

EMSのためのエネルギー 需要の科学的扱い

2018.9.18

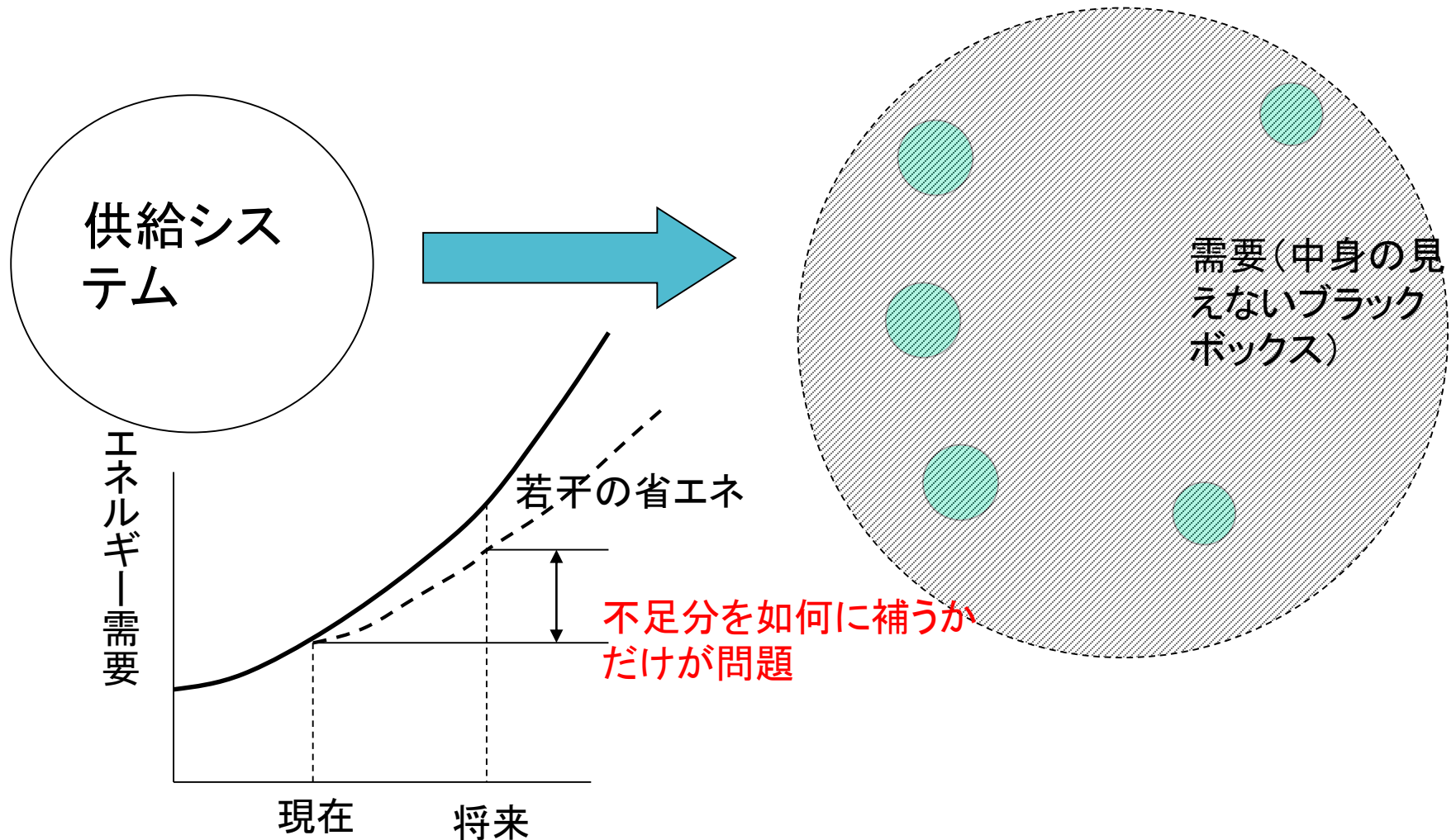
大阪大学大学院工学研究科
環境・エネルギー工学専攻

(CREST-EMS中島チーム) 下田吉之

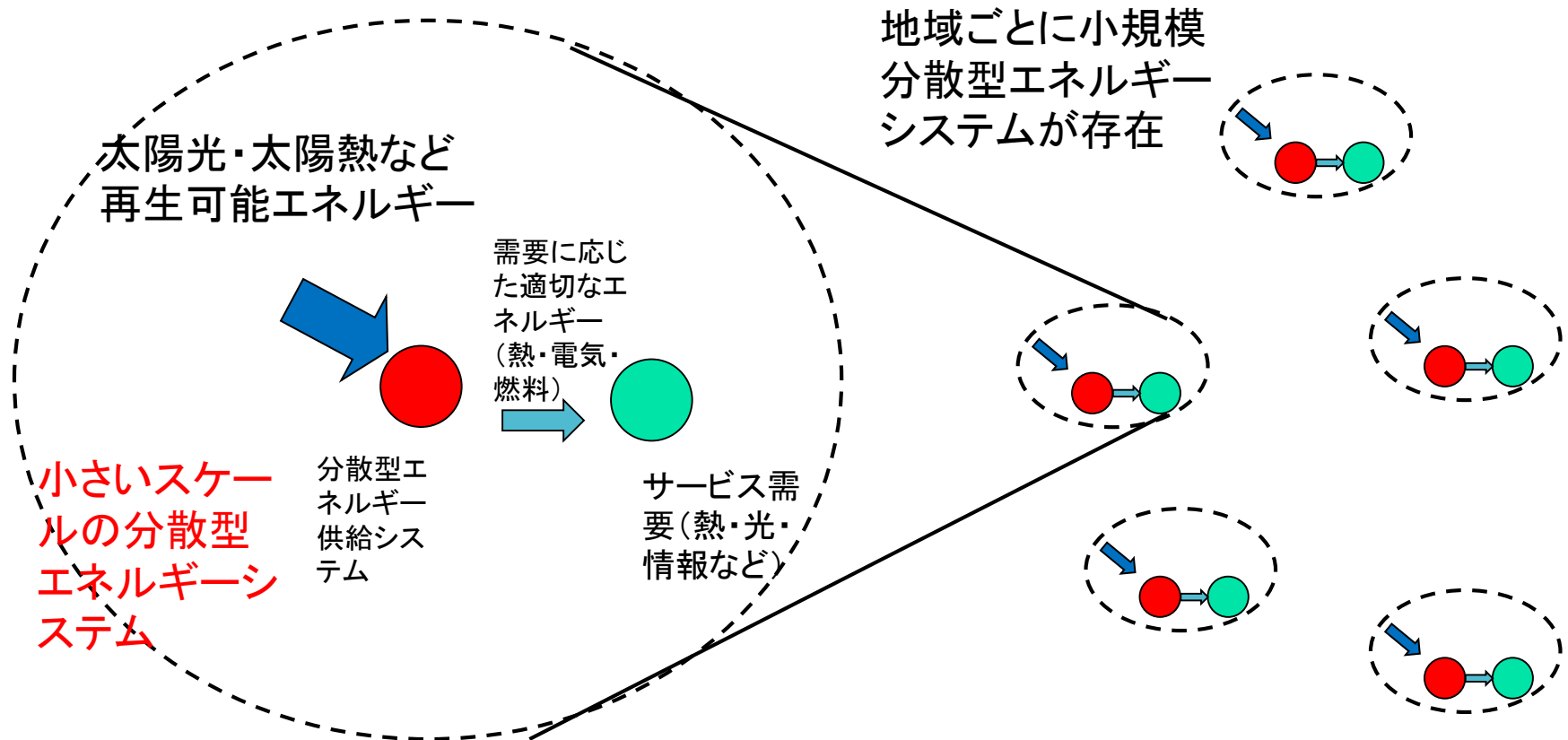
「エネルギー需要を科学的に扱う」とは？

- エネルギー需要を省エネルギーやエネルギーマネジメント等のように工学的な計画・設計・操作の対象とするために、その構成・振る舞いを解明すること。
- 従来のエネルギー需要に対する考え方
 - 国レベルのエネルギー需要：GDPや人口などの関数。
 - 建物単位などでは、時系列予測手法を用い気温など最小限の説明変数で需要を予測する手法がとられてきた。
 - 機器レベルの効率向上は進んだが、使われ方などを含めた正確な省エネルギー効果は評価できていない。
- 実際にエネルギーを消費しているのは機器であるが、各機器の操作・エネルギー消費のレベルに分解して需要を論じる研究はこれまであまりおこなわれてこなかった。

ハード・エネルギーパス 以前の（あるいは現在でも残っている） エネルギーシステムのあり方



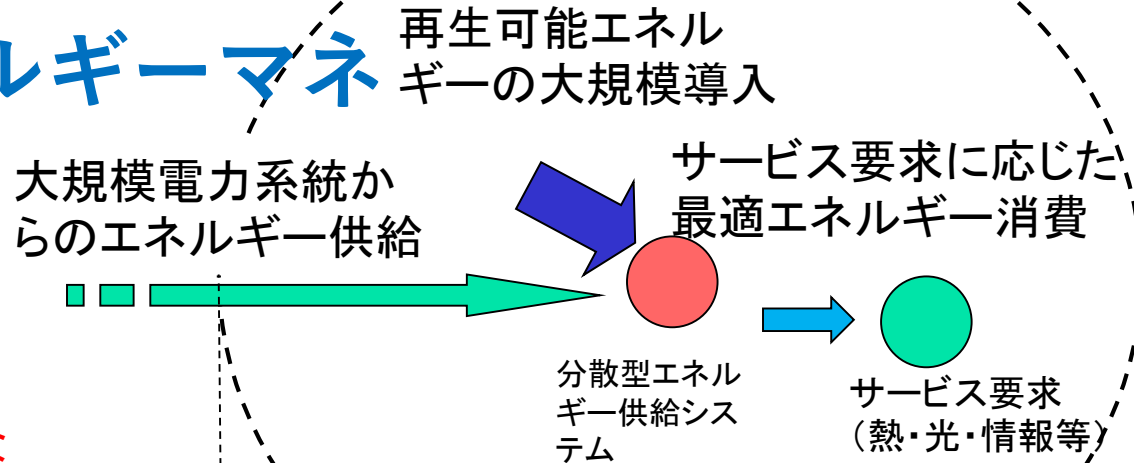
ソフト・エネルギーパス (ロビンズ、1977)



小規模による需給の時間変動に対する安定性の問題

ホロニックパス（茅、1988） →分散協調型エネルギーマネ ジメント？

小規模エネルギーシステムだけでな
く、大規模システムとのベストミックス



分散システム(ZEB, ZEH, ゼロエネルギーコミュニティ)

大規模電力系統

- ①ローカールスケールでの再生可能エネルギー変動
 - ②大規模系統電力からの要求
 - ③エネルギー需要
- の3者を安定的に最適化する必要。そのために需要の能動化と、需要変化とサービスへの影響を定量化する必要。

