

「環境社会学特別講義」  
1. 総論

2011. 8. 29

慶応義塾大学環境情報学部教授  
太田 志津子

1

総論

1. 化学物質の環境リスクとは？
2. リスクアセスメント
3. リスクマネジメントの考え方

2

1. 化学物質の環境リスクとは？

3

化学物質とは？

- 化学物質とは：**元素又は化合物**
  - 元素：水素(H)、酸素(O)、炭素(C)など
  - 化合物：水(H<sub>2</sub>O)、塩(NaCl)、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)・・・
- 天然に存在するものと人間活動により生成するもの
  - 天然に存在：鉱石、動植物、体内で生成、生物毒(ハチの毒)など。
  - 人間活動により生成：
    - 意図的生成：プラスチック、殺虫剤、洗剤、塗料・・・
    - 非意図的生成：不純物、燃焼生成物

化学物質は、世界で約10万種、我が国で約5万種  
流通しているといわれる。

4

(化学物質の)環境リスクとは？

人の活動によって環境に加えられる負荷が  
環境中の経路を通じ、人の健康や生態系に  
有害な影響を及ぼす**可能性**。

環境リスク = 有害性の程度 × 暴露量

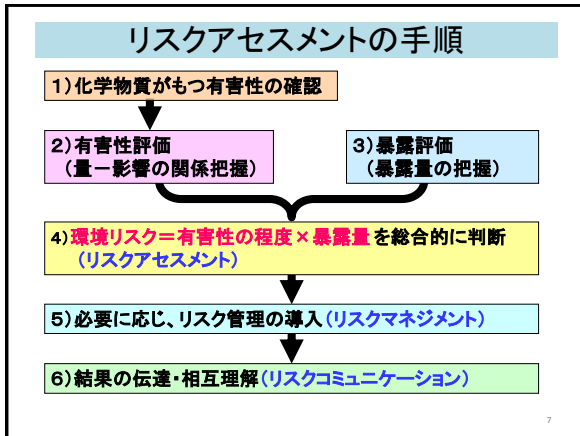
(例)

- 猛毒の化学物質でも世界に1つの実験室内にしか存在しなければリスクはない。
- 弱い毒性でも食物に含まれるなどにより、大量に摂取すればリスクは大きくなる。

5

2. リスクアセスメント

6



### リスクマネジメント＝化学物質の管理

- 新たに作られる化学物質の有害性を調査させる仕組み (環境への影響を考慮しているもの)
  - 一般化学物質・「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」(化学物質審査規制法)
  - 農薬・.....「農薬取締法」
- 暴露量(化学物質の環境への排出量)を調査・公表する仕組み
  - PRTR (Pollutant Release and Transfer Register: 化学物質排出移動量届出制度)
  - 各種の環境モニタリング

### リスクアセスメント→リスクマネジメント

リスクアセスメントシステムに従って、

- 有害性の高い化学物質は暴露量が許容レベルを上回らないように厳しく制限する。
- 有害性の低い化学物質でも、暴露量が許容レベルを上回ればリスクがあるので、環境中への排出量などを監視し、必要に応じて対策をとる。

### リスクマネジメント

- 製造・流通・使用に関する仕組み
  - 一般化学物質(慢性毒性)・化学物質審査規制法
  - 農薬・.....農薬取締法
- 個別事業所からの環境への排出を規制する仕組み
  - 廃棄物処理法、大気汚染防止法などの環境法

<ul style="list-style-type: none"> <li>• 毒物・劇物の管理..... 毒物及び劇物取締法</li> <li>• 食物の管理..... 食品衛生法</li> <li>• 労働者の健康保護..... 労働安全衛生法</li> <li>• 爆発・引火などの予防..... 消防法</li> </ul>
---

### 有害性(hazard)の種類

- 物理化学的有害性(爆発性、引火性など)
- ヒトの健康に対する有害性
  - 急性毒性: 化学物質を動物に1回または短時間に反復投与した場合の毒性
  - 慢性毒性(長期毒性): 動物の平均寿命に相当する長期に渡り、化学物質を投与した時に生ずる中毒症状の毒性
    - ※毒性は「toxicity」。
- 生態系への有害性(魚毒性など)

