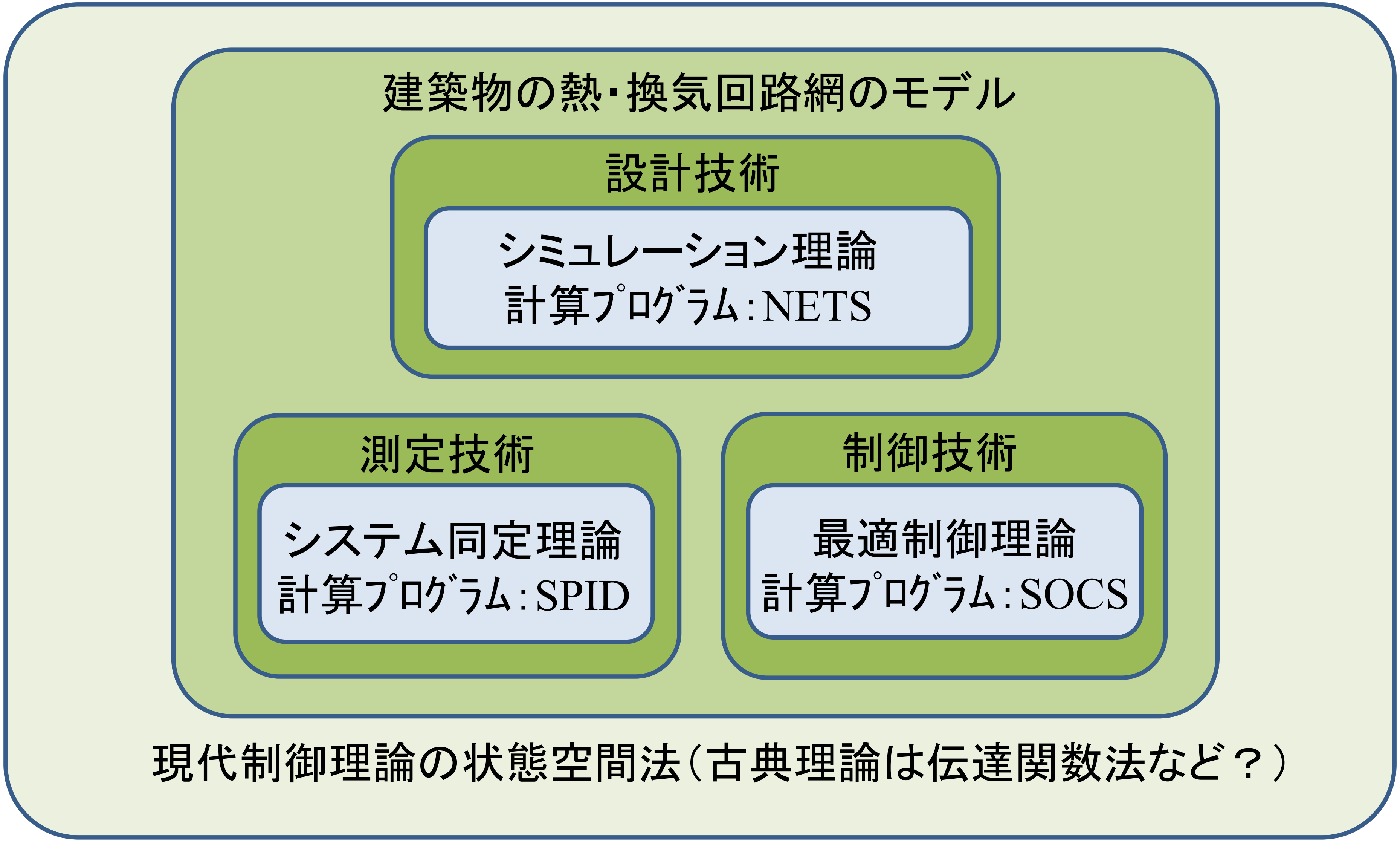
熱・換気回路網モデルによる技術の継承を期待して

奥山 博康



略歴紹介

ふりがな	おく　やま　　ひろ　やす
氏　　名	奥　山　　博　康
生年月	1952年　3月 生まれ

（木村研）太陽熱利用
空気式太陽熱集熱器の計算モデルを考えて，
・一般化熱コンダクタンス $c_{i,j}$ を考案
・完全連結システムの節点方程式　を考案
（計算プログラムの汎用性を実現できた）

学位	修士	学位名：工学修士（建設工学建築設備学）（1976年3月15日　早稲田大学，第221号）
		学位論文題目：　熱回路網数値解析法に関する研究
	博士	学位名：工学博士（1987年　12月3日　早稲田大学，第1391号）
		学位論文題目：　建築物の熱回路網モデルに関する理論的研究

・熱回路網の解析的時間積分法
（応用と固有値の数値解法が残る問題）
・換気回路網のモデルと解法
（CFDを包括し連成する方法が残る問題）
・熱回路網のシステム同定法
（測定システムとしての実用化が残る問題）

自　1967年　4月	山形県立山形東高等学校入学
至　1970年　3月	山形県立山形東高等学校卒業
自　1970年　4月	早稲田大学理工学部物理学科入学（1年次末建築
至　1974年　3月	早稲田大学理工学部建築学科卒業（学士）
自　1974年　4月	早稲田大学大学院建設工学建築設備入学
至　1976年　3月	早稲田大学大学院建設工学建築設備修了（修士）

1976年　4月	清水建設株式会社入社 研究所･環境研究部配属 研究員(1988年5月まで)
1987年11月	スウェーデン国立建築研究所･客員研究員(1988年5月まで．帰国後は主任研究員）
2012年　3月	清水建設･技術研究所･地球環境技術ｾﾝﾀｰ上席研究員で60歳の定年退職
2012年　4月	神奈川大学工学部建築学科　教授（2022年3月で70歳の定年退職）
2022年　4月	神奈川大学　非常勤講師 等，現在に至る

1990年12月	一級建築士（登録番号第227220号　建設省）
2006年　2月	CASBEE（建築環境総合性能評価員）（登録番号00582-09(財)建築環境･省エネルギー機構）
2008年　4月	SHASE技術フェロー（認定番号08-10262空気調和衛生工学会,換気測定法の研究開発）

次に三つの，

- ・予測計算　NETS　(Network model Simulation)
- ・システム同定　SPID (System Parameter Identification)
- ・最適制御　SOCS (Systematic Optimal Control System)

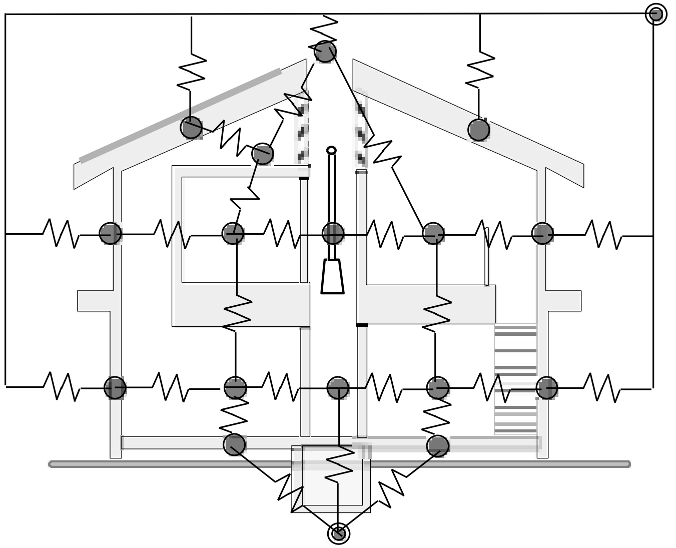
の概要をそれぞれ1スライドずつで紹介します．

NETS

SPID　SOCS

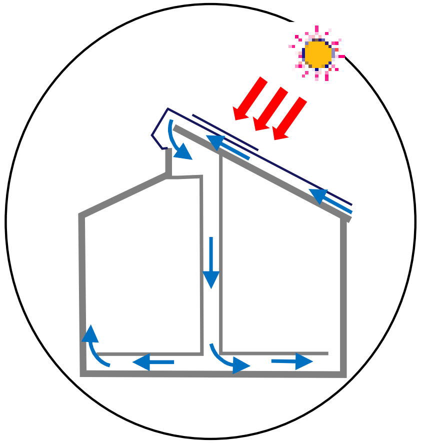
熱・換気回路網シミュレーション・プログラムNETSとは？

建物の熱回路網モデル

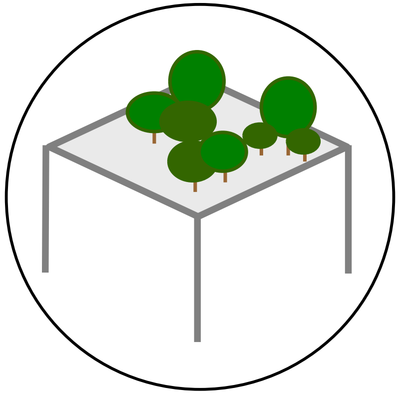


熱容量を持つ温度の節点と
一般化熱コンダクタンスから構成

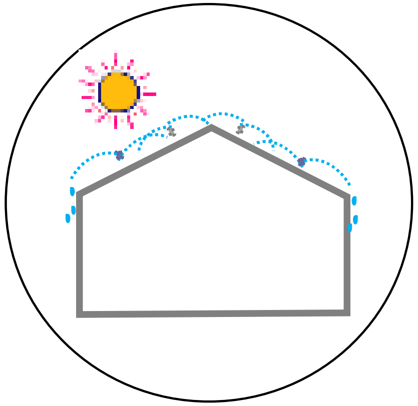
太陽熱利用



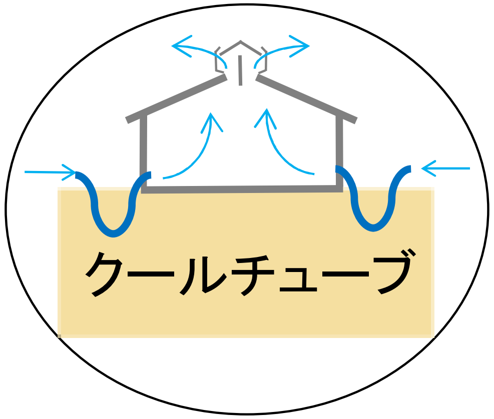
屋上緑化



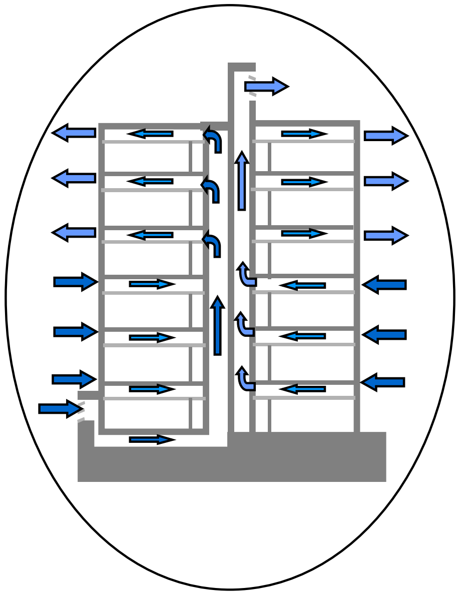
蒸発冷却利用



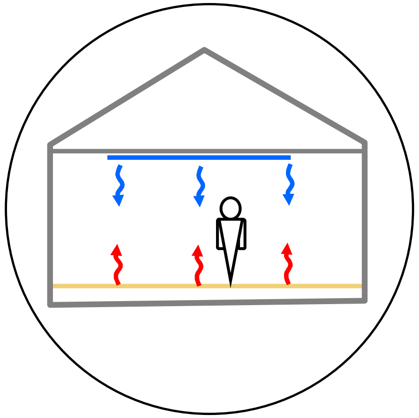
地中熱利用



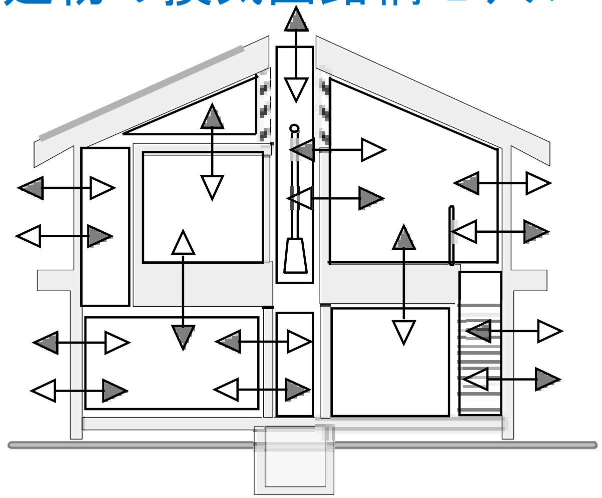
自然換気利用



放射冷暖房



建物の換気回路網モデル

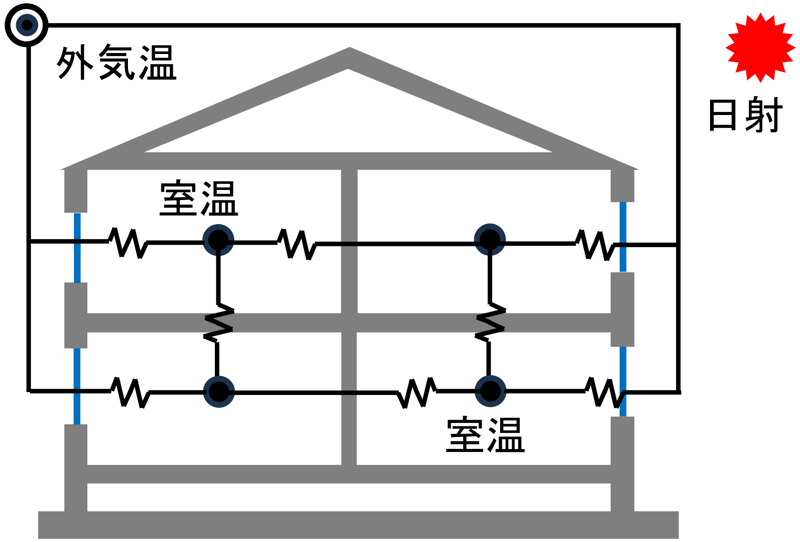


ゾーンの圧力の節点と流路から構成

NETSはモデル化の自由度が高く，汎用性がある

熱回路網のシステム同定計算プログラムSPIDとは？

多数室熱性能測定
（熱の拡散系のシステム同定）

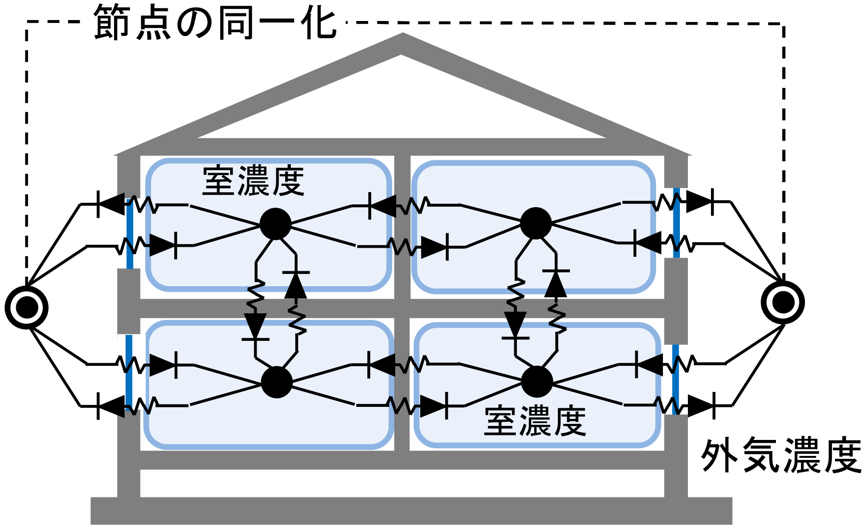


システム同定する係数：
- 壁体の貫流熱コンダクタンス
- 室の相当熱容量
- 室の日射熱取得係数

システム同定の方法：
- （原理）最小二乗法
- （回帰式）熱流収支の連立常微分方程式から

システム同定に与えるデータ：
- 外気温と日射量と各室温の時系列データ

多数室換気測定
（ガスの拡散系のシステム同定）



システム同定する係数：
- 室間と外気との風量
- 室の有効混合容積

数式モデルと計算プログラムは熱回路網用と兼ねることができる

システム同定の方法：
- （原理）最小二乗法
- （回帰式）ガス流収支の連立常微分方程式から

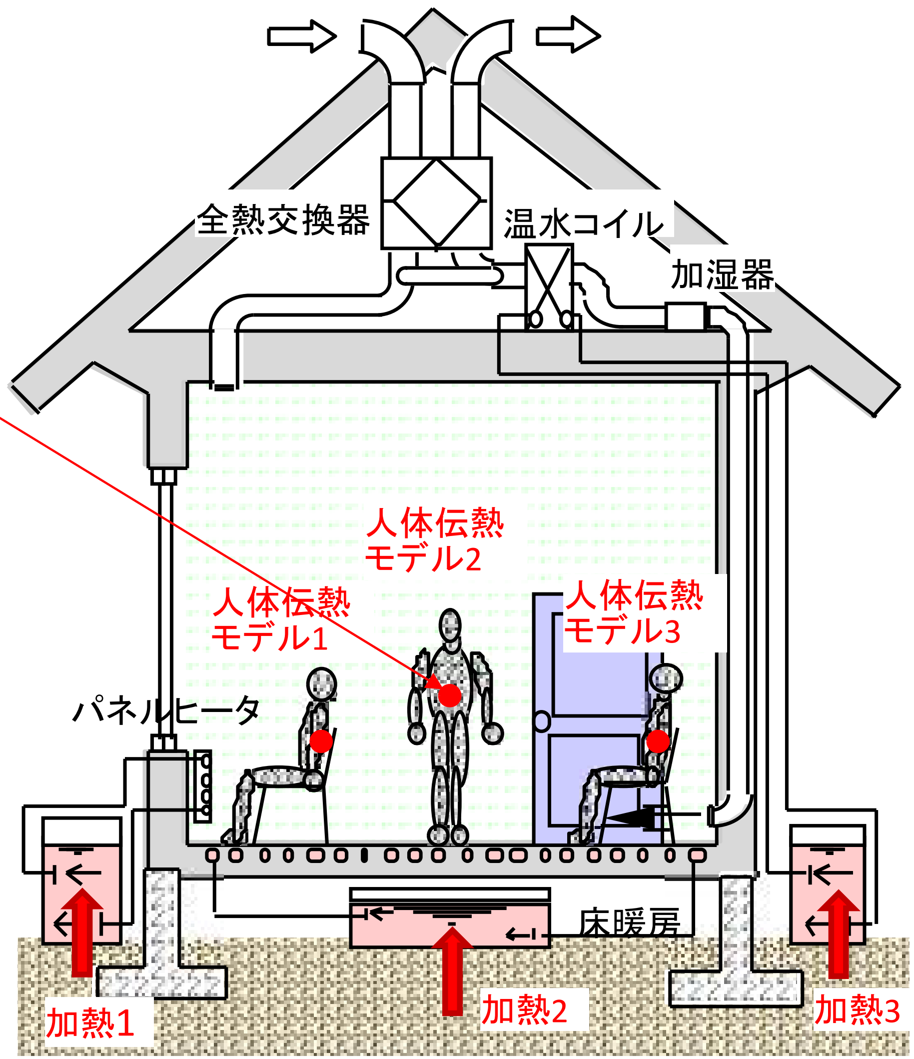
システム同定に与えるデータ：
- 各室濃度と外気濃度の時系列データ

状態とエネルギー供給の最適化計算プログラムSOCSとは？

状態空間法の最適制御理論に由来する

評価関数＝
＋熱的快適性
Wc･（中立の躯幹温度37℃との偏差）^{2}
＋省エネルギー性
We･（投入エネルギーの 0 Wとの偏差）^{2}
＋低質エネルギー性
Wx･（冷温水の外気温との偏差）^{2}

この評価関数を最小にする熱供給と温度状態の解を，状態空間法の最適制御理論の問題として，ラグランジェ乗数法により導いた．



制御法ではなく，最適設計法としての応用を考え，元々の非定常解から定常解を導いた．

外気温に近いぬるい熱ならば自然エネルギーが有効利用できる

計算プログラムSOCSを作成し，幾つかの試算までで中断している．
（最後は1996年，Optimization Theory for State and Energy Supply Based on a Heat and Moisture Transfer Network Model and Numerical Investigation, Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate）

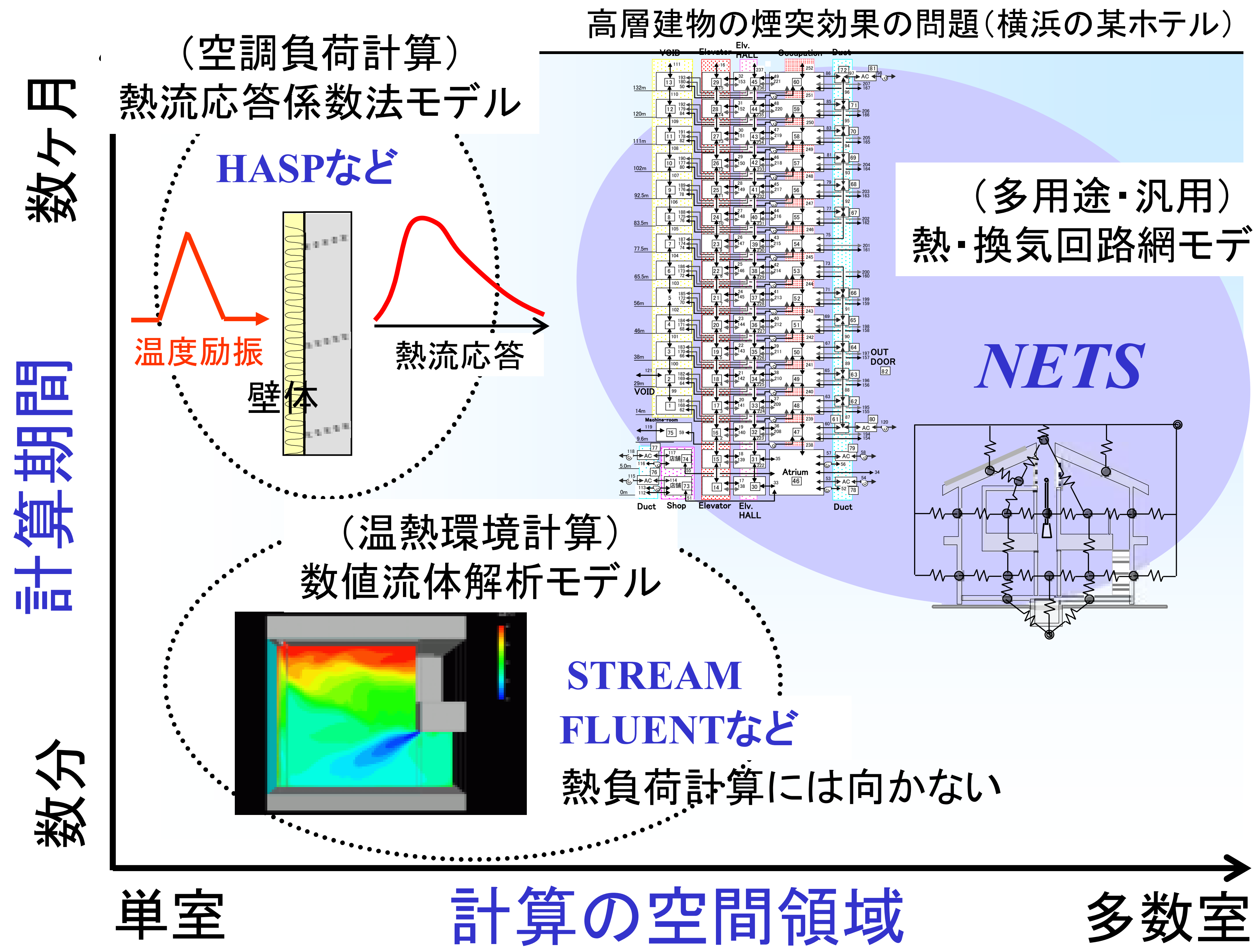
次に，NETSと他の解析方法との比較を，1 スライドで説明して，

さらに，NETSの入出力ユーザーインターフェイスについて，4 スライドで説明します．

NETS

SPID SOCS

他の解析手法と比較したNETSの位置づけ



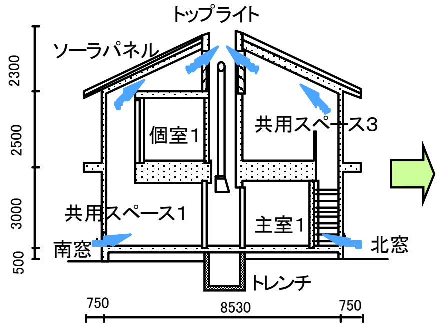
NETSのグラフィカル入出力プログラムの開発

ハウス・ジャパンの中間実証棟（舞浜）

1994年から2001年に通産省の
ハウス・ジャパン・プロジェクト
（顧問：田辺新一教授）
によりNETSのユーザーインターフェイスが開発できて，ようやく使えるようになった．

