

チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

(1) 取り扱える元素の種類を増大させることは理解できますが(これまでの12種の元素にプラスして43種の元素)、これらの元素(個数も限られている)から構成されるすべての物質のシミュレーション結果をどのように検証するのか、お示しください(一例については示されていますが、43種のいずれかの元素から構成された物質のSPMデータをどのように入手するののかも含めて)。

(回答)

実験報告例のあるものについては、その物質系に対するシミュレーションを実施して有効性を検証します。報告例のないものについては、必要に応じて理論的な予測を行い、その計算結果を実験研究者に提供します。

シミュレーション計算結果が妥当なものであるか否かの検証作業の重要性は、私たちも、十分、認識しています。このような検証作業は、シミュレーション結果と実験結果の比較・検討を丹念に繰り返すしか他に手はありません。今回のプロジェクトでは、取り扱える元素の種類を大幅に増やすことを目的としていますので、検証すべき物質系の数も膨大となります。これらの膨大な物質系に関する検証作業を、短時間で終わらせるのは難しいと考えられます。ですので、比較的重要と考えられる物質系を優先して、シミュレーション結果と実験結果の比較・検討を進めることとなります。

具体的には、サブリーダーである黒川准教授(京都大学工学研究科)の担当されるMg3元合金を中心とする各種無機材料のSTM/STS実験結果と、シミュレーション結果との比較を考えています。また、さらには、分担開発者である須藤教授(東北大学大学院理学研究科)の担当される様々なシリコン結晶面およびその表面上での銀・プラチナ原子のナノクラスター形成でのSTM/STS実験結果と、シミュレーション結果との比較も予定しています。

シミュレーション計算結果と実験結果との間に、重大な食い違いが見つかった場合、ソフトウェアの計算アルゴリズムなどを見直して、プログラムの修正を行うこととなります。ですので、シミュレーション・プログラムは、定期的にバージョンアップしていくこととなります。そういった意味では、シミュレーション・ソフトウェアの開発に終わりはありません。

私たちは、SPMシミュレータ開発当初から、計算プログラムの修正、機能追加などの作業に伴い、ソフトのバージョンアップを繰り返し行って来ました。その頻度は、半年から一年程度の間隔です。シミュレーション・ソフトの開発は、地道な検証作業の繰り返しであり、その作業に必要な期間も数年以上に及ぶことが有ります。この点を御理解下さい。

チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

(2) これまでに開発したシミュレータの普及に努められていることは存じあげていますが、その状況をまとめてください。また、SPM装置は多くのメーカーから販売されており、どのメーカーの装置にも搭載できることがユーザーにとっては必要ですが、どのように搭載しているのか、あるいは、その方向への取り組みも示してください。

(回答)

SPM(走査型プローブ顕微鏡)シミュレータは、塚田捷東北大学特任教授の指導の下、平成21年度から本格的に開発が進められてきたソフトウェアです。これまで、以下の助成を受けています。

「走査型プローブ顕微鏡シミュレータの開発」(H21.4~H24.3 プロトタイプ実証・実用化タイプ)

「SPM装置シミュレータの活用・普及促進」(H24.10~H27.3 開発成果の活用・普及促進)

SPMシミュレータは、日本の大学発の、世界標準を目指すことが可能なソフトウェアです。

現状のSPMシミュレータは、以下の8個のソルバの集合体です。

Analyzer(実験データ画像処理プロセッサ)	LiqAFM(液中ソフトマテリアルAFMシミュレータ)
SetModel(試料と探針の原子モデル作成)	CG(構造最適化AFM像シミュレータ)
GeoAFM(高速相互予測AFMシミュレータ)	MD(分子動力学AFM像シミュレータ)
FemAFM(連続弾性体AFMシミュレータ)	DFTB(量子力学的SPM像シミュレータ)