脱炭素社会の成立のための条件

$$\text{カーボンフリーエネルギー} \geq \frac{\text{エネルギー需要}}{\text{サービス}} \times \frac{\text{サービス}}{\text{充足度}} \times \frac{\text{充足度}}{\text{人口}} \times \text{人口}$$

■ 需要の削減

- 温室効果ガス排出の大幅削減のために、可能な限りエネルギー需要（上式の右辺）を小さくする。
- 省エネルギーは充足度を落とす「我慢の省エネ」では駄目。

■ カーボンフリーエネルギーの供給可能量に応じた**需要パターンの時間シフト**

- 再生可能エネルギーの変動に応じてエネルギー需要を変化させるため、サービス需要とエネルギー需要の時間変化をずらす。



エネルギー管理のためのエネルギー需要科学

- 「誰が、どのくらいの量の、どのような種類のエネルギーを、どのような目的のために、どのくらいの期間必要とするのか？」（Herman Daly 1976）
 - エネルギー消費を電力ロードカーブが推計できる時間粒度でエネルギー消費機器レベルに分解し
 - 機器稼働とサービス・快適性の関係を明らかにした上で
 - 可制御負荷とそれ以外に分解し、前者について制御による負荷の変化とサービスの低下の関係を明らかにする
- 時系列のエネルギー需要を対象とするため、**時間解像度の向上**が必要。
- 特に家庭では**居住者の行動**が需要の発生と密接な関係を持つ。
 - 居住者行動、DRなどサービス変化に対する受容性など「ひと」を中心とするアプローチが重要に。

エネルギー需要をモデル化する2つのアプローチ

■ 要素分解型

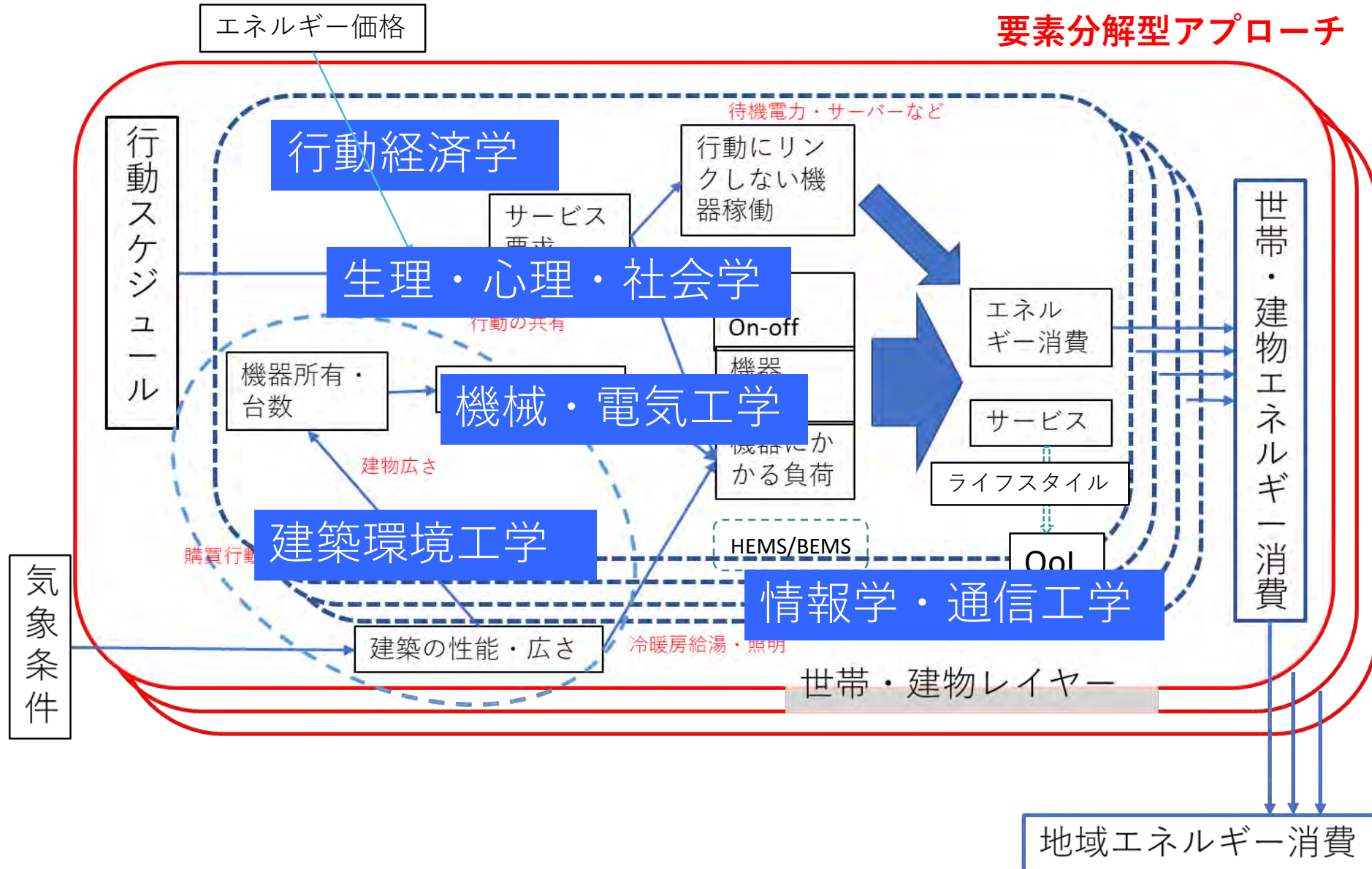
- エネルギー需要を、さまざまなサービスを生み出すエネルギー消費機器と、それを操作する人間行動や制御装置などの要素から構成されるシステムとして表現し、気象条件や機器の普及、人間の慣習の変化、DR信号など外部からの働きかけによってこのシステムが変化するメカニズムを明らかにするアプローチ

■ 全体挙動型

- エネルギー需要を細分化せず、その全体が居住者の消費・行動性向等によって決まる複雑なシステムとしてとらえ、その総体的な挙動を対象とするアプローチ。機械学習での予測など

家庭・地域のエネルギー需要はどう決まるか？

要素分解型アプローチ



エネルギー需要をモデル化する2つのアプローチ

■ 要素分解型

- エネルギー需要を、さまざまなサービスを生み出すエネルギー消費機器と、それを操作する人間行動や制御装置などの要素から構成されるシステムとして表現し、気象条件や機器の普及、人間の慣習の変化、DR信号など外部からの働きかけによってこのシステムが変化するメカニズムを明らかにするアプローチ

■ 全体挙動型

- エネルギー需要を細分化せず、その全体が居住者の消費・行動性向等によって決まる複雑なシステムとしてとらえ、その総体的な挙動を対象とするアプローチ。機械学習での予測など

2つのアプローチの違い（DRを例に）

■ 要素分解型

- Automated Demand Responseの分析・計画では必要。
- 可制御負荷について機器毎のエネルギー消費とサービス（快適性）との関係を定量化していく。
- IoT等の背景。

■ 全体挙動型

- Manual Demand Responseの評価にはこちらの方が適している。
- エネルギー需要の構造は極めて複雑で、要素分解型では再現できない？

- 目的に応じて要素分解型と全体挙動型との最適な統合の手法を見いだすことが重要ではないか。

2018 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings
Informal Session: "Energy Demand Science in a De-carbonized Society"
Pacific Grove, CA, USA. Aug. 13, 2018



エネルギー管理のための需要科学の研究手法

■ エネルギー需要の計測と分析

- エネルギー需要変動の計測も含む
- 要素分解型と全体挙動型をつなぐ。

■ エネルギー需要モデルの開発

- 要素分解型研究の典型例
- 未来の需要など、計測できない需要の生成

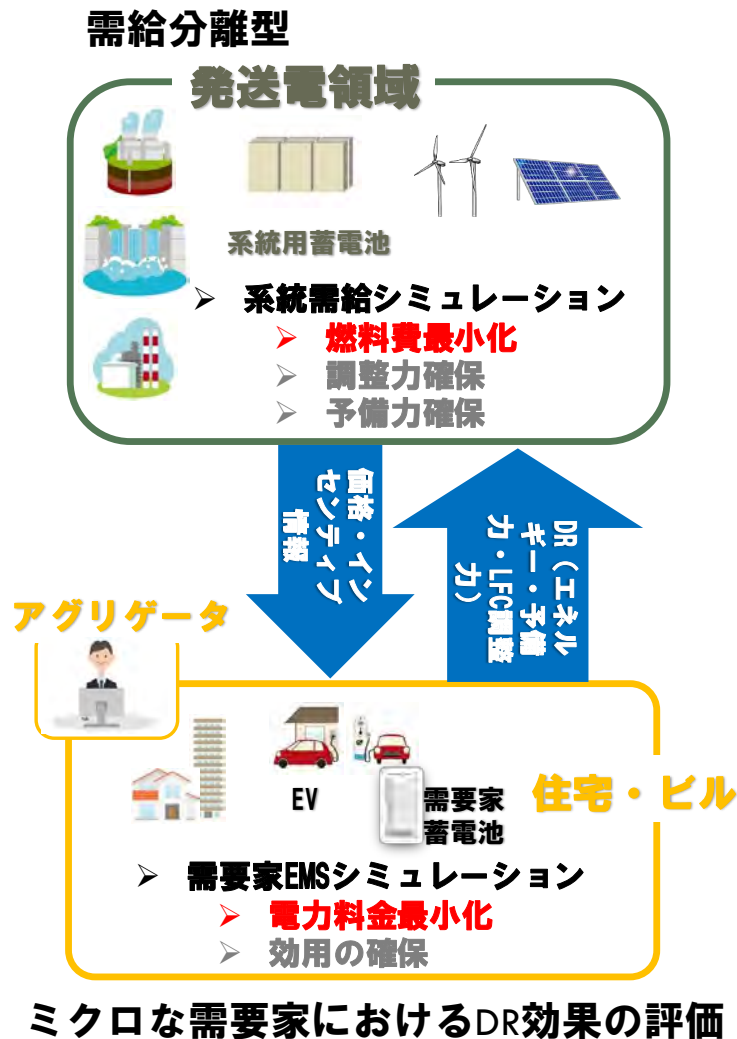
■ エネルギー需要に対する影響要因の解明、介入

- 現在のところ、全体挙動型の典型的な手法。
- マニュアルDRの観測など

需要反応(DR)モデルの構築 (東大)

