室内空気汚染による健康被害のライフサイクル影響評価手法の開発

ー室内空気汚染による健康被害に関する研究（その3）ー

DEVELOPMENT OF LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT METHODS
FOR THE HEALTH DAMAGE BY INDOOR AIR POLLUTION

Study on health damage causes by indoor air pollution

成田 菜採*, 村上 周三**, 伊香賀 俊治**, 坂部 貢***, 伊坪 徳宏****

Natsumi NARITA, Shuzo MURAKAMI, Toshiharu IKAGA,

Kou SAKABE and Norihiro ITSUBO

There are so many chemical substances around us today. On the other hand, new houses are significantly air tight by standards of energy saving policy and it is very difficult to exchange between indoor air and fresh outdoor air. As a result, indoor air quality becomes worse, and health concerns have been an increasing social problem. The studies for these problems have been developed in the several fields, such as Building Environmental Engineering, Medical Science and in other areas so on. However, to solve this problem fundamentally, the comprehensive and quantitative assessments from the generation of chemical substances to onset of symptoms are needed. In this study, the health damages by indoor air pollutants are evaluated comprehensively following the environmental assessment tool, LIME (Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling) developed by Advanced Industrial Science and Technology. Theoretically it is very difficult to evaluate sick-building syndromes, because these symptoms are extremely variable from person to person, and there has been no research in the world in these areas. Therefore, the data offered by a special hospital for sick-building syndromes are used with medical specialists in this study. A new assessment tools for indoor air pollutants is developed for the first time.

Keywords : indoor air pollution, health damage, sick building syndrome, disability adjusted life year, LIME

室内空気汚染, 健康被害, シックハウス症候群, DALY, LIME

1. はじめに

近年、室内空気汚染が深刻化し人間健康への被害が憂慮されている。しかし、室内空気汚染の影響を定量的に評価する手法はこれまで存在しなかった。そのため、本研究ではLCA国家プロジェクト（経済産業省ほか：1998-2005）において、（独）産業技術総合研究所が開発した日本版被害算定型影響評価手法LIME¹⁾（Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint modeling、2節に後述、以降LIME）に倣い、室内空気汚染が人間の健康に及ぼす被害を包括的かつ定量的に評価する手法を開発してきた²⁻⁵⁾。中でも室内化学物質（ホルムアルデヒドやトルエン）によるシックハウス症候群は感受性の個人差が大きく、評価が大変難しい。これまで両者の関係を定量的に表すデータは世界的に見ても例がなかった。そこで本研究では建築環境工学、医学、LCA工学の専門家による横断的な共同研究を行い、医学的知見を交えながら実際の患者データを用いることで、室内化学物質とシックハウス症候群の関係を解明し、室内空気汚染の影響を定量的に評価する手法の開発を行った。

既報²⁾ではホルムアルデヒドによるシックハウス症候群のライフサイクル影響評価手法（LIMEによる評価手法）を実際の患者データ（19名）により検討したが、本報では更に約100名の患者データを

追加しトルエンのデータも加え、統計学的な分析から新たな算定を行った。またこれらの物質はシックハウス症候群を引き起こす代表的な化学物質として知られているが、一方でホルムアルデヒドは発ガン性が指摘されており、トルエンは筋力低下や難聴といった中毒症状を引き起こすことが多くの研究で明らかにされている。このため室内空気汚染による影響を評価するには、シックハウス症候群だけでなく、起こりうる健康被害をできるだけ多く想定する必要がある。また室内空気汚染は住宅や生活スタイル等に関わらず様々な状況で発生する。そのため本研究では既報²⁾からこれらの課題に継続的に取り組み「シックハウス症候群」に加えて「発ガン性」「中毒症状」及び「戸建住宅」「集合住宅」「施工段階」に対応した評価手法の開発を行ったため、これを報告する。

2. 日本版被害算定型影響評価手法LIME（以降LIME）

LIMEは地球温暖化やオゾン層破壊等の環境問題による影響をすべて被害量に換算し、単一指標化することで統合評価を可能にする手法である。近年では国内外からも大きな注目を集めている¹⁾。被害量への換算には「ダメージ関数」と呼ばれるものを用いており、汚染物質の発生量とダメージ関数を乗じることで簡単に被害量を算出で

* 東京電力㈱
(元慶應義塾大学大学院 大学院生)

** 慶應義塾大学理工学部 教授・工博

*** 北里大学薬学部 教授・医博

**** 武蔵工業大学環境情報学部 准教授・工博

Tokyo Electric Power Company

(Former Graduate Student, Keio Univ.)

Prof., Faculty of Science and Technology, Keio Univ., Dr. Eng.

Prof., Faculty of Pharmaceutical Science, Kitasato Univ., Dr. Med.

Assoc. Prof., Faculty of Environmental and Informations, Musashi Institute of Technology, Dr. Eng.

