

空気清浄機による
室内花粉除去に関するシミュレーション研究
Simulation study on indoor pollen removal by an air purifier

平成 25 年 1 月

January 2013

橋本 明憲
Akinori Hashimoto

群馬大学大学院工学研究科工学専攻電子情報工学領域

Department of electronics and computing

Graduate school of engineering, Gunma University

目次

第1章	序論.....	3
第1節	花粉症.....	3
第2節	花粉症による弊害.....	4
第3節	既存の花粉症対策.....	5
第4節	国内に於ける室内花粉に関する既往研究	6
第5節	海外に於ける室内花粉に関する既往研究	8
第6節	家庭用空気清浄機.....	10
第7節	室内気流及びエアロゾル挙動シミュレーションに関する既往研究	12
第8節	既存のシミュレーションソフトウェア	13
第9節	研究目的.....	13
第2章	シミュレーションソフトウェア	18
第1節	CAMPAS	18
第2節	乱流シミュレーション.....	19
第3節	LES SGS モデル	22
第4節	Euler の連続式.....	28
第5節	Flux 関数と圧力の Poisson 方程式.....	29
第6節	数値流体計算スキーム.....	30
第7節	LES 代数方程式.....	33
第8節	花粉挙動支配方程式及びスキーム.....	41
第9節	花粉挙動シミュレーションモデル	45
第10節	花粉挙動解析ツール	47
第11節	可視化ツール.....	48
第3章	CAMPAS の妥当性検証.....	54
第1節	CAMPAS 流体解析の妥当性検証の目的	54

第2節	Code_Saturne	54
第3節	CAMPAS と Code_Saturne のパラメータ.....	60
第4節	Code_Saturne との比較結果.....	60
第5節	妥当性検証実験モデル	67
第6節	妥当性検証シミュレーションモデル	71
第7節	妥当性検証実験結果比較.....	74
第4章	CAMPAS による室内花粉除去シミュレーション	79
第1節	瞬時流れ場に於ける花粉除去効率の比較.....	79
第2節	気流可視化結果.....	80
第3節	落下及び吸入花粉の時発展	82
第4節	落下及び吸入花粉初期位置分布	91
第5章	結論.....	105

第1章 序論

本章では、本論文の目的を述べる。第 1 節では花粉症症状のメカニズムを、第 2 節では花粉症症状による弊害を、第 3 節では花粉症対策を述べる。花粉症はアレルギー疾患であるので、花粉症症状を低減するには人体の花粉への暴露を減らすしかない。室内花粉を除去する手法について、工学的アプローチで研究を行った。その室内花粉に関する既往研究を、国内のものを第 4 節に、海外のものを第 5 節にまとめる。室内花粉除去機構として、一般家庭が最も手軽に導入できるのは空気清浄機である。その空気清浄機に関して第 6 節で述べる。室内花粉挙動にはシミュレーションが適していることを第 7 節にまとめ、第 8 節で既存のシミュレーションソフトウェアを挙げ、最後に研究目的を述べる。

第1節 花粉症

1961 年、ブタクサによる国内の花粉症患者が初めて報告^[1]された。1964 年、現在主流であるスギ花粉症が、栃木県日光地方で初めて報告^[2]された。

戦後の拡大造林政策により、スギが短期間に一斉に植えられた。スギは林齢 16～35 年で花粉産生の適齢期に達す為、1976 年に空中スギ花粉は急増^[3]した。その 1970 年代後半からスギ花粉症患者数が増加し始め、その後も Fig. 1.1 に示すスギ花粉の飛散量増加に伴い

患者数は増えていき、現在も累積的に患者数は増加している。2005 年現在の国内患者数は 2,200 万人と推定される^[4]。

花粉症を知るならば、そのメカニズムを理解しなくてはならない。花粉症はアレルギー症状であり、IgE (Immunoglobulin E) 抗体をつくらせるアレルゲン (抗原) としての花粉に、免疫が過剰反応を起こす症状である。花粉症は、鼻漏・

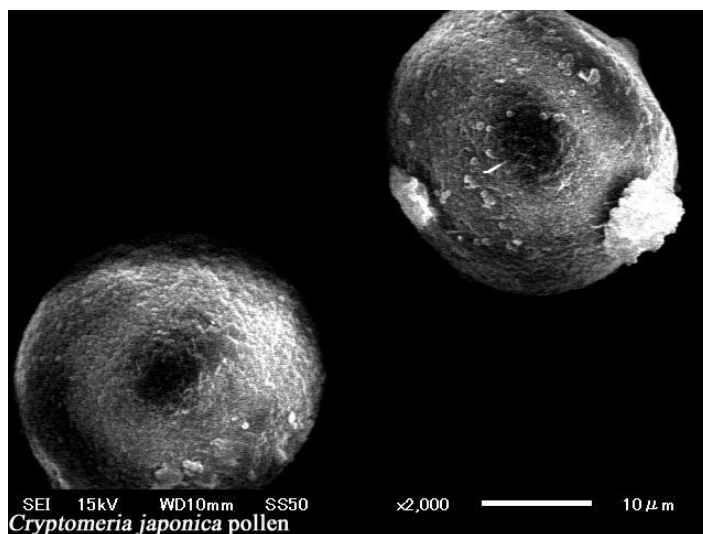


Fig. 1.1. The electron micrograph of cedar pollens. The pollen is a sphere, and its diameter is about 30 micrometers.

鼻閉などのアレルギー性鼻炎，眼の痒みや流涙などのアレルギー性結膜炎，及び喉の痒みや咳などのアレルギー性咽喉頭炎などの，特に眼・鼻・喉のアレルギー疾患の総称である．アレルギーとは“免疫反応が結果として生態に危害を与えてしまう状態”を指す．免疫とは，体内に侵入した病原体などの非自己物質を抗原（異物）として認識し，それを排除するために抗体をつくり，再度接触した抗原と抗原抗体複合物を形成して抗原を排除する生体反応のことである．花粉症では花粉内の複数の成分の中のいくつかが抗原となる．この抗原のうちで，IgE 抗体をつくらせる抗原を特にアレルゲンという．このうちスギ花粉のアレルゲンとして，Cry j I と Cry j II が知られている．斎藤洋三は発症に至る過程を次のように示す^[5]．

- ① 花粉を吸入する．
- ② 鼻粘膜上に沈着し，粘液層で花粉からアレルゲンが遊離する．
- ③ 生体外異物と認識されて，IgE 抗体が産生される．
- ④ 肥満細胞^{*1}や好塩基球表面に結合した IgE 抗体が結合する．（感作の成立）
- ⑤ 新たに花粉の吸入，アレルゲンの遊離が起こる．
- ⑥ 肥満細胞表面に結合した IgE 抗体とアレルゲンとの抗原抗体反応が起こる．
- ⑦ 肥満細胞からケミカルメディエーター^{*2}を放出する．
- ⑧ ケミカルメディエーターによる炎症反応が起こる（発症）

つまり花粉症の症状はケミカルメディエーターが引き起こしているのである．そしてそのケミカルメディエーターのうちの 1 つ，ヒスタミンが特にアレルギー性鼻炎に大きな影響を与えている．そのため，花粉症対策薬では第二世代抗ヒスタミン薬などがよく用いられ，このような対症療法が現在主流になっている．従って今後は根治治療による完治の可能性を探っていくとともに，症状を緩和させるための技術開発が求められている．

*1： 粘膜下組織や結合組織などに存在する細胞．炎症や免疫反応などの生体防御機構に重要な役割を持つ．

*2： 肥満細胞の中に存在する各種化学伝達物質．

第2節 花粉症による弊害

花粉症患者数は年々増加し，現在の国内患者数はおよそ 2,200 万人^[4]とされている．これは日本人口の 6 人に 1 人が発症している計算であり，都心部では 4 人に 1 人が発症しているという．Fig. 1.2 はその増加グラフである．

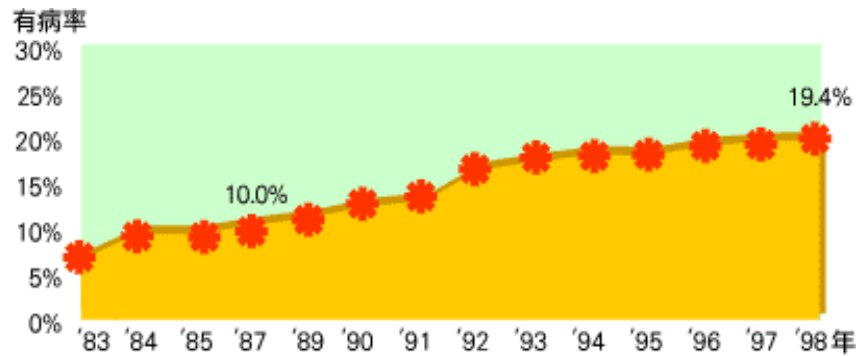


Fig. 1.2. Yearly change of pollinosis patient number. ^[6]

花粉症によるアレルギー症状は睡眠不足の要因にも成り得、呼吸器の支障からウイルス感染症を誘発し、スギ花粉症患者の精神面での QOL (Quality Of Life) が有意に低値を示す ^[7] と指摘される。

花粉症は、日本経済にも大きな影響を与える。その影響はおおまかに医療費、花粉症特需、症状による労働損失や個人消費の落ち込みなどに分類される。医療費や労働損失は年間約 2860 億円との調査結果が、科学技術庁の「スギ花粉症克服に向けた総合研究班」から報告された。また、花粉症特需（花粉症対策グッズ）が 640 億円、花粉大量飛散による個人消費の落ち込みが 7500 億円以上という予測結果がある ^[8]。この個人消費の落ち込みの理由として、花粉症症状の悪化を懸念し外出を控える事が大きいとされる。

第3節 既存の花粉症対策

前節迄の現状により、さまざまな対策が行われており、メディカルケアとセルフケアに大別される。メディカルケアとは、抗ヒスタミン薬を服薬したり、レーザー治療や減感作療法を行ったりする、医療による防衛策である。セルフケアは、花粉飛散情報に応じて外出を控えたり、マスクを着用したり、空気清浄機を導入したりと、花粉との接点を減らす自己防衛策である。

メディカルケアには、薬物治療、減感作療法、外科手術が存在 ^[3] する。主な薬物治療として、抗ヒスタミン剤、抗アレルギー剤、ステロイド剤、漢方薬がある。抗炎症作用のある抗ヒスタミン剤は速効作用があり、現在も市販されている。医師の処方箋の必要な抗アレルギー剤は、症状の初期段階に効果があり、確実に症状発生を抑え、あるいは軽減させる作用がある。抗ヒスタミン剤または抗アレルギー剤では効果がない重症患者には、抗炎症作用が強力であるステロイド剤を使用する場合がある。但し、ステロイド剤は副作用も強いものが多

く、慎重に処方される。減感作療法とはアレルゲン特異的免疫療法であり、花粉症の唯一の根治治療である。これは、長期に渡りアレルギー疾患抗原を皮下注射により体内に侵襲させることで、抗原に対する過敏性を低下させ症状の改善を図る根治治療である。しかしながら、この治療は月一回などの定期的な抗原注射と二年程度の長期的な診療を必要とし、いささかの障害がある。また、症状改善率は八割程度でかつ、継続して抗原注射を行わないと再発する。レーザーによる外科手術は、下鼻甲介粘膜に炭酸ガスレーザーなどを照射し、粘膜の表面 0.1~0.2[mm]程度を焼く手術である。下鼻甲介は嗅裂部とは離れているため、嗅覚が無くなることはない。手術はほぼ無痛であること、アレルギー性鼻炎症状が抑えられる事、保険適用も可能な事により、普及している外科手術である。しかしながら、効果は1~3年であると言われる。よって、花粉症は完治が困難と言われている。

花粉症対策としてのセルフケアは、花粉との接触を減らすことである。花粉との接触がなければ、花粉症症状は表れないからである。屋外でのセルフケアは、屋外花粉飛散量が多いときには外出を控えたり、花粉の付きにくい服を着用したり、眼鏡やマスクを着用したりといった事が挙げられる。屋内でのセルフケアは、如何に花粉を屋内に入れないか、侵入した屋内花粉を如何に除去するかである。即ち、花粉の多い時期の閉窓や、洗濯物の外干しの配慮、屋内に持ち込まれる衣服や洗濯物を払うなどの屋内に花粉を侵入させない対策、こまめな屋内清掃や、空気清浄機などによる屋内浮遊花粉の除去などの既に侵入した屋内花粉を除去する対策である。

セルフケアの1つである室内花粉除去に関して、工学的なアプローチで著者は研究を行っている。

第4節 国内に於ける室内花粉に関する既往研究

室内に花粉を侵入させないのは至難である。花粉が室内に入る経路は、窓などの開口部から直接侵入するものと、人や物に付着し間接侵入するものとの、2種類である。換気や清掃以外に開口部が閉鎖されていれば、直接侵入量は限りなく少なくすることができる。しかしながら、3月~4月に於ける、換気や清掃以外では開口部が閉鎖されている一般家庭の室内でのスギ花粉個数濃度は、1.5~0.5[個/m³](2003年)、0.4~0.3[個/m³](2004年)である^[9]と報告された。これは、一般的な生活を送れば、花粉に注意を払っていても、花粉を屋内に侵入させてしまう事を意味している。

屋外花粉量に対して室内への花粉の直接侵入率は、室内中央では約 1.6%、窓

際では 3.1%，常時開口部では約 26%であることが判明^[10]した．開口部である窓から侵入した花粉は，重力落下により室内中央に到達するまでに落下してしまうため，室内中央よりも窓際の方が多く花粉を検知している．また，換気などの一時的に開口するよりも，常時開口している方が屋外から花粉は直接侵入しやすい．このことから，屋外との開口部は可能な限り閉鎖しておく方が，花粉の直接侵入を抑えられるということが分かる．

間接侵入としては，出入りする人の衣類や，洗濯物に付着して屋内に花粉が搬入される．屋外の空中に浮遊する花粉を落下法にて採取・計数した花粉粒子数を屋外飛散花粉量[個/cm²/day]とすると，外出によって屋外飛散花粉量の 10～30%が人に付着する可能性がある^[11]される．洗濯物には屋外花粉飛散量に比例して花粉が付着するが，付着花粉が落下するなどの条件から，付着量は洗濯物を干す時間には必ずしも比例せず，洗濯物を振るだけで約 50%の花粉を落とせることが分かった．また，洗濯物による搬入では，屋外に T シャツを干した際は 0.3[個/cm²]，タオルには 0.9[個/cm²]花粉が付着する．

直接ないし間接侵入した屋内花粉は約 500[個/m²]に達する事もあり，セルフケアの一環として掃除の励行が有効であると報告^[12]される．一時的に開口されることのある窓際は落下花粉が多いために，そこを掃除することで屋内花粉量を大幅に減らすことが出来るであろう．落下花粉分布などの室内の花粉挙動特性を解析できれば，さらに効率よく室内花粉を掃除により除去できるであろう．また，花粉症患者の発症期間が花粉飛散期間後にも続く理由の一つとして，屋内に持ち込まれた花粉が関係している可能性がある^[13]とされる．これは，屋外から花粉が侵入しなくなっても，室内に侵入した花粉が除去されずに残留してしまう為であると考えられる．

これらの事より，通常的生活を行う上では，室内に花粉を侵入または搬入させないことは極めて困難であり，花粉症患者の室内での QOL が低下することは避けられないと言える．

室内に花粉を侵入または搬入させないのが困難であれば，室内花粉を除去し続けられればよい．花粉除去機構を導入する際，一般家庭に於いて最も手軽に設置できるのは空気清浄機である．平成 24 年 3 月現在の一般世帯に於ける空気清浄機の普及率は 40.0%^[14]であり，推定花粉症患者率よりも高い．これは，室内空気環境への関心が高いということであろう．

野崎らは，スギ花粉粒子を拡散させた拡散チェンバー内で，空気清浄機による 0.3～5.0 ミクロンの微粒子の除去に関する相当換気量を報告している^[15]．相当換気量とは，新鮮空気の供給による空気の入れ換えに相当する体積量への換算値である．清澤らも，同一のチェンバーで同様の実験をし，空気清浄機等の相当換気量から時間に対する室内濃度予測式を提案した^[16, 17]．但し，これら

の対象粒径は一般的なスギ花粉粒子 30[μm]と比較して非常に小さく、花粉粒子に付着している Ubisch 体やオービクル、破碎した花粉粒子を対象としており、花粉粒子そのものを対象としているわけではない。また、床などへの落下花粉も空気清浄機への吸入と同一化している。

このように、室内への花粉の侵入量及び搬入量、空気清浄機運転時での微粒子除去に関する相当換気量といった報告はされているが、空気清浄機運転時での花粉挙動の様子や特性に関しては十分に把握されていないのが現状である。

第5節 海外に於ける室内花粉に関する既往研究

第 4 節では、日本に於ける室内花粉に関する既往研究についてまとめた。日本に於けるスギ花粉症の問題は、植林政策による過剰なスギの植樹と近年における国産木材使用量の低下によってもたらされたものであり、日本国特有の問題である。また、気候により植生が異なるため、花粉によるアレルギーの問題やそれに対する対策・取り組みも、国によって当然のことながら異なってくる。本節では、海外に於ける室内花粉の既往研究について概説する。

行列力学を確立し不確定性原理を提唱するなど、量子力学の創設期に活躍したハイゼンベルクが、花粉症に悩まされていたことは有名な話である。花粉症を全治させるためにヘルゴランド島に避難した際には、殴られたあとではないかと思われるほど顔が腫れ上がっていた、と自伝「部分と全体」^[18]に記されている。このように、ドイツや北欧の国々では古くからイネ科の植物の花粉による花粉症の問題が知られていた。花粉症が枯草熱(hay fever)と呼ばれるのは、イネ科の植物が干し草として利用されており、これらとの接触により鼻炎や発熱などの症状が生じると考えられていたからである。イネ科と同様、カバノキの花粉も、北欧では主なアレルゲンである。これらの花粉の大きな特徴は、その粒径の小ささであり、1[μm]を下回るものも存在する。これは、約 30[μm]程度の粒径を有する日本のスギ花粉と比して非常に小さい。通常の粒径のイネ科やカバノキの花粉は、空気力学上、鼻腔深くに進入できないと考えられる。しかし、気管支でアレルギー症状がみられることから、1[μm]を下回る花粉の存在が疑われ、Spieksma 等はカスケードインパクターによる粒径分析を行い、存在を示した^[19]。粒径が大きい場合は、フィルタ付き換気装置で屋外花粉の室内侵入を容易に防ぐことができる^[20]が、小さくなるほどフィルタでの除去が困難になるため室内侵入量が増える。このような背景から、室内花粉量の定量化はこの地域において重要な課題となっている。

スウェーデンの Holmquist 等は、Acevedo 等が開発した花粉採取フィルタに付

着したアレルゲンの直接定量化法^[21]を用いて、学校やオフィスに於ける室内花粉（カバノキとイネ科）を測定した^[22]。これによれば、花粉由来のアレルゲンの多くは花粉の粒径よりも小さいことが明らかにされた。また、屋外の花粉量が減少しているにもかかわらず、学校の教室では花粉アレルゲン濃度が高くなっていることがあることも判明した。さらに静電集塵機を導入した教室は、導入していない教室と比べて 95% 低下させられることも分かった。また Holmquist 等は、2001 年の論文において、都市部の店舗 1 階における花粉量調査結果を報告した^[23]。特に、空気清浄機導入の効果が調べられており、カバノキ花粉で 26% から 48% の低減でき、イネ科花粉では 17% の低減効果があったことが示された。

ドイツでは Fahlbusch 等が、降下塵としてのハウスダストに含まれるイネ科花粉アレルゲン定量化を行っている^[24, 25]。二つの論文から共通して分かったことは、花粉シーズンではなくとも、ハウスダストには花粉アレルゲンが多く含まれているということである。従って、空中花粉を空気清浄機で除去すること、並びに降下塵を速やかに掃除機で吸い取ること、等がアレルギー症状を長期化させないために必要である。

これまで、北欧の研究を中心にまとめたが、今度は米国の研究に目を向ける。Lee 等は、室内外の空中放線菌、菌類孢子、及び花粉濃度の関係を調べた^[26]。シンシナチ郊外の 6 家庭に協力してもらい、サンプルは 24 時間かけて吸入式エアロゾル捕集器を用いて採取した。2004 年の春と秋、および 2005 年の冬の 3 シーズンにおいて測定がなされた。室内外濃度比（室内濃度／室外濃度）は放線菌が最も高く、平均で 2.857 であった。一方で、菌類孢子と花粉は、室内濃度の方が低く、室内外比は菌類孢子で 0.345 であり、花粉は 0.025 であることが示された。Lee 等は、花粉シーズンに於いても室内外比の値が小さい理由として、室内侵入割合が、他に比べて小さいことを挙げている。つまり、花粉粒径が大きいからである。菌類が高い値を示すは、室内に発生源があり、侵入割合も高いことが示唆されている。

Cheng 等は、二つの隔てられた寝室における花粉や真菌孢子の空中濃度を、換気量や空気清浄機作動の有無によって比較することで効果を調べた^[27]。この調査研究については、以下に詳しくまとめてみたい。Cheng 等の調査は、夏から秋にかけて行われ、寝室は気化冷却装置に備え付けられているダクトから外気が取り込まれ、換気がなされる。この流量を調整し室内を換気する。換気量は、ガス追跡法によって試験期間初期に較正された。花粉や真菌孢子などのバイオエアロゾルは、可動式のスライドガラスにグリスを塗って収集し、光学顕微鏡で計数することで、濃度を評価している。換気量（換気流量を寝室体積で除することで単位時間当たりの換気可能部屋数を示す）が大きい($2.8\text{--}3[\text{h}^{-1}]$)時、空気清浄機を稼働することで初期濃度の 10~20% 程度の低レベルで維持できることが

わかった．中程度の換気率($1\text{--}1.2[\text{h}^{-1}]$)では，80%以上の微粒子を除去できたが，空気清浄機がない場合は重力沈降によって 50%の微粒子が床に堆積することが明らかになった．低い換気率($<0.2[\text{h}^{-1}]$)では，空気清浄機の有無によらず 1 時間以内で 10%程度の濃度に低減することがわかり，これは重力沈降が進んでいることを示している結果となっている．空気清浄機は，室内での人間の活動が少ない時，特に除去機能を発揮することが示された．

既往研究の問題点は，花粉濃度を定量化するためには，評価モデルを必要とすることである．評価モデルには，花粉挙動に関して，壁や床への付着や空気中の輸送など，物理近似が導入されている．しかしながら，空気清浄機や換気による気流は乱流であり，乱流による花粉輸送は非常に複雑であり，空気清浄機の吸気や排気構造によっても大きく変化する．簡単な物理モデルによる評価がどれだけ定量的に信頼できるかは，明らかではない．また，3 次元空間に於ける花粉濃度分布を実測することも，これまでの研究ではなされていない．したがって，乱流中の花粉ダイナミクスをシミュレーションによって解析することは，花粉濃度の定量評価において非常に重要なことであり，過去にも例のないことである．また，花粉濃度の空間分布が明らかにされれば，空気清浄機の吸排気構造，流量や排気角制御など新たな運転方法の開発などにもつながり，花粉症患者の QOL 向上に大きく貢献できる．

第6節 家庭用空気清浄機

空気清浄機は空気清浄システムの中では安価であり，建築後に於いても建築物に一切手を入れずに設置できるため，一般家庭に於いても気軽に導入することの出来る空気清浄システムである．この家庭用空気清浄機は，ファン・フィルタ式，イオン式，及びイオン・ファン式に分類される^[28]．

イオン式空気清浄機は電気集塵方式であり，一般的には針状の正電極と板状の負電極に数[kV]の高電圧をかけることで，正に帯電させた浮遊物質を負極で集塵する．この際，マイナスイオン（空気負イオン）が発生し，人体に好影響を与えるという触れ込みで 2000 年代に話題になった．しかしながら，このマイナスイオンに関しては科学的な正当性が無く，むしろ高電圧放電により発生する低濃度オゾンガスの強い酸化力による，殺菌性や脱臭性の方が効果を及ぼすと考えられる．

ファン・フィルタ式空気清浄機は，シロッコファンによる大きい静圧を利用し，ファン前に設置されたエアフィルタを通して空気を吸い込む方式で，エアフィルタで集塵を行う．このエアフィルタは，通常 HEPA (High Efficiency

Particulate Air Filter)フィルタが用いられる。HEPA フィルタとは、JIS Z8122 により「定格風量で粒径が $0.3\mu\text{m}$ の粒子に対して 99.97%以上の粒子捕集率をもち、かつ初期圧力損失が 245Pa 以下の性能を持つエアフィルタ」と定義されている。エアフィルタには径が数 $[\mu\text{m}]$ の繊維が充填されており、粒子径によってその捕集効率は異なる。これは、さえぎり、完成、重力、拡散および静電気力捕集機構^[29]により粒子が捕集されるため、粒子径によってこれらの各捕集機構による影響が異なる為である。また、繊維径が小さくなるほど完成、拡散、さえぎりの効果が増大するために捕集効率は増大するが、圧力損失が大きくなりファンの動力消費と騒音も増大する。従って、捕集粒径や効率と圧力損失のバランスの取れた HEPA フィルタが現在も主流である。

イオン・ファン式空気清浄機は、ファン・フィルタ式空気清浄機にイオン発生器が付属したタイプで、現在の主流である。

各社からはイオン発生器の付属した空気清浄機が発売されており、現在は主力製品となっている。イオン発生器は、例えば S 社のプラズマクラスター、P 社のナノイー、D 社のアクティブ・プラズマイオンなどである。これらは、プラズマ放電や高電圧によりイオンを発生させ、浮遊微生物の抑制効果や脱臭の効果があるとされている。しかしながら、S 社イオン発生器に於いて、イオン発生器のみの運転では浮遊微生物粒子は自然減衰と変わりなく相当換気回数も低いと報告^[30]される。各社のイオン発生器による浮遊微生物抑制や脱臭の効果に関しては甚だ疑問であるが、放電を行っている以上少なからずオ존は発生しているので、各社が広報している効果はオゾンによるものではないかと考えられる。

空気清浄機メーカー各社は、ドライアイスによる空気清浄機の風洞実験動画を HP 上で公開し、イオン発生器だけではなく、空気清浄機の気流生成技術にも広報に力を入れている。また、2 方向の排気を行ったり、フロントパネルが可動し空気清浄機下部からも吸引したりと、消費者の視覚に訴える吸排気機構に力を入れているようである。しかしながら、その空気清浄機が生成する気流分布や、花粉などを含むエアロゾル（浮遊粒子状物質）の挙動解析などは、空気清浄機メーカーからはほとんど報告されていない。

空気清浄機の生成する気流および花粉挙動を解析することは、高効率な空気清浄機の吸排気形状を提案したり、室内の花粉除去手法の助言になったりと、工学的に有益だと考えられる。室内の花粉挙動特性を把握するには、実験とシミュレーションの 2 種が考えられる。実験を行うには、実験空間及び計測機材が必須である。実験空間は、閉鎖されており外界の影響を受けない必要がある。計測機材は、パーティクルカウンタや微粒子可視化カメラなどが存在するが、それらはやはり高価である。また、それら機材を用いたとしても、リアルタイ

ムにかつ三次元的に計測するのは不可能である。それに、パーティクルカウンターは通常吸気によって吸い込まれた粒子数を計数するため、室内気流への影響を与えてしまい、単位時間あたりに平均された個数を出力するのであって、完全なリアルタイムではない。複数のパーティクルカウンターを適切に配置すれば、実験空間の部分点抽出された位置での花粉粒子の時間変化は計測することが出来るが、精密に実験空間内を計測しようとするとかかなりのパーティクルカウンターが必要になる。既に実験環境が整っているならば、パーティクルカウンターの外乱を無視するという仮定が必要だが、それなりのパーティクルカウンターを持ってして実験空間内の花粉粒子個数時間推移を把握することは可能であろう。

コンピュータ・シミュレーションであれば、パーティクルカウンターなどの計測機器の影響を受けず、部分点抽出の間隔も非常に小さく、かつ非常に小さな時間刻みで、気流や花粉挙動を解析することが出来る。従って、著者はシミュレーションにより、空気清浄機により生成される気流及び花粉挙動に関して研究している。著者は、数値流体力学及びエアロゾル挙動解析、可視化を行うソフトウェアを開発した。

第7節 室内気流及びエアロゾル挙動シミュレーションに関する既往研究

本節では、室内に於けるエアロゾル挙動シミュレーションの既往研究について概説する。

台湾の複数部屋から成る建物に於いて、いくつかの窓を開けた換気パターンでの浮遊粒子状物質濃度のシミュレーション研究^[31]では、どの換気パターンでもよく 10[μm]の粒子を自然換気により除去できている。しかしながら、1[μm]や 2.5[μm]では、室外から搬入されてしまい、逆に増加するパターンもある。この研究のように、室内気流をシミュレーションし、エアロゾルを濃度として解くアルゴリズムも存在する。

気流シミュレーションで得られた流れ場を用いて、エアロゾルの濃度ではなく、粒子として挙動をシミュレーションする場合が多い。家具のある室内を 2 つの異なる手法で室内気流を解き、エアロゾル挙動を行った結果、実験結果と同様の結果を示したとの報告^[32]もあり、正しく計算できていればシミュレーションの結果には信用性がある。また、居住空間の換気システムをシミュレーションした研究^[33]では、粒子発生源に関わらず室内循環流の位置を通過する事が分かっており、室内気流を解くことが重要である。

このように、乱流流れ場をシミュレーションにより解き、エアロゾルを粒子追跡する手法が脚光を浴びている。

第8節 既存のシミュレーションソフトウェア

既存の流体解析ソフトウェアは、商用及び非商用に分類できる。商用ソフトで有名なものは、STAR-CD^[34]、Fluent^[35]である。これらは、粒子を Lagrange 的に追跡しながら流れ場を Euler 的に解く、Lagrange 混層流を解析することができる。従って、本論文の目的である、室内花粉挙動解析を行うことが出来るだろうと思われるが、非常に高価である。

非商用のライセンスフリーの流体解析ソフトとしては、Code_Saturne^[36]、OpenFOAM^[37]が挙げられる。Code_Saturne では、Lagrange 粒子追跡を行う事はできるが、第2章2節にて述べる RANS などの平均流れ場での粒子追跡しかできず^[38]、時発展する流れ場での粒子追跡を行う事が出来ない。OpenFOAM も同様に、ポストプロセスで Lagrange 粒子追跡を行う。Code_Saturne 及び OpenFOAM では、時間変動する流れ場での粒子挙動を解析することが出来ず、乱流場での粒子追跡もできない。

また、商用・非商用問わず、これらのソフトはシミュレーション結果を独自形式で出力するため、他のソフトとの連携が取りにくく、標準搭載されていない解析を行いにくい。そして、機能追加のためのシミュレーション・コードの改変などは非常に困難であり、研究目的の内容を再現できない場合がある。

フリーの可視化ツールも存在するが、それらが PC に要求するスペックは非常に高く、そして操作が非常に繁雑である。

著者が開発した室内粒子挙動解析ソフトでは、時間変動を再現した流れ場での Lagrange 粒子追跡を可能とし、また、通常は無視される解像度以下の乱流変動を考慮した粒子追跡も行う事が出来る。可視化ツールは、非常に動作が軽く、ノート PC でも可視化が行える。

第9節 研究目的

花粉症はアレルギー疾患であるため、アレルゲンである花粉への人体の暴露がなければ、花粉症症状は生じえない。花粉除去に最も良く利用されているのは空気清浄機であるが、空気清浄機による花粉除去及び花粉挙動はあまり報告されていないのが現状である。従って、気流シミュレーションと花粉挙動シミュレーションを行い、空気清浄機による花粉除去及び挙動解析を行う。

室内気流及び粒子追跡シミュレーションには、様々な計算上のモデルやスキ

ームがあり，これらを複合または追加してシミュレーションしていく必要がある．本研究は，室内気流とエアロゾル粒子挙動をカップリングさせて同時に時発展させ，それを並列計算により高速に解くことを目的としている．従って，発展性・拡張性を保持するため，室内気流及び花粉挙動のシミュレーションを行い，そのデータの解析及び可視化を行うツール群を開発した．このツール群の粒子挙動シミュレーションでは，乱流場を再現し時間的に変動させながら粒子追跡ができ，また解像度以下乱流の影響下での粒子追跡も可能である．この2点は，非商用の `Code_Saturne` では出来ない．

この開発したソフトウェアを用いて，高効率花粉除去に関する研究を行う．

第2章では，この開発したソフトウェアの解説と，シミュレーション手法，可視化手法を述べる．第3章では，開発した気流シミュレーション結果を解析し，他の流体解析ソフトと比較検討する．第4章では，花粉挙動シミュレーション結果をまとめる．

参考文献

- [1] 荒木英斉：花粉症の研究 II 花粉による感作について，*アレルギー* **10**(6)，354-370 (1961).
- [2] 堀口申作，斉藤洋三：栃木県日光地方におけるスギ花粉症 Japanese Cedar Pollinosis の発見，*アレルギー* **13**，16-18 (1964).
- [3] 佐橋紀男：花粉アレルギー，*ファルマシア* **32**(6)，661-665 (1996).
- [4] (株)シード・プランニング：2005 年版アレルギー性鼻炎（花粉症）患者数の動向，URL: <http://www.seedplanning.co.jp/report/00478.html>（アクセス日：2009.11）.
- [5] 齊藤洋三，井出武：花粉症の科学，化学同人 (1994).
- [6] health クリニック：花粉症患者数の増加グラフ，URL: <http://www.health.ne.jp/library/3000/w3000519.html>（アクセス日：2012.09）.
- [7] 藤井つかさ，萩野敏，有本啓恵，入船盛弘，岩田伸子，大川内一郎，菊守寛，瀬尾津，竹田真理子，玉城晶子，馬場謙司，野瀬道宏：花粉大量飛散ピーク時における花粉症患者の QOL：SF-8 を用いて，*Japanese Journal of Allergology* **55**(10)，288-1294 (2006).
- [8] (株)第一生命経済研究所経済調査部：花粉の大量飛散が日本経済に及ぼす影響，URL: http://group.dai-ichi-life.co.jp/dlri/news/pdf/nr2004_29.pdf（アクセス日：2012.09）.
- [9] 大橋えり，吉田伸治，大岡龍三，宮沢博：室内空気のスギ花粉個数濃度とアレルギー(Cry j1)濃度について，*日本建築学会環境系論文集* **594**，39-43 (2005).
- [10] 清澤裕美，吉澤晋：住宅等における花粉の侵入と被曝量，*日本建築学会環境系論文集* **548**，63-68 (2001).
- [11] 清澤裕美，吉澤晋：住宅などへの花粉搬入量，*日本建築学会計画系論文集* **558**，37-42 (2002).
- [12] 高橋裕一，宮沢博，阪口雅弘，井上栄，片桐進，名古屋隆生，渡辺雅尚，谷口美文，栗本雅司，安枝浩：室内塵中の Cry jI 量と空中スギ花粉数との関係，*Japanese Journal of Allergology* **43**(2)，97-100 (1994).
- [13] 野崎淳夫，清澤裕美，吉澤晋：家庭用空気清浄機の汚染物質除去性能と室内濃度予測に関する研究（その 1），*日本建築学会環境系論文集* **576**，37-42 (2004) .
- [14] 内閣府経済社会総合研究所景気統計部：消費動向調査 平成 24 年 3 月実施調査結果，URL: <http://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/2012/1203ippansetai.pdf>（アクセス日：2012.09）.

