

## 特集

「第15回日本臨床環境医学会総会特別講演」

(臨床環境15:76~83, 2006)

## DALYに基づく室内空気汚染による健康影響の定量的評価

—外部/内部コストを考慮した Full Cost Assessment による換気の効果の評価—

村上 周三

慶應義塾大学 理工学部システムデザイン工学科

## I. 室内空気汚染と健康影響

室内空気汚染は、人類が洞窟で火を使用したときから始まったと言われるように、古くから存在する問題である。一方、近年ホルムアルデヒドやVOC等による化学物質汚染が顕在化し、さらにダニ・カビ等による生物汚染も深刻になりつつある。人体が対外から体内に取り込む物質摂取量(重量比)のうち、食物や水が1割に満たないのに対し、約6割が住宅の室内空気であり、公共施設の室内空気も含めるとその量は圧倒的に大きい<sup>1)</sup>。このため、清潔な室内空気の確保は我々の健康管理のためには非常に重要である。近年、室内空気汚染問題が深刻化する状況を受け、厚生労働省による室内濃度指針値の設定や国土交通省による建築基準法の改正等が行われ、改善の効果が顕著に見られるようになった。従来室内空気汚染問題に対する取り組みは、図1に示すように建築環境工学、医学、化学工学等の各分野で行われる研究がほとんどであった。しかし、室内空気汚染問題の根本的な解決のためには、汚染物質の発生メカニズム(図1、**1**)から人間健康への被害(図1、**3**)まで包括的な研究を行う必要がある。

そこで筆者らは建築環境工学、医学、化学、

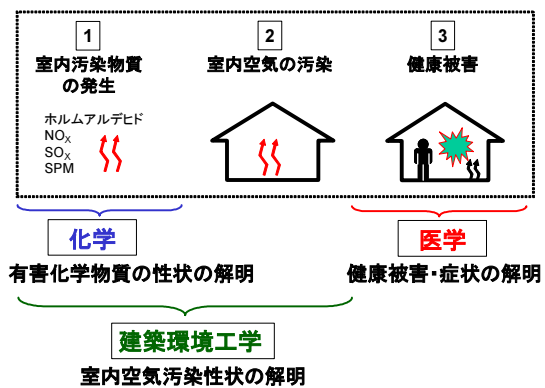


図1 室内空気汚染のメカニズムと各分野における研究の範囲

LCA (Life-Cycle Assessment) 工学等の横断的な専門家による共同研究を行い、汚染物質の発生量から健康被害量を予測することで、室内空気汚染の影響を包括的かつ定量的に評価する手法の開発を進めてきた。

II. 環境影響による被害量の定量的評価手法とLIME<sup>2)</sup>注1)

各種の環境問題は相互に関連する複雑な問題であり、その分析、評価、解決のためには単一の指標で統合的に評価し、最適な対策を選択する必要

《Key words》室内空気汚染、健康被害、生命損失年数 DALY、ダメージ関数、FCA (フルコストアセスメント)

別刷請求宛先: 村上周三

〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科

Reprint Requests to Shuzo Murakami, Department of System Design Engineering, Keio University Faculty of Science and Technology Yagami Campus, 3-14-1 Hiyoshi Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 223-8522 Japan

がある。日本ではこのような問題を解決するために LCA (Life-Cycle Assessment) に関する国家プロジェクト (経済産業省ほか: 1998-2005) において、(独)産業技術総合研究所が日本版被害算定型影響評価手法 LIME (Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint modeling、以下、LIME)<sup>2) 注1)</sup> と呼ばれる手法を開発した。この手法では、図 2 に示すように各種の環境問題による影響を、環境負荷物質の発生量から被害量に換算するための指標 (係数) を用いて、すべての影響を被害量に統合し、その大きさをを用いて環境問題を評価する。