きる仕組みになっている。特に人間健康への被害量は DALY⁶⁾

注1) (Disability Adjusted Life Year: 単位[年]) という寿命の損失分を表す指標を用いているのが特徴であり、これまで本研究では室内中のホルムアルデヒド等による人間健康への被害量を算出するためのダメージ関数[DALY/kg]を開発してきた²⁾。この結果から、室内空気汚染による健康被害が非常に深刻であることがわかっている。

3. 人間健康へのダメージ関数 DF の算定 (図 1)

LIME ではすでに屋外における環境汚染に対して、被害量を算出するためのダメージ関数が多数定義されている。2 節で述べたように、環境汚染に対するダメージ関数[DALY/kg]が定義されると、その環境汚染物質の発生量[kg]と乗じることで、簡単に環境汚染の影響を健康被害量[DALY]として定量化でき、その環境汚染の評価が可能となる。これより室内空気汚染を評価するためには、室内空気汚染のダメージ関数を定義する必要がある。まず主要な汚染物質を選定し、室内空気汚染をモデル化する。ダメージ関数の算定の流れを図 1 に示す。ダメージ関数の算定式は(1)式のように表され、各項の値 (図 1(A)~(D)) を順に検討していく。

ダメージ関数 DF 算定式

$$DF = \Delta C \times DR \times P \times D_S \quad \dots (1)$$

ここに

DF : 室内空気汚染の人間健康へのダメージ関数[DALY/kg]

ΔC : 室内汚染物質の年間単位量排出による外気に対する室内濃度増加[ppm/kg または ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/kg]

DR : 用量反応関係[QEESI/人/ppm または case/人/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)]

P : 対象人口[人]

D_S : 1 疾病に対する被害量[DALY/QEESI または DALY/case]

4. 室内空気汚染のモデル化

統計値から日本の平均的な戸建住宅と集合住宅を想定し^{7, 8), 注2)}、年間で汚染物質が単位量排出された場合の室内空気汚染をモデル化しダメージ関数を算定する。住宅の形態はこの 2 種類を代表として想定したが、別個に室内濃度を用いた評価手法も検討し、異なる大きさの住居にも対応できるようにした。これについては後述する。更に本研究では主要な室内汚染物質であるホルムアルデヒド、トルエンが引き起こす健康被害を対象に検討を行った。表 1 に示す室内汚染物質と健康被害の因果関係は、医学的にも十分に確認されているものであり、信頼できる研究結果も公表されているためそれらを研究の第一段階とした。シックハウス症候群の場合には、専門医の知見に基づき大きく粘膜系の症状と精神系の症状に大別した。また室内空気汚染は居住時だけでなく施工時における高濃度曝露による健康被害も考えられるため、本研究では居住時と施工時の 2 つの室内空気汚染をモデル化し検討を行った。

5. 化学物質の単位量排出による濃度増加 ΔC の算定 (図 1, (A))

既報⁹⁾の CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析により、瞬時一様拡散の場合と濃度分布を考慮した場合とで人体曝露量は変わらないことが示された。このため本研究では、(2)式に示す一様拡散に基づく室内濃度式から化学物質の単位量排出による濃度増加 (=室内濃度 - 外気濃度) を(3)式で算定した。換気回数は、既往研究や実測

図 1 ダメージ関数 DF の算定手順

表 1 本研究で対象とした室内汚染物質と健康被害 (症状)

対象とした汚染物質	対象とした症状
ホルムアルデヒド	シックハウス症候群
	鼻咽頭のガン
トルエン	シックハウス症候群
	中毒症状

表 2 汚染物質の年間単位量排出による室内濃度増加 ΔC の計算

<p>室内濃度増加 ΔC 【戸建住宅】</p> <p>$M + Q =$ 汚染物質の年間単位量排出量[1[kg]] + 年間換気量[m³]</p> <p>$= 1[\text{kg}/\text{年}] \div (1.0[\text{回}/\text{h}] \times 302[\text{m}^3] \times 24[\text{h}/\text{日}] \times 365[\text{日}/\text{年}])$</p> <p>$= 3.78 \times 10^{-7} [\text{kg}/\text{m}^3]$</p> <p>(室容積 (一住戸) : 302m³ (建築学会標準モデル⁸⁾)</p> <p>換気回数 : 1.0 回/h)</p> <p>$\therefore \Delta C = 3.78 \times 10^{-1} [(\text{mg}/\text{m}^3)/\text{kg}] = 3.06 \times 10^{-1} [\text{ppm}/\text{kg}]$</p> <p>室内濃度増加 ΔC 【集合住宅】</p> <p>$M + Q = 1[\text{kg}/\text{年}] \div (0.7[\text{回}/\text{h}] \times 111[\text{m}^3] \times 24[\text{h}/\text{日}] \times 365[\text{日}/\text{年}])$</p> <p>$= 1.47 \times 10^{-6} [\text{kg}/\text{m}^3]$</p> <p>(室容積 (一住戸) : 111m³ (日本全国平均値))</p> <p>換気回数 : 0.7 回/h)</p> <p>$\therefore \Delta C = 1.47 [(\text{mg}/\text{m}^3)/\text{kg}] = 1.19 [\text{ppm}/\text{kg}]$</p>

