

中国広州レストランでの新型コロナウイルス感染症クラスター を対象とした各種換気効率評価と感染確率分布に関する研究

発表部門—環境工学

正会員 ○ 阿式信英^{*1}
 // 金 政一^{*3}

正会員 倉 淵 隆^{*2}

COVID-19 換気効率 PFR CFD

Wells-Riely モデル Quanta 生成量

1. はじめに

コロナウイルスの感染拡大に伴い、建築物には用途に応じた換気効率、新たなデザイン様式、空調及び換気の運用方法、既存建築物の改善案等の多面的な感染リスクの低減方法を体系化し、工学的観点による安全性を担保する評価指標とデザイン手法の構築が求められている。

2. 目的・範囲

本研究では、在室人数 89 人の内、9 人が感染し、且つ、Table No. A, B, C に局所クラスターが生じた中国広州のレストラン (Fig. 1) の曝露時間と感染確率の研究⁵⁾⁶⁾ (Table 1) を手掛かりに、CFD シミュレーションを用いて、各種換気効率にて室内濃度分布の評価、局所領域での換気量から感染率の推定値と実質値の相対的評価を行い、感染確率を導く上で重要な Quanta 生成量を推定した。シミュレーションの異なるアプローチとして定常解析と非定常解析を比較検証することにより、感染確率から感染者数分布の予測フローを確立することを目的とする。

3. 既往研究と課題

コロナウイルス感染症の拡大防止に対して世界各国では様々な研究が行われ、国内外の学会を中心としてガイドラインが続々と公開されているがクラスター発生状況は、局所領域であり、その明確な予測フローは構築されていない。換気的重要性が再確認されてはいるが、一般的な換気計画を行う際には、室内の完全混合を仮定し、室内における汚染質濃度分析を無視した状態で必要換気量を算定する。実空間では汚染源の発生は局所的であり、室内での気流性状、新鮮空気の到達・分配や発生汚染質の排出性状は大きく異なるため、不均一濃度場と換気効率分布や感染確率分布も生じる。また、空気感染リスクを定量的に評価する代表的なモデルとして Wells-Riley¹⁾ モデル (式 1) (以下 WRM) があり、中国で発生した数値解析の事例が報告されている。しかし、WRM では室内飛沫の分布が均一であり、飛沫濃度が定常状態であることを前提として、ウイルス活性状態や偏在する汚染源から不均一濃度場を考慮していない課題がある。

そこで、CFD 解析により局所領域内の平均濃度を制御する換気量を直接定義する PurgingFlowRate²⁾ (式 2) (以下、PFR) を導出することで、感染源からの局所領域における汚染質除去のための換気量を導出し、WRM の換気量に代入することにより、局所空間における感染確率分布の予測が可能と考えられる。次に、CFD による Quanta 濃度の定常解析と非定常解析を行う事で、偏在する汚染源や分布が生じる濃度場、感染確率の検証を行う。

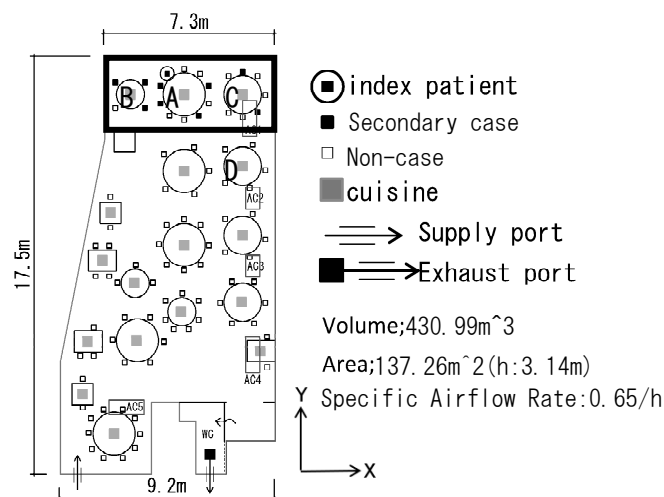


Fig.1 Plan of Guangzhou Restaurant
 Table 1 Time Schedule of Guangzhou Restaurant

