

都市気候変動の原因と影響と適応策の設計

Causes and Impacts of Urban Climate Change and Design of Adaptation Measures

河北省講演会「先端技術の発展と日中科学分野の連携」

2021年11月24日

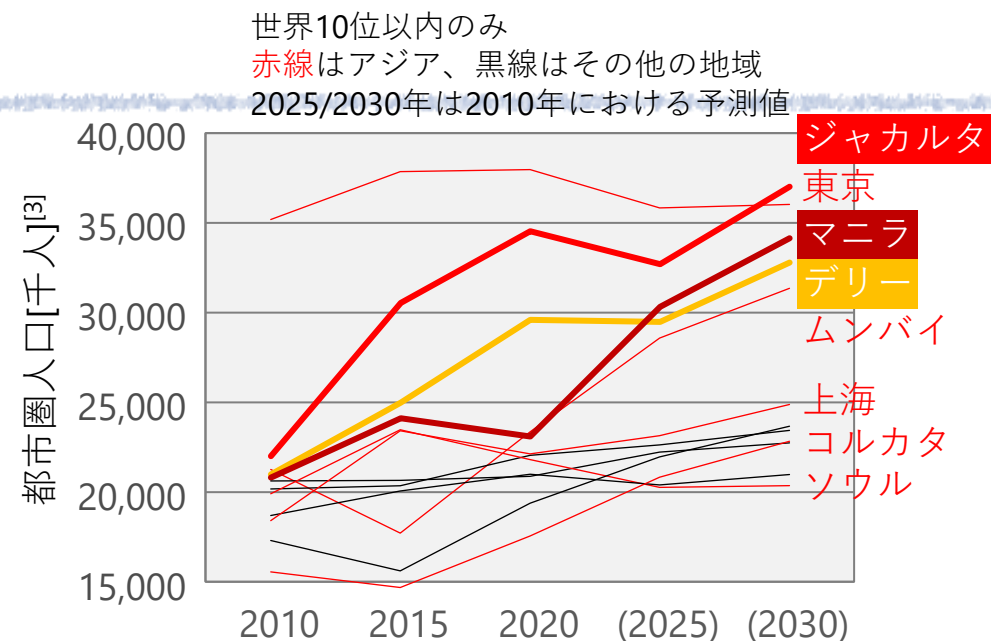
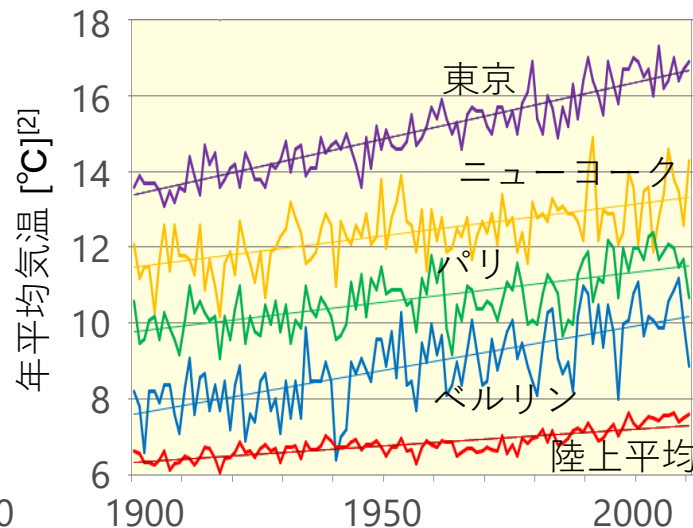
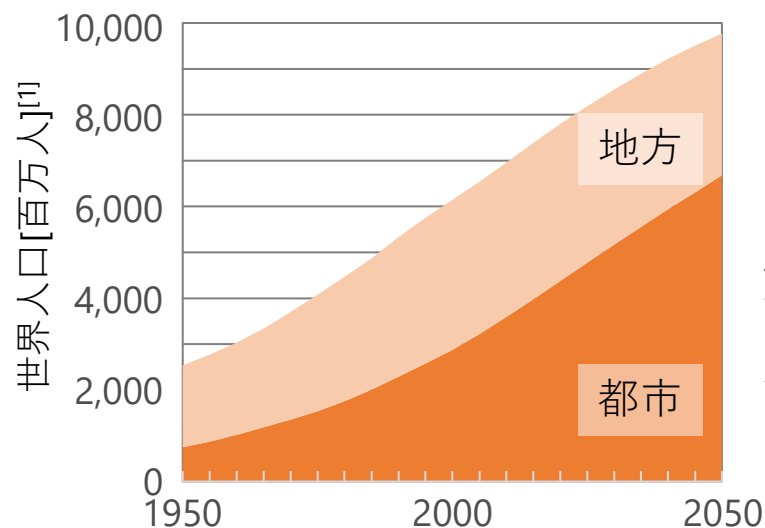
井原 智彦

ihara-t@k.u-tokyo.ac.jp

<http://www.lct.k.u-tokyo.ac.jp>

1 都市気候変動とは

都市における気候変動



- 都市は、世界人口の過半、資産や経済活動の大部分を抱え、温暖化に加えヒートアイランド現象でも気温上昇。
- 気候変動のリスクは、都市域（特に発展途上国）に集中（海面上昇、沿岸氾濫、内水氾濫、極端暑熱、）（IPCC AR5 WGII）

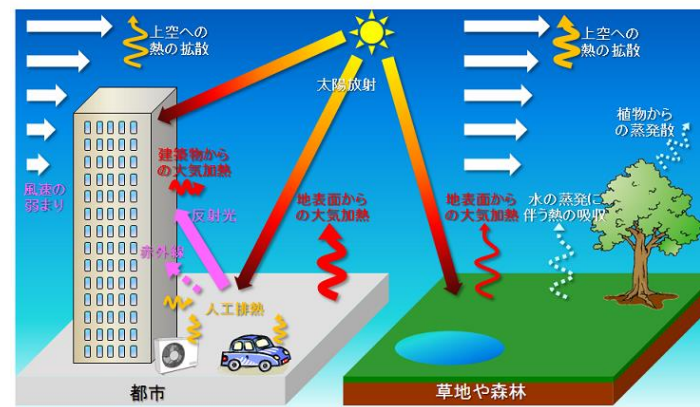
- 低緯度のため気温が高く、人口が急増するアジアのメガシティは、特に深刻。
- 正に建設ラッシュであるため、望ましい適応策の設計を早急に示す必要あり。

1 都市気候変動とは

都市気候変動の構造は？

温室効果ガスによる地球温暖化 都市の人工化によるヒートアイランド現象

原因



http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/02/qa.html

現象

都市における気候変動

影響

熱中症



冷房エネルギー消費



桜の開花



など

http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList9_2.html

2つの温暖化

東京の気温上昇
100年間で+3.0°C

=

+

(1) 温室効果ガスによる地球温暖化

全球レベルの温暖化

全球で+0.9°C（日本では+1.0°C）

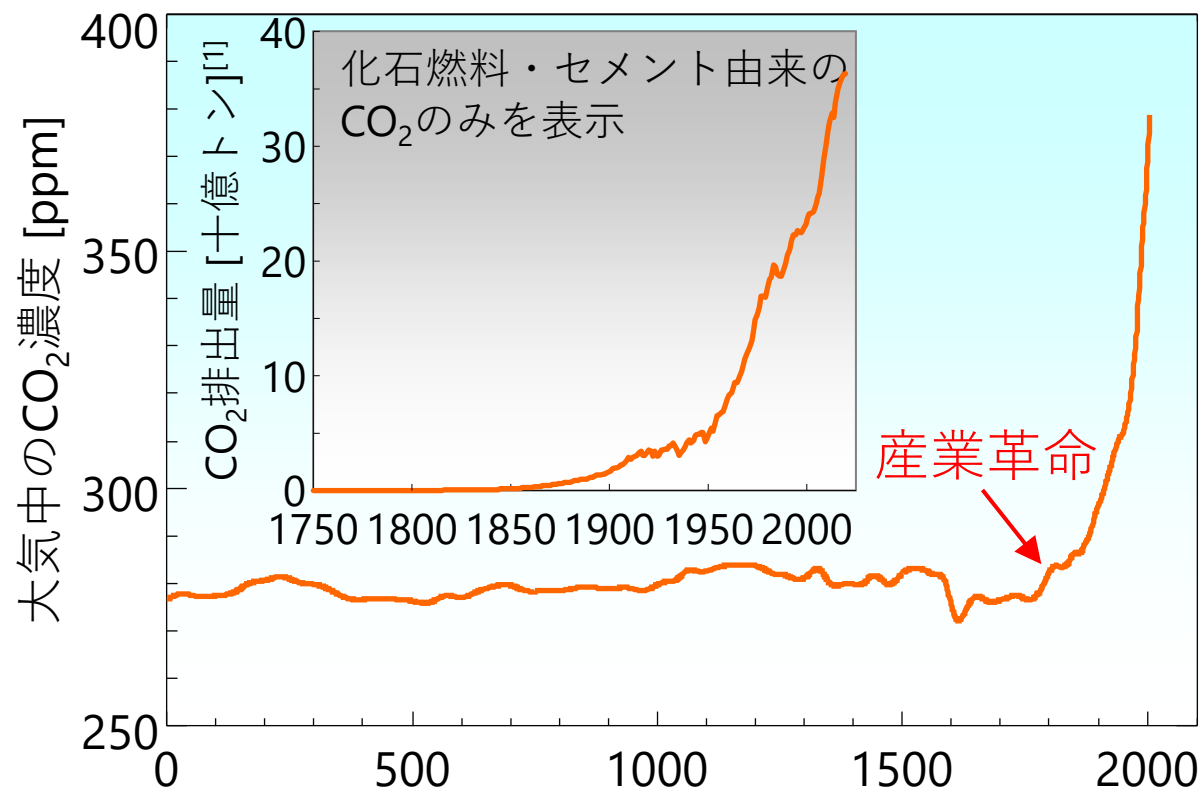
(2) 都市の人工化によるヒートアイランド現象

都市に特有の温暖化

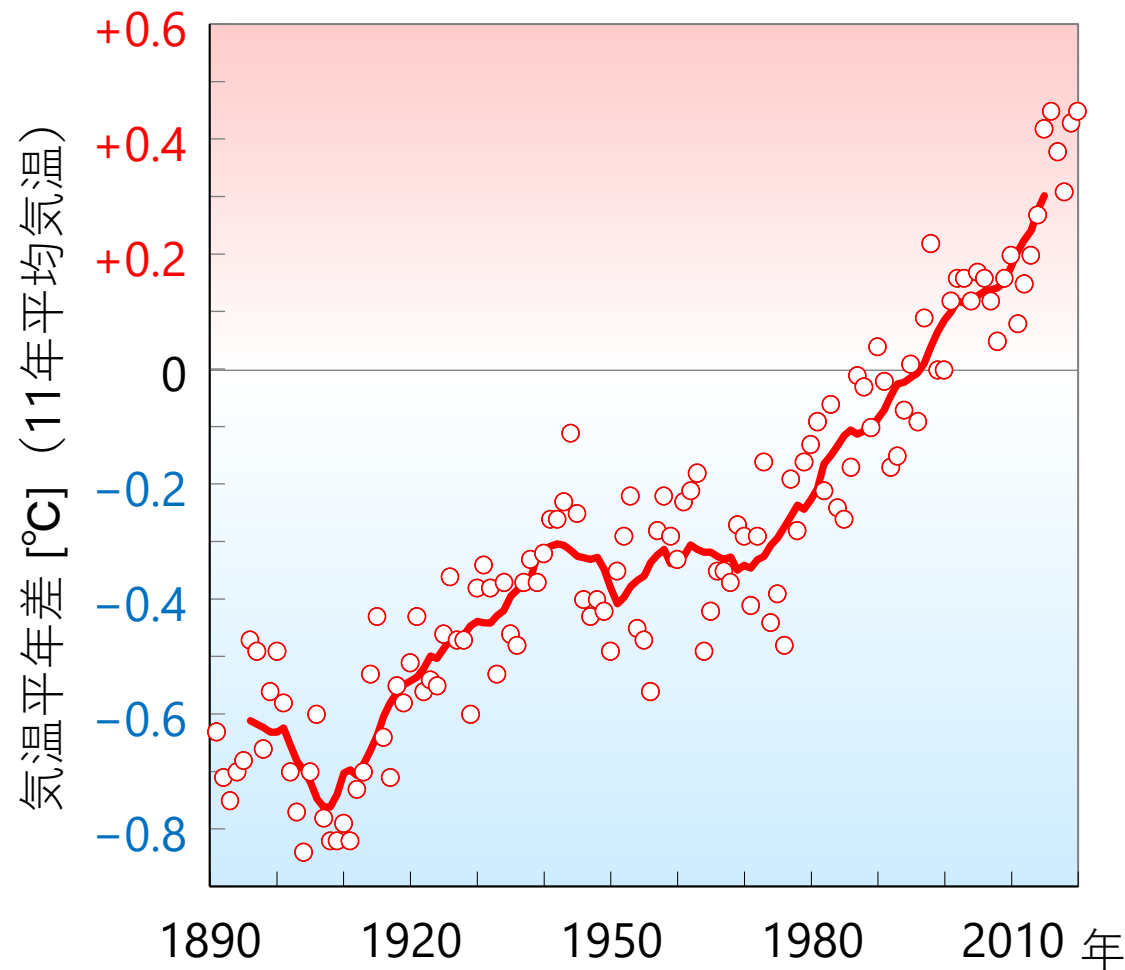
東京では+2.0°C

地球温暖化の原因

大気中のCO₂濃度の変化^[2]



全球気温の変化

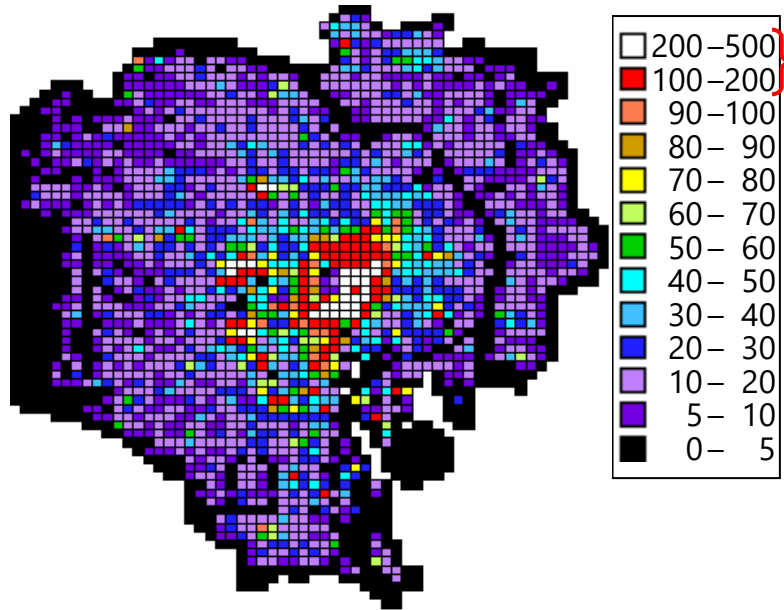


[1] Carbon Dioxide Information Analysis Center. <http://cdiac.ornl.gov> [2] IPCC (2007): Fourth Assessment Report (AR4) WG I.
[3] 気象庁: 気象統計情報. <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>

2.1 都市気候変動の原因

ヒートアイランド現象の原因^[1]