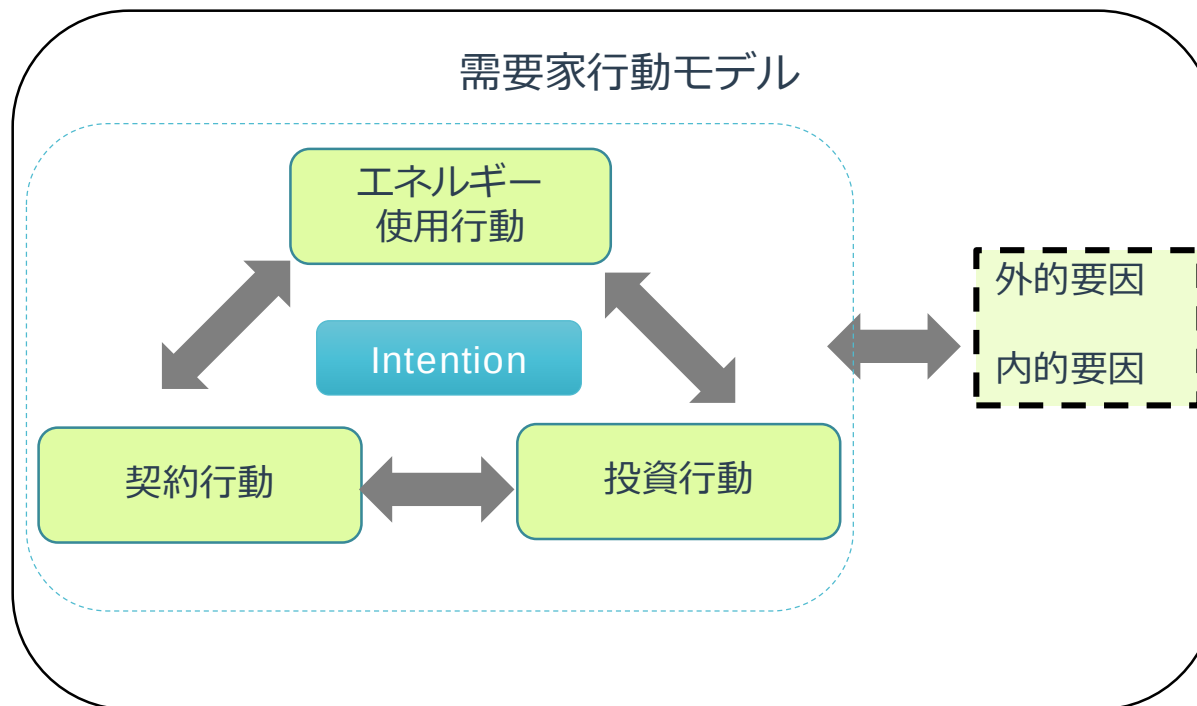
- 家庭用DRリソース(HP給湯機、電池、EV)の系統、家計における経済性、環境性の評価
 - 需給統合型 (系統大での評価)
 - 発電機運転費用抑制効果
 - 調整力・予備力としての活用効果
 - 再エネ抑制の緩和効果
 - CO₂削減効果
 - 需給分離型 (家単位での評価)
 - 料金最小化
 - 太陽光発電自家消費拡大
 - HEMSデータを用いた評価

需要反応(DR)モデルの構築 (東大)



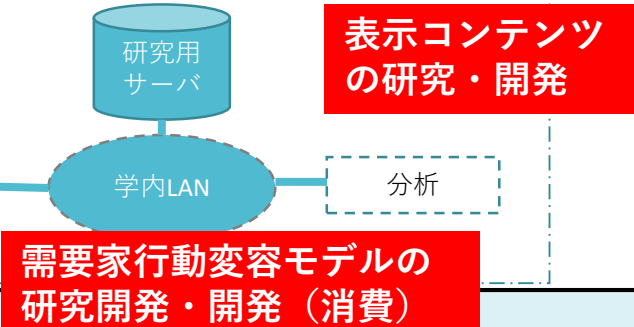
エネルギー需要家行動モデルの研究開発（東工大）

- エネルギー需要家の行動は、使用行動（消費）のみならず、エネルギー提供者との契約行動、使用設備への投資行動など、多岐にわたる。
- これらの行動に影響を与える要因を実データに基づき解明し、行動相互の関連性を分析することより、統合的エネルギー需要家行動モデルを開発する。
- これを通じて、分散協調エネルギーシステムに於けるエネルギー需要家の役割を設計するための知見を提供する。



エネルギー需要家行動モデルの研究開発（東工大）

消費行動の分析例（プロジェクト対馬）



対馬市CATV（対馬メディアセンター）

- ①対象者ID
- ②計測時刻
- ③計測電力量
- ④その他



実時間モニタリングの実装

機器分離技術の応用研究

対馬市CATV網

Internet

学内LAN

分析

対馬市一般家庭 (50->100)

ONU

Wi-fi
ルーター

**再生可能エネルギー
発電の情報表示**

電力モニタリング
端末（専用機）

**Bルートにて
電力量取得**

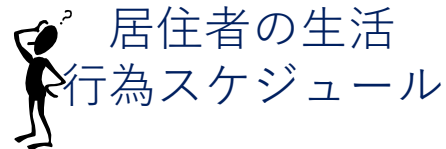
スマートメーター



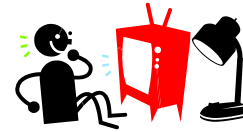
ボトムアップ型エンドユースモデルの開発（阪大）

- 建物単位から都市・電力系統・国土に至るまで、エネルギー需要の発生の成り立ちを要素に分解してモデル化
- 家庭用は2000年頃に着想。2001年米国LBNLで最終需要予測やそれを活用した機器省エネ基準の影響評価に触れる。
- 2004年頃にモデルの初期バージョンが完成。当初は 都市→都道府県→国レベルのエネルギー需要予測。
- 現在ではロードカーブ予測に重点
- 業務用：2005年頃から開発開始。
- 現在”Urban Model”は建築シミュレーションの重要テーマ。

積み上げ型エネルギー需要推計



各機器の
稼働スケジュール



生活行為
モデル

機器操作モデル

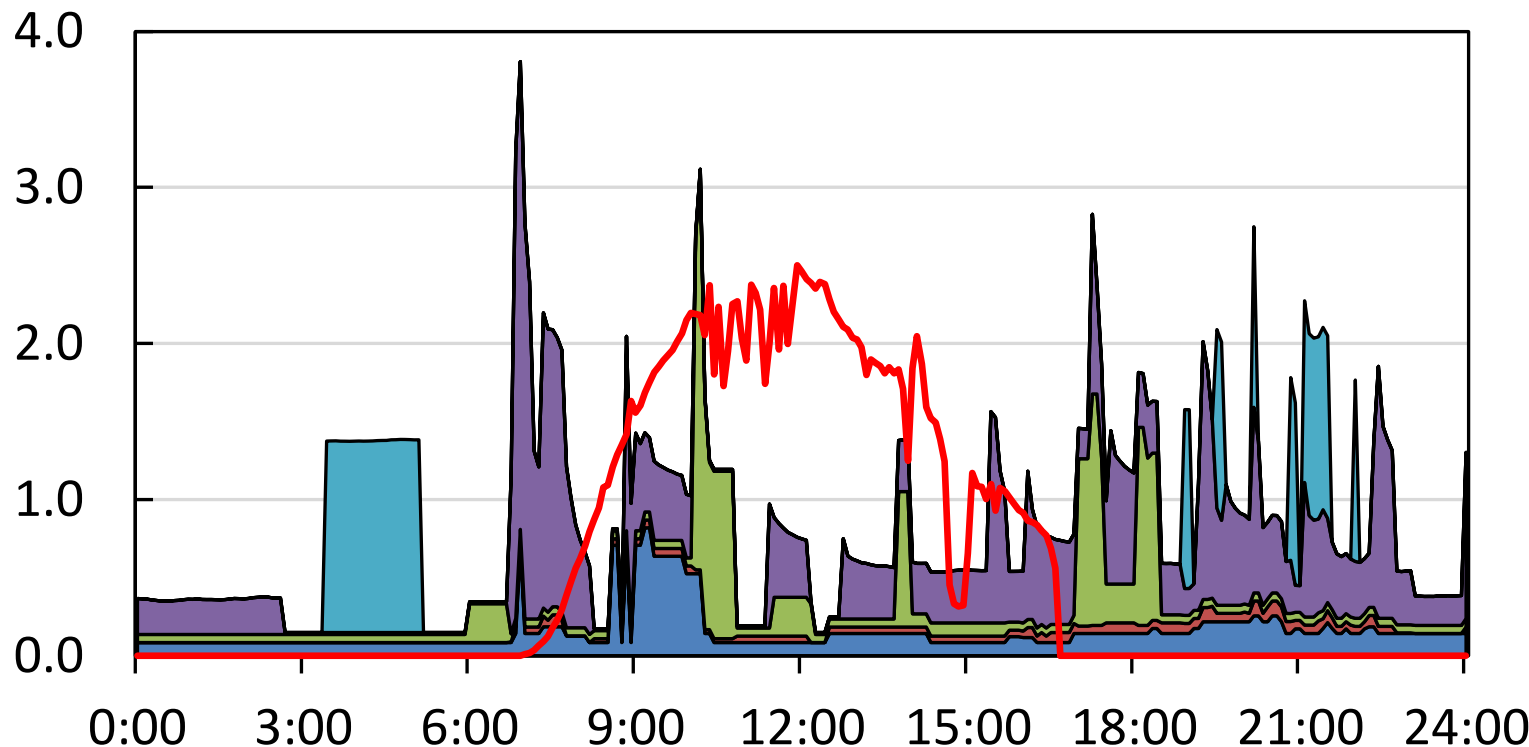
機器エネルギー
消費モデル

エネルギー
需要

■家電 ■照明 ■厨房 ■暖冷房 ■給湯 — 発電量

冷房
テレビ
掃除機
洗濯機
冷蔵庫

消費電力[kW]



モデルのフロー（全国推計の場合）

対象都道府県の
世帯の類型化

代表世帯の
サンプリング

世帯
912類型

19 家族類型
12 住宅類型
4 断熱性能区分

家庭部門エネルギー最終需要予測モデル

居住者行動モデル

家電機器エネルギー
消費モデル

給湯エネルギー
消費モデル

暖冷房エネルギー
消費モデル

代表世帯の
エネルギー消費

社会生活基本調査

家電機器操作確率

家電機器保有数量

家電機器の消費電力

行為別使用湯量

湯はり頻度

上水温度

気象データ

住宅間取り

壁・屋根・窓の仕様

暖冷房設定温度

エアコンCOP

入カデータ

積み上げ

各都道府県の
エネルギー消費

日本全国の
エネルギー消費

世帯・地域特性を
考慮した推計が可能

モデルのポイント

■ 居住者行動モデル

- 特に現実的なロードカーブを得るために重要。
- 当初はNHK生活時間調査→社会生活基本調査
- 現在国際的にも注目されているテーマ(IEA-EBC Annex66 “Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings”)

■ 熱負荷計算モデル

- 気象条件、建物仕様から冷暖房負荷を計算する。
- 建築分野でHASP, BEST, EnergyPlus, ESP-rと長い歴史。当初は建物設計用→エネルギー消費評価用
- 給湯負荷計算モデルも水道水温の推計が必要。

