

クリーンルームの動的シミュレーションと バーチャルメトロロジによる温度制御

甲斐春貴^{†1} 阿部成海^{†1} 熊谷祐希^{†1} 岩村航^{†2}
久保田弘^{†1} 橋新剛^{†1} 吉岡昌雄^{†2}

概要: 半導体製造プロセスのクリーンルームでエネルギーを節約するために、ダウンフローの概念からかけ離れた横風の概念を提案します。ファンフィルターユニット (FFU) の風量を横風にする事で、正確な温度管理が必要な場所のみ風量を配分する方法です。半導体製造プロセスのクリーンルームでエネルギーを節約するために、ダウンフローではなく横風を用いた手法を提案します。ファンフィルターユニット (FFU) の風を横風にする事で、温度管理が必要な場所のみ風量を配分する方法です。

キーワード: 計算科学と数値シミュレーションの理論と実践 - すべて、シミュレーション・応用計算の実装と評価

Temperature control of clean room by dynamic simulation and virtual metrology

HARUKI KAI^{†1} NARUMI ABE^{†1} YUKI KUMAGAE^{†1} KO IWAMURA^{†2}
HIROSHI KUBOTA^{†1} TAKESHI HASHISHIN^{†1} MASAO YOSHIOKA^{†2}

Abstract: In order to save energy in the clean room of the semiconductor manufacturing process, we propose the concept of crosswind far from the concept of down flow. It is a method to distribute the wind volume only in the area where accurate temperature control is required by distributing the Fan filter units (FFU's) air volume to create a crosswind.

Keywords: Theory and Practice of Computational Science and Numerical Simulations – ALL, Implementations and evaluations of numerical simulations and applications

1. はじめに

半導体は微細化・高集積化の研究が進められている。この半導体の微細化・高集積化を行うことで一枚のウェーハ上に一度に多くのデバイスを作ることができるため、生産効率も飛躍的に上がり、コストダウンにつながるという効果がある。図 1.1 は ITRS が公表している Flash メモリと DRAM のハーフピッチのロードマップである[1]。この図より、これからも半導体の微細化が進むことが予想される。

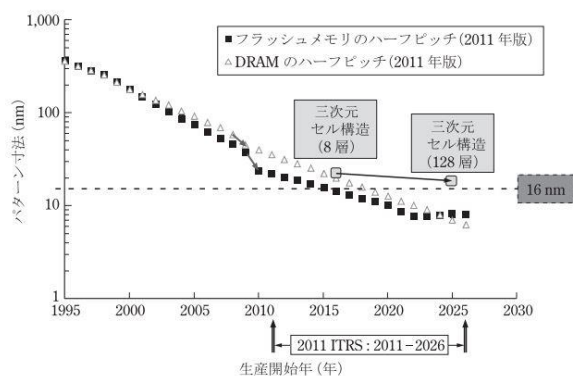


図 1 DRAM と Flash メモリの微細化トレンド

またそれに伴い、クリーンルームの温度・湿度管理が非常に重要になると予想される。

半導体製造プロセスにおいて温度制御は、製品の品質や生産性を左右する非常に重要な要素であるため、常にクリーンルーム内の温度が一定に保たれるよう管理されている。現在のクリーンルームの室内温度管理の方法は、ある一点で温度変化を検知するとクリーンルームのすべてのファンの風量を同量で変更し、温度を調節するという方法である。この方法では、温度変化が起きていない箇所の温度まで変化させてしまう可能性があり、余分な電力を消費してしまう。

対策として、すべてのファンの風量を変更するのではなく、温度変化が起きた点に関与しているファンのみ風量の調整を行うことで不必要な温度変化を起こすことなく消費電力も抑えることができる。

本研究では、ファンの変風量制御によって温度制御の必要な点のみを適切な温度に調整する方法の開発を行う。

^{†1} 熊本大学大学院自然科学研究科
Kumamoto University GSST.

^{†2} 熊本大学 工学部
Kumamoto University Faculty of Engineering

2. 横風での制御概念

従来のクリーンルーム設計の概念は、いわゆるダウンフローの概念に基づいている。クリーンルーム全体で均一なFFUの通気を維持し、各ユニットに供給される清浄度を保証して換気を行う。

しかしこの考え方は、クリーンルームの導入時やクリーンルームの大きさに比べてごく少数の機器しか存在しないときやクリーンルーム内が空いている状態で成立する図2(a)。

長く稼動している中で様々な製造設備や搬送設備が複雑になっているクリーンルームでは、その考えは成り立たない。さらに、現在の混雑したクリーンルームでは、表面温度の異なる機器が混在しているため、ダウンフローの考え方で温度分布を一定に保つことは困難である。