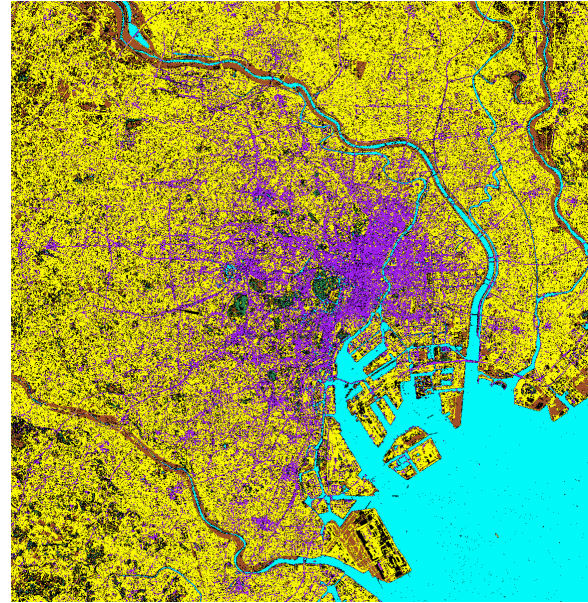
人工排熱の増加



8月14時の東京都区部における
エネルギー消費密度[W/m²]^[2]

都心を中心に
100 W/m²超のエネルギー消費
→ 熱として
大気に排出

地表面被覆の人工化^[2]



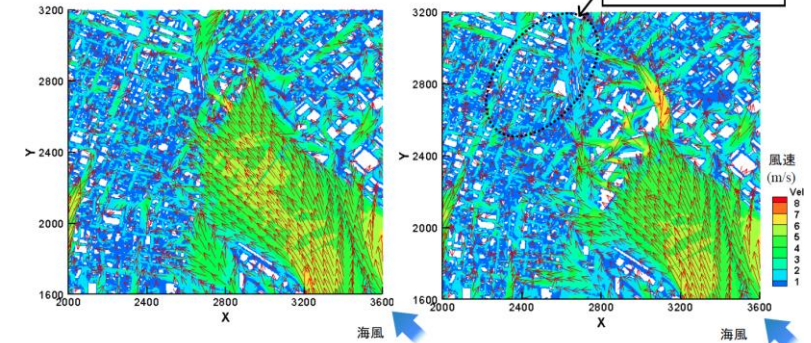
緑：緑地
茶：裸地・草地
黄：舗装面
紫：コンクリート街区
水色：水域
黒：判別不能

緑地が減ると気化熱（蒸発潜熱）が減るので日射が過度に地面とビル壁を熱する。その熱（対流顕熱）で大気が暑くなる。

都市形態の高密度化



汐留
シオサイト^[1]

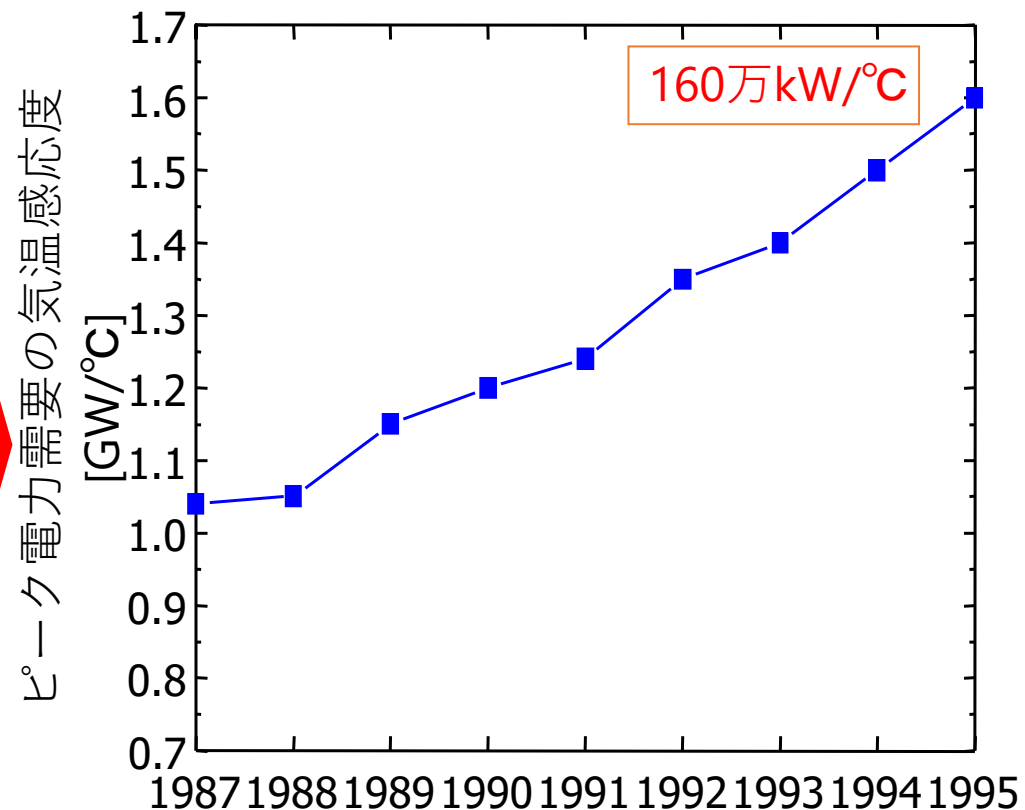
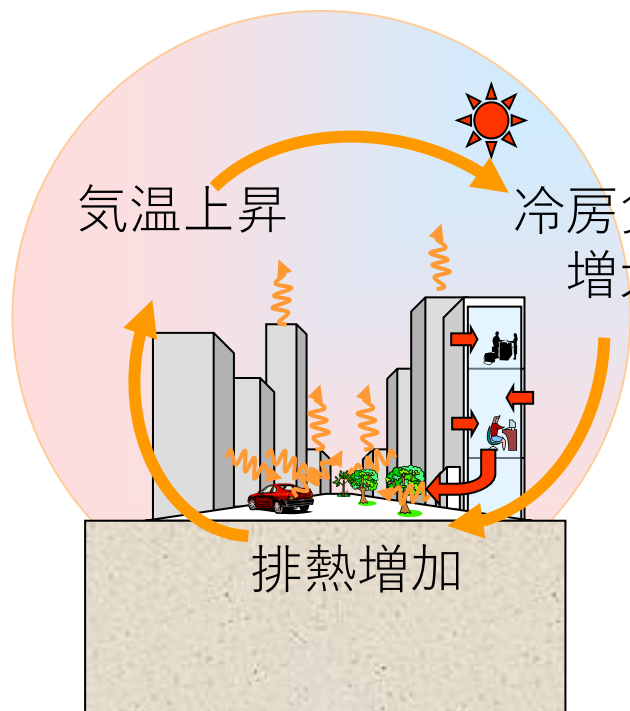


高層ビル群によって
風が弱められる。
天空への放射も弱まる。

[1] 環境省(2013): 平成24年度版ヒートアイランド対策ガイドライン 改訂版. http://www.env.go.jp/air/life/heat_island/guideline/h24.html [2] 亀卦川幸浩(2001): 東京大学博士論文.

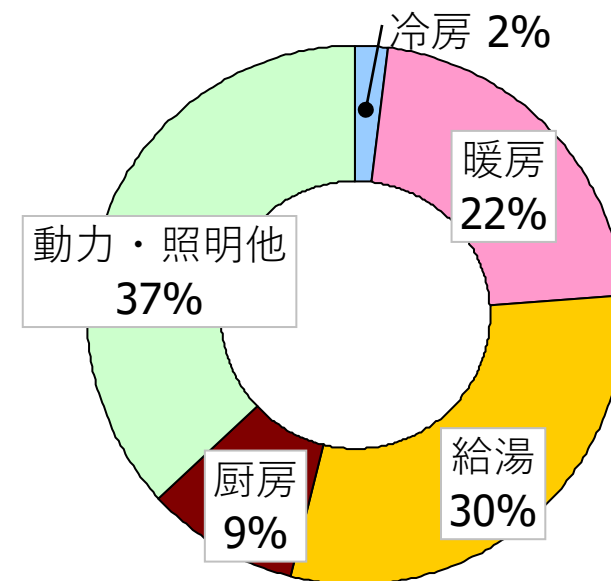
都市気候変動の影響(1)

エネルギー消費



夏季ピーク電力消費（東京電力）の気温感応度

ピークのためだけに発電所が必要に。



日本の家庭用エネルギー消費^[1]

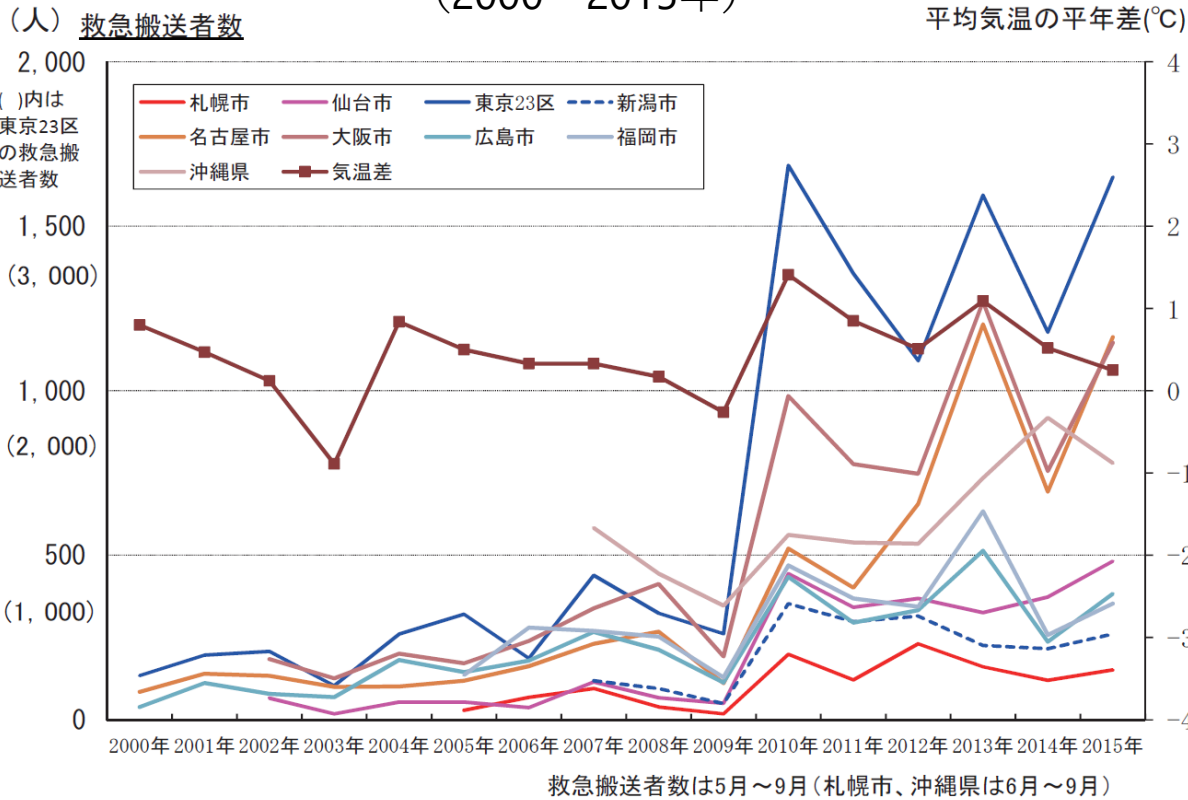
家庭用エネルギー消費は、
冷暖房・給湯・動力で1/3ずつ。
冷暖房は暖房が9割以上、
冷房は暖房の1/10。

[1] 日本エネルギー経済研究所(2007): 2008年版 EDMC/エネルギー・経済統計要覧。

都市気候変動の影響(2)

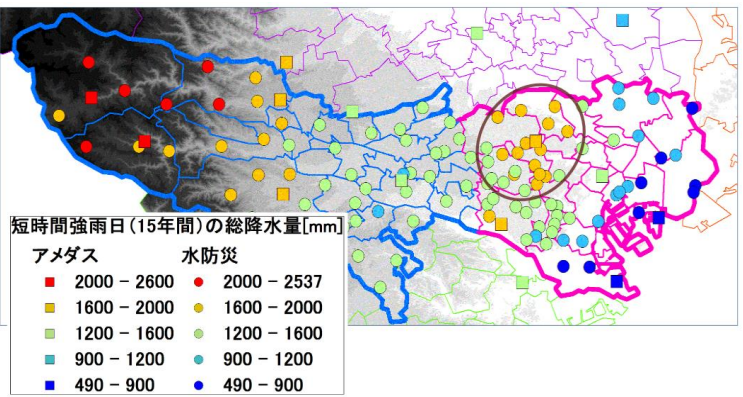
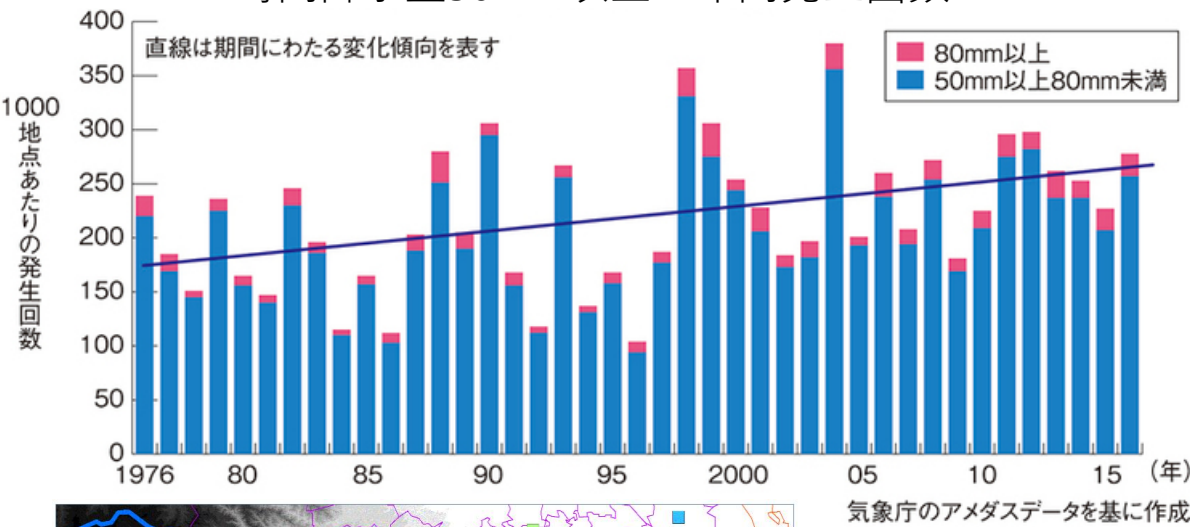
人間健康

都市別・年次別熱中症救急搬送者数^[1]
(2000～2015年)



集中豪雨

1時間降水量50mm以上の年間発生回数^[2]



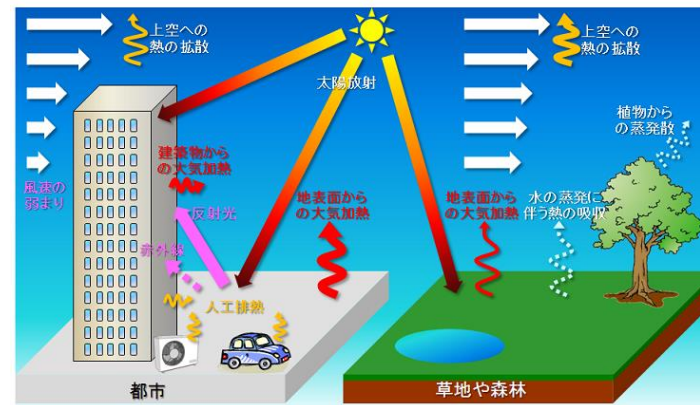
15年間の
短時間強雨発生日の
総降水量^[3]