今回の開発プロジェクトに関係があるのは、上記8個のソルバのうちのDFTBです。

SPMシミュレータは、「SPM実験研究者が手軽に使える理論シミュレーション・ソフトを提供する」というコンセプトの下に研究開発が進められてきました。SPMは原子レベルの解像度を持つ優れた実験装置ですが、得られた観察画像をどのように解釈するかで自明でない場合があります。そのため、シミュレーション結果を参照しつつ、実験結果に物理的な考察を加えるのが望ましいとされています。SPMシミュレータは、この要望(ユーザーニーズ)に応えるために、以下の三つの機能を同一のプラットフォーム上で実現するように設計されています。これらの特徴より、SPMシミュレータは世界的に見ても類似製品が見当たらない極めてユニークなソフトウェアに仕上がっています。

1. 理論的シミュレーション計算機能
2. 実験画像データ処理機能
3. シミュレーション結果と実験画像データの、デジタル画像処理による比較・検討機能

SPMシミュレータは、平成23年7月より希望者に試供版を無償供与の形で配布して来ました。試供版をご利用頂いているユーザーの数は、国内で約300名、国外で約170名です。その後、プログラム不具合の修正・新機能の追加を重ね、平成26年9月にソフトウェアの正式なリリースにこぎ着けました。現在は、無償版を使用頂いているユーザーの方に、有償版への切り替えを促している段階です。また、新規ユーザー獲得のために、原子力開発機構、物質・材料研究機構などの公的研究機関に対して積極的な売り込み活動を展開中です。さらには、現在、特別措置期間として、ライセンス料金を大幅ダウンさせた価格設定で、新規ユーザーの敷居を低くする努力を続けています。

最先端研究基盤領域

これとは別に、国内外の SPM 実験装置ユーザーのメールアドレスを収集・データベース化し、ソフトウェアの開発進捗情報を電子メールによって積極的に開示する活動も行っています。この SPM ユーザーリスト・データベース化は、平成 24 年に採択された「SPM 装置シミュレータの活用・普及促進」活動の一環として行われました。SPM ユーザーリストは、以下の三つのグループに分類され、グループごとにきめ細かな営業活動が行われています。

A) コアユーザー(約 300 人) : 試供版シミュレータを使われている研究者の方々が中心
B) 周辺ユーザー(約 1100 人) : シミュレータに興味を持っておられそうな研究者の方々
C) 潜在的ユーザー(約 5500 人) : SPM 実験は行うが、シミュレータ導入には積極的でない方々

国内外の SPM 装置メーカーに働きかけて、販売される SPM 装置に、本 SPM シミュレータの搭載・同梱を依頼することを計画しています。現時点では、国内有力メーカー数社、海外有力メーカー2社と交渉中です。

特に、情報交換を密に行っている国内有力メーカーは、自社製品に私たちの SPM シミュレータをバンドルさせて販売するための要件として、以下の項目を提示しています。

- (その SPM メーカーでは、)STM が主力製品なので、STM シミュレーション機能強化が望まれる。
- STM 理論計算では、試料となる物質系の電子状態の計算が重要である。それに伴い、出来るだけ多くの原子種のパラメータを用意して、様々な物質の SPM 実験に対応できるのが望ましい。
- (その SPM メーカーの)ユーザーは、具体例としては、多層膜や単原子の STS およびスピン偏極観測、ポルフィリンなどの分子の STM/STS 観察を目的として自社製品を使用している。従って、装置にバンドルされるソフトは、これらのシミュレーションに対応していなければならない。今回の研究開発プロジェクトの目的である、原子間相互作用パラメータ・データベース構築は、上記の SPM 実験装置メーカーの要望を満たすものです。従って、パラメータ・データベース強化は、新たなユーザーを引き込む直接的な原動力となりえます。未知の対象物に対してシミュレーションが実行可能であることは、ユーザーにとって大きな魅力となると確信しています。