値等^{10~12)}を調査し全国平均値として戸建住宅 1.0[回/h]、集合住宅 0.7[回/h]を採用した。表 2 に室内濃度増加の算定結果を示す。

室内濃度一様拡散式

$$C_i = C_o + M/Q \quad \dots (2)$$

室内濃度増加式

$$\Delta C = C_i - C_o = M/Q \quad \dots (3)$$

ここに

C_i : 汚染物質の室内濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

C_o : 汚染物質の外気濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

M : 汚染物質の排出量 [$\mu\text{g}/\text{h}$]

Q : 換気量 [m³/h]

6. 用量反応関係 DR の算定 (図 1, (B))

6.1 シックハウス症候群の用量反応関係

6.1.1 ホルムアルデヒド、トルエンとシックハウス症候群

ホルムアルデヒドおよびトルエン濃度に対するシックハウス症候群の用量反応関係を明確に定義した既往研究は見当たらない。通常の用量反応関係は、用量 (濃度) に対する発症率で表されるが、シックハウス症候群は個人の感受性が大きいことが特徴であり、個々人によって発症率が大きく異なるため、濃度に対する発症率を定義することは医学的にも困難である。また濃度増加に伴い症状が悪化する特徴を持つため、本研究では新たな用量反応関係を定義した。本研究では、1998 年にアメリカのミラー博士により開発された、世界共通に化学物質過敏症患者の診断を行うための QEESI (Quick Environmental Exposure Sensitivity Inventory)¹³⁾ という診断表の結果を用

いて、室内濃度と症状の重度の関係を検討する。それに統計から求めたシックハウス症候群患者数を発症割合として掛け合わせる。日本でも QEESI による化学物質過敏症およびシックハウス症候群の診断・研究は非常に有効であることが示されており、最も一般的な診断表として各研究所で採用されている。QEESI では、粘膜症状、精神症状の重度がそれぞれ 30 点満点で評価され、点数が大きいほど症状が重いことを表す。シックハウス症候群の症状には頭痛や目の痛み等、健常時にも発症しうる症状が含まれる。ここではシックハウス症候群によって発症した症状のみを検討するため、各患者の QEESI 点数から健常時の点数の差³⁾をとり、それをシックハウス症候群によって表れた症状の QEESI 点数とした。

6.1.2 シックハウス症候群患者データの分析

本研究では北里研究所病院より提供された実際の患者データを用いて用量反応関係を定義する。図 2.1 にそのデータ⁴⁾による室内ホルムアルデヒド濃度と症状の重度 (QEESI 点数) の関係を示す。室内濃度については測定機関によって詳細な値がわかるデータと厚生労働省の濃度指針値を基準にしたデータとが混在していた。濃度指針値を基準にしたものは「指針値以下」「指針値以上」「高濃度」の 3 区分のみで表示されており、詳細な室内濃度の値は不明であった。そこで医学分野で検査等に用いられている「倍々の基準」の考え方を採用し「指針値以下」を濃度指針値の値、「指針値以上」を濃度指針値の 2 倍の値、「高濃度」をシックハウス症候群から中毒症状と判断される域の値 (共同研究者である坂部により提供) の 3 点でプロットすることとした。グラフ上で濃度指針値やその倍の値に集中したデータがあるのはこれが理由となる。相関分析の結果、すべての物質の室内濃度と症状の重度に中程度以上の相関が見られた (図 2.1 ~ 2.4)。この推定方法による誤差については、今回データ数の確保を優先し、各々相関があることを確認できたため大きな誤差はないものとした。但し今後も詳細な室内濃度データを集め、精度の向上を図っていく予定である。

6.1.3 用量反応関係式の作成・閾値の有無の検討 (図 2、表 3)

本研究では既往研究に倣い¹⁾直線の回帰式を用いる。厚生労働省による室内濃度指針値はシックハウス症候群が発症しない条件を基準に定められているため、その値を閾値に用いる場合と閾値なしの場合を検討した。回帰式の適合性の判断には統計学でよく用いられている AIC (赤池情報量基準) を利用した¹⁴⁾。AIC は値が小さいほど適合性が高いことが判定できる。この結果、ホルムアルデヒド、トルエンとも閾値なしの回帰式のほうが、濃度に対する症状の重度をよりよく予測できることがわかった (表 3)。これより、本研究では閾値なしの回帰式を選択する (図 2.1 ~ 2.4、①)。

6.1.4 シックハウス症候群の発症割合

6.1.3 で検討した患者データはシックハウス症候群を発症した人のみが対象であるが、用量反応関係には発症するか否かという割合も考慮する必要がある。日本におけるシックハウス症候群の患者数を調査した内山ら (京都大, 2000)¹⁵⁾の研究によると、日本の総人口に対する化学物質過敏症患者とシックハウス症候群患者を合わせた割合を 0.74% としている。本研究ではシックハウス症候群の患者割合だけが必要なため、北里研究所病院に通院している化学物質過敏症患者 (14%) とシックハウス症候群患者 (45%) の比率 (共同研究