- [15]野崎淳夫, 櫻庭春毅, 一条佑介: 家庭用空気清浄機の花粉粒子除去性能に関する研究, *日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 環境工学II* **2009**, 855-856 (2009).
- [16]清澤裕美, 野崎淳夫, 吉澤晋: 家庭用空気清浄機の花粉粒子除去性能と室内濃度予測に関する研究, *日本建築学会関東支部研究報告集 I* **74**, 599-602 (2003).
- [17]清澤裕美, 野崎淳夫, 吉澤晋: 家庭用空気清浄機の汚染物質除去性能と室内濃度予測に関する研究(その 2), *日本建築学会環境系論文集* **596**, 29-35 (2005).
- [18]W. ハイゼンベルク, 山崎和夫訳: 部分と全体—私の生涯の偉大な出会いと対話, みすず書房 (1974).
- [19]F. Th. M. Spieksma, J. A. Kramps, A. Plomp, and H. K. Koerten: Grass-pollen allergen carried by the smaller micronic aerosol fraction, *Grana* **30**, 98-101 (1991).
- [20]O. A. Seppänen, and W. J. Fisk: Summary of human responses to ventilation, *Indoor Air* **14** (Suppl. 7), 102-118 (2004).
- [21]F. Acevedo, O. Vesterberg, and C. Bayard: Visualization and quantification of birchpollen allergens directly on air-sampling filters, *Allergy* **53**, 594-601 (1998).
- [22]L. Holmquist and O. Vesterberg: Quantification of Birch and Grass Pollen Allergens in Indoor Air, *Indoor Air* **9**, 85-91 (1999).
- [23]L. Holmquist and O. Vesterberg: Airborne Birch and Grass Pollen Allergens in Street-Level Shops, *Indoor Air* **11**, 241-245 (2001).
- [24]B. Fahlbusch, D. Hornung, J. Heinrich, H.-M. Dahse, and L. Jäger: Quantification of group 5 grass pollen allergens in house dust, *Clinical and Experimental Allergy* **30**, 1645-1652 (2000).
- [25]B. Fahlbusch, D. Hornung, J. Heinrich, L. Jäger: Predictors of group 5 grass-pollen allergens in settled house dust: comparison between pollination and nonpollination seasons, *Allergy* **56**, 1081-1086 (2001).
- [26]T. Lee, S. A. Grinshpun, D. Martuzevicius, A. Adhikari, C. M. Crawford, J. Luo, T. Reponen: Relationship between indoor and outdoor bioaerosols collected with a button inhalable aerosol sampler in urban homes, *Indoor Air* **16**, 37-47 (2006).
- [27]Y. S. Cheng, J. C. Lu, and T. R. Chen: Efficiency of a Portable Indoor Air Cleaner in Removing Pollens and Fungal Spores, *Aerosol Science and Technology* **29**, 92-101 (1998).
- [28]大村道雄, 入江建久, 池田耕一: 室内型空気清浄機のパフォーマンス比較(その 4) ファン・フィルタ式, イオン式・ファン式の総括, *日本建築学会学術講演梗概集(D-2)* **1999**, 807-808 (1999)

- [29] 高橋武士：エアフィルタの集塵理論と静電気効果，*エアロゾル研究* **3**(4)，283-291 (1988)
- [30] 遠藤めぐみ，柳宇，鍵直樹，石岡沙保里：空気清浄機による浮遊微生物粒子の除去性能に関する研究，*日本建築学会関東支部研究報告集(環境工学)* **2010**(II)，73-76 (2011)
- [31] Hong-Ming Kao, Tsang-Jung Chang, , Yi-Fang Hsieh, Chia-Ho Wang, Cheng-I. Hsieh: Comparison of airflow and particulate matter transport in multi-room buildings for different natural ventilation patterns, *Energy and Buildings* **41** (Issue 9), 966–974 (2009)
- [32] Qingyan Chen, Zhao Zhang: Prediction of particle transport in enclosed environment, *China Particuology* **3** (Issue 6), 364–372 (2005)
- [33] 伊藤一秀，加藤信介，村上周三：Particle Tracing による Visitation Frequency, Purging Flow Rate の基礎解析 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究，*日本建築学会計画系論文集* **534**，41-48 (2000)
- [34] CD-adapco：STAR-CD，URL: http://www.cd-adapco.com/products/star_cd/（アクセス日：2012.12）
- [35] ANSYS：ANSYS Fluent - 汎用熱流体解析ソフトウェア，URL: <http://ansys.jp/products/fluid/fluent/>（アクセス日：2012.12）
- [36] EDF：Introduction Code_Saturne，URL: <http://research.edf.com/research-and-the-scientific-community/software/code-saturne/introduction-code-saturne-80058.html>（アクセス日：2012.09）
- [37] OpenFOAM：The OpenFOAM® Foundation，URL: <http://www.openfoam.org/>（アクセス日：2012.12）
- [38] EDF：Code Saturne version 2.3.0 practical user's guide，URL: <http://code-saturne.org/cms/sites/default/files/user-2.3.pdf>（アクセス日：2012.12）

第2章 シミュレーションソフトウェア

室内花粉挙動を解析するソフトウェアを開発した。そのソフトウェアの概要を第 1 節にまとめる。室内気流は乱流であるため、乱流シミュレーション手法について第 2 節にまとめる。第 3 節から第 7 節では、気流シミュレーションの代数方程式及び計算スキームについて述べる。第 8 節から第 9 節では、花粉挙動のシミュレーション方程式及び手法を述べる。第 10 節では花粉挙動シミュレーション結果の解析に関して、第 11 節では気流及び花粉挙動結果の可視化についてまとめる。

第1節 CAMPAS

気流シミュレーション及びエアロゾル挙動シミュレーション、解析及び可視化ツールから成るソフトウェア群 Computational fluid dynamics and Aerosol Motion Property Analysis Suite (CAMPAS)を開発した。その CAMPAS のフローを Fig. 2.1 に示す。

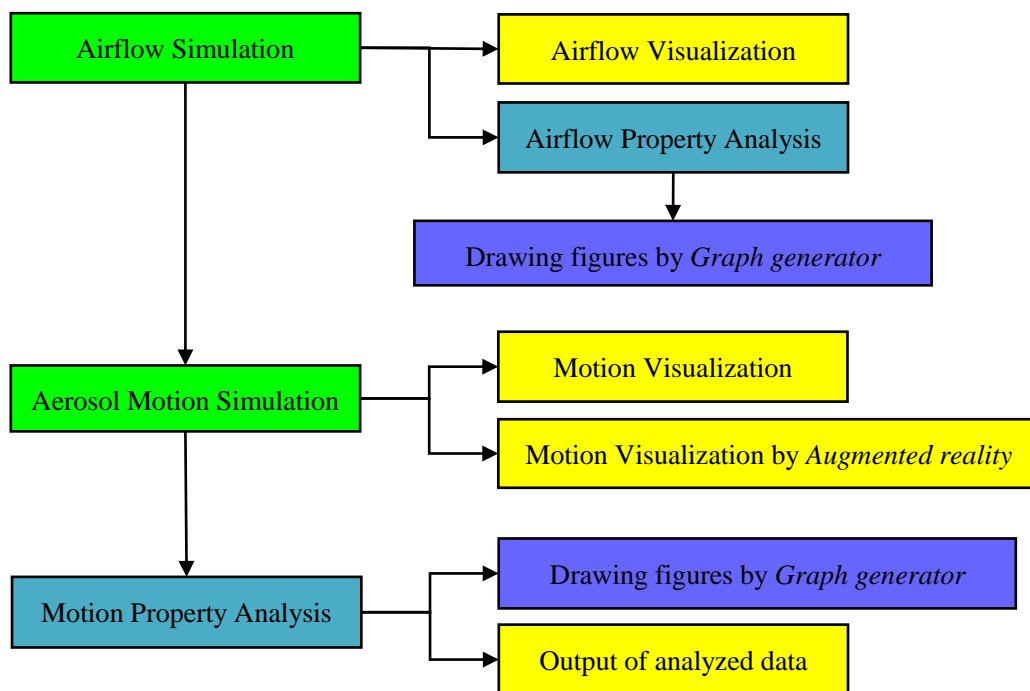


Fig. 2.1. The calculation procedure of the CAMPAS.

気流シミュレーションでは空間を離散化して流れ場を Euler 的に解き，その気流データを用いてスギ花粉粒子を Lagrange 的に追跡し，エアロゾル挙動をシミュレーションする．気流シミュレーション結果は，ファイル I/O 高速化のために，メモリ上の構造体配列を Binary 形式でそのまま出力する．その生データは，三次元空間の倍精度浮動小数型のベクトルデータであるため，そのままでは有意な知見を得ることが出来ない．また，エアロゾル挙動シミュレーションでも，粒子の三次元位置情報を時刻毎にテキスト形式で出力するため，理解するのは非常に難しい．従って，結果の考察を行う為に，そのデータを可視化，グラフ化するための解析ツールも併せて開発した．

気流は時々刻々と変化するため，気流シミュレーションと花粉挙動シミュレーションを同時に解き時発展させると，より現実に近い挙動結果が得られる．しかしながら，気流計算には非常に時間がかかり，本論文のモデル・条件にて花粉挙動と同時に解くと，Phenom II プロセッサでは 200 日以上計算に要すると思われる．従って，本論文では計算資源の関係上，気流シミュレーションを行って得られた，時間変化しない流れ場を用いて，花粉挙動シミュレーションを行った．

第2節 乱流シミュレーション

流体とは圧力差の緩衝によって生成されるものであり，本来は圧縮性流体である．しかしながら，密度変化が約 5%以下になる Mach 0.3 以下では，それを近似的に無視でき，密度変化のない非圧縮性流体と見なすことが出来る．空気清浄機による吸排気流速が Mach 0.3 を超えることは有り得ないため，空気清浄機を設置した室内気流を，非圧縮性粘性流体として解析を行う．

本論文では，Fig. 2.2 に示す前面吸気モデルと側面吸気モデルの 2 つの空気清浄機モデルを設定する．前面吸気モデルでは前面全域を吸気面とし，側面吸気モデルでは両側面全域を吸気面とする．双方共に流量 $7.81[\text{m}^3/\text{min}]$ の上面排気を仮定しており，上面全域に於いて $1.5[\text{m/s}]$ で排気する．排気流量と吸気流量は同値であり，計算空間への吸排気流量は保存されている．

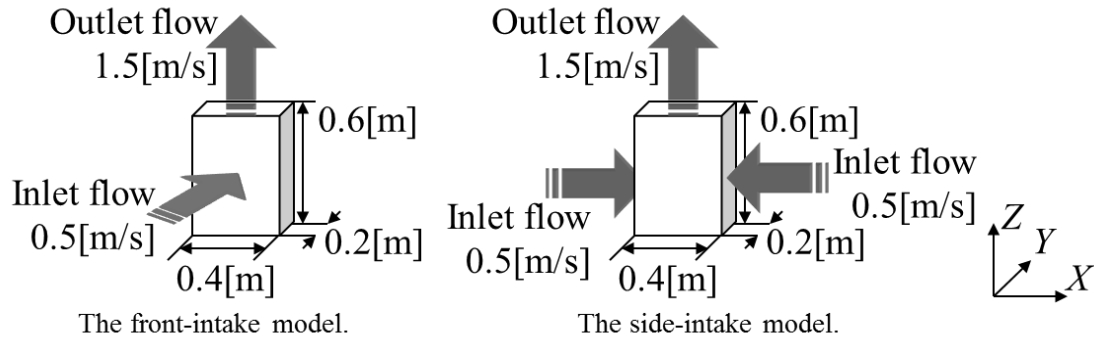


Fig. 2.2. The front-intake (left) and side-intake (right) air purifier models. The size of the front-intake air purifier equals the side-intake. In both the front-intake and side-intake model, flow rate is $7.81 \text{ [m}^3\text{/min]}$, exhaust velocity is 1.5 [m/s] and intake velocity is 0.5 [m/s] .

通常の生活空間では空気清浄機を部屋の隅に置くことが多いが、空気清浄機の後方領域での花粉挙動を調べるために、空間中央に配したモデルを用いて、気流解析を行う。

本論文では、空間を連続量[m]と離散量[grid]の二種で表記しており、前者に(X, Y, Z)、後者に(i, j, k)を用いることとする。Table 2.1 では、頂点座標を用いて、空気清浄機の高さと位置を離散量[grid]で示している。例えば X 方向の横幅は、44-52 の頂点間であるので、 $8[\text{grid}] \times 0.052[\text{m/grid}] = 0.416[\text{m}]$ となる。

一般的に、Reynolds 数が 3,000 以上の流れ場は、乱流であるとされる。計算空間の Reynolds 数は流入境界によって決定されるため、計算空間への流入部、即ち空気清浄機の排気面を代表速度・長さで定義すれば、Tables 2.1, 2.2, Fig. 2.3 の代表速度 $U=1.5[\text{m/s}]$ 、代表長さ $L=41.6[\text{cm}]$ 、動粘性係数 $\nu=1.54 \times 10^{-5}$ より、本モデルの Reynolds 数は $Re=UL/\nu=4.1 \times 10^4$ である。従って、空気清浄機を設置した室内気流は乱流である。

Table 2.1. Parameters of the simulation model. The room size and the grid size use the X, Y, Z axis, and the air purifier size uses i, j, k .

Parameters	$X (i)$	$Y (j)$	$Z (k)$
Room size [m]	5.0	5.0	2.5
Division number [count]	96	96	96
Grid size [m]	0.052	0.052	0.026
Air purifier size [grid]	44-52	46-50	0-24

Table 2.2. Parameters of the airflow simulation. The dynamic viscosity is the value of atmospheric air at 25 degrees Celsius. The intake velocity of the front-intake air purifier model and the side-intake model are the same value.

Parameters		Value
Air purifier	Intake velocity U_{in} [m/s]	0.5 (front and side intake)
	Exhaust velocity U_{out} [m/s]	1.5
Initial Value of Pressure p [Pa]		1.0×10^5
Dynamic viscosity ν [m ² /s]		1.54×10^{-5}
Time interval Δt [sec]		1.0×10^{-3}

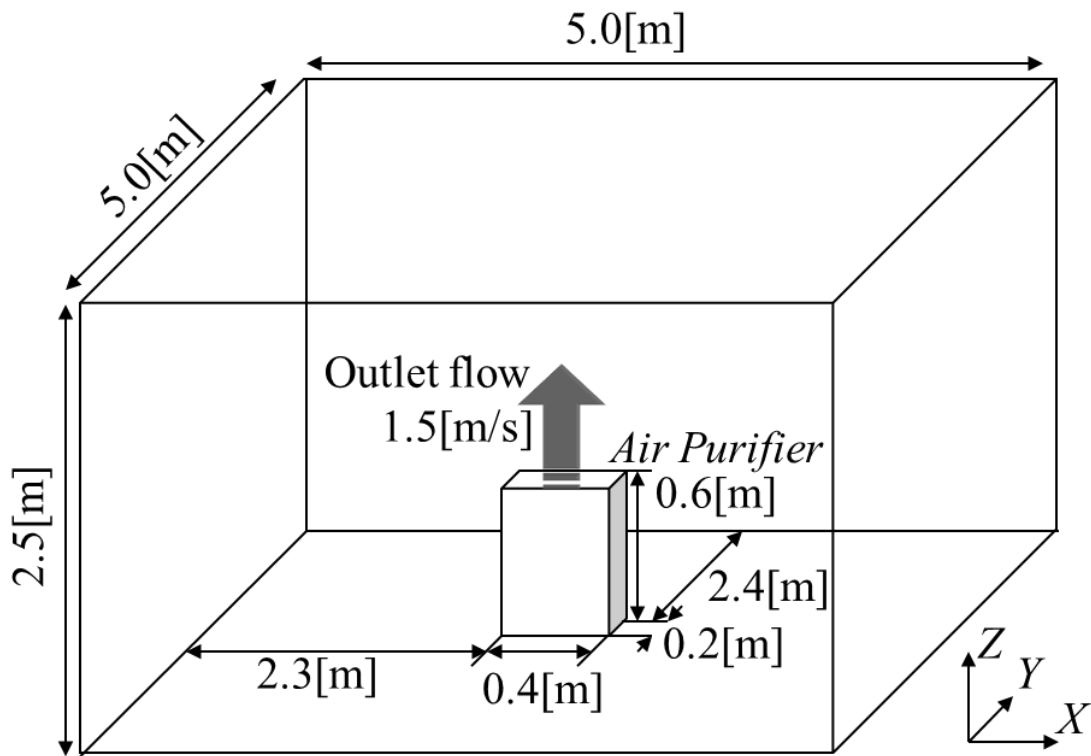


Fig. 2.3. The simulation model. The air purifier of the front-intake or side-intake model exists at the center of the square room.

乱流を数値計算するモデルは，DNS (Direct Numerical Simulation)，LES (Large Eddy Simulation)，RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)に大別される．DNS は乱流の直接数値シミュレーションであり，物理モデルを用いない格子解像度までの高精度計算であるため，Reynolds 数の 9/4 乗かそれに準ずる格子点数が必要^[1]になる．本モデルでは 2.4×10^{10} 個，即ち各軸方向に 2,900 分割しなければなら

ない．不十分な解像度で DNS を行った場合，格子解像度(GS: Grid-Scale)以下のスケールの渦をカットオフし無視していることになる．このエネルギー散逸を担う小スケールの渦は，乱流エネルギーのカスケードによる大スケールの渦との相互作用を持っているため，格子解像度以上の渦にも影響を与える．従って，小スケールの渦を解像できる程度の格子点数を用意するか，格子解像度以下のスケールの渦と相互作用させるモデルが必要になる．そのカットオフされる格子解像度以下のスケール(SGS: SubGrid-Scale)の渦をモデル化し，解像可能な大スケール渦にカスケードさせるのが，LES である．

LES では DNS と同様に GS を直接計算しているが，前述のように SGS を GS に作用させているため，DNS よりも粗い格子で解くことが可能である．RANS では，Navier-Stokes 方程式自体をアンサンブル平均してしまい，変動成分をモデル化するため，平均的流れだけを知ることが出来る．GS を含めた変動成分を全てモデル化してしまっているため，RANS は LES よりも粗いメッシュで解くことができ，計算負荷が小さい．

本モデルでは Reynolds 数が大きすぎるために，計算資源の関係上 DNS を選択することはできない．RANS は平均流れ場を解析しているために，気流シミュレーションとエアロゾル挙動シミュレーションを同時にカップリングさせて解くといった発展性に乏しい．従って，本論文では，計算負荷が現実的かつ，発展性のある LES を選択した．

第3節 LES SGS モデル

LES は，SGS (SubGrid-Scale)流速をモデル化し，GS (Grid-Scale)流速を直接解く．その SGS 流速のモデル化が LES の肝要であり，LES の Navier-Stokes 方程式 (2.3.1)の τ_{ij} が SGS 応力テンソルである．

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu \bar{S}_{ij} - \tau_{ij}) \quad (2.3.1)$$

ここで， u_i は GS 流速， P は圧力， ν は動粘性係数， S_{ij} は歪み速度(Strain rate)テンソルである．上式は既に代表流速及び代表長さで規格化されているが，それを示す表示はしていない．また，上付きバーは SGS 流速をカットオフするフィルタ操作を表しており，規格化を示すものではない．以降，規格化及びフィルタ操作に関する表示は行わない．

SGS 応力テンソルは，下式に示すように Leonard 項 L_{ij} ，Cross 項 C_{ij} 及び Reynolds 応力項 R_{ij} に分解される．Leonard 項と Cross 項は同時に無視できる．

$$\begin{aligned}\tau_{ij} &= L_{ij} + C_{ij} + R_{ij} \\ L_{ij} + C_{ij} &= 0\end{aligned}\tag{2.3.2}$$

Reynolds 応力テンソルに Smagorinsky モデルを適用すると, 以下となる. 通常, LES と言えば, Smagorinsky モデルを示す.

$$\begin{aligned}R_{ij} &= -2\nu_T S_{ij} \\ \nu_T &= C\Delta^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \\ S_{ij} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ \Delta &= \sqrt[3]{\Delta_x \Delta_y \Delta_z}\end{aligned}\tag{2.3.3}$$

ここで, ν_T は渦動粘性係数, Δ_i は各軸方向の計算格子幅, C は Smagorinsky 定数 C_s の 2 乗に相当する動的なモデル係数である. この C の取り扱いが渦粘性に大きな影響を与える. 最も単純な Smagorinsky モデルでは, $C=C_s^2$ とされる. Smagorinsky 定数は物理的な仮定を必要とする経験定数であり, 普遍定数ではない. 通常 Smagorinsky 定数の理論値は 0.173 とされているが, 実験値などとの整合性を取るために, 平行平板間流れでは 0.1, 一様等方性乱流では 0.2 とする場合が多い. この差異を確認するため, Smagorinsky 定数 0.1 及び 0.25 の, 2.2 節の条件での流れ場を解析した. 5[s]での気流解析結果を, $X=2.5[\text{m}]$ で切り取った YZ 平面のベクトルプロットとして Fig. 2.4 に示す. この図では, ベクトルの長さと色は流速の常用対数に比例している. ベクトル色は加色法によって示されており, 赤が最大流速, 青が最小流速であり, 青, 水色, 緑, 黄色, 赤の順に強くなる. Smagorinsky 定数が 0.1 の場合には渦動粘性係数が小さくなるために, 乱れが強くなっている. 0.25 では乱れが弱く, 天井に沿う排気主流の到達距離も 0.1 の時より短い. このように, 目視で明らかに差異が確認できるほど, 流れ場に与えるモデル係数 C の影響は大きい.

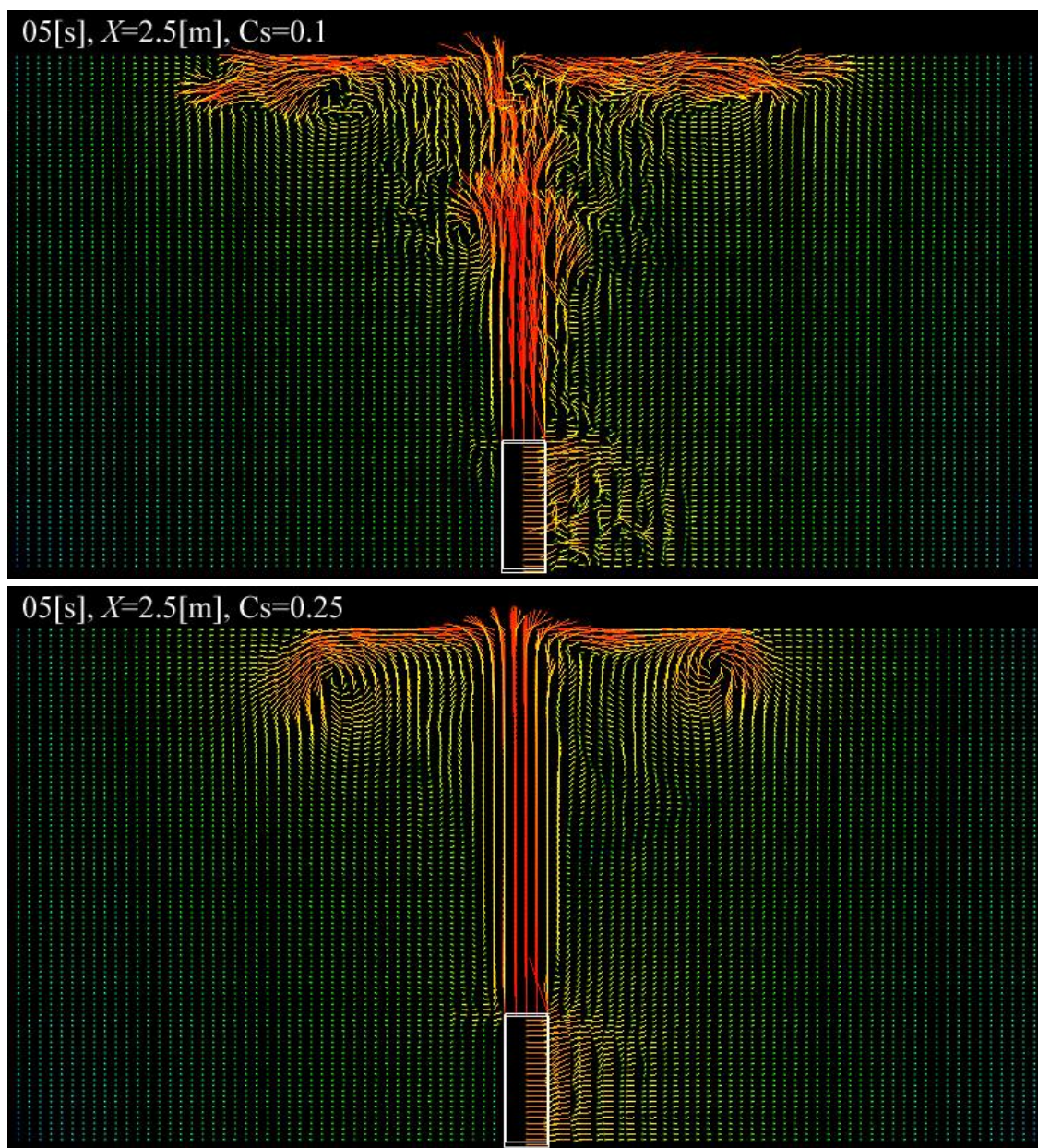


Fig. 2.4. Vector plots on the Y - Z plane of the indoor airflow created by the front-intake air purifier. Figures indicate 5 seconds after starting up the air purifier, respectively. The vector color and the vector length indicate the volume of flow velocity in proportion to the common logarithm. Red and blue of the vector color indicate maximum velocity and minimum, and yellow is 75%, green is 50%, cyan is 25%.

壁面などの non-slip 条件となる境界面では、壁面での乱れを含む接線方向の GS 流速は 0 [m/s]である。しかしながら、(2.3.3)に示すように、GS 流速に勾配が

あると歪み速度テンソルの大きさが 0 に成らないために、渦動粘性係数が 0 に成らない。

標準 Smagorinsky モデルでは、減衰関数 f_s を用いて、モデル係数 C を以下と定義する。

$$C = (C_s f_s)^2$$

$$f_s = 1 - \exp \frac{-y^+}{A^+} \quad (2.3.4)$$

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu}$$

ここで、 u_τ は摩擦速度、 y は境界からの距離で、 y^+ はその無次元化距離、 A^+ は無次元定数である。減衰関数には、無次元定数を 25 とする上式の van Driest 関数がよく用いられる。無次元化距離 y^+ に対する、減衰関数 f_s とモデル係数 C をプロットしたのが Fig. 2.5 である。減衰関数は壁に向かって 2 次で 0 に漸近しているため、 C も $C_s^2 = 0.173^2 = 0.0299$ から 0 に漸近し補正される。

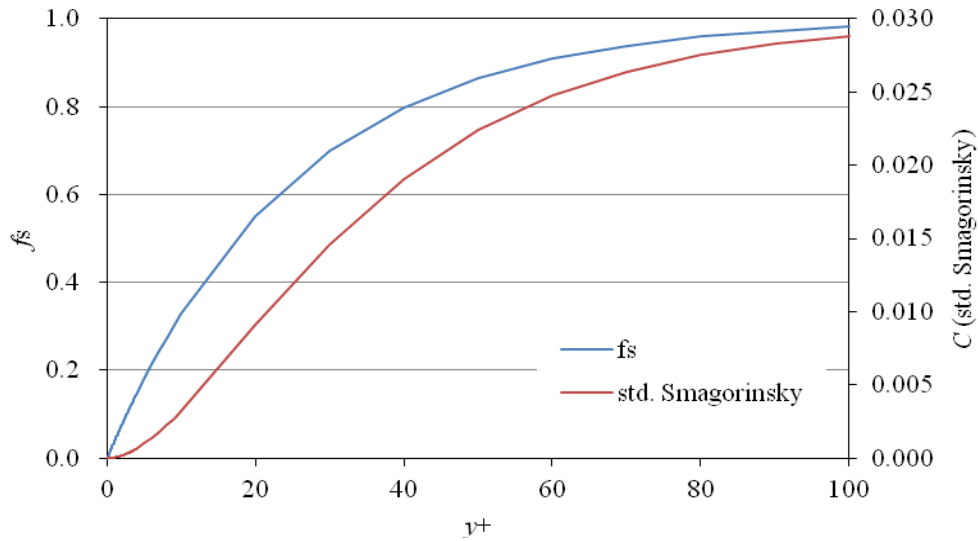


Fig. 2.5. The van Driest function (f_s) and the model coefficient C with the standard Smagorinsky model. The y^+ is dimensionless wall coordinate. The Smagorinsky constant is 0.173.

この標準 Smagorinsky モデルでは、2 つの問題点がある。Smagorinsky 定数は経験定数であるためにその決定根拠が必要であるということ、また、壁面に沿った流れ以外では減衰関数の y^+ をどのように取るかということである。その問題点を解消するのが、モデル係数 C を動的な変数として考え、減衰関数を用い

ずに GS 流速から決定させる DSM (Dynamic Smagorinsky model) である。

DSM は、各格子点で動的にモデル係数 C を決定する。従って、乱れの状態に応じて空間的に大きく変動し負の値を取るだけでなく、分母の状況によってはモデル係数が非常に大きくなることもあり、数値計算的に非常に不安定である。故に、通常はなんらかの平均処理を行う。この平均処理に於いて最も使用されるのは Lilly の最小二乗法であり、一様方向に平均し最小二乗法をかけることでモデル係数を決定する。この際、上限及び下限を設けることが多い。この Lilly の DSM に於いても、一様方向のない場合には局所的にモデル係数を決定しなければいけないこと、最小二乗法による計算負荷といった問題点はあるが、標準 Smagorinsky モデルと比べて欠点は小さいためよく用いられている。

この問題を解決したのが CSM (Coherent Structure Model)^[2, 3] である。速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q は、渦の中心で最大値を取り、そのまわりで負の値となる。それを速度勾配テンソルの大きさ E で除すれば、無次元化された第 2 不変量 F_{CS} となる。このコヒーレント構造関数 F_{CS} は、渦として乱れを抽出するため、壁方向に 2 次で 0 に漸近する。CSM を以下に示す。

$$C = \frac{1}{22} |F_{CS}|^{\frac{3}{2}} F_{\Omega}$$

$$F_{\Omega} = 1 - F_{CS} \quad (2.3.5)$$

$$F_{CS} = \frac{Q}{E}$$

$$Q = \frac{1}{2} (W_{ij} W_{ij} - S_{ij} S_{ij})$$

$$E = \frac{1}{2} (W_{ij} W_{ij} + S_{ij} S_{ij}) \quad (2.3.6)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(-\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

ここで、 W_{ij} は渦度テンソル、 F_{Ω} はエネルギー減衰抑制関数である。また、コヒーレント構造関数は下記を満たす。

$$F_{CS} = \frac{W_{ij} W_{ij} - S_{ij} S_{ij}}{W_{ij} W_{ij} + S_{ij} S_{ij}}$$

$$= \frac{1 - \frac{S_{ij} S_{ij}}{W_{ij} W_{ij}}}{1 + \frac{S_{ij} S_{ij}}{W_{ij} W_{ij}}} \quad (2.3.7)$$

$$\begin{aligned}
& S_{ij}S_{ij}, W_{ij}W_{ij} \geq 0 \\
& \frac{S_{ij}S_{ij}}{W_{ij}W_{ij}} = 0 \quad \rightarrow \quad F_{cs} = 1 \\
& \frac{S_{ij}S_{ij}}{W_{ij}W_{ij}} = \infty \quad \rightarrow \quad F_{cs} = \frac{\left(\frac{S_{ij}S_{ij}}{W_{ij}W_{ij}}\right)^{-1} - 1}{\left(\frac{S_{ij}S_{ij}}{W_{ij}W_{ij}}\right)^{-1} + 1} = -1
\end{aligned} \tag{2.3.8}$$

$$\text{i.e.} \quad -1 \leq F_{cs} \leq 1$$

従って、CSM では上限及び下限値を設ける必要性が無い．また，モデル係数は常に正で安定し，平均処理は必要ない．コヒーレント構造関数に対するモデル係数のプロット図を下に示す．

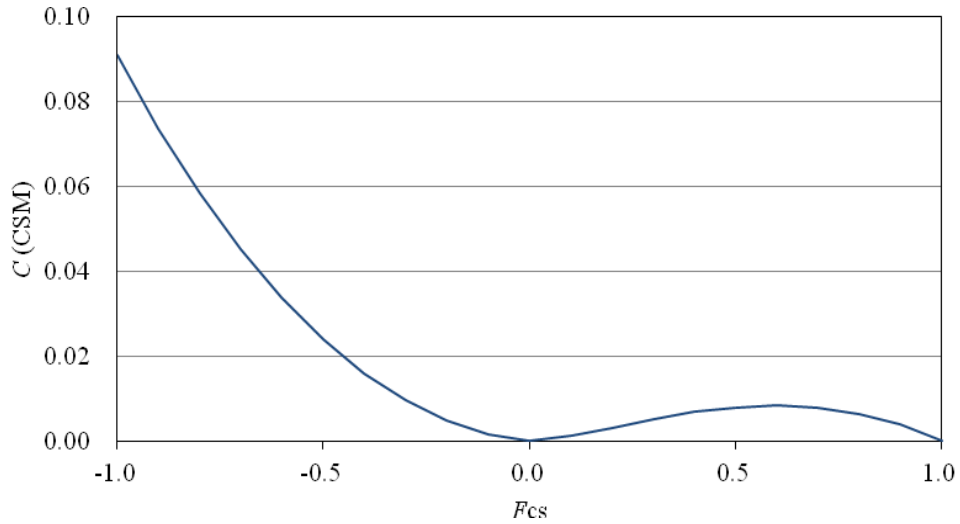


Fig. 2.6. The model coefficient of the CSM depends on the coherent structure function.

本論文では，経験定数である Smagorinsky 定数を用いず普遍性があり，壁面近傍の境界層で層流に漸近し，かつ平均化処理が不要で計算負荷が小さく安定する CSM を，Smagorinsky モデルに適用した．CSM Navier-Stokes 方程式は以下となる．

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} ((v + v_T) 2S_{ij})$$

$$v_T = C\Delta^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$
(2.3.9)

ここで、渦動粘性係数のモデル係数 C は(2.3.5)で示される。

第4節 Euler の連続式

単位体積あたりの質量保存則を考える．検査体積での質量収支は，表面からの流出と内部での湧き出し q によって決まる．従って，体積を V ，表面を S ，表面での外向き単位法線ベクトルを n_i とすれば，単位体積あたりの質量，即ち密度変化は以下と示される．

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = -\iint_S n_i \rho u_i dS + \iiint_V q dV$$
(2.4.1)

ガウスの定理を用いて，体積積分にまとめる．

$$\iiint_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} - q \right) dV = 0$$
(2.4.2)

これが，質量保存則の積分形である．

この積分形は，任意の場所で成立しなければならない．即ち，被積分部分が 0 でなければならない．

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} - q = 0$$
(2.4.3)

ここで，湧き出しは 0 と仮定する．また，本論文では **Mach 0.3** 以下の非圧縮性粘性流体を想定しているため，密度の時空間変動は考慮しない．

$$q = 0$$

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \rho = \text{const.}$$
(2.4.4)

従って，Euler の連続式は以下となる．

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$
(2.4.5)

上式をもって，Navier-Stokes 方程式の移流項を保存型（発散型）に修正する．

$$\begin{aligned}
u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \\
&= \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}
\end{aligned} \tag{2.4.6}$$

以降、移流項には上記の保存型を用いる。

第5節 Flux 関数と圧力の Poisson 方程式

LES の CSM Navier-Stokes 方程式と Euler の連続式を再掲する。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u_i}{\partial t} &= -\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \nu_T) 2S_{ij} \right) \\
\frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0
\end{aligned} \tag{2.5.1}$$

ここで、flux（流束）関数 f_i を式(2.5.2)と定義すれば、Navier-Stokes 方程式は式(2.5.3)となる。

$$f_i = \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \nu_T) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \tag{2.5.2}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - f_i \tag{2.5.3}$$

Navier-Stokes 方程式には未知数として流速 u_i 及び圧力 P の2変数が存在する。従って、圧力に関する方程式が必要になる。式(2.5.3)の時間差分に Euler 陽解法を用い、さらに空間差分を行う。

$$\begin{aligned}
\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} &= -\frac{\partial P^n}{\partial x_i} - f_i^n \\
\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} &= -\frac{\partial^2 P^n}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{\partial f_i^n}{\partial x_i} \\
\nabla^2 P^n &= -\frac{\partial f_i^n}{\partial x_i} - \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\partial u_i^{n+1}}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i^n}{\partial x_i} \right)
\end{aligned} \tag{2.5.4}$$

上式が圧力の Poisson 方程式である。

Navier-Stokes 方程式を解いたとき、 \mathbf{u}^{n+1} は離散化誤差や丸め誤差により連続条件を満たさない場合があり、時間発展により誤差が蓄積されて発散に至ってし

まう．従って，現在の質量保存誤差 $\text{div} \mathbf{u}^n \neq 0$ は許容するが，連続条件を満たすために圧力の Poisson 方程式に $\text{div} \mathbf{u}^{n+1} = 0$ を適用する．これにより，誤差拡散が抑えられる．

$$\nabla^2 P^n = -\frac{\partial f_i^n}{\partial x_i} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial u_i^n}{\partial x_i} \quad (2.5.5)$$

第6節 数値流体計算スキーム

気流シミュレーションモデルを Figs.2.2, 2.3 及び Tables 2.1, 2.2 に示した．側面又は前面吸気型空気清浄機を，正方形の部屋の中央に配置する．

変形させた Navier-Stokes 方程式と圧力の Poisson 方程式を以下に示す．

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} &= -\frac{\partial P}{\partial x_i} - f_i \\ f_i &= \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \nu_T) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \\ \nabla^2 P^n &= -\frac{\partial f_i^n}{\partial x_i} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial u_i^n}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2.6.1)$$

本論文では，Staggered 格子を採用し，flux を部分段階として解き，圧力の Poisson 方程式を後述する SOR (逐次過緩和: Successive Over-Relaxation)法^[4]で収束計算させた後に，GS 流速を計算する MAC (Marker And Cell)法を用いる．Staggered 格子とは，Fig. 2.7 に示すように，ベクトル成分 $u_i=u, v, w$, $f_i=f, g, h$ を面中心に，スカラーをセル中央に配する格子である．スカラーとベクトル成分を同一点に配する regular 格子又は collocated 格子では，1 格子おきのセルの圧力場は滑らかだが，隣り合うセルでは振動を許してしまう．これは，二次元では市松模様を表すため，チェッカーボード不安定性(Checkerboard instability)と言われる．このチェッカーボード不安定性を解消するために，ベクトル成分とスカラーを食い違いに配したのが Staggered 格子である．

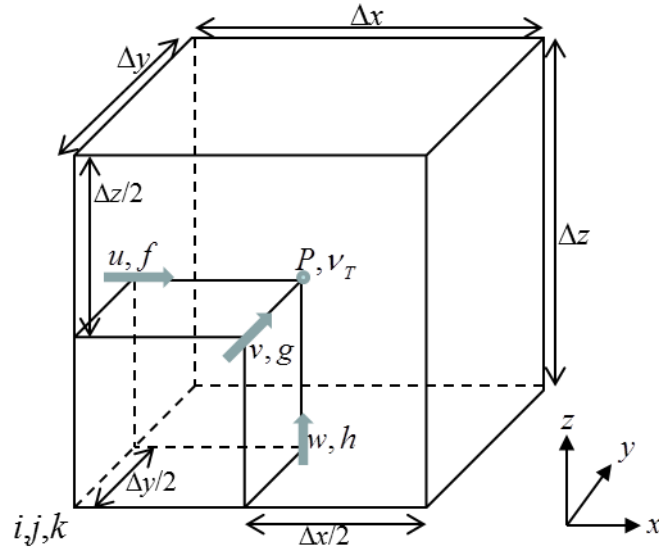


Fig. 2.7. The staggered grid. The vector components are aligned at the center of a cell surface, and the scalar is at the center of the cell.