### 有害性のうち、慢性毒性の種類

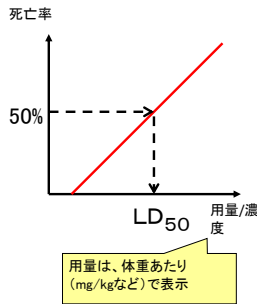
慢性毒性(長期毒性):

動物の平均寿命に相当する長期に渡り、化学物質を投与した時に生ずる中毒症状の毒性

- 一般毒性: 血液学的、臨床化学的、病理学的な変化
- 生殖(繁殖)毒性: 生殖能力への影響(形態異常、機能異常、胚・胎児への障害など)
- 発生毒性(催奇形性): 胎児に奇形を起こす性質
- 発がん性

## 有害性評価 ①急性毒性

- 半数致死量: LD50 (50% Lethal Dose)
- 半数致死濃度: LC50 (50% Lethal Concentration)
- 化学物質をラット、モルモットなどの実験動物に投与した場合に、その実験動物の**半数が試験期間内に死亡**する用量のこと。いずれも急性毒性の代表的指標。



13

## (参考)急性毒性の判定基準

(例) 毒物及び劇物取締法: 劇毒物の新判定基準  
(厚生労働省薬事・食品衛生審議会より <http://www.mhlw.go.jp/shingi/2003/09/s0902-2i.html>)

	経口	経皮	吸入(ガス)	吸入(ダスト)
毒物	LD50 ≤ 50mg/kg	LD50 ≤ 200mg/kg	LC50 ≤ 500ppm	LC50 ≤ 0.5mg/L
劇物	50 < LD50 ≤ 300mg/kg	200 < LD50 ≤ 1000mg/kg	500 < LC50 ≤ 2500ppm	0.5 < LC50 ≤ 1.5mg/L

- ※ 毒劇法では、このほか、吸入(蒸気)、皮膚・粘膜に対する刺激性などによっても毒物・劇物を判定。
- \* 薬事法では「毒薬」、「劇薬」を別途半数致死量などにより定義している。

14

## 有害性の評価 ②生態毒性

- 魚類急性毒性試験では、半数致死濃度: LC50や生長阻害半数影響濃度 EC50が用いられる。
- 化学物質審査規制法における生態毒性試験
  - 藻類生長阻害試験
  - ミジンコ急性遊泳阻害試験
  - 魚類急性毒性試験
- 【判定基準】  
3種の試験結果から得られるL(E)C50値の最小値が
  - 概ね 1mg/l 以下... 第三種監視化学物質
  - 1mg/l < L(E)C50 ≤ 10mg/l... 物質の化学構造、生物種の特性等を考慮して個別に判断
  - 10mg/l ≤ L(E)C50... シロ

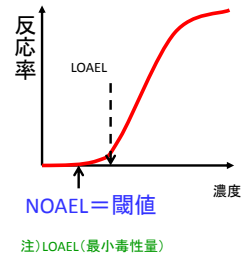
15

## 有害性の評価

### ③ 閾値のある(発がん性以外の)慢性毒性

無毒性量: NOAEL (No Observed Adverse Effect Level) とは?

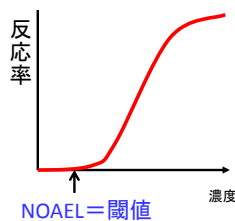
- 化学物質を複数の用量段階で動物への毒性を観察した場合に、悪い影響が見られない最大用量のこと。
- ヒトの体重kg当たりの量として「mg/kg/day」のように表す。
- 閾値がある慢性毒性のさまざまな基準や耐容1日摂取量(TDI)の算定に用いられる。



16

## 閾値(いきち)はなぜあるのか?

- 生物には毒物を分解したり排泄したりする能力がある。
- 個々の細胞にはDNAやタンパク質の損傷を修復する能力がある。
- 再生可能な細胞がある。



17

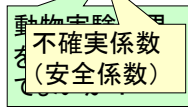
## TDI(耐容1日摂取量)

- 耐容1日摂取量とは:
  - ヒトが一生涯にわたり摂取しても健康に対する有害な影響が現れないと判断される一日当たりの摂取量。
  - NOAELと同じく「mg/kg/day」で表す。
- TDIとADI: 意味は同じ
  - 農薬や食品添加物など有用性のあるものは「許容一日摂取量(ADI: Acceptable Daily Intake)」という。
  - 環境汚染物質の場合はTDI(Tolerable Daily Intake)を用いる。