この環境負荷物質の発生量から被害量に換算するための指標は図 2 の下部に示すダメージ関数 [DALY/kg]<sup>注2)、注3)</sup> と呼ばれ、LIME ではすでに多くの環境問題に対してダメージ関数の値や利用方法が定義されている。しかし、それらはすべて屋外で発生した環境問題を対象としたものであり、室内空気汚染に対するダメージ関数はこれまで考えられたことがなかった。そこで、我々はこのダメージ関数、すなわち室内空気汚染の影響を包括的かつ定量的に評価できる手法を LIME に倣い開発することを試みた。

LIME が対象とする被害は、図 3 に示すように人間健康と社会資産 (建築物等)、一次生産 (農作物等)、生物多様性の 4 つであり、それらを統一して評価する場合には、被害金額 (単位: 円) が用いられる<sup>2)</sup>。一方、室内空気汚染による被害は人間健康に対する被害のみであり、この評価には寿命の損失分を意味する DALY<sup>注3)</sup> (Disability Adjusted Life Year: 障害調整生存年、単位: 年、ここでは寿命の損失分を表す年数として、生命損失年数 DALY と呼ぶ) という指標を用いるのが特徴である。DALY は WHO (世界保健機構) でも採用されている指標であり、健康損失の世界的影響を評価するために開発された<sup>3)</sup>。また LIME では DALY に基づく健康被害量を貨幣換算することも可能であり、室内空気汚染による被害は人間健康に対する寿命の損失分を表す DALY [年] と人間健康被害にかかる被害金額 [円] の両者で表すことが可能である。このよう

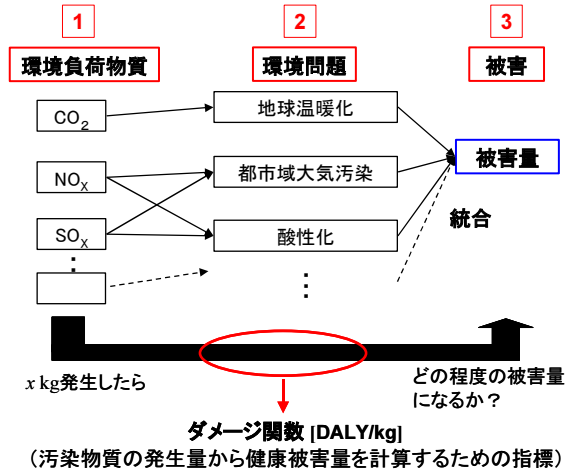


図 2 室内空気汚染による健康被害量のダメージ関数<sup>2)</sup>

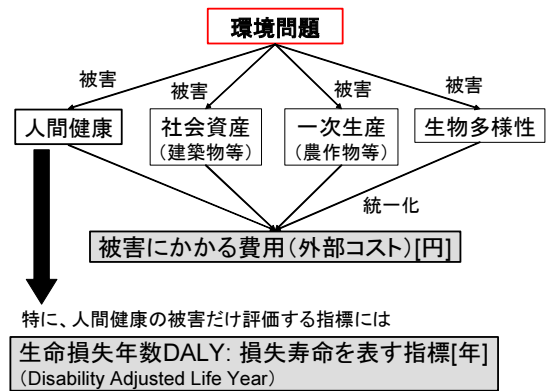


図 3 LIME の被害対象と評価指標<sup>2)</sup>

な室内空気汚染等の環境問題による健康被害にかかる金額 [円] は、いわゆる外部コスト<sup>注4)</sup> に該当する。

### Ⅲ. 室内空気汚染による生命損失年数 (DALY) の評価手法の開発<sup>4)</sup>

#### 1. 室内空気汚染のダメージ関数 [DALY/kg] の算定フロー

人間健康被害を評価するためのダメージ関数の算出過程は大きく 2 つに分けられる。図 4 に示す「運命曝露解析<sup>注5)</sup>」と呼ばれる汚染物質の発生量と室内濃度および曝露量の関係を検討する第 1 ステップと、「疫病リスク」と呼ばれる曝露濃度と

疾病の関係および疾病による被害の程度を検討する第2ステップである。

2. 研究の対象とする室内空気汚染物質と被害の症状

研究の第一段階として、シックハウスの主要な室内汚染物質として知られているホルムアルデヒドの他に、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、SPM (Suspended Particulate Matter：浮遊粉塵) を検討対象とした。それらの物質の曝露によって生じる健康被害(疾病)は、医学専門家の判断に基づき、表1に示す各疾病を考えた。

