disulfide Alga	藻類	急性	0.86	0.53	8
CO_X alcohol unreactive w/o halogen, acid, EO	藻類	急性	0.95	0.90	6
COS_X thiol	藻類	急性	0.88	0.52	6
CNO_X ester unreactive Alga	藻類	急性	0.94	0.85	6
CO_X primary alcohol	藻類	急性	0.91	0.79	6
C_X hydrocarbon unreactive aliphatic w/ X, excl. Halomethane	藻類	急性	0.97	0.91	5
Cnos_X heteroaromatic excl. pyridine Alga	藻類	急性	0.83	0.52	5
narcotic group Fish Chronic	魚類	慢性	0.82	0.75	12
Cnos_X unreactive Fish Chronic	魚類	慢性	0.76	0.68	12
C_X hydrocarbon unreactive	魚類	慢性	0.78	0.68	11
narcotic group Daphnid Chronic	ミジンコ	慢性	0.78	0.76	70
C_X hydrocarbon unreactive aromatic fused R=0 w/o X	ミジンコ	慢性	0.78	0.71	15
CO_X alcohol unreactive w/o EO Daphnid	ミジンコ	慢性	0.80	0.74	15
CNO_X amine sec,tert unreactive w/ N-Oxide,Nitroso	ミジンコ	慢性	0.81	0.74	15
CO_X ether unreactive	ミジンコ	慢性	0.88	0.76	10
ester unreactive w/o acid	ミジンコ	慢性	0.81	0.69	9
CNO_X ester unreactive Daphnid	ミジンコ	慢性	0.84	0.73	8
CNO_X amide unreactive Daphnid	ミジンコ	慢性	0.83	0.74	8
Cnos_X heteroaromatic unreactive	ミジンコ	慢性	0.83	0.64	7
Cnos_X heteroaromatic unreactive Fish, Daphnid	ミジンコ	慢性	0.83	0.64	7
C_X hydrocarbon unreactive aliphatic w/ X, excl. gem,vic-Cl,TCE	ミジンコ	慢性	0.98	0.97	6
COs_X ketone unreactive	ミジンコ	慢性	0.92	0.59	5

QSARクラス	生物群	急性/慢性	R^2	Q^2	n
phenol unreactive unhindered w/o X, bisphenol, HRAC Ea	藻類	慢性	0.72	0.65	18
CO_X ether unreactive excl. HRAC Ea Alga	藻類	慢性	0.89	0.86	15
CNO_X nitro mono unreactive	藻類	慢性	0.78	0.53	13
aromatic n reactive Alga	藻類	慢性	0.77	0.70	11
CO_X alcohol unreactive w/o halogen, acid, EO	藻類	慢性	0.87	0.81	10
amine primary unreactive NH ₂ >1, Nv ₃ <3	藻類	慢性	0.78	0.70	10
CNOS_X sulfur reactive excl. disulfide Alga	藻類	慢性	0.82	0.66	9
CNOSP_X phosphorus all	藻類	慢性	0.74	0.64	9
ester unreactive w/o acid	藻類	慢性	0.88	0.79	9
CNO_X ester unreactive Alga	藻類	慢性	0.90	0.79	8
COS_X thiol	藻類	慢性	0.85	0.70	7
CNO_X amine sec,tert unreactive aliphatic	藻類	慢性	0.90	0.79	6
CNOS_X sulfur unreactive Alga	藻類	慢性	0.97	0.93	6
CNOSP_X phosphorus unreactive	藻類	慢性	0.95	0.86	5
CNOS_X N-hetero unreactive w/o amine, aldoxime, carbamate	藻類	慢性	0.80	0.57	5

5.2 外部バリデーション

ここでは、外部バリデーションによるKATE2025の予測性能（モデルの開発には使われていない新たなデータをどれくらいよく予測できるか）の評価結果について説明します。

5.2.1 外部バリデーションに用いたデータ（バリデーションセット）

OECD SIDS (Screening Information Data Set) に掲載されている毒性値をバリデーションセットとして利用しました。標準試験期間±24時間から逸脱しているものおよび信頼性（Klimischコード）が3もしくは4のものは除外し、KATE2025のデータには含まれない生物種（ゼブラフィッシュ、イカダモ等）を用いた試験結果は採用しています。また、1物質に複数の試験結果が存在する場合、信頼性が最も高いデータを採用し、信頼性が最も高いデータが複数存在する場合は幾何平均値を取っています。

