

# 事業者の自主管理に資する確率論を援用した ヒト曝露評価モデルの開発

本研究は、新LRI第1期の助成を得て実施された。記して謝意を表する。

大阪大学大学院工学研究科  
環境・エネルギー工学専攻  
環境マネジメント学領域  
○東海 明宏\*・山口治子

\*工学研究科附属サステイナビリティ デザインオンサイトセンター・センター長

# 講演内容

1. 研究PJの概要
2. 新LRI 第1期の成果
3. おわりに

# リスク評価の局面

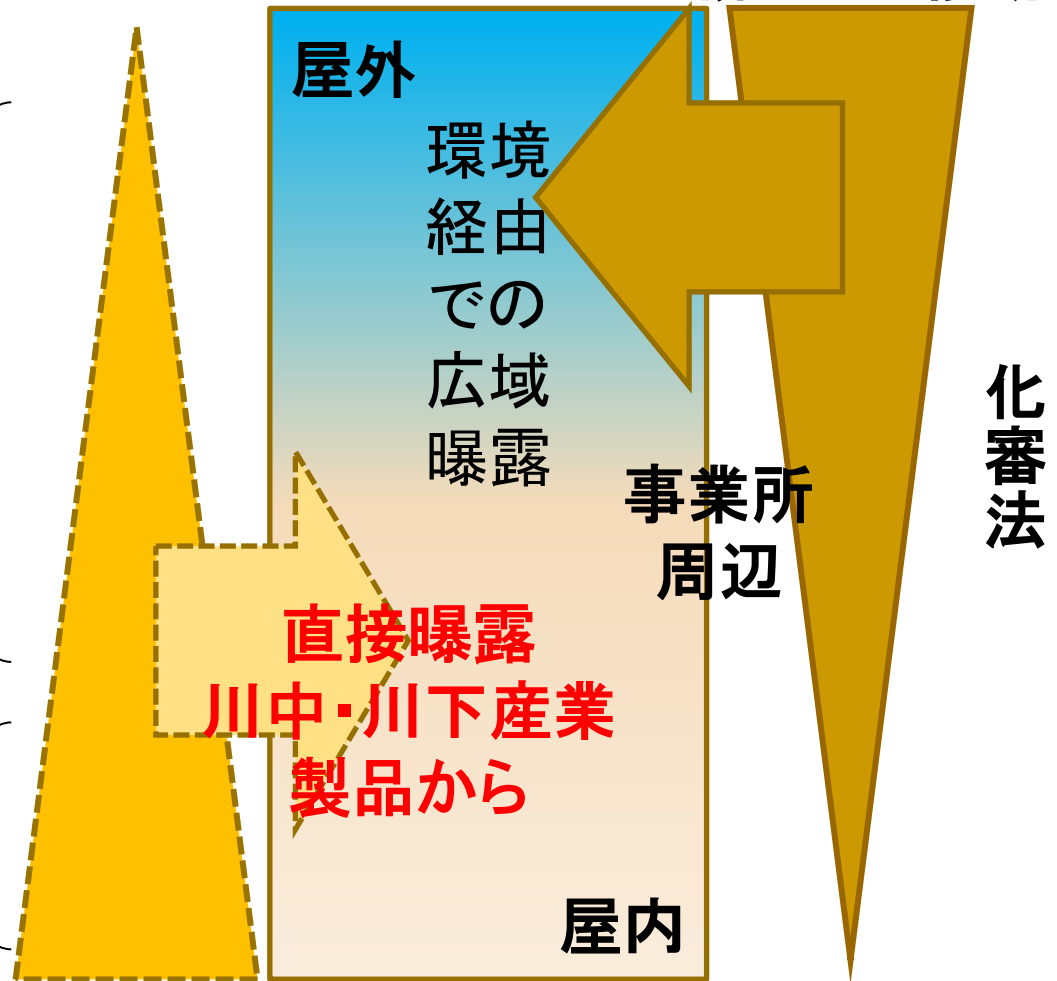
ライフステージを通じた化学物質管理

メーカー側の自主的管理

消費者側のリスク選択

ストック由来

化管法  
排出量・移動量



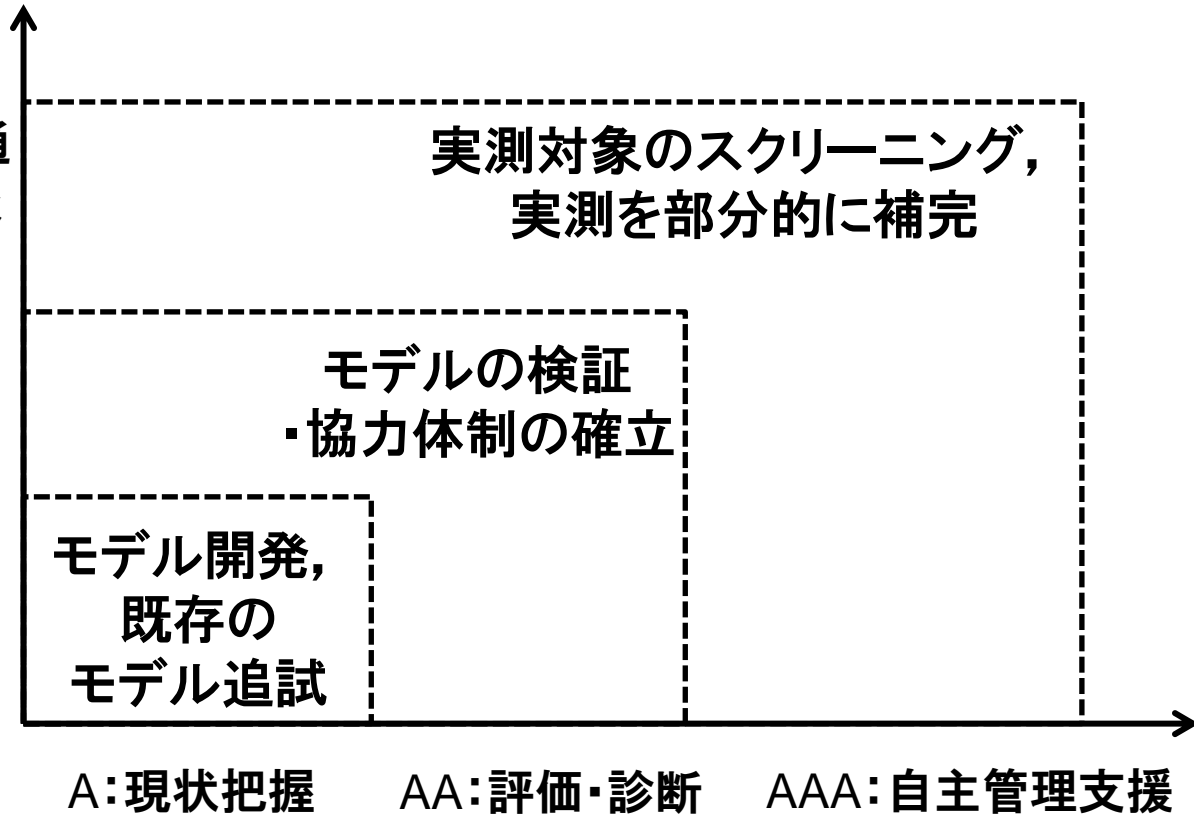
# リスク評価において何が必要か

関係者の協働・知見の集積レベル

Ⅲ：国内関係者の協働を通じた基盤情報の活用

Ⅱ：国内；個別目的下での調査結果の活用

Ⅰ：公表データの活用



リスク評価の段階

# 研究開発戦略

## Screening analysis :

限られたデータを有効に利用することで  
可能となる方法



## Object specific analysis :

特定の物質への対策を検討するために  
必要な詳細解析

# 中心コンセプト:「3種類の知見の統合」

## モデル

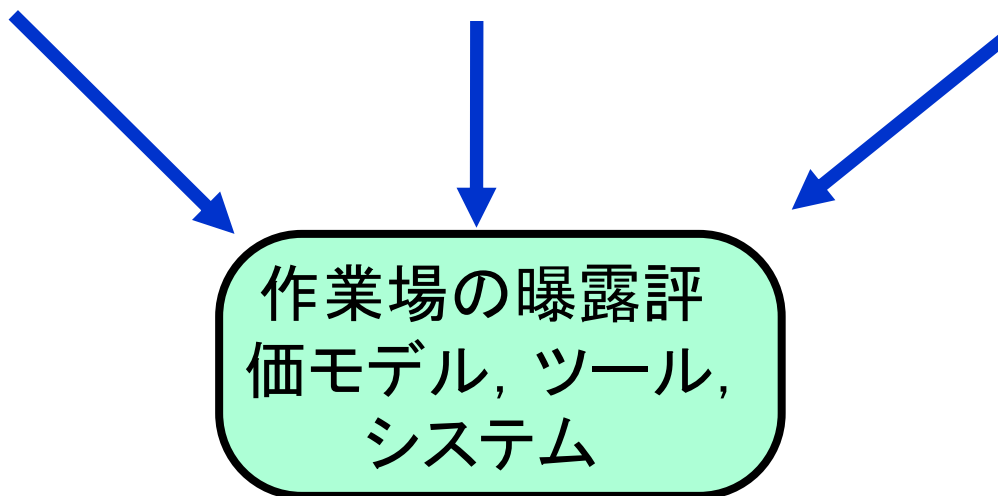
- ・労働環境曝露モデル, 完全混合モデル
- ・ベイズ統計手法

## 観測値

労働環境での測定値  
(作業場, 作業者の  
生体試料)