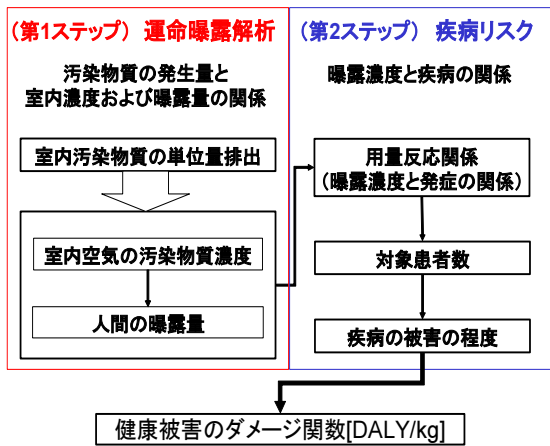


図4 室内空気汚染のダメージ関数算定フロー

3. 運命曝露解析(第1ステップ)

室内空気汚染による曝露を検討するための住宅のモデルは日本建築学会の戸建住宅の標準問題モデル<sup>5)</sup>を用い、換気回数は一般的な住宅を想定し1.0[回/h]<sup>6,7)</sup>とし、室内において1年間、汚染物質が1kg発生した場合の室内濃度の増加分を算出した<sup>4,8)</sup>。

4. 疾病リスク(第2ステップ)

1) 用量反応関係(曝露濃度と疾病の関係)

NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、SPMの曝露濃度と呼吸器系の疾患の関係は既往研究<sup>9)</sup>の結果に倣う。しかし、ホルムアルデヒドの曝露濃度とシックハウス症候群の関係については、これまで世界にも検討例がなかったため、北里研究所病院の石川哲教授、坂部

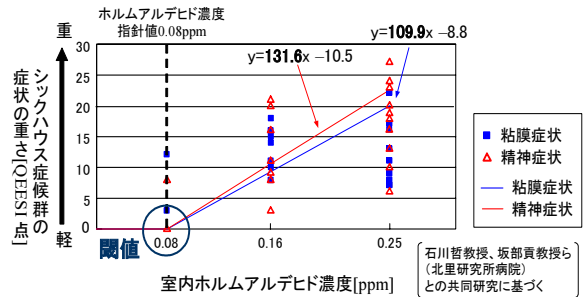


図5 ホルムアルデヒドとシックハウス症候群の用量反応関係

表1 本研究で対象とする室内空気汚染物質と健康被害<sup>4)</sup>

室内空気汚染物質	左記の物質の曝露から引き起こされる健康被害(疾病)
ホルムアルデヒド	シックハウス症候群 ・ 粘膜症状 ・ 精神症状
NO <sub>x</sub>	呼吸器系疾患 ・ 呼吸器系疾患による入院
SO <sub>x</sub>	・ 急性死亡
PM10 (粒径 10μm)	呼吸器系疾患 ・ 呼吸器系疾患による入院 ・ 急性死亡 ・ 気管支拡張剤の使用 ・ 咳 ・ 喘鳴
PM2.5 (粒径 2.5μm)	・ 慢性気管支炎 ・ 慢性の咳 ・ 行動制限日 ・ 慢性閉塞性肺疾患 ・ 喘息 ・ 未就学児の咽頭気管支炎

貢教授等と共同研究グループを構成し、本研究グループで独自に検討を行った。医学的知見に基づき実際の患者データを利用し定量化した室内ホルムアルデヒド濃度とシックハウス症候群の用量反応関係を図5に示す。

2) 対象患者数

検討モデルの中で室内空気汚染の被害の対象となる者の人数を考える。ここでは一般的な住宅に暮らす人数と考え、日本の平均世帯人数、2.72人(2000年国勢調査)を用いた。なお、日本全体としての被害については次章で述べる。

