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)—

LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT ON THE HUMAN HEALTH DAMAGES AND INTERNAL/EXTERNAL EXPENSES CONCERNED WITH AIR CHANGE RATE

Study on health damage caused by indoor air pollution (Part 2)

成田 菜採*, 村上周三**, 伊香賀 俊治***

坂部 貢****, 伊坪徳宏*****, 水石 仁*****

Natsumi NARITA, Shuzo MURAKAMI, Toshiharu IKAGA,

Kou SAKABE, Norihiro ITUBO and Tadashi MIZUISHI

The residences in which indoor ventilation is lacking are increasing due to the improvement of air-tightness. Reflecting this situation, the health damages by the indoor air pollution, such as sick house syndrome, have become one of the most serious social problems. Increase of the amount of ventilation is recommended for improving indoor air pollution. While replacing indoor air with outdoor one frequently has positive effects on indoor air pollution, it has negative effects on energy saving and global warming mitigation. Therefore, in order to take measures to prevent the health damages caused by indoor air pollution, it is necessary to assess rationally such a trade-off relation among various environmental issues. In this study, the effect of the ventilation on direct health damages by indoor air pollution, and on indirect damages by global warming and air pollution is evaluated quantitatively and integrally using LIME; Life-Cycle Impact Assessment Method of Endpoint modeling. Furthermore relation between the effectiveness of the improvement of indoor air pollution on health damages and internal / external expenses is examined. The result of assessment proves that ventilation is effective in both human health damages and total expenses. In particular, it becomes clear that the total of internal / external expenses becomes least when air change rate is about 0.5 times/h.

Keywords : sick building syndrome, health damage, internal/external expenses, disability adjusted life year, ventilation, indoor air pollution, air pollution, global warming

シックハウス、健康被害、内部・外部費用、DALY、換気、室内空気汚染、都市域大気汚染、地球温暖化

1. はじめに

近年のシックハウス問題の深刻化を背景に、室内空気を清浄に保つための方策のひとつとして、平成 15 年度の建築基準法の改正により、換気回数 0.5 回/h 以上の機械換気設備の設置 (住宅の場合) が義務付けられ、室内に十分な換気量を確保することが推奨されている。しかし、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、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、本報では、既報¹⁾で算出した室内で発生するホルムアルデヒド、NO_x、SO_x による人間健康へのダメージ関数 DF²⁾を用いて、①室内空気汚染、②地球温暖化、③都市域大気汚染による健康被害を総合評価する方法を提案し、換気による室内空気質改善策の有効性を検討する。さらに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)^{注 2) 文 2) 文 3)}で算出されている統合化係数^{注 3) 文 2)}を用いて④健康被害額 (外部費用^{注 4)}) に貨幣換算し、⑤暖冷房費用 (内部費用) と共に総合評価する手法を提案した。

2. 室内空気汚染による健康被害の評価方法

本研究では代表的な室内空気汚染の原因物質として建材等から放散するホルムアルデヒドと開放型暖房器具の使用により室内に発生する NO_x、SO_x を対象とする。また、地球温暖化の原因物質には暖冷房エネルギー消費により屋外に排出される CO₂ を対象とし、都市域大気汚染の原因物質には、暖冷房エネルギー消費により屋外に排出される NO_x、SO_x を対象として、図 1 に示す手順で算定する。

2.1 室内空気汚染による健康被害量 D_{HH(m)} の算定方法

室内空気汚染による人間健康への被害量 D_{HH(m)} は、(1) 式に示すように、建材等から放散されるホルムアルデヒド、開放型暖房器具から

* 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

*** ㈱日建設計環境計画室 室長・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 助教授・工博

***** 野村総合研究所 研究員・工修
(元 慶應義塾大学大学院)

Graduate Student, Keio Univ.

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

General Manager, Environmental Engineering Group, Nikken Sekkei Ltd., Dr. Eng.

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

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

Researcher, Nomura Research Institute Ltd., M. Eng.

(Former Graduate Student, Keio Univ.)