予測毒性タイプごとのテストセットのデータ数およびKATE2025で適用領域内（構造判定についてはin(p)のものも含める）の予測値が得られた数は表5-3のとおりです。1物質に複数の予測値が得られた場合は、実測値に最も近いもののみを採用しています。

表5-3 テストセットのデータ数および適用領域内の予測値の数

	急性			慢性		
	魚類	ミジンコ	藻類	魚類	ミジンコ	藻類
全データ数	178	196	141	3	46	100
適用領域内の予測値の数	114	117	66	1	32	45

5.2.2 結果

表5-3のデータについて、適用領域内の予測値と実測値の比が1オーダー（1/10から10倍）および2オーダー（1/100から100倍）の範囲に入るデータの数と割合を表5-4に、実測値対予測値のグラフを図5-1に示します。図中の青い点線の内側が1オーダーの範囲、赤い一点鎖線の内側が2オーダーの範囲を示しています。

表5-4 全QSARクラスの予測値と実測値の比が1オーダーおよび2オーダーの範囲に入るデータ数と割合

	急性						慢性					
	魚類		ミジンコ		藻類		魚類		ミジンコ		藻類	
	数	割合	数	割合	数	割合	数	割合	数	割合	数	割合
予測値と実測値の比が1オーダーの範囲に入る	102	89%	96	82%	48	73%	0	0%	25	78%	33	73%
予測値と実測値の比が2オーダーの範囲に入る	112	98%	114	97%	64	97%	1	100%	31	97%	42	93%
適用領域内の予測値	114		117		66		1		32		45	