3) 疾病の被害の程度

検討している疾病(シックハウス症候群、呼吸器系疾患)に対して被害の程度を生命損失年数DALYを用いて定量化する。DALYは寿命の損失分を意味する指標であるが、疾病によって死に至り、その分寿命が短縮した期間[年]を表すYLL(Years of Life Lost)と、疾病によって死には至らないまでも障害を負うことで生活の質が低下した分を寿命の損失年数に換算したYLD(Years Lived with Disability)とを別々に定義し、足し合わせる。これをモデル化して図6に示す<sup>2,10)</sup>。

NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、SPMにより引き起こされる呼吸器系の疾患については、既往研究<sup>11)</sup>によって検討が成されているため、その結果を引用することとした。一方、ホルムアルデヒドによるシックハウス症候群はこれまで研究された例がなかったため、本研究が新たに値の検討を行った。共同研究者の

坂部により、すでに生命損失年数DALYが算出されている他の疾病を参考とし、シックハウス症候群の被害の程度を表すDALYが定義された<sup>4)</sup>。

4) ダメージ関数の算定

以上の検討により、ダメージ関数の導出を行うことが可能となる。(詳しい計算の過程については文献4を参照されたい。)

これよりホルムアルデヒドやNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、SPMの室内中の発生量がわかれば、そのとき生じると予想される健康被害量を生命損失年数DALYを用いて定量的に算出することが可能となった。表2に算定した室内空気汚染のダメージ関数を示す。この結果、先にLIMEで定義されていた各種の環境問題に加え、室内空気汚染も含めた総合評価が可能となった。

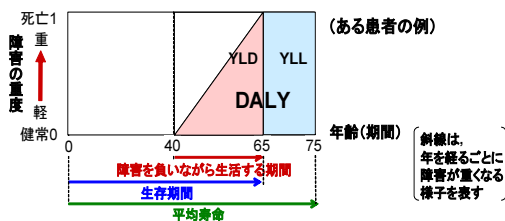
表2 室内空気汚染のダメージ関数<sup>4)</sup>

室内空気汚染物質	ダメージ関数 [DALY/kg]
ホルムアルデヒド	$5.96 \times 10^{-3}$
NO <sub>x</sub>	$1.96 \times 10^{-3}$
SO <sub>x</sub>	$4.14 \times 10^{-3}$
PM10	$1.40 \times 10^{-1}$
PM2.5	$3.68 \times 10^{-1}$

IV. 室内起因、屋外起因の空気汚染による健康被害量の比較<sup>12)</sup>  
(日本全国について)

これまでLIMEで開発されてきたダメージ関数は屋外の環境問題を対象としており、被害範囲も地球規模または日本全国と広い範囲である<sup>2)</sup>。一方、筆者らが開発した室内空気汚染のダメージ関数は、LIMEや他の世界的な環境影響評価手法<sup>注1)</sup>の中でも唯一、室内起因の環境問題を対象としており、被害範囲の単位は1戸の住宅である。人類は一般に全時間の75~90%を室内で過ごすとも言われ、被害の範囲は小さくとも、屋外起因の環境問題と同様に室内起因の環境問題も議論されるべきである。今回、室内空気汚染の影響を検討できるようになったため、室内起因、屋外起因の環境問題による健康被害量について合わせて検討することを考えた。

今回の研究では、室内起因の環境問題を室内空



DALY(生命損失年数) = YLD(ピンクの面積) + YLL(水色の面積)

<p><b>YLD (Years Lived with a Disability)</b>                  : 障害を負うことで低下した生活の質                  =&gt; 損失年数に換算                  = 障害の重度                  × 障害を負いながら生活する期間</p>	<p><b>YLL (Years of Life Lost)</b>                  : 死亡することで失った年数                  = 障害の重度(死亡=1)                  × (平均寿命-生存期間)</p>
---	--