排出される NO_x 、 SO_x などの室内空気汚染物質(mi) 毎の人間健康へのダメージ関数 $DF_{HH(mi)}$ に室内空気汚染物質 (mi) の年間排出量 M_{mi} と住宅内滞在時間率 R_{ti} の積として定義できる。①室内空気汚染によるダメージ関数については、既報^{文1)}に基づく算出方法に従い、換気回数別に算出した。住宅内滞在時間率 R_{ti} については、一般的なリスク解析に倣い、通常人生の 75% を住宅内で過ごす^{文4)}として、0.75 とした。

室内空気汚染による健康被害量 $D_{HH(mi)}$ の算定式

$$D_{HH(mi)} = DF_{HH(mi)} \times R_{ti} \times M_{mi} \quad \dots (1)$$

ここに

$D_{HH(mi)}$: 室内空気汚染物質 mi による健康被害量[DALY^{注5)}]

$DF_{HH(mi)}$: 室内空気汚染物質 mi の単位排出量あたりの人間健康へのダメージ関数[DALY/kg] (表7参照)

R_{ti} : 住宅内滞在時間率[-] (=0.75)

M_{mi} : 室内空気汚染物質 mi の年間排出量[kg]

2.2 地球温暖化と都市域大気汚染による健康被害量 $D_{HH(mo)}$ の

算定方法

地球温暖化、都市域大気汚染による人間健康への被害量 $D_{HH(mo)}$ は、(2)式に示すように、LIME においてすでに算出されている CO_2 排出による②地球温暖化のダメージ関数および、 NO_x 、 SO_x 排出による③都市域大気汚染のダメージ関数 $DF_{HH(mo)}$ ^{文2)文3)}と暖冷房エネルギー消費により屋外に排出される各環境負荷物質(mo)の年間排出量 M_{mo} ^{注6)}との積として定義される。室内空気汚染によるダメージ関数の算定^{文1)}では、汚染質の単位排出量による室内空気汚染濃度の増加分 ΔC を求めるのに、屋外濃度を初期値(基準)として算出した。このため室内に滞在する時間率 R_{ti} を考慮し、室内に滞在している時間だけ被害影響を受けると考えた。これに対し、都市域大気汚染に関する被害は屋外環境を対象としており、外気(屋外)濃度はバックグラウンド濃度として24時間影響するため、室内空気汚染による健康被害量の計算で用いた滞在時間率 R_{ti} を考慮する必要はない。

地球温暖化、都市域大気汚染による健康被害量 $D_{HH(mo)}$ の算定式

$$D_{HH(mo)} = DF_{HH(mo)} \times M_{mo} \quad \dots (2)$$

ここに

$D_{HH(mo)}$: 地球温暖化物質、都市域大気汚染物質 mo による健康被害量[DALY]

$DF_{HH(mo)}$: 地球温暖化物質、都市域大気汚染物質 mo の単位排出量あたりの人間健康へのダメージ関数[DALY/kg] (表9参照)

M_{mo} : 屋外排出汚染物質 mo の年間排出量[kg]

2.3 人間健康の被害費用(外部費用^{注4)}) ED_{HH} の算定方法

2.1 節で算出方法を示した室内空気汚染物質、地球温暖化物質、都市域大気汚染物質による人間健康への被害量 D_{HH} ($=\sum D_{HH(mi)} + \sum D_{HH(mo)}$) に、LIME で提案されている人間健康の統合化係数 WF_{HH} (9.70×10^6 [円/DALY]^{文2)} を乗ずることで(3)式に示すように被害量を被害費用 ED_{HH} に貨幣換算することができる。人間健康に関する統合化係数 WF_{HH} の値として、一般の消費者を対象としたアンケート調査「損失余命に対する支払い意思額」の結果から、コンジョイント分析を利用して開発された値を引用した^{文2)文5)}。