18

### 閾値のある慢性毒性－TDIの算出

NOAEL (動物実験結果) → TDI (ヒトの許容限度)



(例) 100mg/kg/day → 1mg/kg/day

- 種差 (動物とヒトの違い)・・・10
- 個体差 (ヒトの中の感受性の違い)・・・10
- そのほかにも考慮すべき要因

19

### 閾値のある慢性毒性－寄与率

TDI → それぞれの基準値

- TDIを食品、飲料水、その他 (大気・土壌) などの暴露 (摂取) 経路毎の寄与率で配分して、それぞれの基準値 (上限値) とする。
- 食品80%、飲料水10%がしばしば用いられる。

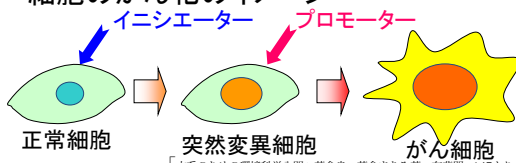
(例) 農産物の残留農薬基準値は、食事に含まれる穀物、野菜、果物などからの対象の農薬の1日の摂取量の合計が、体重に応じてADI (= TDI) から導かれる摂取許容量の80%を超えないよう設定される。



20

### 発がん性のある物質の基準値

• 細胞のがん化のイメージ



- プロモーターには閾値 (NOAEL) が存在すると考えられている。
- イニシエーターは、細胞に1分子が取り込まれることで遺伝子異常を起こす (ワン・ヒット・モデル) ので、閾値 (NOAEL) が存在しないと考えられている。

21

### 何が人間を“がん”にすると思うか

	市民の感覚	がん疫学専門家		市民の感覚	がん疫学専門家
食品添加物	43.5%	1%	普通の食品	0%	35%
農薬	24%	0%	性生活・出産	0%	7%
タバコ	11.5%	30%	職業	0%	4%
大気汚染	9%	2%	アルコール	0%	3%
タンパク質黒焦げ	4%	0%	放射線・紫外線	0%	3%
ウイルス	1%	10%	医薬品	0%	1%
			工業生産物	0%	1%

22

### どんなものが発がん物質か？①

国際がん研究機関 (IARC) による発がん性の分類 (2011.6.17現在。IARCはWHOの下部機関。)

グループ1 (発がん性がある: Carcinogenic to humans 107種)

- アスベスト、ヒ素及びヒ素化合物、カドミウム及びカドミウム化合物、六価クロム化合物、ホルムアルデヒド、ベンゼン、2,3,7,8-TCDD (ダイオキシン類の一つ)、
- 特定のウイルス、経口避妊薬、
- 太陽光暴露 (紫外線による)、X線、ガンマ線、
- アルコール飲料、コールドール、塩漬けの魚 (中国風)、
- ばい煙、木工粉じん、
- タバコ製品、喫煙、受動喫煙 など

出所) <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/ClassificationsGroupOrder.pdf>

23

### どんなものが発がん物質か？②

グループ2A (おそらく発がん性がある: Probably carcinogenic to humans: 59種)

- 無機鉛化合物、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、紫外線、ディーゼル排ガス、PCB、日焼け用ランプの使用、理容・美容に従事 など

グループ2B (発がん性の可能性がある: Possibly carcinogenic to humans: 267種)

- クロロホルム、四塩化炭素、DDT、鉛、メチル水銀化合物、金属ニッケル、コーヒー (膀胱ガンのみ)、ガソリン、重油、ガソリン排ガス、漬物 (アジアで伝統的に製造されているもの)、携帯電話の電磁波、印刷業に従事 など

24

## どんなものが発がん物質か？③

グループ3(発がん性があるという分類ができない: Not classifiable as to carcinogenicity to humans : 508種)

- ▶カフェイン、金属クロム、石炭の粉じん、低周波電場、静電場、静磁場、水銀、セレン、サッカリン、虫歯治療の充填材など外科的に体内に埋め込まれたもの、お茶、原油、軽油 など

グループ4(おそらく発がん性はない: Probably not carcinogenic to humans : 1種)

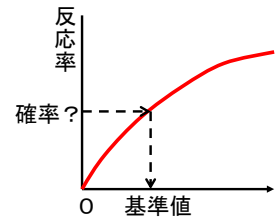
- ▶カプロラクタム(ナイロン繊維の原料)