図 2.1 室内ホルムアルデヒド濃度と粘膜症状

図 2.2 室内ホルムアルデヒド濃度と精神症状

図 2.3 室内トルエン濃度と粘膜症状

図 2.4 室内トルエン濃度と精神症状

図 2 室内汚染物質とシックハウス症候群の各症状の患者データおよび回帰式

表 3 図 2.1 ~ 2.4 の①、②回帰式と AIC (値が小さいほどよい)

		①閾値なし	②閾値あり
図 2.1 ホルムと粘膜症状	回帰式	$y = 67.0x$	$y = 156.3x - 12.5$
	AIC	325	419
図 2.2 ホルムと精神症状	回帰式	$y = 72.0x$	$y = 163.9x - 13.1$
	AIC	355	417
図 2.3 トルエンと粘膜症状	回帰式	$y = 53.2x$	$y = 87.0x - 6.1$
	AIC	33	39
図 2.4 トルエンと精神症状	回帰式	$y = 57.9x$	$y = 102.0x - 7.1$
	AIC	44	47

者の坂部より提供)を用いて0.56% (=0.74×[45/(45+14)])と計算しなおした。この発症患者の割合0.56%を6.1.3で得た回帰式の傾きの値に乘じ、これを用量反応関係とした。6.1.3、6.1.4より得られた値から計算したシックハウス症候群の用量反応関係を表4に示す。

6.2 その他の用量反応関係

6.2.1 ホルムアルデヒドと鼻咽頭ガン

化学物質による発ガンモデルは米国 EPA (US Environmental Protection Agency) のユニットリスクが世界的にも有名であり多くの疫学研究に用いられている¹⁾。本研究ではこのユニットリスクをホルムアルデヒドによる発ガンの用量反応関係として利用する。ユニットリスクは発ガン性を有する化学物質に、通常的生活状態において生涯曝露されたときの発ガン確率を、媒体中の単位濃度あたりの値として表現したものである。これより本研究で用いる1年あたりの用量反応関係とするためには、生涯年数で割る必要がある。また施工段階の用量反応関係を計算するためには、通常的生活状態における曝露から労働環境における曝露の時間差を考慮する¹⁶⁾。一般的なリスクアセスメントでは生涯年数75年、労働年数45年¹⁶⁾であることから、表5に示す居住時、施工時の用量反応関係を計算した。

6.2.2 トルエンと中毒症状

トルエンによる中毒症状の用量反応関係については、信頼性の高い既往研究があるため、それを引用することとした。文献17では多くの疫学データから曝露濃度と有症率の関係を検討している。表6にその関係式(4)式を示す。室内濃度増加 ΔC を代入することで、用量反応関係DRを求めることができる。これより、5節で求めた戸建、集合住宅別の室内濃度増加 ΔC を代入し計算する。また施工時における用量反応関係は一般曝露から労働時間の曝露への換算係数(表5と同様)を考慮して計算する(表6)。

7. 対象人口Pの算定(図1, (C))

室内空気汚染の被害は住宅内に滞在する人が対象となる。ダメージ関数の算定では被害が想定される人数を対象人口として計上する。居住時の場合には住宅に暮らす居住者数、施工時は室内に滞在する労働者数と考えられる。前者に関しては平成17年度国勢調査による日本の平均世帯人数2.58人を用いた。後者に関しては住宅建築における従業者総数(2000年)約188万人¹⁸⁾と、新設住宅の着工戸数がおおよそ123万戸¹⁹⁾から(表7.1)、1住宅の建設現場における職業性曝露の対象者1.53人と計算した(表7.2)。

8. 疾病別総DALYDsの算定(図1, (D))

対象としている健康被害(疾病)の程度を定量化する。LIMEではDALY^{注1)}と呼ばれる指標を用いており、これより1つの疾病に対する健康被害量DALYの値を決定していく。

8.1 シックハウス症候群のDALYDs

シックハウス症候群のDALY値を算定した既往研究は見当たらないため、本研究では新たな値の算定方法を開発した²⁾。DALYは健康被害を障害による相当損失年数(Years Lived with a Disability: YLD)と早死による生命損失年数(Years of Life Lost: YLL)に分け、その和によって求める。前者YLDは死亡に至らない健康被害であっても障害を負った分を寿命の損失

表4 シックハウス症候群の用量反応関係DR

ホルムアルデヒドの用量反応関係DR	
(1)粘膜症状	$66.98 \times 0.0056 = 3.78 \times 10^{-1} [\text{QEESI}/\text{人}/\text{ppm}]$
(2)精神症状	$71.96 \times 0.0056 = 4.06 \times 10^{-1} [\text{QEESI}/\text{人}/\text{ppm}]$
トルエンの用量反応関係DR	
(1)粘膜症状	$53.16 \times 0.0056 = 3.00 \times 10^{-1} [\text{QEESI}/\text{人}/\text{ppm}]$
(2)精神症状	$57.88 \times 0.0056 = 3.27 \times 10^{-1} [\text{QEESI}/\text{人}/\text{ppm}]$