私たちは過去に海外有力メーカーから、「理論シミュレーションだけでなく、実験データ処理機能も充実させたソフトウェア作りを」という助言を受け、理論・実験の両面からプログラム開発に取り組んできました。その成果として、SPM シミュレータには Analyzer ソルバ(実験データ画像処理プロセッサ)が実装されています。Analyzer ソルバは、国内・海外の主要 SPM 装置メーカーのデータ出力形式をサポートしており、実験画像バイナリデータ(生データ)を直接読み込み可能です。さらに、Analyzer ソルバには高度なデジタル画像処理機能も用意されており、実験データ処理が容易に行える環境となっています。このように、現段階の SPM シミュレータは極めて汎用的な製品となっており、機種を選ばず、このままの形で SPM 装置メーカー各社の製品にバンドル(同梱)して頂ける状態となっています。

現在、SPM シミュレータ有償版納入実績がある、または、商談が進行中のお客様は、公的研究機関・民間企業・大学研究室(海外を含む)等、広い範囲に渡っています。

チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

(3) 高性能SPM測定の主流はSTMからAFMに変わり、現時点ではAFM/STM同時測定に変わっていますが、何故、STMの性能ばかり説明するのでしょうか？ご説明ください。

(回答)

電子状態の計測にはSTMが必須であり、半導体や磁性材料などの分野ではSTMの必要性はAFMに劣らず大きいと思います。また、計画しているDFTB法計算のパラメータの充実は、STMシミュレーションはもちろんのこと、量子力学による電子状態計算を利用した、より精密なAFMシミュレーションを可能とします。本研究プロジェクトでは、STMとAFMのシミュレーションの両方を強化して、より応用範囲の広いシミュレータ開発を目指すものです。

私たちが開発しているSPM(走査型プローブ顕微鏡)シミュレータは、8個のソルバの集合体です。これらの中には、以下の特徴を持つソルバが含まれています。

[FemAFM] (連続弾性体 AFM シミュレータ)

[LiqAFM] (液中ソフトマテリアル AFM シミュレータ)

[CG] (構造最適化 AFM 像シミュレータ)

[MD] (分子動力学 AFM 像シミュレータ)

[DFTB] (量子論的 SPM 像シミュレータ) : STM/STS/FM-AFM/KPFM を含む

以上の構成を見ると分かるように、SPMシミュレータは、全体としては、STM(走査型トンネル顕微鏡)よりもむしろAFM(原子間力顕微鏡)関連ソルバが中心となっています。FemAFMおよびLiqAFMでは、試料・探針は弾性体と見なし、液中環境は流体力学で解くなど、古典力学の手法を駆使しており、取り扱える系の特徴的なスケールは μm オーダーとなっています。CGおよびMDでは、分子構造のエネルギー最適化や分子動力学の手法を使っており、古典力学の範囲ではありますが、例えばペンタセン分子一個の周波数シフトAFM像を求めるのも可能で、数十Åオーダーの系を取り扱うことが可能です。

一方、DFTBソルバは、量子力学の考え方を使ったシミュレータで、DFTB法(Density Functional based Tight Binding: 密度汎関数に基づく強束縛法)を解法として採用しています。このDFTB法は、第一原理計算法と比較して、少ない計算時間・メモリで、高精度な近似計算が可能であるという特徴を有しています。このため、DFTBソルバは、数Åオーダーの系を取り扱うことが可能です。これは、原子一個一個のSPM実験画像をシミュレーションすることが可能であることを意味します。実際、DFTBソルバの試料平面内における分解能は0.1Åオーダーとなっています。

最先端研究基盤領域

DFTB ソルバは、STM(走査型トンネル顕微鏡)、STS(走査型トンネル分光法)、FM-AFM(周波数変調原子間力顕微鏡)、KPFM(ケルビンプローブフォース顕微鏡)の理論シミュレーションを行うことができるソフトウェアです。決して、STM を重視し、AFM を軽視するといった仕様にはなっていません。DFTB ソルバは、STM だけでなく、AFM をはじめ様々な理論シミュレーションが実行可能です。