図1 換気による室内空気質改善策と暖冷房エネルギー消費増大のトレード・オフの関係

1F 平面図

2F 平面図

図2 建築学会標準住宅モデル（戸建住宅）^{文6)}

表1 住宅モデル概要^{文6)}

住戸モデル: 建築学会標準モデル(木造戸建住宅) 総2階 5LDK		
住戸面積: 125.9m ²	開口率: 24.5%	LDK 占有率: 22.4%

表2 住宅モデル室容積・室内表面積^{文6)}

	床面積[m ²]	壁面積[m ²]	天井面積[m ²]	室容積[m ³]
1階 LDK※	27.7	49.8	27.7	66.5
1階和室※	13.3	35.4	13.3	31.8
1階洗面※	5.0	19.4	5.0	11.9
1階玄関ホール※	12.0	32.3	12.0	28.9
1階浴室	3.3	13.6	3.3	7.9
1階トイレ	1.7	11.2	1.7	4.0
2階 MB※	20.5	40.1	20.5	49.2
2階 CB1※	11.6	33.2	11.6	27.8
2階 CB2※	11.6	31.1	11.6	27.8
2階予備室※	10.1	25.7	10.1	24.3
2階ホール※	7.5	20.3	7.5	17.9
2階トイレ	1.7	11.2	1.7	4.0
合計	125.9	323.2	125.9	302.1
(※合計)	(119.2)	(287.3)	(119.2)	(286.2)

※1)室内空気汚染物質の放散対象とした室内表面

2)押入れは存在しないものとして、壁・床・天井の面積を計上

3)壁面積から窓、外部建具、内部建具の面積を除外

人間健康に関する被害費用 ED_{HH} 算定式

$$ED_{HH} = D_{HH} \times WF_{HH} \quad \dots (3)$$

ここに

 ED_{HH} : 人間健康に関する被害費用[円] D_{HH} : 人間健康への被害量[DALY] WF_{HH} : 人間健康に関する統合化係数 (9.70×10^{-6}) [円/DALY]

3. 室内空気汚染による健康被害の評価結果

3.1 住戸モデルの設定

解析モデルには、建築学会の戸建住宅標準モデル⁵⁶⁾ (図2、表1、表2)を用いた。対象地域には、住宅数の最も多い東京と暖冷房負荷の最も大きい札幌の2地域を選定し、断熱水準を無断熱および住宅の省エネルギー基準における旧基準、新基準、次世代基準の4ケースとした。換気回数については0.1、0.3、0.5、1.0、1.5[回/h]の5ケースについて検討を行う。表3に換気回数1.0[回/h]における住宅の熱損失係数を示す。

3.2 換気回数別エネルギー消費量の算定

暖冷房による CO_2 、 NO_x 、 SO_x の排出量を算定するにあたり、標準気象データを用いた年間暖冷房負荷計算を行った。住宅用熱負荷計算プログラムには「SMASH」⁵⁷⁾を用いた。熱負荷シミュレーション結果については、実態調査⁵⁸⁾によるエネルギー消費量と比較し、ほぼ一致することを確認している。表4に暖冷房設定温度および湿度を示す。その他、部位仕様、暖冷房スケジュール、各室の使用状況等は建築学会標準問題⁵⁶⁾に準じた。但し、暖冷房スケジュールに関しては実態調査⁵⁸⁾によるエネルギー消費量と比較し、一部の地域において改良スケジュール⁵⁹⁾を用いた。図3に暖冷房スケジュールを示す。算出した年間暖冷房負荷を家庭用暖冷房エネルギー消費内訳(表5)および暖冷房器具の機器効率(表6)を考慮し、暖冷房エネルギー消費量に換算した。換気回数別・断熱水準別の暖冷房エネルギー消費量を図4に示す。

3.3 ホルムアルデヒドの室内放散量の算定

ホルムアルデヒドは床、壁面、および天井から一様に放散され発生するものとした。一般的な住宅を想定し、床には放散等級F☆☆☆ (最大放散速度 $20\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)、壁面・天井には放散等級F☆☆☆☆ (最大放散速度 $5\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) の内装材を使用するものとした。建材から放散するホルムアルデヒドについては、同物質が放散開始後から数年間は材料内で加水分解によって生成され続け、放散量がほぼ一定となること

表3 断熱水準別熱損失係数 (換気回数 1.0 回/h)

熱損失係数 [W/m ² K]	無断熱	旧基準	新基準	次世代基準
東京	8.42	4.34	3.34	2.64
札幌	8.42	2.43	2.15	2.04

表4 暖冷房設定温度および湿度

暖房	温度：東京 20℃ 札幌 24℃	湿度：設定なし
冷房	温度：28℃	湿度：60%

表5 家庭用暖冷房エネルギー消費内訳¹⁸⁾ [-]