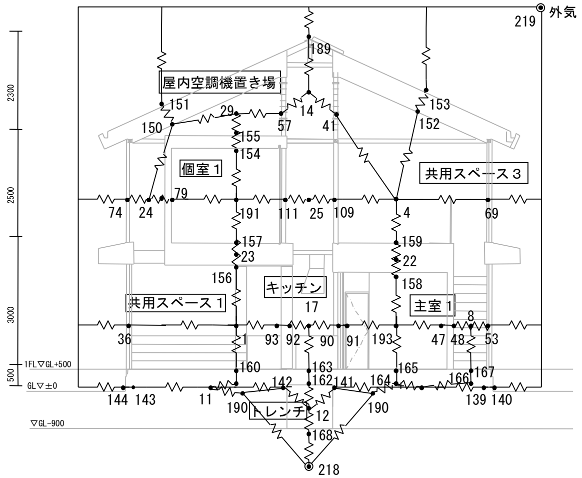
大型電算機からパソコンへ移行の時代に．

バグ探しを田辺研に委託

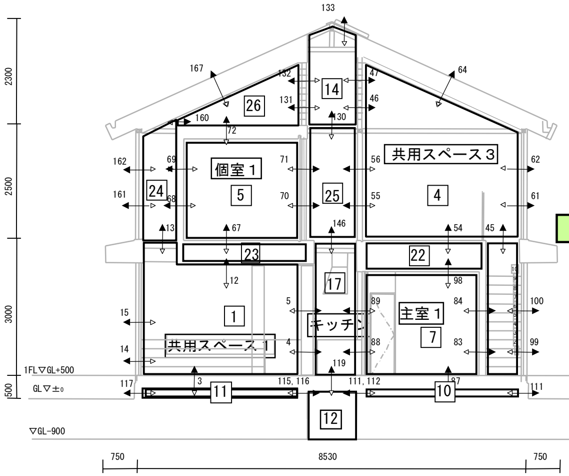


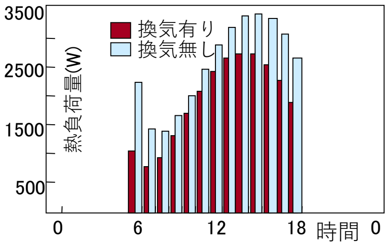
夏季の排熱換気モード

熱回路網モデル



換気回路網モデル



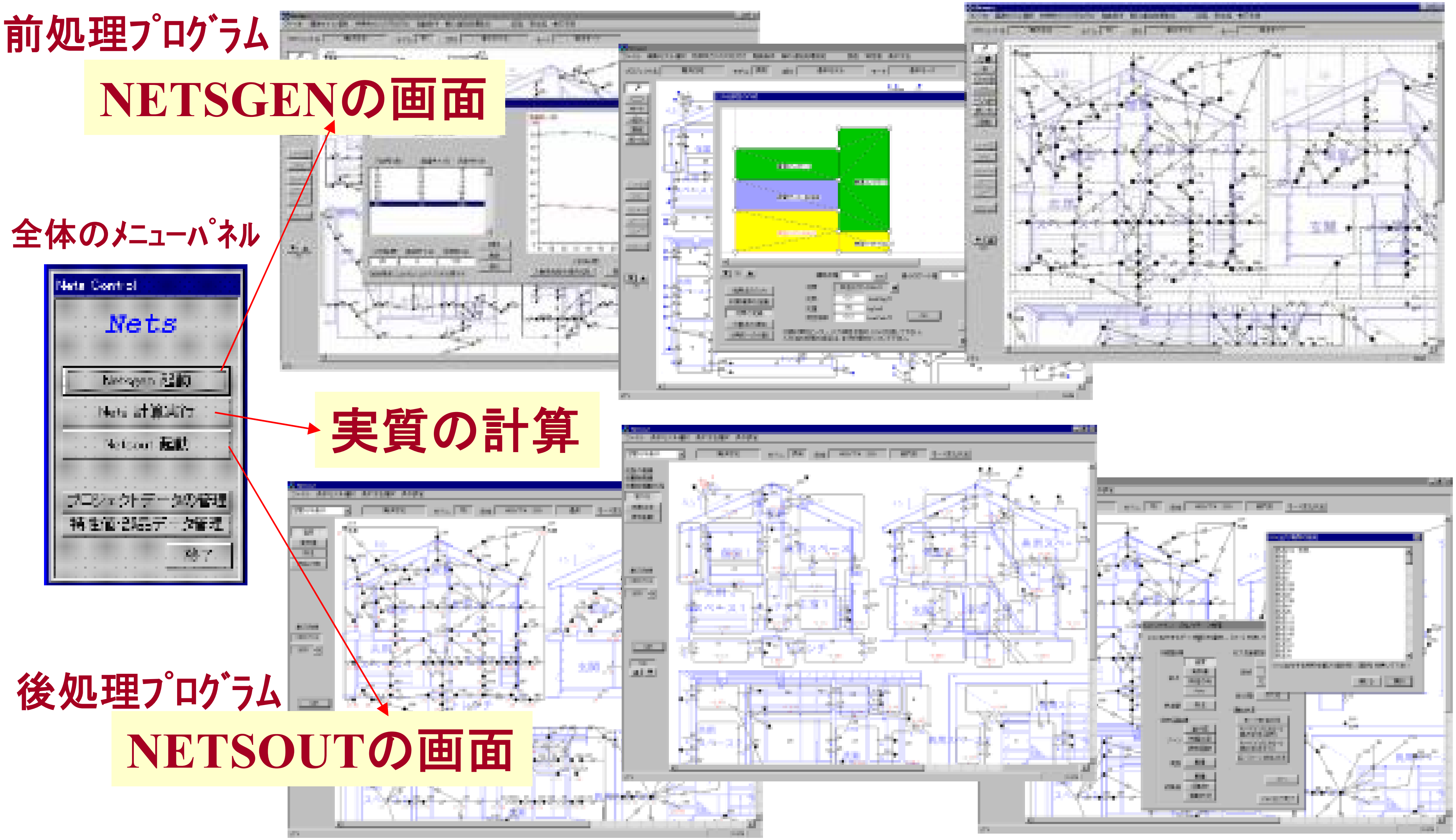


冷房負荷

NETSのデータ処理は3ステップ

前処理のNETSGEN，シミュレーション計算，後処理のNETSOUT

特性値や部品のﾗｲﾌﾞﾗﾘｨを使って，全体ﾓﾃﾞﾙを構築します



NETSの前処理プログラム NETSGEN

プリ処理システム
NETSGEN

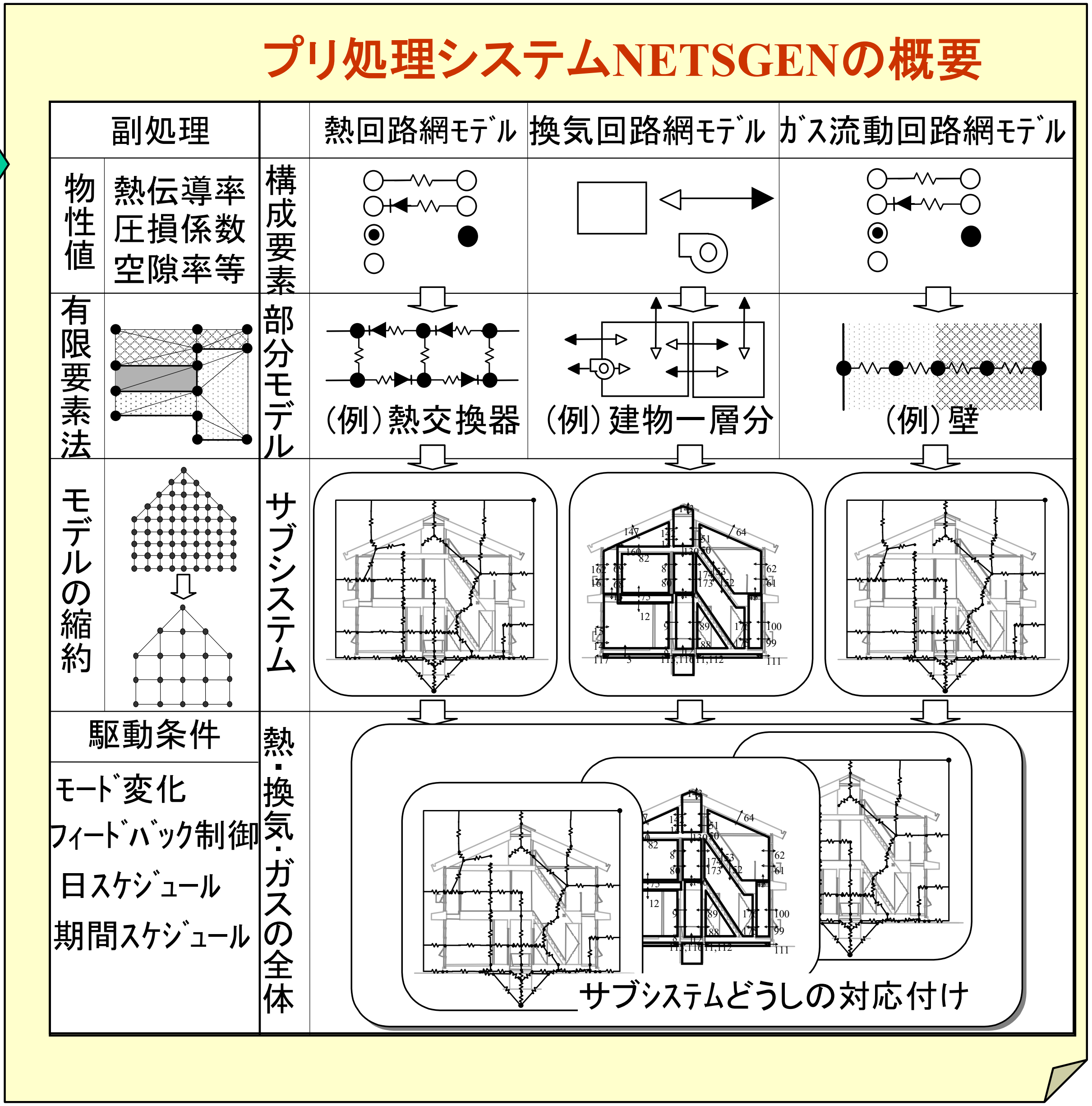
↓

熱・換気回路網モデル
計算プログラムNETS

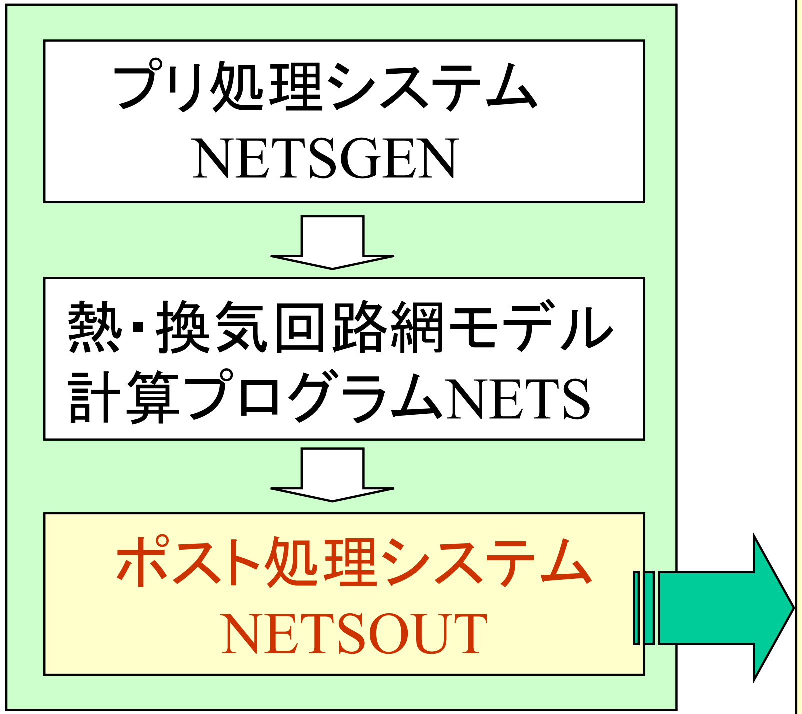
↓

ポスト処理システム
NETSOUT

熱・換気・ガスの回路網モデルを，画面上で自由に描いて，計算モデル作成ができます．

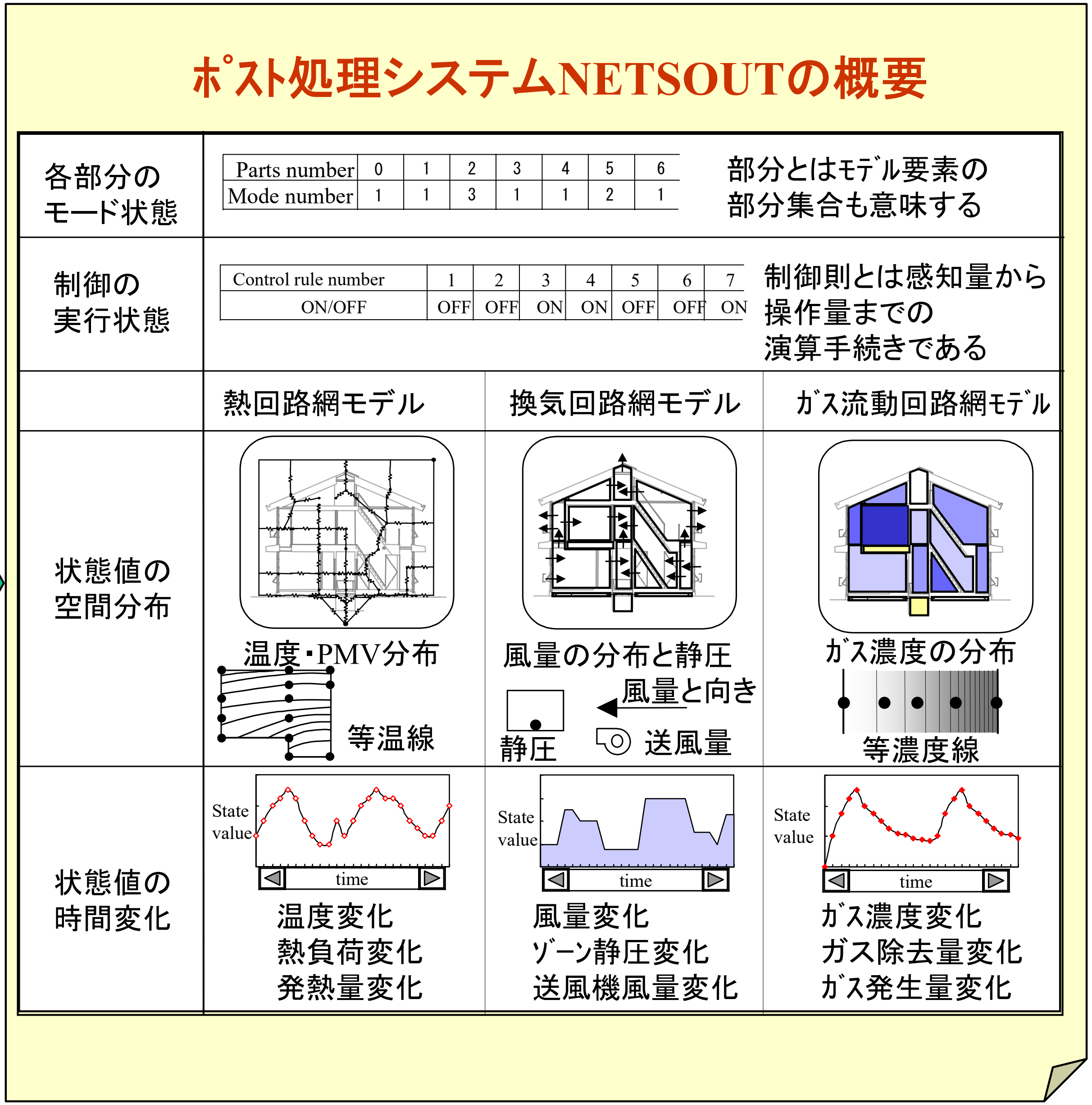


NETSの後処理プログラム NETSOUT



温・湿度状況，換気風量，熱負荷等を，モデル図に沿って表示したり，温度等の時間変化のグラフ表示をしたりできます．

数値的結果をCSVファイルで出せるので，表計算ソフトによるグラフ作成もできます．



ここで建築の伝熱と換気で重要な二つの現象を確認

・煙突効果または重力換気（温度差換気）

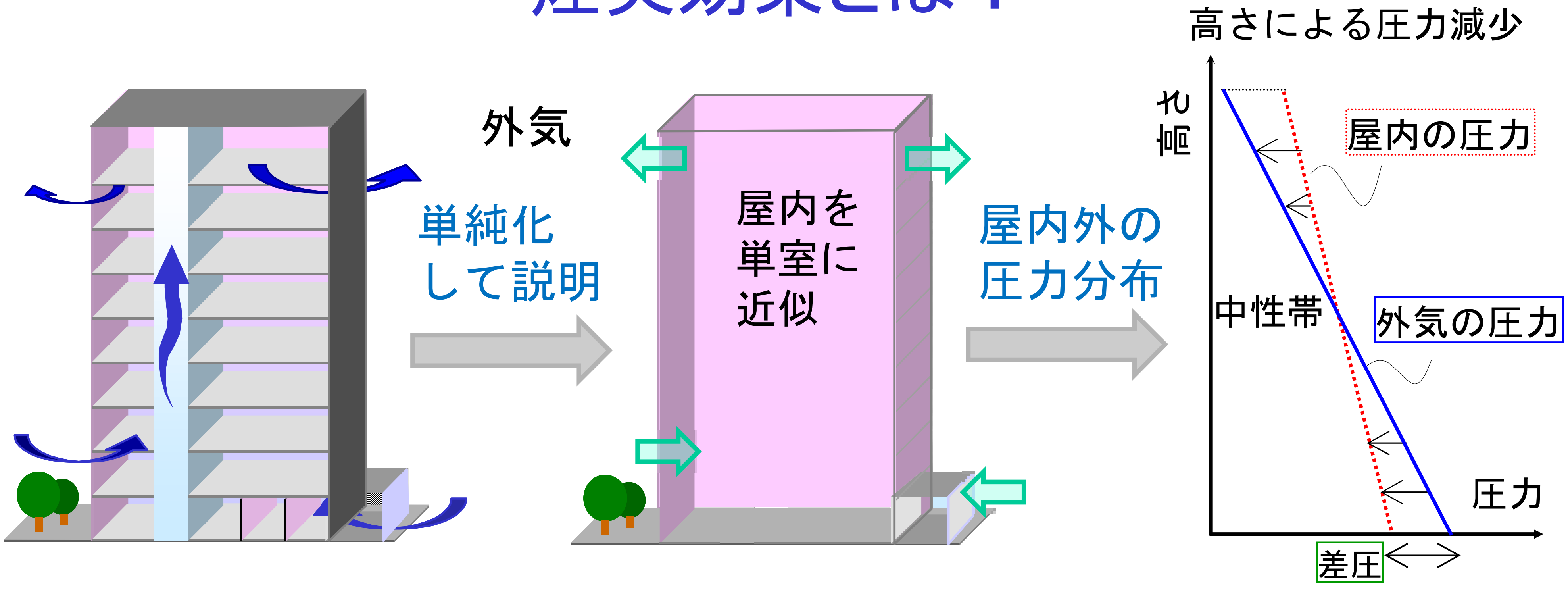
・ガラス等による温室効果

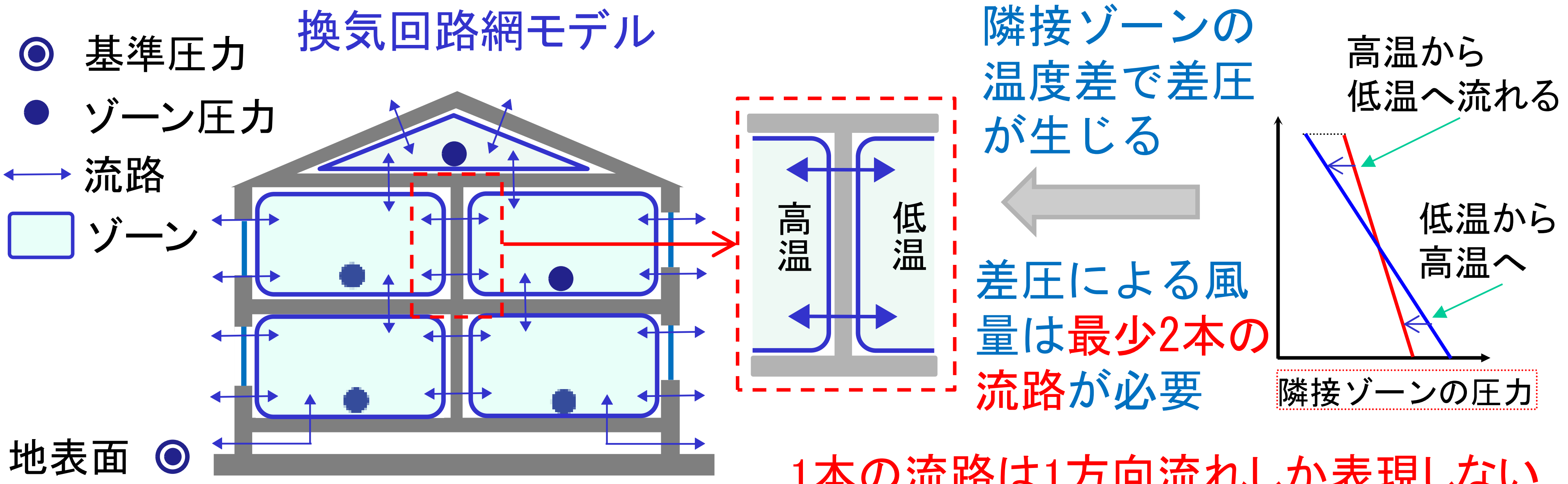
それぞれのモデル化を合計2枚のスライドで説明

NETS

SPID SOCS

煙突効果とは？

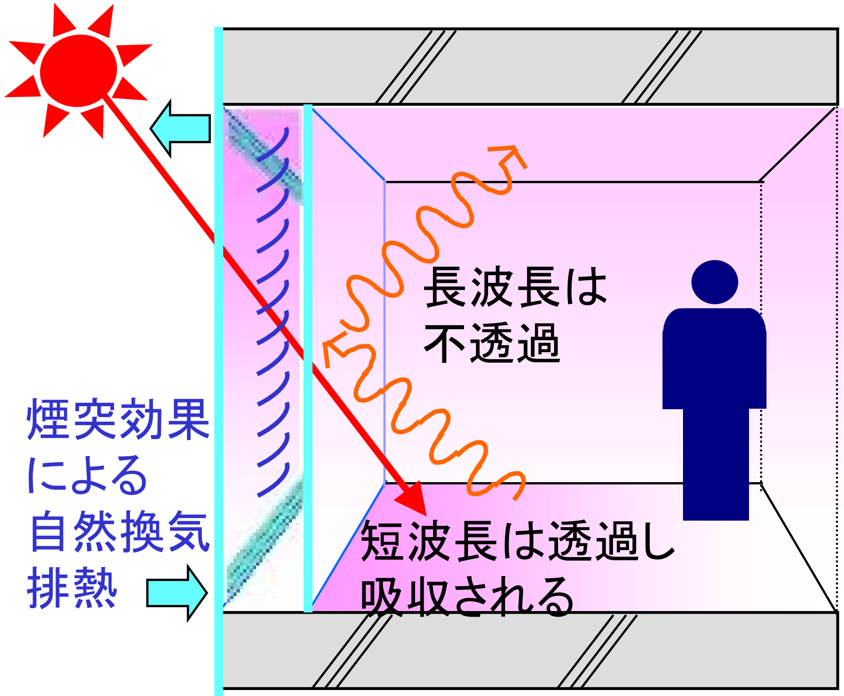




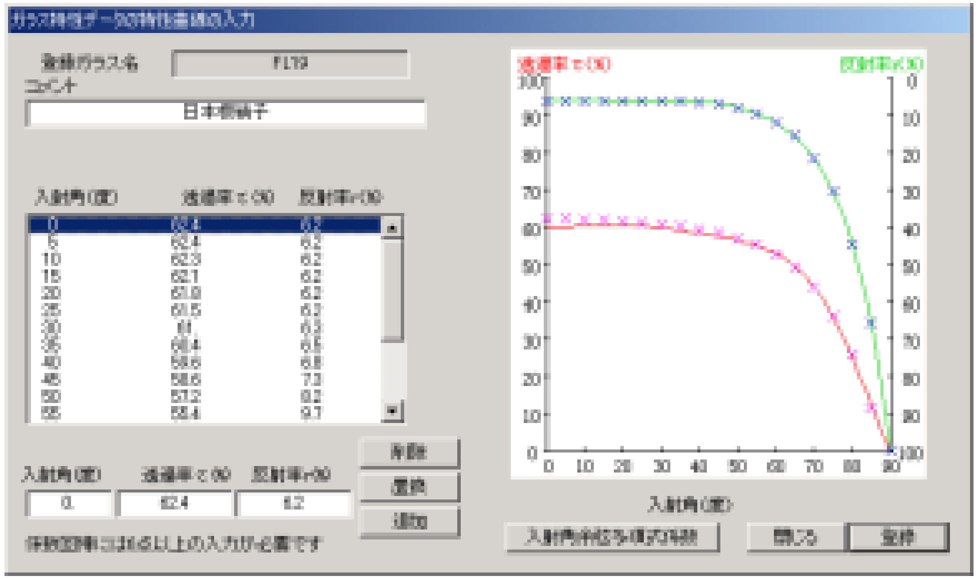
1本の流路は1方向流れしか表現しない

温室効果とは？　ガラスの透過･吸収のモデルは？

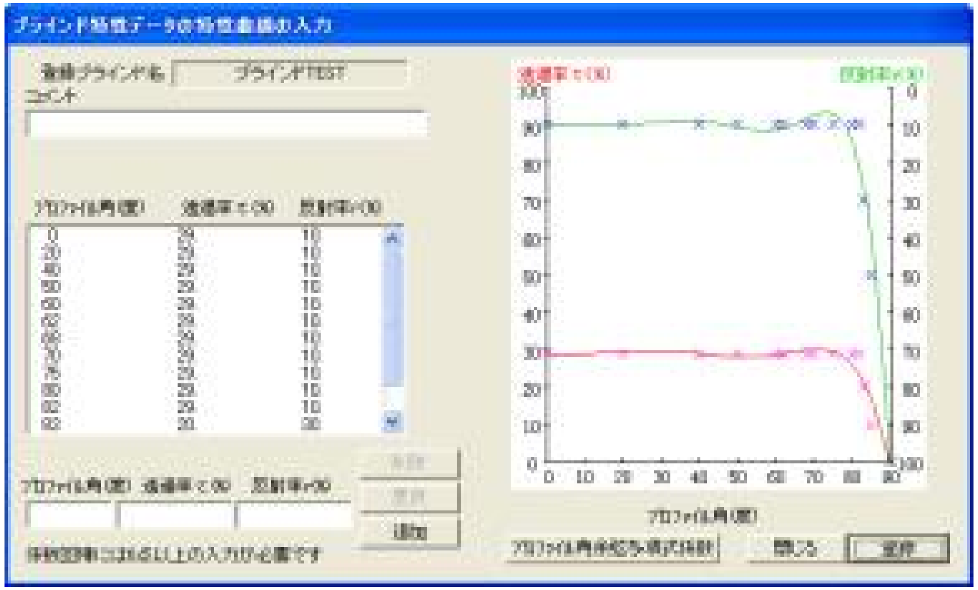
ダブルスキンの温室効果と自然排熱



ガラスの透過率と反射率を入射角度依存で扱う



ブラインドはプロファイル角度依存で扱う



NETSでは，直達日射に関して，入射角度θ依存の，透過率と反射率を，入射角の余弦COSθの5次の冪級数の係数にして，ライブラリィに保存しておいて利用します．

ブラインドに関しては，プロファイル角の余弦で定義された5次の冪級数の係数により計算する．

(吸収率)=1－(透過率)－(反射率)

ここからは，NETSによる検討事例を紹介

次の４スライドは木造住宅の通気層の効用検討

NETS

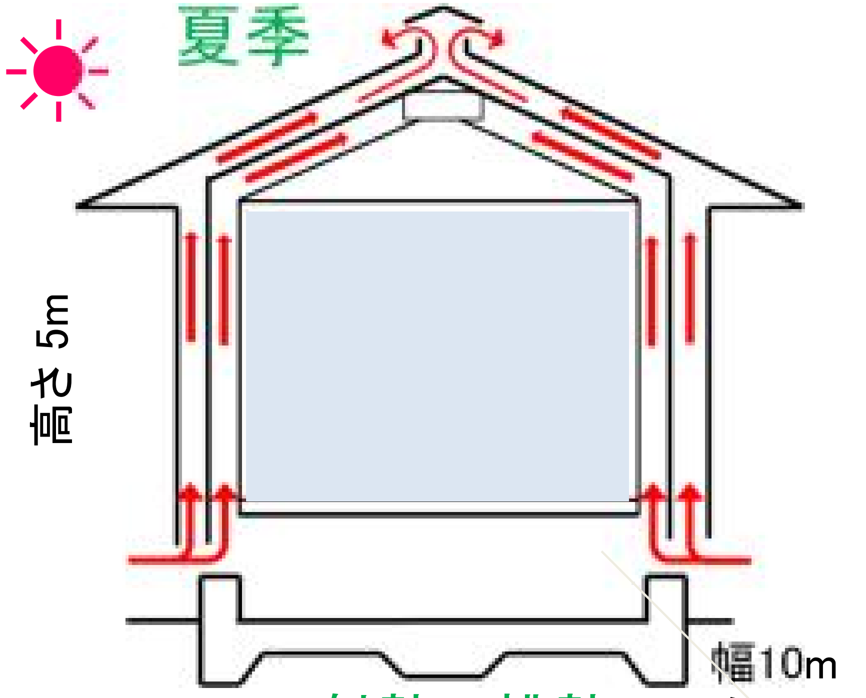
SPID SOCS

NETSの検討事例1：木造住宅の通気層の効用検討

問題意識

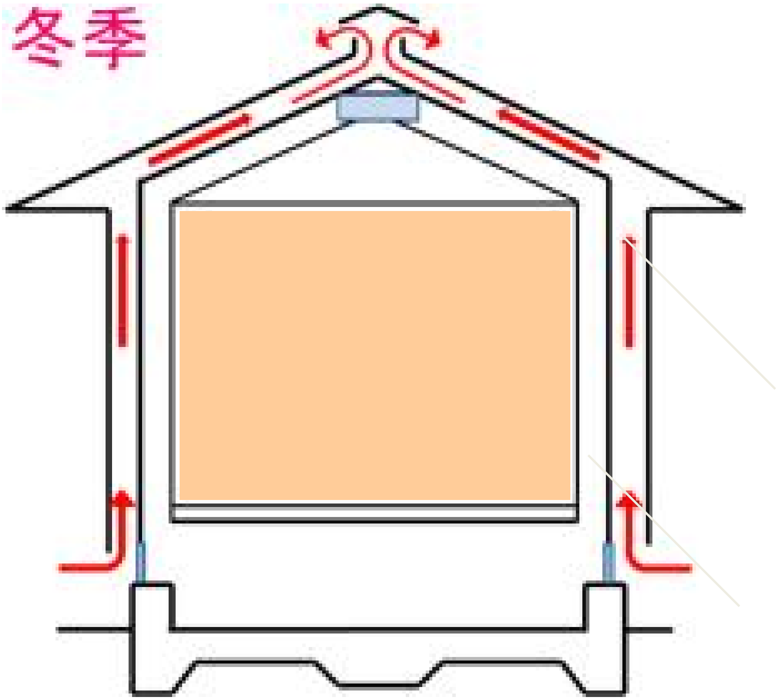
- 通気層の熱的な効果が誇大視されていないか？
- 室内側にも通気層を設けるのは正しいのだろうか？
- 水蒸気排出の効用が重要なのではないか？　耐久性，健康性
- 通気層が高く長く続いているのは正しいのか？　等圧区画は不要か？

