

高効率有機発光材料の開発

プロジェクト責任者

石田 雅也 住友化学株式会社 筑波研究所

著者

石田 雅也^{*1}、秋野 喜彦^{*1}、善甫 康成^{*2}、浦下 真治^{*3}、新宮 哲^{*4}、数納 広哉^{*4}、
西川 憲明^{*4}

* 1 住友化学株式会社 筑波研究所

* 2 法政大学 情報科学部

* 3 (株) シミュラティオ

* 4 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 22 年 4 月 1 日～平成 23 年 3 月 31 日

アブストラクト

有機 LED (有機 EL) 発光素子は、最近の平面型ディスプレイのなかで自発光であることから液晶に替わる表示素子として大いに期待されている。また素子構造の単純化が容易であることから大型基板への対応や製造コスト的な優位性がある。現在、超薄型テレビの試作など、一部実用化も試みられ、その材料開発が急速に進んでおり、今後市場の拡大が予想される。これら材料の開発は材料物性を比較的精度よく計算することが可能になったことによるところが大きい。特に重要なのが光の吸収・発光などのスペクトル解析である。時間依存密度汎関数法の技術の発達により、吸収・発光スペクトルを比較的高精度で効率よく求めることができるようになった。我々は基底を用いず実空間・実時間で電子状態を計算する方法を用いている。比較的少ないメッシュでの計算にも関わらず、有機分子系材料において実測と比較的良好な一致を示す結果が得られることと、精度が全時間ステップ数によるという特徴がある。最近では、高い量子効率を持つ材料の開発のため、蛍光ばかりでなく燐光も試されるようになっており、材料の多様性に対応した高度な処理が不可欠である。2005-2007 年度に地球シミュレータにて得られた成果をもとに、2008-2009 年度には、燐光材料の解析に向けてスピン-軌道相互作用を導入し、その基本的な動作検証を中心に進めるとともに、電子状態の可視化についても実施した。2010 年度は、前年度に見出されたプログラム上の課題について引続き検討し、燐光材料の最適計算条件の抽出と基本スペクトルの算出を行った。これまでの報告結果を含め、高分子 LED の開発のため我々がやっている解析結果について報告する。

キーワード： 有機 LED、高分子 LED 材料、光学スペクトル、時間依存密度汎関数法

1. はじめに

最近の IT 関連材料の技術革新は非常に早い。インターネットの普及に伴い、PC はもとより携帯電話やテレビなど、通信技術と表示装置の発達には目覚ましいものがある。それに伴い、多くの発光材料が開発されていることは、特に注目すべきである。有機 LED (有機 EL) 発光素子は、最近の平面型ディスプレイのなかで自発光であることから液晶に替わる表示素子として大いに期待されている。特に視認性、応答速度、低消費電力であることなど優れた特性がある。また素子構造の単純化が容易であることから大型基板への対応や製造コスト的な優位性がある。これらのことから、今後市場を拡大していくものと思われる。現在、厚さが数 mm の携帯電話の表示、超薄型テレビの試作など、一部実用化も試みられ、その材料開発が急速に進んでいる。

我々が注目している高分子 LED は、構造が Fig.1 に示すように、陰極と陽極の間に高分子を用いた発光層を挟んだ単純な構造をしていることから、かなり薄い表示装置として仕上げることも可能である。さらに高分子材料であることからフレキシブルディスプレイに用いることも期待されている。また、エネルギーの利用効率が高く省エネであることも大きな特徴である。

これら表示素子の開発の鍵を握るのが有機材料である。特に高分子有機材料は構造的にも電子的にも多様性があるため、目的の物性をもつ分子構造の探索では様々な組み合わせを試す必要がある。これを効率的に進めること

が開発の成否を決める。更に、将来のフレキシブルディスプレイや壁・天井などに設置する面発光照明など、生活様式を大きく変えるインパクトを潜在的に持っていると言える。

これら材料の開発においては、最近の計算技術の進歩により、材料物性を比較的精度よく計算することが可能になったことによるところが大きい。比較的良好的な精度を維持しつつ高速に計算を進めることができる密度汎関数法 (Density Functional Theory : DFT) の利用が挙げられる。この密度汎関数法は、比較的大きな分子等の解析においても実績を挙げてきており、最近の代表的な量子化学計算プログラムの中にも、この方法に関連した幾つかの手法が導入されている。特に重要なのが光の吸収・発光などのスペクトル解析であるが、時間依存密度汎関数法 (Time Dependent Density Functional Theory : TDDFT) と呼ばれる手法が注目されている^[2,3]。密度汎関数法は基底状態の理論であるため、発光に重要な励起状態を完璧に記述するものではないが、それをある程度解決するものとして期待されている手法である。光の吸収・発光スペクトルなどは、外部からの摂動に対する応答として、時間依存密度汎関数法の技術の発達により効率よく求めることができるようになった。

