

## 床面衝突噴流を用いた準置換換気空調方式に関する研究 (その4) 非等温場における CFD 解析の精度検証

正会員 ○杉田 雄希\*<sup>1</sup> 同 小林 知広\*<sup>2</sup>  
同 梅宮 典子\*<sup>3</sup> 同 岸本 孝志\*<sup>4</sup>  
Mats Sandberg\*<sup>5</sup>

### 4. 環境工学 - 13. 空気流動応用

衝突噴流 置換換気 温度成層

#### 1. はじめに

室内の居住域のみを対象とする空調方式は非居住域の空調制御条件の緩和ができるため、省エネルギーの観点から有効と考えられる。そのような効率的な空調方式の1つとして置換換気方式<sup>1,2)</sup>(Displacement Ventilation 方式、以降 DV 方式)があるが、DV 方式は低温・低速で給気を行うため、大きな熱負荷がある場合にはその周辺で気流が上昇して水平方向に温度分布が生じるという問題点がある。また、室下部での急な温度勾配による足下付近の過剰冷却の問題も存在する。一方、DV 方式と同様に上下温度分布を形成し、水平方向の温度分布が生じにくい方式として、床面付近に設置したダクトから鉛直下向きに給気し、床近傍で水平方向に広がる衝突噴流により空調を行う方式<sup>3,4)</sup>(Impinging Jet Ventilation 方式、以降 IJV 方式)が提案されている。この方式は DV 方式に比べて適度に混合するため、足下付近の過剰冷却を解消し、冬期の暖房にも適用できる可能性を有するが、その詳細な性状は十分には明らかにされていない。

既往の研究<sup>5,6)</sup>では DV 方式と IJV 方式における気流分布および鉛直温度分布の基礎的性状の比較を行い、初期段階として等温場における CFD 解析の精度検証を行った。本研究では、非等温場における CFD 解析のケーススタディを行い、最終的には数値実験に基づく鉛直温度分布の簡易予測モデルの提案を行うことを目的とする。そのためには非等温場での CFD 解析の精度検証が必要であるため、本報では実験室実験による結果と CFD 解析の結果を比較して精度検証を行う。

#### 2. 実験室実験

##### 2.1. 実験概要

実験は2014年7月19日～7月20日に行った。図1に示す実験室(幅9,000mm×奥行5,000mm×高さ2,700mm)において、直径300mmの半円筒型のIJV吹出口(図2)を下端が床上600mmの高さになるように設置し、実験室外の空調機に接続した。ここでは、冷房時を想定した熱負荷として室中央に発熱体(2kW)を設置し、IJV方式における風速測定および温度測定の実験を行った。

##### 2.2. 測定概要

CFD 解析の精度検証時の真値の取得のため、吹出風量 600m<sup>3</sup>/h、吹出温度 20℃の実験条件で、空調開始後概ね定常状態となったところで、吹出口付近における風速・温度測定および空間温度測定を行った。風速測定は、I型熱線流速計(日本カノマックス, 0251R-T5 型 φ5μm タングステン)を用いて行った。測定点は全て中心断面(Y=0mm)上とし、サンプリング周波数 1,000Hz、平均化時間 30 秒とした。吹出口付近における測定点は、X=200mm から水平方向に 200mm 間隔で高さ Z=240mm までの風速の鉛直分布 85 点(17 点×5)とした(図3)。温度測定は、T型熱電対(旭産業, T-0.32-PVC-VKF)を用いて、図4に示す位置の鉛直温度分布を測定した。測定点は X=250mm から水平方向に 100mm 間隔かつ鉛直方向に 100mm 間隔で高さ Z=600mm までの 78 点(6 点×13)とした。また、吹出口近傍以外の空間温度測定も実施し、水晶温度計(九州計測器, TempLAN)を用いて図5のプロットで示