## 経験的知見

現場の経験・専門  
家の知見



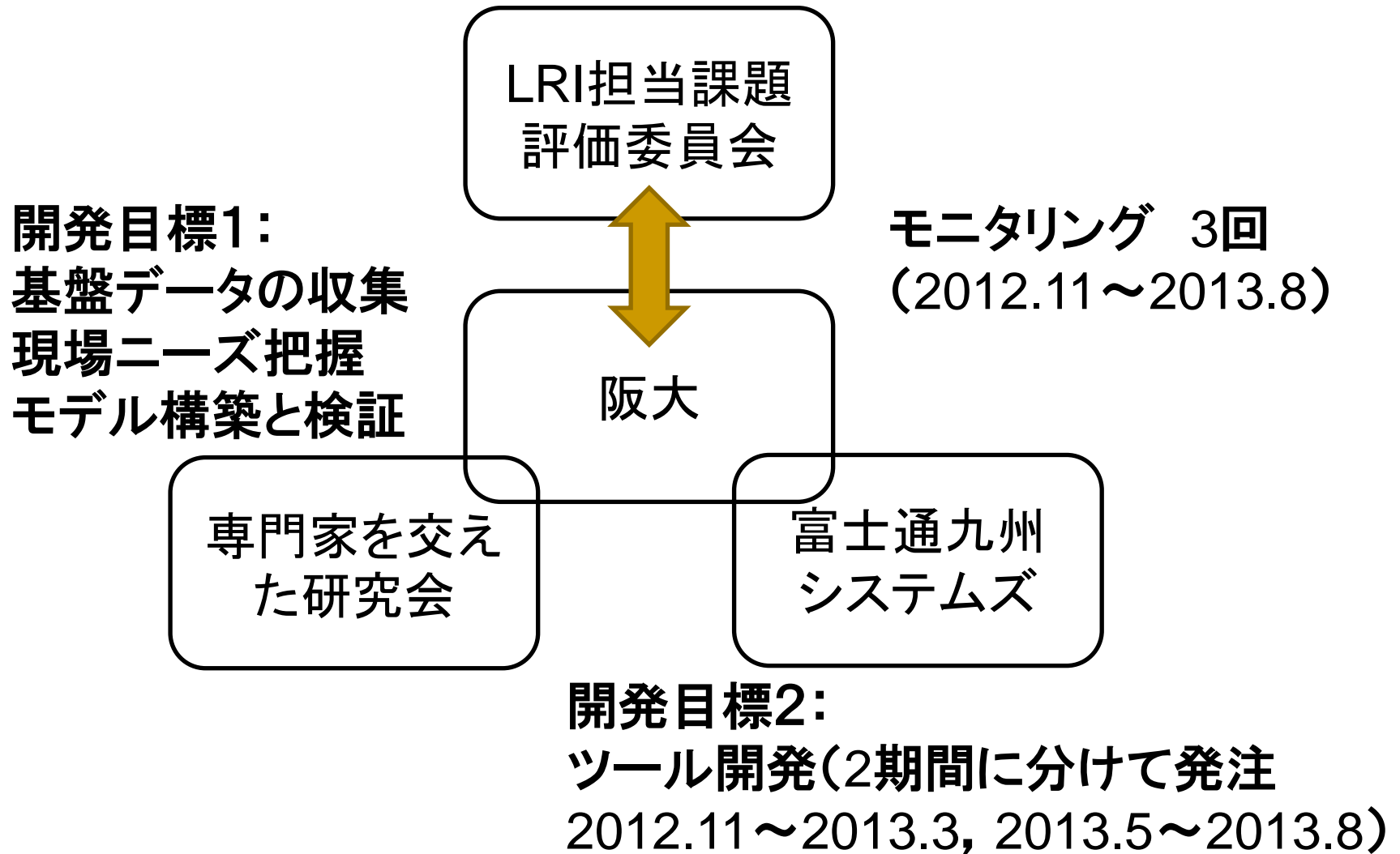
# 本研究の目的と達成目標

そこで、本研究では、労働環境に焦点をあて、自主管理を支援するための確率論的曝露評価モデルを開発することを目的とした。具体的な開発目標は次のとおり。

**目標1: 確率論的労働曝露評価モデルの構築**  
欧州で開発がすすめられているAdvanced REACH Tool (ART)を参考に、プロトタイプモデルを構築し、日本国内でのデータで検証し、適用性について検討すること。

**目標2: 上記のプロトタイプモデルを多様な作業場での利用を念頭におきツールとして開発すること。** integrated Score-based Workplace Exposure Estimating system, SWEEs.

# PJ推進における役割分担





# ARTの開発目的とコンセプト

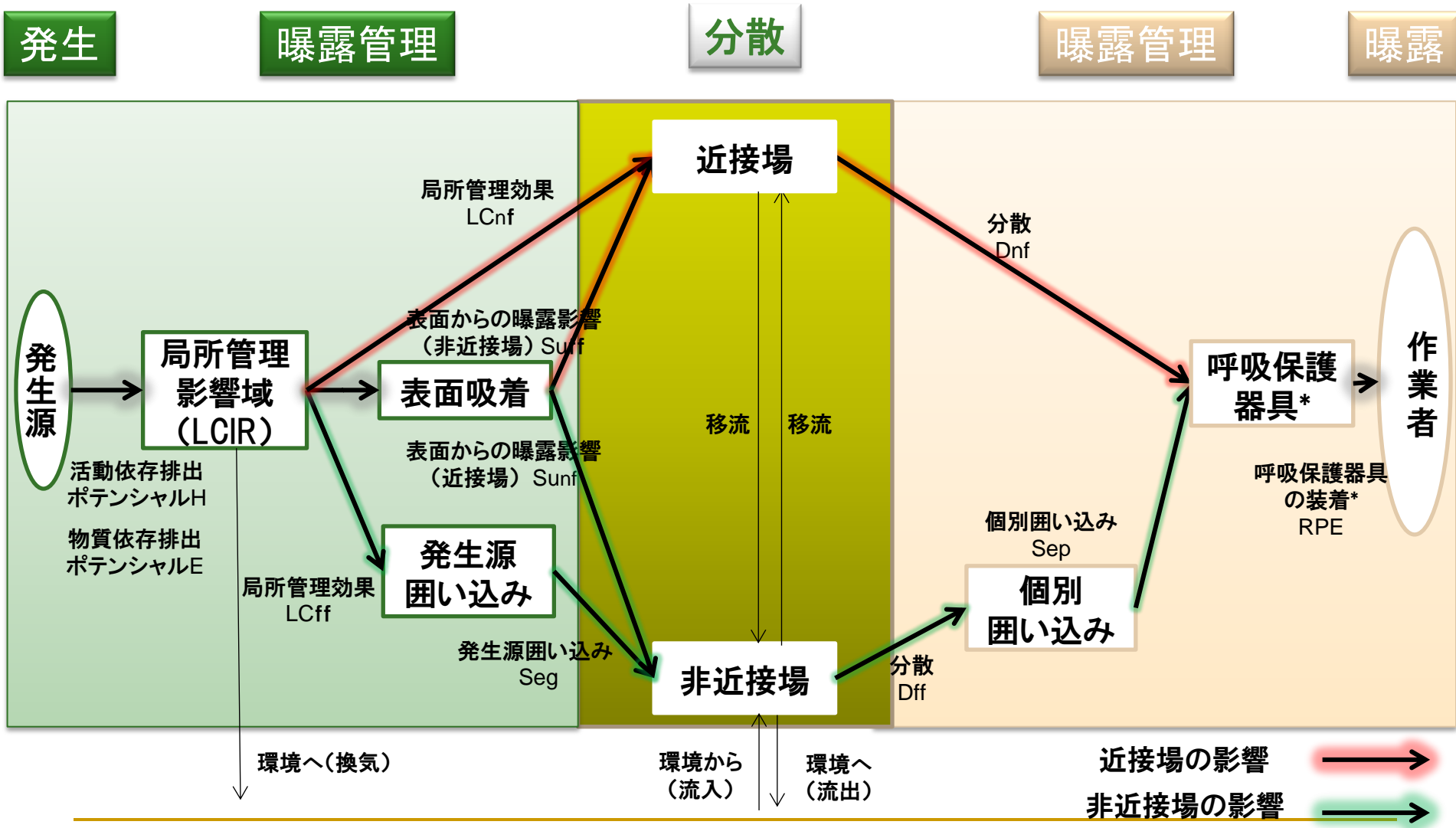
## ■ 開発目的

- 確率論的に推定を行う曝露解析ツール。REACHへの対応。(Fransman et al. 2010)

## ■ 技術的特徴

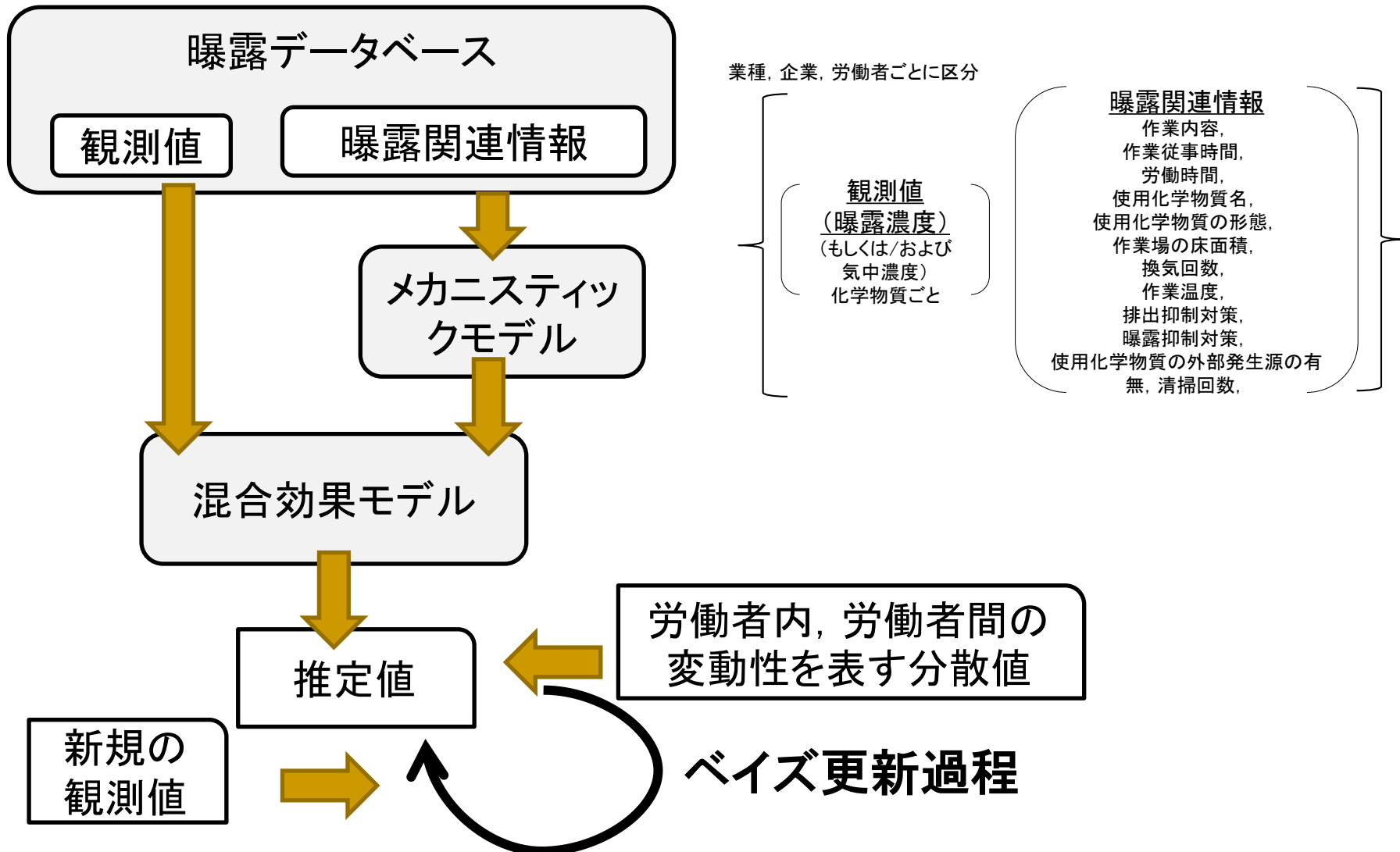
- 作業場での化学物質の放散，希釈拡散に関する知見，曝露態様に関する知見と作業場での化学物質濃度測定値を活用した回帰分析に基づく。
- ベイズ統計解析を援用する。