[1] 環境省(2018): 熱中症保険マニュアル2018. http://www.wbgt.env.go.jp/heatillness_manual.php [2] 日刊工業新聞社(2017): ゲリラ豪雨への備え-雨水流出抑制と自治体の取り組み. <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00432424/0/14756> [3] 水成真由美(2010): 筑波大学卒業論文. <http://www.geoenv.tsukuba.ac.jp/~kusakaken/index.php?id=3>

都市気候の変動への対策は？

温室効果ガスによる地球温暖化 都市の人工化によるヒートアイランド現象

原因



http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/02/qa.html

現象

都市における気候変動

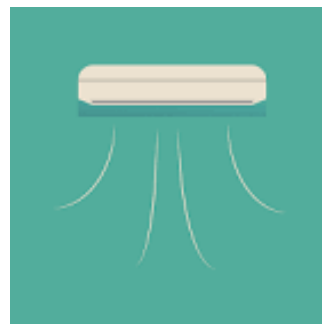
適応策

影響

熱中症



冷房エネルギー消費



桜の開花



など

http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList9_2.html

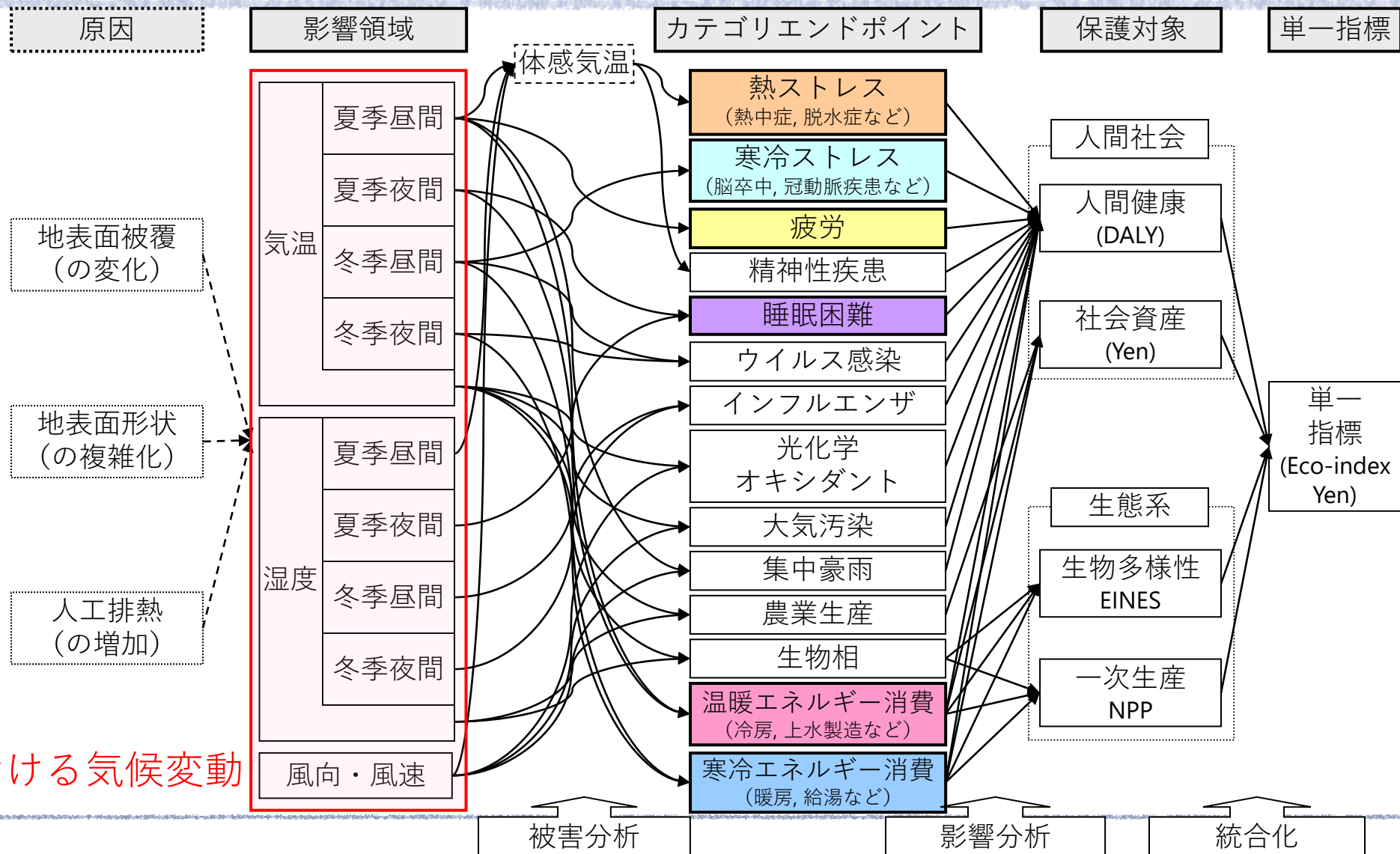
3 都市気候変動の適応策の設計

適応策を設計するには...

1. 環境影響を定量化

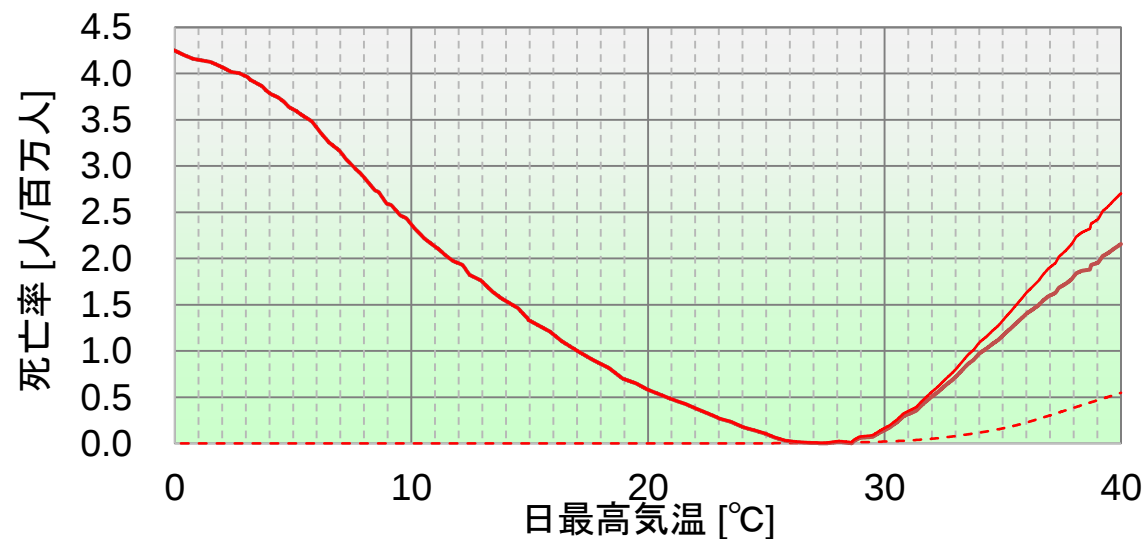
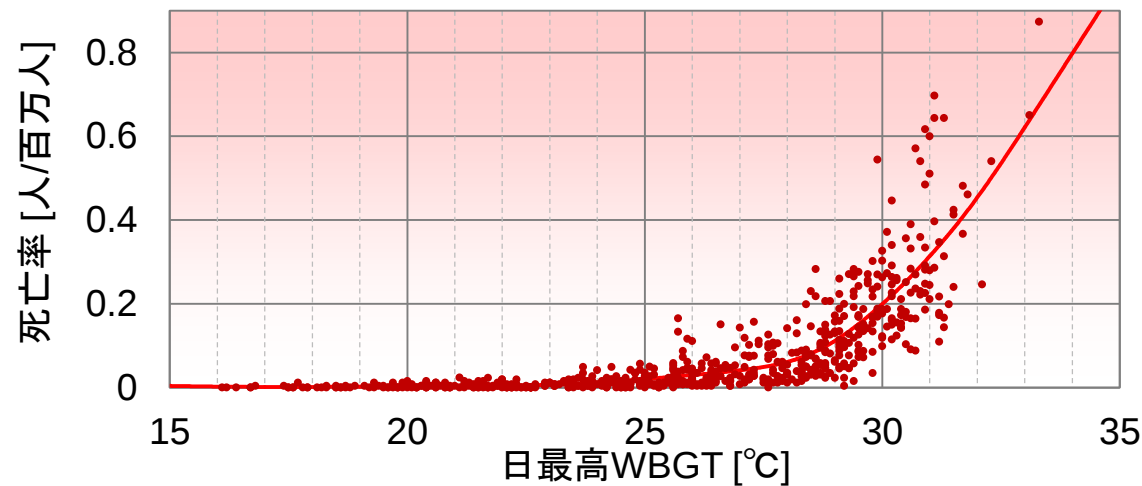
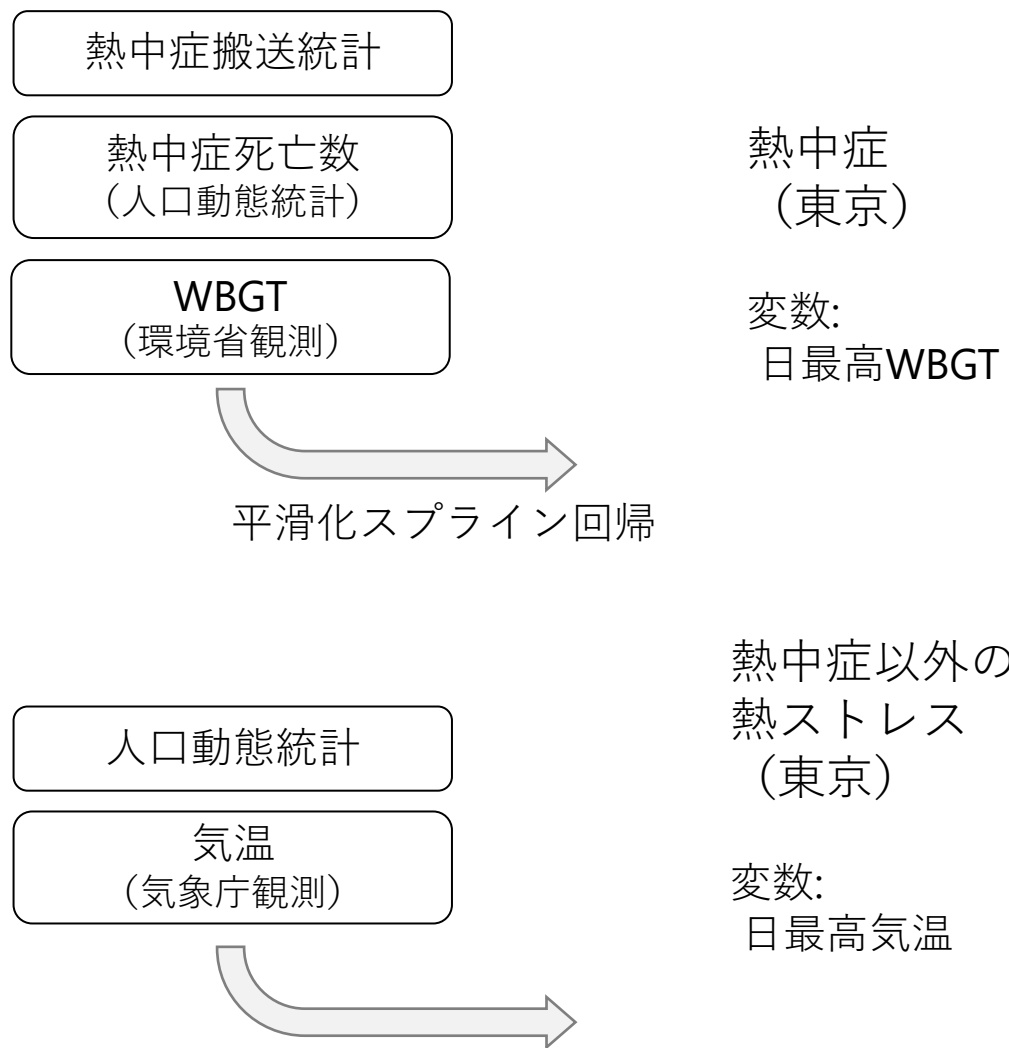
2. 適応策の導入効果の評価

被害算定型影響評価手法による都市気候変動の影響評価

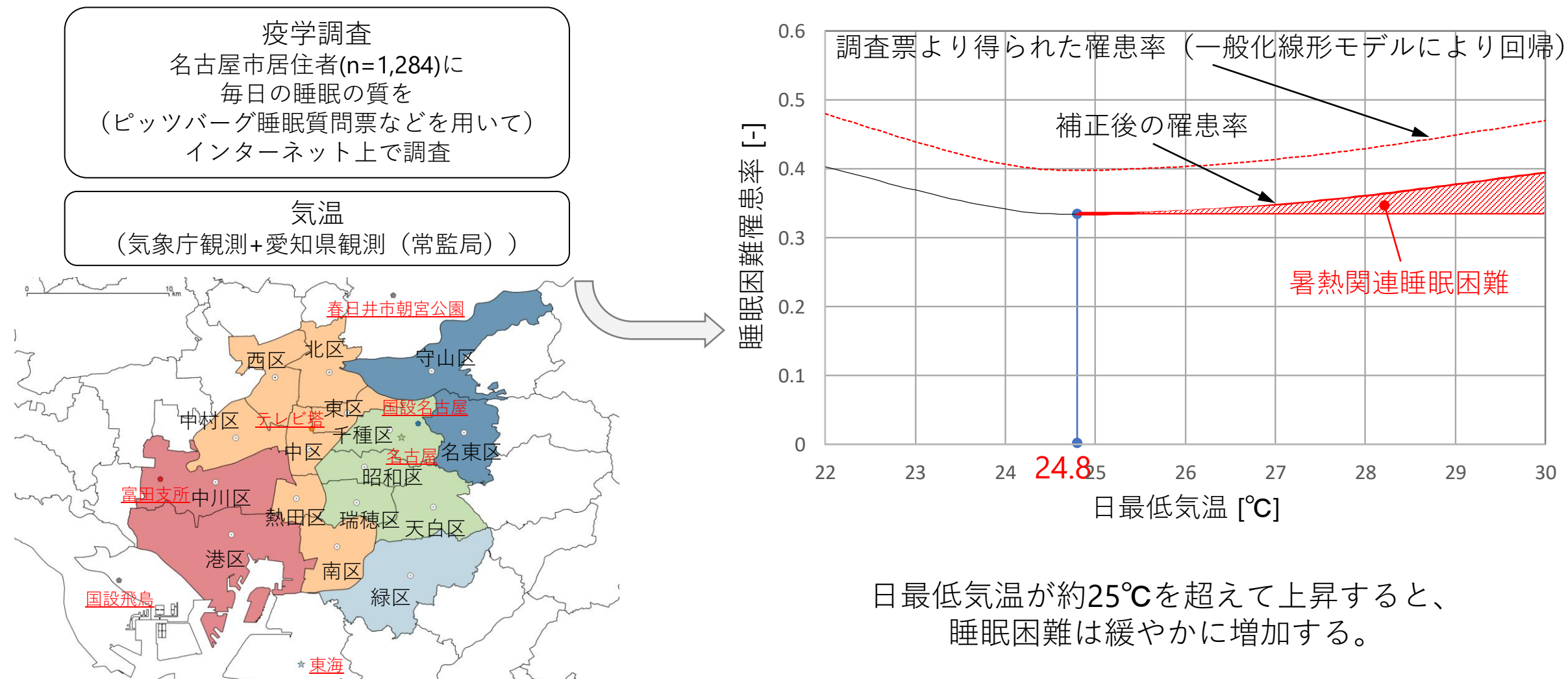


3.1 都市気候変動の影響の定量化

熱ストレス被害関数の開発



睡眠障害被害関数の開発



障害調整生存年(DALY)による健康影響評価

被害算定型影響評価手法では、人間健康を障害調整生存年(DALY)で評価する。

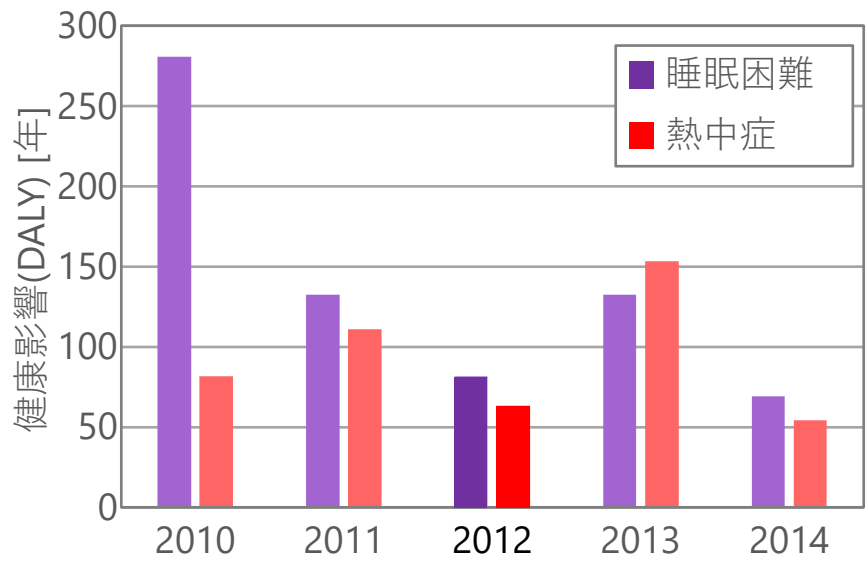
- $DALY = YLL + YLD$ (YLL: 損失生存年数, YLD: 障害生存年数)
- $YLL = N \times L$ (N: 死亡数, L: 損失年数)
- $YLD = I \times DW \times L$ (I: 罹患数, DW: 重篤度, L: 罹患期間)