我々は基底を用いず実空間・実時間で電子状態を計算する方法を用いており、比較的少ないメッシュでの計算にも関わらず、有機分子系材料において実測と比較的良好的な一致を示す結果が得られることと、精度が全時間ステップ数によるという特徴がある。また実空間の解析であることから、並列化が比較的容易であり、地球シミュレータのような大型並列計算機に適した手法と言える。また、我々が扱う高分子のモデル化に関しては、単分子モデルを用いて、電子状態が高分子とみなせる程度の長さを用いればよいことが分かっている。もちろん、その解析が実現可能な環境がなければならないが、

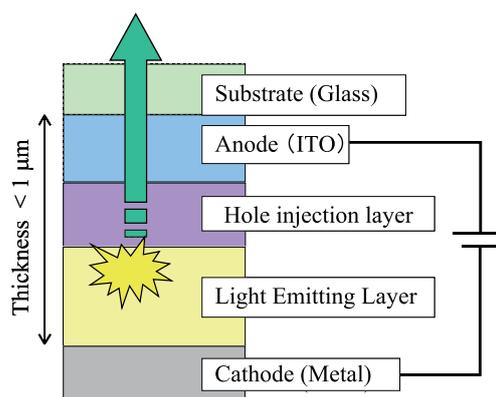


Fig.1 高分子 LED の構造

地球シミュレータ上での大規模シミュレーションを用いる事で実現可能となった。地球シミュレータの利用を通じて、2005-2007年度は、有限温度での発光スペクトル解析手法の考案、発光部周辺の電子状態の解析および発光強度に関する解析が可能となった。2008-2009年度には、燐光材料の解析に向けてスピン-軌道相互作用を導入し、その基本的な動作検証を中心に進めるとともに、電子状態の可視化も実施した。2010年度は、前年度に見出されたプログラム上の課題について引続き検討し、燐光材料の最適計算条件の抽出と基本スペクトルの算出を行った。これまでの報告結果を含め、高分子LEDの開発のため我々が行った解析結果について報告する。

2. 光学特性の算出

材料解析には密度汎関数法が用いられていることが多いが、この理論は基底状態に基づいているため励起状態を記述するには不十分である。そこで、電子状態を時間依存させることにより励起状態を表す時間依存密度汎関数法 (TDDFT) を用いる^[2]。この手法は、ポテンシャル部分が時間に依存する場合、例えば時間によって変動する動的な電場や磁場中での電子の振舞いや断熱近似が成り立たないような化学反応を扱う場合などに利用される。これらの現象解析においては、励起状態を扱う必要があるが、これまでの計算例などから経験的に、このような励起状態を TDDFT は良く記述できていることが分かっている。

我々がこの TDDFT を利用するために用いたのは、基底を用いず実空間・実時間を用いる解析手法である^[3]。これはプログラムが簡便になることと直感的に理解できるという利点があるからである。また、実時間を用いているため、計算する全時間ステップがそのまま精度につながる。もちろん計算には多くの計算資源を必要とするが、これは最近の計算機の進歩に合致した方法といえる^[4]。

実際の計算では、用いる実空間を等間隔のメッシュに細分し、各メッシュにおける波動関数を直接に扱う。従って、全空間メッシュ数が、計算精度に直結する。このプロジェクトでの計算では、等間隔メッシュ $4x \sim 0.3 \text{ \AA}$ 程度を用いた。このメッシュサイズにより、炭化水素系の全エネルギーにおいては $\sim 0.1\text{eV}$ の精度が得られる。吸収発光スペクトルの解析は、この最適化された電子状態に外部から摂動を加え、それに伴う波動関数の時間発展を追跡する。時間依存の双極子モーメント $\mu(t)$ をフーリエ変換することにより動的な分極率 $\alpha(\omega)$ を求め、光学的な応答として強度関数 $S(\omega)$ を求める。