Table	Infection probability	Number of cases		Exposure time		Time zone
		person	Total number of people	(h)	(m)	
A	44.44%	4	9	1.28	77	12:01-13:18
B	75.00%	3	4	0.88	53	11:37-12:54
C	28.57%	2	7	1.25	75	12:03-13:18
D	0.00%	0	5	0.30	18	13:00-13:18
A~D	36.00%	9	25	1.01	60.73	

I : Number of infected people [person]
p : Breath rate [m³/h]
q : Quanta generation rate [quanta/h]
t : Exposure time [h]
Q : Ventilation flow rate [m³/h]

$$P_{if} = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q}} \quad (1)$$

$$PFR = \frac{qP}{C_p} \quad (2) \quad \begin{matrix} q_p : \text{Amount of target area generation rate [kg/s]} \\ C_p : \text{Average concentration of target area [kg/m}^3\text{]} \end{matrix}$$

4. 研究方法

本研究の研究手法および手順を以下に示す。

- 1) クラスタが発生した要因を解明するため、広州のレストランの空間を CFD シミュレーションにて解析し、各種換気効率指標 (SVE3, SVE4) にて評価する。
- 2) 1) の換気効率のみならず、CFD を用いて局所領域下の実質換気量である PFR を算定し、WRM の換気量へ代入して導出される感染確率を、クラスタ発生時の感染確率との整合性を鑑みて Quanta 生成量の範囲を推定する。
- 3) CFD シミュレーションにて、気流場と温度場を固定した条件下で、定常解析と非定常解析の異なるアプローチから、ポイントソースとしての呼気性状の濃度上昇や分布性状を明らかにして、Quanta 生成量を導出する。

5. 各種換気効率指標による評価

局所クラスタ発生要因は、 $2.7 \sim 3.7 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$ と少ない換気量と入口とトイレのみによる換気の短絡及び、空調気流による滞留域の発生によるものと推測される。その吸込口の排出濃度を基準とした吹出口空気のある領域での平均到達時間で定義される SVE3 と各吹出口の勢力範囲で定義される SVE4 の解析 Case と各スカラー断面を Table 3, Fig. 2 に示す。Fig. 3, 4, 5, 6 の様に流れ場と温度場を固定し、各種換気効率を解析する。Fig7 には $Z=1.1\text{m}$ の SVE3 の分布を示し、局所クラスタ発生空間領域では換気効率の悪い解析結果となる。また、室内空気環境の局所制御を合理的に行うには、制御要因である吹出し気流の勢力範囲を具体的な評価が必要であり、空調機と給気口の空間に対する寄与率を Table 4 に示す。局所クラスタ発生空間領域では、空調気流の 42% が循環気流となり、空気の入れ換えが少ない流れ場が形成されている。水平断面と鉛直断面のコンター図を Fig. 9~14 に示す。

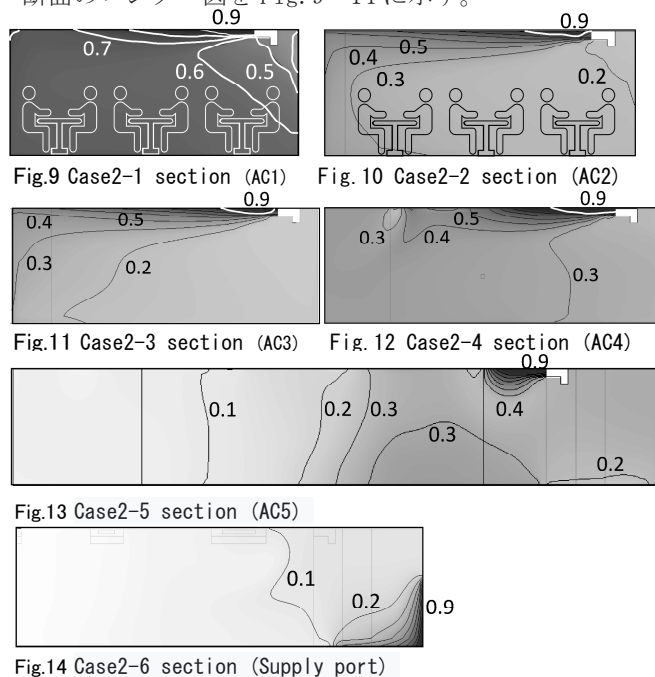


Table 2 Analysis summary

Analysis content	Steady analysis
Turbulence model	Standard k-ε model
Difference scheme	Quick
Mesh	1,030,000Mesh X92*Y350*Z32(100mm*50mm*100mm)
Soft	FlowDesigner/Ver2020