専門家（睡眠、疲労または精神科）への対面調査、
一般内科医へのインターネット調査を通じて、

- 3種類の睡眠困難、5種類の疲労の症状を文章で説明
- 33種類の疾患の重篤度（Müller-Wenk(2002)に軽度の精神疾患を追加）を提示することで、各種の睡眠困難・疲労の重篤度を評価

PSQI-Jに基づいて説明
軽度: PSQI = 5.5 – 7.4
中等度: PSQI > 7.5

	睡眠困難			疲労				
				急性疲労	慢性疲労症候群			
	環境性	軽度	中等度		診断基準	軽度	中等度	重度
専門家 睡眠(n=6) 疲労(n=7)	0.101 ± 0.0004	0.069 ± 0.053	0.086 ± 0.067	0.050 ± 0.036	0.099 ± 0.038	0.164 ± 0.093	0.281 ± 0.148	0.459 ± 0.216
一般内科医 (n=57)	0.114 ± 0.095	0.140 ± 0.165	0.126 ± 0.132		0.154 ± 0.141	0.099 ± 0.094	0.147 ± 0.126	0.226 ± 0.182



2010–2014年の名古屋では、睡眠困難（81.8年）は、熱中症（63.6年）とほぼ同等の被害をもたらしていた。

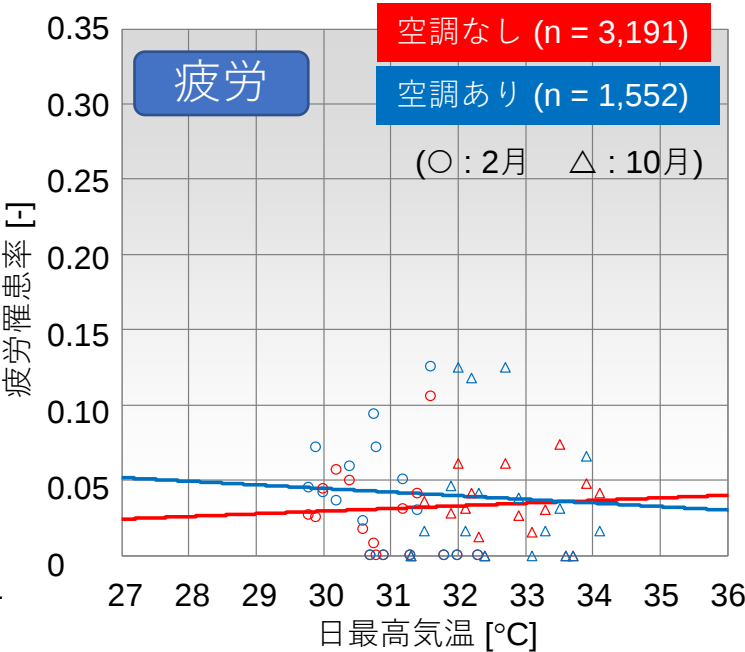
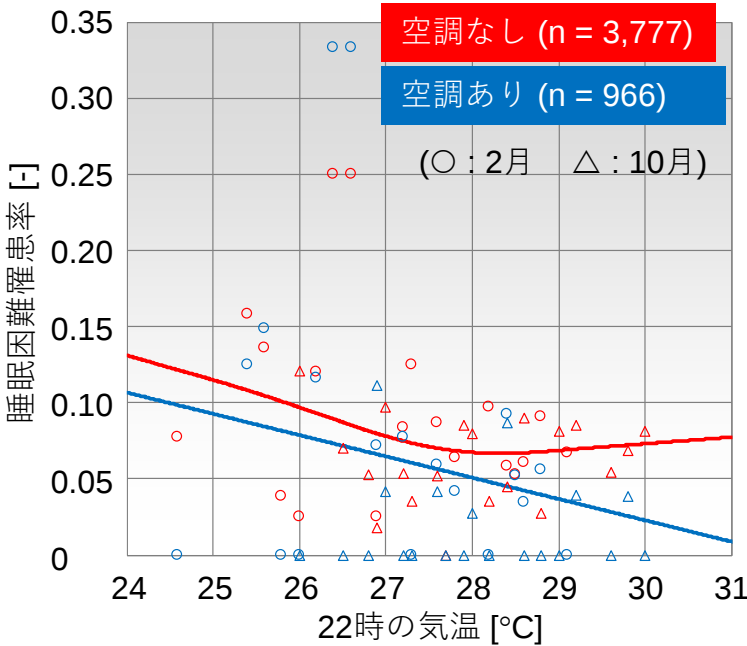
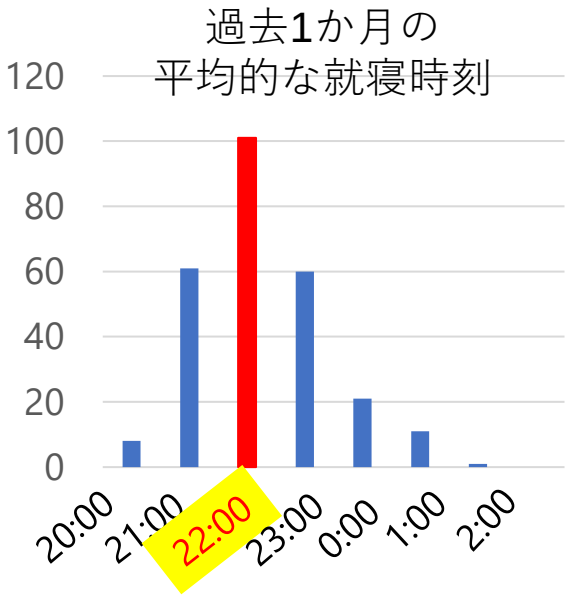
アジアのメガシティへの展開

疫学調査
ジャカルタ居住者(n=263)に
毎日の睡眠の質を
訪問留め置き方式で調査

気温
(NOAA集計データ)

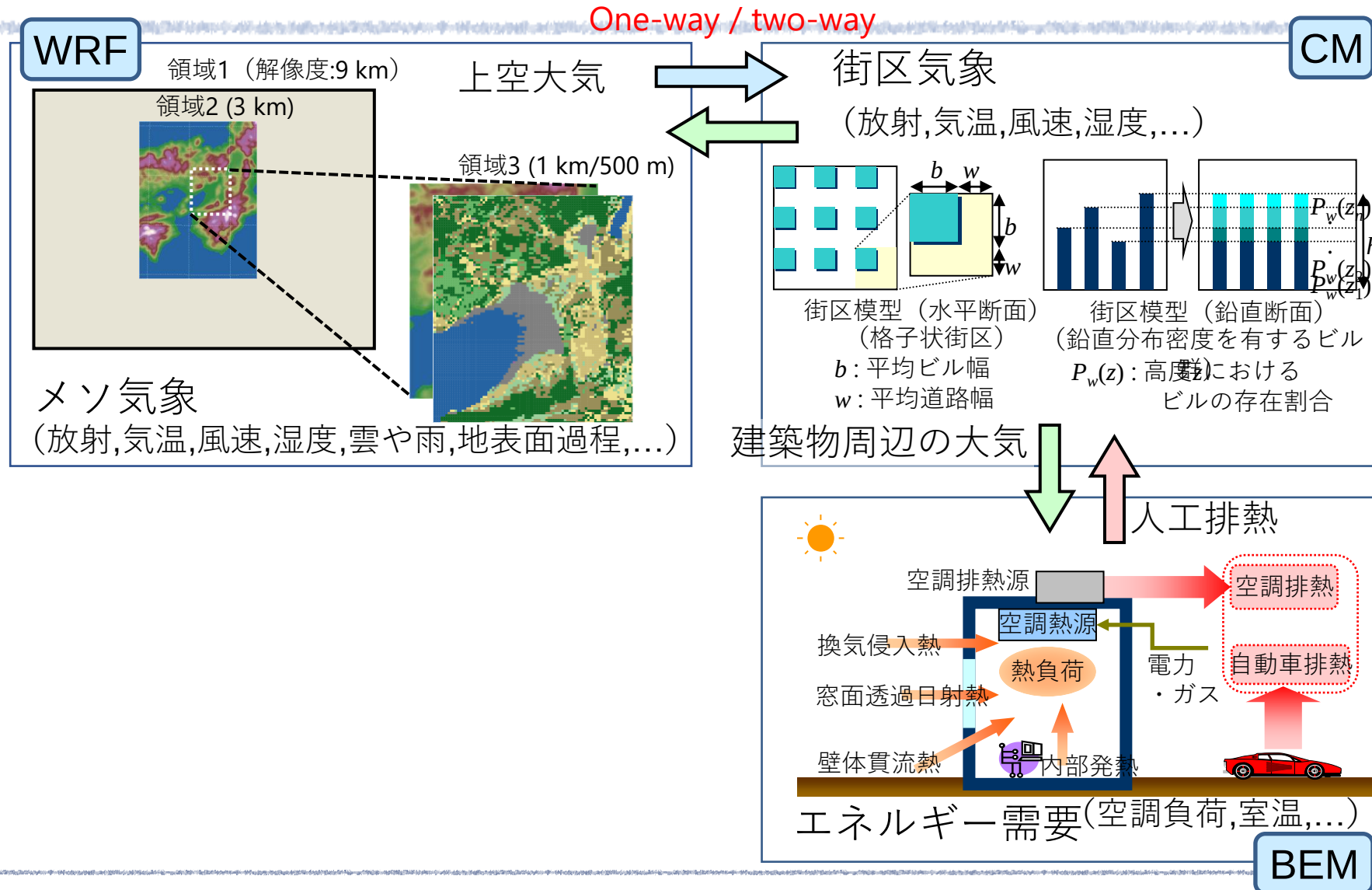
Doi et al (2001)^[a]
(N=1871)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	睡眠困難
	睡眠の質	入眠時間	睡眠時間	睡眠効率	睡眠困難	眠剤の使用	日中覚醒	
ジャカルタ 2016, 訪問留め置き	0.65	0.76	0.84	0.00	0.78	0.12	0.30	16.7%
東京 2007, インターネット	1.28	1.08	1.40	0.19	0.83	0.26	0.90	46.6%
日本全国 1997, 郵送	0.95	0.94	0.92	0.31	0.81	0.26	0.61	28.8%

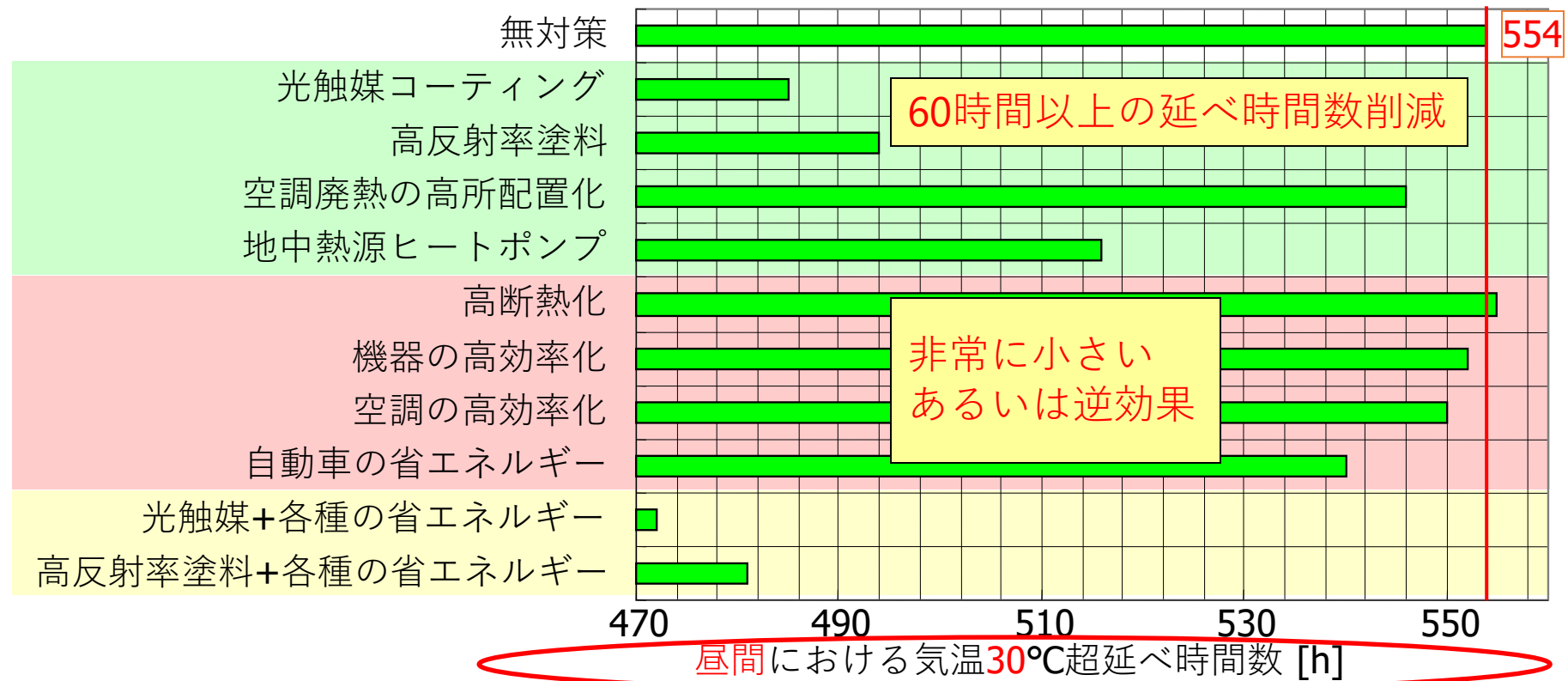


[a] Doi Y et al (2001): *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 55 (3), pp.213–215.
[1] 草間蓮(2017): 東京大学修士論文. [2] Ihara T and Kusama R (2017): The 21st International Congress of Biometeorology.