# 物質挙動の概念モデル



\*ART version1.0には組み込まれていない

# ARTにおける入出力構造



# メカニスティックモデル

## ■ 個人の全曝露量 $C_t$

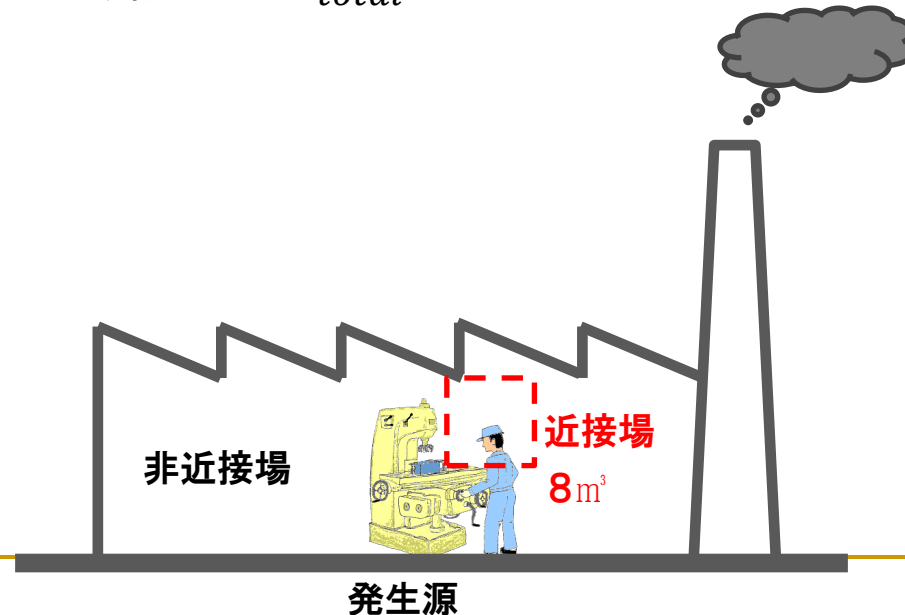
$$C_t = \frac{1}{t_{total}} \sum_{tasks} \{ t_{exposure} \times (C_{nf} + C_{ff} + Su) \}$$

$C_{nf}$ : 近接場での個人曝露量

$C_{ff}$ : 非近接場での個人曝露量

ここで,  $Su$ は, 表面汚染レベルを示す

$t_{exposure}$ は, 曝露時間,  $t_{total}$ は, 全作業時間を示す



## ◆メカニスティックモデル(つづき)

近接場での個人曝露量 $C_{nf}$

$$C_{nf} = (E_{nf} \times H_{nf} \times LC_{nf1} \times LC_{nf2}) \times D_{nf}$$

$E_{nf}$ : 物質依存排出ポテンシャル(近接場)にかかわる修正係数

$H_{nf}$ : 活動依存排出ポテンシャル(近接場)にかかわる修正係数

$LC_{nf1}$ : 一つ目の局所管理(近接場)にかかわる修正係数

$LC_{nf2}$ : 同時に2つの局所管理を用いている場合, 2つ目の局所管理(近接場)にかかわる修正係数

$D_{nf}$ : 希釈(近接場)にかかわる修正係数

非近接場においても, 同様な考え方で定義。 $C_{ff}$

# 修正係数の割り当て根拠

修正係数	記号	情報発生源
物質依存排出ポテンシャル	E	化学物質の物理化学的特性
活動依存排出ポテンシャル	H	Calibrationに用いた曝露データ, 文脈情報, および, 専門家の判断
局所管理	LC	ECEL データベース*, 専門家の意見を集約するためのワークショップ
発生源囲い込み (segregation)	Seg	ECEL データベース*, 専門家の判断
個人の囲い込み (separation)	Sep	ECEL データベース*, 専門家の判断
表面汚染	Su	専門家の判断
分散 (dispersion)	D	2媒体ボックスモデルによるシミュレーション

\*ECEL データベース (Exposure Control Efficacy Library) は, 吸入曝露管理対策の有効性を集約したエビデンスデータベースである。労働衛生に関わる主要な学術誌4誌 (Annals of Occupational Hygiene, American Industrial Hygiene Association Journal, Applied Occupational and Environmental Hygiene, Journal of Occupational and Environmental Hygiene) から90の査読付き文献を選び出し, その文献から433個のデータを抽出して行われた曝露管理対策の有効性評価が集約されている (Fransman et al. 2008)。

# 混合効果モデル

企業，施設，作業内容，作業者間の変動を考慮

$$\ln(Y_{ijk}) = \ln(\alpha) + \ln(C_t) + \delta_i + c_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$Y_{ij}$  :  $i$ 番目のシナリオ， $j$ 番目の企業内の， $k$ 番目の測定における曝露レベル

$\ln(\alpha)$  : 切片

$\delta_i$  :  $i$ 番目のシナリオのランダム効果

$c_{ij}$  :  $i$ 番目のシナリオの $j$ 番目の企業のランダム効果

$\varepsilon_{ijk}$  : 残差誤差

※欧州の開発グループでは，測定値：2056(うち蒸気態で，528のデータ)を使い， $\ln(\alpha)=10.56$ と推定。

# 講演内容

## 1. 研究PJの概要

## 2. 新LRI 第1期の成果

### ○目標1:

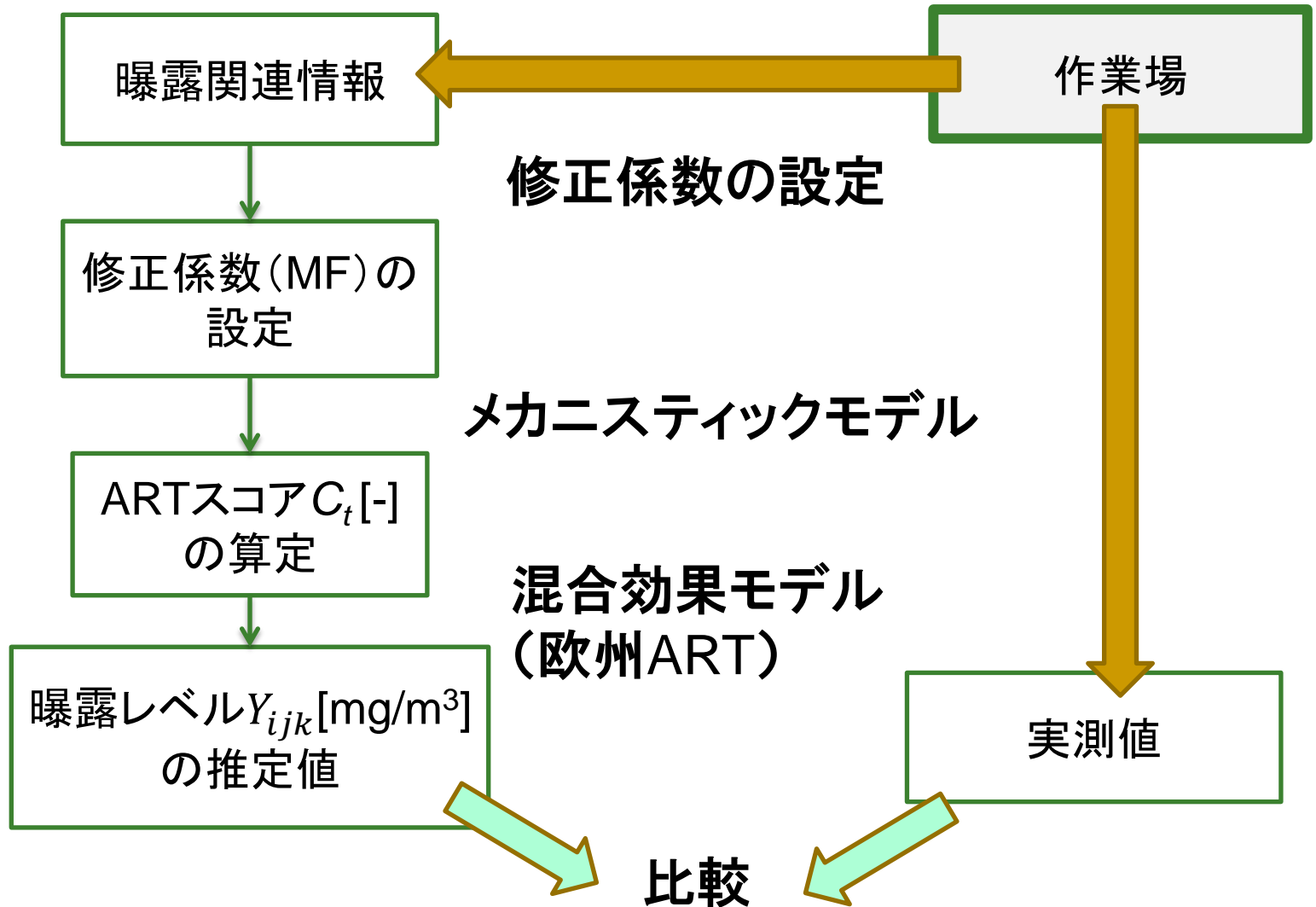
- ・日本の作業現場への適用を通じた検証
- ・印刷工場におけるトルエン曝露への適用