したがって、温度制御が正確に行われる領域を限定する必要がある。その他のポイントは、温度管理を行わない。図2(b)のペナルティポイントの温度を正確に制御することを検討する。高温、中温、低温および異なる熱発生を有する装置が配置されているCRでその制御を行うと、高温機器には大量の空気が吹き付けられ、低温機器には少量の風が吹き付けられることが予想される。

不均衡な気流は室内に圧力差を生じさせそして横風を生じさせる。目的地の温度が目的の温度になるように、この横風の度合いを制御するためにFFUの風量を調整する。つまり横風がダウンフローの代わりに吹くクリーンルームの制御方法である。

今回はこの実現方法について説明する。

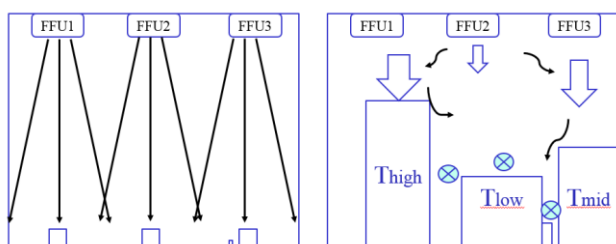


図 2(a)

図 2(b)

この横風で制御するクリーンルームを実現するためには機器の配置などによる渦流の出現を排除する必要がある。渦の形成はFFUの吹き出し口とリターンダクトの位置によって大きく異なってしまう、またこの2つの要素を変更する自由度は非常に小さい。

よって、すべて同量で調整しているFFUの運転状態を変更し各FFUの風量を分配することで、渦流をなくす方法を提案する。

ここで、今回用いたシミュレーションソフト[3]は2次元レイアウト情報と高さ情報から図3に示すような3次元デバイス分布を出力する[5][6]。

また、各機器の表面温度や壁の温度などを測定して入力することで、3次元熱気流シミュレーションを行い、渦のないFFU風量を求める。

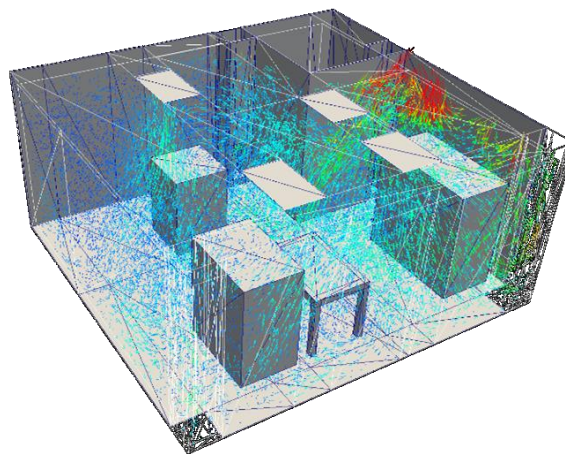


図 3 3次元シミュレーション(例)

3. FFU 風量算出

1つのFFUを除いて、他は全て停止し、温度制御点の温度変化に寄与する係数を行列の要素として求める。この作業をすべてのFFUに対して行い、すべてのFFUの各点への寄与係数を計算する。3次元シミュレータが信頼できるものであれば、実測でなくてもシミュレータによってこれらの係数を事前に計算することも可能である。この逆行列を求めることで、目的地点の要求温度変化からFFUの要求風量変化量を算出することができる。

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \vdots \\ \Delta T_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & \cdots & x_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \cdots & x_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_i & b_i & c_i & \cdots & x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \\ \vdots \\ \Delta F_l \end{bmatrix}$$

ΔT : 基準温度との温度差 [°C]
 ΔF : 基準風量との風量差 [m³/sec]

※イメージ図

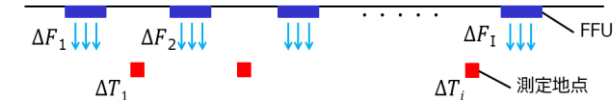


図 4 風量算出のための行列式

計算の全体的な流れを図5に示す。

実際に予備実験を100以上のFFUを持つクリーンルームで行なった結果、渦のないクリーンルームの実現までに30%の省エネ効果が見られた。成功の主な理由は、空いているスペースに吹く空気の量を最小限に抑えることである。

言い換えれば、無駄なスペースが約30%ある又は発熱が少ないということである。

この予備実験から、精密な温度制御に必要なスペースにのみ適用することで、大きな省エネ効果が得られることが分かる。

例えば、露光装置部分だけを温度制御によって保護した場合、露光装置の面積の占有面積は約 10% を占めるので、概略計算で消費電力を約 90% 削減することが可能となる。