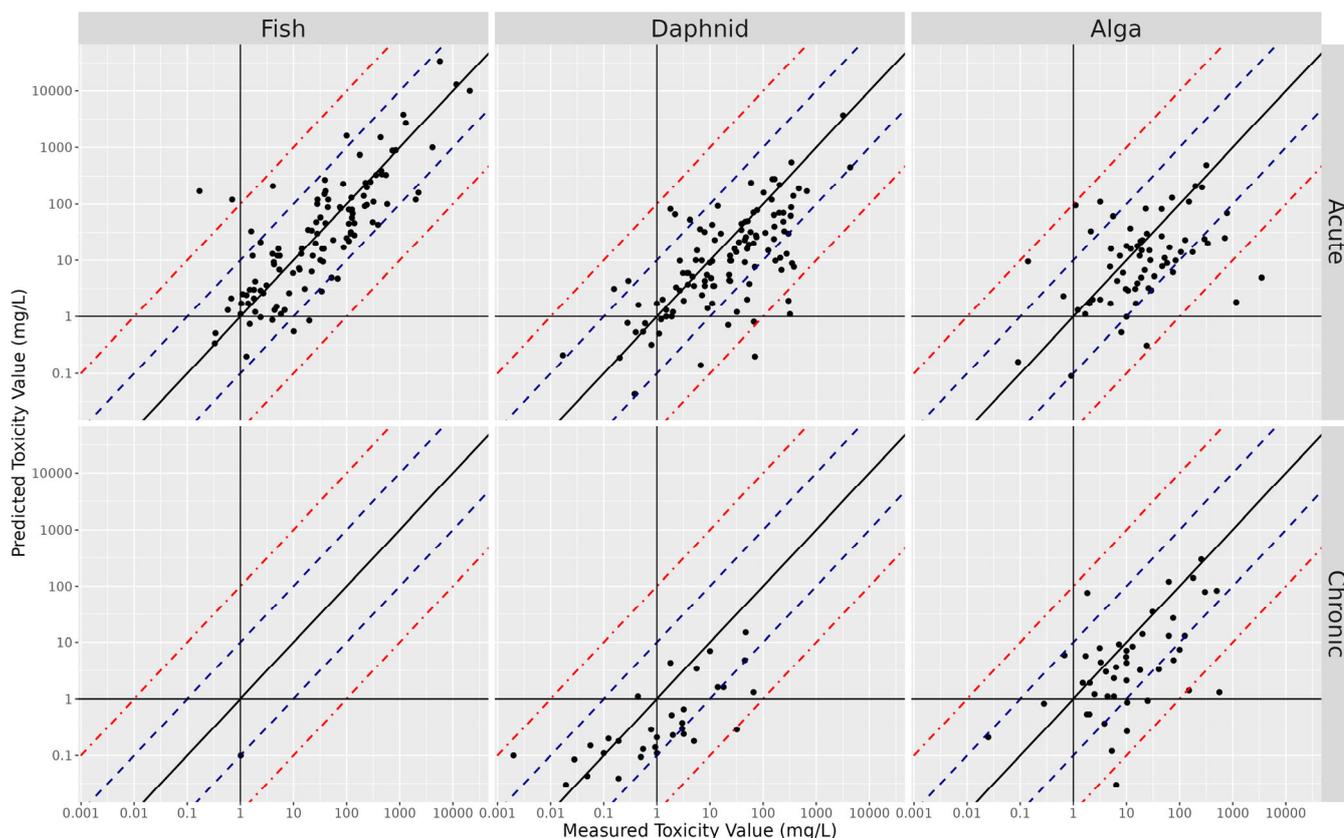


図5-1 全QSARクラスによる実測値対予測値のグラフ

統計指標の基準を満たすQSARクラス（表5-2参照）に関して、適用領域内の予測値の数および実測値と予測値の比が1オーダーおよび2オーダーの範囲に入るデータの数と割合を表5-4に、実測値対予測値のグラフを図5-2に示します。

表5-5 統計指標の基準を満たすQSARクラスの予測値と実測値の比が1オーダーおよび2オーダーの範囲に入るデータ数と割合

	急性						慢性					
	魚類		ミジンコ		藻類		魚類		ミジンコ		藻類	
	数	割合	数	割合	数	割合	数	割合	数	割合	数	割合
予測値と実測値の比が1オーダーの範囲に入る	78	92%	49	82%	15	68%	0	NA	9	90%	9	69%
予測値と実測値の比が2オーダーの範囲に入る	83	98%	58	97%	22	100%	0	NA	10	100%	12	92%
適用領域内の予測値	85		60		22				10		13	