解析の典型的な例として、青色の高分子 LED 材料として良く知られている 9,9-ジアルキル-フルオレンについて TDDFT を用い吸収・発光スペクトルを求めた結果を Fig.2 に示す。得られたスペクトル形状およびピーク位置を実験結果と比較してみると、非常によく一致していることが分かる。特に吸収ピークについては 390nm 付近のピーク波長が実験と計算でほぼ一致しており TDDFT による計算の効果が得られているものと思われる。一方、実験では発光スペクトルに 450nm 付近にサブピークを持っており、この計算では現れていないが、420nm 付近の主ピークでは計算および実測ともほぼ一致していることがわかる^[5,6]。

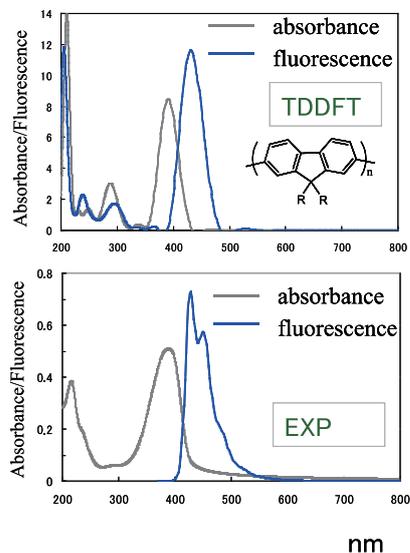


Fig.2 フルオレンでの光学特性の計算値 (上) と実験値 (下)

3. 実時間実空間解析の特徴と ES での効果

実時間実空間の TDDFT 解析では、まずセルフコンシステントな電子状態を求め、続いて双極子モーメントの時間変化を求めるための時間発展を行う。我々は、並列計算を MPI およびノード内でのマルチタスクを用いて実行するように最適化を行った。時間発展部は電子状態計算部で得られた基底状態について外部刺激を与え、その応答を双極子モーメントの変化として時間発展させるものである。また、実空間解析であることから並列化が容易であることも特徴としてあげられる。上述の典型的な青色高分子材料の解析に用いる分子サイズとしてフルオレン 6 量体を用いて、電子状態計算 (RS) および時間発展 (RT) での速度実測を行った結果、旧 ES 243 ノードの場合、RS にてベクトル化率 99.07%、並列化率 99.98%、7.89 TFLOPS、RT にてベクトル化率 99.27%、並列化率 99.99%、7.70 TFLOPS の処理速度が得られた。

この処理速度であれば、上記最適化及び並列化により、 $\sim 0.1 \text{ \AA}$ メッシュサイズでの計算を実施することが可能である。これにより、従来用いていた 0.3 \AA のメッシュサイズと比較して、炭化水素系において、発光スペクトルの精度がこれまでの精度 $O(10^{-1} \text{ eV})$ よりも向上し、スペクトルの予測性を高めることが可能となった。

なお ES2 では、フルオレン 4 量体を用いた RT 計算の 1 ノード速度実績として、ベクトル化率 98%、6GFLOPS であり、チューニングにより約 6 倍の高速化を得た。

4. 熱運動を考慮した発光スペクトル解析

高分子 LED 材料として典型的な青色材料であるアミンを共重合したフルオレンについて、系統的なスペクトル解析を行った。ホールを供給する役割を果たすアミン周辺の構造が発光吸収スペクトルを求めるために重要である。そこでアミン発光部周辺での構造とスペクトルの関係について、特に有限温度での発光スペクトルを解析した。我々が行った解析の手順は以下の通りである。

- フルオレン-アミンの単分子モデルでの励起状態での最適化構造を求める。
- フルオレン-アミン間の Fig.3 に示した二面角を回転させ、各角度位置でのスペクトルを求める。
- 各角度位置での全エネルギーを求め、最安定点を基準とし室温でのボルツマン分布をもとに各角度位置のスペクトルに重みを付けて加える。

以上の手順を異なるアミンについて適用した結果、得られた発光スペクトル特性は、実験結果と辻褃が合う結果であった。スペクトルおよび強度とも十分に予測に使えるものと判断できる。Fig.3は、9,9-ジプロピル-フルオレンとトリフェニルアミン (TPA) 共重合体について、二面角を変え最安定点を基準にとり全エネルギーを計算したものである。励起状態の安定構造である 0° 付近では、波動関数の共役が非局在化し、発光強度は強くなる。一方、隣接するベンゼン環が垂直になる 90° 付近ではエネルギー障壁が高く、ピークは短波長化するが有限温度でのスペクトルへの寄与は少なくな

