

特集：気候変動による日常生活や健康への影響を考える

<総説>

気候変動による建築と室内環境への影響

金勳, 山田裕巳, 阪東美智子, 開原典子

国立保健医療科学院生活環境研究部 (建築・施設管理研究領域)

Climate change, architecture and indoor environment

KIM Hoon, YAMADA Hiromi, BANDO Michiko, KAIHARA Noriko

National Institute of Public Health, Department of Environmental Health

抄録

建築は外部の擾乱や外敵から居住者の命と健康を守る砦であると共に、居住者の快適性を担保して健康で衛生的な環境と安楽な生活を保障しなければならない。昨今の地球温暖化と温暖化ガス濃度の上昇による気候変動、例えば極端な気温変化、豪雨豪雪、台風など自然からの脅威は建築に資源・エネルギーの節減と健康・衛生・快適性の向上といった相反する要素を両立させる困難さを求めている。

本稿では、地球環境保全と省エネルギーを始め、スマートシティや建築物の高性能化、新しい空調技術、CO₂濃度上昇と換気、省エネルギーに伴う建物運用の効率化と室内環境の悪化など、気候変動が建築物、室内環境、居住者に与える影響について概説した。

建築分野における地球環境保全と省エネ対策は単に高効率と節減だけを目指すものではなく、居住者の快適性かつ衛生・健康的な環境を確保することが根幹となる。そのために建築・設備技術の開発と高効率化、運用方法の改善、利用者リテラシーの醸成など様々な試みが行われている。

キーワード：気候変動、建築、省エネルギー、室内環境、健康、快適性

Abstract

Architectural structures have traditionally served as shelters to protect the lives and health of residents from external disturbances and enemies, and today should ensure not only health and hygiene, but also the comfort of occupants.

Climate change due to global warming and increasing concentrations of greenhouse gases has brought about extreme temperature changes, heavy rains and snowfalls, typhoons, and other natural threats.

Currently, our society is asking the architecture and construction field to address a conflicting and difficult situation, which involves not only saving energy and resources, but also providing more comfortable and healthy indoor environments.

The impacts of climate change and global warming on the architecture field range from implications for smart cities, to details regarding the high performance of buildings and new equipment technologies, including HVAC in large indoor environments, in terms of temperature, humidity, air quality, and ventilation.

連絡先：金勳

〒351-0197 埼玉県和光市南2-3-6

2-3-6 Minami, Wako, Saitama 351-0197, Japan.

Tel: 048-458-6250

Fax: 048-458-6253

E-mail: kim.h.aa@niph.go.jp

[令和2年11月10日受理]

In fact, energy saving, either directly or indirectly, accounts for a deterioration of indoor environments such as air quality, ventilation rate, and relative humidity. Energy conservation in buildings, however, does not merely aim at achieving high efficiency and savings, and is the basis for securing a comfortable, hygienic, and healthy indoor environment for residents.

For that purpose, the architecture field is attempting to develop and improve technologies for construction, equipment, and operations, and is nowadays broadly engaged in innovation, from occupant literacy to work-life styles.

keywords: climate change, architecture, energy saving, indoor environment, health, comfort

(accepted for publication, November 10, 2020)

I. はじめに

建築は外部の擾乱や外敵から居住者の命と健康を守る砦であり、現代社会ではシェルターの役割を超え、健康的な衛生環境と安楽な生活を保障するため良好な室内環境と快適性を確保しなければならない。昨今の地球温暖化と温暖化ガス濃度の上昇による気候変動は極端な気温変化、豪雨豪雪、台風など自然からの脅威を増し建築分野により強い変革を求めている。本稿では建築物性能、エネルギー消費、温熱環境、空気質、換気など建築物、室内環境、居住者に与える影響について概説する。

II. 気候変動が生活や住宅・建築にもたらす影響

1. 大気中CO₂濃度の変化

産業革命以来CO₂の大気濃度は年々上昇しており、国内でも年間平均で毎年約2 ppmずつ上がっている(図1)[1]。大気中CO₂濃度は季節変動し、夏にもっとも低く冬と春に向けてだんだん高くなる。

気象庁の発表[1]では、最も綺麗な空気を誇る南鳥島や与那国島でも年間平均濃度が410ppm(2018年度)に達しており、一世代前に教科書で教えていた空調設計用外気濃度350ppmはもう通用しなくなっている。都市部の外気濃度は500~600ppmを超えることも多い。

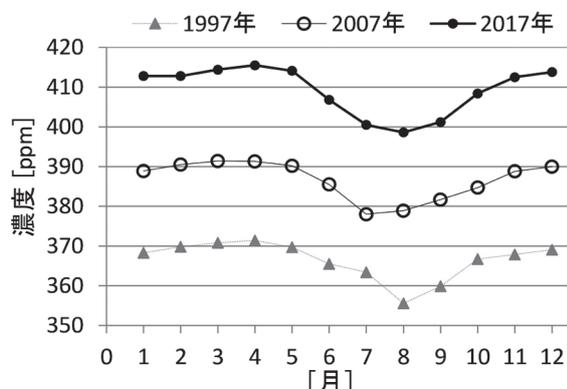


図1 綾里観測所(岩手県大船渡市)におけるCO₂濃度の月別変動[1]

2. 気候変動に対する我が国の施策

省エネ法化を推進することが求められるようになったのは、1970年代に起きたエネルギーショックとされている[2]。1979年に「エネルギー使用の合理化に関する法律」が制定され、これを受けて1980年に通称「旧省エネルギー基準」が制定される。この基準は、制定当時、努力義務と呼ばれ、法的拘束力のないものであった。以降改正が続き、1992年通称「新省エネルギー基準」、1999年通称「次世代省エネルギー基準」、2013年通称「平成25年省エネルギー基準」、2016年通称「平成28年建築物省エネ法」と、断熱の水準や届出義務が徐々に強化されてきている。この中でも、2016年4月以降は、それまでとは異なり、建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律[3]および関連する省令・告示[4]を示すものになっている。根拠法は異なるものの目的や評価体系に変更はないとされている。

「パリ協定」(2016年11月発効)を踏まえた温室効果ガス排出量の削減目標の達成等に向け、住宅・建築物の省エネルギー対策の強化が喫緊の課題となっており、国土交通省では、住宅・建築物市場を取り巻く環境を踏まえ、住宅・建築物の規模・用途ごとの特性に応じた実効性の高い総合的な対策を進めている[5]。具体的には、(1)オフィスビル等に対する措置、(2)マンション等に対する措置、(3)戸建住宅等に対する措置、(4)その他の措置に分けられている。