IARCにより、追加や分類の変更が随時なされている。

25

## 発がん性のある物質の基準値①

- 閾値のない(発がん性がある)物質は、**どんなに小さくてもゼロではない危険**がある。
- しかし**全てを規制**できない。

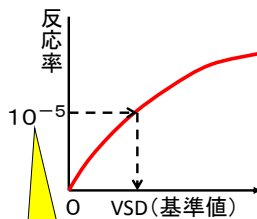


確率で設定

26

## 発がん性のある物質の基準値②

- 発がん性のある物質の基準値は、**生涯リスクレベル $10^{-5}$** (生涯その場で暴露を受けた場合、暴露を受けなかった場合に比べて**10万人に1人の割合でがんを発症する人が増える**)として設定。



- この値は「**実質安全量**」(VSD: Virtually Safe Dose)と呼ばれ、**TDI**や**ADI**と同等に用いられる。

27

## 発がん性のある物質の基準値③

基準値の設定例: **ベンゼン**

- **大気環境基準**・・・0.003mg/m<sup>3</sup>(年平均値)
  - 吸入の生涯リスクレベル $10^{-5}$ に相当する濃度から設定。  
(環境庁中央環境審議会「今後の有害大気汚染物質対策のあり方について(第2次答申)」(1996年10月))
- **水道水質基準**・・・0.01mg/L
  - 飲用の生涯リスクレベル $10^{-5}$ に相当する濃度(下限値)から設定。  
(厚生労働省厚生化学審議会「水道基準値案の根拠資料について(参考)」2004年)

※発がん性の**濃度-発がん率**は、吸入・飲用(経口)などの**暴露経路毎**に調べられている。

28

## 暴露量を把握する仕組み

- **暴露量**(環境への排出量、環境中の濃度)を把握する仕組み
  - ▶PRTR(化学物質排出移動量届出制度)
  - ▶環境モニタリング
- 規制の目標となる**基準値**(大気環境基準、水道水質基準、水質環境基準など)
  - 有害性の評価のみで設定されるものではない。
  - 環境を経由する**暴露量を把握**し、必要があると認められれば(**リスクアセスメント**)、
  - 対策の実施可能性などを考慮した上で設定。

29

## PRTR

(化学物質排出移動量届出制度)

有害性のある多種多様な化学物質が、**どこから、どれくらい環境中に排出されたか**、あるいは廃棄物に含まれて事業所の外に運び出されたかという**データを把握し、集計し、公表する仕組み**。

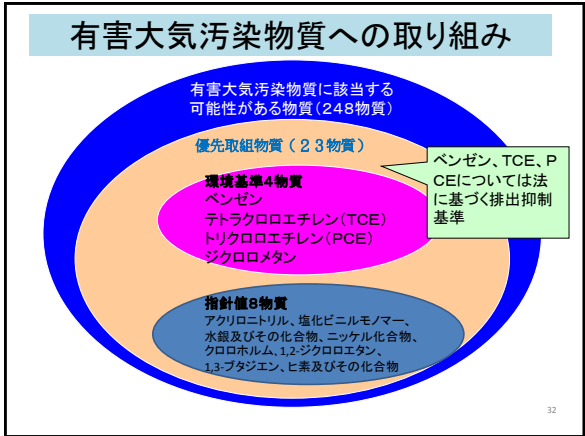
(平成11年「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」)

30

### 環境モニタリング

- 大気・水質の環境モニタリング
  - 以前は環境基準設定項目だけ
  - 近年、監視が必要な項目をリストアップする仕組みに
- 大気汚染対策
  - 低濃度ではあるが長期曝露によって人の健康を損なうおそれのある有害大気汚染物質の取り組みについて枠組みを提示(H8)
- 水質モニタリング
  - 要調査項目(300物質群):リスクは中程度/不明であるが、知見の集積が必要な物質として選定。
  - 要監視項目(27項目):直ちに環境基準とはせず、引き続き知見の集積に努めるべき物質。
  - 環境基準(27項目)