今回の開発プロジェクトでは、サブリーダーの黒川准教授(京都大学・工学研究科)、分担開発者の須藤教授(東北大学・大学院理学研究科)、共に、無機材料に関する STM/STS 観察実験を主たる研究テーマとされています。このため、課題申請書を見ると、STM が重視されて、AFM に関する記述が少ないと思われたのかもしれませんが。

しかし、私たちは、東北大学原子分子材料科学高等研究機構ソフトマテリアルグループ、中嶋健准教授をはじめとして、数多くの AFM 実験ユーザーと情報交換・意見交換を行っており、AFM シミュレーションには、かなりの時間と労力を割いています。また、近年、ソフトマテリアル・バイオ関連の AFM 実験研究者の増加が著しく、SPM シミュレータのユーザーのかなりの割合を占めるようになってきています。そのため、ユーザーの皆様からのソフトウェアに関する問い合わせも、AFM 関連のものが多くなってきており、私たちはその対応に追われる傾向が続いています。このように、私たちは、AFM シミュレーション開発にも力を入れています。

本研究開発プロジェクトは、数Åオーダーの原子レベル領域での、STM および FM-AFM の両方の量子力学的理論シミュレーションの充実を目指しています。

チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

(4) 実験で主流となる多次元マッピングは出来ますか？ご説明ください。

(回答)

シミュレーションは基本的に、任意の探針位置での「探針に働く力」、「探針に流れるトンネル電流」を計算するものですから、この情報から多次元マッピングを行うことが可能です。

従って、例えば、AFM シミュレーションにおいて、試料表面からある一定の高さに探針を固定して xy 平面内をスキャンし、「探針に働く力」の二次元分布図(二次元フォースマップ)を得る。次に、探針の高さを Δz だけ変化させて、同様に二次元フォースマップを得る、といった計算を繰り返すことにより、三次元フォースマップを得ることが可能です。

STM シミュレーションにおいて、三次元トンネル電流マップを得るのも、全く同様の操作で可能です。FM-AFM(周波数変調 AFM)、KPFM(ケルビンプローブフォース顕微鏡)についても、同じことがいえます。

チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

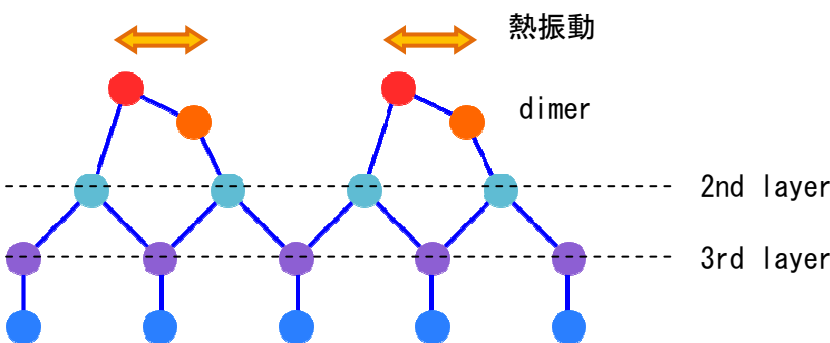
(5) 将来の実用的応用を考えた場合、室温や高温の原子分解能のSPMシミュレーションが必須となりますが可能でしょうか？ご説明ください。

(回答)

計算時間は長くなりますが、原理的に可能です。ただし、そのためのソフト開発は将来的な課題にしたいと考えています。

現段階でのDFTBソルバには、次の意味で温度パラメータが導入されています。DFTBソルバでは、絶対温度が0[K]の状況下で、電子占有確率が1の量子状態Aから、電子占有確率が0の量子状態Bへ、電子が量子論的に移動する、といった際の確率計算を行う場合があります。ところが、絶対温度が0[K]からT[K]に上昇した場合、量子状態A、Bの電子占有確率は、もはや、フェルミ分布に従って、0と1との間の値の確率に変化してしまいます。このようなフェルミ分布による温度依存性は、DFTBソルバの計算アルゴリズムに正しく取り入れられています。