中央環境審議会「日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について(意見具申)」(2015年)[6]では、暑熱による生活への影響として、都市部では気候変動による気温の上昇に加えてヒートアイランド現象による昇温により、熱ストレス・睡眠障害、暑さによる不快感等が指摘されている。

また、水害、土砂災害、高潮・高波などの自然災害の影響の増大が予測されている。近年、平成26年8月豪雨による広島市の土砂災害、平成27年9月関東・東北豪雨、平成29年7月九州北部豪雨、平成30年7月豪雨、令和元年東日本による土砂災害と水害、令和2年7月豪雨など、日本各地で大きな被害をもたらす災害が続いているが、自然災害による被害は今後さらに深刻化することが懸念される。

気候変動に伴う様々な現象は、住宅や建築、都市にお

ける既存概念の一部について、その変化を促している。例えば、従来の建築は、公衆衛生の観点や消費者の嗜好を反映し、日照や採光を重視してきたが、猛暑日や熱帯夜が増える中で室内熱環境への影響を考慮する必要がある。また、地震や火事の多い日本では、建築構造において地震対策や防火対策が重視されてきたが、今日増加している水害や土砂災害等に対する強靱性は十分とはいえない。

気候変動は、住宅・建築・都市の既成概念を変化させるとともに、日常生活や健康な生活の在り方をも変化させつつあり、新たな日常生活や健康な生活を実現するための、計画手法や評価指標が求められている。

III. 省エネルギーの考え方

1. 何処から何を減らすか

東日本大震災（2011年）直後はブラックアウトの危機が叫ばれ、電車の運行休止や本数も減らされていた。建物ではエレベーターの運転を止めたり、極限まで冷房を弱め、やせ我慢しながら汗だくになって仕事をする場面が続出した。震災直後はさすがに仕方ないといっても、ある程度落ち着いてからもそのようなビルが多々存在していた。高層ビルで人が活動する、仕事をするためにはエレベーターと冷房は欠かせない設備だが、どこから省エネするかが分からず、優先順位を決められず手当たり次第節電に走ってしまうとこのような悲惨な事態が起きてしまう。

何処で省エネして何をそのまま使うか、優先順位が重要である。また、ピーク電力を削減するか、年間エネルギー使用量を削減するかによっても対策は異なってくる。

夏場、冷房を弱めて省エネを狙うのはピーク時の電力消費を削減することで契約電力を下げて契約料金を節減することが目的である。地球環境保全のための省エネは年間を通じた消費量削減となる。住宅とオフィス・商店などの業務部門（非住宅）はエネルギー使用パターンが異なるためその対策も異なる（図2）[7]。図2は年間エネルギー消費の割合であるが、住宅は暖房と給湯といった暖めるためのエネルギーが半分以上を占める一方、冷房は僅か2%程度しか使っていない。業務部門は冷暖房28%、給湯14%である一方、動力・照明が半分近くを占めている。更に、オフィスだけに絞って見ると空調28%、照明40%と照明のエネルギー使用量が最も多いことが分かる。当然ながら、省エネのためには最も使用量が多い分野に手を入れた方が効率がよく、オフィスの場合は年間を通じて均一に使っている照明を工夫すると最も効率が良く省エネができるわけである。

2. 空調技術の多様化

中央式空調、個別式空調と大別されがちな空調方式だが、最近は個別分散型（ビル用マルチエアコン）、デシカント（Desiccant）、放射（輻射）空調、パーソナル空調（Personal HVAC；Task-ambient HVACとも言う）など様々な技術が出ており、それらを組み合わせたハイブリッド方式も増えている。

従来の空調は温度・湿度のみをコントロールするものだったが、新しい空調方式は人体温熱の6要素（温度、湿度、気流、放射、代謝量、着衣）に加え、自己効力感（self-efficacy）といった人間心理までをうまく考慮することで省エネと快適性を図る。ここでは、近來耳にすることが多くなっているパーソナル・デシカント・放射空

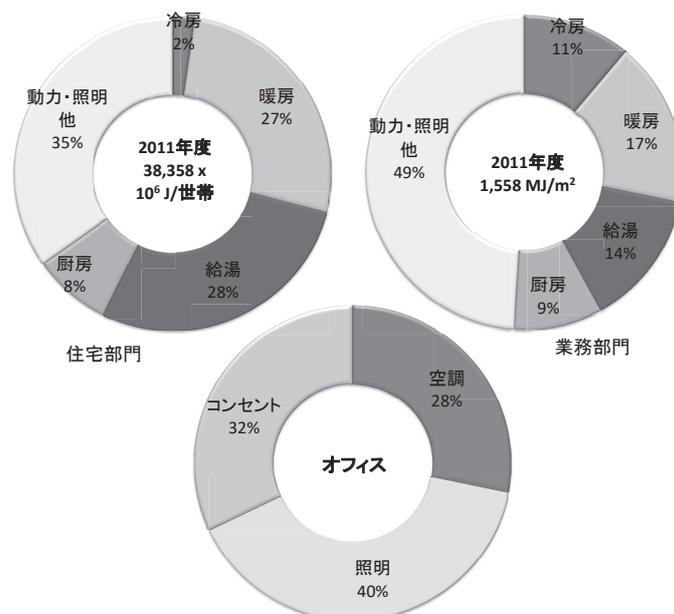


図2 建物用途別の年間エネルギー消費量割合[7]

調について簡単に紹介する。

(1) パーソナル空調

既存の空調が全般空調、即ち室内空間全体を均質に制御しようとするのに対して、パーソナル空調はアンビエント域 (Ambient, 周辺域) の温熱条件を緩和し、利用者周りのタスク域 (Task, 個人作業域) をしっかり制御する (図3)。更に、個々人の要求に応えられるよう環境調節への個人自由度を高めることで省エネと高い満足度を図っている。

事務所建築で採用されるパーソナル空調は冷房用が多く、伝熱原理は対流及び放射がメインであり一部には接触と伝導を取り入れている。個人用の気流調整器具は天井、床、デスク、パーティション、椅子などに設置されている。更にパーソナル空調は利用者に環境選択権や自己効力感を与えることで個人自由度を上げ、満足感と快適性向上を図るため人間心理までを考慮に入れている。