都市気象-ビルエネルギー連成モデル WRF-CM-BEM

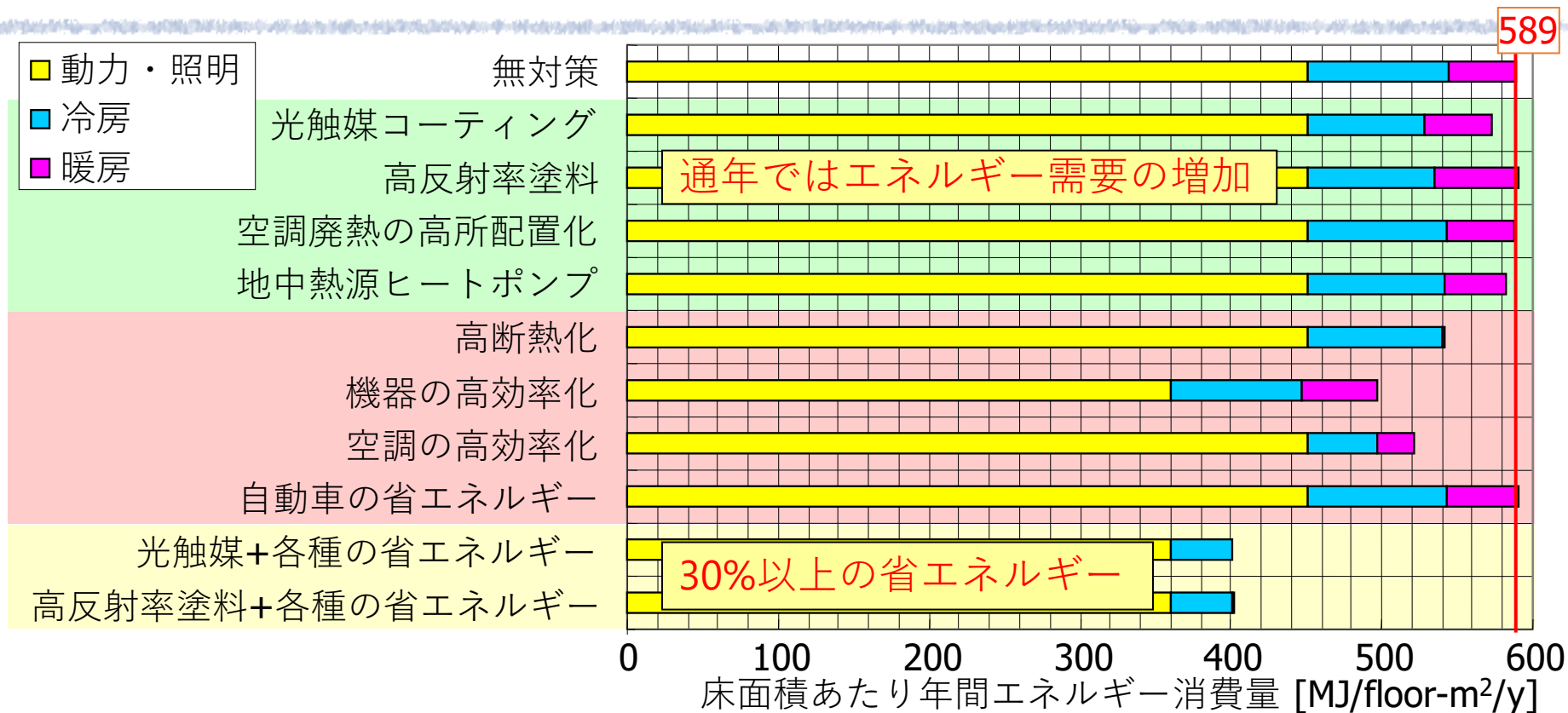


シミュレーション結果：夏季の気温（東京/事務所街区）



- 光触媒コーティングや高反射率塗料など建築被覆対策の効果は大きい。
- 地中熱源ヒートポンプはそれに次ぐ。
- 省エネルギーによる気温低下効果は非常に小さい。

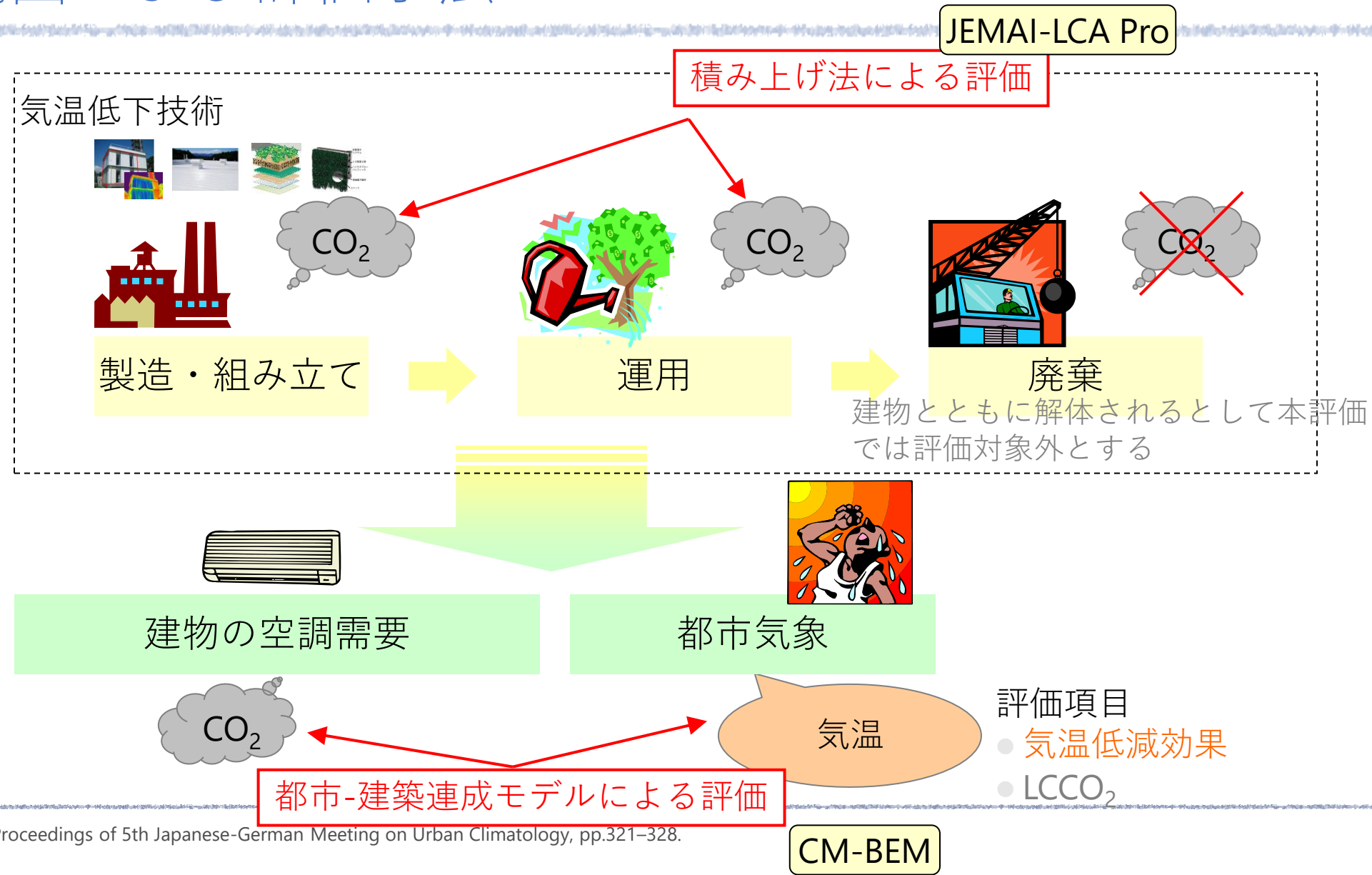
シミュレーション結果：エネルギー消費（東京/事務所街区）



- 光触媒や地中熱源ヒートポンプはわずかにエネルギー消費を削減する。
- 高反射率塗料は通年では増エネルギーの可能性。

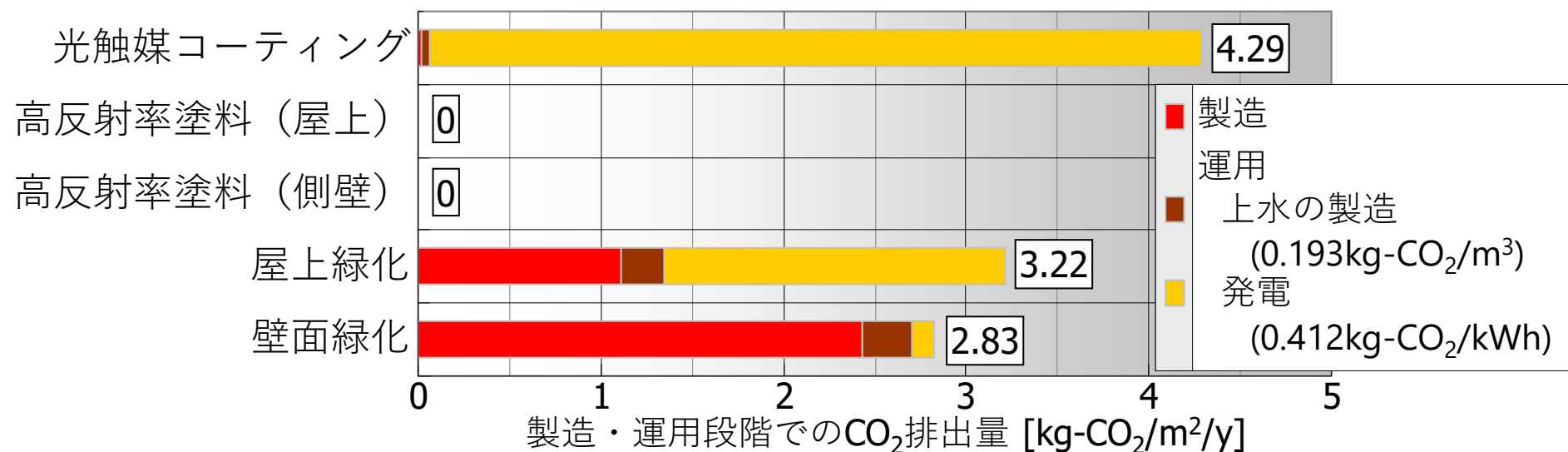
冬季の暖房需要増にも着目した気温低下技術の導入設計が可能に。

評価範囲および評価手法



Ihara T et al (2008): Proceedings of 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, pp.321-328.

製造～組み立てのCO₂排出量（東京/事務所街区）



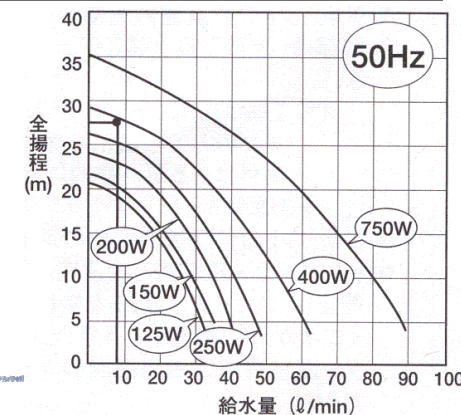
- 光触媒コーティングは、電力（ポンプ動力）によるCO₂排出が圧倒的。
- 屋上緑化は素材製造と電力が大きく、壁面緑化は素材製造が圧倒的。

製造

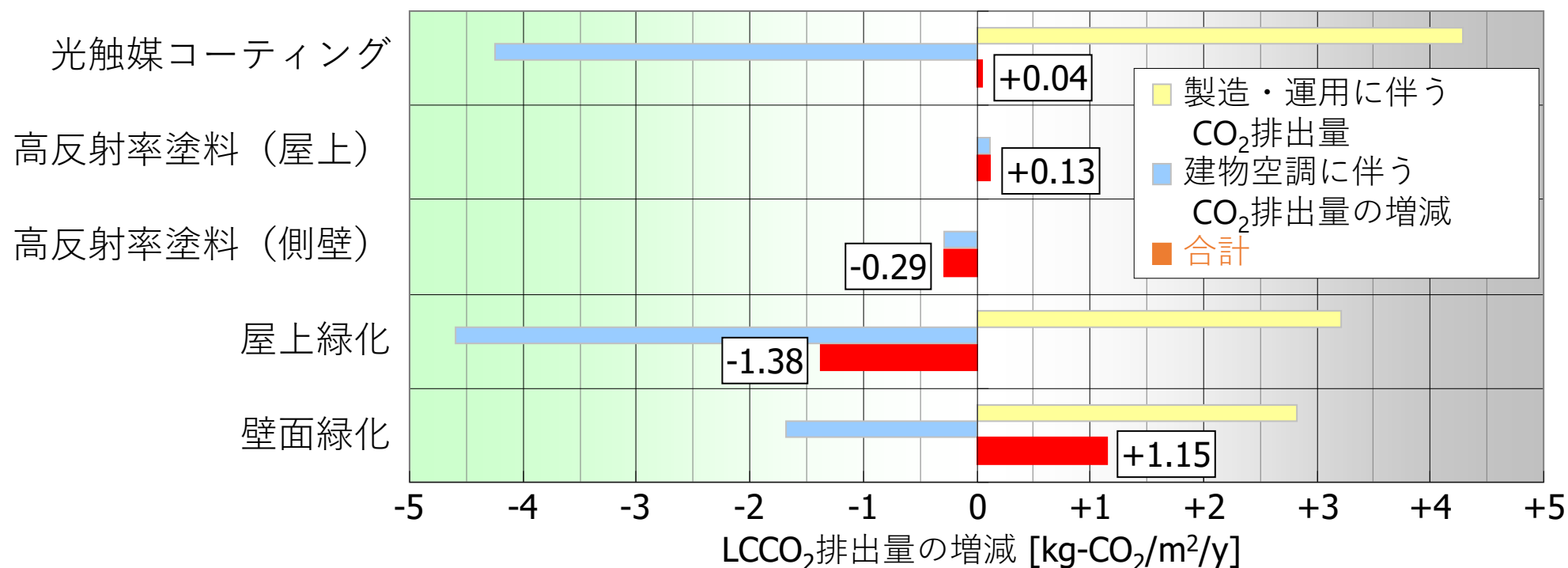
- 金属のCO₂排出は大きい
→ 壁面緑化
(SS400製パネル)

揚水動力

- 高所ほど大きくなる
→ 屋上緑化, 壁面緑化
- 稼働時間が長いと大きくなる
→ 光触媒コーティング



LCCO₂排出量（施工面積あたり）（東京/事務所街区）



- 屋上緑化と高反射率塗料（側壁）のみがLCCO₂排出減となった。
- 光触媒コーティングと壁面緑化のように、運用や素材製造によるCO₂排出増が、空調削減によるCO₂排出減を上回る場合もある。