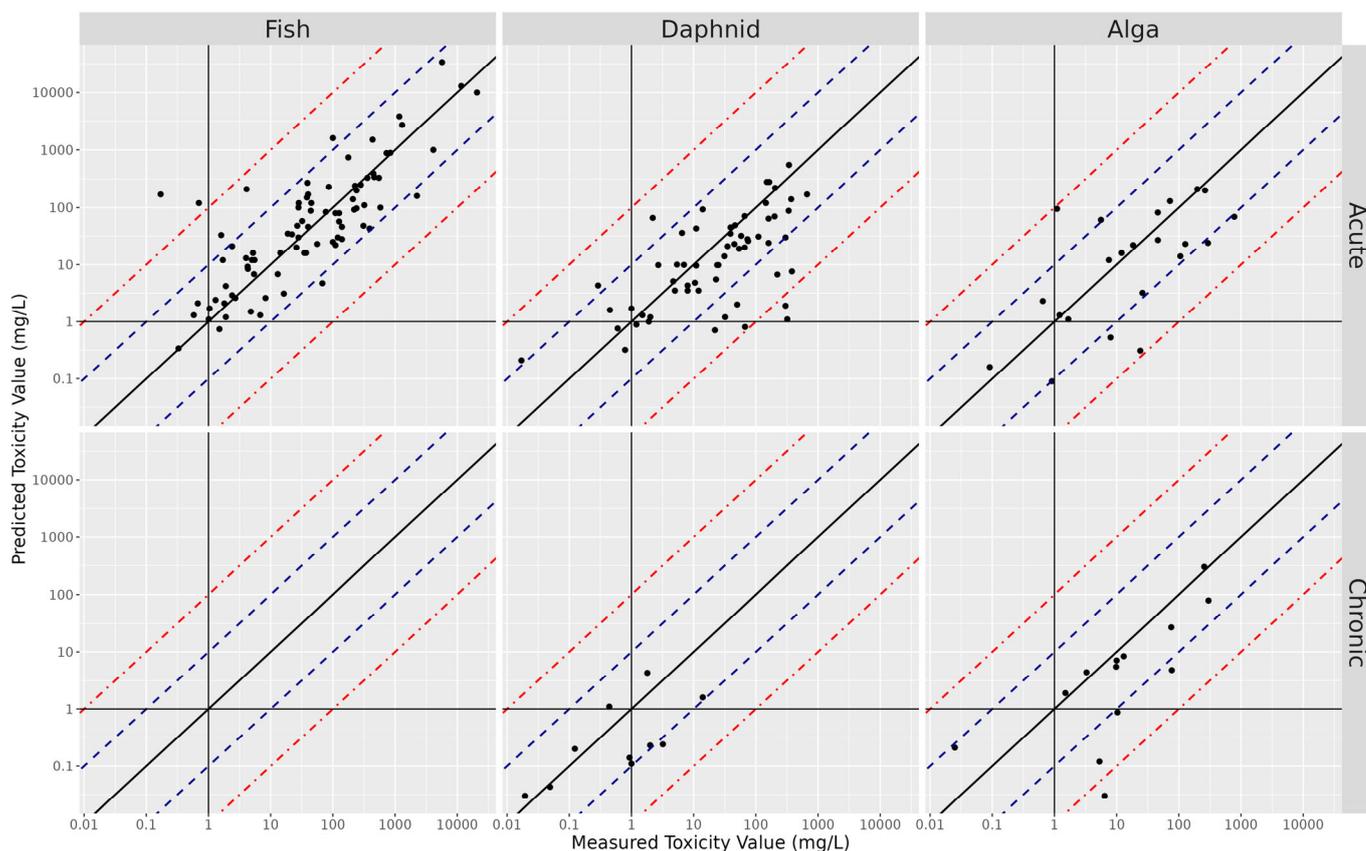


図5-2 統計値基準を満たすQSARクラスによる実測値対予測値のグラフ

第6章 メカニズムに関する解釈 – OECD (Q)SAR バリデーション原則 5

疎水性（細胞膜透過性）と毒性には、両者に対数を取ると線形関係があることが知られており [31]、KATE2025では説明変数をlog P、被説明変数を毒性値（影響濃度）とするQSAR式を構築しています。KATE2025の各QSARクラスは、特徴的な構造を持つ化学物質で構成されており、構造を特徴づける「構造クラス」は部分構造の種類と数により定義されています（15ページ 3章 3.5 参照）。反応性が高いと考えられる部分構造を持つ物質はReactiveな構造クラスに分類し、非特異的で高い反応性によって毒性を発現すると考えられます。そのような部分構造を持たない場合は反応性が低いと考えられ、Unreactiveな構造クラスに分類します [32]。一部の構造クラスには、特異的なメカニズムによって毒性を発現する部分構造が含まれます。構造クラスおよび部分構造の一覧については下記を参照してください。

構造クラス一覧：https://kate.nies.go.jp/nies/structure_classes.php

部分構造一覧：<https://kate.nies.go.jp/nies/substructures.php>

参考文献

- [1] <https://cdk.github.io/>
- [2] <https://www.epa.gov/tsca-screening-tools/epi-suite-tm-estimation-program-interface>
- [3] <http://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&serial=295>
- [4] [https://www.env.go.jp/chemi/report/y052-\[24\]/1_ref2 terms.pdf](https://www.env.go.jp/chemi/report/y052-[24]/1_ref2 terms.pdf)
- [5] <https://www.daylight.com/dayhtml/doc/theory/theory.smarts.html>
- [6] <http://www.daylight.com/smiles/index.html>
- [7] OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Test No. 203: Fish, Acute Toxicity Test
(https://www.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-203-fish-acute-toxicity-test_9789264069961-en)
- [8] OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Test No. 210: Fish, Early-life Stage Toxicity Test
(https://www.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-210-fish-early-life-stage-toxicity-test_9789264203785-en)
- [9] OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Test No. 202: Daphnia sp. Acute Immobilisation Test
(https://www.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-202-daphnia-sp-acute-immobilisation-test_9789264069947-en)
- [10] OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Test No. 211: Daphnia magna Reproduction Test
(https://www.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-211-daphnia-magna-reproduction-test_9789264185203-en)
- [11] OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Test No. 201: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test
(https://www.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-201-alga-growth-inhibition-test_9789264069923-en)
- [12] <http://www.env.go.jp/chemi/sesaku/01.html>
- [13] https://archive.epa.gov/med/med_archive_03/web/html/fathead_minnow.html
- [14] Guidance Document on the Validation of (Quantitative) Structure-Activity Relationship [(Q)SAR] Models, 2007 (<https://www.oecd.org/env/guidance-document-on-the-validation-of-quantitative-structure-activity-relationship-q-sar-models-9789264085442-en.htm>)
- [15] <https://openbabel.org/>
- [16] <https://jsme-editor.github.io/>
(上記URLはすべて2025年3月1日アクセス)
- [17] Bienfait B, Ertl P (2013) JSME: a free molecule editor in JavaScript. *J Cheminform* 5(24). doi:10.1186/1758-2946-5-24
- [18] Willighagen E.L., Mayfield J.W., Alvarsson J, *et al* (2017) The Chemistry Development Kit (CDK) v2.0: atom typing, depiction, molecular formulas, and substructure searching. *J Cheminform* 9(33). doi:10.1186/s13321-017-0220-4
- [19] May J.W., Steinbeck C (2014) Efficient ring perception for the Chemistry Development Kit. *J Cheminform*, 6(3). doi:10.1186/1758-2946-6-3
- [20] Steinbeck C, Hoppe C, Kuhn S, Floris M, Guha R and Willighagen E.L. (2006) Recent