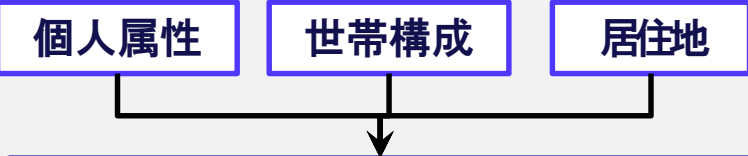
■ 住宅省エネ仕様、機器性能、冷暖房・入浴行為のデータベース

生活時間統計分析と確率的生活時間生成

Yamaguchi, et. al. Journal of Building Performance Simulation (2017)

生活時間モデリング

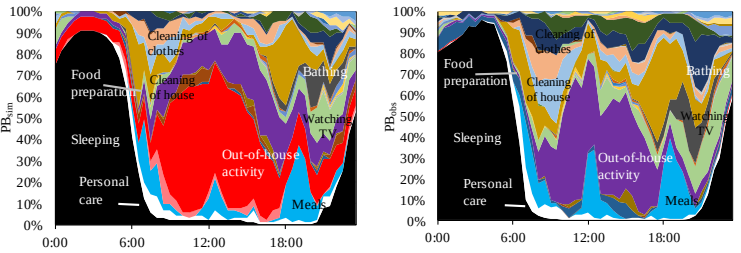
総務省統計局:社会生活基本調査個票



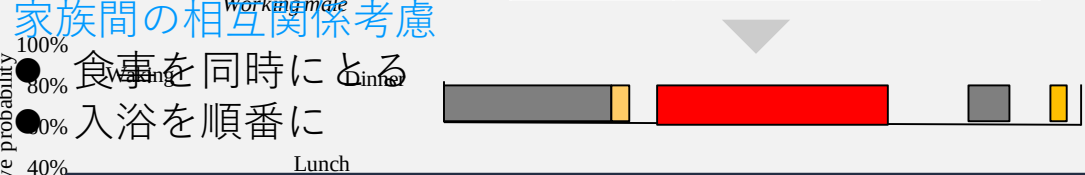
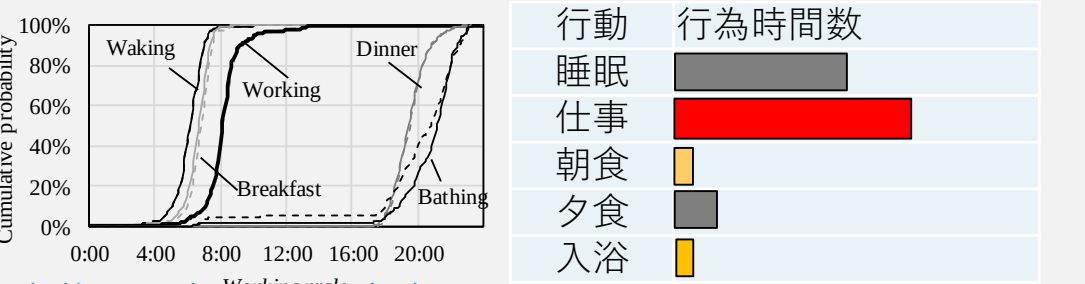
$$\log \frac{p_k}{p_{ref}} = \beta_{k,0} + \sum_{n=1}^N \beta_{k,n} x_n$$

個人属性・世帯属性・居住地を考慮した生活時間回帰モデル(例:時刻別生活行為実施比率の場合)

シミュレーション対象世帯個人個人に、世帯・個人の属性、居住地を反映した生活時間データを付与する

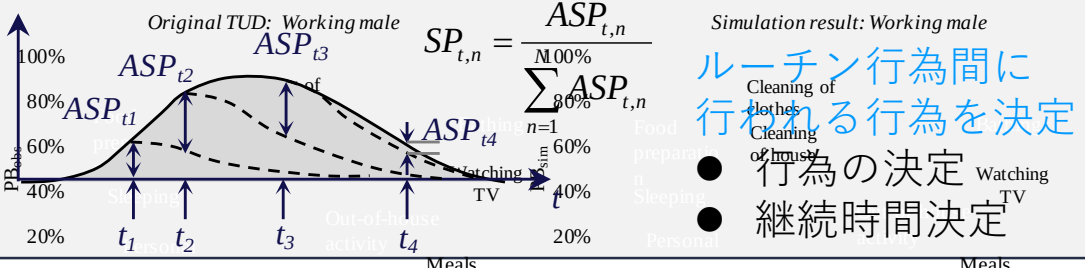
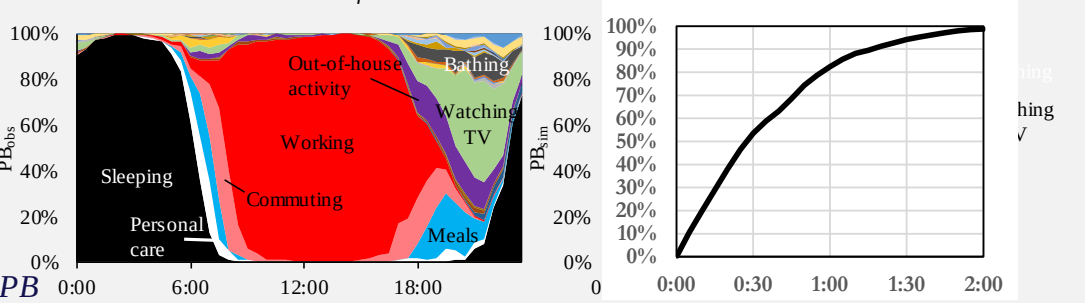


ルーチン行為の開始・終了時刻・継続時間決定



非ルーチン行為による行為遷移の模擬

時刻別生活行為実施比率 行為別継続時間頻度分布



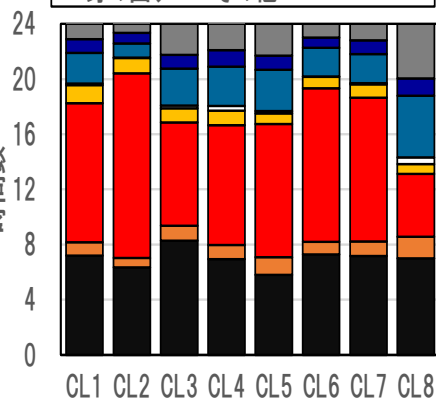
総務省社会生活基本調査に基づく生活パターン分類

平日の行為
生起確率

■ 睡眠 ■ テレビ ■ 食事 ■ 家事
■ 仕事 ■ 通勤 ■ 身の回りの用事

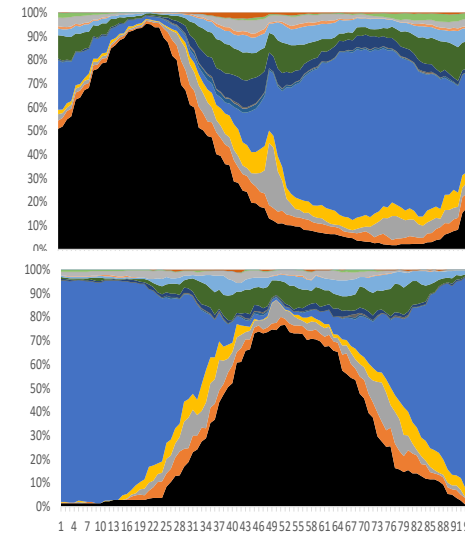
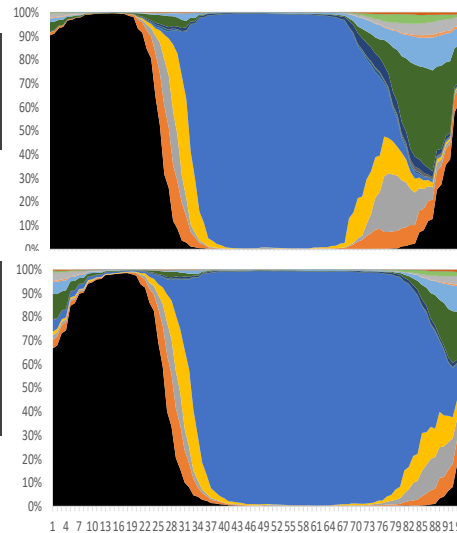
勤め人男

■ 睡眠 ■ 食事 ■ 仕事
■ 通勤 ■ 家事 ■ メディア
■ 身の回り ■ その他



43%
多数派

17%
長時間
勤務

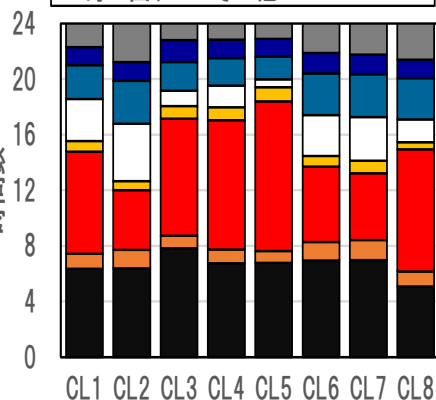


5%
午後・夜
間勤務

2%
夜勤

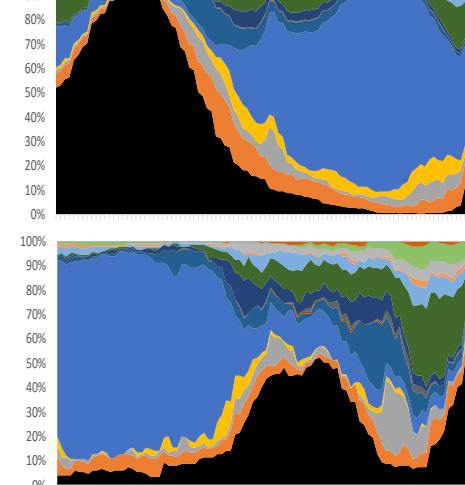
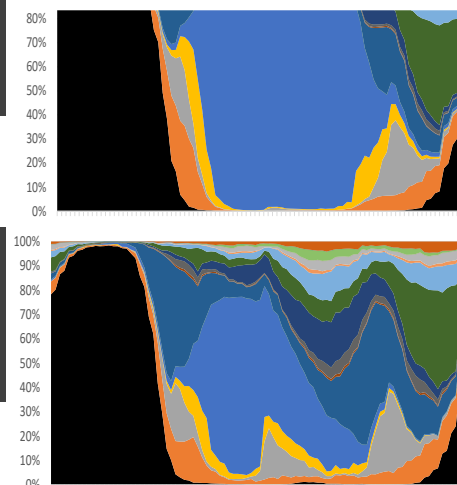
勤め人女