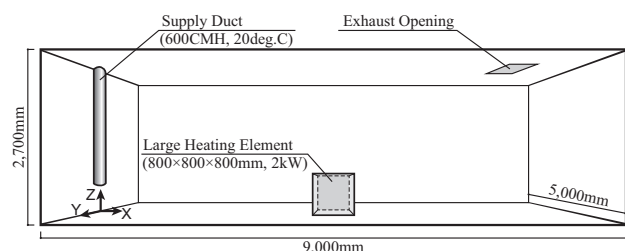


図1 実験室概要図

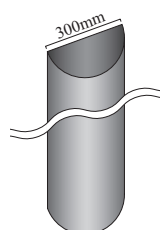
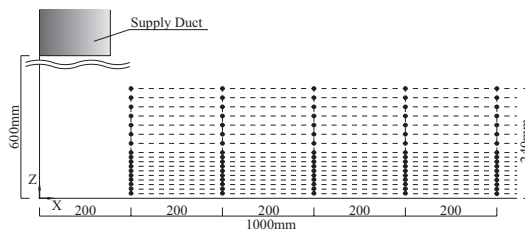


図2 IJV 吹出口



● Measurement Point for Vertical Velocity Profile with Hotwire Anemometer (10points at every 10mm up to Z=100mm, and 7points at every 20mm above Z=100mm)

図3 吹出口付近風速測定点

A Study on Semi-Displacement Ventilation System using Impinging Jet Flow  
Part 4. Accuracy of CFD Analysis under Non-Isothermal Condition

SUGITA Kazuki, KOBAYASHI Tomohiro, UMEMIYA Noriko, KISHIMOTO Takashi, and SANDBERG Mats

す位置の鉛直温度分布を測定した。図中の黒プロットで表す中央断面 (Y=0mm および X=4500mm) 上においては鉛直方向に 250mm 間隔で 12 点 (ただし最上部のみ 200mm 間隔)、白プロットの点は 500mm 間隔を基本として Z=250mm も追加して 6 点とした。CFD の温度境界条件の取得を目的として、図 5 の灰色プロット位置で表面温度の鉛直温度分布を T 型熱電対により測定した。

### 3.CFD 解析の精度検証

#### 3.1.CFD 解析概要

表 1,2 に CFD 解析条件を示し、図 6 に解析に用いた実験室の解析領域およびメッシュレイアウトを示す。メッシュの分割幅は最小 3mm とし、吹出口・発熱体等の流れが複雑になると考えられる領域から離れる方向に分割領域が大きくなるように設定した。乱流モデルには標準 k-ε モデル (SKE)、RNGk-ε モデル (RNG)、せん断応力輸送 k-ω モデル (SST)、Large Eddy Simulation (LES) の 4 種を用いた。RANS モデルの解析空間は計算負荷を軽減するために Free Slip 境界を用いて実験室の半分のみを再現した。流入境界面

の位置は吹出口下端とし、吹出風量 600m<sup>3</sup>/h を吹出口面積で除した風速および実験から得られた給気温度を境界条件に与えた。発熱体表面の熱的境界条件は熱流束で与え、発熱量 2kW を表面積で除した 625W/m<sup>2</sup> とした。室の壁面については実験により得られた鉛直温度分布を与えたが、給気口が設置された壁のみ断熱境界とした。解析は非等温場とし、浮力はブシネスク近似により表現した。LES では Smagorinsky-Lilly モデルを用い、瞬時値の非定常計算であるため、対称面を設けず、解析空間は実験室全体とした。SKE の結果を初期条件とし、計算時間間隔は 0.01 秒 (100Hz) として 3,000 ステップ (30 秒) までを助走計算とみなして結果を破棄し、その後の 72,900 ステップ (729 秒=名目換気時間) の結果を用いて時間平均値の算出を行った。

#### 3.2. 乱流モデルに関する検討

4 種の乱流モデル SKE、RNG、SST、LES の解析結果および実験結果の比較を行う。図 7 に吹出口付近の風速・乱流エネルギー k・エネルギー消散率 ε の分布を示す (LES は風速のみ)。風速分布において X=200mm では LES で差が生じており、給気直後に下向きの運動量の拡散を過大評価している。また、