31



## 3. リスクマネジメントの考え方

33

### リスクマネジメントの原則

- 世の中には、様々な種類のリスクがあり、対策をするための資源(コスト)は有限である。そこで、どのようなルールで対策をするのかという指針が必要になる。
- まず、リオ宣言の「予防原則」・国際的合意
- リスク管理の考え方に以下の3つ。
  - ①「ゼロリスク原則」リスクを全く無くしてしまうこと
  - ②「等リスク原則」無視できないレベルのリスクを排除
  - ③「リスクベネフィット原則」リスクと便益を対置させて比較考量する

34

### 予防原則 (Precautionary principle)

環境と開発に関するリオ宣言(仮訳) 第15原則

- 「環境を保護するため、予防的方策は、各国により、その能力に応じて広く適用されなければならない。深刻な、あるいは不可逆的な被害のおそれがある場合には、完全な科学的確実性の欠如が、環境悪化を防止するために費用対効果の大きな対策を延期する理由として使われてはならない。」

※リオ宣言とは、1992年にブラジルのリオ・デ・ジャネイロで開催された環境と開発に関する国連会議(通称:地球サミット)で合意された文書の一つ。前文と27項目にわたる原則により構成。

35

### ゼロリスク原則 という考え方

**ゼロリスク:** リスクを全く無くしてしまうこと。

- 農薬、食品添加物などに対し、しばしば「ゼロリスク」が要求されるが、ゼロリスクは不可能。
  - リスクがないことを科学は証明できない。「今の知見から判断して、有害な影響が生じる見込みはとて小さい」といえるだけ。科学の進展により新たなリスクの把握が可能になってきている。
  - リスクにはトレードオフがあり、あるリスクを下げると別のリスクを増加させることがあり得る。
  - 対策のための資源(コスト:税金等)が有限である以上、達成できない。

36

(参考)ゼロリスク:米国デラニー条項の経緯

米国食品医薬品化粧品法の「デラニー条項」(1958年)  
「安全性評価実験で発ガン性が認められたものは、どんな添加物でも安全とはみなせない」(ゼロリスクの発想)

<デラニー条項の矛盾点>

1. 発ガン性物質の「安全」レベル(検出限界値以下)が、分析手法の向上に伴って厳しくなる。
2. デラニー条項以前に許可された殺虫剤は発ガン性についての十分な検査がないまま使用継続。新規の殺虫剤には厳密に発ガン試験が義務付けられたため、リスクの高い古い殺虫剤を新しい殺虫剤で代替できなくなった。
3. どんなに便益が大きくても、いったん発ガン性が確認されれば使用禁止になるので、研究開発の意欲が抑制された。

37

(参考)ゼロリスク:米国デラニー条項の経緯(続き)

<デラニー条項の矛盾点(続き)>

4. 人工化学物質だけを対象として、天然化学物質を無視していた。しかし、後者は前者よりも量においてもリスクにおいても大きい可能性が指摘された。
5. 発ガン性だけに焦点を当て、非ガン性のリスクを無視していた。発ガン性物質を非ガン性物質に代替することが、必ずしもリスク削減につながらない。
6. 動物実験で発ガン性を持つことがそのままヒトにおいても発ガン性を持つことを仮定しているが、両者は必ずしもイコールでないことが明らかになってきた。

1996年 クリントン大統領がデラニー条項を廃止。

38

リスクのトレードオフ

対抗リスクが影響を与える集団	対抗リスクの種類	同じタイプのリスク	異なるタイプのリスク
同じ集団		リスク相殺	リスク代替
異なる集団		リスク転移	リスク変換

- リスク代替: 水道水の塩素処理(発ガンリスク)中止→水由来の感染症リスク増加。
- リスク転移: 有機塩素系殺虫剤(慢性毒性、生態系リスク)を有機リン系殺虫剤に転換→作業者に急性毒性の被害増加。
- リスク変換:
  - ・DDT(生態系へのリスク)を禁止→マラリア患者のリスク増加(毎年150万人が死亡)。
  - ・はんだを無鉛化→代替金属(銀)資源枯渇のリスクや、気候変動のリスク(より高温→エネルギー消費量が増える)が増加