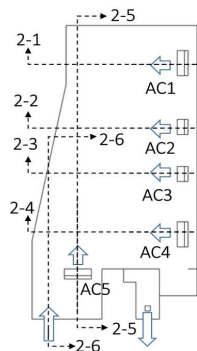
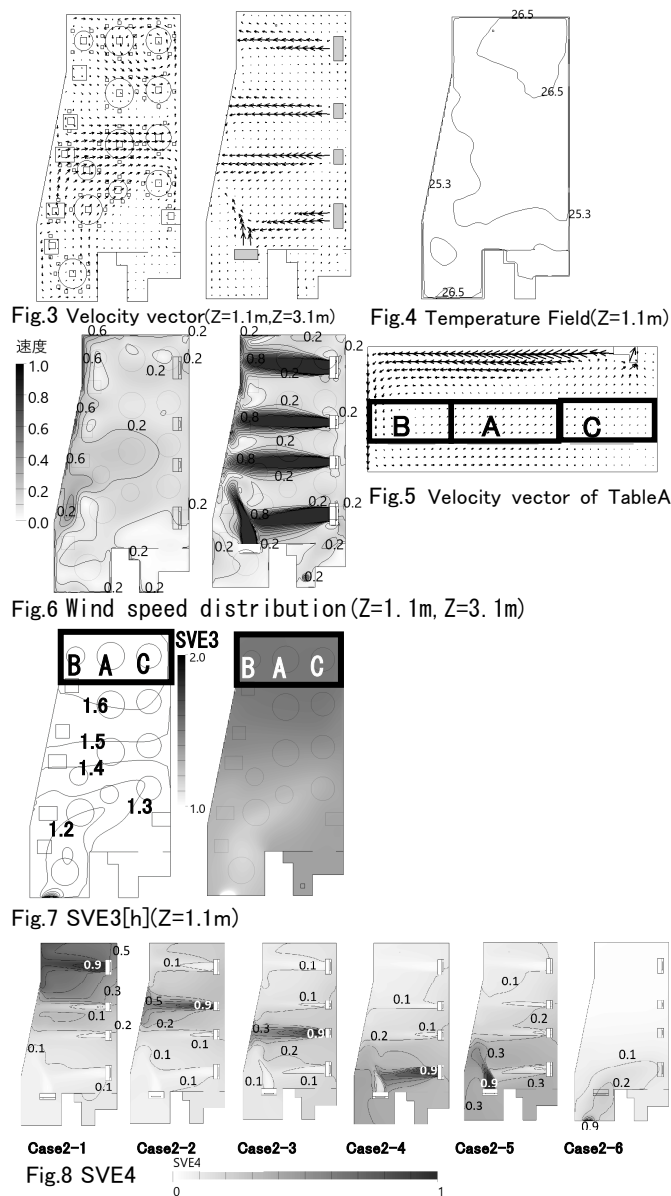


Fig.2 Target diagram

Table 3 Analysis case

Case	Case of SVE	Analysis object Supply/Exhaust/AC
1	SVE3	Supply: 280m ³ /h Exhaust: 280m ³ /h AC1~5: 4080m ³ /h
2-1	SVE4	AC1: 960m ³ /h
2-2		AC2: 600m ³ /h
2-3		AC3: 600m ³ /h
2-4		AC4: 960m ³ /h
2-5		AC5: 960m ³ /h
2-6		Supply: 280m ³ /h



6. CFDシミュレーションによる感染確率に関する検討

6-1. 定常解析と非定常解析

一次感染者はテーブルA(Fig. 14)におり、既往研究の報告では、二次感染者が発生したテーブルA、B、Cの人数やテーブルDも含めた曝露時間が既知であり、上述したSVE3、SVE4の解析結果から、テーブルA、B、Cの領域では、換気効率の低下や不均一濃度場の形成、空調機の循環気流が生じている事を示した。次に、局所換気量で定義されるPFRを算定する領域として、平面的には、テーブルA、B、Cの3Caseと高さ方向では、Fig. 16に示す呼吸域とした。CFD解析は、2つのアプローチで進めた。1つ目は、定常解析にて、温度場、気流場、濃度場の連成解析を行い、導出したPFR(Table 7)をWRMへ展開する事により、局所クラスター発生時の感染確率を既知として、Quanta生成量の範囲を推定した。2つ目は、非定常解析で温度場と気流場を定常状態まで計算して固定(Fig. 3, 4)し、一次感染者が実際にレストランにいた77分間をポイントソースとして既往研究と同じ発生量(318g/h)を与えて、経時変化による濃度上昇と減衰性状を確認し、定常解析結果の濃度との比較をFig. 17に示す。感染リスク低減の手法の確率が目標である中、不均一濃度場が形成される実空間においては、その用途や曝露時間に対応する非定常解析の有用性を確認した。