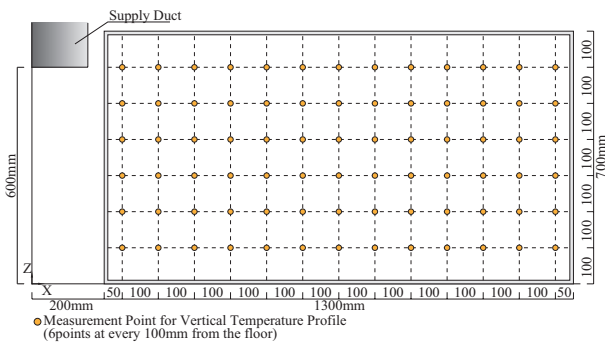


図 4 吹出口付近温度測定点

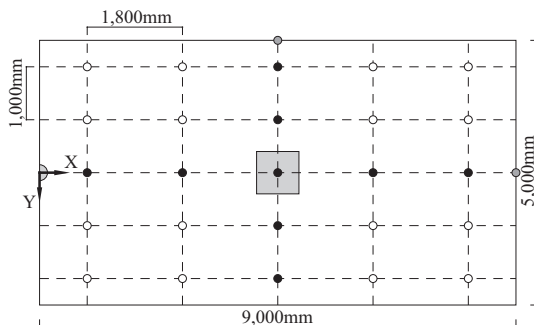


図 5 空間温度測定点

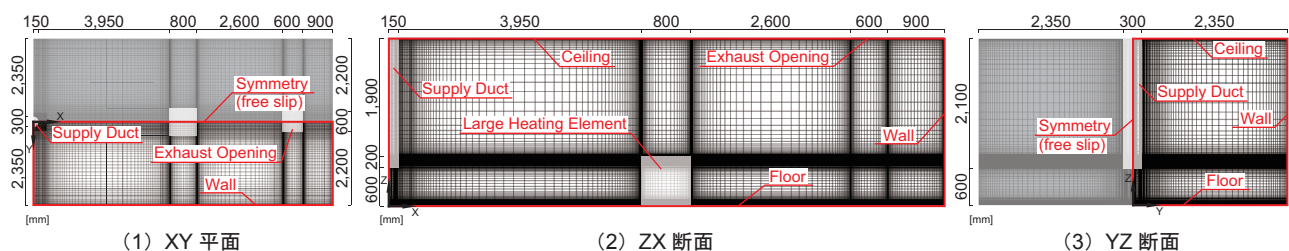


図 6 CFD 解析領域およびメッシュレイアウト (RANS モデル)

表 1 CFD 解析条件 (RANS モデル)

CFD code		Fluent 14.5
Turbulence Model		Standard k-ε Model (SKE) RNG k-ε Model (RNG) Shear-Stress Transport k-ω Model (SST)
Algorithm		SIMPLE
Discretization Scheme for Advanction Term		QUICK
Boundary Condition		Inlet Velocity Magnitude : 4.716m/s Turbulent Intensity : I=10% Turbulent Length Scale : L=21mm
		Outlet Velocity Magnitude : 0.463m/s
		Walls (Heat) Wall (X=0) : Adiabatic Boundary Heating Element Surface : Heat Flux Boundary Other Walls : Temperature Boundary
		Walls (Velocity) Symmetry : Free Slip Other Walls : Standard Wall Function
Total Number of Cells		2,023,362

表 2 CFD 解析条件 (LES)

CFD code		Fluent 14.5
Turbulence Model		Large Eddy Simulation (Smagorinsky-Lilly Model)
Algorithm		Implicit Method (SIMPLE)
Discretization Scheme for Advanction Term		Bounded Central Differencing
Time Step		0.01s (100Hz)
Total Calculation Term		Preconditioning 3,000 time step (30s)
		Main Calculation 72,900 time step (729s)
Boundary Condition		Inlet Velocity Magnitude : 4.716m/s (Constant)
		Outlet Velocity Magnitude : 0.463m/s (Constant)
		Walls Warner & Wengle's linear-power law
Smagorinsky Coefficient		0.1
Total Number of Cells		2,423,104