気温低下技術が導入されたときの気温とCO₂排出量の同時評価が可能に。

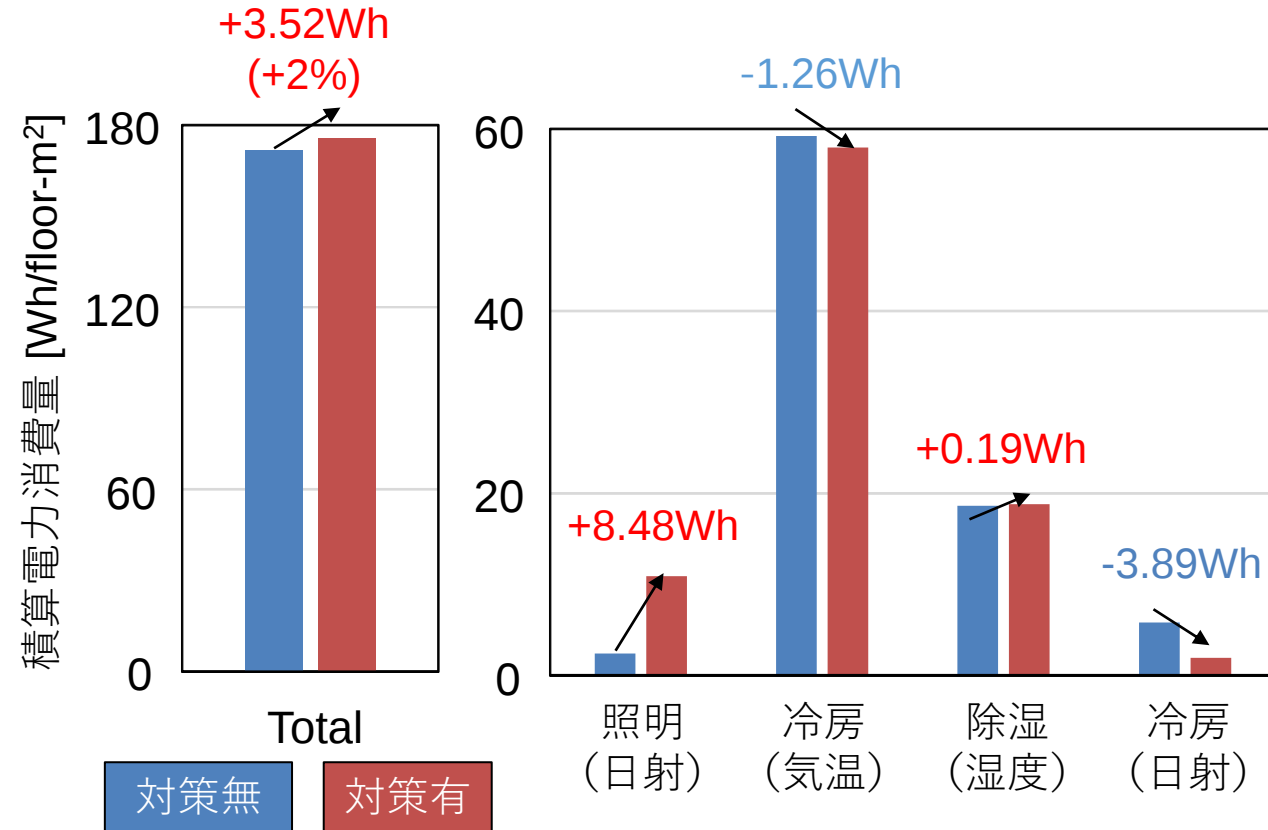
壁面緑化の導入効果の評価（東京）



壁面緑化

- 東京・戸建住宅街区
- 2007/8/4 0:00~24:00

壁面緑化導入時の1日積算電力消費量

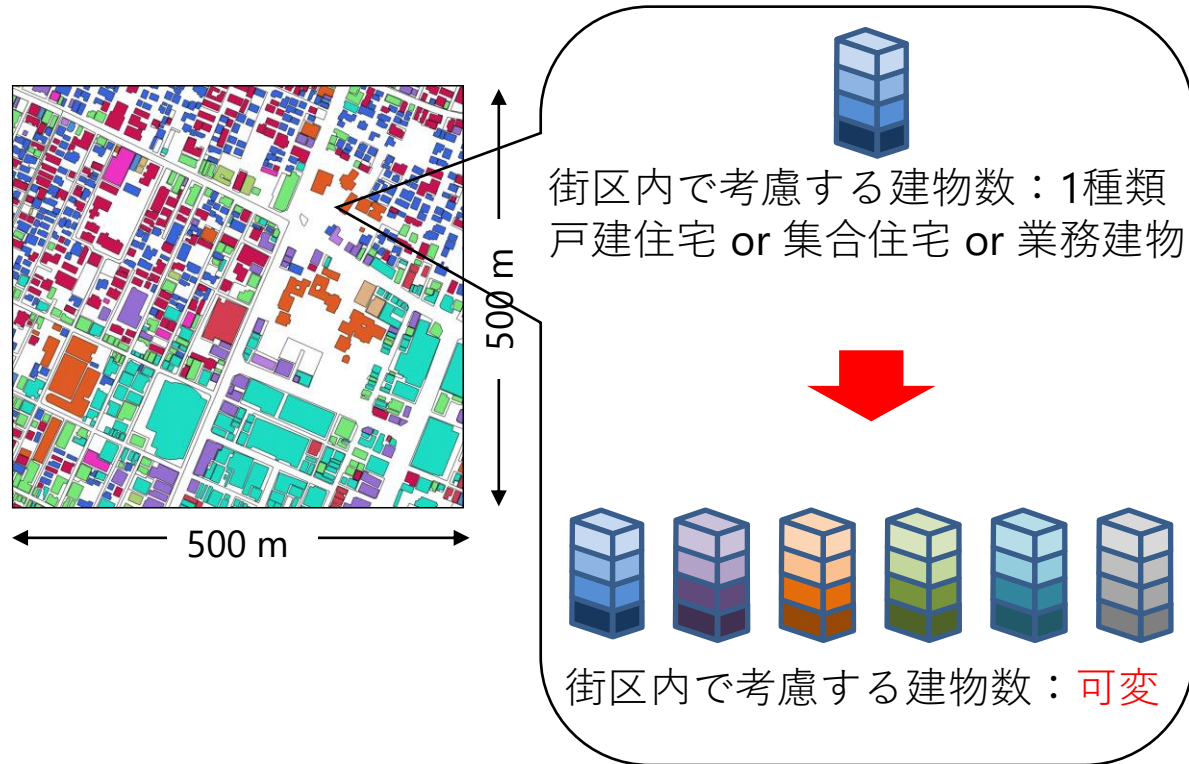


積算電力消費は微増。

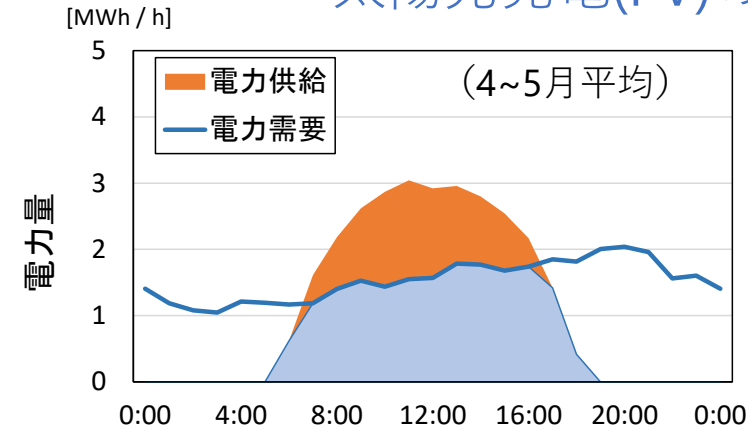
- 冷房需要は、気温・日射減による効果で減少。
- 照明需要は、日射減によって大きく増加。

再エネ・省エネの電力需給や気温への影響（大阪）

CM-BEMのサブグリッド化

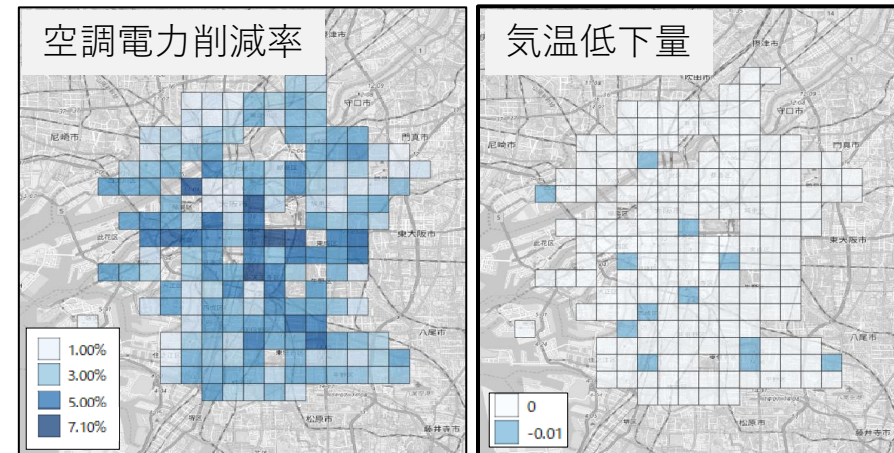


太陽光発電(PV)の評価



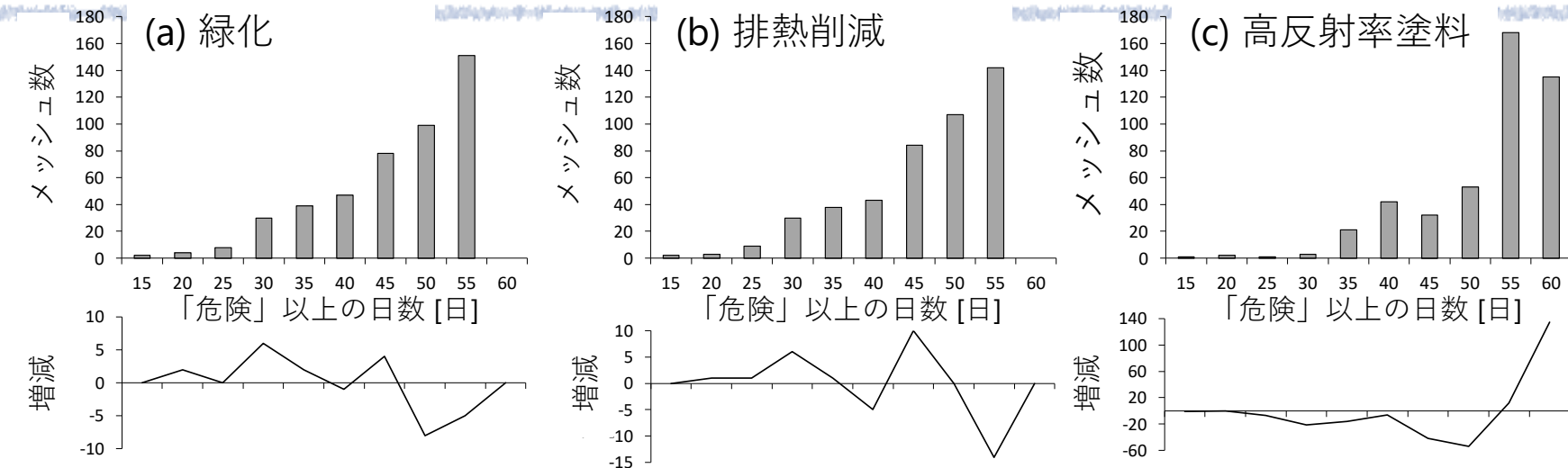
- 屋上面の50%にPVを設置。
- 発電の有効活用には、10 MWhの蓄電池が必要。

中小規模業務ビルのエアコンの高効率化



- 最大7.1%、平均3.4%の空調電力を削減。
- 気温低下は、最大0.01°C。

緑化・排熱削減・高反射率塗料の熱中症の軽減効果（東京）

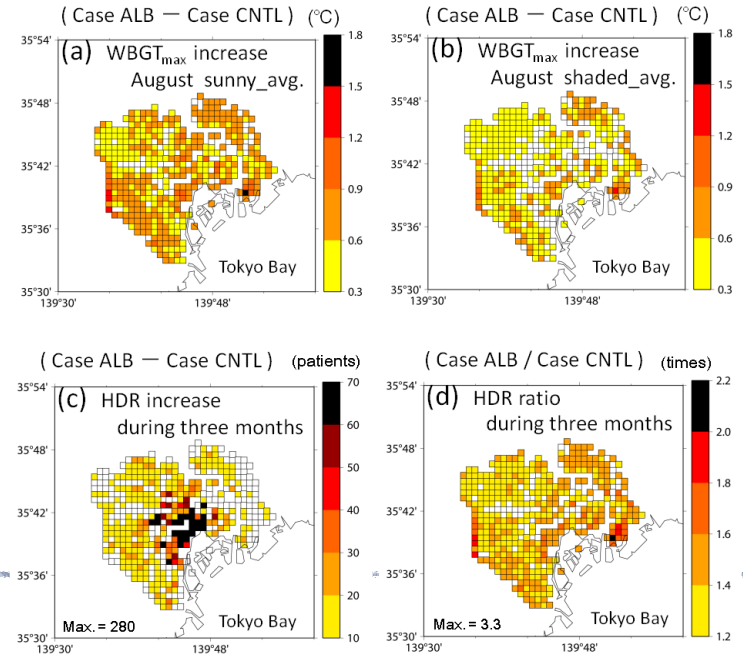


$$WBGT = 0.7 \times T_w + 0.2 \times T_g + 0.1 \times T_a$$

温度基準 (WBGT)	注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 (31℃以上)	すべての生活活動でおこる危険性	高齢者においては安静状態でも発生する危険性が大きい。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
厳重警戒 (28～31℃※)		外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒 (25～28℃※)	中等度以上の生活活動でおこる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に充分に休息を取り入れる。
注意 (25℃未満)	強い生活活動でおこる危険性	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には発生する危険性がある。