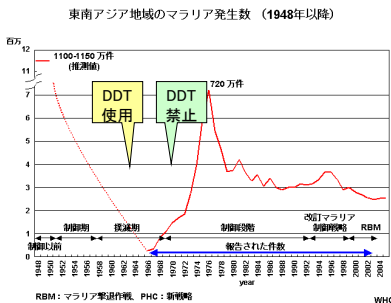
39

不確実性とトレードオフの例: DDTとマラリア①

- ・DDT: Dichloro-diphenyl-trichloroethaneは、かつて世界中で使用された有機塩素系の殺虫剤、農薬。シラミの駆除などで日本でも多用された。
- ・1964年に出版されたレイチェル・カーソンの「沈黙の春」により危険性が指摘され、難分解性、蓄積性、長期毒性(猛毒類等への影響、人体への影響は後に科学的知見により評価が変わった。)を有することから日本でも1971年に農業登録失効、1981年に製造・使用全面禁止。
- ・一方、DDTの使用を中止したためにマラリア(熱帯病のなかで最大の感染者を有する原虫感染症)の撲滅ができなかった。推定感染者数: 3~5億人、推定死亡者数: 100~200万人/年。
- ・2006年、WHOは発展途上国においてはマラリア予防のためにDDTの室内残留性噴霧を奨励すると方針転換。

40

不確実性とトレードオフの例: DDTとマラリア②



・かつて沖縄でも数十人の児童がマラリアで死亡。DDTにより完全撲滅された。  
 ・この図は東南アジアだけのもので、アフリカではもっとひどい。  
 ・途上国では使用禁止したわけではないが、世界銀行や国際機関がDDT使用に援助しなかった。

出所) [http://homepage3.nifty.com/nankou-pub/asia/yak-388\\_390.htm#zakka388](http://homepage3.nifty.com/nankou-pub/asia/yak-388_390.htm#zakka388) に加筆

41

等リスク原則 という考え方

等リスク原則とは:

無視できない(一定)レベルのリスクを排除するという考え方。例えば、様々な物質について発ガンリスク10万分の1で規制を行う。

- ・リスクの総和を低減する効果。
- ・等リスク原則の問題点:
  - 推計に不確実性が残っている。
  - 物質により推計の不確実性に大きな差がある。
  - 社会全体で感受性や暴露量にばらつきがある。
  - 暴露を受ける人々の価値観や文化に差がある。
  - リスク削減費用に差がある。

42

## リスクベネフィット原則 という考え方

リスクベネフィット原則：リスクと便益を対置させて比較考量するという考え方。社会の効率性を高める。

環境汚染物質対策の費用対効果 事例	余命1年延長費用(万円)
シロアリ防除剤クロルデンの禁止	4,500
苛性ソーダ製造での水銀法の禁止	57,000
乾電池の無水銀化	2,200
ガソリン中のベンゼン含有率の規制	23,000
自動車NOx法	8,600
ゴミ焼却施設でのダイオキシン規制(緊急対策)	790
ゴミ焼却施設でのダイオキシン規制(恒久対策)	15,000

出典：日本化学会「環境科学」(原典は岡敏弘)

43

## 演習1

課題：

ホルムアルデヒドの水道水質基準値を計算せよ。(有効数字1桁)

<参考データ>

- ・ホルムアルデヒドのNOAEL: 15mg/kg/day
- ・不確実性係数: 種差10、個人差10、吸入暴露による影響10
- ・ホルムアルデヒドのTDIに対する飲料水の寄与率: 20%
- ・水道基準設定における仮定:  
体重50kgのヒトが1日2L飲料水を飲む

<解答>

NOAEL:ラットへの2年間の飲水投与実験で 15 mg/kg/day

不確実係数: 1000

種差10、個人差10。さらに、入浴時等の水道水からの酸化による吸入暴露による影響も考慮に入れる必要があるとして、追加の不確実係数: 10

$$TDI = 15 \text{ mg/kg/day} \div 1000 = 0.015 \text{ mg/kg/day}$$

飲料水の寄与率:ホルムアルデヒドは塩素消毒の副生成物であることからTDIに対する飲料水の寄与率を20%とする。(食品は少ない)

飲料水からの摂取量の上限:

$$0.015 \text{ mg/kg/day} \times 0.2 = 0.003 \text{ mg/kg/day}$$

体重50kgのヒトが1日2L飲むと仮定      ホルムアルデヒドの  
飲料水中のホルムアルデヒドの濃度:      水道水質基準値

$$\frac{0.003 \text{ mg/kg/day} \times 50 \text{ kg}}{2 \text{ L/day}} = 0.075 \text{ mg/L} \approx 0.08 \text{ mg/L}$$