(2) デシカント空調 (潜熱・顕熱分離)

夏場、同じ室内温度でも湿度が低い方が快適であることは誰もが知っている。一般的な空調では、コイル表面を冷却させて結露を生じさせることで湿気を多く含んでいる空気の除湿を行う方法が良く使われるが、この方法は大量のエネルギーを消費する。冷却除湿 (結露除湿) ではなく、吸着除湿を利用すると冷却エネルギーを使わずに済むため省エネとなる。

湿気が多い部屋に塩や活性炭、シリカゲルなど吸湿性の高い物質を置くと空気中の水蒸気を吸着して部屋の湿度は下がる。デシカント空調はその物理化学的な吸着で除湿する。潜熱 (湿気) と顕熱 (乾燥空気) を分離して処理するため潜顕熱分離空調とも呼ばれる。更に、加湿しなくても加湿ができる無給水加湿はこれを逆に応用したものである。

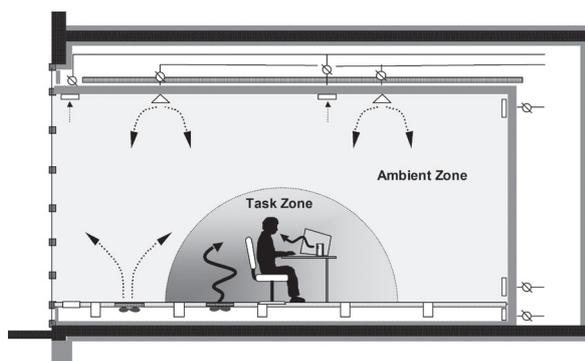


図3 パーソナル空調の概念

(3) 放射空調

放射 (輻射) は温冷熱エネルギーが電磁波の形で伝播し、空気を直接暖めたり冷やしたりせず、表面からのエネルギーが直接人体に伝わるため効率がよく快適性に優れている。

オフィスでは放射だけというよりは空気を扱う従来の空調方式に放射パネルや放射天井を加えて、空気側の負

荷を減らすことで省エネと快適性の向上を図ることが多い。高温多湿な日本の気候から、放射だけで冷房をしようとするると結露が問題となるため、除湿処理した空気を室内に送る必要がある。従来の空気式空調やデシカント空調と組み合わせると、空調機側と放射側の処理負荷を分離してそれぞれの分担分を軽減することができる。結露の心配も減り、省エネと快適性向上に繋がる。

パイプに冷水を流す放射パネルの他にも、パンチングした天井パネルや布製の膜を天井に設置し空調機からの冷空気を天井裏のチャンバーに流して細孔から室内へしみ出る空気を空調に利用すると共に、パンチングメタルや膜面を冷やして放射効果を得るシステムもある。また、パーソナル空調としてデスクやパーティション面の一部が冷却・加温されて冷暖房に使われるシステムも開発されている。

IV. 住宅

1. 建物の安全・衛生・快適

建物の基本性能は安全・衛生・快適の提供であるといわれている[8]。古くは、動物から身を守るため、安全が確保されると次は衛生の確保、これらの確保により生命が脅かされる危険が小さくなると人間の活動がより効率的に気持ちよく行われるよう快適性の確保[8]というように段階的に進んでいく。安全・衛生・快適性を脅かす要素には自然環境 (物理, 生物) と人間社会環境があるといわれる[8]。

日本の一般住宅における室内環境の調査によれば、日本の住宅は暖房が不十分で、冬期の室内環境は非常に貧しい状況であるとの指摘もある。北海道を除いた寒冷な地域ほど、心疾患や脳血管疾患の死亡率が高い傾向にある[9]。具体的に、住宅で問題となる快適や健康を阻害する要因は非常に雑多であり、複雑な対応が求められるように見える。しかしながら、ある1つの対策で2つ以上の問題の解決に有効であるようなケースも多く、基本となる対策は比較的単純に整理できるのではないかとされている[10]。その際に注意すべきことは、1つ1つの対策には特有の利害があるため、その対策の利点や欠点を踏まえて、調和のある計画とすることである[10]。また、建物と設備の役割には限界と適性があることにも留意する必要がある。

2. 移りかわる健康影響

日本の住宅は、古くから夏を旨として建てられており、開放的である。昭和30年代以前は、体の一部を暖め寒さをしのぐ方法 (暖身) が主流であったとされる[10]。昭和30年代以降になると、大きな温度むらを伴うものの局部的に高温となる方法 (採暖) に変化する[10]。この方法は、暑さと寒さの同居ともいわれている[10]。一方、現代になると、比較的均一な温度分布が形成される方法 (暖房) の技術開発が進み、部屋を暖める方法や設備機

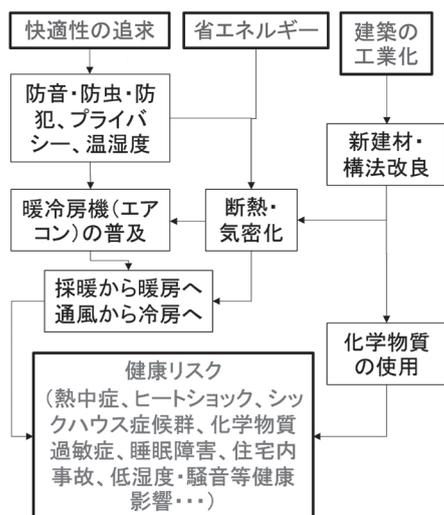


図4 住宅ニーズと健康潜在リスクの概念図

器について、居住者が選択できる状況となる。しかしながら、北海道をはじめとする寒冷地以外では、暑さや寒さを我慢してしまう傾向にあるともいわれており、住まい方の課題が解決されているとは言い難い現状にある。