Table 4 Contribution rate of each exhaust outlet

	Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case2-4	Case2-5	Case2-6
AC1	42.43	23.09	11.99	5.68	6.35	3.85
AC2	23.71	27.59	19.62	9.87	11.01	6.68
AC3	13.87	20.04	22.73	15.05	16.63	10.38
AC4	7.92	11.67	17.92	21.15	22.02	18.81
AC5	4.70	6.86	10.95	26.29	21.63	38.84
Exhaust	7.38	10.74	16.79	21.96	22.36	21.44
Total[%]	100	100	100	100	100	100

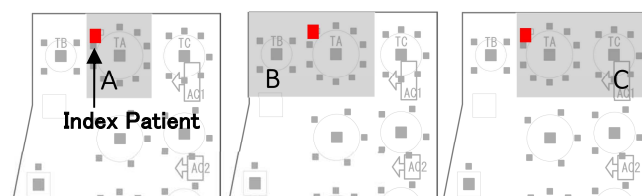


Fig.15 Target area of the plane

Table 5 Analysis summary

Analysis content	Steady analysis, Transient Analysis
Turbulence model	Standard k-ε model
Difference scheme	Quick
Mesh	1,030,000Mesh X92*Y350*Z32(100mm*50mm*100mm)
Soft	FlowDesigner/Ver2020