しかし、SPM観察の対象となる試料表面自体の構造が温度によって変化する、といった効果は、まだ考慮されていません。このような効果の具体例としては、Si(001)面のダイマー(dimer)が知られています。



Si(001)の清浄表面では、上の図で示すように、隣接する二個のSi原子が傾いた非対称なダイマーが構成されます。温度0[K]では、これらの非対称なダイマーは二次元平面内で列を形成して安定状態となります。しかし、温度が上昇すると、この非対称なダイマーは熱振動することが知られています。そのため、温度0[K]の状況下では、上の図の、赤いSi原子、オレンジ色のSi原子それぞれの付近で観測される異なるトンネル電流の値が、温度上昇すると、それらの熱平均としての値に変化します。このような現象は、温度上昇と共に生じる試料表面の構造変化を理解していなければ、シミュレーション計算で再現することは難しいと考えられます。これは、今後の課題として残されています。

チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

(6) AFMで必要となる探針・試料間の強い原子間力相互作用による探針・試料原子の緩和は扱えますか？ご説明ください。

(回答)

これは十分可能です。すでに、これまでに開発したシミュレータで、このような効果を取り込む計算を選択することができます。

SPM シミュレータ・DFTB ソルバには、構造緩和計算オプションが用意されています。このオプションは、FM-AFM(周波数変調 AFM)、KPFM(ケルビンプローブフォース顕微鏡)の計算で有効です。構造緩和計算を実行するために、以下のパラメータを入力する必要があります。

- 構造緩和計算の繰り返し回数の最大値
- 構造が収束したと判定する際の原子一個に働く力の閾値
- 構造が収束したと判定する際の全エネルギーの変化量の閾値
- 緩和構造を探索する際の原子の位置の最大変位量
- 次の緩和構造を探索する際に考慮に入れる過去の探索結果の数

チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

(7) 数100万円程度のワークステーション用のプログラム開発は考えていますか？ご説明ください。

(回答)

本シミュレータはそのようなレベルの計算機に搭載することを目的として開発して来ました。これは実現しています。

SPM シミュレータの開発拠点である Advanced Algorithm & Systems 社、恵比寿シミュレーションセンターには、以下のワークステーションが設置されています。

ビジュアルテクノロジー社製ワークステーション、機種名：VT64 Server 9500 XQN-2Q、CPU：Intel Xeon E5540 (2 CPU, 8 core) (クロック周波数 2.53GHz×8)、メモリ：24GB、OS：Linux (Red Hat) (64bit)

上記のワークステーションは約4年前に購入した、4セットから構成されるサーバーの1セットに相当します。サーバー全体の価格は、当時で約250万円程度でした。

私たちは、上記のワークステーションを、普段から、SPM シミュレータの並列化計算で使用しています。ですから、現時点において、SPM シミュレータは、中規模程度 (CPU が8コアから24コア程度) のワークステーションでの使用に耐える性能を有しています。

チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

(8) 使用した一般的なパソコンの具体的な性能または機種は何でしょうか？ご説明ください。

(回答)

SPM シミュレータ開発におきましては、以下の二種類のコンピュータを使用しています。

1. DELL 社製パソコン、機種名：vostro220s、CPU：Intel Core2 Duo E7500 (クロック周波数 2.93GHz×2)、メモリ：2GB、OS：Windows 7 (32bit)
2. ビジュアルテクノロジー社製ワークステーション、機種名：VT64 Server 9500 XQN-2Q、CPU：Intel Xeon E5540 (2 CPU, 8 core) (クロック周波数 2.53GHz×8)、メモリ：24GB、OS：Linux (Red Hat) (64bit)

上記項目 1 の DELL 社製のパソコンは、ごく普通の家庭やオフィスで使用されているパソコンです。上記項目 2 のビジュアルテクノロジー社製ワークステーションは、比較的小型のワークステーションで、最大で 8 コアの並列計算が可能です。

私たちは、上記項目 1 の DELL 社製パソコンを大学の研究室で使用される一般的かつ標準的なパソコンと見なして、計算時間、メモリ消費等を測定し、シミュレータ性能評価を行っています。