表5 ホルムアルデヒドと鼻咽頭ガンの用量反応関係DR

【居住時】	
ユニットリスク	$1.30 \times 10^{-2} [\text{case}/\text{人}/(\text{mg}/\text{m}^3)] + \text{生涯年数 } 75$
	$= 1.73 \times 10^{-4} [\text{case}/\text{人}/(\text{mg}/\text{m}^3)]$
【施工時】	
	$1.30 \times 10^{-4} [\text{case}/\text{人}/(\text{mg}/\text{m}^3)] + \text{生涯年数 } 75 \times \text{換算係数 } 0.13$
	$= 2.25 \times 10^{-5} [\text{case}/\text{人}/(\text{mg}/\text{m}^3)]$
通常的生活時間から労働時間への換算係数	
$= 8(\text{h})/24(\text{h}) \times 5(\text{日})/7(\text{日}) \times 48(\text{週})/52(\text{週}) \times 45(\text{年})/75(\text{年}) = 0.13$	

表6 トルエンと中毒症状の用量反応関係DR

文献17による用量反応関係式	
$DR = \{1/[1 + \exp(-(-3.09722) - 0.00909961 \times \Delta C) - 0.043]\} \cdots (4)$	
【居住時、戸建住宅】	
$DR = \{1/[1 + \exp(-(-3.09722) - 0.00909961 \times 3.78 \times 10^{-1} [\text{mg}/\text{m}^3]) - 0.043]\} = 3.65 \times 10^{-4} [\text{case}/\text{人}/(\text{mg}/\text{m}^3)]$	
【居住時、集合住宅】	
$DR = \{1/[1 + \exp(-(-3.09722) - 0.00909961 \times 1.47 [\text{mg}/\text{m}^3]) - 0.043]\} = 7.77 \times 10^{-4} [\text{case}/\text{人}/(\text{mg}/\text{m}^3)]$	
【施工時、戸建住宅】	
$DR = \{1/[1 + \exp(-(-3.09722) - 0.00909961 \times 3.78 \times 10^{-1} [\text{mg}/\text{m}^3]) - 0.043]\} \times \text{換算係数 } 0.13 = 4.81 \times 10^{-5} [\text{case}/\text{人}/(\text{mg}/\text{m}^3)]$	
【施工時、集合住宅】	
$DR = \{1/[1 + \exp(-(-3.09722) - 0.00909961 \times 1.47 [\text{mg}/\text{m}^3]) - 0.043]\} \times \text{換算係数 } 0.13 = 1.02 \times 10^{-4} [\text{case}/\text{人}/(\text{mg}/\text{m}^3)]$	

表7.1 建築従業者数・着工建築物数(2000)

	住宅	非住宅
従業者総数[人] ¹⁸⁾	1,884,752	1,163,630
着工建築物[戸] ¹⁹⁾ (着工面積)	1,229,843 (119,879,000m ²)	— (80,380,070m ²)

表7.2 施工時の対象人口Pの計算結果

$1,884,752 [\text{人}] + 1,229,843 [\text{戸}] = 1.53 [\text{人}/\text{戸}]$
--

表8 各症状に対するDALYDs

	症状	DALYDs
8.1 節	シックハウス症候群 ²⁾ [DALY/QEESI] ^{注5)}	粘膜症状 1.72×10^{-2}
		精神症状 3.83×10^{-2}
8.2	鼻咽頭ガン ¹⁾ [DALY/case]	4.9
8.3	中毒症状(手足の筋力低下・難聴・集中力低下) ¹⁷⁾ [DALY/case]	0.16

分と仮定し計上した年数、後者YLLは死亡に至った分、寿命が短縮した年数を表す。シックハウス症候群の疾病が直接死亡の原因となることは稀であり、因果関係を医学的に証明することは難しい。そのため本研究では障害による損失年数YLDのみを考慮した。YLDは疾病の障害の重度と障害の持続期間の積で求められる。本研究では既報にてシックハウス症候群に近い症状を参考にしながら専門医の判断に基づき障害の重度を決定した²⁾。また障害の持続

期間も一般的なシックハウス症候群の治療期間、約2年を採用した²⁾。このため本報でもこれらの値をシックハウス症候群に対する DALY D_s とした。表 8 に DALY D_s を示す。

8.2 鼻咽頭のガンの DALY D_s

LIME では、すでに鼻咽頭のガンについては DALY の値を検討している。そのため LIME にて公開されている鼻咽頭のガンの DALY D_s をここでは引用することとした¹⁾。表 8 に値を示す。

8.3 中毒症状の DALY D_s

DALY を開発した Murray によって中毒症状に対する障害の重度は 0.609 と算定されている⁶⁾。但しこの値は重度の中毒症状を対象にしており、ここで対象とする手足の筋力の低下、難聴、集中力低下のような比較的軽度の中毒症状には大きすぎる値と考えられる。本報ではトルエンによる健康被害を詳細に研究している文献 17 を参考とし、専門医の意見も交えながら障害の重度として 0.08 を採用した。また本報で対象としている中軽度の中毒症状により死亡に至ることは稀なことから YLD のみを検討することとした。障害の持続期間には専門医の意見から治療にかかる期間 2 年間とし、表 8 に示す中毒症状に対する DALY D_s の値 ($0.16 = 0.08 \times 2$) を決定した。