### ○目標2: ツール開発

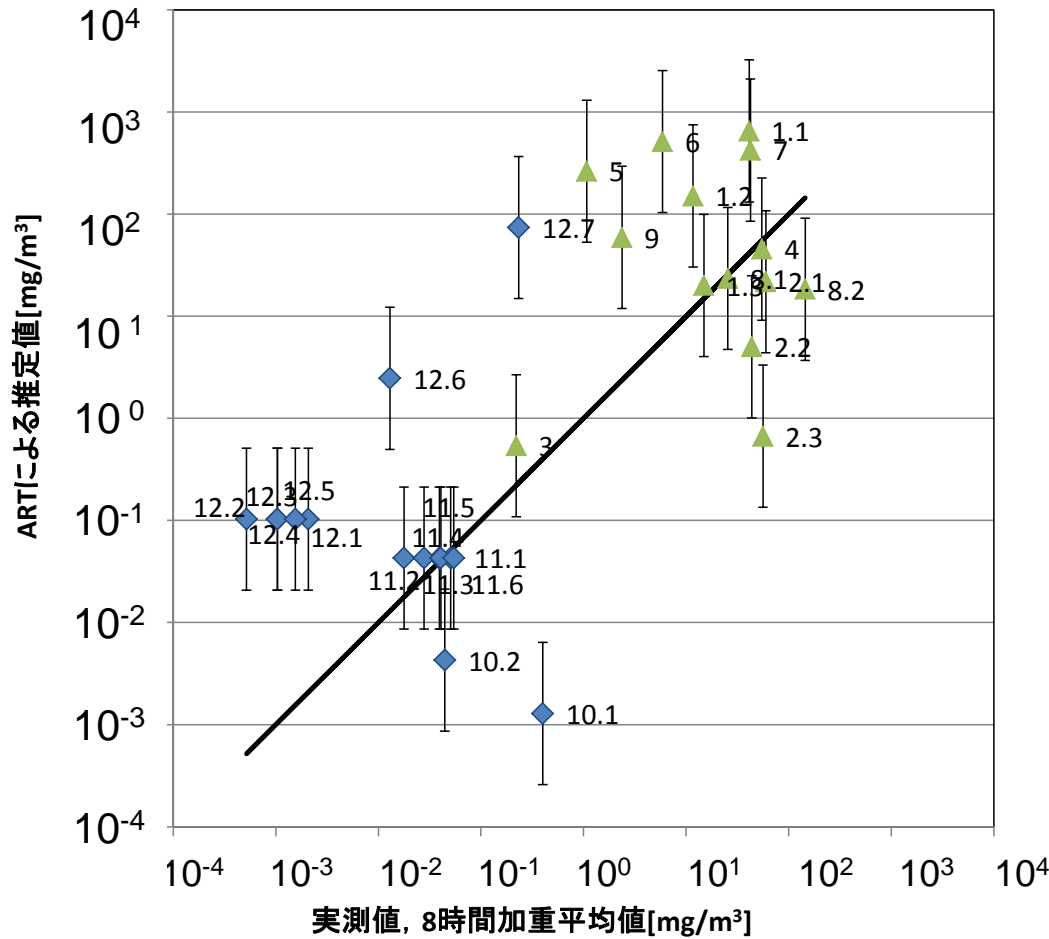
## 3. おわりに



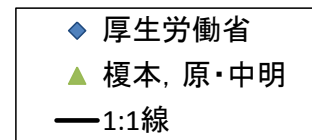
# 日本の作業現場に適用



# 検証結果



欧州ART  
 $\ln(\alpha) = 10.56$



# 作業環境測定値を用いた検証

作業環境測定の期間：平成11年9月から平成11年12月

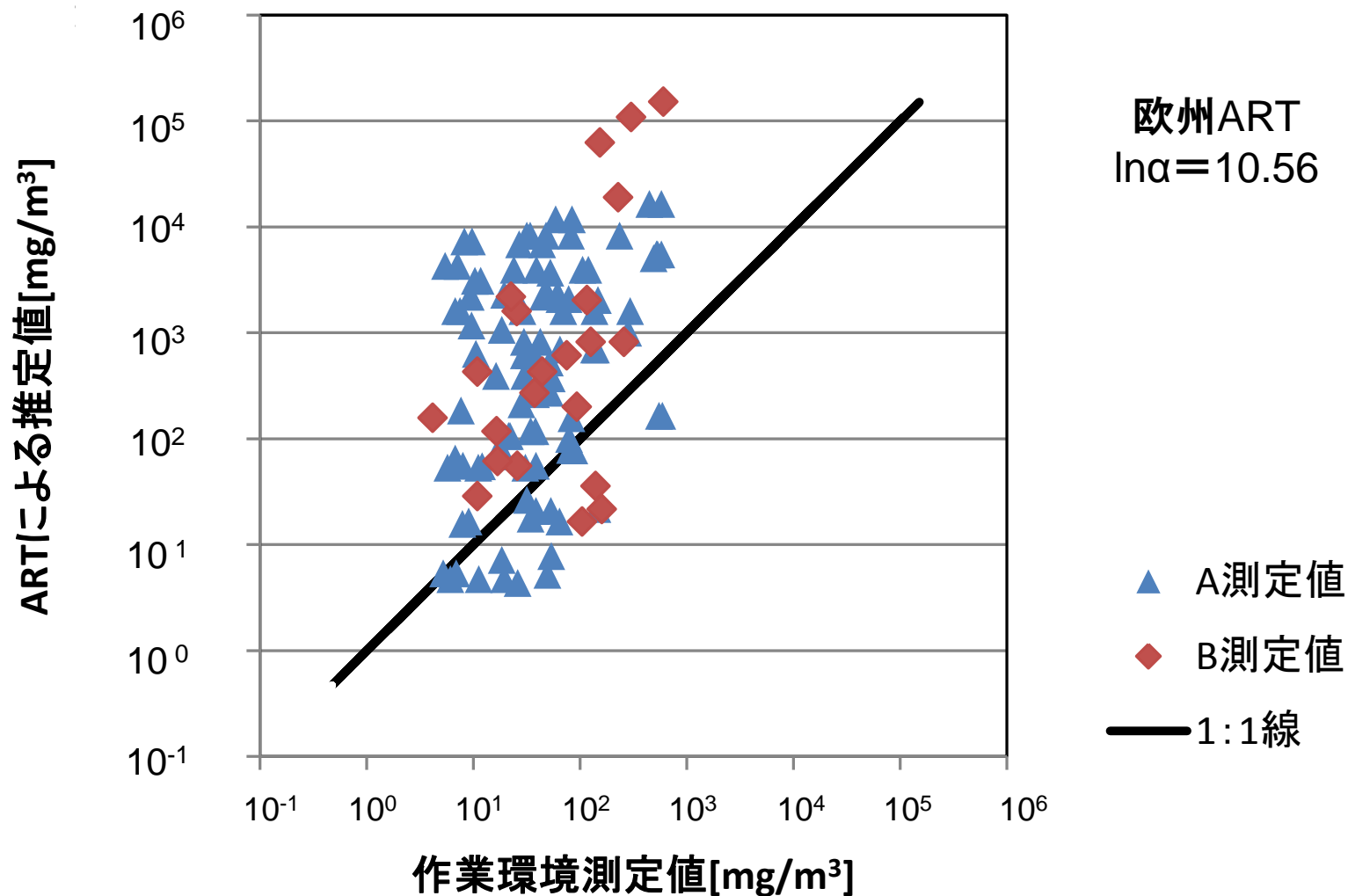
実施主体：愛知産業保健推進センター

調査対象：愛知県下の自動車製造業の関連事業所

調査測定項目：有機溶剤の気中濃度（A測定値とB測定値）と曝露濃度，および，環境設備の稼働状況。使用有機溶剤はすべて労働安全衛生法有機溶剤中毒予防規則の第1～第2種有機溶剤に指定されている物質。

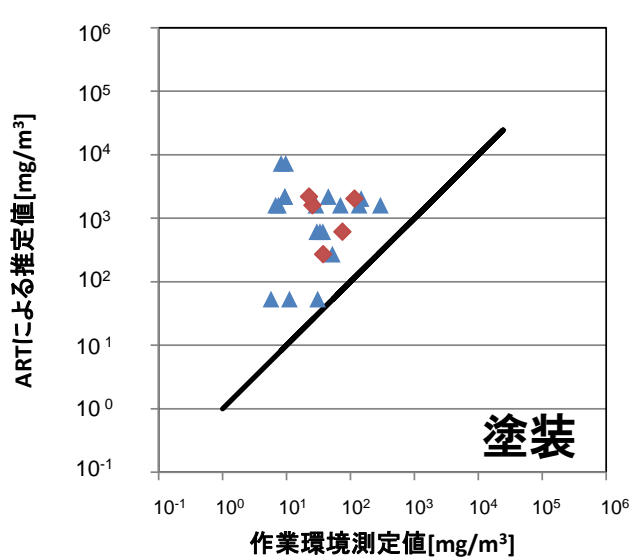
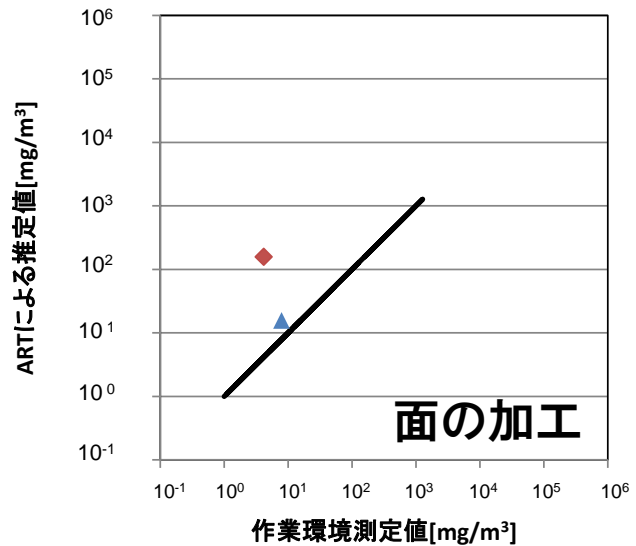
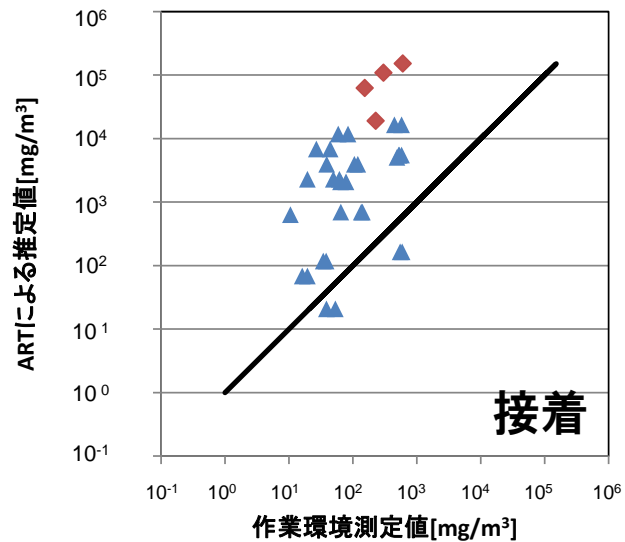
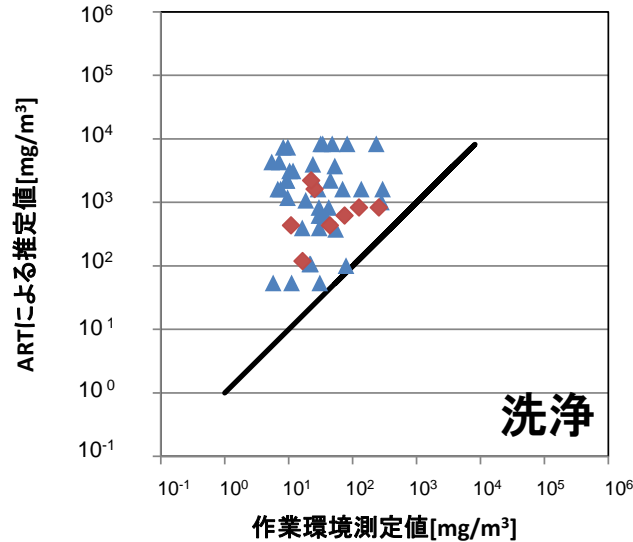
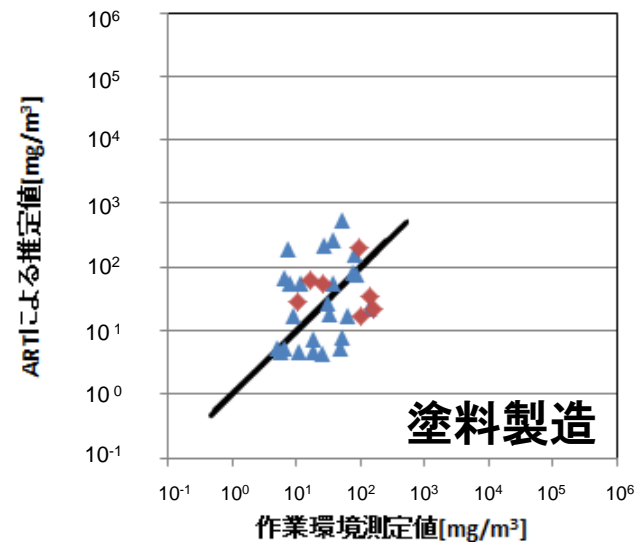
業務内容：塗装製造，洗浄，接着，面の加工，塗装。

# 作業環境測定値を用いた検証 ～結果



データ元:愛知産業保健推進センター(2000)

# ◆業務別(つづき, 作業環境測定値による検証)



欧州ART  
 $\ln\alpha = 10.56$

▲ A測定値  
 ◆ B測定値  
 — 1:1線

# まとめ

- 欧州のARTで導出されたモデルを援用し、日本国内事例として収集できた29個のデータに適用したが、欧州のグループが実現した±1オーダー程度の範囲内に収めることを実現するには至ってはいない。
- 作業環境測定値を利用し、業務別に検証を行ったところ、限られた測定数であることから既存研究並みの検証結果はえられてはいない。
- 傾向を再現できつつあるものの、実用にむけた優先度の高いタスクとしては、作業場における実測値と曝露関連情報が対になったデータの充実にある。