ただし、SPM シミュレータの OpenMP 並列化性能の評価に関しては、上記項目 2 のビジュアルテクノロジー社製ワークステーションを利用しています。

上記のパソコン、ワークステーションのどちらにおきましても、プログラムのコンパイラとしては、Intel 社製の Fortran・C++コンパイラを使用しています。

チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

(9) STMやAFM実験の標準試料であるSi (111) 7x7表面のような数百個の原子の場合の計算時間はどれくらいですか？ご説明ください。

(回答)

以前、Si (001)-7x7 の STM 画像をシミュレーション計算したことがあり、その際にかかった計算時間は約 93 時間(約 4 日)でした。

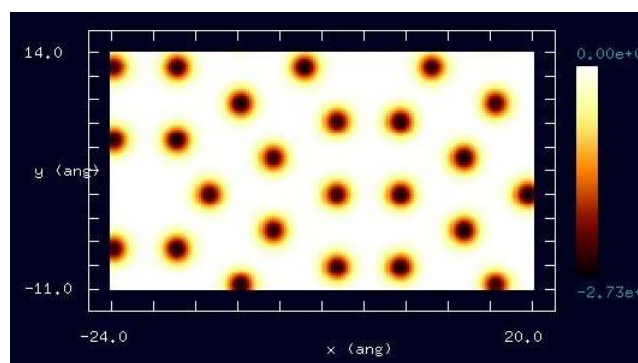
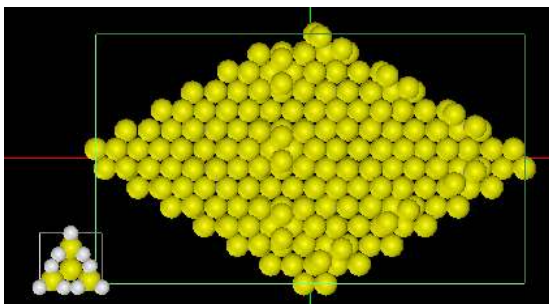
計算条件は次の通りです。Si (001)-7x7 表面の原子数は計 347 個で、シリコン探針を用いました。原子の電子状態を計算する際、k 点は 16 個取りました。ここでいう k 点とは、電子の運動量に相当し、バンド構造を計算する際、16 個にメッシュ分割して量子力学的な計算を実行したことを意味します。STM 二次元画像を得るためにトンネル電流を計算した試料表面上の点数は、 $173 \times 101 = 17473$ 個でした。

使用した計算機は、以下のものです。

ビジュアルテクノロジー社製ワークステーション、機種名：VT64 Server 9500 XQN-2Q、CPU：Intel Xeon E5540 (2 CPU, 8 core) (クロック周波数 2.53GHz×8)、メモリ：24GB、OS：Linux (Red Hat) (64bit)

実際の計算においては、並列化計算は行わず、CPU は 1 個しか使用しませんでした。ただし、メモリは数 GB 程度使用した可能性があります。このようなワークステーションの使い方は、CPU の性能、計算時間的には、通常のパソコンと同等と言えます。しかし、メモリ消費が大きく、この点に関しては標準的なパソコンでは計算不可能な可能性があります。

シミュレーション計算で得られた Si (001)-7x7 表面 STM 画像は、以下の通りとなります。



チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

(10) サブリーダーの黒川氏や分担開発者の須藤氏の役割について、ご説明ください。

(回答)

[サブリーダー：黒川修准教授(京都大学・工学研究科)の役割]

黒川准教授は、特殊合金の表面を STM(走査型トンネル顕微鏡) 観察する実験を行い、これによって得られた実験結果と、SPM シミュレータ・DFTB ソルバから得られる STM シミュレーション画像とを比較・検討する作業に取り組まれる予定です。

