

修 士 論 文

住宅用換気システムの運用時を対象とした

性能評価に関する研究

Performance Evaluation for Domestic Ventilation Systems in  
Operating Term

高知工科大学大学院  
工学研究科基盤工学専攻

嶋 田 祐 典

2018 年 1 月



平成 29 年度 修士論文

住宅用換気システムの運用時を対象とした  
性能評価に関する研究

高知工科大学大学院

工学研究科基盤工学専攻 社会システム工学コース

建築環境研究室 1205099

嶋田 祐典

指導教員 田島 昌樹 准教授

副指導教員 高木 方隆 教授



## 論文要旨

一般的に住宅換気の設計は、仕様書等に示される性能で換気システムが常に稼働することを前提に行われる。例えば省エネルギー基準において、第三種換気システムや第一種熱交換換気システムなどの全般換気システムのエネルギー効率について一般的な値として想定された比消費電力や、DC モータの採用やダクト径を大きくした場合などの省エネルギー効果が数値として示されており、設計時の一次エネルギー消費量の推定に用いられている。一方で、長期的な運用を考えると多くの住宅用換気システムには、定期的なメンテナンスが必要とされる。このメンテナンスが不足するとフィルターが目詰まりなどが起こり、換気量の減少やファンの空回りによるエネルギーの浪費につながると考えられ、実際の既往調査でも竣工後から数年以上経過した住宅で換気量が減少し、設計値を満たしていない事例が報告されている。そのため居住者へのメンテナンスの促進や簡易的なメンテナンスで風量を長期的に維持ができるシステムの開発などが住宅換気の課題の一つとして考えられている。

本研究では、住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価方法の提案と評価の試行を目的に、換気システムのメンテナンスの必要性に着目し、メンテナンス不足による風量減少が引き起こす換気性能や省エネルギー性の低下を考慮した性能評価に加え、換気システムのメンテナンスの容易性評価に関する検討を行った。性能評価に用いる風量減少モデルは、先行研究や既往研究での実測値と仕様値とともに新たに行った実住宅での実測値を用いて分析することで作成した。換気性能評価では風量減少モデルと先行研究で開発された  $\text{CO}_2$  呼出量関係式を用いて、居住者が生活で呼出する  $\text{CO}_2$  を指標とした実条件に近い換気性状を算出し、空気質に対する換気システムの風量減少の影響を確認した。省エネルギー評価では、省エネルギー基準に示される各全般換気設備の基本となる比消費電力を対象に風量減少モデルとともに実測データなどを使用することで清掃からの時間経過に対する比消費電力の変化を表すモデルを作成し、省エネルギー評価を行った。次に暖冷房における換気負荷も考慮もするため、換気と暖冷房の年間一次エネルギー消費量の算出をシミュレーションにより行った。また性能評価とは別に、メンテナンス性の評価を換気システムに必要とされるメンテナンス行為の活動量を実測実験により定量化することで行った。そして最終的に 3 項目の評価結果を総合的にみることで、運用時を対象とした性能評価の考察を導出した。

以上の検討より、メンテナンス不足が要因とされる風量減少が起きる第一種換気システムの性能を維持して運用するには短い間隔でメンテナンスを行う必要が確認された。また第三種換気システムについては風量減少が起きにくいことから換気性能が安定しており、かつ比消費電力の増加がほとんどなく小さい値を維持できることから省エネルギー性も優れているため評価値が高く算出される結果が得られた。

# Abstract

Regular maintenance, such as the cleaning of filters, is important for the efficient operation of domestic ventilation systems. That is because air flow rate of domestic ventilation systems may decrease if regular maintenance isn't carried out. However, most residents are unaware of the necessity for maintenance of ventilation systems, and in some previous investigations, some houses that have shortness of ventilation air flow rate in operating term are actually confirmed.

In this study, for the purpose of proposing a performance evaluation method of domestic ventilation systems in operating term, analysis of effect of a decrease in air flow rate of ventilation systems due to lack of maintenance on ventilation performance and energy saving performance are performed and these results are evaluated. Furthermore, measurement experiments and field measurement as investigation on maintainability evaluation of domestic ventilation systems are conducted.

An air flow rate decrease model for calculation of the performance evaluation is proposed and analyzed real measurement results and specification values. Then, ventilation aspect estimating the actual condition utilizing CO<sub>2</sub> included in exhaled breath of residents as index is calculated by using the air flow rate decrease model and equations for recent Japanese CO<sub>2</sub> production rate included in exhaled breath developed in previous studies to confirm effect of the air flow rate decrease on the air quality. In energy saving performance evaluation, effect of cleaning of ventilation systems on specific fan power is modeled with reference to the air flow rate decrease model and real measurement results. Total primary energy consumption of heating, cooling and ventilation is calculated by a computational program to consider heating and cooling load due to ventilation. In maintainability evaluation, amount of activities of maintenances required for ventilation systems are quantified based on the energy equivalent and the metabolic rate by measurement experiments and field measurement. Finally, the comprehensive evaluation is made by combining the performance evaluation and the maintainability evaluation.

As these results, performance characteristics and suitable operation methods considering maintainability in operating term for balanced ventilation systems with heat recovery and mechanical exhaust only ventilation systems as typical whole house ventilation are shown.





# 目次

第1章：序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 本研究に関連する既往の研究	2
1.3 本研究の目的と概要	5
1.4 本論文の構成	6
第1章 引用・参考文献	8
第2章：本研究に関する基本事項	10
2.1 はじめに	10
2.2 住宅換気に関する基本事項	10
2.2.1 換気回数と換気量	10
2.2.2 換気手法の分類	10
2.2.3 換気システムの種類と特徴	11
2.3 換気性能評価	13
2.3.1 トレーサーガスによる換気量測定	13
2.3.2 多数室系換気性能評価指標（SRF）	17
2.4 換気回路網を用いたシミュレーション手法	25
2.4.1 換気回路網ソフト VentSim	25
2.4.2 換気回路網計算について	25
2.4.3 VentSim の計算方法	26
2.5 室内空気環境に関する基準	27
2.5.1 二酸化炭素濃度	27
2.5.2 相対湿度	28
2.5.3 シックハウス症候群およびその他の空気汚染質	29
2.6 人間のCO <sub>2</sub> 呼出量に関する研究	30
2.6.1 基本事項	30
2.6.2 本論文で用いるCO <sub>2</sub> 呼出量に関する先行研究	38
第2章 引用・参考文献	54

<b>第3章：住宅用換気システムの運用要因による経時風量減少を対象とした分析</b> . . . .	<b>57</b>
3.1 はじめに. . . . .	57
3.2 機械換気システムの風量減少の要因. . . . .	58
3.3 風量減少モデルの作成. . . . .	58
3.3.1 概要. . . . .	58
3.3.2 モデルの参考となる風量測定データ. . . . .	59
3.3.3 本研究における風量減少モデル. . . . .	66
3.4 おわりに. . . . .	72
第3章 引用・参考文献. . . . .	73
<b>第4章：メンテナンス行為に関する活動量実測実験によるメンテナンス性評価</b> . . . .	<b>74</b>
4.1 はじめに. . . . .	74
4.2 本研究におけるメンテナンス性評価の概要. . . . .	74
4.3 換気システムのメンテナンス行為に関する活動量実測実験. . . . .	75
4.3.1 実験概要. . . . .	75
4.3.2 実験対象および実験条件. . . . .	76
4.3.3 実験結果. . . . .	76
4.3.4 再現性の確認. . . . .	77
4.4 まとめ（メンテナンス性評価）. . . . .	78
第4章 引用・参考文献. . . . .	80
<b>第5章：風量減少を組み込んだCO<sub>2</sub>濃度にもとづく換気性能評価</b> . . . . .	<b>81</b>
5.1 はじめに. . . . .	81
5.2 本研究における換気性能評価方法の概要. . . . .	81
5.3 居住者の家族構成と生活スケジュール. . . . .	83
5.3.1 居住者の家族構成と生活スケジュールの概要. . . . .	83
5.3.2 生活スケジュールにおけるMet値の設定に関する検討. . . . .	85
5.3.3 Met値を設定した生活スケジュールの作成. . . . .	87
5.4 換気回路網計算を用いた室内空気環境評価. . . . .	90
5.4.1 計算概要. . . . .	90
5.4.2 計算結果および室内空気環境評価. . . . .	93
5.5 おわりに. . . . .	103
第5章 引用・参考文献. . . . .	104

<b>第 6 章：住宅用換気システムの省エネルギー評価</b> .....	105
6.1 はじめに.....	105
6.2 省エネルギー評価方法の概要.....	105
6.3 比消費電力のモデル化による省エネルギー評価.....	106
6.3.1 ダクト式第一種熱交換型換気システム (AC モータ) .....	107
6.3.2 ダクト式第三種換気システム (AC モータ) .....	108
6.3.3 ダクト式第三種換気システム (DC モータ) .....	109
6.3.4 ダクト式第一種熱交換型換気システム (DC モータ) .....	110
6.3.5 比消費電力のモデル化による省エネルギー評価.....	111
6.4 暖冷房負荷に関する検討.....	112
6.4.1 計算概要および計算条件.....	112
6.4.2 計算結果.....	113
6.4.3 まとめ.....	115
第 6 章 引用・参考文献 .....	116
<b>第 7 章：住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価および総括</b> .....	117
7.1 はじめに.....	117
7.2 住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価.....	117
7.3 本論文のまとめ.....	119
7.4 研究の総括と今後の展望.....	122
<b>謝辞</b> .....	125
<b>付録</b>	
付録 A：生活スケジュール.....	126
付録 B：風量減少を組み込んだ CO <sub>2</sub> 濃度にもとづく換気性能評価 シミュレーション 算出結果 .....	129
付録 C：換気に関するアンケート調査.....	161

## 図目次

図 1-1	本論文の構成	7
図 2-1	機械換気方式の種類	11
図 2-2	自然（温度差）換気方式の種類	12
図 2-3	単室の濃度変動	13
図 2-4	瞬時一様拡散の濃度変換	14
図 2-5	$SRF_i$ と $\bar{\alpha}_i$ および $d_i$ の関係	24
図 2-6	換気回路網計算の計算モデル	25
図 2-7	汚染濃度計算のモデル	26
図 2-8	CO <sub>2</sub> 呼出量の測定値と推定値	41
図 2-9	測定対象室の平面図	42
図 2-10	CO <sub>2</sub> 呼出量の測定値と推定値	44
図 2-11	測定対象室の平面図	46
図 2-12	C-1 の CO <sub>2</sub> 濃度	46
図 2-13	C-2 の CO <sub>2</sub> 濃度	47
図 2-14	Met <sub>D</sub> と Met <sub>A</sub> （平均値）の関係	49
図 2-15	脈拍数と Met の関係	49
図 2-16	各 Met 値の RMSE（Met <sub>D</sub> を真値とした）	50
図 2-17	CO <sub>2</sub> 呼出量計算値の RMSE（Met <sub>D</sub> を真値とした）	50
図 2-18	CO <sub>2</sub> 濃度（ケース A-1）	52
図 2-19	CO <sub>2</sub> 濃度（ケース A-12）	53
図 2-20	CO <sub>2</sub> 濃度測定値と計算値の 2RMSE（在室者数 4 人）	53
図 3-1	測定対象住宅の平面図および概要	60
図 3-2	2005 年 9 月実施清掃前後の風量	61
図 3-3	2006 年 7 月実施清掃前後の風量	61
図 3-4	2006 年 11 月実施清掃前後の風量	61
図 3-5	2007 年 11 月実施清掃前後の風量	61
図 3-6	清掃前後の有効換気量にもとづく	62
図 3-7	各期間の比消費電力の増加および有効換気量の低下	62
図 3-8	2007 年 2-9 月の比消費電力と風量（第一種熱交換型換気）	62
図 3-9	2007 年 2-9 月の比消費電力と風量（第三種換気）	62
図 3-10	RA グリル別の風量測定結果	64
図 3-11	清掃前後の換気量と消費電力	64
図 3-12	RA グリル別の風量測定結果	64
図 3-13	清掃前後の換気量と消費電力	64
図 3-14	RA グリル別の風量測定結果	65

図 3-15	清掃前後の換気量と消費電力 .....	65
図 3-16	2007 年 2-9 月の有効換気量率の変動（第一種熱交換型換気） .....	67
図 3-17	第一種熱交換型換気システム（AC モータ）の風量減少モデル .....	68
図 3-18	第三種換気システム（AC モータ）の風量減少モデル .....	69
図 3-19	第一種熱交換型換気システム（AC モータ）の風量減少モデル .....	71
図 5-1	モデル住宅の平面図 .....	83
図 5-2	第一種換気 換気計画条件（省エネルギー基準） .....	91
図 5-3	第一種換気 換気計画条件（自立循環型住宅） .....	91
図 5-4	第三種換気 換気計画条件 .....	91
図 5-5	室空間および換気システムの端末部材の高さ .....	92
図 5-6	各居室の CO <sub>2</sub> 発生量 .....	92
図 5-7	第三種換気システム（性能値）による CO <sub>2</sub> 濃度 .....	93
図 5-8	第一種換気システム（性能値）による CO <sub>2</sub> 濃度 .....	93
図 5-9	第一種換気システム（4 ヶ月後）による CO <sub>2</sub> 濃度 .....	94
図 5-10	第一種換気システム（1 年後）による CO <sub>2</sub> 濃度 .....	94
図 5-11	第三種換気システム（性能値）による SRF .....	96
図 5-12	第一種換気システム（性能値）による SRF .....	96
図 5-13	第一種換気システム（4 ヶ月後）による SRF .....	97
図 5-14	第一種換気システム（1 年後）による SRF .....	97
図 5-15	第三種換気システム（性能値）による OSRF .....	98
図 5-16	第一種換気システム（性能値）による OSRF .....	98
図 5-17	第一種換気システム（4 ヶ月後）による OSRF .....	99
図 5-18	第一種換気システム（1 年後）による OSRF .....	99
図 5-19	第一種換気システムの清掃からの経過月と OSRF の関係 .....	99
図 5-20	第三種換気システム（性能値）における不足新鮮空気量の変化 .....	100
図 5-21	第一種換気システム（性能値）における不足新鮮空気量の変化 .....	101
図 5-22	第一種換気システム（4 ヶ月後）における不足新鮮空気量の変動 .....	101
図 5-23	第一種換気システム（1 年後）における不足新鮮空気量の変化 .....	101
図 5-24	第一種換気システムの清掃からの経過月と .....	102
図 5-25	第一種換気システムの清掃からの経過月と .....	102
図 5-26	清掃からの経過月と居室 OSRF の関係 .....	103
図 6-1	ダクト式第一種換気システム（AC モータ）の比消費電力モデル .....	107
図 6-2	消費電力と実質的に給気に供している電力 .....	108
図 6-3	ダクト式第三種換気システム（AC モータ）の比消費電力モデル .....	108
図 6-4	ダクト式第三種換気（DC モータ）の消費電力特性図 .....	109
図 6-5	ダクト式第三種換気システム（DC モータ）の比消費電力モデル .....	110

図 6-6	ダクト式第一種換気 (DC モータ) の消費電力モデル.....	110
図 6-7	ダクト式第一種換気システム (DC モータ) の比消費電力モデル.....	111
図 6-8	東京 (温暖地) 居室間歇暖冷房の算出結果 .....	113
図 6-9	札幌 (寒冷地) 全館連続暖冷房の算出結果 .....	114
図 6-10	札幌 (寒冷地) 全館連続暖冷房の算出結果 2.....	115
図 7-1	OSRF と比消費電力の関係.....	118

## 表目次

表 2-1	本研究で扱う SRF の特徴	17
表 2-2	建築基準法における室内空気基準	27
表 2-3	二酸化炭素濃度に関する基準	28
表 2-4	個別の揮発性有機化合物 (VOC) の指針値	29
表 2-5	基礎代謝量の主な推定式	31
表 2-6	基礎代謝基準値(参照体重における基礎代謝量)	32
表 2-7	ASHRAE に示されている Met 値	33
表 2-8	JIS A1406 による人間が呼出する CO <sub>2</sub> 量 (成人男子)	37
表 2-9	SHASE-S102 による労働強度別 CO <sub>2</sub> 呼出量 (成人男子)	37
表 2-10	被験者の属性と人数	39
表 2-11	測定機器と測定項目	39
表 2-12	HBF-701 の表示範囲と測定誤差	39
表 2-13	年代別基礎代謝量と基礎代謝量の比	40
表 2-14	測定機器と測定項目	42
表 2-15	測定条件と RMSE の結果	43
表 2-16	測定概要	45
表 2-17	隣室からの空気量の設定に使用した機器	45
表 2-18	被験者実験の条件	48
表 2-19	測定機器と測定項目	48
表 2-20	行為とエネルギー代謝率	51
表 2-21	測定条件	51
表 2-22	Met 値と CO <sub>2</sub> 濃度計算値の 2RMSE	52
表 3-1	換気システムの仕様	60
表 3-2	測定項目および測定指標	60
表 3-3	第一種換気設備の清掃実施時期	61
表 3-4	各対象住宅の清掃および測定を行った日時およびその他条件	63
表 3-5	測定項目と測定器機および清掃に用いた掃除機の機種	63
表 3-6	各期間の測定値と本研究でモデルとする一ヶ月あたりの風量減少モデル	66
表 3-7	各期間の測定値と本研究でモデルとする一ヶ月あたりの風量減少モデル	68
表 3-8	第一種熱交換換気における清掃から経過月と機外静圧、SA 風量の関係	71
表 3-9	各ダクト式換気システムの一ヶ月あたりの風量減少モデル	72
表 4-1	測定項目と測定機器	75
表 4-2	測定対象のメンテナンス行為の実験条件	76
表 4-3	測定対象のメンテナンス行為の実験条件	77
表 4-4	モデル住宅 (高知市) での清掃行為の活動量測定結果 (2017. 10. 05)	78

表 4-5	実住宅での清掃行為の活動量測定結果 (2017. 11. 13-14) .....	78
表 5-1	本研究における換気性能評価の主要素と目的 .....	82
表 5-2	本研究における空気環境評価の主要素と目的 .....	82
表 5-3	本研究における空気環境評価の主要素と目的 .....	83
表 5-4	省エネ基準などの基準エネルギー算定に用いられる生活スケジュール ....	84
表 5-5	呼気収集実験の実施条件 .....	85
表 5-6	測定項目と測定器機 .....	85
表 5-7	測定項目と測定器機 .....	86
表 5-8	睡眠 Met 値の推測値と文献値 .....	87
表 5-9	生活スケジュールにおける各行動の設定 Met 値とその根拠 .....	88
表 5-10	本研究で作成した生活スケジュール (平日版) .....	89
表 5-11	生活スケジュールにおいて Met 値を測定した行動が占める時間割合 ....	90
表 5-12	シミュレーションの計算条件 .....	90
表 6-1	基本となる消費電力 .....	106
表 6-2	省エネルギー対策の効果率 .....	106
表 6-3	計算に使用した条件 .....	112
表 7-1	本研究において導出した換気システムの特徴 .....	118

# 第 1 章

## 序論

# 第1章：序論

## 1.1 はじめに

換気とは“在室人員や各種の機器などの汚染源から発生する汚染物質、あるいは熱や水蒸気によって汚染、悪化した室内空気を正常な外気と入れ替えること”<sup>[1-1]</sup>である。居室に十分な換気が確保されていないと、室内空気は居住者の呼吸、機器の燃焼などによって二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）濃度が増加し、衣類から塵埃や喫煙、臭気あるいはCO、NO<sub>x</sub>などの有害ガス濃度が高まり、在室者に不快感を与えるばかりか健康上の障害を起こす危険性もある。<sup>[1-2]</sup>しかしながら、わが国の歴史において長い間、住宅の換気に対する関心はあまり高いものではなかった。これは夏を旨とすべしとする日本の伝統的住宅づくりの教えがあり、意図的にあらゆる部分に隙間を作ることにより計画的ではない漏気によって換気量を確保していたことに繋がる。<sup>[1-3]</sup>ただし近年になると、省エネルギーの観点で住宅の高断熱・高气密化が進み、それに伴い漏気が減少することで計画換気がされていない住宅においては換気量の確保が難しくなり、住宅の内装材や生活用品、家具などから発生する化学物質によるシックハウス病などの健康被害が顕在化するようになった。そのため平成15年7月1日に施行された改正建築基準法（シックハウス法）により、住宅において内装仕上げや天井裏などの制限と共に、24時間稼働する機械換気設備の設置が義務化や住宅の換気回数も定められ、住宅でもようやく新鮮かつ安全な空気環境が求められるようになった。

一方で昨今、世界的に地球温暖化問題への対応として二酸化炭素の排出量を抑制することが求められ、我が国では家庭部門において二酸化炭素排出量の増加傾向が続いており、住宅での一層の省エネルギー対策が不可欠となっている。住宅用換気システムにおいても、上述したように安全で新鮮な空気環境の維持のために24時間連続稼働する必要があり消費電力が小さい機器でも年間消費電力は小さいものではなく<sup>[1-4]</sup>、エネルギー対策は重要な課題の一つとなっている。換気システムの省エネルギー化としては、DCモータを用いた高効率ファンの使用や変风量制御による換気量の最適化などの工夫された機械換気システムの使用の他に、自然風や室内外温度差などの自然エネルギーを利用した換気手法を採用することも有効とされている。<sup>[1-5]</sup>

このように換気システムには良好な空気質を形成するための換気性能とより少ないエネルギーでそれを実行する省エネルギー性能が求められる。この一見、相反するような問題を解決する手法としてはデマンド換気などの高い技術をもったシステムが挙げられる。しかし、それは換気システムがそれ自体の性能を維持していることを前提した考えであり、多くの換気システムの性能維持には定期的なメンテナンスが必要であるとされている。それにも関わらず、住宅設備の性能確認は、基本的に設計時のみに行われ、竣工後である運用時に行われることは現状稀である。そのため何らかの要因で換気量が低下しても居住者

がその事実を知覚することは難しく、計画換気をされている居室にも関わらず結露等の湿気の問題や室内空気質が悪化することなどが懸念される。またメンテナンス不足は換気システム内の空気の経路に設けられているフィルター等の目詰まりなどに繋がり、結果として換気量の減少や圧力損失が発生することによるエネルギーの浪費を引き起こすことが考えられる。

住宅用換気システムが換気性能と省エネルギーの両立を行うにはその前提となる性能を維持させることが重要であり、技術者による定期的な性能検証や改修に加えて居住者へのメンテナンスを促すことが重要だと考えられる。もしくは、メンテナンスをしなくても長期的に風量を保持できるようにすることやメンテナンスをしやすくし居住者の負担を減らすようなシステム自体の改良も望まれる。<sup>[1-6]</sup>

以上のことを住宅用換気システムの評価という観点で考えると、その性能評価の大部分は換気システムの役割上、換気性能と省エネルギー性能の二点が重要であると考えられる。しかし、住宅換気においては運用時に技術者が介入する機会がほとんどないため、居住者のメンテナンスへの理解度や関心度によって、換気システムの運用状態が左右され、それが換気システムの性能に影響を与えることを考慮する必要がある。また性能維持にメンテナンスが必要とされることを踏まえると、様々な換気システムが存在する現在、どういったシステムがメンテナンス間隔や性能の保持性などのメンテナンス性が優れているのかを評価するための手法や指標なども要求されると考えられる。すなわち、技術者ではなくユーザー側である居住者が運転に大きく関わる住宅換気システムにおいては、性能面を判断する換気性能および省エネルギーとともにそれらの維持にかかわるメンテナンス性も含めた運用時を対象とした性能評価が必要であるといえる。

## 1.2 本研究に関連する既往の研究

住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価は、換気システムの性能値における換気性能や省エネルギー性能などの性能評価をするだけでは不十分であり、前節でも述べているように居住者の換気に対する関心やメンテナンスの実行不実行などの運用状況により、その性能は大きく変わってくる可能性があり、換気システムのメンテナンス性も考慮した評価方法が必要であると考えられる。そのため本研究では、住宅用換気システムの評価方法を検討する際に、多くの既往研究の成果や評価指標を参考にしている。

ここでは、本研究で参考とした既往研究および知見をメンテナンス性、空気環境、省エネルギーの3種の評価項目に分類し、体系的に取りまとめたものを以下に示す。

### (a) 換気システムのメンテナンス性に関する既往研究

#### (a-1) アンケート調査<sup>[1-7, 8, 9]</sup>

実在住宅や集合住宅における機械換気システムを対象に多くの既往研究でアンケート調査が行われている。その多くはシックハウス問題に対する建築基準法改正による24時間機

械換気設備の設置義務化後のメンテナンスを含めた使用実態や居住者の換気に対する意識変化の把握を目的としている。調査結果としては、基準改正から数年以上経過しているのにも関わらずメンテナンス不足により換気回数が0.5回/hに満たない住宅や換気システム自体の運転を停めていることなどが確認され、居住者の換気に対する意識が定着しておらず、メンテナンス不足となっている実態が報告されている。

#### (a-2) 住宅用換気システムの性能低下予測

住宅用機械換気システムの課題として、埃や虫がフィルターやファンなどに付着することにより風量減少が起き、換気不足になることが挙げられる。そのため機械換気システムは定期的に適切な方法で清掃などのメンテナンスを行うことが必要であり、その実施者となる居住者にメンテナンスの必要性および適切なメンテナンス情報を提示することが重要である。そのため連続運転によりシステムが汚れる経緯や場所の特定およびそれに伴う風量減少の傾向の把握は、メンテナンス性を考慮したシステム設計の改善や提案に必要不可欠である。

村田らは換気システムの汚れや風量減少の評価することを目的に浮遊粉じんによる風量低下促進試験方法<sup>[1-5,10]</sup>を提案し、第一種熱交換型セントラル換気システムを対象に試験を実施し、再現性の確認と風量減少と粉じん粒径の関係性を示し、第三種型の中間ダクトファンを対象にした促進試験と実際の長期室内暴露試験の比較<sup>[1-11]</sup>を行っている。より実証的な風量低下の予測を行うための課題として試験用粉体の検証が必要であることが確認されたが、対象としたシステムのフィルターに対して風量減少が起きる積算吸込み粉じん量を確認することができ、今後の平均的なメンテナンス期間の概略推定を行うための有意義な知見も得られている。

#### (a-3) 全般換気システムの清掃と換気性能や消費電力に関する検討

自立循環型開発委員会の換気・通風に関わる技術開発委員会でプロジェクトでは、住宅用機械換気システムの清掃と換気性能や消費電力に関係性について調査<sup>[1-12,13]</sup>を行っている。この調査では、実験集合住宅において全般換気設備としてダクト式第一種熱交換換気システムと第三種換気システムを導入した時の清掃前後の消費電力と換気風量の変化について分析・整理しており、第一種熱交換換気システムは清掃を行わない期間が4ヶ月程度になると風量や有効換気量率に基づく比消費電力 SFP などの性能の低下が現れ、第三種換気システムは清掃を行わなくて顕著な性能低下は確認されなかったことを報告している。また田島らは、その検討結果より、実験として第一種換気システムにおける換気端末のフィルターの目詰まりによる風量減少が起こった状態を模擬的に作り、空気質と比消費電力 SFP の変化を調査しており、風量が大きく減少することが空気質や SFP に悪影響を与えることを示している。<sup>[1-14]</sup>

## (b) 換気システムの空気環境に関する既往研究

(b-1) CO<sub>2</sub>呼出量関係式に関する研究

在室者がいる条件で、トレーサーガスを発生させて室の換気性状を測定することは様々な制約があるため困難となることが多い。そのため人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>をトレーサーとして考え、在室者によるCO<sub>2</sub>の発生量から換気量を推定する手法がある。そこで、田島、井上らによる先行研究<sup>[1-15]</sup>では、現在の日本人のCO<sub>2</sub>呼出量を体重、身長、性別、年齢といった個人属性と活動量に基づいたCO<sub>2</sub>呼出量の推定手法を被験者実験による呼気収集および分析により提案し、換気量の推定に使用する場合の精度確認を目的として換気性状推定実験を行っており、一定の精度をもって使用できるという結果を得ている。本研究では、対象が住宅用換気システムであり運用時の多くは、居住者が換気対象となる居室に在室していると考えられるためトレーサーガスで換気性状を測定することは現実的ではなく困難であると想定し、上記で述べた研究で作成されたCO<sub>2</sub>呼出量を推定するCO<sub>2</sub>呼出量関係式を用いて換気性能評価を行っている。なお、CO<sub>2</sub>呼出量関係式に関する先行研究については第3章でより詳細に述べる。

## (b-2) SRF (Supply Rate Fulfillment)

建築は一般的に多数の室や廊下などから構成され、隣接する空間との空気の流動が存在する多数室系の換気系であり、室間の空気流動は内壁の隙間やドア、ガラリなどを通じて複雑に行われている。住宅においてもそれは当てはまる。そのため換気システムから直接導入される空気量や排気される空気量のみで系の換気性能を評価するのではなく、直接導入される外気の他に他室や他ゾーンを通過した空気をも考慮に入れた実質的な外気導入量の評価を行うことが重要であるといえる。

このような多数室系の外気導入量評価の問題に対し、本研究では澤地らが提案した給気の充足度指標<sup>[1-16, 17, 18, 19, 20]</sup>をもとに田島により非定常状態に拡張された給気の充足度指標の推定手法<sup>[1-21]</sup>の考えに基づき多数室の空気環境評価を行った。

## (c) 省エネルギー

## (c-1) 比消費電力 SFP (Specific Fan Power)

省エネルギー基準では、設備において暖冷房、給湯、換気、照明の一次エネルギー消費量を基準として評価されている。その中でも、住宅用換気システムは24時間稼働するため、たとえ消費電力が小さい機器でも年間の消費電力は大きくなるため換気に係わる高効率機器を導入することが省エネルギーとして有効な手段と考えられている。

そのため、「住宅事業建築主の判断の基準」<sup>[1-22]</sup>や省エネルギー基準<sup>[1-23]</sup>では、換気システムのエネルギー効率として、換気システムのエネルギー消費量の算出する際に、換気システムの消費電力を換気システムの風量で除した値、すなわち1m<sup>3</sup>/hの空気を搬送するのに必要な消費電力を表す比消費電力を用いることで評価している。またこの比消費電力だが、

海外では SFP : Specific Fan Power と呼ばれている。

$$\text{SFP} = P_v \div Q \quad (1-1)$$

SFP : 換気設備の比消費電力 [W/(m<sup>3</sup>/h)]

$P_v$  : 換気設備の消費電力 [W]

$Q$  : 換気設備の風量[m<sup>3</sup>/h]

本研究においても、換気システムの省エネルギーについて、この換気設備の効率指標である比消費電力 SFP を用いて各方式に定められている基準値と比較し、評価を行っている。

### 1.3 本研究の目的と概要

前節までで述べたとおり、住宅用換気システムが運用時にそれ自体の性能を保持するには、定期的なメンテナンスが必要である。そのため換気システムのより実状的な性能評価には、メンテナンス不足による性能低下も考慮しなければならない。本研究では、住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価方法の提案と試行をすることを目的に、住宅用換気システムにおけるメンテナンス不足によって起こるフィルター等の目詰まりが要因とされる風量減少による換気性能や省エネルギー性の低下を分析することで性能評価を行い、それに加え居住者が担う換気システムのメンテナンス性の評価を定量的に行った。

まずは実験住宅における住宅用換気システムの長期連続運転測定結果や実住宅での清掃前後の測定結果などの複数のデータを整理することにより住宅用換気システムの風量減少モデルの作成を行った。次に作成した風量減少モデルを用いて、換気性能評価として居住者の呼気に含まれる CO<sub>2</sub> を評価指標とした室内空気質をシミュレーションにより計算し、省エネルギー評価としては風量減少に伴う比消費電力 SFP の変動モデルを作成することにより省エネルギー評価を行った。

また上記の 2 項目の性能評価とは別にメンテナンス性の評価も行った。ここでは、換気システムの性能維持に必要なメンテナンスなどの居住者の負担を定量的に評価することを目的としており、実際のメンテナンスに当たる清掃行為などのエネルギー代謝量や Met 値を被験者実験により測定することで実行した。

最後にメンテナンス性評価、性能評価としての換気性能評価、省エネルギー評価の 3 項目を総合的にみることで換気システムの運用評価の検討を行った。

以上より、本研究では以下の内容を実践している。

- ① 実測データによる住宅用換気システムの経時風量減少モデルの作成
- ② 住宅用換気システムのメンテナンスにかかる活動量の実測評価
- ③ 風量減少を組み込んだCO<sub>2</sub>濃度にもとづく換気シミュレーションによる換気性能評価
- ④ 風量減少に伴う比消費電力 SFP の変化による省エネルギー評価
- ⑤ 住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価

#### 1.4 本論文の構成

本論文は序論と総括を含む 7 つの章で構成されている。以下に各章の概要を、本論文の構成図を図 1-1 に示す。

第 1 章「序論」では、研究の背景や本論文に関する既往研究の概要、研究目的、本論文の構成を示す。

第 2 章「本研究に関する基本事項」では、住宅用換気システムに関する基本事項を示す。また本研究で使用する空気環境や省エネルギーに関する評価指標や評価に用いる手法の理論や先行研究についても記述する。

第 3 章「住宅用換気システムの運用要因による経時風量減少を対象とした分析」では、過去の実験住宅における風量測定結果や新たに行った実住宅での測定結果、または既往研究におけるメンテナンスを行わなかった場合の風量の経時的な減少を表す風量減少モデルの作成を行う。

第 4 章「活動量実測実験にもとづくメンテナンス性評価」では、住宅用換気システムの性能維持のために必要とされるフィルター清掃等のメンテナンス行為の活動量を測定し、それを居住者にかかるメンテナンスの負担とし、定量的な評価を行う。

第 5 章「風量減少を組み込んだ CO<sub>2</sub> 濃度にもとづく換気性能評価」では、居住者が生活している住宅を想定し、第 3 章において作成した換気システムの風量減少モデルを用いることでメンテナンス不足となり換気性能が低下した時の換気システムの空気環境評価を、人間の呼気から発生する CO<sub>2</sub> を評価指標として行う。

第 6 章「住宅用換気システムの省エネルギー評価」では、省エネルギー基準などで機械換気システムの効率指標として使用されている比消費電力 SFP (Specific Fan Power) は風量減少によって変化するため、そのモデル化を行うことで省エネルギー評価を行う。また同時に、換気にかかわる暖冷房負荷についての検討も行う。

第 7 章「住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価および総括」では、第 4 章～第 6 章までの各評価項目の結果を総合的に見ることで、住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価を行う。最後に、本論文のまとめと研究の総括および今後の課題につ

いて言及する。

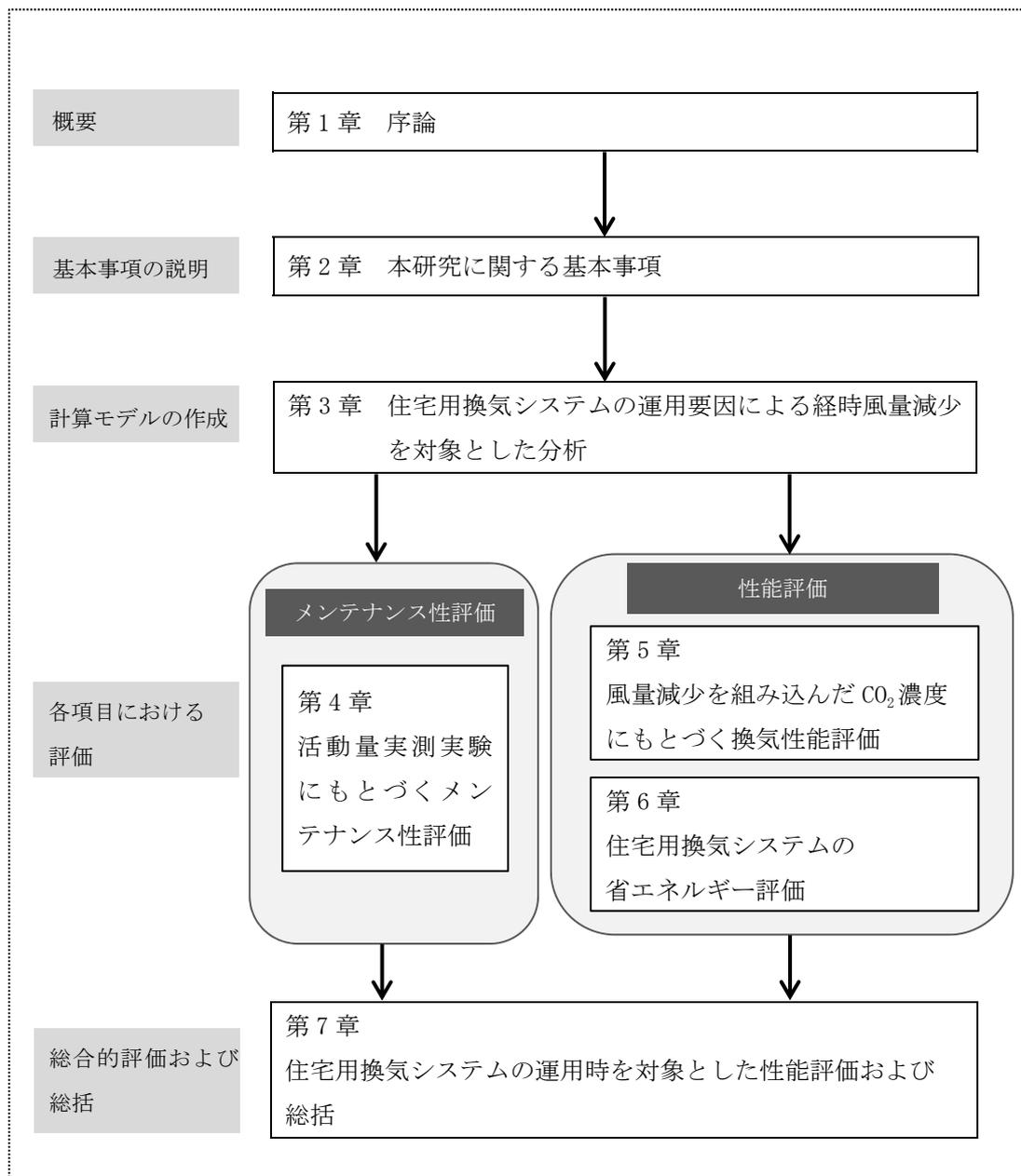


図 1-1 本論文の構成

## 第1章 引用・参考文献

- [1-1] 田中俊六 武田仁 岩田利枝 土屋喬雄 寺尾道仁：最新建築環境工学[改訂4版]，井上書院，2014.2
- [1-2] 大塚雅之：初学者の建築講座 建築設備（第三版），市ヶ谷出版社，2016.1
- [1-3] 峰野悟：換気性状が変動する住宅における換気性能評価に関する研究 修士研究，2005.2
- [1-4] 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構：自立循環型住宅への設計ガイドライン要素技術活用シリーズ 住宅用機械換気設備の計画と性能評価 ダクト式機械換気設備の省エネルギーと維持管理・ライフサイクルに関するブックレット，2016.9
- [1-5] 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所監修：温暖地版 自立循環型住宅への設計ガイドライン，一般社団法人建築環境・省エネルギー機構刊，2015.8
- [1-6] 村田さやか 高倉政寛 鈴木大隆 大西茂樹 尾本英晴：住宅用機械システムの粉じんによる性能低下予測 その1 風量低下促進方法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），日本建築学会，2006.9
- [1-7] 高木理恵 吉野博 藤川光利 和田浩行：住宅25戸における機械換気システムの給排気口の風量とメンテナンスに関する調査，日本建築学会東北支部研究報告会，2007.6
- [1-8] 杉本由美子，倉淵隆，遠藤智行，鳥海吉弘，熊谷一清，野口美由貴，柳沢幸雄：常時換気設備を設置した住宅の換気性状に関する実測調査，空気調和・衛生工学大会学術講演論文集，2005.8
- [1-9] 峰野悟，村田さやか，坂本雄三，田島昌樹，澤地孝男：住宅用局所換気設備の使用方法に関する調査 その1 アンケート調査のまとめ，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），日本建築学会，2008.9
- [1-10] 大西茂樹 村田さやか 高倉政寛 鈴木大隆 尾本英晴：住宅用機械システムの粉じんによる性能低下予測 その2 2種類粉じんによる熱交換型換気システムの試験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），日本建築学会，2006.9
- [1-11] 村田さやか 鈴木大隆 高倉政寛 福島明：住宅用機械換気システムの長期風量保持とメンテナンスに関する評価手法 その3 換気風量の長期室内暴露試験と促進試験との比較，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），日本建築学会，2009.8
- [1-12] 井前貴正 峰野悟 瀬戸田裕直 田島昌樹 澤地孝男 津田学志：実験集合住宅における全館換気設備の清掃と消費電力に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），日本建築学会，2008.9
- [1-13] 峰野悟 澤地孝男 秋元孝之 田島昌樹 三浦尚志 坂本雄三：実験集合住宅における全館換気の換気性能および SFP の測定，日本建築学会大会学術講演概要集（九州），日本建築学会，2007.8

- [1-14] M. Tajima, T. Sawachi, S. Mineno, S. Murata: Effect of Cleaning of Residential Ventilation System on Fan Energy Use and Ventilation Performance, EPIC 2006 AIVC, pp561-566, 2006. 11
- [1-15] 田島昌樹 井上貴之 大西裕治: 換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻 第728号, 日本建築学会, pp885-892, 2016. 10
- [1-16] 谷口佳紀 大西茂樹 大澤元毅 澤地孝男 瀬戸裕直: 住宅用換気システムの換気性能評価に関する研究 その1 排気セントラルシステムと住宅の気密性能, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp49-52, 1994. 3
- [1-17] 大西茂樹 谷口佳紀 大澤元毅 澤地孝男 瀬戸裕直: 住宅用換気システムの換気性能評価に関する研究 その2 住宅全体の換気性能評価指標の提案と検討, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp53-56, 1994. 3
- [1-18] 澤地孝男 大澤元毅 瀬戸裕直 大西茂樹 谷口佳紀: 住宅用換気システムの換気性能評価に関する研究 その3 外壁の気密性能および内壁の通気性能が温度差換気に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集, pp711-712, 1995. 8
- [1-19] 谷口佳紀 大西茂樹 澤地孝男 大澤元毅 瀬戸裕直: 住宅用換気システムの換気性能評価に関する研究 その4 住宅の「通気性能」と内外温度差が排気セントラルシステムの換気量に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集, pp713-714, 1995. 8
- [1-20] Shigeki OHNISHI Takao SAWACHI Yoshinori TANIGUCHI Haruki OHSAWA Hirano SETO: A New Experimental Approach for the Evaluation of Domestic Ventilation Systems Part3 - Evaluation of Ventilation Systems for an Entire House, ASHRAE Transactions: Research, 1998, pp598-61
- [1-21] 田島昌樹: 必要新鮮空気量の充足度による多数室系の換気性能評価手法に関する研究, 博士論文, 2004. 1
- [1-22] 財団法人 建築環境・省エネルギー機構: 住宅事業建築主の判断基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説, 2009
- [1-23] 国土交通省国土技術政策総合研究所 独立行政法人 建築研究所: 平成25年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 II 住宅, 2013. 5

## 第 2 章

### 本研究に関する基本事項



## 第2章：本研究に関する基本事項

### 2.1 はじめに

換気システムの性能評価は、住宅等もその対象とされる多数室系の換気性能評価方法だけでも空気齢やパーキングフローレートなどを評価指標としている、トレーサーガスを測定手法や評価手法の他にも第1章で述べた外気を含めた室間空気量に着目した必要新鮮空気充足度SRFなどを用いたものもある。

このように換気システムの性能評価に関する評価方法は多数に渡るため、本章では換気システムの基本事項とともに、本研究で性能評価項目である空気環境（換気性能）と省エネルギーについて評価をする際に使用した評価指標について、その基礎理論や基本事項を述べる。

### 2.2 住宅換気に関する基本事項

#### 2.2.1 換気回数と換気量

換気とは、自然または機械的手段により室内の空気と外気を入れ替えることである。国内では、1990年頃から住宅の高断熱高気密化に伴いシックハウス症候群、結露、ダニ、カビ問題などが原因とされる健康障害が問題視されようになった。<sup>[2-1]</sup>それにより建築基準法が改正（2003年7月1日施工）され、住宅において24時間稼働が可能な機械換気設備の設置が義務化され、住宅全体を考慮した計画換気が必要とされるようになった。また必要換気量も建築基準法によって定められており、室の容積に対して1時間当たりに新鮮空気（外気）と入れかえられた室の空気量の比を換気回数（回/h）といい、住宅等の居室では換気回数0.5回/h以上、その他の室では換気回数0.3回/h以上と決められている。換気量でいえば、1人当たり20m<sup>3</sup>/h以上が必要とされている。

#### 2.2.2 換気手法の分類

換気手法の分類<sup>[2-2]</sup>として、全般換気と局所換気とがある。全般換気は全体の空気を入れ換えることにより、室内の汚染質濃度を希釈するために行うもので、汚染源が固定していない場合の規格に適用され、具体的には居室・工場・作業場・倉庫・集会所などで採用される。

これに対して、局所換気は、室全体ではなく汚染質が発生する場所を局部的に換気する方法で、汚染源が固定している場合の計画に適用され、具体的にはちゅう房・工場・実験室などで採用される。

全般換気は、室内で発生する汚染質を完全に希釈・拡散したうえで排気することが原則なので、汚染質の種類やその発生量によっては、非常に大量の換気を必要とすることがあ

る。一方、局所換気は、汚染質を汚染源の近くで補足・処理するため、周辺の室内環境を衛生的かつ安全に保つうえで有効であり、換気量も比較的少なくすむ。

換気設備については、法規および地方条例で詳細に規定されており、これらを十分理解して設計することが必要である。

### 2.2.3 換気システムの種類と特徴

全般換気のなかには機械換気と自然換気による方式があり、機械換気方式には、給気系と排気系の送風機の組み合わせによって、3種類に分類される。図2-1に機械換気方式の種類を示す。

#### (1) 機械換気方式

##### a. 第一種換気方式

第一種換気方式は、機械給気と機械排気との併用による換気である。確実に換気量を確保することができ、大規模な建築物に用いられる。また、送風量と排風量を調整し室内を正圧にも負圧にもできるため、クリーンルーム・ハザード対策施設などの特殊な環境へも応用されている。一般的には、外気を浄化するためにエアフィルタを必要とする。

##### b. 第二種換気方式

第二種換気方式は、機械給気と自然排気口による換気である。一般的には外気取入れ部に空気清浄装置が設けられる。室内が正圧となるため病院の手術室など汚染空気の流入が許されない室に利用される場合もある。

##### c. 第三種換気方式

第三種換気方式は、機械排気と自然給気とによる換気である。第三種換気の例は、駐車場・工場・作業場等のほかに小規模建築物に多い。外気を直接導入して第三種換気を行う場合、給気口から確実に給気されていることに注意を要する。給気が確保されなければ、排気はその能力を発揮できない。

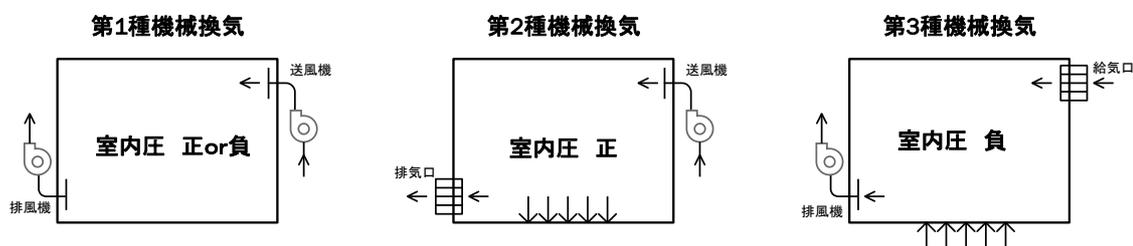


図2-1 機械換気方式の種類

## (2) 自然換気方式

自然換気方式<sup>[2-2]</sup>は、送風機などの機械力を使わずに換気を行えるので、省エネルギー手法として採用されることが多い。自然換気の原理は室内外の風圧差(風力)により空気が入れ換わる場合と、室内外の温度差(浮力)によって生じる場合とに大別されるが、自然換気はこの両者の原理が同時に影響し合って行われ、自然条件に左右されるので、換気量を一定に保ったり制御したりすることはできない。しかし、最近では温湿度や風向・風速、雨量などを計測し、自動的に判断して作業させるシステムが増えている。換気口は自然排煙口を兼用している場合が多いが、定風量機構や逆流防止機構を備えた換気口も開発されている。換気口は直接外気に開放するので、外部騒音に留意が必要であるとともに、フィルターを設けられないので室外空気の清浄度などにも注意が必要である。自然換気に機械換気や空調設備を補助的に組み合わせて換気を行うシステムをハイブリット換気(空調)システムと呼ぶ。広義には補助ファン付自然換気や煙突・風力利用機械換気を含むが、一般にはどちらかを選択して利用する方式または併用して用いる方式をハイブリット換気システムと呼んでいる。また、換気塔を設置し、そこに太陽熱を取入れ温度差換気に利用することも試みられており、ソーラーチムニーと呼ばれる。図 2-2 に自然換気方式の一例の概念図を示す。

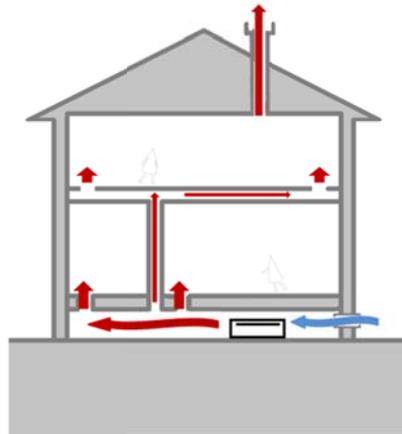


図 2-2 自然(温度差)換気方式の種類

## 2.3 換気性能評価

### 2.3.1 トレーサーガスによる換気量測定<sup>[2-3]</sup>

#### (1) 瞬時一様拡散の仮定

空間内に、ある汚染質が発生した場合、発生した瞬間に汚染質が空間全体に広がり、しかも、空間の至るところで同じ濃度になるような拡散状況を瞬時一様拡散と呼んでいる。実際には汚染質が発生すると、その空気の動きによって汚染質は徐々に拡散していき、汚染質濃度の分布が生じるのが普通であるが、空間内の気流状況によっては瞬時一様拡散に近い状態が起きる場合もある。また、室内の平均的な汚染質濃度を予測したい場合には、計算が簡便なのでしばしば瞬時一様拡散を仮定して室内平均濃度を求めることが行われる。

図2-3に示すような単室で汚染質が一定の割合 ( $M$  mg/h) で発生し、また、一定量の換気 ( $Q$  m<sup>3</sup>/h) が行われている場合の室内平均濃度を瞬時一様拡散に仮定して求める。

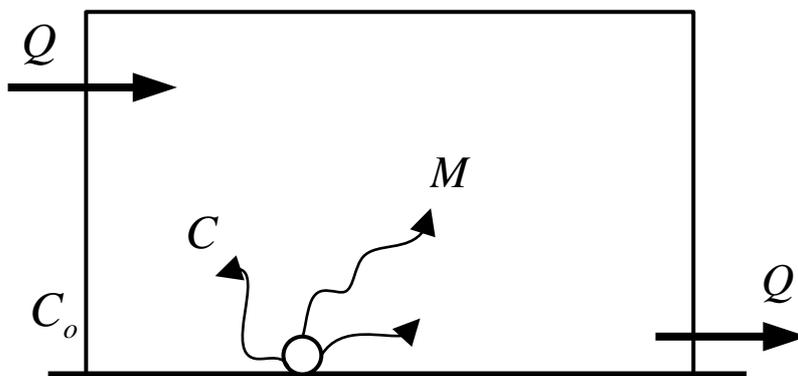


図 2-3 単室の濃度変動

微小時間  $dt$  における汚染質の室に対する流出入バランスを考えると、

$$C_0 Q dt + M dt - C Q dt = V dC \quad (2-1)$$

ここで

$C$  : 室内の汚染質濃度 [mg/m<sup>3</sup>]

$C_0$  : 外気の汚染質濃度 [mg/m<sup>3</sup>]

$M$  : 汚染質発生量 [mg/h]

$V$  : 室の容積 [m<sup>3</sup>/h]

$t$  : 時間 [h]

となり、 $dt$  時間に室内汚染濃度の微量  $dC$  だけ濃度上昇が起きる。

上式を整理すると微分方程式

$$\frac{V dC}{Q dt} = C_0 - C + \frac{M}{Q} \quad (2-2)$$

が得られる。これを初期条件  $t=0$  で、 $C=C_S$  として解くと

$$C = C_0 + (C_S - C_0) e^{-\frac{Q}{V}t} + \frac{M}{Q} \left( 1 - e^{-\frac{Q}{V}t} \right) \quad (2-3)$$

ここで

$C_S$  : 室内の初期濃度

となる。式 (2-3) の右辺第 1 項は外気の汚染質濃度、第 2 項は初期濃度減衰、第 3 項は汚染質発生による濃度の増加を示している。また、式中の  $Q/V$  は換気回数 [1/h] と呼ばれ、1 時間に室の空気が何回入れ換わるかを表している。

図 2-4 に室内汚染質濃度の時間変化を示す。図中の①、②、③はそれぞれ式 (2-3) の第 1 項、第 2 項、第 3 項に相当する。式 (2-3) は定常状態、すなわち  $t \rightarrow \infty$  で、

$$C = C_0 + \frac{M}{Q} \quad (2-4)$$

となる。これは長時間、 $M$  の発生、 $Q$  の換気量が維持されているときの室内汚染質濃度である。また、室内初期濃度  $C_S$  で、汚染質の発生がない場合 ( $M=0$ ) に換気を始めたとする、式 (2-3) の第 3 項はなくなり、室内汚染質濃度は

$$C = C_0 + (C_S - C_0) e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (2-5)$$

となり、図 2-4 で示したように徐々に減衰していき最終的には外気濃度と同じになる。

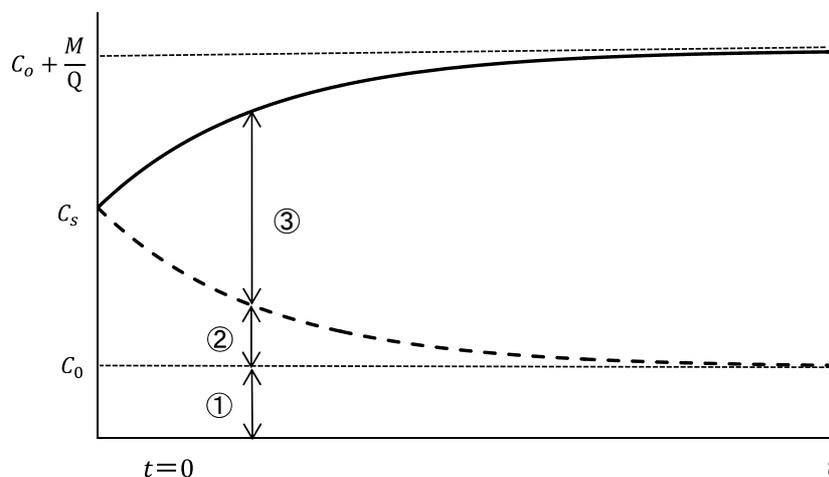


図 2-4 瞬時一様拡散の濃度変換

## (2) 濃度測定による換気量の測定

瞬時一様拡散が仮定できるような状況では、汚染質濃度の時間変化を測定することにより空間の換気量を求めることができる。この方法を適用することにより空間の換気量を求めることができる。この方法を適用するためには厳密には以下の仮定が必要である。

空間内に侵入、または空間内で発生した汚染質は空間内で瞬時一様拡散する。汚染質は空間の壁などに吸われたり、付着したりすることはない（吸着はない）、また、化学変化を起こさない。

流出入する空気の温度変化はない。

I. 汚染物質を空間内に一定割合で人為的に連続放出し、その定常状態の濃度を測定する方法

II. 汚染物質を空間内に放出し、均一的な濃度分布を達成した後の濃度変化を測定する方法（濃度減衰を測定する）

いずれの方法も、人為的に汚染質（ガス状の汚染質が用いられることが多い）を放出してその濃度を追跡する方法を、トレーサーガス法と呼んでいる。トレーサーガス法は空間の開口部や隙間が数多く分散しており、そこでの空気の流出入が不明確であるような自然換気の測定法として用いられることが多い。したがって、実験室実験などではなく実物での測定に適用されている。空気の流入や流出が予測でき、その位置も限定されている機械換気の場合には、流入口での風速測定やダクト内での流入測定により換気量を求める方法（JIS B 8330 に測定方法が規定されている）が用いられる。

トレーサーガス法による換気量の測定に用いられるトレーサーとしては、二酸化炭素（ $\text{CO}_2$ ）、エチレン（ $\text{C}_2\text{H}_4$ ）などが一般的である。トレーサーは空気の流動と共に動く、すなわち比重が空気とほぼ同じで、その濃度測定が簡便なものが適している。最近では6フッ素硫黄（ $\text{SF}_6$ ）が用いられる例もある。実際の測定においては、それぞれの測定環境や目的に応じて適切なトレーサーを選定するべきである。

## (3) 自然換気量の測定

室内で汚染物質（トレーサーガス）が常によく混合し、瞬時一様拡散であればザイデル式が成り立つ。すなわち、

$$\text{増加時} : p - p_0 = (p_1 - p_0) e^{-\frac{Q}{V}t} + \frac{k}{Q} \left( 1 - e^{-\frac{Q}{V}t} \right) \quad (2-6)$$

$$\text{平衡状態} : p - p_0 = \frac{k}{Q} \quad (2-7)$$

$$\text{減衰時} : p - p_0 = (p_1 - p_0) e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (2-8)$$

ここで

- $V$  : 室容積[m<sup>3</sup>]または[kg]  
 $k$  : 汚染物質発生量[m<sup>3</sup>/h]または[kg/h]  
 $Q$  : 換気量[m<sup>3</sup>/h]または[kg/h]  
 $p$  : 室内汚染物質濃度[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]または[kg/kg]  
 $p_0$  : 外気汚染物質濃度[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]または[kg/kg]  
 $p_1$  : 室内の初期汚染物質濃度[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]または[kg/kg]  
 $t$  : 時間[h]である。

これらの関係から換気量を求める方法には二通りあり、その一つは平衡濃度から知る方法と、減衰の速さから知る方法である。

平衡濃度から求める方法では、トレーサーガス濃度  $p$  が一定になるようにガス流量  $k$  を供給するか、 $k$  を流量一定で  $p$  が安定するまで運転し、式(2-7)から、

$$Q = \frac{k}{p - p_0} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (2-9)$$

として求める。この場合はガス流量を正確に計測する装置がいる、外部風速の変化などで  $Q$  が変動するときは計測値が安定しないが、換気量を長機関、実測するときに利用される。

一方、減衰を利用する方法ではトレーサーガスを室に噴出して十分、濃度を高くし、その濃度を一定時間毎に計測する。式(2-8)を常用対数を用いて書き換えると下式のようになる。

$$\log_{10} \frac{p - p_0}{p_1 - p_0} = -\frac{1}{2.303} \frac{Q}{V} t \quad (2-10)$$

$(p-p_0)/(p_1-p_0)$  と  $t$  の関係を方対数グラフにプロットすれば、その回帰式は右下がりの直線となり、その勾配は、

$$-\frac{1}{2.303} \frac{Q}{V} = -\frac{1}{2.303} n \quad (2-11)$$

であるから、換気量  $Q$ 、換気回数  $n$  が求まる。この方法では室容積  $V$  を知る必要があるが、測定は濃度  $p$  の時間変化のみである。

### 2.3.2 多数室系換気性能評価指標 (SRF)

対象室に直接給気される外気導入量を対象に各換気対象室の充足度を表す指標として SRF (Supply Rate Fulfilment) がある。SRF は完全な充足状態で最大値 1 を示し、その数値の大小で充足度が表される。以下に SRF の定義を示す。

SRF の定義<sup>[2-4]</sup>

$$\text{SRF} = \text{実質的に換気に供する外気相当空気量} / \text{実質的に必要な外気導入量}$$

この定義で SRF の分母である「実質的に必要な外気導入量」とは当該室でもともと必要とされている外気導入量の他に他室から汚染された空気が流入してその汚染質を許容濃度まで希釈するために外気導入が必要となる場合は、その希釈用の外気導入量を加えた外気導入量を示す。また分子となる「実質的に換気に供する外気相当空気量」(以下、有効新鮮空気量  $S_i$ ) は当該室への直接供給される外気量と他室から供給される外気ポテンシャルを含む空気量の総和であり、この総和が当該室に必要とされている空気量 (分母) を上回る場合は余剰した外気導入相当空気量があると考え、他室の換気に供すると考える。

表 2-1 本研究で扱う SRF の特徴

- |   |
|---|
| ① 多数室の換気系における実質的な給気充足度が 1 つの数字で表現できる    |
| ② 各室で実質的に換気に供する外気相当空気量が評価できる            |
| ③ 各室で不足する外気相当空気量が表現できる                  |
| ④ トレーサーガスを用いて値が推定できる                    |
| ⑤ 同一物質で許容濃度が異なる室が系にある場合も実質的外気導入量の評価ができる |

SRF 指標は以上の空気の持つ新鮮外気基準の性能を表す特徴のほかに、設計値以上の換気があった場合の余剰する空気量が算定できるため、換気に供しない空気量が算定できるためこの値を最小にすることが冷暖房負の外気負荷を低減することとなり、省エネルギー的な判断が可能となる。

#### (a) SRF の基本式

ある空気量  $Q \text{ m}^3$  に、外気濃度を基準とした汚染物質が濃度  $\sigma \text{ mg/m}^3$  含まれており、その汚染物質の許容濃度が  $\sigma_c$  である場合、この空気は許容濃度  $\sigma_c$  である空気  $\sigma / \sigma_c \cdot Q \text{ m}^3$  と汚染物質濃度が外気同等である空気の混合空気であると考えられる。よって、この空気には  $(1 - \sigma / \sigma_c) \cdot Q \text{ m}^3$  分の外気相当空気量が含まれており汚染物質を希釈することが可能であ

と言える。この空気量 $(1 - \sigma / \sigma_c) \cdot Q \text{ m}^3$ を余剰している新鮮空気量（以下、余剰新鮮空気量）として、 $Q$ にかかる係数を余剰新鮮空気量率 $\alpha$ として式(2-12)のように定義する。

$$\alpha \equiv 1 - \frac{\sigma}{\sigma_c} \quad (2-12)$$

式(2-12)は外気を基準とした濃度であり、外気の場合は汚染質濃度  $\sigma = 0$  となり、余剰新鮮空気量率  $\alpha$  は 1 を示すこととなる。

SRF に関する関係式を以下に示す。前述のように多数室換気系の換気性能評価をする場合には他室を通過した空気の評価が重要であり、本論文では他室を通過した空気内に含まれる外気相当の質を評価する余剰新鮮空気量を定義して換気性能を評価する。

式(2-12)の定義に基づき多数室系の新鮮空気量の保存式を  $i$  室についてたてると式(2-13)のようになる。

$$A_i + \sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot Q_{ij} - \alpha_i \cdot \left( B_i + \sum_{j=1}^N Q_{ji} \right) - P_i = 0 \quad (2-13)$$

ここで

- $A_i$  :  $i$  室への直接新鮮空気量 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- $B_i$  :  $i$  室から直接外部へ排出される空気量 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- $P_i$  :  $i$  室の必要新鮮空気量 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- $Q_{ij}$  :  $j$  室から  $i$  室へ流れる空気量 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- $N$  : 室数
- $\alpha_i$  :  $i$  室の余剰新鮮空気量率

式(2-13)の各項は実質的な外気相当空気量（ここでは余剰新鮮空気量）の次元を持っており、左辺の第1項は  $\alpha = 1$  である  $i$  室への直接の外気導入量を、第2項は他室から流入する余剰新鮮空気量の総和を、第3項は流出する余剰新鮮空気量を、第4項  $P_i$  は  $i$  室で必要な新鮮空気量であり当該室で消費される新鮮空気量である。 $P_i$  は、汚染物質を想定した場合、 $i$  室内で発生する汚染物質を許容濃度にするために必要な外気相当空気量と等しい。そのため設計において当該室に必要とされる外気導入量と等しい。式(2-13)は室数  $N$  分だけたてられ余剰新鮮空気量率  $\alpha$  の  $N$  元連立方程式として  $\alpha$  が求められる。外気の室番号を 0 として外気も室間の空気流動と同じと考える一般式では式(2-13)'のようになる。

$$\sum_{j=0}^N \alpha_j \cdot Q_{ij} - \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^N Q_{ji} - P_i = 0 \quad (2-13)'$$

次に、i 室に供給される実質的な外気導入量である有効新鮮空気量 $S_i$ は以下の式(2-14)のように表せる。

$$S_i = A_i + \sum_{j=1}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) - \sum_{j=1}^N \max(0, \alpha_i \cdot Q_{ji}) - \max(0, \alpha_i \cdot B_i) \quad (2-14)$$

ここで

$S_i$  : i 室の有効新鮮空気量 [m<sup>3</sup>/h]

式(2-14)も各項は実質的な外気相当空気量（ここでは有効新鮮空気量）の次元を持っており右辺第1項はi室に直接供給される外気量を、第2項は他室から供給される有効新鮮空気量を、第3項はi室から他室へ流出する有効新鮮空気量を、第4項はi室から直接排出され他室の換気に供さない有効新鮮空気量を示している。第2項、第3項および第4項は有効新鮮空気量の正の値のみを考慮に入れている。これは第2項の場合、負の値は汚染物質を想定した場合には許容濃度を越えた汚染質を希釈する能力が無い空気量であり、有効新鮮空気量には含めないためである。第3項および第4項はi室では換気に供さない外気相当空気量であり、有効新鮮空気量に組み込まない。このように有効新鮮空気量はi室外部から供給された外気相当空気量のうち実際にi室の換気に供する外気相当空気量である。なお式(2-14)を一般式の形で表すと式(2-14)'となる。

$$S_i = \sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) - \sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_i \cdot Q_{ji}) \quad (2-14)'$$

次に、i室に実質的に必要な必要新鮮空気量について示す。外気導入の分配や供給が設計通りになされており、実質的に外気導入量が不足しない条件では必要新鮮空気量 $P_i$ が実質的に必要な新鮮空気量と等しいが、ある室で汚染質を希釈するのに十分な有効新鮮空気量が得られておらず、かつその室からの空気がi室に流入する場合はその汚染空気に含まれる汚染質を許容濃度まで希釈するのに必要な外気導入量も、もともとの必要新鮮空気量に加えて要求される。そのため実質的な必要新鮮空気量 $P_i'$ は式(2-15)のように表される。

$$P_i' = P_i - \sum_{j=1}^N \min(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) \quad (2-15)$$

ここで

$P_i'$  : i 室の実質必要新鮮空気量 [m<sup>3</sup>/h]

よって、実質必要新鮮空気量に対する有効新鮮空気量の比である SRF は式(2-6)のように表される。

$$SRF_i = S_i / P'_i = \frac{A_i + \sum_{j=1}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) - \max(0, \alpha_i) \cdot (B_i + \sum_{j=1}^N Q_{ji})}{P_i - \sum_{j=1}^N \min(0, \alpha_j \cdot Q_{ij})} \quad (2-16)$$

一般式の形では以下の式(2-16)'となる。

$$SRF_i = S_i / P'_i = \frac{\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) - \max(0, \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^N Q_{ji})}{P_i - \sum_{j=1}^N \min(0, \alpha_j \cdot Q_{ij})} \quad (2-16)'$$