外側通気層：開放，内側通気層：開放



日射熱の排熱

外側通気層：開放，内側通気層：閉鎖



内部結露の防止

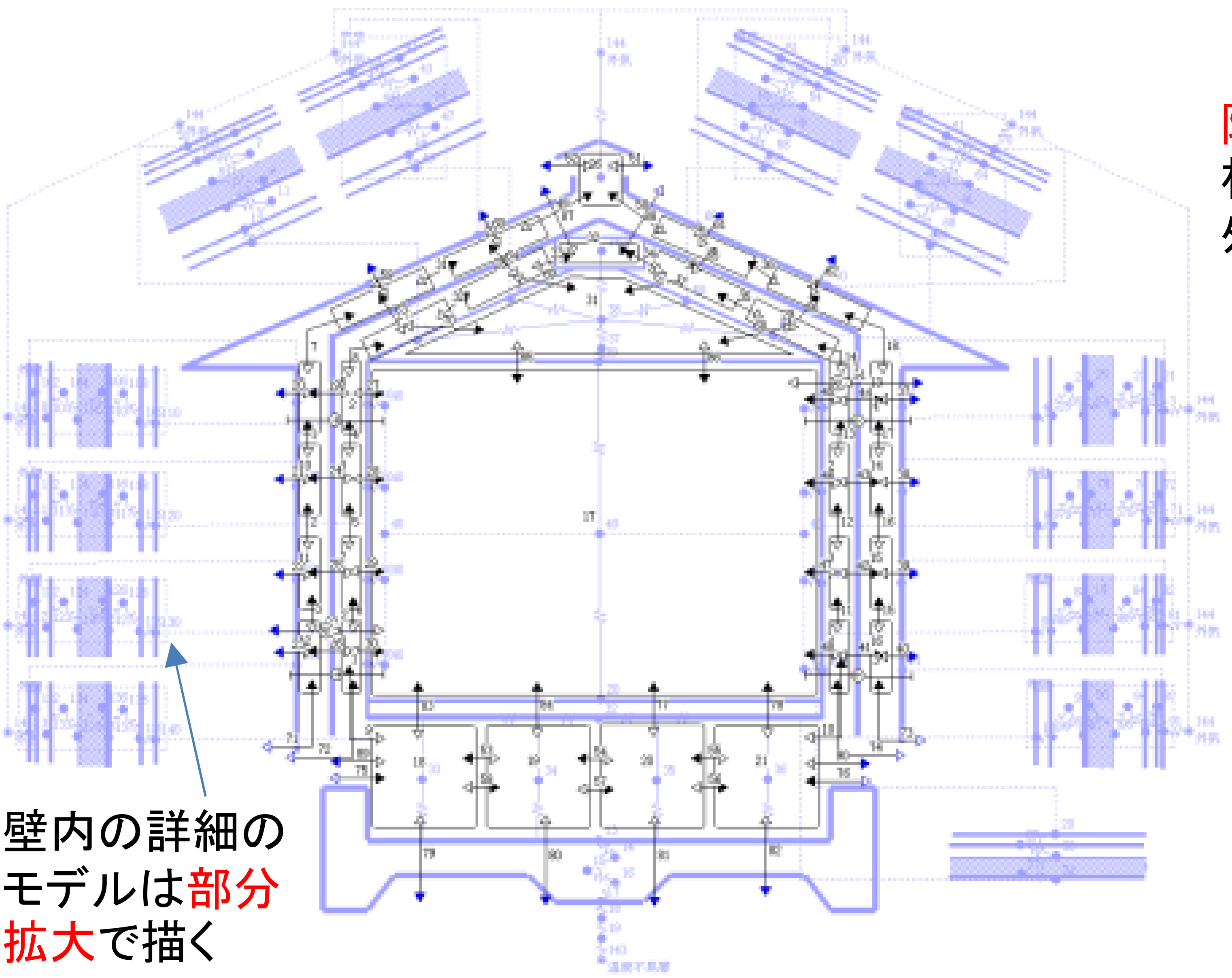
屋根：外側から順に，スレート:10，合板:10，通気層：60，フォームスチレン:50，合板:10，通気層:60，プラスターボード:10（mm）

外壁：外側から順に，タイル:10，合板:10，通気層：60，フォームスチレン:50，合板:10，通気層:60，プラスターボード:10（mm）

換気回路網モデル

薄青色の下図は，モデル描画のガイドにする熱回路網モデル

通気層の流れ方向は幾つかのゾーンに分割する



流路

ゾーン

隙間風のモデルは相当隙間4 cm^2/m^2 を外壁に均等に配分.

換気回路網を描きやすくするため，熱回路網や水蒸気回路網を下図として表示する.

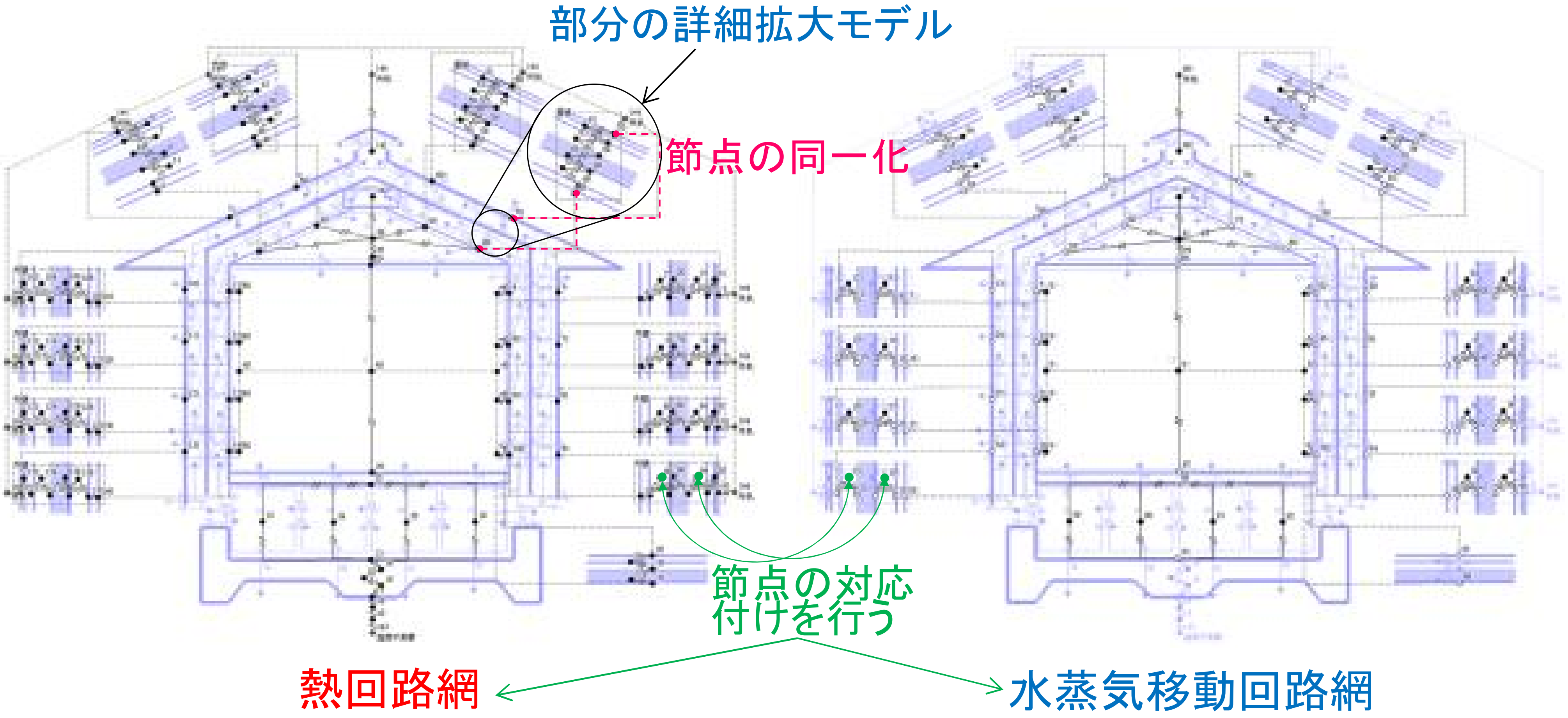
ゾーンの空気密度を計算するために熱回路網の節点との対応付けをする.

壁内の詳細のモデルは部分拡大で描く

熱と水蒸気の移動の回路網モデル

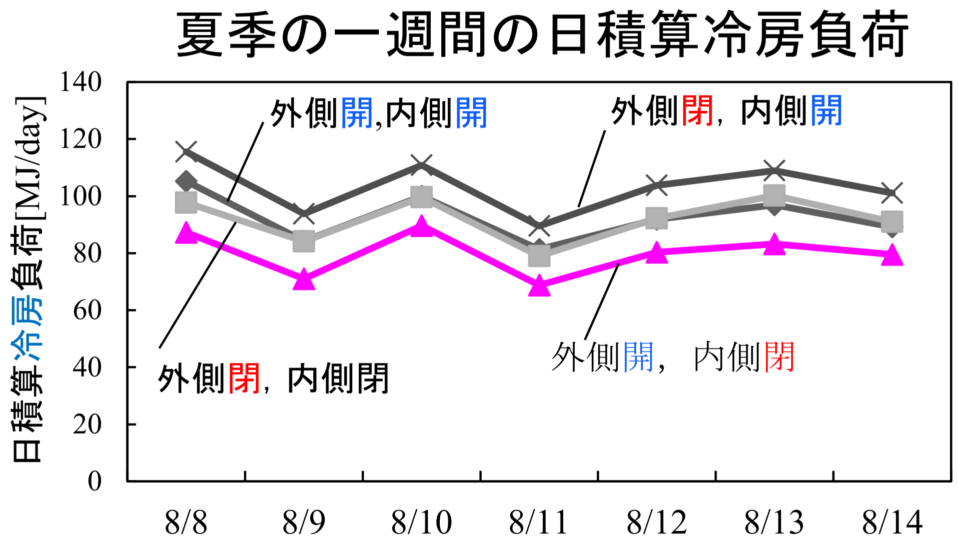
モデル図を描きやすく分かり易くする「節点の同一化」がある.

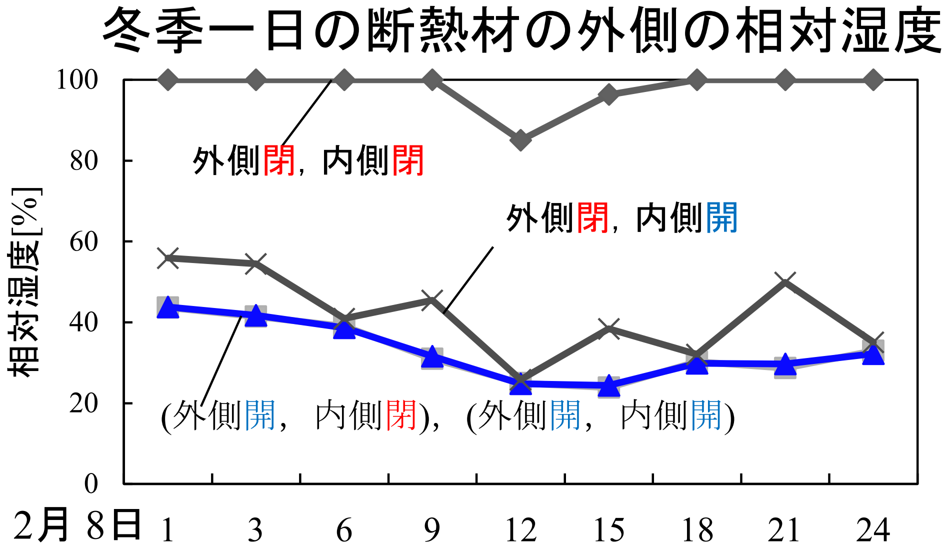
（例えば，壁の中の詳細は，全体図には描かず，別のところに描く）

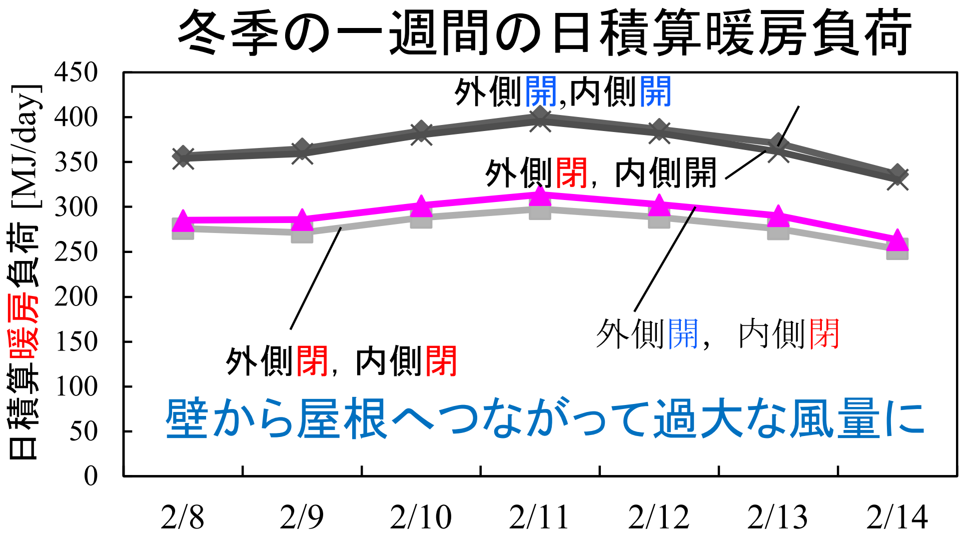


・三つの回路網モデルの節点の対応付けを行う.
・絶対湿度の連立方程式を解き，対応する温度から，相対湿度も算出される.

通気層の熱的効果と内部結露防止効果







- 内部結露防止に外側の通気層は重要な働きをする．
  水蒸気排出に必要な風量は，熱的な効果は殆ど無くても十分．

- 夏季の日射の排熱効果は少しはあるが，冬季に暖房負荷は増えるので，水蒸気排出目的の僅かな通気量で良しとすべき．

（今後の課題）通気層の等圧区画と延焼防止区画の検討

次からの３スライドは，多層階のデータセンターの

自然換気冷却

NETS

SPID SOCS

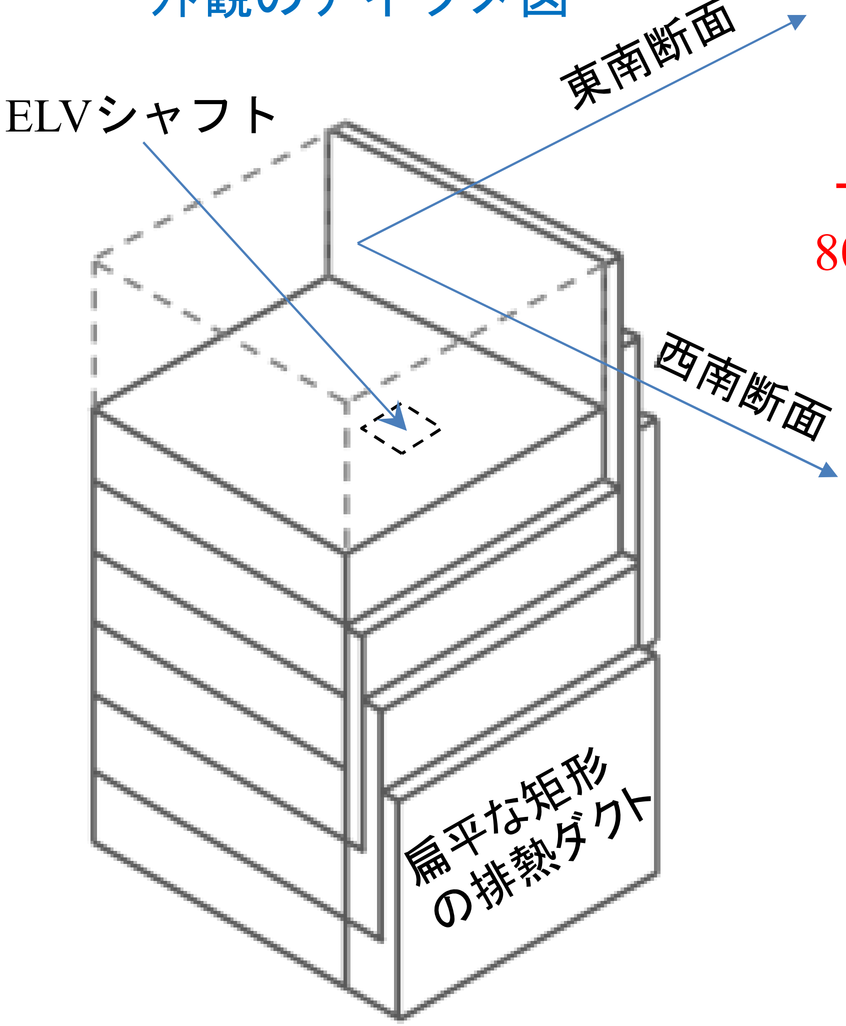
NETSの検討事例2：多層のデータセンターの自然換気冷却

問題意識

データセンター等では電力の内部発熱が大きく，電力を使って冷房が行われている．

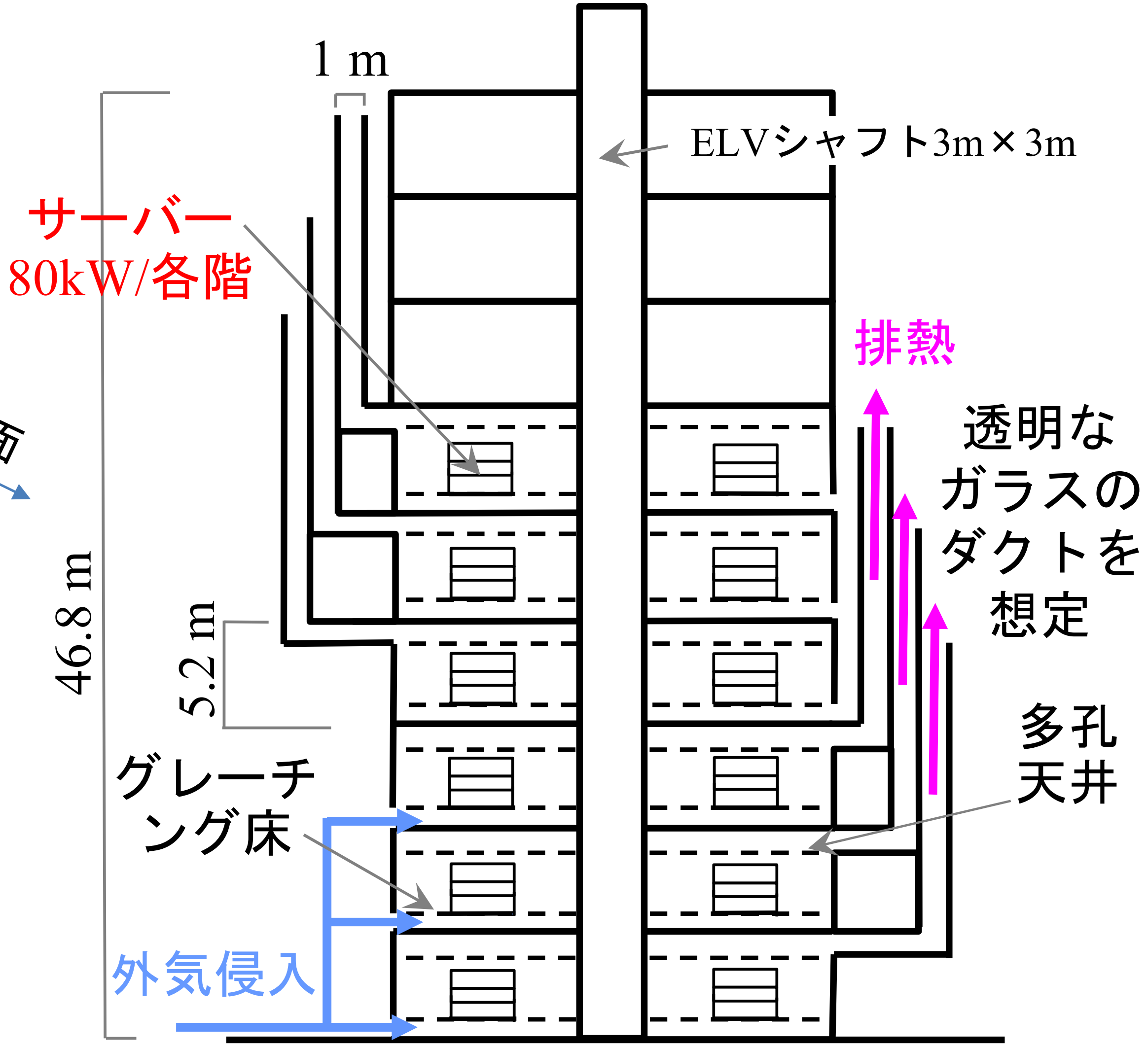
- 多層階であれば，煙突効果の利用で自然換気冷却が可能ではないか？
- ELVシャフトにより，各階の自然換気量が，大きく異なってしまうのではないか？

外観のアイソメ図



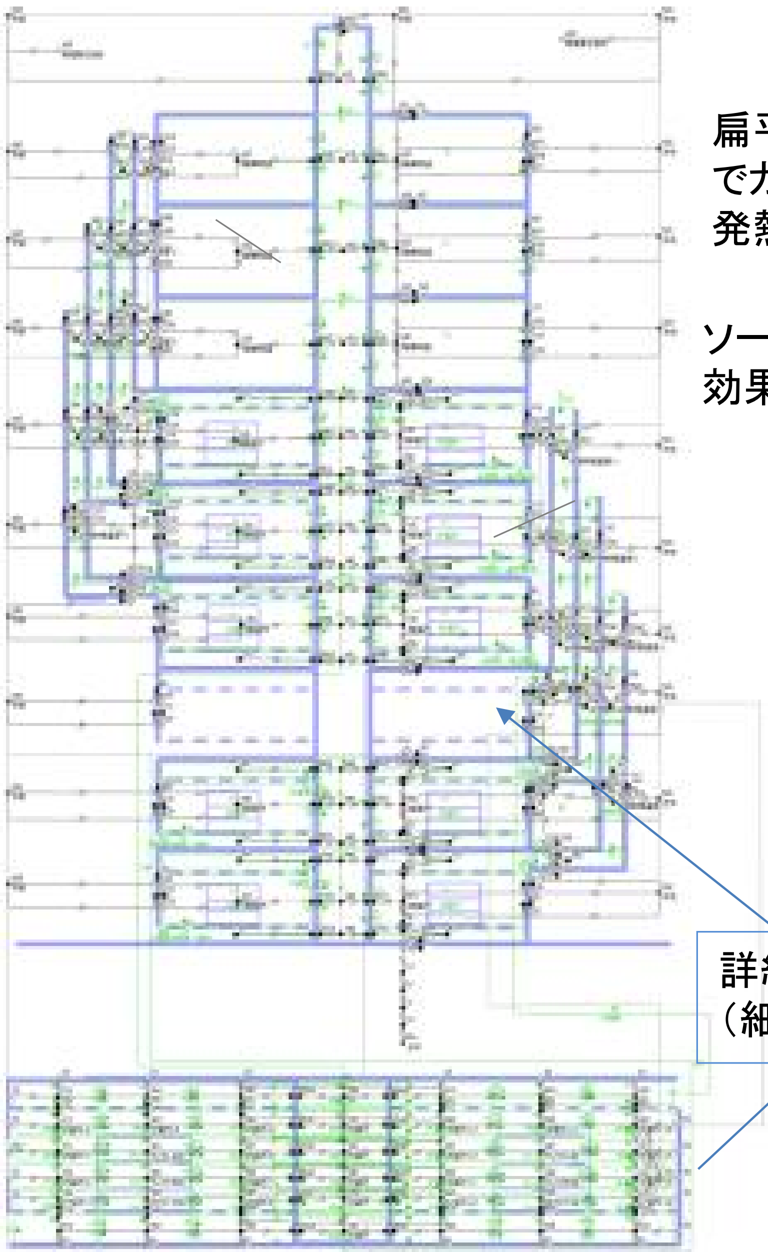
1階の平面は20m×20m

東南と西南の合成断面の模式図



床下も天井裏の空間も高さは1m

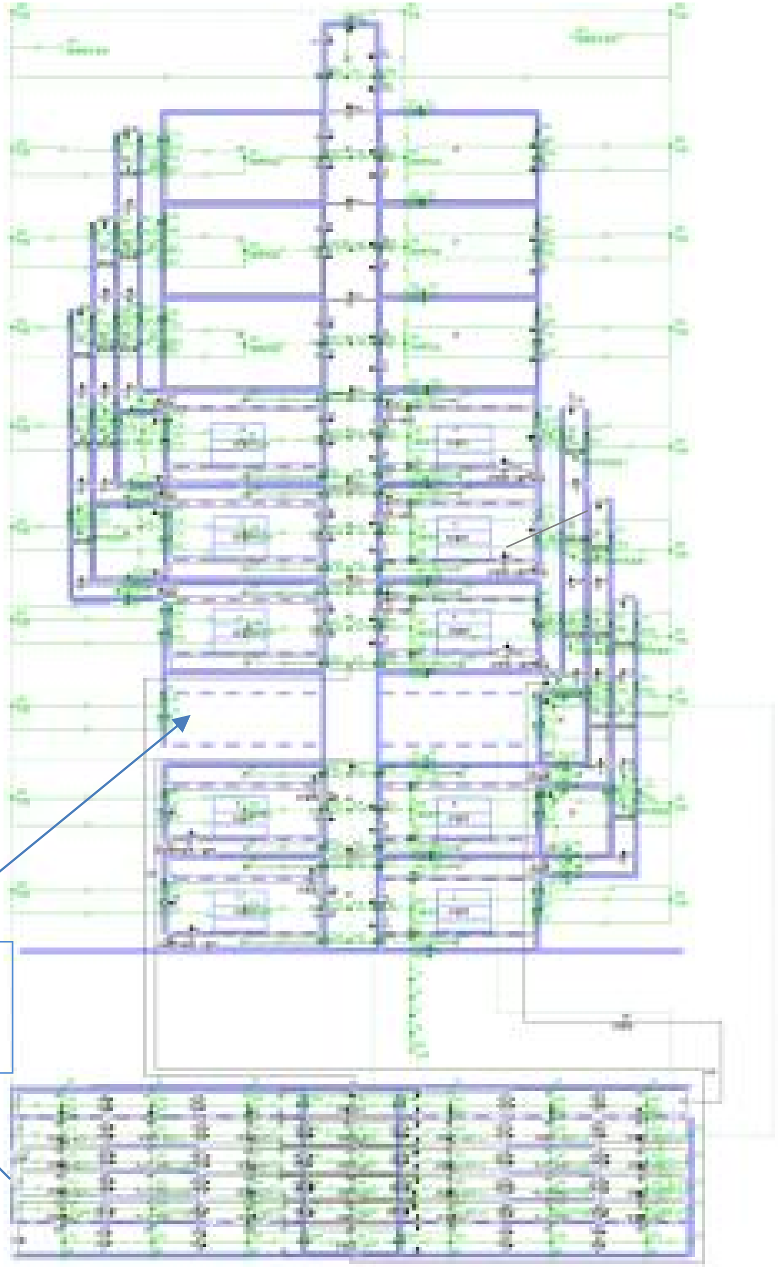
熱回路網と換気回路網のモデル



扁平な矩形断面
でガラス製の排
発熱ダクト

ソーラーチムニー
効果も利用

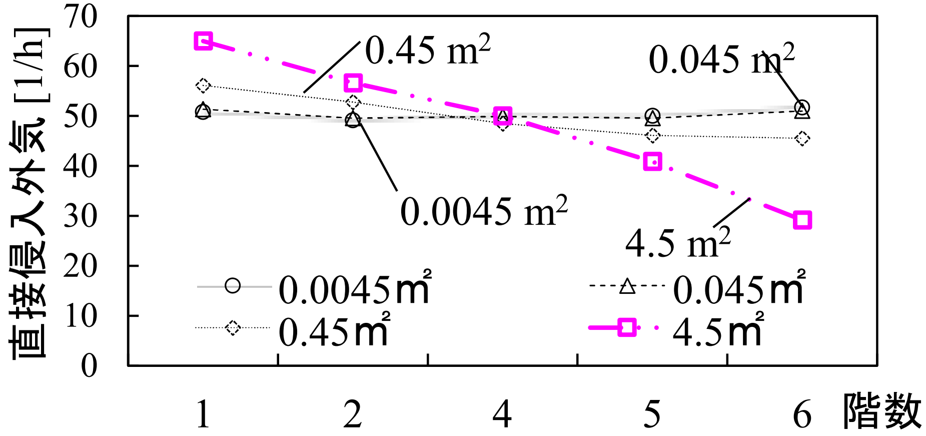
詳細階のモデル
（細かい分割）



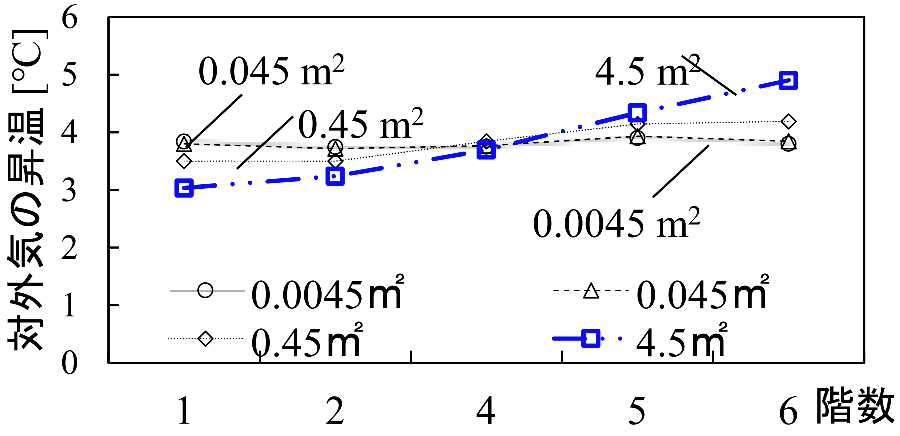
東京の標準気象データで外気温だけ0℃一定とした．日射量は利用．
4日間の非定常計算を行い最後の1日分の計算結果を用いた．

各階室温と換気回数のELV扉開口による影響

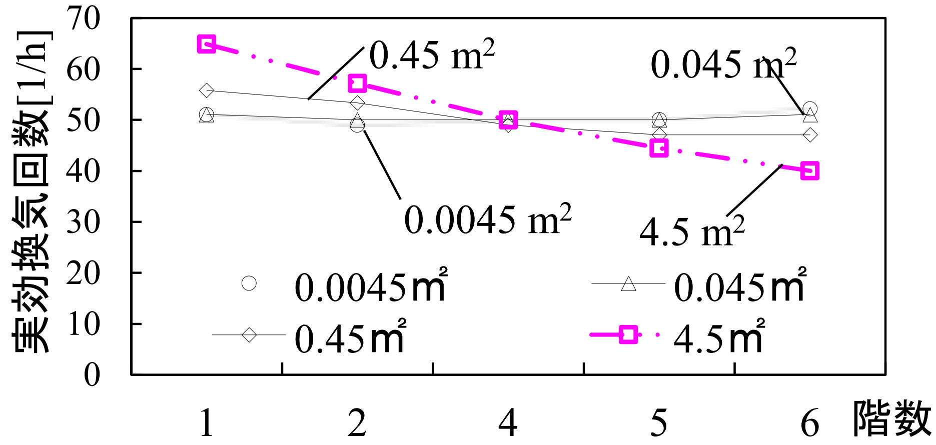
直接侵入外気量だけの換気回数



各階の室温（外気は0℃として）



ガス濃度で評価した実効換気回数



- 外気温が0℃では室温は4℃程度となる.
- ELV扉が開く影響による各階の換気量の違いは小さい.
- 直接侵入外気量でも，実効換気回数でも，50回毎時程度になる.