境界条件として、境界面の法線方向流速は、空気清浄機の流入境界では Table 2.2 のとおりに与え、それ以外の境界では 0 とする。全境界の接線方向流速には、non-slip 条件を適用する。Non-slip 条件とは、Fig. 2.8 に示す通り、境界面での流速の滑りを許容せず、0[m/s]とする境界条件である。境界面上の接線方向流速は Staggered 格子で与えられていないため、境界外流速に境界内流速を用いて与えることで、補間結果の境界面流速を 0 とする。

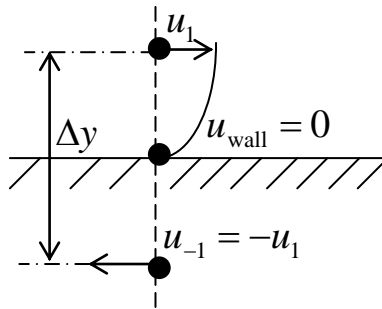


Fig. 2.8. The non-slip boundary condition. The area below the horizon is virtual mesh, u_1 is calculated by the Navier-Stokes equation, however, the u_{-1} is not calculated. Moreover, u_{-1} uses u_1 . Therefore, u_{wall} complemented by u_1 and u_{-1} is 0.

渦動粘性係数に減衰関数は使用していないが，CSM では F_{CS} は壁(y)方向に y の 2 次で 0 に漸近するため，渦動粘性係数も 0 に漸近し，壁面近傍での粘性の過大評価が抑えられる。

固体壁面に於ける粘性底層を Fig. 2.9 に示す．固体壁面に沿う流れでは，粘性の影響を強く受け，速度勾配が大きくなる境界層が存在する．その境界層に，特に粘性が支配的であり層流的な薄い層が壁面近傍に形成され，これを粘性底層と呼ぶ．本論文のモデルでは，天井の壁面第 1 セルでの排気主流の流速は 0.5 ～1[m/s]程度であるので，粘性底層は 2～3[mm]程度である．壁面近傍での粘性は CSM により抑えられるが，粘性底層に壁面第 1 セルが存在しないために，多少の誤差が生じていると考えられる．しかしながら，壁面第 1 セルを粘性底層の幅よりも小さくすると，時間刻みも小さくしなければならず，それに比例した計算時間を要する．粘性底層に壁面第 1 セルを配さない事による誤差の影響は，計算コストに比して小さいと判断し，本論文では粘性底層内に壁面第 1 セルを配していない．

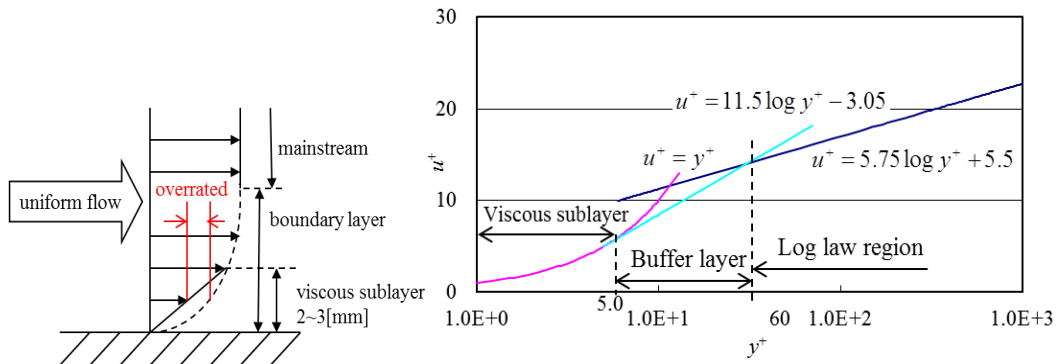


Fig. 2.9. The viscous sublayer of the boundary layer (left) and the plots of viscous sublayer and buffer layer and log law region (right). In the left figure, viscous sublayer is indicated by the solid line. The viscous sublayer is a very thin layer, and the 1st computational cell above the wall has to be located within the viscous sublayer. If the viscous sublayer has not the 1st cell, the velocity of the viscous sublayer is overrated. In the viscous sublayer of the right figure, the dimensionless velocity (u^+) equals the dimensionless wall coordinate (y^+).

第7節 LES 代数方程式

LES 支配方程式は偏微分方程式であるので、シミュレーションを行う為に、代数方程式に差分する必要がある。ここでは、flux を移流項(advection term)と粘性拡散項(viscous diffusion term)に分解して考える。

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_i}{\partial t} &= -\frac{\partial P}{\partial x_i} - f_{ai} + f_{vi} \\ f_{ai} &= \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \\ f_{vi} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v_T + \nu) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right)\end{aligned}\tag{2.7.1}$$

上式の各項に関して、それぞれ差分化を考える。以降、求めるべきベクトル成分又はスカラーの基準位置 (Fig. 2.7) を、 i, j, k 座標とする。例えば、 $u_{i,j,k}$ と $f_{i,j,k}$ は同じステンシルであるが、 $u_{i,j,k}$ と $v_{i,j,k}$ は異なるステンシルである。

圧力拡散項は、以下のようにそのまま差分出来る。

$$\begin{aligned}\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{i,j,k} &= \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x} \\ \left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_{i,j,k} &= \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y} \\ \left. \frac{\partial P}{\partial z} \right|_{i,j,k} &= \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}\end{aligned}\tag{2.7.2}$$

移流項は、Staggered 格子によりステンシルの位置が違うことに注意し、以下と差分する。 \bar{u}^x は、 u の x 方向補間を意味する。

$$\begin{aligned}
\left. \frac{\partial uu_j}{\partial x_j} \right|_{i,j,k} &= \frac{1}{\Delta x} \left(\left(\bar{u}_{i+\frac{1}{2},j,k}^x \right)^2 - \left(\bar{u}_{i-\frac{1}{2},j,k}^x \right)^2 \right) + \frac{1}{\Delta y} \left(\bar{u}_{i,j+\frac{1}{2},k}^y \bar{v}_{i,j+\frac{1}{2},k}^x - \bar{u}_{i,j-\frac{1}{2},k}^y \bar{v}_{i,j-\frac{1}{2},k}^x \right) \\
&\quad + \frac{1}{\Delta z} \left(\bar{u}_{i,j,k+\frac{1}{2}}^z \bar{w}_{i,j,k+\frac{1}{2}}^x - \bar{u}_{i,j,k-\frac{1}{2}}^z \bar{w}_{i,j,k-\frac{1}{2}}^x \right) \\
&= \frac{(u_{i+1,j,k} + u_{i,j,k})^2 - (u_{i,j,k} + u_{i-1,j,k})^2}{4\Delta x} \\
&\quad + \frac{(u_{i,j+1,k} + u_{i,j,k})(v_{i,j+1,k} + v_{i-1,j+1,k}) - (u_{i,j,k} + u_{i,j-1,k})(v_{i,j,k} + v_{i-1,j,k})}{4\Delta y} \\
&\quad + \frac{(u_{i,j,k+1} + u_{i,j,k})(w_{i,j,k+1} + w_{i-1,j,k+1}) - (u_{i,j,k} + u_{i,j-1,k})(w_{i,j,k} + w_{i-1,j,k})}{4\Delta z} \\
\left. \frac{\partial vu_j}{\partial x_j} \right|_{i,j,k} &= \frac{(v_{i+1,j,k} + v_{i,j,k})(u_{i+1,j,k} + u_{i+1,j-1,k}) - (v_{i,j,k} + v_{i-1,j,k})(u_{i,j,k} + u_{i,j-1,k})}{4\Delta x} \\
&\quad + \frac{(v_{i,j+1,k} + v_{i,j,k})^2 - (v_{i,j,k} + v_{i,j-1,k})^2}{4\Delta y} \\
&\quad + \frac{(v_{i,j,k+1} + v_{i,j,k})(w_{i,j,k+1} + w_{i,j-1,k+1}) - (v_{i,j,k} + v_{i,j,k-1})(w_{i,j,k} + w_{i,j-1,k})}{4\Delta z} \\
\left. \frac{\partial wu_j}{\partial x_j} \right|_{i,j,k} &= \frac{(w_{i+1,j,k} + w_{i,j,k})(u_{i+1,j,k} + u_{i+1,j-1,k}) - (w_{i,j,k} + w_{i-1,j,k})(u_{i,j,k} + u_{i,j-1,k})}{4\Delta x} \\
&\quad + \frac{(w_{i,j+1,k} + w_{i,j,k})(v_{i,j+1,k} + v_{i,j+1,k-1}) - (w_{i,j,k} + w_{i,j-1,k})(v_{i,j,k} + v_{i,j,k-1})}{4\Delta y} \\
&\quad + \frac{(w_{i,j,k+1} + w_{i,j,k})^2 - (w_{i,j,k} + w_{i,j,k-1})^2}{4\Delta z}
\end{aligned}$$

(2.7.3)

粘性拡散項の縮約を解き, $j=1, 2, 3$ で分けて差分を考える. 粘性拡散項の X 成分 f_v は以下となる.

$$\begin{aligned}
f_v &= f_{v_x} + f_{v_y} + f_{v_z} \\
&= \frac{\partial}{\partial x} \left((v_T + \nu) \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_T + \nu) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_T + \nu) \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \quad (2.7.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_{v_x}|_{i,j,k} &= \frac{2}{\Delta x} \left\{ \left(v_{T i,j,k} + \nu \left(\frac{u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}}{\Delta x} \right) \right) - \left(v_{T i-1,j,k} + \nu \left(\frac{u_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}}{\Delta x} \right) \right) \right\} \\
f_{v_y}|_{i,j,k} &= \frac{1}{\Delta y} \left\{ \left(\overline{v_T}_{i,j+\frac{1}{2},k}^{xy} + \nu \right) \left(\frac{u_{i,j+1,k} - u_{i,j,k}}{\Delta y} + \frac{v_{i,j+1,k} - v_{i-1,j+1,k}}{\Delta x} \right) \right. \\
&\quad \left. - \left(\overline{v_T}_{i,j-\frac{1}{2},k}^{xy} + \nu \right) \left(\frac{u_{i,j,k} - u_{i,j-1,k}}{\Delta y} + \frac{v_{i,j,k} - v_{i-1,j,k}}{\Delta x} \right) \right\} \\
f_{v_z}|_{i,j,k} &= \frac{1}{\Delta z} \left\{ \left(\overline{v_T}_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{xz} + \nu \right) \left(\frac{u_{i,j,k+1} - u_{i,j,k}}{\Delta z} + \frac{w_{i,j,k+1} - w_{i-1,j,k+1}}{\Delta x} \right) \right. \\
&\quad \left. - \left(\overline{v_T}_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{xz} + \nu \right) \left(\frac{u_{i,j,k} - u_{i,j,k-1}}{\Delta z} + \frac{w_{i,j,k} - w_{i-1,j,k}}{\Delta x} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{2.7.5}$$

粘性拡散項の Y 成分 g_v は以下となる.

$$\begin{aligned}
g_v &= g_{v_x} + g_{v_y} + g_{v_z} \\
&= \frac{\partial}{\partial x} \left((v_T + \nu) \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_T + \nu) \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_T + \nu) \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right)
\end{aligned} \tag{2.7.6}$$

$$\begin{aligned}
g_{v_x}|_{i,j,k} &= \frac{1}{\Delta x} \left\{ \left(\overline{v_T}_{i+\frac{1}{2},j,k}^{xy} + \nu \right) \left(\frac{v_{i+1,j,k} - v_{i,j,k}}{\Delta x} + \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i-1,j-1,k}}{\Delta y} \right) \right. \\
&\quad \left. - \left(\overline{v_T}_{i-\frac{1}{2},j,k}^{xy} + \nu \right) \left(\frac{v_{i,j,k} - v_{i-1,j,k}}{\Delta x} + \frac{u_{i,j,k} - u_{i,j-1,k}}{\Delta y} \right) \right\} \\
g_{v_y}|_{i,j,k} &= \frac{2}{\Delta y} \left\{ \left(v_{T i,j,k} + \nu \right) \left(\frac{v_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}}{\Delta y} \right) - \left(v_{T i,j-1,k} + \nu \right) \left(\frac{v_{i,j,k} - v_{i,j-1,k}}{\Delta y} \right) \right\} \\
g_{v_z}|_{i,j,k} &= \frac{1}{\Delta z} \left\{ \left(\overline{v_T}_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{yz} + \nu \right) \left(\frac{v_{i,j,k+1} - v_{i,j,k}}{\Delta z} + \frac{w_{i,j,k+1} - w_{i,j-1,k+1}}{\Delta y} \right) \right. \\
&\quad \left. - \left(\overline{v_T}_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{yz} + \nu \right) \left(\frac{v_{i,j,k} - v_{i,j,k-1}}{\Delta z} + \frac{w_{i,j,k} - w_{i,j-1,k}}{\Delta y} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{2.7.7}$$

最後に、粘性拡散項の Z 成分 h_v は以下となる.

$$\begin{aligned}
h_v &= h_{v_x} + h_{v_y} + h_{v_z} \\
&= \frac{\partial}{\partial x} \left((v_T + \nu) \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_T + \nu) \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_T + \nu) \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right)
\end{aligned} \tag{2.7.8}$$

$$\begin{aligned}
h_{v_x}|_{i,j,k} &= \frac{1}{\Delta x} \left\{ \left(\overline{v_T}^{xz}_{i+\frac{1}{2},j,k} + \nu \right) \left(\frac{w_{i+1,j,k} - w_{i,j,k}}{\Delta x} + \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i+1,j,k-1}}{\Delta z} \right) \right. \\
&\quad \left. - \left(\overline{v_T}^{xz}_{i-\frac{1}{2},j,k} + \nu \right) \left(\frac{w_{i,j,k} - w_{i-1,j,k}}{\Delta x} + \frac{u_{i,j,k} - u_{i,j,k-1}}{\Delta z} \right) \right\} \\
h_{v_y}|_{i,j,k} &= \frac{1}{\Delta y} \left\{ \left(\overline{v_T}^{yz}_{i,j+\frac{1}{2},k} + \nu \right) \left(\frac{w_{i,j+1,k} - w_{i,j,k}}{\Delta y} + \frac{v_{i,j+1,k} - v_{i,j+1,k-1}}{\Delta z} \right) \right. \\
&\quad \left. - \left(\overline{v_T}^{yz}_{i,j-\frac{1}{2},k} + \nu \right) \left(\frac{w_{i,j,k} - w_{i,j-1,k}}{\Delta y} + \frac{v_{i,j,k} - v_{i,j,k-1}}{\Delta z} \right) \right\} \\
h_{v_z}|_{i,j,k} &= \frac{2}{\Delta z} \left\{ \left(\overline{v_T}_{i,j,k} + \nu \right) \left(\frac{w_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}}{\Delta z} \right) - \left(\overline{v_T}_{i,j,k-1} + \nu \right) \left(\frac{w_{i,j,k} - w_{i,j,k-1}}{\Delta z} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{2.7.9}$$

以上が、流速 u の代数方程式である。

次に、渦動粘性係数 ν_T の差分化について考える。歪み速度テンソルの大きさ $\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ は、テンソル成分の 2 乗和を 2 倍し、平方根を取ったものである。従って、各成分のステンスルは渦動粘性係数のと一致する。歪み速度テンソルの各成分を下記の通り差分化する。尚、歪み速度テンソルは、式(2.3.3)に示すように、対称テンソルである。

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{2.3.3}$$

$$\begin{aligned}
S_{11} &= \frac{1}{\Delta x} (u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}) \\
S_{12} &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\Delta y} \left(\bar{u}_{i,j+\frac{1}{2},k}^{xy} - \bar{u}_{i,j-\frac{1}{2},k}^{xy} \right) + \frac{1}{\Delta x} \left(\bar{v}_{i+\frac{1}{2},j,k}^{xy} - \bar{v}_{i-\frac{1}{2},j,k}^{xy} \right) \right\} \\
&= \frac{1}{2} \left\{ \frac{(u_{i,j+1,k} + u_{i+1,j+1,k}) - (u_{i,j-1,k} + u_{i+1,j-1,k})}{4\Delta y} + \frac{(v_{i+1,j,k} + v_{i+1,j+1,k}) - (v_{i-1,j,k} + v_{i-1,j+1,k})}{4\Delta x} \right\} \\
S_{13} &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{(u_{i,j,k+1} + u_{i+1,j,k+1}) - (u_{i,j,k-1} + u_{i+1,j,k-1})}{4\Delta z} + \frac{(w_{i+1,j,k} + w_{i+1,j,k+1}) - (w_{i-1,j,k} + w_{i-1,j,k+1})}{4\Delta x} \right\} \\
S_{21} &= S_{12} \\
S_{22} &= \frac{1}{\Delta y} (v_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}) \\
S_{23} &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{(v_{i,j,k+1} + v_{i,j+1,k+1}) - (v_{i,j,k-1} + v_{i,j+1,k-1})}{4\Delta z} + \frac{(w_{i,j+1,k} + w_{i,j+1,k+1}) - (w_{i,j-1,k} + w_{i,j-1,k+1})}{4\Delta y} \right\} \\
S_{31} &= S_{13} \\
S_{32} &= S_{23} \\
S_{33} &= \frac{1}{\Delta z} (w_{i,j,k+1} - w_{i,j,k})
\end{aligned} \tag{2.7.10}$$

Smagorinsky モデルのモデル係数は、歪み速度テンソルと渦度テンソルによって決定される。ここでも、テンソルの各成分の二乗和が用いられる。渦度テンソルは符号が異なるだけで歪み速度テンソルと同じであるので、差分式は割愛する。

圧力の Poisson 方程式(2.5.5)を再掲する。これを各項で分けて差分を考える。

$$\nabla^2 P^n = -\frac{\partial f_i^n}{\partial x_i} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial u_i^n}{\partial x_i} \tag{2.5.5}$$

右辺第一項及び質量保存誤差の差分では、補間は必要ない。

$$\left. \frac{\partial f_i^n}{\partial x_i} \right|_{i,j,k} = \left(\frac{f_{i+1,j,k} - f_{i,j,k}}{\Delta x} + \frac{g_{i,j+1,k} - g_{i,j,k}}{\Delta y} + \frac{h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}}{\Delta z} \right)^n \tag{2.7.11}$$

$$\left. \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial u_i^n}{\partial x_i} \right|_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}}{\Delta y} + \frac{w_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}}{\Delta z} \right)^n \tag{2.7.12}$$

左辺の二回微分を差分すると、 $P_{i,j,k}$ が出現する。

$$\begin{aligned}
\nabla^2 P^n \Big|_{i,j,k} &= \frac{P_{i-1,j,k}^n - 2P_{i,j,k}^n + P_{i+1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j-1,k}^n - 2P_{i,j,k}^n + P_{i,j+1,k}^n}{\Delta y^2} \\
&\quad + \frac{P_{i,j,k-1}^n - 2P_{i,j,k}^n + P_{i,j,k+1}^n}{\Delta z^2} \\
&= \frac{P_{i-1,j,k}^n + P_{i+1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j-1,k}^n + P_{i,j+1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k-1}^n + P_{i,j,k+1}^n}{\Delta z^2} \\
&\quad - 2 \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) P_{i,j,k}^n \\
&= \gamma_{i,j,k}^n + \Lambda P_{i,j,k}^n
\end{aligned} \tag{2.7.13}$$

式(2.7.13)を，式(2.5.5)に代入すると下式となり，これを SOR 法で収束計算させる．

$$P_{i,j,k}^n = \frac{1}{\Lambda} \left(-\gamma_{i,j,k}^n - \frac{\partial f_i^n}{\partial x_i} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial u_i^n}{\partial x_i} \right) \tag{2.7.14}$$

SOR 法の説明の為に，まずは Jacobi 法について述べる．Time step “ n ”は同じであるので取り払う．また，式(2.5.5)の右辺を ψ と置き，反復回数を m とする．

$$\begin{aligned}
\nabla^2 P^n &= -\frac{\partial f_i^n}{\partial x_i} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial u_i^n}{\partial x_i} \\
&= \psi^n \\
\gamma_{i,j,k} + \Lambda P_{i,j,k} &= \psi_{i,j,k}
\end{aligned} \tag{2.7.15}$$

$$\begin{aligned}
P_{i,j,k}^{\langle m+1 \rangle} &= \frac{1}{\Lambda} (-\gamma + \psi)_{i,j,k}^{\langle m \rangle} \\
P_{i,j,k}^{\langle m+1 \rangle} &= P_{i,j,k}^{\langle m \rangle} + \frac{1}{\Lambda} (-\gamma - \Lambda P + \psi)_{i,j,k}^{\langle m \rangle}
\end{aligned}$$

上式の右辺第二項は，式(2.7.13)で示したように，圧力 P の 2 回空間微分である．

$$\begin{aligned}
P_{i,j,k}^{\langle m+1 \rangle} &= P_{i,j,k}^{\langle m \rangle} + \frac{1}{\Lambda} (-\gamma - \Lambda P + \psi)_{i,j,k}^{\langle m \rangle} \\
&= P_{i,j,k}^{\langle m \rangle} + \frac{1}{\Lambda} (-\nabla^2 P + \psi^n)_{i,j,k}^{\langle m \rangle}
\end{aligned} \tag{2.7.16}$$

式(2.7.15)を繰り返し反復計算させ，式(2.7.17)となるまで十分に収束させた時，式(2.7.16)の右辺第二項が 0 とならなければならないので，圧力の Poisson 方程式が解かれたことになる．これが，Jacobi 法である．

$$P_{i,j,k}^{\langle m+1 \rangle} = P_{i,j,k}^{\langle m \rangle} \tag{2.7.17}$$

この Jacobi 法では, i, j, k についてループで回して計算している. ここで, 既知の $P_{i-1,j,k}$, $P_{i,j-1,k}$, $P_{i,j,k-1}$ を用いて,

$$\gamma_{i,j,k}^{(m)} = \frac{P_{i-1,j,k}^{(m+1)} + P_{i+1,j,k}^{(m)}}{\Delta x} + \frac{P_{i-1,j,k}^{(m+1)} + P_{i,j+1,k}^{(m)}}{\Delta y} + \frac{P_{i,j,k-1}^{(m+1)} + P_{i,j,k+1}^{(m)}}{\Delta z} \quad (2.7.18)$$

としたのが, Gauss-Seidel 法または逐次緩和法(Successive Relaxation method)である.

逐次緩和法に対し, 加速係数 ω を用いることで, さらに収束を早めたのが SOR 法であり, 以下で示される.

$$P_{i,j,k}^{(m+1)} = P_{i,j,k}^{(m)} + \frac{\omega}{\Lambda} (-\gamma - \Lambda P + \psi)_{i,j,k}^{(m)} \quad (2.7.19)$$

$$1 < \omega < 2$$

本論文では, 加速係数 $\omega=1.9$ とする. 式(2.7.17)の収束判定には, 下式を用いる.

$$\frac{P_{i,j,k}^{(m+1)} - P_{i,j,k}^{(m)}}{P_{i,j,k}^{(m+1)}} = \varepsilon < 10^{-8} \quad (2.7.20)$$

上流境界での法線方向流速が固定されている, Fig. 2.10 のような境界での差分化について考える. この場合, 最左端のセル中央の圧力は, 図より通常の圧力のポアソン方程式を適用できない事が自明である. 本論文では, 全境界の法線方向境界条件として, 流速には Dirichlet 条件を, 圧力には Neumann 条件を用いる.

$$u_{0,j} = \text{const.} \quad (2.7.21)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2.7.22)$$

$$P_{-1,j} = P_{0,j}$$

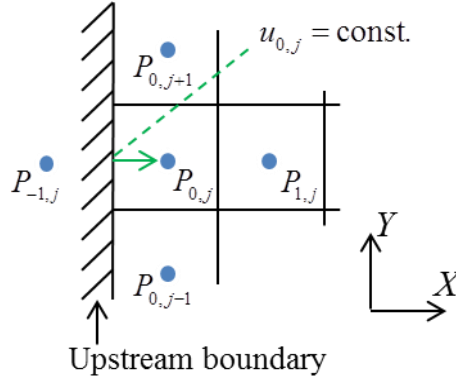


Fig. 2.10. The Upstream boundary. When using Dirichlet boundary condition, the wall-normal velocity is a given constant.

これを式(2.7.13)に適用すると,

$$\begin{aligned}\nabla^2 P^n|_{0,j,k} &= \frac{P^n_{1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{P^n_{0,j-1,k} + P^n_{0,j,k+1}}{\Delta y^2} + \frac{P^n_{0,j,k-1} + P^n_{0,j,k+1}}{\Delta z^2} \\ &\quad + \left(\frac{-1}{\Delta x^2} + \frac{-2}{\Delta y^2} + \frac{-2}{\Delta z^2} \right) P^n_{0,j,k} \\ &= \gamma^n_{0,j,k} + \Lambda P^n_{0,j,k}\end{aligned}\tag{2.7.23}$$

となる. また, 法線方向 flux は 0 になる.

$$\begin{aligned}f_{0,j,k} &= \frac{\partial u}{\partial t}|_{0,j,k} + \frac{\partial P}{\partial x}|_{0,j,k} \\ &= 0 \quad (\because u^{n+1}_{0,j,k} = u^n_{0,j,k})\end{aligned}\tag{2.7.24}$$

従って, flux の空間差分は以下となる.

$$\frac{\partial f_i^n}{\partial x_i}|_{0,j,k} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{f_{1,j,k}}{\Delta x} + \frac{g_{0,j+1,k} - g_{0,j,k}}{\Delta y} + \frac{h_{0,j,k+1} - h_{0,j,k}}{\Delta z} \right)\tag{2.7.25}$$

以上のように, 境界では取り扱いに注意し, 圧力に関する Poisson 方程式を解かなければならない.

第8節 花粉挙動支配方程式及びスキーム

花粉粒子以外のエアロゾルを本論文では考慮していないため，花粉粒子パラメータで説明を行う．

花粉挙動は **Lagrange** 粒子追跡によって解かれ，支配方程式はニュートンの運動方程式であり，以下で示される．

$$m \frac{dv_i}{dt} = -mg\delta_{i3} - F_{Di} \quad (2.8.1)$$

右辺第一項は重力，第二項は粘性抵抗 force であり， m は花粉の質量， g は重力加速度， δ_{ij} は **Kronecker delta** である．花粉粒子の密度は $0.14[\text{g}/\text{cm}^3]$ ^[5]であり，空気密度よりも 2 桁オーダーが大きいいため，浮力を無視する．

粘性抵抗 force F_D は，**Allery**^[6]，**Chow**^[7]を参考に，以下のベクトル式とした．

$$F_{Di} = \frac{\pi d_p^2}{8} \rho C_D |v_i - u_i| (v_i - u_i) \quad (2.8.2)$$

ここで， d_p は花粉の直径， ρ は流体の密度， u_i は花粉位置での流速， C_D は抗力係数である．粘性抵抗 force は，相対速度の逆方向に働く力であり，投影面積，抗力係数，相対速度の 2 乗に比例する．

流体の粘性係数を μ とし，table 2.3 の値を用いれば，粒子 **Reynolds** 数は以下となる．

$$\begin{aligned} Re_p &= \frac{\rho |v_i - u_i| d_p}{\mu} \\ &= 1.95 |v_i - u_i| \end{aligned} \quad (2.8.3)$$

Table 2.3. Parameters of the pollen-motion simulation.

Parameters		Value
Pollen ^[5]	Mass m [kg]	2.01×10^{-12}
	Diameter d_p [m]	3.0×10^{-5}
Atmospheric air at 25 deg. C	Viscosity μ [Pa.s]	1.82×10^{-5}
	Density ρ [kg/m ³]	1.184
Simulation time [s]		1,400
Time interval Δt [s]		1.0×10^{-4}
File-out time step Δt_{FO} [s]		0.1

Hinds^[8]は、抗力係数 C_D の近似式を以下のように与えている.

$$\begin{cases} C_D = \frac{24}{Re_p} & \text{if } Re_p < 1 \\ C_D = \frac{24}{Re_p} (1.0 + 0.15 Re_p^{0.687}) & \text{if } 1 \leq Re_p < 1000 \end{cases} \quad (2.8.4)$$

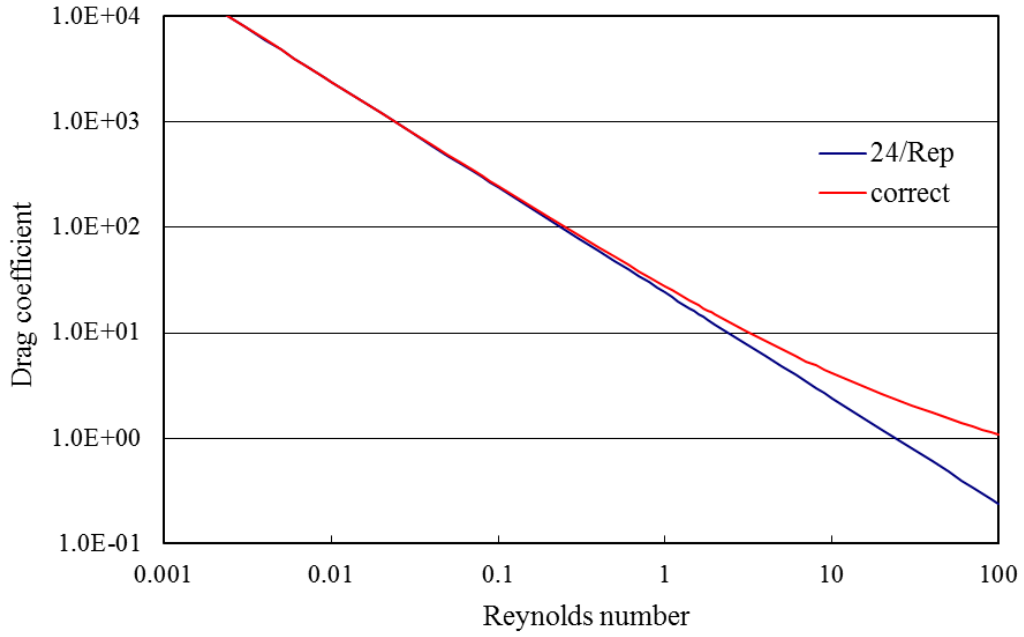


Fig. 2.11. The drag coefficient versus Reynolds number for sphere grains. If the Reynolds number of a sphere grain is less than 1.0, the drag coefficient is indicated by the solid blue line. If the Reynolds number is greater than or equal to 1.0, the coefficient is given by solid red line.

本論文のモデルでは、空気清浄機の吸排気流速の最大値が 1.5[m/s]であるため、粒子と流体の相対速度が 500[m/s]を超えることは無い。従って、 Re_p が 1,000 を超えることはない。よって、粘性抵抗力を以下と定義する。

$$\begin{cases} F_{Di} = 3\pi\mu d_p (v_i - u_i) & \text{if } |v_i - u_i| < 0.5 \\ F_{Di} = 3\pi\mu d_p (v_i - u_i) (1.0 + 0.15 Re_p^{0.687}) & \text{if } |v_i - u_i| \geq 0.5 \end{cases} \quad (2.8.5)$$

速度の時間微分に修正した下式を、4次精度 Runge-Kutta 法^[9]で数値積分する。

$$\frac{dv_i}{dt} = -g\delta_{i3} - \frac{1}{m}F_{Di} = f(v_i) \quad (2.8.6)$$

速度の X 成分 v を **Runge-Kutta** 法で積分する手法を，式(2.8.7)及び Fig. 2.12 に示す．まずは v^n での傾きを k_1 とする．これをそのまま **Euler** 法で解いてしまうと，図に示すように $k_1\Delta t$ は誤差が大きい．そこで，その半分の位置($t_n + \Delta t/2$)での傾きを k_2 とする．同様に k_3 も求め，(t_{n+1})での傾きを k_4 とする．これら $k_i\Delta t$ を重み付けて平均した量が，図の赤矢印で示す大きさとなる．この値は，時間刻みが十分に細かければ，真値とほぼ同じになる．

$$\begin{aligned} k_1 &= f(v^n) \\ k_2 &= f\left(v^n + \frac{k_1\Delta t}{2}\right) \\ k_3 &= f\left(v^n + \frac{k_2\Delta t}{2}\right) \\ k_4 &= f(v^n + k_3\Delta t) \\ v^{n+1} &= v^n + \frac{\Delta t}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \end{aligned} \quad (2.8.7)$$

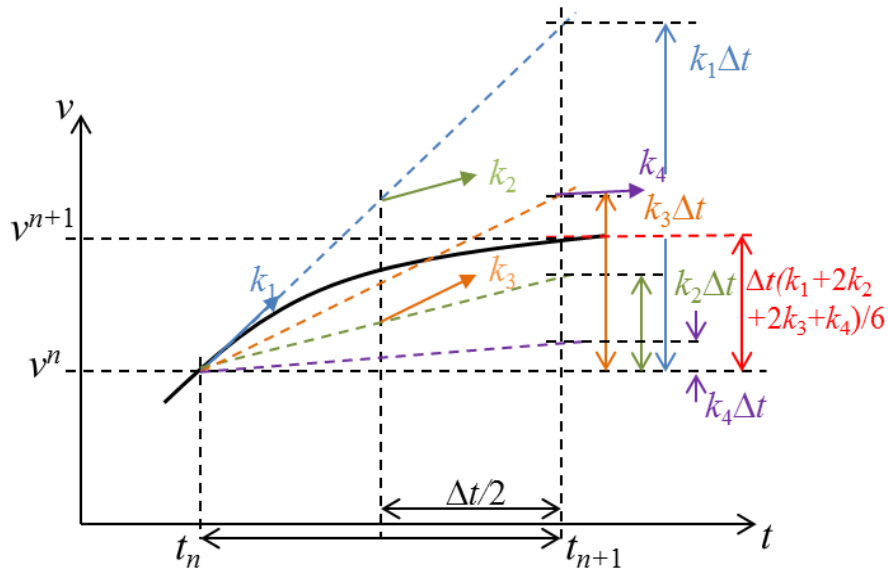


Fig. 2.12. The 4th Runge-Kutta method. The black solid curve is true value depended on time. The value of the red arrow is calculated by the 4th Runge-Kutta method, and it is nearly equal to the true value.

移動度 B を

$$B = \frac{1}{3\pi\mu d_p} \quad (2.8.8)$$

と定義すると、緩和時間 τ_p は以下となる.

$$\begin{aligned} \tau_p &= mB \\ &= \frac{m}{3\pi\mu d_p} = 3.91 \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (2.8.9)$$

従って、花粉挙動シミュレーションの時間刻みを、 10^{-4} [s]とする.

LES により解析された流速成分は **Staggered** 格子で与えられているが、計算セル内の粒子位置での流速は与えられていない. 従って、粒子位置での流速を何らかの方法で補間しなければならず、本論文では **PIC (Particle In Cell)**法を用いる. **PIC** 法で用いるのは頂点流速であるので、**Staggered** 格子流速を補間し、**Regular** 格子に変換する. XY 平面の二次元での流速 u_i の **PIC** 法を、Fig. 2.13 に示す. 頂点流速とその対角の面積比 (体積比) の積の総和が、粒子位置での流速となる.

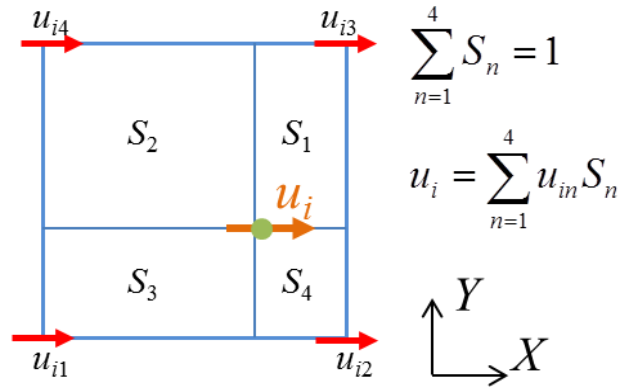


Fig. 2.13. The PIC method with regular grid on the XY surface. The sum of square equals 1.0, and the sum of velocity multiplied by the diagonal square is equal to the velocity of the particle position.

LES は非常に時間がかかるため、時間変化しない流速情報を読み込んで花粉挙動シミュレーションを行う.