図6 健康被害量を表すDALY

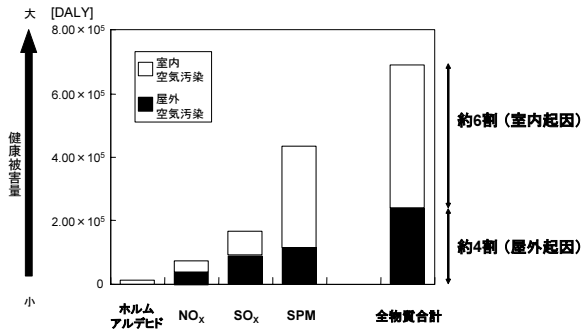


図7 空気汚染による健康被害量 (日本人全体)

気汚染に限定して着目しているため、屋外起因の環境問題も同様に空気汚染に着目し、両者の被害の範囲を日本全国 (日本人全体) に統一して両者を比較することとした。屋外起因の空気汚染による健康被害量については、屋外で発生している汚染物質の発生量を調査し、その値からダメージ関数を用いて日本人全体の健康被害量を生命損失年数 DALY を用いて算出した<sup>12)</sup>。室内起因の空気汚染による健康被害量については、個々の住宅で発生する健康被害を日本の住宅全体で総計するという考え方で、日本人全体の健康被害量を算出した。その結果、図7に示すように空気汚染による日本人全体の健康被害量 (生命損失年数 DALY) は約6割が室内起因の影響であり、約4割の影響が屋外起因であることがわかった。約6割の室内起因の健康被害量については今回の筆者らの研究開発により評価が可能となった部分であり、今まで考慮できていなかった室内起因の空気汚染の影響が極めて大きいことがわかった。

## V. 換気の効果に関する外部／内部コストの両者を考慮した FCA

(Full Cost Assessment)<sup>13)</sup>

健康被害も含め環境問題によって生じた被害にかかる費用を外部コスト<sup>注4)</sup>と呼ぶが、それに対してユーザーが自分で実際に支払う費用 (例えば、住宅の購入費や電気代、水道代など) を内部コストと呼ぶ。この外部コストと内部コストを合わせてフルコストといい、フルコストで行う評価をフルコストアセスメント (FCA) という。

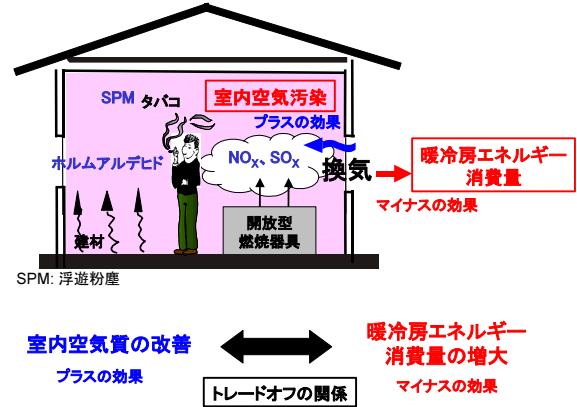


図8 換気量増大と環境負荷増加のトレード・オフ

ここでは、次のような問題を検討する。室内空気汚染を抑制するためには、住宅内に十分な換気量を確保することが必要であるが、図8に示すように換気量の増大は、室内空気質の改善というプラスの効果をもたらす一方で、換気による環境負荷の増加、すなわち暖冷房エネルギー消費の増大に伴う地球温暖化、都市域大気汚染というマイナスの効果をもたらすことが指摘される。このようなトレード・オフの関係を有する課題を評価するために、筆者らが開発した室内空気汚染のダメージ関数や LIME の他のダメージ関数を用いて、複数の環境問題の影響を統一的に評価する。更に被害費用 (外部コスト) を算出し、暖冷房費用 (内部コスト) と合わせた FCA を行う。

前節同様に日本建築学会の戸建住宅標準モデルを用いて、換気量増大による暖冷房負荷に対するシミュレーションを行った。検討の対象とした環境問題および環境負荷物質 (燃料消費による) については図9に示す。これらの発生量に各環境問題のダメージ関数を乗じて外部コストとした結果を図10に示す。

複数の環境問題がもたらす外部コストのうち、室内空気汚染のもたらす健康被害による外部コストが最も大きいことがわかる。これは、いずれの断熱水準についても同様である。換気量の増大は、当然のことながら室内空気汚染の改善にはプラスの効果であるため、健康被害による外部コストは