- 実効換気量Qはトレーサーガス発生量Gと濃度CからQ=G/Cで計算できる.
- 実効換気回数=(実効換気量)／(室容積)
  「実効換気量」は外気量だけでなく他室からの希釈能力ある風量を考慮する.

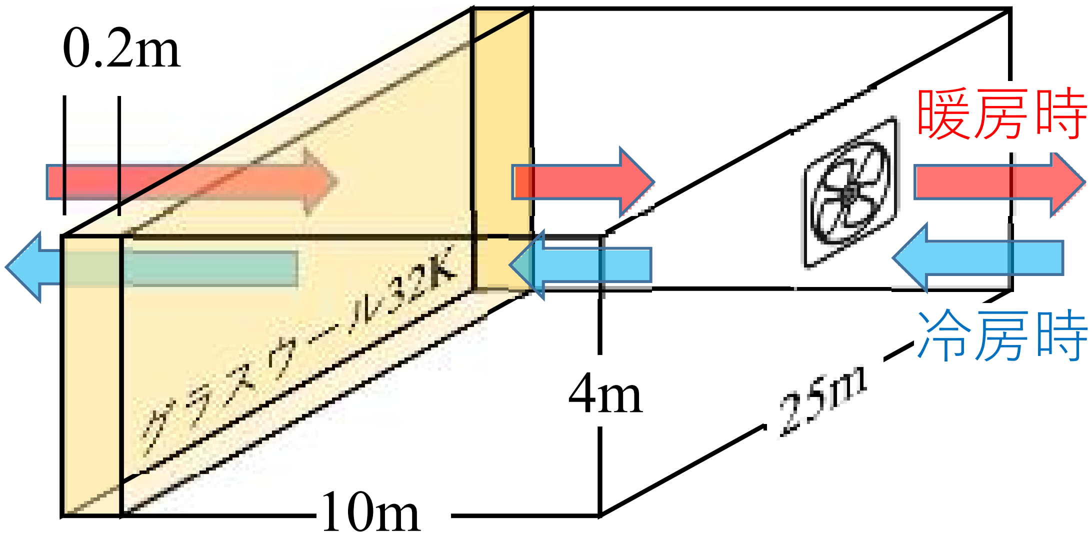
次からの２スライドは，ダイナミック・インシュレーション

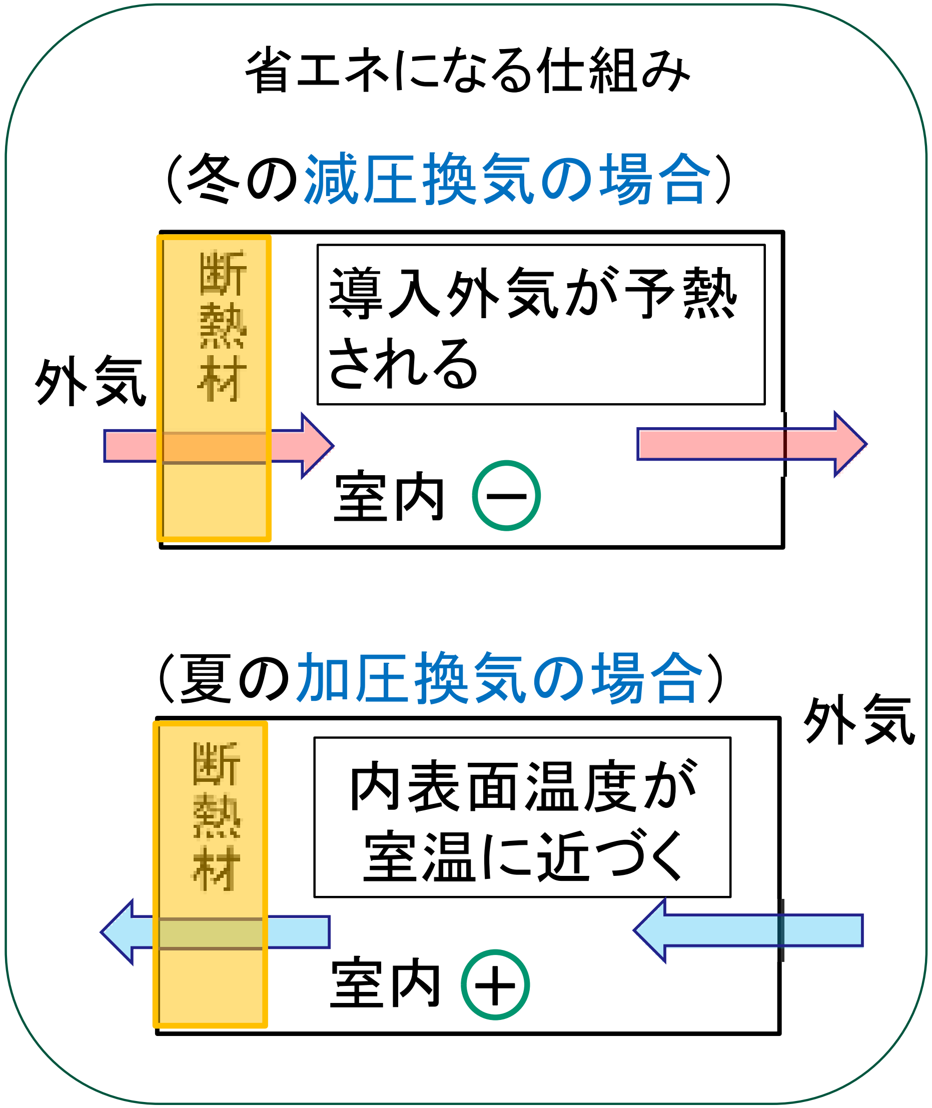
NETS

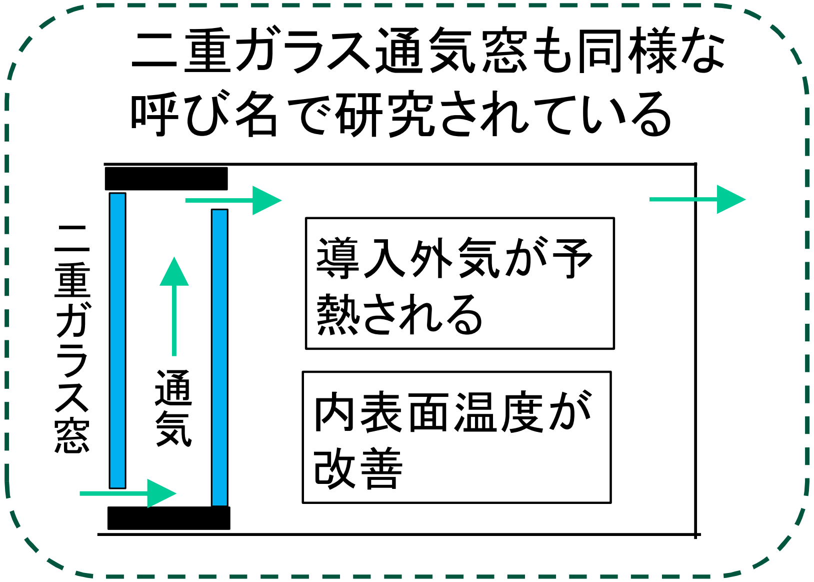
SPID　SOCS

NETSの検討事例3：ダイナミックインシュレーション

透気性の断熱材や気泡コンクリートの壁を換気に利用して省エネができる？



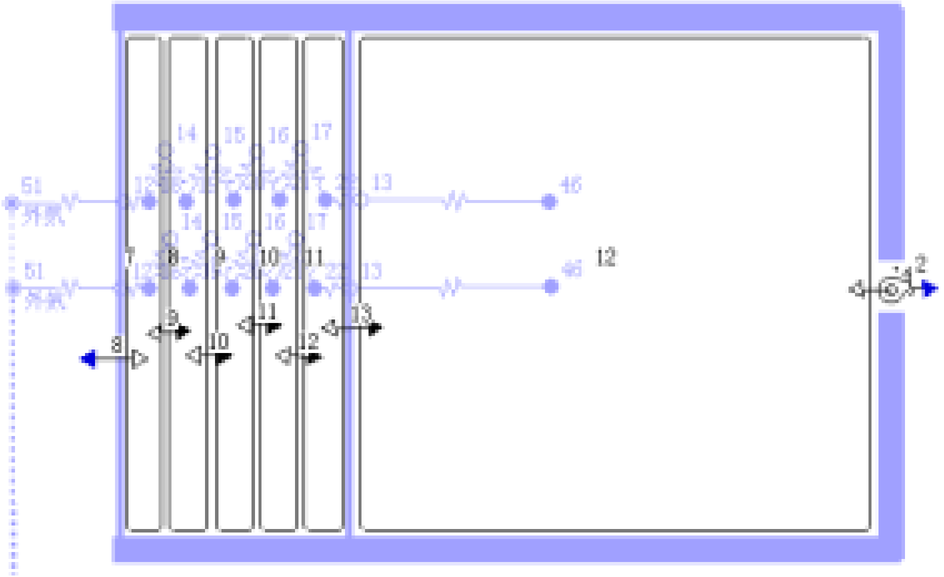




冬季の内部結露防止に行う場合もある

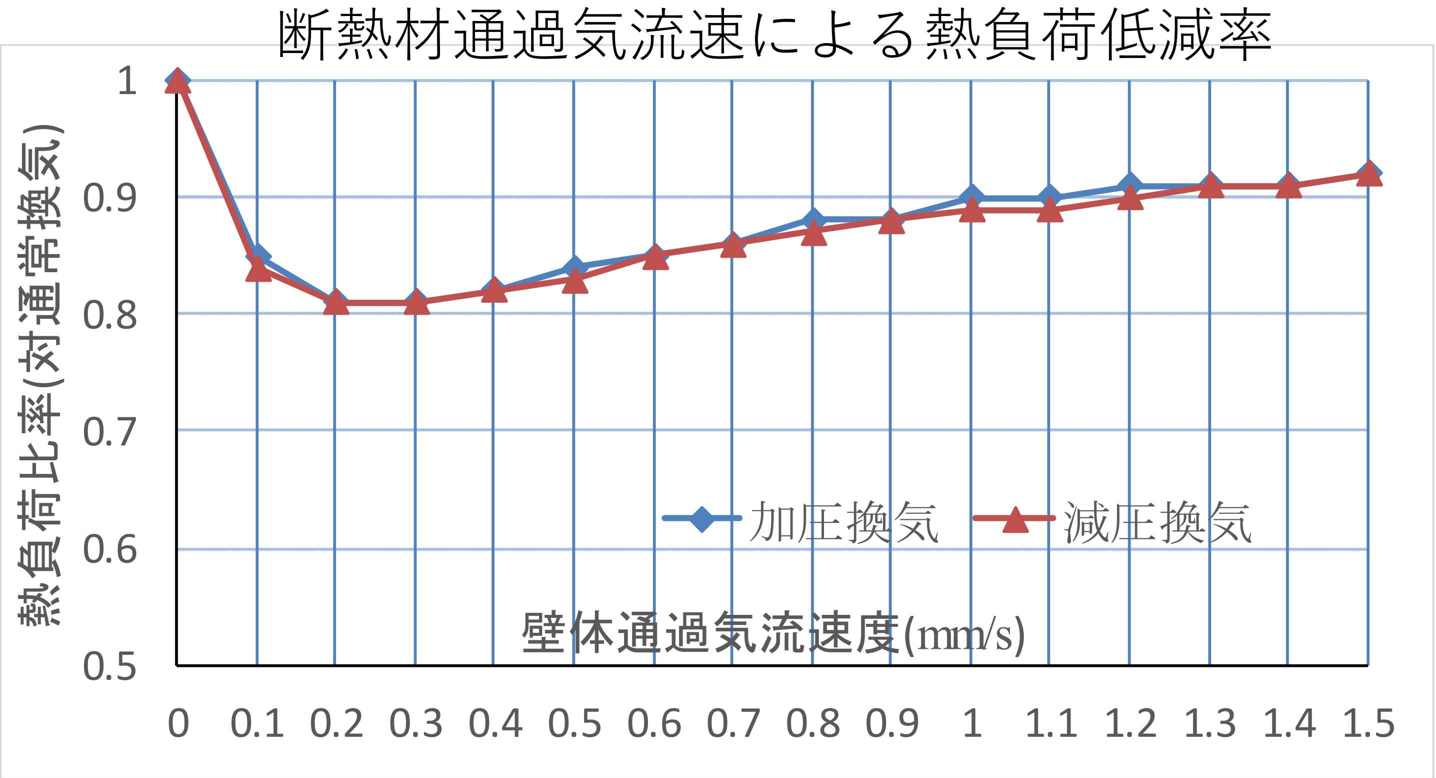
NETSの計算モデルと熱負荷低減率の結果

熱・換気・水蒸気回路網



右の換気回路網のモデル作成では，背景に熱回路網と水蒸気回路網が透けて見えようにしている.

（換気量が異なる複数のモデルを，並べて描き，同時に計算した. この中の一つのモデル）



「熱負荷低減率」とは透気しない場合の熱負荷に対する比率.

左図から，熱負荷を最小にするのは，0.2 [mm/s]の流速であり，換気回数では0.072となる.

次からの4スライドは，室内上下温度分布のモデル

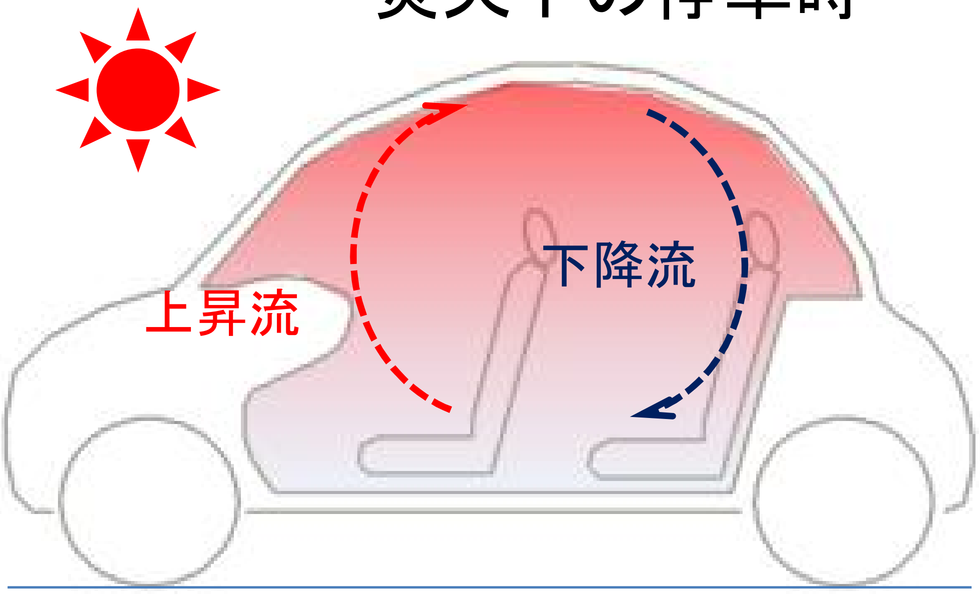
NETS

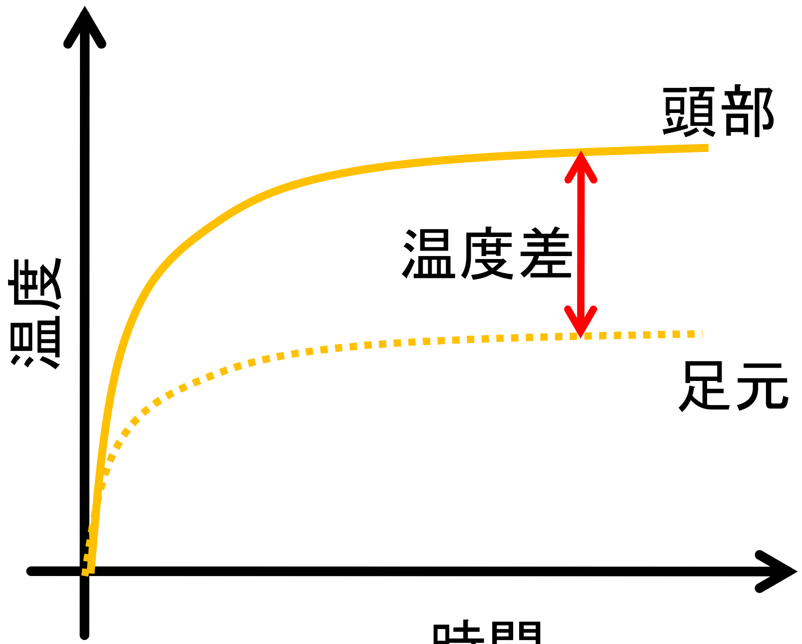
SPID SOCS

NETSの検討事例4：室内上下温度分布のモデル

田辺先生の某自動車メーカーからの受託研究がモデル考案の動機になった
2007年頃

炎天下の停車時





温度成層化の推移

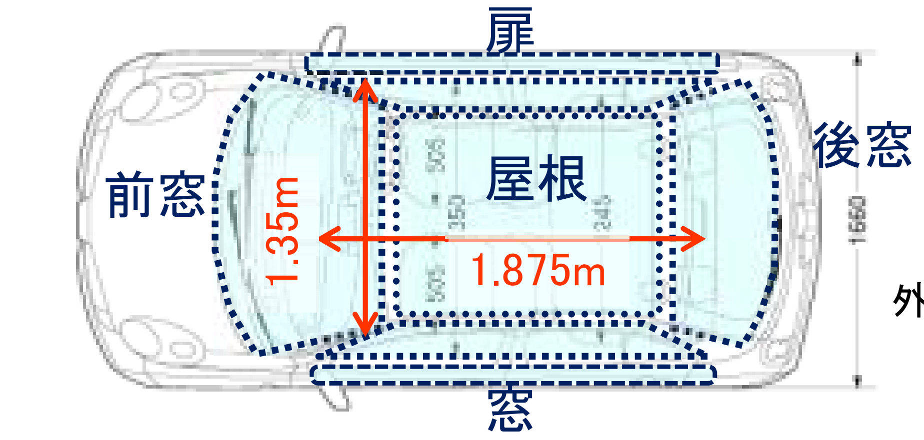
日射が室内を加熱して上昇流が生じ，室内表面で冷やされる下降流で，大きな上下の温度分布が生じる.

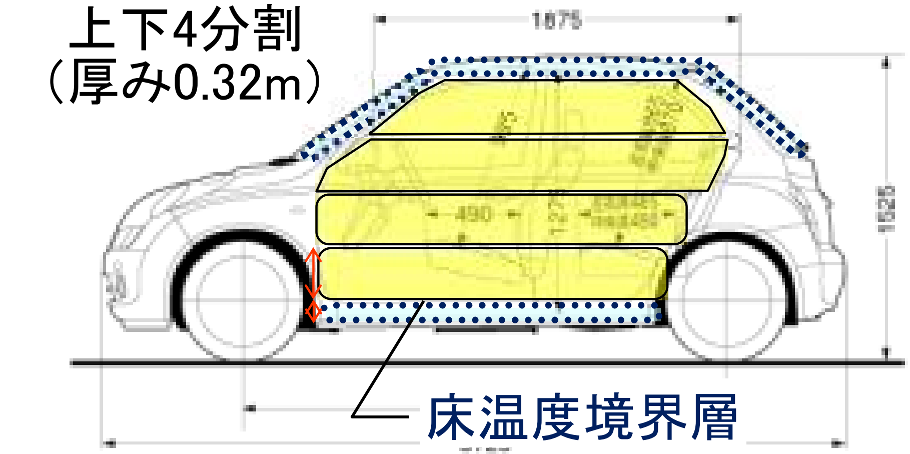
予測計算に，数値流体解析は，長時間の非定常の計算には向いていない.