X=400mm では SKE を除く乱流モデルで全体的に実験結果に概ね一致しており、それ以降では床面付近で差が生じる傾向が見られる。SKE では概して差が大きいことが示され、全体的には SST が実験結果と概ね一致する傾向を示す。また、吹出口付近における鉛直温度分布の比較結果を図 8 に示し、中心断面 (Y=0mm) 上における空間温度分布の結果を図 9 に示す。空間温度分布においては SST, LES が実験結果に比較的良く一致し、SST では発熱体上部の熱ブルームの影響が比較的良く再現されている。吹出口のごく近傍では LES が温度の低い給気気流との混合を過大に評価しているため、温度が低い結果となっている。

本検討では、吹出口近傍あるいは床面のごく近傍の風速・乱流統計量の過大評価が見られた。実験におけ

る風速の過小評価も考え得るが、この領域の解析精度向上の可能性を探るため、次節では床面の速度の壁面境界条件の取り扱いに関する検討を行う。

### 3.3. 床面粗度の検討

CFD 解析では比較的粗度の小さな床面を想定した境界条件を設定したのに対し、実験では床面にタイルカーペットが敷設されており、床近傍で摩擦が働き、風速が低減された可能性が考えられるため、床面の粗度の影響を考慮した検討を行う。本研究では、次式のように標準壁関数を  $\Delta B$  を用いて補正することで壁面粗さを考慮する<sup>7)</sup>。

$$\frac{u_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{E y_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{v} \right) - \Delta B$$

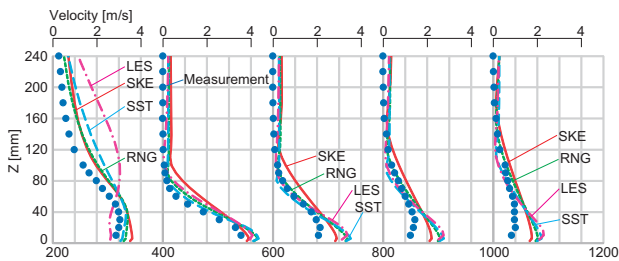
なお、 $\Delta B$  は粗度 Re 数  $K_s^+$  の関数であり、粗さの程度により挙動が異なり、次のように  $K_s^+$  に応じて算出される。

・滑らかな領域  $K_s^+ < 2.25 : \Delta B = 0$

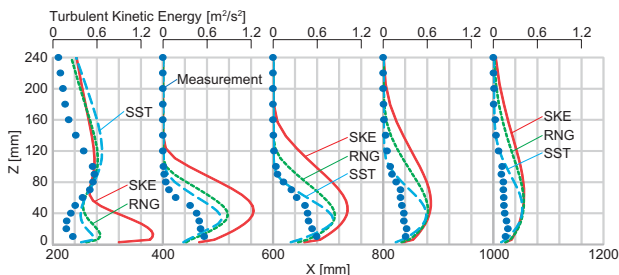
・遷移域  $2.25 < K_s^+ < 90 :$

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{K_s^+ - 2.25}{87.75} + C_s K_s^+ \right) \sin[0.4258\{\ln(K_s^+) - 0.811\}]$$

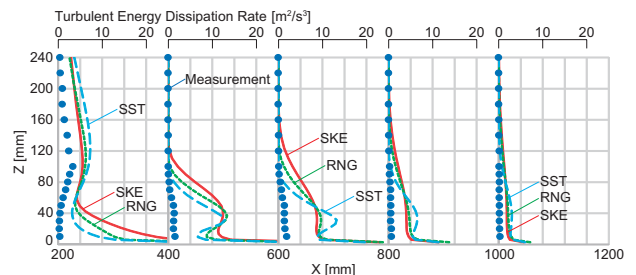
・粗い領域  $K_s^+ > 90 : \Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + C_s K_s^+)$



(1) 風速の ZX 成分



(2) 乱流エネルギー k (RANS モデル)



(3) エネルギー消散率 ε (RANS モデル)