2000 年度		電力	都市ガス	LPG	灯油
(1) 関 東	暖房	0.15	0.23	0.05	0.57
	冷房	1.00	0.00	0.00	0.00
(2) 北海道	暖房	0.04	0.02	0.00	0.94
	冷房	0.00	0.00	0.00	0.00

表6 暖冷房器具機器効率⁹⁾ [-]

暖房				冷房
電力	都市ガス	LPG	灯油	電力
2.2	0.8	0.8	0.8	2.7

図4 換気回数別・断熱水準別の暖冷房エネルギー消費量 (二次エネルギー換算値)

が加藤信介、田辺新一らの研究¹⁰⁾よりわかっている。文献 10 によると、放散速度が安定する値は、各放散等級の最大放散速度かもしれないが、それより若干小さい値となるが、建材によるばらつきがあるため、本研究では、最大放散速度を用いることとした。床・壁・天井材から室内へのホルムアルデヒドの年間放散量 M_{HCHO} は、表 2 に示す各部位の面積を用いて (4) 式に示す通り $38.7 \times 10^3 \text{ kg/年}$ と計算できる。これに既報¹¹⁾に従い算出した各換気回数における室内ホルムアルデヒドのダメージ関数 $DF_{\text{FH}}(\text{HCHO})$ (DALY/kg) (表 7) を乗じて、室内ホルムアルデヒドによる人間健康への被害量 $D_{\text{FH}}(\text{HCHO})$ を算出した (図 5)。

ホルムアルデヒドの室内年間放散量 M_{HCHO}

$$M_{\text{HCHO}} = S_m \times v_d \cdots (4)$$

ここに

M_{HCHO} : ホルムアルデヒドの室内年間放散量[kg/年]

S_m : 住戸モデル各部位の総面積[m²]

v_d : 各部位におけるホルムアルデヒドの放散速度[μg/m²h]

(床面): $119.2[\text{m}^2] \times 20[\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}] = 2.38[\text{mg}/\text{h}]$

(天井面): $119.2[\text{m}^2] \times 5[\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}] = 0.60[\text{mg}/\text{h}]$

(壁面): $287.3[\text{m}^2] \times 5[\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}] = 1.44[\text{mg}/\text{h}]$

(住宅全体): $(2.38 + 0.60 + 1.44)[\text{mg}/\text{h}] \times 24[\text{h}/\text{日}] \times 365[\text{日}/\text{年}]$
 $= 38.7 \times 10^3[\text{mg}/\text{年}] = 38.7 \times 10^{-3}[\text{kg}/\text{年}]$

3.4 NO_xの室内排出量の算定

(5)式に示す算出式により、図 4 に示す換気回数別暖冷房エネルギー消費量と、単位エネルギー消費あたりの NO_x 排出係数⁷⁾ (表 8) を乗ずることで、開放型暖房器具¹⁰⁾からの年間 NO_x 室内排出量 M_{NOx} を算出する。都市ガス、LPG、灯油の燃焼による NO_x 排出を対象とし、電力消費による室内への NO_x 排出はないものとしている。室内での年間 NO_x 排出量 M_{NOx} に、既報¹¹⁾に従って算出した各換気回数における NO_x のダメージ関数 $DF_{\text{FH}}(\text{NOx})$ (DALY/kg) (表 7) を乗じて、室内で排出された NO_x による人間健康への被害量 $D_{\text{FH}}(\text{NOx})$ を算出した (図 5)。

NO_xの室内年間排出量 M_{NOx}

$$M_{\text{NOx}} = F_{\text{NOx}} \times E_{\text{heat}} \cdots (5)$$

ここに

M_{NOx} : 燃料 e による NO_x の室内年間排出量[g-NO₂/年]

F_{NOx} : 燃料 e の NO_x 排出係数[g-NO₂/MJ] (表 8 参照)

E_{heat} : 燃料 e の暖房による年間消費量[MJ/年] (図 4 参照)