黒川准教授は、特殊合金の一つの例として、Mg3元合金のシンクロ型 LPSO(Synchronized Long Period Stacking Ordered) 相を研究されています。希土類元素と遷移金属を溶質原子に用いた Mg 合金は、軽量、高強度、高延性を示すことで注目を集めており、これらの性質は、合金内部に現れるシンクロ型 LPSO 相が原因であると考えられています。LPSO 相は劈開性有し、この劈開面を STM 観察する研究を、黒川准教授は続けておられます。この LPSO 相の劈開面の STM 実験画像を、SPM シミュレータ・DFTB ソルバで再現するのが、今回のプロジェクトの一つの目標です。

また、Mg3元合金に限らず、必要と考えられる様々な元素データに関して、可能な限りの物質系について、STM 像、STS(scanning tunneling spectroscopy、走査型トンネル分光法) データを取得し、シミュレーション結果と比較する考えでいます。

これらの作業により、各種金属材料の表面 STM 画像、STS 実験データと、DFTB ソルバから得られるシミュレーション計算結果を、比較・検討し、DFTB ソルバの性能の検証を行う予定です。

[分担開発者：須藤彰三教授(東北大学・大学院理学研究科)の役割]

須藤教授は、シリコン系材料表面の STM 観察実験を行い、これによって得られる実験画像と、SPM シミュレータ・DFTB ソルバによって得られる STM シミュレーション画像とを比較・検討する作業に取り組まれる予定です。

須藤教授の研究室では、シリコン結晶の様々な結晶面を STM 観察する、シリコン結晶面上に銀・プラチナなどの原子を吸着させてナノクラスター形成の様子を時系列的に STM 観察する、といった実験が行われています。これらの STM 実験画像を、SPM シミュレータ・DFTB ソルバで再現できないか、シミュレーション画像と比較・検討を行う予定です。

また、今回のプロジェクトで追加する予定のコンスタント・カレント・モード STM シミュレーション機能について、実験結果とシミュレーション結果を比較するのも、重要な目標の一つです。

チームリーダー氏名： 吾妻広夫

(質問)

(11) 開発経費の90%以上は企業の人件費であり、先端機器開発とは言い難いのではないのでしょうか？ご見解をお示してください。

(回答)

今回のプロジェクトでは、以下の3カ所で研究・開発が行われる予定です。

- Advanced Algorithm & Systems : 恵比寿シミュレーションセンター(チームリーダー：吾妻広夫)：プログラム実装担当
- 京都大学工学研究科材料工学専攻：先端材料物性学研究室(サブリーダー：黒川修准教授)：Mg 3元合金 LPSO 相 STM(走査型トンネル顕微鏡)/STS(走査型トンネル分光法) 実験担当
- 東北大学理学研究科物理学専攻：表面物理研究室(分担開発者：須藤彰三教授)：シリコン材料系 STM(走査型トンネル顕微鏡)/STS(走査型トンネル分光法) 実験担当

このうち、黒川准教授、須藤教授の研究室においては、既にそれぞれ、Mg 3元合金 LPSO 相 STM 実験、シリコン材料系 STM/STS 実験に関して、十分な研究の蓄積が有り研究設備も整っている段階です。従って、研究の遂行に際して研究費がさほどかからない状況となっています。

一方、Advanced Algorithm & Systems 社、恵比寿シミュレーションセンターでのプログラム実装作業においては、経験のあるプログラマーを4名以上、2年程度、確保しなくてはなりません。特に、原子間相互作用パラメータ・データベース構築は、量子力学に精通したプログラマーを必要とし、それだけの力量を持つスタッフを用意すること自体、簡単なことではありません。

パラメータを生成するためのツール(プログラム)群の準備、および、実際にパラメータを計算するには、ワークステーションを使った長時間の計算、試行錯誤を繰り返すための人的な労力(手間)が膨大となり、このため、どうしても、相当な費用が発生してしまいます。

以上の理由から、開発経費のかなりの部分が、人件費とならざるをえません。高度なソフトウェアの開発には、それに見合った人件費が発生するのは、不可避と考えられます。この点について、御理解下さい。