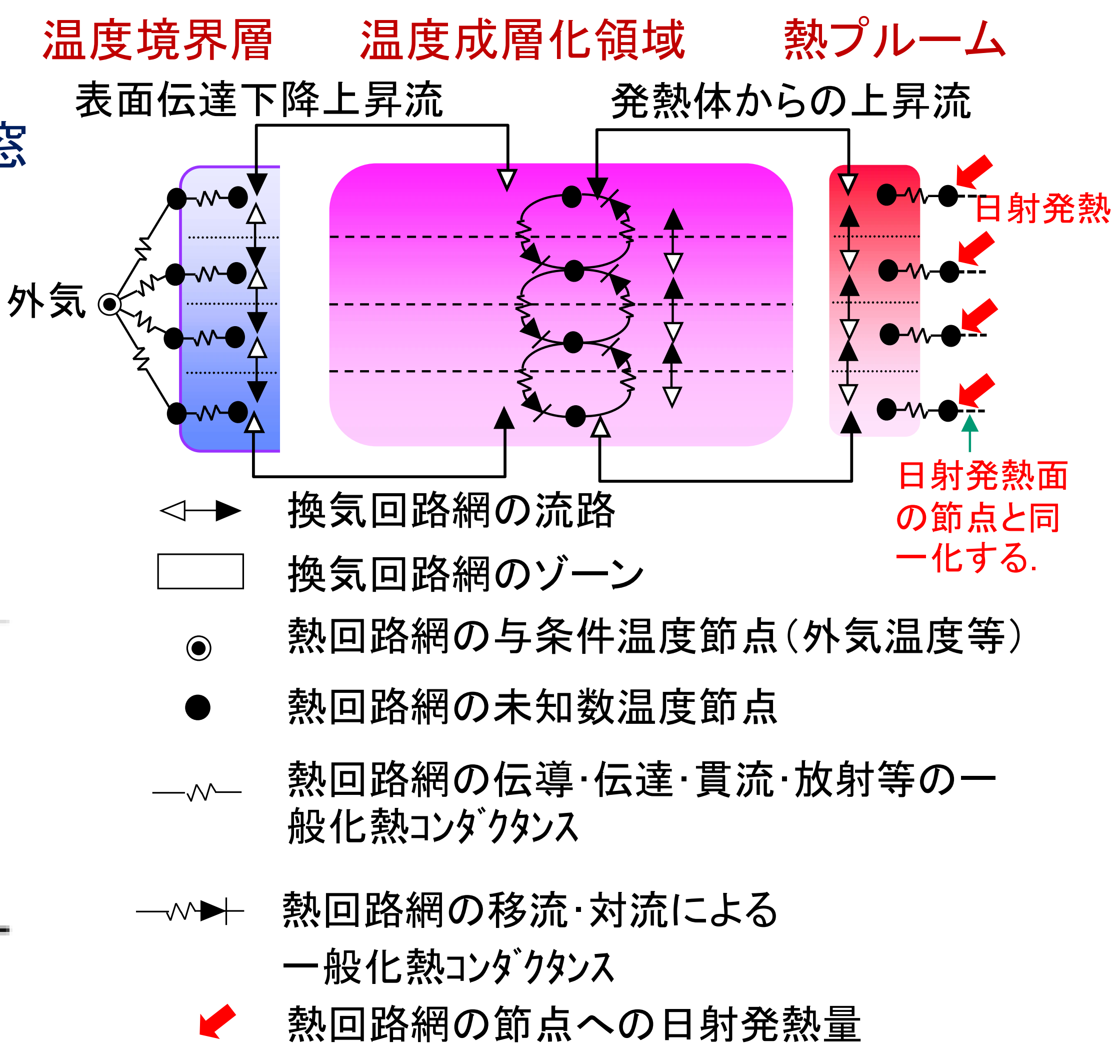
⇒

熱･換気回路網モデルの試み

考案した上下温度分布の工学モデルの概要

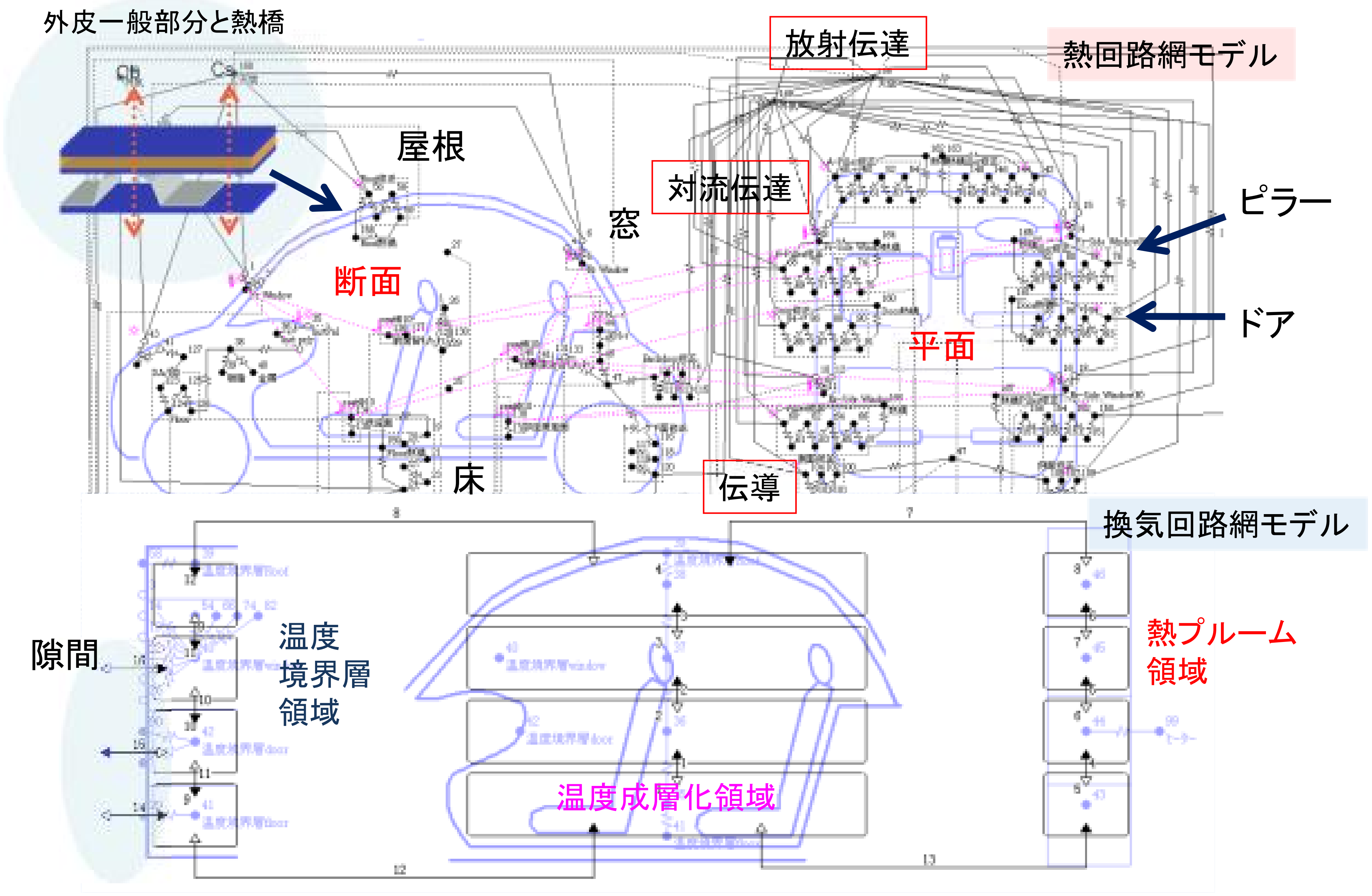






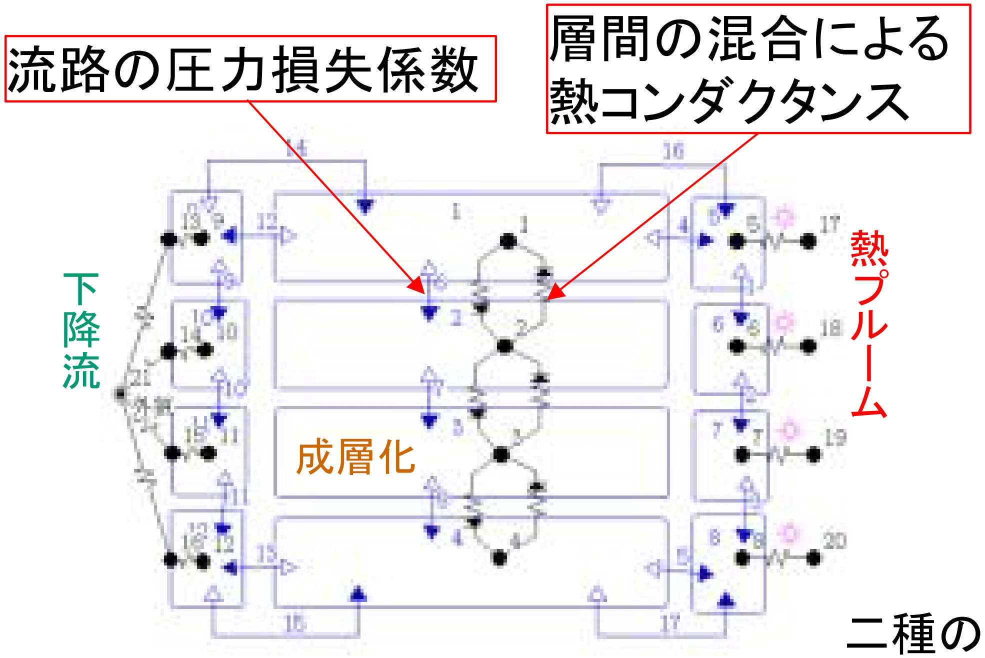
自然対流状態と強制対流状態は，上記の同じ構造のモデルながらも，
強制対流時は温度成層ゾーン間の混合対流コンダクタンスを大きくする.

構築した熱・換気回路網モデル

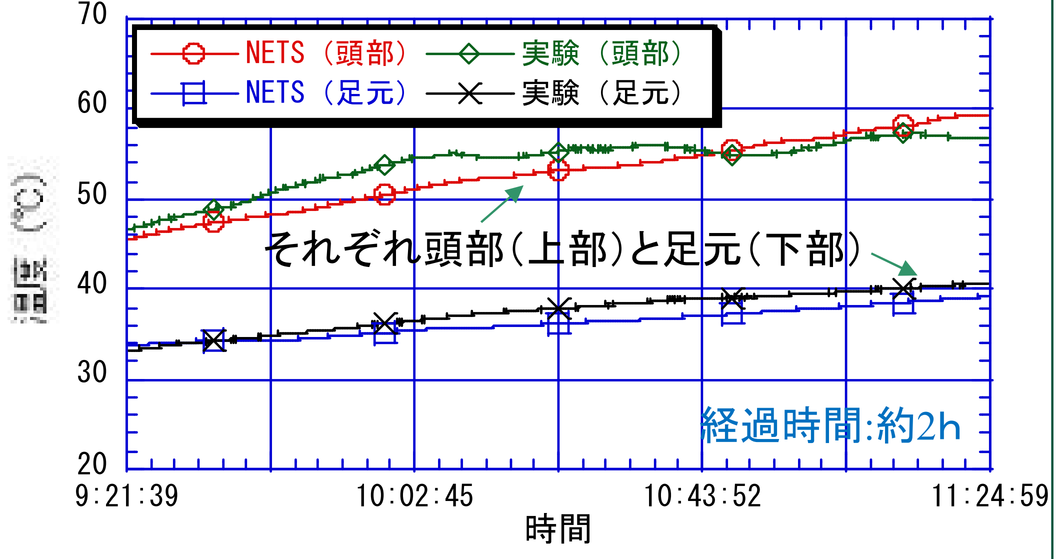


実験値との比較

実験値から最適の係数を求めた，

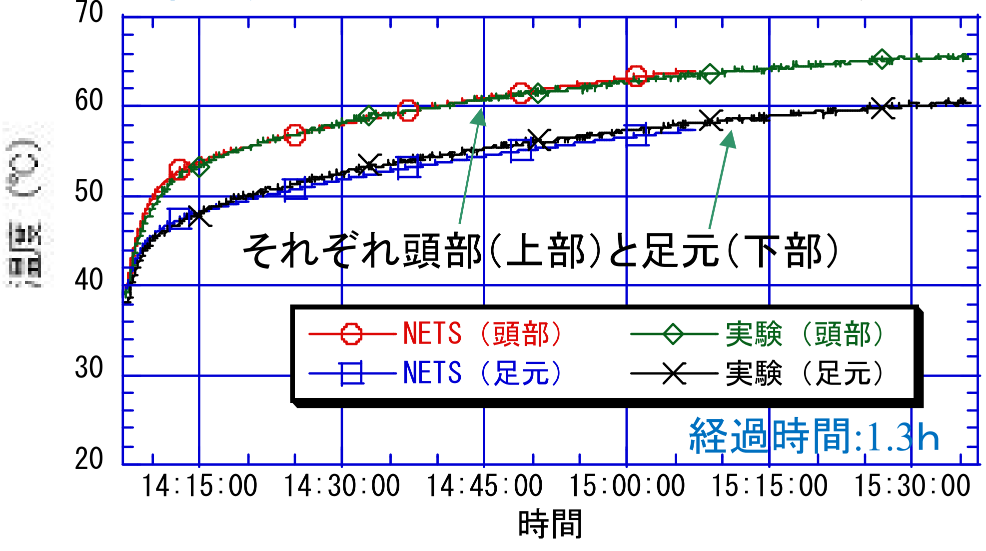


屋外での，自然室温推移比較

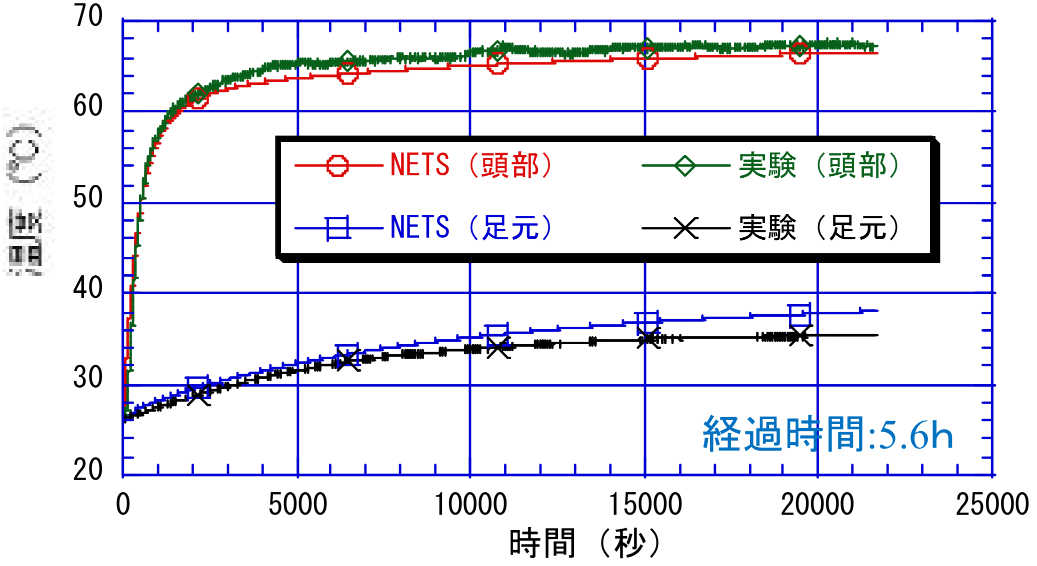


二種の係数を調整したが，いずれも良く一致している．

環境実験室での，強制対流加熱実験



自然対流加熱実験



次からの 5スライドは，二重ダクトによる換気の熱回収

NETS

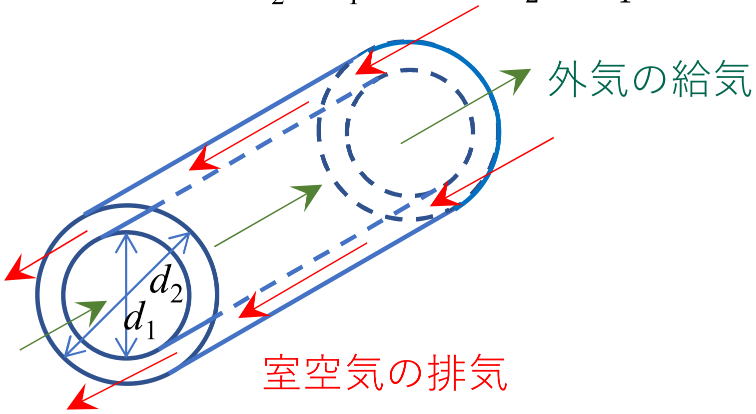
SPID SOCS

NETSの検討事例5：二重ダクトによる換気の熱回収

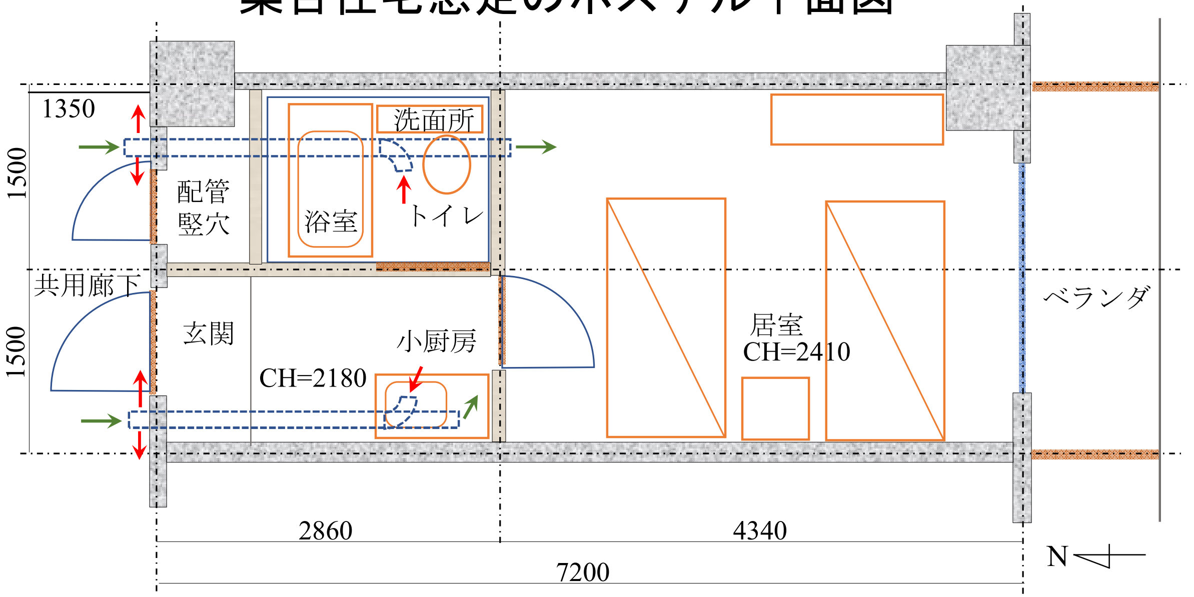
菅野先生と共著で9月のSHASE大会発表予定

二重ダクトの概要

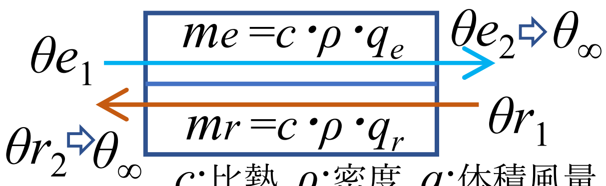
同じ給・排気風量の場合に
外筒と内筒の直径d_2とd_1の関係 $d_2 = d_1\sqrt{2}$



集合住宅想定のホステル平面図



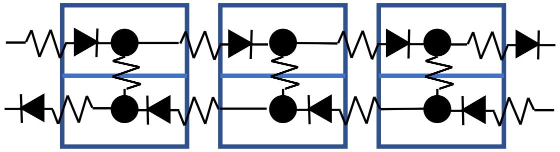
向流型熱交換の各種の変数と係数



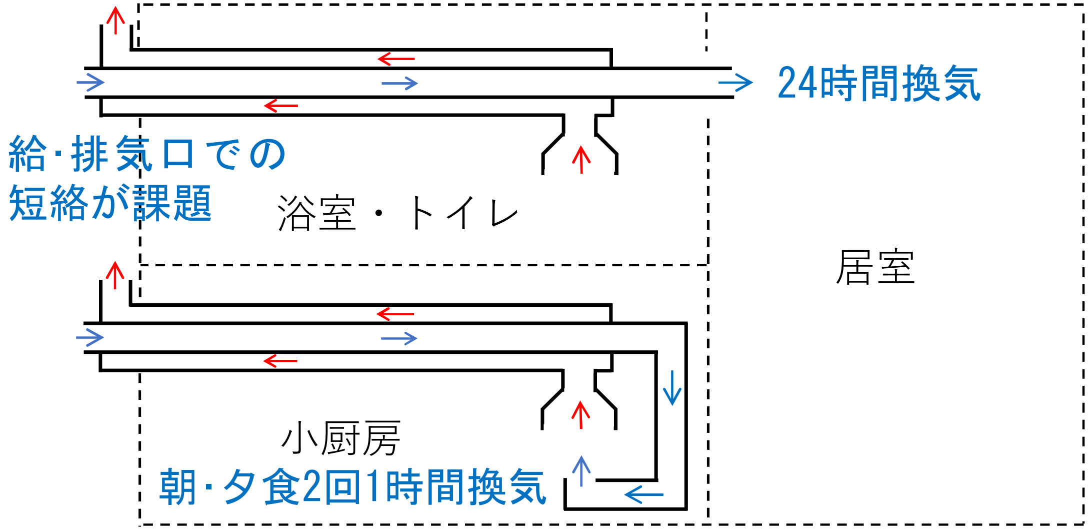
c:比熱, ρ:密度, q:体積風量

θ_∞:究極出口温度

流れ方向の３分割モデル

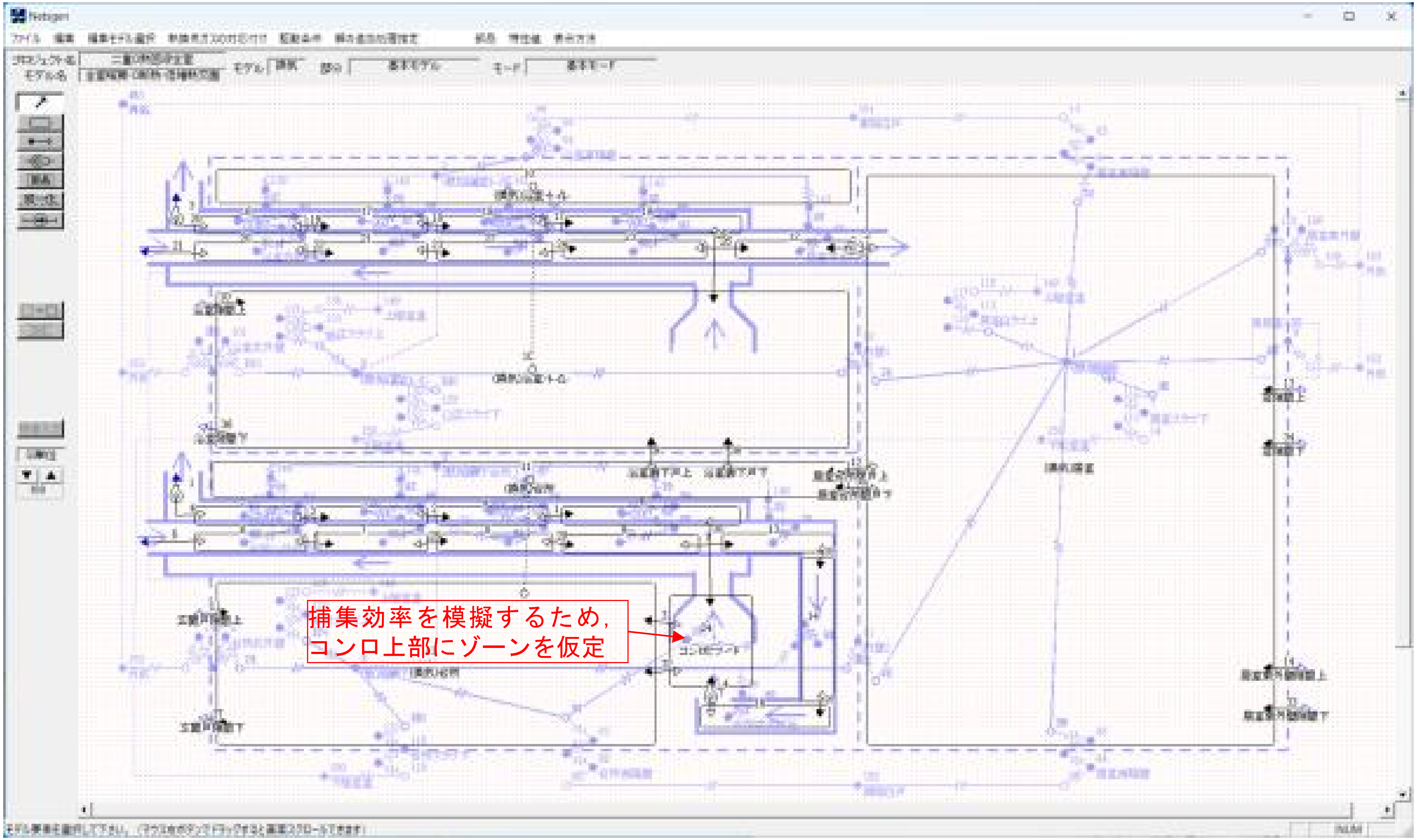


換気システムの模式図



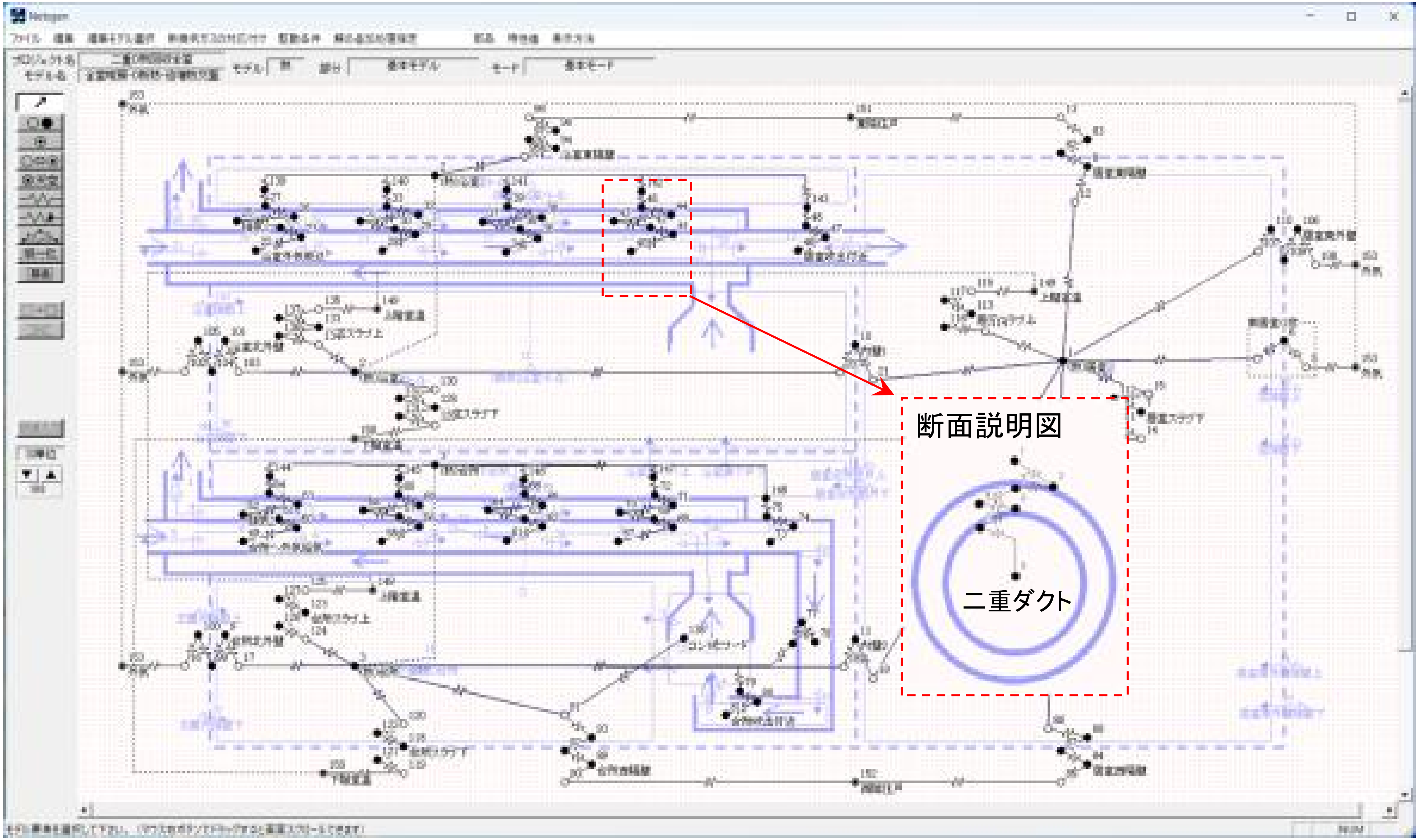
全熱回収は厨房からの臭気と浴室からの水蒸気が還流し問題？

換気回路網モデルの作成画面



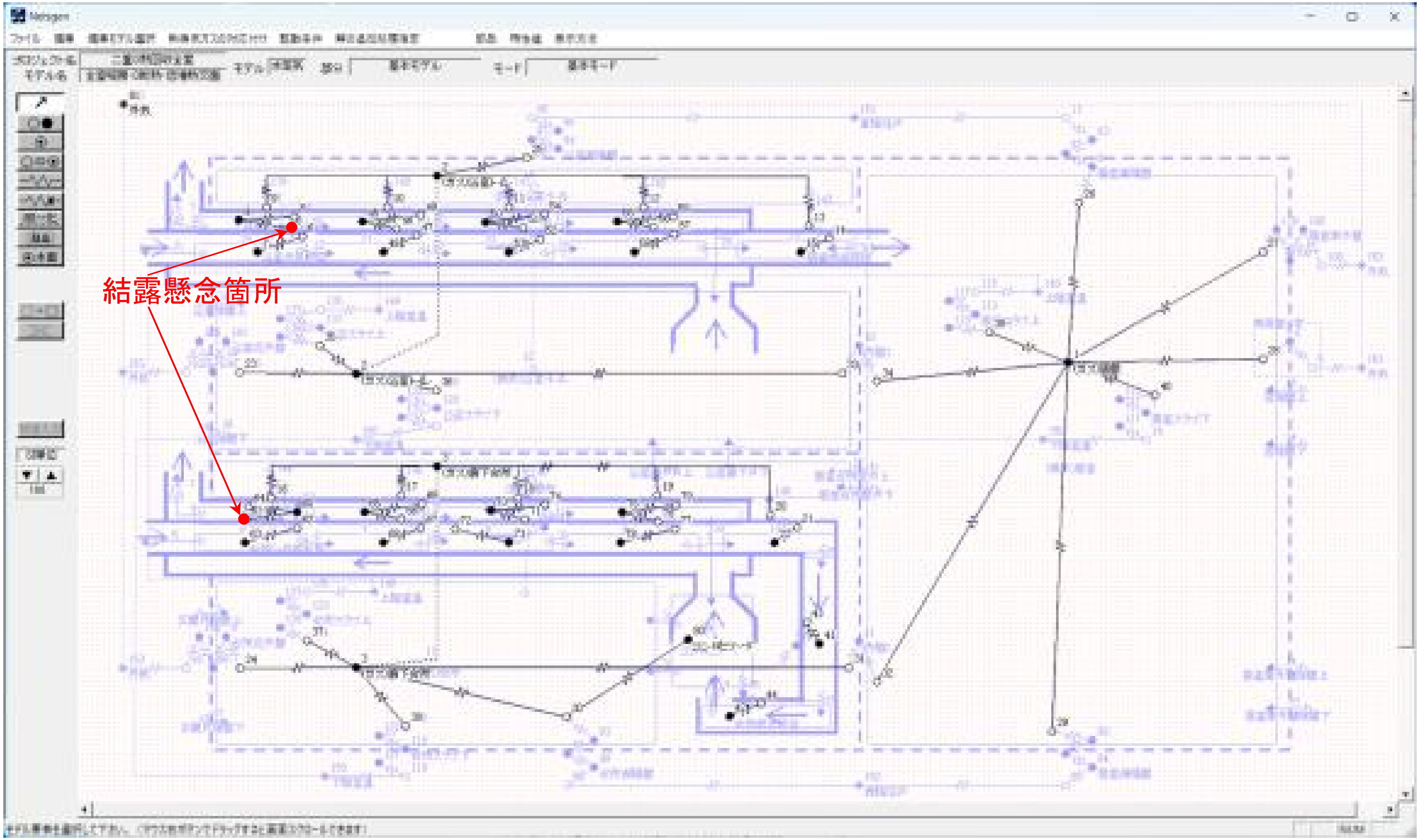
・ダクト内の温度変化を模擬するために４分割から７分割した．
・ダクトからの漏れを考慮し，給・排気の送風機は出口側に設け，第一種換気とした．
・異常な室内圧を避けるため，相当隙間面積は$1cm^2/m^2$と仮定し，外皮に均等に分散配置した．

熱回路網モデルの作成画面



・スパイラルダクトの内・外表面にそれぞれ節点を設けた（鋼板厚0.5mm）．
・計算時間間隔Δtは，伝熱と換気の連成をするので，短めに5分とした．
・上下左右の隣住戸の室温は，外気温度が0.2，前時刻の自室温が0.8の重み付き平均とした．

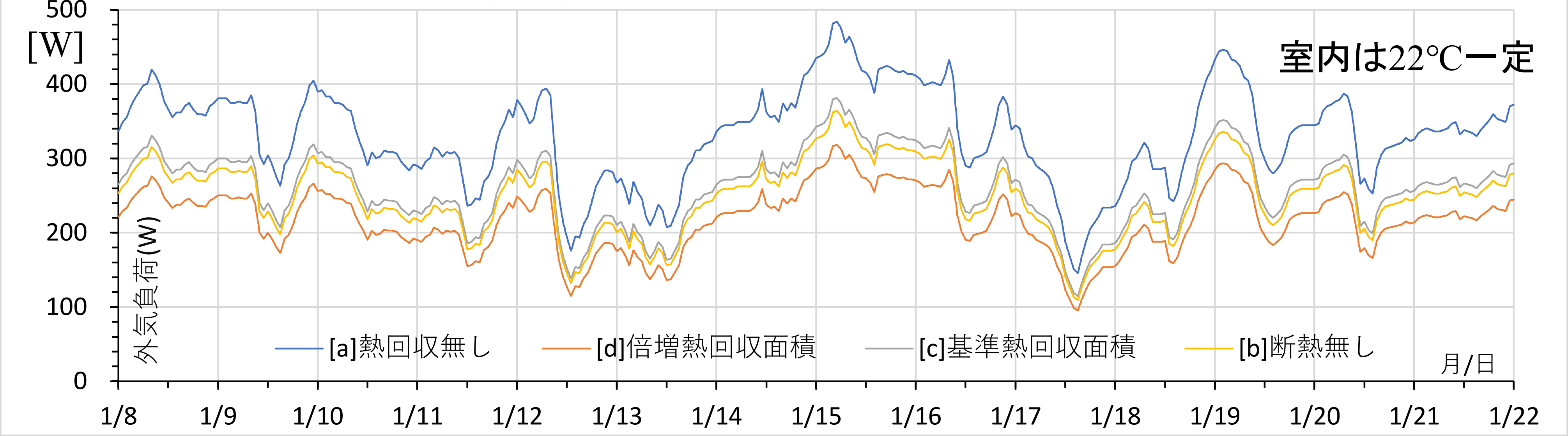
水蒸気移動回路網モデルの作成画面



・スパイラルダクトの内・外表面の二つの節点の間は切断している（水蒸気は鋼板を不透過）.
・水蒸気移動は空気移動によるものだけとし，壁体等の湿気伝導は省いた.
・水蒸気発生は，浴室洗面室の常時発生，間欠的な寝室の人体発生と台所の発生を与えた.