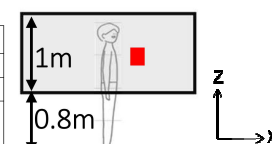


Fig.16 Height of target area

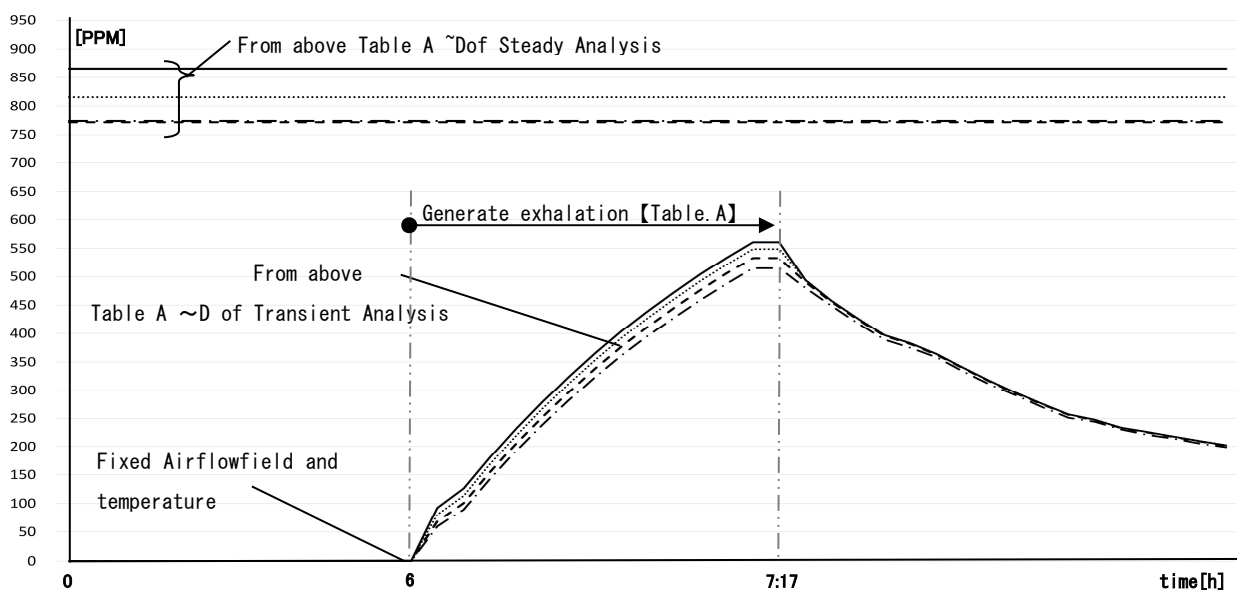


Fig.17 Concentration of Transient Analysis and Steady Analysis

6-2. PFRからQuanta生成量の範囲の推定

Table 7に定常解析から得られた濃度と呼気の発生量の関係から、Fig. 15・16の領域でのPFRの算定結果を示す。その値をWRMのQに代入し、実クラスターの感染確率、呼吸率($p=1.1 \text{ m}^3/\text{h}$)にて導いたQuanta生成量の範囲は、14~92[quanta/h]となる(Table 8)。

Table 7 PFR based on Steady Analysis

No	Table	Q[m ³ /h]	PFR[m ³ /s]	q[g/s]	C[g/m ³]
1	A	46.35	0.01288	0.089	6.91
2	B	63.99	0.01777	0.089	5.00
3	C	56.16	0.01560	0.089	5.70

Table 8 Quanta generation range based on Analysis

Actual infection rate	Case	Pif	I[person]	p[m ³ /h]	q[quanta/h]	t[h]	PFR[m ³ h]
44.44%	A	44.44%	1	1.1	19	1.28	46.35
75.00%	B	75.00%	1	1.1	92	0.88	63.99
28.57%	C	28.57%	1	1.1	14	1.25	56.16

6-3. 定常と非定常解析のQuanta生成量の比較

二次感染者が発生したテーブルA~C、曝露時間が短く二次感染者0人のテーブルDも含めた上で、会話時の呼吸率(1.1 m³/h)の条件下で、CFDの非定常解析と定常解析の異なるアプローチでQuanta生成量を算出し比較検討した(Table 9, Table 10)。Fig. 20, Fig. 21の通り、非定常解析の方が、定常解析よりもQuanta生成量は高くなる。それはWRMのQuantaが濃度と対応している為である。また、既往研究のBuonanno⁴⁾では、会話中のQuanta生成量の90%タイル値は42となり非定常解析値の方が近い値である。算出したQuanta生成量から感染したテーブルA~Cの実感染者数との整合性も非定常解析の方が精度が高い。

6-4. 定常と非定常解析の濃度分布の比較

Fig. 22は、ポイントソースとして呼気の発生量を局所クラスター発生時と同条件での定常解析結果、Fig. 23は、その発生量と時間を局所クラスター発生時と同条件で非定常解析した濃度分布のコンター図(Z=1.1m)である。一次感染者の配置や発生量が同じであるが、定常解析だとFig. 19の通り、各テーブルの濃度が一定になり、且つ、近接するテーブルの濃度も同じ値になるのに対し、非定常解析では、濃度上昇と減衰効果による感染確率や濃度分布から感染確率分布の導出も可能である。また、実空間では建築用途による行為や滞在時間が推定できることから、非定常解析の方がより精度の高い感染確率を求めることができる。

まとめ

本研究より以下の知見を得た。

- 1) 局所クラスターの発生の要因をSVE3, SVE4の各種換気効率にて評価することは有効である。
- 2) 実現象の分析においては、局所領域のPFRからWRMに展開する事で、Quanta生成量の範囲の導出が可能である。
- 3) 感染確率算定に重要なQuanta生成量の導出には、定常解析よりも非定常解析の方が有効である。
- 4) 感染リスク低減を目的とし、不均一濃度場が形成され、その用途による行為や在室時間を条件とする場合は、定常解析よりも非定常解析の方が有効である。

参考文献

- 1) Riley EC, Murphy G, Riley RL. Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *Am. J. Epidemiol.* 1978; 107: 421-432
- 2) Mat Sandberg: Ventilation effective and purging flow rate -A review, International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, The University of Tokyo, 1992
- 3) REHVA COVID-19 Ventilation Calculator for estimation of ventilation effect on COVID-19 airborne infection
- 4) Buonanno et al.: Provides a range of estimates for SARS-CoV-2, 2020a, b
- 5) Lu et al.: COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020, *Emerging Infectious Diseases*, Vol/26, No.7 July 2020 Research Letter
- 6) Li et al.: Aerosol transmission of SARS-CoV-2 Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant (<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.16.20067728v1>)