■ 睡眠 ■ 食事 ■ 仕事
■ 通勤 ■ 家事 ■ メディア
■ 身の回り ■ その他



43%
多数派

8%
パートタ
イム勤務

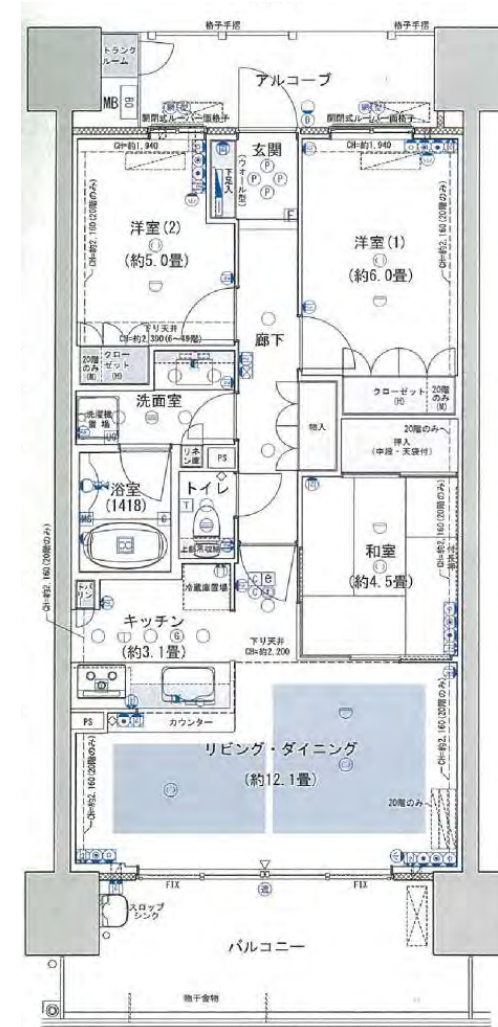
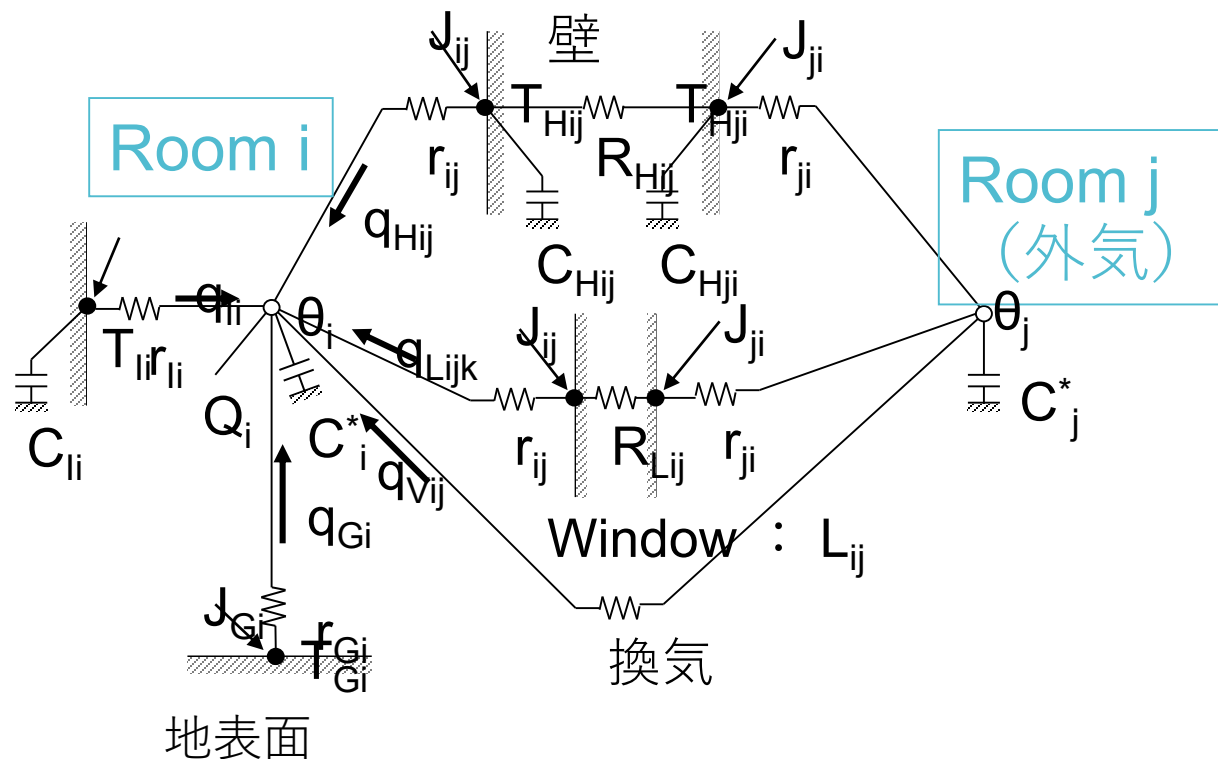


5%
午後・夜
間勤務

1%
夜勤

熱負荷計算モデルの概要

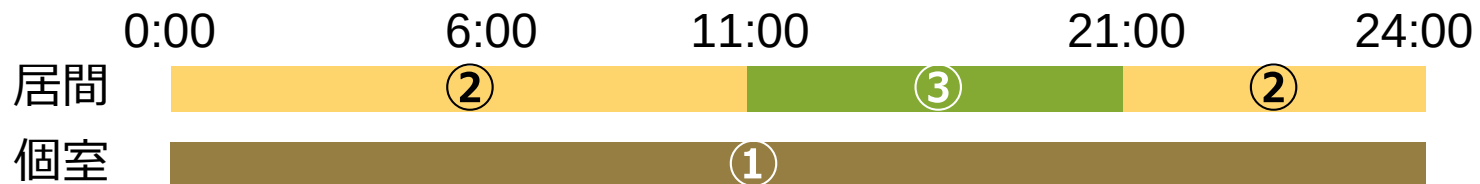
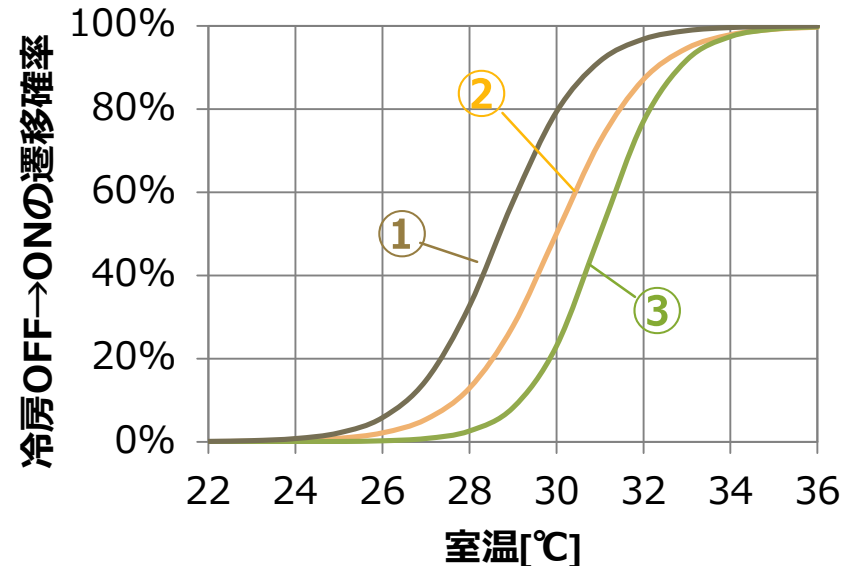
- 熱負荷計算：熱回路網モデル
- エアコンCOPは負荷率と外気温の関数
- エアコンのon/off 室温と時刻の関数



冷房ON/OFFを決定する確率関数の設定

■ 冷房OFF→ONの 状態遷移確率の設定

- 居住者が部屋にいる場合、冷房をONするかどうかを決定
- 居住者の状況により判断基準が異なる
→ 3つの確率関数を設定



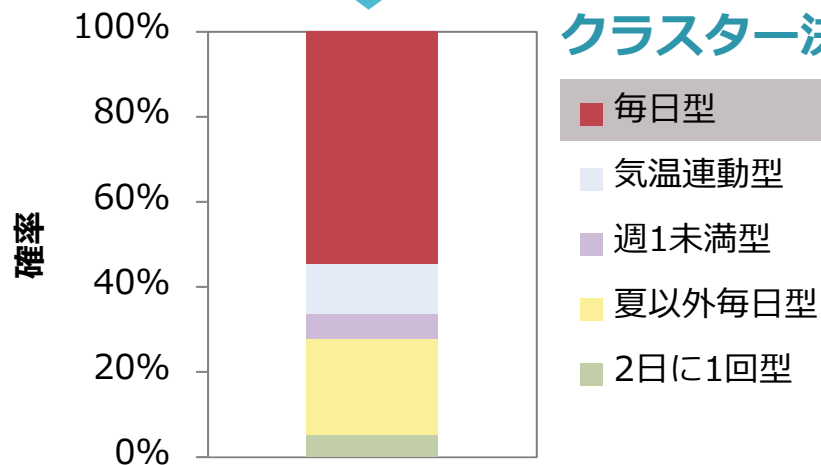
湯はり頻度予測モデルの開発

ある世帯の属性情報

戸建ダミー：0
 世帯年収：600万円未満
 家族構成：夫婦と子
 世帯主年齢：30代

多項ロジスティック回帰モデル

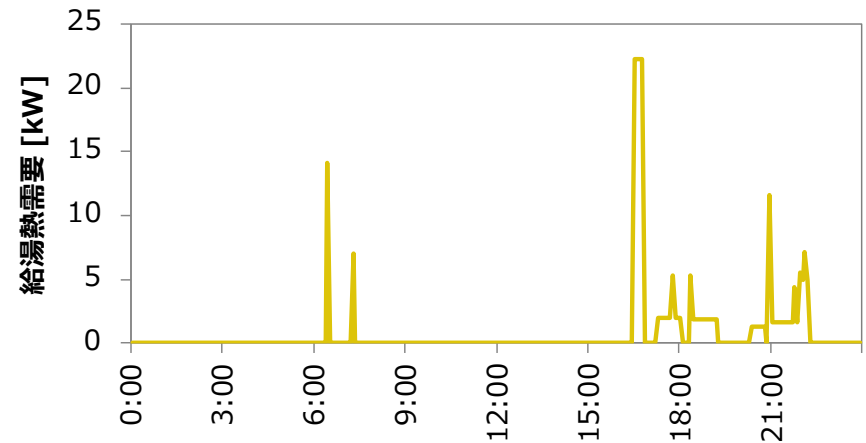
$$\log \frac{P_i}{P_5} = \alpha_i + \beta_{i1}x_1 + \dots + \beta_{in}x_n$$