図 7 吹出口付近における風速・乱流エネルギー・エネルギー消散率の分布

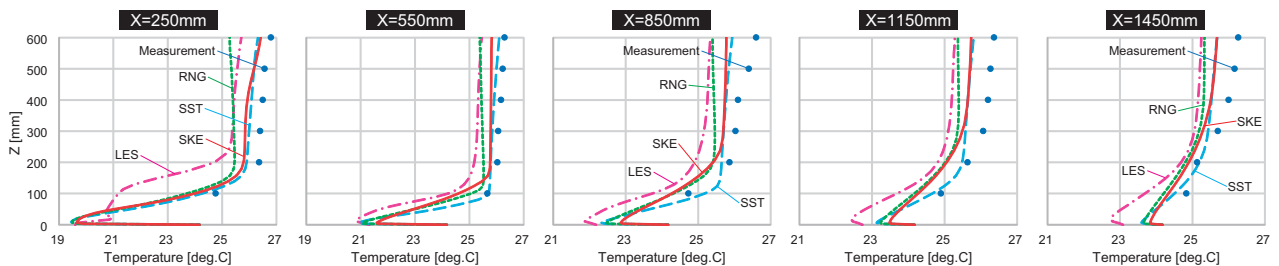


図 8 中央断面上における吹出口付近温度分布

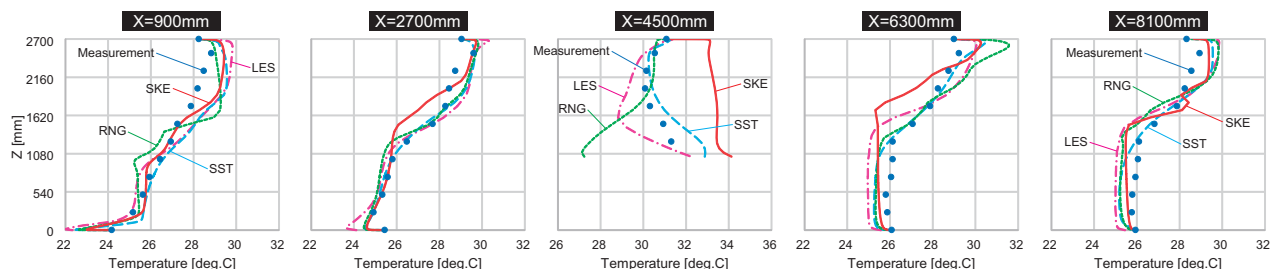


図 9 中央断面上における空間温度分布

なお、 $C_s$ は粗度定数であり、0.5～1の値を取り、不均一な粗さを持つ壁面ほど大きい値を与える必要がある。また、粗度Re数 $K_s^+$ は次式のように定義されており、絶対粗度 $K_s$ を与えることにより算出される。

$$K_s^+ = \frac{K_s C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\nu}$$

$K_s$ は第一メッシュ寸法より小さい値を与える必要があるため、表3のように床面の境界条件を与えた。乱流モデルにはSSTを用いた。吹出口付近における風速分布の比較結果を図10に示し、空間温度分布の結果を図11に示す。床面のごく近傍の風速が低減される傾向を示すが、吹出口近傍の風速の過大評価の大幅な改善は見られない。また、空間温度分布は多少実験結果から遠ざかる傾向が見られた。

#### 4. まとめ

本研究では非等温場におけるIJV方式を対象としたCFD解析の精度検証を目的として、実験室実験およびCFD解析を行った。ケーススタディに最も精度が重要な温度分布に関してSST、LESともに実験結果と比較的良く一致していたと言える。このため、計算負荷と精度の観点から、IJV方式のケーススタディに最も適した乱流モデルはSSTであると言える。今後の課題として、IJV方式の冬期における暖房での風速分布・空

間温度分布の基礎的性状の把握を行うとともに、室内負荷の条件や空調吹出条件を変更したCFD解析を行う必要がある。将来的には、ケーススタディに基づく鉛直温度分布および濃度分布の簡易予測モデルの提案を行う所存である。

[記号表]

- $u_p$ : 壁面第1セルの壁面接線方向速度 [m/s]
- $k_p$ : 壁面第1セルの乱流エネルギー $k$ の値 [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]
- $y_p$ : 壁面第1セルの中心までの距離 [m]
- $\tau_w$ : 壁面せん断応力 [kg/m·s<sup>2</sup>]
- $\rho$ : 流体密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $C_\mu$ : モデル定数 [-] (=0.09)
- $\nu$ : 動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s]
- $E$ : 経験定数 [-] (=9.0)
- $\kappa$ : カルマン定数 [-] (=0.4)
- $K_s^+$ : 粗度Re数 [-]
- $K_s$ : 絶対粗度 [m]
- $C_s$ : 粗度定数 [-]