LES では、カットオフされた **SubGrid-Scale** 流速 u'_i はモデル化されており、**Grid-Scale** 流速のみ解かれる. この **GS** 流速は乱流であるので時間変動するが、乱流統計的に定常であるならば、ある点での **GS** 流速は、時間平均 **GS** 流速 \bar{u}_{Avi} と

時間摂動 GS 流速 $\bar{u}_{\text{GST}i}$ に分解することが出来る．

$$\begin{aligned} u_i(\mathbf{r}, t) &= \bar{u}_i(\mathbf{r}, t) + u'_i(\mathbf{r}, t) \\ &= \bar{u}_{\text{AV}i}(\mathbf{r}) + \bar{u}_{\text{GST}i}(\mathbf{r}, t) + u'_i(\mathbf{r}, t) \end{aligned} \quad (2.8.10)$$

乱流統計的に定常に達しているならば，時間摂動の標準偏差から，正規分布を用いる事で時間摂動 GS 流速を再現することが出来る．時間摂動 GS 流速は，標準偏差 σ_i を用いて，以下のように Box-Muller 法で計算することが出来る．

$$\begin{aligned} \bar{u}_{\text{GST}i} &= \sigma_i \sqrt{-2 \ln \alpha} \sin(2\pi\beta) \\ \sigma_i(\mathbf{r}) &= \sqrt{\frac{1}{N_t} \sum_{i_t=1}^{N_t} (\bar{u}_i(\mathbf{r}, t)_{i_t} - \bar{u}_{\text{AV}i}(\mathbf{r}))^2} \end{aligned} \quad (2.8.11)$$

$$\begin{aligned} 0 < \alpha &\leq 1 \\ 0 &\leq \beta \leq 1 \end{aligned} \quad (2.8.12)$$

ここで，自然対数を用いる為に，一様乱数 α ， β は上記の変域と成る．標準偏差 σ は，各 time step での流速の分散で算出している．

本論文では，150[s] で乱流統計的に定常に達したと見なし，150～160[s] の各 time step での流速から時間摂動の標準偏差を計算し，Binary ファイルに出力する．花粉挙動シミュレーション時にそれを読み込み，各 time step で式(2.8.11)から時間摂動 GS 流速を算出し，時間平均流速に和することで，時間的な乱流変動を再現する．

流れ場の SGS 成分はモデル化されており，SGS 乱流変動である SGS 流速は LES で解かれない．この SGS 流速は，Dynamic Random Walk SGS モデル^[10]を用いて，以下に示す標準偏差 σ から Box-Muller 法により決定する．

$$\begin{aligned} \sigma(\mathbf{r}) &= \sqrt{\frac{2}{3} k_s(\mathbf{r})} \\ k_s(\mathbf{r}) &= C^{\frac{2}{3}} \Delta^2 (2S_{ij}S_{ij}) \end{aligned} \quad (2.8.13)$$

ここで， k_s は流体 SGS 成分の運動エネルギーであり， C は式(2.3.5)で示した LES に於ける Smagorinsky モデルのモデル係数である．

第9節 花粉挙動シミュレーションモデル

シミュレーション空間は，気流シミュレーション (Tables 2.1 and 2.2 及び Figs. 2.2 and 2.3) と同一である．花粉挙動独自のパラメータは Table 2.3 に示した．

空気清浄機の花粉除去性能を調べるために，2 通りの花粉初期分布を与える．

1 つめは室内に乱数を用いて一様に分布させる初期分布で、疑似乱数発生関数名を取って **Rand 型**と呼ぶことにする。2 つめは空間中央 1.0[m³]領域に花粉を 5[cm]刻みで均等配置する初期分布で、**V1 型**と名付ける。双方共に、空気清浄機内部には花粉を配しない。V1 型では、各軸ともに花粉の配置間隔は 5[cm]刻みであり、X, Y 軸の配置範囲は 2.0[m]以上 3.0[m]以下とし、21 個ずつ配する。Z 軸は 0.0[m]超過 1.0[m]以下とし、20 個配するため、空気清浄機が無ければ 1.0[m³]体積に 8,820 個配される。空気清浄機は、X, Y, Z 軸に、9, 5, 12 個の計 540 個相当の体積であるので、V1 型は 8,820 から 540 個を減じた 8,280 個配される。Rand 型も、V1 型と同じく、8,280 個とする。Rand 型では室内全域にわたる吸排気特性を評価でき、V1 型は空気清浄機近辺の花粉除去性能を調査することができる。

初期条件として、初期位置に関しては上記の通りに与え、初速度は全成分に 0.0[m/s]を与える。

花粉挙動の境界条件は、花粉が仮想空間外及び空気清浄機内に侵入しないことを基礎とする。仮想空間の床に花粉が落下、及び空気清浄機吸気面を通過した場合、花粉はその境界面で静止したように取り扱い、以降解析しない。それ以外の境界に衝突した花粉は、境界面法線方向の速度を失い、法線方向には移動しない。その結果、吸気面を除く境界面に衝突した花粉は、その境界面に沿って重力落下する。

花粉の終端速度 v_T は、ストークスの式(2.9.1)より 3.85[mm/s]である。

$$v_T = \frac{\rho_p}{18\mu} g d_p^2 \quad (2.9.1)$$

3.85[mm/s]で 2.5[m]を落下するには 649[s]かかる。本論文では、その 2 倍強の 1,400[s]を花粉挙動シミュレーションのシミュレーション時間とする。その 1,400[s]時点での、空気清浄機に吸入された花粉の割合を、**花粉除去効率**と本論文では定義する。

花粉挙動計算結果を time step 毎に出力する必要性が無いため、計算結果の解析に用いる時間刻み 0.1[s]毎に、Text ファイルに出力する。出力する内容は、時刻、花粉 number、花粉の状態、花粉の三次元位置である。花粉の状態とは、浮遊、吸入または落下を示す。また、吸入及び落下した花粉の位置は変化しないため、それ以降の位置情報は不要である。従って、浮遊中の花粉の情報のみ出力し、吸入及び落下した花粉は出力しない事とする。

第10節 花粉挙動解析ツール

空気清浄機に吸入された花粉を吸入花粉，床に落下した花粉を落下花粉，空気清浄機に吸入された花粉の初期位置を吸入花粉初期位置と，本論文では定義する．

花粉挙動シミュレーション結果は，本論文の条件では 1GB 程度の数字の羅列である．そのままの生データでは何を意味するか理解できないため，なんらかの解析を行わなければならない．花粉挙動解析ツールは，挙動結果を解析し，以下の 4 つのファイルとして出力する．

1. 時発展グラフ用の，時系列にまとめられた吸入・落下花粉数及び割合
 2. 花粉挙動シミュレーション用にまとめられた，位置情報の Binary ファイル
 3. 落下花粉の二次元分布の table データ
 4. 吸入花粉初期位置の，二次元分布の table データ
-
1. Excel 等のグラフ作成ソフトで，吸入及び落下花粉の時発展グラフを作成する．時発展グラフでは時間刻みが粗くても問題なく，解析結果ファイルの時間刻みを 1[s]とする．花粉総数が異なる挙動シミュレーション結果を比較する事を考慮し，また，吸入・落下花粉数よりはその割合の方が理解しやすいため，吸入及び落下花粉数とそれを花粉総数で除した割合を併記する．
 2. 花粉挙動結果を読み込んでそのまま可視化すると 3 つの問題が発生する．1 つ目は，挙動結果は大きな Text ファイルであるため，読み込みに非常に時間がかかる．2 つ目は，本論文の条件である 8,280 個，1,400[s]の花粉の位置情報（時間刻み 0.1[s]）は 2.59GB と非常に大きく，メモリを非常に圧迫する．3 つ目に，8,280 個の花粉挙動をアニメーションするには，CPU だけではなくグラフィックス演算器 GPU に過剰な性能を要求する．従って，大多数の花粉が吸入又は落下する 800[s]迄を描画時間とし，挙動の傾向が認識できる 25%程度である 2,000 個の花粉を抽出する．また，可視化の為に位置座標には単精度浮動小数で充分であり，倍精度浮動小数である必要がないため，花粉の位置情報（単精度浮動小数 $4B \times 3$ ）と状態（単精度整数 2B）を 1 つの構造体としてまとめる．この構造体の実質的なサイズは $4B \times 3 + 2B = 14B$ であるが，alignment の関係上 2B の padding が成されているため，構造体のメモリ上のサイズは 16B となる．花粉数 2,000 個，800[s]間の構造体配列は 244MB であり，本来のサイズの 1 割に抑えられる．これを Binary ファイルとして出力し，可視化ツールで読み込む．
 3. 落下花粉は XY 平面の密度分布として示すことが出来る．Table 2.1 の空間分解能で分割し，それを Table 状に Text ファイルに出力する．タブと改行を用

いた標準的なフォーマットで出力しているので、様々なグラフ作成ソフトで読み込む事が出来る。これにより、落下花粉分布の二次元ヒストグラム化が可能である。

4. 吸入花粉初期位置は、空気清浄機に吸入された花粉の初期位置であるので、空気清浄機の有効範囲を示す。この吸入花粉初期位置は三次元位置情報であるので、各平面に投影した密度分布を落下花粉二次元分布と同様に **Table** 状で出力する。

第11節 可視化ツール

気流、花粉挙動シミュレーションで得られた三次元の生データを理解するのは非常に難しく、可視化ツールで可視化する必要がある。しかしながら、ベクトルの三次元分布の可視化が可能なソフトウェアは少なく、有償であったりフォーマットが独特であったり、可視化上の制約があったりと、様々な問題がある。従って、研究者が視覚的に理解するのを目的に、独自に可視化ツールを開発した。可視化には、研究用途での三次元アニメーションに定評のある **OpenGL** (**Open Graphics Library**)^[11]を用いた。

OpenGL はオープンソースでかつ、プラットフォームに依存しないのが特徴であり、研究者に愛用されている。**OpenGL** はプラットフォームに依存しないが為に、各々のプラットフォーム毎の規格で **OpenGL** コードを組まなければならない。そのプラットフォームの規格毎の異なるコードを **AUX(Auxiliary)**ライブラリにまとめ、一つの共通コードで様々なプラットフォームに対応できるようにされたのが **GLUT (OpenGL Utility Toolkit)**である。**OpenGL** 及び **GLUT** は可視化することに主眼が置かれているため、マウスやキーボードからの入力には対応しているものの、柔軟な操作を行う事はできない。可視化ツールの操作性を向上させるために、**GLUI (OpenGL User Interface Library)**を採用した。**GLUI** は、ボタン、チェックボックス、スピナーなどによるマウスでの操作をサポートしており、キーボードから数値を直接入力することも可能である。この入力されたパラメータに従い、**OpenGL** はフィードバックされた描画を行う。また、プログラム内の値を **User Interface** に出力することも可能である。

OpenGL, **GLUT**, **GLUI** を用いて、C++で気流可視化及び花粉挙動アニメーションツールを開発した。

気流可視化ツールは、Table 2.1 の設定ファイルと流速情報の **Binary** ファイルを起動時に読み込み、気流描画 **Window** (Fig. 2.14)及び **UI (User Interface)** **Window**

(Fig. 2.15)を作成する．流速の描画は，UIのパラメータに従って三次元で可視化される．UI Window は，視点移動，視点切り替え，流速描画オプション，描画平面オプション，カラーバー，指定座標での流速情報表示の，6つの機構を備える．

視点移動機構では回転，平行移動，拡大縮小が可能であり，視点位置切り替えではプリセットされた視点（正面・側面・俯瞰）に変更が可能である．流速描画オプションでは，フルカラー・グレースケールの切り替え，ベクトル長タイプ（常用対数比，通常比，固定長）の選択，描画ベクトルの間引き（描画解像度の変更），ベクトルの太さ及び長さ，また，ベクトル先端の球の大きさが設定可能である．描画平面オプションでは，各平面及び三次元の4つからベクトルの可視化空間を選択でき，指定値(i, j, k)での平面(YZ, XZ, XY)を可視化できる．流速の大きさをベクトルの色からでも判断できるように，流速スカラーの常用対数比を後述する加色法によるレインボーカラーに対応させ，それをカラーバーとして表示している．指定座標での流速情報表示では，指定座標(i, j, k)での各流速成分及び流速スカラーを表示する．スピナー式の Text エリアは，キーボードから数値の直接入力にも対応している．

加色法によるレインボーカラーは，24bit フルカラー(0xRRGGBB)の16進数で作られる．流速スカラーの常用対数比 U_{ratio} に応じて，赤(100%: 0xff00)，黄(75%: 0xffff00)，緑(50%: 0x00ff00)，水色(25%: 0x00ffff)，青(0%: 0x0000ff)と定義する．本論文のレインボーカラーでは，最低値である青(0x0000ff)から25%になるまで Green を加色していき，水色(0x00ffff)となる．25～50%では，水色(0x00ffff)から青を減色していき緑色(0x00ff00)とする．50～75%では緑色(0x00ff00)から赤を加色していき黄色(0xffff00)とし，75～100%では黄色(0xffff00)から緑を減色していき赤(0xff0000)とする．

常用対数を用いているために，流速スカラーの最小値 U_{min} を，0.0[m/s]を除く全領域での流速スカラーの最小値とする．全領域での流速スカラーの最大値を U_{max} とし，流速スカラーの常用対数比 U_{ratio} を以下と定義する．

$$U_{\text{ratio}} = \frac{\log(U) - \log(U_{\text{min}})}{\log(U_{\text{max}}) - \log(U_{\text{min}})} \quad (2.11.1)$$

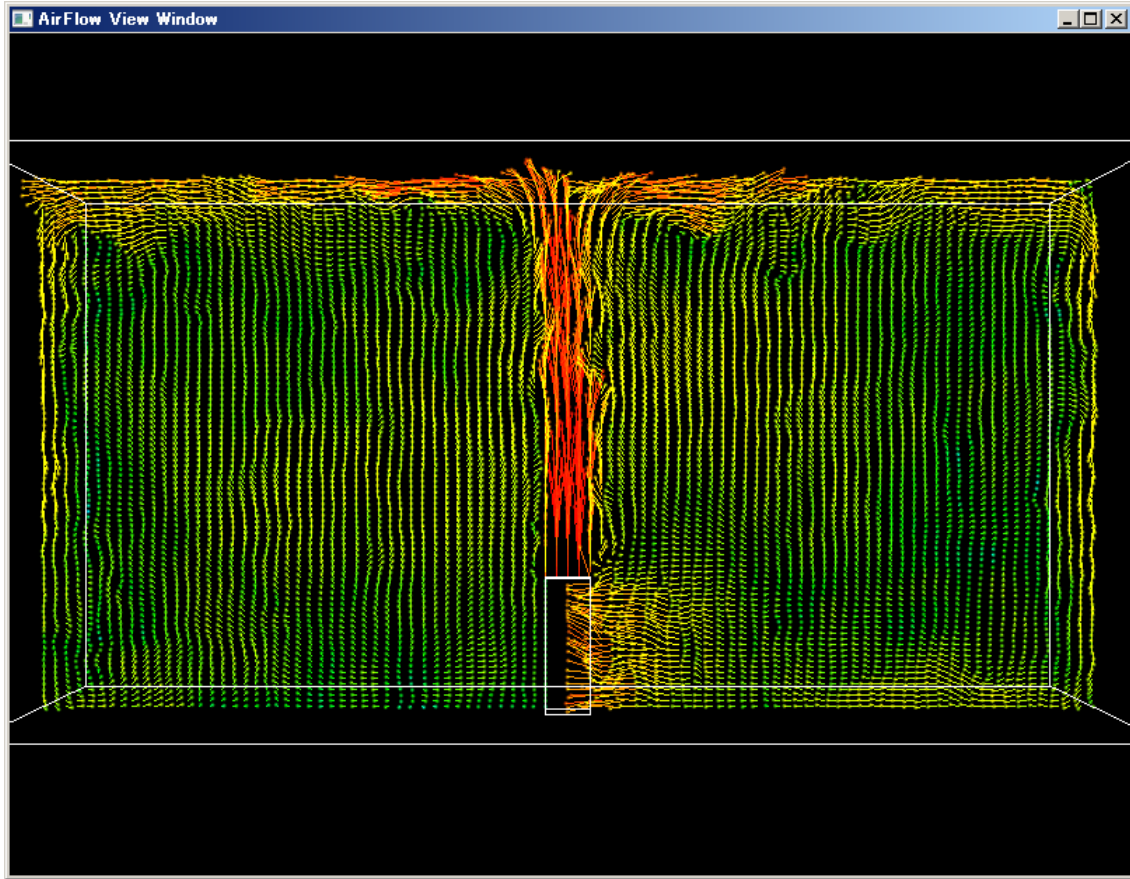


Fig. 2.14. The airflow visualization window.

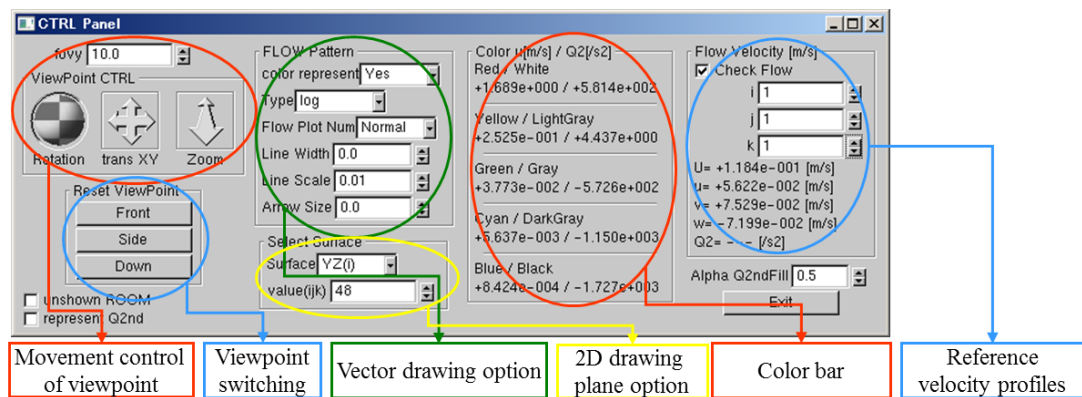


Fig. 2.15. The user interface window for controlling the airflow visualization (fig. 2.14). The user interface has six features for plotting the flow velocity, such as the movement control of viewport, the viewport switching, the option for drawing the velocity vector, the option of drawing on the 2D surface, the color bar, and the reference velocity profiles at specified coordinates.

花粉挙動アニメーションツールは、気流可視化ツールと同様に、起動時に Table 2.1 の設定ファイルとアニメーション用の花粉挙動 Binary ファイルを読み込み、花粉挙動描画 Window (Fig. 2.16)及び UI Window (Fig. 2.17)を作成する。

花粉挙動可視化 UI も、気流可視化ツールと同じ視点移動及び視点切り替え機構を有する。また、描画時間制御機構を搭載しており、通常再生、逆再生、一時停止でき、現在の再生フレームを表示する。カラー表示機構では、カラーまたはグレースケールから粒子の表示色を選択でき、その色の示す粒子の状態を表示している。Fig. 2.16 で示される各花粉の状態は、緑が浮遊花粉、赤が空気清浄機吸入花粉、青が落下花粉である。

OpenGL では、パラパラ漫画のように、スライドを次々と交換していく事でアニメーションとしている。1 枚のスライドを表示中に、バッファのスライドに次に表示する絵を準備し、準備が完了すればバッファのスライドと交換する。するとバッファのスライドが空くので、次のスライドを用意し…という事を繰り返す。従って、PC のグラフィクス能力及び、PC の OpenGL の設定によって、描画スピードは異なる。再生スピードが速すぎる場合に備えて、花粉挙動アニメーションツールでは、Rendering wait の値を上げることで低速化を可能にしている。

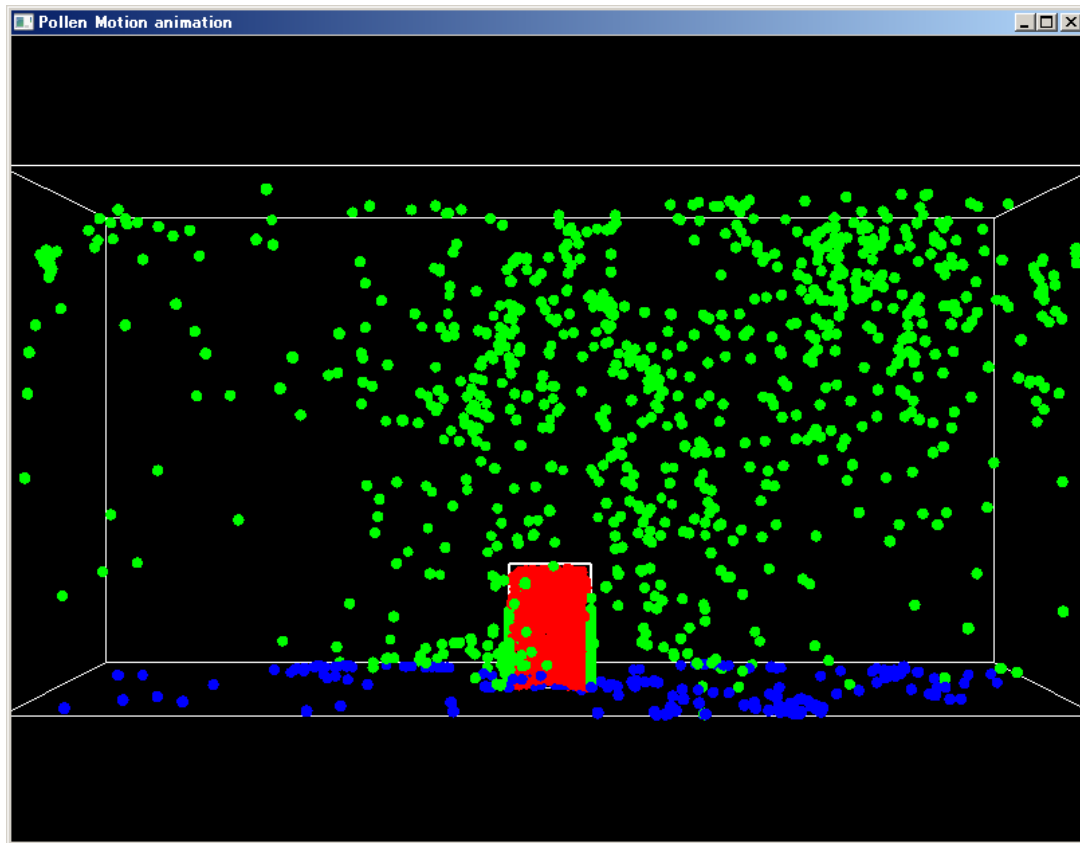


Fig. 2.16. The particle motion visualization window. The red particle indicates the removed pollen by the air purifier, the blue is fallen, the green is floating pollen.

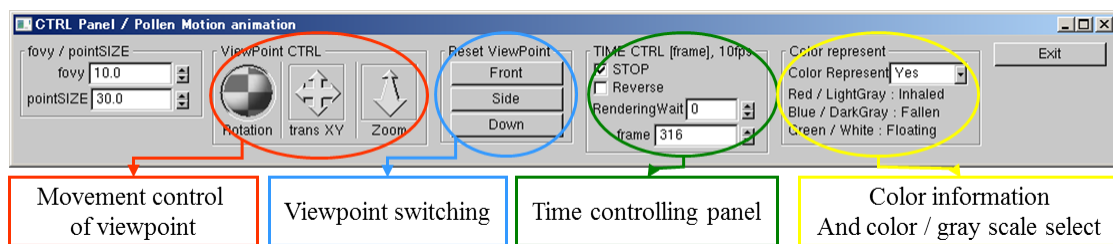


Fig. 2.17. The user interface window for controlling the particle motion visualization window (fig. 2.16). The user interface has four features for plotting particles. The movement control of viewport and the viewport switching features are same as fig. 2.15. The time controlling panel can control to play sequential or reverse, and to pause. The color represent feature selects a color or gray scale, and indicates pollen status.

参考文献

- [1] 梶島岳夫：乱流の数値シミュレーション，第3版，養賢堂，(2007).
- [2] Kobayashi H.: The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow, *PHYSICS OF FLUIDS* **17**, 045104 (2005).
- [3] Kobayashi H., Ham F., Wu X.: Application of a local SGS model based on coherent structures to complex geometries, *HEAT AND FLUID FLOW* **29**, 640-653 (2008).
- [4] 保原充, 大宮司久明 編: 数値流体力学 基礎と応用, 東京大学出版会, (1992).
- [5] 大橋えり, 大岡龍三: スギ花粉による室内空気汚染(2) —スギ花粉粒子の粒径・重量の実測と空気力学特性について—, *日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 環境工学II* **2001**, 939-940 (2001).
- [6] Allery C., Bégheyn C., Hamdouni A.: Applying proper orthogonal decomposition to the computation of particle dispersion in a two-dimensional ventilated cavity, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* **10**, 907-920 (2005)
- [7] Chow W.K., Yin R.: A new model on simulating smoke transport with computational fluid dynamics, *Building and Environment* **39**, 611-620 (2004)
- [8] Hinds W. C.: Aerosols Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc., (1999)
- [9] 越塚誠一：数値流体力学，第3版，培風館，(2001).
- [10] 雷康斌, 谷口伸行, 小林敏雄：ダイナミック Random Walk SGS モデルの提案（固気混相乱流のLESにおける粒子運動に及ぼす気体SGS成分の影響），*日本機械学会論文集 B 編* **69**(681), 1073-1080 (2003).
- [11] OpenGL 策定委員会：OpenGL プログラミングガイド，第5版，ピアソンエデュケーション，(2006).

第3章 CAMPAS の妥当性検証

開発した気流シミュレーション結果を流体解析ソフトと比較し、また、粒子挙動解析結果を実験と比較する。第 1 節で妥当性検証の目的を述べる。第 2 節では、比較する流体解析ソフト **Code_Saturne** について述べ、第 3 節では比較条件を、第 4 節では比較結果を述べる。第 5 節では、粒子挙動解析結果と比較する実験モデルについて述べ、第 6 節ではシミュレーションモデルを、第 7 節では比較結果をまとめる。

第1節 CAMPAS 流体解析の妥当性検証の目的

第 1 章 8 節で、室内気流及び粒子追跡シミュレーションの拡張発展性のために、非商用の流体解析ソフトを用いずに、**CAMPAS** を独自開発したことを述べた。

CAMPAS の流体解析結果を実験値などと比較し、妥当性を検証する必要がある。室内気流を測定するには、**LDV (LASER Doppler Velocimetry)**を用いるのが一般的である。**LDV** では計測による外乱が無く、指定時間内の流速スカラーの時間変動を測定することが出来る。しかしながら、得られるデータが流速ベクトルではなく流速スカラーであること、本モデル **Table 2.1** では 88 万個の位置での測定をしなければならないことから、本モデル空間である $5 \times 5 \times 2.5[\text{m}]$ の実験空間での気流分布測定は困難である。従って、本研究モデルと同一化が可能な、シミュレーション結果同士を比較する事にする。

CAMPAS の流体解析及び粒子挙動解析の妥当性を検証するために、風洞実験を行った。筒型の開放型風洞に流速を与え、2 個のパーティクルカウンタを用いて 3 点の粒子数を計測した。シミュレーションでは、パーティクルカウンタの流入出流速を考慮したモデルで流体解析を行い、その流れ場で粒子挙動を解いた。このシミュレーション結果と実験値を比較することで、**CAMPAS** の流体解析及び粒子挙動解析の妥当性を検証する。

第2節 Code_Saturne

Code_Saturne^[1]とは、フランス電力公社 **EDF** によって開発された、**GNU GPL (General Public License)**の汎用 **CFD (Computational Fluid Dynamics)**ソフトウェアである。**Code_Saturne** の基本性能として、熱伝導や乱流に関わらず、流れ場の取

り扱いができる．専用モジュールは，放射性伝熱，ガス・石炭・重油などの燃焼，磁気流体力学，圧縮性流体，Euler-Lagrange 手法による混層流や大気などの特定物理学に利用できる．

Code_Saturne での流体解析フローを Fig. 3.1 に示す．Code_Saturne はメッシュ生成機能を有していないため，別のソフトで形状モデルを生成し，メッシュ分割しなければならない．本論文では，SALOME で生成したメッシュを用いて Code_Saturne で数値シミュレーションを行い，EnSight Gold 形式で結果を出力した．EnSight Gold 形式は，SALOME, ParaView で可視化できる．この EnSight Gold 形式は，頂点座標でセル位置を決定し，そのセルでの *collocated* 格子に変換した流速情報を単精度浮動小数で出力している．

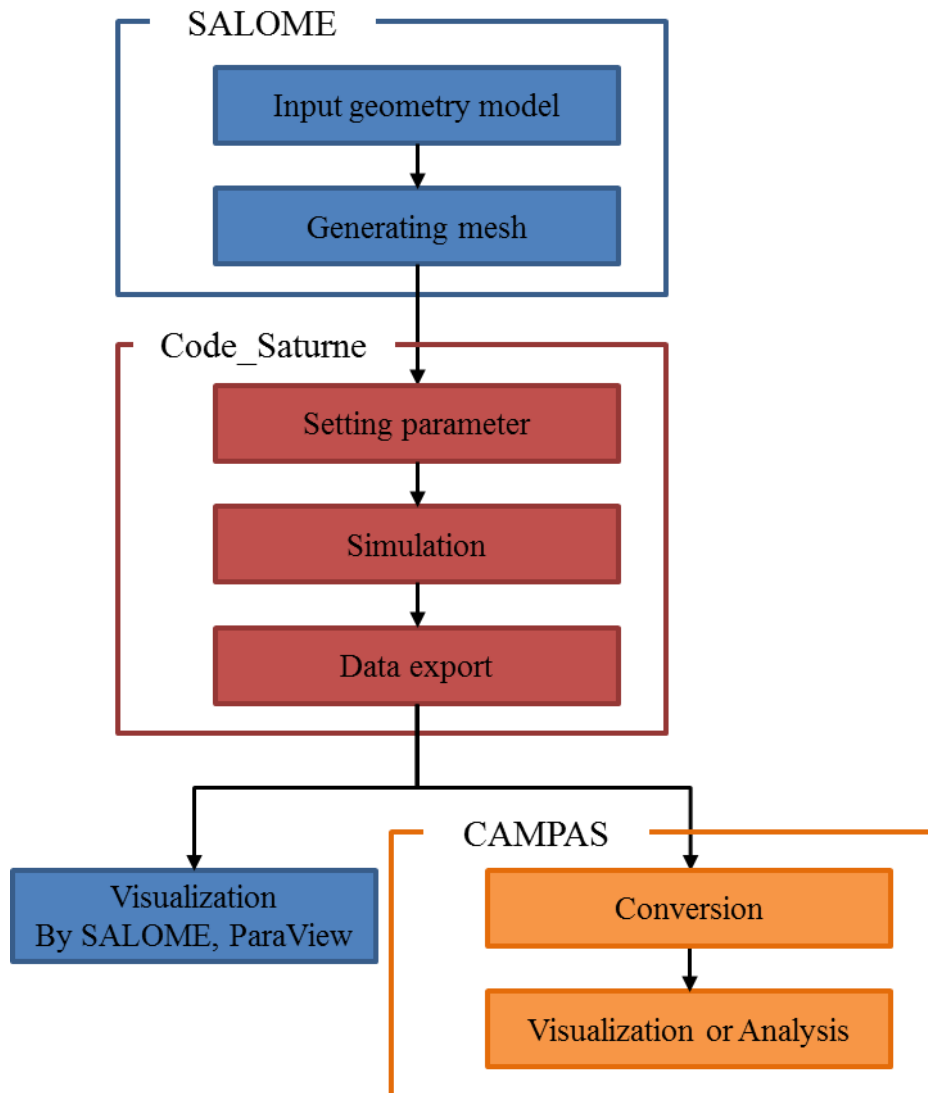


Fig. 3.1. The Code_Saturne flow chart. The Code_Saturne does not have a mesh generator module, since the calculation mesh is generated by the SALOME. The SALOME is a software for mesh generation or visualization. The Code_Saturne exports the simulation results. The results are visualized by the SALOME or the ParaView. The CAMPAS is able to convert from the results of the Code_Saturne format (EnSight Gold) to the CAMPAS format, and the CAMPAS visualizes and analyses the converted data.

Code_Saturne はライセンス料が不要であるため、大学や企業などでの研究にてよく使用されており、開発元の EDF が改良を重ねている。ユーザ数が多いこと、ソースコードが公開されていることにより、バグが少なく信頼性が高いという評価を受けている。ここでは、Code_Saturne で解かれた潜水艦表面での圧力係数

^[2]及び、高温流と低温流の T 字パイプでの合流^[3]の結果を示し、Code_Saturne の妥当性を述べる。

Zhi Shang は、DARPA 潜水艦の表面に於ける圧力係数を Code_Saturne, Fluent, STAR-CD によって解き、実験値との比較を行った。DARPA とは、アメリカ国防総省の国防高等研究計画局である。圧力係数とは、無次元化された圧力であり、位置と Reynolds 数のみに依存する変数である。

その DARPA 潜水艦のモデルを Fig. 3.2 に、圧力係数の比較図を Fig. 3.3 に示す。Fig. 3.3 は DARPA 潜水艦に沿った横断面での圧力係数 C_p を示しており、潜水艦の上面部分、艦首・艦橋・尾翼・艦尾までの表面が比較されていると思われる。図では、艦橋前の 0.2 までの領域で差が確認できる。論文中では一切触れられていないために推測になるが、艦橋前が滑らかな局面を描く形状の模型実験と、艦橋前が平面になっている実機モデルでのシミュレーションを比較しているため、差が生じているのではないかと考えている。しかしながら、艦橋以降の領域では Code_Saturne の解析結果は特に曲線部でよく一致しているのが見て取れる。また、商用ソフトの Fluent, STAR-CD とも、Code_Saturne はよく一致している。これより、Code_Saturne は商用の流体解析ソフトと一致するのは勿論、実験値ともよく一致しており、信頼性を有するのが確認できる。

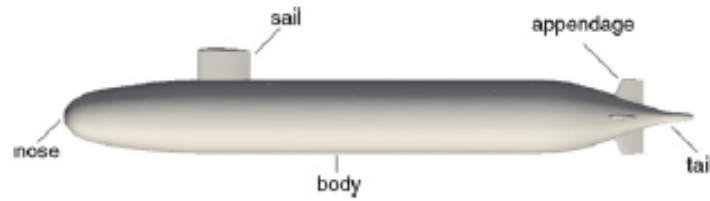


Fig. 3.2. The DARPA submarine model.

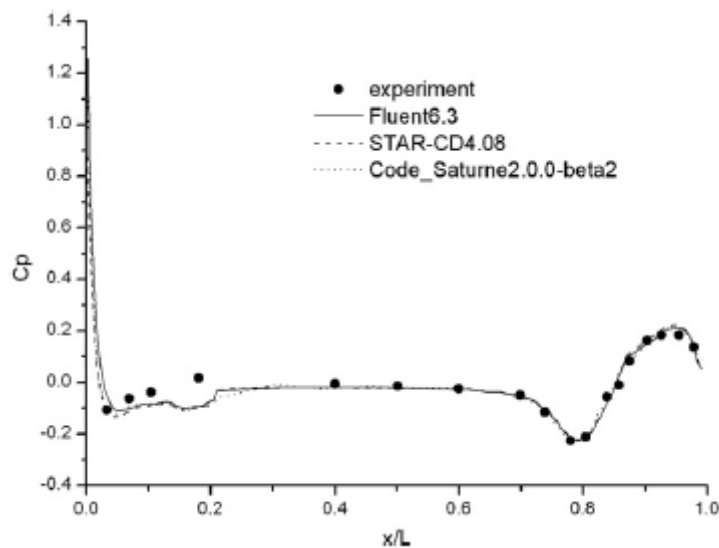


Fig. 3.3. Comparisons of pressure coefficients.

Jean-Marc Ndombo らは、高温流と低温流が T 字パイプで合流する流れ場を Code_Saturne によって解き、実験値と比較した。そのモデル図を Fig. 3.4 に示す。T 字パイプの上部から高温流が、左から低温流が流れ込み、T 字部で合流する。このモデルに於いて、600 万(6 Million)または 1,000 万(10 Million)セル、流入境界部で渦を人工的に設定する Synthetic Eddy Method の有無の 4 パターンでシミュレーションが行われた。この結果を、低温流入部の直径を D とし、 X が $2.6D$ の位置での比較を Fig. 3.5 に、 X が $6.6D$ を Fig. 3.6 に示す。Fig. 3.5 は Z 方向での流速分布を示しており、Fig. 3.6 では Y 方向（紙面奥方向）での流速分布を示す。両図共に、無次元化された平均流速と、本章 4 節に後述する rms 流速をプロットしている。Fig. 3.5 及び 3.6 とともに、実験結果と Code_Saturne シミュレーション結果は同様の傾向を示している。

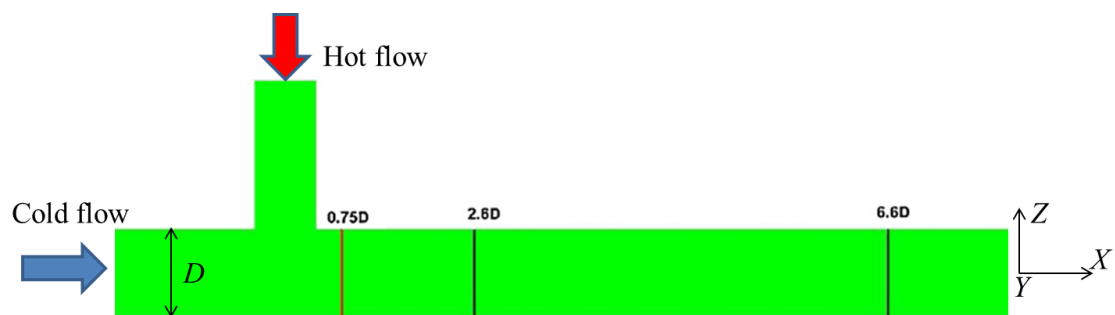


Fig. 3.4. X positions for the comparisons.

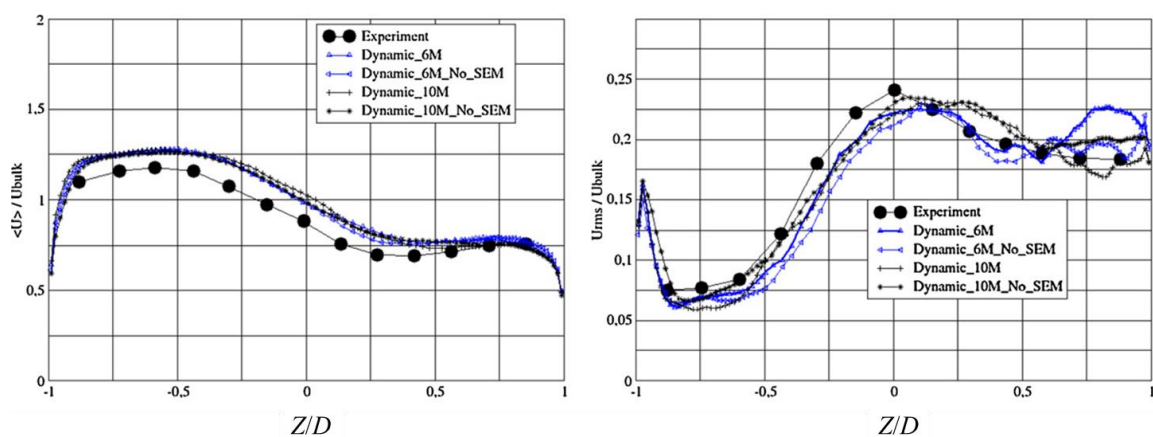


Fig. 3.5. Dimensionless mean velocity (left) and rms velocity (right) at $X = 2.6D$.