室内環境の要素から、住まいと健康に関する変遷をたどる(図4)。日本では、1970年代、断熱することは優先されず、1980年代に入り高断熱化が進む状況であった。例えば、灯油ストーブは典型的な暖房器具として普及したものの、燃焼ガスを室内空間に放出し、結露と空気質の悪化を引き起こすことが問題とされ、エアコン等の燃焼を伴わない暖房設備が普及することになる。結露や空気質の悪化は、直接的、或いは副次的に健康に影響を及ぼすともいわれている。1980年代後半には寒冷地において、全体暖房システムが導入され、温熱環境の改善が進み、快適性などが評価されるようになった。さらに、近年では、高効率な設備の技術開発とともに、適切な加湿設備の運転が難しい場合、低湿度由来の健康問題も顕在化している。音環境においては、過去には、給排水騒音がクレームの上位であったものの、さや管工法の普及や衛生器具の改良などにより低減化が図られる傾向にある。設備改善は進んでいるものの、近年では、居住者の生活行為における音への配慮が希薄化しているとの指摘もあり、訴訟事件へ発展するケースも増え、紛争処理機関による調停などが必要な場合も出ている。シックハウスについては、後述の節で詳しく述べるが、1990年代中頃に、気密化とともに新築住宅を中心に頭痛や吐き気、目の痛み、呼吸器疾患などの健康被害が報告され、社会問題として取り上げられている。2003年に建築基準法が改正され、クロルピリホスの使用禁止やホルムアルデヒド発散建材の使用制限、換気設備の設置などが規定されている。これらのほかにも、ヒートショック、熱中症などの住宅内事故への対応、高齢者・乳幼児・独居や居住者の多様化への対応など、多くの住宅の健康問題が顕在化してい

る。

日本では、1970年代に建設された無断熱住宅から、最新の断熱住宅まで、様々な性能の住宅がある。新旧の住宅の性能格差が広がってしまったことを認識し、旧来住宅の限界を知り、必要に応じて改修等を行うことや、新しい住宅ではどのように住んでいくかなどの使い方を理解することが必要となっている。

3. 断熱気密性能の変化と良好な建物性能の必要性

気候変動に伴った年平均気温の上昇を受け、防暑を目的とした空調運転・日射遮蔽技術や断熱技術の導入が進められている。加えて冬期の一層の快適性向上と省エネルギー性能との両立のために住まいの構造が変化してきた。

建物の気密性能C値(相当隙間面積)は、1983年に報告された結果では、関東・関西地域における一般住宅の値は、 $5.3\sim 17.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ の範囲に分布する低い気密性であった[11]。前述したとおり、断熱基準の強化に伴って、次世代省エネルギー基準においては、I・II地域(北海道・青森県・岩手県・秋田県)では、 $2.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以下、III～V地域(I・II地域・沖縄県を除く)では $5.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以下の値が採用された(その後運用は廃止)。近年、高い気密性能を訴求する住宅供給会社も増えつつある。このような断熱仕様の向上並びに窓の断熱気密性の向上といった断熱化の推進に伴い、住宅の気密性能も向上しつつある。

断熱性能の向上への取り組みとこれに伴う気密性能の向上に際して、住宅全体の機械換気への配慮が不足していたことから、室内空気汚染が顕在化した。室内空気汚染物質には、 CO_2 、室内燃焼物、喫煙、様々な化学物質発生、真菌やダニ・アレルゲンなどの生物学的な要因、気流や温度・湿度環境がある。

室内の燃焼物としては、開放型暖房器の使用によるものがあり、温暖な地域ほど石油・ガスファンヒーターの利用が高くなる傾向がある。これらの機器を用いた場合、多量の水蒸気や燃焼系ガス(NO 、 NO_2 、 NO_x 等)が発生し、濃度は上昇する[12]。化学物質に関しては、これを利用した工業化建材から発散される化学物質による、いわゆる「シックハウス症候群」問題が1990年代に顕在化した。また、湿気の排出を効果的に行うことができない住宅は、「ダンプネス」と呼ばれる高湿度環境が持続する住まいとなり、真菌・ダニ等の曝露によるアレルギー疾患や喘息との関係が示唆されている。

機械換気を考慮しない断熱気密化は、汚染物質の濃度の上昇を招くこととなった。例えばシックハウスの代表的な物質であるホルムアルデヒド濃度は、問題が顕在化した当時、気密性能が $5.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ を下回る住宅において、換気回数0.5回/h以上の建物の室内濃度が厚生労働省が定める指針値程度であったのに対し、0.5回/h未満の建物の多くは指針値を超える物件が多数存在した[13]。また、2000年に国土交通省が実施した全国実態調査では、ホルムアルデヒド濃度の指針値の超過率が28.7%存在し

た（超過率は年々低下し、2004年度調査結果では1.6%）。このホルムアルデヒドの指針値を超過した106件の建物を継続調査した結果、2002年から2004年までの夏季において13.2%から17%程度の超過率を維持し[14]、木質建材からの発散は長期間に及ぶことが確認された。このように断熱気密化が図られた住まいにおいて汚染物質濃度を許容濃度以下とするために家全体の機械換気設備（全般換気）が必要であることから、2003年には建築基準法が改正されホルムアルデヒド発散材料に関する規制に加え、住宅への常時機械換気の設置が義務付けされることとなった[15]。

住宅の断熱気密化が進む中で室内空気質を良好に保つためには、適正な気密を確保したうえで全般換気を運転する必要がある。しかし一般に、居住者は断熱性能に比較して気密性能や換気の運転に関して意識は低い傾向がある。これは、温冷感に比較して、空気汚染に関する感覚が低いことがあることに加え、空気質が健康に及ぼす影響が十分に理解されていないことが理由と考えられる。断熱性能は、快適性や冷暖房費用との関係で認識される一方で、気密性能に関しては、気密をした上での常時機械換気運転に対して、十分な理解を得られているとは言えず、非気密住宅における自然換気（漏気）を認める居住者の存在も懸念される。

これら低気密住宅の問題は、計画的な換気を行うことができないことにある。計画的な換気とは、適正な換気を行うために、計画された給気口から外気を導入し、生活に伴って汚染された空気を屋外に排出することを指す。気密が確保されない住宅においては、給気口からの外気導入は難しく、計画外の空気の流れが発生することになる。このことを踏まえ、2003年の建築基準法改正の際に、天井懐などの非居住空間での建材のホルムアルデヒド対策が盛り込まれた。これは、第3種換気（住宅内部からの強制排気）により、天井懐に存在するホルムアルデヒドが居室へ侵入しても問題がない水準にすることを目的としている。以上より、高い断熱性能と適正な気密性能を有し、外気の導入と汚染空気の排出を計画的に行うことが重要であるといえる。

4. 建物構造の発展と住まい方のリテラシー

新築住宅においては、断熱気密性能の一層の向上が望まれ、いかに適切に住まうかという居住者側のリテラシーの醸成が必要とされている。また耐震性を有し、人が居住している既存住宅のうち「バリアフリー・省エネ」をいずれも満たさない住宅が42%程度存在している現状を踏まえると[16]、室内環境の向上のためには断熱気密の改修が求められている。