式(2-16)で SRF のとりうる最大値は  $S_i = P'_i$  となる場合であり、 $SRF=1$  となる。つまり完全な充足状態で 1 を示す。SRF は各室の換気性能を表し、更に系全体の換気性能を表すには以下の式(2.3.17)のような必要新鮮空気量を設定した室の SRF 値の累乗平均となる OSRF (Overall Supply Rate Fulfilment) を定義する。

$$OSRF = (SRF_1 \times SRF_2 \times \dots \times SRF_M)^{1/M} \quad (2-17)$$

ここで

$M$  : 必要新鮮空気量を設定した室の数

(b) ガス濃度と余剰新鮮空気量率の関係

通常、定常条件における室数  $N$  の系における質量保存則に基づく  $i$  室のガス量収支は式(2-18)のように表される。

$$q_i + \sum_{j=0}^N \sigma_j Q_{ij} - \sum_{j=0}^N \sigma_i Q_{ji} = 0 \quad (2-18)$$

ここで

$q_i$  :  $i$  室で発生するガス量 [mg/h]

式(2-18)の両辺を許容濃度  $\sigma_c$  で除すと式(2-19)のようになる。

$$\frac{q_i}{\sigma_c} + \sum_{j=0}^N \frac{\sigma_j}{\sigma_c} Q_{ij} - \sum_{j=0}^N \frac{\sigma_i}{\sigma_c} Q_{ji} = 0 \quad (2-19)$$

今、i 室の風量収支は 0 となるので

$$\sum_{j=0}^N Q_{ij} - \sum_{j=0}^N Q_{ji} = 0 \quad (2-20)$$

ここで式(2-20)と式(2-19)の差をとると以下の式(2-21)のようになる。

$$-\frac{q_i}{\sigma_c} + \sum_{j=0}^N \left(1 - \frac{\sigma_j}{\sigma_c}\right) \cdot Q_{ij} - \sum_{j=0}^N \left(1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_c}\right) \cdot Q_{ij} = 0 \quad (2-21)$$

式(2.2.12)の定義から $\alpha_j$ および $\alpha_i$ はそれぞれ

$$\alpha_j = 1 - \frac{\sigma_j}{\sigma_c} \quad \alpha_i = 1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_c}$$

と表わせるので、式(2-21)に代入して、以下の式(2-21)'を得る。

$$-\frac{q_i}{\sigma_c} + \sum_{j=0}^N \alpha_j Q_{ij} - \sum_{j=0}^N \alpha_i Q_{ji} = 0 \quad (2-21)'$$

(c) ガス濃度と SRF の関係

前項で余剰新鮮空気量とガス量収支は同現象を別表現で表していることを示した。本項では、さらに SRF とガス量収支の関係について示す。保存式(2-13)'の左辺第1項を SRF の関係式(2-16)'に代入するため $\alpha_j \cdot Q_{ij}$ が正である場合および負である場合に分けて表現すると式(2.2.13)''のようになる。さらに(2.2.16)'式の最右辺における分母の形となるよう整理すると式(2.2.13)'''となる。

$$\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) + \sum_{j=0}^N \min(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) - \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^N Q_{ji} - P_i = 0 \quad (2-13)''$$

$$P_i - \sum_{j=1}^N \min(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) = \sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) - \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^N Q_{ji} \quad (2-13)'''$$

式(2-13)'''では左辺第2項の $\alpha$ の範囲が $j=1$ からとなっているが、 $\min(0, \alpha_i \cdot Q_{ij})$ の項は外気(つまり $j=0$ )の場合は0となり実質的には加算されないため $j=0$ と同じ意味を表す。ここで式(2-13)'''を式(2-16)'に代入すると、式(2-16)''のようになる。

$$SRF_i = \frac{\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) - \max(0, \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^N Q_{ji})}{\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) - \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^N Q_{ji}} \quad (2-16)''$$

以下、 $SRF_i=1$  となる充足状態と  $SRF_i < 1$  となる非充足状態に分けてガス量収支と SRF 値との関係を示す。

(1)  $SRF_i=1$  となる場合

$SRF_i=1$  を示すには式(2-16)''の形から、右辺分子と右辺分母がそれぞれ 0 より上の値を示し、かつ分子と分母の値が等しくなればよい。今、右辺における分子および分母のそれぞれ第 1 項は  $\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij})$  と等しい形をしているため、右辺分母および分子の各第 2 項が同値(式(2-22))となれば  $SRF_i=1$  となり完全充足状態を示すこととなる。今、 $\alpha_i$  が 0 以上であれば、式(2-22)を満たすこととなり  $SRF_i=1$  の必要十分条件となる。よって  $SRF_i=1$  の条件として式(2-23)が示される。

$$\max\left(0, \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^N Q_{ji}\right) = \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^N Q_{ji} \quad (2-22)$$

$$\alpha_i \geq 0 \Leftrightarrow SRF_i \quad (2-23)$$

また式(2-23)は、式(2-12)の定義から式(2-24)のようにも表せる。

$$\sigma_i \leq \sigma_c \Leftrightarrow SRF_i = 1 \quad (2-24)$$

さらに、以降の式展開を簡便性のため濃度比  $d_i$  を以下の式(2-25)のように定義する。

$$d_i = \frac{\sigma_c}{\sigma_i} \quad (2-25)$$

よって濃度比  $d_i$  と  $SRF_i=1$  の関係は以下の式(2-26)のように表される。

$$d_i \geq 1 \Leftrightarrow SRF_i = 1 \quad (2-26)$$

余剰新鮮空気量率が正であり必要新鮮空気量が得られる条件となっているためこれらの式が表現するところは当然の結果であるが、ガス量収支との関係からも  $SRF_i=1$  となる条件が示された。

(2)  $SRF_i < 1$  となる場合

$SRF_i$  が充足状態を示すか否かは  $i$  室の濃度  $\sigma_i$  と許容濃度  $\sigma_c$  の大小関係 (式(2-24)) から簡単に判断が出来た。しかし非充足状態の  $i$  室のガス濃度からだけでは不足している外気相当空気量を求めることは不可能であり、空間空気流量の関係を用いて表現する必要がある。以下、非充足条件における  $SRF_i$  値の導出方法を示す。 $SRF_i < 1$  となる非充足の場合は式(2-23)および式(2-24)と逆の条件となるため、式(2-27)および式(2-28)が条件となる。

$$\alpha_i < 0 \Leftrightarrow SRF_i < 1 \quad (2-27)$$

$$\sigma_i > \sigma_c \Leftrightarrow SRF_i < 1 \quad (2-28)$$

今、 $SRF_i$  と  $\alpha$  の関係式(2-16)'' に  $\alpha_i < 0$  の条件を代入すると右辺分子第2項が0となるため式(2-16)'''となる。

$$SRF_i = \frac{\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij})}{\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) - \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^N Q_{ji}} \quad (2-16)'''$$

更に、右辺において分母・分子とも  $\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij})$  (分母および分子の第1項) で除して式(2-16)''''を得る。

$$SRF_i = \frac{1}{1 - \alpha_i \cdot \frac{\sum_{j=0}^N Q_{ji}}{\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij})}} \quad (2-16)''''$$

ところで、 $i$  室に流入する空気の平均的な余剰新鮮空気量率は、 $i$  室に流入する実質的な外気導入量を流入する空気量の総和で除したものであるため式(2-29)となる。

$$\bar{\alpha}_i = \frac{A_i + \sum_{j=1}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij})}{A_i + \sum_{j=1}^N Q_{ij}} \quad (2-29)$$

$\bar{\alpha}_i$  :  $i$  室に流入する空気の平均余剰新鮮空気量率

なお式(2-29)は一般式の形では以下のようなになる。

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij})}{\sum_{j=0}^N Q_{ij}} \quad (2-29)'$$

また式(2-12)と式(2-25)から余剰新鮮空気量率 $\alpha_i$ と濃度比 $d_i$ は式(2-30)のような関係にある。

$$\alpha_i = 1 - \frac{1}{d_i} \quad (2-30)$$

ここで式(2-16)''''に式(2-20)、式(2-29)および(2-30)を代入すると式(2-31)のように $SRF_i$ が $i$ 室のガス濃度と $i$ 室に流入する平均余剰新鮮空気量率を用いて表すことが出来る。

$$SRF_i = \frac{1}{1 - (1 - \frac{1}{d_i}) \cdot \frac{\sum_{j=0}^N Q_{ij}}{\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ji})}} = d_i \cdot \frac{1}{d_i + (1 - d_i) \cdot \frac{1}{\bar{\alpha}_i}} \quad (2-31)$$

式(2-31)の関係式をもとに $i$ 室に流入する平均余剰新鮮空気量率 $\bar{\alpha}_i$ と $i$ 室の濃度比 $d_i$ および $SRF_i$ の関係を図示すると、図2-5のようになる。図2-5では $\bar{\alpha}_i$ を0~1.0まで変化した場合の値を示している。通常の定常状態の換気系では $\bar{\alpha}_i=0$ であれば、当該室に外気相当の空気量が全く供給されていないことになり濃度比 $d_i > 0$ となることはない。そのため、図中の $\bar{\alpha}_i=0$ の線は、必要新鮮空気量 $P_i=0$ と設定した室外では存在し得ない条件である。

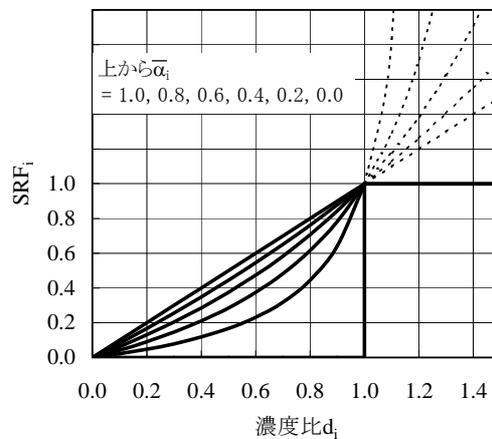


図2-5  $SRF_i$ と $\bar{\alpha}_i$ および $d_i$ の関係

## 2.4 換気回路網を用いたシミュレーション手法

### 2.4.1 換気回路網ソフト VentSim

本研究では換気回路網計算を用いたシミュレーションに VentSim バージョン 2.1.5<sup>[2-5]</sup>を用いた。このシミュレーションソフトは、独立行政法人建築研究所と(社)プレハブ建築協会の共同研究で開発されたもので、与えられた条件下での空気の流れや、室ごとの給気の充足度 SRF と汚染質等の非定常濃度等が求めることができる。

### 2.4.2 換気回路網計算について

多数室の換気回路網は室間の窓やドア、隙間などの開口を抵抗と考え外部や室内は体積を無視することが出来る「質点」としてモデル化し「質点」間の空気量流動を計算する方法である。この方法は室内空気流動の複雑な動きを無視し、空間の空気の流れを簡潔に知ることが出来る。図 2-6 のようなモデルケースでは式(2-32)と(2-33)より各開口の流量  $Q$  を求める事ができる。

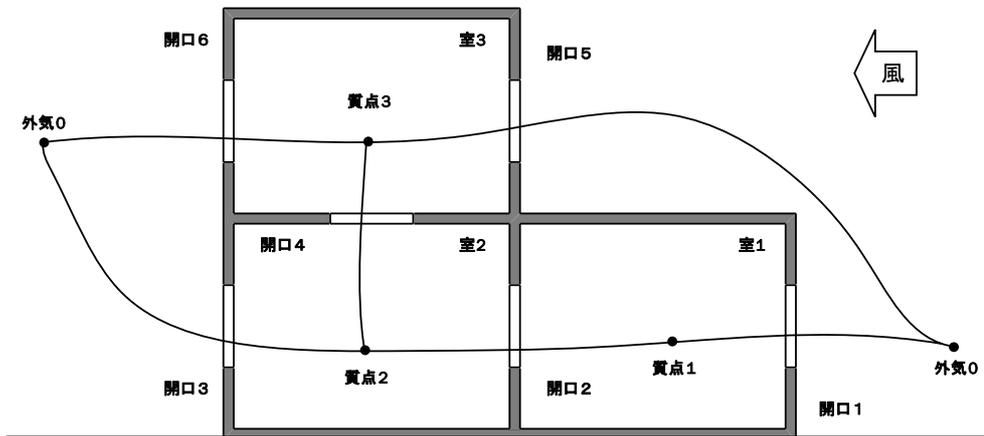


図 2-6 換気回路網計算の計算モデル

$$Q = f(\Delta P) = C \cdot \Delta P^{\frac{1}{n}} \quad (2-32)$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2-33)$$

ここで

- $Q$  : 室間の空気流量[m<sup>3</sup>/h]
- $\Delta P$  : 室間の圧力
- $C$  : 定数
- $n$  : 隙間定数 ( $1 \leq n \leq 2$   $n=1$  隙間なし  $n=2$  完全開口)
- $\rho$  : 空気密度
- $v$  : 室間の流速

### 2.4.3 VentSim の計算方法

VentSim で行われている汚染濃度計算のモデルを図 2-7 に示す。図 2-7 のような換気性上の室 1~3 の場合、微小時間  $dt$  における室 1~3 の汚染物質流入収支に以下の関係が成り立つ。

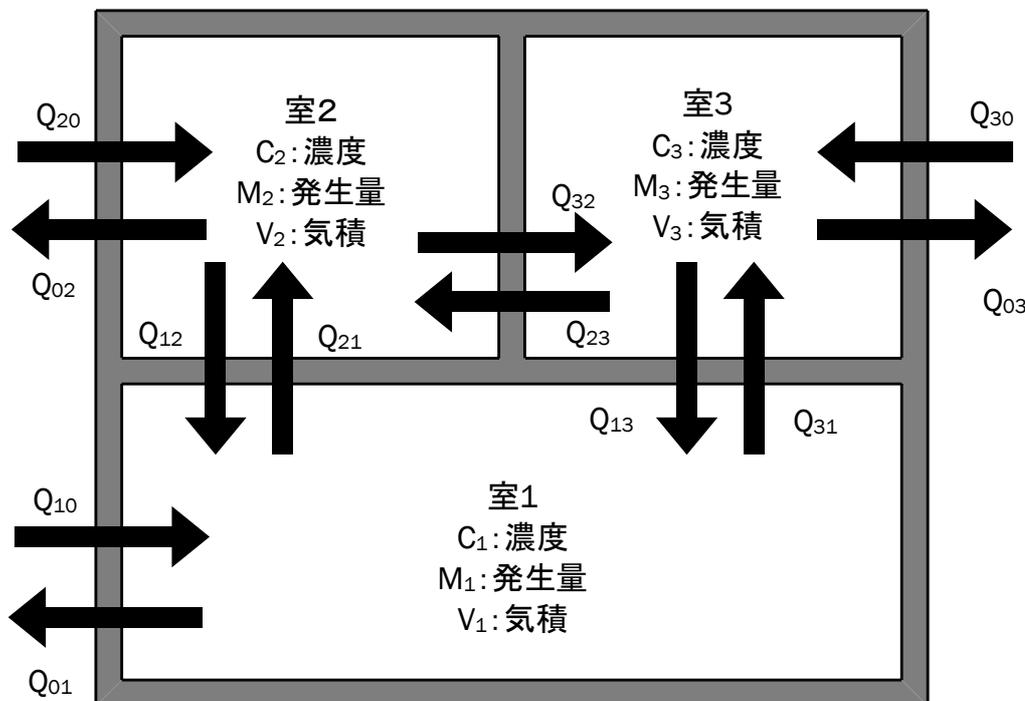


図 2-7 汚染濃度計算のモデル

$$\begin{aligned}
 M_1 dt + C_0 Q_{10} dt + C_2 Q_{12} dt + C_3 Q_{13} dt - C_1 Q_{01} dt - C_1 Q_{21} dt - C_1 Q_{31} dt &= V_1 dC_1 \\
 M_2 dt + C_0 Q_{20} dt + C_1 Q_{21} dt + C_3 Q_{23} dt - C_2 Q_{02} dt - C_2 Q_{12} dt - C_2 Q_{32} dt &= V_2 dC_2 \\
 M_3 dt + C_0 Q_{30} dt + C_1 Q_{31} dt + C_2 Q_{32} dt - C_3 Q_{03} dt - C_3 Q_{13} dt - C_3 Q_{23} dt &= V_3 dC_3 \quad (2-34)
 \end{aligned}$$

よって、全室数を  $m$  として式(2-34)を整理すると、以下の  $m$  次元連立微分方程式(2-35)が得られる。

$$\frac{dC_n}{dt} = \frac{\sum_{i=0}^m Q_{ni}}{V_n} C_n + \frac{1}{V_n} \left( M_n + \sum_{i=0}^m C_i Q_{in} \right) \quad (2-35)$$

VentSim では式(2-35)をルンゲクッタ法で解いている。

## 2.5 室内空気環境に関する基準

室内空気は人体から発生するCO<sub>2</sub>（二酸化炭素）、臭気、衣服や喫煙による粉塵、燃焼に起因するCO<sub>2</sub>、CO（一酸化炭素）、NO<sub>x</sub>（窒素酸化物）、SO<sub>x</sub>（硫黄酸化物）などによって汚染される。換気の目的の一つは、これらの汚染物質の濃度を許容値以内までに希釈し抑えることにある。また外気は本来、新鮮空気と呼ばれ汚染されていない清浄な状態であることが前提であったが、最近は大気汚染による汚染も考慮する必要が求められるようになっている。表2-2に国内での建築物における室内空気環境基準として定められている「建築基準法」および「建築物環境衛生管理基準」を示す。<sup>[2-6]</sup>

表2-2 建築基準法における室内空気基準<sup>[2-6]</sup>

項目	基準	備考
(1) 浮遊粉塵の量	0.15mg/m <sup>3</sup> 以下 (10μm以下の粉塵に対し)	9ppm (ASHRAE)  } 空調設備がある時のみ
(2) CO	10ppm	
(3) CO <sub>2</sub>	1000ppm	
(4) 温度	17~28℃ (室内外温度差を大としない)	
(5) 相対湿度	40~70%	
(6) 気流	0.5m/s以下	
(7) ホルムアルデヒド	0.08ppm (0.1mg/m <sup>3</sup> )以下	

### 2.5.1 二酸化炭素濃度

二酸化炭素は換気性状の指標としてしばしば使われることがある。大気中の濃度はおよそ400ppmであり、これは気象庁が大気汚染の直接的な影響を受ける可能性が極めて低い南鳥島で観測したことものものであり、年々上昇傾向にあり地球温暖化の進行度を示す指標として多くの関心を寄せている。

室内空気環境における二酸化炭素の基準値としては、建築基準法や建築物衛生法の1000ppm以下にするよう規定されている。この基準値は室内空気汚染の総合指標であり、二酸化炭素そのものの健康影響に基づくものではなく、室内にある他の汚染物質の発生量が定量化できないときに、二酸化炭素濃度がこの基準値以下であれば他の汚染物質による空気汚染も許容できるものであると推定する場合に用いる。他にも、学校環境衛生基準では1500ppm以下と定められており、緩和措置がとられている。表2-3に二酸化炭素濃度に関する各基準を示す。

一方、二酸化炭素そのものが健康に影響をおよぼす最低濃度は7000ppmといわれ、カナダでは住宅における室内空気基準としては、3500ppmという値が定められており、二酸化炭素を単独指標の基準値として扱う場合にはこの値が使われることがある。<sup>[2-7]</sup>

表 2-3 二酸化炭素濃度に関する基準

法律等	基準値[ppm]
建築基準法、建築物衛生管理基準	1000
学校環境衛生管理基準	1500
旅館業衛生管理	1500
ASHRAE	外気濃度+700
Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health(Canada)	3500

### 2.5.2 相対湿度

建築物衛生法では、相対湿度の室内基準は40%RH以上70%RH以下と定められている。相対湿度は室内環境において、その快適性や安全性に与える影響が大きいといわれている。夏季の高湿度状態は、暑さに対する不快感を高めるだけでなく、アレルギー疾患などとの関係が考えられる好湿性真菌やダニの増殖を招きやすくなる。一方で、冬季の低湿度状態は、気道粘膜を乾燥させ気道の細菌感染予防作用を弱めるとともに、インフルエンザウイルスの生存時間が延長し、インフルエンザに罹患しやすい状況になり、アトピー性皮膚炎や気管支喘息などのアレルギー疾患の患者にとっては、低湿度が増悪因子ともなる。<sup>[2-8]</sup>

住宅に関しては、温度と同様に相対湿度についての基準は存在していない。理由としては、相対湿度が温熱環境に与える影響は個人差が大きく、法として一義的に値を定められないことや実際に基準を設けたとしても一般的な住宅ではその制御は難しく現実的ではないことが考えられる。

### 2.5.3 シックハウス症候群およびその他の空気汚染質

近年、住宅の高断熱・高気密化の発展や開放型燃焼暖房器機や加湿器の使用により結露が発生しやすくなり、ダニやカビの発生を招くだけでなく有機溶剤などを使用した新材の使用により室内への化学物質の拡散が増加しアレルギー疾患や呼吸器の障害を引き起こすシックハウス症候群が多発するようになった。その対策として政府は平成15年に建築基準法を改正し、表2-4に示すような揮発性有機化合物（VOC）の抑制として建材などの放出基準を定めるとともに24時間換気設備の設置義務化を行った。特に、現在では建築物衛生法にも示されているホルムアルデヒドについては、室内空気環境の基準として追加されている。

これらの他にも、空気中の細菌数、臭気、放射性物質、イオンや石材などから発生する放射性ラドンが空気質や居住者の健康に影響を与えるとされている。<sup>[2-6]</sup>

表2-4 個別の揮発性有機化合物（VOC）の指針値<sup>[2-6]</sup>

揮発性有機化合物	毒性指標	室内濃度指針値
ホルムアルデヒド	ヒト曝露における鼻咽頭粘膜への刺激	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)
トルエン	ヒト曝露における神経行動機能および生殖発生への影響	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppm)
キシレン	妊娠ラット曝露における出生児の中樞神経系発達への影響	870 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.20ppm)
パラジクロベンゼン	ビーグル犬曝露における肝臓肝臓および腎臓等への影響	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.04ppm)
エチルベンゼン	マウスおよびラット曝露における肝臓および腎臓への影響	3800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.88ppm)
スチレン	ラット曝露における脳や肝臓への影響	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.05ppm)
クロルピリホス	母ラット曝露における新生児の神経発達への影響および新生児脳への形態学的影響	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppm), ただし小児の場合は, 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.007ppm)
フタル酸ジブチル	母ラット曝露における新生児の生殖器の構造異常等の影響	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppm)

\*両単位の換算は、25℃の場合による。日本建築学会編「シックハウス辞典」技報堂出版, p11, 表-1

## 2.6 人間のCO<sub>2</sub>呼出量に関する研究

第1章2節でも述べたように本研究では、先行研究で作成したCO<sub>2</sub>呼出量関係式を用いて人間の呼気から排出されるCO<sub>2</sub>を推定し、それをトレーサーとして換気性能評価としての空気環境を定量的に評価している。人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を推定する際に使用される人間の個人属性、身長、体重、体表面積等の体格に関する情報、代謝量や活動量などの人体で生命維持や身体活動によって消費されるエネルギー消費量、それに加え年齢や性別などの情報が考えられる。特に代謝量とCO<sub>2</sub>呼出量には強い相関があると指摘されているため、既往の研究の多くは活動量に多寡によりCO<sub>2</sub>呼出量を設定したり、それを変数とした推定式を作成していたりする。またCO<sub>2</sub>呼出量を推定する方法の一つに、心拍数や脈拍数とO<sub>2</sub>消費量の相関を用いて活動量を推定する方法があり、この過程で得られるO<sub>2</sub>消費量を変換することでCO<sub>2</sub>呼出量を算出する方法もある。

本章では本研究で用いるCO<sub>2</sub>呼出量関係式についての先行研究および既往研究、それらと関連する代謝量などの基本事項や推定手法について述べる。

### 2.6.1 基本事項

#### (1) 代謝

代謝とは、生体の生命活動に伴う物質の変換過程の総和であり、これをエネルギーの立場から見た総称をエネルギー代謝と呼ぶ。特に、覚醒状態において生命活動に必要な最小限のエネルギーである基礎代謝量は、体内のエネルギー源が完全に熱に変換された時の代謝量であり、生体のエネルギー利用速度の基本的指標となるものである。基礎代謝量は、快適な室内環境において12時間以上の絶食による空腹状態と安静仰臥位で測定される。<sup>[2-9]</sup>一方、直接測定ではなく、性、年齢、身長、体重などを用いた推定式を開発する試みも数多く行われている。日本人の食事摂取基準2015年版<sup>[2-10]</sup>に記載されている基礎代謝量の主な推定式を表2-5、2-6に示す。先行研究で使用した基礎代謝量に関しては、表2-6の値を参考としている。

エネルギー代謝（エネルギー消費量）においても同じくその評価法は、直接熱量法と間接熱量測定法に大別できる。<sup>[2-11]</sup>直接法は、消費されたエネルギーが熱となって放散されるため、その熱量を直接的に測定することによりエネルギー消費量を把握する手法であり、ヒューマンカロリメーターなどに代表されるが、この装置は非常に大がかりであり、活動内容も限定されるため、現在ではほとんど使用されていない。また間接法は、エネルギーを生成する際、食物から摂取した栄養素と酸素の化学反応が二酸化炭素を産生するという生理的なメカニズムを利用して、呼気中の酸素および二酸化炭素の濃度と容積からエネルギー消費量を算出する方法である。代表的なものとして式(2-36)、(2-36)'のWeirの式(1949)を利用したものがある。

$$EE = 3.941 \times V_{O_2} + 1.106 \times V_{CO_2} - 2.17 \times m_{N_2} \quad (2-36)$$

また摂取エネルギーに占めるタンパク質の割合は安定しているためタンパク質の占める割合を12.5%と仮定した場合、上記の式は次のようになる。

$$EE = 3.9 \times V_{O_2} + 1.1 \times V_{CO_2} \quad (2-36)'$$

ここで

EE : エネルギー消費量[kcal]

$V_{O_2}$  : 酸素摂取量[L]

$V_{CO_2}$  : 二酸化炭素産出量[L]

$m_{N_2}$  : 尿中窒素排泄量[g]

表 2-5 基礎代謝量の主な推定式 <sup>[2-10]</sup>

名称	年齢 (歳)	推定式 (kcal/日) 上段 男性、下段 女性
基礎代謝基準値	-	表 2-6 参照
国立健康・栄養研究所 の式	-	$(0.0481 \times W + 0.0234 \times H - 0.0138 \times A - 0.4235) \times 1,000 / 4.186$ $(0.0481 \times W + 0.0234 \times H - 0.0138 \times A - 0.9708) \times 1,000 / 4.186$
Harris-Benedict の式	-	$66.4730 + 13.7516 \times W + 5.0033 \times H - 6.7550 \times A$ $655.0955 + 9.5634 \times W + 1.8496 \times H - 4.6756 \times A$
Schofield の式	18~29	$(0.063 \times W \times 2.896) \times 1,000 / 4.186$ $(0.062 \times W \times 2.036) \times 1,000 / 4.186$
	30~59	$(0.048 \times W \times 3.653) \times 1,000 / 4.186$ $(0.034 \times W \times 3.538) \times 1,000 / 4.186$
	60 以上	$(0.049 \times W \times 2.459) \times 1,000 / 4.186$ $(0.038 \times W \times 2.755) \times 1,000 / 4.186$
FAO/WHO/UNU の式	18~29	$(64.4 \times W - 113.0 \times H / 100 + 3,000) / 4.186$ $(55.6 \times W - 1,397.4 \times H / 100 + 148) / 4.186$
	30~59	$(47.2 \times W - 66.9 \times H / 100 + 3,769) / 4.186$ $(36.4 \times W - 104.6 \times H / 100 + 3,619) / 4.186$
	60 以上	$(36.8 \times W - 4,719.5 \times H / 100 + 4,481) / 4.186$ $(38.5 \times W - 2,665.2 \times H / 100 + 1,264) / 4.186$

略号) W: 体重 (kg)、H: 身長 (cm)、A: 年齢 (歳)

表 2-6 基礎代謝基準値(参照体重における基礎代謝量) [2-10]

性別	男性			女性		
	基礎代謝基準値 (kcal/kg/日)	参照体重 (kg)	基礎代謝量 (kcal/日)	基礎代謝基準値 (kcal/kg/日)	参照体重 (kg)	基礎代謝量 (kcal/日)
年齢 (歳)						
1~2	61.0	11.5	700	59.7	11.0	660
3~5	54.8	16.5	900	52.2	16.1	840
6~7	44.3	22.2	980	41.3	21.3	920
8~9	40.8	28.0	1,140	38.3	27.4	1,050
10~11	37.4	35.6	1,330	34.8	36.3	1,260
12~14	31.0	49.0	1,520	29.6	47.5	1,410
15~17	27.0	59.7	1,610	25.3	51.9	1,310
18~29	24.0	63.2	1,520	22.1	50.0	1,110
30~49	22.3	68.5	1,530	21.7	53.1	1,150
50~69	21.5	65.3	1,400	20.7	53.0	1,100
70以上	21.5	60.0	1,290	20.7	49.5	1,020

## (2) Met (メット) およびエネルギー代謝量を表現する指標

人体の代謝量は、メット (met) という単位で表され、国際的にも作業の強弱の指標としてよく使用されている。1met は、椅座安静状態でおよそ 58.2W/m<sup>2</sup> に相当し、単位体表面積 [m<sup>2</sup>] 当りで表される。算出方法は、式 (2-37) に示すように基準となる着座安静時のエネルギー代謝量に対するある作業時のエネルギー代謝量の比をエネルギー代謝率 Met ととし、単位は[met]を用いる。また、ASHRAE HANDBOOK [2-12] に記載されている活動に対応した値を表 2-7 に示す。

$$\text{Met}_i = \frac{M_i}{M_{Si}} \quad (2-37)$$

ここで

- Met<sub>i</sub> : 被験者 *i* のエネルギー代謝率 [-]
- M<sub>i</sub> : 被験者 *i* のある作業時のエネルギー代謝量 [W]
- M<sub>Si</sub> : 被験者 *i* の着座安静時のエネルギー代謝量 [W]

表 2-7 ASHRAE に示されている Met 値 <sup>[2-12]</sup>

Activities	met
Resting	
Sleeping	0.7
Reclining	0.8
Seated, quiet	1.0
Standing, relaxed	1.2
Walking	
2.9fps(2mph)	2.0
4.4fps(3mph)	2.6
5.9fps(4mph)	3.8
Office Activities	
Reading, seated	1.0
Writing	1.0
Typing	1.1
Filing, seated	1.2
Filing, standing	1.4
Walking about	1.7
Lifting/packing	2.1
Driving/Flying	
Car	1.0 to 2.0
Aircraft, routine	1.2
Aircraft, instrument landing	1.8
Aircraft, combat	2.4
Heavy vehicle	3.2
Miscellaneous Occupational Activities	
Cooking	1.6 to 2.0
Housecleaning	2.0 to 3.4
Seated, heavy limb movement	2.2
Machine work	
sawing(table saw)	1.8
light(electrical industry)	2.0 to 2.4
heavy	4.0
Handling 110 lb bags	4.0
Pick and shovel work	4.0 to 4.8
Miscellaneous Leisure Activities	
Dancing social	2.4 to 4.4
Calisthenics/exercise	3.0 to 4.0
Tennis, singles	3.6 to 4.0
Basketball	5.0 to 7.6
Wrestling/competitive	7.0 to 8.7

またスポーツ医学会などでは運動強度 METs (Metabolic equivalents) が用いられており、式 (2-38) によって求めることが出来る<sup>[2-13]</sup>。1.0MET の運動を行う際、体重 1kg 当たり、1 時間あたりで約 1kcal のエネルギーを消費され、この指標は広く運動処方や運動指導の場面で必要となる運動強度の目安として用いられている。(独) 国立健康・栄養研究所では『身体活動のメッツ (METs) 表』<sup>[2-14]</sup> を公開している。これは the 2011 Compendium of Physical Activities といった海外の資料を参考に作成された表であり、その数値には測定値によるものと計算式による推定値から定められたものがある。

Met 値と METs はどちらも安静時のエネルギーを分母、ある活動のエネルギー消費量を分子に計算される単位であり、算出方法は同じである。そのため本研究では METs を Met 値とみなして検討を行う。

$$\text{METs}_i = \frac{\text{活動時の全エネルギー消費量}}{\text{安静時のエネルギー消費量}} \quad (2-38)$$

ここで

$\text{METs}_i$  : 被験者  $i$  の METs [-]

また METs には Ex (エクササイズ) もしくはメッツ・時と呼ばれる消費したエネルギー量に表す意味合いをもった身体活動の量を表す指標がある。その算出方法は式 (2-39) のように表せ、式 (2-40) に算出した Ex を代入することで消費エネルギーを推定することができる。

$$\text{Ex}[\text{エクササイズ}] = \text{METs} \times \text{身体活動の実施時間}[\text{時}] \quad (2-39)$$

$$\text{Ex}[\text{エクササイズ}] \times \text{体重}[\text{kg}] \times 1.05 = \text{消費エネルギー}[\text{kcal}] \quad (2-40)$$

Met に似たエネルギー代謝量の比率の表現として RMR (relative metabolic rate) や動作強度 Af (Activity factor) と呼ばれる指標がある。式(2-41)、式(2-42)に示すように、RMR は活動時に必要としたエネルギーが基礎代謝量の何倍に当たるかといった活動強度を表しており、Af は消費したエネルギーが基礎代謝量の何倍かを表した動作指数である。<sup>[2-15]</sup>

これらは体格、性別、年齢が考慮されている基礎代謝量を基準としていることから個人属性に関係なく活動の強度を示すものとして利用できる。

$$\begin{aligned} \text{RMR} &= \frac{\text{活動時のエネルギー消費量} - \text{安静時のエネルギー消費量}}{\text{基礎代謝量}} \\ &= \frac{\text{活動代謝量}}{\text{基礎代謝量}} \end{aligned} \quad (2-41)$$

$$\text{動作強度 Af} = \frac{\text{活動時のエネルギー消費量}}{\text{基礎代謝量}} \quad (2-42)$$

### (3) 体表面積

人間の体表面積は裸体立位姿勢における身体全体の表面積で、単位は [m<sup>2</sup>] が用いられる。体表面積を求める方法は接触・直接法、非接触・直接法や、間接法など方法が取られる。接触・直接法は、非伸縮性のテープなどを用いて体表を写しとり体表面積を求める方

法であり、非接触・直接法は、レーザー光などを用いて得た3次元座標から体表面積を求める方法である。

体重と身長からなる回帰式を用いて体表面積を求める間接法では、様々な研究で式が作成されており、式のいくつかを以下に示す。これらの式(2-43)(2-44)(2-45)は日本人を対象に作成された回帰式である。また海外の文献に示されているものはDuBoisの体表面積の式がある。以下にDuBoisの体表面積の式(2-46)を示す。この式はASTM D6245-12<sup>[2-16]</sup>に示されている式で、欧米人のデータを用いて作成されている。

高比良の式<sup>[2-17]</sup>

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (2-43)$$

藤本らの式<sup>[2-18]</sup>

$$A_D = 0.008833 \times W^{0.444} \times H^{0.663} \quad (2-44)$$

蔵澄らの式<sup>[2-18]</sup>

$$A_D = 0.0100315 \times W^{0.383} \times H^{0.693} \quad (2-45)$$

ここで

- $A_D$  : 日本人成人の体表面積 [m<sup>2</sup>]
- $W$  : 体重 [kg]
- $H$  : 身長 [cm]

DuBoisの式<sup>[2-18]</sup>

$$A_{DB} = 0.203 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (2-46)$$

ここで

- $A_{DB}$  : 体表面積 [m<sup>2</sup>]
- $W$  : 体重 [kg]
- $H$  : 身長 [m]

#### (4) 呼吸商(呼吸比) RQ:Respiratory Quotient

呼吸商は、体内で栄養素が燃焼したときの単位時間当たりの酸素消費量に対する二酸化炭素産出量の体積比のことである。呼吸商は、燃焼するエネルギー源となる栄養素により一定の値となり、糖質のみが燃焼される場合には1.00であり、脂質のみが燃焼した場合は0.707(脂質全体の平均)であり、脂質全てがパルミチン酸のみであると0.703となる。このようにヒトの呼気中の消費された酸素量と排出された二酸化炭素量から呼吸商を求めることで、糖質と脂質の燃焼比を知ることができる。また、呼吸比に対する酸素1リットル

当りの発熱量が求められていることを利用し、呼吸商と酸素消費量を把握することにより発生するエネルギー量を算出することができる。<sup>[2-15]</sup>

呼吸商は通常時は糖と脂質、たんぱく質が同時に使われると考えられているため 1.00 から 0.707 の間を推移する。安静時には脂質が優先されて燃焼されるが、運動が高強度になるほど糖質の燃焼が増加し、RQ1.0 は最大酸素摂取の時に糖質が 100%燃焼した時に見られる。生体内のエネルギー代謝では、脂質だけをエネルギー源として代謝できないため、脂質が 100%燃焼した場合でも RQ は 0.707 にならない。そのため、本研究では RQ が 1.00 から 0.707 の範囲外にあるデータは遷移的な状態にあると判断し分析には使用していない。

### (5) 心拍数

心拍数とは一定時間内に心臓が拍動する回数をいい、通常 1 分間の拍動の回数 (bpm) を指す。心拍数を用いた代謝量や運動強度を推定する研究も多く行われている。しかし、作業時に測定される心拍には個人差、個人内変動がみられるため、これらを考慮している手法でなくてはならない。心拍数を用いた運動強度の評価方法としては、最大心拍数を用いる方法やカルボネン法に代表される予備心拍数による方法などがある。

また心拍数は最大酸素摂取量を間接的に測定する際に用いられ、身体運動の生理学には心拍数から酸素消費量を求める式が示されており、式 (2-47) が男性の式で、式 (2-48) が女性の式となっている。<sup>[2-19]</sup> 藤川らの研究<sup>[2-20]</sup>ではこの式を用い、安静時の  $O_2$  摂取量と  $CO_2$  排出量の比から、心拍数計を用いて  $CO_2$  呼出量を測定している。

$$Y = 1.848X - 124.02 \quad (2-47)$$

$$Y = 2.418X - 254.16 \quad (2-48)$$

ここで

$X$  : 心拍数 [bpm]

$Y$  : 酸素摂取量 [l/h]

### (6) $CO_2$ 呼出量に関する既往研究

日本人の  $CO_2$  呼出量は JIS<sup>[2-21]</sup> や SHASE-S<sup>[2-22]</sup> に値が示されている。表 2-8 に JIS に示されている  $CO_2$  呼出量を示す。当該 JIS は 1974 年から現在まで新たな改定は行われておらず、直近では 2014 年 10 月に日本工業標準調査会の確認が行われている<sup>[2-23]</sup>。またも日本人の  $CO_2$  呼出量のデータが示されている。また SHASE-S は、1972 年の空気調和・衛生工学会の学会誌によると昭和 14 年 9 月に制定され、当該学会誌において HASS102 換気 (案) として改定案が示されている。現行の SHASE-S は JIS を参照されているが若干数字が異なる。SHASE-S に記載されている値を表 2-9 に示す。

海外では ASTM D6245<sup>[2-16]</sup> や The ASHRAE Fundamentals Handbook に身長・体重・Met 値より  $CO_2$  呼出量を推定する計算式 (2-49 及び 2-46) が示されている。呼吸商 RQ に代入す

る0.83という値はASTMで示されている値であり、light activity(軽い活動)やsedentary activity(座っている活動)をしている成人男性の平均値である。また最近の研究ではPersilyらは基礎代謝量やmet値を変数としたCO<sub>2</sub>呼出量の推定式(2-50)、(2-50)'を提案している。しかしながら、これらの計算式は、西洋人のデータを用いて係数が決められており、日本人に使用する際には一定の誤差が生じる可能性が考えられる。

表2-8 JIS A1406<sup>[2-21]</sup>による人間が呼出するCO<sub>2</sub>量(成人男子)

作業中のエネルギー代謝率 RMR (Met)	CO <sub>2</sub> 呼出量[m <sup>3</sup> /h]
0 (1.00) (安生息時)	0.011
0~1.0 (1.00~1.83) (着座事務作業)	0.0129~0.0230
1.0~2.0 (1.83~2.66) (徐歩行)	0.0230~0.0330
2.0~4.0 (2.66~4.32) (軽労働)	0.0330~0.0538
4.0~7.0 (4.32~6.81) (中労働)	0.0538~0.0840
7.0以上 (6.81) (労働)	0.0840以上

備考：女子は表の値90%、児童は表の値の50%程度にとる、Met値は筆者の計算による

表2-9 SHASE-S102<sup>[2-22]</sup>による労働強度別CO<sub>2</sub>呼出量(成人男子)

エネルギー代謝率 RMR (Met)	作業程度	CO <sub>2</sub> 呼出量[m <sup>3</sup> /h]
0 (1.0)	安静時	0.0132
0~1 (1.0~1.83)	極軽作業	0.0132~0.0242
1~2 (1.83~2.66)	軽作業	0.0242~0.0352
2~4 (2.66~4.32)	中等作業	0.0352~0.0572
4~7 (4.32~6.81)	重作業	0.0572~0.0902

備考：女子は表の値90%、児童は表の値の50%程度にとる、Met値は筆者の計算による

$$F = RQ \frac{0.00276A_{DB}Met}{(0.23RQ + 0.77)} \quad (2-49)$$

$$A_{DB} = 0.203 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (2-46(\text{再掲}))$$

ここで

- $A_{DB}$  : 体表面積 [m<sup>2</sup>]
- $F$  : CO<sub>2</sub>呼出量 [L/s]
- $RQ$  : 呼吸商 (0.83) [-]
- $W$  : 体重 [kg]
- $H$  : 身長 [m]

$$V_{CO_2} = 0.000569 \times RQ \times BMR \times M \quad (2-50)$$

これに気圧や空気温度を考慮すると以下のようになる。

$$V_{CO_2} = 0.0002111 \times RQ \times BMR \times \frac{T}{P} \times M \quad (2-50)'$$

ここで

- $V_{CO_2}$  : 二酸化炭素呼出量[L/s]
- $RQ$  : 呼吸商[-]
- $BMR$  : 基礎代謝量[MJ/day]
- $M$  : met 値[-]
- $T$  : 気温[K]
- $P$  : 気圧[kPa]

### 2.6.2 本論文で用いる CO<sub>2</sub>呼出量に関する先行研究

前述した JIS や SHASE-S 及び ASTM に示されている CO<sub>2</sub>呼出量の値や計算式をこの手法に使用する際は、体重や身長等の個人属性によらず活動ごとに一つの値が示されていることや、欧米人のデータを使用している事に留意する必要がある。

このような背景から先行研究 [2-24, 25, 26, 27, 28, 29, 30] では、これらの文献に示されている人間の CO<sub>2</sub>呼出量との比較を一目的とし、20代の日本人を中心にダグラスバック法による呼気収集実験を行い、呼気データと被験者の属性データ（性別、年齢、身長及び体重）を収集した。表 2-10 に実験の被験者の属性、表 2-11 に実験で使用した測定機器と測定項目を示す。性別、身長及び体重は被験者より聞き取り調査を行い、体重に関しては実験前に OMRON 体重体組成計 HBF-701 を用いて測った値を用いた。以下に体重計の写真と表 2-12 に使用した体重体組成計の表示範囲と精度について示す。実験の結果 169 点の呼気データを収集することが出来た。

表 2-10 被験者の属性と人数

属性	人数
20代	40 (18)
30代	1 (1)
40代	5 (0)
50代	1 (0)
60代	1 (0)
合計	48 (19)

( ) 内は女性 内数

表 2-11 測定機器と測定項目

機器名	測定概要	測定項目
HORIBA ポータブルガス分析器 PG-240	測定範囲 CO <sub>2</sub> 0~20vol% O <sub>2</sub> 0~25vol%	CO <sub>2</sub> 濃度 O <sub>2</sub> 濃度
竹井機器工業株式会社 ダグラスバッグ TK-11288	容量 100L	



写真 体重体組成計 HBF-701

表 2-12 HBF-701 の表示範囲と測定誤差

表示	0~100kg まで : 100g 単位
	100~135kg まで : 200g 単位
体重計 精度	0kg~67.5kg まで : ±200g
	67.5kg~100.0kg まで : ±300g
	100.0kg~135.0kg まで : ±200g

実験より収集した呼気データ及び被験者の属性データを回帰分析することで人間の呼気に含まれる CO<sub>2</sub>呼出量関係式 (2-51) を作成した。前述したように、この時に用いた呼気のデータは RQ が 1.00 から 0.707 の範囲外にあるデータは遷移的な状態にあると判断し、

分析には使用していない。また関係式は学校、事務所などの比較的活動強度の低い活動が行われる居室で使用されることを想定し、ダグラスバック法で得られたMet値が3.0より大きいデータも分析に使用していない。また年齢に関して、先述のとおりCO<sub>2</sub>呼出量は代謝量に比例するため、日本人の食事摂取基準2015年版<sup>[2-10]</sup>に記載してある年代別基礎代謝量を利用し、18～29歳の値を基準とした基礎代謝量の比を年齢係数*C<sub>a</sub>*として導入している。使用した年代別の基礎代謝量と18～29歳の値を基準とした基礎代謝量の比を表2-13に示す。同じく性別に関するCO<sub>2</sub>呼出量の差についても検討しており、表2-13に示す18～29歳の男性と女性の基礎代謝量の比(1520と1110の比)を性別係数*C<sub>g</sub>*とし、男性1.00女性0.73としている。

図2-8にはCO<sub>2</sub>呼出量の測定値とCO<sub>2</sub>呼出量関係式に全ての日本人被験者の属性(体重・身長・年齢・性別)を代入して求めたCO<sub>2</sub>呼出量の推定値を示している。関係式を用いて計算した推定値と測定値の決定係数は0.8561となり、一定の精度で体重・身長・エネルギー代謝率・年齢・性別よりCO<sub>2</sub>呼出量を推定できることを確認している。

$$P_{CO_2i} = 1.601 \times 10^{-4} (60.63 \times A_D \times Met \times C_a \times C_g) \quad (2-51)$$

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (2-46 \text{ (再掲)})$$

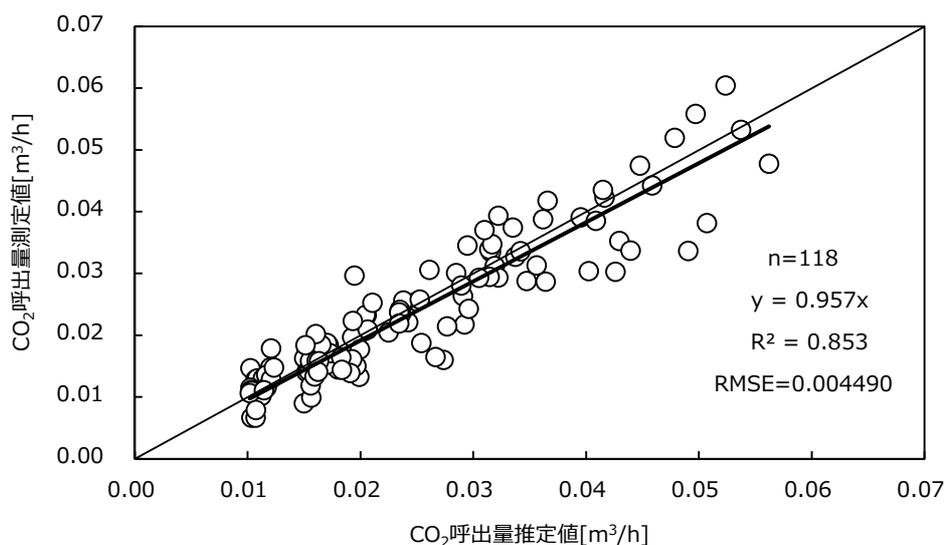
ここで

<i>P<sub>CO<sub>2</sub>i</sub></i>	: CO <sub>2</sub> 呼出量 [m <sup>3</sup> /h]
<i>A<sub>D</sub></i>	: 体表面積[m <sup>2</sup> ]
<i>Met</i>	: エネルギー代謝率[-]
<i>C<sub>a</sub></i>	: 年齢係数[-] (表2-13参照)
<i>C<sub>g</sub></i>	: 性別係数[-] (男性1.00 女性0.73)
<i>H</i>	: 体重[kg]
<i>W</i>	: 身長[cm]

表2-13 年代別基礎代謝量<sup>[2-10]</sup>と基礎代謝量の比

年齢	基礎代謝量 [kcal/日] (基礎代謝量の比 <i>C<sub>a</sub></i> )	
	男	女
1～2	700 (0.46)	660 (0.59)
3～5	900 (0.59)	840 (0.76)
6～7	980 (0.64)	920 (0.83)
8～9	1140 (0.75)	1050 (0.95)
10～11	1330 (0.88)	1260 (1.14)
12～14	1520 (1.00)	1410 (1.27)
15～17	1610 (1.06)	1310 (1.18)
18～29	1520 (1.00)	1110 (1.00)
30～49	1530 (1.01)	1150 (1.04)
50～69	1400 (0.92)	1100 (0.99)
70以上	1290 (0.85)	1020 (0.92)

基礎代謝量の比は18～29歳の値を基準としている  
表中の灰色の部分は先行研究における被験者が含まれる条件を示している

図 2-8 CO<sub>2</sub>呼出量の測定値と推定値

また関係式を用いて換気性状の推定に使用する場合の精度確認を行うことを目的に複数の単室において換気性状測定を行っている。測定は高知工科大学のセミナー室で室内 CO<sub>2</sub> 濃度を 30 秒ごとに測定し、関係式(2-51)や表 2-8 に示している JIS 及び ASTM の式(2-49)による CO<sub>2</sub> 呼出量を、単室の換気に関する式 (2-52) に代入して算出した CO<sub>2</sub> 濃度計算値と比較を行うことで精度を確認した。

測定に使用した機器と測定項目を表 2-14 に、図 2-9 に測定対象室の概要図、表 2-15 に測定条件と RMSE の計算結果を示す。換気量の設定は、換気設備を用いる代わりに気密測定機を使用することで換気量を設定して測定を行った。また CO<sub>2</sub> 濃度計は排出口近くに配置し、完全拡散に近いと考えられる条件で測定を行った。

室内 CO<sub>2</sub> 濃度計算値を求める際に CO<sub>2</sub> 呼出量関係式に代入する属性データ（体重、身長、年齢、性別）は参加者の属性データを使用した。またエネルギー代謝率は、目視で活動を確認し ASHRAE Handbook に示されている値を参値して設定した。

各測定ケースの CO<sub>2</sub> 濃度の測定値と計算値は付録に示す（図 A-1～図 A-7）。ほとんどのケースで関係式から求めた RMSE が JIS や ASTM から求めた RMSE よりも小さくなる結果となった。エネルギー代謝率が大きい条件である B-7 が他の条件と比較して CO<sub>2</sub> 濃度が低く算出される結果となっており、設定した活動と実際のエネルギー代謝率の差が影響していると考えられる。また在室者が多い条件の RMSE は在室者の少ない条件よりも小さく、在室者数が多いほど個人差の影響が小さくなり、CO<sub>2</sub> 濃度の測定精度の向上することが示唆されている。全体的な傾向として JIS による CO<sub>2</sub> 呼出量を用いた場合が最も RMSE が大きく、ASTM による CO<sub>2</sub> 呼出量を用いた場合の RMSE は比較的小さかったものの、全測定データから求めた RMSE も本研究によるものが最小となる結果となり、本研究の関係式が単室の室内 CO<sub>2</sub> 濃度を一定の精度で推定できることを確認した。

$$\frac{dC_i}{dt} V_i = \sum P_{CO_2i} + Q_{io}(C_o + C_i) \quad (2-52)$$

ここで

- $C_i$                      $i$  室の室内濃度 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- $C_o$                     外気濃度 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- $P_{CO_2i}$                 CO<sub>2</sub>呼出量 [m<sup>3</sup>/h]
- $Q_{io}$                      $i$  室への外気導入量 [m<sup>3</sup>/h]
- $t$                         時間[h]
- $V_i$                      $i$  室の空気容積 [m<sup>3</sup>]

表 2-14 測定機器と測定項目

測定項目	機器名	測定概要
CO <sub>2</sub> 濃度	CO <sub>2</sub> センサー KNS-CO2S	測定誤差 ±50ppm ±測定値の5%
	RVR-52L	測定誤差 ±5%+5dat (0~40℃の環境下において)
室内の 換気量の設定	気密測定器 KNS-5000C (コーナー札幌株式会社)	出力範囲 0Pa 2100/2400m <sup>3</sup> /h (最大) 100V 50/60Hz

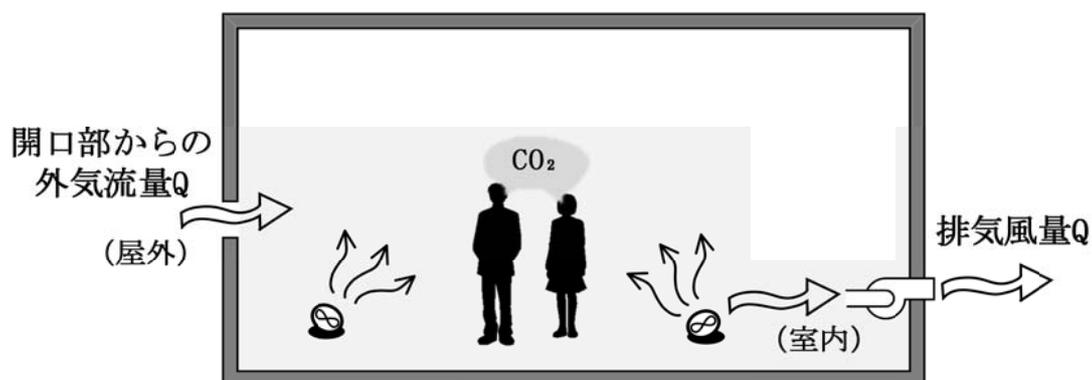


図 2-9 測定対象室の平面図



写真 気密測定器 KNS-5000C

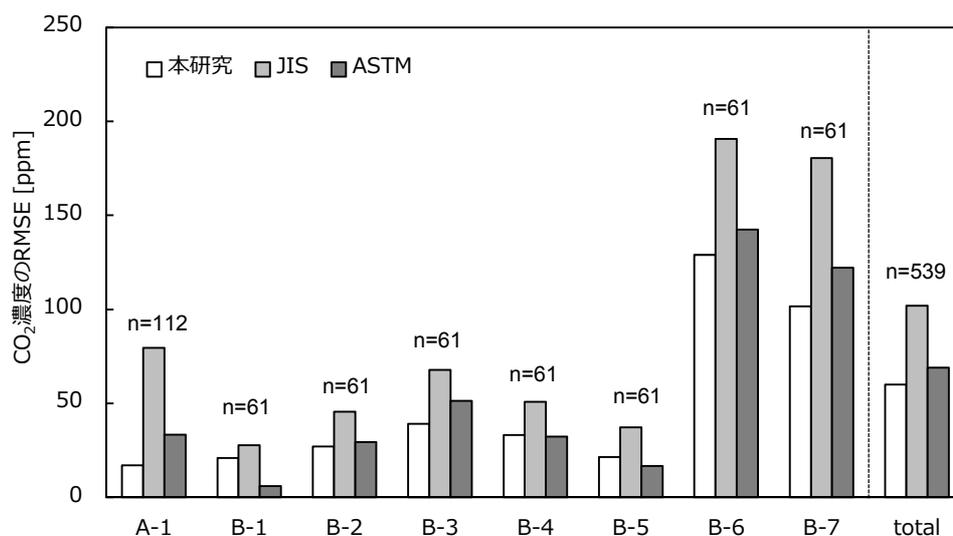


写真 気密測定器の表示画面

表 2-15 測定条件と RMSE の結果 (RMSE は室内 CO<sub>2</sub> 濃度の計算値と測定値の差による)

測定ケース名	A-1	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	Total	
室容積[m <sup>3</sup> ]	141	111							-	
機械換気量 [m <sup>3</sup> /h]	120	120	100	80	120	120	80	100	-	
外気 CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	400	430	434	409	413	410	421	419	-	
在室者数[人]*	6 (1)	6 (1)	5 (2)	4 (0)	6 (2)	6 (2)	4 (1)	5 (1)	-	
Met 値 (作業名)	1.0 (着座安静)				1.1 (タイプ・ワープロ)		1.7 (自由歩行)		-	
RMSE	本研究	17	21	27	39	33	21	90	52	42
	JIS	80	28	46	68	51	37	140	116	102
	ASTM	33	6	29	51	32	17	106	76	52

\* ( ) 内は女性 内数

図 2-10 CO<sub>2</sub>呼出量の測定値と推定値

単室において CO<sub>2</sub> 呼出量関係式を用いて一定の精度で換気性状の測定を行えることを確認したため、非定常的な条件下でも換気性状推定を行った。測定対象室は高知工科大学のある室で、測定概要を表 2-16 に、平面図を図 2-11 に示す。単室の換気性状測定と同じく、測定対象室は換気システムの代わりに気密測定器を使用し、対象室からの排気量を手動により設定した。また隣室からの空気量は単相ファン（リングブロー）に排煙用の管をつなぎ、強制的に隣室から対象室に空気量を供給した。隣室からの給気量に関しては風量計の測定部を給気口に接続して、10 分置きに風量の確認を行った。隣室からの空気量の設定に使用した機器を表 2-17 に示す。室内はファンを使用することで完全拡散していると仮定し、CO<sub>2</sub> 濃度計を外気と対象室の気密測定器の排出口の中および隣室の単相ファンからの給気口の中に設置した。実験は 2 ケース行い、1 ケース目の実験では事務作業程度 (Met 値 1.2) として、5 人の在室者にタイピングや筆記を行ってもらい、2 ケース目の実験では自由行動として 2 人の在室者に各々の行動をしてもらった。結果の図において実験参加者を X, Y として Met 値を示している。Met 値については目視により 10 分毎に記録した行動を ASHRAE Handbook [2-12] に示されている Met 値に変換して決定した。実験時間はそれぞれ 60 分とした。

図 2-12 および図 2-13 に対象室の CO<sub>2</sub> 濃度、隣室の CO<sub>2</sub> 濃度、外気 CO<sub>2</sub> 濃度および CO<sub>2</sub> 呼出量関係式を使用して算出した対象室の CO<sub>2</sub> 濃度推定値を示す。対象室の CO<sub>2</sub> 濃度計算値は式 (2-53) に示す換気に関する微分方程式を用いて求めた。対象室の CO<sub>2</sub> 濃度推定値を求める際に CO<sub>2</sub> 呼出量関係式に代入する属性データ（体重、身長、性別）は実験の参加者の属性データを使用した。実験の結果 CO<sub>2</sub> 濃度測定値と計算値の RMSE は、ケース C-1 では 18ppm、ケース C-2 では 20ppm となり、実空間の多数室の換気系における実験において、非定常条件の場合でも CO<sub>2</sub> 呼出量関係式は一定の精度を持って、CO<sub>2</sub> 濃度の推定ができる結果を得た。

$$\frac{dC_i}{dt} V_i = \sum P_{CO_2 i} + C_0 \cdot Q_{i0} + C_j \cdot Q_{ij} - C_i \cdot Q_{oi} \quad (2-53)$$

ここで

- $Q_{i0}$   $i$  室への直接新鮮空気量 [m<sup>3</sup>/h]  
 $Q_{oi}$   $i$  から直接外気へ排出される空気量 [m<sup>3</sup>/h]  
 $Q_{ij}$   $j$  室から  $i$  室へ流れる空気量 [m<sup>3</sup>/h]  
 $C_j$   $j$  室の室内 CO<sub>2</sub> 濃度 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

表 2-16 測定概要

検討ケース	C-1	C-2
室容積 [m <sup>3</sup> ]	80	
機械換気量 [m <sup>3</sup> /h]	100	120
隣室からの空気量 [m <sup>3</sup> /h]	20.8	21.9
外気 CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	404.4	406.5
隣室 CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	848.4	875.6
在室人数 [人]	5	2
活動量 (Met 値)	着座安静 (1.2)	自由行動 (-)
測定時間 [分]	60	

表 2-17 隣室からの空気量の設定に使用した機器

機器名	測定概要
テラルリングブロー 単相・標準型 VFZ081PN	出力範囲 0.25/0.35 m <sup>3</sup> /min 単相 100V 50/60Hz
風量測定器 SWF-125D	測定範囲 7.2~450m <sup>3</sup> /h

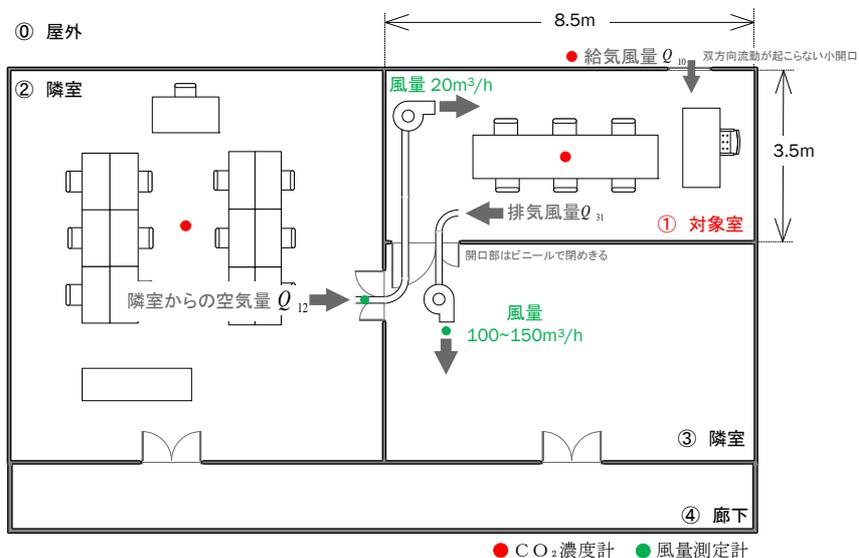


図 2-11 測定対象室の平面図

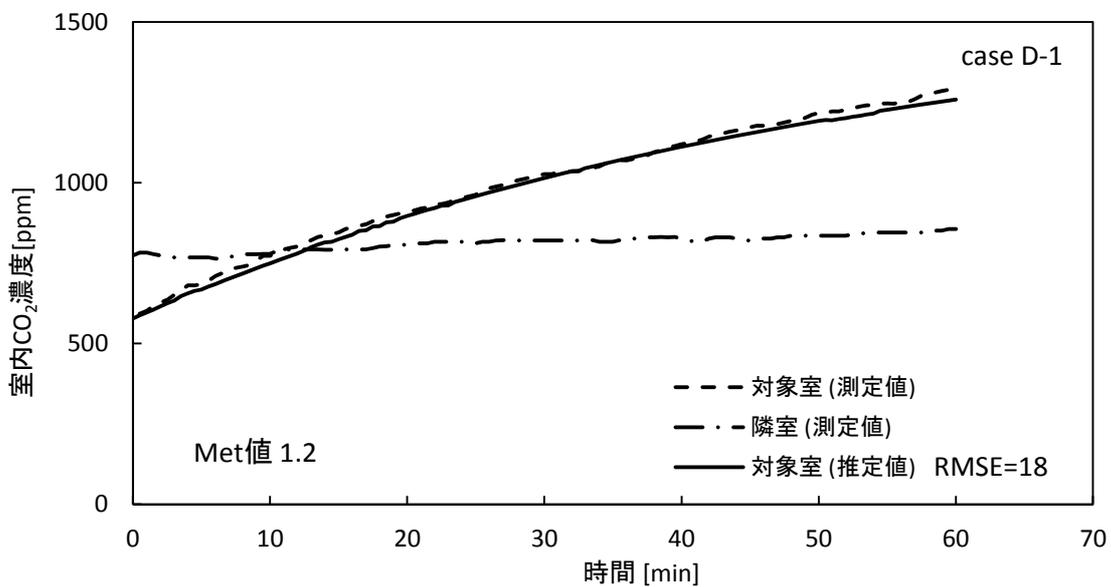
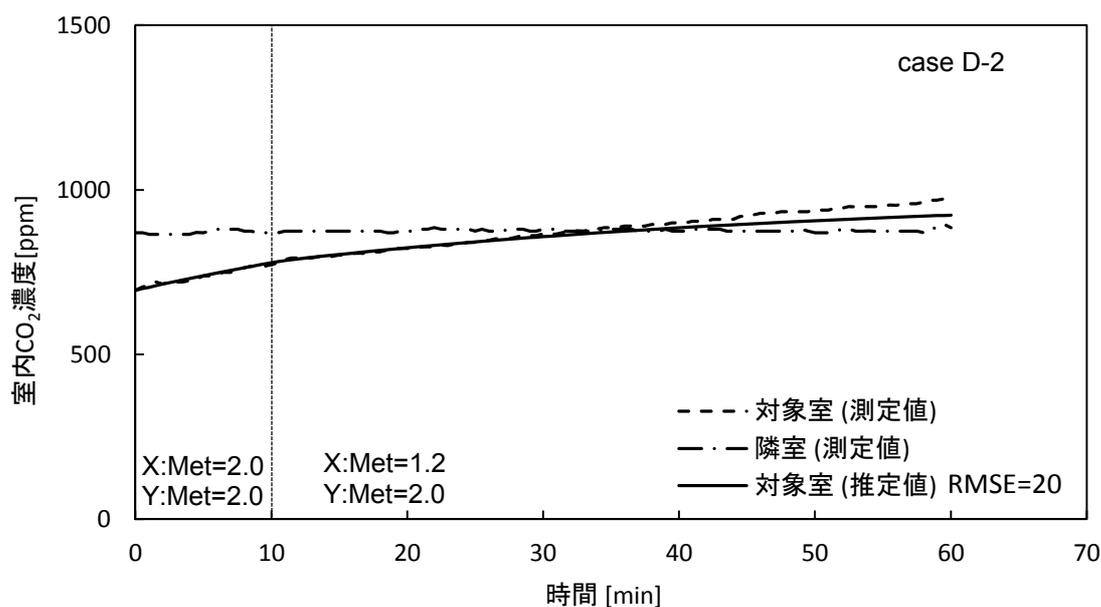


図 2-12 C-1 の CO<sub>2</sub> 濃度

図 2-13 C-2 の CO<sub>2</sub> 濃度

換気室と考えられる単室実験や2室+外気の3ノードモデルによる実空間における非常実験により作成した CO<sub>2</sub> 呼出量関係式 (式 2-51) を用いることで一定の精度を持って CO<sub>2</sub> 濃度を求める事ができることを確認したため、次に CO<sub>2</sub> 呼出量やそれを用いた換気性状の推定精度向上を目的として、CO<sub>2</sub> 呼出量関係式 (式 2-51) の変数である Met 値の推定精度向上に関する検討を行った。<sup>[2-31, 32, 33]</sup>

これまでは CO<sub>2</sub> 呼出量関係式を用いて CO<sub>2</sub> 濃度を推定する際、計算で使用する Met 値は ASHRAE HANDBOOK (表 2-7) などに示されている文献値を参照して算出を行っていたが、活動量が大きい条件になると測定値と推定値の乖離している測定ケースが確認でき、これは設定された Met 値と実際の Met 値との間に誤差が生まれている可能性があるのではないかと考えられる。文献値を用いる以外の Met 値の推測方法としては、代謝に相関があるとされる人の動きや生理現象などを測定し、算出する方法が挙げられる。

そのため、この検討では三軸加速度センサーを用いて人の活動量を Met 値や Mets と同じ単位として計測する活動量計や原則として心拍と同数値と扱われる脈拍数を簡易的に計測できる測定器を用いること推定される Met 値を用いた場合にどの程度精度が変わるのか、被験者実験による Met 値推定と単室での CO<sub>2</sub> 濃度推定により、文献値との比較を行った。