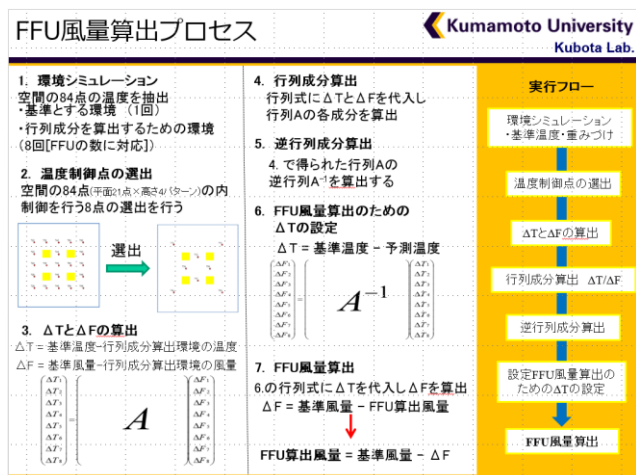


図5 風量算出プロセス

4. 実験結果

図5に示した方法で算出した FFU 風量を実際にシミュレーションに適用した結果を図6に示す。

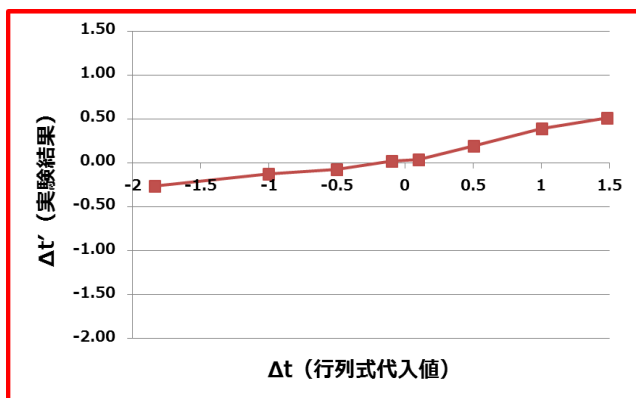


図6 温度制御実験結果

このグラフは横軸に要求温度変化、縦軸にシミュレーションで得られた温度変化をとっている。そのため、図7のようなグラフになるのが理想的な結果である。

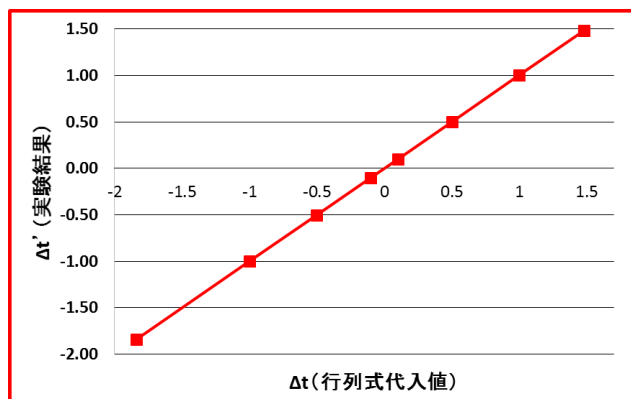


図7 温度制御理想結果

図6の結果を見ると図7の理想的なもの比べて傾きが小さいことから温度制御がまだまだ不十分であることが分かる。

しかし、温度を上昇・低下させる制御をかけた際にそれぞれしっかりと温度が上昇・低下していることから、温度変化の制御を行うことができていることが分かる。

次に空気齢[2]の制御を行った際の実験結果を以下に示す。空気齢を制御することで部屋内の空気がスムーズに流れるようになるため、CR全体の循環効率が向上する。循環効率が向上すると空気がフィルターを通る回数が増えるため、CR内のパーティクルの数を減らすことができる。

つまり、空気齢を制御することでパーティクルの数を減らすことが可能であると考えられる。

図8,9[4]が空気齢の制御を行う前の空気齢の分布、図10,11が空気齢を下げるために最適な風量を設定した際の分布である。それぞれ、赤く表示されている点は空気齢が高く、青く表示されている点は空気齢が低いことを表している。

言い換えると、赤い領域は空気が滞留している、青い領域はスムーズに風が流れていることを表している。

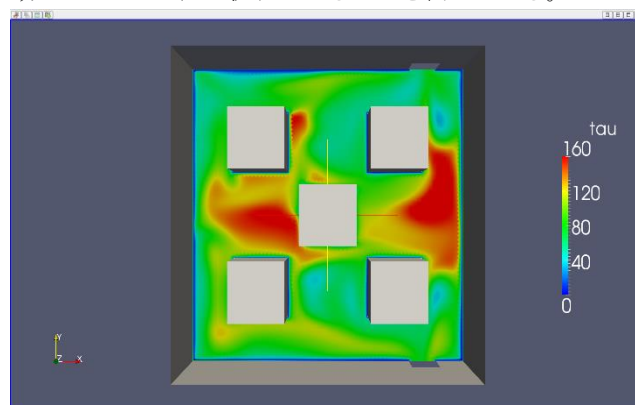


図8 空気齢分布(1.5m)