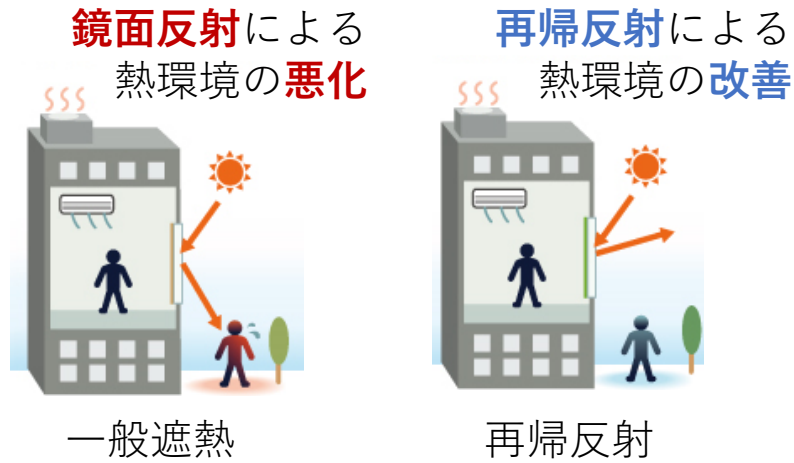
<http://www.wbgt.env.go.jp/wbgt.php>

高反射率塗料を導入した場合、反射の増加により、WBGTが上昇してしまうメッシュが多い。

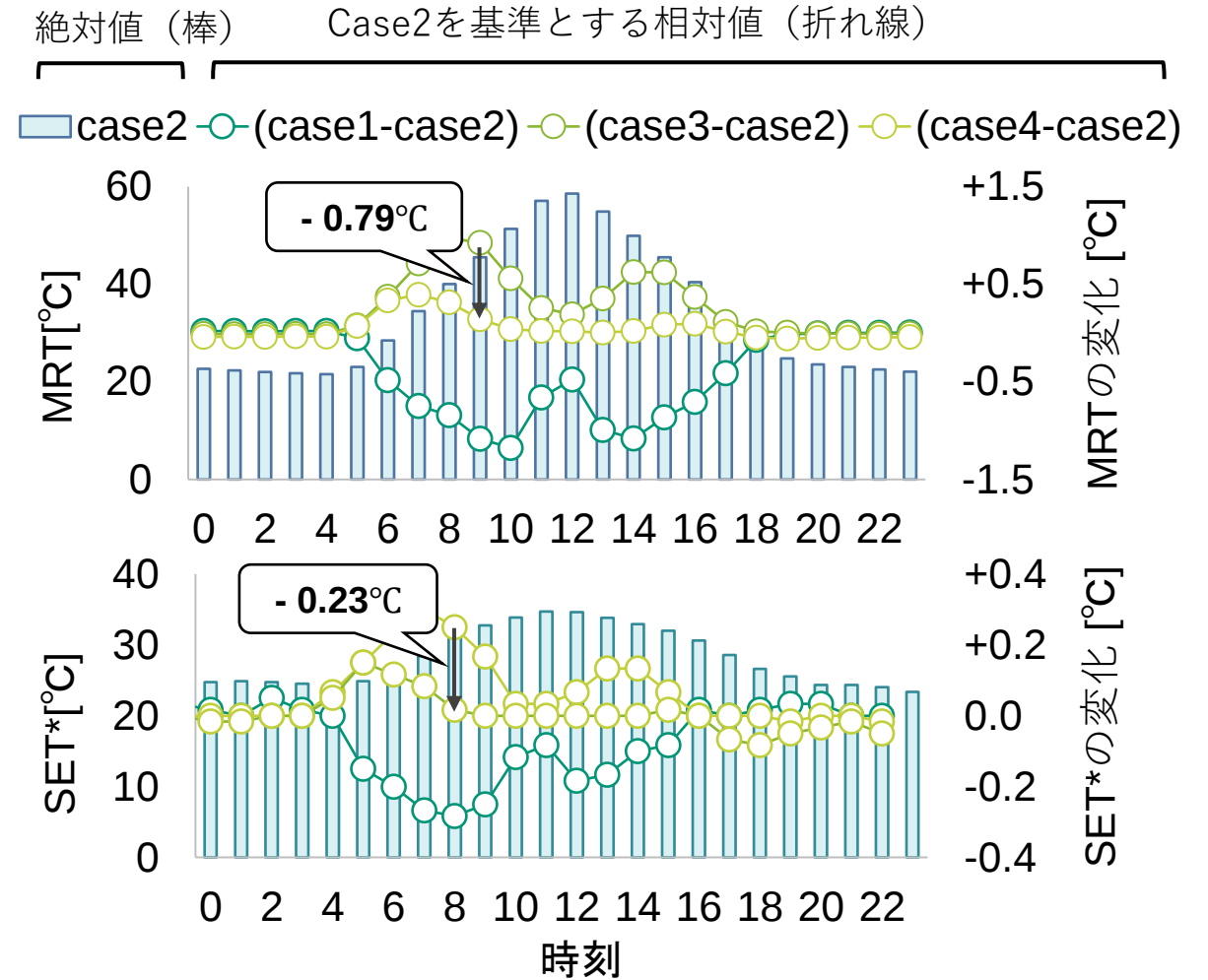
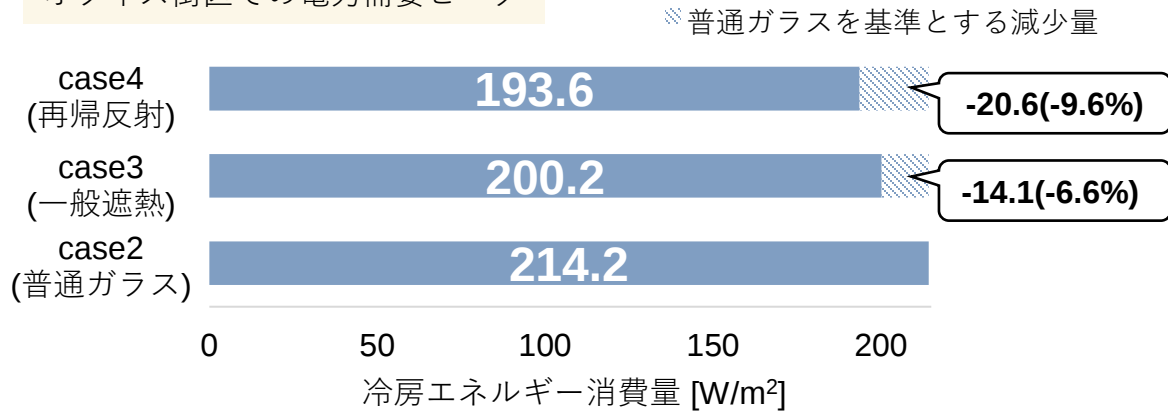


[1] Ohashi Y et al (2016): *Energy and Buildings*, 114, pp.104–111.

再帰反射フィルムの熱環境改善・省エネルギー効果（東京）



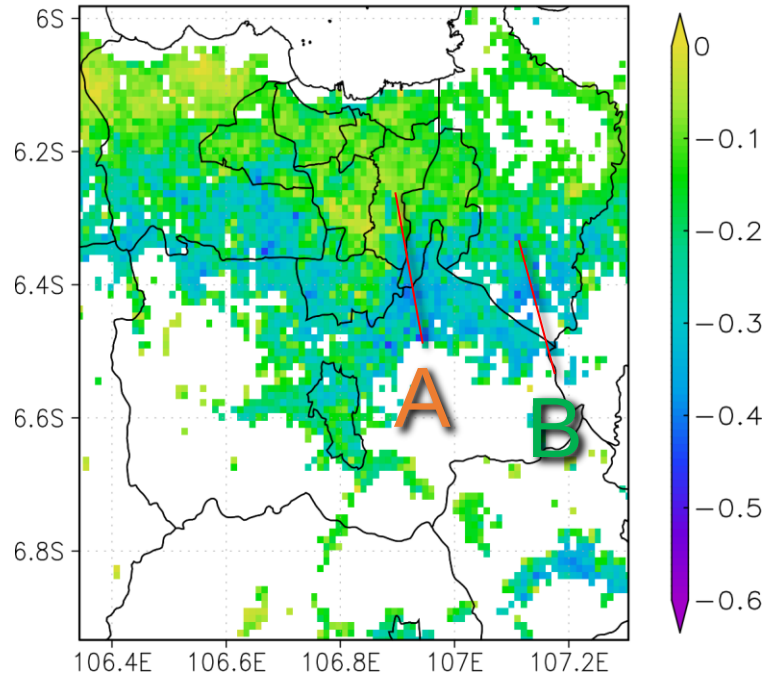
オフィス街区での電力需要ピーク



アジアのメガシティへの展開（ジャカルタ）

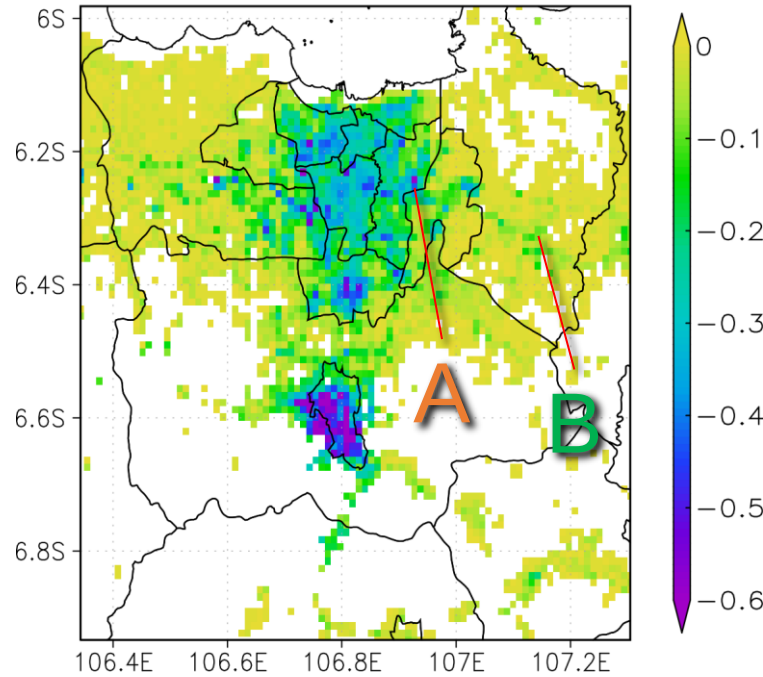
地上緑化

ΔT [°C] 14:00 GG-Base



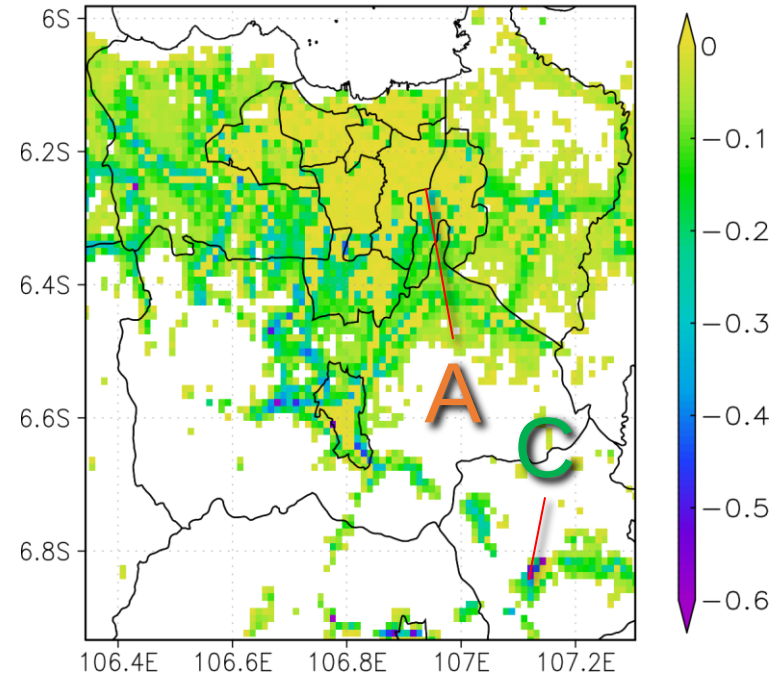
電気自動車

ΔT [°C] 14:00 EV-Base



ヒートポンプ給湯機

ΔT [°C] 05:30 HP-Base



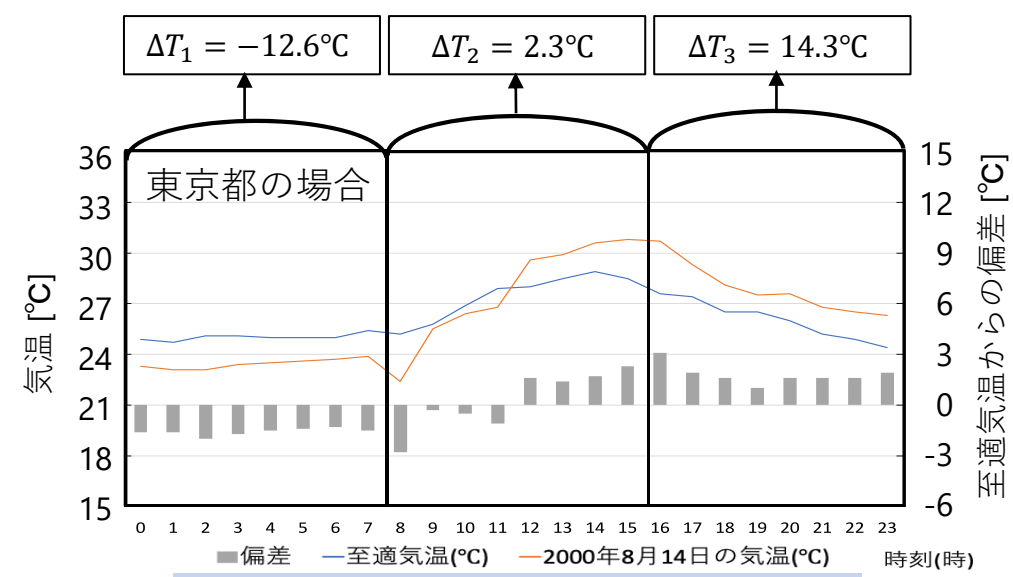
- 導入余地のある郊外で効果。
- 日射のある昼間に効果。

- 交通量の多い都心で効果。
- 交通量の多い朝夕に効果。

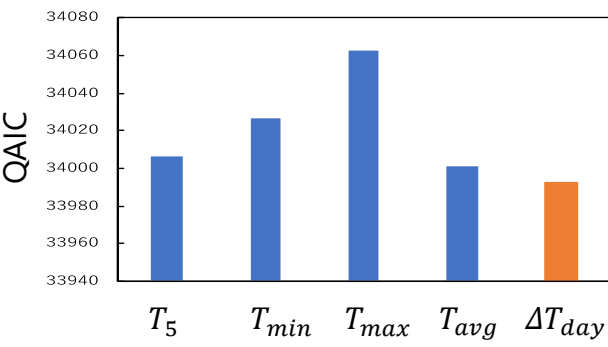
- 特に集合住宅街区で効果。
- 夜間に効果。

さまざまな対策の気温低下と熱ストレス削減効果（東京）

時間帯別気温と熱ストレスの関係

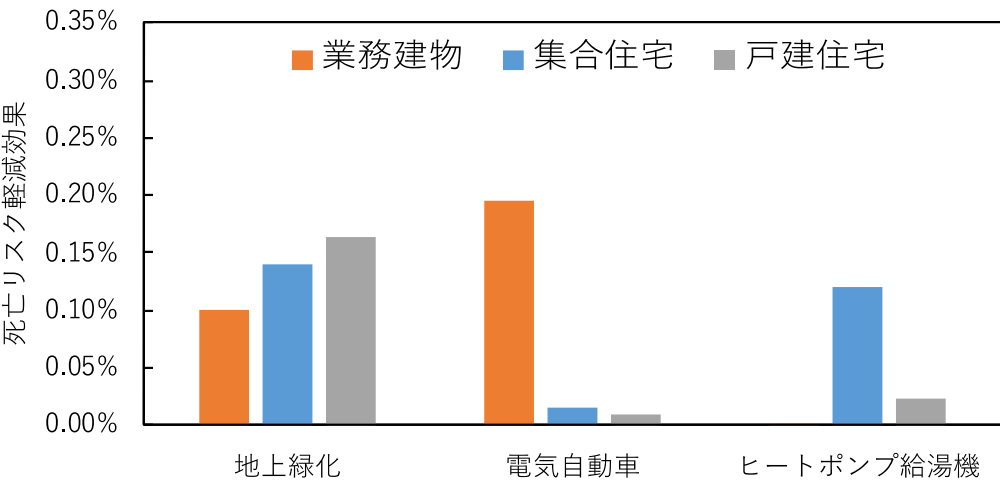
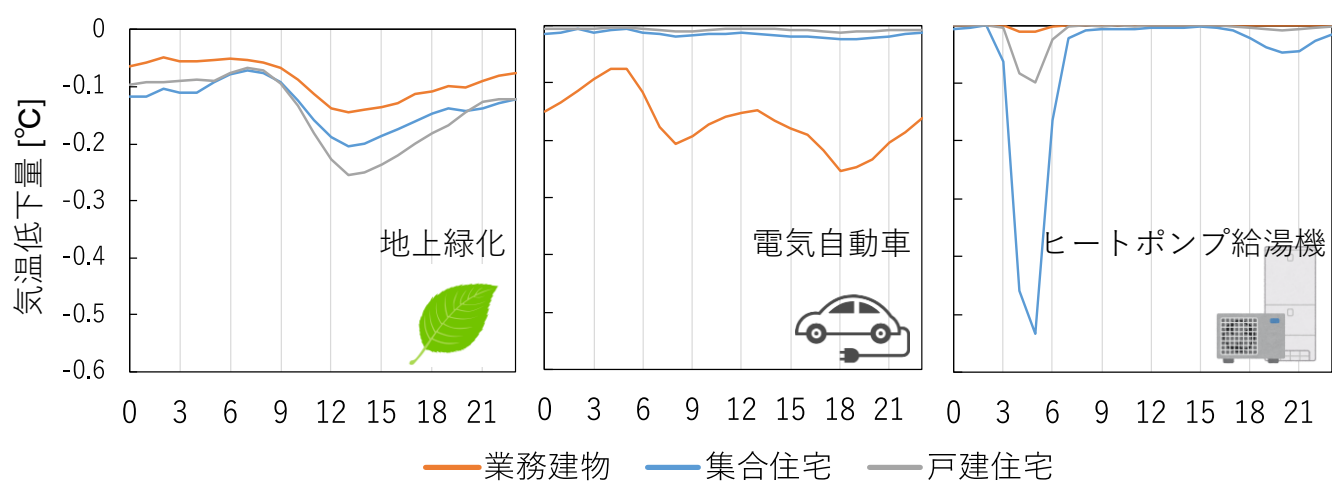