被験者実験は、20 歳代の男子学生を中心として 11 の行為を設定して行った。被験者実験の実施条件を表 2-18、実験で使用した機器は表 2-11 に示している機器に加え、被験者の Met 値推定を目的として表 2-19 に示すものを使用した。それぞれの計測器の装着時の様子を写真に示す。また、活動量計は 10 秒間隔で測定を行うため測定時間における平均値を用いて検討を行っている。脈拍数を用いる手法は、1 秒間隔で測定された脈拍数の測定結果から Met 値との一次回帰式を作成し、推定を行った。なお、真値とするダグラスバッグ法で得た値を Met<sub>D</sub>、活動量計による測定値を Met<sub>A</sub>、脈拍数計を用いた推定値を Met<sub>P</sub> と表す。

表 2-18 被験者実験の条件

行為		作業時間 [分]	ASHRAE に示されて いる値 <sup>[2-12]</sup>	METs 表に示されて いる値 <sup>[2-14]</sup>	被験者数 [人]
椅座静位			1.0	1.0	15
事務作業	筆記	5	1.0	1.3	7
	タイプ		1.1	1.3	10
	書類整理**		1.2	2.0	15
掃除	皿洗い	4	2.0~3.4	1.8	11
	机拭き			2.3	14
	窓拭き			3.2	11
	掃除機*			3.3	11
歩行	3.2 km/h	3	2.0	2.8	11
	4.8 km/h		2.6	3.5	13
	6.4 km/h		3.8	5.0	12

表 2-19 測定機器と測定項目

測定項目	機器名	測定概要
活動量	OMRON 製 Active style PRO HJA-750c	測定範囲 ±6G 1.0~18.0METs (0.1METs 刻み)
脈拍数	MIO ALPHA 53PBLK-INT	測定範囲 脈拍数 30 ~ 220 拍



写真 脈拍数計 (装着時)



写真 活動量計 (装着時)

それぞれの手法による Met 値測定もしくは推定の実験結果を図 2-14、2-15 に示す。図 2-14 は  $Met_D$  と  $Met_A$  の回帰分析の結果を示したものである。活動量が大きくなるにつれ  $Met_D$  と  $Met_A$  のかい離が大きくなることを確認した。図 2-15 は、実験結果から抜粋した被験者の  $Met_D$  を真値として脈拍数と回帰分析の結果とそれにより得られた個人式を示している。個人式作成では、被験者 A, B のように相関係数が高い個人式を作成できる被験者もいるが、

中には被験者Cのように相関係数が低い被験者もみられる結果となった。また、 $Met_D$ を真値とした場合の $Met_A$ 、 $Met_P$ および参考として『身体活動のメッツ (METs) 表』(以下、METs表)、ASHRAEのそれぞれに記載されている文献値のRMSEを図2-16に示す。 $Met_A$ はほとんどの活動条件でRMSEが小さい値となり、結果として全データから求めたRMSEでも、最も小さい結果となった。このことから検討した手法の中で、最も精度が高く $Met$ 値推定ができるものは活動量計に手法となった。

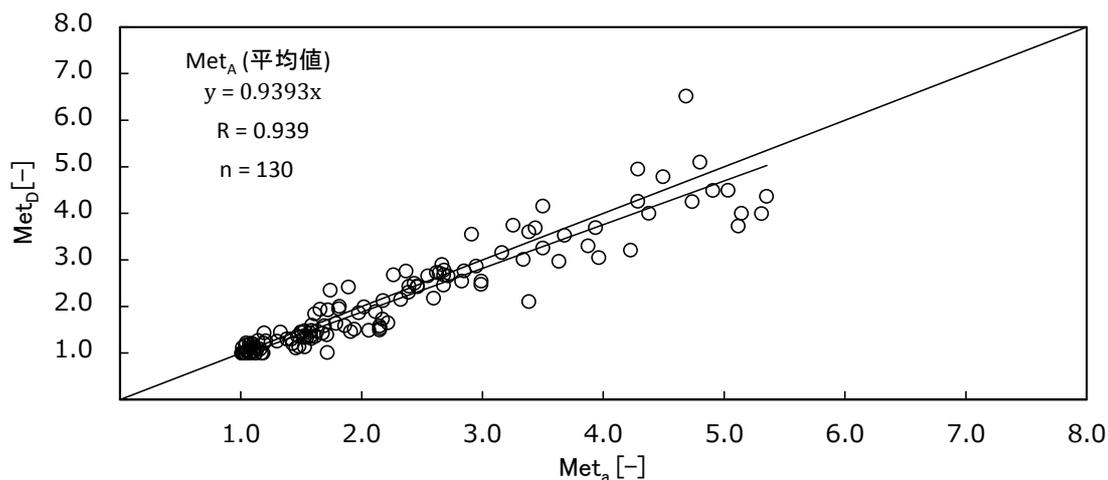


図2-14  $Met_D$ と $Met_A$  (平均値) の関係

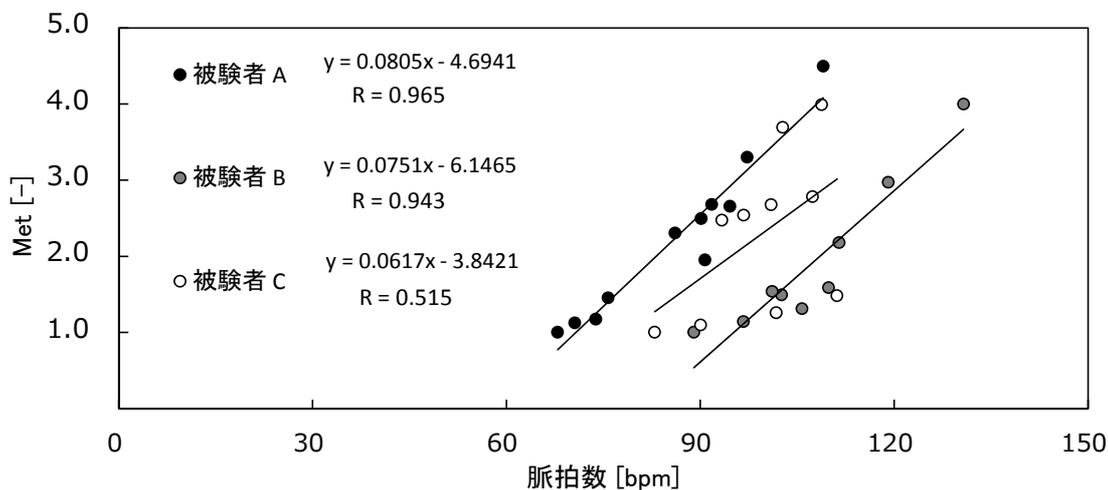


図2-15 脈拍数と $Met$ の関係

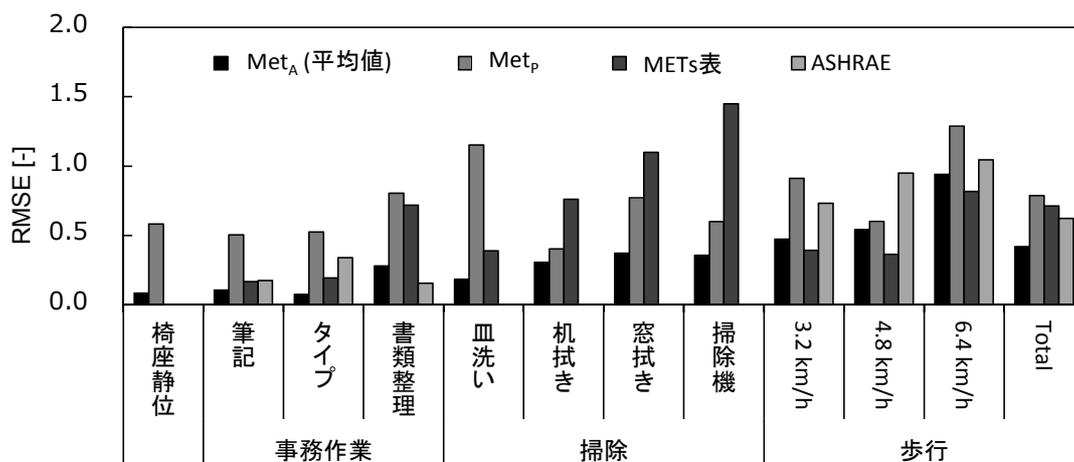


図 2-16 各 Met 値の RMSE (Met<sub>p</sub> を真値とした)

次に、各 Met 値推定（測定）手法により得られた Met 値を式 (2-51) に代入し、CO<sub>2</sub>呼出量を算出し、ダグラスバッグ法より得られた CO<sub>2</sub>呼出量測定値を真値として比較したそれぞれの RMSE の算出結果を図 2-17 に示す。また文献値と測定された Met<sub>A</sub> および Met<sub>p</sub> の平均値を表 2-20 に示す。

CO<sub>2</sub>呼出量でも全データから求めた RMSE は、Met<sub>A</sub> の RMSE が最も小さい結果となった。椅座静位で Met<sub>A</sub> の RMSE が高くなった理由は、Met<sub>A</sub> の最低値を 1.0 として検討を行ったため Met<sub>A</sub> が 1.0 以上の条件で CO<sub>2</sub>呼出量が計算され RMSE が大きく算出されたことにあると思われる。これらの結果から、式 (2-51) が Met 1.0~3.0 の呼気データから作成されたことを考慮すると、活動量計を用いることで Met 値が 1.0~3.0 の範囲内であれば CO<sub>2</sub>呼出量算定の精度向上が可能であるといえる。

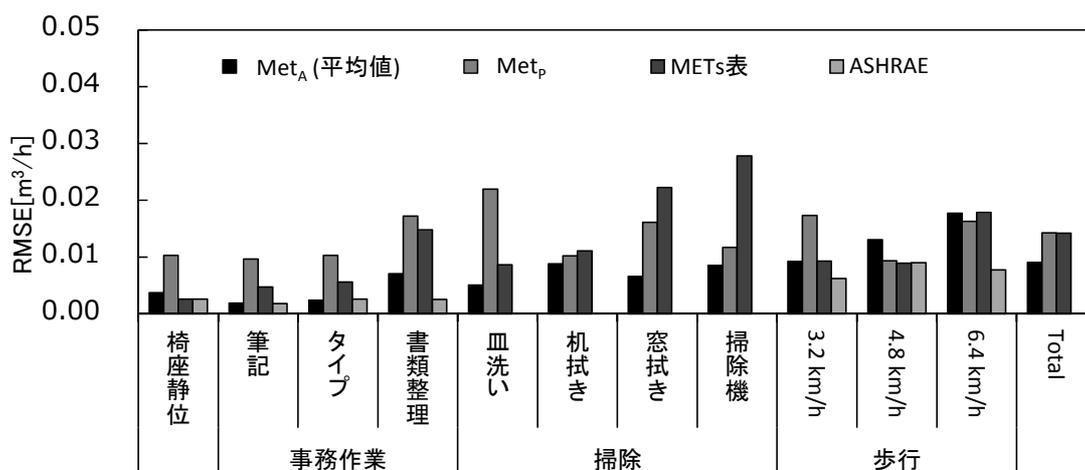


図 2-17 CO<sub>2</sub>呼出量計算値の RMSE (Met<sub>p</sub> を真値とした)

表 2-20 行為とエネルギー代謝率

行為	Met <sub>D</sub>	文献値		Met <sub>A</sub> (平均値)	Met <sub>P</sub>
		ASHRAE	METS 表		
椅座静位	1.00	1.0	1.0	1.06	1.04
事務作業	筆記	1.15	1.0	1.08	1.25
	タイピング	1.12	1.1	1.10	1.46
	書類整理	1.29	1.2	1.47	1.87
掃除	皿洗い	1.49	-	1.57	2.09
	机拭き	2.09	-	2.17	2.32
	窓拭き	2.19	-	2.25	2.85
	掃除機	1.98	-	2.15	2.15
歩行	3.2 km/h	2.64	2.0	2.76	2.71
	4.8 km/h	3.48	2.6	3.75	3.39
	6.4 km/h	4.58	3.5	4.85	4.35

※Met<sub>D</sub>に近い測定値を赤字している

最後に、活動量計を用いることでMet 値およびCO<sub>2</sub>呼出量関係式によるCO<sub>2</sub>呼出量の精度が向上することが可能であることを確認したため、活動量計を用いることで機械換気されている室の換気性状としてCO<sub>2</sub>濃度の推定精度向上が可能となるか確認するために行った検討内容について述べる。実験は、単室とみなせる室において、在室者に活動量計を装着させることでMet 値と室内CO<sub>2</sub>濃度を10秒ごとに測定した。測定条件を表2-21に、測定機器は表2-14に示してあるものに表2-19にある活動量計を用いた、測定条件の概要は図2-9に示しているものと同条件で行っている。また活動量計の値は、これまで使用していた測定時間の平均値を用いた時間平均値（以下Met<sub>A</sub>（平均値））と時々刻々と変化する10秒ごとの測定値（以下Met<sub>A</sub>（測定値））の2種類で検討を行っている。

表 2-21 測定条件

ケース	在室者数 [人]	機械換気量 [m <sup>3</sup> /h]	室容積 [m <sup>3</sup> ]	実験時間 [分]	在室者の 行為
A-1	4	80	111.5	30	椅座静位
A-2				60	椅座/勉強**
A-3				30	タイプ
A-4					書類整理
A-5					勉強**
A-6					机拭き
A-7					掃除*
A-8					歩行
A-9				30	歩行
A-10					歩行
A-11					歩行
A-12					歩行

掃除\*：机拭き3人（Met 値：2.3）、掃除機1人（3.2）  
勉強\*\*：主行動は筆記，その他に本で調べるなどがある

CO<sub>2</sub>濃度の測定結果および計算結果のうちケース A-1, A-12 を図 2-18, 19 に示す。図には CO<sub>2</sub>濃度測定値を真値とした場合の各条件における CO<sub>2</sub>濃度計算値の RMSE を示した。また表 2-22 に全ケースの Met 値の測定結果と各 CO<sub>2</sub>濃度計算値の 2RMSE (信頼度 95%) の範囲を示す。おなじく測定値と計算値から求めた 2RMSE を図 2-20 に示す。

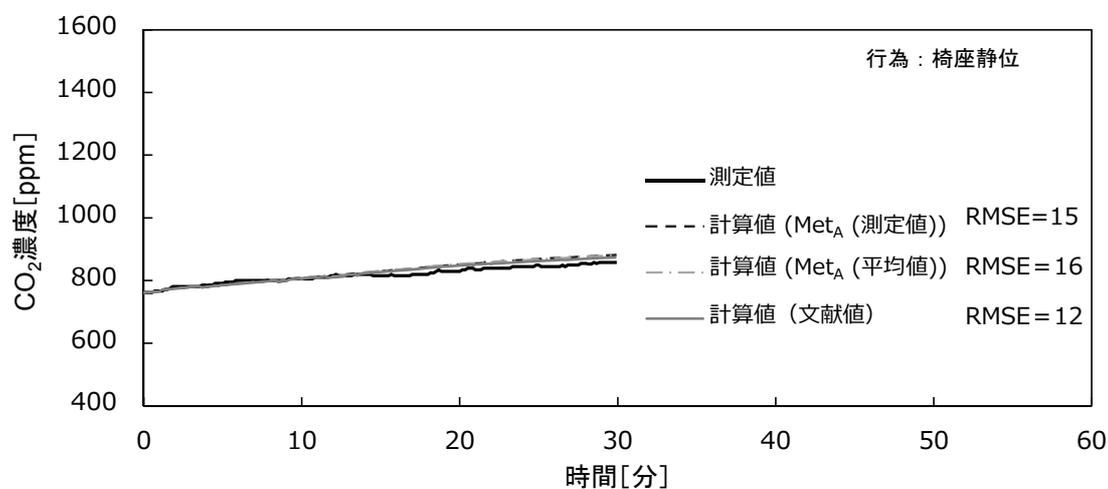
測定結果として、図 2-18 に示すような椅座静位などの Met 値が 1.0 程度の行為 (A-1～A-5) では、活動量計と文献値を用いた場合の差異はほとんど生じなかった。しかし、図 2-19 に示している書類整理などの行為では文献値より活動量計の値を用いた方が、測定値に近い CO<sub>2</sub>濃度を算出できることが確認できた。また、図 2-20 による全データから得られた 2RMSE は、活動量計の平均値 (Met<sub>A</sub> (平均値)) を用いる手法が最も精度が高い結果となっている。

表 2-22 Met 値と CO<sub>2</sub>濃度計算値の 2RMSE

ケース	Met 値		CO <sub>2</sub> 濃度計算値の 2RMSE [ppm]		
	文献値 Met <sub>R</sub>	Met <sub>A</sub> (平均値)	文献値の場合	活動量計を用いた場合 測定値	活動量計を用いた場合 平均値
A-1	1.0	1.03	24.1	30.6	29.6
A-2		1.04	41.5	31.2	29.2
A-3	1.0/1.3 <sup>*2</sup>	1.05	44.3	27.8	29.6
A-4	1.1 <sup>*1</sup>	1.07	60.9	69.2	68.4
A-5		1.04	26.5	43.2	43.3
A-6	1.2 <sup>*1</sup>	1.64	165.5	56.3	51.2
A-7		1.29	27.5	11.3	7.0
A-8	1.3 <sup>*2</sup>	1.18	32.7	23.0	27.2
A-9		1.33	11.4	16.5	15.7
A-10	2.3 <sup>*2</sup>	2.28	38.8	30.0	33.8
A-11	2.3/3.2 <sup>*2</sup>	2.57	69.9	64.5	60.6
A-12	1.7 <sup>*1</sup>	2.29	267.0	116.6	116.3

\*1 : ASHRAE に示されている Met 値

\*2 : 国立健康栄養研究所「METs 表」に示されている Met 値

図 2-18 CO<sub>2</sub>濃度 (ケース A-1)

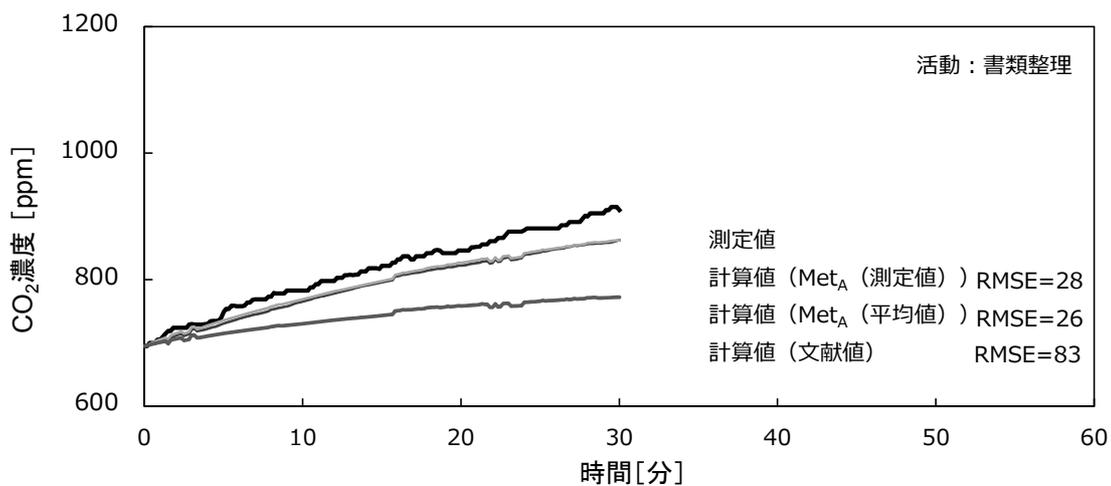


図 2-19 CO<sub>2</sub> 濃度 (ケース A-12)

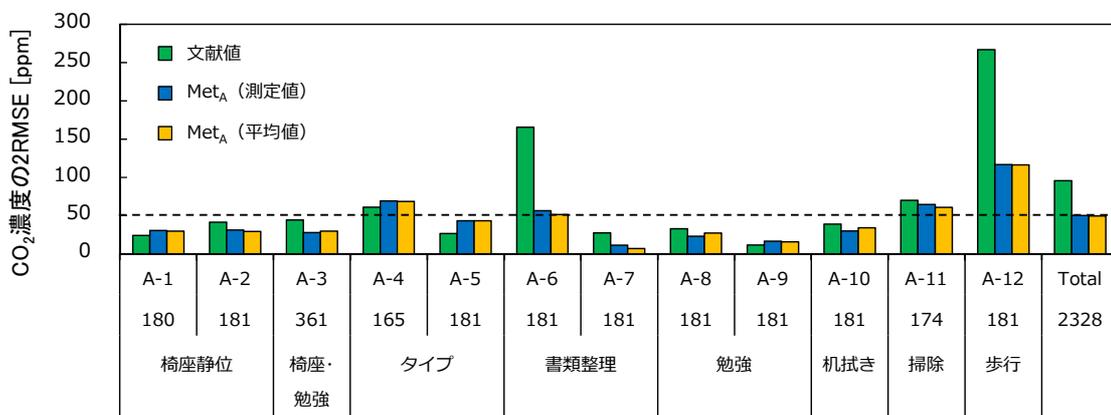


図 2-20 CO<sub>2</sub> 濃度測定値と計算値の 2RMSE (在室者数 4 人)

## 第2章 引用・参考文献

- [2-1] 田中俊六・武田仁・岩田利枝・土屋喬雄・寺尾道仁：最新建築環境工学[改訂4版]，井上書院，p150，2014.2
- [2-2] 社団法人 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧（第14版）3基空気調和設備，2010.2
- [2-3] 峰野悟：換気性状が変動する住宅における換気性能評価に関する研究 修士研究，2005.2
- [2-4] 田島昌樹：必要新鮮空気量の充足度による多数室系の換気性能評価手法に関する研究，p11-25，2004.1
- [2-5] 社団法人 プレハブ建築協会 性能認定分科会：換気回路網シミュレーション Vent Sim version2，2001.5
- [2-6] 田中俊六・武田仁・岩田利枝・土屋喬雄・寺尾道仁：最新建築環境工学[改訂4版]，井上書院，pp52-53，2014.2
- [2-7] 社団法人 空気調和・衛生工学会：SHASE-S 102-2011 換気規準・同解説 Ventilation Requirements for Acceptable，SHASE-S Standard，pp7-10，2012.2
- [2-8] 東賢一：室内環境における湿度基準と居住者への健康影響問題，<http://www.kinki-shasej.org/upload/pdf/situn.pdf>，2018.1.16 取得
- [2-9] 身体活動量の定量法とその実際（1）：[http://www.okamurakoji.info/Site/ti\\_yu\\_xue\\_bu\\_files/11%20%E8%BA%AB%E4%BD%93%E6%B4%BB%E5%8B%95%E9%87%8F%E3%81%AE%E5%AE%9A%E9%87%8F%E6%B3%95%E3%81%A8%E3%81%9D%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%9A%9B\(1\)%EF%BC%88%E9%85%8D%E5%B8%83%EF%BC%89.pdf](http://www.okamurakoji.info/Site/ti_yu_xue_bu_files/11%20%E8%BA%AB%E4%BD%93%E6%B4%BB%E5%8B%95%E9%87%8F%E3%81%AE%E5%AE%9A%E9%87%8F%E6%B3%95%E3%81%A8%E3%81%9D%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%9A%9B(1)%EF%BC%88%E9%85%8D%E5%B8%83%EF%BC%89.pdf)，2018.1.16 取得
- [2-10] 「日本人の食事摂取基準（2015年版）」策定検討会報告書，厚生労働省，p59-66，2014.3
- [2-11] 厚生労働省 生活習慣病予防のための健康情報サイト e-ヘルスネット[情報提供] エネルギー代謝の評価法，2018.1.16 取得
- [2-12] ASHRAE：ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS，p9.6，2013
- [2-13] 倉邦造：スポーツ医学-基礎と臨床-，株式会社朝倉書店，pp68-73、81-95，1998.7.10
- [2-14] 中江悟司 田中茂穂 宮地元彦：改訂版『身体活動のメッツ（METs）表』，国立健康・栄養研究所，2012.4
- [2-15] 食生活改善指導担当者研修「食生活改善指導担当者テキスト」，厚生労働省，p183-191，2009.3
- [2-16] ASTM D6245-12，Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation，American society for Testing and Materials International，2012

- [2-17] 社団法人 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧（第14版）1基礎編，p 330，2010.2
- [2-18] 日本建築学会基準・AIJES-H0004-2014 温熱心理・生理測定法基準・同解説，一般社団法人日本建築学会，p46，2014.3
- [2-19] 身体運動の生理学，猪飼道夫編著，杏林書院，1973.12
- [2-20] 藤川光利・吉野博・高木理恵・奥山博康・林基哉・菅原正則，居住者の呼気を用いた多数室換気量測定法に関する実験的研究，日本建築学会環境系論文集，第75巻第652号，日本建築学会，pp499-508，2010.6
- [2-21] JIS A14061974 室内換気量測定法（炭酸ガス法），2010
- [2-22] 労働強度別二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)吐き出し量，空気調和・衛生工学便覧3空気調和設備編，第14版，空気調和・衛生工学会，p141，2010.2
- [2-23] 日本工業標準調査会「データベース-JIS詳細表示:」，<http://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISNumberNameSearchList?toGnrJISStandardDetailList>，2018.1.16取得
- [2-24] 田島昌樹 井上貴之 大西裕治：換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定，日本建築学会環境系論文集，第81巻第728号，日本建築学会，pp885-892，2016.10
- [2-25] 大西裕治 井上貴之 田島昌樹：人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その1人間のCO<sub>2</sub>呼出量の推定式の導出と実空間への適用，日本建築学会学術講演梗概集（近畿），日本建築学会，pp831-832，2014.9
- [2-26] 大西裕治 井上貴之 田島昌樹：人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その2必要換気量についての検討，日本建築学会学術講演梗概集（近畿），日本建築学会，pp833-834，2014.9
- [2-27] 大西裕治 井上貴之 田島昌樹：人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その3人間のCO<sub>2</sub>呼出量に関する既往研究の調査，日本建築学会学術講演梗概集（関東），日本建築学会，pp855-856，2015.9
- [2-28] 大西裕治・井上貴之・田島昌樹：人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その4CO<sub>2</sub>呼出量推定式の適用範囲の拡張と精度確認，日本建築学会学術講演梗概集（関東），日本建築学会，pp857-858，2015.9
- [2-29] 井上貴之 大西裕治 嶋田祐典 依光剛志 田島昌樹：人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その5呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を利用した多数室系の換気性能評価，日本建築学会学術講演梗概集（九州），日本建築学会，pp661-662，2016.8
- [2-30] 井上貴之 大西裕治 嶋田祐典 依光剛志 田島昌樹：人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その6在室者の呼気を用いた多数室の換気測定，日本建築学会学術講演梗概集（九州），日本建築学会，pp663-664，2016.8

- [2-31] 嶋田祐典 依光剛志 大西裕治 田島昌樹:人間の呼気に含まれる CO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その7 Met 値推定の精度向上, 日本建築学会学術講演梗概集(中国), 日本建築学会, pp701-702, 2017.8
- [2-32] 依光剛志 嶋田祐典 大西裕治 田島昌樹:人間の呼気に含まれる CO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その8 Met 値推定手法と CO<sub>2</sub>呼出量算定の精度向上, 日本建築学会学術講演梗概集(中国), 日本建築学会, pp703-704, 2017.8
- [2-33] 依光剛志 嶋田祐典 大西裕治 田島昌樹:人間の呼気に含まれる CO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その9 換気室の CO<sub>2</sub>濃度推定精度の検討, 日本建築学会学術講演梗概集(中国), 日本建築学会, pp705-706, 2017.8



## 第3章

# 住宅用換気システムの運用要因による 経時風量減少を対象とした分析



## 第3章：住宅用換気システムの運用要因による経時風量減少を対象とした分析

### 3.1 はじめに

序章でも述べたように、住宅ではシックハウス対策などのために24時間稼働する機械換気システムの設置が義務化されており、建築基準法では居室の換気回数は0.5回/h以上の換気性能が求められていることが建築基準法によって定められている。しかし、換気システムが入居後に風量測定を行われるのは稀であり、何らかの要因により風量が減少することで換気性能が低下した場合、居住者はそのことを知覚せずに常に換気不足の空間に曝されることとなる。長期的な換気不足は、室内空気環境の安全性や快適性を悪化させ、居住者の健康に影響を与える可能性があり、結露によるカビの発生なども懸念される。

住宅用換気システムにおける換気不足は、技術者ではない居住者が換気の運用を担うということに大きな要因があることが考えられる。換気システムは、埃や虫がフィルターやファンに付着することで風量が不足するため、定期的に適切な清掃などのメンテナンスを行う必要がある。しかし、現実として住宅受け渡し時の説明不足等なども踏まえると、一般的な居住者は換気システムのメンテナンスの必要性に関して認識・知識不足であり、既往調査でも多くの住宅で換気不足が起こっていることが指摘されている。また換気システムの中でも給排気を機械で行う第一種換気システムが必然的にフィルターの数が多くなりメンテナンス不足による風量減少が起こりやすいと考えられる。

本章では、第一種換気方式を中心に住宅用換気システムのメンテナンス不足により経時的に風量が減少として減少の計算モデルとして風量減少モデルを作成し、第4章以降の換気システムの各性能評価の計算値として用いることで運用時を対象とした実状に近い性能評価を行い、メンテナンス不足が招く居住者へのリスクを換気性能や省エネルギーの観点で示すことを目的としている。

## 3.2 機械換気システムの風量減少の要因

換気システムの風量が減少する要因について、村田らによる「集合住宅の第一種熱交換換気システムの風量低下要因に関する調査（2005）」<sup>[3-1]</sup>を引用し、体系的に取りまとめたものを以下に示す。

### ①設計要因

空気の搬送経路の圧力損失についての的確な計算ができずに換気システムの部材やファンの選定もしくは経路の設計が行われるなるもの。これは換気計画・設計段階においては圧力損失計算を行う時点で、建築側の施工状況が把握できないため実施工状態を想定したダクト配置計画が難しいことが一つの理由として考えられる。この問題については、設計風量が実測定値と合わない場合があるという指摘もあり、計算方法によっては圧力損失に誤差が大きく含まれる可能性がある。<sup>[3-2,3]</sup>

### ②施工要因

ダクトのつぶれや、曲がりなどの施工不良や設計段階で圧力損失計算していたとしても施工時に計画されていたものよりも圧力損失の大きい部材が使用されることなどが考えられる。<sup>[3-4]</sup>

### ③運用要因

フィルターの清掃などのメンテナンスが適切に行われなことで虫や埃が付着し、空気が搬送される経路で起こる目詰まりが要因とされるもの。またファンモーター等の経年劣化や故障によるもの。特に住宅の換気システムについては、運用時の性能検査がほとんど行われなため、居住者が換気について認識や知識が不足している場合に起こりやすい。

最近では、高圧損部材の使用等などによる風量減少の設計要因については、設計時に安全率を見込むことで解消される兆しにある。しかし、運用段階でのフィルターやファンに見られる埃の付着を中心とした複合的な要因で風量が大きく減少することが確認されているため、今後はこの運用要因の解消が求められる。

本研究では、上記にある理由を含め換気システムの運用要因による風量減少のみを対象とし、風量減少モデルの作成を行う。

## 3.3 風量減少モデルの作成

### 3.3.1 概要

本節では、換気システムがメンテナンス不足によりフィルターなどによって経路に目詰まりが起こることで風量が経時的に減少していく現象の計算モデル作成を行う。モデルの

作成には、1.2節で述べた自立循環プロジェクトの換気・通風に関わる技術開発委員会によって行われた「実験集合住宅における全般換気の清掃と消費電力に関する検討」<sup>[3-5]</sup>によって行われたダクト内風量と端末部材の風量の測定結果と本研究で新たに実住宅を対象に行ったダクト式第三種換気システムの清掃前後の風量と消費電力の測定結果を用いて行う。

また本研究での風量減少モデルの作成は、換気システムによる住宅全体の換気量を省エネルギー基準の算定に使用されるモデル住宅の条件に合わせ、160[m<sup>3</sup>/h]を想定して検討している。

### 3.3.2 モデルの参考となる風量測定データ

換気システムのメンテナンスが要因とされる経時的な風量減少のモデル作成には、長期間の風量測定データを必要とする。対象とする風量減少は、主に換気システムが空気を搬送する際の経路に設けられたフィルターなどに虫や埃の付着が長期間放置され積み重なることで起こる目詰まりが原因と考えられる。しかし、立地条件や天候条件、または花粉なども考慮すると測定時期などによって外気の変化するため、一般的な目詰まりのモデルを定義するのは難しいと考えられ、それに加え長期的かつ有効な測定データを複数入手するのが困難である。そのため、本研究では複数の条件を設けた測定データを扱うのではなく、対象とする測定データを決め、その建物および換気システムを基にした風量減少モデルの提案を行う。以下に、対象および分析に用いた測定データを示す。

#### (1) 「実験集合住宅における全般換気の清掃と消費電力に関する検討」の測定結果<sup>[3-5]</sup>

自立循環プロジェクトで、生活行為が模擬的に再現されている一棟の集合住宅内のダクト式第一種熱交換換気システムもしくはサニタリー局所換気を兼ねる第三種換気システムが導入されている4住戸において換気システムの清掃後の換気システム風量や比消費電力の変化について整理した結果である。測定は全般換気システムを連続稼働させ、消費電力や換気システム風量を測定している。それに併せて、非定期的に換気システムの清掃を行い、この条件で得られた測定値をもとに換気システム風量、有効換気量率および比消費電力などについて取りまとめている。測定対象とした住戸の平面図を図3-1に全般換気システムの仕様を表3-1に示す。この調査において消費電力や換気システム風量の測定が比較的安定して得られた101号室と303号室についてデータ整理を行っているため、本研究でも二室の測定データを対象に分析を行っている。

なお換気システムの風量や消費電力の測定は表3-2に示す手法を用いて行っている。表3-2における①ダクト内風量[m<sup>3</sup>/h]は2007年2月から測定を開始し、第一種、第三種ともに連続測定を実施している。この手法ではダクト内に設置した風速計の指示値とトレーサーガスなどの測定結果から風量を導出する式を決定し、ダクト内風量に換算している。②端末部材の風量[m<sup>3</sup>/h]は、表3に示している時期に換気システムの清掃の実施と同時に行った。③消費電力は①の設置以前から連続的に測定している。

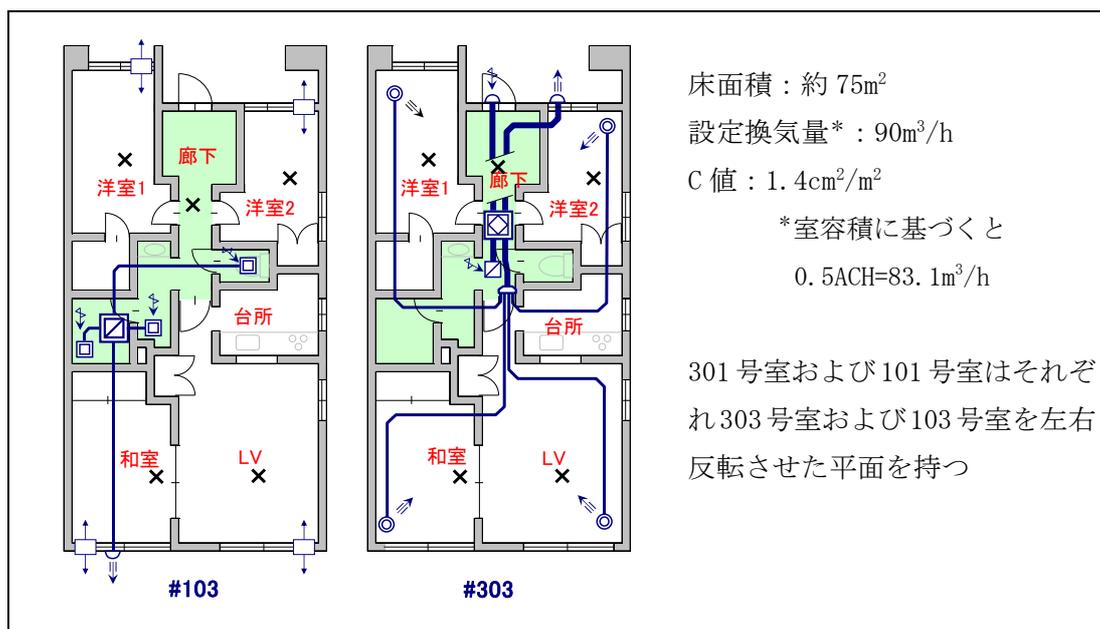


図 3-1 測定対象住宅の平面図および概要

表 3-1 換気システムの仕様

301/303 号室	第一種熱交換型換気システム 2 モーター (AC モーター) 2 ファン 定格機能:71W, 120m <sup>3</sup> /h, 機外静圧 58.8Pa, 有効換気量率 94%
101/103 号室	第三種換気システム DC モーター 定格機能:8W, 120m <sup>3</sup> /h, 機外静圧 0Pa 時 ※3 箇所から排気を行い、24h モードと端末がある室において、強モード (使用モード) の選択ができる

表 3-2 測定項目および測定指標

測定項目	測定方法
①ダクト内風量 [m <sup>3</sup> /h]	熱式風速計から換算
②端末部材の風量 [m <sup>3</sup> /h]	フード式風量計、トレーサーガス*
③消費電力 [W]	クランプ式電力量記録計

\*フード式風量計での測定精度が低いと考えられる条件で使用

表 3-3 第一種換気設備の清掃実施時期

年.月	清掃間隔名	清掃/風量測定*	備考
2005.3	期間 A:約 6 ヶ月	清掃	実施者 a
2005.9		清掃/風量測定	実施者 b
2006.7	期間 B:約 10 ヶ月	↑	↑
2006.11		↑	↑
2007.11	期間 D:約 12 ヶ月	↑	↑

\*フッド式風量計での測定精度が低いと考えられる条件で使用

②端末部材の風量の測定結果として、303号室の第一種熱交換型換気システムの清掃前後の端末部材における風量を図3-2～図3-5に示す。また清掃前後のSAの有効換気量率にもとづき算出された比消費電力 $SFP_E$ を図3-6に、表3に示している時期におけるSA風量や比消費電力の変化を図3-7に示す。

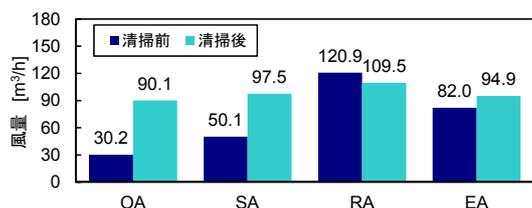


図 3-2 2005年9月実施清掃前後の風量 (約6ヶ月運転)

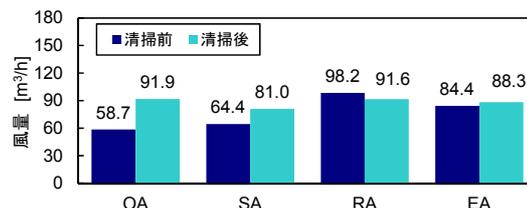


図 3-4 2006年11月実施清掃前後の風量 (約4ヶ月運転)

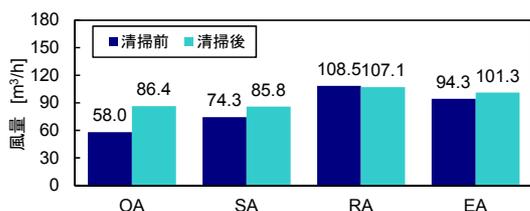


図 3-3 2006年7月実施清掃前後の風量 (約10ヶ月運転)

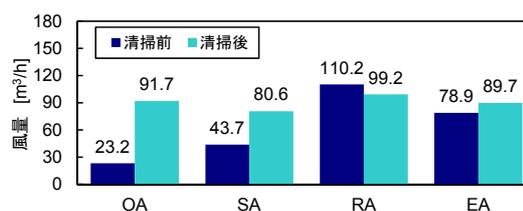


図 3-5 2007年11月実施清掃前後の風量 (約12ヶ月運転)

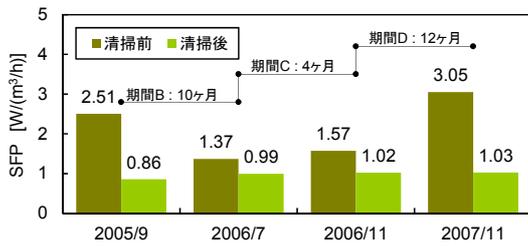


図 3-6 清掃前後の有効換気量にもとづく比消費電力 SFP<sub>E</sub>

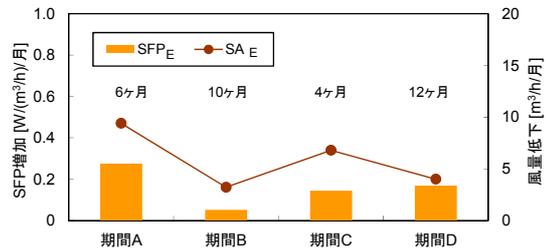


図 3-7 各期間の比消費電力の増加および有効換気量の低下

第一種熱交換型換気システムと第三種換気システムの期間 D で連続測定により取得できた各月の比消費電力の推移を図 3-8 および図 3-9 に示す。図 3-8 には SA 風量の有効換気率にもとづく比消費電力 SFP<sub>E</sub> を示しており、2006 年 11 月の清掃実施後から SA<sub>E</sub> は低下し続け、SFP<sub>E</sub> は半年を経過したあたりから増加が顕著となった。一方、図 3-9 に示している第三種換気システムの風量の低下は見られず、DC モータを採用しているため比消費電力は元々小さく目立った変化も見られなかった。

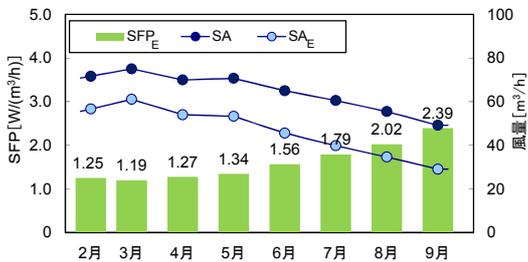


図 3-8 2007 年 2-9 月の比消費電力と風量 (第一種熱交換型換気)

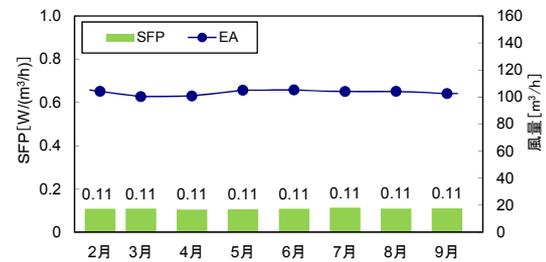


図 3-9 2007 年 2-9 月の比消費電力と風量 (第三種換気)

## (2) 実住宅におけるダクト式第三種換気システムの実測

本項では、ダクト式第三種用換気システム（AC モータ）を採用している実住宅3件において、換気システムの清掃前後の風量や消費電力を測定した結果を整理したものを示す。測定対象とした換気システムはシステム内にフィルターを用いていない機構であり、基本的なメンテナンスは換気の対象となる各居室の天井に設けられているRA グリル周辺の埃などを掃除機で吸い取った後、水または中性洗剤入れたぬるま湯に浸した布で拭き掃除をし、最後にからぶきをするという簡易的なものである。今回はRA グリルの清掃に加え、ファンの稼働を止め対象RA グリル以外のRA グリルの給気口を閉じた状態で各室のRA グリルから掃除機によるダクト内の埃を吸い取る試みも行っている。

表3-に各対象住宅の清掃および測定を行った日時およびその他条件を、表3-に測定項目と測定器機および清掃に用いた掃除機の機種を示す。また測定対象とした住宅は全てワンフロアのみを換気対象としたシステムであった。

表3-4 各対象住宅の清掃および測定を行った日時およびその他条件

対象住宅	実施日時	築年数	換気の対象フロア	ダクト径	RA グリル数
0 邸	2017年11月13日（月） 13：00-15：30	7年	2階	75mm	6箇所
I 邸	2017年11月14日（火） 9：10-10：40	8年	2階	50mm	7箇所
K 邸	2017年11月14日（火） 13：00-14：30	4年	2階	75mm	4箇所

表3-5 測定項目と測定器機および清掃に用いた掃除機の機種

項目	機種	備考
風量	風量計 SWF-126 (コーナー札幌)	-
消費電力	電力計 3168 (HIOKI)	-
粉塵・埃捕集量	サイクロン掃除機 V8 Fluffy SV10FF2	換気システムの清掃に用いた
	紙パック掃除機 MC-PK18G	

各住宅のRA グリル別の風量測定結果とワンフロア全体の清掃前後の換気量と消費電力の測定結果を以下に示す。

・0 邸

0 邸の換気システムはΦ75mm のダクトを採用している。風量、消費電力ともに清掃前後での変化は少なかった。

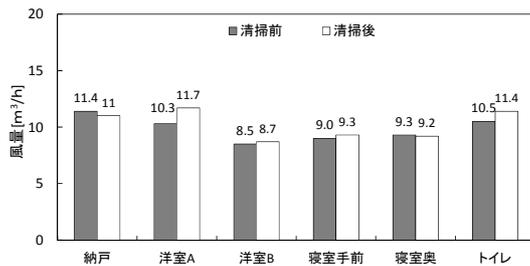


図 3-10 RA グリル別の風量測定結果

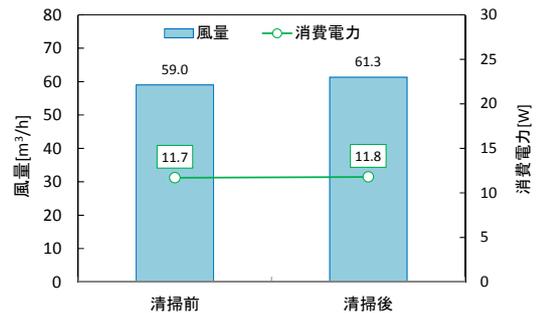


図 3-11 清掃前後の換気量と消費電力

・I 邸

I 邸には RA グリルが 7 箇所存在するが、その内一つは屋根裏部屋にあるため今回の調査では実測を行わなかった。そのため、図 3-13 に示している合計された換気量が他の住宅と比較しても小さくなっている。また換気システムに使用しているダクト径がΦ50mm であり、掃除機でダクト内の埃を吸引するときにΦ75mm と比べると風速が大きくなり、埃の捕集量は他の住宅と比べ多かったことから風量の回復も大きくなったのだと考えられる。

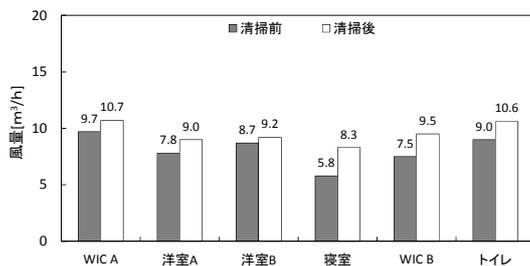


図 3-12 RA グリル別の風量測定結果

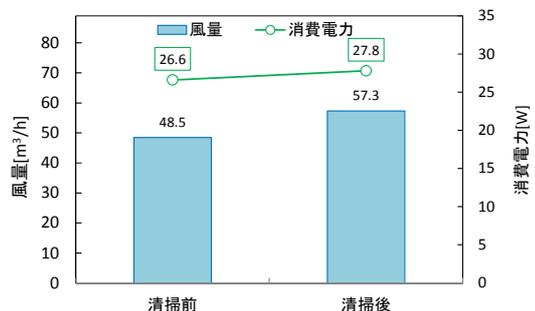


図 3-13 清掃前後の換気量と消費電力

・I邸

I邸は、0邸と同じく換気システムはΦ75mmのダクトを採用しており、全体での風量、消費電力ともに清掃前後での変化は少なかった。

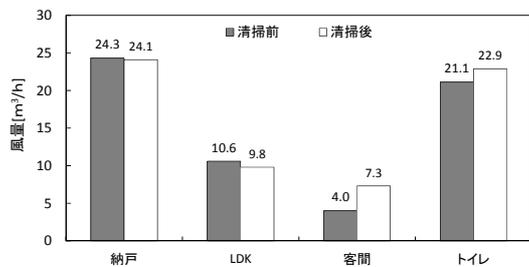


図 3-14 RA グリル別の風量測定結果

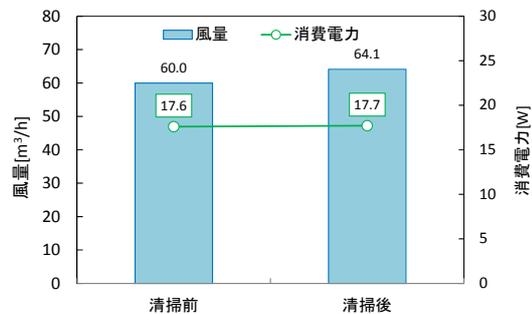


図 3-15 清掃前後の換気量と消費電力

### 3.3.3 本研究における風量減少モデル

本項では、3.3.2項で示した(1)、(2)、(3)の3種の測定データに、計算モデルの換気システムの条件に近い機種仕様値を用いて捕捉することで、本研究における換気システムの風量減少モデルの作成を行う。本研究で作成する風量減少モデルは、一ヶ月あたりの風量減少を定量化するものとし、省エネルギー基準に従い住宅全体の設定換気量が $160\text{m}^3/\text{h}$ である換気システムを想定して検討を行う。以下に、それぞれの測定データに基づく風量減少モデルについて、その作成方法と内容を示す。

#### (1) 「実験集合住宅における全般換気の清掃と消費電力に関する検討」の測定結果

測定結果は図3-9に示したように、第三種換気システム(DCモータ)は排気風量も比消費電力もほとんど変化が得られなかったため、ここでの検討は第一種熱交換換気システムの風量減少モデルを図3-2～3-5、3-7、3-8に示している測定結果を用いて作成する。

風量減少については、換気における外気導入量の多寡が重要であると考えられるため換気ユニットから室内への給気であるSA風量を中心に検討を行っている。一ヶ月あたりの風量の減少は、各期間において前回の清掃後の風量からその期間の清掃前の風量の差を、その期間における風量減少量とし、それを清掃間隔で除したものを月平均値にしている。しかし、表3-3に示しているように2005年3月の清掃の実施者とそれ以降の期間における清掃と測定の実施者が異なる上に、実施者bは実施者aに比較して換気システムの取り扱いに慣れており、システム本体内部の清掃もしていることから同条件のデータを対象とする為、本検討では期間Aにおける測定データは除き、期間B-Cにおける一ヶ月あたりの風量減少量を平均することで、風量減少モデルの作成を行った。表3-6に各空気系統における期間毎と本研究のモデルとしての一ヶ月あたりの風量減少量とそれを設定換気量 $160\text{m}^3/\text{h}$ に換算した時の値を示す。

表3-6 各期間の測定値と本研究でモデルとする一ヶ月あたりの風量減少モデル

	測定値にもとづく計算値 [ $\text{m}^3/\text{h}/\text{月}$ ]				本研究の風量減少モデル [ $\text{m}^3/\text{h}/\text{月}$ ]
	期間B	期間C	期間D	平均風量低下量	$160\text{m}^3/\text{h}$ 換算平均風量低下量*
OA	3.21	6.93	5.73	5.29	9.40
SA	2.32	5.35	3.11	3.59	6.39
RA	0.10	2.23	-1.55	0.26	0.46
EA	0.06	4.23	0.78	1.69	3.00

\* 測定値は $90\text{m}^3/\text{h}$ を設定風量としているため一般的なモデルとして仮定できる省エネルギー基準の住宅モデルとして設定されている換気システムの $160\text{m}^3/\text{h}$ にその比率を乗じることで換算した値

\*\* 本研究で第一種換気の空気系統で特に重視しているSA風量について、その値を着色している

第一種熱交換型換気システムに関しては、給気量に含まれる環境衛生上支障のない状態である外気相当の新鮮空気量である有効換気量を考慮しなければならない。熱交換を行う際に還気が給気に混入する場合があるからであり、必要換気量に対してこの有効換気量で満たさなければならない。また第一種換気システムの給気量に対する有効換気量の比率を有効換気量率と呼び、還気の漏気が給気に混入しない場合に有効換気量率は1.0となり、第二種換気システム、第三種換気システムにおいてもその値は1.0とされている。通常、第一種換気システムの有効換気量率は0.85-1.0と言われているが、現在は多くのメーカーの仕様書では、0.90をほとんどの機種が超えており、0.97前後の値を性能として有しているものも存在する。

有効換気量も図3-8に示すようにSA風量と同じように清掃からの時間が経過するほど減少している。そのため本検討では、図3-8の測定結果を用いて清掃から4ヶ月目から11ヶ月目にかけての有効換気量率の変化を有効換気量から逆算することで算出した。その結果を図3-16に示す。なおグラフに示している回帰直線は①が4ヶ月目から11ヶ月目までのデータによるものであり、②は4ヶ月目の有効換気量率が5ヶ月目の値より小さかったため4ヶ月目のデータを除いて直線を引いたものを載せている。

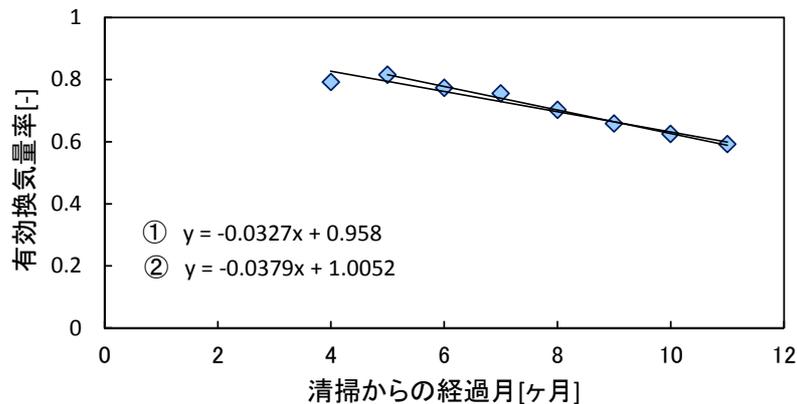


図3-16 2007年2-9月の有効換気量率の変動（第一種熱交換型換気）

結果として、有効換気量率も減少していく傾向にあることが確認できた。本検討ではこの結果より、有効換気量率の一ヶ月あたりの減少を安全率も見込み0.4とし、機器自体の性能としての有効換気量率は、仕様書にも多く記載されている0.95を用いてモデルの検討を行った。以上の検討結果より、作成したACモータの第一種熱交換型換気システムの給気に関する風量減少モデルを図3-17に示す。

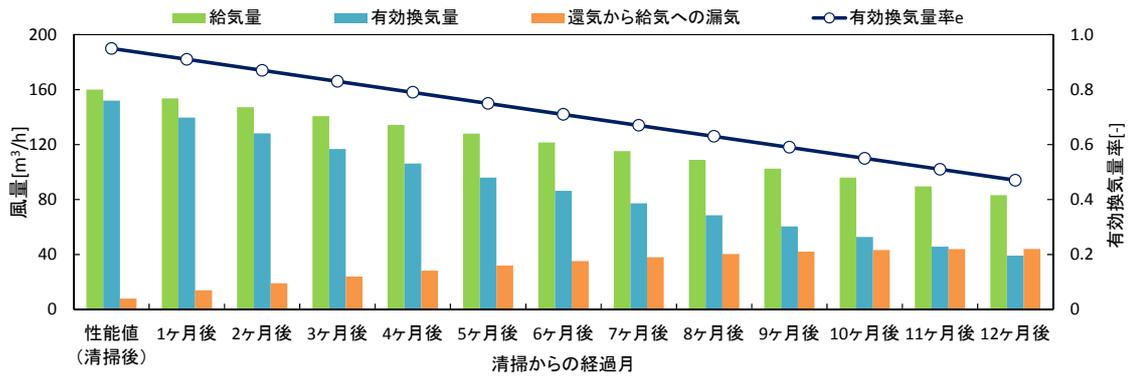


図 3-17 第一種熱交換型換気システム（AC モータ）の給気に関する風量減少モデル

(2) 実住宅におけるダクト式第三種換気システムの実測

ここでは、前項で示した実測結果を用いて AC モータを採用しているダクト式第三種換気システムの風量減少と同時に消費電力の減少モデルも作成する。

モデル作成の考え方は、居住者からの聞き取りより今回対象となった全ての住宅においてほとんど換気システムのメンテナンスや清掃は竣工後からしていなかったという回答を得ているため、今回の清掃前と清掃後の性能値の差を築年数における性能低下として考え、それを一ヶ月あたりの値に平均する。また、清掃後の実測によって得られた風量と消費電力をその住宅に導入されている換気システムの性能値として考える。消費電力についても同様に考え、省エネルギー基準に示されているダクト式第三種換気システムの基準となる比消費電力を用いて、160m³/h の換気量を持つシステムの性能値としての消費電力を求め、測定で得られた一ヶ月あたりの消費電力の減少との比率をみることで算出している。また検討は、ダクト径Φ75mm を採用していた O 邸と K 邸の測定結果を用いて行っている。以下に、両住宅から算出された一ヶ月あたりの風量と消費電力の減少モデルとした数値を示す。また同時に両住宅の平均値を示す。

表 3-7 各期間の測定値と本研究でモデルとする一ヶ月あたりの風量減少モデル

	月平均風量減少量 [(m³/h)/月]		月平均消費電力減少量 [W/月]	
	測定値	160[m³/h]換算値	測定値	160[m³/h]換算値
O 邸	0.027	0.071	0.0012	0.0023
K 邸	0.085	0.213	0.0021	0.0027
平均値	0.056	0.142	0.0016	0.0025

省エネルギー基準で基準を算定するために設定されている第三種換気の換気計画では、RA グリルは6箇所あるため、本研究ではダクト式第三種換気システムの風量減少モデルは同じく6ヶ所に分岐している0邸か平均値のモデルを用いることとする。図3-18に上記の平均値を用いた第三種換気システム（ACモータ）の風量減少モデルを示す。

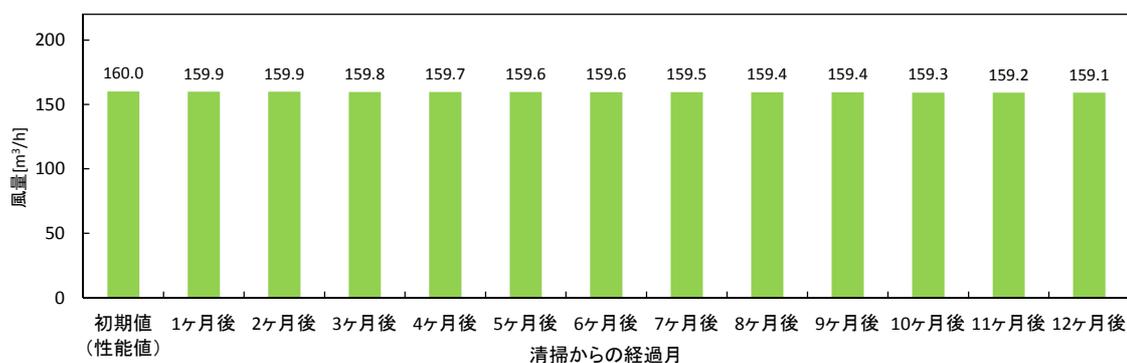


図3-18 測定値の平均値を用いた第三種換気システム（ACモータ）の風量減少モデル

### (3) 仕様値と測定データを用いた検討

(1)～(3)の検討では、ダクト式第一種熱交換型換気システム（ACモータ）とダクト式第三種換気システム（ACモータ）についてしか風量減少モデルを提案出来ていないため、ここでは、測定データと特定の換気システムの仕様値<sup>[3-9]</sup>を用いてDCモータを採用しているダクト式第三種換気システムおよび第一種熱交換換気換気システムの風量減少モデル作成の検討を行う。しかし、仕様値に関しては入手できるものが限られているため、可能な限り想定モデルに近いものと本研究における過程に基づいて行うことを前提とする。DCモータは通常、定風量制御機能がついており、ある程度の機外静圧の範囲ならば一定の風量を維持することができる。そのため定風量制御が可能な機外静圧の範囲では、静圧が増加すると風量を一定に制御するため消費電力が増加する特徴がある。

まずDCモータを搭載しているダクト式第三種換気システムについて考える。モデルとして検討する換気システムの条件は、設定風量が160m<sup>3</sup>/hであり、枝ダクトの最大長さは10.4mであるため安全側をとり、パイプ抵抗曲線は20mのものとして、参考とする仕様値を検討した。入手できた仕様値の中で、強運転において最も風量が160 m<sup>3</sup>/hに近い170 m<sup>3</sup>/hの機種を参考して、定風量制御における風量を160 m<sup>3</sup>/hとなるように該当機種のPQ曲線を換算し用いた。この機種では、160 m<sup>3</sup>/h換算した時におよそ0～155Paの範囲で定風量制御が可能である。ダクト式第三種換気システム（ACモータ）は、上記の(3)の検討で示した実測結果を見ても、清掃をしない場合の風量減少はごく僅かしかなく、これを機外静圧の増加に換算した場合、およそ2Pa程度であり、十分に定風量制御が可能な範囲に静圧の変化が収まると考えられる。また前節、3.3.2(1)で示したDCモータの第三種換気システムの連続運転における風量測定結果でも、9ヶ月間風量はほとんど変化しなかったため、ダクト式

第三種換気システム（DC モータ）においては風量が変わらないと想定し今後は検討を行う。

次にダクト式第一種熱交換換気システム（DC モータ）の風量減少についての検討を述べる。第一種熱交換換気システムは、給気用と排気用のファンを2個と熱交換素を有しているなどその特徴や利点ゆえに複雑な部分があり、実状の現象を再現することは難しいと考えられる。また多くの第一種熱交換換気システムの仕様書には、後述の第6章にて必要となる定風量時の消費電力特性の情報が記載されているものがない。そのため本検討では先述したダクト式第三種換気システム（DC モータ）の風量減少モデル作成の検討で使った機種仕様書に示される消費電力を省エネルギー基準で定められている比消費電力の比率から第一種熱交換換気システム相当に変換し、検討している。（ダクト式第三種換気システム（DC モータ）は、第一種換気と比較して単純な機構であり、仕様書に消費電力と機外静圧の関係を表す消費電力特性図が記載されている。）

しかし、その条件より消費電力を仮定し、算出する場合、清掃後からの各経過月におけるダクト式第一種熱交換換気システム（DC モータ）の機外静圧を知る必要がある。この問題については、ダクト式第一種熱交換換気システム（AC モータ）の風量減少モデルを用いて、換気システムの想定条件としている風量が  $160\text{m}^3/\text{h}$  に近い機種仕様書に示されている P-Q 曲線から各経過月における風量から機外静圧を読み取り、その値を第一種熱交換換気システム相当に変換したダクト式第三種換気システム（DC モータ）の P-Q 線図に当てはめることで風量を読み取り、風量減少モデルの作成を行う。

表 3-8 に清掃からの経過月に対応した第一種熱交換換気システムの機外静圧とともに AC モータ、DC モータそれぞれの想定される風量の関係を示す。またダクト式第一種熱交換換気システム（DC モータ）の有効換気量率は、図 3-11 の第一種熱交換換気システム（AC モータ）の風量減少モデルの中で SA 風量が最も近い清掃からの経過月の有効換気量率を用いた。これらの検討より作成したダクト式第一種熱交換換気システム（DC モータ）の風量減少モデルを図 3-19 に示す。

しかし、このモデルに関しては、実際の現象や実在する機種仕様値を参考に作成しているが、熱交換素子による圧力損失を考慮していないことや実際の第一種熱交換換気システム（DC モータ）の機種には定風量制御が可能な機外静圧の範囲が、モデルのものよりも広いものが存在することがあるため、モデルと実際の現象は大きくかい離する可能性があることを考えて用いる必要がある。

表 3-8 第一種熱交換換気における清掃から経過月と機外静圧、SA 風量の関係（設定風量 160 m<sup>3</sup>/h）

	性能値	1ヶ月目	2ヶ月目	3ヶ月目	4ヶ月目	5ヶ月目	6ヶ月目
静圧[Pa] *	90	100	110	120	130	138	148
AC モータの SA 風量[m <sup>3</sup> /h]	160	154	147	141	134	128	122
DC モータの SA 風量[m <sup>3</sup> /h]	160	160	160	160	160	160	160

	7ヶ月目	8ヶ月目	9ヶ月目	10ヶ月目	11ヶ月目	12ヶ月目
静圧[Pa]	155	160	167	175	180	188
AC モータの SA 風量[m <sup>3</sup> /h]	160	109	103	96	90	83
DC モータの SA 風量[m <sup>3</sup> /h]	160	150	130	62.5	0	0

\*DC モータ採用時において定風量制御が可能な静圧の範囲を、薄い赤色で着色している

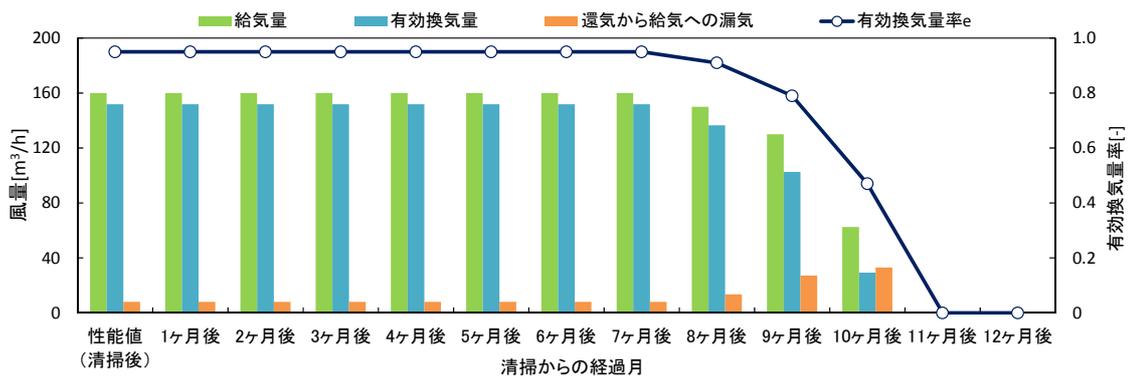


図 3-19 第一種熱交換型換気システム（AC モータ）の給気に関する風量減少モデル

### 3.4 おわりに

本章では、測定データや既往研究ならびにモデル条件に近い機種仕様値を用いることで、後述する換気システムの性能評価に用いることを目的に住宅用のダクト式第一種熱交換換気と第三種換気についてAC, DC モータ別に風量減少モデルの作成を行った。本章で作成した各換気システムの一ヶ月あたりの風量減少モデルを数値として表3-9に示す。

表3-9 各ダクト式換気システムの一ヶ月あたりの風量減少モデル

換気システム	モータ種別	風量減少 [(m <sup>3</sup> /h)/月]
第一種熱交換型換気	AC	SA 風量 : 6.39, 有効換気量率 : 0.04[%]
	DC	機外静圧により変動 (図3-18 参照)
第三種換気	AC	0.071 (0 邸モデル) もしくは 0.142 (平均値モデル)
	DC	静圧変化が定風量制御範囲とし、性能値一定とする

上記の表に示されているように、第三種換気はACモータのモデルに関しても風量減少量は定めているがごく僅かであり特に気にする必要がないと考えられる、DCモータでは、実住宅の測定結果より定風量制御の範囲内でしか静圧が変化しないと考えられるため、メンテナンス不足による風量減少は起きにくいシステムとして考えられる。そのため本研究では主に風量減少は第一種熱交換型換気で起こるものとしてと検討を行う。ACモータは、表でも示すように、1ヶ月単位でも換気性状に影響がでると考えられるほどの風量が減少すると想定される結果となった。DCモータに関しては、実際の現象や特定の機種仕様値を参考にしてはいるが、想定した条件での検討が重ねられたものであり、熱交換素子による圧力損失といった微細な部分における検証もできていないため実際の現象とかい離する可能性もあることを考慮する必要がある。また、今後は実測データやDCモータの消費電力特性を合せたP-Q線図を入手することでより実現象に近いモデルに修正していくことが必要である。