9. 人間健康へのダメージ関数 DF の算定

9.1 算定結果

前章までの検討により、3 章(1)式のダメージ関数を求めるための各項が決定された。これより各汚染物質、症状別の計算結果を表 9.1 (居住時) 表 9.2 (施工時) に示す。また室内空気汚染は室内濃度により評価されるケースが多いため、室内濃度あたりのダメージ関数も定義した。これは(1)式の(A)項が汚染物質の発生量と室内濃度を関係付ける項であるため、これを除いた(B)～(D)のみを考慮すると算定できる^{註6)}。表 9.1、9.2 の右端にこれを示す。

算定結果から住宅の違いについて考察すると、戸建住宅より集合住宅のダメージ関数が多い。これは換気回数の設定による室内濃度増加 ΔC の影響が大きいためといえる。今後、換気回数や室広さの設定について十分に検証していく必要がある。また物質の違いを考察するとトルエンよりホルムアルデヒドのダメージ関数の値が多い。これは同じシックハウス症候群でもホルムアルデヒドによる健康被害の症状が重いまたは発症しやすいことを表す。共同研究者の坂部によると実際の患者においてもその傾向が見られ、本報での結果もこれに合う結果になったといえる。

表 9.1 室内空気汚染のダメージ関数【居住時】 (ホルムアルデヒド、トルエン)

住宅	症状	(A) 室内濃度増加 ΔC	(B) 用量反応関係 DR	(C) 対象 人口 P	(D) 疾病の 被害の程度 DALY D _s	(A)×(B)×(C)×(D) 疾病別ダメージ関数 [DALY/kg]	ダメージ関数 [DALY/kg]	濃度あたり ダメージ関数 [DALY/(mg/m ³)]
ホルムアルデヒド								
戸建	シックハウス 症候群(粘膜症状)	3.06×10 ⁻¹ [ppm/kg]	3.78×10 ⁻¹ [QEESI/人/ppm]	2.58 [人]	1.72×10 ⁻² [DALY/QEESI]	5.12×10 ⁻³	シックハウス 症候群のみの ダメージ関数 1.74×10 ⁻²	1.82×10 ⁻²
	シックハウス 症候群(精神症状)	3.06×10 ⁻¹ [ppm/kg]	4.06×10 ⁻¹ [QEESI/人/ppm]		3.83×10 ⁻² [DALY/QEESI]	1.23×10 ⁻²		
	鼻咽頭のガン	3.78×10 ⁻¹ [(mg/m ³)/kg]	1.73×10 ⁻⁴ [case/人/(mg/m ³)]		4.9 [DALY/case]	8.28×10 ⁻⁴		
集合	シックハウス 症候群(粘膜症状)	1.19 [ppm/kg]	3.78×10 ⁻¹ [QEESI/人/ppm]	2.58 [人]	1.72×10 ⁻² [DALY/QEESI]	1.99×10 ⁻²	シックハウス 症候群のみの ダメージ関数 6.74×10 ⁻²	7.06×10 ⁻²
	シックハウス 症候群(精神症状)	1.19 [ppm/kg]	4.06×10 ⁻¹ [QEESI/人/ppm]		3.83×10 ⁻² [DALY/QEESI]	4.75×10 ⁻²		
	鼻咽頭のガン	1.47 [(mg/m ³)/kg]	1.73×10 ⁻⁴ [case/人/(mg/m ³)]		4.9 [DALY/case]	3.21×10 ⁻³		
トルエン								
戸建	シックハウス 症候群(粘膜症状)	3.06×10 ⁻¹ [ppm/kg]	3.00×10 ⁻¹ [QEESI/人/ppm]	2.58 [人]	1.72×10 ⁻² [DALY/QEESI]	4.07×10 ⁻³	シックハウス 症候群のみの ダメージ関数 1.39×10 ⁻²	1.40×10 ⁻²
	シックハウス 症候群(精神症状)	3.06×10 ⁻¹ [ppm/kg]	3.27×10 ⁻¹ [QEESI/人/ppm]		3.83×10 ⁻² [DALY/QEESI]	9.86×10 ⁻³		
	中毒症状	3.78×10 ⁻¹ [(mg/m ³)/kg]	3.65×10 ⁻⁴ [case/人/(mg/m ³)]		0.16 [DALY/case]	5.69×10 ⁻⁵		
集合	シックハウス 症候群(粘膜症状)	1.19 [ppm/kg]	3.00×10 ⁻¹ [QEESI/人/ppm]	2.58 [人]	1.72×10 ⁻² [DALY/QEESI]	1.58×10 ⁻²	シックハウス 症候群のみの ダメージ関数 5.40×10 ⁻²	5.45×10 ⁻²
	シックハウス 症候群(精神症状)	1.19 [ppm/kg]	3.27×10 ⁻¹ [QEESI/人/ppm]		3.83×10 ⁻² [DALY/QEESI]	3.82×10 ⁻²		
	中毒症状	1.47 [(mg/m ³)/kg]	7.77×10 ⁻⁴ [case/人/(mg/m ³)]		0.16 [DALY/case]	4.70×10 ⁻⁴		