# 講演内容

## 1. 研究PJの概要

## 2. 新LRI 第1期の成果

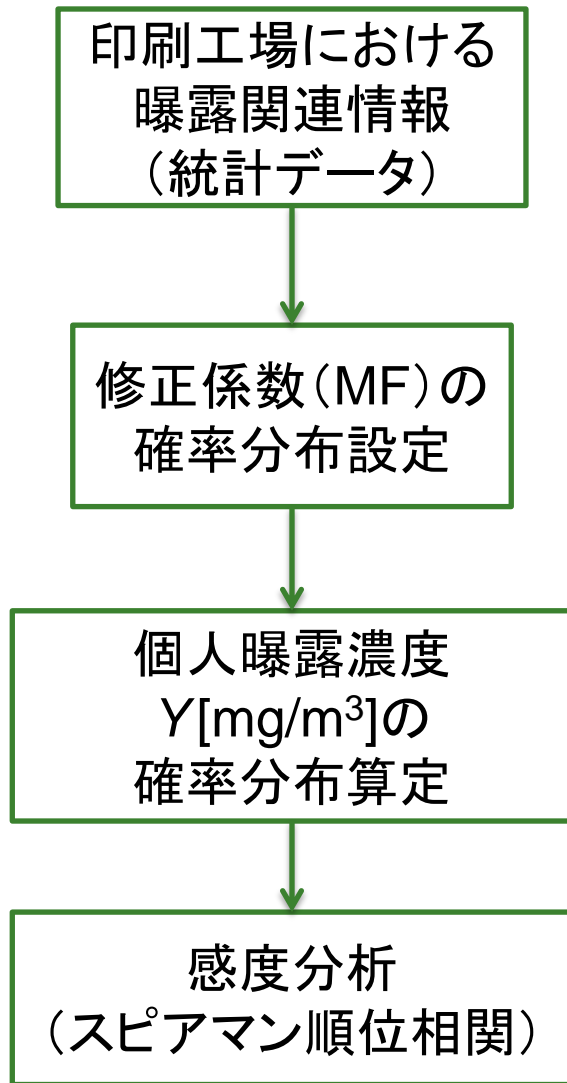
### ○目標1:

- ・日本の作業現場への適用を通じた検証
- ・印刷工場におけるトルエン曝露への適用

### ○目標2: ツール開発

## 3. おわりに

# 修正係数を確率分布で設定し、感度を評価する



## □使用したデータ

**物質依存E**: 5種類の印刷インキのトルエン含有率(経済産業省・(社)産業環境管理協会)

**活動依存H**: タスクごとの曝露濃度の実測値(EUリスク評価書, 25タスク, N=10~335)

**局所管理LC**: 印刷機器の生産台数, 輸出台数より推定。

耐用年数は10年と15年と仮定。

**分散・希釈D**: 事業所規模別印刷機台数により工場敷地面積を推定。工場の高さ5m, 換気回数10ACHとした。トルエンの実測値: N=20, 測定値下限8[ppm], 測定値上限273[ppm](熊谷ら 1992)

## □@Riskを併用





# 条件設定の流れ

印刷作業工程

その他

後処理

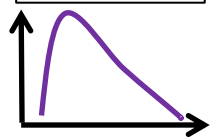
印刷

シリンダー調整

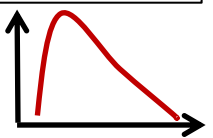
前処理

<設定条件>

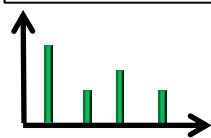
物質依存E



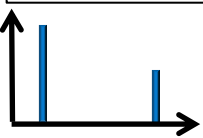
活動依存H



分散・希釈D



局所管理LC



ARTIにおける修正係数

前処理の作業従事時間



作業従事時間

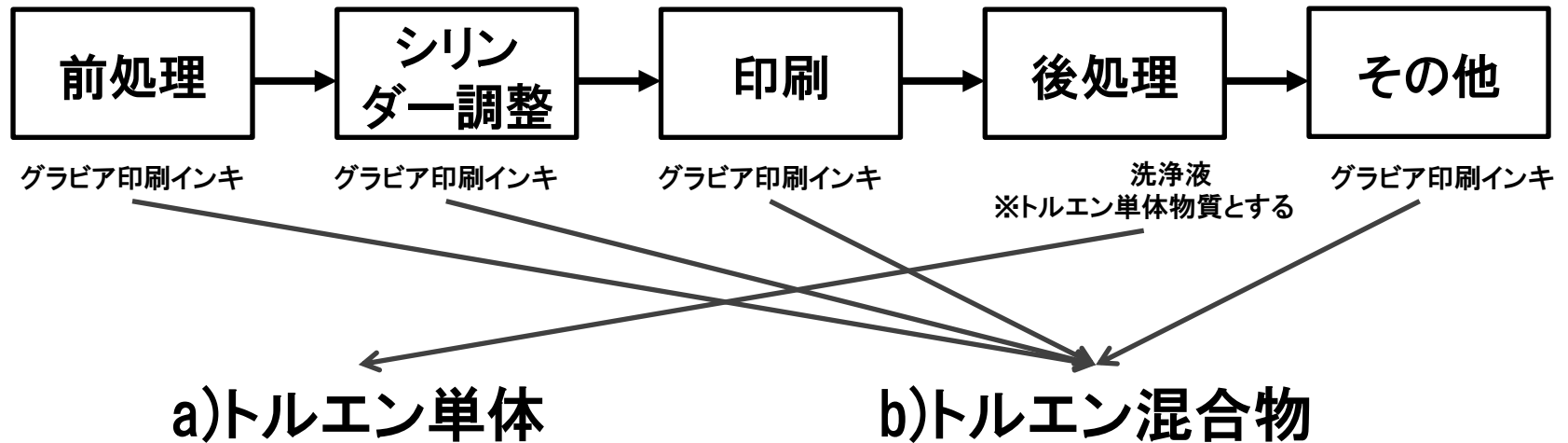
モンテカルロシミュレーション

個人曝露濃度推定

個人曝露濃度

# 物質依存排出ポテンシャル ( $E$ ) の設定方法

$$C_{nf} = (E \times H \times LC) \times D_{nf}$$



$$E_i = \frac{p_i}{30,000}$$

$p_i$ :トルエンの蒸気圧2930Pa(20°C)

$$p_{i,mix} = \gamma_i \times x_i \times p_i$$

$$E_i = \frac{p_{i,mix}}{30,000}$$

$\gamma_i$ :物質の活量係数

$x_i$ :モル分率

$p_i$ :トルエンの蒸気圧2930Pa(20°C)

# 物質依存排出ポテンシャル (E) の設定

$$C_{nf} = (E \times H \times LC) \times D_{nf}$$

## b) 混合物質

$$p_{i,mix} = \gamma_i \times x_i \times p_i$$

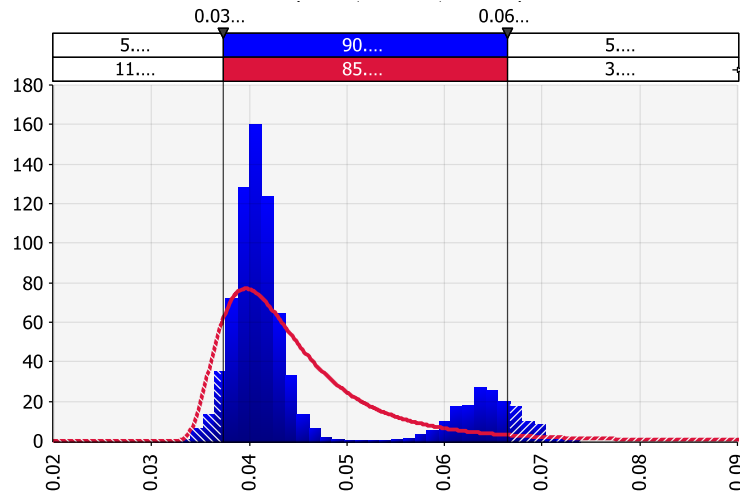
$$E_i = \frac{p_{i,mix}}{30,000}$$

### 活量係数( $\gamma_i$ )

	分子量	含有率	物質量(mol)	モル分率	活量係数
トルエン	92.14	42.58	0.29	0.37	1.37
酢酸エチル	88.17	22.9	0.16	0.21	1.97
MEK	72.11	19.03	0.16	0.21	1.04
IPA	60.1	15.48	0.16	0.21	1.24

【出典:日本印刷産業連合会】

### 物質依存ポテンシャルEの分布



対数正規分布, 平均値0.045, 標準偏差0.0094

### トルエンのモル分率( $x_i$ )

	トルエン	酢酸エチル	MEK	IPA
1-1(1)	15-20	7-10	12-15	8-10
1-1(2)	18-25	9-12	12-19	9-12
1-3(1)	22-26	11-13	17-20	11-13
1-3(3)	25-30	13-16	19-22	14-16
1-5.	23-31	12-16	0	8-11

単位:%

【出典:経済産業省】

# 活動依存排出ポテンシャル ( $H$ ) の設定方法

$$C_{nf} = (E \times H \times LC) \times D_{nf}$$



タスクごとの短期間個人曝露濃度  $C_{st}$  の測定値から算出される確率分布を利用して,  $H$  の確率分布を算定

$$C_{st} = \alpha \times E \times H \times LC \times D$$

$$H = \frac{C_{st}}{\alpha \times E \times LC \times D}$$

$C_{st}$  : 短期間個人曝露濃度(EUリスク評価書より引用)

$E$  : 0.098(後処理(トルエン単体)), 0.038(後処理以外のタスク(混合物の平均値))

$LC$  : 0.1

$D$  : 1.6(EUの労働作業場の代表値)

$\alpha$  : 混合効果モデルの切片(10.56)

# 活動依存排出ポテンシャル (H) の設定

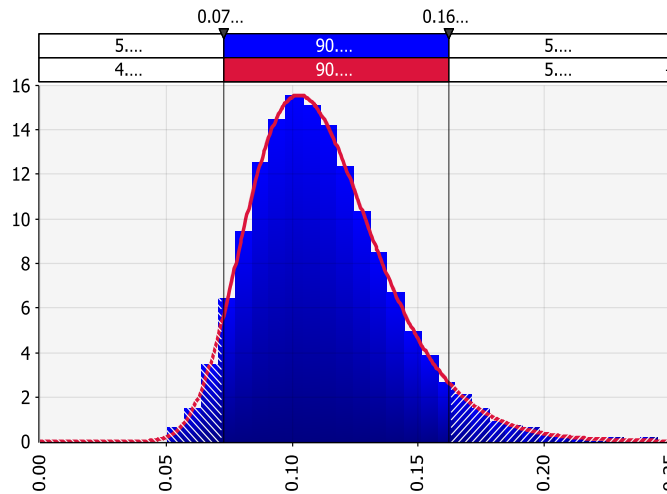
作業区分	日本語訳	備考	N	会社数	50%タイル値	90%タイル値
前処理	運搬	移動・運搬	12	4	129	176
シリンダー調整	一般的な印刷フィルム, 印刷紙の準備	印刷準備	33	9	37	137
	シリンダー調整	印刷準備	12	4	40	116
印刷	運転開始時における印刷機(Printing Units)での作業	印刷	101	12	133	358
	印刷機(Printing press)での作業	印刷	64	11	63	203
	一般的な校正作業	印刷	14	6	77	128
	印刷機(Printing Units)での作業	印刷	13	5	110	183
後処理	シリンダー洗浄機での作業	洗浄	18	8	135	287
その他	銅メッキ版でのガルバニック工程	製版	20	9	8	74
	クロムメッキ版のガルバニック工程	製版	10	7	15	121
	彫刻機での作業	製版	38	7	15	131
	機械の修理	印刷異常時の作業	44	10	35	163
	巻き取り台, 巻き取り室での作業	巻き取り	78	12	37	123
	巻き取り台, 機械での作業	巻き取り	12	4	46	183
	一般的な製本作業	製本	22	6	8	34
	無線とじによる製本作業	製本	22	6	11	28
	中とじによる製本作業	製本	169	12	14	53
	とじ込み製本機での作業	製本	43	6	20	45
	一般的な印刷後処理	裁断, 折り, 丁合, 製本, 孔あけ, トリリング	66	12	12	35
	最終製品の移動・運搬	移動・運搬	27	6	15	67
	印刷物の配送, 仕分け, バッファローロールでの作業	移動・運搬	72	10	77	203
	パレット台への荷積み, 包装	移動・運搬	84	12	118	243
	部長室内での作業	管理	24	9	9	31
	管理室内での作業	管理	17	8	13	79
	制御室での作業	管理	335	13	113	258