以上のことより、後述の検討では空気環境評価については、第三種換気は風量を一定とし、第一種熱交換換気はACモータのモデルを用いて検討を行うこととする。省エネルギーについては、ACモータとDCモータで同じ換気システムでも消費電力が異なるためそれぞれを個別に行う必要がある。

第3章 引用・参考文献

- [3-1] 村田さやか 高倉政寛 鈴木大隆 福島明 片岡尚 大西茂樹:集合住宅の第1種集中換気システムの風量低下要因に関する調査, 日本建築学会技術報告集, 第22号, pp307-310, 2005.12
- [3-2] 井前貴正, 澤地孝男, 津田学志, 田島昌樹, 瀬戸裕直:ダクト式全般換気システムの設計に関する研究 第3種換気システムの設計風量と実測風量の比較および圧力損失計算に関する評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 20003.9
- [3-3] 井前貴正, 田島昌樹, 津田学志, 澤地孝男, 瀬戸裕直, 市川大介, 峰野悟:ダクト式全般換気システムの設計に関する評価 その2 第3種換気システムの風量測定技術に関する評価
- [3-4] 大西茂樹 田島昌樹 片岡尚 澤地孝男 瀬戸裕直 峰野悟:ダクト式全般換気システムの風量検証に関する研究 全熱交換型第1種換気システムにおける評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp763-764, 2003
- [3-5] 井前貴正 峰野悟 瀬戸田裕直 田島昌樹 澤地孝男 津田学志:実験集合住宅における全般換気設備の清掃と消費電力に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 日本建築学会, 2008.9
- [3-6] 村田さやか 高倉政寛 鈴木大隆 大西茂樹 尾本英晴:住宅用機械システムの粉じんによる性能低下予測 その1 風量低下促進方法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 日本建築学会, 2006.9
- [3-7] 大西茂樹 村田さやか 高倉政寛 鈴木大隆 尾本英晴:住宅用機械システムの粉じんによる性能低下予測 その2 2種類粉じんによる熱交換型換気システムの試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 日本建築学会, 2006.9
- [3-8] 村田さやか 鈴木大隆 高倉政寛 福島明:住宅用機械換気システムの長期風量保持とメンテナンスに関する評価手法 その3 換気風量の長期室内暴露試験と促進試験との比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 日本建築学会, 2009.8
- [3-9] 三菱電機 製品情報 暮らしと設備トップ 空調・換気・衛生トップ 製品情報 換気・換気空清機ロスナイ, <http://www.mitsubishielectric.co.jp/ldg/ja/products/air/lineup/ventilationfan/>, 2017.12 取得



## 第4章

# メンテナンス行為に関する活動量実測実験によるメンテナンス性評価



## 第4章：メンテナンス行為に関する活動量実測実験によるメンテナンス性評価

### 4.1 はじめに

第3章までにもメンテナンスが換気システムの性能に悪影響を与えることについて述べてきた。特に1.2節でも示したように換気システムのメンテナンスに関する既往研究はこれまでもいくつか存在している。しかし、メンテナンスの手法自体に関する研究はほとんどされていなく、明確な評価指標なども存在していない。また建築環境・省エネルギー機構における住宅用ダクト式設備に関するブックレット<sup>[4-1]</sup>に示されている性能評価方法の中で清掃作業の容易さを評価する要件があるが、これは立位又は座位において可能かどうか、メンテナンスを知らせる機能を設けているか、動作数などで判断するものであり、定量的な指標を用いていないおおまかな評価に用いるものである。特に、動作数に関しては、一動作における負担が清掃作業によって異なることが考えられるため、より詳細な清掃の容易さの評価を行うには各清掃作業の負担を考慮していく必要がある。

そのため本章では、各換気システムにおけるユニット本体や端末部材などのメンテナンスとして必要となる清掃作業の容易性をエネルギー消費量やMet値などの指標を用いることで定量的に評価する方法を提案し、各換気システムの種類や設置条件などとメンテナンス性の関係を明確化することを目的とする。

### 4.2 本研究におけるメンテナンス性評価の概要

本研究における換気システムのメンテナンス性評価では、前節でも示したように換気システムの種類や設置場所により異なるメンテナンスにおける清掃などの作業を対象とし、その作業の負担を定量化することで換気システムのメンテナンス性の評価を行う。メンテナンスの負担を定量化する方法は、被験者実験を用いて各作業の実技時のエネルギー代謝量もしくはMet値などを測定することで行う。

### 4.3 換気システムのメンテナンス行為に関する活動量実測実験

#### 4.3.1 実験概要

実験は換気システムのメンテナンス行為を想定した模擬行為を実際に被験者に行ってもらい、その時のエネルギー代謝量をダグラスバッグ法により測定することにより、本検討で設けたメンテナンス行為の Met 値を算出する。また、被験者は20歳代の男子学生を中心とし、ダグラスバッグ法で呼気を収集するのと同時に人の活動量をエネルギー代謝率の単位で計測が可能な三軸加速度センサー内蔵活動量計 OMRON HJA-750C（以下、活動量計と表す）と脈拍数計 MIO ALPHA 53PBLK-INT（以下、脈拍数計と表す）も被験者に装着してもらい測定を行っている。実験に使用した測定器機と測定項目を表 4-1 に示す。本章での検討では、実験で行うメンテナンスの模擬行為をより実条件に近づけるため、換気ユニットや点検口、RA グリルなどの天井に取り付ける部材は 2.4mの天井高に、壁に取り付ける部材は 1.6m の高さで取り付けることができる実験棟を作成することで、一般的な住宅での換気システムや端末部材の設置条件に近づけた。実験棟の写真 4-1 に示す。

表 4-1 測定項目と測定機器

測定項目	機器名	備考
CO <sub>2</sub> 濃度 O <sub>2</sub> 濃度	HORIBA ポータブルガス分析器 PG-240	測定範囲 CO <sub>2</sub> 0~20vol% O <sub>2</sub> 0~25vol%
	竹井機器工業株式会社 ダグラスバッグ TK-11288	容量 100L
活動量	OMRON 製 Active style PRO HJA-750c	測定範囲 ±6G 1.0~18.0METs (0.1METs 刻み)
脈拍数	MIO ALPHA 53PBLK-INT	測定範囲 脈拍数 30 ~ 220 拍



写真 測定に使用した実験棟

### 4.3.2 実験対象および実験条件

測定の対象としたメンテナンス行為は5項目設定した。これらの項目は、ダクト式第三種換気システムのメンテナンス行為を中心に考えたものである。3.3.3(3)で示した実住宅におけるダクト式第三種換気システムの実測では、風量や消費電力と同時に活動量計を用いて行ったメンテナンス行為のMet値の測定を行っており、その結果と本章での被験者実験で同様のメンテナンス行為の測定結果を比較することで、実験におけるメンテナンス行為の再現性について確認を行うことを実験の目的の一つとしているからである。測定対象としたメンテナンス行為の実験条件を表4-2に示す。椅座静位は、安静状態のエネルギー代謝として測定しており、この測定結果を被験者それぞれのMet値1.0として扱っている。

表4-2 測定対象のメンテナンス行為の実験条件

メンテナンス行為	作業内容	作業時間 [分]	被験者 人数 [人]
椅座静位	椅子に座り、安静状態である	5	4
グリル清掃	グリル周辺の埃等を掃除機で吸い取る模擬作業を行う (脚立使用)	4	4
グリル拭き取り*	① グリルと周辺を水またはぬるま湯に浸した布で拭く ② 空拭きを行う	4	4
点検口等取り外し	① 点検口を開ける ② 換気ユニットの外蓋についているネジの取り外し 作業を3ヶ所行う ③ 点検口を閉める	-	4
ダクト清掃	① グリルに掃除機を15秒間あてダクト内の埃を吸引 ② 掃除機を持ち4m移動する ③ ①と②を6回繰り返す	-	4
自然給気口手入れ	① パネルを外す ② フィルターを取り外す ③ 手でフィルターについた埃を払う ④ 掃除機でフィルターについた埃を吸う ⑤ パネルを布で拭く ⑥ フィルターを付け、元通りに取り付ける	4	4

### 4.3.3 実験結果

測定したダグラスバッグ法によるMet値、活動量計によるMETsの平均値を標準偏差とともに表4-3に示す。結果としては、活動量が多いと想定されるメンテナンス行為ほど測定されたMet値が大きくなる傾向がみられた。特に、移動を伴う行為や高い場所での上向きの作業が必要となる行為である点検口等取り外しやダクト清掃が他の行為と比較して大きくなる結果となった。

表 4-3 メンテナンス行為の実験結果

メンテナンス行為	ダグラスバッグ法		活動量計		データ数
	Met 値	標準偏差	METs	標準偏差	
椅座静位	1.0	0	1.1	0.089	4
グリル清掃	1.4	0.182	1.4	0.250	4
グリル拭き取り	1.5	0.145	1.7	0.270	4
点検口等取り外し	1.9	0.181	1.7	0.292	4
ダクト清掃	1.9	0.212	2.1	0.122	4
自然給気口手入れ	1.4	0.337	1.6	0.219	4

#### 4.3.4 再現性の確認

4.3.2 で述べたように本節では、実際の住宅でダクト式第三種換気システムのメンテナンス行為を行った時に、活動量計により計測された METs (Met 値と同義として扱うことが可能) とダグラスバッグ法による被験者実験により得られた Met 値の測定結果を比較することで、実験で行ったメンテナンス行為を想定した模擬行為の再現性の確認を目的に検討を行う。モデル住宅や実際に居住者がいる住宅でメンテナンスを行った時に測定した METs の結果と比較として対応する実験で行ったメンテナンス行為と測定結果として得られた Met 値と活動量計の MET s を表 4-4, 5 に示す。

それぞれで得られた結果をみると、モデル住宅での活動量計による結果は、本体取付けに関しては、実験のダグラスバッグ法で得られた Met 値とおおよそ近い値となった。しかし、ダクト清掃においては両者の差が 0.5 以上みられる。これは、実験での移動条件は障害物などもない直線的な規定距離での移動に対して実住宅では、ドアなど狭い区間や曲がることが必要な移動が要求され、なおかつグリル間の移動距離が異なるなどの差が存在することが要因の一つとして考えられる。また実住宅での測定結果では、I 邸の測定結果が他の住宅と比較して実験値との差が大きいが、これはダクト内の埃を吸引するために対象としたグリルの数が小さいことと、住宅の移動距離が他と比較しても短かったためと考えられる。

以上のことを結果から考えると、おおよその Met 値は実住宅での測定結果に近く、差異がみられるケースはその住宅での移動距離やグリル個数など特性のある条件と実住宅でのメンテナンスは決められた作業以外にもその居室の条件などによりその場での対応を求められる作業なども追加されることもあることが要因とされるため、ある程度実際のメンテナンス状況を想定した模擬行為ならメンテナンス性の評価をするために扱っても問題ないと考えられる。

表 4-4 モデル住宅（高知市）での清掃行為の活動量測定結果（2017. 10. 05）との比較

	①本体 取り外し	② グリル閉	③ダクト 清掃	④本体 取付け	⑤ グリル開	①, ④ 平均
METs	1.9	2.5	2.6	2.0	2.2	1.9
対応する 実験における行為	点検口等 取り外し	-	ダクト 清掃	点検口等 取り外し	-	点検口等 取り外し
実験での測定 Met 値	1.9	-	2.0	1.9	-	1.9
実験での METs	1.7	-	2.1	1.7	-	1.7

表 4-5 実住宅での清掃行為の活動量測定結果（2017. 11. 13-14）との比較

	RA グリル閉じ	ダクト清掃		
	平均値	0 邸	I 邸	K 邸
METs	2.2	2.1	1.6	1.9
対応する 実験における行為	-	ダクト清掃		
実験での測定 Met 値	-	2.0		
実験での METs	-	2.1		

#### 4.4 まとめ（メンテナンス性評価）

本節では、前節までに行った被験者を用いたメンテナンス行為のダグラスバッグ法や活動量計によるエネルギー代謝量および Met 値の測定結果を用いて換気システムのメンテナンス性の評価を行う。また本章での検討に対してまとめを行い、今後の展望として必要とされる課題や検討も同時に述べる。

本章でのメンテナンス性の評価は、主にダクト式第三種換気システムのメンテナンス行為を対象としているため、本節では測定対象の中でどのようなメンテナンス行為が居住者に対してメンテナンスの負担を重くするののかということとを測定結果から想定し、換気システムのメンテナンス性について考察する。

表 4-3 の結果より、脚立などを使用し上向きの作業が必要とされたり、移動が伴ったりするメンテナンス行為の Met 値が高く測定され、居住者のメンテナンスに対して負担が大きくなる要因として考えられる。それらの対策としては、ユニットを天井ではなく壁や床下、床置き型のものを使うことでより楽な姿勢でメンテナンスが可能とすることや外蓋の開口を簡易にする機種や外蓋がなくとも安全に使用できるような配慮が望まれる。

まずは今回の実験におけるメンテナンス行為の対象であるダクト式第三種換気システムについて、実験結果を用いた直接的な評価を述べる。対象とした第三種換気システムで実際に居住者が行うメンテナンス行為は、グリル清掃、グリル拭き取り、自然給気口の手入れである。他の二つの行為は、通常は居住者が行わないダクト内の清掃を目的に行うものであり、実住宅でそれを行った活動量の実測結果があるため、実フィールドで行ったメンテナンス行為が実験でどの程度、再現性を高くできるのか各印するために今回実験の項目に追加している。実験で測定された Met 値をみると、三種の行為全てが、活動量が大きくない行為であると考えられ、第三種換気はメンテナンス性が困難ではなく、一般的な居住者でも比較的容易に性能を維持できる機種であることを確認した。

第一種換気システムは、第三種換気システムと異なり機械ファンにより給気、排気を行う為、自然給気口がなくその代り給気グリルが設置される。今回、住宅の一般モデルとして使用している省エネルギー基準の住宅で考えると第三種換気システム時における自然給気口の数と第一種換気システムの給気グリルの数は同じく 6 個であり、両者のメンテナンスにかかる Met 値に差異はほとんどないため、端末部材にかかるメンテナンスの容易性は同程度と考えることができる。しかし、第一種換気システムの多くは換気ユニット内の給排気の経路にフィルターが設けられており、第一種換気システムの多くが当てはまる熱交換型の場合は、ユニット内に熱交換素子があるため、これらの清掃に加え、清掃のための点検口やユニット本体の開閉作業がメンテナンスに必要となってくる。特に、外気からの粉塵や花粉、虫などを除去するための役割を持つ給気側のフィルターは目詰まりをする間隔が短いため、比較的短期間で定期的な清掃が強いられる。このことを考慮すると、第一種換気システムのメンテナンスの負担が第三種換気システムより大きくなるのは、メンテナンスが必要とする部材や箇所の多さに加え、第三種換気にはない上向きの作業が増えることから明らかであるといえる。そのため本章では、メンテナンス性については第三種換気の方が優れており、第一種換気については、今後メンテナンスが容易になるような工夫が求められるという課題が把握できた。

今後の検討や検討としては、今回行ったダクト式第三種換気システムのメンテナンス行為の実測実験に加え、第一種換気システムのメンテナンス行為についても実測を行っていく必要があるといえる。また、今回の実験では換気ユニットはダクト式で一般的に用いられる天井裏を想定して行ったが、現在メンテナンス性を考慮して床下や床置き、壁付けなどの換気ユニットも流通しているため換気システムの設置場所についても検討することも課題である。さらにメンテナンス性の評価をする際の分析についても、Met 値だけではなくメンテナンス行為自体にも実際の作業時間やその頻度についても考慮することで年間の居住者のメンテナンスにかかる負担の定量化を行うなどして、より実状に近い評価にすることが要求されると考える。

#### 第4章 引用・参考文献

- [4-1] 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構：自立循環型住宅への設計ガイドライン要素技術活用シリーズ 住宅用機械換気設備の計画と性能評価 ダクト式機械換気設備の省エネルギーと維持管理・ライフサイクルに関するブックレット，2016.9
- [4-2] 「日本人の食事摂取基準（2015年版）」策定検討会報告書，厚生労働省，p59-66，2014.3
- [4-3] 食生活改善指導担当者研修「食生活改善指導担当者テキスト」，厚生労働省，p183-191，2009.3
- [4-4] 三菱電機 製品情報 暮らしと設備トップ 空調・換気・衛生トップ 製品情報 換気・換気空清機ロスナイ，<http://www.mitsubishielectric.co.jp/ldg/ja/products/air/lineup/ventilationfan/>，2017.12 取得



## 第 5 章

風量減少を組み込んだ CO<sub>2</sub> 濃度にもとづく換気性能評価



## 第5章：風量減少を組み込んだCO<sub>2</sub>濃度にもとづく換気性能評価

### 5.1 はじめに

シックハウスなどの健康障害が目立つようになり、機械で強制的に室内空気を入れ替え、汚染物質を排出し空気環境を保つことを目的として建築基準法では、規定の必要換気量を満たす24時間稼働する機械換気システムの設置が義務化されている。

しかし、実状としては何らかの要因により設計風量を得られていない住宅や換気システムを居住者の判断により、適切ではない設定で運用したり、電源を切ったりしており本来の換気システムが要求される換気性能を見たしないケースが報告されていることが少なくない。そのような問題が発生する一つの要因としては、換気システムのメンテナンス不足による風量減少がある。

本章では、空気環境を第3章で提案した換気システムの風量減少モデルを用いて換気性能が低下した状態における住宅の空気質を算出し評価することで、メンテナンス不足が招く空気環境への悪影響を明確化することを目的として実測とシミュレーションを用いた検討を行った。

### 5.2 本研究における換気性能評価方法の概要

本章では、換気システムのメンテナンス不足により風量減少が起こった場合の換気性能評価をシミュレーションによる算出結果を用いて行う。また換気性能評価を行うには換気量の他に空気質を知る必要があり、ガス濃度や汚染物質の多寡によって判断される。本研究では、その空気質の評価基準を人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>によるCO<sub>2</sub>濃度としている。CO<sub>2</sub>濃度には建築物衛生法などで1000ppmという濃度基準値が定められており、これは室内空気汚染の総合指標として扱うことできる<sup>[5-1]</sup>ということに加え、対象が住宅用換気システムであるため居室の汚染物質を居住者の呼気とすることは特別な環境下を除き、より実状に近い空気質を評価できると考えられるためである。また通常は、在室者が設計通りの人数以内である場合、計画換気されている居室ならば人間の呼気のみで基準値を大きく超えることは無いと考えられる。そのため、風量減少が起こった換気システムがつくる空気質はどのくらい悪くなるのか把握することも本検討の目的の一つである。本研究における換気性能評価の主要素とその目的をまとめる以下ようになる。

表 5-1 本研究における換気性能評価の主要素と目的

主要素	① 換気システムのメンテナンス不足による経時風量減少 ② 人間の呼気を用いた換気性能評価
目的	風量減少が与える住宅の室内空気環境への影響

住宅内のCO<sub>2</sub>濃度の計算手順は、標準的な住宅や居住者家族構成とそれらの生活パターンを想定し、式(2-51)、(2-46)<sup>[5-2]</sup>を用いることで空気環境評価のトレーサーとして使用する居住者のCO<sub>2</sub>呼出量を推定し、CO<sub>2</sub>濃度の算出を行った。なお、計算する際に使用した住宅モデルは、住宅省エネルギー基準などで基準策定のために用いられたモデル<sup>[5-3]</sup>を用いている。その平面図を図5-1に、また居住者家族構成とその生活パターンの詳細については次節の5.3節において示す。

$$P_{CO_2i} = 1.601 \times 10^{-4} (60.63 \times A_D \times Met \times C_a \times C_g) \quad (2-51 \text{ (再掲)})$$

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (2-46 \text{ (再掲)})$$

ここで

$P_{CO_2i}$	: CO <sub>2</sub> 呼出量 [m <sup>3</sup> /h]
$A_D$	: 体表面積[m <sup>2</sup> ]
$Met$	: エネルギー代謝率[-]
$C_a$	: 年齢係数[-] (表2-13参照)
$C_g$	: 性別係数[-] (男性1.00 女性0.73)
$H$	: 体重[kg]
$W$	: 身長[cm]

表 5-2 男女別年齢係数

年齢	男	女
18～29	1.00	1.00
30～49	1.01	1.04
50～69	0.92	0.99

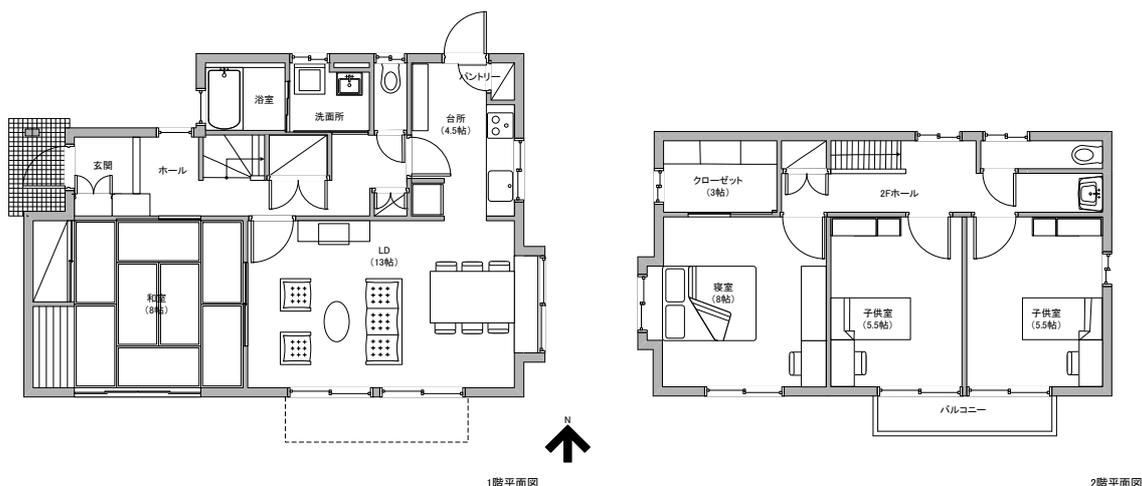


図 5-1 モデル住宅の平面図

### 5.3 居住者の家族構成と生活スケジュール

#### 5.3.1 居住者の家族構成と生活スケジュールの概要

居住者の家族構成と生活スケジュールにおいても、省エネルギー基準もしくは自立循環型住宅への設計ガイドライン<sup>[5-3,4]</sup>で用いられているモデルと参考としている。

家族構成は4人家族とし、夫婦に子供が二人を想定している。また家族構成には、性別、年齢も示されているため、これらの情報から平成26年国民健康・栄養調査<sup>[5-5]</sup>の年齢、性別ごとの平均身長、平均体重を引用することで式(2-51)の変数である体重、身長、年齢、性別の属性データを設定できたこととなる。表5-3に設定した家族構成を示す。

生活スケジュールは標準的と考えられる生活パターンを平日と休日の2種類を想定して作成されたものであり、CO<sub>2</sub>濃度計算の際に、CO<sub>2</sub>の発生場所と式(2-51)の変数の一つであるMet値を設定するために用いる。しかし、表5-3に示す省エネルギー基準のエネルギー算定に使用されている生活スケジュールは、発生場所となる在室場所とそこでの行動は示されているが、Met値まで記されていないため行動からMet値を設定する必要がある。そこで本研究は、可能な限りの生活スケジュールに記されている行動のMet値を被験者実験により測定した。また実験では測定ができないとされている行動のMet値は文献値もしくは既往の代謝量に関する推定式を用いることで設定した。

表 5-3 本研究における空気環境評価の主要素と目的

	年齢	性別	身長	体重
父	45歳	男性	171.0cm	70.4kg
母	42歳	女性	158.0cm	55.3kg
子供1	17歳	女性	156.1cm	50.6kg
子供2	15歳	男性	164.1cm	53.1kg

表5-4 基準エネルギー算定に用いられる生活スケジュール（平日）\*

時刻	男性46歳		女性44歳		女性16歳		男性14歳	
	行動	場所	行動	場所	行動	場所	行動	場所
0:00								
0:15								
0:30								
0:45								
1:00								
1:15								
1:30								
1:45								
2:00								
2:15								
2:30								
2:45								
3:00								
3:15	睡眠	寝室	睡眠	寝室	睡眠	子供室(東)	睡眠	子供室(西)
3:30								
3:45								
4:00								
4:15								
4:30								
4:45								
5:00								
5:15								
5:30								
5:45								
6:00								
6:15								
6:30	洗顔など	洗面所	洗顔など	洗面所				
6:45	新聞	食事室	炊事(準備)	台所				
7:00	朝食	食事室	朝食	食事室	朝食	食事室	朝食	食事室
7:15			炊事(洗い物)	台所	洗顔など	洗面所	テレビ	居間
7:30			テレビ	居間	テレビ	居間	洗顔など	洗面所
7:45							テレビ	居間
8:00								
8:15			洗濯	洗面所				
8:30			テレビ	居間				
8:45								
9:00			掃除	各室				
9:15								
9:30			テレビ	居間				
9:45								
10:00			外出準備	洗面所				
10:15								
10:30								
10:45								
11:00				外出				
11:15								
11:30								
11:45								
12:00			炊事(準備)	台所				
12:15			昼食	食事室				
12:30			炊事(洗い物)	台所		外出		外出
12:45								
13:00								
13:15		外出	テレビ	居間				
13:30			外出準備	洗面所				
13:45								
14:00								
14:15								
14:30				外出				
14:45								
15:00								
15:15								
15:30								
15:45								
16:00			テレビ	居間				
16:15								
16:30			炊事(下ごしらえ)	台所				
16:45								
17:00								
17:15			家事+趣味	居間			テレビ	居間
17:30								
17:45								
18:00								
18:15								
18:30			炊事(調理)	台所	テレビ	居間	学習	子供室(西)
18:45			炊事(仕上げ)	台所				
19:00								
19:15								
19:30								
19:45	夕食	食事室	夕食	食事室	夕食	食事室	夕食	食事室
20:00								
20:15			炊事(洗い物)	台所			テレビ	居間
20:30					学習	子供室(東)	入浴	浴室
20:45							洗顔など	洗面所
21:00	テレビ	居間			入浴	浴室		
21:15			テレビ	居間	洗顔など	洗面所	学習	子供室(西)
21:30								
21:45								
22:00	入浴	浴室						
22:15	洗顔など	洗面所						
22:30	パソコン	居間	入浴	浴室	学習+音学	子供室(東)	テレビゲーム	子供室(西)
22:45								
23:00	パソコン+テレビ	居間	洗顔など	洗面所				
23:15			テレビ	居間				
23:30					音楽	子供室(東)	睡眠	子供室(西)
23:45	睡眠	寝室	睡眠	寝室				

\*省エネ基準などで用いられる生活スケジュールには平日と休日の2種が存在するが、本章では平日版のみを示す。

## 5.3.2 生活スケジュールにおけるMet値の設定に関する検討

## (1) 呼気収集実験による検討

Met値の測定として、2.6.3に示したCO<sub>2</sub>呼出量に関する先行研究の中でも行ったダグラスバッグを用いた呼気収集実験を行った。測定は、20歳代の男子学生を主な被験者とし、ダグラスバッグにより呼気収集が可能である6種の行動（椅座静位を除く）を対象として行った。呼気収集測定の実施条件を表5-5、使用した機器と測定項目を表5-6に示す。また椅座静位は、Met値1.0の基準とするため測定前に安静時間を30分置いて測定を行った。

表5-5 呼気収集実験の実施条件

行動	作業時間 (呼気収集時間)	被験者数 [人]
椅座静位	15分(5分)	5
テレビ	10分(5分)	5
パソコン		5
学習		5
読書		5
洗濯物たたむ		4
音楽		4

表5-6 測定項目と測定器機

測定項目	機器名	測定概要
CO <sub>2</sub> 濃度 O <sub>2</sub> 濃度	HORIBA ポータブルガス分析器 PG-240	測定範囲 CO <sub>2</sub> 0~20vol% O <sub>2</sub> 0~25vol%
	竹井機器工業株式会社 ダグラスバッグ TK-11288	容量 100L

測定した行動のMet値の平均値とその標準偏差、比較対象として身体活動のMETs表<sup>[5-6]</sup>とASHRAE HANDBOOK<sup>[5-7,8]</sup>に示されているMet値を表5-7に示す。なお椅座静位をMet値1.0の基準としたときに、対象行動の測定Met値が1.0を下回ったものは分析に使用していない。また表5-7には先行研究<sup>[5-9,10,11,12]</sup>におけるMet値を測定している行動の中で、省エネ基準のスケジュールに示されている行動と被っている測定結果も載せている。全体的にMETs表に記載されている生活行動の値と比較をすると、測定値の方が小さくなる結果となった。

表 5-7 測定項目と測定器機

	測定結果			文献値	
	Met 値	標準偏差	データ数	ASHRAE	METs 表
椅坐静位	1.0	0.00	5	1.0	1.0
テレビ	1.1	0.05	3	-	1.3
パソコン	1.1	0.05	3	-	1.5
学習	1.1	0.06	5	-	1.3
読書	1.0	0.03	3	1.0	1.3
洗濯物たたむ	1.3	0.22	4	-	1.5
音楽	1.1	0.04	4	-	2.0
洗い物	1.5	0.24	11	-	1.8
掃除	2.0	0.62	11	2.0-3.4	3.3

## (2) 文献値による検討

上記の(1)呼気収集実験による検討に示した測定方法では、難しいと考えられる行動の Met 値に関しては METs 表に記載されている行動の中で同等もしくは最も近い行動と思われるものの値を引用している。

## (3) 睡眠時の Met 値に関する Harris-Benedict の式<sup>[5-13]</sup>を用いた検討

表 5-4 に示しているように本章の検討において参考としている生活スケジュールの中で居住者が最も長い時間連続して同じ居室で行う行動は睡眠である。そのためスケジュール内の行動でも睡眠時の Met 値は重要度が高いものと考え、文献値を用いずに測定データと代謝に関する既往研究を用いることで検討した。

睡眠時代謝は、副交感神経が緊張状態にあるため心拍数が低く、骨格筋が弛緩しており、体の動きが少ない睡眠をとっている状態である。以前までは、基礎代謝レベルよりもやや低いとされてきたが、現在では、睡眠時間中の平均的なエネルギー消費量は基礎代謝量とほぼ等しいため基礎代謝と同じように扱われることが多い。そのため本検討では、先行研究までに収集した被験者 15 名の Met1.0 とされる椅座静位時のエネルギー代謝量のデータと 2.6.1 の(1)代謝において基礎代謝の推定式の一つとして述べた Harris-Benedict の式(式(5-1)(5-2))を用いることで睡眠時の Met 値の推定を行った。すなわち睡眠時の Met 値は Harris-Benedict の式で基礎代謝量を求めた後に式(5-3)によって求められる。結果として得られた Met 値の範囲は 0.7~1.0 であり、その平均値は 0.8 となった。本研究では、睡眠時の Met 値を 0.8 として扱うこととする。表 5-8 に睡眠時の Met 値として推測値の平均と比較対象として ASHRAE HANDBOOK と METs 表、METs 表の引用元である海外の Met 値の文献である Compendium of Physical Activities<sup>[5-14]</sup>に示されている睡眠時 Met 値を示す。

$$\text{男性： BMR} = 66.4730 + 13.7516 \times W + 5.0033 \times H - 6.7550 \times A \quad (5-1)$$

$$\text{女性： BMR} = 655.0955 + 9.5634 \times W + 1.8496 \times H - 4.6756 \times A \quad (5-2)$$

ここで

BMR : 基礎代謝量[kcal/day]

W : 体重[kg]

H : 身長[cm]

A : 年齢[歳]

$$\text{睡眠時 met} = \frac{BMR * 4186.8}{24 * 60 * 60} \quad (5-3)$$

椅坐位時の代謝量

表 5-8 睡眠 Met 値の推測値と文献値

推測値 (平均値)	文献値		
	ASHRAE	Mets 表	Compendium of Physical Activities
0.8	0.7	1.0	0.95

### 5.3.3 Met 値を設定した生活スケジュールの作成

本項では前項で検討を行った生活スケジュールにおける行動の Met 値について整理し、それぞれの行動の Met 値を設定することで対象住宅モデルの一日のCO<sub>2</sub>発生量を算出することが目的である。前項までの検討結果を用いて生活スケジュールにおける各行動について設定した Met 値とその根拠を表 5-8 に、その情報を表 5-3 に追加し、修正した本研究の空気環境評価に用いる生活スケジュールを表 5-9 に示す。表 5-8 では Met 値の設定の根拠が本研究で行った測定値もしくは測定値を用いた推定値に着色している。家事+テレビのような同時に 2 つの行動を行うものはそれらの平均値とすることで設定を行っている。表 5-9 に関しては、オリジナルの生活スケジュールである表 5-3 と比べて在室場所が異なる部分があるが、これは後述する空気質の計算において、台所、居間、食事室を LDK と一つの空間で評価を行っているなど空気環境評価を行うために表現を変更したことによるものである。

また生活スケジュールにおける行動のうち測定を根拠として Met 値を設定した行動が占める時間割合は、24 時間中において 51%、居住者が外出をしている時間を除いた場合は 80% となり、実質 CO<sub>2</sub> 発生量の算出に必要な Met 値は 8 割を測定により把握したこととなる。

表 5-9 生活スケジュールにおける各行動の設定 Met 値とその根拠

行動	設定 Met 値	設定の根拠	備考
睡眠	0.8	測定(Harriss)	
洗顔など	2.0	Met 表	
新聞	1.0	測定	読書と同じ結果を使用
食事	1.5	Met 表	
テレビ	1.1	測定	
入浴	1.5	Met 表	
パソコン	1.1	測定	
パソコン+テレビ	1.1	測定	
炊事(洗い物)	1.5	測定	
洗濯	2.0	Met 表	
掃除	2.0	測定	掃除機を用いた掃除
外出準備	3.5	Met 表	
炊事(準備)	2.5	Met 表	
炊事(下ごしらえ)	1.8	Met 表	
炊事(調理)	1.5	Met 表	
炊事(仕上げ)	1.5	Met 表	
学習	1.1	測定	
音楽	1.1	測定	
学習+音楽	1.1	測定	
テレビゲーム	1.1	測定	テレビと同じ結果を使用
テレビ+新聞	1.0	測定	
家事+テレビ	1.2	測定	洗濯物たたむ <sup>*</sup> +テレビ
家事・趣味・娯楽	1.6	測定	掃除とパソコン
家族団欒	1.8	Met 表	家族で親睦会
趣味・お茶	1.0	測定	読書
趣味(音楽・読書)	1.0	測定	
家事+趣味	1.2	測定	洗濯物たたむ <sup>*</sup> +テレビ

表 5-10 本研究で作成した生活スケジュール（平日版）

時刻	父			母			子供1			子供2		
	行動	Met値	場所	行動	Met値	場所	行動	Met値	場所	行動	Met値	場所
0:00												
0:15												
0:30												
0:45												
1:00												
1:15												
1:30												
1:45												
2:00												
2:15												
2:30												
2:45												
3:00	睡眠	0.8	寝室	睡眠	0.8	寝室	睡眠	0.8	子供室(東)	睡眠	0.8	子供室(西)
3:15												
3:30												
3:45												
4:00												
4:15												
4:30												
4:45												
5:00												
5:15												
5:30												
5:45												
6:00												
6:15												
6:30	洗顔など	2.0	洗面所	洗顔など	2.0	洗面所						
6:45	新聞	1.0	LDK	炊事(準備)	2.5	LDK						
7:00	朝食	1.5	LDK	朝食	1.5	LDK	朝食	1.5	LDK	朝食	1.5	LDK
7:15				炊事(洗い物)	1.5	LDK	洗顔など	2.0	洗面所	テレビ	1.1	LDK
7:30							テレビ	1.1	LDK	洗顔など	2.0	洗面所
7:45				テレビ	1.1	LDK				テレビ	1.1	LDK
8:00												
8:15				洗濯	2.0	洗面所						
8:30				テレビ	1.1	LDK						
8:45												
9:00				掃除	2.0	LDK						
9:15												
9:30				テレビ	1.1	LDK						
9:45												
10:00				外出準備	3.5	洗面所						
10:15												
10:30												
10:45				外出								
11:00												
11:15												
11:30												
11:45												
12:00				炊事(準備)	2.5	LDK						
12:15				昼食	1.5	LDK						
12:30												
12:45				炊事(洗い物)	1.5	LDK						
13:00												
13:15				テレビ	1.1	LDK						
13:30												
13:45				外出準備	3.5	洗面所						
14:00												
14:15												
14:30				外出								
14:45												
15:00												
15:15												
15:30												
15:45												
16:00				テレビ	1.1	LDK						
16:15												
16:30				炊事(下ごしらえ)	1.8	LDK						
16:45												
17:00												
17:15				家事+趣味	1.2	LDK				テレビ	1.1	LDK
17:30												
17:45												
18:00												
18:15												
18:30				炊事(調理)	1.5	LDK	テレビ	1.1	LDK			
18:45												
19:00				炊事(仕上げ)	1.5	LDK				学習	1.1	子供室(西)
19:15												
19:30												
19:45	夕食	1.5	LDK	夕食	1.5	LDK	夕食	1.5	LDK	夕食	1.5	LDK
20:00												
20:15				炊事(洗い物)	1.5	LDK				テレビ	1.1	LDK
20:30							学習	1.1	子供室(東)	入浴	1.5	浴室
20:45										洗顔など	2.0	洗面所
21:00	テレビ	1.1	LDK									
21:15				テレビ	1.1	LDK	入浴	1.5	浴室			
21:30							洗顔など	2.0	洗面所	学習	1.1	子供室(西)
21:45												
22:00	入浴	1.5	浴室									
22:15	洗顔など	2.0	洗面所									
22:30				入浴	1.5	浴室	学習+音学	1.1	子供室(東)	テレビゲーム	1.1	子供室(西)
22:45	パソコン	1.1	LDK									
23:00	パソコン+テレビ	1.1	LDK	洗顔など	2.0	洗面所						
23:15				テレビ	1.1	LDK						
23:30	睡眠	0.8	寝室	睡眠	0.8	寝室	音楽	1.1	子供室(東)	睡眠	0.8	子供室(西)
23:45												

表 5-11 生活スケジュールにおいて Met 値を測定した行動が占める時間割合

	24 時間における割合	外出を除いた割合
平日	51%	80%
休日	69%	80%

#### 5.4 換気回路網計算を用いた室内空気環境評価

本章では、第 3 章で作成した換気システムの風量減少モデルと前節に示した標準的な住宅モデル、家族構成および生活スケジュールを計算条件とし、居住者の CO<sub>2</sub> 呼出量を用いた換気システムの風量減少を考慮した空気環境評価を行った。

##### 5.4.1 計算概要

室間の空気流動は、VentSim2<sup>[5-15]</sup>を用いて換気回路網計算を行うことにより算出した。計算条件を表 5-12 に示す。

計算条件として使用した各換気システムの給排気に関する換気計画図を、換気システムの風量（性能値）とともに図 5-2, 3, 4 に示す。図 5-2, 3 は第一種換気の計画図であるが、図 5-2 が省エネルギー基準の算定根拠の設定条件であり、図 5-3 自立循環型住宅の設計ガイドラインに示されているものである。本章内では、第一種換気の評価としては図 5-3 の結果を用いて行い、図 5-2 の結果は本論文の付録として記載する。なお、第一種換気の計画図には住宅の室以外に Unit と SubUnit という室を作成しており、これは VentSim での換気システムの風量設定は、室空間の間に直接行われるため、給気経路における OA、SA、排気経路における RA、EA のそれぞれを風量減少時に区別するために住宅内の空気環境に影響を与えないように住宅と外気の間の一つの空間を作成しているからである。さらに、この空間を作成したことにより第一種熱交換型換気システムにおこる還気が給気へ混入する現象を再現することもできる。図 5-5 に VentSim で計算した際に入力した室空間および換気システムの端末部材の高さ情報を示す。

また、家族構成、生活スケジュールと式 (2-51) を用いて算出した各居室の CO<sub>2</sub> 発生量のスケジュールを図 5-6 に示す。

表 5-12 シミュレーションの計算条件

項目	条件
住宅 延べ床面積	120.08[m <sup>2</sup> ]
全体換気量	160[m <sup>3</sup> /h]
周辺温度	室内外とも、20°C
換気システム	・第一種換気システム ・第三種換気システム
C 値	1.0[cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
風量減少の間隔	1ヶ月毎に0-12ヶ月目まで
CO <sub>2</sub> 発生ケース	・平日
計算出力時間	24時間[0:00-23:59 まで]
データの時間単位	1分データ

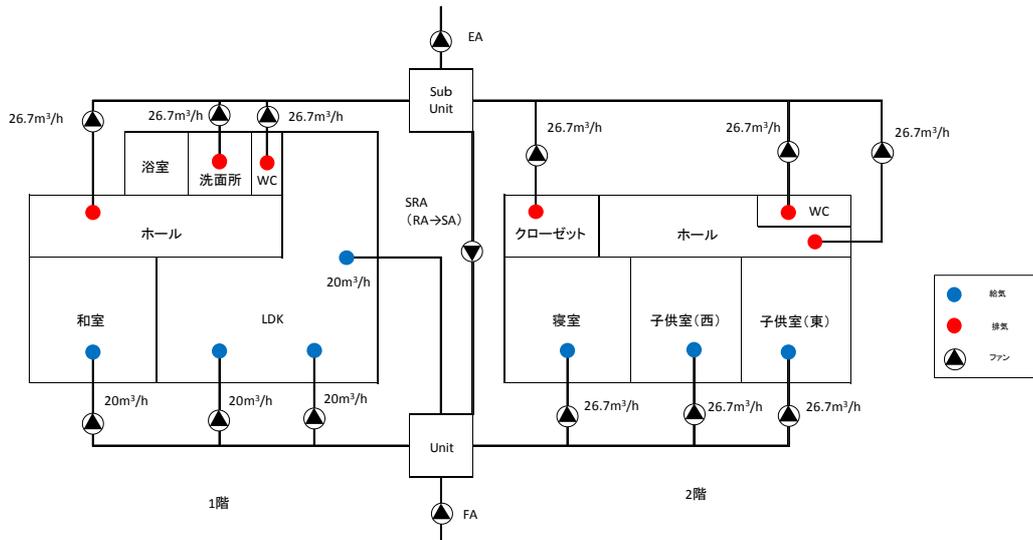


図 5-2 第一種換気 換気計画条件 (省エネルギー基準)

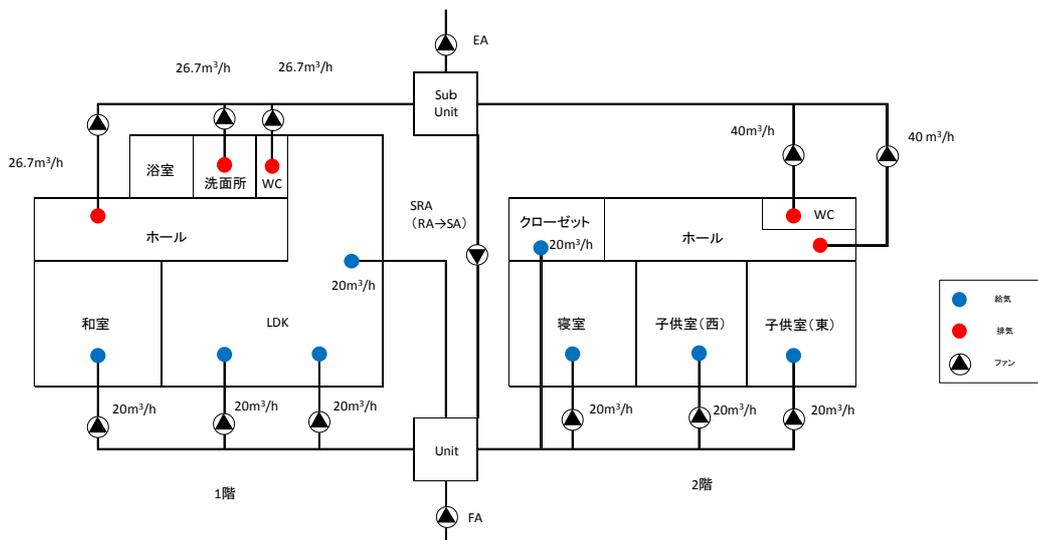


図 5-3 第一種換気 換気計画条件 (自立循環型住宅)

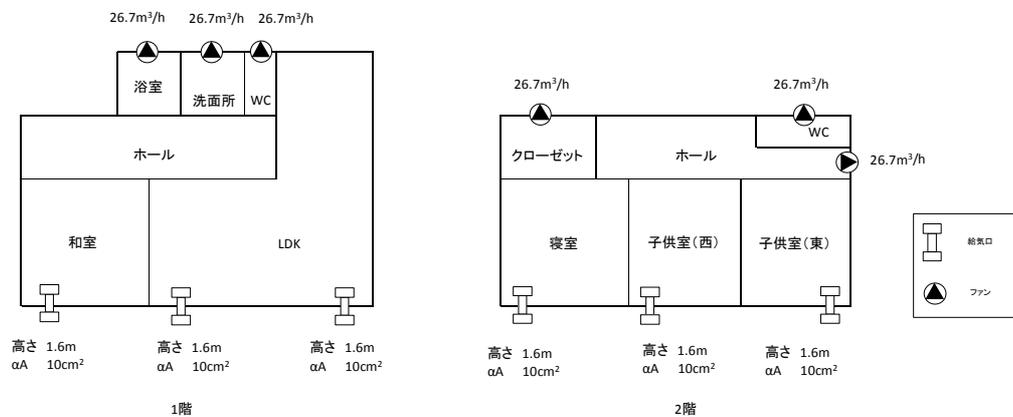


図 5-4 第三種換気 換気計画条件

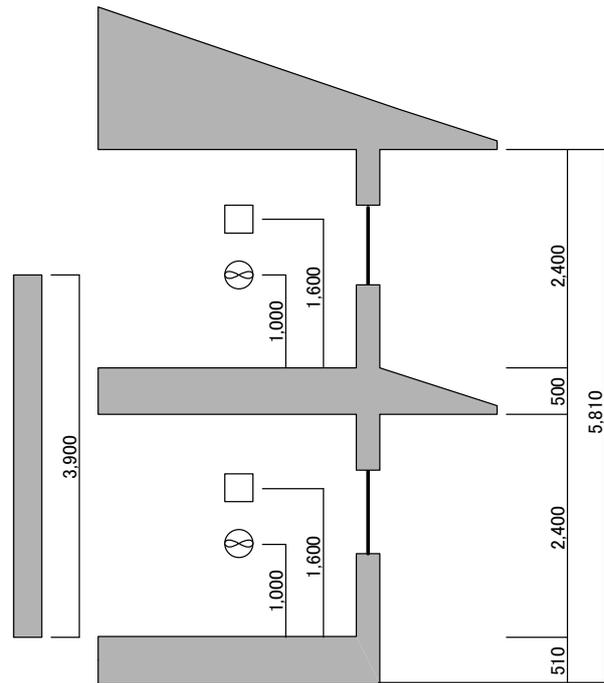


図 5-5 室空間および換気システムの端末部材の高さ

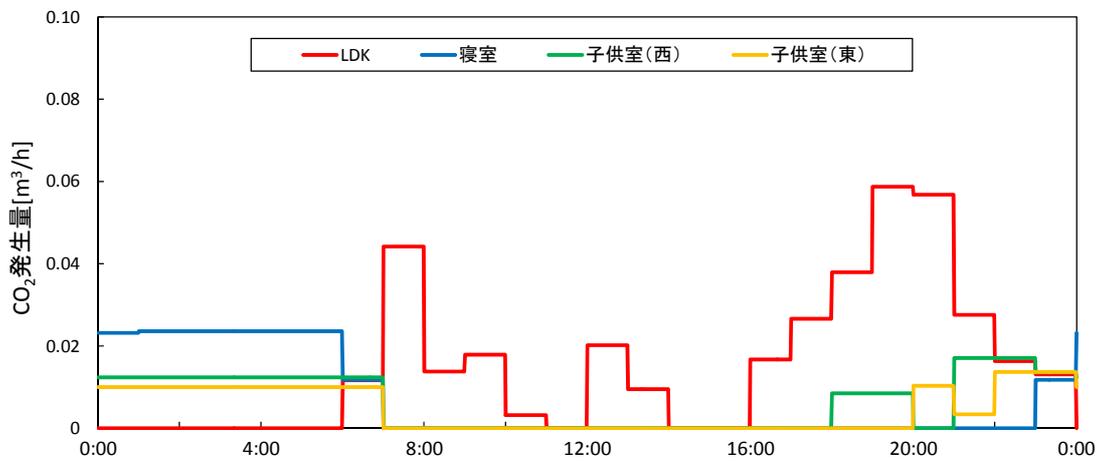


図 5-6 各居室のCO<sub>2</sub>発生量

### 5.4.2 計算結果および室内空気環境評価

本項では、風量が減少しない条件で検討を行った第三種換気システムと経時的な風量減少が起こることを想定した第一種熱交換換気システムの空気質の算出結果を示す。

#### (1) CO<sub>2</sub>濃度

計算条件のスケジュールに合わせた1日におけるCO<sub>2</sub>濃度の算出結果を第三種換気システムは図5-7に、第一種換気は性能値（清掃直後の値）、風量減少のパターンとしてはメーカーでメンテナンス間隔としてよく推奨されている4ヶ月後とメンテナンスをせずに長時間経過した状態として1年後の2パターンの算出結果をそれぞれ図5-8、5-9、5-10に示す。

性能値で比較した場合は、第三種換気よりも第一種換気の方が、基準値を超える割合が小さくなった。しかし、4ヶ月、1年後の算出結果から各部屋でのCO<sub>2</sub>濃度は上昇し、基準値の適合割合も減少しているため第一種換気が第三種換気より優れた空気質をつくるには定期的なメンテナンスが必要であることが示唆できる。

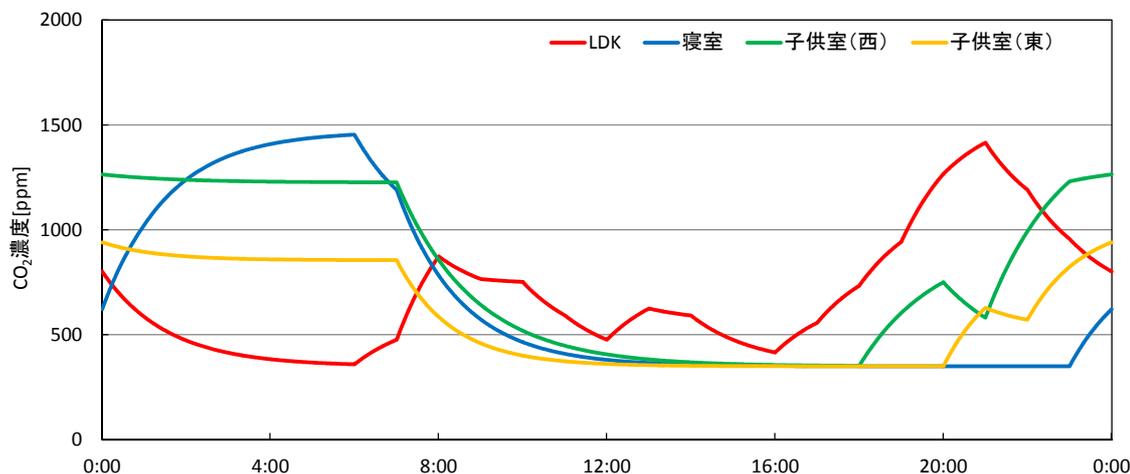


図5-7 第三種換気システム（性能値）によるCO<sub>2</sub>濃度

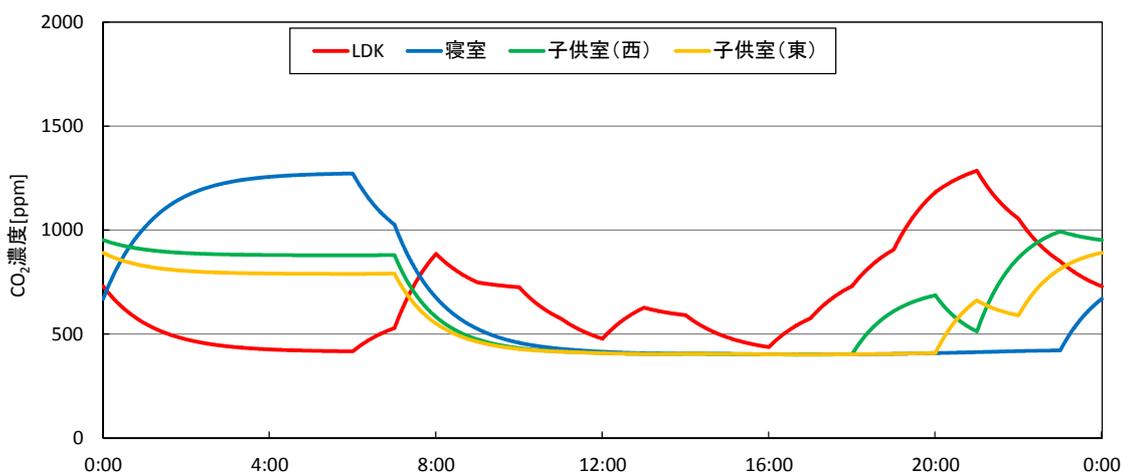


図5-8 第一種換気システム（性能値）によるCO<sub>2</sub>濃度

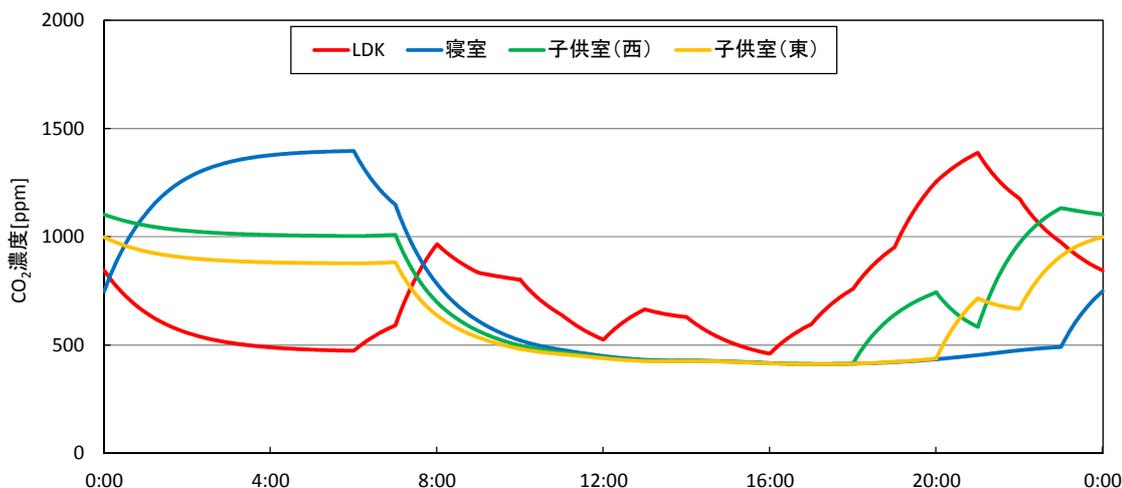


図 5-9 第一種換気システム (4ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

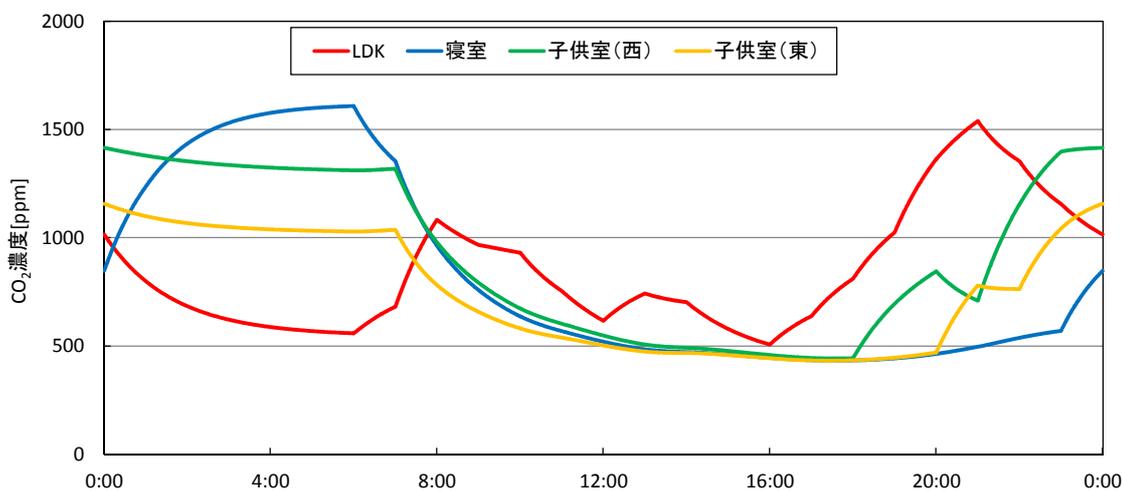


図 5-10 第一種換気システム (1年後) による CO<sub>2</sub> 濃度

(2) SRF

VentSim による CO<sub>2</sub> 濃度と室間空気流量の算出結果を用いて、CO<sub>2</sub> 濃度における許容濃度を 1000ppm としたときの SRF の算出することで空気質の評価を行った。しかし本章における空気環境評価の計算条件は非定常条件であるため、2.3.2 で示した式 (2-16) のままでは SRF の算出をすることができない。

$$SRF_i = S_i / P'_i = \frac{\sum_{j=0}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij}) - \max(0, \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^N Q_{ji})}{P_i - \sum_{j=1}^N \min(0, \alpha_j \cdot Q_{ij})} \quad (2-16)$$

そこで本研究では、田島が定常的な条件下での指標として定義された SRF に関する理論

や測定法を非定常状態に拡張した際の考え方やデータの取り扱い方を参考にし、SRF 値の算出を行った。<sup>[5-16]</sup>以下に、田島が定義したトレーサーガス濃度との関係による条件分けのもとでの非定常条件下における SRF 値の表現方法を示す。

非定常条件での SRF とトレーサーガス濃度との関係

$$\sigma_i \leq \sigma_c \Leftrightarrow \text{SRF}'_i = 1$$

i 室の一定発生法によるトレーサーガス濃度が許容濃度以下であれば i 室は設定した必要新鮮空気量に対して充足状態にあるとして  $\text{SRF}'_i = 1$  となる。

$$\sigma_i > \sigma_c \Leftrightarrow \text{SRF}'_i < 1$$

i 室のトレーサーガス濃度が許容濃度を上回っていれば充足状態にないため  $\text{SRF}'_i$  は 1 未満となる。

$$\sigma_i > \sigma_c \text{ かつ } \bar{\alpha}_i \Leftrightarrow \text{SRF}'_i = 0$$

i 室流入する空気に余剰新鮮空気量が認められない場合は  $\text{SRF}'_i = 0$  とする。

また、 $\text{SRF}' < 1$  かつ  $\text{SRF}' \neq 0$  である場合に  $\text{SRF}'$  値の算出法をまとめると以下のようになる。

$\text{SRF}' < 1$  かつ  $\text{SRF}' \neq 0$  である場合の  $\text{SRF}'$  値算出法

(1) 濃度の測定値  $\sigma_i$  を i 室におけるトレーサーガス濃度の変化量と流入および i 室内で発生するトレーサーガス総量の関係式である式(5-3)に代入し  $Q_{ij}$  を算出

$$V_i \frac{d\sigma_i}{dt} = q_i + \sum_{j=0}^N (\sigma_j - \sigma_i) Q_{ij} \quad (5-3)$$

(2) 濃度の測定値から式(2-12)より  $\alpha_i$  ( $\alpha_j$ ) を、式(2-25)から  $d_i$  を算出

$$\alpha \equiv 1 - \frac{\sigma}{\sigma_c} \quad (2-12)$$

$$d_i = \frac{\sigma_c}{\sigma_i} \quad (2-25)$$

(3)  $\alpha_j$ および $Q_{ij}$ を式(2-29)に代入し $\bar{\alpha}_i$ を算出

$$\bar{\alpha}_i = \frac{A_i + \sum_{j=1}^N \max(0, \alpha_j \cdot Q_{ij})}{A_i + \sum_{j=1}^N Q_{ij}} \quad (2-29)$$

(4)  $\bar{\alpha}_i$ および $d_i$ を式(2-31)に代入し $SRF'_i$ を得る

$$SRF'_i = d_i \cdot \frac{1}{d_i + (1 - d_i) \cdot \frac{1}{\bar{\alpha}_i}} \quad (2-31)$$

以上より、算出した第三種換気システム、第一種換気のパフォーマンス、4ヶ月後、1年後のそれぞれの結果を図5-11、5-12、5-13、5-14に示す。傾向は前項での結果と似ているが、SRFを用いることによってどの居室でどの時間に新鮮空气が不足していることが一目で分かるものとなっている。第一種換気に関しては、清掃から時間が経過するほど空気質がすべての居室で悪くなり、SRF値1.0を下回る居室が増えてくる結果となった。

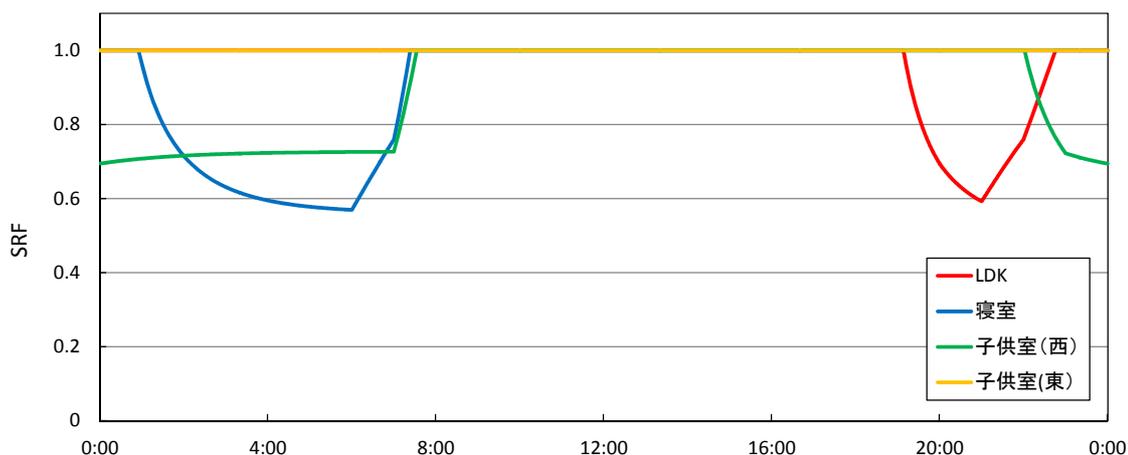


図5-11 第三種換気システム（性能値）によるSRF

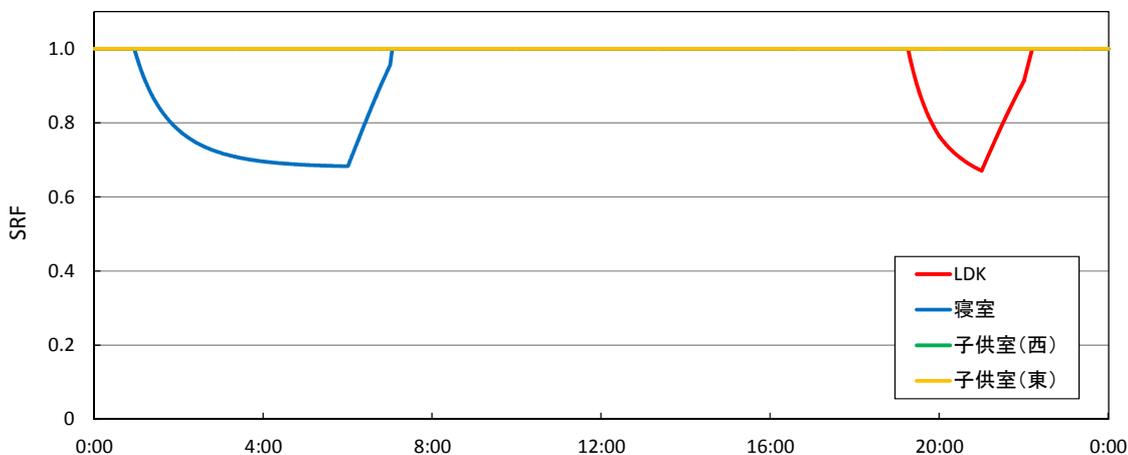


図5-12 第一種換気システム（性能値）によるSRF

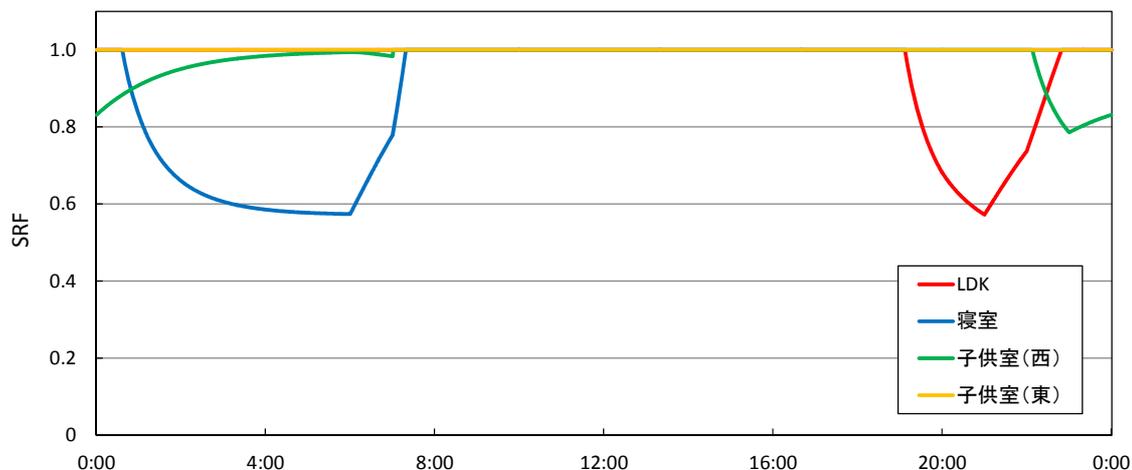


図 5-13 第一種換気システム（4ヶ月後）による SRF

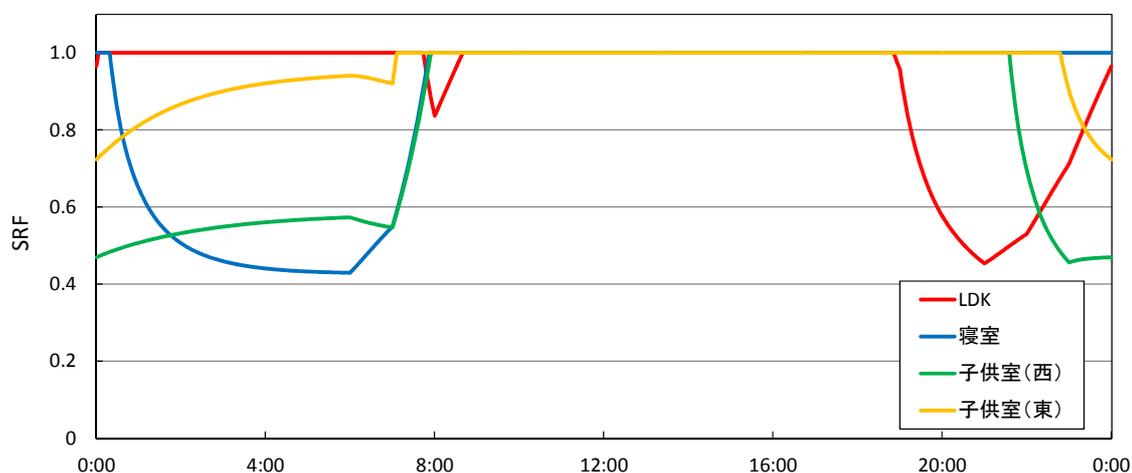


図 5-14 第一種換気システム（1年後）による SRF

### (3) OSRF

(2) に示した SRF 値は、単室において新鮮空気の充足度を表す指標として換気性能表  $k$  に用いることができるが、住宅は多数室で構成されているため本検討では、住宅内の居室に関する OSRF を算出することで住宅全体の空気環境評価を行った。本検討での OSRF は 1 分毎の SRF に対してその時在室者がいる居室の SRF のみで相乗平均をとることで算出できるものとしている。