換気熱負荷の省エネ効果

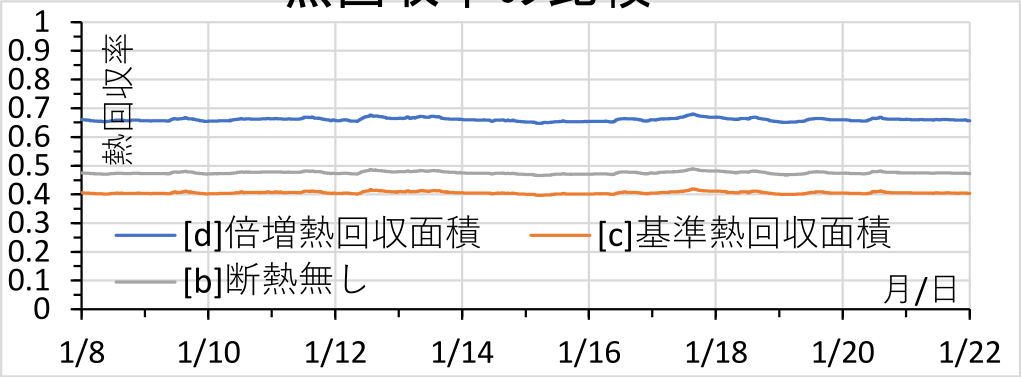
導入外気の暖房負荷の比較（福岡の気象データで1月の2週間）



熱回収率 η の定義式（究極出口温度を$\theta\infty$）

$$\eta = \frac{(\theta e_2 - \theta e_1)\cdot me}{(\theta_\infty - \theta e_1)\cdot me} = \frac{\theta e_2 - \theta e_1}{\theta_\infty - \theta e_1}$$

熱回収率の比較



・熱回収率は約0.4が得られる．これはダクト長さ1.8mの場合で，もし2倍の長さでは約0.65となる．

・外気取り込み温度は，内外温度差の半分程になり，冷風感の緩和は期待できる．

・換気量は毎時約1回であり，無断熱建築なので，貫流熱負荷が大部分を占め換気負荷は小さい．

ここからはSPIDによる熱・換気性能の現場測定法の御話になります.

まず現場測定法の必要性について1枚,

次に熱回路網のシステム同定法の展開の歴史を1枚で説明します.

SPID

NETS SOCS

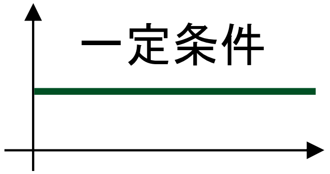
実験室測定と現場測定の違い

人工気候室での測定では･･･

・試験用に建てられた**設計通りの性能**に近い.

・**人工気候室**では一定の温度にできて性能評価もしやすい.

・手間と実施費用が大きい.



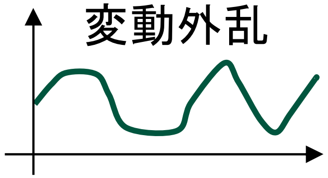
実態の建物では･･･

・断熱性や気密性の**経年劣化**があるかもしれない.

・**施工ミス**があるかもしれない.

従って，実態の建物で現場測定する方法が必要.

しかし，変動する外気温，日射量等の気象条件に曝されるので性能評価は簡単ではない.



熱回路網のシステム同定理論の展開

- 1983年：システム同定理論を考案し「一般拡散システムの回路網による状態方程式とそのシステムパラメーターの同定理論」として建築学会で発表し，翌1984年には理論を論文報告集にも発表．
- 1985年：日本原子力研究所･保健物理部から「家屋の放射能防護効果調査」を受託し，第一世代の多数室換気測定システムを試作し，各種の住宅で測定を実施．
- 1987年：多数室換気測定法の検証実験をスウェーデン国立建築研究所で行い，理論と結果はBuilding and Environment誌に1990年に発表．（Dr. Mats Sandberg）
- 1991年：第二世代の測定システムを試作し，電力会社や住宅会社等の受託研究で，幾つかの住宅で測定を実施．
- 1997年～2002年：筑波の建築研究所のシリンダーハウスで多数室換気測定法の検証実験を実施．（澤地先生，瀬戸先生）
- 2007年～2009年：「多種PFTによる多数室換気測定の統計的データ分析法」を田辺研と住宅会社と共研．2009年にBuilding and Environment誌にも発表．
- 2012年：Building and Environment誌に，システム同定理論を含め，気密性測定法と，ガス濃度減衰法に関する三篇の論文を発表．
- 2019年：科研費により第三世代の多数室の熱･換気測定システムを試作し，幾つかの住宅会社で測定実施．
- 2021年：実用性向上を目指し，灯油暖房器を利用した換気と熱性能の同時測定法を考案し，建築学会の第50回熱シンポで理論と計算機実験を発表．
- 2022年：福岡のホステルで測定実験したが，準備不足により発熱量が不足で失敗．結果は建築学会の第51回の熱シンポで発表．

そこで，再実験を期待したいが，事前のNETSによる模擬測定を十分に行いたい．

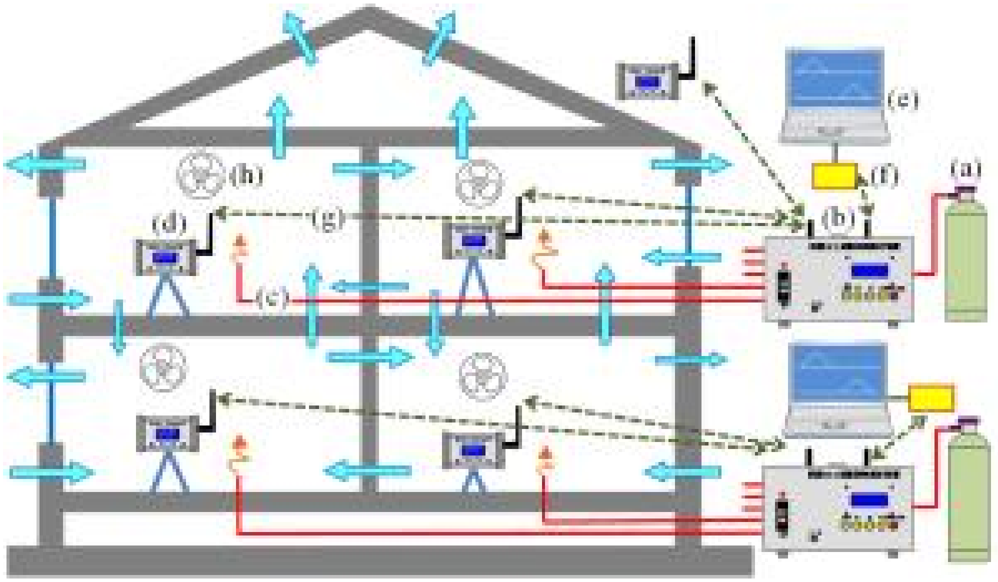
次からのスライド2枚は，第三世代の多数室換気測定システムの集合住宅での実験例

SPID

NETS SOCS

第三世代の多数室換気測定システムの動作確認実験

多数室換気測定システム



（科研費の補助で試作）

CO_2濃度と温･湿度の測定器

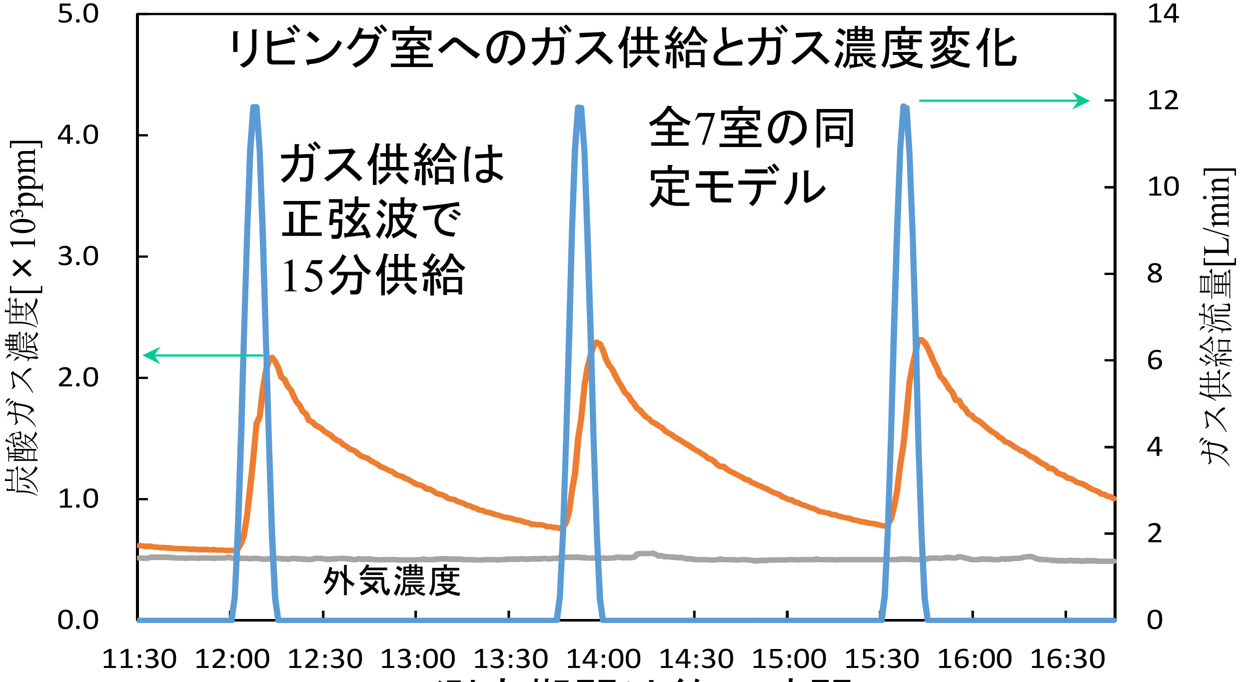
制御･測定･記録用PC

CO_2ボンベと流量制御箱

室内攪拌ファン

横浜の集合住宅の4階3LDK：
床面積66m^2，屋内容積は138m^3

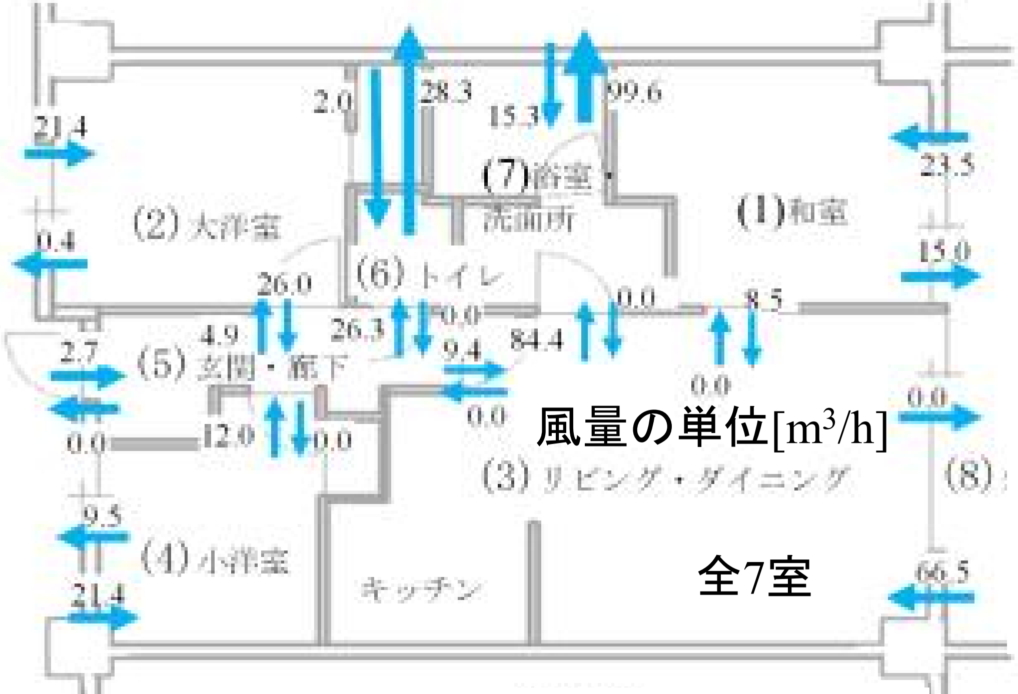
測定日時は2019年4月22日
11:30から16:45まで



測定期間は約 5 時間

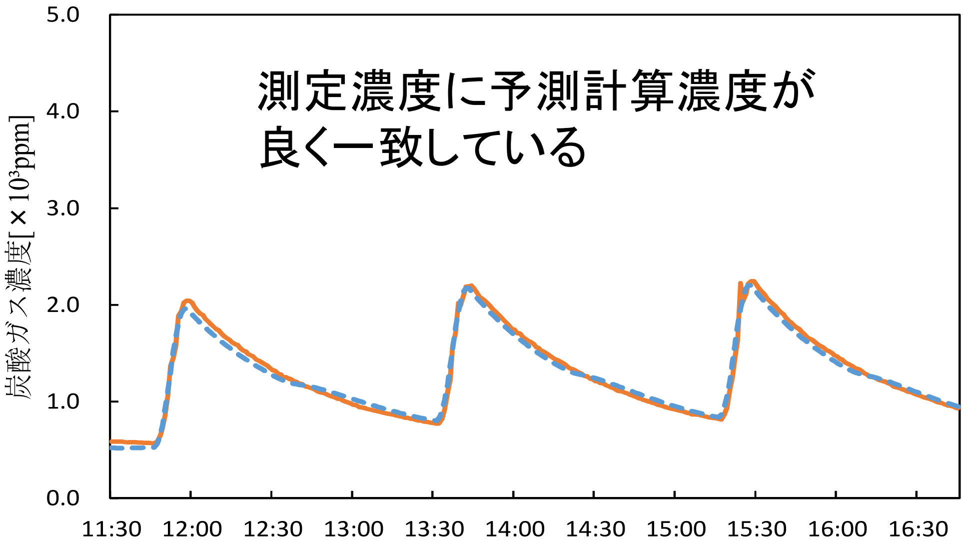
多数室換気測定システムの実験結果

システム同定された風量分布図



全室での換気回数は1.1，このうち機械排気は0.92回毎時と設計風量に近い.

システム同定されたガス移動回路網モデルに測定のガス供給を与えてガス濃度を比較した



信頼性の評価指標の決定係数CODは0.926

システム同定された有効混合容積

容積(m³)	$m_{1,1}$	$m_{2,2}$	$m_{3,3}$
同定値	13.94	14.98	44.81
幾何的容積	20.22	24.13	47.53

$m_{4,4}$	$m_{5,5}$	$m_{6,6}$	$m_{7,7}$
13.91	8.52	2.71	7.36
17.98	8.84	5.17	14.4

幾何的な容積より少し小さい

また独自に定めたシステム同定の前提の不適合率βは0.958となった.

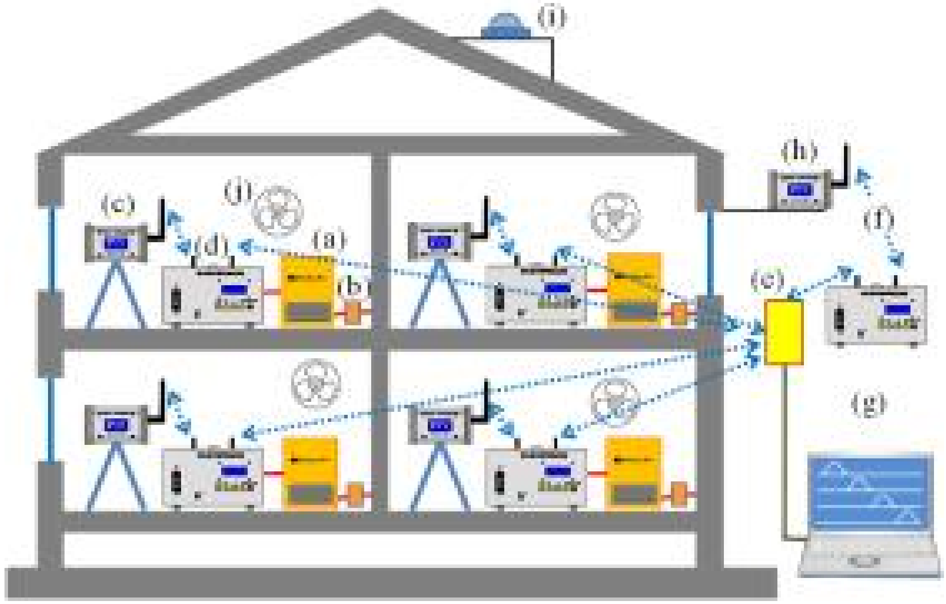
(ここにβは 1 に近いほど正常で，もし大きすぎる場合には，前提の不成立が疑われる)

次からのスライド2枚は，多数室熱性能測定システムの同じ集合住宅での実験例

SPID
NETS SOCS

多数室熱性能測定システムの動作確認実験

多数室熱性能測定システム



（科研費の補助で試作）

電熱発熱制御装置

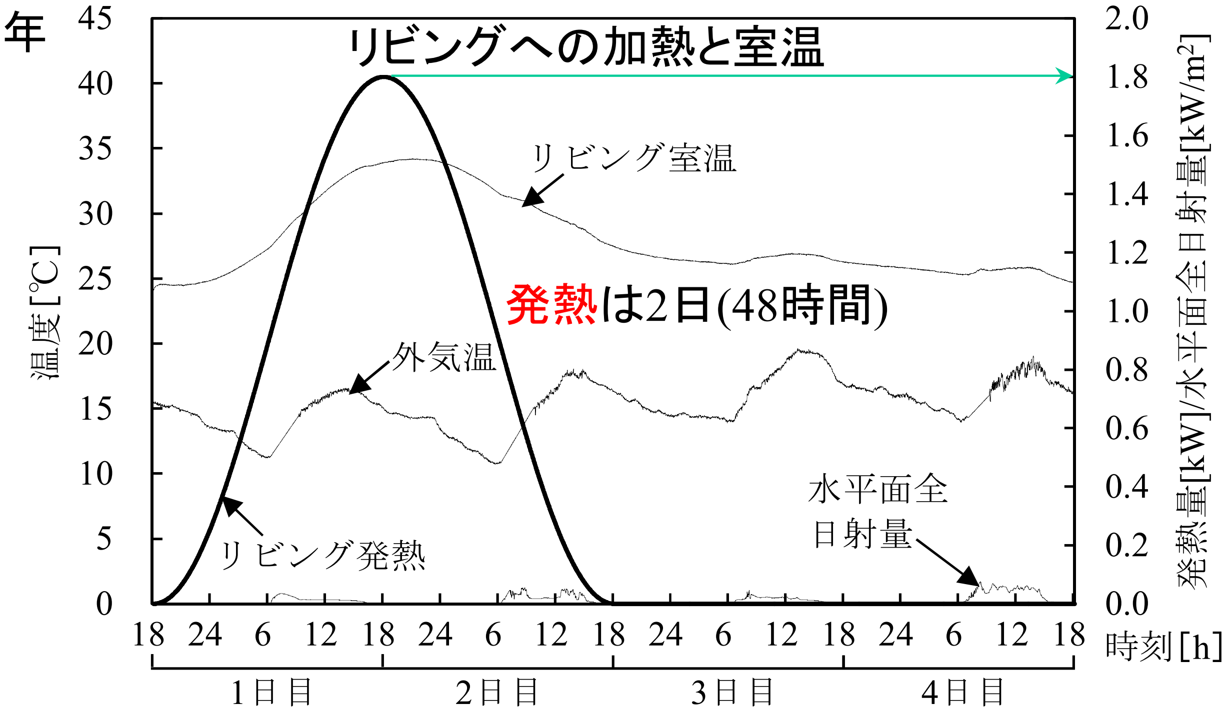
発熱制御・測定・記録PC

温･湿度測定装置

電熱器と撹拌機

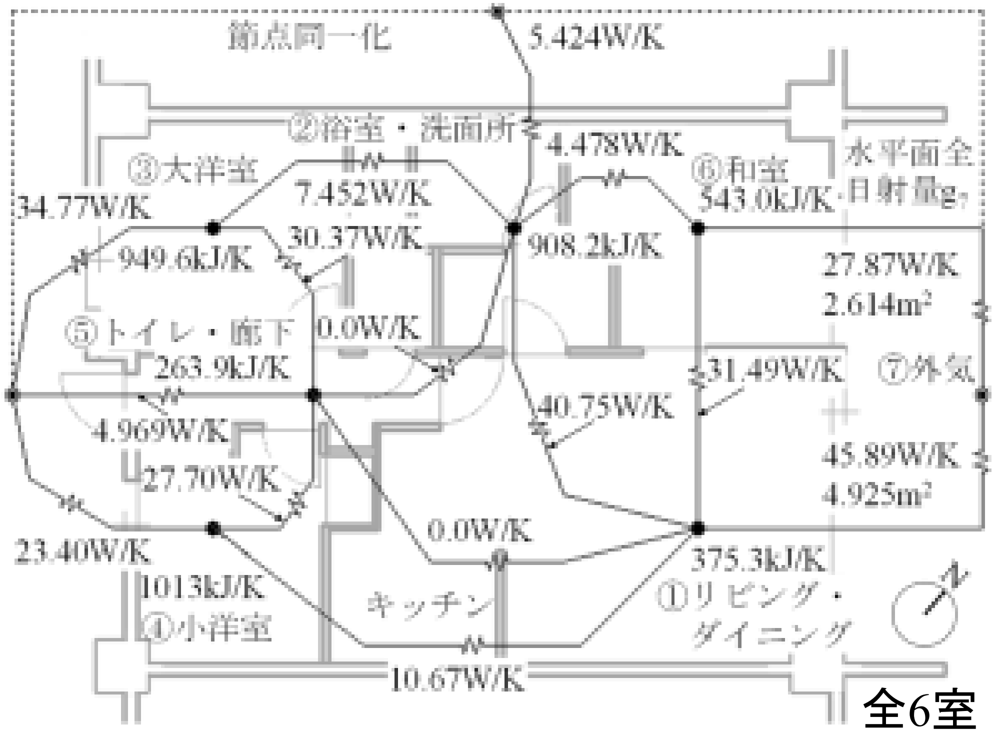
横浜の集合住宅の4階3LDK：竣工2013年
床面積66m^2，屋内容積は138m^3

測定期間は2018年11月14日
18:10から18日18:10まで4日間



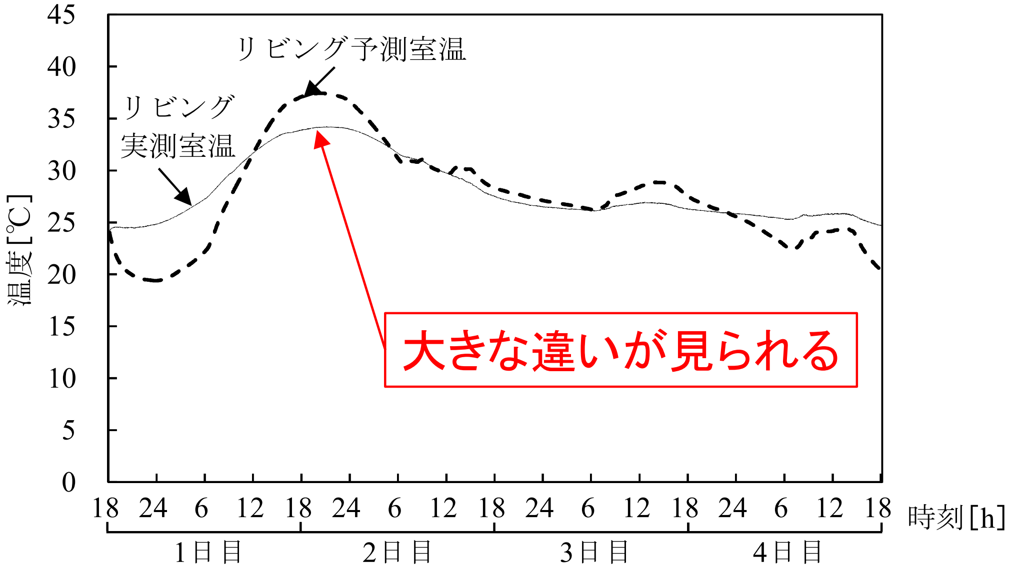
多数室熱性能測定システムの実験結果

同定された一般化熱コンダクタンスと相当熱容量



全6室

システム同定された熱回路網モデルに測定の発熱量と外気温を与えて室温変化を比較した



隣住戸（上下左右）の室温状況が測定できず，外気温とみなした問題がある

不合理検出

日射取得係数 $r_{i,j}$ [m²]と信頼性評価指標

$r(1,7)$	$r(6,7)$	β	COD
4.925	2.614	1.460	0.957

室1~6の電熱発熱はg_1~g_6，g_7は水平面全日射量．$r(1,7)$はリビングの，$r(6,7)$は和室の日射取得係数．

本件での問題と今後の課題：

・上下左右の隣住戸も外気温と仮定したこと．（隣住戸にも発熱を与え測定する必要がある）

・同定の一般化熱コンダクタンスは，換気量の分も含まれるので，貫流分と分けたい．（多数室換気風量も同時に測定でき，熱貫流だけ同定できる理論が必要である）

・電熱発熱では，戸建て住宅では加熱力不足になる．（別の加熱方法が必要である）

多数室の熱･換気性能の測定法を改良

灯油暖房器の，大きな加熱力と炭酸ガス発生を利用する測定法に.