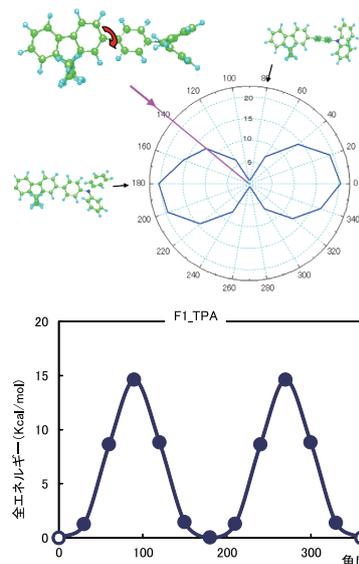


Fig.3 9,9-ジプロピル-フルオレンとトリフェニルアミンの二面角と発光強度 (上)と回転障壁 (下)。励起状態では 0° 付近 (○) が安定構造である。

る。アミンについては、上記TPAの他、フェニレンジアミン（PDA）について、スペクトルを同様に計算しフルオレン単体のスペクトルと比較した（Fig.4参照）。アミン構造と電子状態の関連については今後詳細に検討を進める必要があるが、アミンの違いによるスペクトルの違いが明確に分かる。

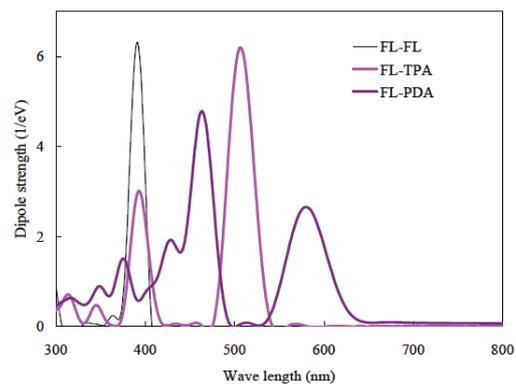


Fig. 4 アミン構造によるスペクトルの違い

5. アミン周辺の電子状態

前述したように、発光にはアミン周辺の電子状態が極めて重要である。フルオレン、及びフルオレンーアミンから構成される化合物における状態密度を表したものが Fig.6 である。特に高分子としての特徴が現れるよう分子鎖をフルオレン相当の長さとして 21 量体分をとることとした。フルオレン分子鎖の中央部分を代表的なアミンである TPA、TPD、PDA と置き換え、電子状態を比較した。伝導帯付近の状態は、いずれの場合においても大きな差は無い。一方、価電子帯付近では、アミンによる状態がバンドギャップ内に見られる。またアミン種により異なる様子が確認できる。アミンの存在により p 型となることが知られているが、解析結果も同様である。これらアミンに関連する状態は Fig.5 に示すようにアミン近傍に局在していることがわかる。

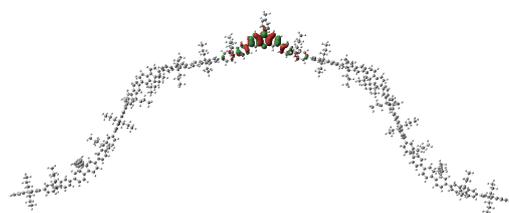


Fig.5 分子全体の構造と局在状態の分子軌道 (FL₁₀ - PDA - FL₁₀)