高い断熱気密性能が普及した場合においても、住宅内部で開放型暖房機を用いたり、機械換気を停止していた場合、良好な環境を築くことはできない。このため、適正な断熱・気密・換気・空調技術を土台とした生活リテラシーが重要である。

一方、大量に存在する既築住宅に関しては断熱気密改修による室内環境の改善が求められ、補助事業も実施されている。しかし断熱改修に伴う断熱性と気密性の変化の調査では、断熱性に関しては、性能の向上が見られるものの、気密性に関しては、適正な施工を行った場合に $0.9\text{cm}^2/\text{m}^2$ と高い値を得たことに対して、部分改修を行った建物では、 $10\text{cm}^2/\text{m}^2$ を超える値を計測するなど[17]、既存住宅における気密性能向上の難しさが指摘され、より良い気密工法の開発など、具体的な解決方法が待たれている。

V. 特定建築物

1. 建築分野の省エネルギーと室内環境

CO_2 濃度上昇と地球温暖化対策として建築分野でも強く要求されているのはやはり省エネルギーである。1970年代からの国内エネルギー消費推移を見ると産業、運輸ではGDPの増加にも関わらず、減少あるいは横這いの趨勢が続いているが、家庭と業務部門（第3次産業）だけは増加傾向にある。家庭と業務部門のエネルギー消費割合は2000年代に入って国全体の30%を超え、1970年代比2倍近くまで増えている[18]。少子化や人口減少、機器設備の技術発展と高効率化が進んでいるものの、一人暮らしや少人数世帯の増加、冷暖房・電気設備の台数増加が原因である。

そのため、国レベルで民生分野に対する省エネを求めておりCOOLBIZやWARMBIZは社会運動として定着しているが、建築分野で直接的な努力としてはZEB（Zero Energy/Emission Building）やZEH（House）が進められている。

省エネの手法としては、設計の最適化、躯体やガラスの断熱性・気密性・遮蔽性の向上、高効率・省エネ仕様の設備機器、建物利用時間の短縮、ピークシフト（Peak shift）、自然・再生可能エネルギーの導入、利用者意識や行動の変化などが挙げられる。その結果、建物の性能認証制度の普及、設備機器の省エネ・高効率化に関する技術発展、COOLBIZによる軽装や柔軟な勤務形態への移行など肯定的な結果が得られているが、当然ながらそ

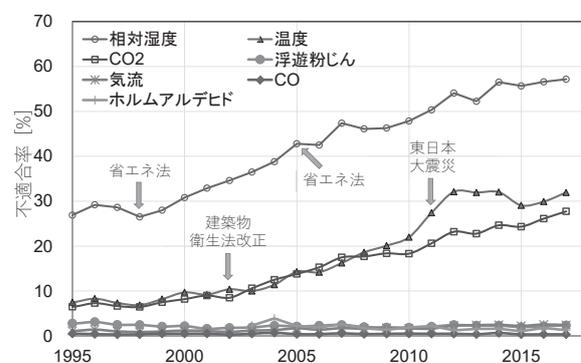


図5 空気環境衛生管理基準に対する不適率の推移[19]

れに伴う弊害も起きている。特に省エネに伴う室内空気環境(温度・湿度・空気質)の悪化がその一つである(図5)[19]。

2. 特定建築物における室内環境

特定用途に使われる面積が3000m²以上の特定建築物(2017年度全国統計から特定建築物の数は45,000超)を対象にした「建築物における衛生的環境の確保に関する法律(1970年);建築物衛生法,ビル管法」の空気衛生管理基準では「温度,相対湿度,CO,CO₂,浮遊粉じん,気流」の6項目に関する測定を2ヶ月以内に1回(年6回以上)行うことを義務づけている。しかしながら,相対湿度は不適合率が55%以上,温度およびCO₂濃度は30%前後であり,更に上昇傾向が続いている(図5)[19]。

図5に急激な不適合率上昇があった時期を印しているが,殆どが法律改正,特に省エネ法改正(1998年,2003年,2005年,2013年,2017年)及び東日本大震災(2011年)による節電要求が大きく影響している。

換気のための新鮮外気の取入れは冷暖房負荷,加湿・除湿負荷,搬送動力負荷を増加させる原因となる。特に加湿には大量のエネルギーが必要であり,相対湿度の不適合は殆どが冬期の加湿不足である。省エネや運用コスト削減を意図していることが多いが,加湿機の容量不足や劣化,WARMBIZによる暖房温度低下による飽和度低下,室内での結露を嫌がるなど様々な原因がある。

厚生労働省の「建築物衛生法」ではCO₂濃度1000ppmを,文部科学省の「学校環境衛生基準」では1500ppm以下を基準として定めているが,これらの基準はCO₂自体による健康影響によるものではなく換気基準である。特に,1000ppmは特定建築物の管理基準であり,空調・換気設計に用いられるが,外気濃度350ppmと外気濃度500ppm時に室内を1000ppmに維持するための換気設計では濃度差ΔCがそれぞれ650ppmと500ppmと換気負荷が30%も異なってくることから,空調設計と運用時に換気量を減らす工夫がなされることが多い。大気中や都心部でのCO₂濃度上昇を考慮して,アメリカ暖房冷房空調学会(ASHRAE)では室内外濃度差ΔC=700ppmにする設計手法も提案している。

VI. スマートシティ

1. スマートシティの取組みとスーパーシティ法案の成立

世界的な傾向として,スマートシティの導入が進み活発化しているが,その促進要因として,急激な都市化の進行と気候変動が挙げられている[20]。気候変動の影響による大規模災害に対してサステナブルな都市建設を進めることが,スマートシティ導入のきっかけの一つになっている。風水害に強い強靱な都市への改造や,温室効果ガス削減に向けた省エネルギー・創エネルギー対策の推進が,スマートシティという都市づくり構想に反映

されている。

スマートシティとは,「都市の抱える諸課題に対して,ICT等の新技術を活用しつつ,マネジメント(計画,整備,管理・運営等)が行われ,全体最適化が図られる持続可能な都市または地区」[21]である。日本では,約10年前から,住宅・建築・都市などのスマート化,すなわち,スマートハウス・スマートビルディング・スマートシティの取組みが始まった。当初の動きは,省エネルギー化や再生エネルギー活用,蓄電池を活用したエネルギーマネジメントシステム,などの実証や実例が中心であった。