算出した結果を第三種換気システムは図 5-15、第一種換気システムの性能値、4ヶ月後、1年後をそれぞれ図 5-16、5-17、5-18 に示す。また第一種換気システムの清掃から経過月と OSRF の日平均値、中央値、最小値の関係を図 5-19 に示す。

在室者がいる居室の空気質のみを評価対象としているため、家族 4 人が揃う 19 時 30 分から翌朝までの時間帯で OSRF 値が小さくなっており、睡眠時は通常よりも Met 値が低く CO<sub>2</sub>

呼出量が低いにもかかわらず時間経過とともに OSRF 値が低くなっている。1年後の条件では、およそ OSRF 値が 0.6 まで下がっており、睡眠時に自覚していない状態で劣悪な空気環境にさらされる危険性があることが考えられる。また図 5-19 では、清掃からの経過月が大きくなるほど空気質が悪くなることを示している。

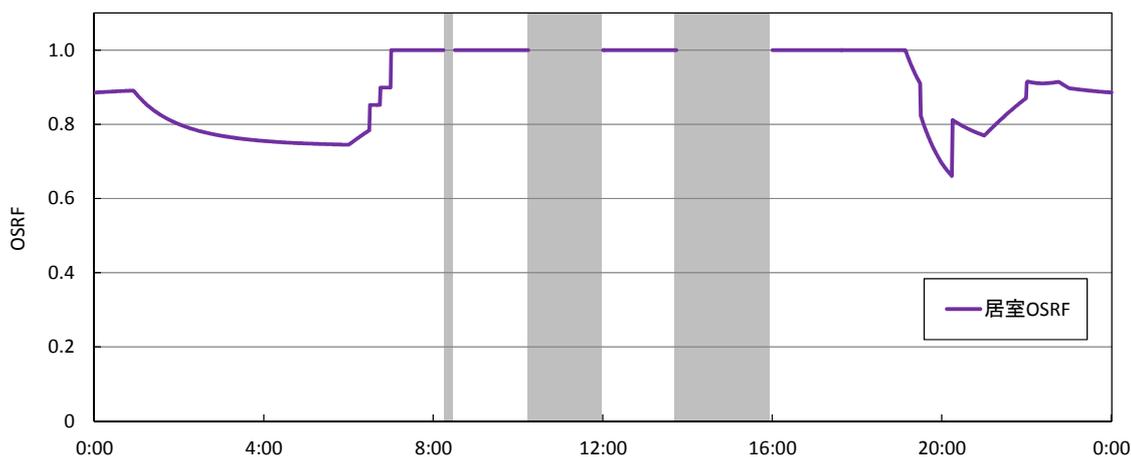


図 5-15 第三種換気システム（性能値）による OSRF

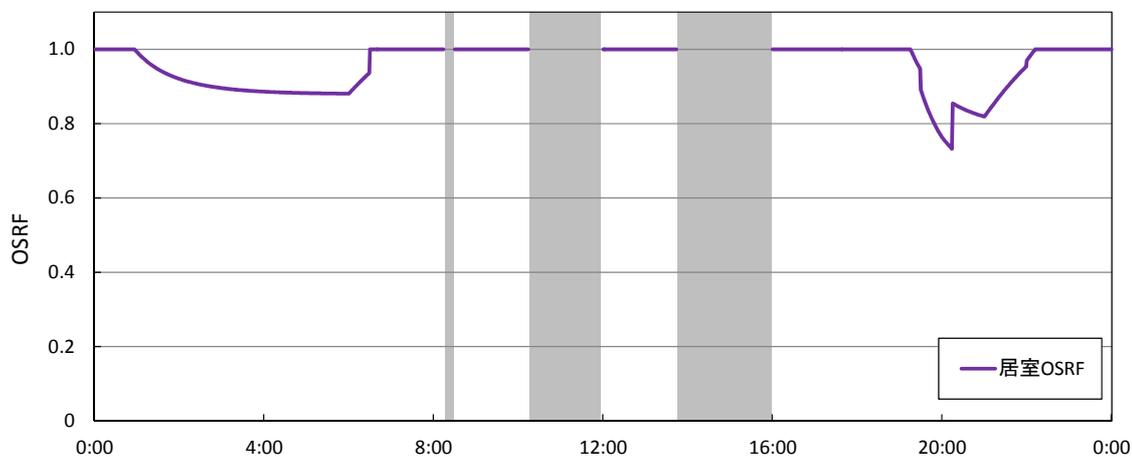


図 5-16 第一種換気システム（性能値）による OSRF

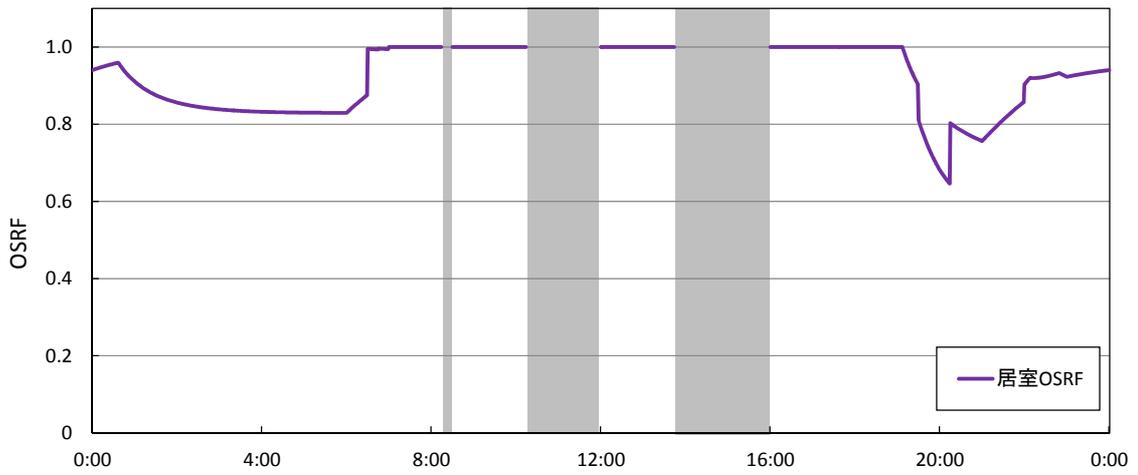


図 5-17 第一種換気システム（4ヶ月後）による OSRF

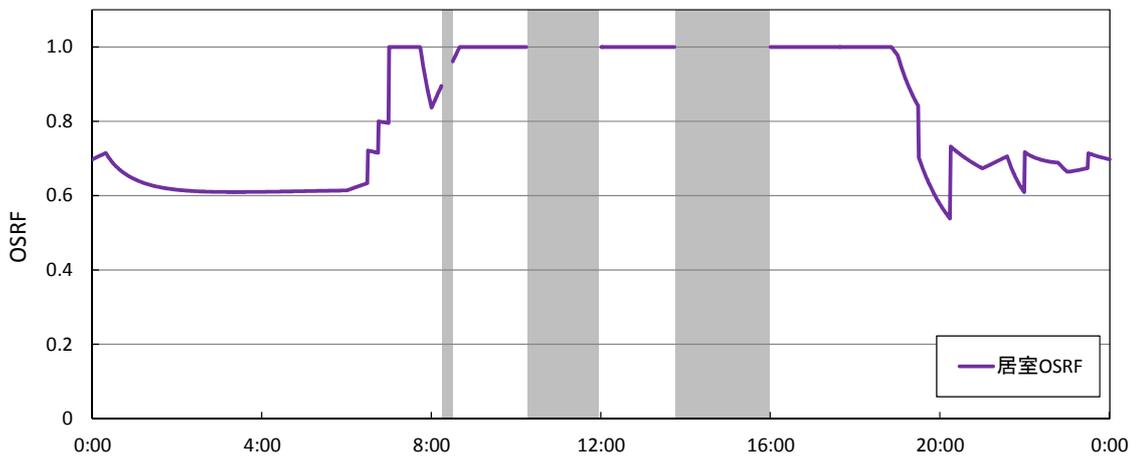


図 5-18 第一種換気システム（1年後）による OSRF

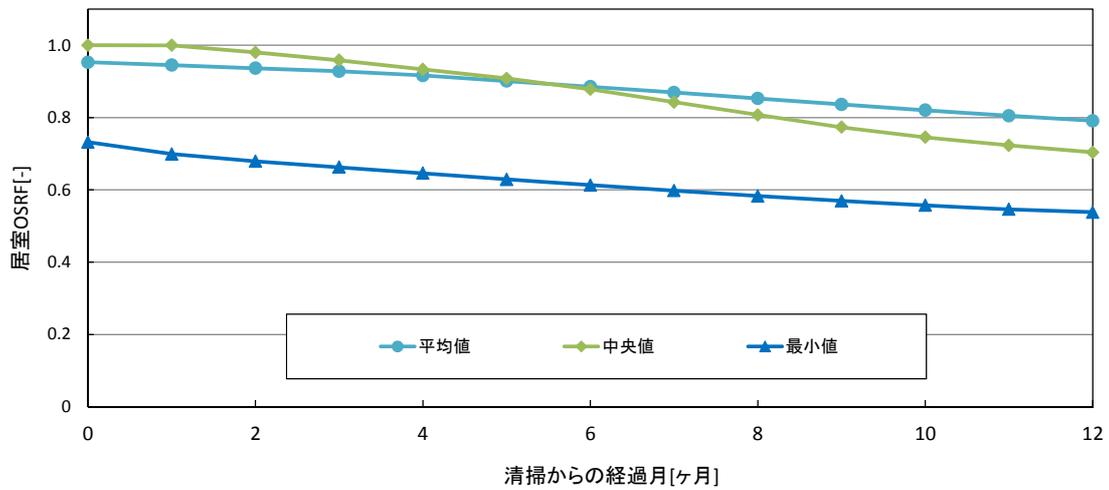


図 5-19 第一種換気システムの清掃からの経過月と OSRF の関係

#### (4) 不足新鮮空気量

SRF 指標は、必要新鮮空気が充足しているか非充足であるかの判断に使用でき、不足している場合に式 (5-4) により、不足する新鮮空気量を算出することができる。本検討では、空気質の悪さだけでなく換気システムに風量減少が起きた場合の新鮮空気の非充足状態を把握するために不足新鮮空気量の算出を行った。

$$Q_{Li} = (1 - SRF_i) \cdot P_i' \quad (5-4)$$

ここで

$Q_{Li}$  : i 室の不足する新鮮空気量[m<sup>3</sup>/h]

$P_i'$  : i 室の実質必要新鮮空気量[m<sup>3</sup>/h]

算出した不足新鮮空気量の結果を、第三種換気システムは図 5-20、第一種換気は性能値、4 ヶ月後、1 年後をそれぞれ図 5-21、5-22、5-23 に示す。また換気システムの清掃から経過月と各居室における 1 日で不足する新鮮空気量の積算値を算出したものを図 5-23 に示す。

全体の傾向として、1 日の流れでは在室者が多くなると不足する新鮮空気量が増加しており、これまでの評価指標と共通して清掃から時間がたつほど風量減少し、新鮮空気の不足が増加していくことが確認できる。

また図 5-24、5-25 により子供室（西）の日不足新鮮空気量が他の居室と比較して経過月に対し増加する割合が高く、換気システムの風量減少により住宅内の換気における空気流動が変化することが示唆できる。

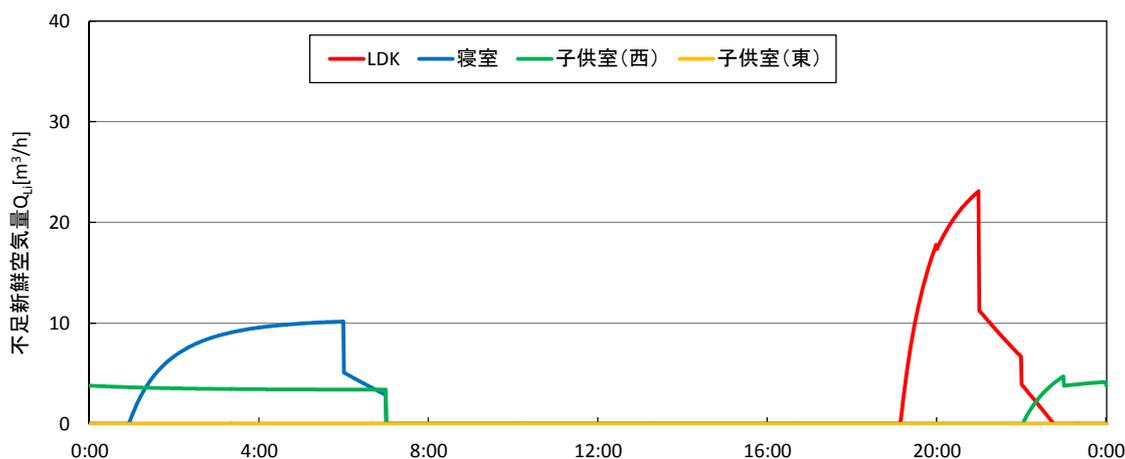


図 5-20 第三種換気システム（性能値）における不足新鮮空気量の変化

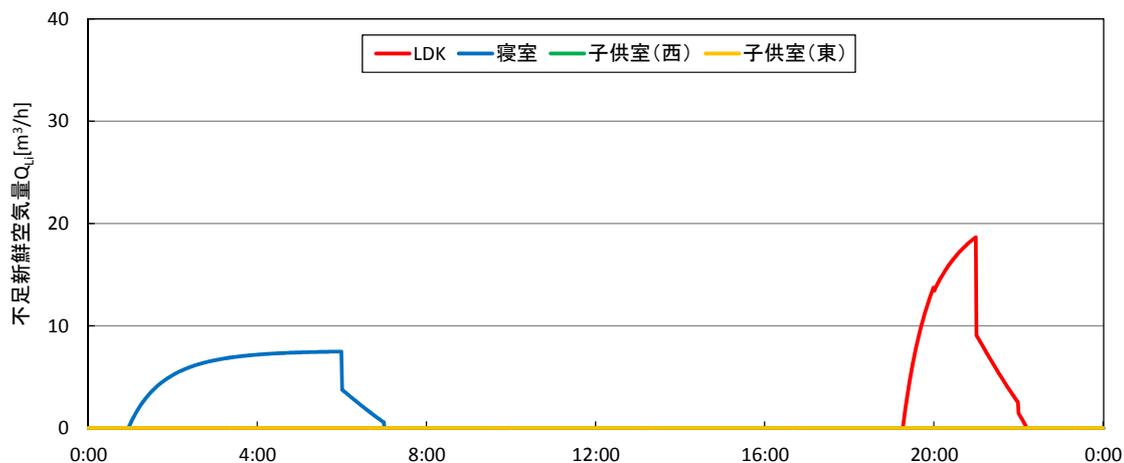


図 5-21 第一種換気システム（性能値）における不足新鮮空気量の変化

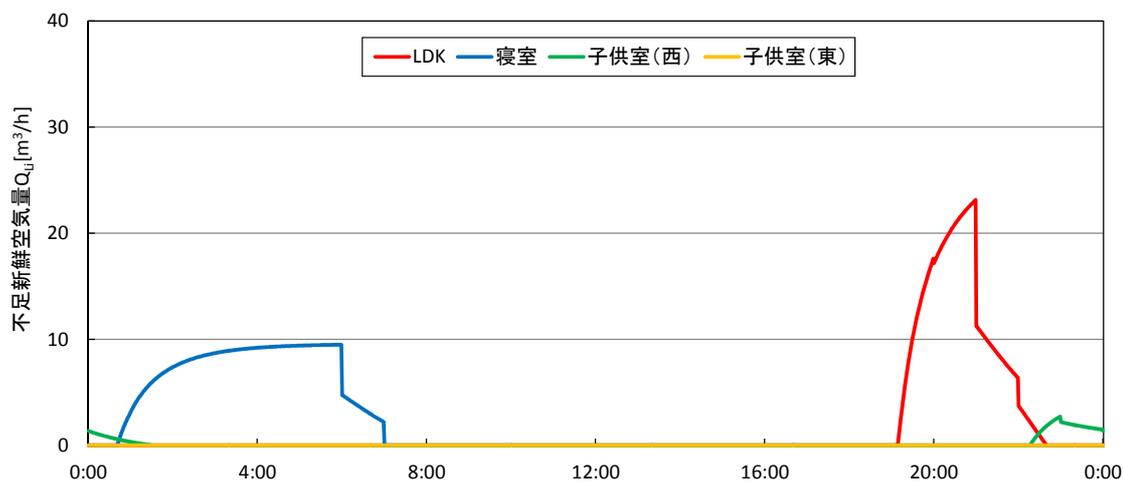


図 5-22 第一種換気システム（4ヶ月後）における不足新鮮空気量の変化

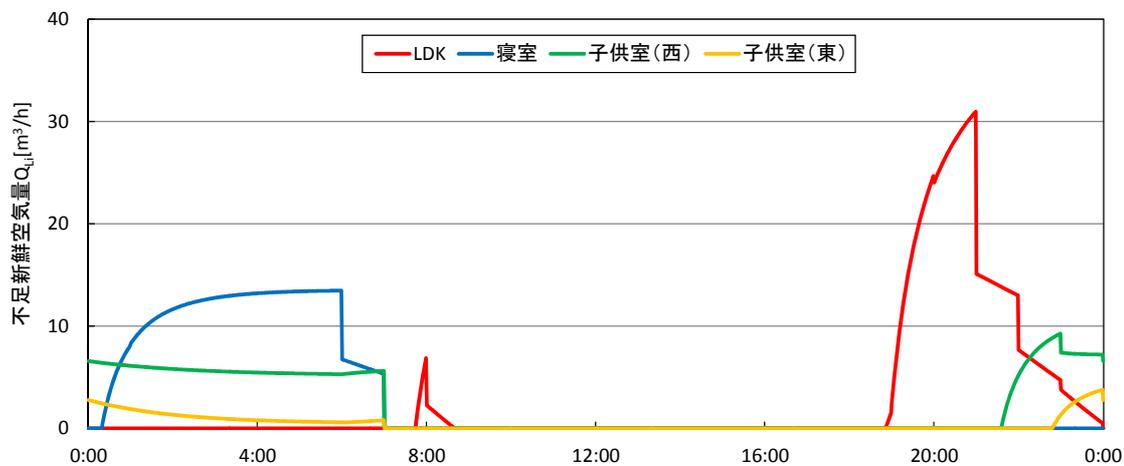


図 5-23 第一種換気システム（1年後）における不足新鮮空気量の変化

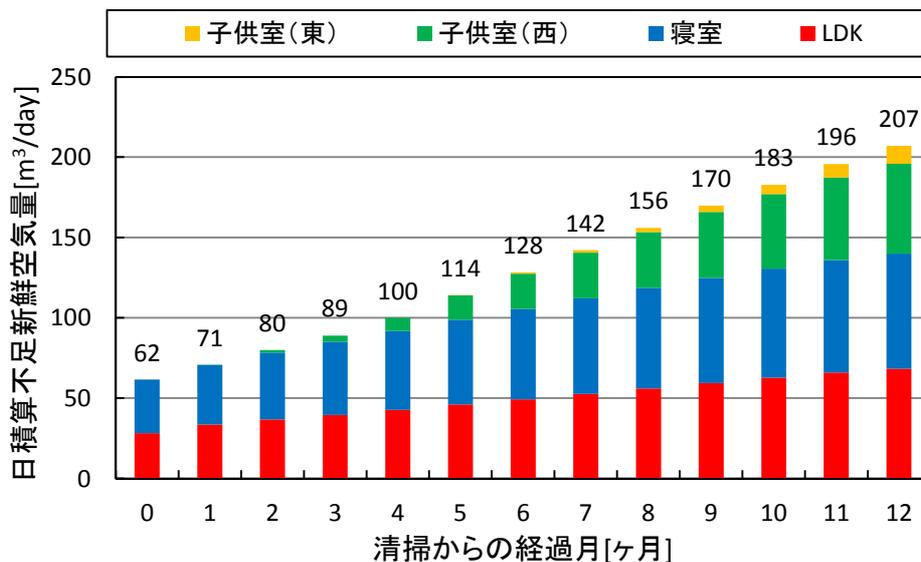


図 5-24 第一種換気システムの清掃からの経過月と住宅全体の日積算不足新鮮空気量と内訳の関係

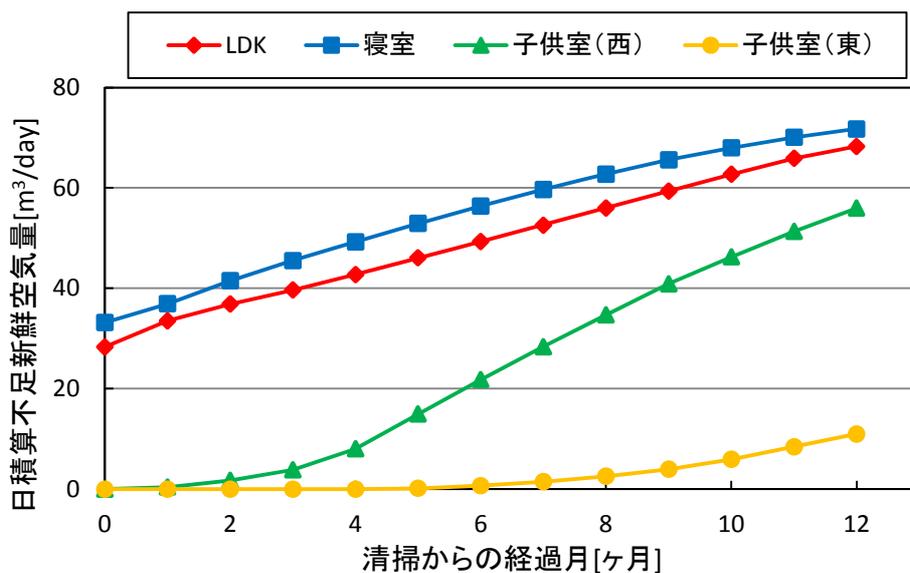


図 5-25 第一種換気システムの清掃からの経過月と各居室の日積算不足新鮮空気量の関係

### 5.5 おわりに

本章では、換気システムがメンテナンス不足により風量減少している状態が住宅の空気環境に与える影響を把握することを目的に、第 3 章で作成した風量減少モデルを使用し、さらには人間の呼気から発せられる CO<sub>2</sub> を評価指標とすることでより実状に近い形を想定した空気質を、換気回路網を用いたシミュレーションにより算出した。

また人間の呼気を住宅内で標準的なスケジュールで発生させる条件を設定するために、省エネルギー基準などでエネルギー算定の際に使用されている、家族構成及び生活スケジュールの設定を用い、CO<sub>2</sub> の発生量の増減に関する行動における活動量を示す Met 値については、被験者による呼気収集実験を主な手法として設定を行った。

本章の検討により得られた空気環境評価に関して、OSRF に基づいてまとめたグラフを図 5-26 に示す。これは風量減少が起きないと仮定した第三種換気システムと清掃などのメンテナンスが不足すると経時的に風量が減少していく第一種換気のそれぞれで算出された 24 時間における OSRF の平均値を清掃からの経過月を横軸として表したものである。0 ヶ月目である性能値で比較した場合、第一種換気は第三種換気よりも空気の流れを制御しているため OSRF 値も 1.0 に近く、空気質に関して優れているといえる。しかし、清掃から時間が経過するほど第一種換気は風量が減少していくため、OSRF 値も小さくなり空気質が低下していくことが分かる。そして 6 ヶ月目には第三種換気の OSRF 値 0.89 を下回るようになる。このことから第一種換気を良好な空気環境の形成を目的に使用する際は、少なくとも半年に 1 度はメンテナンスを行う必要があることが分かり、換気に関して知識や関心が低い居住者に関しては第三種換気を用いた方が安定した空気環境を提供できるといえる結果となった。

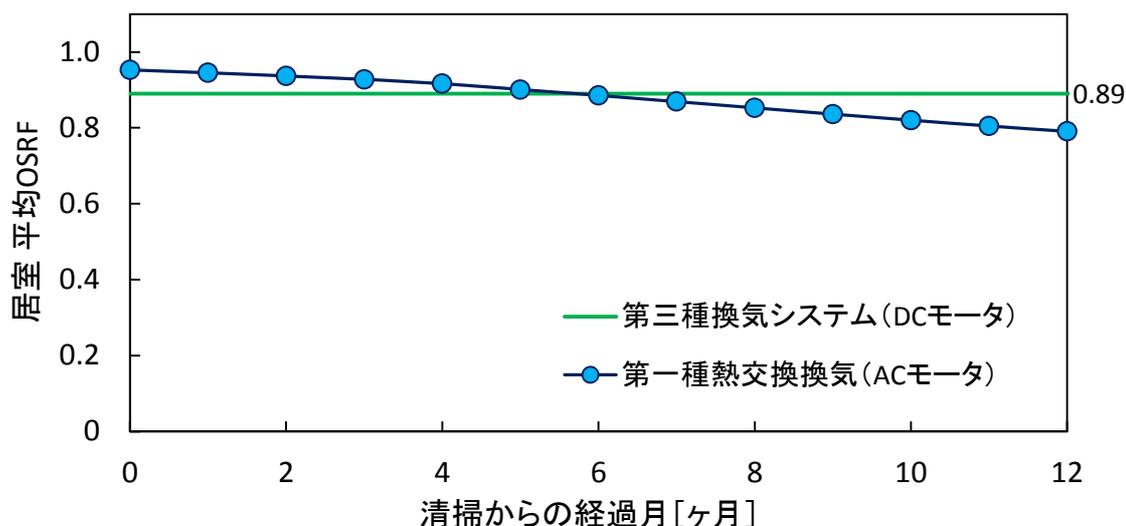


図 5-26 清掃からの経過月と居室 OSRF の関係

## 第5章 引用・参考文献

- [5-1] 社団法人 空気調和・衛生工学会：SHASE-S 102-2011 換気規準・同解説 Ventilati on Reuirements for Acceptable , SHASE-S Standard, pp7-10, 2012.2
- [5-2] 田島昌樹 井上貴之 大西裕治：換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定, 日本建築学会環境系論文集 第81巻 第728号, pp.885-892, 2016.10
- [5-3] 国土交通省国土技術政策総合研究所 独立行政法人 建築研究所:平成25年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 II住宅, 2013.5
- [5-4] 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅事業建築主の判断基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説, 2009
- [5-5] 総務省統計局：政府統計の窓口(e-Start), <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do>, 2017.5.15取得
- [5-6] 中江悟司 田中茂穂 宮地元彦：改訂版『身体活動のメッツ (METs) 表』, 国立健康・栄養研究所, 2012.4
- [5-7] 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧 (第14版) 1基礎編, p.330, 2010.2
- [5-8] ASHRAE：ASHRAE HANDBOOK FANDAMENTALS, 9.6, 2013
- [5-9] 嶋田祐典 依光剛志 大西裕治 田島昌樹：人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その7 Met 値推定の精度向上, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国), 日本建築学会, pp701-702, 2017.8
- [5-10] 依光剛志 嶋田祐典 大西裕治 田島昌樹：人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その8 Met 値推定手法とCO<sub>2</sub>呼出量算定の精度向上, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国), 日本建築学会, pp703-704, 2017.8
- [5-11] 依光剛志 嶋田祐典 大西裕治 田島昌樹：人間の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を利用した居室の換気性能評価：その9 換気室のCO<sub>2</sub>濃度推定精度の検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国), 日本建築学会, pp705-706, 2017.8
- [5-12] 嶋田祐典 依光剛志 田島昌樹：住宅のCO<sub>2</sub>濃度計算に使用する居住者のCO<sub>2</sub>呼出量の推定, 空気調和・衛生工学大会学術講演論文集 (高知), 2017.9
- [5-13] J. ARTHUR HARRIS, FRANCIS G. BENEDIT: A BIOMETRIC STUDY OF HUMAN BASAL METABOLISM, National Academy of Sciences Vol.4, No.12, pp370-373, 1918.12
- [5-14] Compendium of Physical Activities, <https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/>, 2018.1.16取得
- [5-15] 社団法人 プレハブ建築協会 性能認定分科会：換気回路網シミュレーション2.1.6, 2014.10
- [5-16] 田島昌樹：必要新鮮空気量の充足度による多数室系の換気性能評価手法に関する研究, 博士論文, 2004.1

## 第6章

### 住宅用換気システムの省エネルギー評価



## 第6章：住宅用換気システムの省エネルギー評価

### 6.1 はじめに

現在、住宅における平成28年省エネルギー基準では、換気システムを含む設備を評価する基準として「一次エネルギー消費量」が用いられており、設計段階で算定される一次エネルギー消費量が基準一次エネルギー消費量を下回ることが求められる。

設備機器の運転に要するエネルギーは、運転時間が長いものほど大きくなると考えられ、通常、住宅用の機械換気システムは連続稼働して使用されるため、設備の選択や設計の良し悪しにより、空気質を維持のに効率的にエネルギー活用することもできれば、逆にエネルギーの浪費を招く可能性もある。そのため、設計段階で導入する換気システムのエネルギー効率やその特性を把握しておくことは重要である。また換気システムのエネルギー効率は、 $1\text{m}^3/\text{h}$ の空気を搬送するのに必要な消費電力を表している比消費電力（SFP: Specific Fan Power）が用いられる。最近では省エネルギー基準などの影響もあり、DCモータを採用した高効率機器の開発やダクト径が75mm以上のものを使うことが主流となっており、換気においても省エネルギーに関する意識は高まりつつある。しかし、これらはすべて設計段階での話であるため、機器本来の性能値のみしか判断に使われず、例えば何らかの要因で風量が減少した場合などの運用時におけるエネルギー効率などには考慮されていない。そのため、運用時の性能低下も含めた機器の選択ができるような省エネルギー評価が必要とされる。

また、近年の高断熱・高气密化により住宅での外皮による熱損失が減少したため、暖房負荷における換気負荷の割合が高まっており、熱交換機能を持つ第一種換気システムの採用が外気負荷を削減する手法として有力であるとされている。しかし、熱交換素子や採用に伴うダクトなどの存在は、圧力損失を増加させるため換気に係る動力（消費電力）は大きくなりやすいので、気象条件や暖房の使用時間や暖房対象となる室空間の範囲を考慮することや稼働動力を削減するバイパス運転などの工夫が第一種熱交換型換気には必要とされる。このように換気に関して省エネルギーを検討するには暖冷房負荷となる換気負荷も考えなければ住宅全体のエネルギー削減には繋がらないとされる。

### 6.2 省エネルギー評価方法の概要

本章では、前節で述べたように運用時の性能低下も含めた省エネルギー評価を行うことを目的として検討を行う。まずは、省エネルギー基準で定められている各全般換気設備の種類における基本となる比消費電力(表6-1)やそれに対する省エネルギー対策の効果率(表6-2)を各換気方式における機種別の比消費電力の性能値として参考<sup>[6-1]</sup>にし、第3章で作成した換気システムのメンテナンス不足が要因とされる風量減少モデルとともに実住宅等に

における換気システムの消費電力の実測結果や特定の機種仕様値<sup>[6-2]</sup>を用いることでメンテナンスを行わなかった場合の比消費電力モデルの作成をし、清掃後からの経過月に対して比消費電力の上昇具合をみることで省エネルギー評価を行い、各機種のメンテナンスの必要性について言及する。

次に、換気システムの省エネルギーと切り離すことができない関係である暖冷房負荷について各換気システムの暖冷房に対する換気負荷も含んだ年間一次エネルギー消費量をシミュレーションにより算出し、評価を行う。ただし、換気における暖冷房負荷の検討は既往の研究でも多く行われているため、本研究では風量減少時の第一種熱交換換気システムにおける熱交換効率を中心に検討を行う。

表 6-1 基本となる消費電力

全般換気設備の種類	基本となる比消費電力
ダクト式第一種換気設備（熱交換型換気設備）	0.70
ダクト式第一種換気設備	0.50
ダクト式第二種換気設備又はダクト式第三種換気設備	0.40

表 6-2 省エネルギー対策の効果率\*

	ダクトの内径	電動機の種類	効果率
ダクト式第一種換気設備	内径 75mm 以上のダクトのみ使用	直流	0.455
		交流、又は直流と交流の併用	0.700
	上記以外	直流あるいは交流	1.000
ダクト式第二種換気設備 又は ダクト式第三種換気設備	内径 75mm 以上のダクトのみ使用	直流	0.360
		交流、又は直流と交流の併用	0.600
	上記以外	直流あるいは交流	1.000

\*表 6-1 の基本となる消費電力に、表 6-2 に示す省エネルギー対策の効果率を乗じて比消費電力を求めることとする。

### 6.3 比消費電力のモデル化による省エネルギー評価

ここでは、第 3 章で作成した風量減少に伴う比消費電力の変化についてダクト式第一種熱交換型換気とダクト式第三種換気のそれぞれ AC、DC モータごとに行った検討や作成したモデルを示す。

またモデルを作る際の換気システムの条件は以下の通りとしている。

換気量 : 160[m<sup>3</sup>/h]

比消費電力 : 省エネルギー基準の基本となる消費電力に省エネルギー対策の効果率を乗じた値

### 6.3.1 ダクト式第一種熱交換型換気システム（AC モーター）

通常、AC モーターを採用している換気システムは風量の変化に対して消費電力の変化は少なく、風量が減少するほど消費電力も小さくなる。そのため、本検討では消費電力は設定性能から変化しない過程で検討を行う。これは比消費電力に換算した時に実際の消費電力よりも安全側に（非消費電力が大きく）計算されるため他の換気システムと比較しても優位に評価されないため問題ないとする。

検討条件は、換気システムの風量が 160[m<sup>3</sup>/h]であり、ダクト式第一種熱交換型換気（AC モーター）であるので比消費電力は 0.7[W/(m<sup>3</sup>/h)]と設定できるため、性能値における消費電力は  $0.7[W/(m^3/h)] \times 160[m^3/h] = 112[W]$ となる。これは、消費電力を 112[W]を一定とし、3.3.3 の図 3-11 で示した第一種熱交換型換気システム（AC モーター）の給気に関する風量減少モデルを用いて SA 風量に基づく比消費電力 SFP と SA 風量の有効換気量に基づく SFP<sub>E</sub>を算出した。同様に作成したダクト式第一種換気（AC モーター）と合わせて作成した比消費電力と清掃からの経過月の関係を図 6-1 に示す。また図には省エネルギー基準で基準一次エネルギー消費量を算定する際に用いられた比消費電力 0.3 の値を比較として載せている。

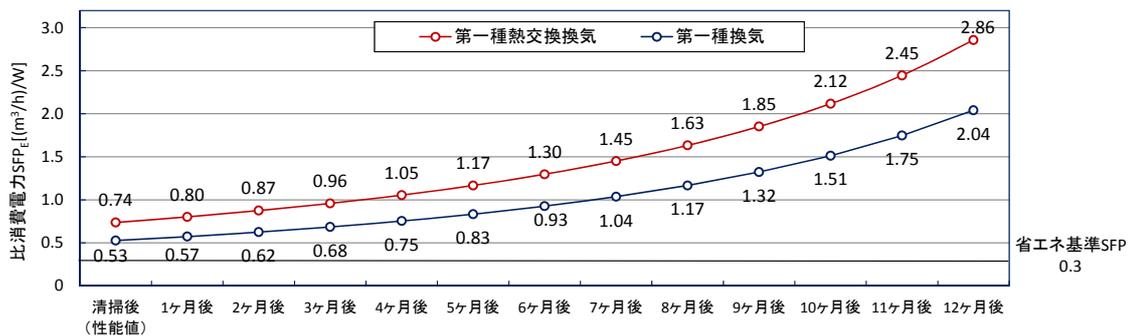


図 6-1 ダクト式第一種換気システム（AC モーター）の比消費電力モデル

図 6-2 は、図 6-1 の位置の結果に基づき、使用される消費電力とそれに対して実質的に給気に供している電力を算出したものを示している。実質的に給気に供している電力は性能値の SFP に対して、減少した風量を乗ずることで算出している。青色で示す消費電力に対して、緑色の実質的に給気に供している電力が多くなるほどエネルギー効率が低下すると考えられ、清掃後から時間が経過するほど効率が低下していくのが分かる。

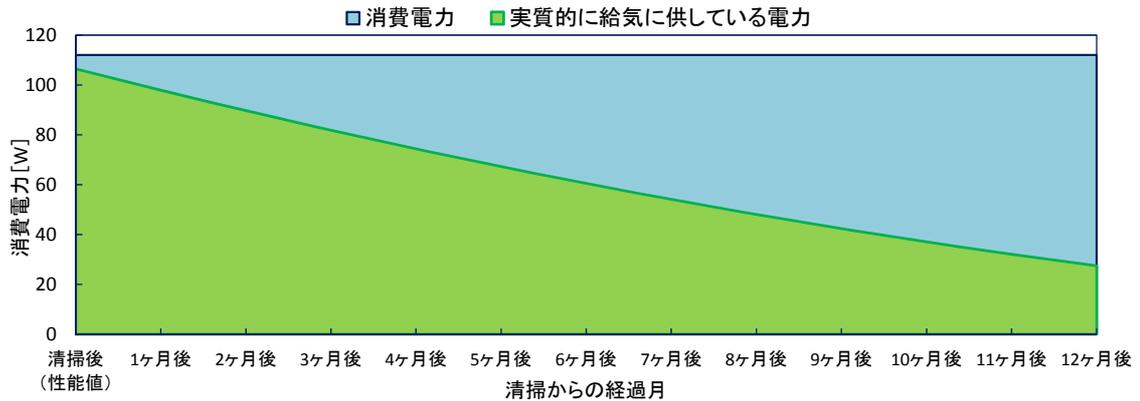


図 6-2 消費電力と実質的に給気に供している電力  
(ダクト式第一種熱交換型換気 (AC モーター))

### 6.3.2 ダクト式第三種換気システム (AC モーター)

ダクト式第三種換気 (AC モーター) の比消費電力の変動モデルは、3.3.2、3.3.3 で述べたダクト式三種換気 (AC モーター) を導入している実住宅での清掃前後の風量と消費電力の測定結果により作成した、

AC モーターであることから比消費電力のモデル化は、前述のダクト式第一種熱交換型換気 (AC モーター) と同様の考え方で行っている。

比消費電力の変動モデルとして作成したダクト式第三種換気 (AC モーター) の比消費電力と清掃からの経過月の関係を図 6-3 に示す。第三種換気は、ダクト内やファン付近にフィルターを有していない機種の実測結果を用いていることもあり、風量減少がほとんどないため算出されたモデルにおいて比消費電力の変化は1年の範囲では見られなかった。

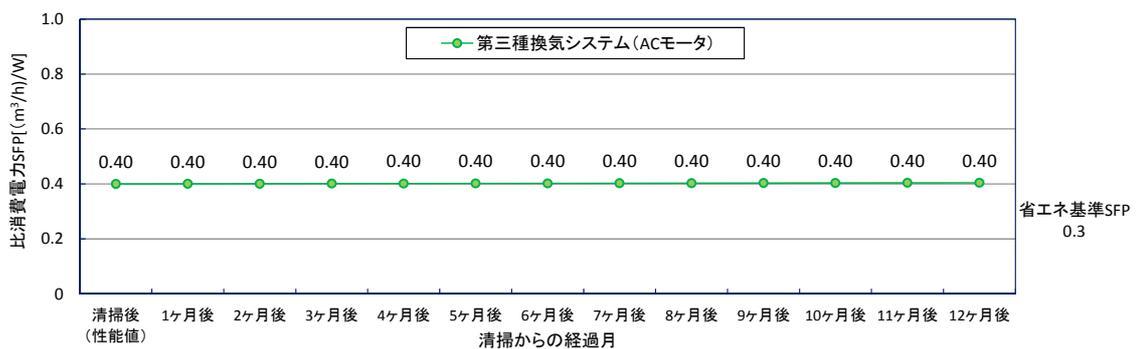


図 6-3 ダクト式第三種換気システム (AC モーター) の比消費電力モデル

### 6.3.3 ダクト式第三種換気システム (DC モータ)

DC モータを採用している換気システムは、一定の機外静圧範囲において定風量制御ができ、その範囲内では静圧が大きくなるほど消費電力も増加するという特徴を持っている。

今回作成するモデルの消費電力特性に関しては、3.3.3 (4) 仕様値と測定データを用いた検討において参考とした機種種の消費電力特性図（静圧と消費電力の関係を示したグラフ）を用いて検討を行う。この消費電力特性図は3種類の直線からなり、1種が定風量制御時に機外静圧の上昇時における消費電力の増加傾向を表す傾きであり、残りの2種は定風量制御が可能な静圧の範囲を超えたときに静圧の増加に反し消費電力が減少する特性を表している傾きである。ある静圧点で風量の減少率が変化するため、静圧に対し消費電力が小さくなる傾きが2種類存在する。その消費電力の特性について仕様値をそのまま用いずに、モデル条件に合した換算を行っている。換算方法は設定風量が160m<sup>3</sup>/h、パイプ抵抗曲線20mの圧力損失を設計条件とし、ファン能力を表す曲線とパイプ抵抗曲線が交わる静圧時の消費電力を省エネルギー基準で基準とする比消費電力の値を用いて得られる消費電力に置き換え、機外静圧0Paとその点の回帰直線を引くことで定風量制御における消費電力の傾きを算出した。また定風量制御を越えた静圧範囲に関しては、仕様書に記載されている消費電力の傾きの境界点間で消費電力の減少割合を求め、それ作成するモデルの各境界点における消費電力に乗ずることで算出する。作成したダクト式第三種換気 (DC モータ) の消費電力特性図を図6-4に示す。なお、作成したダクト式第三種換気 (DC モータ) の消費電力特性をモデル値、参考とした機種種の仕様書に示されていた消費電力特性を仕様値として表している。

しかし、前項で検討したダクト式第三種換気 (AC モータ) の風量減少モデルではごく僅かと想定している点から機外静圧の変化も同じくほとんど起こらなく、比消費電力の変化も起こらないものとして考える。以上の検討より作成した比消費電力のモデルを図6-5に示す。

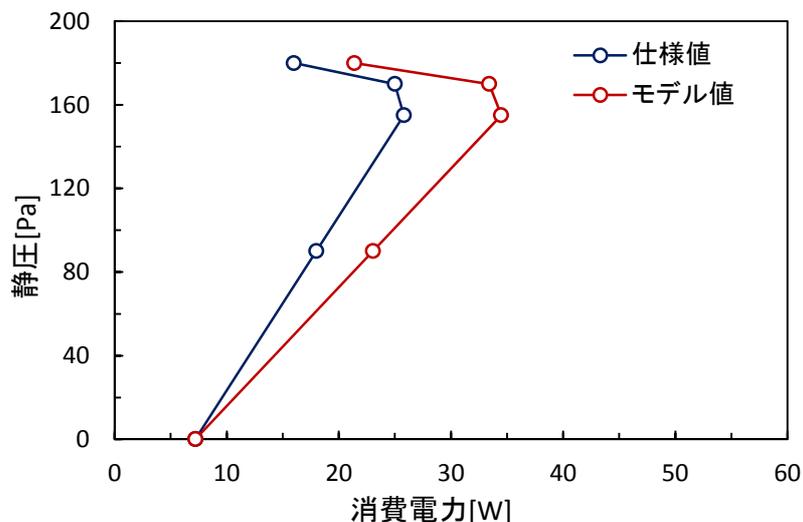


図6-4 ダクト式第三種換気 (DC モータ) の消費電力特性図

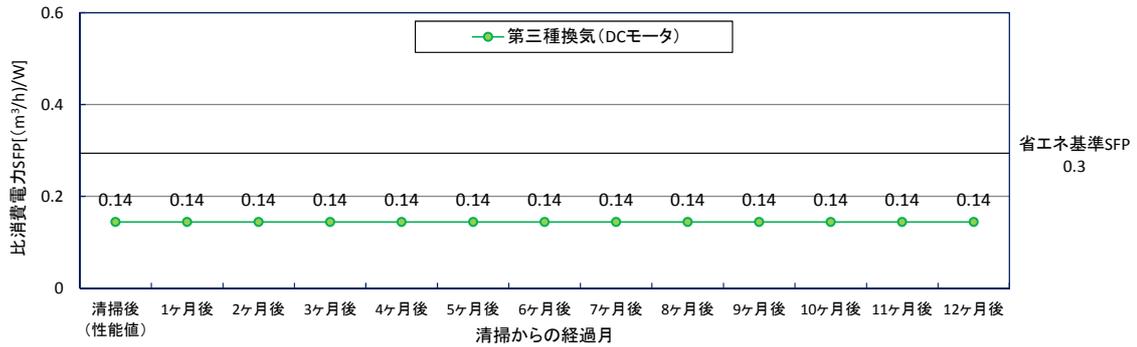


図 6-5 デクト式第三種換気システム (DC モータ) の比消費電力モデル

### 6.3.4 デクト式第一種熱交換型換気システム (DC モータ)

3.3.3(4)仕様値と測定データを用いた検討でも述べたように、ダクト式第一種熱交換型換気システム (DC モータ) について仕様書から入手できる情報に消費電力特性が含まれていなかったためダクト式第三種換気システム (DC モータ) の仕様書に基づき前項での検討と同様の方法でダクト式第一種熱交換型換気システム (DC モータ) 相当の消費電力特性に変換した。作成した消費電力特性図を図 6-6 に示す。

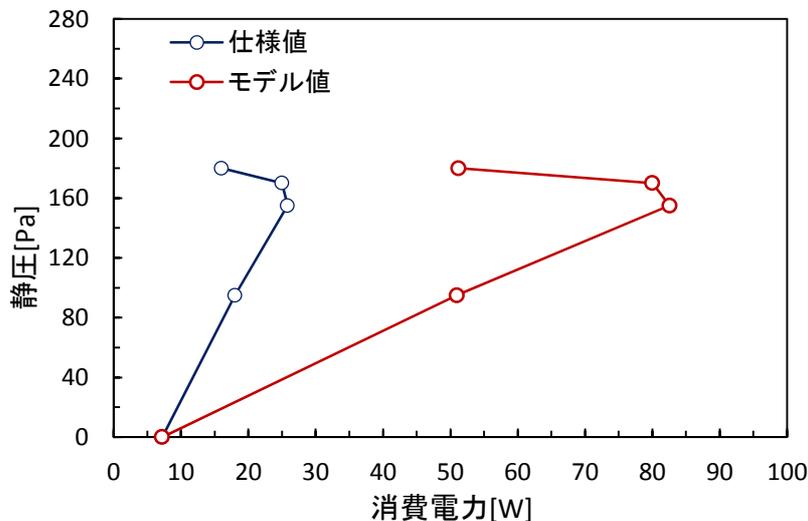


図 6-6 デクト式第一種換気 (DC モータ) の消費電力モデル

図 6-6 の消費電力特性と図 3-18 に示した風量減少モデルを用いることで、作成した比消費電力モデルを図 6-7 に示す。

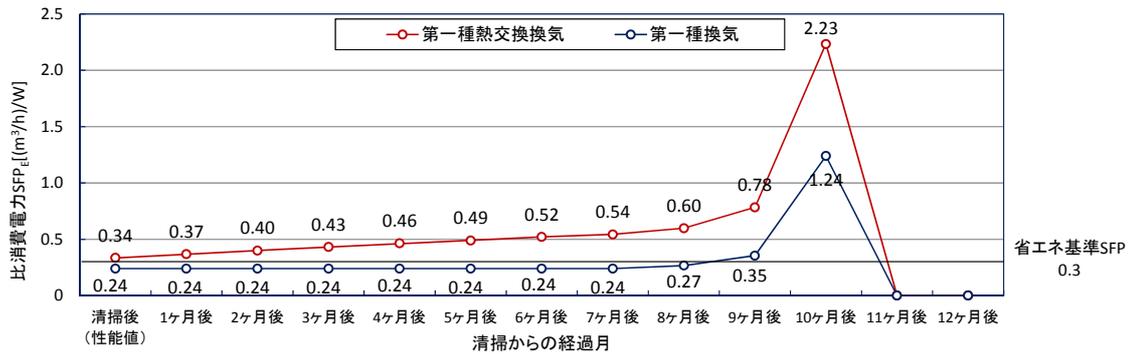


図 6-7 ダクト式第一種換気システム (DC モータ) の比消費電力モデル

### 6.3.5 比消費電力のモデル化による省エネルギー評価

本節では、住宅におけるダクト式全般換気システムとして主に使われている第一種熱交換型換気システムと第三種換気を対象にメンテナンス不足が原因とされる風量減少に伴う換気システムのエネルギー効率指標である比消費電力の変化について検討を行った。

比消費電力のモデル作成により、第三種換気システムが比消費電力の値は小さく、経時的な変化もほとんどみられないのに対し、第一種熱交換型換気は比消費電力の値自体も第三種換気と比べ大きく、風量減少による比消費電力の増加が起りやすい結果となった。また、換気システムをさらにモータ種別で分類した場合、最も省エネルギー性が高いと判断できるのは、第三種換気システム (DC モータ) であり、清掃から長時間経過しても定風量制御の範囲で圧力損失の変化が収まるため風量減少がなく、消費電力も測定値に基づき分析した結果ほとんど変化しないため、省エネルギー基準の基準一次エネルギー消費量の算定に用いられる比消費電力 3.0 の半分を下回る 0.14 という非常に小さい値が一定のまま維持できるという結果が得られた。第一種熱交換換気に関しては、AC モータは風量減少により比消費電力は元の性能値よりも数倍以上になり、定期的なメンテナンスを行わなければエネルギー損失が時間経過とともに大きくなっていくと考えられる。DC モータについては、比消費電力に清掃から 8 ヶ月まではほとんど変化はみられなかったが 10 ヶ月目から急激に比消費電力が上昇する結果が得られ、このことから目詰まりなどに起因する圧力損失が、定風量制御が不可能となる静圧に達するまでに清掃などのメンテナンスを行うことで第一種熱交換換気を比較的省エネルギー性を持って運用できると考えられる。しかし、第一種熱交換換気 (DC モータ) については、実在する機種仕様値に基づいているとはいえず想定による検討部分が多いため、今後も実測などのアプローチを増やし、さらに実状に基づく詳細な分析が必要だといえる。

## 6.4 暖冷房負荷に関する検討

6.1 節で述べたように換気は外気を室内に取り入れるため暖冷房負荷に与える影響を考慮しなければ、住宅全体での省エネルギーは達成できない。本節では、一般的に暖房負荷を削減することを目的に採用される第一種熱交換型換気システムについて、風量減少時により熱交換にどれほどの影響があるのかを換気と暖冷房に係る一次エネルギー消費量を算出することで評価を行った。

### 6.4.1 計算概要および計算条件

評価対象とするのは、換気と暖房、冷房の年間一次エネルギー消費量とする。自立循環型住宅開発委員会で開発された拡張デグリーデー法を用いて外気導入負荷を算出するプログラム<sup>[6-3,4]</sup>を用いることで、一次エネルギー消費量を求める。

本検討の目的は、風量減少が第一種熱交換型換気の暖房負荷削減に与える影響を把握することであり、比較条件として風量減少のパターンつまり清掃頻度では毎月、4ヶ月に1回、年1回の3パターン、換気システムとしての比較として第三種換気を設定している。暖房使用時間や暖房の対象となる空間の範囲によっても熱交換の効果は変化すると考えられるため温暖地としての東京と寒冷地の北海道において検討を行った。その他の情報も併せた本検討での計算条件を表6-に示す。また表6-の顕熱交換効率の値は、設計風量時の値を示しており、通常、顕熱交換効率は風量が減少するほど上昇する傾向があるため本検討においても第一種熱交換換気の仕様書を参考に風量が減少した時の顕熱交換効率を設定している。(およそ1ヶ月に顕熱交換率が1%上昇すると想定している)しかし、潜熱交換効率については複雑な部分があるため一定値として扱っている。また第三種換気はDCモータを想定しているため風量は年間で一定として考える。

表 6-3 計算に使用した条件

設定項目	水準
気候条件	札幌（寒冷地）、東京（温暖地）
断熱性能	H25 省エネ基準相当
全般換気設備	・ 第三種換気、 ・ 第一種熱交換換気
暖冷房方式	・ 居室間歇 ・ 全館連続暖冷房
空調率	0.92
有効換気量率	0.95
エアコン効率	COP=3.0
温度交換効率	顕熱交換効率 0.65、潜熱交換効率 0.40
比消費電力[W/(m <sup>3</sup> /h)]	・ 第三種換気：0.144 ・ 第一種熱交換換気：0.319
清掃頻度	・ 毎月 ・ 4ヶ月に1回 ・ 年1回 計3種

### 6.4.2 計算結果

前項に示した計算条件でシミュレーションを用いて算出された一次エネルギー消費量について以下に示す。

#### (1) 東京（温暖地） 居室間歇暖冷房の結果

最もわが国を占める温暖地の一例として東京の気象条件を用いて換気と暖冷房にかかる一次エネルギー消費量について検討してみた。暖冷房方式は、大多数の家庭に当てはまると考えられる居室間歇暖冷房方式を想定している。算出結果を図に示す。

結果としては、第一種熱交換換気において清掃頻度の違いによって暖房負荷の値はほとんど変わらないことが確認できた。また、温暖地であり暖房時間も短いことから熱交換による暖房負荷削減の効果よりも換気システムの稼働にかかる消費電力が大きくなってしまったため、全体の一次エネルギー消費量では第三種換気の方が小さくなる結果となった。

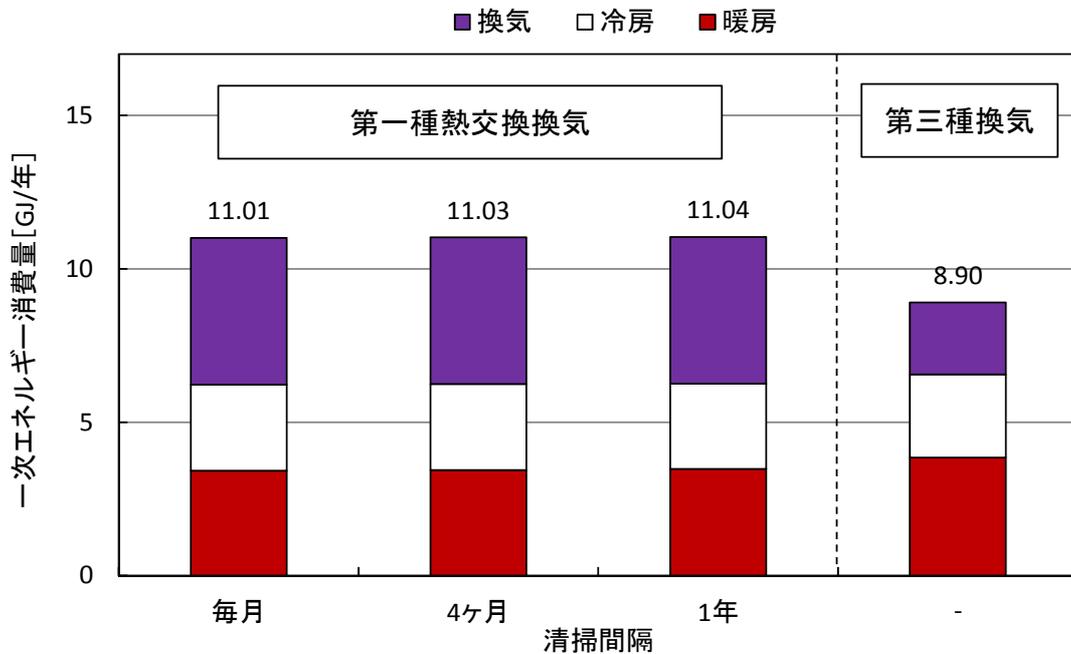


図 6-8 東京（温暖地） 居室間歇暖冷房の算出結果

#### (2) 札幌（寒冷地） 全館連続暖冷房の結果

寒冷地での検討として、札幌の気象条件で換気と暖冷房にかかる一次エネルギー消費量の算出を行った。暖冷房方式は、前項との比較も踏まえ暖房時間が長い条件で検討するため全館連続暖冷房方式を想定している。算出結果を図に示す。

外気条件や暖冷房時間に関係から前項と比較すると、熱交換による暖房負荷が認められる結果とはなったが、換気の動力が大きいため結果としては第一種熱交換換気と第三種換気の年間エネルギー消費量の差はほとんど見られなかった。清掃間隔における暖房負荷へ

の影響も前項と同じくほとんど影響は見られなかったが、唯一、毎月清掃を行う場合が全体のエネルギー消費量で第三種換気の値を下回った。

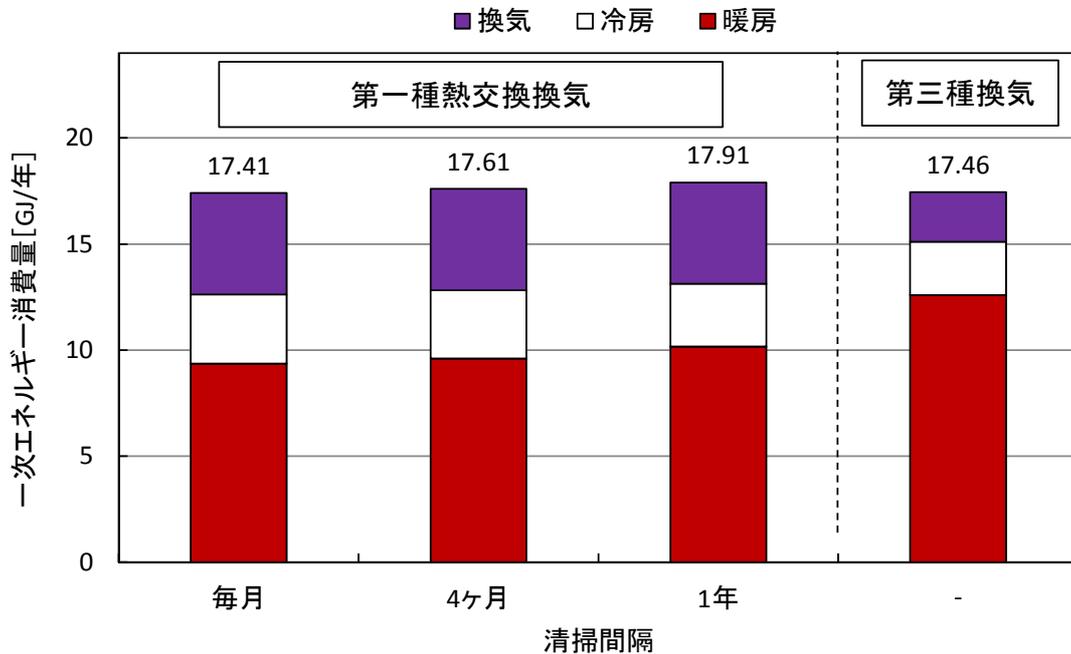


図 6-9 札幌（寒冷地） 全館連続暖冷房の算出結果

(3) 札幌（寒冷地） 全館連続暖冷房 夏期中間期片側排気運転の結果

前項までの検討では、全体的にメンテナンスを必要性が低い第三種換気の方が優れている結果となった。そのためここでは、第一種熱交換換気の運用方法も考慮することで、暖房負荷削減による省エネルギー効果をより活かすための検討を行う。第一種熱交換換気には、熱交換を必要としない中間期や冷房期に給気側のファンを止めることで排気側のみ機械換気を行う片側排気運転が可能な機種があり、上手く利用することで消費電力量を削減することができる。本研究では、この片側排気運転を冷房期中間期に行っている条件での一次エネルギー消費量の算出を行い省エネルギー効果の把握を試みた。

計算条件としては、5月から10月までを冷房期中間期として排気ファンのみ稼働させ、それ以外の期間を暖房期として熱交換かつ給排気両方のファンを稼働させる条件とし、清掃頻度については、冷房期中間期と暖房期に移るタイミングで運転方法を変化させるため、その時に清掃を行い風量が回復するという条件で計算を行った。その条件により算出した結果を比較対象として第一種熱交換換気の清掃頻度が毎月と1年の2パターンと第三種換気と併せて示す。結果としては、普通に運転している場合に比べて換気にかかる動力を削減でき、また熱交換により暖房負荷も削減できることから第一種熱交換換気を冷房期中間期に片側排気運転をさせるケースが最も一次エネルギー消費量が小さくなった。

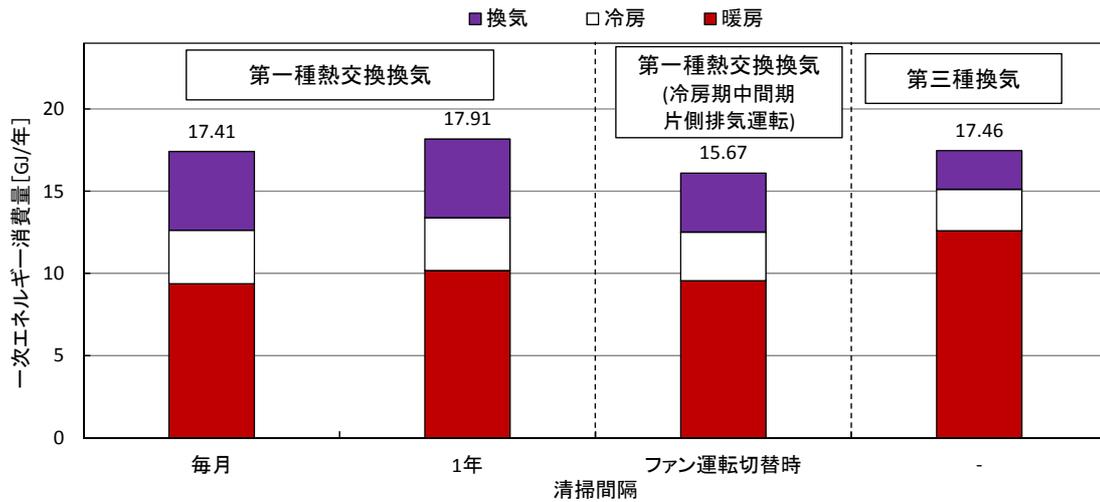


図 6-10 札幌（寒冷地） 全館連続暖冷房の算出結果 2

#### 6.4.3 まとめ

本節では暖冷房負荷を含めた換気システムの省エネルギー性の評価を行うため、換気の動力と暖冷房における一次エネルギー消費量の算出を行った。またメンテナンス不足などによる風量減少が第一種熱交換換気システムの暖房負荷削減の効果に与える影響の把握も同時に検討することを目的とした。

結果は、暖房の使用時間と運転方法および清掃頻度を考慮することが可能ならば第一種熱交換換気が寒冷地では省エネルギーの観点で有利になる場合もあるが、第三種換気が基本的に風量減少もなく換気の動力も少ないためエネルギー消費は安定しているといえるものとなった。

熱交換を用いた暖冷房負荷の削減は、清掃頻度によってほとんど影響を受けない結果となった。これは風量の減少量に対して顕熱交換効率の変化が少ないことと、顕熱交換効率が多少増加したとしても風量減少は給気の方が大きいため、清掃から時間が経過するほど換気システムによる給気と排気のバランスが崩れ、換気経路以外から住宅に侵入する外気が増えるためだと考えられる。

第6章 引用・参考文献

- [6-1] 国土交通省国土技術政策総合研究所 独立行政法人 建築研究所:平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 II住宅, 2013.5
- [6-2] 三菱電機 製品情報 暮らしと設備トップ 空調・換気・衛生トップ 製品情報 換気・換気空清機ロスナイ, <http://www.mitsubishielectric.co.jp/ldg/ja/products/air/lineup/ventilationfan/>, 2017.12 取得
- [6-3] 峰野悟:住宅用換気設備の換気負荷シミュレーションプログラムの開発 その1プログラムの概要, 日本建築学会四国支部研究報告集 第14号, 日本建築学会, pp65-66, 2014.5
- [6-4] 村田さやか:住宅用換気設備の換気負荷シミュレーションプログラムの開発 その2隙間を含む住宅全体換気量の推定方法, 日本建築学会四国支部研究報告集 第14号, 日本建築学会, p67-68, 2014.5

## 第7章

住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価

および総括



## 第7章：住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価 および総括

### 7.1 はじめに

本章では、第4章から第6章まででの住宅用換気システムを対象とした各評価項目における検討結果を用いて、それらを総合的にまとめることで次節において住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価を行い、7.3節において本論文のまとめを示す。最後に7.4節において、本研究における総括と今後の展望や課題を示す。

### 7.2 住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価

本節では、前節でも述べたように第4章から第6章までに示した結果を用いて、総合的な視点で住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価を行う。

まずは換気システム自体の性能の評価対象としている換気性能と省エネルギー性能について評価を行う。第4章で換気性能評価に用いた在室者がいる居室におけるOSRFの算出結果と第5章で作成した比消費電力モデルの関係に清掃からの経過時間の情報を加えて表した図を図7-1に示す。プロット付近に示されている値は清掃からの経過月を表している。

換気性能の点で見ると、第一種熱交換換気は、第三種換気に比べてACモータでは清掃後の約半年間は第三種換気より高い空気質で生活できていることが分かる。DCモータについても風量が定量制御できている7ヶ月後までは高い空気質を維持していることが分かる。しかし、それ以降は両者とも空気質が一段と悪くなり、第三種換気よりも換気性能が低くなることが分かる。また第三種換気の空気質に関しては、SRF値が1.0を下回っているもののそれほど生活に支障がでないほどのものと考えられる。

省エネルギーの観点では、省エネルギー基準で基準一次エネルギー消費量の算定に用いられる比消費電力0.3を常時下回ることができるのは第三種換気のDCモータのみであり、これ以外は換気設備の基準一次エネルギー以上のエネルギーを一年間に必要とすることとなる。また第一種換気に関しては、元々の性能値が第三種換気の数よりも大きいにもかかわらず、清掃から経過するほど比消費電力が増加し、1年後にはおよそ4倍近くにもなる。

これらの点から運用時の住宅用換気システムの性能評価としては、第三種換気にDCモータを採用した方が優れていると判断できる。

メンテナンス性に関しては、性能評価の結果から、第一種換気の方がメンテナンスの必要性があることが認められる。そのことも踏まると、第三種換気換気はメンテナンスによる風量減少が起きにくい上に、第4章での結果よりメンテナンスにかかるMet値は、大きいものではなく一般的な居住者に対しても運用しやすい換気方式であると考えられる。一

方、熱交換型を含む第一種換気システムは、風量減少が清掃後からの時間経過とともに大きくなるため運用時において定期的なメンテナンスの必要性が高く、さらにメンテナンスに必要とされる項目数も第三種換気よりも多く、その中には Met 値が第三種換気のメンテナンス行為と比較して高く想定できる行為も含まれており、適切な運用は容易とはいえず、換気システムについてある程度見識が高い居住者向けであるといえる。