- Developments of the Chemistry Development Kit (CDK) - An Open-Source Java Library for Chemo- and Bioinformatics, *Curr. Pharm. Des.*, 12(17), 2111-2120. doi:10.2174/138161206777585274
- [21] Steinbeck C, Han Y, Kuhn. S, Horlacher. O, Luttmann. E, and Willighagen E.L. (2003) The Chemistry Development Kit (CDK): An open-source Java library for chemo- and bioinformatics, *J. Chem. Inf. Comput. Sci.* 43(2), 493-500. doi:10.1021/ci025584y
- [22] Aptula A.O., Patlewicz G, Roberts D.W. (2005) Skin sensitization: Reaction mechanistic applicability domains for structure–activity relationships, *Chem. Res. Toxicol.* 18(9), 1420–1426. doi:10.1021/tx050075m
- [23] Furuhashi A, Hasunuma K, Aoki Y, Yoshioka Y, Shiraishi H (2011) Application of chemical reaction mechanistic domains to an ecotoxicity QSAR model, the KAshinhou Tool for Ecotoxicity (KATE), *SAR QSAR Environ Res.*, 22(5-6), 505-523. doi:10.1080/1062936X.2011.569944
- [24] <https://cdk.github.io/cdk/1.5/docs/api/org/openscience/cdk/fingerprint/PubchemFingerprinter.html> (2025年3月1日アクセス)
- [25] Golbraikh A, Tropsha A (2002) Beware of q²! *J. Mol. Graph. Model.* 20(4), 269–276. doi:10.1016/s1093-3263(01)00123-1
- [26] Eriksson L, Jaworska J, Worth A.P., Cronin M.T.D., McDowell R.M. (2003) Methods for Reliability and Uncertainty Assessment and for Applicability Evaluations of Classification- and Regression-Based QSARs, *Environ. Health Perspect.* 111(10), 1361-1375. doi:10.1289/ehp.5758
- [27] Tropsha A, Gramatica P (2003) The Importance of Being Earnest: Validation is the Absolute Essential for Successful Application and Interpretation of QSPR Models, *QSAR Comb. Sci.* 22(1), 69-77. doi:10.1002/qsar.200390007
- [28] ECHA (2016) Practical guide How to use and report (Q)SARs 3.1.
- [29] Posthumus P, Slooff W (2001) RIVM report, Implementation of QSAR in ecotoxicological risk assessments
- [30] Alexander D.L.J, Tropsha A (2015) Beware of R²: simple, unambiguous assessment of the prediction accuracy of QSAR and QSPR models, *J. Chem. Inf. Model.* 55(7), 1316–1322. doi:10.1021/acs.jcim.5b00206
- [31] Hansch C, Dunn W.J. (1972) Linear Relationships between Lipophilic Character and Biological Activity of Drugs, *J Pharm Sci.*, 61(1), 1-19. doi:10.1002/jps.2600610102
- [32] Verhaar H.J.M., van Leeuwen C.J., Hermens J.L.M. (1992) Classifying environmental pollutants, *Chemosphere*, 25(4), 471-491. doi:10.1016/0045-6535(92)90280-5