50%タイル値, 90%タイル値から対数正規分布に当てはめた【出典:ECB(2003)】 29

# Hの確率分布

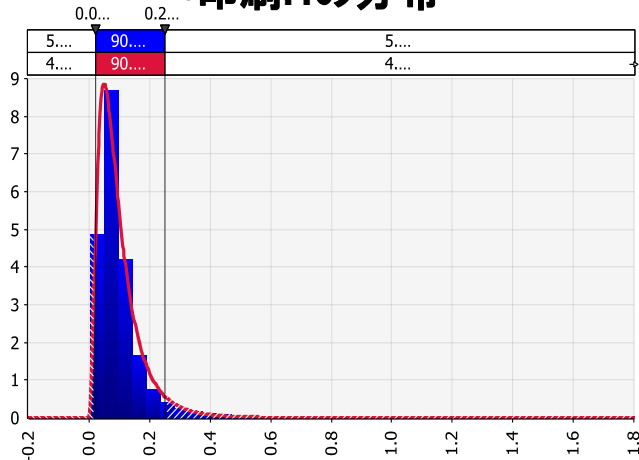
$$C_{nf} = (E \times H \times LC) \times D_{nf}$$

前処理Hの分布



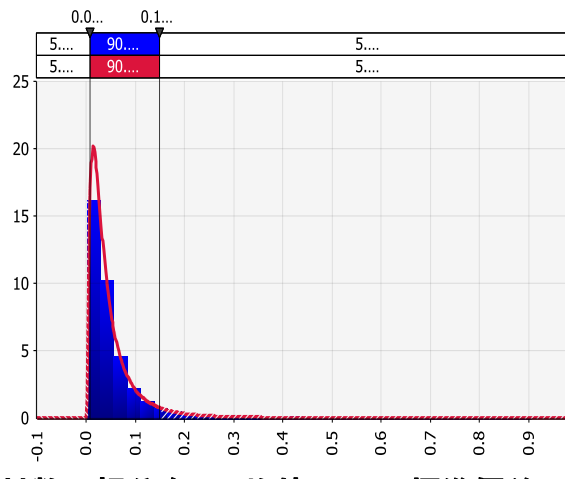
対数正規分布, 平均値0.11, 標準偏差:0.28

印刷Hの分布



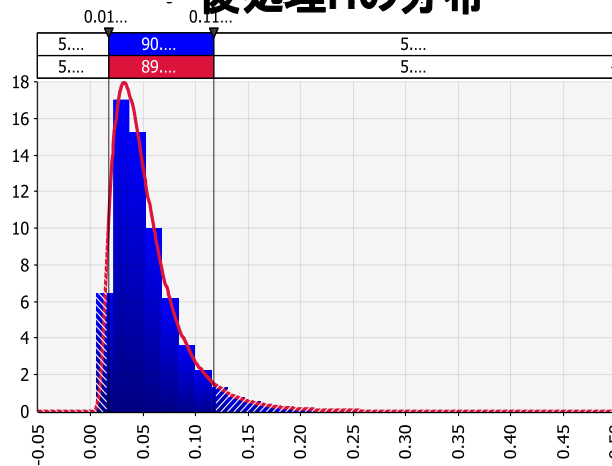
対数正規分布, 平均値0.10, 標準偏差:0.076

シリンダー調整のHの分布



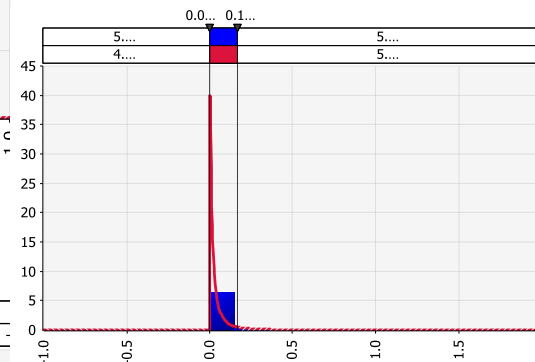
対数正規分布, 平均値0.050, 標準偏差:  
0.058

後処理Hの分布



対数正規分布, 平均値0.053, 標準偏差:0.034

その他の作業Hの分布



対数正規分布, 平均値  
0.049, 標準偏差:0.12

# 分散・希釈 (D) の設定方法

$$C_{nf} = (E \times H \times LC) \times D_{nf}$$

印刷機の種類として、大、中、小の3つに分類され、版胴幅がそれぞれ、1000mm以上、650～999mm、650mm以下となっている。そこで、版胴幅の代表値を大中小の印刷機でそれぞれ、1000mm、750mm、650mmとし、版胴数一個に付き、印刷機の縦幅が1m追加されるとして、印刷機の縦幅を算出し、横幅を版胴幅にして、印刷機の占める面積を算出した。換気回数10ACHとした。

企業売上規模	事業所従業員規模	事業数	事業所あたりの保有数						印刷機の専有面積			工場の敷地面積	工場の体積	D値
			大		中		小		大	中	小			
			台数	版胴数	台数	版胴数	台数	版胴数						
3億円未満	9人以下	18	0.4	2.0	0.7	2.1	1.2	3.6	0.80	1.10	2.16	20.31	101.56	1.5
3～6億円	10～19人	21	1.1	5.5	0.7	4.2	1.9	3.8	6.05	2.21	3.61	59.33	296.63	1.1
3～6億円	20～29人	13	2.0	12.0	0.5	2.0	0.5	1.5	24.00	0.75	0.38	125.63	628.13	1.05
6～10億円	30～49人	26	2.2	15.4	0.6	4.8	0.2	1.0	33.88	2.16	0.10	180.70	903.50	1
10～30億円	50～99人	34	2.9	20.3	0.7	5.6	0.3	1.2	58.87	2.94	0.18	309.95	1549.75	1
30～60億円	100～199人	15	2.6	18.2	0.9	4.5	0.2	1.0	47.32	3.04	0.10	252.29	1261.44	1
60億円以上	200人以上	28	4.4	30.8	0.7	4.9	0.4	2.4	135.52	2.57	0.48	692.86	3464.31	1
総平均		155	2.4	15.1	0.7	4.1	0.6	2.4	36.24	2.15	0.72	195.56	977.81	

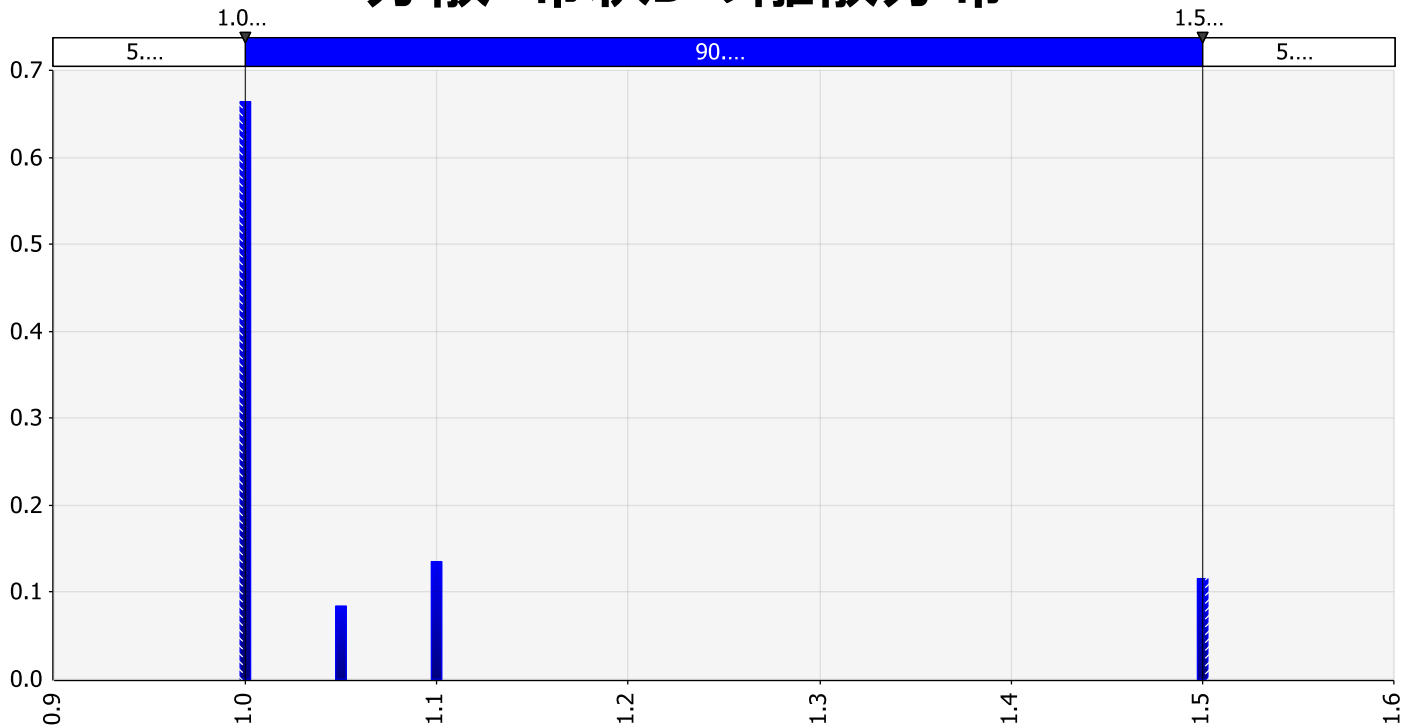
作業場の敷地面積は印刷機の面積の3～5倍、工場の天井の高さは、5mと仮定し、印刷作業場の体積を、印刷機の占める面積×5×5で算出。