以上に述べたことのまとめとして、表 7-1 に第一種熱交換型換気システムと第三種換気システムの特徴を本論文における評価項目に合わせて示す。

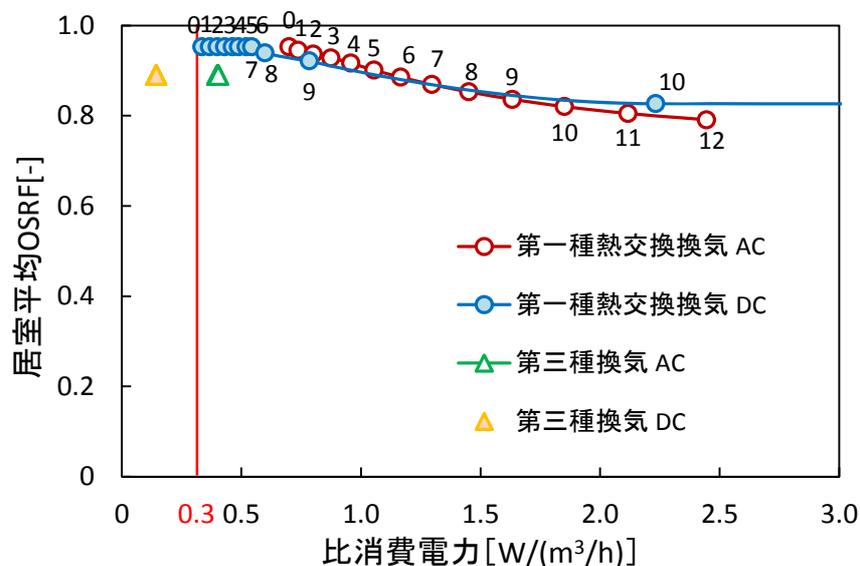


図 7-1 OSRF と比消費電力の関係

表 7-1 本研究において導出した換気システムの特徴

換気システム		第一種熱交換換気		第三種換気		
		AC	DC	AC	DC	
風量減少		×	△	○	◎	
換気性能	性能値	◎	◎	○	○	
	運用時*	△	△	○	○	
省エネルギー性	比消費電力	性能値	△	○	◎	
		運用時*	×	×	○	◎
	暖房負荷削減	性能値	○	○	-	-
		運用時*	○	○	-	-
メンテナンス性		△	△	○	○	

\*一般的な居住者がほとんど清掃をしないことを想定して、性能値から清掃をせずに一年経過した状態を示している

### 7.3 本論文のまとめ

本論文では、住宅用換気システムがメンテナンス不足によるフィルターなどの目詰まりが原因となる風量減少に着目し、住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価方法の検討と試行を目的として、メンテナンス不足による性能低下の明確化の検討に加え、換気システムのメンテナンス性の評価に関する検討を行った。以下に、第6章までに得られた各章での要点を示す。

#### 第1章 序論

本論文の研究背景および目的、概要と関連する既往研究や先行研究との位置づけを示した。

#### 第2章 研究における基本事項

住宅換気に関する基本事項や本研究と関連する換気性能評価、換気回路網計算を用いたシミュレーション手法、室内環境に関する基準を示した。また、本論文でも使用した人間のCO<sub>2</sub>呼出量に関する研究について既往研究の情報整理や先行研究における研究概要と研究成果も示した。

#### 第3章 住宅用換気システムの運用要因による経時風量減少を対象とした分析

第3章では、先行研究や本研究で新たに行ったモデル住宅および実住宅での測定データや既往研究の成果ならびに仕様値にもとづき、第5章での換気性能評価や第6章での省エネルギー評価において評価値を算出する際の計算条件として用いることを目的に住宅用ダクト式第一種熱交換換気と第三種換気についてAC, DCモータ別に風量減少モデルの作成を行った。

結果として、第三種換気はACモータのモデルに関して風量減少はごく僅かであり、DCモータの場合は、ACモータでの風量減少から機外静圧の変化を想定すると、定風量域内での変化と考えられ、風量は一定のままであるとし、メンテナンス不足に影響を受けにくいシステムと想定した。

一方、第一種熱交換換気システムはACモータに関しては、経時的に一定の傾きを持ってSA風量と有効換気量率が減少していくモデルを作成した。これは、先行研究における実験集合住宅での長期連続測定の結果を用いて作られたものである。換気システムの風量減少は、多種にわたる機種やメーカーの違いだけではなく、住宅の立地条件や気候条件に居住者の生活スタイルなどによってフィルターなどが目詰まりする間隔も異なるため、一般的なモデルを定義するのは難しい。そのため本論文では、先行研究で実測を行った第一種熱交換換気システムの実測データを元に作成したモデルにもとづいて検討を行った。

しかし、第一種熱交換型換気システムのDCモータに関しては実際の現象や実在する仕様値を参考にした検討により風量減少モデルを作ったため、熱交換素子による圧力損失とい

った微細な部分における検証ができていないため実際の現象とかい離する可能性もあり計算モデルとして使用する際には、その点に注意しなければならないものとなった。そのため、今後は実測データやDCモータの消費電力特性を合せたP-Q線図を入手することでより実現象に近いモデルに修正していくことが必要であると考えられる。

以上のことより、第5章の換気性能評価における評価値の算出には、第三種換気は風量を一定とし、第一種熱交換換気はACモータのモデルを想定した条件で検討を行うこととした。また第6章における省エネルギー評価では比消費電力による評価を主に行うため、ACモータとDCモータでは消費電力の傾向異なるため、同様に扱うことができないと考え、この第3章で作成した各風量減少モデルを用いることとした。

#### 第4章 活動量実測実験にもとづくメンテナンス性評価

第4章では、被験者を用いた換気システムのメンテナンスの模擬行為の活動量実測実験を行い、メンテナンス行為の活動量をエネルギー代謝量やMet値にすることで定量しメンテナンス性の評価を行った。

メンテナンス行為について述べると、脚立などを使用し上向きの作業が必要とされたり、移動が伴ったりするメンテナンス行為のMet値が高く、居住者が行わなければならないメンテナンスの負担を大きくする可能性があり、ユニットを天井裏ではなく壁や床下、床置き型のものを使うことでより楽な姿勢でできるようにすることや換気ユニットは外蓋の開口が簡易である機種を使用するなどの対策が望まれる結果となった。

ダクト式第三種換気システムは、必要とされるメンテナンス項目全てが、実験結果より活動が大きくない行為であると考えることができ、第三種換気は定期的なメンテナンスが必要であるもののそれ自体に困難さはなく一般的な居住者にとっても扱いやすいシステムと示唆できた。また第一種換気システムのメンテナンス性については、端末部材のメンテナンスにかかる負担は第三種換気と同程度と想定できた。しかし、第一種換気システムには、第三種換気システムにはない換気ユニット内のフィルターや熱交換型には熱交換素子があり、その清掃やそのために点検口やユニット本体の開閉作業がメンテナンスに必要となる。そのため本論文では、メンテナンスを必要とする部材、箇所が多く、第三種換気にはない上向きの作業が存在することから第一種換気の方が第三種換気よりメンテナンスの負担が大きくなると考えた。以上のことより、本章ではメンテナンス性については第三種換気の方が優れており、第一種換気についてはメンテナンスが容易になるような工夫が求められるという課題が把握できた。

#### 第5章 風量減少を組み込んだCO<sub>2</sub>濃度にもとづく換気性能評価

第5章では換気システムがメンテナンス不足により風量減少している状態が住宅の空気環境に与える影響を把握することを目的に、第3章で作成した風量減少モデルを使用し、さらに人間の呼気から発せられるCO<sub>2</sub>を評価指標とすることでより実状に近い状態を想定

した換気回路網を用いたシミュレーションを行い、空気性状の算出を行った。

また人間の呼気を住宅内で標準的なスケジュールで発生させる条件を設定するために、省エネルギー基準などでエネルギー算定の際に使用されている、家族構成及び生活スケジュールの設定を用い、CO<sub>2</sub>の発生量の増減に関係する行動における活動量を示すMet値については、被験者による呼気収集実験を主な手法として設定を行った。

以上の検討より得られた空気環境評価を、OSRFの算出結果に基づいて風量減少が起きないと仮定した第三種換気システムとメンテナンス不足により経時的に風量が減少していく第一種換気を比較して行くと、清掃後から0ヶ月目の性能値では、第一種換気システムは第三種換気システムよりも空気の流れを制御しているためOSRF値も1.0に近く、空気質に関して優れている結果が得られた。しかし、清掃から時間が経過するほど第一種換気は風量の減少量が大きくなるため、OSRF値も小さくなり空気質が低下していく結果となった。また6ヶ月目には第三種換気システムのOSRF値0.89を下回るようになり、第一種換気を良好な空気環境の形成を目的に使用する際は、少なくとも半年に1度はメンテナンスを行う必要があることが分かり、換気に関して知識や関心が低い居住者に関しては第三種換気システムを用いた方が安定した空気環境を提供できると示せる結果となった。

## 第6章 住宅用換気システムの省エネルギー評価

第6章では、住宅におけるダクト式全般換気システムとして主に使われていると考えられる第一種熱交換型換気システムと第三種換気を対象にメンテナンス不足が原因とされる風量減少に伴う換気システムのエネルギー効率指標である比消費電力の変動モデル作成について検討を行った。

比消費電力のモデル作成により、第三種換気システムの比消費電力は小さく、風量減少も起きにくいいため経時的な変化はほとんどみられなかったのに対し、第一種熱交換型換気の比消費電力は、その値自体も第三種換気と比較すると大きく、風量減少による比消費電力の増加が顕著に表れる結果となった。また、換気システムをモータ種別ごとに見た場合、第三種換気システム（DCモータ）が定風量制御のため風量減少がなく消費電力も測定値に基づき分析した結果ほとんど変化しないため、比消費電力0.14という非常に小さい値で一定あることから最も省エネルギー性に優れていると判断できる結果を得られた。第一種熱交換換気に関しては、ACモータは風量減少により比消費電力は元の性能値よりも数倍以上に大きくなったため、定期的なメンテナンスを行わなければ無駄となるエネルギー損失が時間経過とともに大きくなっていくと想定された。DCモータについては、目詰まりなどに起因する圧力損失が、定風量制御が不可能となる静圧に達するまでに清掃などのメンテナンスを行うことで第一種熱交換換気を比較的省エネルギー性を持って運用できると考えられる結果となった。しかし、第一種熱交換換気（DCモータ）については、第4章のまとめでも述べたように想定による検討部分が多いため、今後も実測などのアプローチを増やし、さらに実状に基づく詳細な分析が必要だといえる。

さらに第6章では暖冷房負荷を含めた換気システムの省エネルギー性の評価として換気の動力と暖冷房における一次エネルギー消費量の算出を行った。風量減少が第一種熱交換換気システムの暖房負荷削減の効果に与える影響の把握も目的の一つとして検討を行った。

結果として、暖房の使用時間や対象空間の大きさや定期的なメンテナンスを考慮した運用方法が可能ならば第一種熱交換換気が寒冷地では省エネルギーの観点で有利になる場合もあるが、第三種換気が換気の動力も少ない分、エネルギー消費は安定しているといえる結果となった。熱交換を用いた暖冷房負荷の削減は、清掃頻度によってほとんど影響を受けない結果となった。この理由は、風量の減少量に対して顕熱交換効率の変化が少ないことと、顕熱交換効率が多少増加したとしても風量減少は給気の方が大きいため、清掃から時間が経過するほど換気システムによる給気と排気のバランスが崩れ、換気経路以外から住宅に侵入する外気が増えるためだと考えられる。

以上の検討より、第一種熱交換換気システムのDCモータについては、今後より具体的な検討が必要であるという課題は残っているが、省エネルギーにおいては特に換気システムにこだわりのないような一般的な居住者を想定した場合、比消費電力が小さく運用できるダクト式第三種換気システムが推奨されると考えられる。また、第一種熱交換型換気に関しては、換気性能と同じく性能が低下するまでに清掃などの定期的なメンテナンスを行い、なおかつ寒冷地など暖房時間地域で夏期中間期に片側排気運転をするなどの工夫をすることで省エネルギー効果が認められるようになると考えられる。

#### 7.4 研究の総括と今後の展望

本研究では、住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価方法の提案と試行を目的として、換気システムのメンテナンス不足が要因とされる風量減少に着目し、風量減少による換気性能や省エネルギー性能の低下も考慮した性能評価と換気システムのメンテナンス性の評価に関する検討を行った。風量減少モデルは、先行研究や既往研究で得た実測値に仕様値や本研究で行った実住宅での実測値を付加し、分析することで作成した。

換気性能評価では、換気システムの風量減少を考慮した実状に近い空気質による評価を目的としており、風量減少モデルと先行研究によるCO<sub>2</sub>呼出量関係式を用いることで、実際の住宅でも必ず発生する居住者が生活で呼出するCO<sub>2</sub>を空気の汚染物質として指標にし、月間隔で風量が減少していくことを想定した換気性状をシミュレーションにより算出し、各換気システムにおける風量減少が室内空気質に及ぼす影響について考察を行った。

省エネルギー評価では、換気システムのエネルギー効率に着目した評価を目的とし、風量減少モデルに実測データや仕様値などの情報を付加した分析を行い、比消費電力の性能値が風量減少に伴い変化する様子モデル化を行った。

また換気システムのメンテナンス性評価は、換気システムに必要とされるメンテナンス行為の活動量を実測実験によりエネルギー代謝量やMet値など指標により定量化することで評価を行った。そして最終的には、上記の3項目での評価結果を総合的にみることで、

住宅用換気システムの運用時を対象とした性能評価の考察を行った。

本論文で導出した運用時を対象とした性能評価について、第一種熱交換型換気システムと第三種換気システムを比較して述べると、第一種換気システムはメンテナンス不足が要因とされる風量減少が起きるため性能を維持するには適切なメンテナンスが必要であり、その特徴を利点として運用できる見識を居住者に必要とする。一方、第三種換気はメンテナンス不足による風量減少が長い目で見ても僅かしか起こらないため性能値で見ると第一種換気システムよりも形成する空気質は劣るものの生活するうえで問題があるほどではなく、それ以上低下しないため一般的な居住者でも利用しやすく、DC モータを採用している機種を用いることで比較的小さい消費電力で運転できるため、省エネルギー性に優れていると判断できる結果となった。そのため、本研究での結論としてはDC モータを採用している第三種換気システムが最も一般的な居住者には進めることができる機種であり、第一種熱交換型換気システムは、寒冷地など暖房使用時間が長く熱交換により暖房負荷を削減することで省エネルギーになり、なおかつ居住者がメンテナンスを定期的に適切に行える条件などで優位的に使用できると示唆できる結果を得られた。

最後に本研究の今後の展望を以下に記す。

#### (1) 風量減少モデルに関する分析

本論文では、主にAC モータの第一種熱交換型換気システムを中心に実測値などのデータを用いて風量減少モデルの作成を行った。AC モータの第一種熱交換型換気システムの風量減少モデルに用いた実測データは、実験集合住宅において導入されている一つの換気システムの連続測定データであり、本論文では換気システムの条件は、外気条件、地域条件、機種と考慮すれば異なってくる条件は無数にあるため一つの機種を対象にモデルを作ることと良しとしていたが、今後は違う機種でも可能であれば長期間の連続測定を行うなどして同様に風量減少モデルを作成し、異なる条件での差異なども確認したい。第一種熱交換型換気システムのDC モータについては、仕様値のみで検討を行ったため実際にメンテナンス不足によるフィルターの目詰まりで風量がどのように変化するかを実測や実験を行うことで確認し、定風量制御が可能な期間や消費電力の変化を分析する必要があるといえる。第三種換気システムについては、AC モータ、DC モータともにRA グリルにフィルターを設けない場合には、風量減少がほとんどないことが実測により確認できているため、機械ファンによる排気は風量減少が起きないものとして考えることが可能だが、外気から給気の経路となる自然給気口などのフィルターについて目詰まりが起こるのか実態調査を行い、それにより換気経路などがどのように変化するか分析する必要があるといえる。

また機械ファンを用いたデマンドコントロール換気システムにおける風量減少についても、実験により目詰まりが起り始める積算風量などを目安にした風量減少モデルの作成を行い、デマンドコントロール換気の制御の最適化につながる検討を行うなども考えられる。

## (2) 換気性能評価に関する分析

本論文において、換気システムの風量減少が空気質へ与える影響について分析することで換気性能評価を行った。風量減少が起こった時の空気質は、シミュレーションにより算出をしているが今後の検討としては、ガスの流量を調整できるガスフローコントローラを用いて模擬的に換気システムの風量を起こすような実験を行い、それらとの実測値とシミュレーションとの差異を比較したい。また、定風量の換気システムだけではなくデマンド制御を行っている換気システムと風量減少の関係も分析し、よりデータの拡充を図りたい。

## (3) 省エネルギー評価に関する分析

省エネルギー評価に関しては、第6章でも述べたように第一種熱交換型換気システムのDCモータは、仕様値による検討であるため、今後は風量減少の検討とともに消費電力の実測を行うことで分析を行っていく必要がある。また、他の換気システムについても実測ケースを増やすことでさらに精度の高い消費電力のモデル作成を行っていくことが課題として考えられる。

## (4) メンテナンス性評価に関する取り組み

メンテナンス性の評価について本論文内では、ダクト式第三種換気システムのメンテナンス行為を主に対象とし、ダグラスバッグ法や活動量計を用いてエネルギー代謝量やMet値を測定し、換気システムのメンテナンスの容易性を定量的に示し、評価を行った。

今後は、第一種換気システム固有のメンテナンス行為などについても実測を行っていく必要がある。また、今回の実験では換気ユニットはダクト式で一般的に用いられる天井裏を想定して行ったが、現在メンテナンス性を考慮して床下や床置き、壁付けなどの換気ユニットも流通しているため換気システムの設置場所についても検討することも課題である。

さらにメンテナンス性の評価をする際の分析についても、Met値だけではなくメンテナンス行為自体にも実際の作業時間やその頻度についても考慮することで年間の居住者のメンテナンスにかかる負担の定量化を行うなど、より実状に近い評価にすることが要求されると考える。また各換気システムの性能評価の結果を用いて、風量減少に伴う性能の低下とともにメンテナンスの必要性とメンテナンス性の評価を結び付けることで、設計時に居住者の換気に対する認識や理解に合わせた換気システムの選択に結び付けられるようになることが想定される。

## 謝辭



## 謝辞

本論文は2016年から2年間在籍した高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻の修士課程において、所属する建築環境工学研究室での研究成果をもとに修士論文としてまとめたものです。

本研究を進めるにあたり、主指導教員である高知工科大学システム工学群 田島昌樹准教授には多大なるご指導とご助言とを賜りました。本研究を論文としての形に成せるようになりましたのも、常日頃から私を温かく見守ってくださった田島先生のお陰であります。ここに深甚なる感謝の意を表します。

また副指導教員及び副査である高知工科大学の高木方隆教授、副査である高知工科大学の西内裕晶講師には研究に対して多くの御助言を頂きました。ご両名のご指導に深謝致します。

そして研究室の皆様には、研究活動中および論文執筆中に様々なご協力をいただき、また日々の議論を通して多くの知識や示唆を頂きました。特に同じ研究班の先輩として、修士学生としての研究の取り組み方や手法について助言およびご意見を頂きました井上貴之氏（現職 (株) 四電技術コンサルタント）、大西裕治氏（現職 ダイダン (株)）、後輩として実験やデータ分析など研究活動に多大なる貢献をしていただいた依光剛志氏、大野凌氏、野田奈那氏の皆様には心から感謝いたします。

最後に高知工科大学並びに、田島研究室のより一層の発展を祈念して謝辞に代えさせていただきます。

2018年1月 高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻  
社会システム工学コース 建築環境工学研究室  
学籍番号 1205099 嶋田祐典



## 付録



生活スケジュール

第 5 章で用いた生活スケジュールに関して、本論内では載せていない休日版の生活スケジュールを以下に示す。

表 A-1 省エネ基準などで基準エネルギー算定に用いられる生活スケジュール（休日版）

時刻	男性46歳		女性44歳		女性16歳		男性14歳	
	行動	場所	行動	場所	行動	場所	行動	場所
0:00								
0:15								
0:30								
0:45								
1:00								
1:15								
1:30								
1:45								
2:00								
2:15								
2:30								
2:45								
3:00								
3:15								
3:30	睡眠	寝室	睡眠	寝室			睡眠	子供室(西)
3:45								
4:00					睡眠	子供室(東)		
4:15								
4:30								
4:45								
5:00								
5:15								
5:30								
5:45								
6:00								
6:15								
6:30								
6:45								
7:00								
7:15			洗顔など	洗面所				
7:30			洗濯	洗面所				
7:45	洗顔など	洗面所					洗顔など	洗面所
8:00	テレビ	居間	炊事(準備)	台所			朝食	食事室
8:15	朝食	食事室	朝食	食事室			テレビ	居間
8:30			洗濯	洗面所	洗顔など	洗面所		
8:45					朝食	食事室		
9:00			炊事(洗い物)	台所	テレビ	居間		
9:15	テレビ+新聞							
9:30		居間	掃除				学習	子供室(西)
9:45								
10:00								
10:15			パソコン	居間	学習	子供室(東)		
10:30								
10:45								
11:00	パソコン		家事+テレビ					
11:15								
11:30								
11:45								
12:00	テレビ+新聞		炊事(準備)	台所			昼食	食事室
12:15								
12:30	昼食	食事室	昼食	食事室				
12:45							着替え	洋室2
13:00	テレビ+新聞	居間	炊事(洗い物)	台所				
13:15								
13:30								
13:45					買い物・散策	外出		
14:00								
14:15	買い物・散策	外出	買い物・散策	外出			部活動	外出
14:30								
14:45								
15:00								
15:15								
15:30								
15:45								
16:00								
16:15								
16:30								
16:45			家事・趣味	居間・和室				
17:00	家事・趣味・娯楽	居間			趣味(音楽・読書)	子供室(東)	入浴	浴室
17:15							洗顔など	洗面所
17:30								
17:45			炊事(準備)	台所			TV	居間
18:00								
18:15								
18:30								
18:45	夕食	食事室	夕食	食事室	夕食	食事室	夕食	食事室
19:00								
19:15								
19:30	家族団楽		炊事(洗い物)	台所	家族団楽	居間	家族団楽	居間
19:45								
20:00								
20:15			趣味		学習	子供室(東)		
20:30	テレビ+新聞	居間		居間			テレビゲーム	子供室(西)
20:45								
21:00			テレビ		入浴	浴室		
21:15					洗顔など	洗面所		
21:30								
21:45								
22:00	入浴	浴室						
22:15	洗顔など	洗面所			学習	子供室(東)		
22:30	パソコン	居間	入浴	浴室				
22:45			洗顔など	洗面所				
23:00								
23:15	睡眠	寝室	睡眠	寝室	睡眠	子供室(東)	睡眠	子供室(西)
23:30								
23:45								

表 A-2 本研究で作成した生活スケジュール（休日版）

時刻	父			母			子供1			子供2		
	行動	Met値	場所	行動	Met値	場所	行動	Met値	場所	行動	Met値	場所
0:00												
0:15												
0:30												
0:45												
1:00												
1:15												
1:30												
1:45												
2:00												
2:15												
2:30												
2:45												
3:00												
3:15												
3:30	睡眠	0.8	寝室	睡眠	0.8	寝室	睡眠	0.8	子供室(東)	睡眠	0.8	子供室(西)
3:45												
4:00												
4:15												
4:30												
4:45												
5:00												
5:15												
5:30												
5:45												
6:00												
6:15												
6:30												
6:45												
7:00												
7:15				洗顔など	2.0	洗面所						
7:30				洗濯	2.0	洗面所						
7:45	洗顔など	2.0	洗面所									
8:00	テレビ	1.1	LDK	炊事(準備)	2.5	LDK				洗顔など	2.0	洗面所
8:15	朝食	1.5	LDK	朝食	1.5	LDK				朝食	1.5	LDK
8:30				洗濯	2.0	洗面所	洗顔など	2.0	洗面所	テレビ	1.1	LDK
8:45				炊事(洗い物)	1.5	LDK	朝食	1.5	LDK			
9:00							テレビ	1.1	LDK			
9:15				掃除	2.0	LDK						
9:30	テレビ+新聞	1.0	LDK									
9:45												
10:00				パソコン	1.1	LDK						
10:15							学習	1.1	子供室(東)	学習	1.1	子供室(西)
10:30												
10:45												
11:00	パソコン	1.1	LDK	家事+テレビ	1.2	LDK						
11:15												
11:30												
11:45												
12:00	テレビ+新聞	1.0	LDK	炊事(準備)	2.5	LDK						
12:15	昼食	1.5	LDK	昼食	1.5	LDK				昼食	1.5	LDK
12:30												
12:45	テレビ+新聞	1.0	LDK	炊事(洗い物)	1.5	LDK				着替え	2.5	子供室(西)
13:00												
13:15												
13:30												
13:45												
14:00												
14:15												
14:30	買い物・散策			買い物・散策			買い物・散策					
14:45												
15:00												
15:15												
15:30												
15:45												
16:00												
16:15												
16:30				家事・趣味	1.2	LDK						
16:45												
17:00	家事・趣味・娯楽	1.6	LDK				趣味(音楽・読書)	1.0	子供室(東)	入浴	1.5	浴室
17:15										洗顔など	2.0	洗面所
17:30				炊事(準備)	2.5	LDK				TV	1.1	LDK
17:45												
18:00												
18:15												
18:30												
18:45	夕食	1.5	LDK	夕食	1.5	LDK	夕食	1.5	LDK	夕食	1.5	LDK
19:00												
19:15												
19:30	家族団楽	1.8	LDK	炊事(洗い物)	1.5	LDK	家族団楽	1.8	LDK	家族団楽	1.8	LDK
19:45												
20:00												
20:15				趣味	1	LDK	学習	1.1	子供室(東)			
20:30												
20:45	テレビ+新聞	1.0	LDK									
21:00												
21:15				テレビ	1.1	LDK	入浴	1.5	浴室	テレビゲーム	1.1	子供室(西)
21:30							洗顔など	2.0	洗面所			
21:45												
22:00	入浴	1.5	浴室									
22:15	洗顔など	2.0	洗面所				学習	1.1	子供室(東)			
22:30	パソコン	1.1	LDK	入浴	1.5	浴室						
22:45				洗顔など	2.0	洗面所						
23:00												
23:15	睡眠	0.8	寝室	睡眠	0.8	寝室	睡眠	0.8	子供室(東)	睡眠	0.8	子供室(西)
23:30												
23:45												

付録 A 引用・参考文献

- [A-1] 国国土交通省国土技術政策総合研究所 独立行政法人 建築研究所：平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 II 住宅，2013. 5
- [A-2] 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅事業建築主の判断基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説，2009
- [A-3] 中江悟司 田中茂穂 宮地元彦：改訂版『身体活動のメッツ (METs) 表』，国立健康・栄養研究所，2012. 4
- [A-4] 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧（第 14 版）1 基礎編，p. 330，2010.  
2
- [A-5] ASHRAE：ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS，9. 6，2013



風量減少を組み込んだ CO<sub>2</sub> 濃度にもとづく換気性能評価 シミュレーション算出結果  
 第 5 章 4 節で載せていない空気質の算出結果を経過時間別で以下に載せる。