表 9.2 室内空気汚染のダメージ関数【施工時】 (ホルムアルデヒド、トルエン)

住宅	症状	(A) ΔC [(mg/m³)/kg]	(B) DR [case/人/(mg/m³)]	(C) P [人]	(D) DALY D _s [DALY/case]	(A)×(B)×(C)×(D) ダメージ関数 [DALY/kg]	濃度あたり ダメージ関数 [DALY/(mg/m³)]
ホルムアルデヒド							
戸建	鼻咽頭のガン	3.78×10 ⁻¹	2.25×10 ⁻⁵	1.53	4.9	6.49×10 ⁻⁵	1.72×10 ⁻⁴
集合	鼻咽頭のガン	1.47	2.25×10 ⁻⁵	1.53	4.9	2.52×10 ⁻⁴	
トルエン							
戸建	中毒症状	3.78×10 ⁻¹	4.81×10 ⁻⁵	1.53	0.16	4.45×10 ⁻⁶	1.94×10 ⁻⁵
集合	中毒症状	1.47	1.02×10 ⁻⁴	1.53	0.16	3.68×10 ⁻⁵	

表 10 室内および屋外における空気汚染のダメージ関数の比較[DALY/kg]

汚染物質	(1) 室内空気汚染のダメージ関数（本研究で算出）	(2) 屋外における空気汚染のダメージ関数 ¹⁾ （LIME で既に定義）
ホルムアルデヒド	1.81×10^{-2} （居住時・戸建住宅）	1.31×10^{-5} （光化学スモッグ+有害化学物質）

9.2 屋外におけるダメージ関数との比較

算出された室内空気汚染のダメージ関数と LIME で提案されている屋外へ同じ汚染物質が排出された場合の人間健康へのダメージ関数（表 10）の値¹⁾を比較すると、室内での影響のほうが約 1000 倍大きい結果になっていることがわかる^{注 7)}。これは室内と屋外で同じ排出量があった場合には、室内空気汚染が人間健康へ与える影響のほうが深刻であることを示す。

9.3 研究結果の応用

本研究で室内空気汚染の評価手法に用いた LIME¹⁾は異なる環境問題等の影響を共通指標である健康被害量(DALY)を用いて評価する。このため例えばホルムアルデヒド低放散建材について環境性や室内空気汚染への影響を同じ指標を用いて同等に評価することができる。通常の建材と比較して加工時にエネルギーをより多く投入するが室内空気汚染には良い製品であるということを総合的に評価できる。これより製品の開発や住宅そのものの評価、また環境問題や室内空気汚染への方策にも役立てられるといえる。今後は具体的な評価例を想定し対象となる汚染物質や症状の拡大を図るほか、精度の向上についても検討していく必要がある。

10. まとめ

- 1) 本研究では、これまで考慮されることがなかった室内空気汚染による人間健康への被害量を定量的に評価する手法「室内空気汚染のダメージ関数」を LIME に倣い、医学分野と工学分野の共同研究により提案した。
- 2) 室内空気汚染による健康被害としては「シックハウス症候群」に加え「発ガン性」「中毒症状」を対象とし「戸建住宅」「集合住宅」「施工段階」各々に対応した評価手法の開発を行った。
- 3) シックハウス症候群の用量反応関係は実際の患者の臨床データを分析することにより決定した。いずれの汚染物質、症状にも室内濃度と症状の重度には相関関係があることがわかった。また統計指標の判断の結果、閾値を持たない回帰式を用量反応関係として採用した。
- 4) 室内空気汚染物質のダメージ関数を用いて製品の評価や室内空気汚染の低減方策へ応用が可能となる。このため実用上の意義があり、更に評価手法の確立や精度向上が重要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、東北大学・吉野博教授、（株）みずほ情報総研・永田裕子氏、両氏に多大なるご協力とご助言をいただいた。ここに記して謝意を評する次第である。

注

- 注 1) DALY (Disability-adjusted Life Year: 障害調整生存年) は、Murray ら⁹⁾が地球規模での健康損失を定量的に算定するため開発し、死亡年齢や障害度を加味した新しい健康指標（単位は損失余命[年]）である。現在 WHO や世界銀行等が開発途上国を中心に多くの国々で政策立案ツールとして利用しつつある。
- 注 2) 文献[7]より戸建住宅の全国平均延床面積は 129.03[m²]であり、文献[8]の建築学会戸建標準問題モデルの延床面積 125.86[m²]と大差がない。今後本手法を用いる場合には室内汚染物質の発生量が必要になるため、内装材の使用面積、換気回数の計算等の際、標準問題モデルを代表としたほうが検討しや