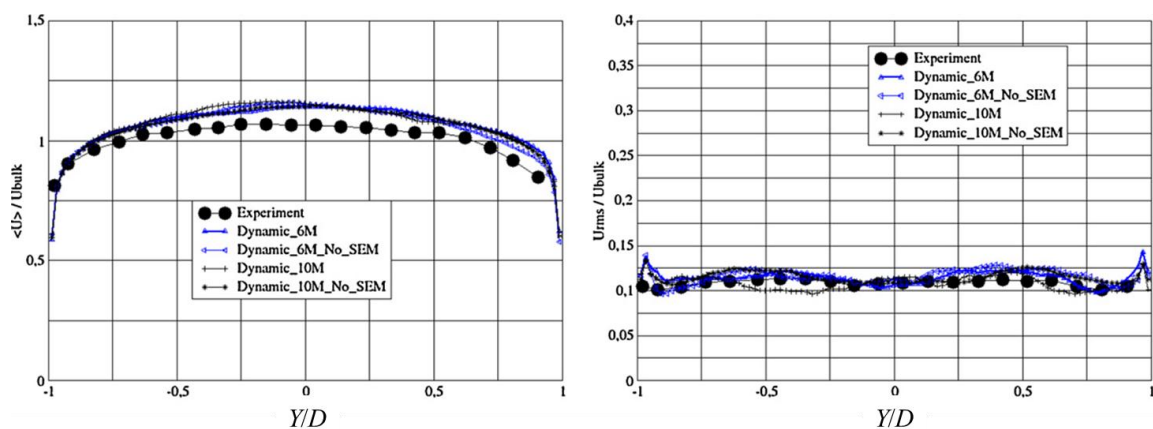


Fig. 3.6. Dimensionless mean velocity (left) and rms velocity (right) at $X = 6.6D$.

この2つの結果より、Code_Saturne は実験値と一致、または同様の傾向を示しており、計算結果の信頼性は充分にあると判断できる。しかしながら、壁面近

傍では実験値を得られないために比較されていない．従って，壁面近傍での Code_Saturne の妥当性検証の余地が存在する．

第3節 CAMPAS と Code_Saturne のパラメータ

本論文で使用している，自作の CAMPAS の流体解析を，Code_Saturne と比較する．

CAMPAS は，Code_Saturne で出力した EnSight Gold 形式の流速情報を CAMPAS 形式に変換できる．その変換した流速情報を解析し，平均流速と二乗平均平方根流速を計算した．

シミュレーション空間は共に Fig. 2.3 であり，空気清浄機モデルは Fig. 2.2 の前面吸気型である．CAMPAS と Code_Saturne のパラメータを Table 3.1 に示す．メッシュは双方共に，各軸等間隔に 96 分割した．時間刻みは，クーラン条件により， $1.7 \times 10^{-2}[\text{s}]$ 以下であればよい．クーラン条件とは，時間刻み Δt の間に情報伝達速度（本報では流速 u ）で伝わる距離が空間格子幅 Δ を越えてはならない^[4]という条件である．従って，Code_Saturne の時間刻みを $1.0 \times 10^{-2}[\text{s}]$ とした．CAMPAS に於いては， $1.0 \times 10^{-2}[\text{s}]$ の時間刻みでは圧力の Poisson 方程式が収束しないため，SOR 法が収束する $1.0 \times 10^{-3}[\text{s}]$ を時間刻みとした．CAMPAS，Code_Saturne 共に LES を行っており，CAMPAS での SGS モデルには CSM を，Code_Saturne では Smagorinsky モデルを用いた．

Table 3.1. CFD input Parameters of the CAMPAS and Code_Saturne.

Parameters	CAMPAS	Code_Saturne
SGS Model	CSM	Smagorinsky
Flow type	Unsteady	
Division Num. [Mesh]	96 ³	
Time interval Δt [s]	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-2}
Initial value of pressure p [Pa]	1.0×10^5	
Initial density ρ [Kg/m ³]	1.154	

第4節 Code_Saturne との比較結果

CAMPAS，Code_Saturne 共に，150～160[s]までの 10[s]間の流速情報を 1Time step 毎に出力した．空気清浄機幅で切り取った領域(Fig. 3.7)を平均化处理領域と

し、この領域を比較領域とする．この平均化処理領域に於いて、X 方向及び、150～160[s]の 10[s]間の時空間に於いて、平均流速(3.4.1)を求め、それを用いて二乗平均平方根流速(3.4.2)を算出した．

$$\langle \bar{\mathbf{u}} \rangle = \frac{1}{N_x} \frac{1}{N_t} \sum_{i_x=1}^{N_x} \sum_{i_t=1}^{N_t} \mathbf{u}_{i_x, i_t} \quad (3.4.1)$$

$$\mathbf{u}_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N_x} \frac{1}{N_t} \sum_{i_x=1}^{N_x} \sum_{i_t=1}^{N_t} (\mathbf{u}_{i_x, i_t} - \langle \bar{\mathbf{u}} \rangle)^2} \quad (3.4.2)$$

ここで、 i_t は Time step を、 N_t は合計 Time step 数を示し、 i_x は X 方向の i 座標を、 N_x は空気清浄機幅分のセル数を示す．従って、CAMPAS 及び Code_Saturne 共に N_x は 8、 N_t は、CAMPAS では 10,000、Code_Saturne では 1,000 である．

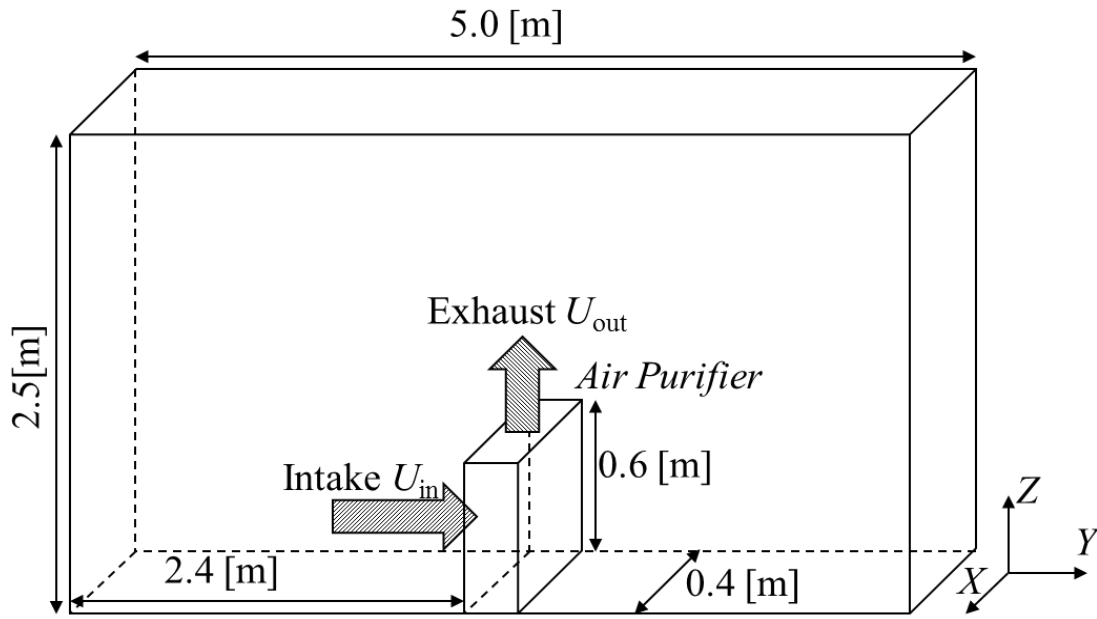


Fig. 3.7. The averaging domain for mean and rms velocity profiles. The Y and Z axis ranges are the same as the computational domain (fig. 2.3), the X direction is in range of the air purifier.

YZ 平面の各座標[m]での流速成分[m/s]を示す方法として、小林の報告^[5]を参考にし、式(3.4.3)を用いる．その様子を Fig. 3.8 に示す．(y, z)での Y 方向流速 $v_{(y, z)}$ を吸気流速 U_{in} で無次元化し、倍率 α_{ratio} [m]を乗じ、その分だけ離れた位置にプロットする．本論文では、倍率 α_{ratio} [m]の大きさは、軸上に表示される基準位置間

の半分の大きさ[m]とした．これにより， Y 軸上に示されるドットから基準位置 (y, z) が判明し，そこからのプロット点の距離で Y 方向流速の大きさを判断することが出来る．

$$\left(y + \frac{v(y, z)}{U_{in}} \alpha_{ratio}, z \right) \quad (3.4.3)$$

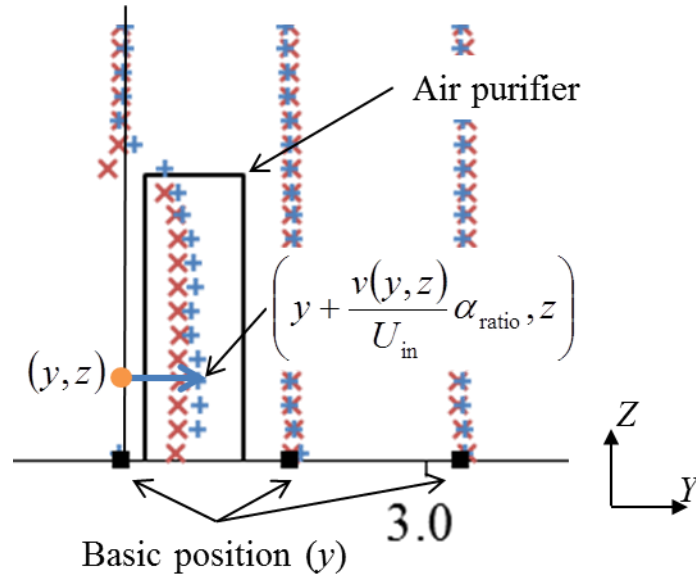


Fig. 3.8. The sample of intakewise velocity plots on the YZ plane. The box at the plot area bottom is the air purifier, the dots on the Y axis indicate the basic position. The Y component of a velocity plots at each position is proportional to the velocity component from the basic position.

この手法では，基準位置 (y, z) が自明でなければならぬため，流速の Y 成分 v と Z 成分 w のどちらかしか示すことが出来ない．流速の Y 成分 v と Z 成分 w を同時に示すことが出来ないため，本論文では2つのグラフに分割して図示する．

Z 方向流速も同様に，式(3.4.4)を用いて図示する．

$$\left(y, z + \frac{w(y, z)}{U_{out}} \alpha_{ratio} \right) \quad (3.4.4)$$

吸気(Y 軸)方向及び排気(Z 軸)方向成分の，無次元化された平均流速を，Fig. 3.8 (a), (b)に示す．各図共に，各セルでの流速成分を流れ方向の代表速度で無次元化し，CAMPAS の流速を $+$ ，Code_Saturne の流速を \times で示す．吸排気流速で無次元

化された流速の指標を、プロットエリア右上に2つのドット間隔として表した。プロットエリア下中央の長方形は、空気清浄機である。Y(Z)軸上に基準位置をドットプロットした。

吸気方向の平均流速 Fig. 3.8 (a)では、空気清浄機上面から排気された主流が天井面に衝突し、左右に分かれているのが確認できる。その天井近傍に於いて多少の差異が確認できる。Fig. 3.8 (a)の左上部分を拡大した図を、Fig. 3.9 に示す。Code_Saturne, CAMPAS 共に、天井に直下の排気主流の大きさは同程度である。しかしながら、その排気主流の下側の領域に於いて、Code_Saturne では流速勾配が大きく境界層が小さいが、CAMPAS は流速勾配が小さく境界層が大きくなっている。これは、SGS モデルの違いによる物だと考えられる。Code_Saturne で使用している標準 Smagorinsky モデルは、渦粘性を壁からの距離に応じて強制的に減衰させている。従って、天井に沿う主流下側の領域でも粘性が小さくなるため、排気主流に引きずられにくく、流速勾配が大きくなると考えられる。CAMPAS での CSM は、各位置での渦粘性を、壁に対して自然減衰するように、動的に計算する。これにより、排気主流下側での領域で、強制減衰されていないために、Code_Saturne よりも粘性を大きく評価していると考えられる。

天井近傍以外では、ほぼ同様の結果を示している。また、排気方向の平均流速 Fig. 3.8 (b)では、完全に一致している。

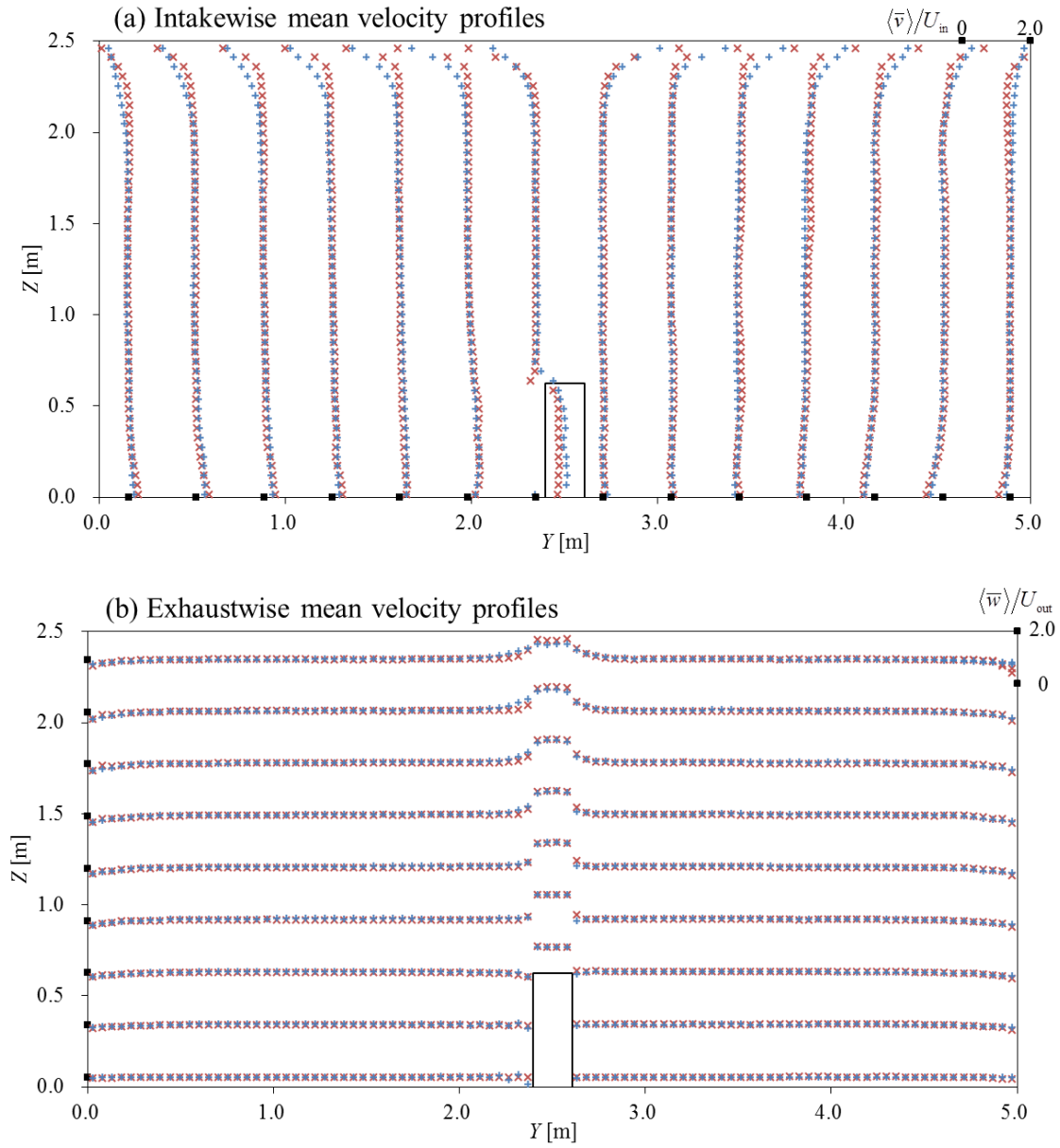


Fig. 3.8. Intakewise (a) and exhaustwise (b) mean velocity profiles. CAMPAS mean velocity is indicated by (blue plus), and Code_Saturne is indicated by (red cross). The intakewise direction is Y (a), and the exhaustwise direction is Z (b). The mean velocity component plots at each position is proportional to the velocity component from the basic position. The mean velocity is averaged in 10 seconds and in the X axial direction as fig. 3.7. The box at the plot area bottom is the air purifier, the dots on the Y (a) Z (b) axis indicate the basic position, the twin dot at the plot area upper right indicates normalized mean velocity.

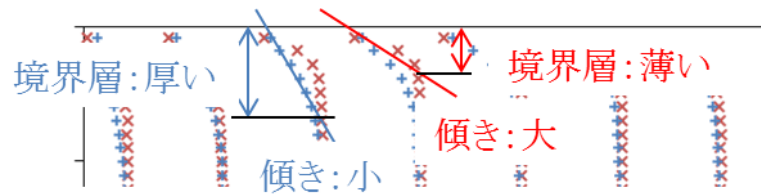


Fig. 3.9. The zoom of the intake-wise mean velocity profiles. The zoom area is the left top of the fig. 3.8 (a).

式(3.4.2)の二乗平均平方根(rms: Root Mean Square)は、速度変動の実効値を示す。速度変動とは、各時間及び各セルでの平均流速からの摂動量である。速度変動の2乗平均値は、乱流のエネルギーの大きさを示す。流れ方向の代表速度で無次元化したrms値を、乱流強度(Turbulent intensity)と定義する。乱流強度は大きいほど乱れた流れであることを示す。

乱流強度を Fig. 3.10 (a), (b)に示す。プロットの手法は、平均流速と同様である。吸気方向 rms の(a)では、空気清浄機吸気面直前に於ける CAMPAS の乱流強度は大きく評価されている。また、排気方向 rms の(b)でも、空気清浄機吸気面直前の乱流強度が、CAMPAS では大きく評価されている。これは、空気清浄機吸気面近傍領域に於いて、CAMPAS は流速の Y 及び Z 成分が時間的に変動し乱れやすい事を示している。この時間変動は、CSM により動的に渦粘性が計算される事に起因し、CSM は標準 Smagorinsky モデルよりも障害物などにより乱流が発生しやすい事を示している。標準 Smagorinsky モデルは、第2章3節で述べたとおり、壁からの距離に応じて Smagorinsky 定数に壁関数を用いて減衰させるのであり、渦粘性を動的に計算していない。従って、CAMPAS の CSM では、障害物などの局所領域に於いて、標準 Smagorinsky モデルよりも渦粘性を小さく評価し、乱れが生成されやすいと言える。

Fig. 3.10 (a)の天井近傍では、CAMPAS は rms 流速の勾配が小さく、排気主流の下領域でも大きく評価されている。これは、Fig. 3.9 でも示されたように、CAMPAS では排気主流の下側の領域でも流速が大きいために、時間変動率が同程度であっても母数が大きいために rms 値も大きくなる。また、空気清浄機上面から天井までの排気主流の側面領域で、rms 値が大きくなっている事も確認できる。これは、排気主流からの剥離流によるものである。

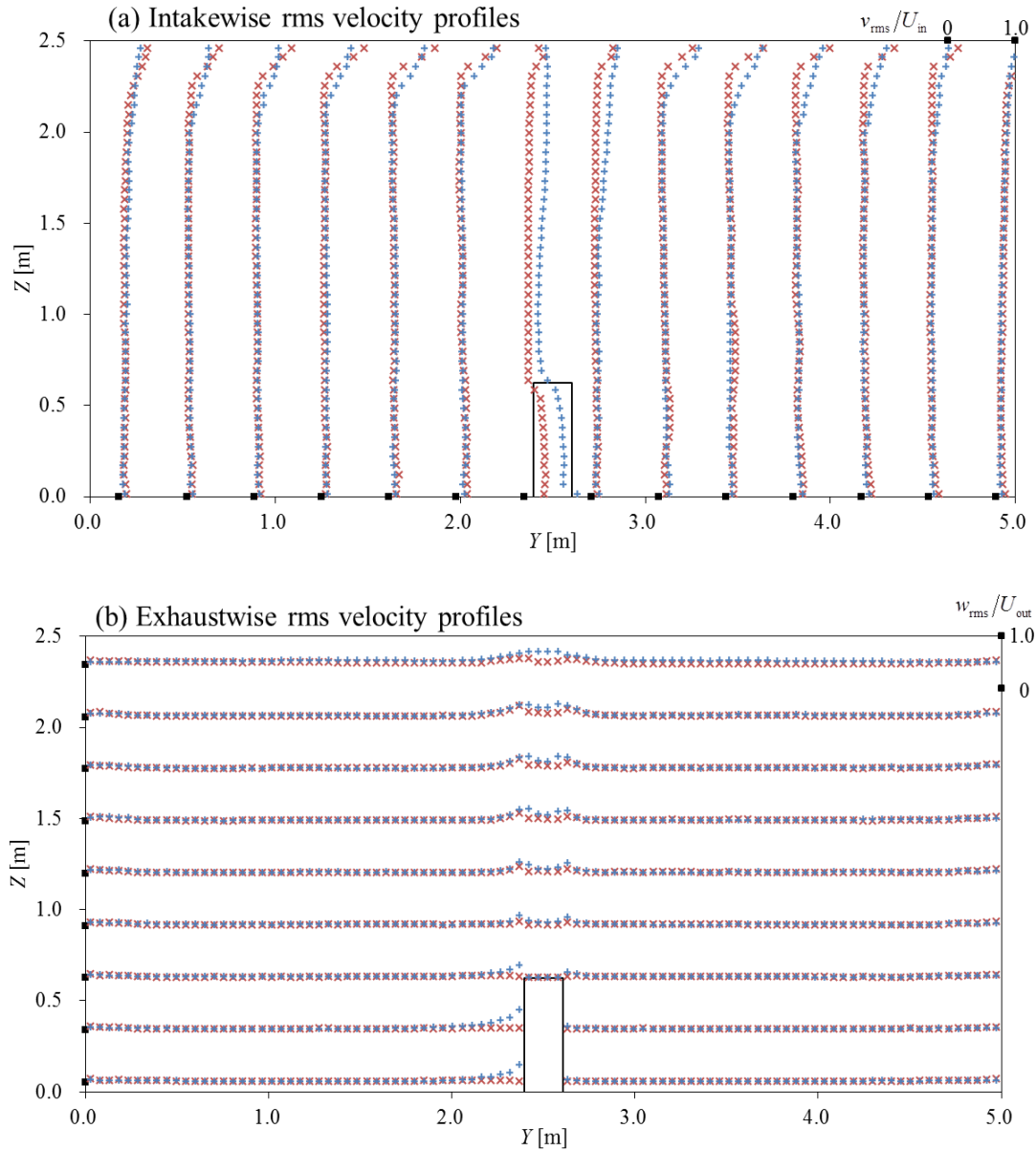


Fig. 3.10. Intakewise (a) and exhaustwise (b) rms velocity profiles. CAMPAS rms velocity is indicated by (blue plus), and Code_Saturne is indicated by (red cross). Other rules are the same manner as Fig. 3.8.

平均流速及び乱流強度共に，空気清浄機排気面から天井までの排気主流，空気清浄機吸気面前方領域，及び天井近傍での境界層に於いて，SGS モデルやスキームの違いによると思われる多少の差異が発生している．しかしながら，それ以外の領域では同等の結果を示している．CAMPAS の流体解析は，

Code_Saturne と比較して、吸気面近傍や天井近傍で差異は生じているが、それ以外の領域では差異は認められない。

第5節 妥当性検証実験モデル

CAMPAS の流体解析及び粒子挙動解析の妥当性を検証するために、開放型風洞を制作し、実験を行った。

開放型風洞実験モデルを Fig. 3.11 に示す。実験装置の全長は 184[cm]、幅及び高さは 25[cm]である。図左側のファンにより装置内への流速を生成し、整流胴にてファンによる乱れを低減させ、破線部以降の観測胴で粒子挙動を測定する。流入ファンには PC 用のファン、株式会社サイズ製 GELID Silent12 PWM を 4 つ並べて固定したものを使用しており、供給する直流電圧を可変することで流速を制御できる。供給電源には株式会社エー・アンド・デ이의直流安定化電源 AD-8723D を用いた。粒子センサには、神栄テクノロジー株式会社の花粉センサ PS2^[6]を用いた。整流胴(Setting chamber)では、整流格子(anti-turbulence screen)を二枚重ね、乱れの低減を図っている。装置上部を開けた様子を、Fig. 3.12 に示す。この整流胴以降では、ファンにより生成された乱流が整流化され、乱れが低減できていると考えられる。風洞の素材にはプラスチック製段ボールを用いた。このプラスチック製段ボールは、静電気が発生しにくく、今回実験に用いる疑似花粉が密着しないことを確認している。

本実験では、ファン電圧を 12.5[V]とし、整流胴直後の流速が 2.0[m/s]となるようにした。センサ 2 個を用いて、3 箇所を測定した。このセンサ間隔は、30[cm]とした。3 点をセンサ 2 個で比較するために、センサ O を基準として測定を行う。即ち、センサ O とセンサ A での実験をケース A とし、結果をセンサ O の値で除すことでセンサ O : センサ A = 1.0 : A とすることが出来る。同様に、センサ O とセンサ B の実験をケース B とし、センサ O : センサ B = 1.0 : B とすれば、センサ O : センサ A : センサ B = 1.0 : A : B と、3 点の比較を行う事が出来る。

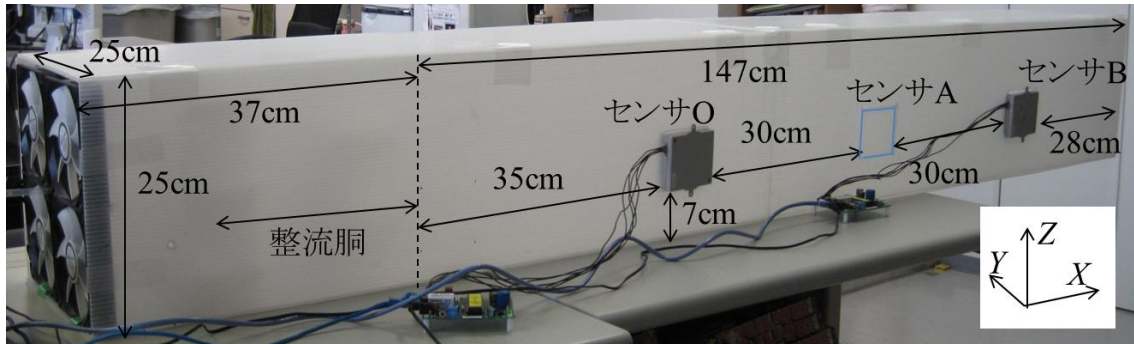


Fig. 3.11. The wind tunnel experimental model. The PS2 is particle counter.

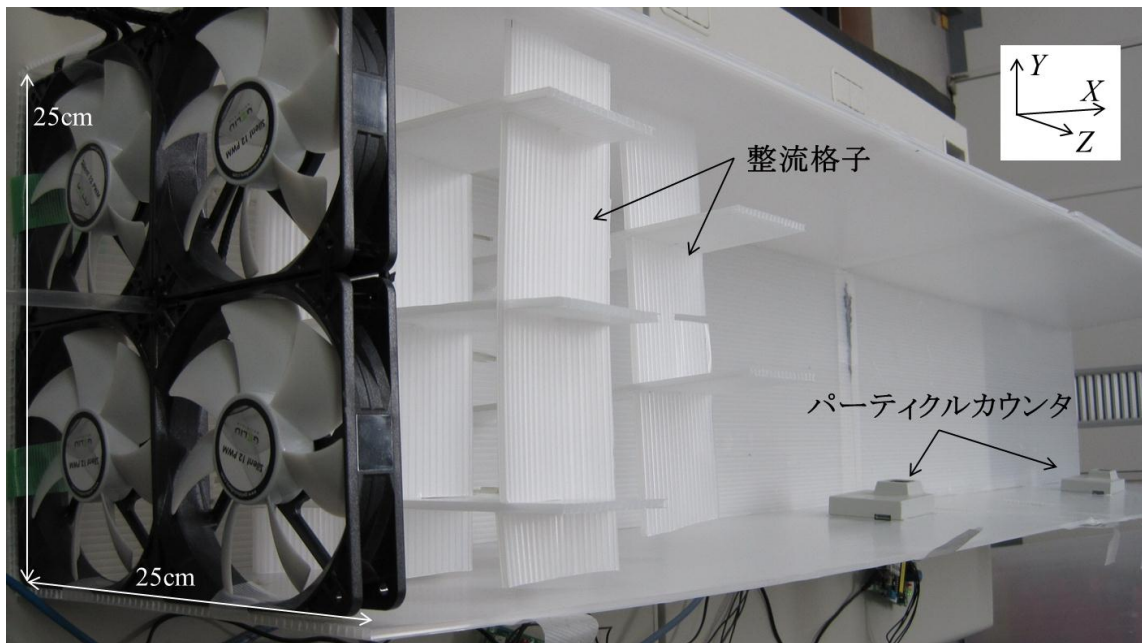


Fig. 3.12. The anti-turbulence screen of the setting chamber.



Fig. 3.13. The velocity at the anti-turbulence screen.

本実験で用いるパーティクルカウンタは、粒子径と偏光度を計測できる。測定原理を Fig. 3.14 に示す。LASER 光が浮遊粒子に当たると、散乱光が発生する。その散乱光の強度から粒子径が、偏光フィルタを通った光強度ととの差から偏光度を検出できる。この偏光度は粒子の表面形状に依存しているため、偏光度を求めることで、粒子形状の推定が可能である。

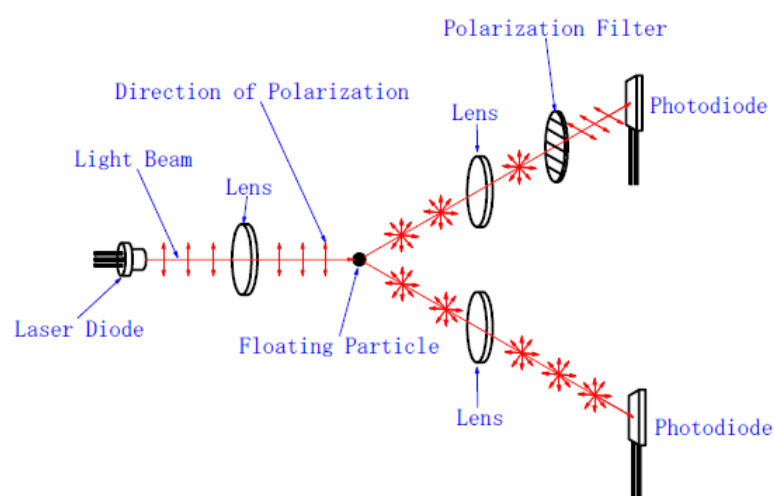


Fig. 3.14. The measurement principle of the particle diameter and surface shape.^[6]

本論文では、APPIE 標準粉体である、石松子(*lycopodium*)^[7]を用いて実験を行った。石松子とは、常緑ほふく草ヒカゲノカヅラの孢子であり、淡黄色の微粒子である。電子顕微鏡写真 Fig. 3.15 に示されるように、網目状の凹凸が存在するのが特徴である。石松子は果実栽培の人工授精用花粉の希釈剤としても使用される。また、アレルギーではないこと、吸湿せず相互に付着しないこと、安価であるなどといった特性を持っているため、各種試験の標準粉体にも用いられる。スギ花粉の大きさとも近いことから、疑似花粉としても用いられる。

この石松子をパーティクルカウンタ PS2 に吸引させ、粒子径と偏光度を測定した。その分布図を Fig. 3.16 に示す。偏光度に対して対象となるように白枠を引き、この範囲内を石松子と判断する。

尚、センサ内の残留粒子が実験結果に影響を与えないように、PS2 を実験毎に分解洗浄した。

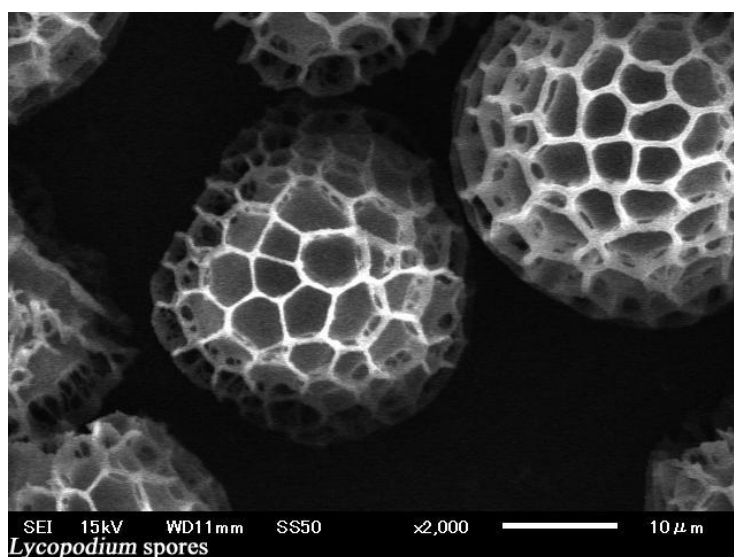


Fig. 3.15. The electron micrograph of the lycopodiums.

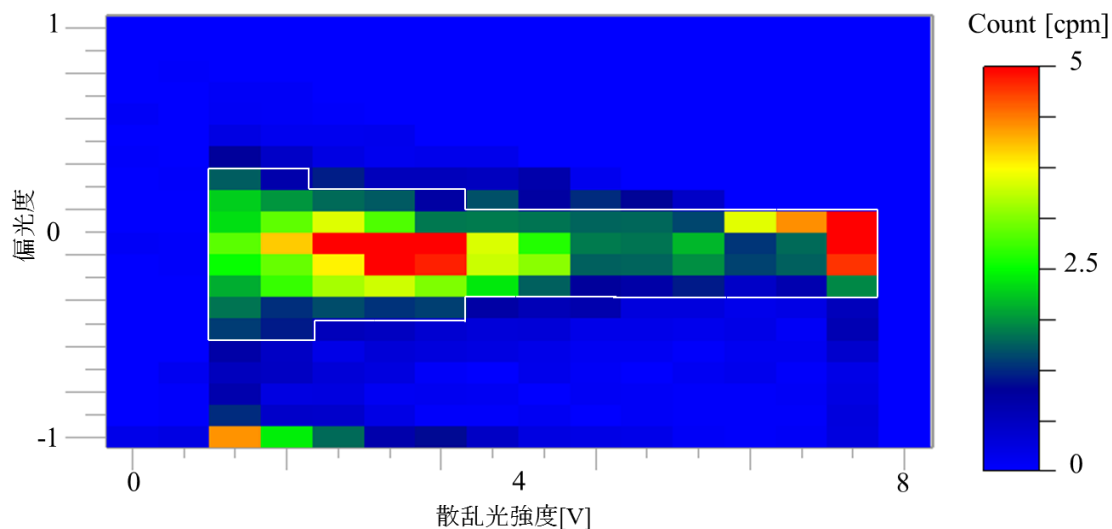


Fig. 3.16. The lycopodiums distribution of particle diameter and surface shape.

本実験では，研究室内に開放型風洞を設置した．従って，室内のエアロゾルを風洞内のセンサが検知しえるため，バックグラウンド・ノイズの測定を行い，実験結果から減ずることとした．

実験では，Fig. 3.11 に示すように，2 個のセンサを用いて，基準となるセンサ O と，センサ A，センサ B の 3 点を計測した．即ち，センサ O とセンサ A の実験ケース A，センサ O とセンサ B の実験ケース B に分けて実験を行い，それぞれセンサ O の粒子検知数で除して比較する．

第6節 妥当性検証シミュレーションモデル

パーティクルカウンタ PS2 のモデル図を Fig. 3.17 に示す．PS2 の吸入口はスリット状であるが，シミュレーションモデルでは $1[\text{cm}^2]$ の正方形から $2.0[\text{m/s}]$ の流速で吸入する仮定とした．排気口の凸部も直方体とし， $4[\text{cm}^2]$ の正方形から一様に $0.5[\text{m/s}]$ 排気するとした．Figs. 3.11, 3.12 の様に，PS2 を回転後，吸排気面を実験装置内に突き出すように設置するため，PS2 のモデル図 Fig. 3.17 では軸がこれまでの図とは異なっている．

シミュレーションモデルを Fig. 3.18 に示す．シミュレーション空間は，観測胴部分の実線領域であり，ファン及び整流部に関してはシミュレーションを行わない．整流格子直後の流入境界は，Fig. 3.19 に示すように，整流格子部分の流速を $0.0[\text{m/s}]$ とし，それ以外の領域を $2.0[\text{m/s}]$ とした．流出境界は $1.69[\text{m/s}]$ とし，

流入境界条件として、流速は Dirichlet 条件を、圧力は Neumann 条件とした。

パーティクルカウンタ PS2 を、センサ O とセンサ A に設置したケース A と、センサ O とセンサ B に設置したケース B の 2 種類で乱流シミュレーションを行った。

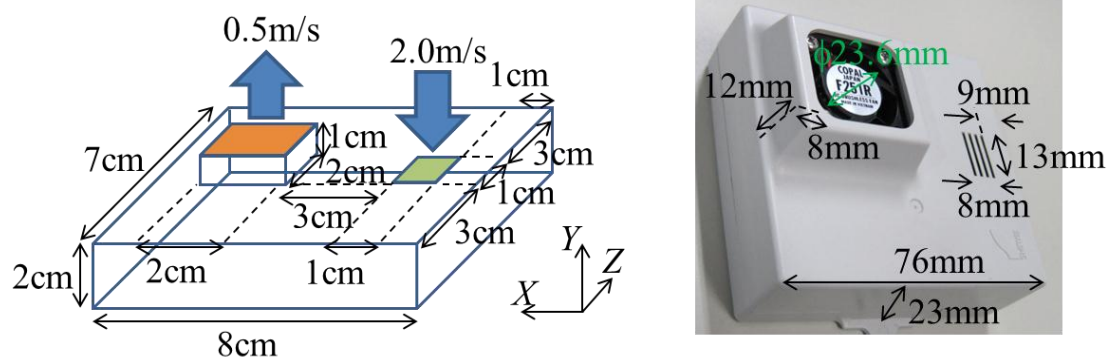


Fig. 3.17. The particle sensor PS2 modeling (left) and actual instrument (right).