3.5 SO_xの室内排出量の算定

(6)式に示す算出式により、図 4 に示す換気回数別の暖冷房エネルギー消費量と、単位エネルギー消費あたりの SO_x 排出係数⁸⁾ (表 8) を乗ずることで室内での SO_x の年間排出量 M_{SOx} を算出する。開放型暖房器具¹⁰⁾から室内への SO_x の排出は灯油の燃焼にのみ起因し、他のエネルギー消費による SO_x の排出はないものとする。室内での SO_x の年間排出量 M_{SOx} に既報¹¹⁾に従って算出した各換気回数における SO_x のダメージ関数 $DF_{\text{FH}}(\text{SOx})$ (DALY/kg) (表 7) を乗じて、室内で排出された SO_x による人間健康への被害量 $D_{\text{FH}}(\text{SOx})$ を求めた (図 5)。

表 7 室内空気汚染物質 mi 毎のダメージ関数 $DF_{\text{FH}}(mi)$ [DALY/kg] (24 時間・365 日在室の場合の値)

単位[×10 ³]	換気回数[回/h]					単位濃度あたりの被害量
	0.1	0.3	0.5	1.0	1.5	
ホルムアルデヒド [DALY/kg]	59.6	19.9	11.9	5.96	3.98	15.8 [DALY/(mg/m ³)]
NO _x [DALY/kg]	19.6	6.54	3.92	1.96	1.30	5.19 [DALY/(mg/m ³)]
SO _x [DALY/kg]	41.4	13.8	8.28	4.14	2.76	11.0 [DALY/(mg/m ³)]

表 8 エネルギー種別の CO₂、NO_x、SO_x 排出係数^{7),8),9)}

☆印燃料別単位	電力 [kWh]	都市ガス [MJ]	LPG [MJ]	灯油 [MJ]
CO ₂ [kg-CO ₂ /☆]	0.379	0.051	0.059	0.069
NO _x [g-NO ₂ /☆]	0.342	8.84×10^{-3}	8.84×10^{-3}	9.47×10^{-3}
SO _x [g-SO ₂ /☆]	0.302	—	—	3.49×10^{-3}

注)電力の CO₂、SO_x、NO_x は、発電所の煙突から排出され、室内には排出されない。また、電力の NO_x、SO_x 排出係数は、産業連関分析に基づく他の産業での誘発排出を含む国内消費の値であり、大きめの値となっている。

表 9 地球温暖化、都市域大気汚染物質 mo のダメージ関数 $DF_{\text{FH}}(mo)$ [DALY/kg] ^{文 2) 文 3)}

環境負荷物質	環境影響	ダメージ関数	
CO ₂	地球温暖化	7.25×10 ⁸	
NO _x	都市域大気汚染	線源	7.41×10 ⁻⁶
		点源	1.64×10 ⁻⁶
		二次	1.29×10 ⁻⁵
		線源＋二次	2.03×10 ⁻⁵
		点源＋二次	1.45×10 ⁻⁵
SO _x		一次	3.46×10 ⁻⁶
		二次	1.01×10 ⁻⁴
		一次＋二次	1.05×10 ⁻⁴

表 10 家庭用エネルギー種別価格(2000 年度値)

電力 ⁸⁾	都市ガス ⁸⁾	LPG ¹⁴⁾	灯油 ¹⁴⁾
27 円/kWh	2 円/MJ	5 円/MJ	1 円/MJ

SO_xの室内年間排出量 M_{SOx}

$$M_{\text{SOx}} = F_{\text{SOx}} \times E_{\text{heat}} \cdots (6)$$

ここに

M_{SOx} : 燃料 e による SO_x の室内年間排出量[g-SO₂/年]

F_{SOx} : 燃料 e の SO_x 排出係数[g-SO₂/MJ] (表 8 参照)

E_{heat} : 燃料 e の暖房による年間消費量[MJ/年] (図 4 参照)

3.6 暖冷房に伴う CO₂ 排出量と地球温暖化による健康被害量の算定

(7)式に示す算出式により、図 4 に示す換気回数別の暖冷房エネルギー消費量と、表 8 に示す CO₂ 排出係数¹²⁾ を乗ずることで屋外への CO₂ 排出量 M_{CO2o} が算出される。これに表 9 に示す LIME ^{文 2) 文 3)} においてすでに算出されている屋外への CO₂ 排出によるダメージ関数 7.25×10^{-8} (DALY/kg) を乗ずることで、地球温暖化による人間健康への被害量 $D_{\text{FH}}(\text{CO2o})$ を算出した (図 5)。