【出典：日本印刷産業連合会】

# 分散・希釈 (D) の確率分布

$$C_{nf} = (E \times H \times LC) \times D_{nf}$$

## 分散・希釈Dの離散分布



各印刷作業場の体積に相当する事業所数より、確率分布を割り当てた



# 局所管理 (LC) の設定方法

$$C_{nf} = (E \times H \times LC) \times D_{nf}$$

- ・1999年までに生産されたグラビア印刷機には局所排気装置なし、2000～2002年では生産量の50%が局所排気装置が付き、2003～2009年では75%、2010年はすべての印刷機に局所排気装置がついているとした。
- ・経済産業省による「機械統計」から1982年から2010年までのグラビア印刷機械の生産台数、さらに、財務省「貿易統計」よりグラビア印刷機械の輸出入数を用い、耐用年数10年、および、15年で全数廃棄されると仮定して、2000年と2010年のストック量を算出した。
- ・局所排気装置ありの時、LCの値が0.1、局所排気装置なしの時、LCの値が1とした。
- ・印刷機の耐用年数を10年、15年として、推定した。

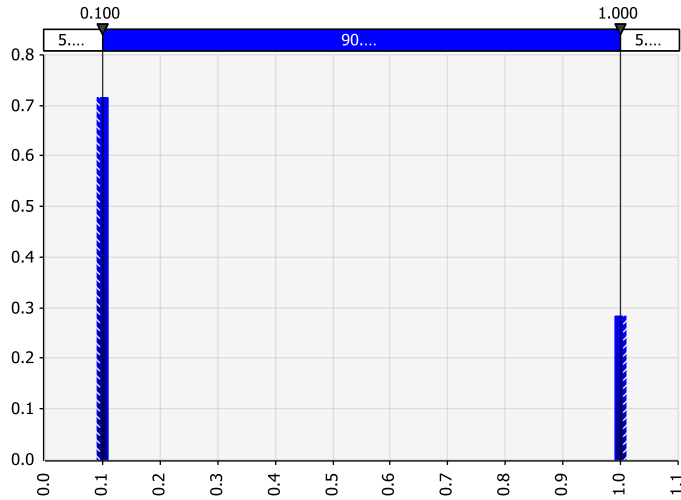
グラビア印刷機の局所排気装置割合

耐用年数10年		
年数	局所管理あり	局所管理なし
2010	0.72	0.28
2000	0.01	0.99
耐用年数15年		
年数	局所管理あり	局所管理なし
2010	0.30	0.70
2000	0.01	0.99

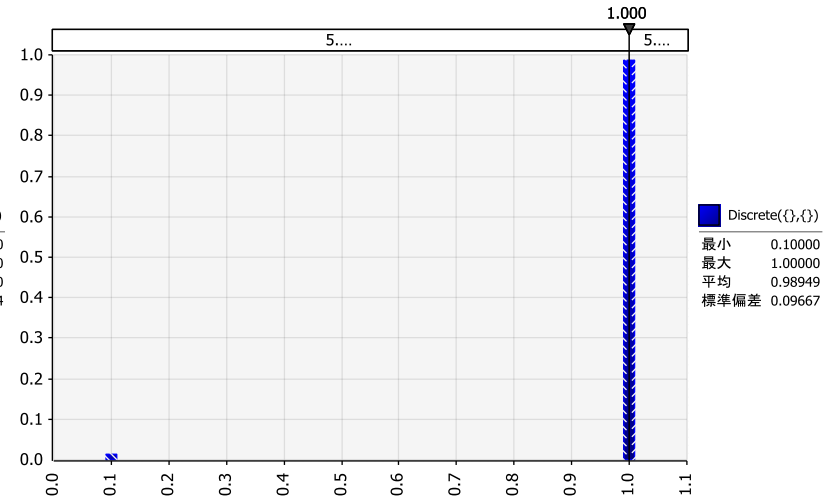
# 局所管理 (LC) の確率分布

$$C_{nf} = (E \times H \times LC) \times D_{nf}$$

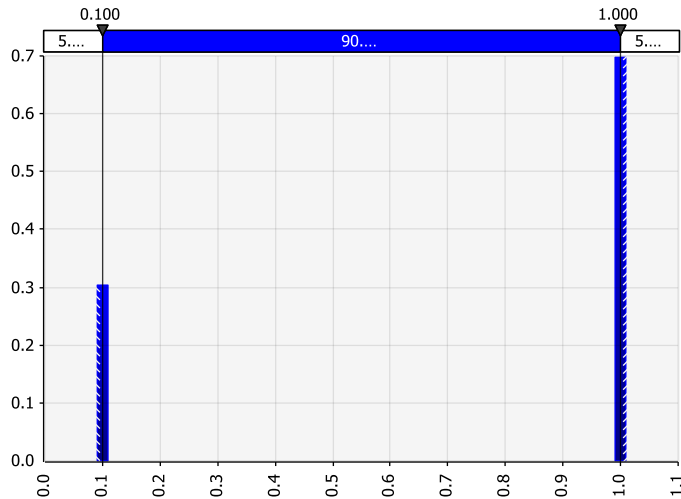
2010年におけるLCの値 (耐用年数10...)



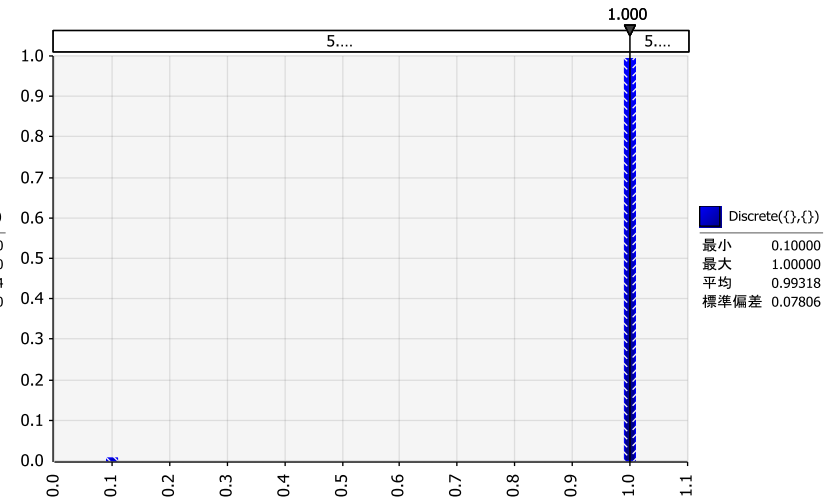
2000年におけるLCの値 (耐用年数10...)



2010年におけるLCの値 (耐用年数15...)



2000年におけるLCの値 (耐用年数15...)



# 作業従事時間 $t_{exposure}$ の設定

$$C_t = \frac{1}{t_{total}} \sum_{task} (t_{exposure} \times C_{nf})$$

- ・1タームのグラビア印刷の作業従事時間は、前処理、シリンダー調整、印刷、後処理に対し、4分、21分、33分、8分を設定。
- ・合計420分の作業従事時間の確率密度の割り当ては中央値の±10%で分散させた正規分布を設定した。

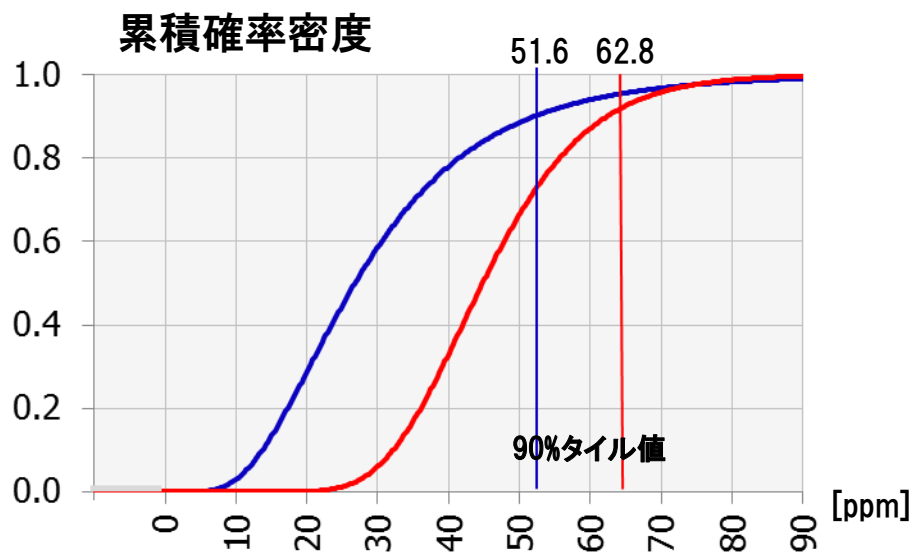
	時間	割合	作業時間
前処理	4	4%	17.8
シリンダー調整	21	22%	93.5
印刷	33	35%	147
後処理	8	8%	35.6
その他	28.3	30%	126
合計	94.3	100%	420