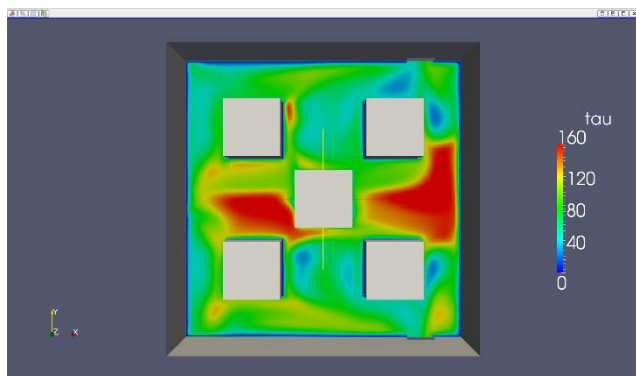


図 9 空気齢分布(2m)

図 8.9 の結果からオブジェクトの間に空気齢が高く、滞留が発生していることが分かる。そこでこの空気齢が高い箇所を制御点として設定し風量を算出する。その風量を設定した結果を以下の図 10.11 に示す。

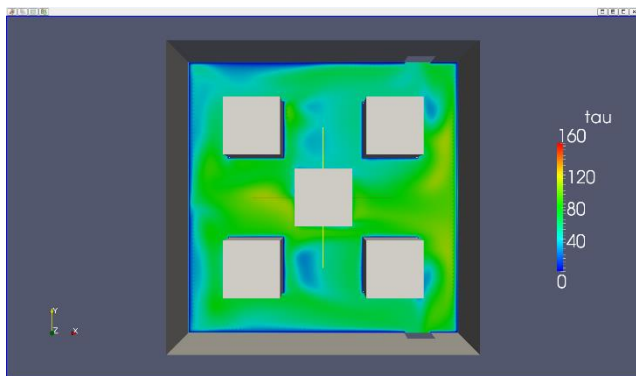


図 10 風量設定後の空気齢分布(1.5m)

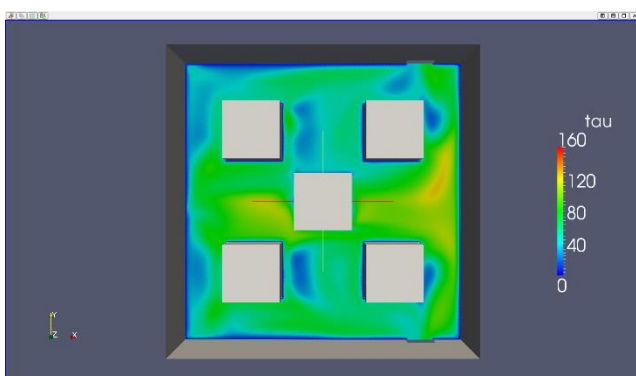


図 11 風量設定後の空気齢分布(2m)

図 10.11 を見て分かるように、オブジェクト間の赤く表示されていた領域の空気齢が低下していることが分かる。

5. 結論

本研究では、FFU の変風量制御によってクリーンルーム内の温度制御の必要な点のみを適切な温度に設定する手法を提案し、その手法を用いたシミュレーション実験の結果を述べた。

シミュレーションの結果、温度制御ではまだまだ不十分であるが室内温度の制御が可能であることが確認でき、空気齢制御では所望の制御ができることを確認することができた。これからクリーンルームにこの手法を組み込むことで温度制御による余分な消費電力の削減や、空気齢制御による循環効率向上・室内パーティクルの減少が期待できる。

参考文献

- [1] ITRS
<https://www.ieice.org/jpn/books/kaishikiji/2012/201211.pdf>
- [2] 加藤信介, 梁禎訓, 「複数の吹出・吸込がある室内における CFD による着目吹出口の空気齢及び吸込口の空気余命の分布性状解析」 J-STAGE, 55 巻(2003)1 号, p.86-90
- [3] OpenFOAM ホームページ
<http://www.openfoam.com/>
- [4] OpenFOAM 勉強会 for beginner
[www.ofwikija.org/images/20111022_勉強会\(高橋\).ppt](http://www.ofwikija.org/images/20111022_勉強会(高橋).ppt)
- [5] Blender ホームページ
<https://www.blender.org/>
- [6] ParaView ホームページ
<http://www.paraview.org/>