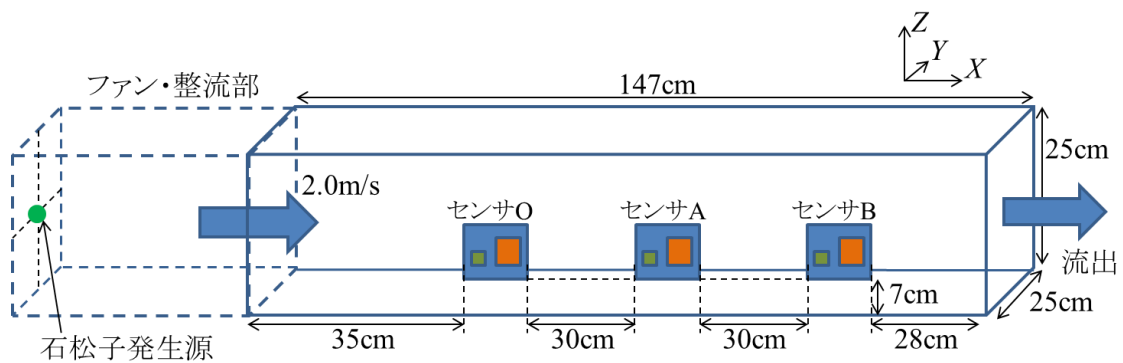


Fig. 3.18. The simulation model.

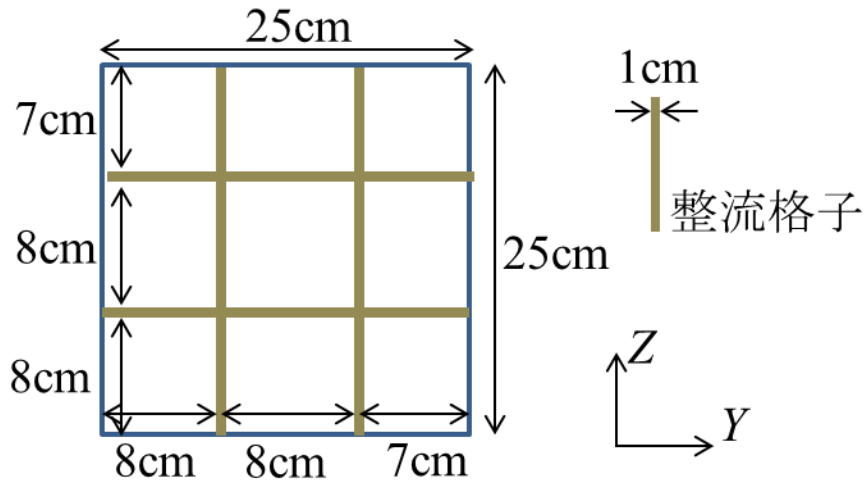


Fig. 3.19. The inlet surface of the simulation.

石松子の直径を $30[\mu\text{m}]$ 、質量 $14.8[\text{ng}]$ とした。石松子はファン側から点源発射しているので、整流部を通る間に広がり、解析胴部で正規分布すると仮定した。パーティクルカウンタ PS2 の流量は $2.0 \times 10^{-4}[\text{m}^3/\text{s}]$ であり、風洞の流量 $1.06 \times 10^{-1}[\text{m}^3/\text{s}]$ と比較すれば 0.19% でしかない。このように、パーティクルカウンタは近傍の粒子しか計測できない。

風洞実験では、整流胴直後、即ち観測胴流入部では、完全に整流されているとするのが一般的である。本比較実験でも、観測胴流入境界で整流されていると仮定しているため、センサ O までの $35[\text{cm}]$ では乱流は発生しない。従って、センサ O に吸入されるのは、センサ側に寄った領域に存在する粒子のみである。センサ A では、センサ O によって発生した乱流に乗った粒子も計測できるが、センサの流量及び体積がさほど大きくないために、吸入出来る位置はセンサ O とさほど変わらない。よって、観測胴流入境界に於いて、センサ側から離れた位置に粒子を配置しシミュレーションを行っても、センサに吸入されずに風洞を通過してしまう。従って、Fig. 3.20 に示すように、YZ 軸に対して、平均 $12.5[\text{cm}]$ 、標準偏差 $6[\text{cm}]$ 、2 万個の正規分布を行うが、Y 軸に対しては約 4 分の 1 である $6[\text{cm}]$ までの配置とした。

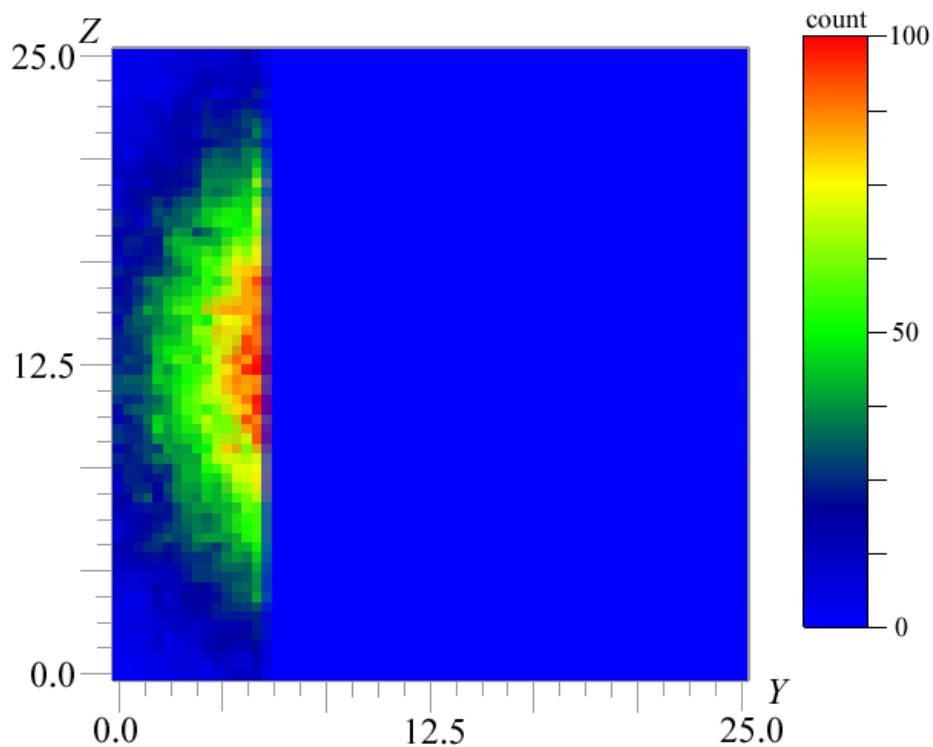


Fig. 3.20. The initial distribution at X 0.0 meter, normal distribution for Y and Z axes. The mean is 12.5 centimeters, the standard deviation is 6 centimeters, respectively.

第7節 妥当性検証実験結果比較

気流シミュレーション 10[s]での、ケース A, ケース B の可視化結果を Figs. 3.21, 3.22 に示す. 両図共に、側面視及び俯瞰図を載せた. それぞれ $Y=1[\text{cm}]$ と $Z=10[\text{cm}]$ の断面図である. ケース A の Fig. 3.21 上図では、パーティクルカウンタ PS2 の下流側の流速が小さいことが見て取れる. これは障害物であるセンサ下流で圧力低下を起こしているからであり、カルマン渦のような巻き渦が確認できる. また、右下の領域では剥離流が形成されているのが確認できる. このように、乱流の特徴が良く表れている. 同下図では、センサ O を迂回する箇所で流速が大きくなっていること、センサ O からセンサ A 間で流速が小さくなっていることが確認できる.

ケース B の Fig. 3.22 上図でも、センサ O の下流で流速が小さくなっていることが確認できるが、センサ B の下流では剥離流が引き寄せられているのが確認できる. 下図では、センサ O, センサ B 共に、センサの上流側で迂回する気流が生成されていることが確認できる.

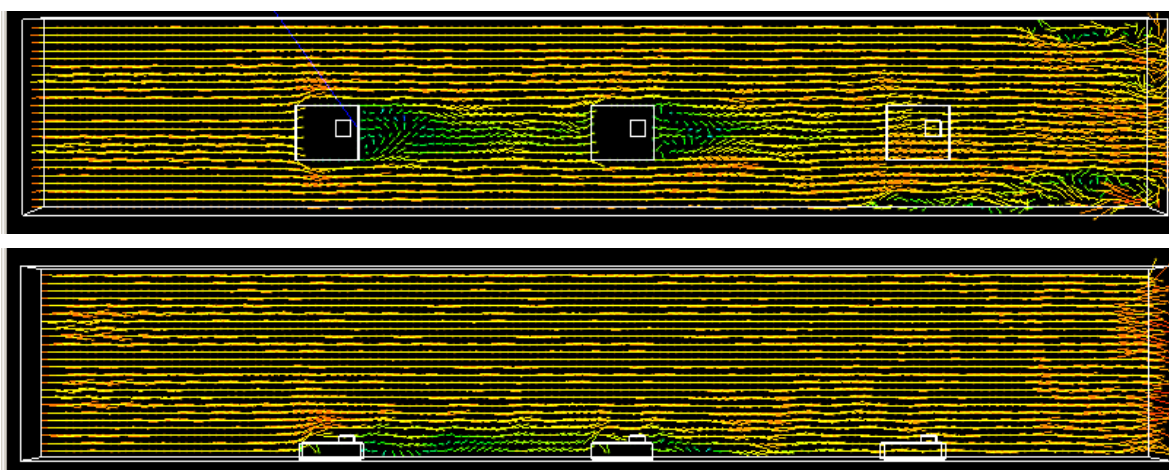


Fig. 3.21. The air flow visualization of the case A at 10 seconds from starting up. The above is side view at Y 1 centimeter, the below is down view at Z 10 centimeters.

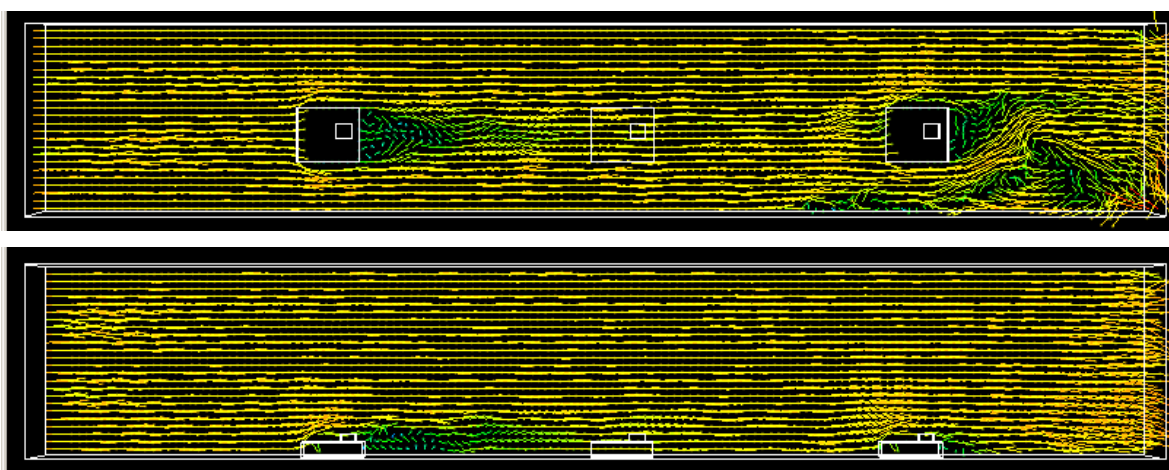


Fig. 3.22. The air flow visualization of the case B at 10 seconds from starting up. The above is side view at Y 1 centimeter, the below is down view at Z 10 centimeters.

8[s]から 10[s]まで時間平均した流れ場を，ケース A は Fig. 3.23 に，ケース B は Fig. 3.24 に示す．各図共に，Figs. 3.21, 3.22 と同様に，側面視及び俯瞰を載せ，それぞれ $Y=1[\text{cm}]$ と $Z=10[\text{cm}]$ の断面図である．各図では，流れ場は均されているが，センサ下流側の領域で流速が小さくなっていること，剥離流が確認できるといった，10[s]の流れ場の特徴は表れている．この平均流れ場を用いて，石松子飛散実験シミュレーションを行った．

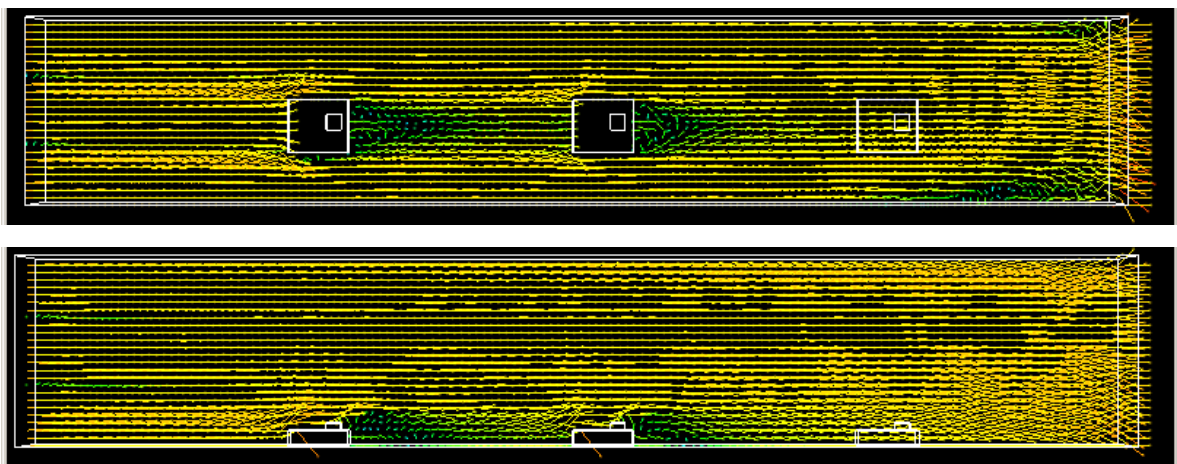


Fig. 3.23. The visualizations of time averaged air flow fields with the case A. The above is side view at Y 1 centimeter, the below is down view at Z 10 centimeters.

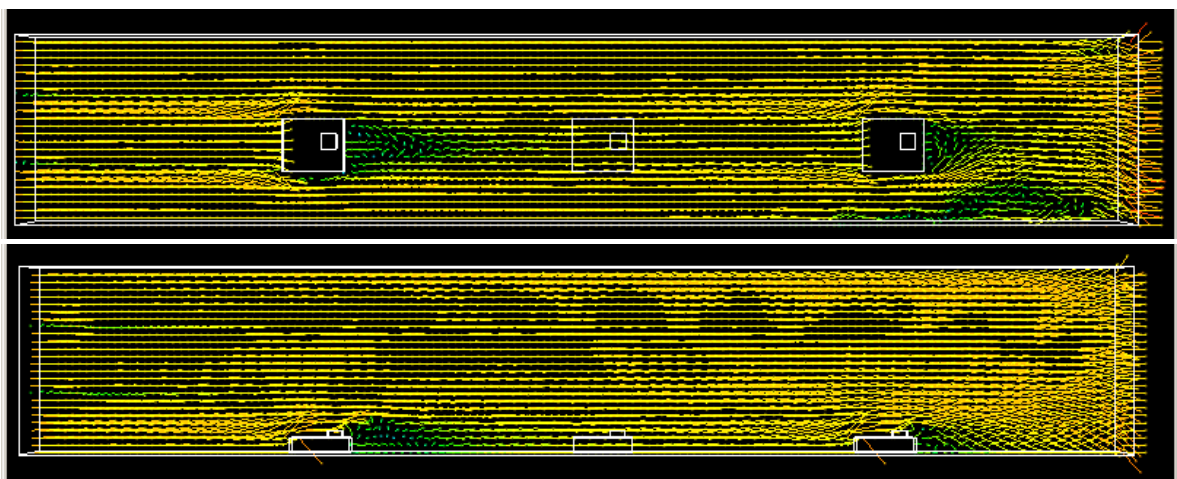


Fig. 3.24. The visualizations of time averaged air flow fields with the case B. The above is side view at Y 1 centimeter, the below is down view at Z 10 centimeters.

石松子飛散風洞実験及びシミュレーションの結果を Fig. 3.25 に示す. ケース A とケース B を一回の試験とし, 4 回の実験とシミュレーションを行った. センサ A, B の値を, 基準とするセンサ O での値で除し, その平均値をプロットし, 標準偏差(Standard Deviation)をエラーバーとして示した. これにより, センサ O, A, B の 3 点を比較する事が出来る.

実験では, センサ A の平均値が 1.141, 標準偏差が 0.191 であり, センサ B の平均値は 1.103, 標準偏差 0.194 であった. シミュレーションでは, センサ A の平均値が 1.087, 標準偏差が 0.151, センサ B では 0.9895, 標準偏差 0.147 であっ

た．実験値がシミュレーションよりも大きく評価されているが，センサ A に対してセンサ B が小さいという傾向は同じである．また，標準偏差に着目すると，実験値で 0.19，シミュレーション値で 0.15 と，センサ A，B 共に同程度の標準偏差を生じている．そして，実験・シミュレーション共に標準偏差はほぼ同程度であり，双方のエラーバー内に平均値が収まっている．

この結果より，開発した **CAMPAS** は風洞実験と比較して傾向が一致しており，信頼性を有していると言える．

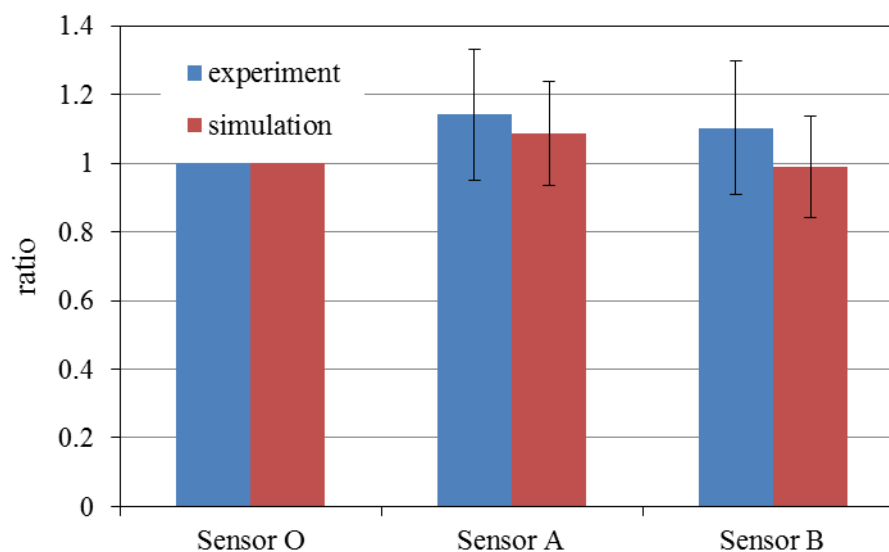


Fig. 3.25. The comparison of the sensor count ratio. The error bar indicates standard deviation.

参考文献

- [1] EDF : Introduction Code_Saturne, URL:
<http://research.edf.com/research-and-the-scientific-community/software/code-saturne/introduction-code-saturne-80058.html> (アクセス日 : 2012.09)
- [2] Zhi Shang: Performance analysis of large scale parallel CFD computing based on Code_Saturne, *Computer Physics Communications* **184**, 381-386 (2013).
- [3] Jean-Marc Ndombo, Richard J.A. Howard: Large Eddy Simulation and the effect of the turbulent inlet conditions in the mixing Tee, *Nuclear Engineering and Design* **241**, 2172-2183 (2011).
- [4] 梶島岳夫 : 乱流の数値シミュレーション, 第 3 版, 養賢堂, (2007).
- [5] Kobayashi H., Ham F., Wu X.: Application of a local SGS model based on coherent structures to complex geometries, *HEAT AND FLUID FLOW* **29**, 640-653 (2008).
- [6] 神栄テクノロジー株式会社 : 花粉センサ技術資料, URL:
<http://www.shinyei.co.jp/stc/optical/pdf/pollensensor.pdf> (アクセス日:2012.12)
- [7] 社団法人 日本粉体工業技術協会 : APPIE 標準粉体・AC ダスト説明書, URL:
<http://www.appie.or.jp/testpowders/descript/pdf/pamphlet3.pdf> (アクセス日:2012.12)

第4章 CAMPAS による室内花粉除去シミュレーション

室内気流及び花粉挙動シミュレーション結果を，本章で述べる．瞬時流れ場での花粉除去効率を比較する事で，流れ場が乱流統計的に定常であることを述べる．第 2 節では，前面吸気型及び側面吸気型空気清浄機での流れ場を可視化する．第 3 節では落下又は空気清浄機に吸入される花粉の時間推移について述べ，第 4 節ではその分布について述べる．

第1節 瞬時流れ場に於ける花粉除去効率の比較

本論文では，(1)平均流れ場，(2)GS 乱流場，(3)SGS 乱流変動を加味した乱流場，の 3 つの流れ場で粒子追跡を行う事を第 2 章 9 節で述べた．この(2)GS 乱流場は，LES 結果の各点での時間変動流速の標準偏差を解析し，その標準偏差を用いて，粒子追跡時に時間変動流速を正規分布させ，乱流場を再現している．従って，LES 結果が乱流統計的に定常でないと，時間平均流速が存在しないために，時間変動流速の標準偏差を取っても，乱流場を再現することが出来ない．従って，乱流変動場を再現し粒子追跡を行うには，LES 結果より，乱流統計的に定常であることを示さなければならない．本節では，150[s]で乱流統計的に定常であることを示す．

40[s]から 200[s]までの，5[s]刻みの瞬時流れ場 33 個に対して，V1 型花粉挙動シミュレーションを行った．各瞬時流れ場に於ける花粉除去効率を，統計量とする．この統計量である花粉除去効率と，最小二乗法による回帰直線を Fig. 4.1 に示す．

40[s]から 150[s]までの花粉除去効率の平均値は 46.1%であり，標準偏差は 4.3%，回帰直線の傾きは $4.22 \times 10^{-2} [\%/s]$ である．40[s]から 150[s]の 110[s]間で回帰直線は 4.64[%]増加しているが，これは平均値 46.1%を基準とすると 10.1%である．

対して，40[s]から 170[s]までの花粉除去効率に着目すれば，回帰直線の傾きは $1.77 \times 10^{-2} [\%/s]$ と，40～150[s]の値の半分以下である．また，40～170[s]で回帰直線は 2.30%増加しているため，平均値 45.9%を基準とすると増加率は 5.01%に過ぎず，40[s]から 170[s]までの回帰直線の傾きは非常に小さい．また，標準偏差も 3.99%と小さく，花粉除去効率は瞬時流れ場に依存してはいるものの，逸脱はしていない．

統計量である花粉除去効率が時間に対してさほど逸脱はしておらず，また回帰直線の値が小さいことから，花粉除去効率はほぼ一定であると言える．よっ

て、40[s]以降は乱流統計的に定常であると考えられる．特に、40[s]から 170[s]までの回帰直線の傾きは非常に小さく、また 150[s]までの回帰直線の半分以下の値であることから、本論文では 150[s]の流れ場を用いて花粉挙動解析を行う．

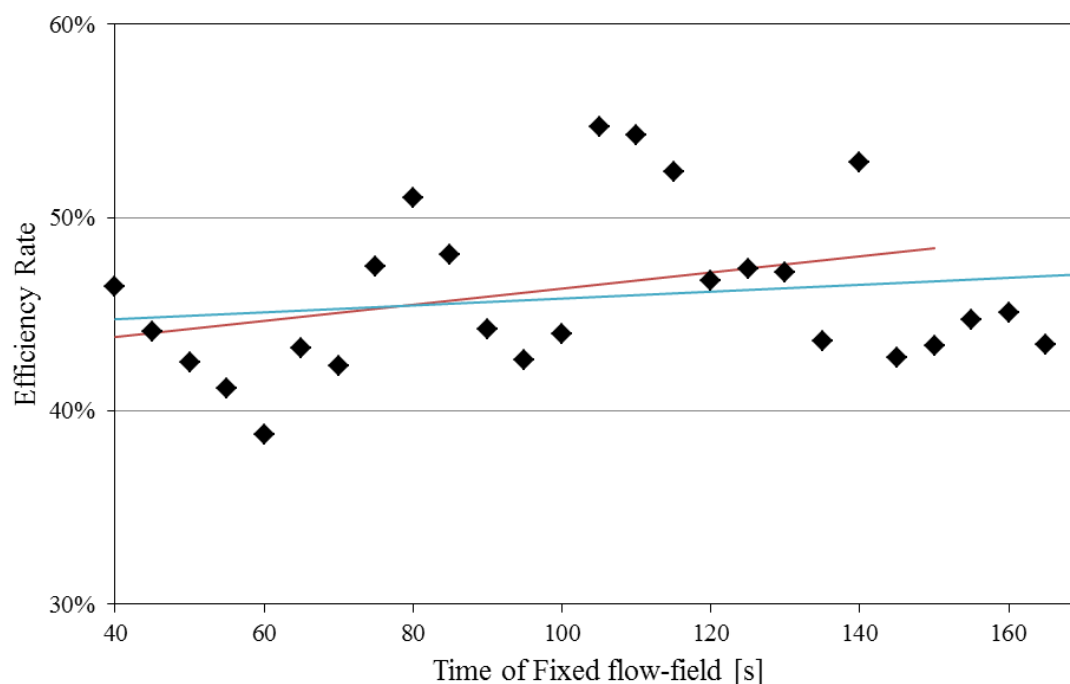


Fig. 4.1. The removed pollen efficiency rate for position times of fixed flow-field. The plot dots represent efficiency rates of pollens suctioned into air purifier until 1,400 seconds with each position time of fixed flow-field. The solid line is graphed by the linear least-squares method.

第2節 気流可視化結果

前面吸気型空気清浄機モデルの気流解析結果、50[s]、100[s]、150[s]及び150~160[s]の時間平均流れ場の可視化結果を Fig. 4.2 に示す．(a)50[s]の可視化結果では、空気清浄機上面の排気面から出ている排気主流が天井境界に衝突し、壁面、床を反時計回りに通り抜け、吸気主流と結合しているのが確認できる．この循環している主流を、本論文では**循環流**と呼ぶことにする．天井衝突後に背面方向に流れる排気主流は、同様に壁面及び床を時計回りに通り、空気清浄機背面に沿って上昇している．空気清浄機背面で巻き渦を生成しており、また、吸気面では激しい乱れを、排気面から天井までの排気主流の両側面では剥離流

を確認でき、乱流の特性を示している．100, 150[s]でもそれは同様に、大局的な流れ場は変化しておらず、乱れのみが時間変化している．

時間平均された Fig. 4.2 (d)は、(a)～(c)の瞬時流れ場と比較して、乱れが無くなり均されている．この平均流れ場を用いて、花粉挙動を Lagrange 粒子追跡によって解析する．

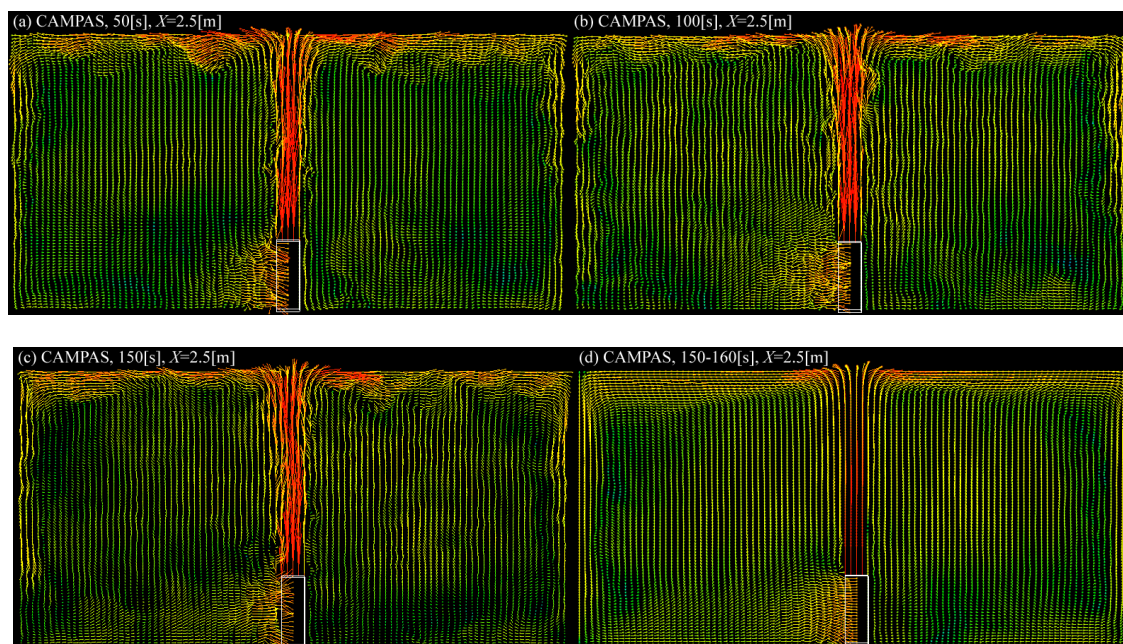


Fig. 4.2. Vector plots on the Y-Z plane of the indoor airflow created by the air purifier. Figures indicate (a) 50, (b) 100, and (c) 150 seconds after starting up the air purifier, and the figure (d) is the time-averaged flow-field over 10 seconds (from 150 to 160 seconds).

側面吸気型モデルの可視化結果も同様に、Fig. 4.3 に示す．流れ場の時刻は前面吸気型の気流解析結果 Fig. 4.2 と同じ、50[s], 100[s], 150[s]及び 150~160[s]の平均である．(a)50[s]の可視化結果では、空気清浄機上面の排気面から出ている排気主流が天井境界に衝突し、左右に分かれている．右側に分かれた排気主流は、壁面、床を時計回りに通り抜け、吸気主流と結合する循環流を形成しているのが確認できる．左側に分かれた排気主流は、同様に反時計回りの循環流を形成している．また、前面吸気型と同様に、(a), (b), (c)では吸気面では激しい乱れを、排気面から天井までの排気主流の両側面では剥離流を確認でき、乱流の特性を示している．(b), (c)の右壁面では、巻き渦が確認できる．この図から、

大局的な流れ場は変化しておらず，乱れのみが時間変化しているのが確認できる．

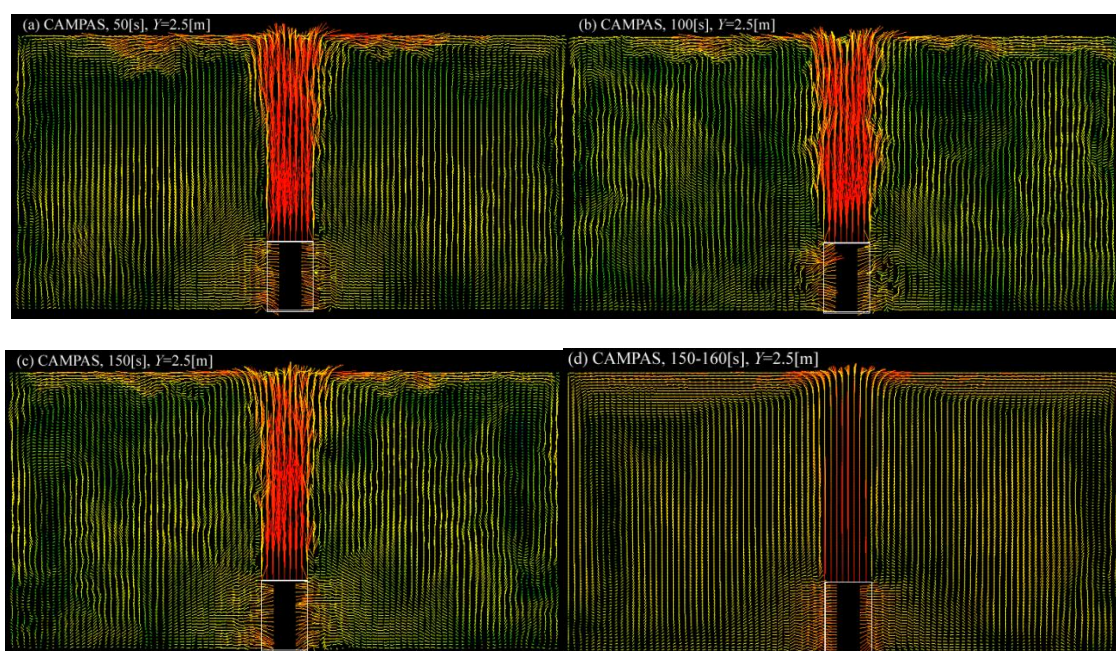


Fig. 4.3. Vector plots on the X-Z plane of the indoor airflow created by the air purifier. Figures indicate (a) 50, (b) 100, and (c) 150 seconds after starting up the air purifier, and the figure (d) is the time-averaged flow-field over 10 seconds (from 150 to 160 seconds).

第3節 落下及び吸入花粉の時発展

LES SGS モデルの流れ場は，第2章8節で示したように，時間平均GS流速，時間摂動GS流速（GS乱流），SGS乱流変動に分解できる．本論文では，(1)平均流（150～160[s]の時間平均流れ場で乱流なし），(2)GS乱流（時間平均+GS乱流），(3)SGS乱流（時間平均+GS乱流+SGS乱流）の，3つの流れ場で花粉挙動シミュレーションを行う．

前面吸気型空気清浄機モデルの流れ場，花粉初期分布V1型及びRand型での，吸入花粉の時発展グラフをFig. 4.4に示す．Rand型の吸入数変移は乱流変動に関わらず飽和曲線であり，最終的な花粉除去効率，平均流で53.5%，GS乱流で53.3%，SGS乱流で53.5%であった．100[s]から600[s]間で，乱流変動の影響が1%程度の差として出ているが，最終的には0.2%に収まっている．反面，V1型ではほとんど乱流変動の影響が表れておらず，平均流，GS乱流，SGS乱流の花粉除去効率が50.2%，49.7%，49.8%と0.5%の差が発生しているだけである．

従って、乱流変動は花粉除去効率にほとんど影響を与えないと言える。

V1 型では、Rand 型とは異なり、屈折のある曲線を描いている。これは、V1 型の分布体積がシミュレーション空間に対して 1.5%でしかなく、空気清浄機周りの特徴だった挙動を抽出した結果であるためである。空気清浄機吸気面前方に存在する花粉は 25[s]間で吸い込まれ、吸入率は 24.2%に達する。25[s]から 50[s]までで吸入率は急激に増加し、170[s]からは緩やかに飽和曲線を描き、最終的には 50%の花粉を吸入する。空気清浄機排気によって吹き飛ばされた花粉の一部は、Fig. 4.2 に現れている時計回りの排気主流に沿って挙動し、25[s]以降に吸入され始める。また、天井境界に沿う主流から脱落し、壁面まで到達しないで落下運動を始め、床に沿う排気主流または吸気主流に捕捉されて吸入される花粉も存在する。しかしながら、空気清浄機背面方向に飛ばされた花粉が吸入できないということではない。空気清浄機後方の壁面を通る反時計回りの主流によって空気清浄機近傍に一周して戻ってきた花粉の一部、または天井に沿い後方に向かう排気主流から脱落した花粉の一部は、再度排気主流に捕まり、時計回りの吸気面に至る排気主流に乗ったり、排気主流から脱落するが結果的に吸気面に至る主流に拾われたりし、吸入される場合がある。25～50[s]の吸入増加率が高いのは、空気清浄機排気主流によって塊のように輸送された花粉が一気に吸入されたからである。まとめると、空気清浄機近辺の花粉は、24%が一瞬で空気清浄機に吸引され、26%は排気によって吹き飛ばされるものの空気清浄機近傍に戻ってきて吸入され、最終的には 50%の花粉が吸入される。

V1 型での花粉挙動アニメーションのキャプチャを、Fig. 4.5 に示す。Fig. 4.5 は正面から可視化したものであり、前述した特徴のある屈折点である 25[s], 50[s], 170[s]及び、花粉の吸入と吹き飛ばしている途中の 10[s]をキャプチャした。吸入花粉は赤、落下花粉は青、浮遊花粉は緑色で示されている。(a)10[s]では、周辺花粉を吸入していること、空気清浄機側面に緑色で示される浮遊花粉が衝突していること、空気清浄機の排気が花粉を吹き飛ばし天井に沿って挙動していることが確認できる。(b)25[s]では、浮遊花粉が天井・壁面を通して空気清浄機吸気面に移動している様子が確認できる。特に、図右下側の領域で花粉が密集している。このような、一度排気によって飛ばされた花粉の集団が、空気清浄機に舞い戻ってきて吸入される様子は、Fig. 4.4 に示されるように大きな傾きで吸入花粉率が大きくなる。この 25[s]が、排気に影響されずに初期吸入される花粉と、一度排気により飛ばされるが戻ってきて吸入される 2 次吸入の境目となる。2 次吸入量の増加が一段落する(c)50[s]では、浮遊花粉が密集せず疎らになっていることが見て取れ、以降、吸入花粉は集団とはならない。空気清浄機付近に戻ってきた花粉は、吸入または落下するか、再度排気主流に乗って天井へ飛ばされる。また、排気によって飛ばされて花粉が吸気面に到達する前に床に落下し

ている様子が確認できる．(d)170[s]ではそれが顕著に表れている．浮遊花粉は空気清浄機に近付き排気によって飛ばされることで，浮遊花粉は攪拌されていく．

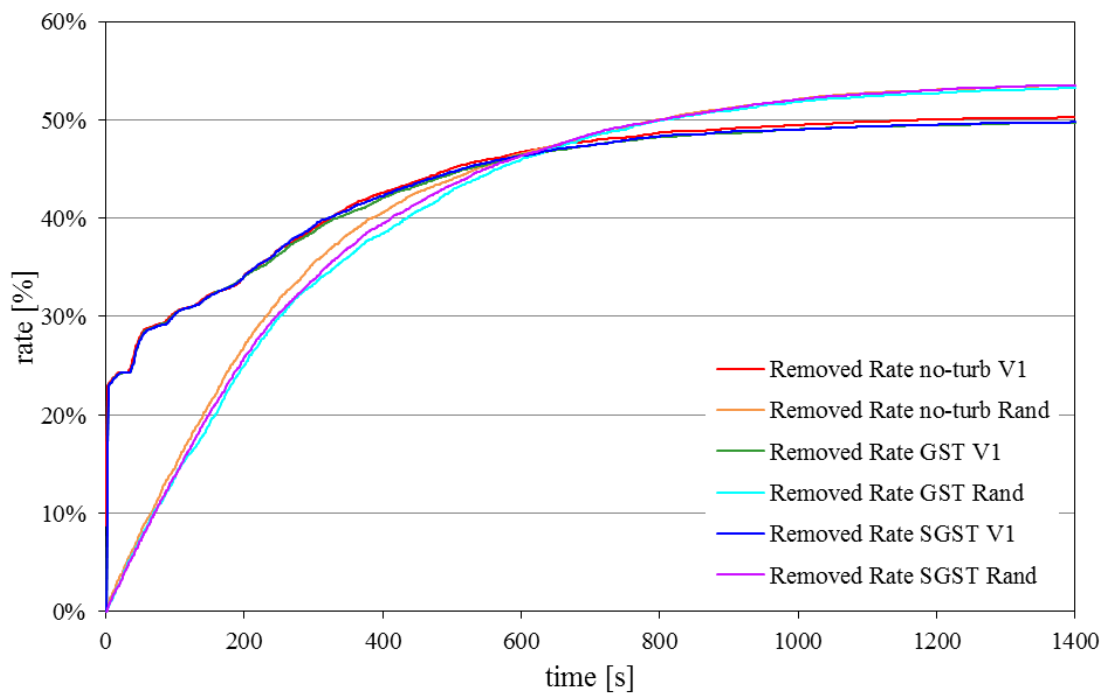


Fig. 4.4. The time evolution of *removed* pollen rates, calculated using the V1 and Rand models with the *front*-intake air purifier.