CO₂、NO_x、SO_xの屋外年間排出量 M_{mo}

$$M_{mo} = F_{mo} \times E_e \cdots (7)$$

ここに

M_{mo} : 燃料 e の屋外排出汚染物質 mo の年間排出量[g-mo/年]

F_{mo} : 燃料 e の屋外排出汚染物質 mo の排出係数[g-mo/MJ]

(表 8 参照)

E_e : 燃料 e の暖冷房による年間消費量[MJ/年] (図 4 参照)

3.7 暖冷房に伴う NO_x・SO_x 排出量と都市域大気汚染による

健康被害の算定

(7)式に示す算出式を用いて、図 4 に示す換気回数別の暖冷房エネルギー消費量と、表 8 に示す NO_x、SO_x 排出係数²⁾¹³⁾ を乗ずることで屋外への NO_x、SO_x 年間排出量 M_{NOx} 、 M_{SOx} が求められる。これに表 9 に示す LIME²⁾²⁾³⁾ においてすでに算出されている NO_x と SO_x のダメージ関数をそれぞれ乗ずることで、都市域大気汚染による人間健康への被害量 $D_{HH(NOx)}$ 、 $D_{HH(SOx)}$ を算出した (図 5)。

LIME における都市域大気汚染の NO_x のダメージ関数 DALY は、曝露経路の違いを考慮し車からの排出を起源とした線源(車の連なる道路が線状になるため)と、工場の煙突からの排出を起源とした点源の 2 種類の値が算出されている。本研究では、暖房用の都市ガス、LPG、灯油の消費による NO_x の排出は室内から発生したものがいずれ屋外へ排出されることとしたため、自動車と同等に地面に近い位置からの線源排出と考え

線源の値 (7.41×10^{-6}) を採用した。電力消費による発電所等の煙突から屋外へ排出される NO_x には点源の値 (1.64×10^{-6}) を用いた。また NO_x と SO_x は硝酸塩・硫酸塩等の二次汚染物質としても人間健康へ影響を与えることが知られており、それらのダメージ関数 (NO_x 二次: 1.29×10^{-5} 、SO_x 二次: 1.01×10^{-4}) も合わせて用いた。これより本研究で用いたダメージ関数は、NO_x(都市ガス・LPG・灯油: 線源一次+二次) 2.03×10^{-5} 、NO_x(電力: 点源一次+二次) 1.45×10^{-5} 、SO_x(一次+二次): 1.05×10^{-4} (DALY/kg) となる (表 9)。

4. 換気回数の増加による人間健康への被害量の緩和効果

図 5 に換気回数別・断熱水準別の異なる環境影響による人間健康への被害量 (DALY) を示す。換気回数を多くするほど、①室内空気汚染による人間健康への被害量 (DALY) は大幅に削減される。一方、②地球温暖化と③都市域大気汚染による DALY は小さな値ではあるが換気回数を多くするほど増大し、①、②、③を合わせた人間健康への被害量 (DALY) の値としては、大幅に減少する。これは①室内空気汚染による人間健康への被害影響(ホルムアルデヒド、NO_x、SO_xによる室内空気汚染)が全体の 9 割以上を占め、②地球温暖化や③都市域大気汚染よりも人間健康へ与える影響が大きいためといえる。換気回数を 0.1 回から 0.5 回に増加させると人間健康へのダメージを約 7 割削減でき、換気による室内空気質改善策の有効性が示された。また断熱水準を向上させると被害量 DALY の値は小さくなっており、暖房エネルギー消費量が

図 5 換気回数別・断熱水準別の人間健康への被害量(DALY) ※1 室内空気汚染による被害量(DALY): 全体の 9 割以上を占める

図 6 換気回数別・断熱水準別の健康被害額(外部費用^{注4)})と暖冷房費用(内部費用)