・ 1 ヶ月後

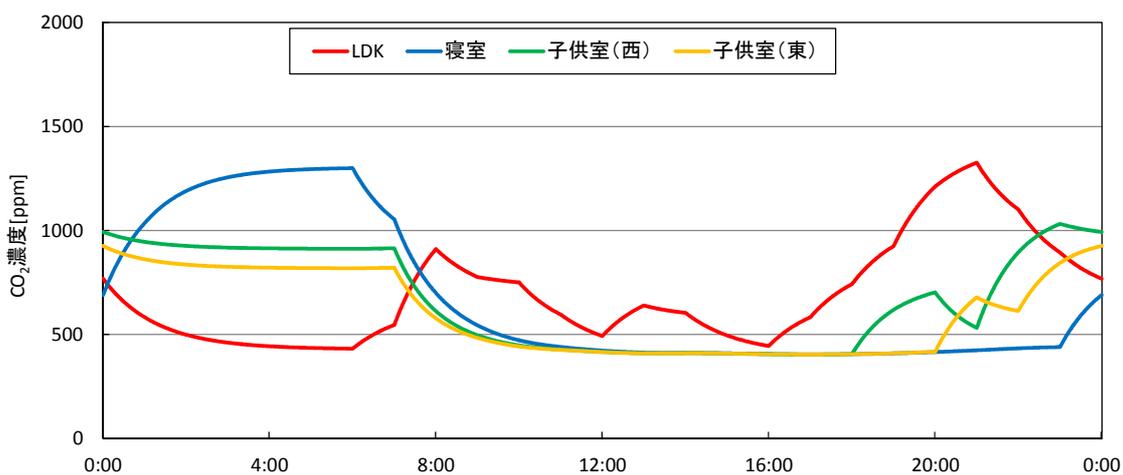


図 B-1 第一種換気システム (1 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

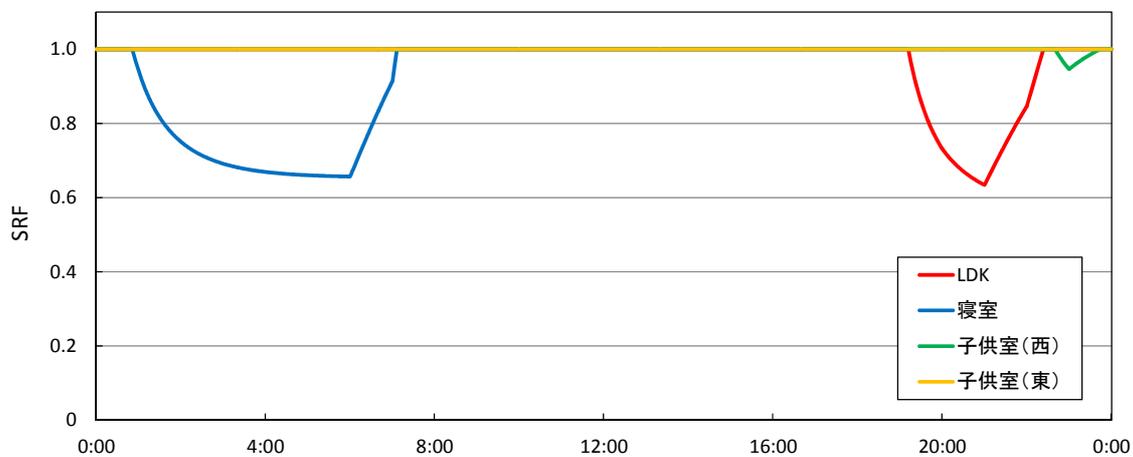


図 B-2 第一種換気システム (1 ヶ月後) による SRF

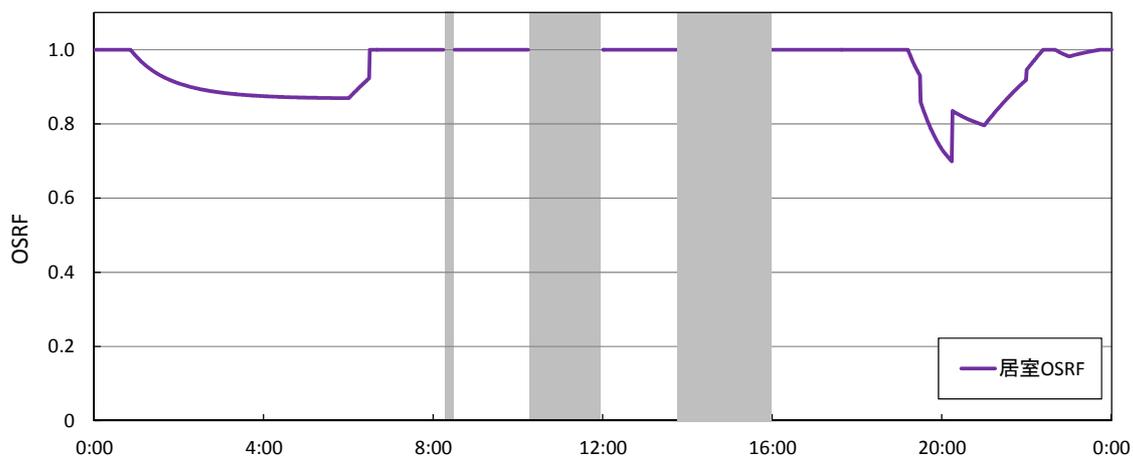


図 B-3 第一種換気システム (1 ヶ月後) による OSRF

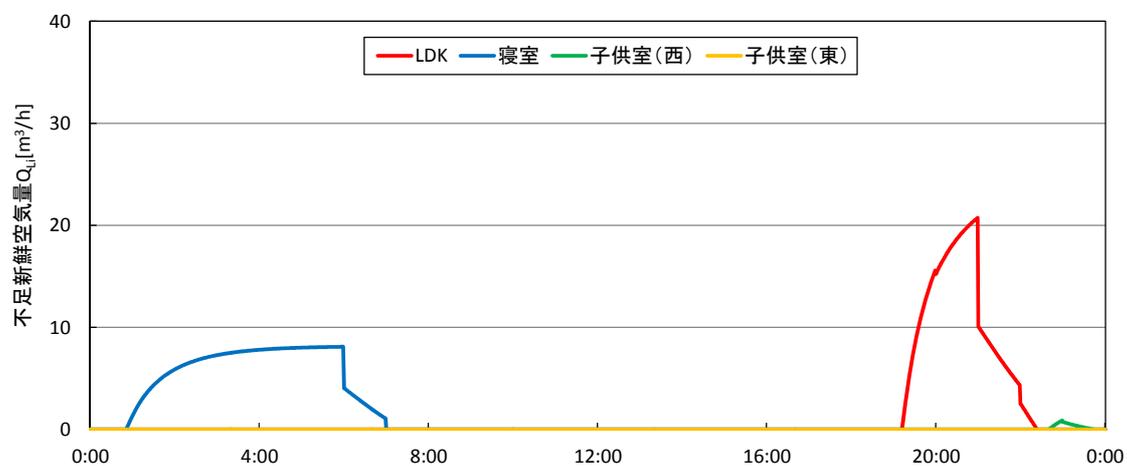


図 B-4 第一種換気システム (1 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 2 ヶ月後

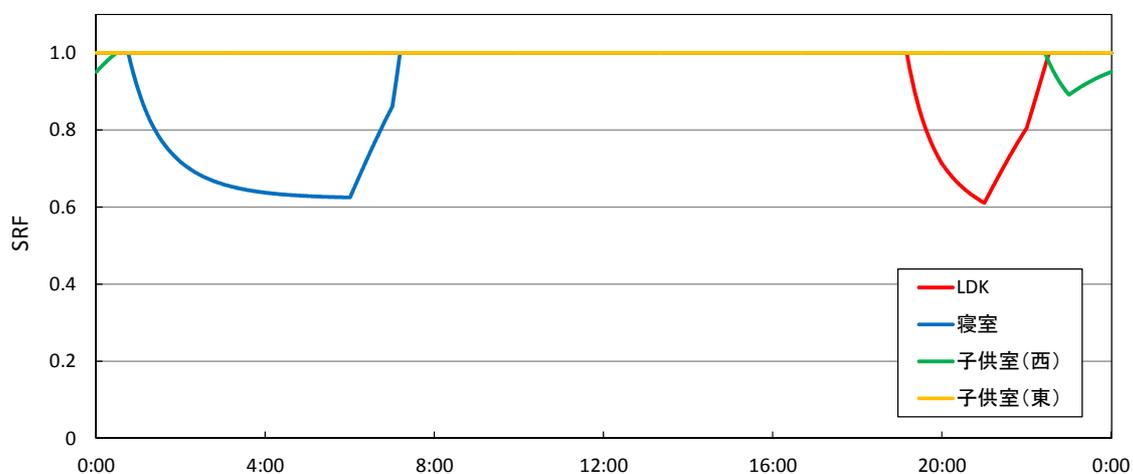


図 B-5 第一種換気システム (2 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

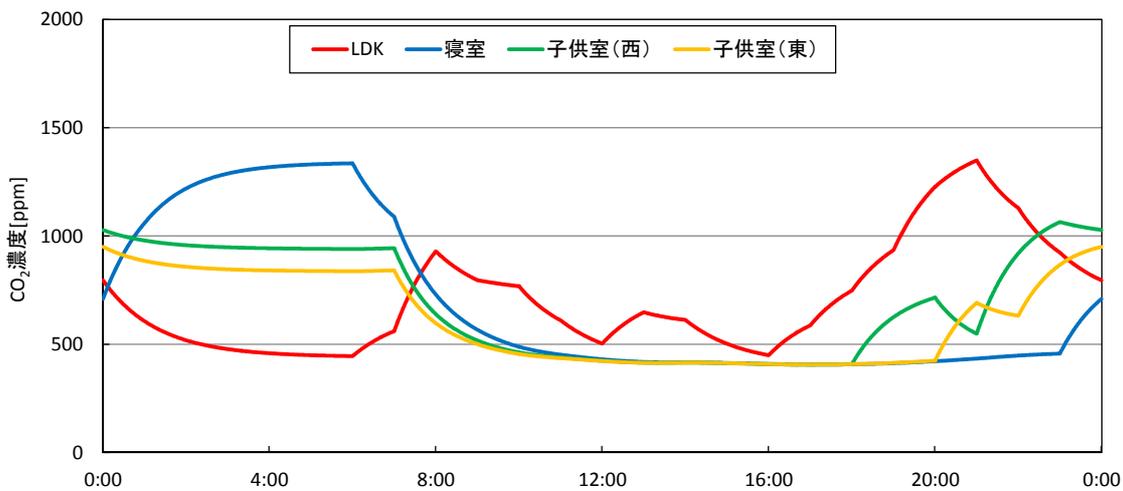


図 B-6 第一種換気システム (2 ヶ月後) による SRF

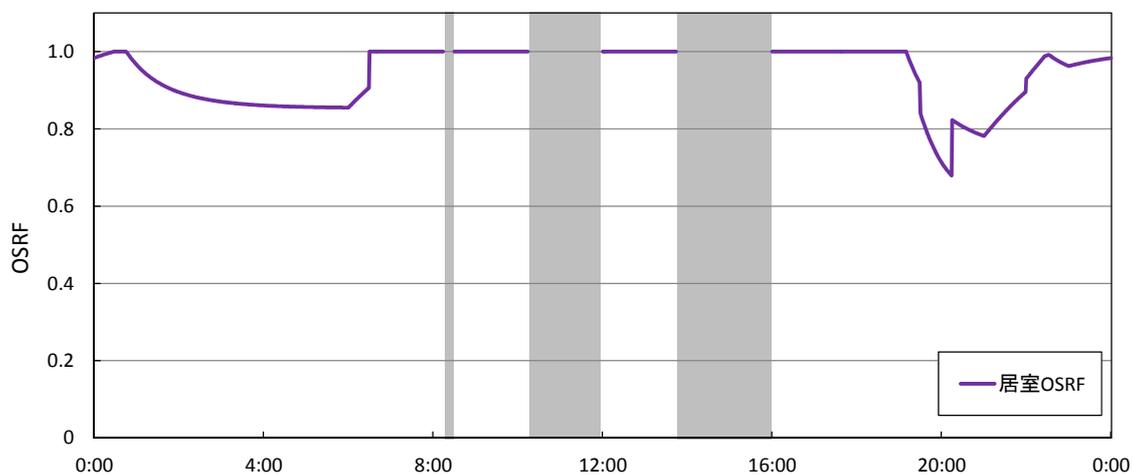


図 B-7 第一種換気システム (2 ヶ月後) による OSRF

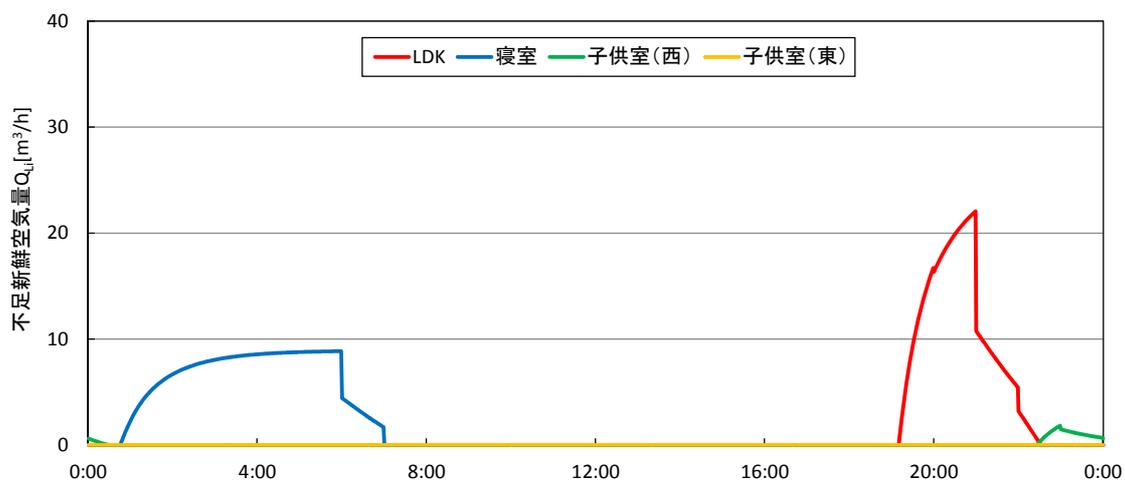


図 B-8 第一種換気システム (2 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・3ヶ月後

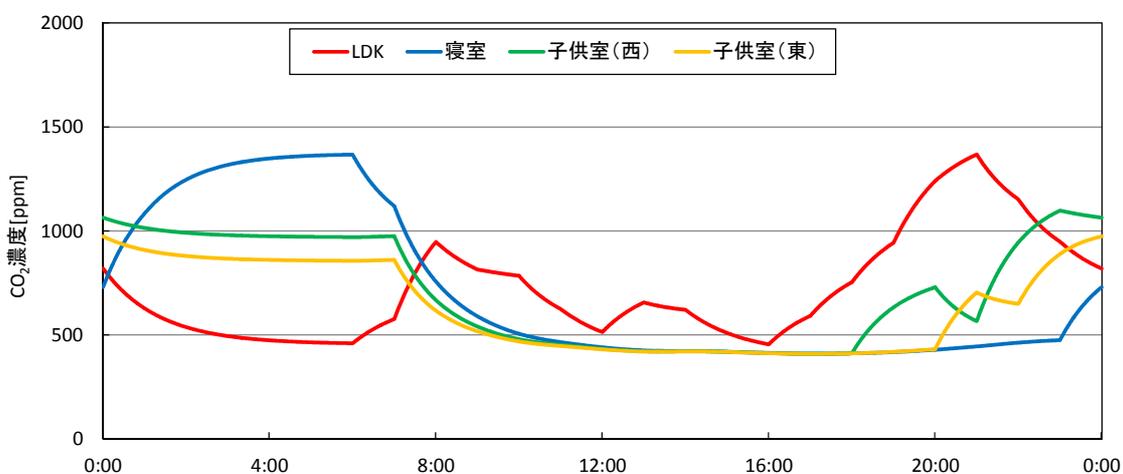


図 B-9 第一種換気システム (3ヶ月後) によるCO<sub>2</sub>濃度

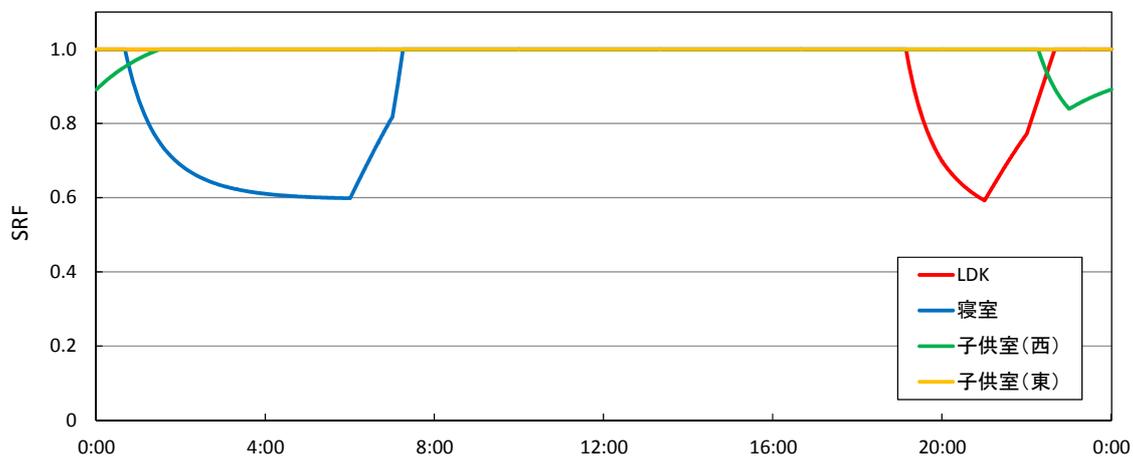


図 B-10 第一種換気システム (3ヶ月後) による SRF

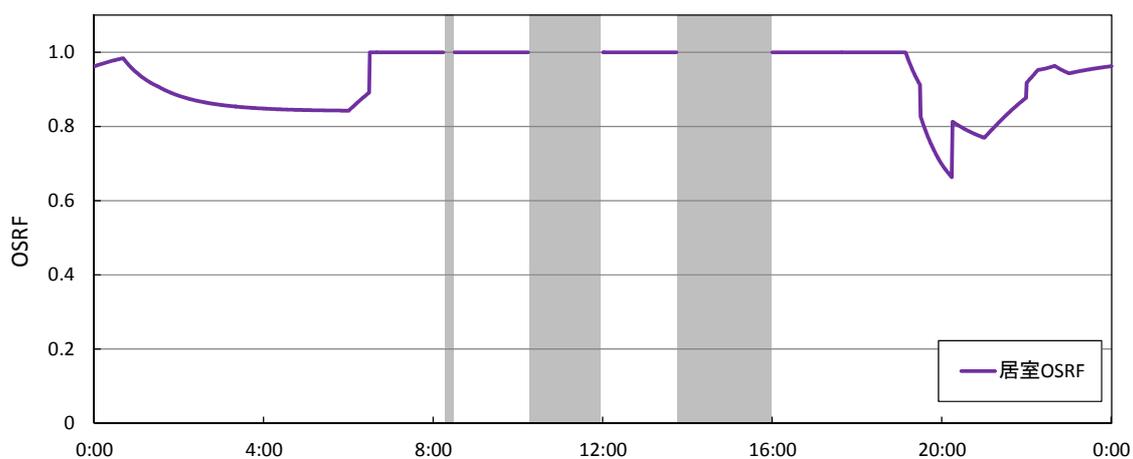


図 B-11 第一種換気システム (3ヶ月後) による OSRF

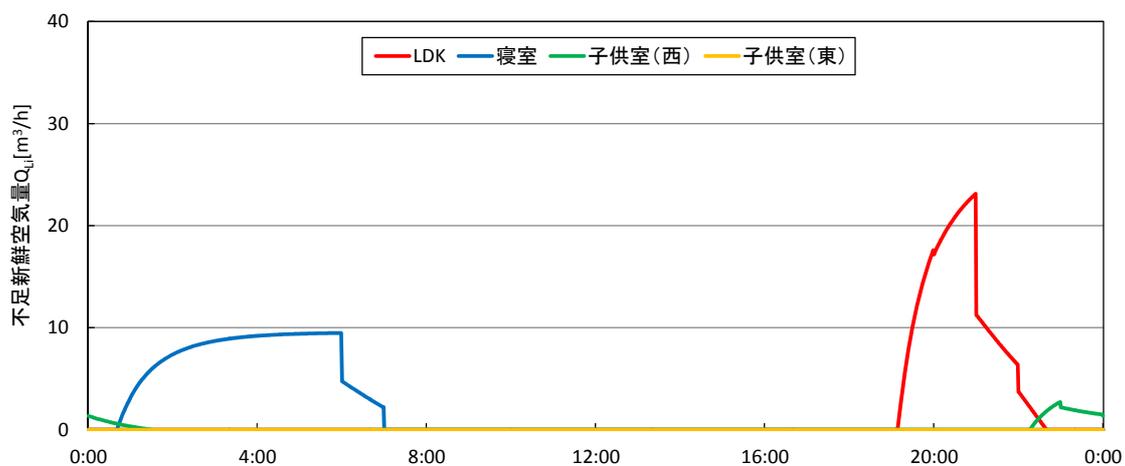


図 B-12 第一種換気システム (3 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 5 ヶ月後

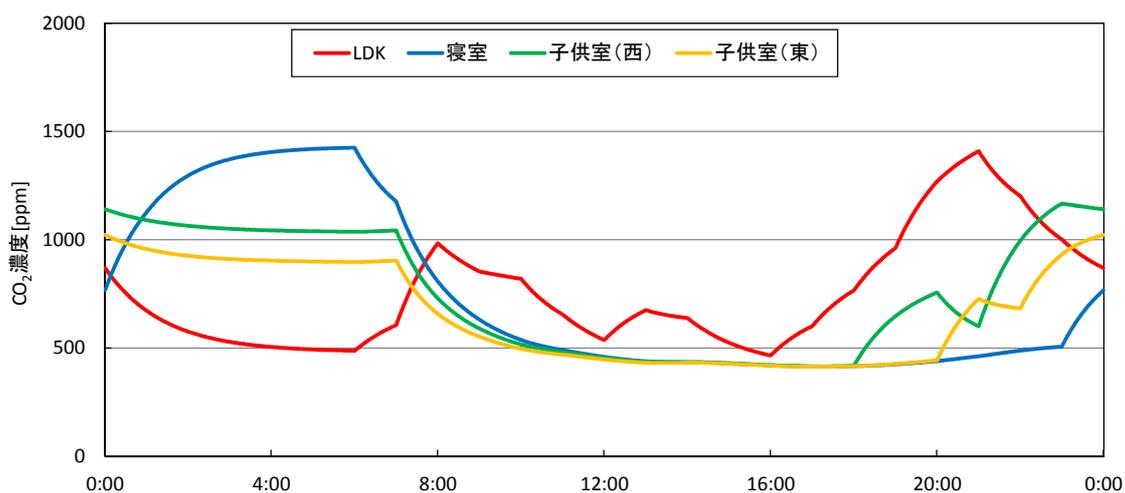


図 B-13 第一種換気システム (5 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

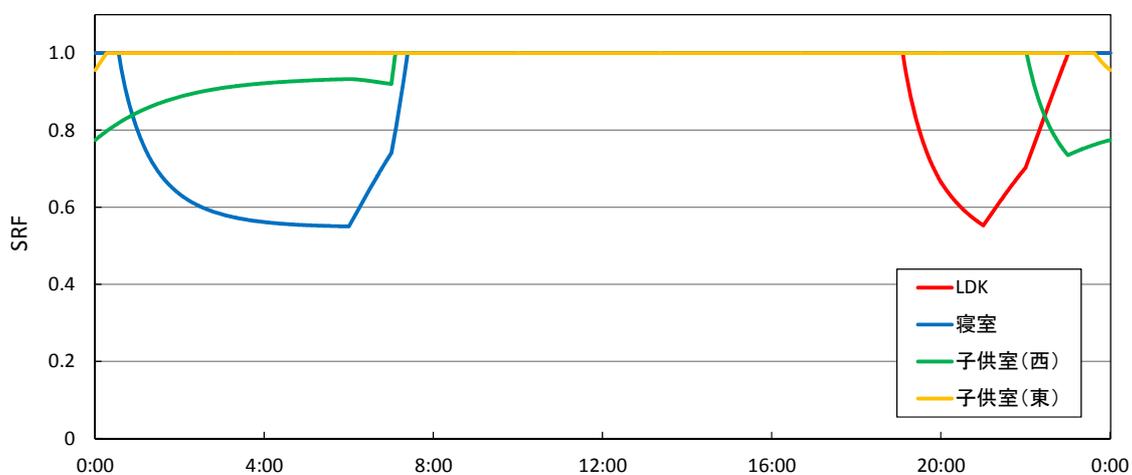


図 B-14 第一種換気システム (5 ヶ月後) による SRF

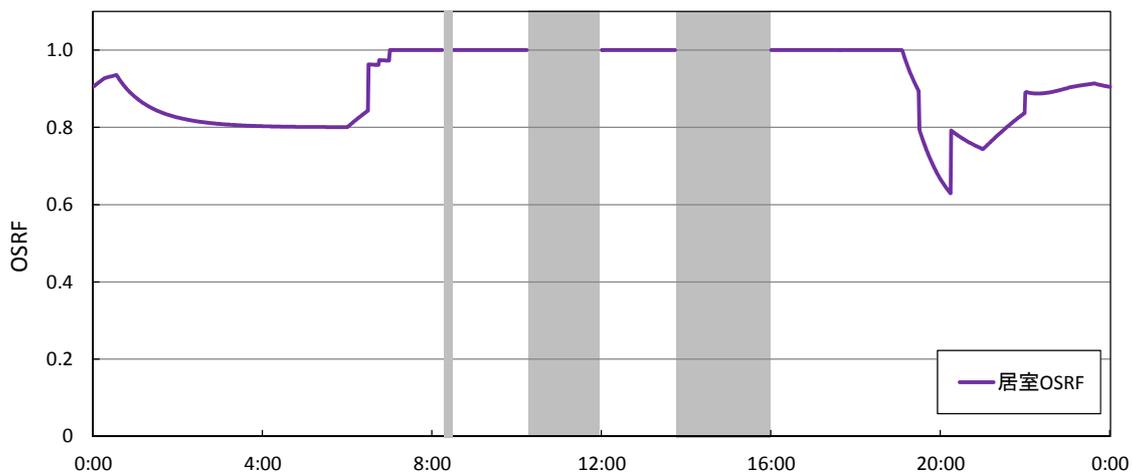


図 B-15 第一種換気システム (5 ヶ月後) による OSRF

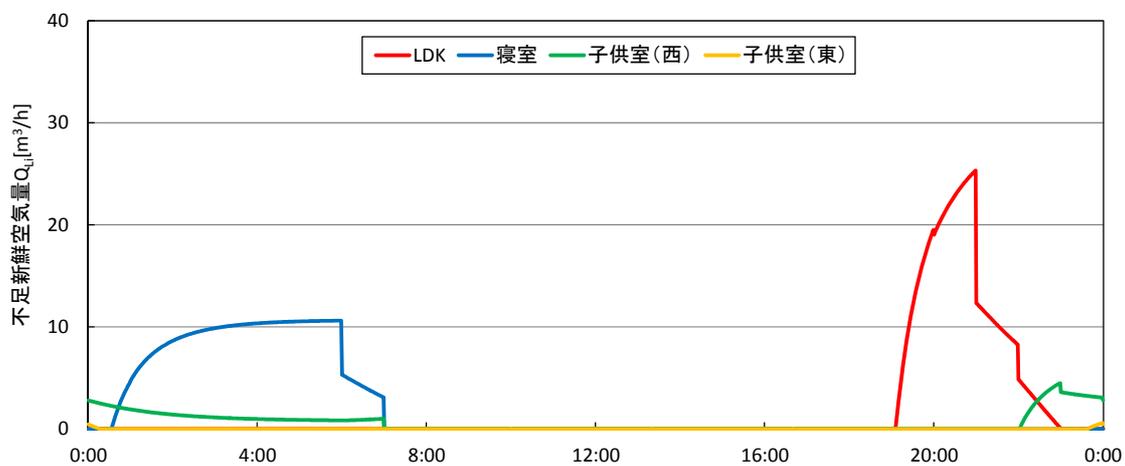


図 B-16 第一種換気システム (5 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・半年後

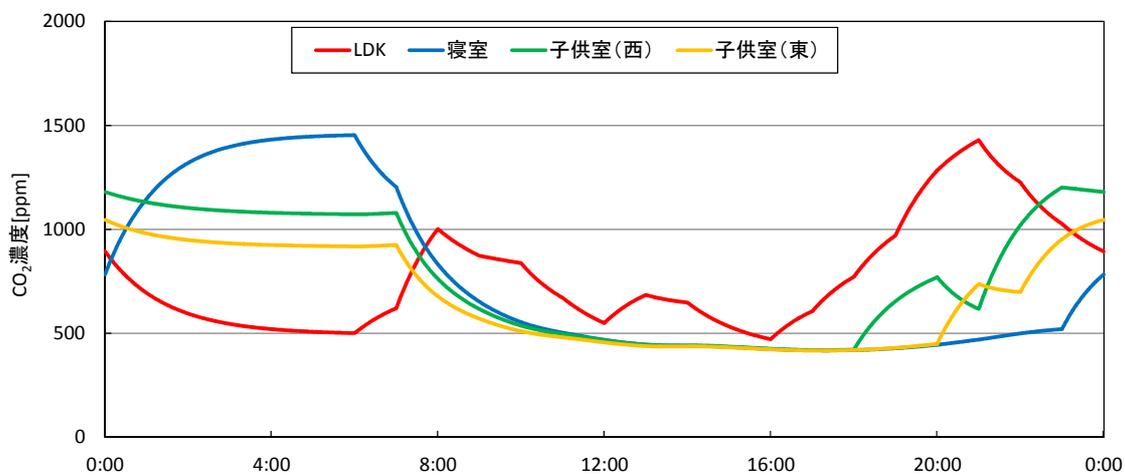


図 B-17 第一種換気システム (半年後) による CO<sub>2</sub> 濃度

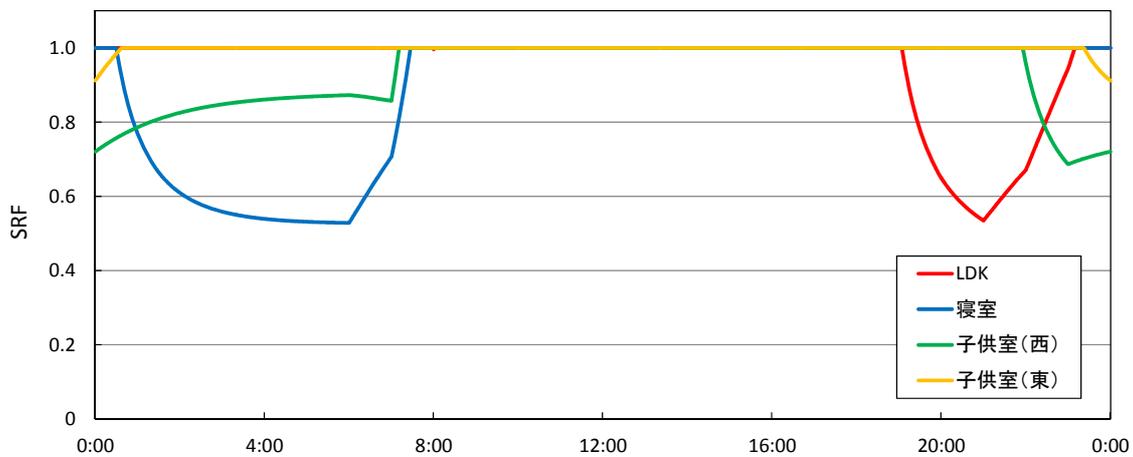


図 B-18 第一種換気システム（半年後）による SRF

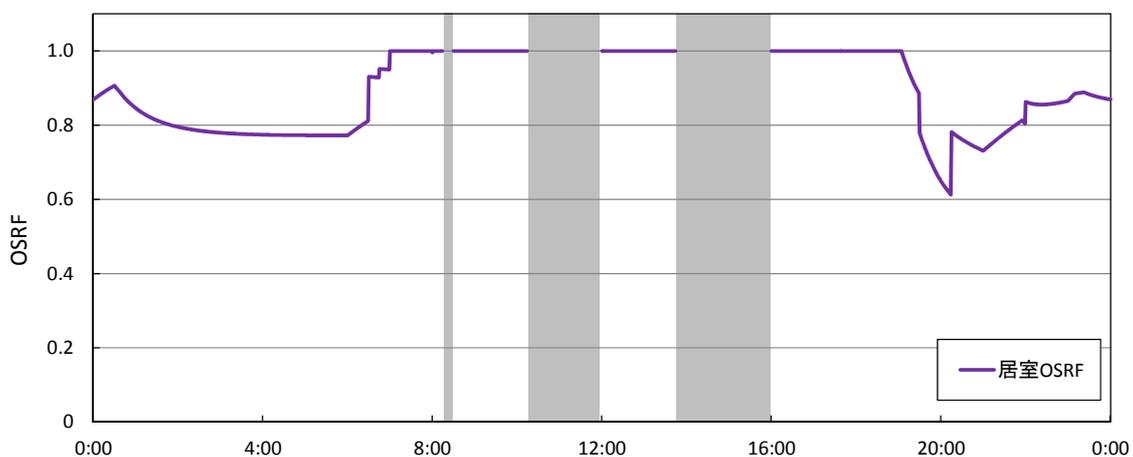


図 B-19 第一種換気システム（半年後）による OSRF

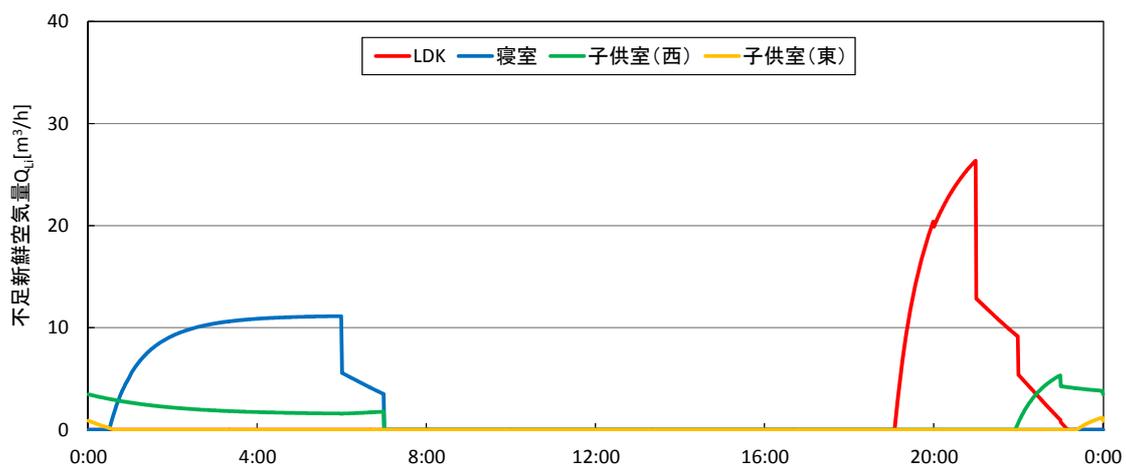


図 B-20 第一種換気システム（半年後）における不足新鮮空気量の変化

・7ヶ月後

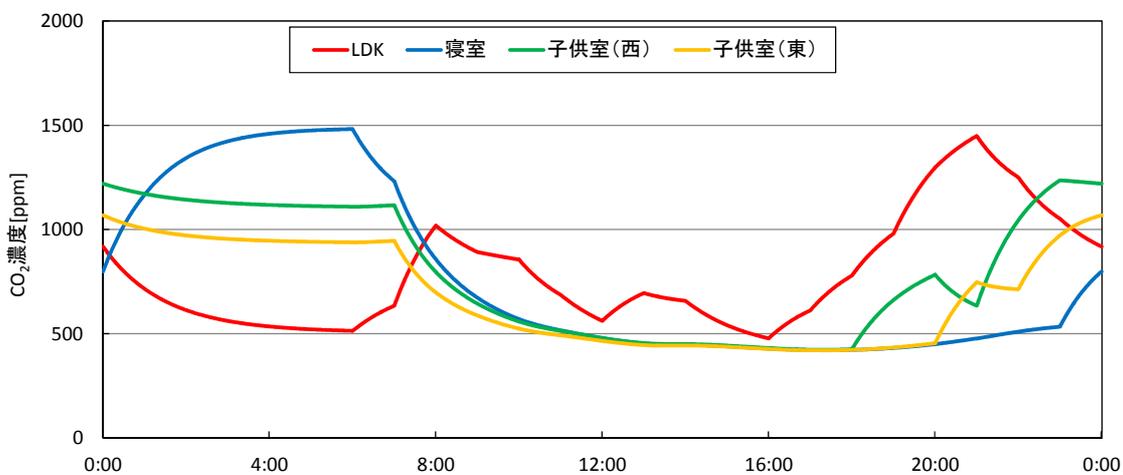


図 B-21 第一種換気システム (7ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

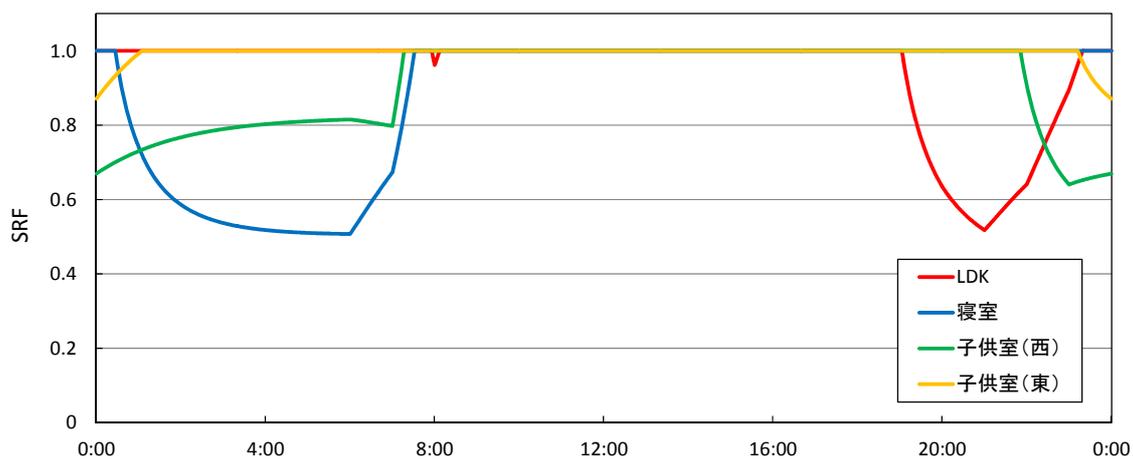


図 B-22 第一種換気システム (7ヶ月後) による SRF

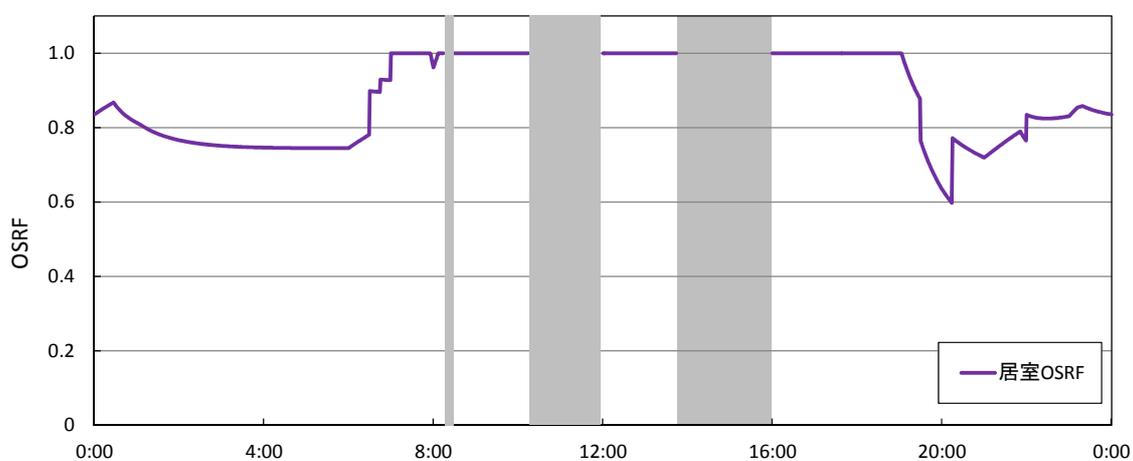


図 B-23 第一種換気システム (7ヶ月後) による OSRF

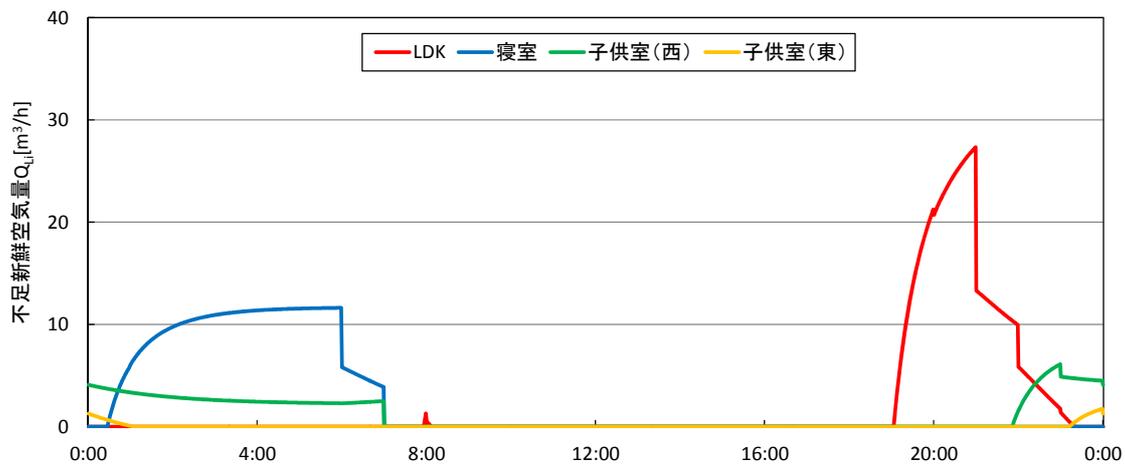


図 B-24 第一種換気システム (7 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 8 ヶ月後

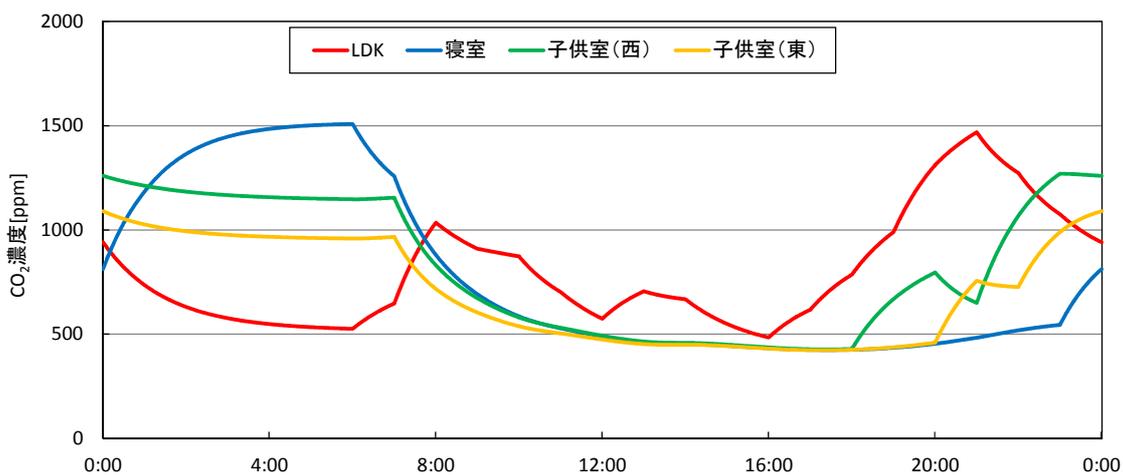


図 B-25 第一種換気システム (8 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

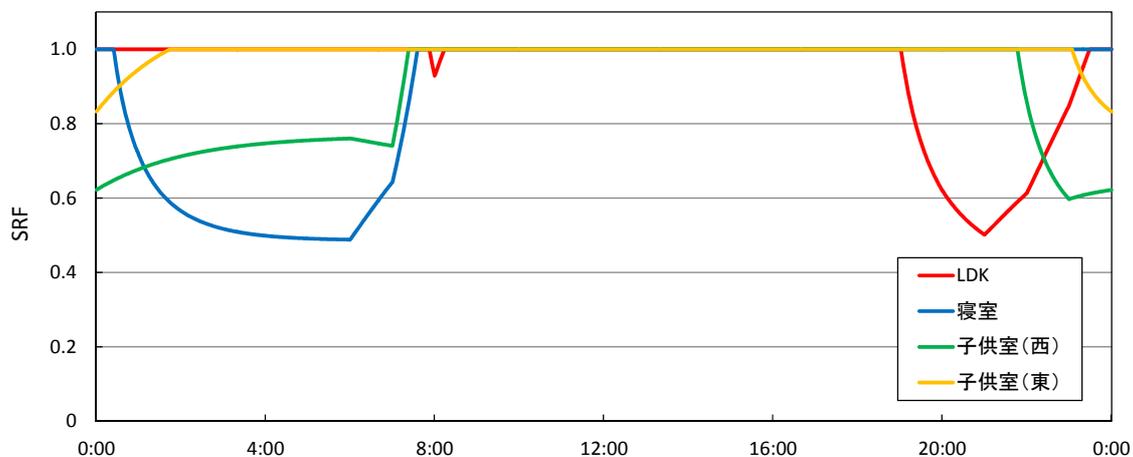


図 B-26 第一種換気システム (8 ヶ月後) による SRF

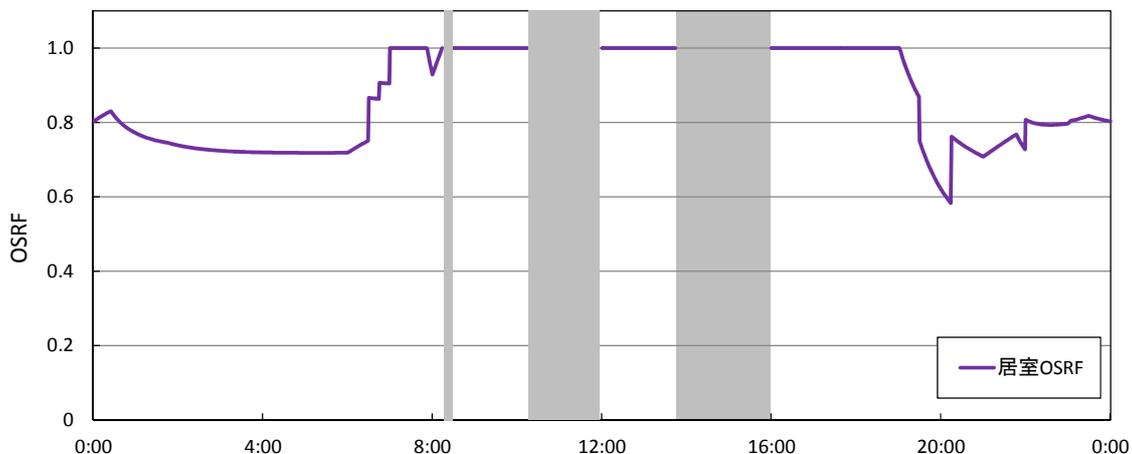


図 B-27 第一種換気システム (8 ヶ月後) による OSRF

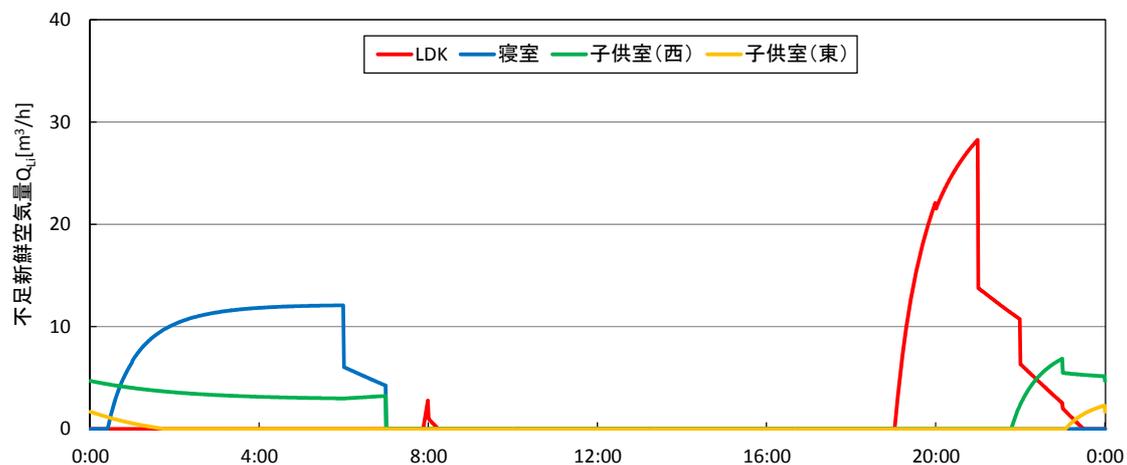


図 B-28 第一種換気システム (8 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 9 ヶ月後

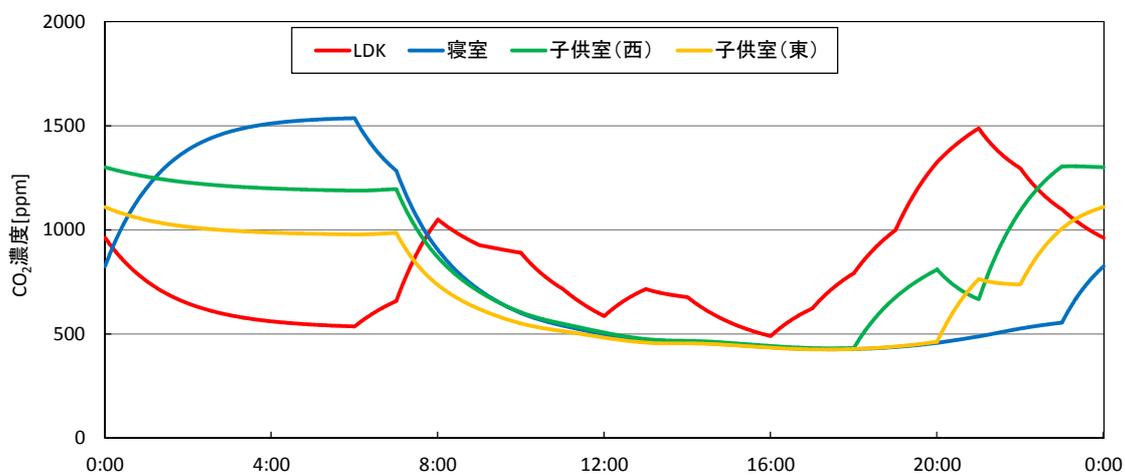


図 B-29 第一種換気システム (9 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

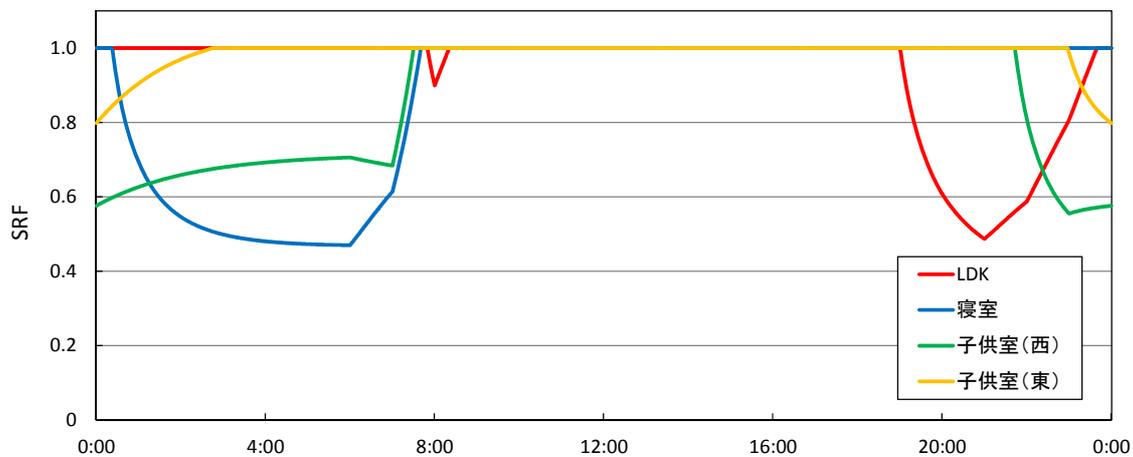


図 B-30 第一種換気システム (9 ヶ月後) による SRF

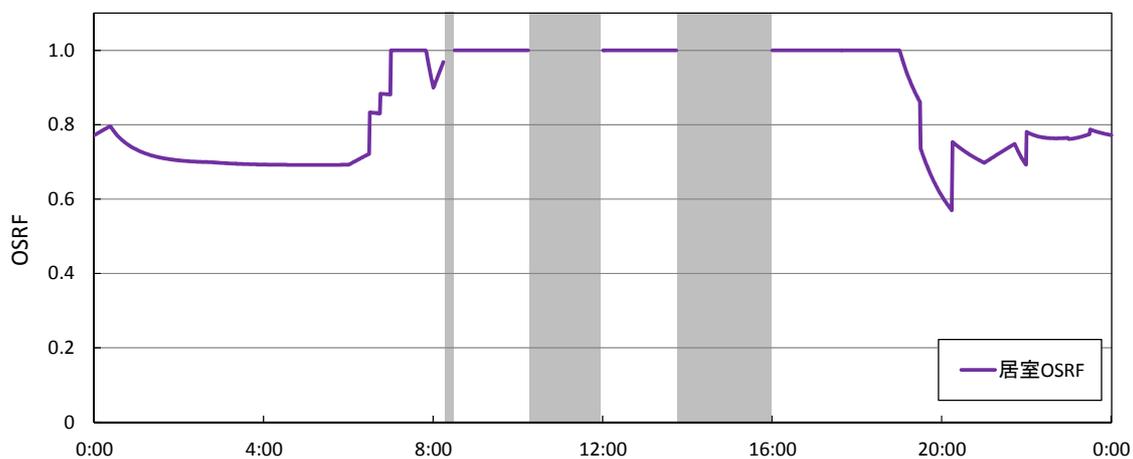


図 B-31 第一種換気システム (9 ヶ月後) による OSRF

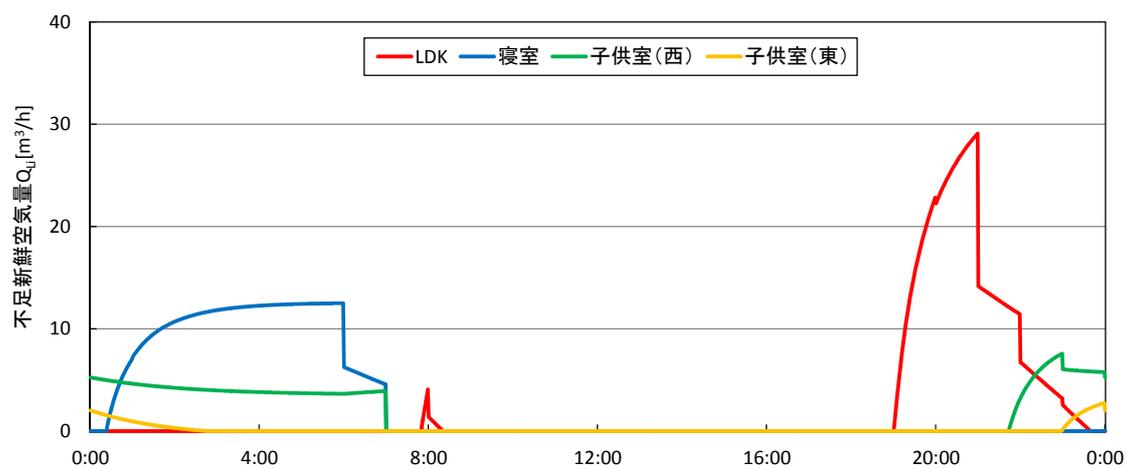


図 B-32 第一種換気システム (9 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 10 ヶ月後

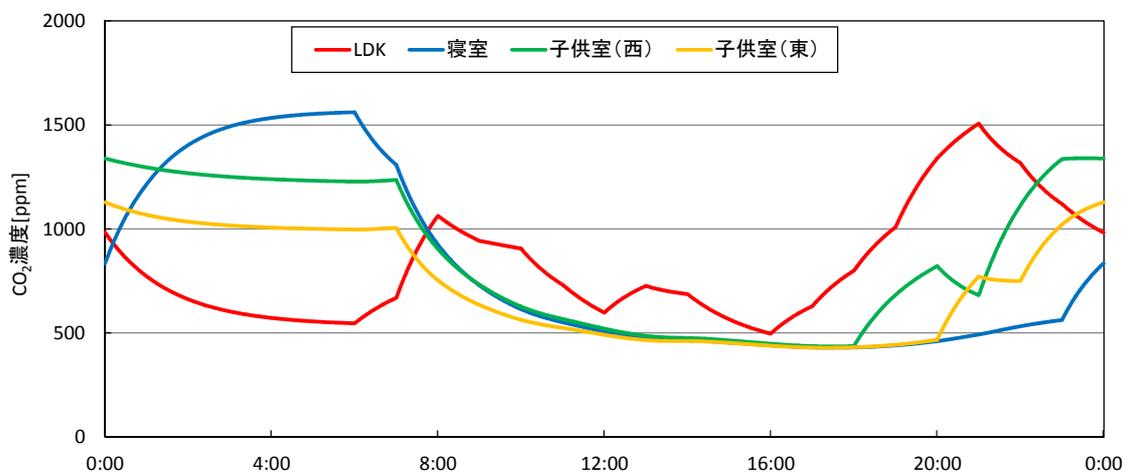


図 B-33 第一種換気システム (10 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

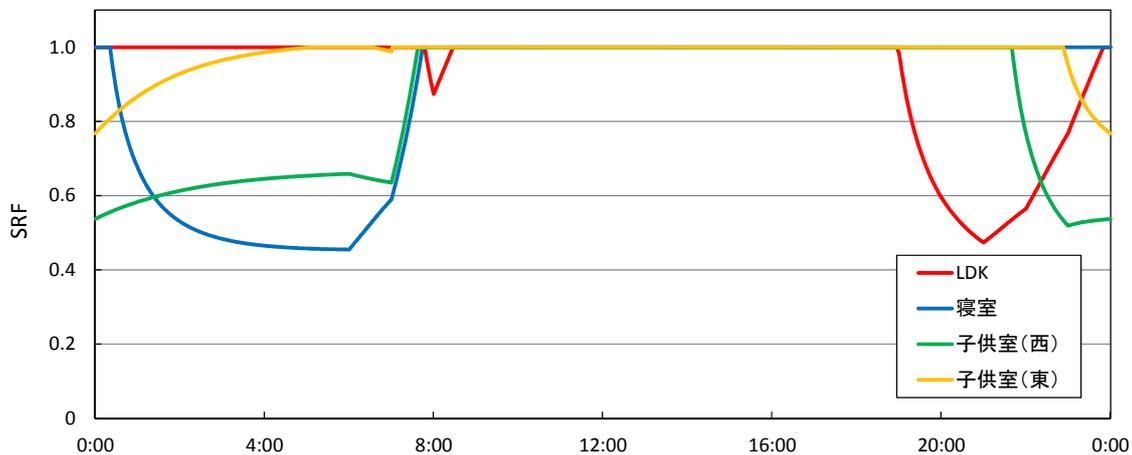


図 B-34 第一種換気システム (10 ヶ月後) による SRF

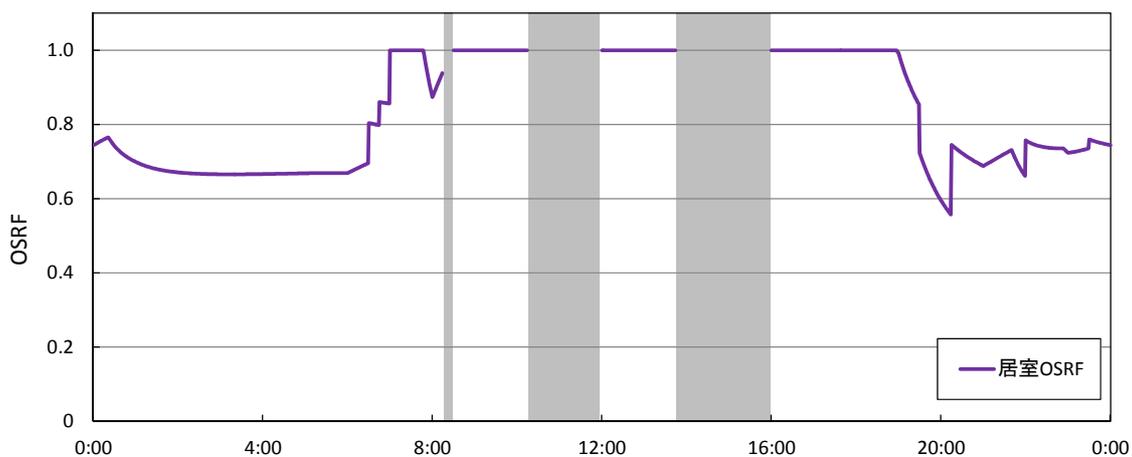


図 B-35 第一種換気システム (10 ヶ月後) による OSRF

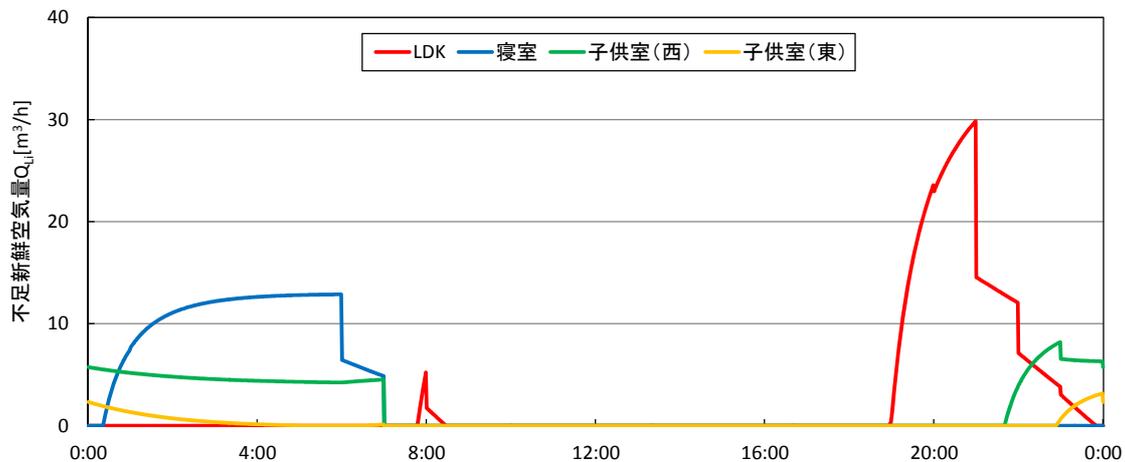


図 B-36 第一種換気システム (10 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 11 ヶ月後

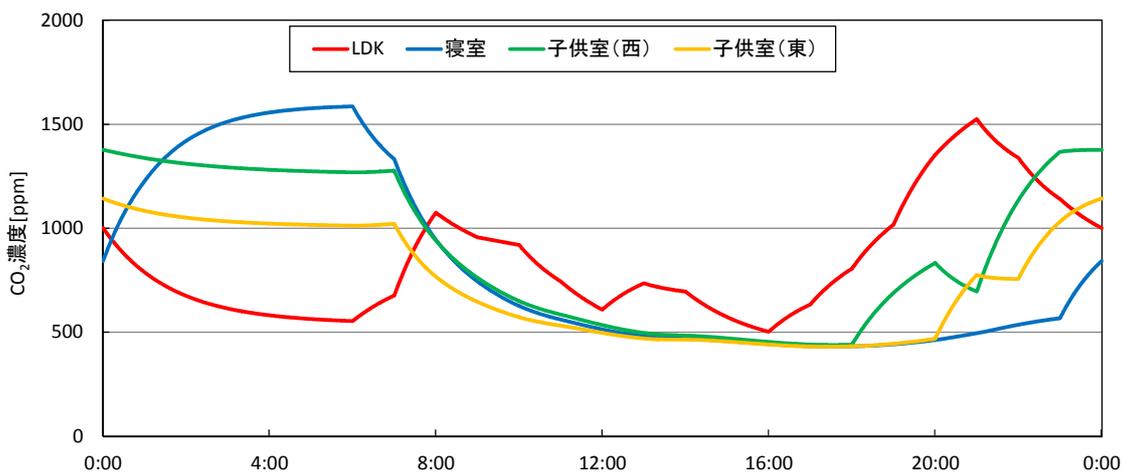


図 B-37 第一種換気システム (11 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

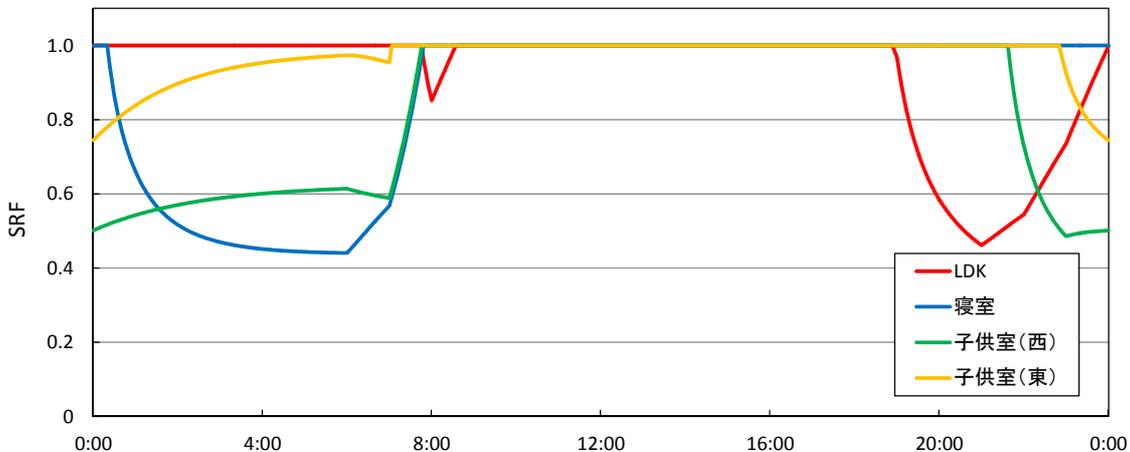


図 B-38 第一種換気システム (11 ヶ月後) による SRF

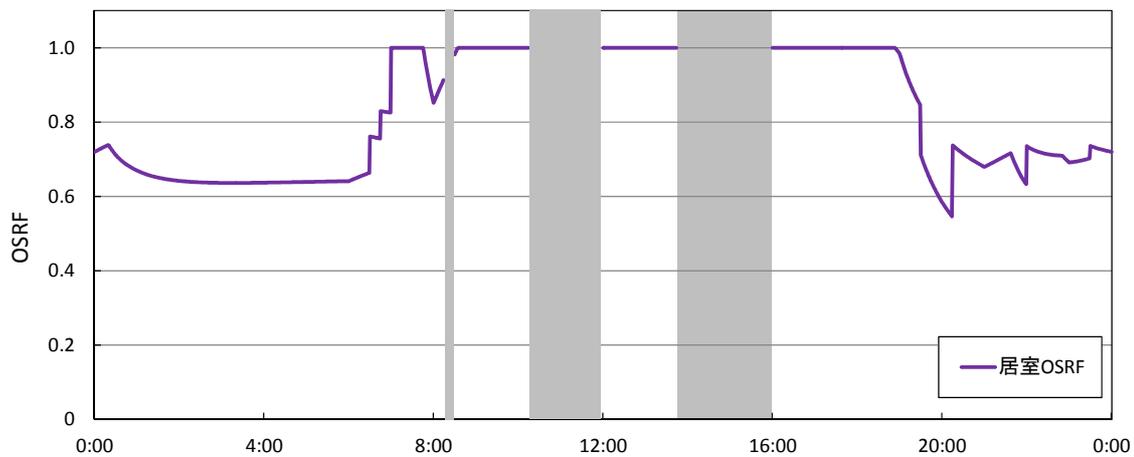


図 B-39 第一種換気システム（11 ヶ月後）による OSRF

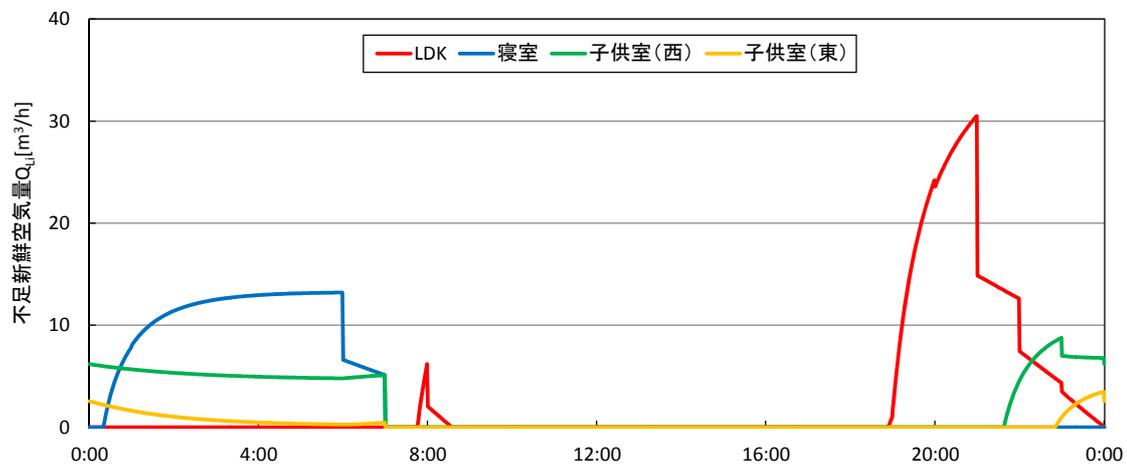


図 B-40 第一種換気システム（11 ヶ月後）における不足新鮮空気量の変化

上記に示したのは、図 5-3 の自立循環型住宅の換気計画に則った換気性能の算出結果である。以下に、本論文内では扱わなかった図 5-2 の省エネルギー基準の換気計画を用いて行った第一種換気システムの計算結果を経過時間別に示す。