すいケースが多い。このため、戸建住宅の延床面積は建築学会の戸建標準問題モデルの延床面積を用いることとした。

注 3) QEESI では健康時の身体状態も尋ねる項目があり、発症後との差を見ることによりシックハウス症候群によって悪化した健康状態を確認できる。

注 4) データは北里研究所病院・臨床環境医学センターにて共同研究者である坂部貢が診察した実際のシックハウス症候群の患者（ホルムアルデヒド 97 名、トルエン 11 名）によるものである。これらは居住時の曝露による患者のみを対象としているため、本報でのシックハウス症候群の結果は居住時のみとなっている。

注 5) 本研究ではシックハウス症候群の用量反応関係を検討するのに、QEESI 点数を用いた患者データを利用した。これは本来の LIME における DALY 算定方法とは異なる（本来は発症割合のみを用いる）。これより算定式の単位をそろえるため、疾病別 DALY D_s [DALY/case]を疾病別 QEESI 平均点 [QEESI/case]で除すことにより QEESI 1 点に対する DALY [DALY/QEESI]に置き換えて検討した。表 8 ではこれより DALY D_s を [DALY/QEESI]の単位で表示している。

注 6) 室内濃度あたりのダメージ関数とすることで、発生量や住宅の広さによる違いを考慮する必要がなくなる。そのため戸建住宅や集合住宅のモデルを区別する必要もなくなり、表 9 では 1 つの汚染物質に 1 つの値を示している。

注 7) 本研究で算出した室内汚染物質のうち、屋外における空気汚染のダメージ関数として LIME で定義されているホルムアルデヒドを比較の対象とした。LIME では屋外でホルムアルデヒドが発生した場合、光化学スモッグと有害化学物質による影響が引き起こされ、人間健康に被害を及ぼすと考えている。また室内空気汚染のダメージ関数は、使用頻度が高いと思われる居住時の戸建住宅の値を参考とした。

参考文献

- 1) 伊坪徳宏、稲葉敦: ライフサイクル環境影響評価手法、2005.9
- 2) 成田菜採、村上周三、伊香賀俊治ら: 室内空気汚染による健康被害に関する研究(その 1)室内空気汚染のライフサイクルインパクト評価手法の開発、日本建築学会環境系論文集、第 592 号 83-88、2005.6
- 3) 成田菜採、村上周三、伊香賀俊治ら: 室内空気汚染による健康被害に関する研究(その 6)住宅施工段階におけるホルムアルデヒドとトルエンのダメージ関数、空気調和衛生工学会学術講演梗概集、2006.9
- 4) 成田菜採、村上周三、伊香賀俊治ら: 室内空気汚染の被害係数に関する研究、第 2 回 LCA 学会研究発表会、2007.3
- 5) 成田菜採、村上周三、伊香賀俊治ら: 室内空気汚染による健康被害に関する研究(その 2) 換気回数の変化が人間健康被害と内部・外部費用に与える影響のライフサイクルインパクト評価、日本建築学会環境系論文集、第 595 号 129-134、2005.9
- 6) Murray, Christopher J. L., Lopez, Alan D.; Global Health Statistics; A Compendium of Incidence, Prevalence and Mortality Estimates for over 200 Conditions - Global Burden of Disease and Injury, World Health Organization
- 7) 総務省統計局: 平成 12 年国勢調査 第一次基本集計結果（全国結果）統計表 住居の状態（第 17 表）、2001.10
- 8) 宇田川光弘: 標準問題の提案一住宅用標準問題一、日本建築学会第 15 回熱シミュレーションテキスト、pp22-33、1985
- 9) 成田菜採、村上周三、伊香賀俊治ら: 室内ホルムアルデヒドの曝露解析および予測摂取量の算定、平成 16 年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 3、pp1995-1998、2004.9
- 10) 吉野博: 戸建住宅の機密性と換気設備の計画、空気調和・衛生工学、第 54 巻、第 11 号、1980.11
- 11) 吉野博: 住宅の気密性能とその基準に関する動向調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp561-562、1990
- 12) 三原邦彰、吉野博ら: 居住状態の住宅 34 戸における換気量測定、環境の管理、No.52、Page.166-169、2004
- 13) Claudia.S.Miley: The Environmental Exposure and Sensitivity Inventory (ESSI): a standardized approach for measuring chemical intolerance for research and clinical applications、1999
- 14) 柳川亮: 環境と健康データーリスク評価のデータサイエンス、共立出版、2002.6
- 15) 内山敏雄: 化学物質過敏症患者数の全国調査、化学物質過敏症センター、2000
- 16) D.M.カーメン、D.M.ハッセンゼール: リスク解析入門 - 環境・健康・技術問題におけるリスク評価と実践、2001.12
- 17) 中西準子、岸本充生共著、NEDO 技術開発機構、産総研化学物質リスク管理研究センター共編: 詳細リスク評価書シリーズ 3 トルエン、丸善、2005.3
- 18) 総務省統計局: 平成 12 年産業連関表 計数編(2)雇用表、2004.3
- 19) 国土交通省: 建築着工統計調査報告、2006.8

(2007年10月10日原稿受理、2008年2月14日採用決定)