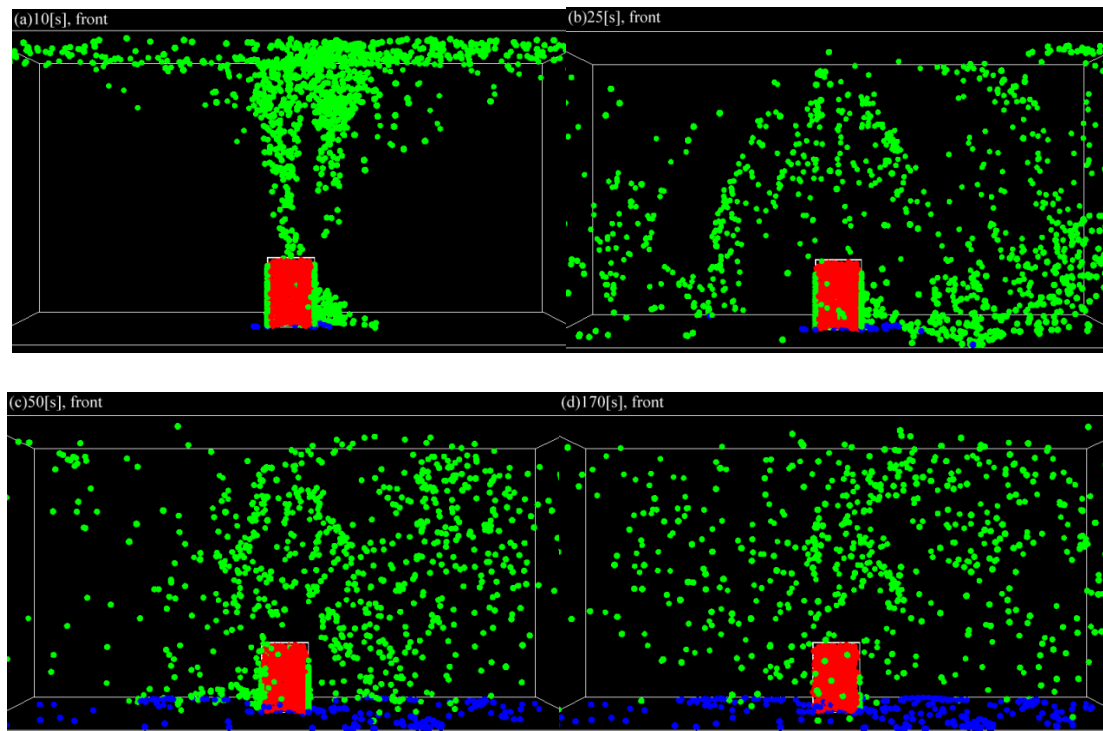


Fig. 4.5. The captures of the pollen motion animation, calculated using the V1 model with the *front*-intake air purifier model. Figures indicate (a) 10, (b) 25, (c) 50, and (d) 170 seconds.

同様に、前面吸気型での落下花粉の時間発展グラフを Fig. 4.6 に示す。Rand 型の落下花粉推移も放物線を描いており、乱流変動による多少の差異は確認できるものの、最終的な落下花粉率は平均流で 45.0%、GS 乱流で 45.4%、SGS 乱流で 45.3%と 0.4%の差異しか発生していない。V1 型は 150[s]、620[s]で屈折した曲線を描いているが、差異はほとんど無く、最終的な落下花粉率は平均流で 49.1%、GS 乱流で 49.6%、SGS 乱流で 49.7%と、0.6%の差である。

V1 型の落下花粉は、150[s]で 30%まで線形に増加する。これは空気清浄機の側背面に存在する花粉が自由落下、または空気清浄機の側背面に衝突した花粉が側背面に沿って落下するからである。初期配置からそのまま空気清浄機の側背面に衝突した花粉の大多数が落下しきるのは 150[s]であり、それ以降では落下花粉の傾きが小さくなる。10[s]程度で壁面に衝突した花粉は塊となって 620[s]で落下しきるため、以降の落下率の傾きは小さい。落下花粉は最終的には 50%になり、空気清浄機周辺に存在する花粉の半数は、吸入できずに落下させてしまう事が分かった。

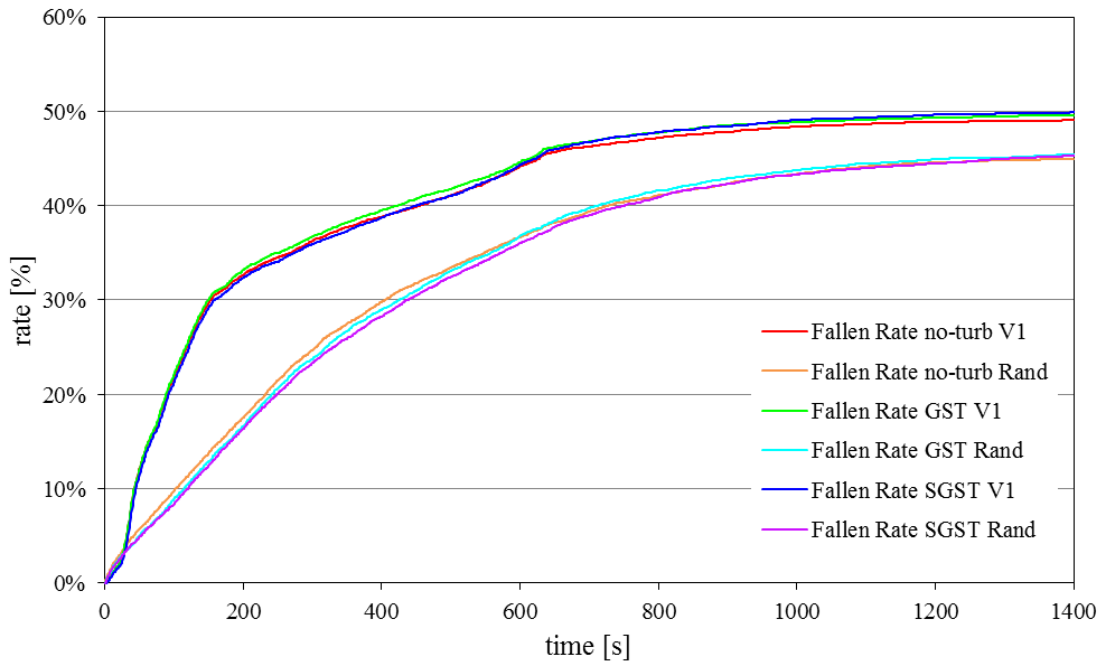


Fig. 4.6 The time evolution of *fallen* pollen rates, calculated using the V1 and Rand models with the *front*-intake air purifier.

側面吸気型空気清浄機モデルでの吸入花粉率推移を、Fig. 4.7 に示す。前面吸気型と同様に、Rand 型は飽和曲線を描き、乱流変動による差異はほとんど無く、最終的な花粉除去効率が平均流で 38.6%，GS 乱流で 38.3%，SGS 乱流で 38.6%と、0.3%の差が発生しているだけである。また、側面吸気での花粉挙動アニメーションの、10[s]、25[s]、100[s]のキャプチャを Fig. 4.8 に示す。

V1 型では、前面吸気型と同様に、25[s]から2次吸入が始まっているのが Fig. 4.7 から確認できる。しかし、前面吸気型とは異なり、吸気面が両側面に分かれているため瞬間的な吸引力は弱く、Fig. 4.8 (a)10[s]で示されるとおり、空気清浄機の両側面に浮遊花粉の集団が見て取れる。初期吸入の瞬間的な吸引力は前面吸気型よりも弱い、前面領域は勿論背面領域の花粉も吸入しており、28.3%と、前面吸気型よりも 4%多くの花粉を吸入している。2 次吸入は前面吸気型と同様に 25[s]から始まっており、Fig. 4.8 (b)の右下などの集団となった浮遊花粉が吸入され始める。100[s]程度で集団となった花粉は粗方吸入され尽くしており、残りは空気清浄機排気によって攪拌されている様子が、Fig. 4.8 (c)でも確認できる。以降は、その攪拌された花粉が空気清浄機に吸入されるので、Fig. 4.7 に示されるように、飽和曲線を描く。最終的には、平均流れ場で 44.5%，GS 乱流変動が 44.9%，SGS 乱流が 45.0%の花粉を吸入する。

Fig. 4.4 及び Fig. 4.7 より，同流量の空気清浄機では，側面吸気型よりも前面吸気型空気清浄機の方が，花粉除去効率が高い．これは，吸気主流が太いため，花粉が床面に脱落せずに吸入されるからであると考えられる．

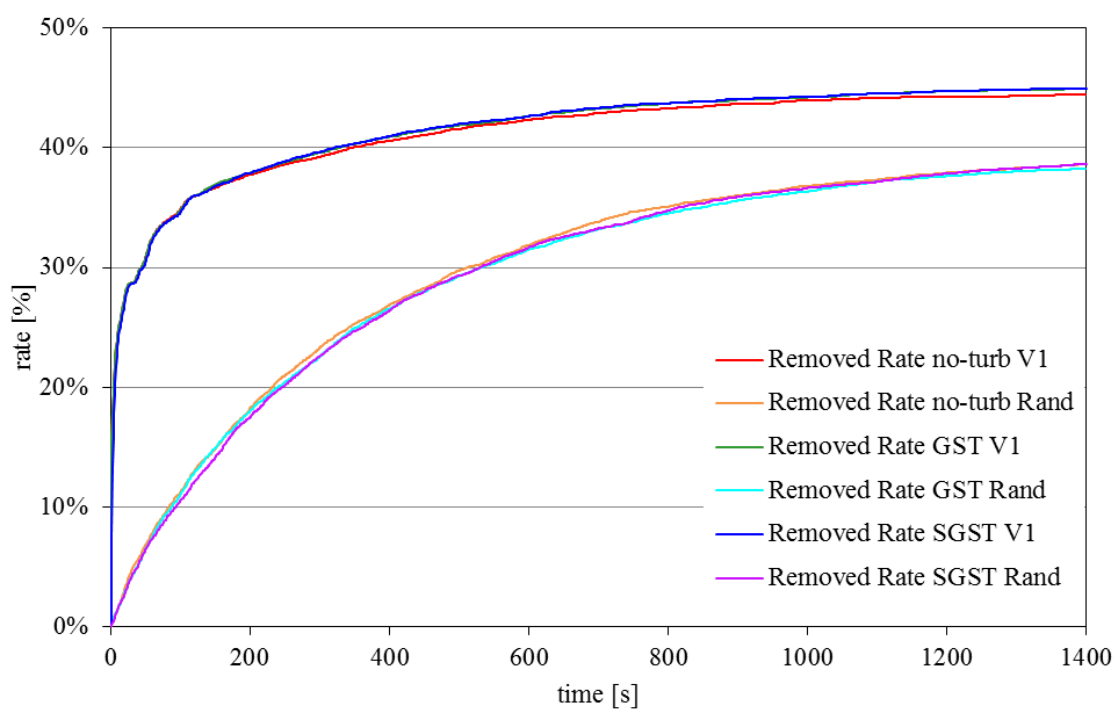


Fig. 4.7 The time evolution of *removed* pollen rates, calculated using the V1 and Rand models with the *side*-intake air purifier.

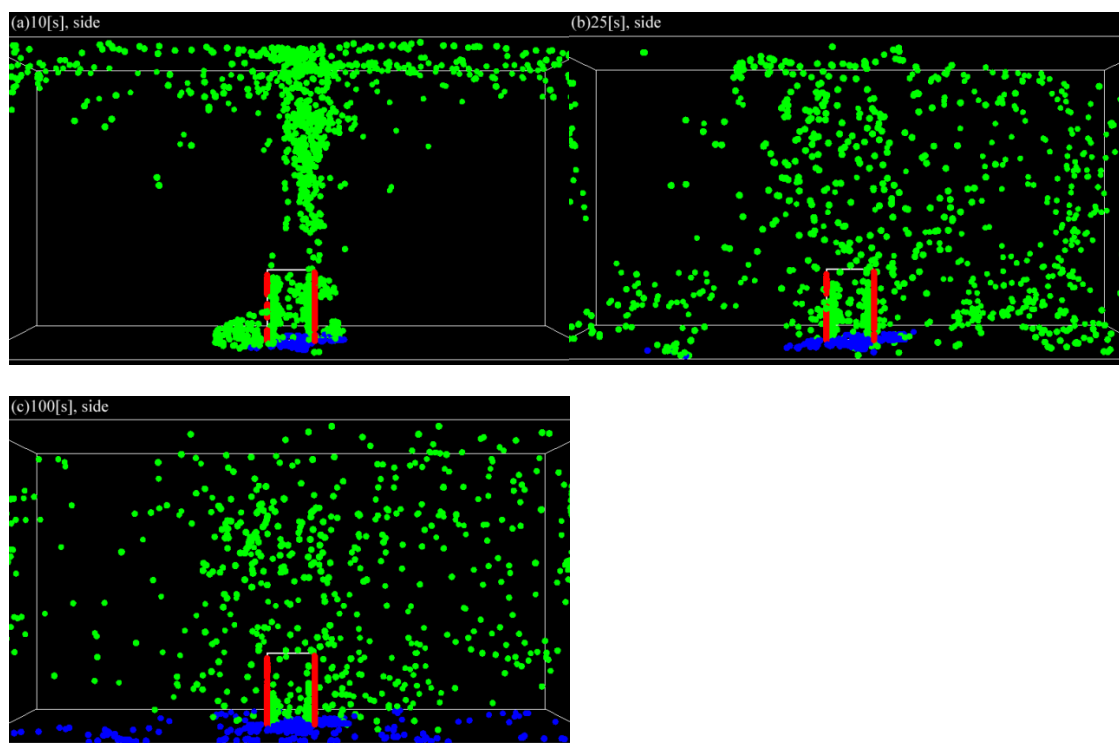


Fig. 4.8. The captures of the pollen motion animation, calculated using the V1 model with the *side*-intake air purifier model. Figures indicate (a) 10, (b) 25, and (c) 100 seconds.

側面吸気型空気清浄機による流れ場での、落下花粉率推移を Fig. 4.9 に示す。これも同様に、乱流変動の影響がほとんど表れておらず、最終的な Rand 型の落下花粉率は平均流で 57.5%，GS 乱流で 58.2%，SGS 乱流で 57.3% と 0.9% の差しかなく，V1 型も平均流で 54.3%，GS 乱流で 53.9%，SGS 乱流で 54.0% と 0.7% しか差を生じていない。

Rand 型は飽和曲線を描いているが，V1 型は 150[s] (34.1%)，620[s] (49.4%) で屈折した線形を描いている。この屈折時刻は，前面吸気型と同様である。空気清浄機の前面及び背面に衝突した花粉が落下しきるのが 150[s] であり，壁面に衝突した花粉が落下しきるのが 620[s] だからである。この時刻が，前面吸気型と側面吸気型空気清浄機モデルで同じなのは，空気清浄機面または壁面に衝突した花粉の挙動は自由落下するからである。この自由落下の際，壁面での接線方向流速が 0 であるために流速の影響は受けず，無風状況下での終端速度で花粉は落下する。

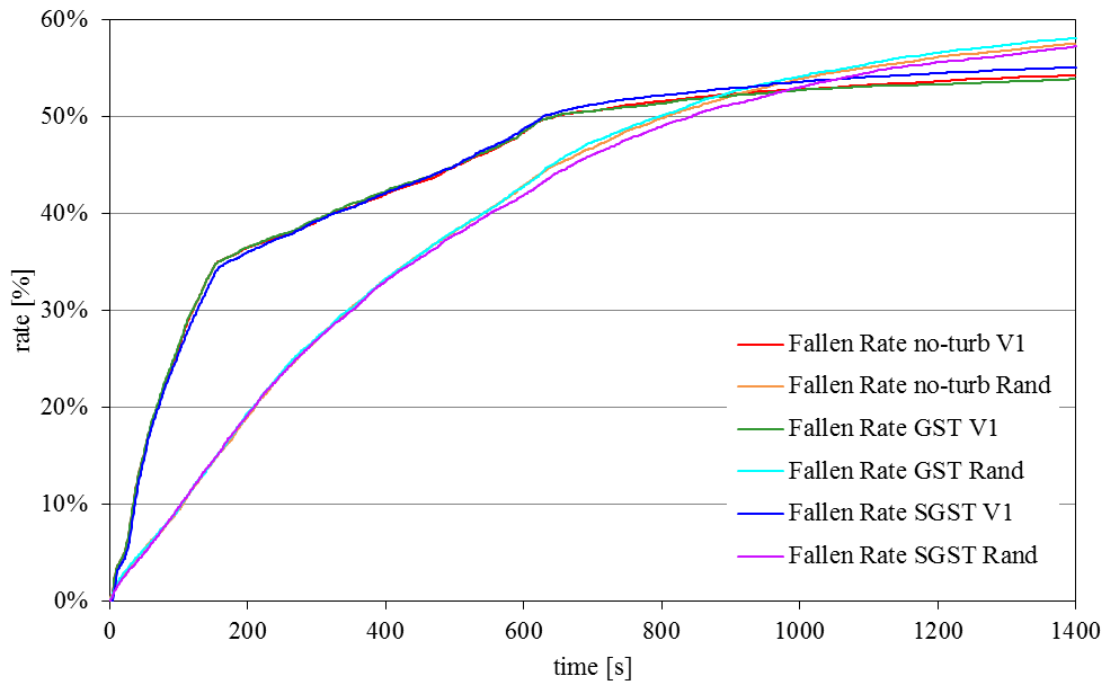


Fig. 4.9 The time evolution of *fallen* pollen rates, calculated using the V1 and Rand models with the *side*-intake air purifier.

前面吸気型，V1 型での落下花粉率(Fig. 4.5)では，16[s] (2.0%)までは小さな傾きである．一方，側面吸気型(Fig. 4.9)では16[s] (4.0%)までの傾きは大きい．16[s]での，V1 型による前面吸気型及び側面吸気型の花粉挙動アニメーションの俯瞰図を，Fig. 4.10 に示す．前面吸気型では青色で示される落下花粉は少ないが，側面吸気型では，空気清浄機から図下側及び上側に落下花粉が存在する．これは，Fig. 4.11 に示される空気清浄機から離れる流れによるものである．Fig. 4.11 は，側面吸気型での YZ 平面の中央面の気流可視化図である．排気主流は天井，壁面を通過して，壁面・空気清浄機間の半分程度まで床面を沿うように流れるが，そこから 30 度程度の仰角で空気清浄機排気に向かう．その位置まで，床面では空気清浄機からの流速ベクトルが確認でき，空気清浄機・壁面間の 1/3 程度では俯角となっている．この俯角の流速ベクトルにより，空気清浄機前面近傍の浮遊花粉は，床面に叩き付けられるように落下する．これにより，Fig. 4.10 (b)に示されるように，16[s]までに花粉が密集して落下する．

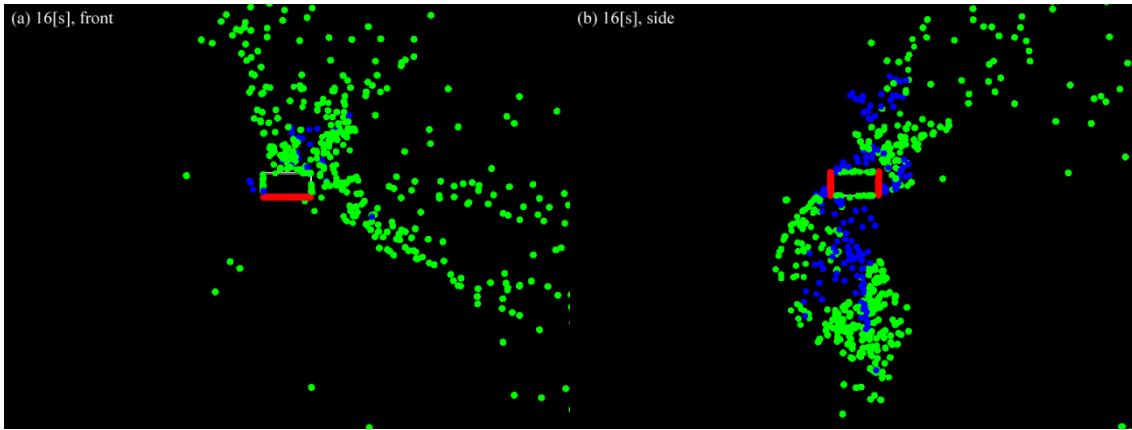


Fig. 4.10. The downward view captures of the pollen motion animation, calculated using the VI model with the *side*-intake and *front*-intake air purifier models. Figures indicate 16 seconds, respectively.

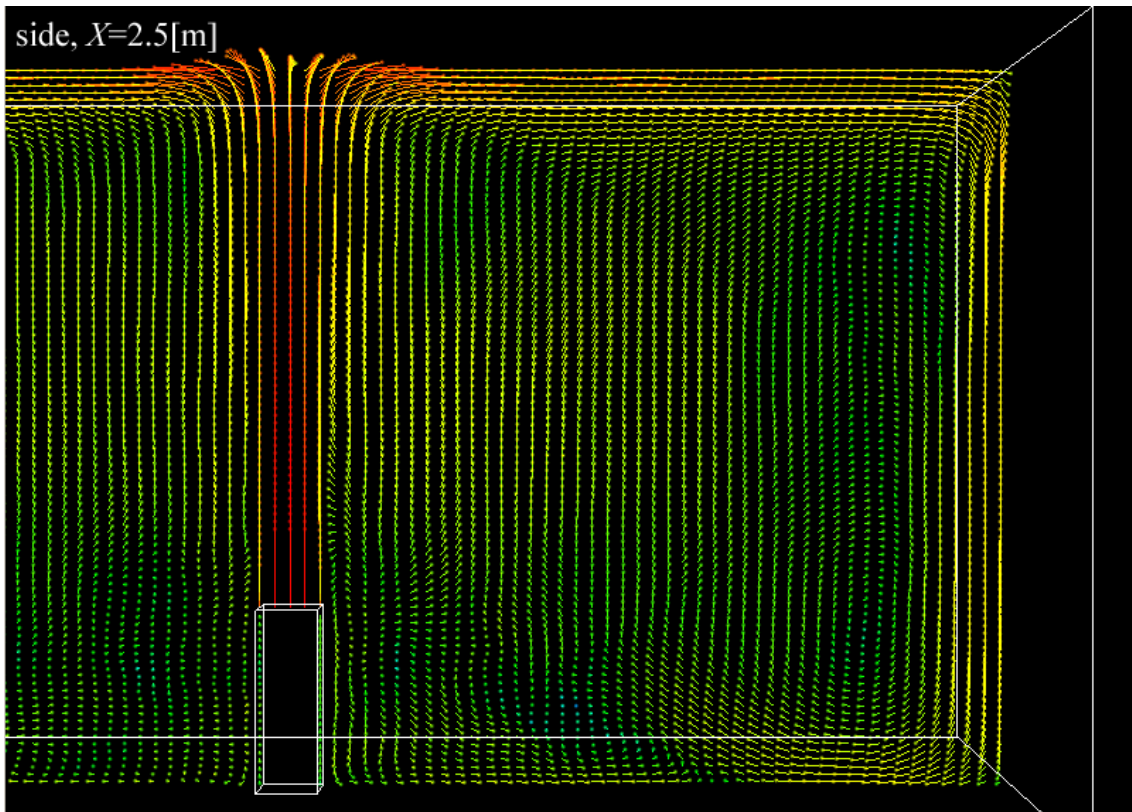


Fig. 4.11. Vector plots on the Y - Z plane of the indoor airflow created by the air purifier. The figure is the time-averaged flow-field over 10 seconds (from 150 to 160 seconds).

第4節 落下及び吸入花粉初期位置分布

前面吸気型空気清浄機モデルが生成する流れ場での、花粉初期配置 Rand 型の落下花粉分布を Fig. 4.12 に、V1 型を Fig. 4.13 に示す。各図共に、図の中央の白線で囲まれた枠が空気清浄機を示しており、吸気面は図下側を向いている。落下花粉分布では、図を判別しやすくするためにカラーバーの最大値を 10 個までにしているが、落下花粉数の最大値は空気清浄機側面で Fig. 4.12 (a)526, (b)560, (c)569 個、Fig. 4.13 (a)1254, (b)1259, (c)1263 個である。

落下分布 Fig. 4.12 Rand 型、Fig. 4.13 V1 型では、空気清浄機の側背面及び壁面の床に花粉が密集して落下している。これは、空気清浄機に吸い寄せられた花粉が吸気面に回り込めずに側背面に衝突、または排気主流によって壁面に衝突した花粉が床面に落下するため、その境界面で花粉が密集するからである。

平均流れ場、Rand 型の Fig. 4.12 (a)では、空気清浄機背面方向の壁面近傍、及び前面方向の壁面近傍に花粉が密集して落下している。これは、排気主流によって壁面から床面を沿うような気流に乗った花粉が、俯角の流速ベクトルによって床面に衝突したからである。落下分布に斑が生じている事は、時間平均流れ場によって花粉が輸送されるために、ある程度決まった場所に落下するということを示している。GS 乱流変動、Rand 型の Fig. 4.12 (b)では、同図(a)で表れていた斑が薄くなっている。これは、GS 乱流変動により各位置での流速ベクトルが時間摂動しているため、落下位置が時間平均流れ場に依存しないからである。SGS 乱流、Rand 型の Fig. 4.12 (c)でも同様の傾向を示しているが、密度は薄くなっている。

平均流れ場、V1 型の落下分布 Fig. 4.13 (a)では、Rand 型 Fig. 4.12 (a)と同様に、空気清浄機背面方向及び前面方向の壁面近傍に、花粉が密集して落下している。これは、同じ流れ場を用いているために、床面近傍の俯角を持つ流速ベクトルにより床面に花粉が叩き付けられているからである。GS 乱流変動 Fig. 4.13 (b)では、Rand 型とは異なり、背面方向及び前面方向の壁面近傍で、落下花粉密度が増加している。これは、空間に対し初期配置を一様分布させる Rand 型とは異なり、V1 型は空気清浄機周辺の $1[\text{m}^3]$ に花粉を密集させる初期配置であるため、花粉が集団となって挙動するからである。即ち、初期分布に於いて、体積当たりの花粉密度が V1 型では $8,754[\text{count}/\text{m}^3]$ 、Rand 型では $133[\text{count}/\text{m}^3]$ であり、Rand 型は V1 型の 15% の密度でしかないため、その影響であると言える。また、平均流れ場及び GS 乱流共に、空気清浄機右後方部に於いて落下花粉が確認できる。これは、空気清浄機の右後方領域の流れ場で澱み点が出来ているためである。Rand 型でこの影響が表れていないのは、前述のように初期分布密度が小さ

いからである．SGS 乱流 Fig. 4.13 (c)では，同様の傾向を示しており，右後方の部屋の隅領域以外では斑が薄くなっている．右後方隅で落下花粉密度がはっきりと表れているのは，SGS 乱流によって花粉が凝集されたからである．

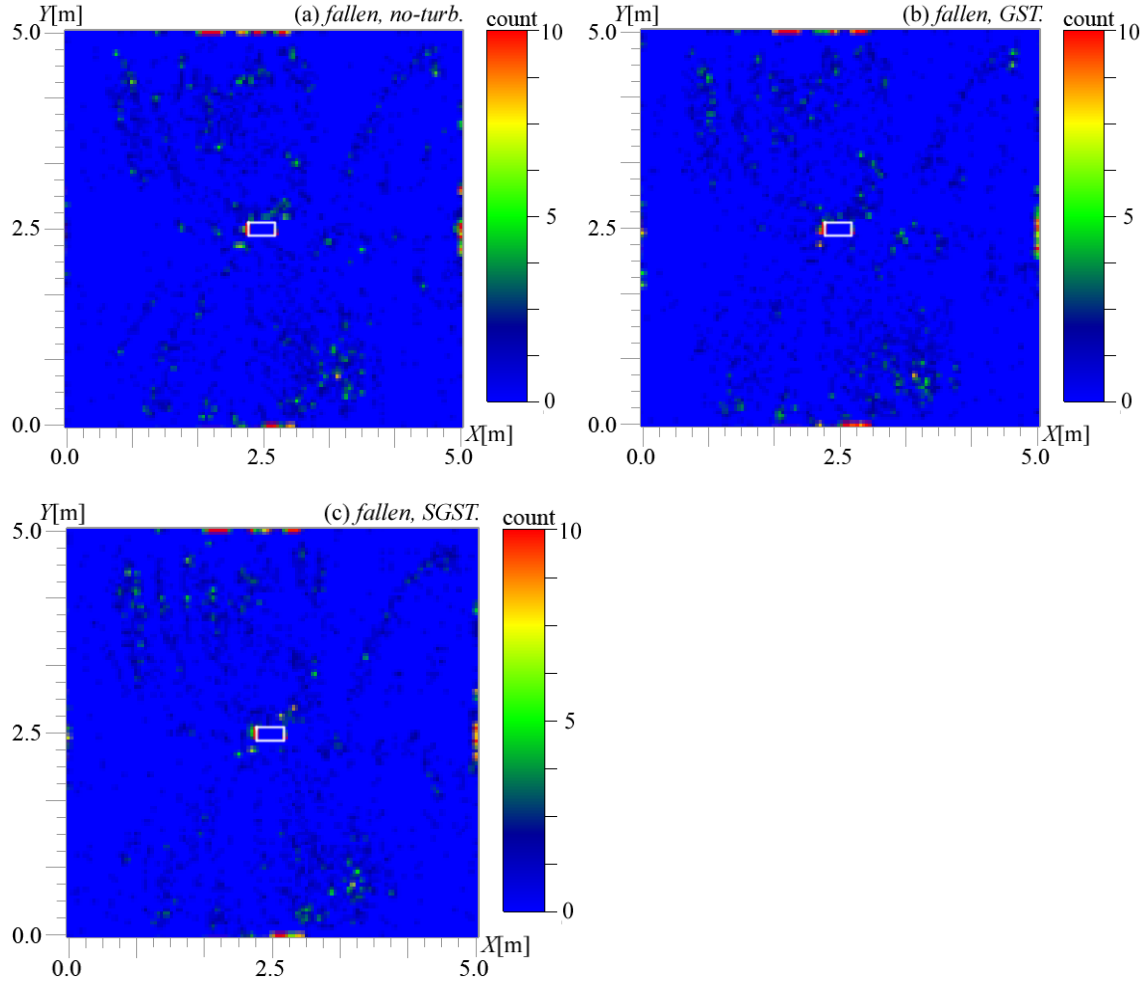


Fig. 4.12. The distribution of the *fallen* pollens projected on *X-Y* plane, calculated using the *Rand* model with the *front*-intake air purifier model. Turbulent models are (a) non-turbulent (averaged air flow), (b) GS turbulent, (c) SGS turbulent. The air purifier exists at the center, and the inlet surface of the air purifier points downward of the figure.

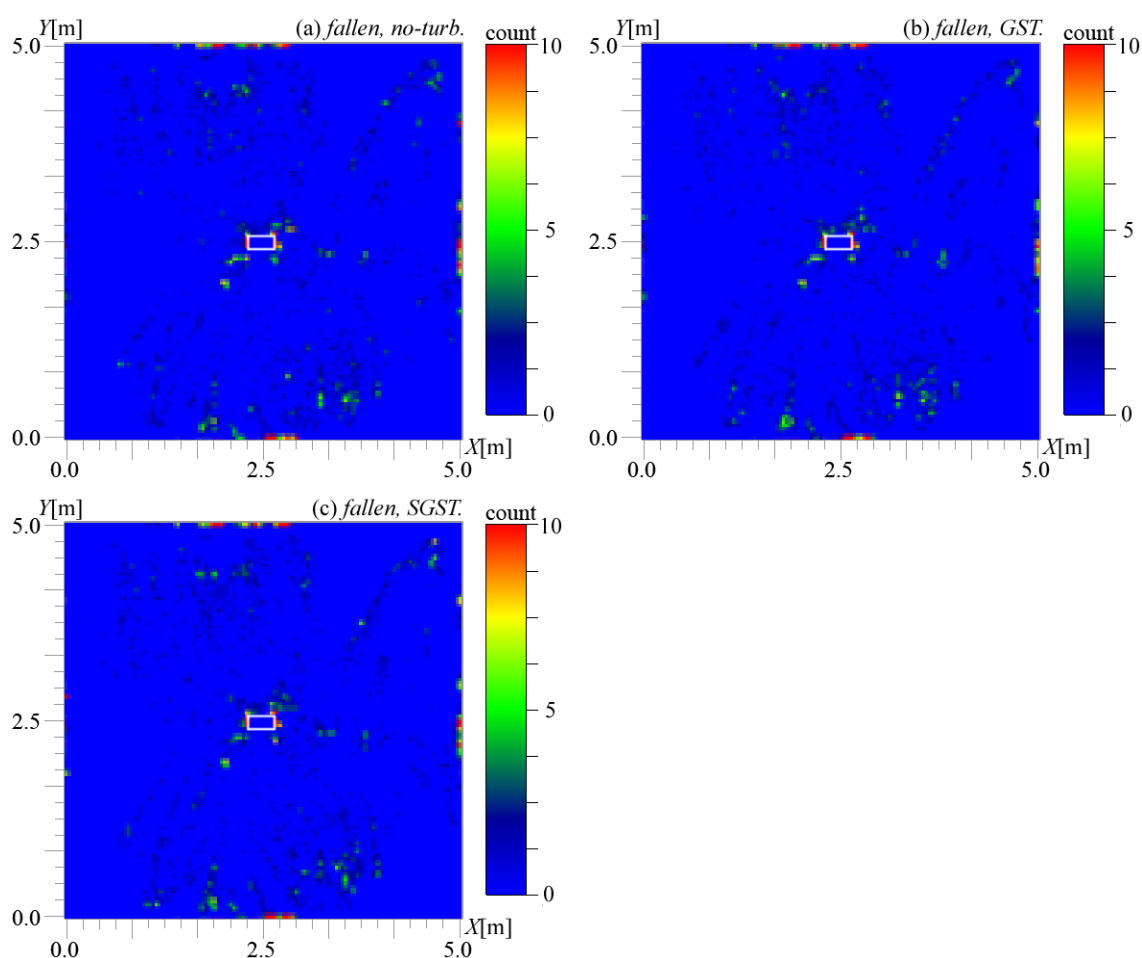


Fig. 4.13. The distribution of the *fallen* pollens projected on X - Y plane, calculated using the $V1$ model with the *front*-intake air purifier model. The air purifier and turbulent model are same as fig. 4.12.