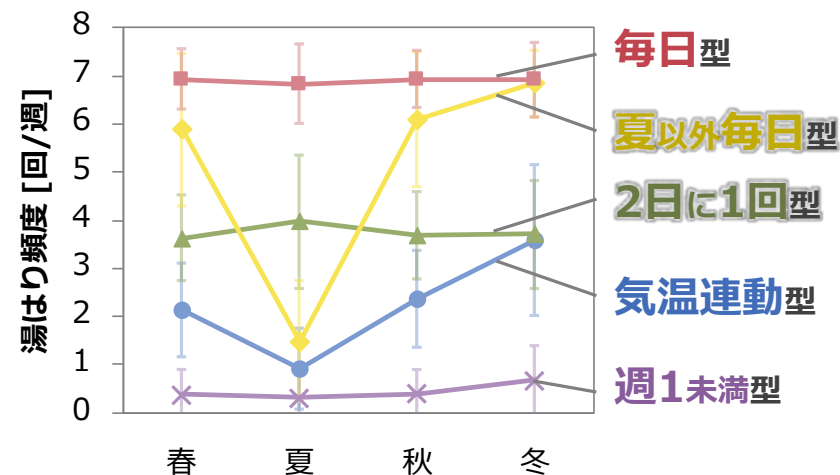
その世帯の湯はりクラスター確率

クラスター決定

その世帯の給湯熱需要の推計



家庭用エネルギー エンドユースモデル



該当クラスターの平均値と標準偏差

電力負荷曲線の推計精度の検証

■ スマートメーター計測データ

- 計測世帯数：1237世帯
- 計測期間：2012年6月1日～10月31日（5ヵ月間）

■ 3つのステップで精度検証

検証1. 中間期の電力負荷曲線 → **冷房以外の用途**の検証

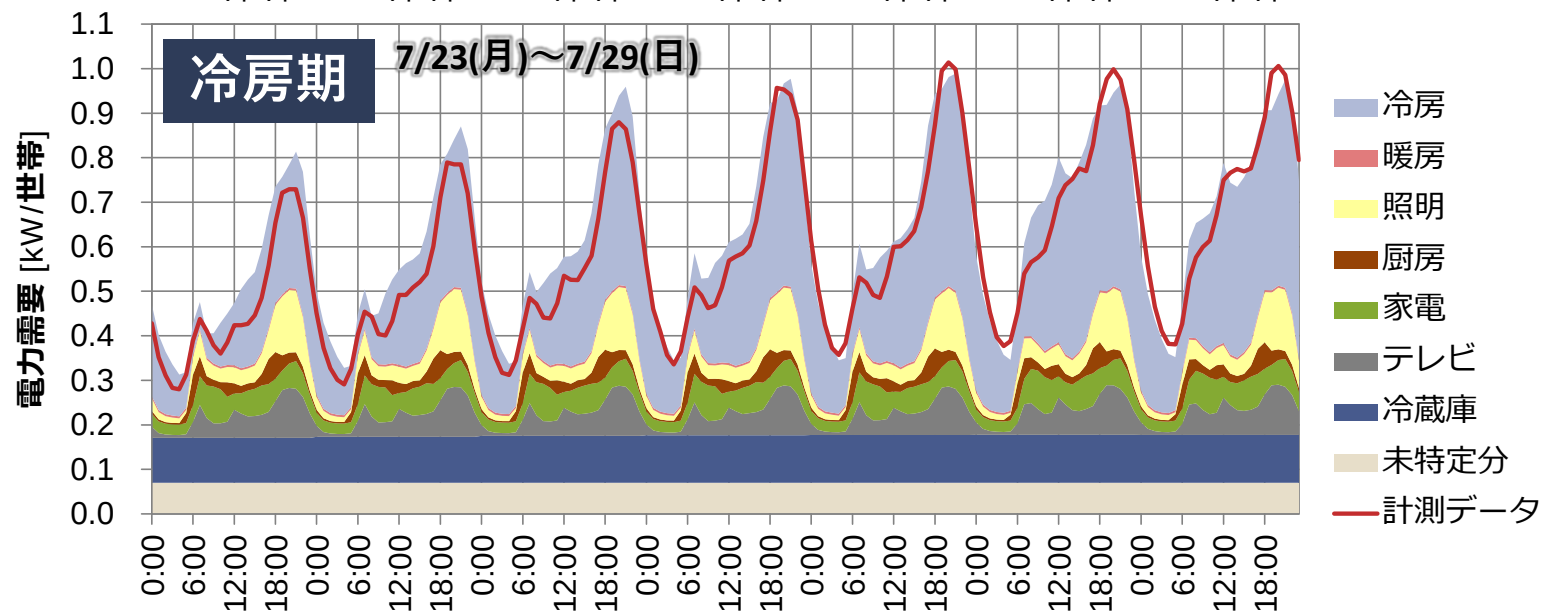
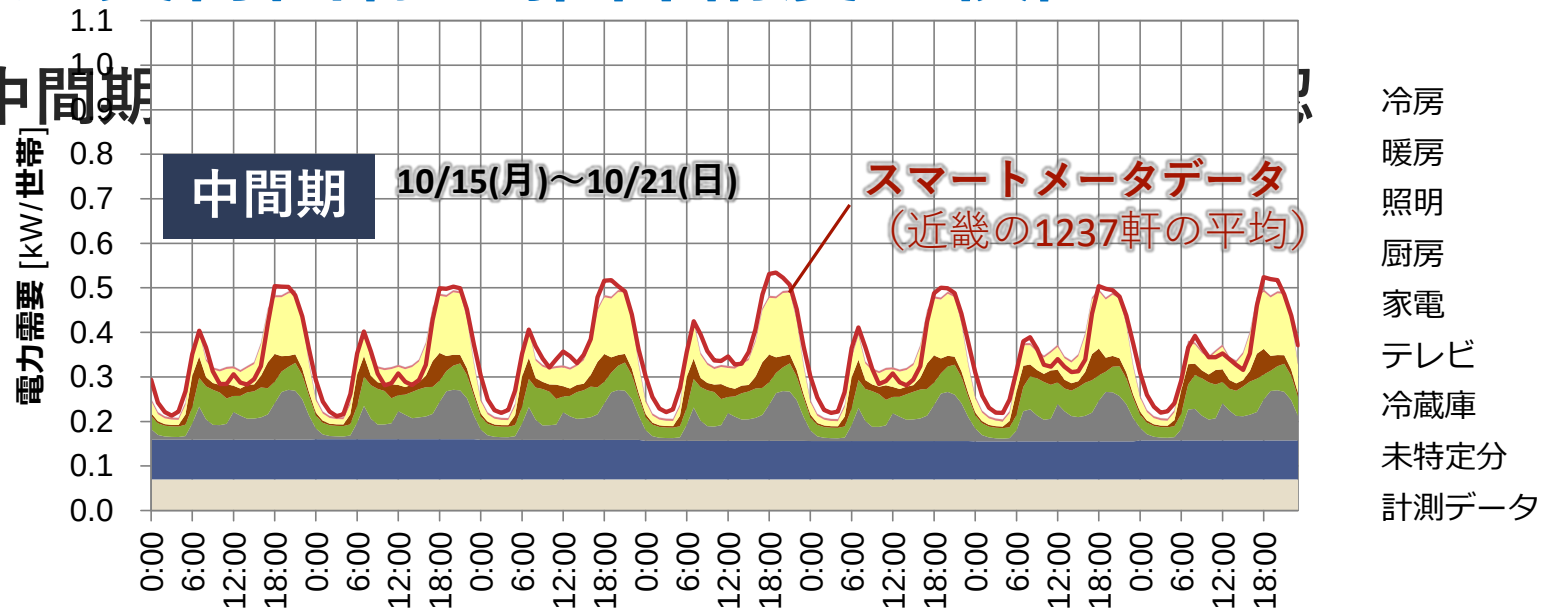
検証2. 冷房の電力需要の特性 → **冷房用途**の検証

検証3. 冷房期の電力負荷曲線 → 上記2つの**合計**の検証

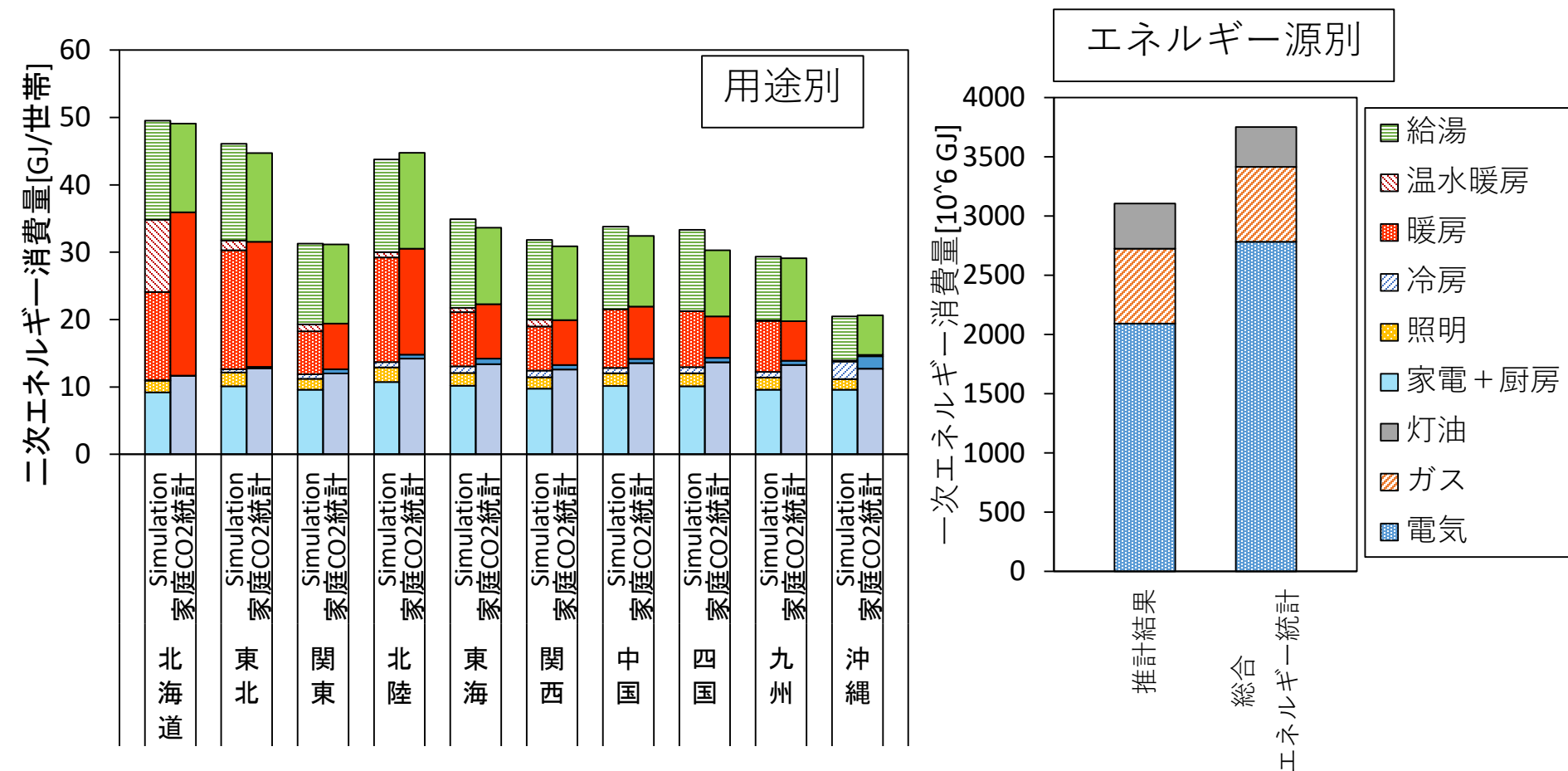
• Taniguchi A., et al., Energy and Buildings (2016)