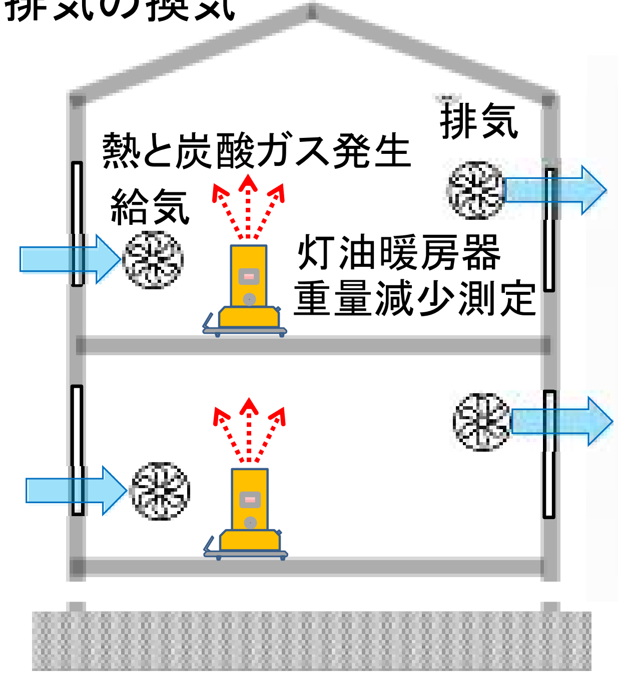
伝熱と換気の同時測定により，貫流分と換気の分を分けて同定する方法を説明します.

合計2スライド

SPID
NETS SOCS

灯油暖房器の利用と二重移動平均の低周波濾波

正常燃焼のため送風機による
給・排気の換気



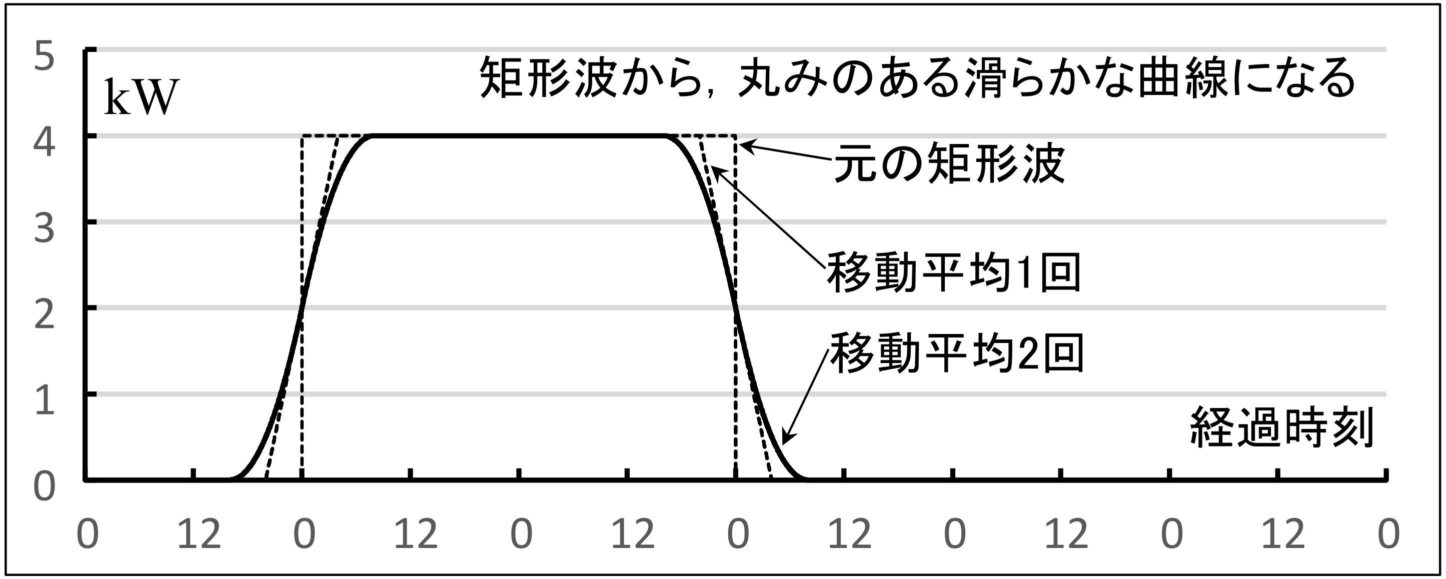
灯油暖房器

電子重量計

温度とCO_2の
測定記録器

重量減少から発熱量
とCO_2発生量は算出

全ての測定値に8時間ほどの移動平均を二重に施す



・電熱発熱では加熱力不足になりやすい．

・灯油燃焼は正弦波燃焼は難しく矩形波的になる．

・8時間の移動平均を二重に施せば滑らかな変化曲線になる．

壁の熱貫流分と空気移動分を分けて同定する方法

熱貫流分　　空気移動分

$$c_{1,2} = \boxed{u_{1,2}} + c_p \cdot \rho \cdot \boxed{q_{1,2}} \quad (1)$$

$$c_{2,1} = \boxed{u_{2,1}} + c_p \cdot \rho \cdot \boxed{q_{2,1}} \quad (2)$$

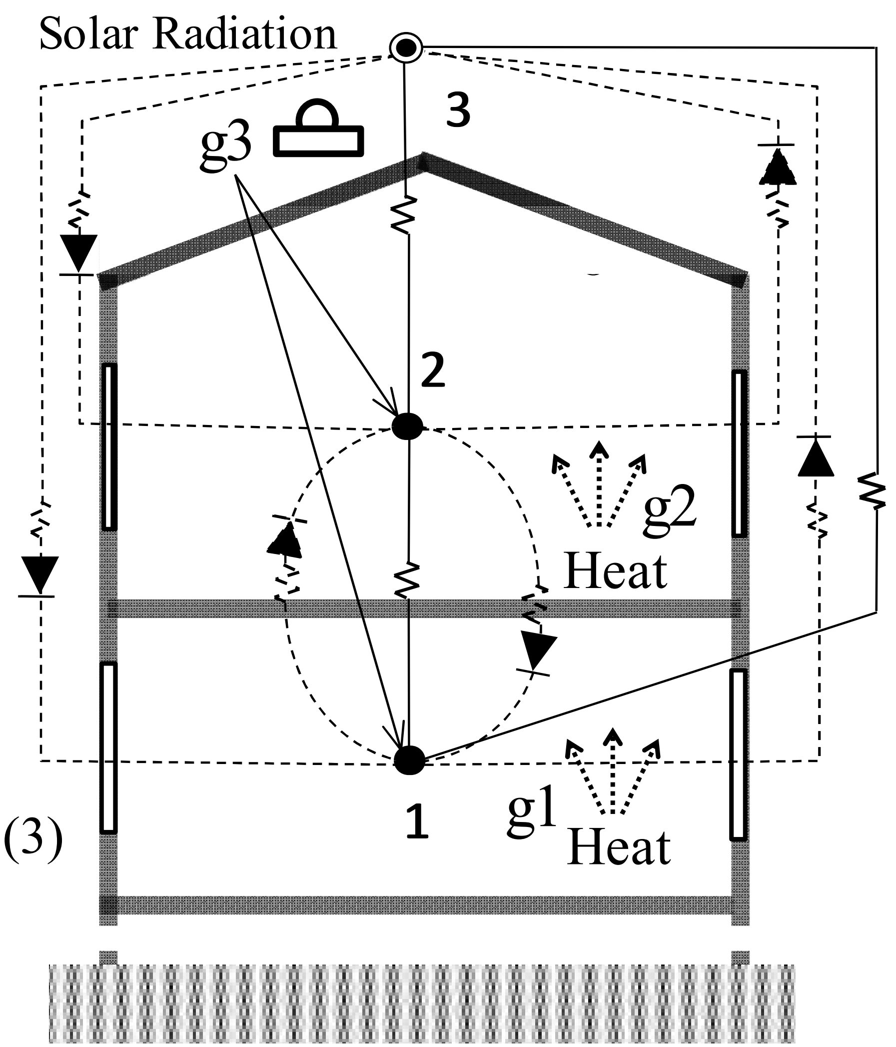
上の二式を辺々差し引いて得られる
次式を最小二乗の拘束式として加える.

$$c_{1,2} - c_{2,1} = c_p \cdot \rho \cdot \left(q_{1,2} - q_{2,1} \right) \quad (3)$$

すると非対称の $c_{1,2}$, $c_{2,1}$ が同定される.

そして熱貫流のコンダクタンス $u_{1,2} = u_{2,1}$ が求められる.

熱回路網の同定モデル

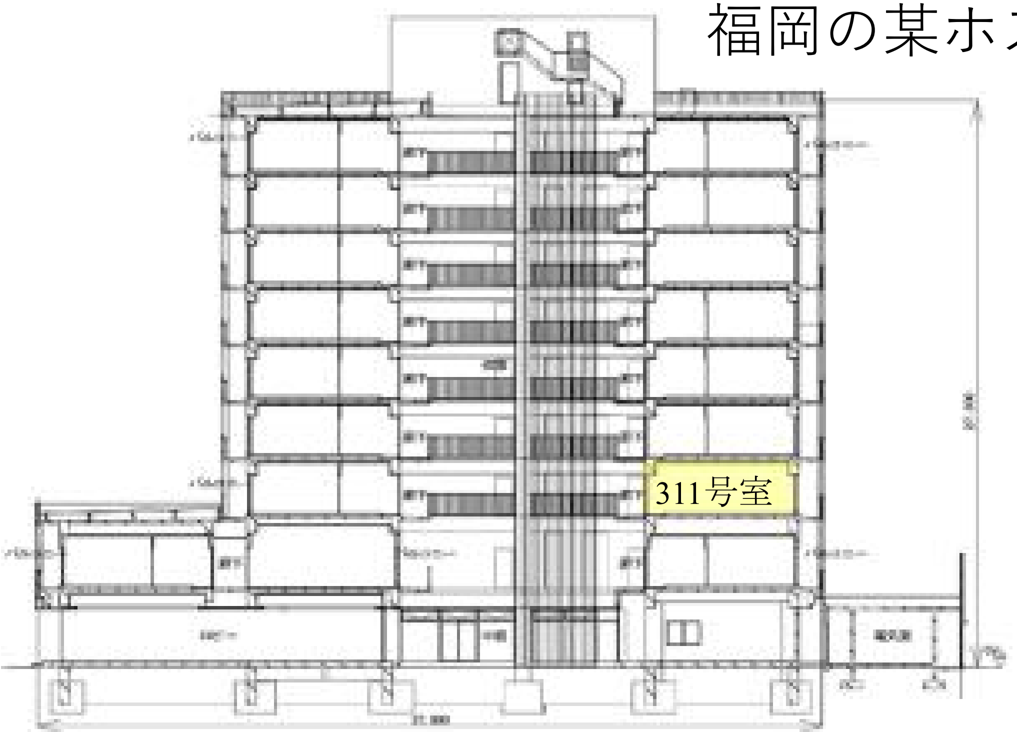


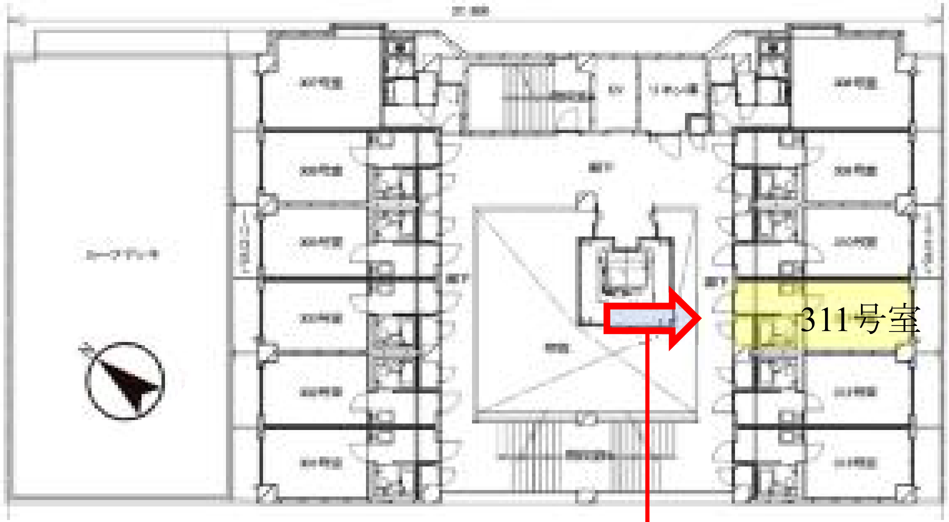
改良した熱･換気性能の測定法の実験　６スライド

SPID
NETS SOCS

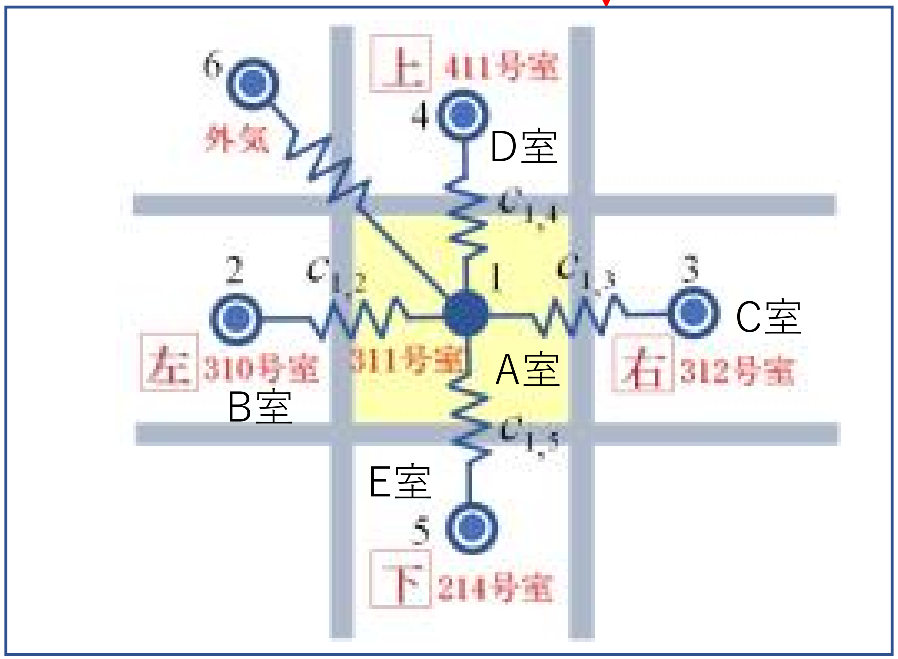
隣住戸の影響も考慮した現場測定法の実験

福岡の某ホステル (株)インテリックス提供

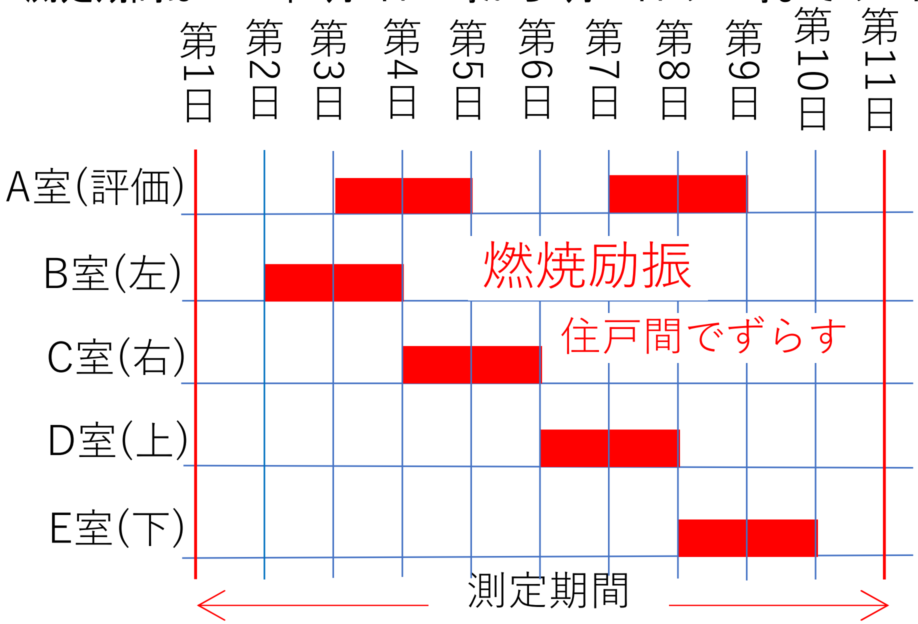




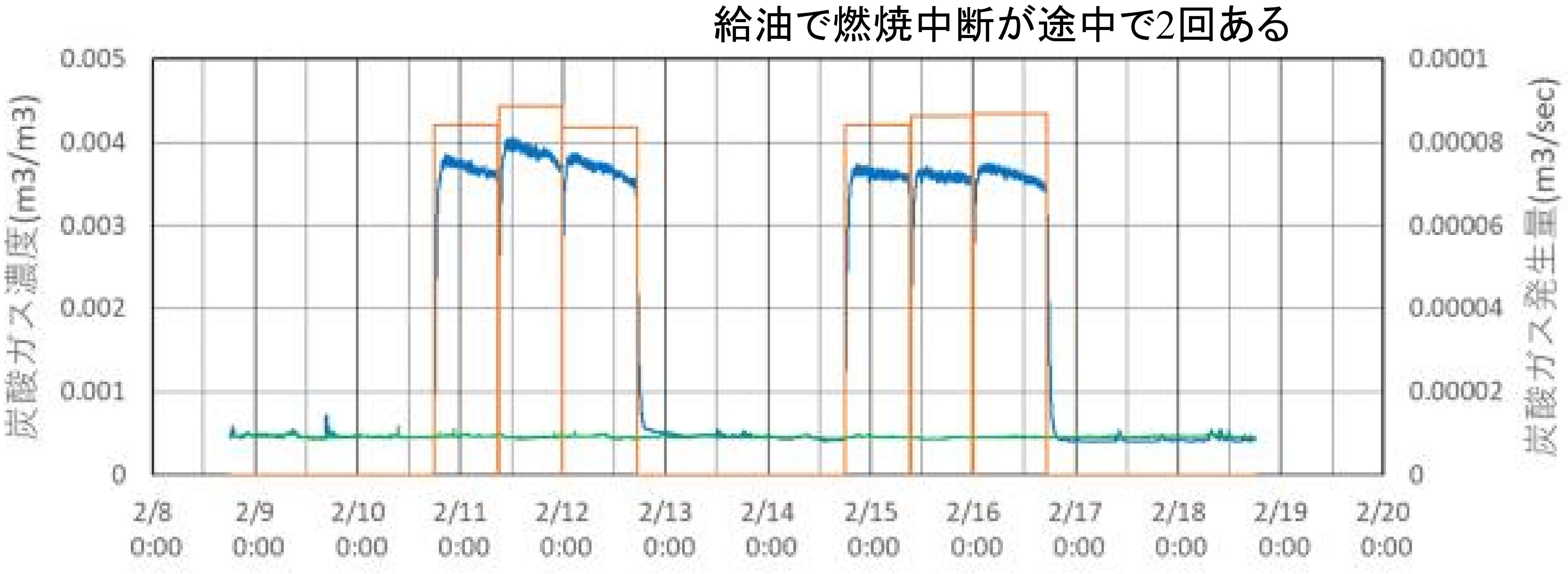
システム同定モデル



測定期間は2022年2月8日18時から2月18日の18時までの10日間



評価対象室の炭酸ガス発生量とガス濃度変化と外気濃度

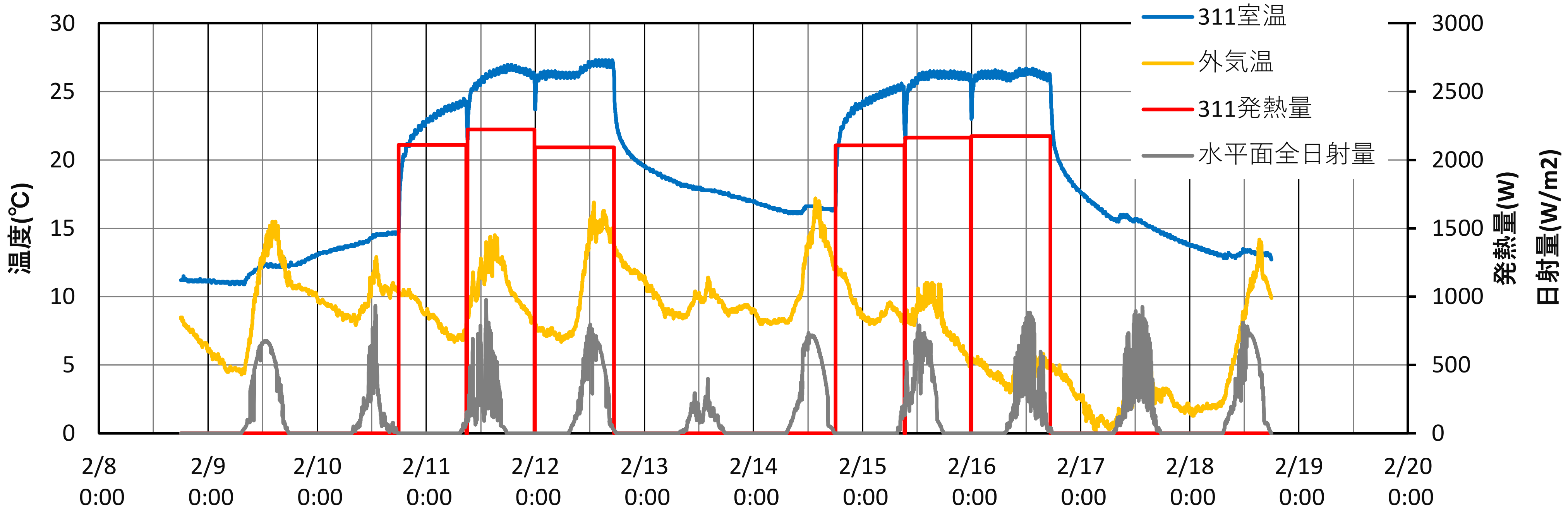


・測定データの期間は，2022年2月8日18時から，
2月18日の18時までの10日間

次のガス移動回路網のシステム同定結果を得た．

・換気風量：96.2[m³/h]（毎時約2回の換気回数）
・有効混合容積：31.9[m³]（幾何的容積は約50[m³]）
・決定係数 COD：0.989

評価対象室の発熱量と室温と水平面全日射量と外気温の変化



・灯油暖房器の発熱量が，計画の2.5kWに達せず，2.0kWであった．
（灯油暖房器の型番RB-250から2.5kWと勘違いした）

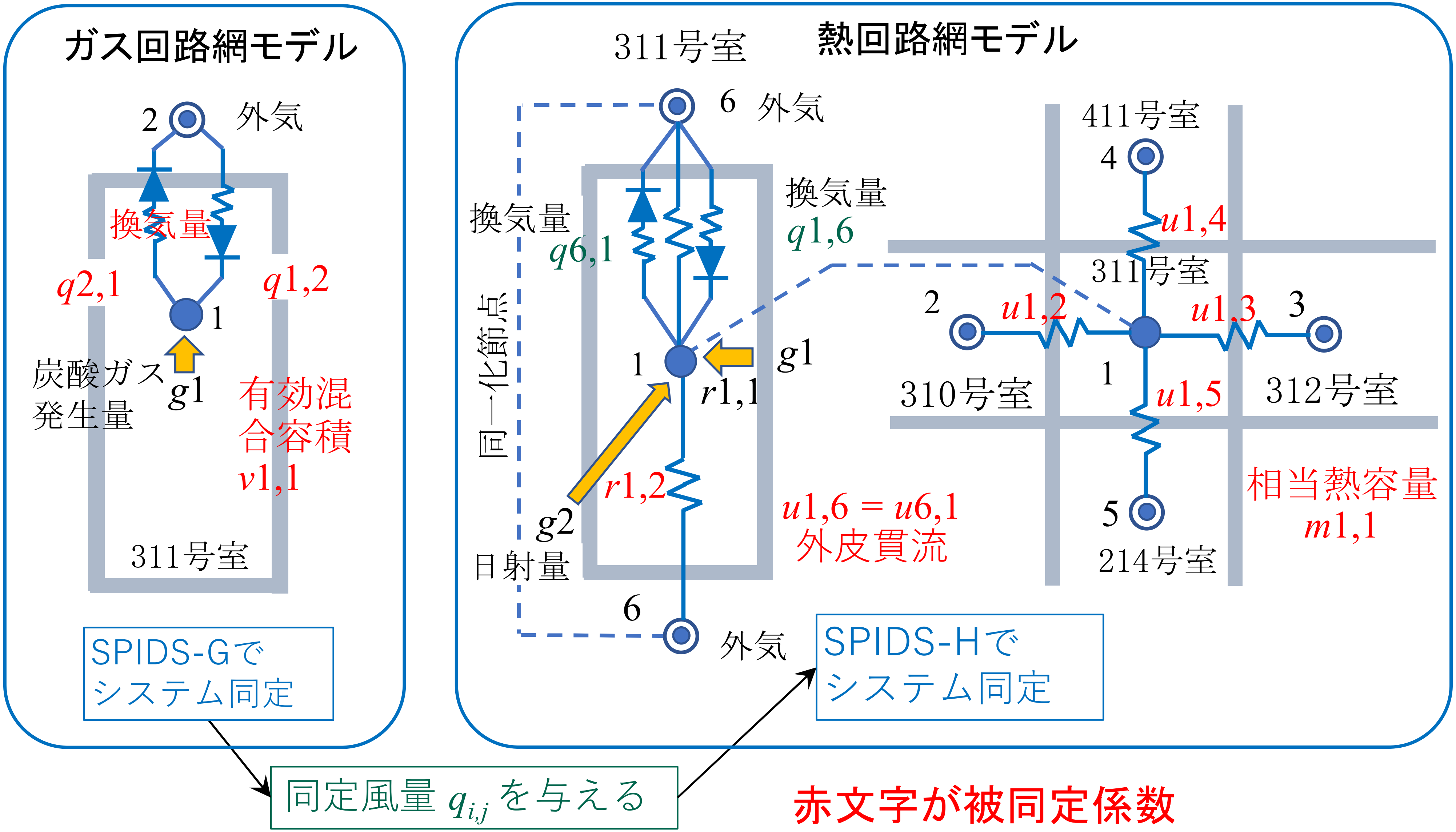
事前のNETSとSPIDによる模擬測定は2.5kWで行い成功していた．

全ての住戸（5住戸）の室温と外気温の変化

・隣住戸でも2日間の燃焼発熱をさせた.
・どの2住戸の間でも，1日はズレて室温が異なるようにした.
・住戸間での温度差と変化がつくようにした.