きいほど室内空気汚染の被害を受けやすいことがわかる。断熱水準の向上も室内空気質の改善策に有効であることが示された。

5. 人間健康への被害額と暖冷房費用の合計額を最小化する換気回数

4章の結果から換気量を増やすと、人間健康への被害が軽減されることがわかったが、暖冷房費用は増大するといえる。そこで人間健康への被害量 DALY を、2.2 節の(2)式を用いて貨幣換算し、④外部費用⁹⁾として計上した。この値に、図 4 に示す換気回数別の暖冷房エネルギー消費量と家庭用エネルギー種別価格(表 10)を乗ずることで算出した暖冷房費用(⑤内部費用)を加算したグラフを図 6 に示す。換気回数を増やすことによって、健康被害額(④外部費用)は減少する一方、暖冷房費用(⑤内部費用)は増大しており、各ケースとも概ね換気回数 0.5 (回/h) 前後のときの合計費用が最小になった。東京の次世代基準において、換気回数を 0.1(回/h)から 0.5(回/h)に増加させると約 3 割費用を削減でき、他のケースでも同様の傾向が見られた。費用の観点からは換気量増大によるプラスの効果だけではなく、適切な換気回数を確保することの有効性が示された。

6. まとめ

- 1) 室内空気汚染による人間健康への被害は、地球温暖化や都市域大気汚染の影響に比べて大きく、換気による室内空気質改善策が人間健康に対して有効であることが示された。
- 2) 断熱水準の向上により、暖冷房エネルギー消費量が小さくなるため、室内空気汚染物質が減少し人間健康への被害量が小さくなることがわかった。
- 3) 換気の効果を人間健康被害額(外部費用)と暖冷房費用(内部費用)の合計費用から評価すると、換気回数 0.5 (回/h) 前後のとき、合計費用が最小化されることがわかった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(株)みずほ情報総研・永田裕子氏、(株)ブリヂストン・水田和彦氏、東京大学生産技術研究所・加藤信介教授、(株)トヨタ自動車(元慶應義塾大学大学院)・横田知博氏、慶應義塾大学大学院・勝又寛子氏には甚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。

注釈

- [1]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(人間、生態系等)に対する被害量である。例えば人間健康に関するダメージ関数は、DALY¹⁵⁾という損失余命[単位: 年]を用いて表される
- [2]LIME は地球温暖化やオゾン層破壊等の環境影響により人間健康や生態系、社会資産へ生じる被害を評価する手法として、LCA 国家プロジェクト(経済産業省ほか: 1998-2003)において、(独)産業技術総合研究所が開発したものである。
- [3]統合化係数とは、異なる影響領域間を単一指標化するために用いられる重み付けのことである。
- [4]外部費用とは企業などの活動により個人、社会、地球環境に与える環境負荷または負荷対策として、社会に発生する環境費用のことを言う。これに対して企業が負担する環境保全のための費用、企業の損益に直接影響する費用を内部費用という。
- [5]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、開発途上国を中心に多くの国々で政策立案のツールとして利用されつつある。
- [6]暖冷房エネルギー消費により屋外に排出される NO_x、SO_x の年間排出量は、都市ガス、LPG、灯油燃料に起因するものは開放型暖房器具より室内に発生し

た NO_x、SO_x がいずれ屋外に排出され、都市域大気汚染による影響を生じるものとして計算を行っている。電力消費に起因する排出量は発電所等の煙突から屋外へ排出されるものを算出している。