Table 9 Quanta range of Transient Analysis

Case	Pif	I[person]	p[m ³ /h]	q[quanta/h]	t[h]	Q[m ³ /h]
A	44.44%	1	1.1	28	1.28	65.98
B	75.00%	1	1.1	142	0.88	98.20
C	28.57%	1	1.1	19	1.25	78.85
D	0.39%	1	1.1	1	0.3	84.51
ABCD	36.00%	1	1.1	33	1.01	81.88

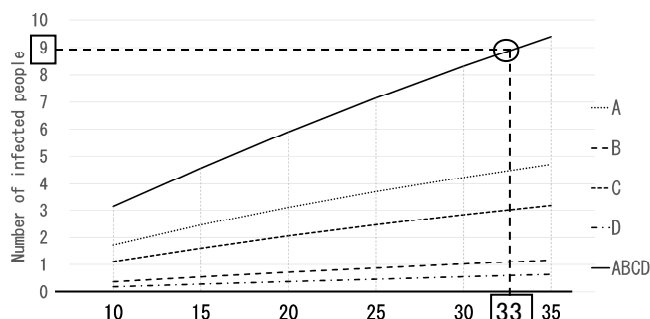


Fig. 18 Quanta generation rate based on Transient Table 10 Quanta range of Steady Analysis

Case	Pif	I[person]	p[m ³ /h]	q[quanta/h]	t[h]	Q[m ³ /h]
A	44.44%	1	1.1	19	1.28	46.35
B	75.00%	1	1.1	92	0.88	63.99
C	28.57%	1	1.1	14	1.25	56.16
D	0.54%	1	1.1	1	0.3	61.03
ABCD	36.00%	1	1.1	23	1.01	56.88

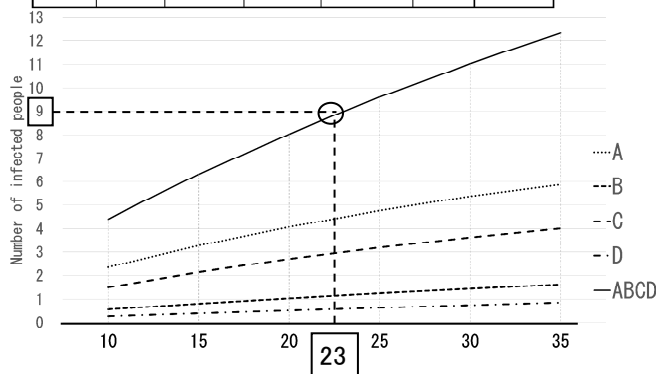


Fig. 19 Quanta generation rate based on Steady Analysis

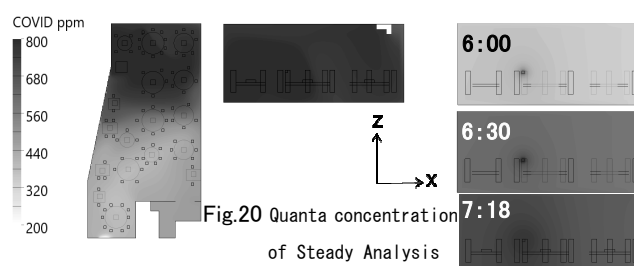


Fig. 20 Quanta concentration of Steady Analysis

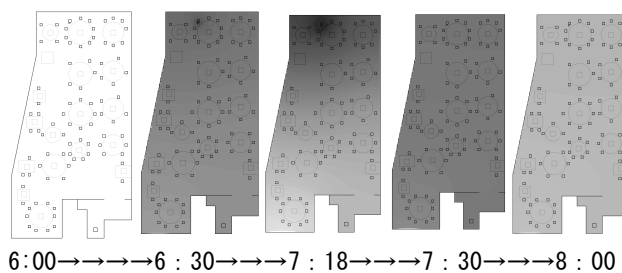


Fig. 21 Quanta concentration of Transient Analysis

*1 東京理科大学大学院工学研究科博士後期課程
*2 東京理科大学 工学部 建築学科 教授・博士(工学)
*3 東京理科大学 工学部 建築学科 助教・博士(工学)

*1 Doctor's Course, Graduate School of Eng., Tokyo University of Science
*2 Professor, Tokyo University of Science, Dr. Eng.
*3 Assistant Professor, Tokyo University of Science, Dr. Eng.