エネルギー問題を端緒としたスマート化の動きは,情報通信の進化に伴って多様な進化を成し,日常生活や居住者行動に大きな影響や変化をもたらしている。人工知能(AI)やロボティクスによる遠隔制御や自動化などの技術的進化,仕事・医療・教育・行政サービスのオンライン化,物流や流通における自動配送,移動におけるMaaS(マース:Mobility as a Service)[注1]など,スマートシティの取組みは様々な分野において大きな進化の契機となりつつある。

スマートシティの取組みを加速化した背景には,2020年3月に,スマートシティの基本設計概念を示す「スマートシティリファレンスアーキテクチャホワイトペーパー」[22]が発表されたことや,2020年5月にスーパーシティ法案が成立したことがある。スーパーシティ法とは,AIやビッグデータなど最先端技術を活用した都市「スーパーシティ構想」の実現に向けた改正国家戦略特区法のことである。スーパーシティは2018年に内閣府が打ち出したスマートシティの一類型で,「スーパーシティ/スマートシティの相互運用性の確保等に関する検討会最終報告書」[23]によると,「課題思考のアプローチ,ビッグデータの分野横断的な活用,国家戦略特区制度を活用した規制改革を用いた技術実装といった考え方・制度活用により第四次産業革命を体現する最先端技術の都市への実装を目指すもの。」と定義されている。スーパーシティは,移動,物流,支払い,行政,医療・介護,教育,エネルギー,環境・ごみ,防災,防犯・安全という生活10領域のうち,少なくとも5領域以上をカバーし生活全般にまたがる取組みであり,住民が参画し住民目線で活動を進める住民参加モデルを目指している。

2. スマートシティの事例

2020年度の日本公衆衛生学会総会でも,健康・医療・介護との関連から,スマートシティの取組みがいくつか紹介されている。

会津若松市のスマートシティプロジェクトは,「地方都市におけるヘルスケア事業の新しい形」として注目されている[24-26]。2011年3月11日の東日本大震災を受けた復興プロジェクトとして始まり,「地域活力の向上:地域経済の活性化」「市民生活の利便性向上:安心して快適に生活できるまちづくり」「市民との情報共有の促

進：『まちの見える化』の実現』の3つの視点のもとにまちづくりを進めている。取組みは、人材育成、しごとづくり、ソフト基盤、交通、行政、医療、エネルギー、農業、教育、観光、商工、防災など様々な分野にわたる。医療分野では、母子健康手帳の電子化「母子健康情報サービス」、遠隔診療（オンライン診療）の推進、スマートウォッチやセンサーを活用したIoTヘルスケアの実証実験などを行っている。健康データや医療データなどの個人情報取り扱いが難しいが、会津若松市では、本人に事前に承諾を得る「オプトイン」という形をとっている。

Fujisawaサステナブル・スマートタウンは、神奈川県藤沢市においてパナソニックの工場跡地に展開したスマートシティである[27,28]。街のコンセプトは「生きるエネルギーがうまれる街」であり、約600戸の戸建住宅には全て省エネ機器と蓄電池、太陽光発電、HEMSを標準装備し、また一部の住宅では家庭用燃料電池により都市ガスから抽出した水素を分解することで発電している。コンセプトの実現に向けて、数値目標とガイドラインを設定しており、CO₂70%削減、生活用水30%削減、再生可能エネルギー利用率30%以上などとしている。居住者は、HEMSデータによるエネルギーの可視化と併せて、日頃からエネルギー意識を持った生活を営めるように計画されている。街全体の計画では、通風や採光、コミュニティでのパッシブデザインにも配慮し、夏の南風を取り込む風の道を設け、各住戸間は歩行者専用道を設けることで建物隣棟間隔を確保し、風通しの良い街となっている。さらに、自然災害への備えも重視しており、蓄電池や太陽光発電により3日間程度は生活が継続できる。集会所での非常用電源の一部確保や、災害時に利用できるマンホールトイレやかまどベンチも備わっている。ウェルネス分野では、サービス付き高齢者向け住宅でのスマートエアコンを活用した見守りサービス、快眠誘導サービス、ウェアラブル端末やスマートフォンを活用した住人健康データの見える化の実証実験、オンライン服薬相談サービスなどの取組みが行われている。

VII. 結語

地球温暖化防止と環境保全といった旗印の下、社会全体が省エネルギー至上主義となってきたことは否めない。本稿で紹介した、スマートシティや建築物（住宅及び非住宅）の高性能化、運用効率化、設備投資などもその一環と言える。

一方、室内環境としては相対湿度、温度の不適率が高く、CO₂（換気）の不適率も30%に近接し上昇傾向が続いている。COOLBIZ・WARMBIZに加え、建築物衛生法の改正や複数回に渡る省エネ法の改正、東日本大震災など複合的な原因があるが、その結果として運用時の換気量の削減や温度・湿度環境の緩和などが露わになっている。

また、気候変動に対する建築分野の努力としては、外

気CO₂濃度上昇による換気量増大とそれに伴う設備容量の増大に対処すべく、一人当たりの占有面積の最適化、温度set pointの現実化、より精緻なCO₂デマンドコントロール、自然換気と自然採光の積極的な利用など様々な工夫がなされている。

建築物における地球温暖化防止・地球環境保全と省エネは単に高効率と節減だけを目指すものではなく、根幹は室内環境や快適性を犠牲にせずに、快適かつ衛生・健康的な環境を確保することにある。そのために建築・設備技術の開発と高効率化、運用方法の改善、利用者リテラシーの醸成など様々な試みが行われている。

本総説について、開示すべき利益相反はない。

[注1] 地域住民や旅行者一人一人のトリップ単位での移動ニーズに対応して、複数の公共交通やそれ以外の移動サービスを最適に組み合わせる検索・予約・決済等を一括で行うサービス（国土交通省資料）。