前面吸気型空気清浄機が生成する流れ場での、花粉初期配置 **Rand** 型による吸入花粉初期位置分布を Fig. 4.14 に、 $V1$ 型を Fig. 4.15 に示す．吸入花粉初期位置とは、空気清浄機に吸入された花粉の初期位置を平面に投影したものである． $V1$ 型の花粉初期配置は X , Y 軸ともに 2.0～3.0[m]であるため、その範囲内をプロットエリアとした．

平均流れ場、**Rand** 型の吸入花粉初期位置分布 Fig. 4.14 (a)では、空気清浄機前方領域、右後方領域の花粉をよく吸入できているのが確認できる．空気清浄機後方及び左後方領域の花粉も吸入してはいるが、前方領域ほど吸入できていないことが確認できる．これは、空気清浄機後方の床に近い下部領域の花粉は吸気によって空気清浄機に輸送されるも、吸気面である前面に到達する前に落下してしまうからである．また、後方上部領域の花粉は排気によって後方下部に

輸送され、落下するが多い。しかしながら、空気清浄機後方領域に存在する花粉の一部は、空気清浄機上方に舞い戻ってきた時に空気清浄機前方に輸送され、最終的に吸入されるのを花粉挙動アニメーションにて確認している。GS 乱流変動，Rand 型での吸入花粉初期位置分布 Fig. 4.14 (b)では，平均流れ場と同様に，空気清浄機前方領域の花粉を良く吸入しており，SGS 乱流 Fig. 4.14 (c)も同様の傾向を示している。

平均流れ場，V1 型の吸入初期位置分布 Fig. 4.15 (a)では，空気清浄機前方領域中央の花粉は吸入できているが，前方領域左側の花粉は 10 個程度しか吸入できていない。また，前方領域右側では大多数吸入できており，左右非対称が生じている。これは，流れ場の非対称性が原因であると考えられる。空気清浄機後方でも 8 個程度吸入できており，空気清浄機側背面領域の花粉は吸入しにくい，吸入できないわけではない事を示している。GS 乱流 Fig. 4.15 (b)及び，SGS 乱流 Fig. 4.15 (c)でも同様の結果を示しているが，全く同じ結果とはなっていない。これは，流れ場が時間変化することにより吸入可能な領域が変化することを示す。

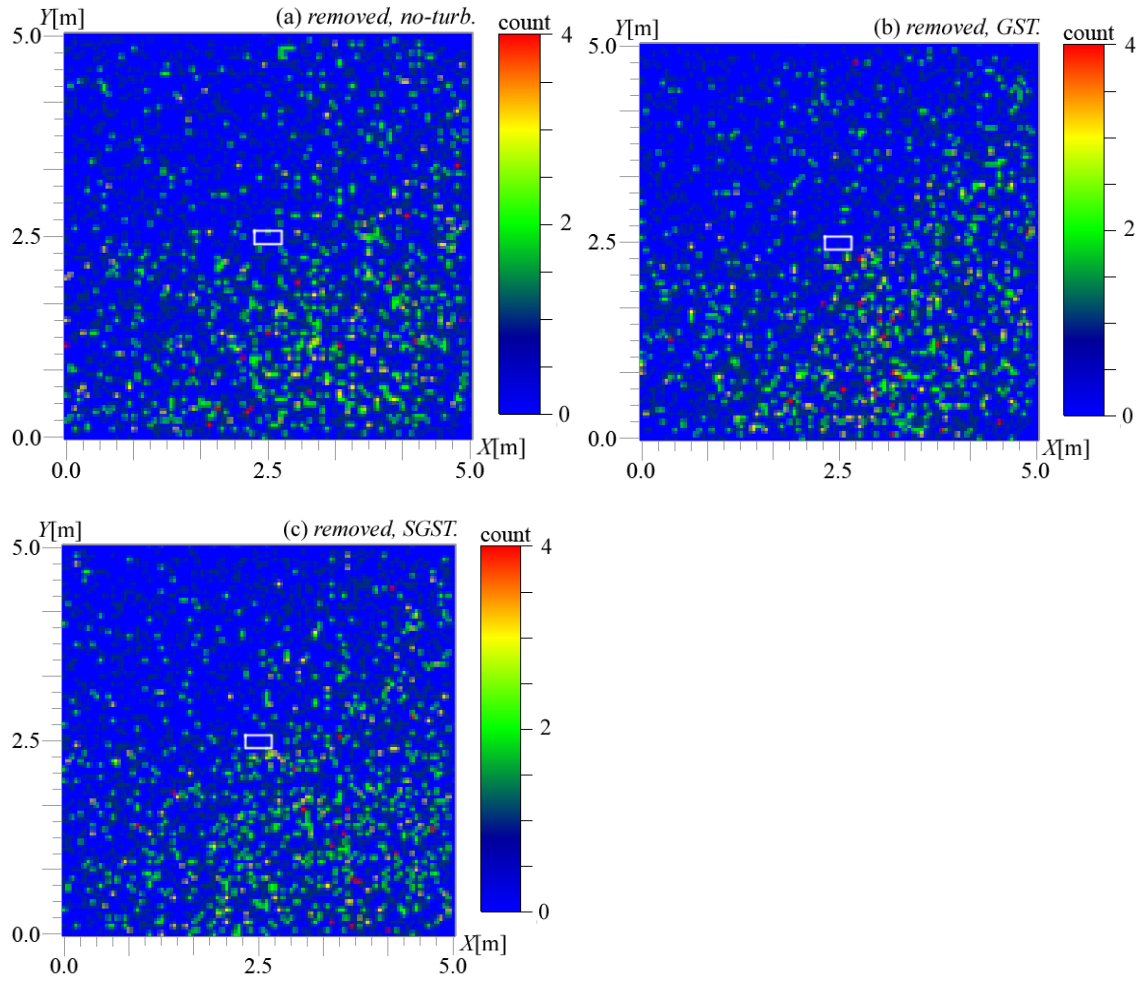


Fig. 4.14. The distribution of the initial position of *removed* pollens projected on X-Y plane, calculated using the *Rand* model with the *front*-intake air purifier model. The air purifier and turbulent model are same as fig. 4.12.

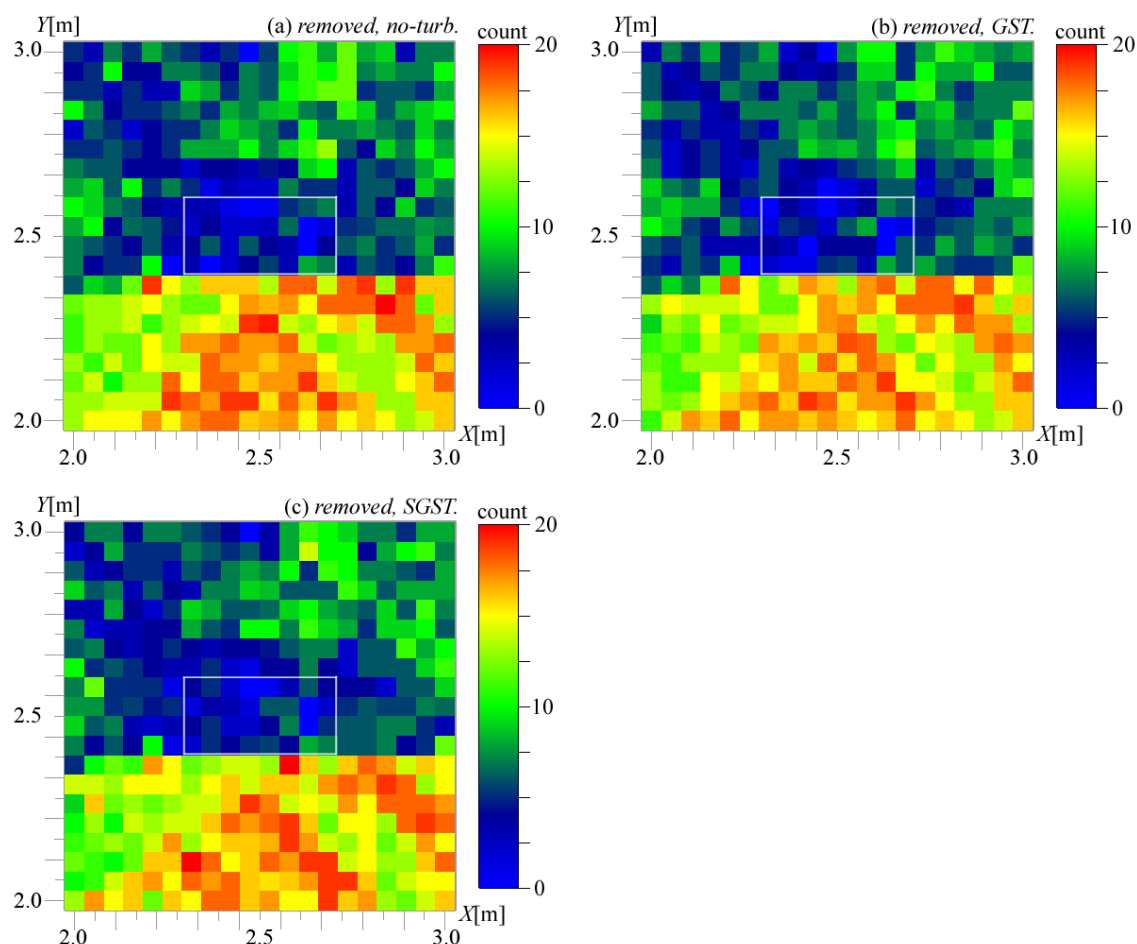


Fig. 4.15. The distribution of the initial position of *removed* pollens projected on X-Y plane in range of 2.0 to 3.0 meters in both dimensions, calculated using the VI model with the *front*-intake air purifier model. The air purifier exists at the center, and the inlet surface of the air purifier points downward of the figure. The turbulent model is same as fig. 4.12.

側面吸気型空気清浄機モデルが生成する流れ場での、花粉初期配置 Rand 型の落下花粉分布を Fig. 4.16 に、V1 型を Fig. 4.17 に示す。各図共に、図の中央の白線で囲まれた枠が空気清浄機を示しており、吸気面は図下側を向いている。落下花粉分布では、図を判別しやすくするためにカラーバーの最大値を 10 個までにしているが、落下花粉数の最大値は空気清浄機前面または背面で Fig. 4.16 (a)509, (b)526, (c)469 個, Fig. 4.17 (a)826, (b)774, (c)810 個である。

落下分布 Fig. 4.16 Rand 型, Fig. 4.17 V1 型では、空気清浄機の前面・背面及び壁面の床に花粉が密集して落下している。これは、前面吸気型と同様に、空気清浄機に吸い寄せられた花粉が吸気面に回り込めずに前面または背面に衝突、

または排気主流によって壁面に衝突した花粉が床面に落下するため、その境界面で花粉が密集するからである。

平均流れ場、Rand 型の Fig. 4.16 (a)では、空気清浄機背面方向及び前面方向の壁面近傍に、花粉が密集して落下している。これも前面吸気型と同様に、排気主流によって壁面から床面を沿うような気流に乗った花粉が、俯角の流速ベクトルによって床面に衝突したからである。GS 乱流変動、Rand 型の Fig. 4.16 (b)では、時間平均流れ場で落下している箇所での落下個数が減少している。これは、流速ベクトルの時間摂動により、落下位置が広がっているためである。逆に、空気清浄機の前背面で落下花粉密度が増加している。これは、GS 乱流時間摂動は 150～160[s]の乱流強度を標準偏差とし正規分布されているため、その間の時間変動が大きければ乱流変動も大きくなる。前背面を滑るような流速が存在していたのに対し、GS 乱流変動により前背面に衝突する気流が生成されたためだと考えられる。SGS 乱流 Fig. 4.16 (c)でも、同様の傾向を示している。

平均流れ場、V1 型の落下分布 Fig. 4.17 (a)では、Rand 型 Fig. 4.16 (a)と同様に、空気清浄機前背面方向及び壁面に衝突した花粉が、密集して落下している。また、前方壁面近傍に於いて、Rand 型と同様に、花粉が密集して落下している。しかしながら、後方壁面の近傍に於いては落下しておらず、空気清浄機周辺に存在した花粉は、側面吸気型空気清浄機の後方には落下しにくい事が分かった。GS 乱流変動 Fig. 4.17 (b)、SGS 乱流 Fig. 4.17 (c)では、Rand 型と同様に、時間平均流れ場と同様の落下分布を示している。

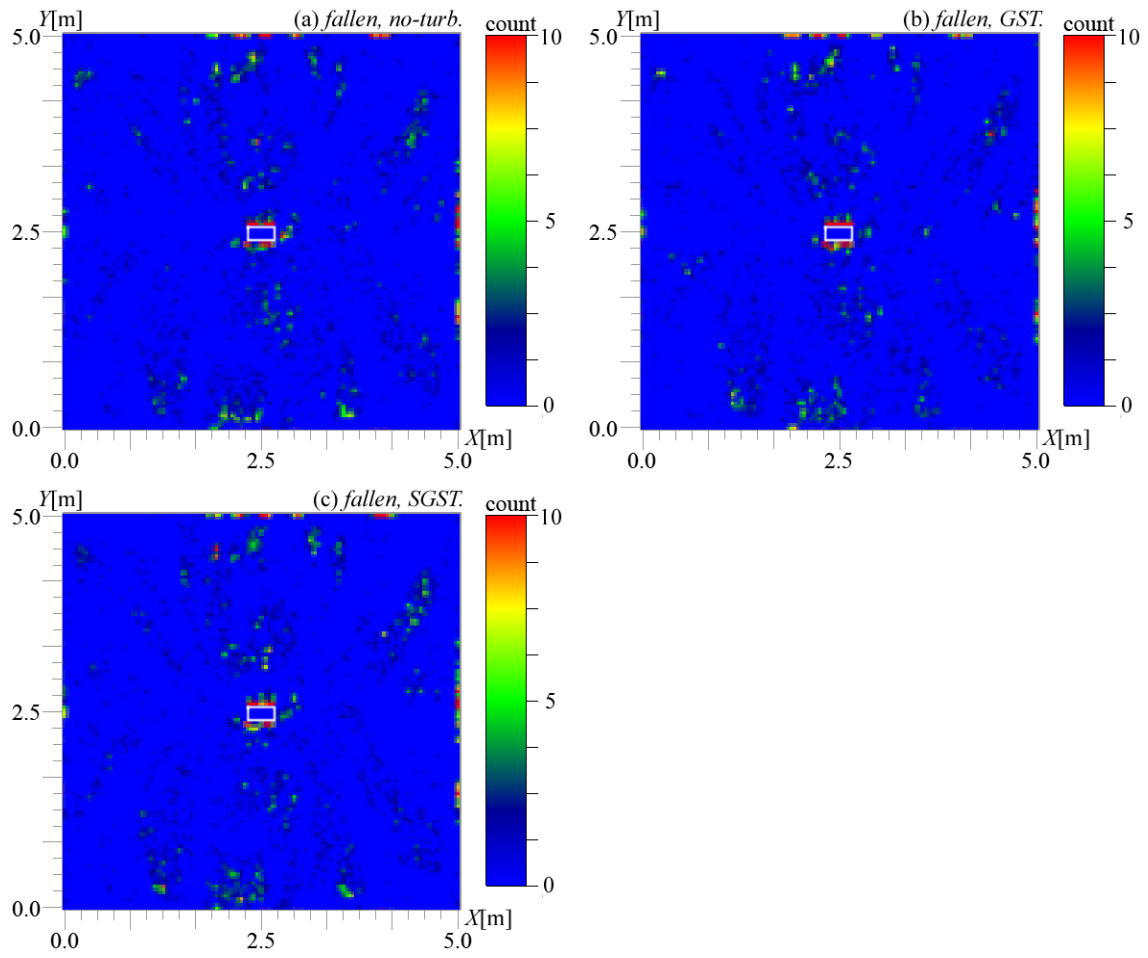


Fig. 4.16 The distribution of the *fallen* pollens projected on X - Y plane, calculated using the *Rand* model with the *side*-intake air purifier model. The air purifier and turbulent model are same as fig. 4.12.

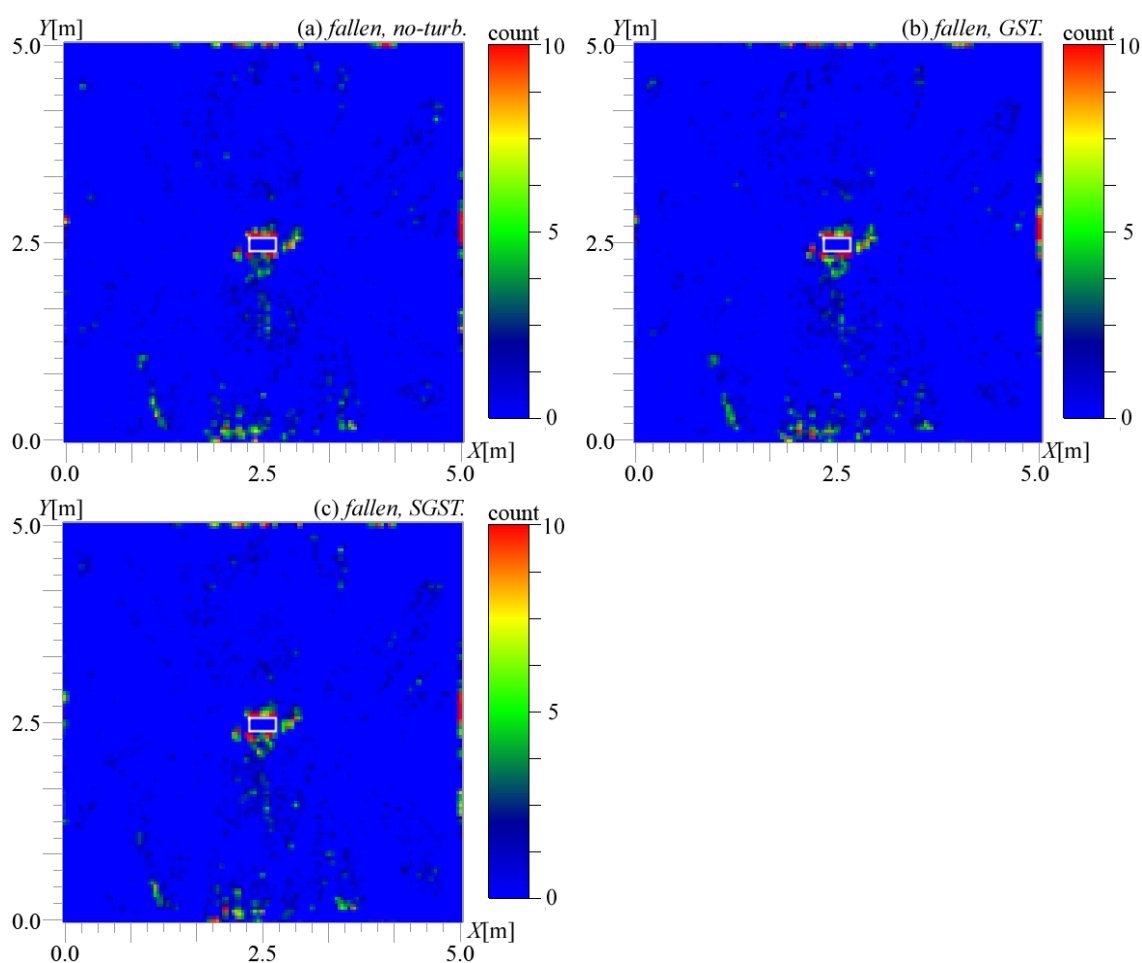


Fig. 4.17 The distribution of the *fallen* pollens projected on X - Y plane, calculated using the $V1$ model with the *side*-intake air purifier model. The air purifier and turbulent model are same as fig. 4.12.

側面吸気型空気清浄機が生成する流れ場での、花粉初期配置 **Rand** 型による吸入花粉初期位置分布を Fig. 4.18 に、**V1** 型を Fig. 4.19 に示す。

平均流れ場、**Rand** 型の吸入花粉初期位置分布 Fig. 4.18 (a)では、前面吸気型とは異なり、全域で吸入できているのが確認できる。空気清浄機前方方向及び背面方向の花粉も吸入できるのは、空気清浄機の両側面が吸気面だからである。GS 乱流変動、**Rand** 型での吸入花粉初期位置分布 Fig. 4.18 (b)及び、SGS 乱流 Fig. 4.18 (c)は、平均流れ場と同様の結果を示す。

平均流れ場、**V1** 型の吸入初期位置分布 Fig. 4.19 (a)では、図の左上から右下への帯状の領域で、花粉をほとんど吸入出来ていないのが確認できる。時間平均流れ場の可視化結果を Fig. 4.20 に示す。空気清浄機左後方から空気清浄機に近付いてきた気流は、空気清浄機背面右部分で背面に衝突する向きとなっている。

この流線により空気清浄機左後方の花粉は吸入出来ない．空気清浄機後方の花粉は，背面左付近まで輸送された後，左側面の吸気面に吸入される．空気清浄機右前方から近付いてくる気流も，空気清浄機前面右部分で前面部へのベクトルにより，空気清浄機に衝突する．これにより，右前方の花粉を吸入出来ない．

GS 乱流 Fig. 4.19 (b)，SGS 乱流 Fig. 4.20 (c)もまた，時間乱流変動の影響を受けて局所的な値は異なるが，傾向は平均流れ場と同じである．

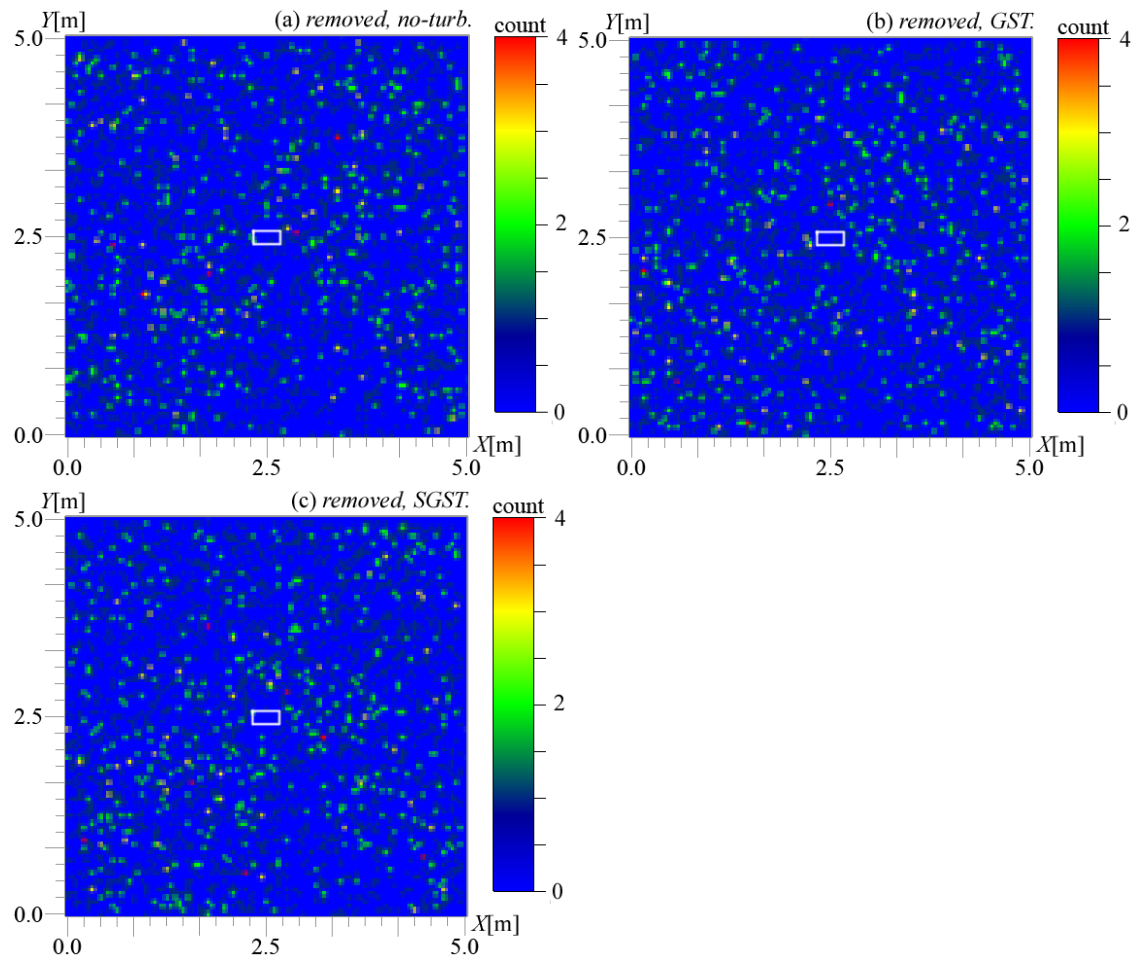


Fig. 4.18 The distribution of the initial position of *removed* pollens projected on X-Y plane, calculated using the *Rand* model with the *side*-intake air purifier model. The air purifier and turbulent model are same as fig. 4.12.

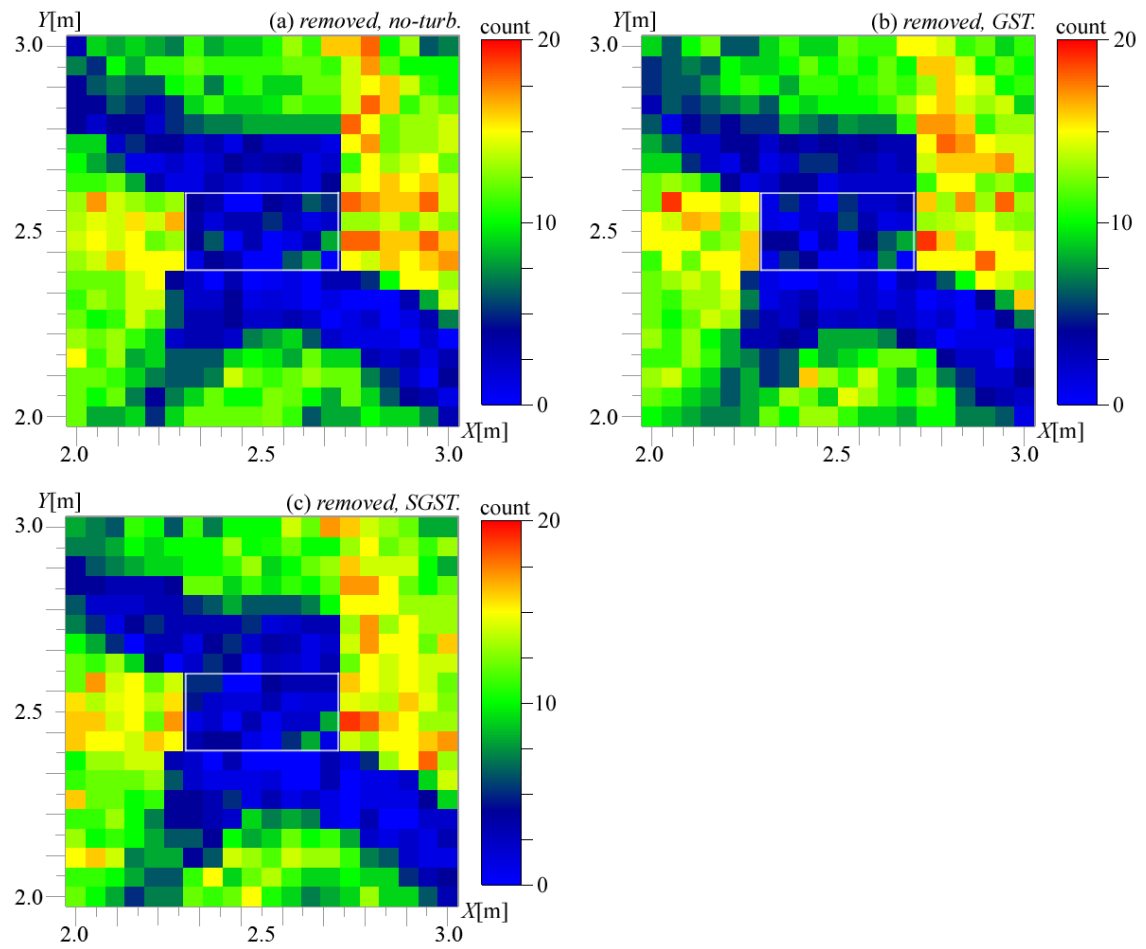


Fig. 4.19 The distribution of the initial position of removed pollens projected on X-Y plane in range of 2.0 to 3.0 meters in both dimensions, calculated using the V1 model with the side-intake air purifier model. The air purifier and turbulent model are same as fig. 4.12.

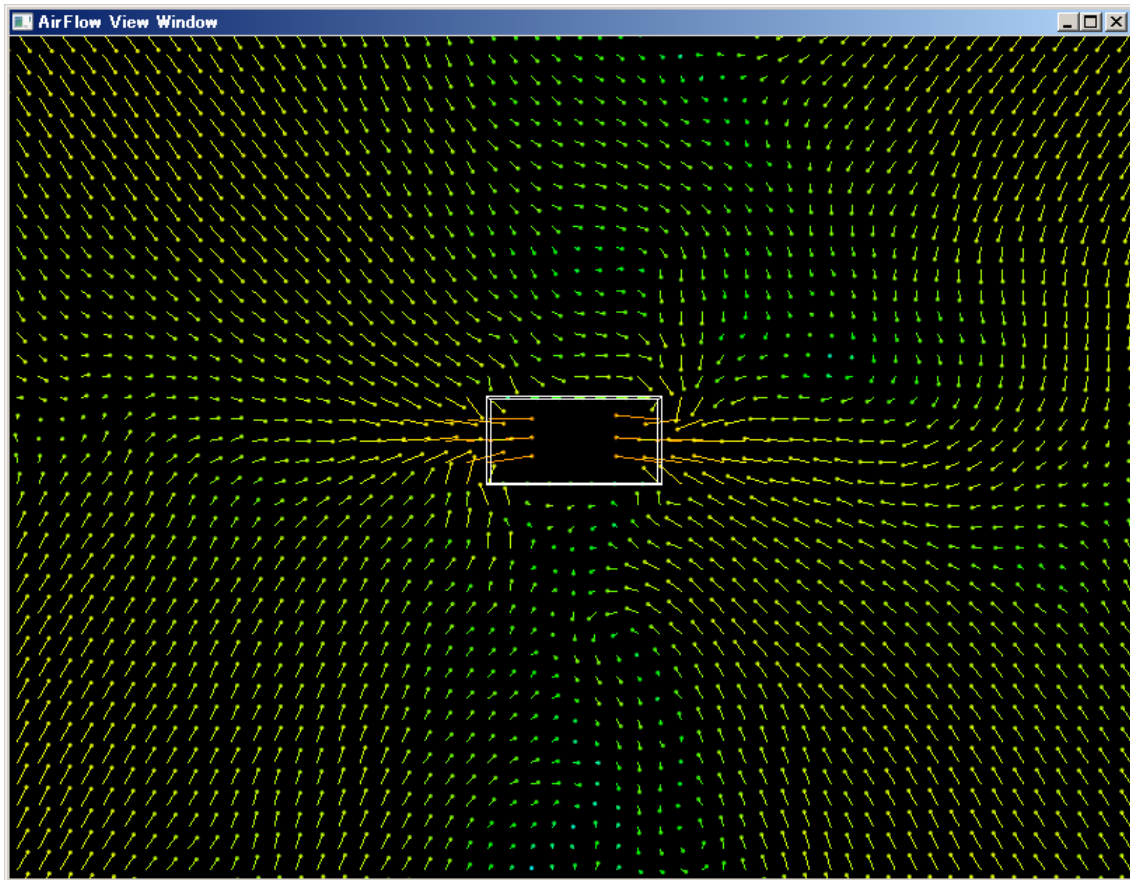


Fig. 4.20. The downward view of the airflow created by the side-intake air purifier. The vector plots surface is X-Y plane at Z=0.31 meters (half of the air purifier height). The figure indicates the time averaged flow field in 10 seconds of 150 to 160 seconds.

吸入花粉初期位置分布 Figs. 4.15 と 4.19 では，時間平均流れ場と GS 乱流の差はさほど無く，同様の傾向を示していることを述べた．この影響が小さいのは，GS 乱流時間摂動流速が，時間平均 GS 流速と比して小さいためであると考えられる．花粉初期配置 V1 型と同じ範囲内の，乱流強度分布を Fig. 4.21 に示す．乱流強度は時間摂動 GS 流速の rms であり，GS 乱流時間摂動の標準偏差である．Fig. 4.21 では，乱流強度 0.02[m/s]未満が 80%以上を占めている．乱流強度 0.02[m/s]の場合，Box-Muller 法で正規分布させているため，GS 乱流変動は 95.45%で 0.04[m/s]以内である．これは，排気流速 1.5[m/s]及び吸気流速 0.5[m/s]と比較して 1 桁以上オーダーが小さい．従って，GS 乱流変動による影響があまり出ないのである．

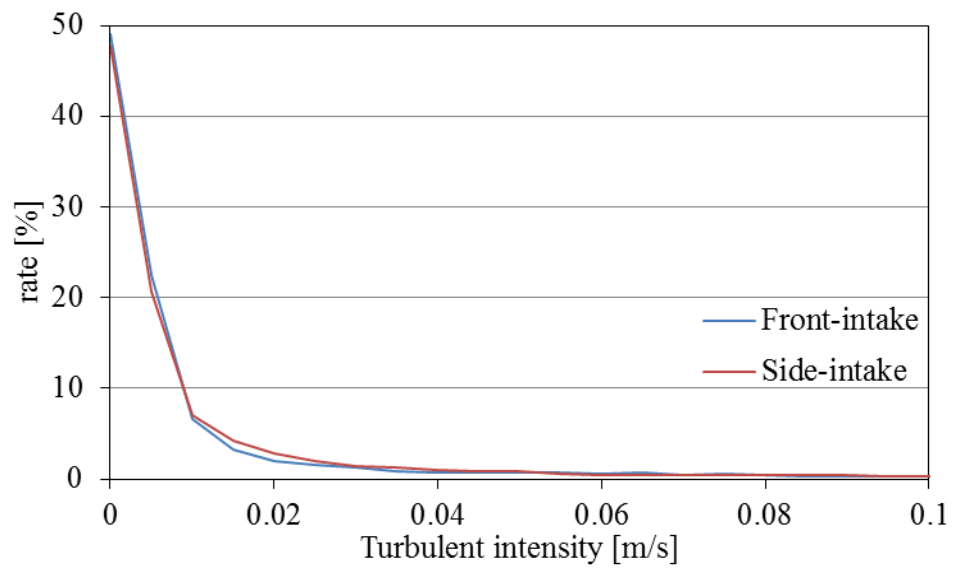


Fig. 4.21. The distributions of turbulent intensity in range of the V1.

第5章 結論

最後に、本論文のまとめを記す。

国内の花粉症患者数は 2,200 万人と推定され、年々増え続けている。花粉症はアレルギー疾患であるため、人体が花粉に暴露されなければ花粉症症状は生じえない。家庭で最も手軽に導入できる花粉除去機構は空気清浄機であり、一般世帯での導入率は 40.0% である。しかしながら、空気清浄機による花粉除去や花粉挙動はあまり報告されていない。そこで、室内気流及び花粉挙動シミュレーション、解析及び可視化を行うソフトウェア **CAMPAS** を開発した。商用の流体解析ソフト、**STAR-CD**、**Fluent** では、粒子を **Lagrange** 追跡しながら流れ場を解く **Lagrange** 混層流を解析できると思われるが、非常に高価である。非商用の **Code_Saturne** では、平均流れ場での粒子追跡しかできない。しかしながら、今回開発した **CAMPAS** では、乱流場を再現しながら粒子追跡を行う事ができる点、かつ可視化ツールもノート PC で可視化が可能なほどに動作性に優れている点が特徴である。

第 2 章では、**CAMPAS** のシミュレーション手法や可視化手法を述べた。第 3 章では、**CAMPAS** の流体解析結果と、流体解析フリーソフト **Code_Saturne** と比較し、逸脱した差はないことを述べた。また、実験とも比較し、シミュレーションの妥当性があることを示した。第 4 章では、**CAMPAS** を用いた結果を述べた。

同流量の前面吸気型と側面吸気型の空気清浄機は、どちらも、空気清浄機立ち上げから 50[s] で排気主流が天井・壁面・床を通り吸気面に結合する事が分かった。空気清浄機による花粉除去効率を統計量とした場合、40[s] 以降、特に 150[s] 以降は乱流統計的に定常であることを示した。前面吸気型・側面吸気型の空気清浄機による花粉除去効率を比較した結果、前面吸気型は 50～54%、側面吸気型は 38～45% であり、前面吸気型の方が花粉除去効率は高いことが分かった。また、どちらの吸気型でも、壁面及び、吸気面ではない空気清浄機面に花粉が衝突し、花粉が落下しやすいことが分かった。空間全域に花粉が落下しやすいが、側面吸気型の周辺に存在する花粉は、後方領域には落下しにくい事が分かった。

本論文では、流れ場を、時間平均流れ場、**GS** 時間乱流を考慮した流れ場、**GS** 時間乱流及び **SGS** 乱流変動を考慮した流れ場の 3 つで、シミュレーションしている。この結果、吸入及び落下花粉の時間推移ではさほど差異はないことが分かった。**GS** 乱流、**SGS** 乱流での落下分布では、流れ場が時間変動するために、平均流れ場での落下分布のピークが広がった分布を示すが、傾向は同様である。

吸入された花粉の初期位置分布でも、乱流変動により、平均流れ場の値と局所的に異なるが、同様の傾向を示す。これは、空気清浄機周辺($1[\text{m}^3]$)に於いて前面吸気型及び側面吸気型双方共に、乱流強度が $0.02[\text{m/s}]$ 以下が 8 割以上を占めており、吸排気流速 $0.5, 1.5[\text{m/s}]$ と比較して 1 桁以上オーダーが小さいからである。従って、障害物の少ない空間で、乱流統計的に定常流に達した流れ場であれば、空気清浄機による室内流れ場の時間変動は小さく、花粉挙動にはさほど影響を与えないという事が分かった。この **GS** 時間乱流及び **SGS** 乱流変動の計算には時間がかかるため、時間平均流れ場で花粉挙動の傾向が判明するという事は、研究スピードに大きく寄与する。

今後の課題としては、様々な空気清浄機モデルでのシミュレーションによる花粉除去効率の把握が挙げられる。現在の空気清浄機モデルは吸気面全域で吸気している。この吸気面をスリット状に変更すれば吸気流速が大きくなるため、大きな影響を受けると考えられる。それ以外にも、吸気面を側面だけではなく全面下部にも設けたモデル、または前面と側面下部の吸気型モデルで、床面近傍の花粉を除去できるのではないかと期待できる。また、排気角ルーバを動かせば、流れ場も変化する。この排気角ルーバを変動させる気流シミュレーションを行いつつ、花粉挙動シミュレーションを同時に解けば、ルーバ変動による流れ場での花粉挙動を計算できる。このルーバ変動を適切に制御すれば、花粉除去効率は上昇すると考えられる。今後も、今回開発した **CAMPAS** の改良し前述のようなシミュレーションを行い、高効率な花粉除去装置モデルを見出し、実機開発を行う。

謝辞

本研究を行なうにあたり、様々なご指導やご教授を賜りました高橋俊樹准教授に厚く御礼申し上げます。

高橋先生には論理的な研究姿勢やアカデミックコースへの心構えなど多岐にわたるご指導だけでなく、生活面などのご相談に乗っていただきました。ご多忙の中であるにも関わらず不出来な私に最後までご指導くださり、研究発表や論文の不備をご教授いただき、非常に有益なご意見をいただきました。ここに厚く謝意を表する次第です。

石川赴夫教授には主査として、本島邦行教授、橋本誠司准教授、鵜崎賢一准教授には副査として、私の博士論文審査に時間を割いて頂いて頂けただけでなく、貴重なご指導賜り、本論文の質をさらに向上させることが出来ました。心より感謝致します。

渡辺隆之さんをはじめ、高橋俊樹研究室の皆さんに心から感謝します。研究以外の面でも大変お世話になりました。

最後に、私の研究活動に快く賛同し応援してくれた両親に深く感謝します。