[謝辞]

実験器具をお貸し頂いた大阪大学建築環境・設備Grに深謝申し上げます。なお、本研究の一部は科学研究補助金(若手研究B、課題番号24760476(研究代表:小林知広))の助成を受けた。

[参考文献]

- 1) P.V.Nielsen: DISPLACEMENT VENTILATION-theory and design, Aalborg University, 1993
- 2) Daid Etheridge, Mats Sandberg: BUILDING VENTILATION Theory and Measurement, John Wiley & Sons, 1996
- 3) T.Karimipannah, H.B.Awbi: Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation, *Building and Environment*, Vol.37, Issue 12, pp.1329-1342, 2002
- 4) H.Chen and B.Moshfegh: Comparing k-ε Models on Predictions of an Impinging Jet for Ventilation of an Office Room, *Proceedings of Roomvent 2011*, In Digital Media, 2011.6
- 5) 宇佐美亮太, 小林知広ら: 放射状壁面噴流を用いた準置換換気方式空調に関する研究(その1), 空気調和衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.277-280, 2013.3
- 6) 富田篤, 小林知広ら: 放射状壁面噴流を用いた準置換換気方式空調に関する研究(その3), 空気調和衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.413-416, 2014.3
- 7) T.Cebeci and P.Bradshaw: "Momentum Transfer in Boundary Layers", Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1977

表3 床面の絶対粗度および粗度定数

	Roughness Height $K_s$	Roughness Constant $C_s$
Case1 (Default)	0 [mm]	0.5
Case5	2 [mm]	0.5
Case6	2 [mm]	1

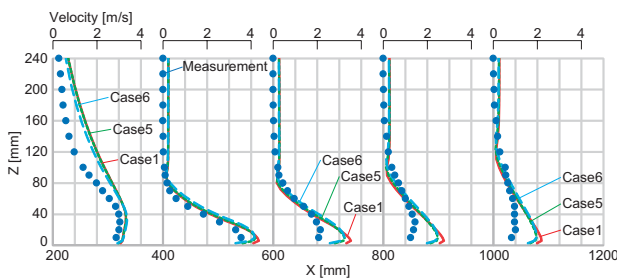


図10 吹出口付近における風速分布

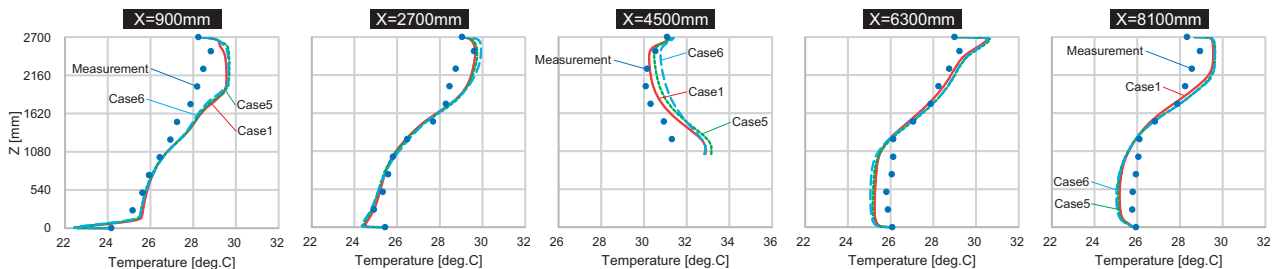


図11 中央断面上における空間温度分布

\* 1 大阪市立大学工学部建築学科 学部生  
 \* 2 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 講師 博士(工学)  
 \* 3 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 教授 博士(工学)  
 \* 4 きんでん 京都研究所 博士(工学)  
 \* 5 イェンブレ大学居住環境センター 教授 Ph.D.

Undergraduate Student, Department of Architecture, Faculty of Eng., Osaka City University  
 Lecturer, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr.Eng.  
 Professor, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr.Eng.  
 Kinden Corporation, Kyoto Institute, Dr.Eng.  
 Professor, Centre for Built Environment, University of Gävle, Ph.D.