参考文献

- [1] 気象庁. 二酸化炭素濃度の観測結果. https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2_monthhave_ryo.html (accessed 2020-04-07)
Japan Meteorological Agency. [Nisankatanso nodo no kansoku kekka.] https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2_monthhave_ryo.html (in Japanese) (accessed 2020-04-07)
- [2] 三浦尚志. 省エネ法改正に伴う住宅・建築物の新たな評価基準の開発. 令和元年度国立研究開発法人建築研究所講演会:2020.3.13; 東京. 同テキスト. p.79-92. 2020. https://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/r01/pdf/T06_Miura.pdf (accessed 2020-10-23)
Miura M. [Syoenho kaisei ni tomonau jutaku/kenchikubutsu no aratana hyoka kijyun no kaihatu.] Reiwu gannendo kokuritsu kenkyu kaihatu hojin kenchiku kenkyu koenkai; 2020.3.13; Tokyo. Text. p.79-92. 2020. (in Japanese)
- [3] 電子政府の総合窓口. 平成27年法律第53号「建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律」. https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=427AC0000000053 (accessed 2020-10-23)
e-Gov. [Heisei 27 nen horitsu dai 53 go [Kenshikubutsu no enerugi syohiseino no kojyo ni kansuru horitsu.] https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=427AC0000000053 (in Japanese) (accessed 2020-10-23)
- [4] 国土交通省. 平成28年国土交通省告示第265号「建築物エネルギー消費性能基準等を定める省令」. <https://www.mlit.go.jp/common/001195127.pdf> (accessed 2020-10-23)

- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. [Heisei 28 nen kokudo kotsusyo kokuji dai 265 go [Kenchikubutu eneurugi syohiseino kijunnado o sadameru syorei].] <https://www.mlit.go.jp/common/001195127.pdf> (in Japanese) (accessed 2020-10-23)
- [5] 国土交通省. 建築物省エネ法のページ. https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/jutakukentiku_house_tk4_000103.html (accessed 2020-10-23)
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. [Kenchikubutu syoeneho no page.] https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/jutakukentiku_house_tk4_000103.html (in Japanese) (accessed 2020-10-23)
- [6] 中央環境審議会. 日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について (意見具申). 平成27年3月. <http://www.env.go.jp/press/upload/upfile/100480/27461.pdf> (accessed 2020-10-22)
- Central Environment Council. [Nihon ni okeru kikouhendo ni yoru eikyo no hyoka ni kansuru hokoku to kongo no kadai ni tsuite (Ikengushin).] March 2015. <http://www.env.go.jp/press/upload/upfile/100480/27461.pdf> (in Japanese) (accessed 2020-10-22)
- [7] 資源エネルギー庁. 平成24年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書2013) —第2部 エネルギーの動向—. p.104-114. 2013.6.
- Agency for Natural Resources and Energy. [2012 energy ni kansuru nenji hokoku (Energy White Paper 2013): Chaper2 energy no doko.] p.104-114. 2013.6. (in Japanese)
- [8] 環境工学教科書研究会, 編著. 環境工学教科書. 東京: 彰国社; 1996.
- Environmental Engineering Textbook Study Group, edited. [Kankyo kogaku kyokasho.] Tokyo: Shokokusha; 1996. (in Japanese)
- [9] 厚生労働省. 平成29年度人口動態統計特殊報告 平成27年都道府県別年齢調整死亡率の概況—主な死因別に見た死亡の状況—. 2017. <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/other/15sibou/dl/16.pdf> (accessed 2020-10-09)
- Ministry of Health, Labour and Welfare. [Heisei 29 nendo jinko dotai tokei tokushu hokoku heisei 27 nen todofuken betsu nenrei chousei shiboritsu no gaikyo: omona shiinbetsu ni mita shibo no jokyoo.] 2017. (in Japanese)
- [10] 坊垣和明. 快適な住まいを求めて. 建設省建築研究所, 監修. 快適な住まいづくりのすべて. 東京: 建築技術; 1990. p.34-42.
- Bogaki K. [Kaitekina sumai o motomete.] Kensetsusho kenchiku kenkyujo supervised. [Kaitekina sumai zukuri no subete.] Tokyo: Kenchikugijutsu; 1990. (in Japanese)
- [11] 村上周三, 吉野博. 住宅の気密性能に関する調査研究. 日本建築学会論文報告集. 1983;325:104-115.
- Murakami S, Yoshiro H. [Investigation of air-tightness of houses.] Transactions of the Architectural Institute of Japan, AIJ. 1983;325:104-115. (in Japanese)
- [12] 嵐谷奎一, 松井康人, 戸次加奈江. 室内環境汚染に関する研究—第1報—. 室内環境. 2019;22(2):127-136.
- Arashidani K, Matsui Y, Bekki K. [Study of indoor air pollution: 1st report.] Indoor Environment. 2019;22(2):127-136. (in Japanese)
- [13] 吉野博, 天野健太郎, 飯田望, 松本麻里, 池田耕一, 野崎淳夫, 他. シックハウスにおける居住環境の実態と健康に関する調査研究. 日本建築学会環境系論文集. 2003;567:57-64.
- Yoshiro H, Amano K, Iida N, Matsumoto M, Ikeda K, Nozaki A, et al. [Investigation of air-tightness of houses.] Journal of Environmental Engineering, AIJ. 2003;567:57-64. (in Japanese)
- [14] 国土交通省. 平成16年度室内空気中の化学物質濃度の実態調査の結果等について. https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/07/070510_.html (accessed 2020-10-23)
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. [Heisei 16 nendo shitsunaikukichu no kagakubushitsunodo no jitaichosa no keka nado ni tuite.] https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/07/070510_.html (in Japanese) (accessed 2020-10-23)
- [15] 国土交通省. 建築基準法に基づくシックハウス対策について. https://www.mlit.go.jp/english/housing_bureau/law/03.pdf (accessed 2020-10-23)
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. [Basic Technical Criteria for Countermeasures Regarding Sick House Issues.] https://www.mlit.go.jp/english/housing_bureau/law/03.pdf (in Japanese) (accessed 2020-10-23)
- [16] 国土交通省. 既存住宅流通を取り巻く状況と活性化に向けた取り組み. <https://www.mlit.go.jp/common/001156033.pdf> (accessed 2020-10-23)
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. [Kizon jutaku ryutsu o torimaku jokyoo to kaseika ni muketa torikumi.] <https://www.mlit.go.jp/common/001156033.pdf> (in Japanese) (accessed 2020-10-23)
- [17] 長谷川兼一, 石川武尚, 松本真一, 竹内仁哉. 断熱改修手法が異なる戸建住宅の環境性能の改善効果に関する事例調査. 日本建築学会技術報告集. 2020;26(63):597-601.
- Hasegawa K, Ishikawa T, Matsumoto S, Takeuchi J. [Case study on environmental improvement after thermally house retrofit.] Journal of Technology and Design, AIJ. 2020;26(63):597-601. (in Japanese)
- [18] 自然エネルギー庁. 集計結果又は推計結果 (総合エネルギー統計, 2018年度) —時系列表 (参考表) —. https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/