・ 性能値

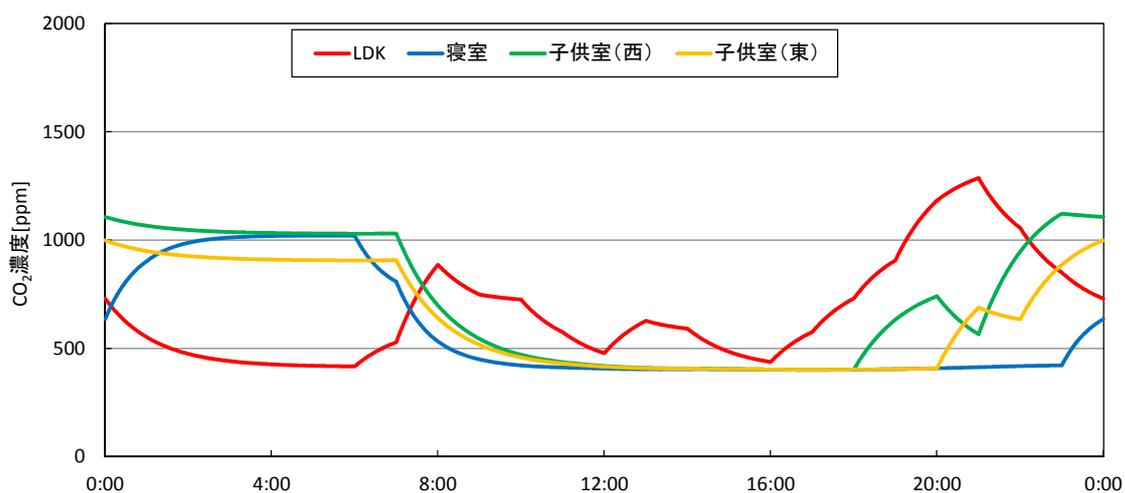


図 B-41 第一種換気システム（性能値）による CO<sub>2</sub> 濃度

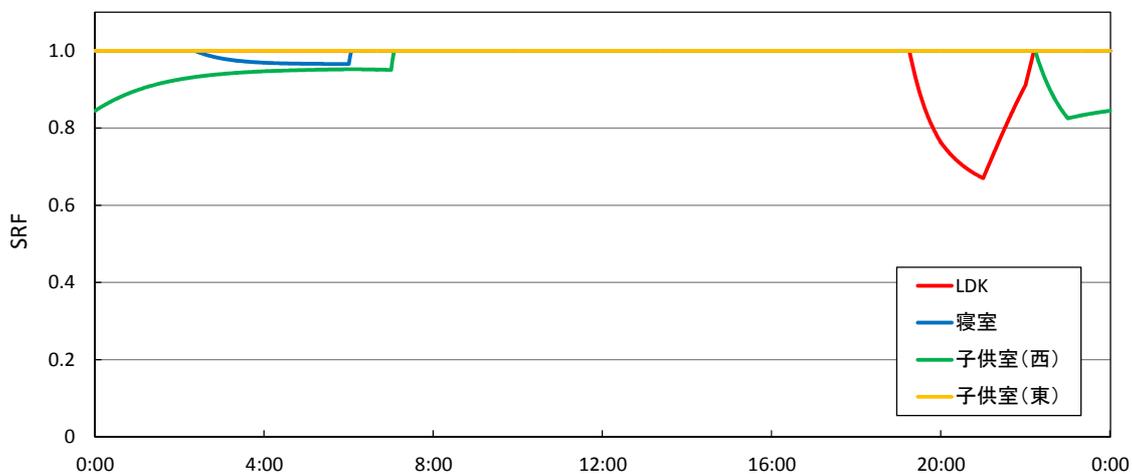


図 B-42 第一種換気システム（性能値）による SRF

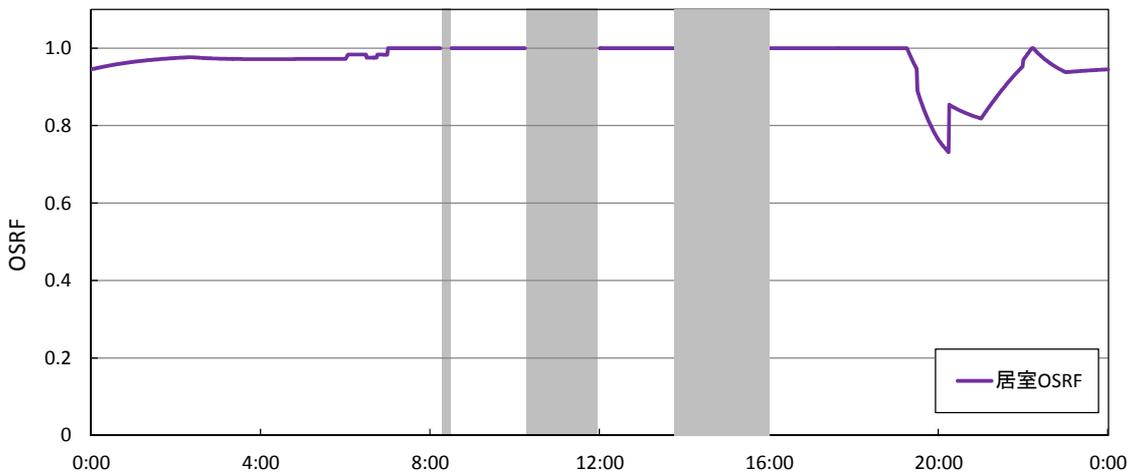


図 B-43 第一種換気システム（性能値）による OSRF

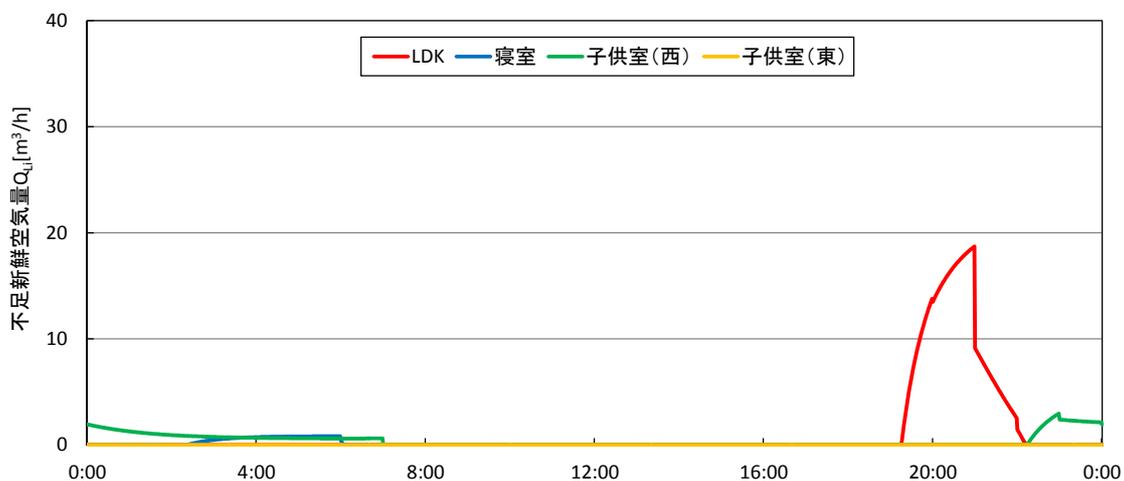


図 B-44 第一種換気システム（性能値）における不足新鮮空気量の変化

・1ヶ月後

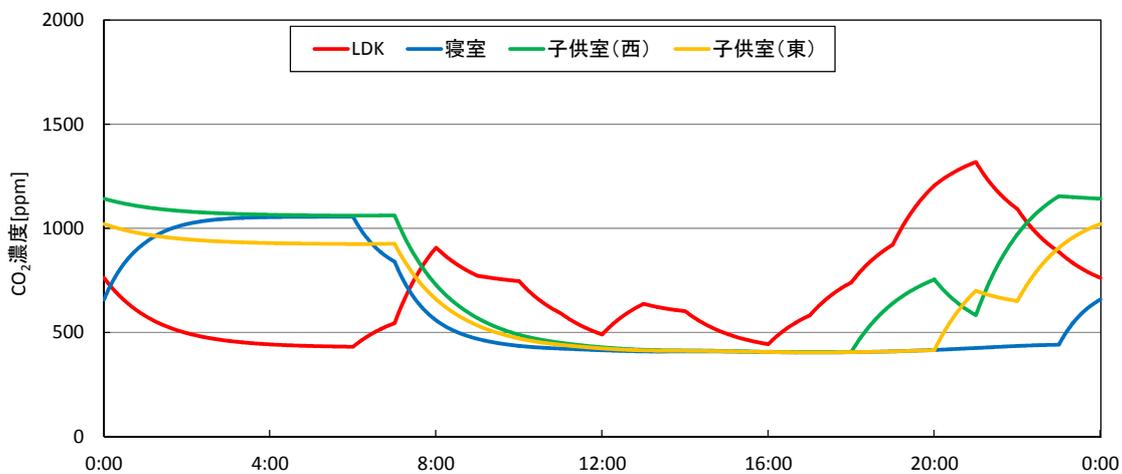


図 B-45 第一種換気システム（1ヶ月後）による CO<sub>2</sub> 濃度

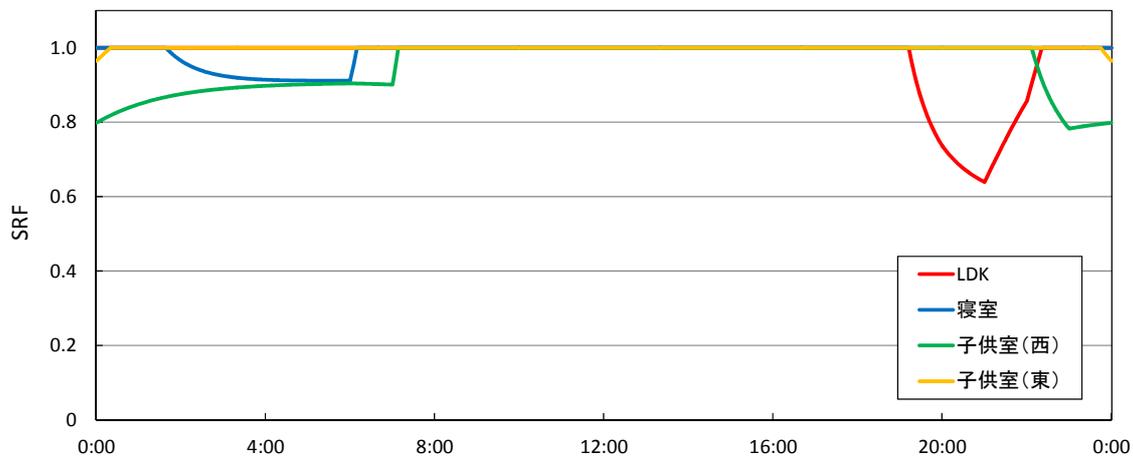


図 B-46 第一種換気システム (1 ヶ月後) による SRF

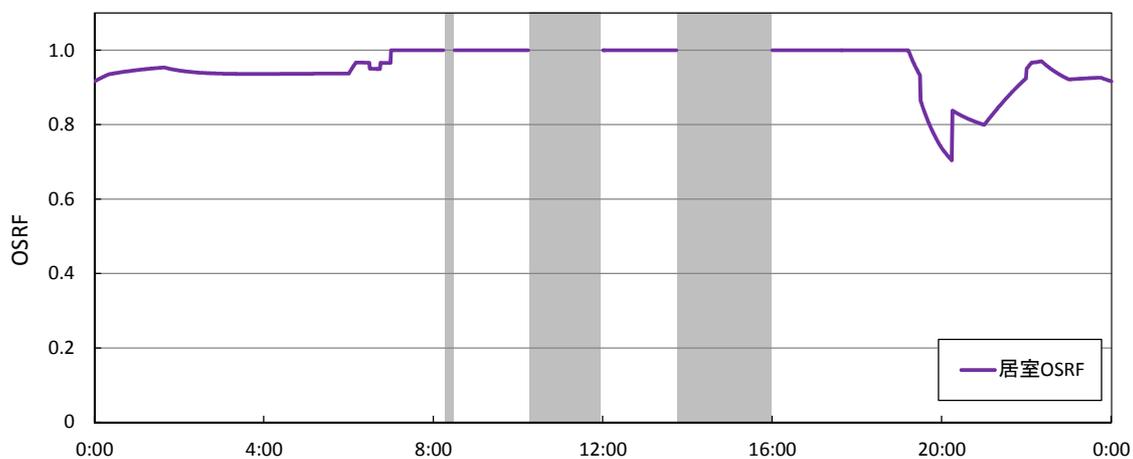


図 B-47 第一種換気システム (1 ヶ月後) による OSRF

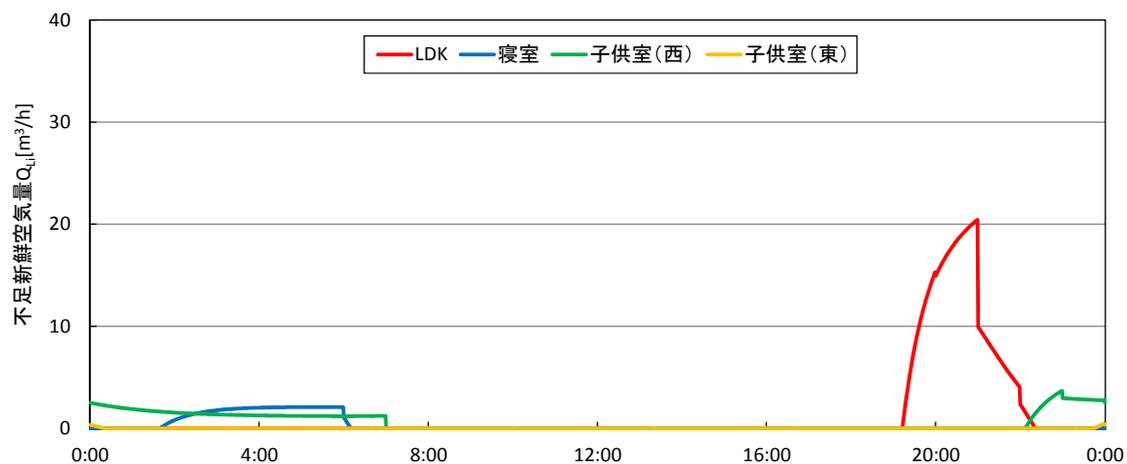


図 B-48 第一種換気システム (1 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 2 ヶ月後

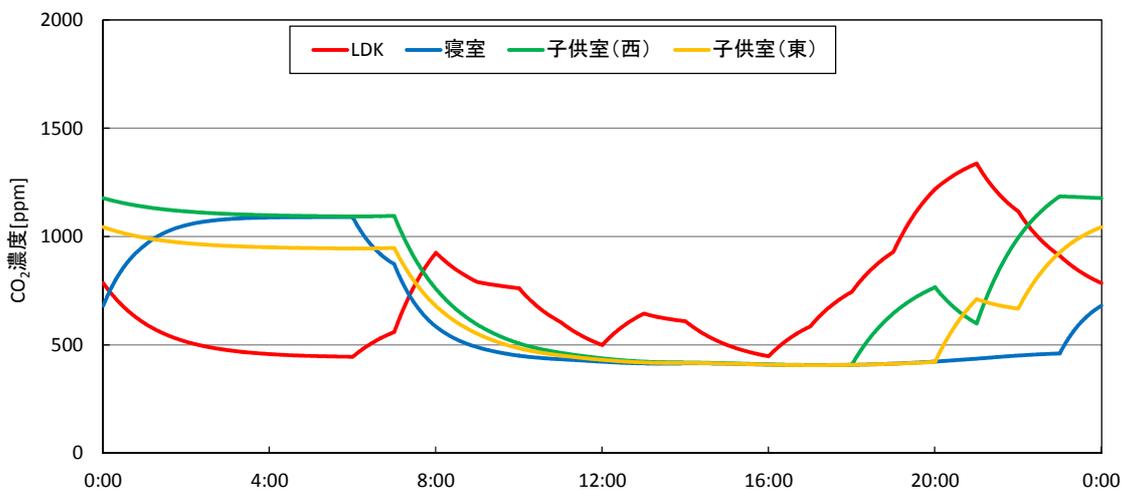


図 B-49 第一種換気システム (2 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

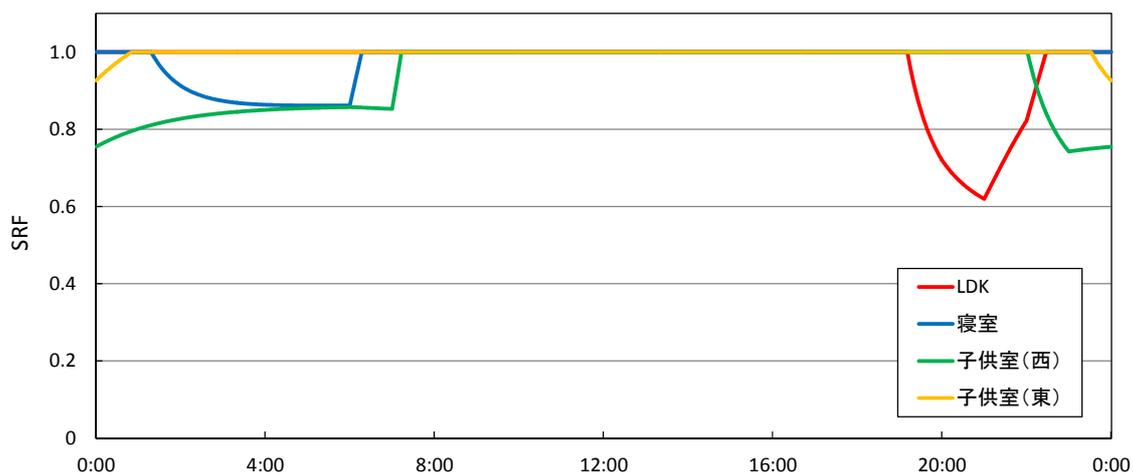


図 B-50 第一種換気システム (2 ヶ月後) による SRF

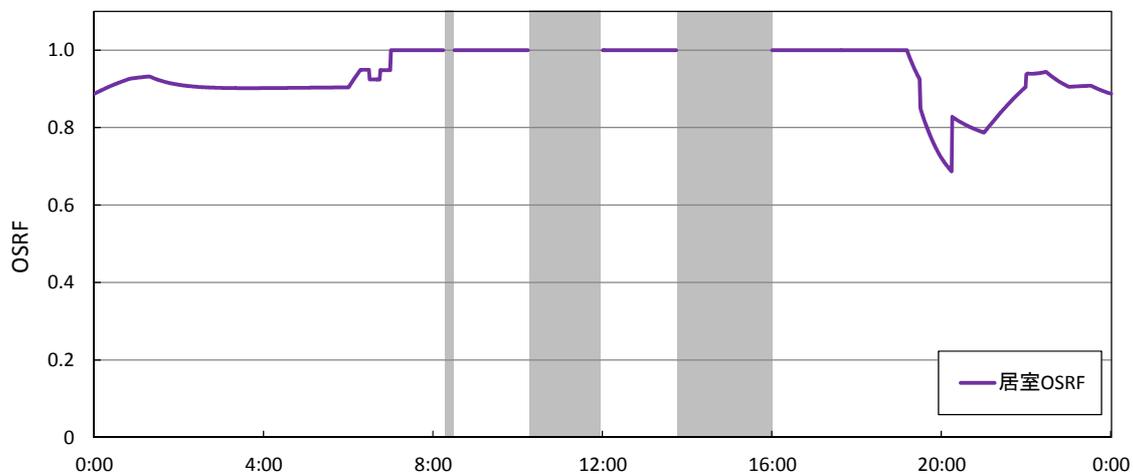


図 B-51 第一種換気システム (2 ヶ月後) による OSRF

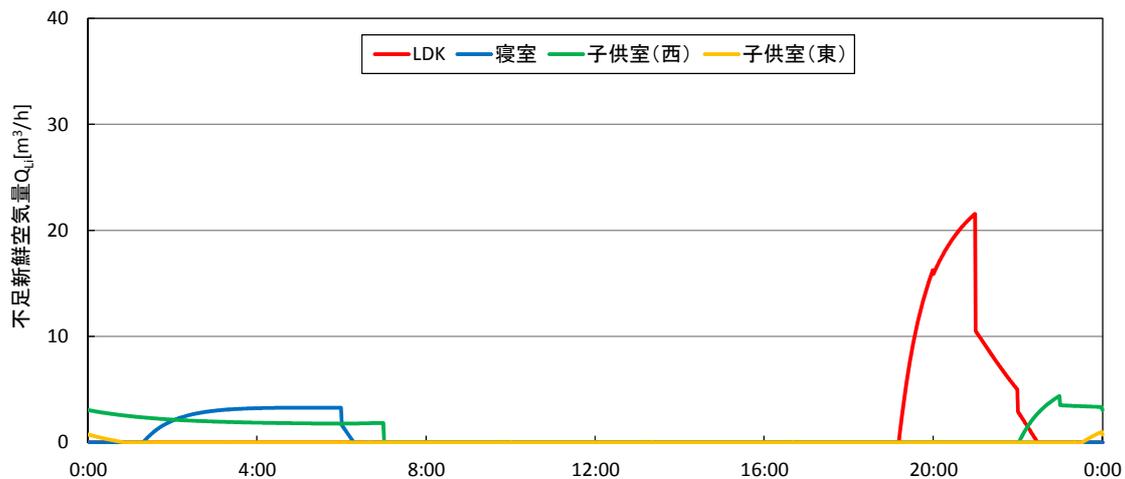


図 B-52 第一種換気システム (2 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 3 ヶ月後

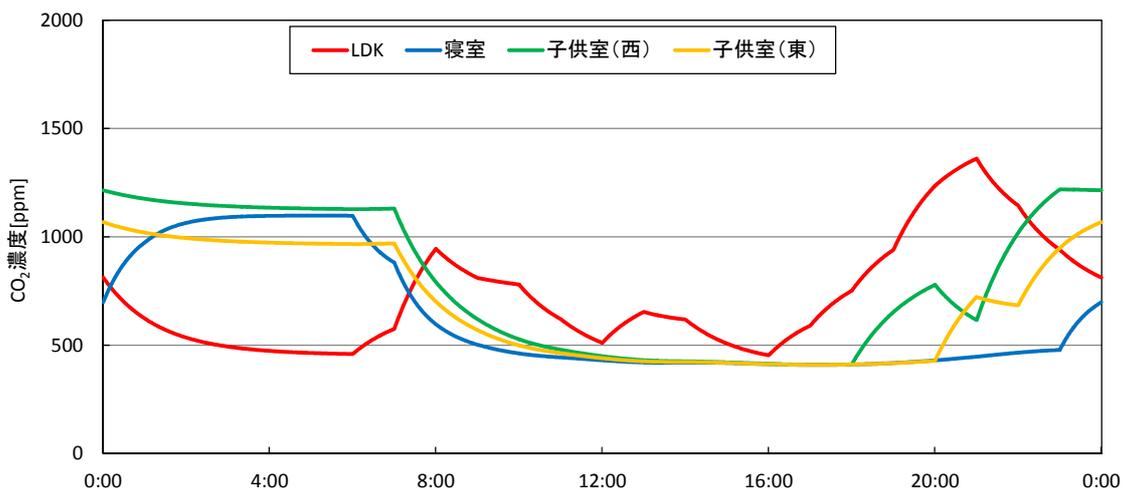


図 B-53 第一種換気システム (3 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

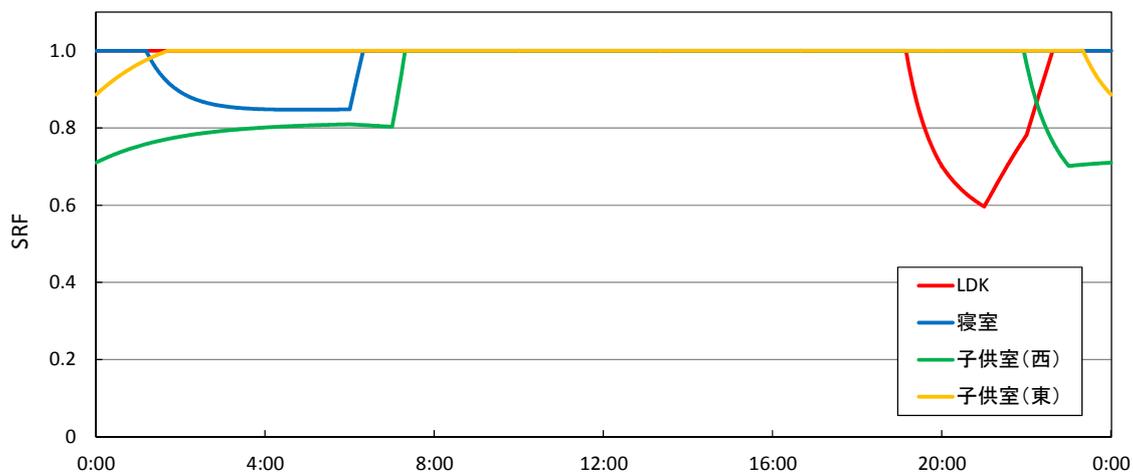


図 B-54 第一種換気システム (3 ヶ月後) による SRF

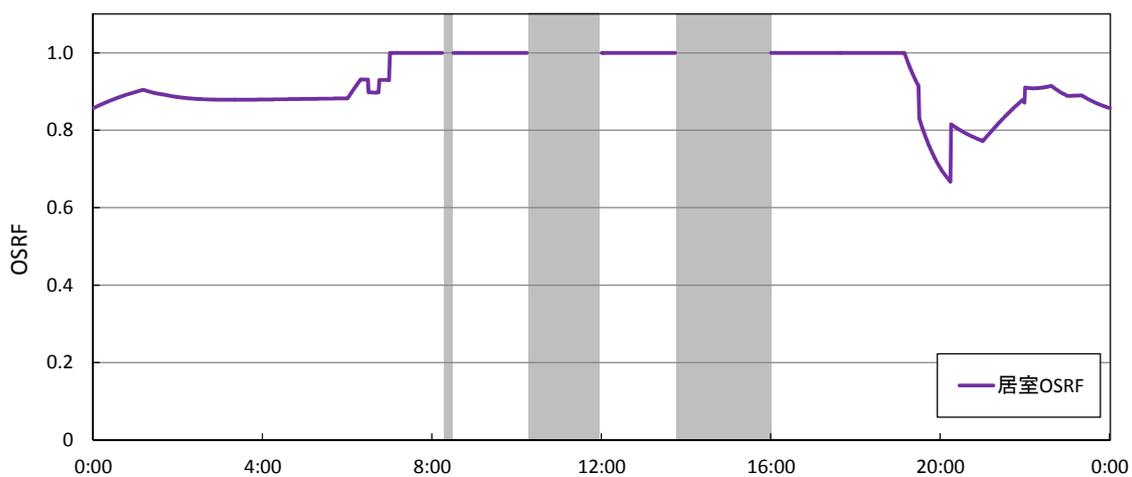


図 B-55 第一種換気システム (3 ヶ月後) による OSRF

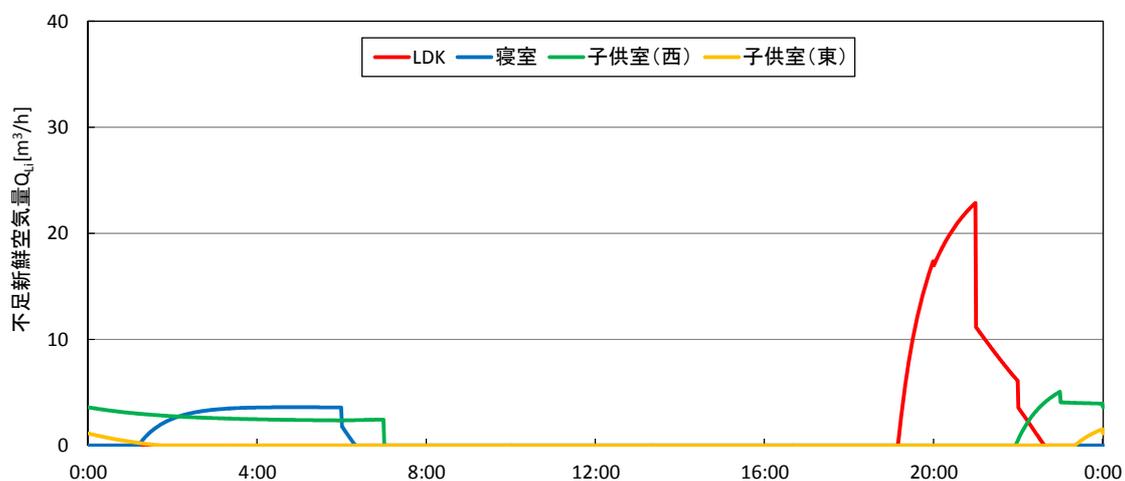


図 B-56 第一種換気システム (3 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 4 ヶ月後

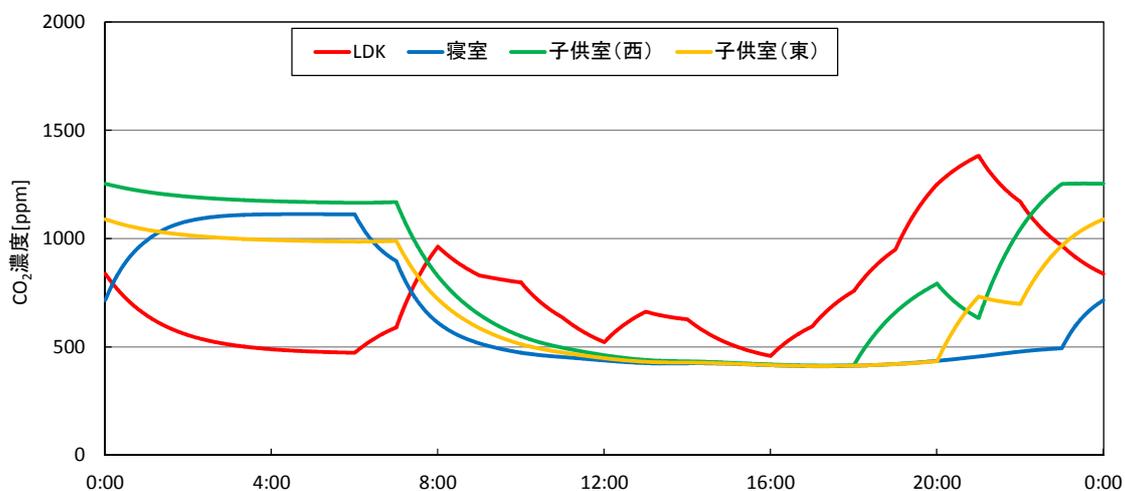


図 B-57 第一種換気システム (4 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

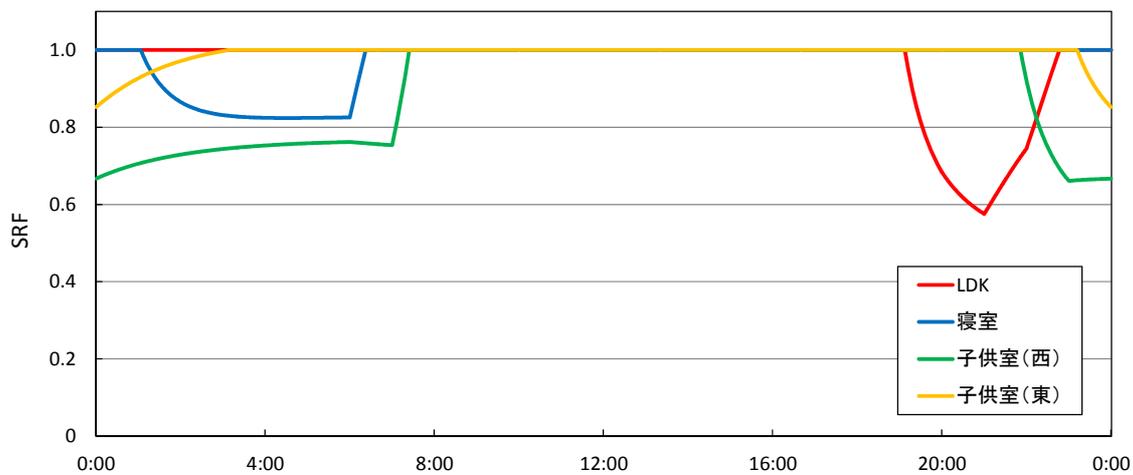


図 B-58 第一種換気システム (4 ヶ月後) による SRF

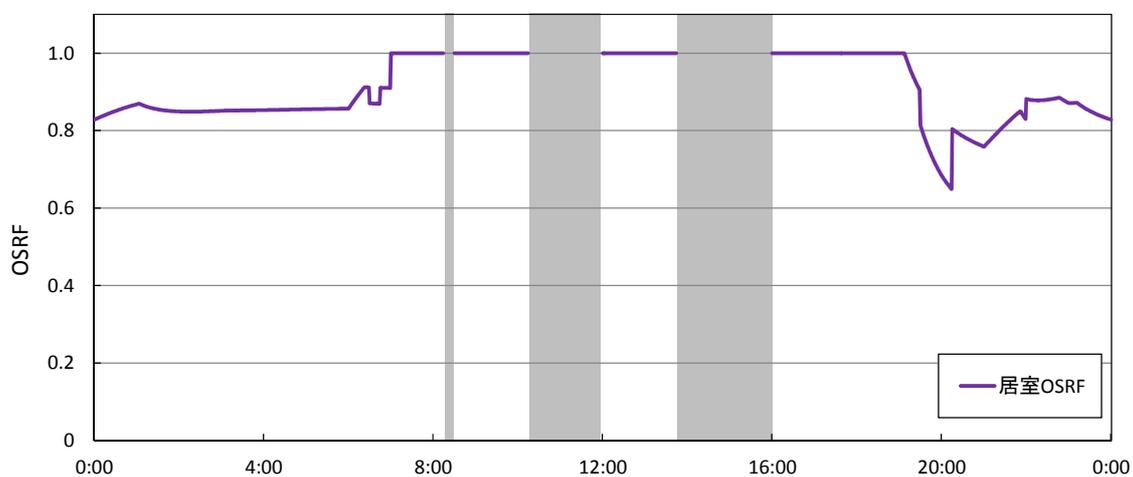


図 B-59 第一種換気システム (4 ヶ月後) による OSRF

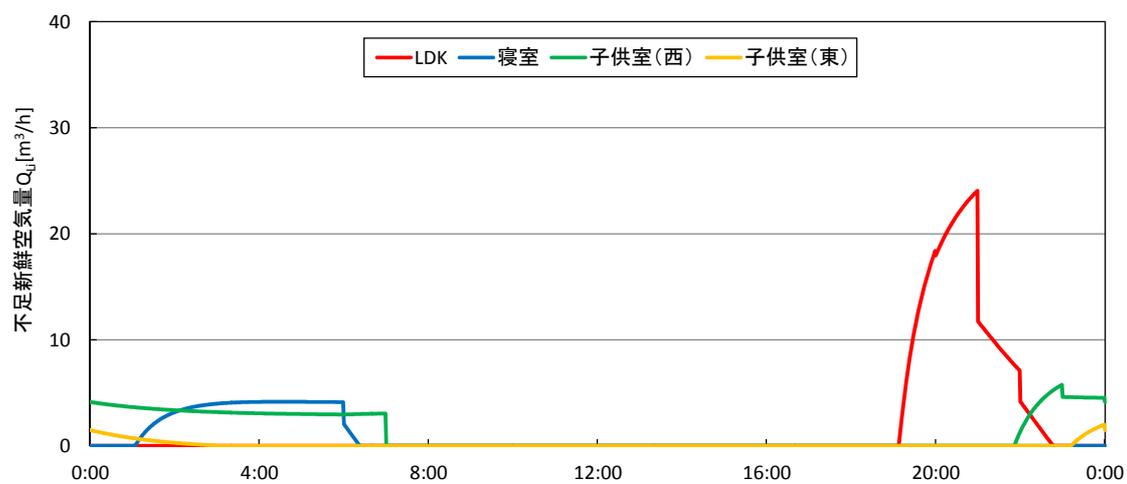


図 B-60 第一種換気システム (4 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・5ヶ月後

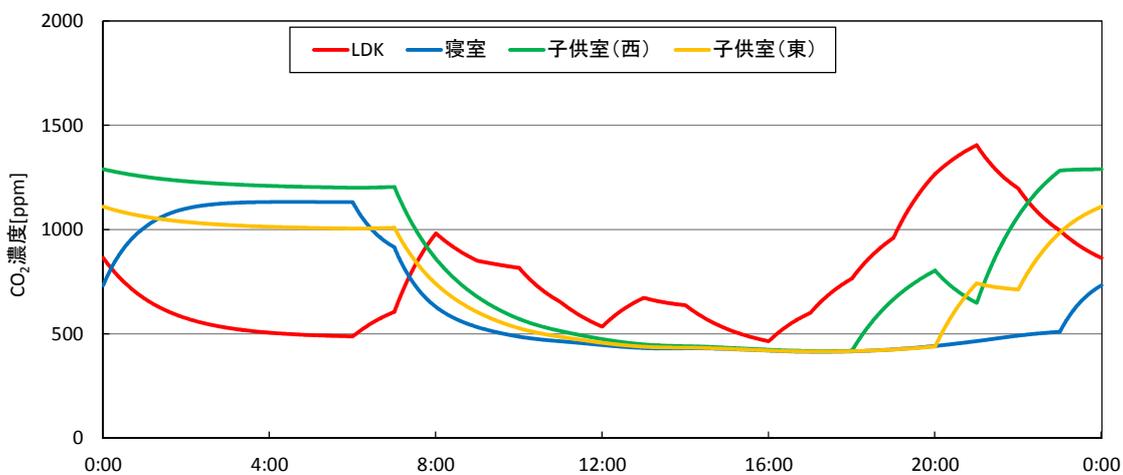


図 B-61 第一種換気システム (5ヶ月後) によるCO<sub>2</sub>濃度

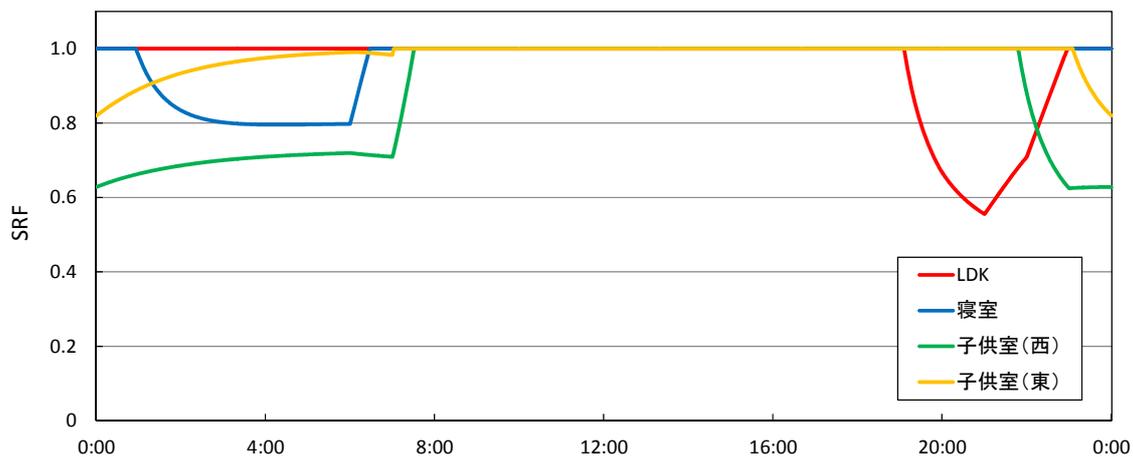


図 B-62 第一種換気システム (5ヶ月後) によるSRF

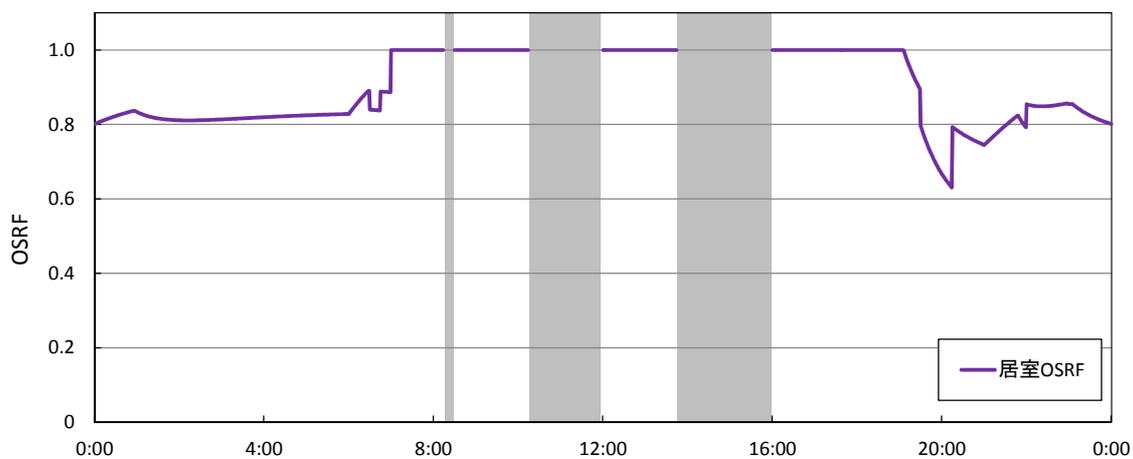


図 B-63 第一種換気システム (5ヶ月後) によるOSRF

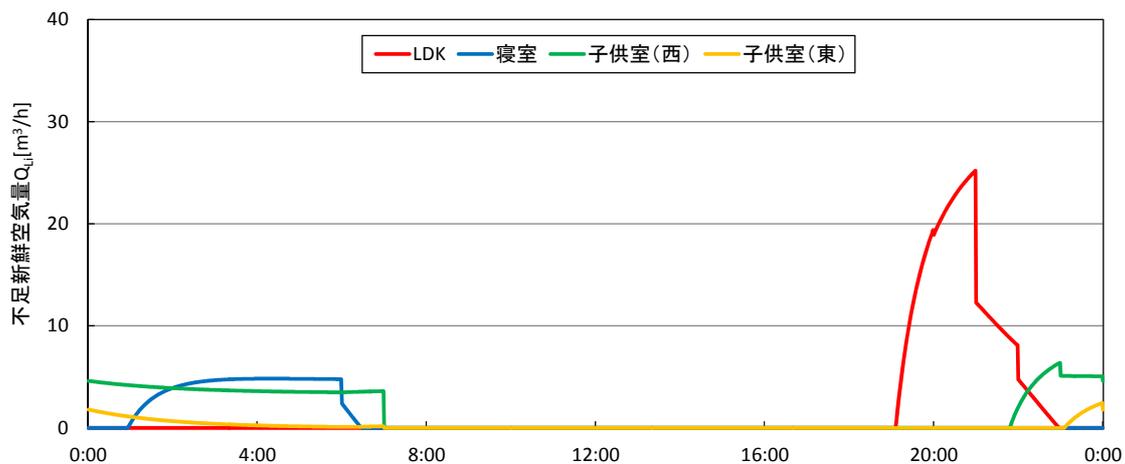


図 B-64 第一種換気システム（5 ヶ月後）における不足新鮮空気量の変化

・半年後

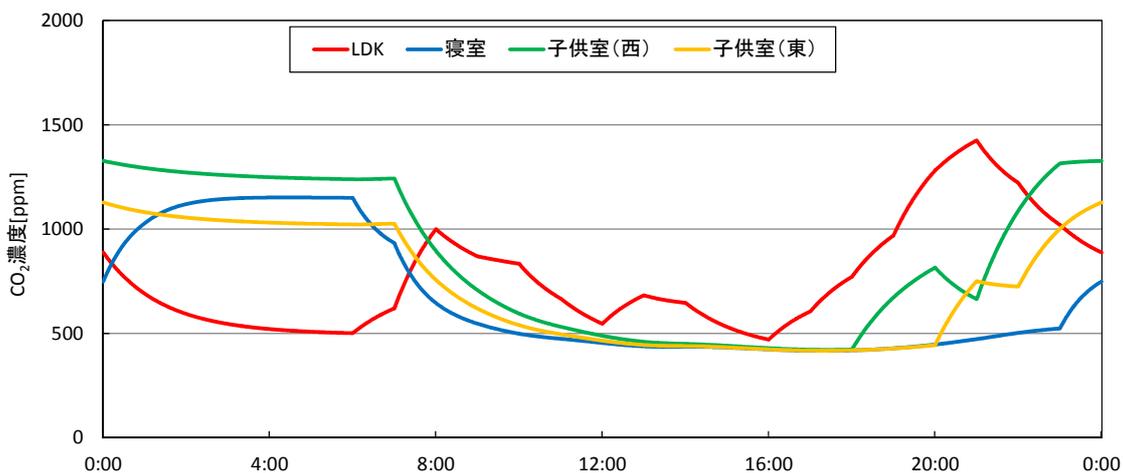


図 B-65 第一種換気システム（半年後）による CO<sub>2</sub> 濃度

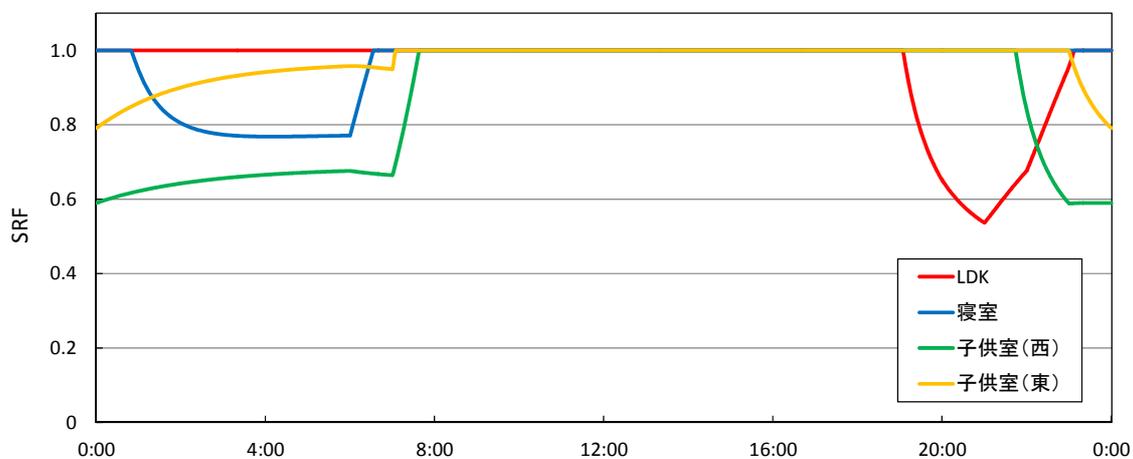


図 B-66 第一種換気システム（半年後）による SRF

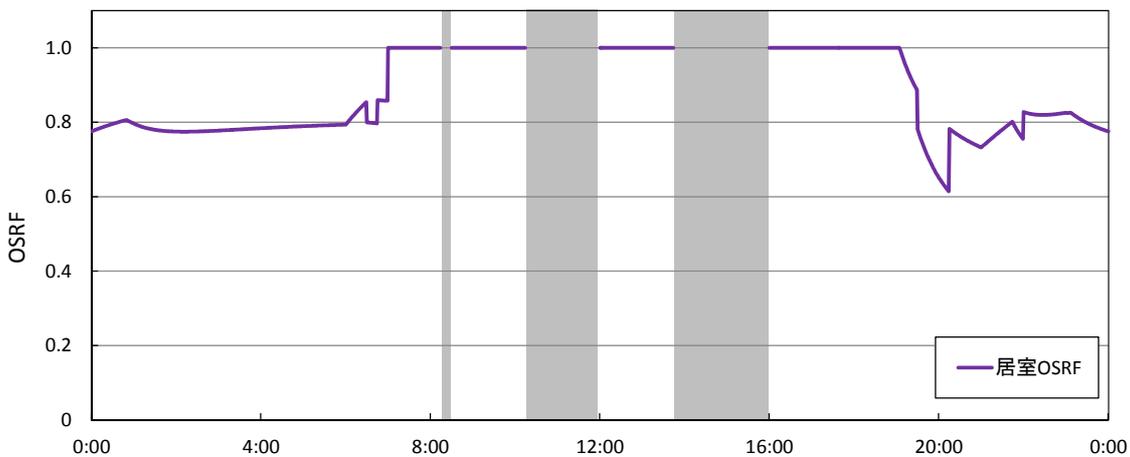


図 B-67 第一種換気システム（半年後）による OSRF

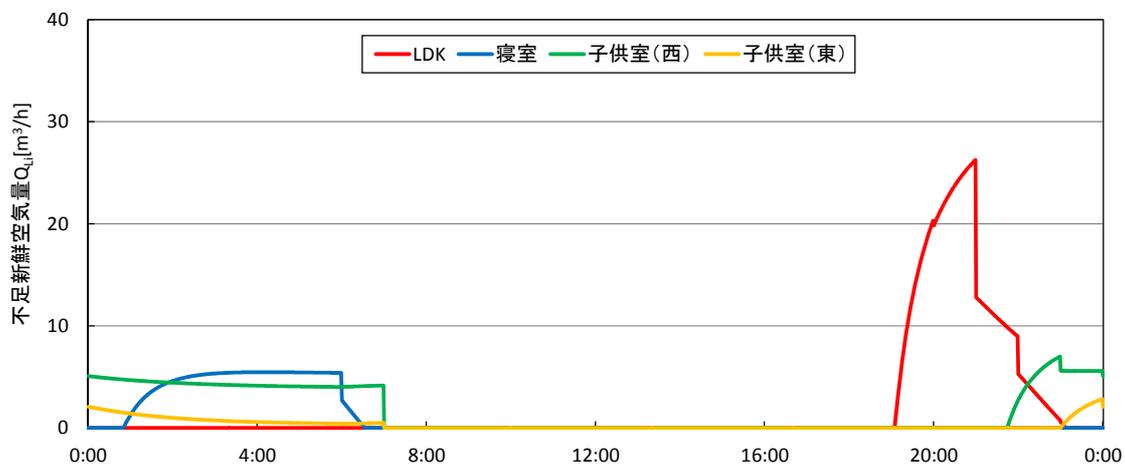


図 B-68 第一種換気システム（半年後）における不足新鮮空気量の変化

・7ヶ月後

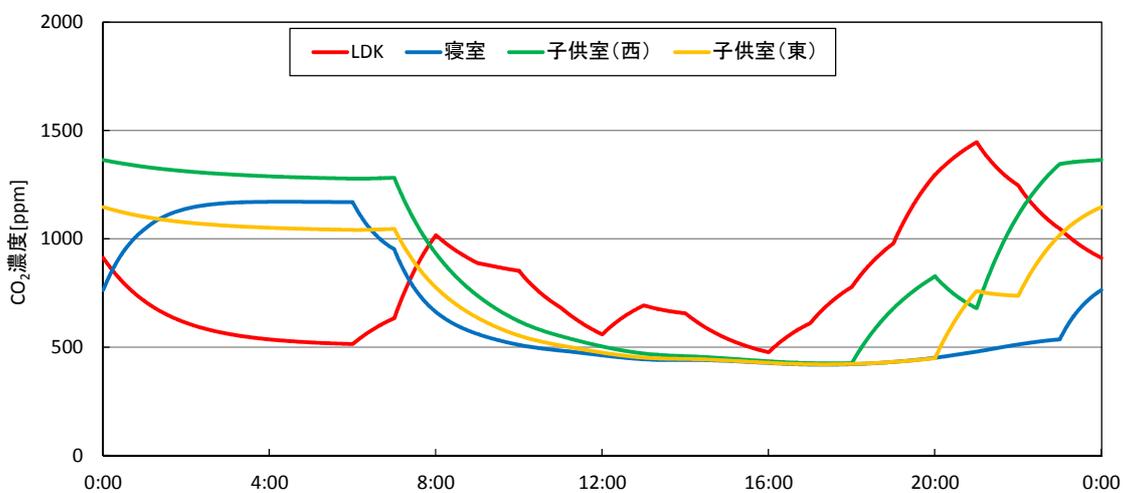


図 B-69 第一種換気システム（7ヶ月後）による CO<sub>2</sub> 濃度

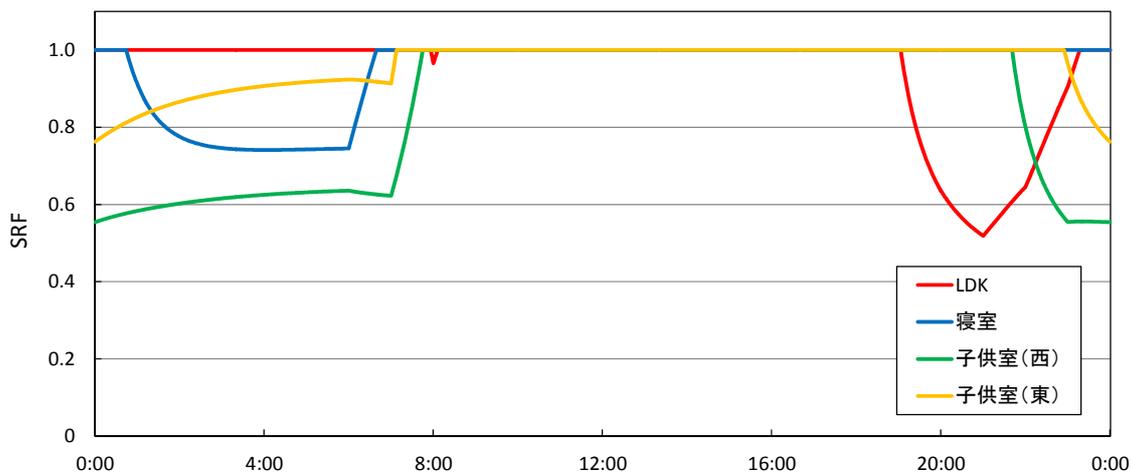


図 B-70 第一種換気システム (7 ヶ月後) による SRF

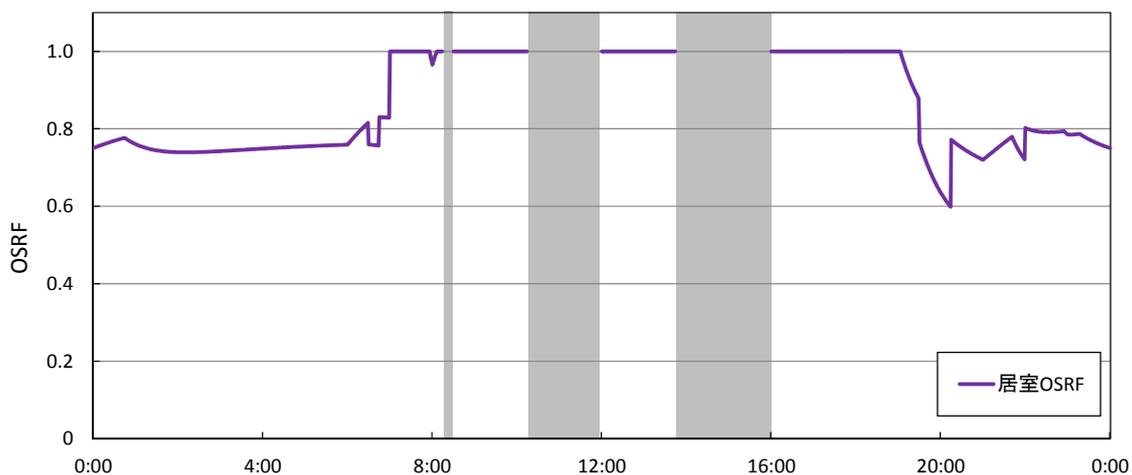


図 B-71 第一種換気システム (7 ヶ月後) による OSRF

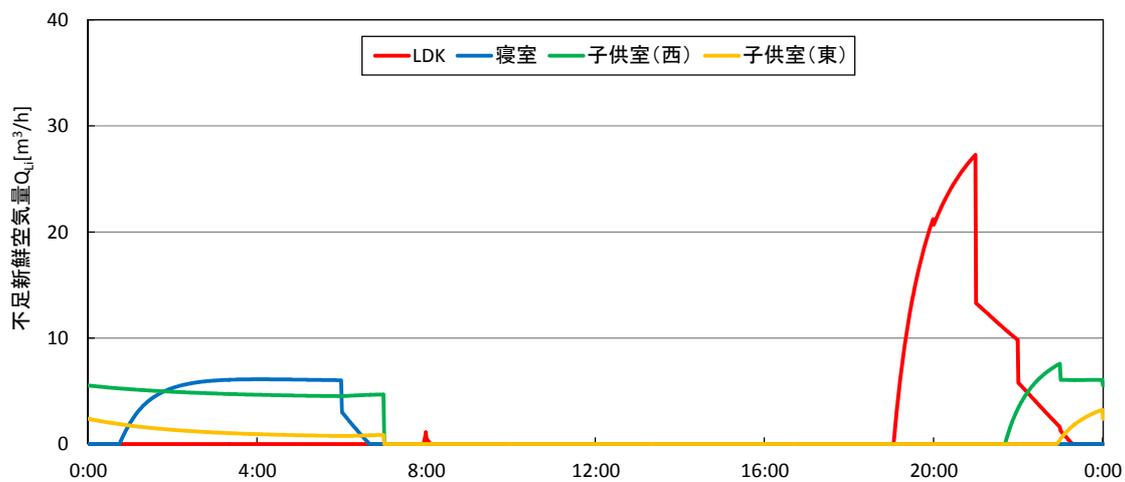


図 B-72 第一種換気システム (7 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 8 ヶ月後

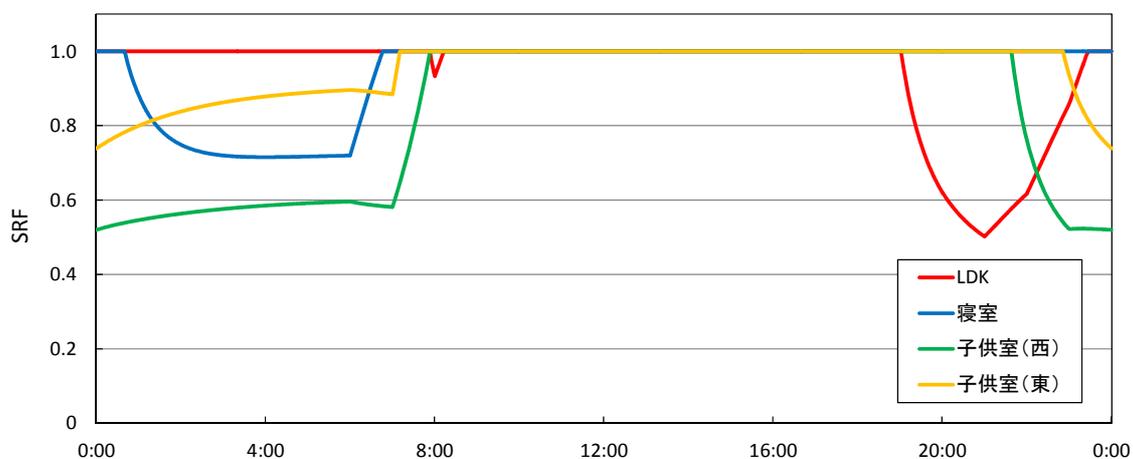


図 B-73 第一種換気システム (8 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

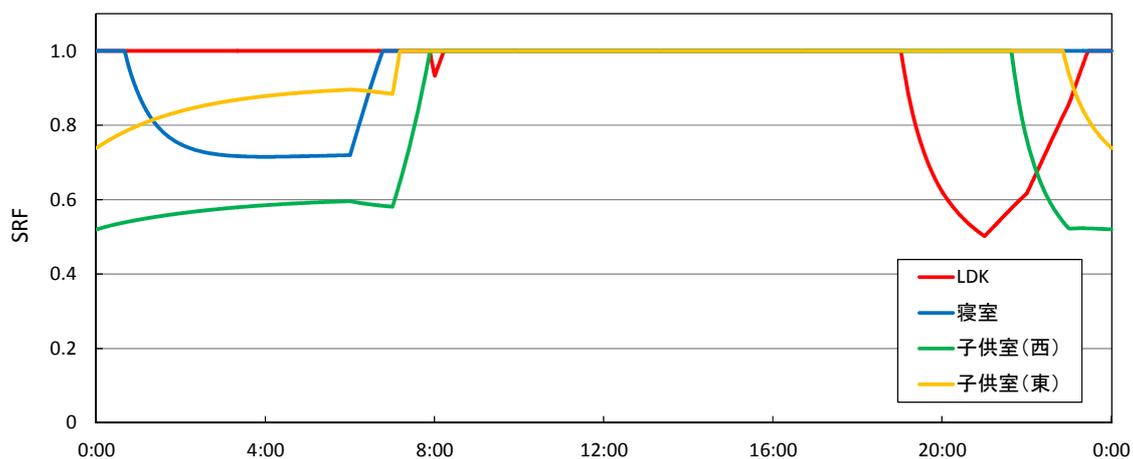


図 B-74 第一種換気システム (8 ヶ月後) による SRF

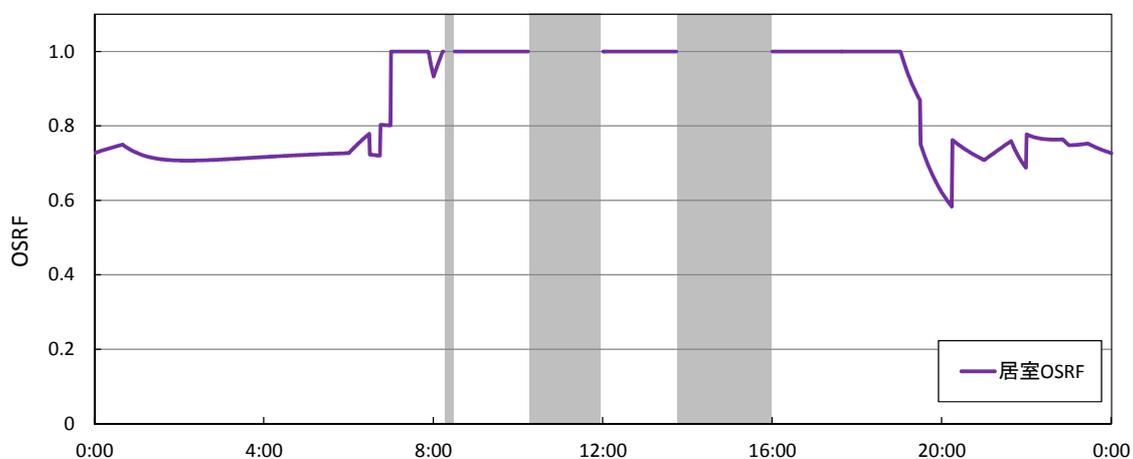


図 B-75 第一種換気システム (8 ヶ月後) による OSRF

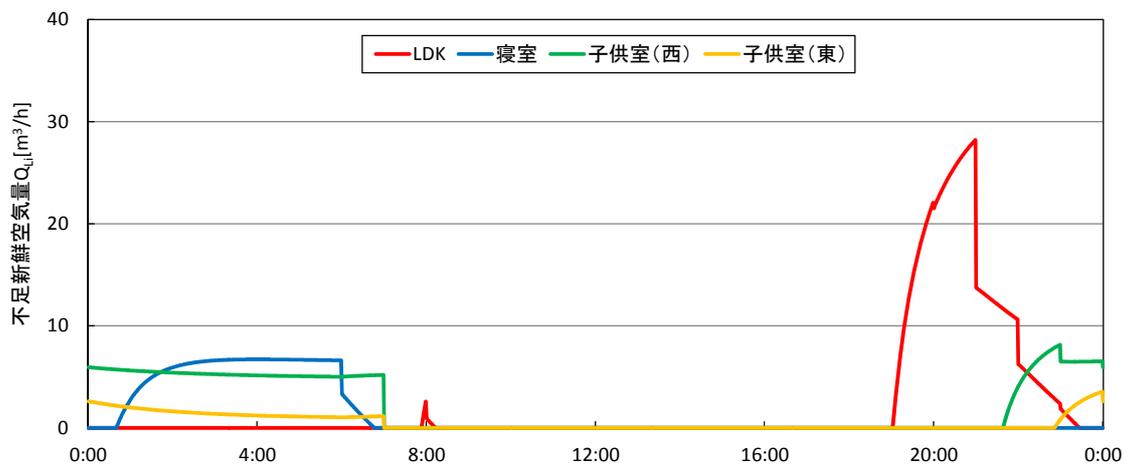


図 B-76 第一種換気システム (8 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 9 ヶ月後

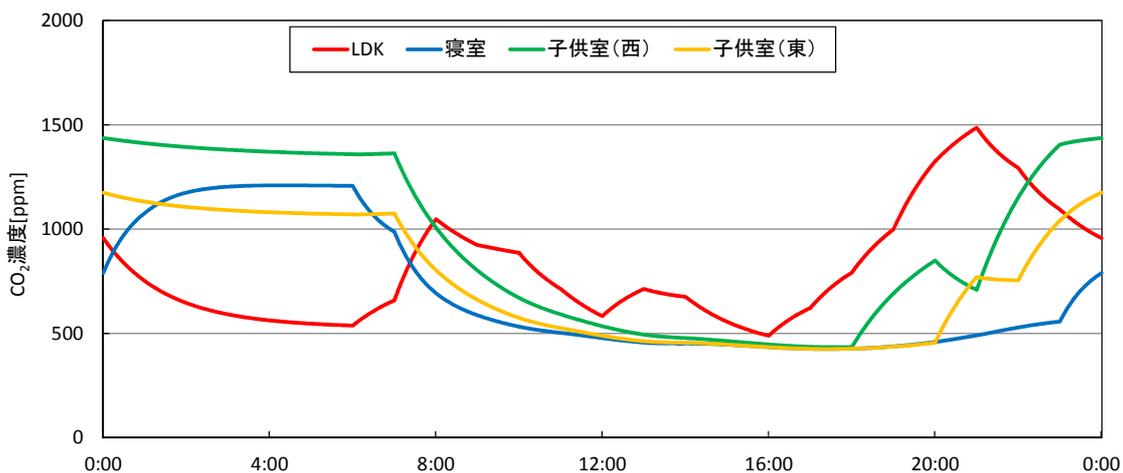


図 B-77 第一種換気システム (9 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

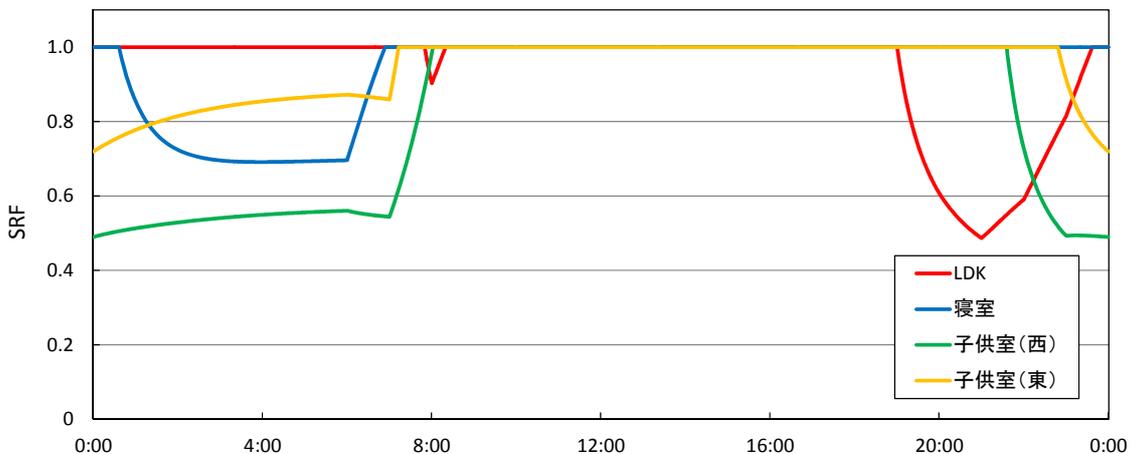


図 B-78 第一種換気システム (9 ヶ月後) による SRF

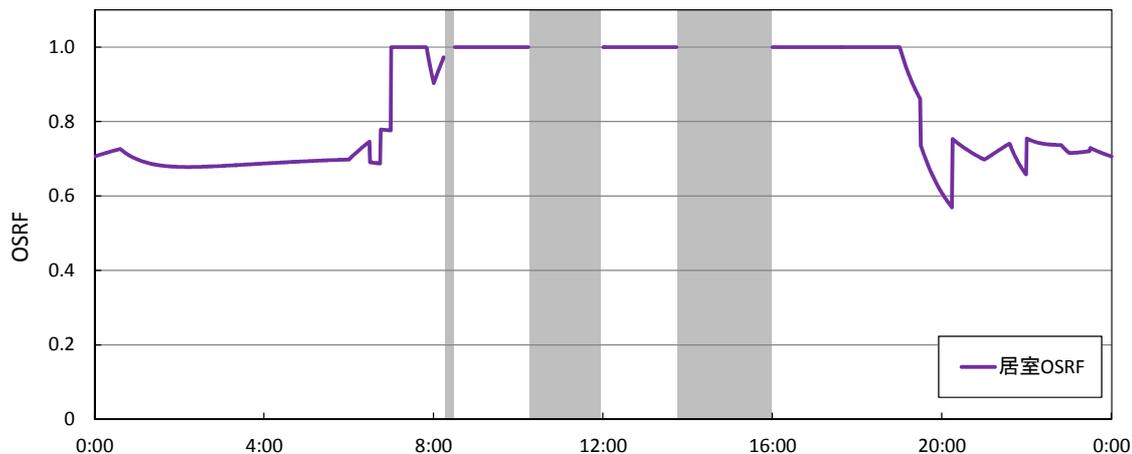


図 B-79 第一種換気システム (9 ヶ月後) による OSRF

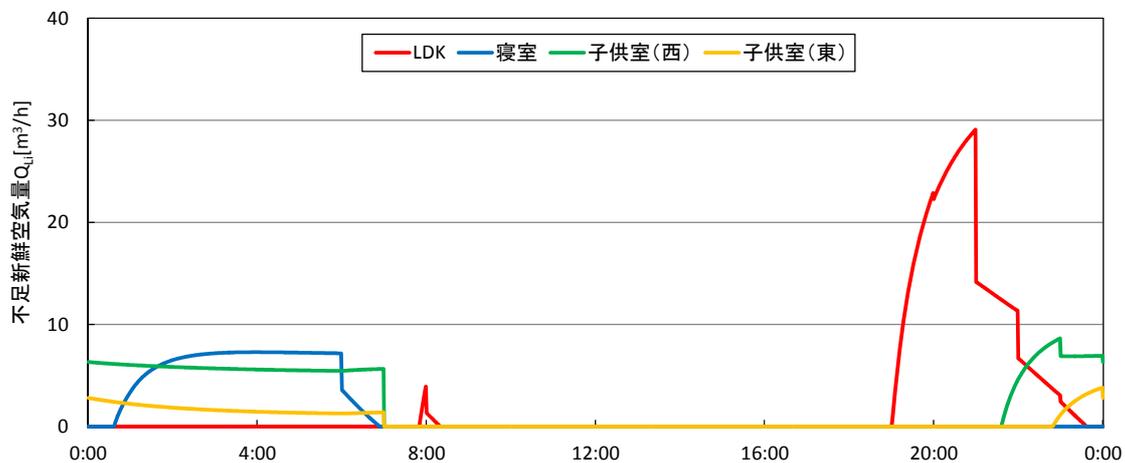


図 B-80 第一種換気システム (9 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・ 10 ヶ月後

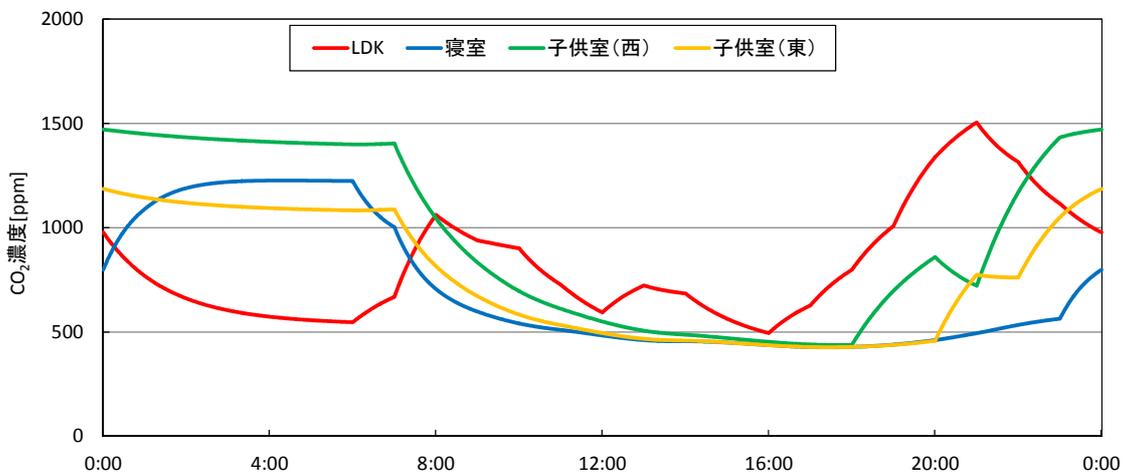


図 B-81 第一種換気システム (10 ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

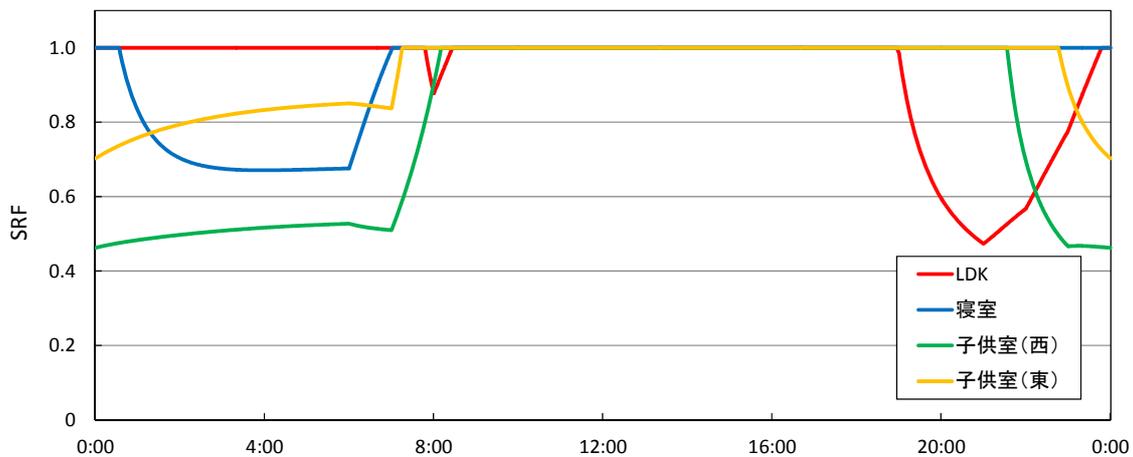


図 B-82 第一種換気システム (10 ヶ月後) による SRF

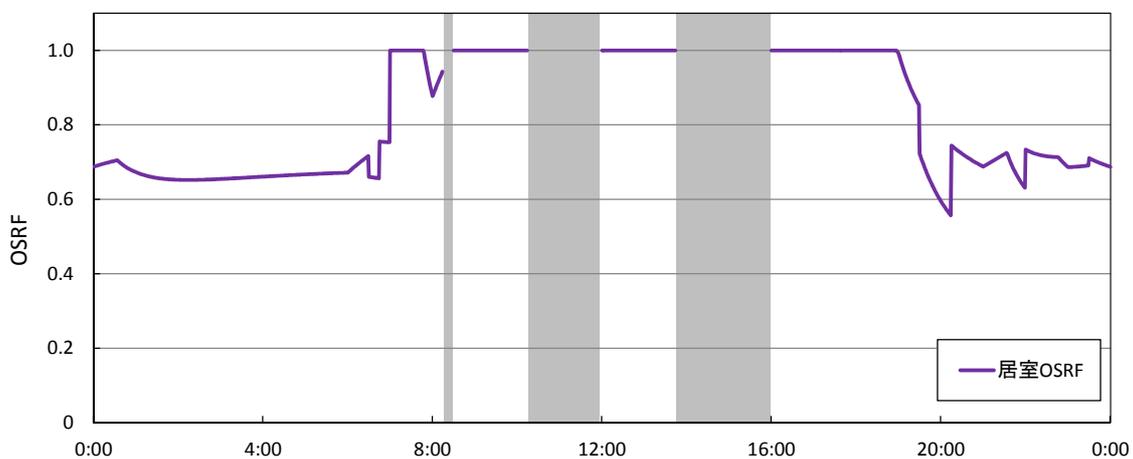


図 B-83 第一種換気システム (10 ヶ月後) による OSRF

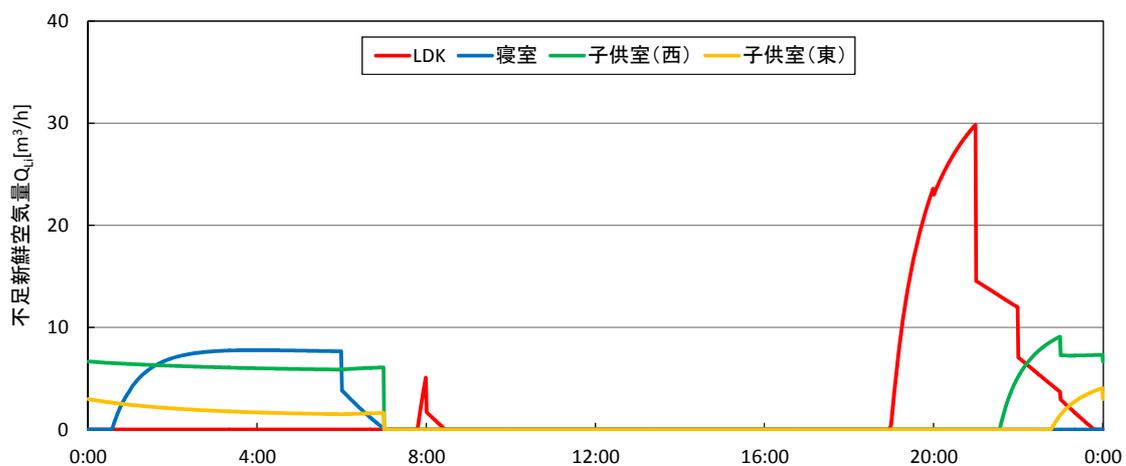


図 B-84 第一種換気システム (10 ヶ月後) における不足新鮮空気量の変化

・11ヶ月後

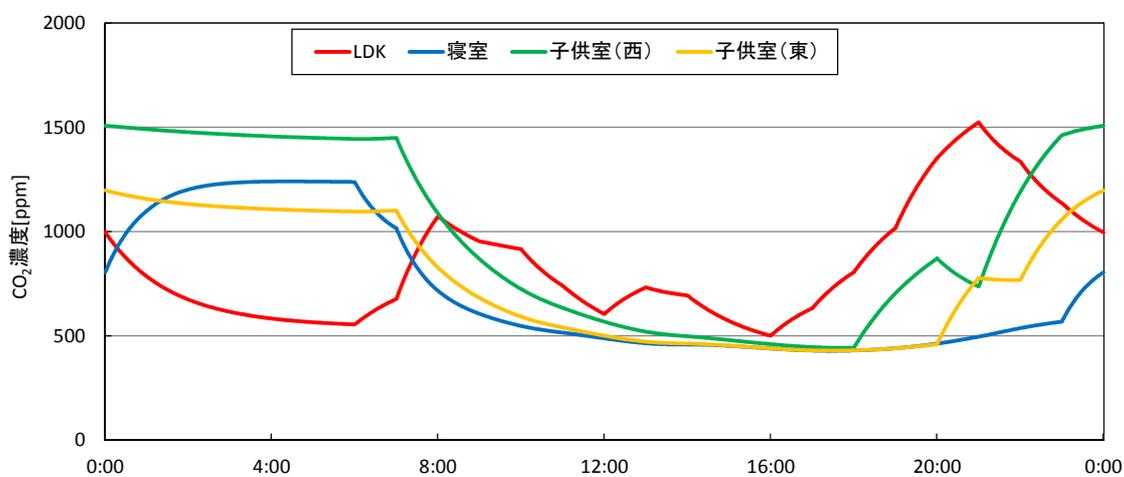


図 B-85 第一種換気システム (11ヶ月後) による CO<sub>2</sub> 濃度

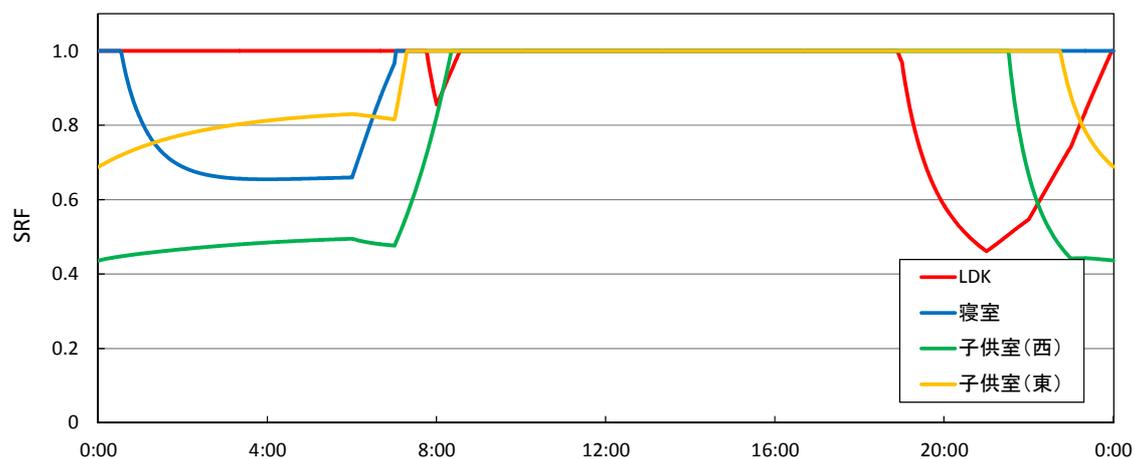


図 B-86 第一種換気システム (11ヶ月後) による SRF

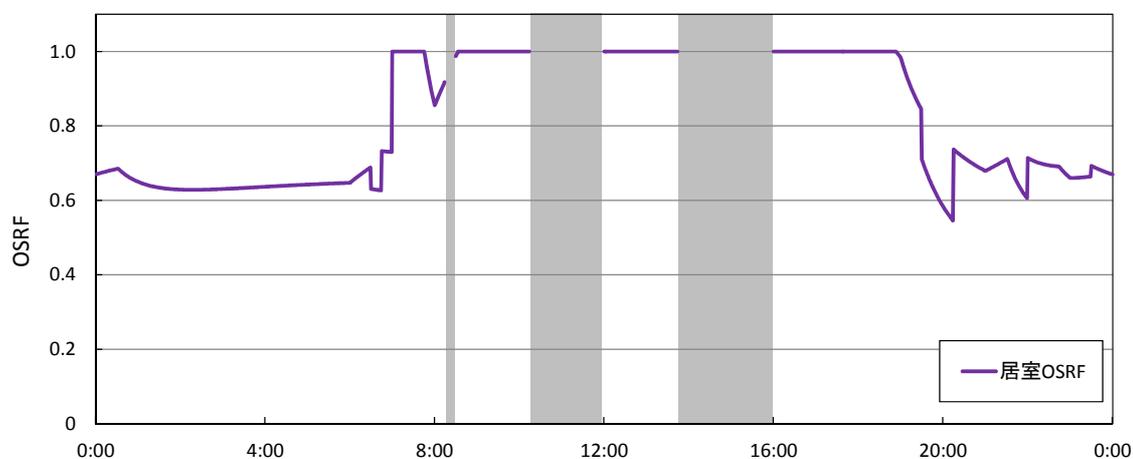


図 B-87 第一種換気システム (11ヶ月後) による OSRF

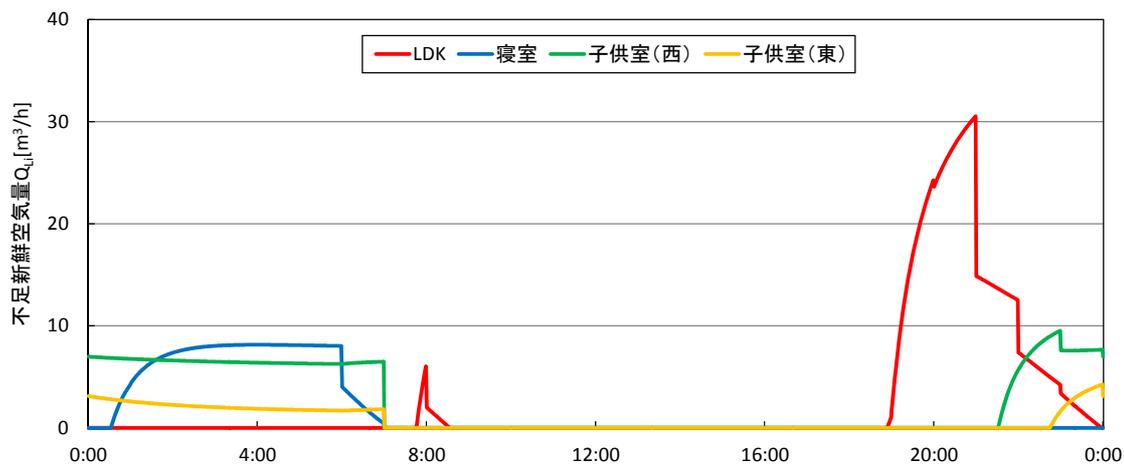


図 B-88 第一種換気システム（11 ヶ月後）における不足新鮮空気量の変化

・1年後

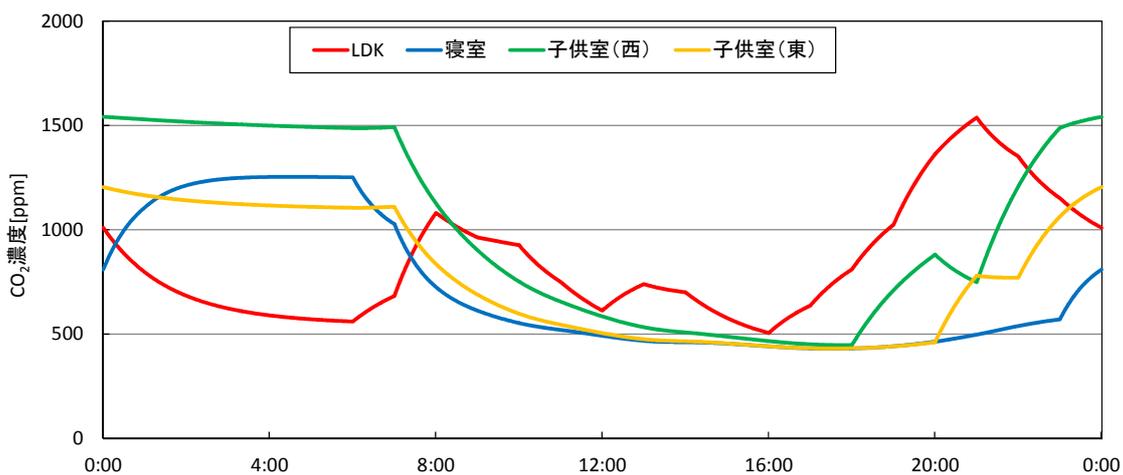


図 B-89 第一種換気システム（1 年後）による CO<sub>2</sub> 濃度

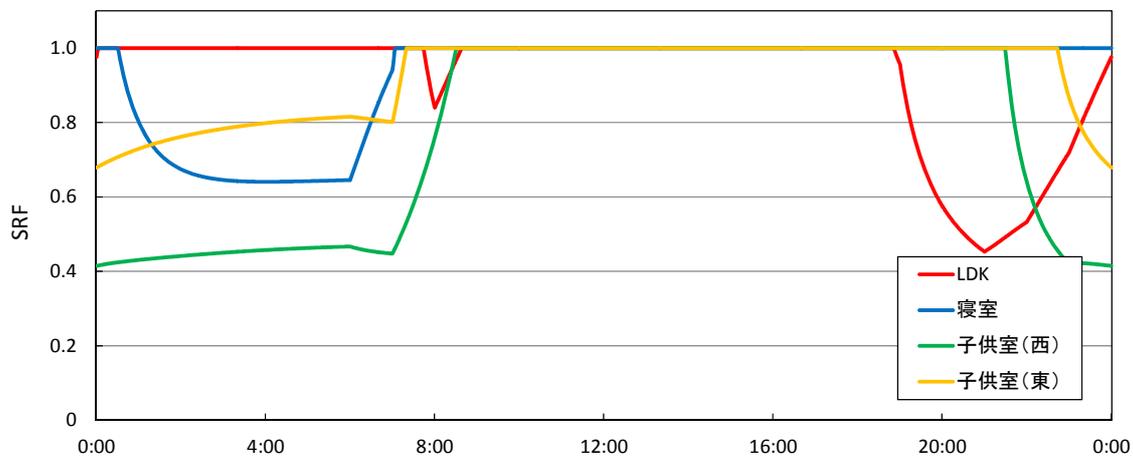


図 B-90 第一種換気システム（1 年後）による SRF

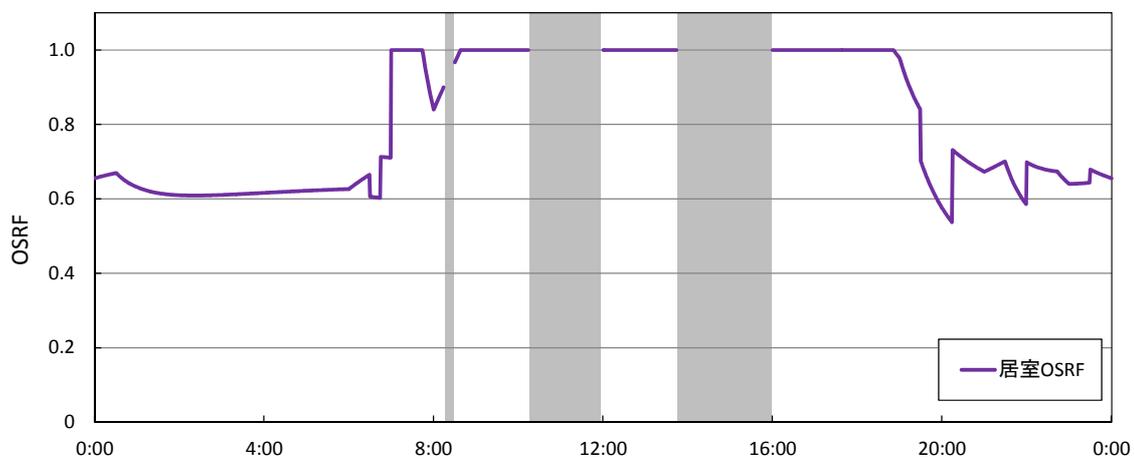


図 B-91 第一種換気システム（1年後）による OSRF

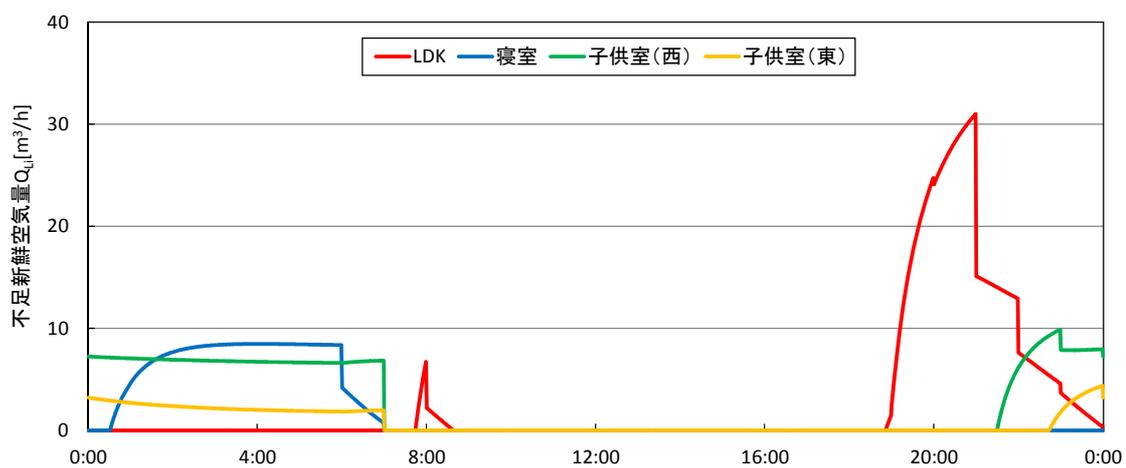


図 B-92 第一種換気システム（1年後）における不足新鮮空気量の変化





### 換気に関するアンケート調査

本研究では、調査の一環としてアンケート調査を行っている。本論文の内容としては、データ数が多く集まらなかったため載せていなかったアンケート調査の内容と集計結果を次ページから載せる。

## 住宅の換気に関するアンケート調査

以下の設問について、該当する項目にチェックをしてください。  
 ご不明の項目については回答していただくことなく構いません。

チェック例			
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

問0. あなたの業種を教えてください。

- |                                  |                                |                                  |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 工務店     | <input type="checkbox"/> 設計事務所 | <input type="checkbox"/> ハウスメーカー |
| <input type="checkbox"/> 大工      | <input type="checkbox"/> ゼネコン  | <input type="checkbox"/> サブコン    |
| <input type="checkbox"/> その他 ( ) |                                |                                  |

問1. 最もよく使用する全般換気設備の種類を教えてください

1) ダクトの有無

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| <input type="checkbox"/> ダクト式 | <input type="checkbox"/> 壁付け式 |
|-------------------------------|-------------------------------|

2) 換気種別

- |                                  |                                |                                |
|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 第一種換気   | <input type="checkbox"/> 第二種換気 | <input type="checkbox"/> 第三種換気 |
| <input type="checkbox"/> その他 ( ) |                                |                                |

3) 熱交換の有無

- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 熱交換あり | <input type="checkbox"/> 熱交換なし |
|--------------------------------|--------------------------------|

問2. 入居時にお客様に対して行っている換気設備の説明に含まれているものを教えてください。(複数選択可)

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> 24時間換気の必要性 | <input type="checkbox"/> 機種について(換気種別、機種の特徴、風量など) |
| <input type="checkbox"/> 運転方法       | <input type="checkbox"/> メンテナンスの必要性              |
| <input type="checkbox"/> メンテナンス方法   | <input type="checkbox"/> メンテナンスの頻度               |
| <input type="checkbox"/> その他 ( )    |  |

問3. 問2で「メンテナンスの必要性」、「メンテナンス方法」、「メンテナンスの頻度」を選択した方にお聞きします。(上記の選択肢にチェックを入れていない方は問4の回答に移ってください)

1) メンテナンスの説明をしている換気設備の部材を教えてください。(複数選択可)

- |  |                                 |
|--|---------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 換気設備本体(換気ユニット、給排気ファン) | <input type="checkbox"/> 自然給排気口 |
| <input type="checkbox"/> 室内グリル(給気グリル、吸入グリル)    | <input type="checkbox"/> 屋外フード  |
| <input type="checkbox"/> レンジフード                | <input type="checkbox"/> ダクト    |
| <input type="checkbox"/> その他 ( )               |                                 |

2) 換気設備のメンテナンスを説明する際に根拠としているものはありますか。

- 貴社で作成したマニュアルを用いた説明を行っている
- 換気設備メーカーの取扱説明書の記述に従って説明を行っている
- その他 ( )

3) お客さまに換気設備の取扱説明書を保管してもらうように伝えていますか。

- 保管してもらい、いつでも読める状態にしてもらうように伝えている
- 保管してもらうことは伝えている
- 取扱説明書は渡しているが、保管に関する説明はしていない
- 取扱説明書は渡していない
- その他 ( )

問 4. お客様が換気設備に関する説明内容を理解されていると思いますか。

- 十分に理解されていると思う
- どちらかと言えば理解されていると思う
- どちらかと言えば理解されていないと思う
- まったく理解されていないと思う
- その他 ( )

問 5. 設計する時に換気（設備）で重視していることを教えてください。（複数選択可）

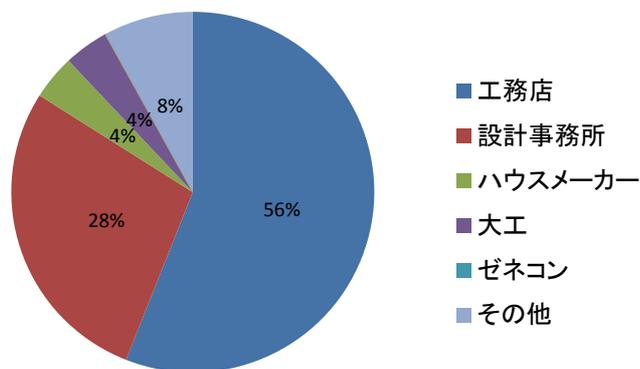
- 換気風量の確保
- コスト
- 換気方式（第一種、第二種、第三種）
- 省エネルギー性能
- 騒音について
- メンテナンスのしやすさ
- ダクト式にすること
- モーター（DC・AC）
- 暖冷房負荷（熱交換器を取り入れるなど）
- 住宅の気密性能
- メーカー・機種      メーカー・機種名 ( )
- その他 ( )

● その他、換気のメンテナンスについて気になることなどがありましたら、ご自由にお書きください。

アンケートは以上です。ご協力ありがとうございました。

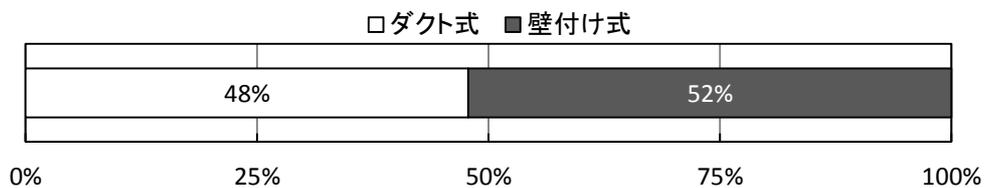
住宅換気に関するアンケート収集結果

回答者の業種 (n=25)

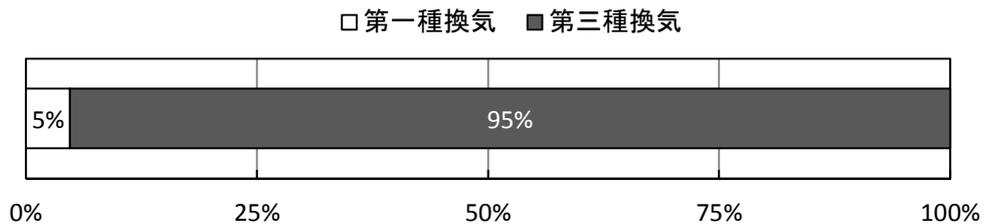


最もよく使用する換気設備の種類

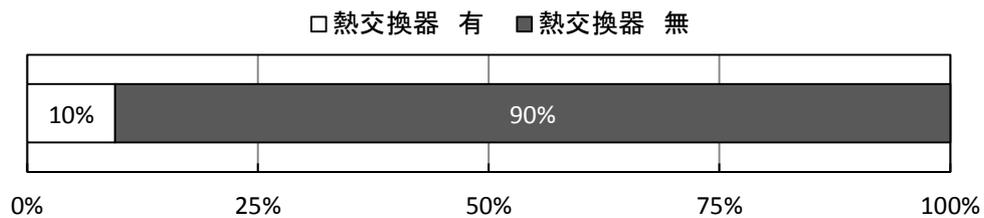
・ダクトの有無 (n=23)



・換気種別 (n=21)



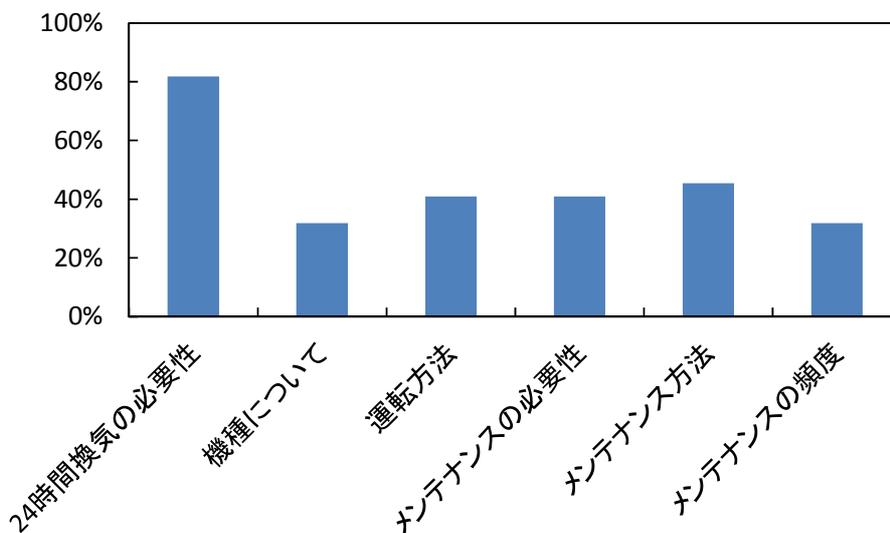
・熱交換の有無 (n=21)



よく使う換気設備

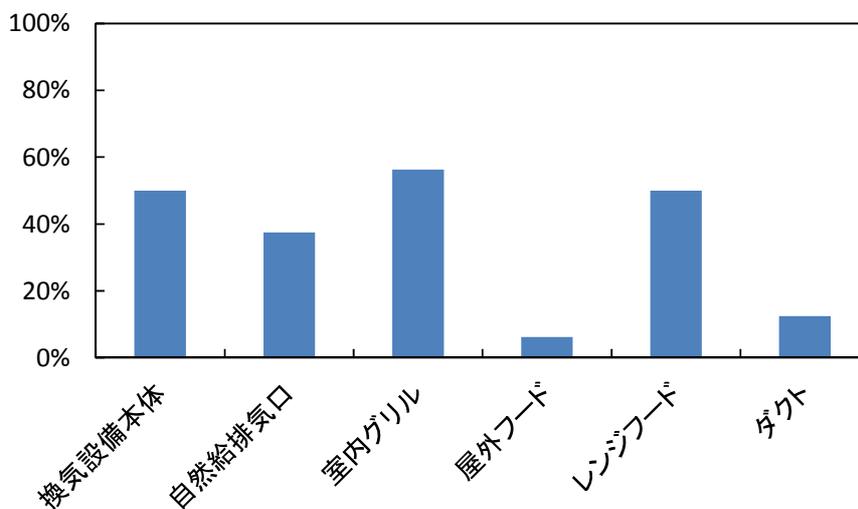
換気種別	回答者(n=21)	割合
壁付け第三种	11	52%
ダクト第三种	10	48%
ダクト第一種熱交換 (ダクト第三种の回答者と重複)	1	5%

お客様の入居時に行っている説明(n=22)

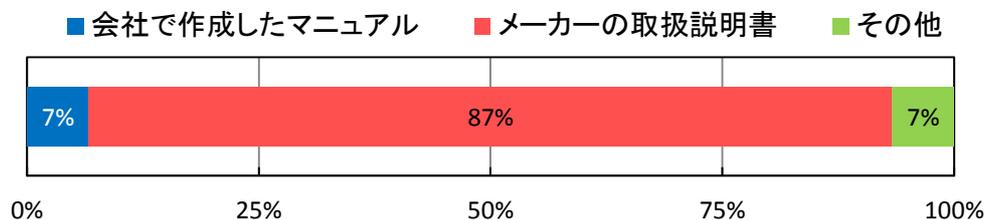


メンテナンスに関して一つ以上選択している人の割合：59%

メンテナンスの説明を行っている部材(n=16)



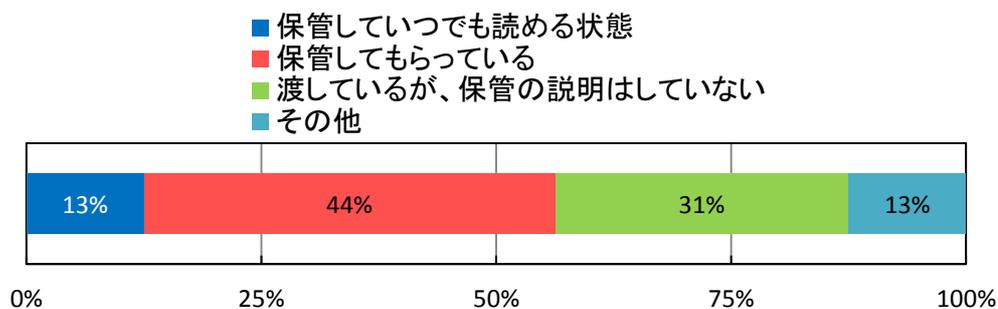
メンテナンスの根拠 (n=15)



その他の内容

- ・マニュアル等はなく、ほこり等がついていると掃除するように説明している

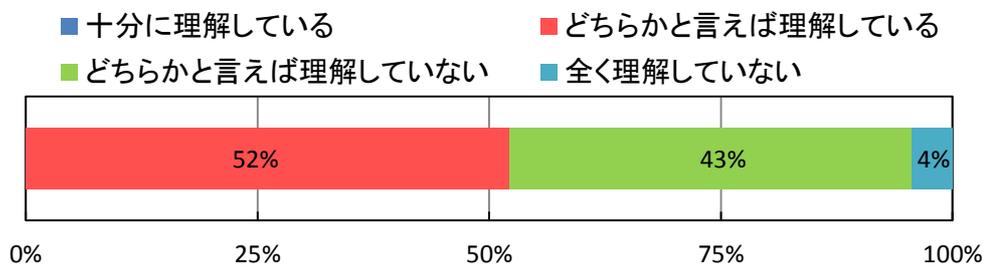
換気システムの取扱説明書の保管に関する説明 (n=16)



その他の内容

- ・ファイルにして渡している

お客様の換気設備に対する理解度 (n=23)



設計時に重視していること (n=21)