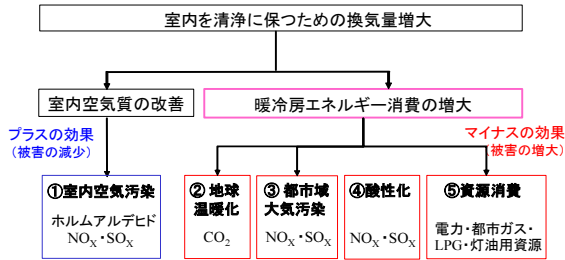


図9 換気量増大に伴い発生する環境問題および環境負荷物質(資源消費)

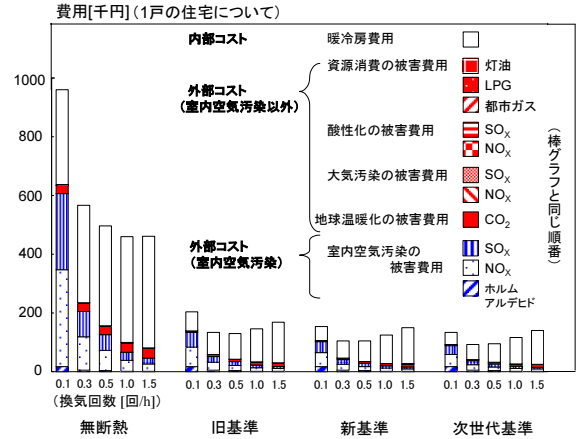


図11 フルコストの算定結果 (FCA)

(図10、11は札幌の結果、他の地域も同様の傾向を示した)

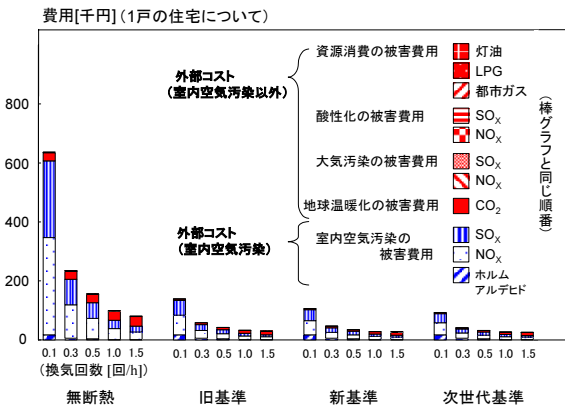


図10 外部コストの算定結果(室内空気汚染とそれ以外の環境問題による被害をもたらす費用)

(グラフ下部の無断熱、旧基準、新基準、次世代基準は、国土交通省が制定した住宅の断熱水準を示す。旧基準、新基準、次世代基準はそれぞれ1980年、1992年、1999年に制定。右にいくに従い断熱水準が高くなる。)

換気量の増大に伴って一方的に減少する。

更に内部コストと合わせてフルコストとした結果を図11に示す。

換気量の増大は、暖冷房負荷を増加させるため内部コストを増加させる。外部コストと内部コストの合計は、今回の条件では換気回数0.5 [回/h]前後のときに最小となることがわかった。これよりFCAの観点からは換気量を一方的に増加すればいいものではないことが判明し、適切な換気回数(本事例では0.5 [回/h]前後)を選択する必要があることがわかった。

## VI. まとめ

1. 建築環境工学、医学、化学等の共同研究により、日本版被害算定型影響評価手法 LIME をベースに室内空気汚染をもたらすいくつかの物質について健康被害を定量的に評価する手法を開発した。
2. 得られた評価手法を用いて、室内で生じる空気汚染の影響を評価した(日本全体)。同時に屋外で発生する空気汚染による健康影響を評価し、両者を比較した結果、室内で生じる空気汚染の影響が大きいことがわかった。
3. 換気量増大に伴う外部/内部コストのトレード・オフ関係についてFCAを行った(開発した室内空気汚染の評価手法とLIMEですでに定義された評価手法を利用)。この結果、フルコストの観点からは適切な換気回数を選択することが必要であることがわかった。