$$\Delta T_{day} = 0.61 \Delta T_1 + 0.19 \Delta T_2 + 0.20 \Delta T_3$$



- T_{max} より T_{min} 、 T_5 の方が精度が良い。
- 時間帯別の違いを考慮した ΔT_{day} は、他の気温指標より予測精度が高い。

地上緑化・電気自動車・HP給湯機の導入効果



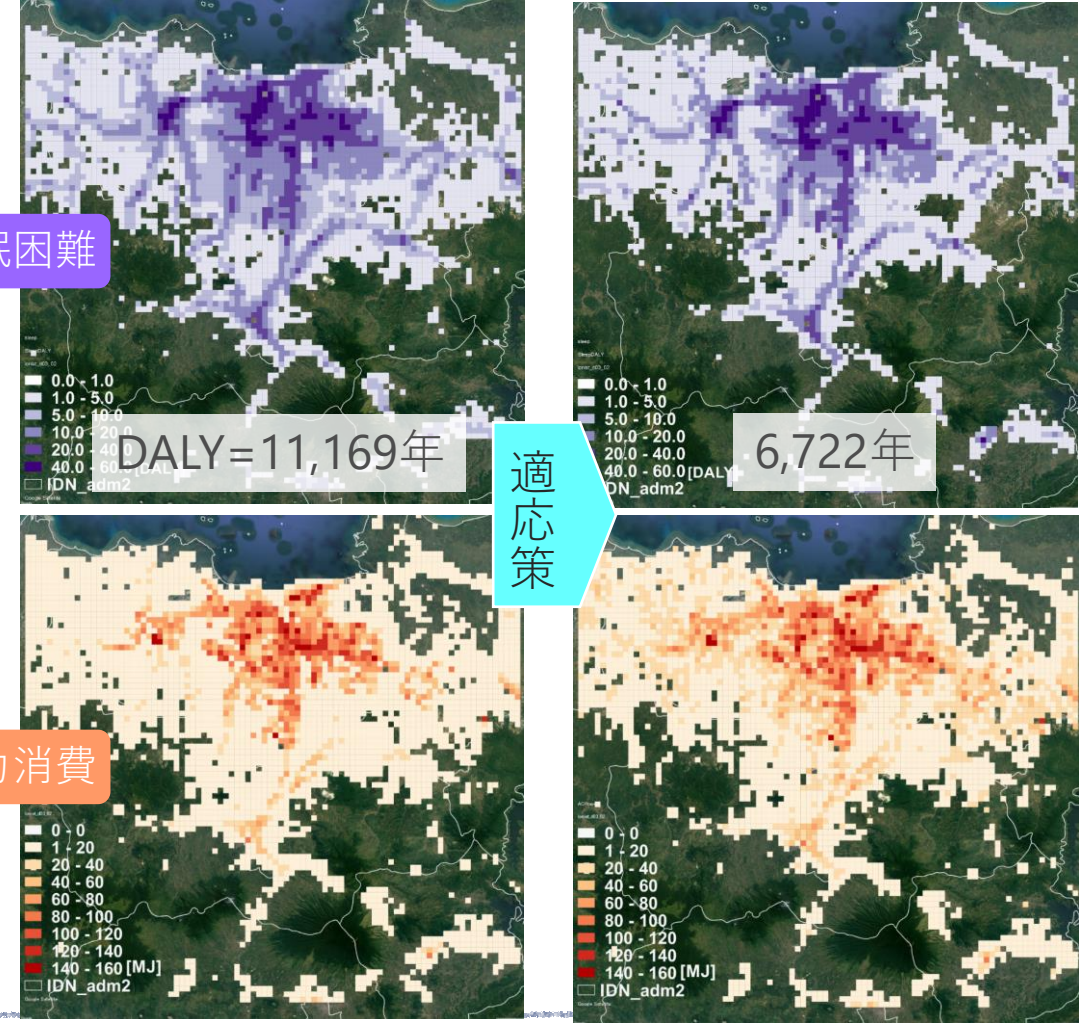
ΔT_{day} を用いると、 ΔT_{max} に影響しない
HP給湯機の効果の評価できる。

[1] 山口和貴ほか(2010): 2010年度日本建築学会大会. [2] 梅野凌矢(2020): 東京大学卒業論文.

温暖化適応策としてのエアコンの評価（ジャカルタ）

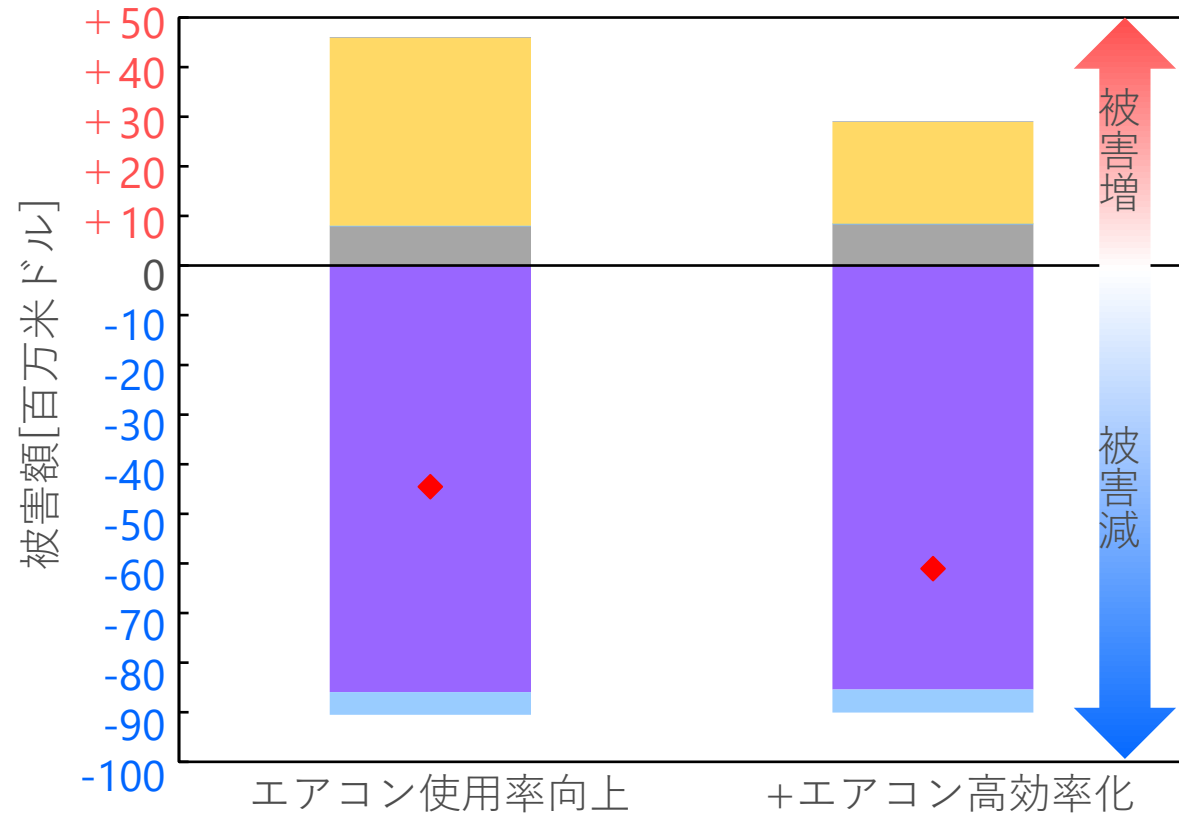
住宅のエアコン使用率15%

60%



適応策のLCA

- 睡眠困難 (Sleep Difficulty)
- 疲労 (Fatigue)
- 製品製造 (Product Manufacturing)
- 流通 (Distribution)
- 廃棄・リサイクル (Disposal/Recycling)
- 合計 (Total)
- 素材・部品製造 (Material/Component Manufacturing)
- 使用段階 (Usage Stage)

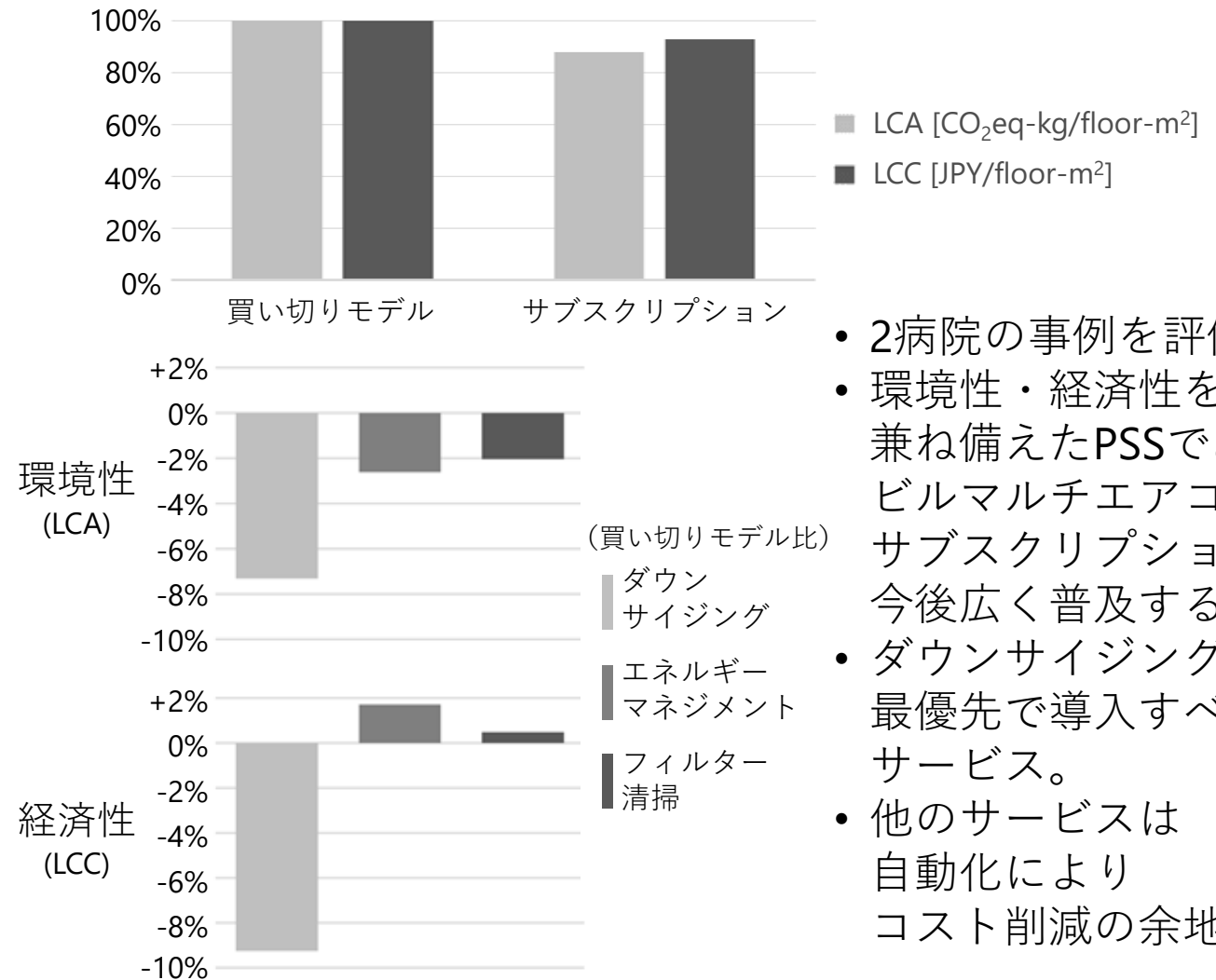
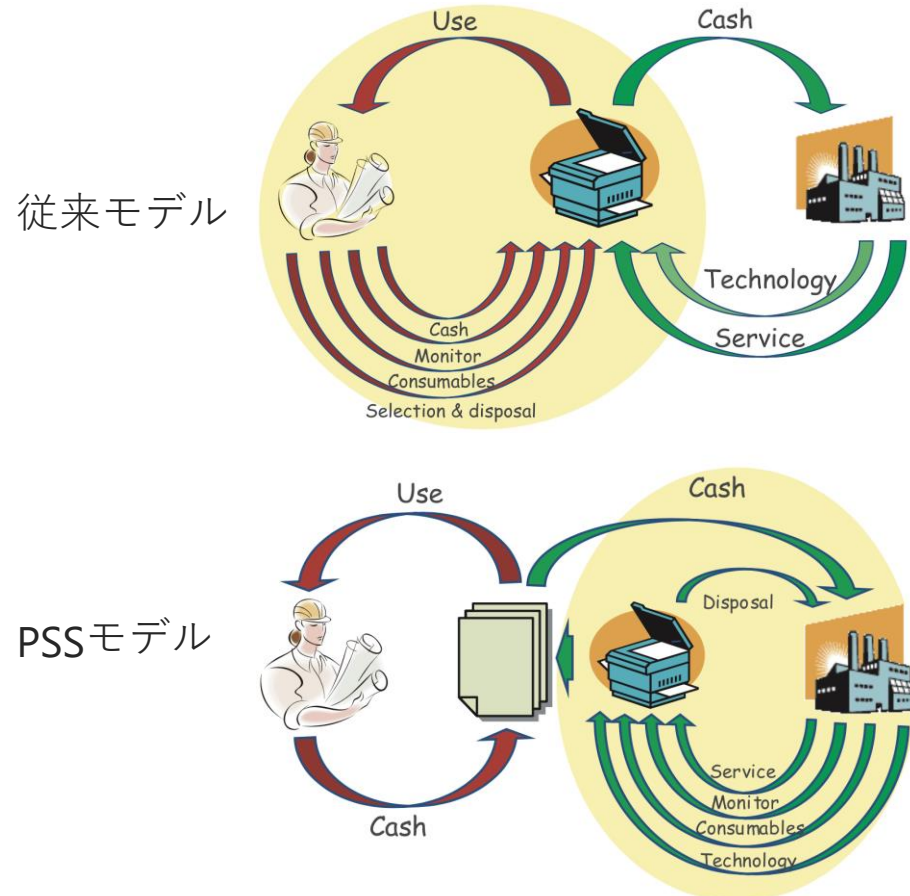


[1] 前田健太郎(2017): 東京大学修士論文. [2] 桑山忠弘(2018): 東京大学修士論文. [3] 桑山忠弘ほか(2019): 日本LCA学会誌, 15 (1), pp.2-9.

サブスクリプションビジネスモデルによるエアコンの導入

プロダクトサービスシステム(PSS)

(例) オフィス用プリンター (結果指向PSS) [a]



- 2病院の事例を評価。
- 環境性・経済性を兼ね備えたPSSであるビルマルチエアコンのサブスクリプションは今後広く普及する可能性。
- ダウンサイジングは最優先で導入すべきサービス。
- 他のサービスは自動化によりコスト削減の余地あり。

[a] Baines et al (2007): Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 221, pp.1543-1552.

[1] 長谷川林太郎(2021): 東京大学卒業論文. [2] 長谷川林太郎ほか(2021): 第16回日本LCA学会研究発表会.