- results.html#headline1 (accessed 2020-11-04)
Agency for Natural Resources and Energy. [Shukei keka mata ha suikei keka (Sogo enerugi tokei, 2018): Jikeiretsu hyo (sankouhyou).] https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline1 (in Japanese) (accessed 2020-11-04)
- [19] 林基哉, 研究代表者. 厚生労働科学研究費補助金健康安全・危機管理対策総合研究事業「建築物環境衛生管理基準の検証に関する研究」(H29-健危-一般-006) 平成30年度総括・分担研究報告書. 2019.3. Hayashi M. Health and Labour Sciences Research Grant, Kenko anzen・Kikikanri taisaku sogo kenkyu jigyo [Kenchikubutsu kankyo eisei kanri kijun no kenshoni kansuru kenkyu (H29-Kiki-Ippan-006)] Heisei 30 nendo Sokatsu・Buntan kenkyu hokokusho. 2019.3. (in Japanese)
- [20] 南雲岳彦. 【スマートシティ】日本のスマートシティ導入論議に必要な不可欠な社会観とは. 2020.1.15. https://mimir-inc.biz/media/expert/smartcity_nagumo/ (accessed 2020-10-22)
Nagumo T. [[Smart City] Nippon no Smart City donyu rongi ni hitsuyo fukaketsu na shakaikan towa.] 2020.1.15. https://mimir-inc.biz/media/expert/smartcity_nagumo/ (in Japanese) (accessed 2020-10-22)
- [21] 国土交通省都市局. スマートシティの実現に向けて [中間とりまとめ]. 平成30年8月. <https://www.mlit.go.jp/common/001249774.pdf> (accessed 2020-10-22)
City Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. [Smart City no jitsugen ni mukete [Chukan torimatome].] 2018.8. <https://www.mlit.go.jp/common/001249774.pdf> (in Japanese) (accessed 2020-10-22)
- [22] 内閣府. スマートシティリファレンスアーキテクチャホワイトペーパー 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期 ビッグデータ・AIを活用したサイバー空間基盤技術におけるアーキテクチャ構築及び実証研究事業 (第1版). 2020年3月31日. https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/a-whitepaper1_200331.pdf (accessed 2020-10-22)
Cabinet Office. [Smart City Reference Architecture White Paper; Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program 2nd Period, Big-Data/AI o katsuyo shita cyber kukan kiban gijutsu ni okeru architecture kochiku oyobi jisho kenkyu jigyo.] 2020.3.31. https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/a-whitepaper1_200331.pdf (in Japanese) (accessed 2020-10-22)
- [23] 内閣府. スーパーシティ/スマートシティの相互運用性の確保等に関する検討会 最終報告書. 令和2年9月. https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/kokusentoc/supercity/pdf/sogowg_houkokusyo.pdf (accessed 2020-10-22)
Cabinet Office. [Super City/Smart City no sogo unyousei no kakuhoto ni kansuru kentokai saishu hokokusho.] 2020.9. https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/kokusentoc/supercity/pdf/sogowg_houkokusyo.pdf (in Japanese) (accessed 2020-10-22)
- [24] 会津若松市のスマートシティプロジェクト. 地方都市におけるヘルスケア事業の新しい形. アクセンチュア, 監修. 日本経済新聞出版, 編. 日経MOOKヘルスケアの未来. 東京: 日本経済新聞出版社; 2020. p.56-59.
Aizuwakamatsu-shi no Smart City Project. [Chiho toshi ni okeru Health Care jigyo no atarashii katachi.] Supervised by Accenture Japan Ltd. Edited by Nikkei Business Publications. Nikkei MOOK Health Care no Mirai. Tokyo: Nikkei Business Publications; 2020.8. p.56-59. (in Japanese)
- [25] 宮森健一朗. スマートシティ会津若松とヘルスケア事業のとりくみ (メインシンポジウム I 健康医療介護とスマートシティ・まちづくり). 第79回日本公衆衛生学会総会; 2020.10.20-22; 京都. 日本公衆衛生雑誌. 2020;67(10特別抄録):62.
Miyamori K. [Smart City Aizuwakamatsu to Health Care jigyo no torikumi (Main Symposium I Kenko Iryo Kaigo to Smart City/Machidukuri).] The 79th Annual Meeting of Japanese Society of Public Health; 2020.10.20-22; Kyoto. Japanese Journal of Public Health. 2020;67(Suppl.10):62. (in Japanese)
- [26] 会津若松市. スマートシティ会津若松パンフレット. https://www.city.aizuwakamatsu.fukushima.jp/docs/2013101500018/files/smartcity_panphlet2020.pdf (accessed 2020-10-22)
Aizuwakamatsu City. [Smart City Aizuwakamatsu Pamphlet.] https://www.city.aizuwakamatsu.fukushima.jp/docs/2013101500018/files/smartcity_panphlet2020.pdf (in Japanese) (accessed 2020-10-22)
- [27] 坂本道弘. Fujisawaサステイナブル・スマートタウン～企業不動産開発からの新潮流～. 民間都市開発推進機構MINTO. 2020;47:73-78.
Sakamoto M. [Fujisawa Sustainable Smart Town: Kigyo fudosan kaihatsu karano shinchoryu.] Organization for Promoting Urban Development MINTO. 2020;47:73-78. (in Japanese)
- [28] 荒川剛. サステイナブル・スマートタウン ウェルネスサービスへの挑戦 (メインシンポジウム I 健康医療介護とスマートシティ・まちづくり). 第79回日本公衆衛生学会総会; 2020.10.20-22; 京都. 日本公衆衛生雑誌. 2020;67(10特別抄録):63.
Arakawa T. [Sustainable Smart Town, Wellness Service eno Chosen (Main Symposium I Kenko Iryo Kaigo to Smart City/Machizukuri).] The 79th Annual Meeting of Japanese Society of Public Health; 2020.10.20-22; Kyoto. Japanese Journal of Public Health. 2020;67(Suppl.10):63. (in Japanese)