電力負荷曲線の推計精度の検証

■ 中間期



応用例 国レベルの予測と2030年評価



地域別推計結果（左：推計結果 右：家庭CO2統計¹⁾）

日本全国推計結果²⁾

およそ妥当な推計結果と判断⇒評価・分析に本推計手法を用いる

1) 環境省；家庭からの二酸化炭素排出量の推計に係る実態調査

2) 経済産業省；総合エネルギー統計，2013年

2030年温室効果ガス削減対策の評価分析

地球温暖化対策計画（家庭部門）の内容

	内容	現状	2030
住宅断熱性向上	新築住宅の省エネ基準適合義務化	6%	30%
	既存住宅の断熱化		
高効率給湯器	HP給湯機	400万台	1,400万台
	潜熱回収型	340万台	2,700万台
	燃料電池	5.5万台	530万台
高効率照明	LED照明 100%普及	9%	100%
高効率家電	家電トップランナー機器の高効率化	-	-

政府試算における各対策削減量の算出方法

単位量当たりの削減効果 × 対策導

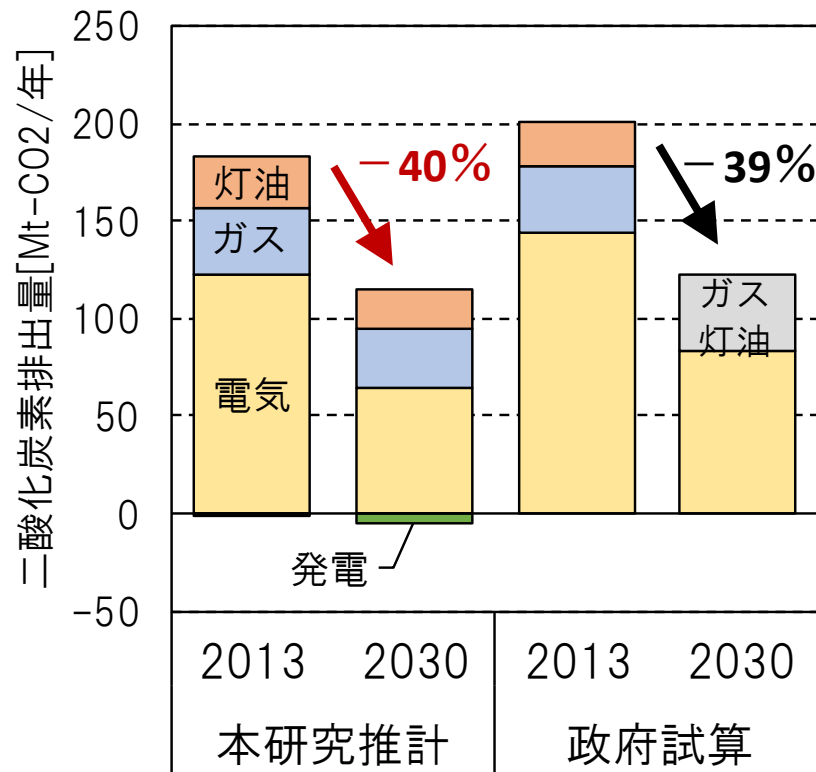
 入数

課題 対策単位量当たりの削減効果一定で推計されている

世帯や地域ごとの削減効果の違いを踏まえた
実態を反映した全国規模の削減効果を推計する

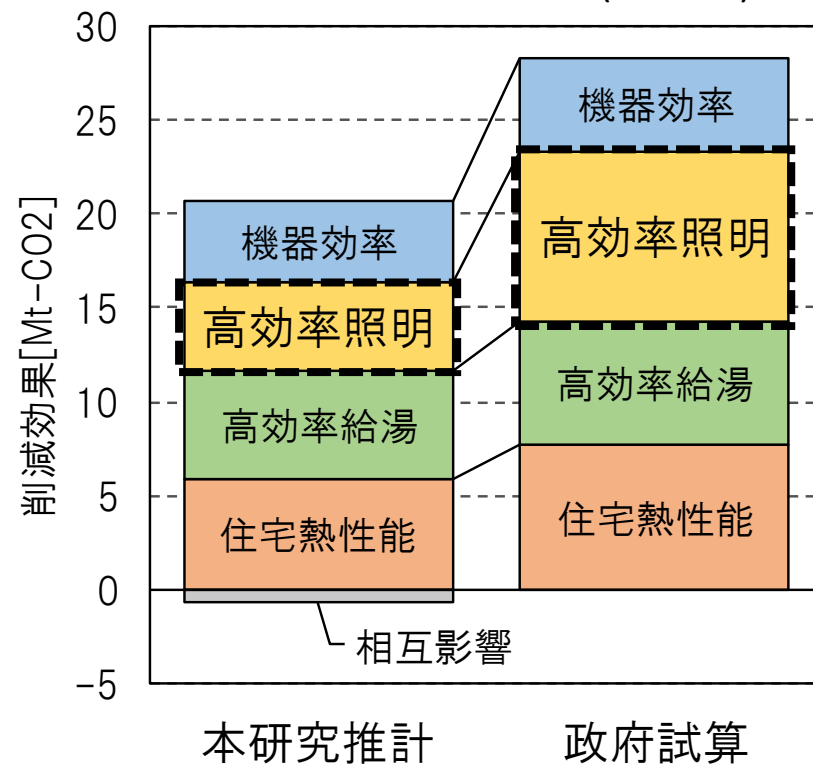
世帯・地域特性を考慮した対策削減効果の推計

● CO₂排出量の推計結果



● 各種対策の実行による削減効果

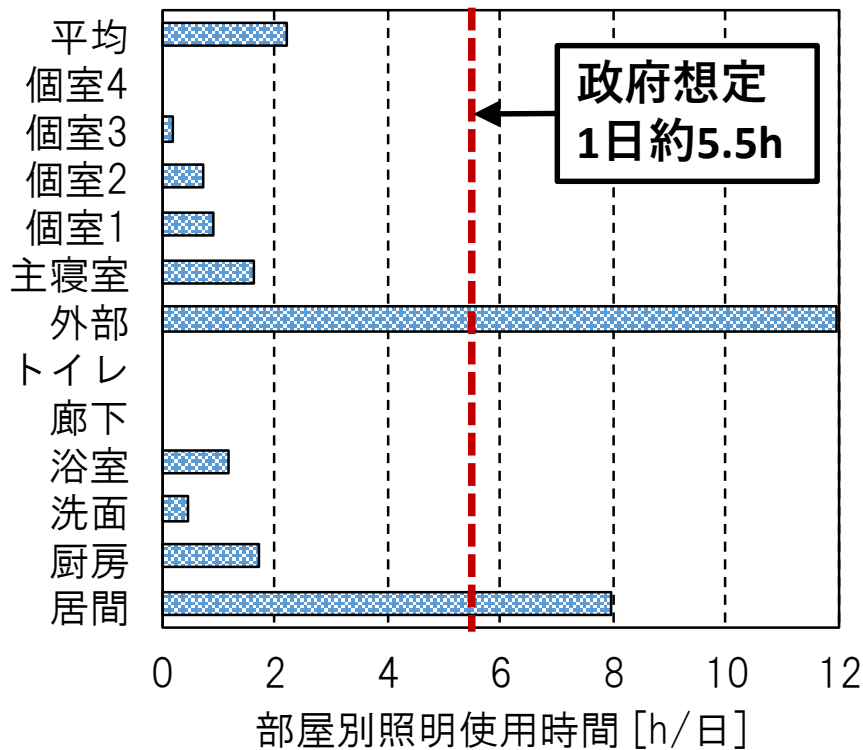
BAU(無対策) 基準



- ✓ 対策別削減効果の内訳は政府試算と異なる
- ✓ 特に「高効率照明の導入」による削減効果は大きく乖離

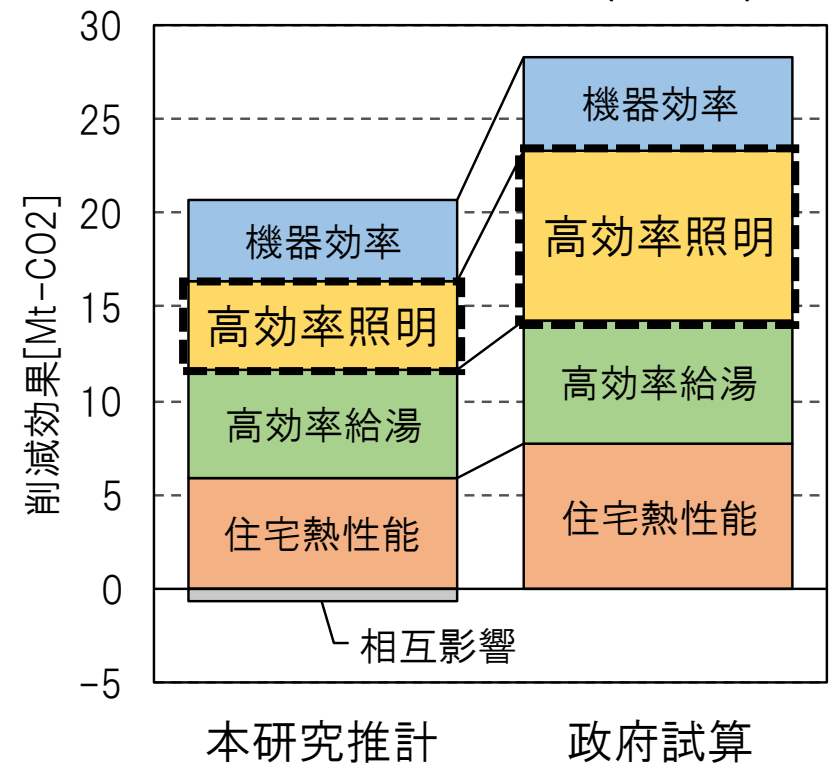
政府試算の検証例（照明）

● 照明使用時間の比較



● 各種対策の実行による削減効果

BAU(無対策) 基準

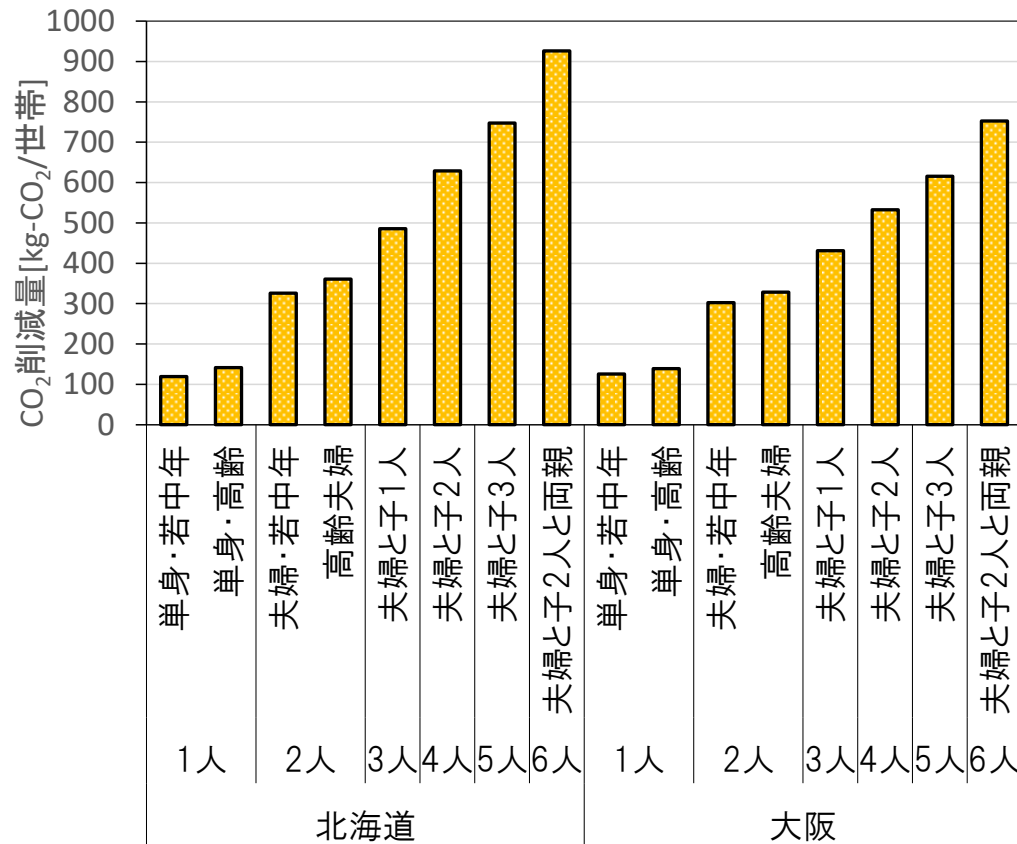


- ✓ 居住者行動に起因して照明稼働
 - ✓ 政府は全照明一律に設定
- = 本研究の方が適切な想定

照明使用時間の想定が乖離の原因

→ 「高効率照明の導入」削減効果の政府試算は過大

政府試算の検証例（給湯）



給湯エネルギー消費・削減効果は

- ・ 給湯需要量
- ・ 上水温度（加熱前水温）

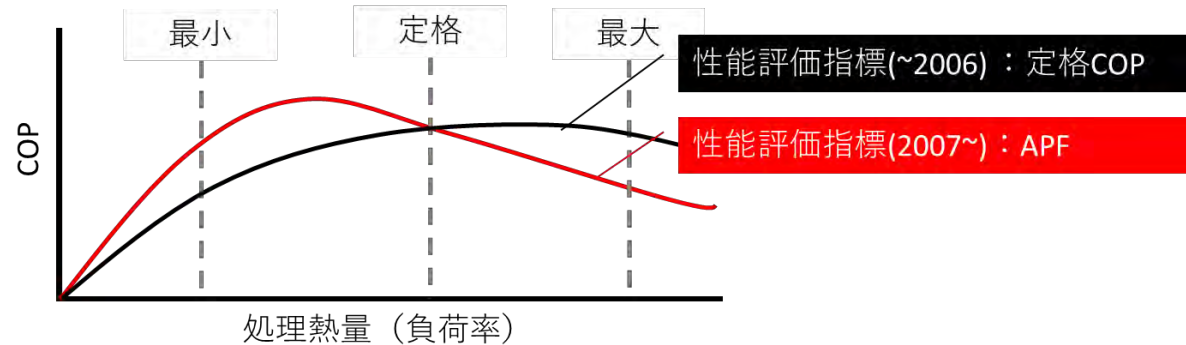
等により変化する

⇒世帯や地域ごとでも
削減効果は大きく違う

「高効率給湯器」の導入削減効果推計結果
（従来型ガス給湯器⇒ヒートポンプ給湯機）

設定室温1°C緩和による省エネ効果

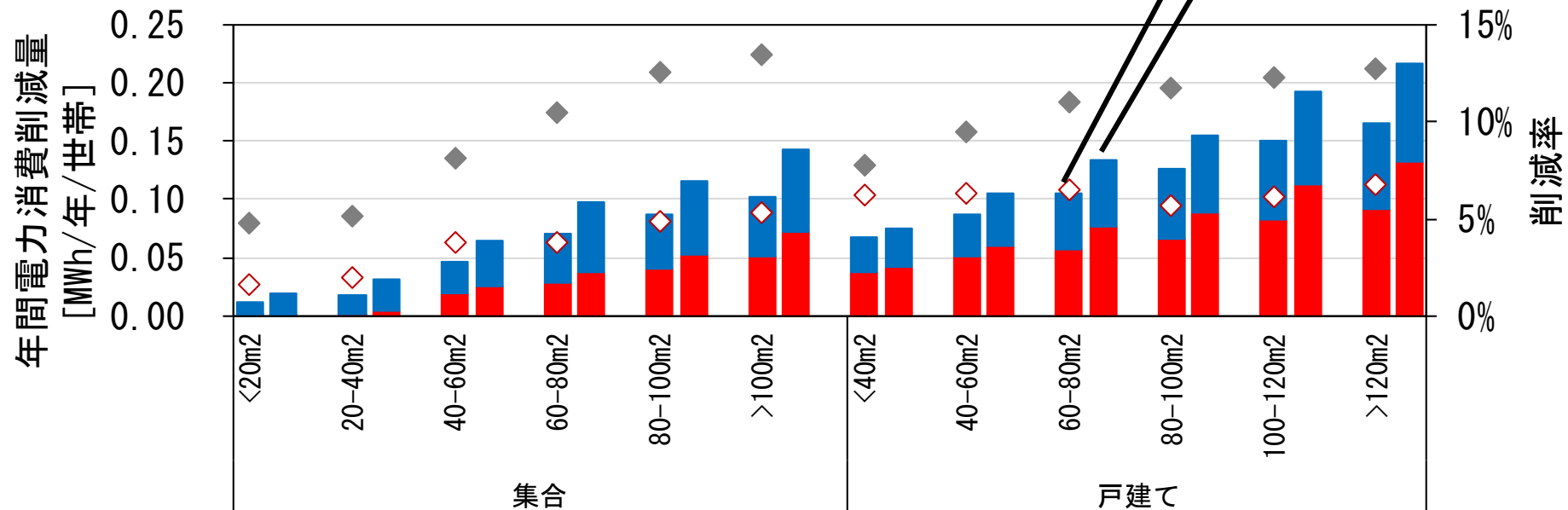