- [7]燃料が理論空気量で完全燃焼したときに発生する理論上の燃焼ガス量を理論燃焼ガス量といい、理論燃焼ガスから水蒸気分を除去したものを理論乾燥燃焼ガスという。この理論乾燥燃焼ガス量とガス中の汚染物質濃度との積が汚染質の発生量となる。これよりエネルギー消費あたりの NO_x 排出係数は理論燃焼乾燥ガス量(都市ガス、LPG: 0.84[m³/kWh]、灯油: 0.90[m³/kWh])にガス中の NO_x 濃度を乗じて求めた(表 8)。通常の燃焼における NO_x 濃度は理論燃料ガス中において 10~20ppm であり¹⁰⁾、本研究では 20ppm を代表値とした。これより NO_x 排出係数は、都市ガス、LPG の場合 8.84×10^{-3} [g-NO_x/MJ]、灯油の場合 9.47×10^{-3} [g-NO_x/MJ] となる(表 8)。
- [8]灯油中の硫黄成分は、通商産業省令 92 号(平成 7 年 10 月 31 日官報号外第 208 号第 27 条)において 0.008% 以下とするように規定されており、この数値に基づいて SO_x 排出係数を算出した。灯油の発熱量は 45.9MJ/kg であり、1MJ あたりの灯油の消費量は 21.8g/MJ である。このうち硫黄の重量は 1.74×10^{-3} g/MJ (= 21.8g/MJ $\times$ 0.00008) 以下であり、これがすべて二酸化硫黄として排出されるとすると、最大 3.49×10^{-3} g-SO₂/MJ の二酸化硫黄の発生がある(表 8)。
- [9]電力、都市ガス、LPG、灯油の CO₂ 排出係数は、文献 12 の 2000 年度の値。電力の NO_x、SO_x 排出係数は、文献 13 の産業連関分析に基づく他の産業での誘発排出を含む国内消費の値であり、大きめの値となっている。
- [10](社)日本ガス石油機器工業会の調査結果によれば、1997 年~2003 年の 7 年間のガス暖房機器の累積販売台数(4,745,000 台)のうち開放型の割合は 95% を占めている。また、灯油暖房機器の累積販売台数(42,239,000 台)のうち開放型の割合は 94% を占めている。このため本研究では、ガス、灯油暖房機器はすべて開放型とみなして、室内への NO_x、SO_x 排出量を算出した。

参考文献

- [1]成田菜探、村上周三、伊香賀俊治、坂部 貢、伊坪徳宏、水石 仁: 室内空気汚染による健康被害に関する研究—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 No.592、pp.83-88、2005.6
- [2]平成 14 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託、製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発成果報告書、社団法人産業環境管理協会 2003.3
- [3]伊坪徳宏: 人間健康への影響評価手法とその被害指標、第 1 回日本版被害算定型影響評価手法ワークショップ—人間健康への影響評価—講演集、2002.3
- [4]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
- [5]日本建築学会: シリーズ地球環境建築専門編 3 建築環境マネジメント、2004.1
- [6]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 回シンポジウムテキスト、pp.22-33、1985
- [7](財)建築環境・省エネルギー機構: SMASH for Window Ver.2—住宅用熱負荷計算プログラム、2000
- [8]エネルギー・経済統計要覧 2002、日本エネルギー経済研究所、2002
- [9]水石仁、村上周三、伊香賀俊治: フロン漏洩を考慮した住宅断熱の LCCO₂ 評価—住宅の断熱強化による温室効果ガス削減に関する研究—、日本建築学会環境系論文集、第 579 号、pp.89-96、2004.5
- [10]日本建築学会: シックハウスを防ぐ最新知識—健康な住まいづくりのために—、2005.3
- [11](社)空気調和・衛生工学会: SHASE-S102-2003、換気基準・同解説、2004.7
- [12]環境省地球環境局: 地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン、2003.6
- [13]日本建築学会地球環境委員会 LCA・環境会計小委員会: LCA データベース(1995 年産業連関分析データ)
- [14]積算資料、(財)経済調査会、2002.5
- [15]水石仁、村上周三、伊香賀俊治: 住宅の断熱強化による温室効果ガス削減に関する研究(その 4)—温室効果ガス削減対策の地域別投資効果の検討、建築学会関東支部研究報告集、2004.3
- [16]成田菜探、村上周三、伊香賀俊治ら: 室内ホルムアルデヒドの暴露解析および予測摂取量の算定、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2004.9
- [17]日本建築学会: 平成 15 年度「住宅内のエネルギー消費量に関する全国調査研究」報告書、2004.3
- [18]住環境計画研究所: 家庭用エネルギー統計年報 2002 年版
- [19]成田菜探、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—有害化学物質の曝露による人間健康へのダメージ関数 DALY の算定、2004 年度建築学会関東支部研究報告集、2005.3
- [20]成田菜探、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—換気回数が人間健康へのダメージ(DALY)と内部・外部費用に及ぼす影響、2004 年度建築学会関東支部研究報告集、2005.3

(2005 年 4 月 10 日原稿受理、2005 年 6 月 13 日採用決定)