熱とガス移動のシステム同定モデル

SPIDの入出力の表計算プログラムは，ガス用がSPIDS-G で，熱用がSPIDS-H



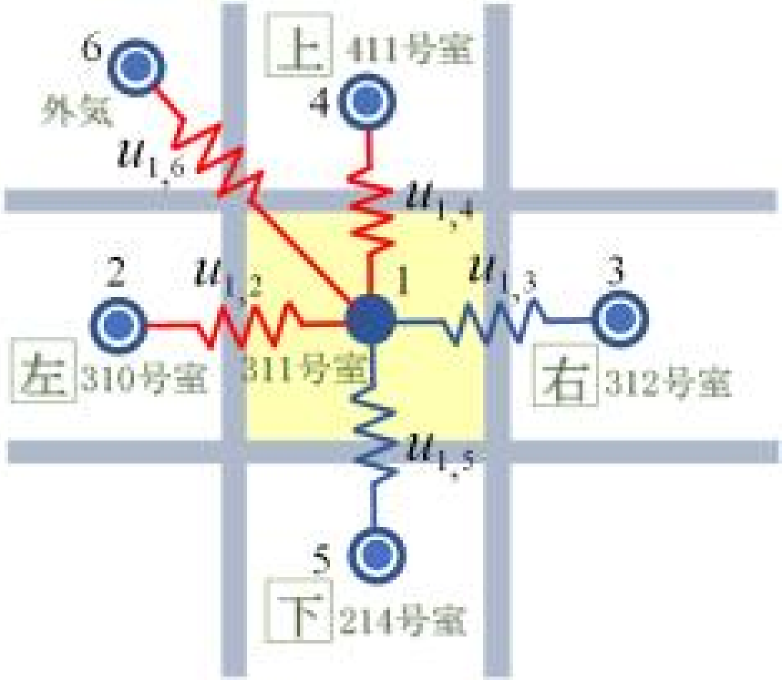
赤文字が被同定係数

まずガス回路網で換気量を同定してから，熱回路網の同定の条件として与える

伝熱系のシステム同定結果

同定係数	310室と 311室 (1,2)節点間	312室と 311室 (1,3)節点間	411室と 311室 (1,4)節点間	214室と 311室 (1,5)節点間	外気と 311室 (1,6)節点間
$q(i,j)$ [m^3/h]	0	0	0	0	96.2
$c(i,j)$ [W/K]	0.001	70.0	0.001	71.6	44.8
$u(i,j)$ [W/K]	0.001	70.0	0.001	71.6	12.5

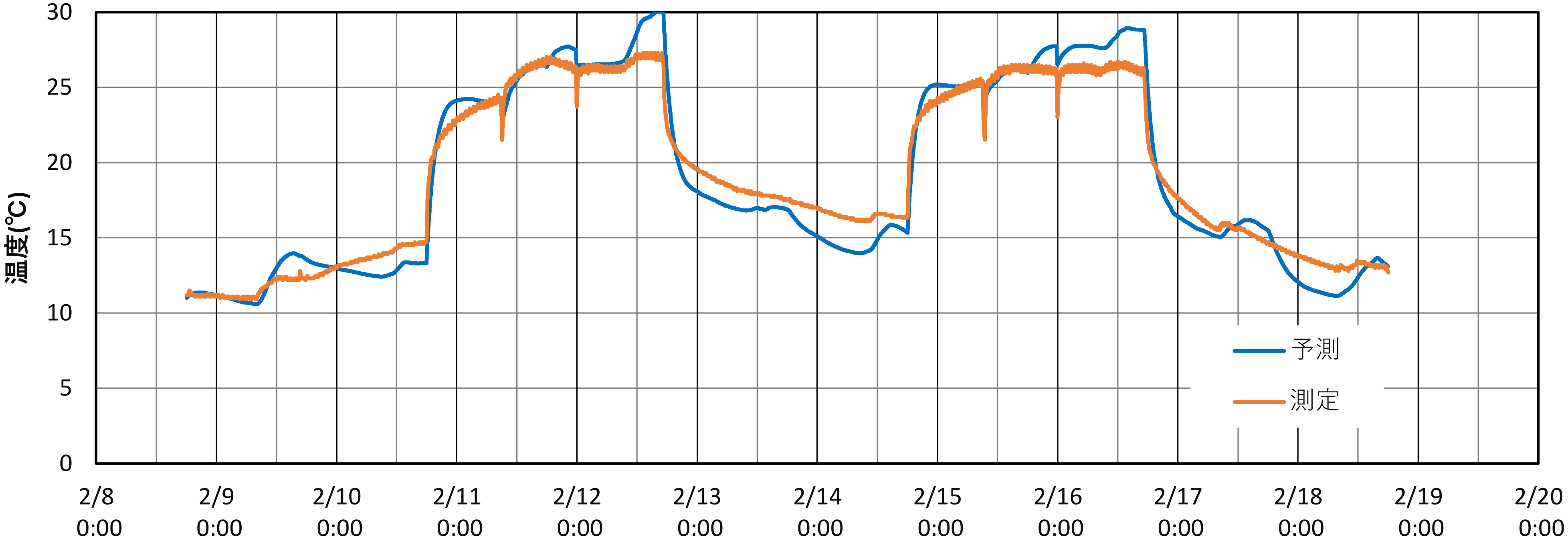
日射取得 係数 [m^2]	相当熱容量 [kJ/K]	決定係数 COD	ｼｽﾃﾑ同定の 前提の 不適合率β
0.00	1100	0.956	2.45



・赤色数字の熱貫流コンダクタンス $u_{i,j}$ が小さくて，不合理な結果になった.

・日射熱は入りにくい状況だったので，0の同定結果はそれほど不合理ではない.

同定された熱回路網による予測室温と測定室温の比較



・同定された熱回路網に，外気温や隣住戸の室温と励振発熱を与えて，室温変化を予測計算し，測定の室温変化と比較した．

・大局的な変化は似ているが，予測室温の方は，急激な上昇・下降の変化が多い．

NETSで模擬測定しSPIDの同定結果と正解値を比較検討

	310-311室 (1,2)節点間[W/K]	312-311室 (1,3)節点間 [W/K]	411-311室 (1,4)節点間 [W/K]	214-311室 (1,5)節点間 [W/K]	外気-311室 (1,6)節点間 [W/K]	日射熱取得係数 [m^2]	相当熱容量 [kJ/K]	決定係数	正解との偏差の二乗和
同定係数	*u*(1,2)	*u*(1,3)	*u*(1,4)	*u*(1,5)	*u*(1,6)	*r*(1,2)	*m*(1,1)	*COD*	dev^2
正解値	59.6	44.1	70.1	70.1	52.8	-	-	-	0
A: 2.5kW10日間	59.1	54.7	78.9	79.5	53.7	0.0855	6771	0.953	279
B: 2.0kW10日間	0.00155	0.813	15.2	17.4	112.8	1.1	7887	0.845	14820
C: 2.5kW18日間	62.1	54.3	73.7	75.8	52.9	0.197	6463	0.954	156

不合理

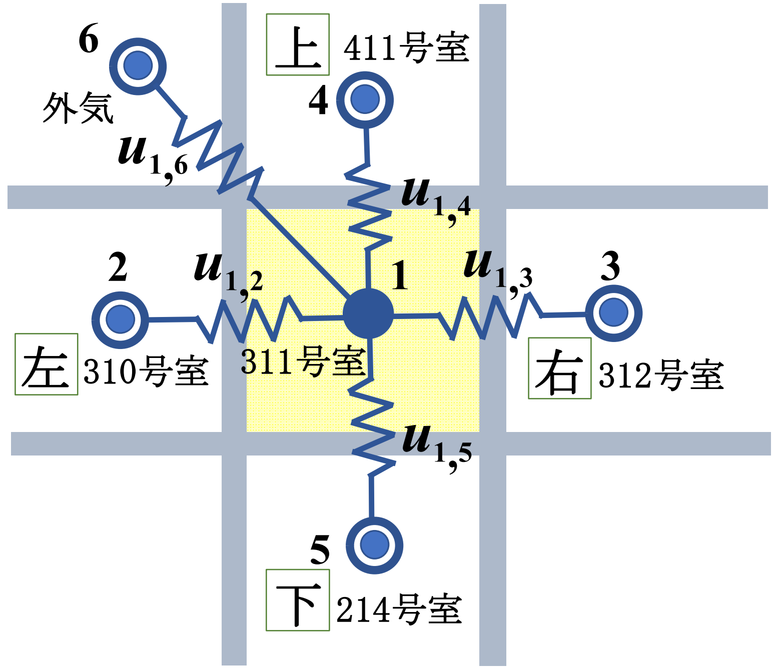
誤差最小

・模擬測定でも2 kW発熱では不合理が見られ，
2.5 kWならば妥当な結果になる．

・励振の回数と測定期間を二倍にすれば，
誤差の二乗和は半減して同定精度は向上する．

・必要な発熱量は次式で概算できる．
$Hg = (UA + cp \cdot \rho \cdot Q / 3600) \cdot \Delta\theta$
ここに内外相当温度差は約8℃とする．

・事前の十分な模擬測定と再実験が期待される．



次から，気密性の測定法と隙間の基礎式の研究

スライド6枚

気密性能評価

NETS SPID

建築の気密性能に関する研究

原発事故の対策

1979年3月
スリーマイル島の事故

1980年頃から5年程
日本原子力研究所から「家屋の放射性ガス防護効果調査」の受託研究

- 換気回数を測定した文献調査により回帰式作成
- 熱・換気ガス回路網による予測計算プログラムを開発
- 各種の隙間形状の試験体で隙間特性の実験

（回帰式は原子力学会等で発表され，あまり知られていない）

- 多数室換気測定システムの第一世代の開発と各種住宅での実験

冷暖房の省エネ志向

1980年頃から
左記の要請から，熱・換気・ガス回路網の計算プログラム開発が促進された．
通常状態の建物の換気回路網モデルも，隙間を考慮することが重要である．

気密性能測定データ分析法

2012年頃
気密測定法のデータ分析法を改良し，測定誤差に対するロバスト性と，信頼性評価が不十分と考えて改良する理論と方法を Building and Environment 誌に発表した．
重み付き最小二乗法によるロバスト性，測定前提の不適合率βによる信頼性評価．
（対数空間で回帰する誤差）

健康的な住宅志向と壁体内部結露検討

2015年頃から
特に木造住宅の内部結露は，壁の部材の湿気伝導よりは，隙間から侵入する水蒸気により起こる場合が多いのでは？

隙間特性の評価方法

2016年頃から
JISの相当隙間面積αAでは適切に隙間特性を表せない．
次の第1式のべき乗則モデルよりは，第2式の二次式モデルが優れていると考えられる．

$$\Delta p = D_n \cdot q^n$$

$$\Delta p = D_1 \cdot q + D_2 \cdot q^2$$

この二次式モデルで定義される幾何的相当隙間面積wlと隙間深さ係数d/w^2で表す．（ここにwは隙間幅，lは長さ，dは隙間深さ）

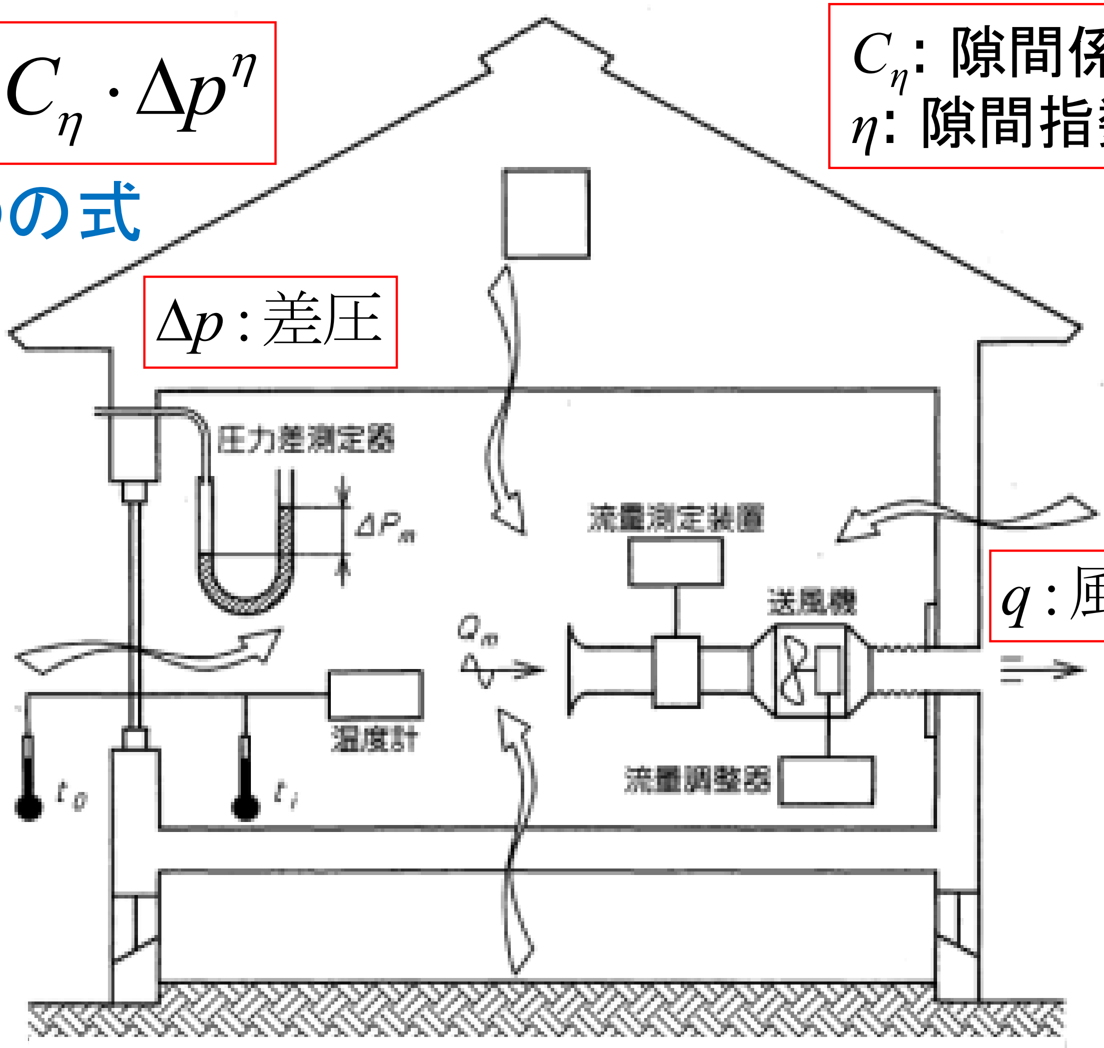
送風機による住宅の気密測定の様子と装置

$$q = C_\eta \cdot \Delta p^\eta$$

ISOの式

C_η: 隙間係数
η: 隙間指数

Δp : 差圧



q : 風量

$$\Delta p = D_n \cdot q^n$$

JISの式

JIS A2201, 2003, 送風機による
住宅等の気密性能試験方法より

冪乗則
（べきじょうそく）モデル

気密性能試験方法のJISの評価方法の問題

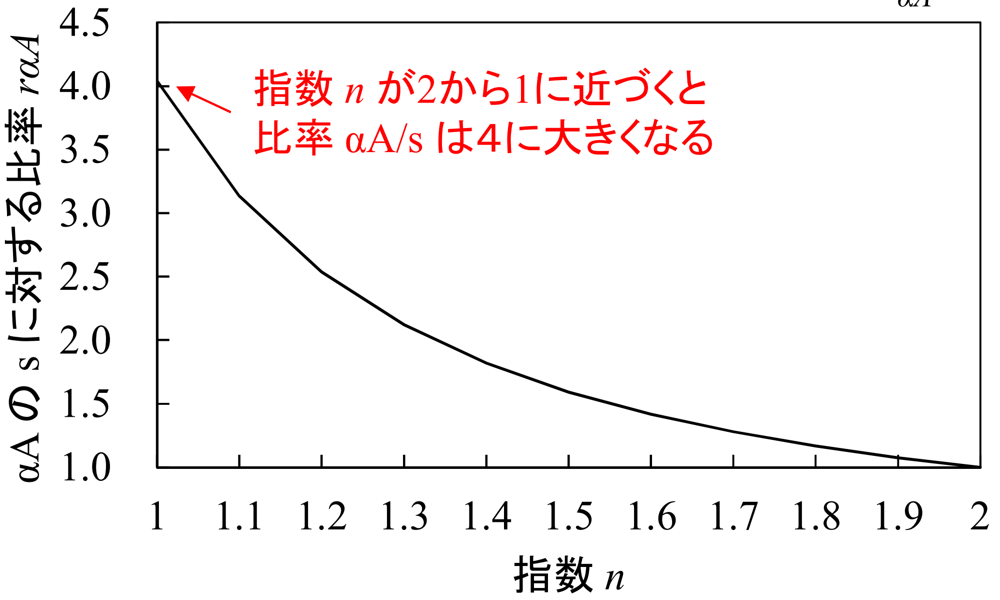
べき乗則の指数 n は 1～2 になり得る.
JISは(2)式で n=2 に関連付けているが,
単純明快な(1)式で良いのではないか？

$$\Delta p = \frac{\rho}{2}\left(\frac{q}{s}\right)^{n} \quad (1) \qquad \Delta p = \frac{\rho}{2}\left(\frac{q}{\alpha A}\right)^{2} \quad (2)$$

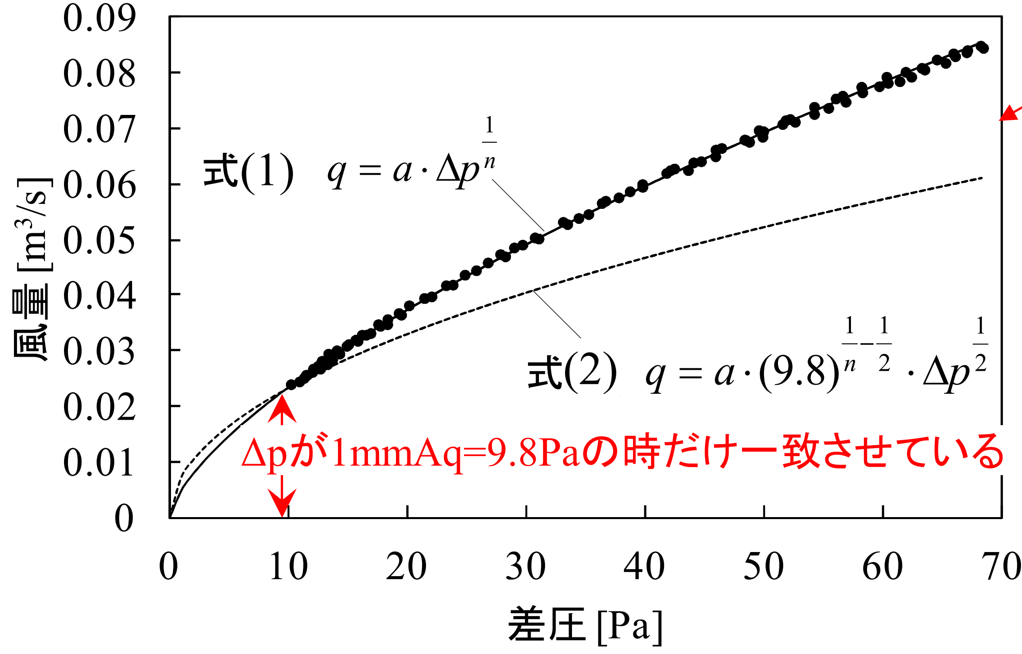
$$r_{\alpha A} = \frac{\alpha A}{s} = \left(\frac{\rho}{2 \cdot 9.8}\right)^{\frac{1}{2}-\frac{1}{n}} \quad (3)$$

αA：総相当隙間面積（JIS）
s：　単純相当隙間面積

JIS総相当隙間面積 αA と s の比率 $r_{\alpha A}$



測定値からの回帰曲線とJISによる曲線



隙間の実態のP-Q特性曲線と，指数を 2 においた特性曲線を，Δp= 1mmAq= 9.8Pa だけで合わせても，他のΔpでは両者は大きく異なる.

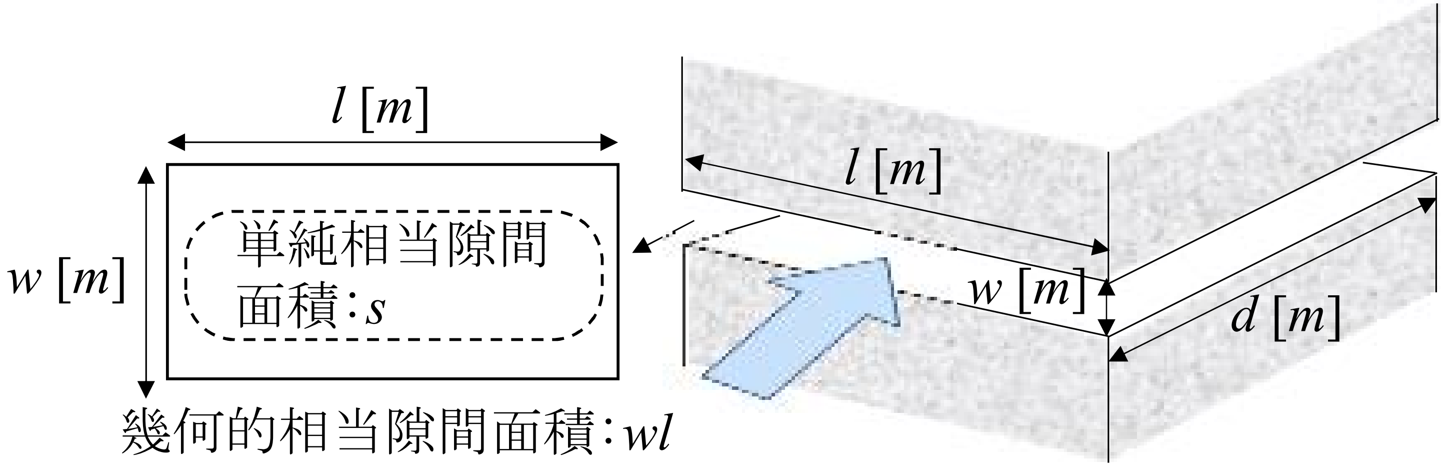
気密性能評価は C 値と呼ばれる相当隙間面積 αA だけでなされ，指数 n は無視されることが多い.
指数 n が物理学的意味を持っていないから？

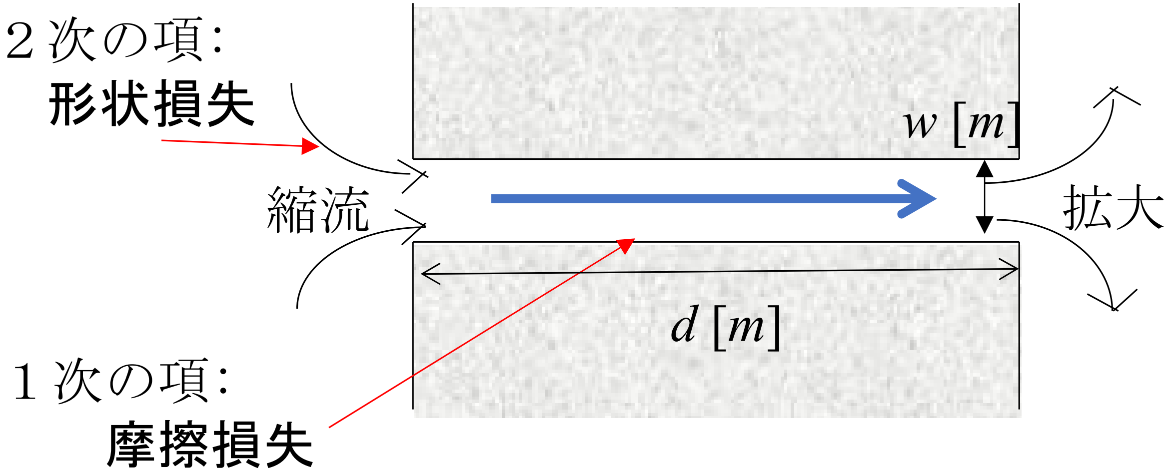
従って「隙間面積」だけでなく「隙間深さ」も考慮できる二次式モデルが良いのでは？

理想化した隙間の形状的な捉え方

隙間を，長さが l，幅が w，深さが d の寸法でとらえる.

単純相当隙間面積：s と幾何的相当隙間面積：wl





ここに隙間幅 w と深さ d の $\frac{d}{w^2}$ を隙間深さ係数と定義する.

由来は，流体の運動方程式による.

隙間の二種の数式モデル

気密性測定値

Δp：圧力損失
q：風量

二次式モデル（本間宏など）

$$\Delta \mathrm{p} = \zeta \frac{\rho}{2}\left(\frac{q}{wl}\right)^2 + 12\mu \frac{d}{w^2}\left(\frac{q}{wl}\right)$$

形状損失　　摩擦損失

二次式モデルの係数

ρ：空気密度
μ：粘性係数
w：隙間幅
l：隙間長さ
ζ：形状圧力損失係数

べき乗則モデル

$$\Delta \mathrm{p} = \frac{\rho}{2}\left(\frac{q}{s}\right)^n$$

指数 n は物理学的意味づけが困難

べき乗則モデルの係数

s：単純相当隙間面積
n：指数

二種の隙間モデルの長短と測定値分析理論

比較項目	二次式モデル　$\Delta p = D_1 \cdot q + D_2 \cdot q^2$	べき乗則モデル　$\Delta p = D_n \cdot q^n$
外形	複雑	単純
根拠	物理学的な根拠あり	指数 n に物理学的な根拠なし
測定分析	最小二乗回帰の精度は比較的に良い	対数空間で最小二乗回帰するので精度が良くない
予測計算	送風機の三次式のPQ特性と相性が良く解きやすい	送風機との運転点を決めるために二次式に近似しなければならない（NETSでの扱い）

なお，送風機による加圧・減圧による気密測定のデータから，べき乗則モデルについて，ロバストな最小二乗回帰方法と，不確かさ評価と信頼性評価を行う理論を展開し，表計算ソフトも開発した．

Hiroyasu Okuyama, Yoshinori Onishi, Reconsideration of parameter estimation and reliability evaluation methods for building airtightness measurement using fan pressurization, Elsevier, Building and Environment, 47 (2012), pp373-384

次は，蛇足ながら，送風機による測定が難しい，多層の建物で，煙突効果を利用して気密性を測定するアイデアの紹介

スライド１枚

気密性能評価

NETS SPID

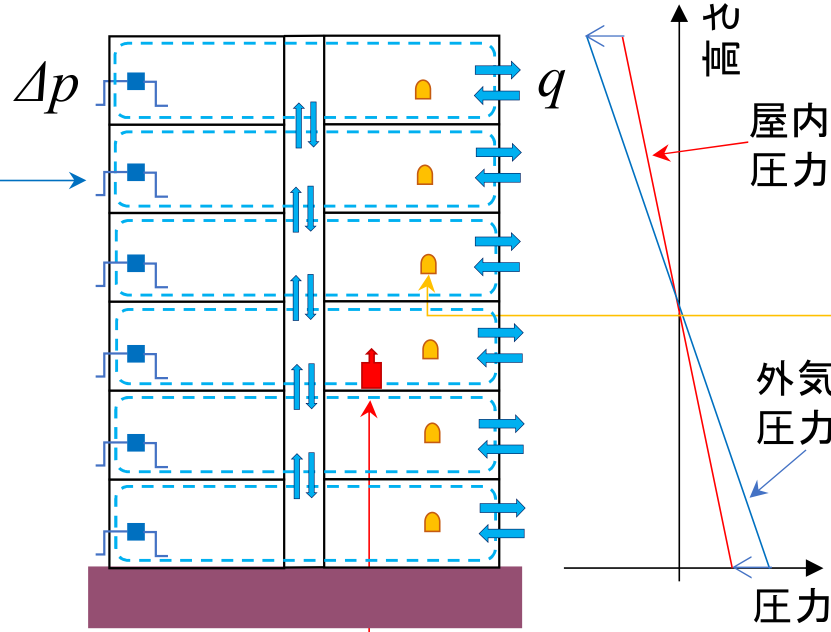
多層階建物の煙突効果で気密性を測定する方法

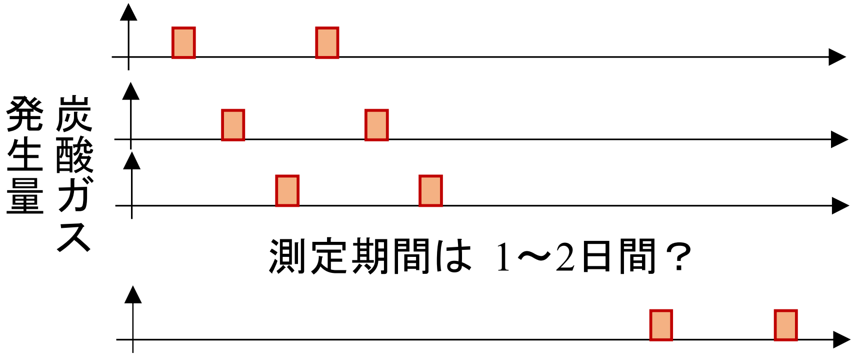
早川眞先生の問題意識を共有すると多数室換気測定法で改善できるのではないか？

各階の内外差圧
測定装置

小型デジタル
微差圧計

電圧データロガー





多数室換気測定の装置

温・湿度・炭酸ガス濃度
測定記録

灯油暖房器でCO_2発生

電子重量計

CO_2発生量は灯油消費
量から算出

各階と外気の間の風量と内外差圧から最小二乗法で相当隙間面積を求める

最後に，さらに 伝えたいこと

扱う現象を理解するモデルにより，できることが大きく異なってくる.

- 古典制御理論の伝達関数法的なモデルでは制約が大きい.
- 現代制御理論の状態空間法的なモデルで解決できる問題は多い.
（この熱回路網モデルでは，拡散系を汎用的な数式モデルでとらえ，状態空間方程式で扱う）
- カルマンフィルタが，こちらの逐次同定と同じなら，合理的な結果が得られるのは，こちらの移動一括同定ではないか？
- 微視的な数値流体解析などのモデルでは，建物全体的で長期間の問題検討には限界がある.「木を見て森を見ず」にならないように.
（細かいモデルから大まかなモデルを数学的に生成する熱回路網のシステム濃縮理論もあり，両者を融合できるのが熱回路網の枠組み）
- 空調システム・シミュレーション・プログラムは，コンポーネント間の汎用的な接続法と連成法が問題と捉え，方法を考案してみたことがある.
（「空調システムシミュレーションの理論とアルゴリズム」，空気調和衛生工学会学術論文集，1982年10月）

期待したいこと

前述した各種の計算プログラムのユーザーとしてだけでなく，さらなる発展的な研究・開発ができる人が出てくることを期待したいと思います．

・御遠慮なく御尋ね下さい．喜んで協力させていただきます．
・またWeb上で質疑応答できるサイトを設けたいと思いますので，サイトの構築と運用に御協力下されば幸いです．

謝辞

これまで好き勝手なことができましたのは，多くの方々のおかげです．
その人々と，良くも悪くも与えられた環境に，感謝申し上げたいと思います．

NETS
SPID SOCS