赤：最近のエアコン
(電中研モデル)
黒：従来のエアコン



◆ 削減量：最近のエアコン > 従来のエアコン

◆ 削減率：従来モデル2~7%、最近のモデル7~14%

■ 暖房削減量 ■ 冷房削減量 ◇ 削減率_従来モデル ◆ 削減率_電中研モデル



業務部門エネルギー需要モデルの開発

■ Archetype Engineering Bottom-up Modelling手法を使用して業務部門のエネルギー需要を推計するモデルを開発。

- スtock構成の変化がエネルギー需要にもたらす影響を定量化可能。
- エネルギー需要が決定される構造が再現され、個々の技術的变化がエネルギー需要にもたらす影響を定量化可能

■ モデルの構築と応用例

- 熱源・空調設備stock推計
- 関東地方業務部門を対象とするエネルギー需要推計
- LEDのエネルギー消費削減効果の推計
- DRの電力需要調整能力の推計

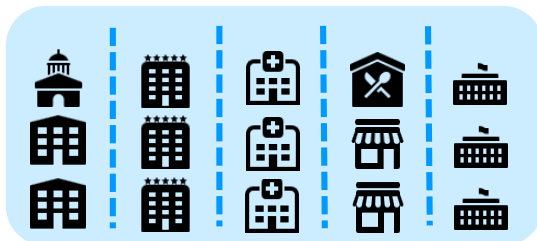
建築stock類型化

×

代表建物モデル
シミュレーション

×

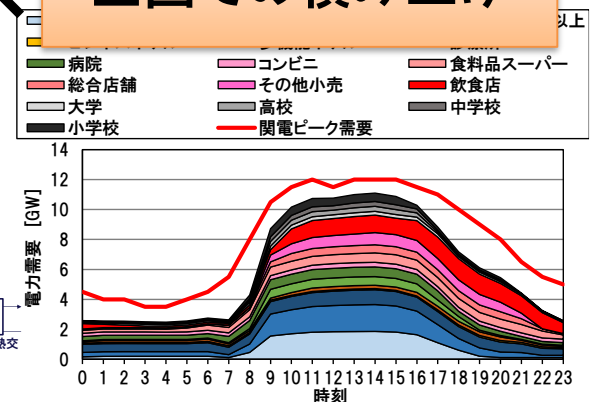
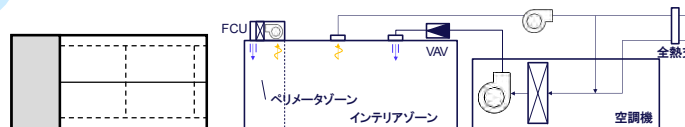
全国での積み上げ



+ 建築設備類型



熱回路網モデル
設備モデル





業務施設ストックの類型化

■ 用途・規模・地域

用途	類型
事務所	9
宿泊施設	11
医療施設	9
文教施設	3
飲食店舗	6
商業施設	14

類型	延床面積(m ²)
CL1	200未満
CL2	200~500
CL3	500~1,000
CL4	1,000~2,000
CL5	2,000~5,000
CL6	5,000~10,000
CL7	10,000~20,000
CL8	20,000~50,000
CL9	50,000以上

地域
北海道
東北
関東
中部
北陸
近畿
四国
中国
九州
沖縄

用途・規模から52類型

地域から
10類型

熱源・空調システムの区分 32類型 → 合計16,640類型

各類型の代表建物の作成

- 平面・外壁・窓面積率・断熱水準など
- 照明・機器負荷、人体発熱、隙間風など

- ・ 関東圏の業務施設エネルギー需要:年間約600PJ(空調が約200PJ)
- ・ 延床面積が多い事務所(190PJ)・商業施設(180PJ)が約65%

結語

- 「分散協調型エネルギー管理システム」におけるエネルギー需要の位置づけ
 - 2つのアプローチ、3つの手法
- エネルギー最終需要モデルとその応用例。
- 今後、境界領域としての「エネルギー需要科学」の確立と発展が望まれる。

ご静聴ありがとうございました。

- shimoda@see.eng.osaka-u.ac.jp