【出典：日本印刷産業連合会】

単位：min

# 曝露推定値と実測値の比較

1992年の実測値と2000年の推定値の平均値, 90%タイル値は, 同等の結果が得られた。



— 2000年の曝露推定結果

対数正規分布, 幾何平均30.8ppm, 幾何標準偏差17.0, 90%タイル値51.6ppm

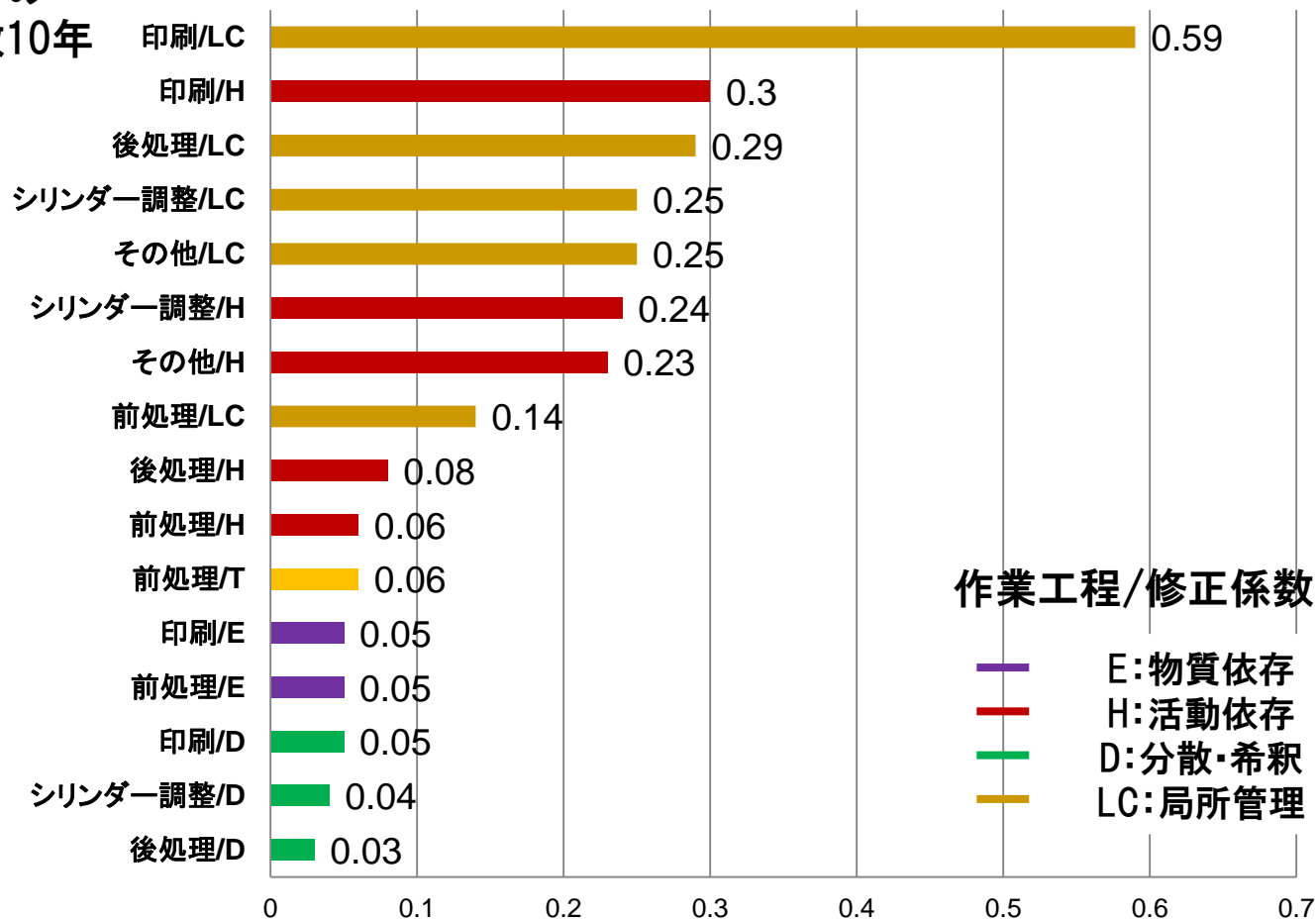
— 1992年の実測値

対数正規分布, 幾何平均46.7ppm, 幾何標準偏差12.1, 90%タイル値62.8ppm

# 個人曝露推定の感度分析

※2010年度,  
印刷機器の  
耐用年数10年

## スピアマン順位相関による感度分析



「印刷」での作業工程における局所管理に係る修正係数LCが、個人曝露濃度に最も高い寄与。

# まとめ

- 1992年の実測値と2000年の推定値の平均値, 90%タイル値は, 同等の結果が得られた。
- この理由は, 知見とデータを統合することで, ARTのパラメータを1つ1つ精査して設定したためであると考えられる。
- 「印刷」での作業工程における局所管理に係る修正係数 $LC$ が, 個人曝露濃度に最も寄与することが示された。
- 局所管理に係る修正係数 $LC$ を精査することで, より精度の高い個人曝露濃度推定を行うことができる。

# 講演内容

## 1. 研究PJの概要

## 2. 新LRI 第1期の成果

### ○目標1:

- ・日本の作業現場への適用を通じた検証
- ・印刷工場におけるトルエン曝露への適用

### ○目標2: ツール開発

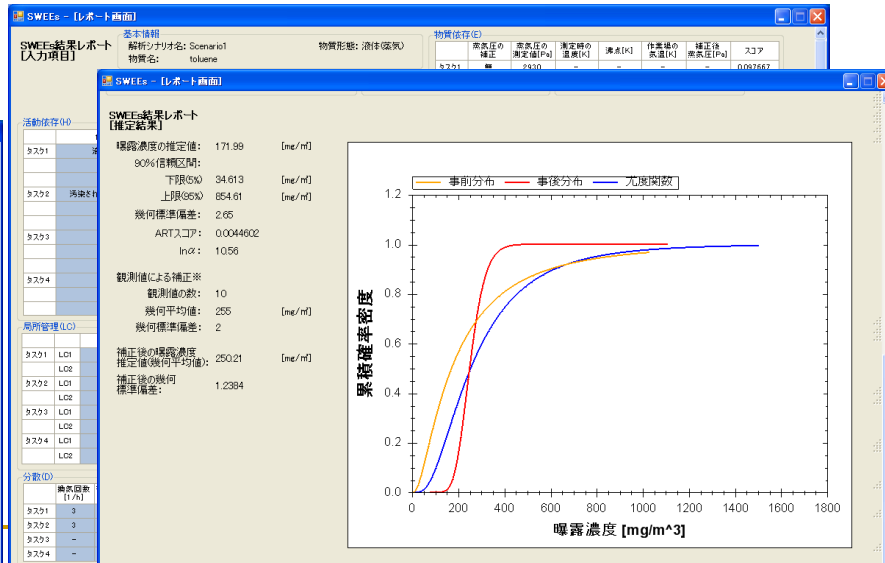
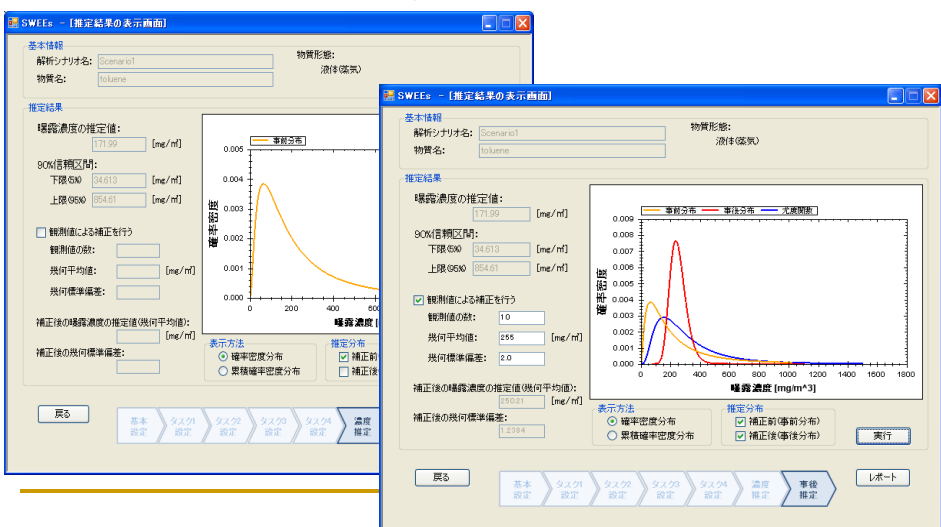
## 3. おわりに

# ツール名: integrated Score-based Workplace Exposure Estimating System



## 基本設定

## 修正係数の設定



## 推定結果と観測値による更新

## レポート表示



# 講演内容

## 1. 研究PJの概要

## 2. 新LRI 第1期の成果

### ○目標1:

- ・日本の作業現場への適用を通じた検証
- ・印刷工場におけるトルエン曝露への適用

### ○目標2: ツール開発

## 3. おわりに

# 今後の課題

- **基盤データの充実: 日本を対象とした業務別の曝露データベース {曝露関連情報, 曝露濃度} の整備が急務。**
  - 検証
  - 混合効果モデルのパラメータの検定
- **修正係数の設定方式の改良**
  - 曝露データベースの更新に伴った修正係数のカテゴリ変数の見直しと修正(ART ver 1.5 では, 活動依存排出ポテンシャルHについて見直されている)
- **PBPKモデルと結合することで, 健康診断データ等の活用を通じた曝露情報の活用充実。**

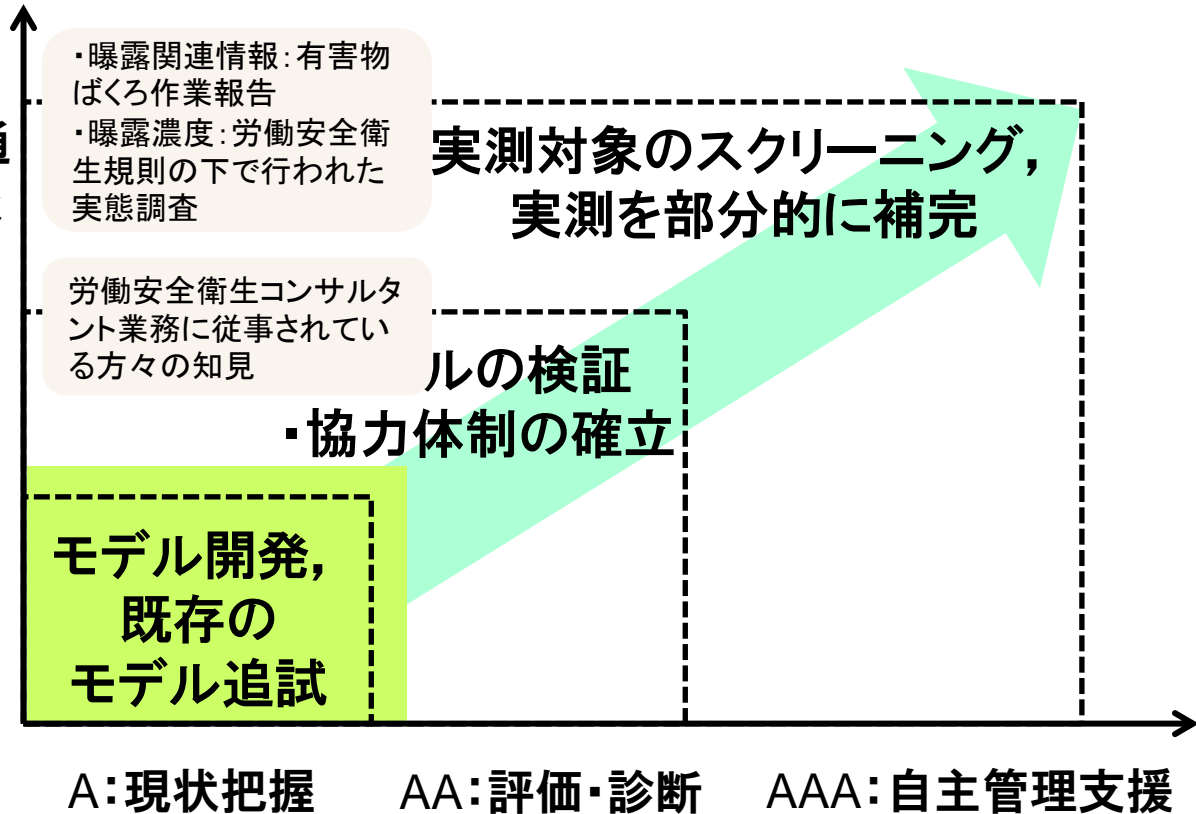
# リスク評価によって何が可能となるか

関係者の協働・知見の集積レベル

Ⅲ：国内関係者の協働を通じた基盤情報の活用

Ⅱ：国内；個別目的下での調査結果の活用

Ⅰ：公表データの活用



リスク評価の段階

# ARTの開発協同プロジェクトの参画団体

	2006年～2007年 始動期	2008年から2010年 開発期
協同プロジェクトの参画団体	<b>TNO</b> (オランダ応用科学研究機構), <b>HSL</b> (イギリス安全衛生庁安全衛生研究所), <b>IOM</b> (イギリス労働医学研究所), <b>NRCWE</b> (デンマーク国立労働環境研究センター), <b>BAuA</b> (ドイツ連邦労働安全衛生研究所), <b>IRAS</b> (ユトレヒト大学)	
資金源	オランダ政府, <b>HSE</b> (イギリス安全衛生庁), <b>Afsset</b> (仏環境労働衛生安全庁)	<b>CEFIC</b> (欧州化学工業連盟), <b>Eurometaux</b> (欧州金属工業会), <b>Shell</b> , <b>GlaxoSmithKline</b>
データ提供	<b>BOHS</b> (英国労働衛生協会)	<b>HSL</b> (イギリス安全衛生庁安全衛生研究所), <b>HSE</b> (イギリス安全衛生庁), <b>IOM</b> (イギリス労働医学研究所), <b>TNO</b> (オランダ応用科学研究機構), <b>BAuA</b> (ドイツ連邦労働安全衛生研究所)の関連企業。 <b>Shell</b> , <b>GlaxoSmithKline</b>

# 期待される成果