## 注釈

- 1) LIME は地球温暖化やオゾン層破壊等の環境問題の影響を人間健康や生態系、社会資産へ生じる被害に統合、換算し、被害量の大小を用いて環境問題の影響を評価する手法である。海外でも環境影響の被害算定を包括的に評価する手法としてEco-Indicator'99(欧州)や

EPS (スウェーデン) など同様のものが開発されており、近年注目を集めている学問分野である。

- 2) ダメージ関数とは、環境媒体中にある物質が単位量発生した場合の保護対象 (LIME の中で被害の対象として考えられているもの、人間健康、生物多様性、社会資産、一次生産の4つがある) に対する被害量である。物質の発生量 [kg] とダメージ関数 [保護対象に対する被害量/kg] との積により保護対象に生じうる被害量を予測することができる。人間健康に関するダメージ関数は、DALY<sup>注3)</sup> という寿命の損失分を意味する指標 (単位: [年]) を用いて表される。
- 3) DALY (Disability-adjusted Life Year: 障害調整生存年) は、地球規模での健康損失を定量的に算定するため開発され、死亡年齢だけでなく健康障害度を加味した新しい健康指標 (単位: [年]) である。図6にこの概念をモデル化して示す。現在、世界の多くの国々で政策立案のツールとして利用されている。ここでは DALY が寿命の損失年数を表すことから生命損失年数 DALY という言葉で表現することとする。
- 4) 外部コストとは個人や企業などの活動により社会や地球環境に与える環境負荷、または負荷対策として社会が支払う環境費用のことを言う。これに対して個人や企業などが自身で直接支払う費用を内部コストという。
- 5) 運命とは、化学物質の運命を指し、環境媒体中での挙動や性質のことを意味する。

## 文献

- 1) 村上周三: 住まいと人体—工学的視点から—, 臨床環境医学 9: 49-62, 2000
- 2) 伊坪徳宏、稲葉敦: ライフサイクル環境影響評価手法—LIME-LCA、環境会計、環境効率のための評価手法・データベース. 産業環境管理協会, 2005
- 3) Christopher JL Murray, Alan D Lopez: Global Health Statistics; A Compendium of Incidence, Prevalence and Mortality Estimates for over 200 Conditions, World Health Organization, Harvard School of Public Health, World Bank, Harvard University Press Boston: 1010, 1996, (Global Burden of Disease and Injury Series, 2).
- 4) 成田菜採、村上周三、他: 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—室内空気汚染による健康被害に関する研究—. 日本建築学会環境系論文集592: 83-88, 2005
- 5) 宇田川光弘: 標準問題の提案—住宅用標準問題—. 日本建築学会第15回熱シンポジウムテキスト: 22-33, 1985
- 6) 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: 561-562, 1990
- 7) 三原邦彰、吉野博、他: 居住状態の住宅34戸における換気量測定. 環境の管理52: 166-169, 2004
- 8) 成田菜採、村上周三、他: 室内ホルムアルデヒドの暴露解析および日予測摂取量の算定. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集3: 1995-1998, 2004
- 9) Holland, et al: ExternE Externalities of Energy, Methodology 1998 Update. European Communities, Luxemburg, 1999
- 10) Mauritz Glaumann: Weighting, a Precondition for Practical Application of Environmental Assessment, But to what extent can it be objective?, Sweden-Japan Workshop on Assessment of Sustainable Buildings and Cities, Institute for Building Environment and Energy Conservation, 2006
- 11) Hofstetter: Perspective in Life Cycle Impact Assessment. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998
- 12) 成田菜採、村上周三、他: 室内空気汚染のダメージ関数を用いた日本人全体の健康被害量の推計—室内空気汚染による健康被害に関する

- る研究(その5). 日本建築学会大会学術講演梗概集: 899-900、2006
- 13) 成田菜採、村上周三、他: 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—室内空気汚染による健康被害に関する研究(その2)—、日本建築学会環境系論文集595: 129-134、2005