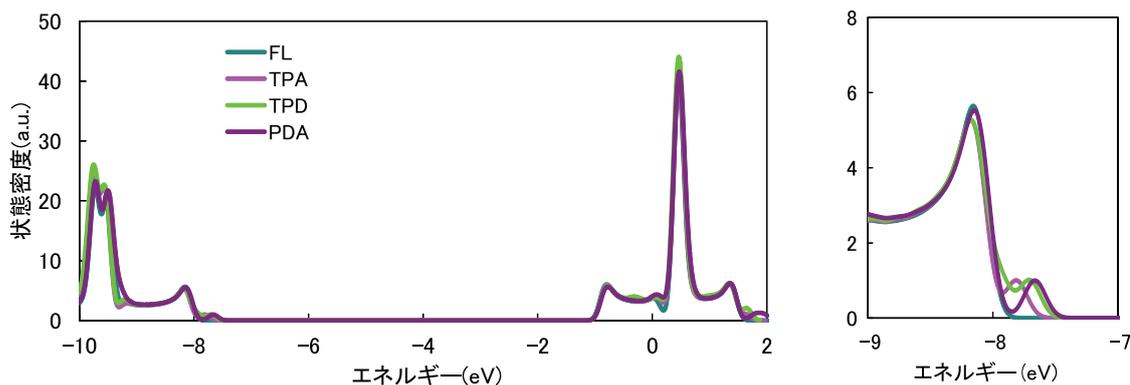


Fig.6 アミンの違いによる状態密度の変化（右は価電子帯付近を拡大）

これらの結果は、計算する系をかなり大きくすることにより確認される結果であり、数量体の小さい系の解析のみでは判断しにくい。高分子の有限鎖長モデルによる計算ではあるが、半導体としての解析が十分に行える結果であり、今後の材料設計においては、このような大規模計算が重要な手段となると思われる。

しかし課題も残る。高分子鎖として十分な長さを確保しなければ、発光強度について測定を反映する結果が得られないということである。フルオレンの量数を少々短めな $n=7$ (FL_n-アミン-FL_n) として発光強度を調べたものが Fig.7 である。FL₁₅ の結果と FL₇-PDA-FL₇ の結果を比較するとスペクトルに顕著な差が現れない。これは、このモデルではほぼ主鎖に分布する軌道として差が無いためである。今後、これらの結果を踏まえ、高分子鎖として十分な長さを確保し、また特に遷移に関わる軌道の重なりに注目し、材料設計に生かす予定である。

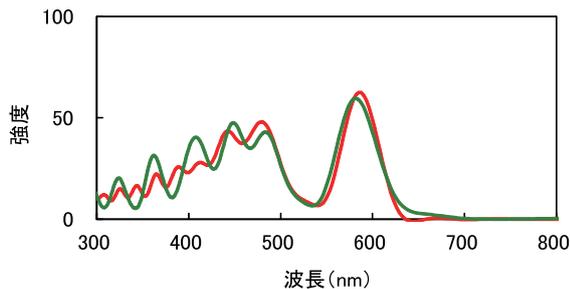


Fig.7 FL₇-PDA-FL₇ (緑) および FL₁₅ によるスペクトル (赤)

TDDFT 解析を行うことにより、分子構造から、発光材料として特に重要な発光スペクトルという光学特性を予測することが可能である。有限温度でのスペクトルが予測可能になり、さらに大規模系にて詳細な電子状態解析をすることによる発光部周辺の状態密度に関する知見が得られるようになった。必要な光学特性に合わせ、分子構造を変えることによる設計も可能になるものと思われる。

6. スピン-軌道相互作用

発光効率を上げるために最近注目されているのが、燐光材料の活用である。燐光材料の発光はいわゆる三重項発光であり、発光効率が高いといわれている。Fig. 8 に代表的な燐光材料である Ir(ppy)₃ (ppy : 2-phenylpyridinate) を示す。Ir を中心金属にもつ錯体であり、発光は緑色である。このような燐光材料の発光は、励起状態の三重項から基底状態の一重項への遷移 ($T_1 - S_0$) が中心である。この遷移はスピン禁制であるため、実際には重原子効果のある錯体がいられスピン禁制を弱めている。従って理論的にもスピン軌道相互作用を考慮したプログラムが必要になる。

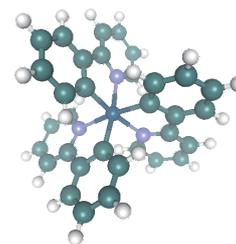


Fig.8 Ir(ppy)₃ の分子構造

これに関して、2008 年度には、燐光材料の解析も可能にするようプログラムの改良に着手した。改良点としては、スピンの↑および↓に対応した擬ポテンシャルに相対論的効果を取り入れ、スピン-軌道相互作用を導入した。またこれに基づいて、三重項状態での時間発展を行いスペクトルが求められるように、プログラムの基本部分を作成した。Fig.9 は Ir(ppy)₃ について試験的に計算の条件を変えて行った吸収スペクトルのシミュレーション結果で、スピン-軌道相互作用を入れないもの (青) と、スピン-軌道相互作用を考慮したもの (紫) を比較してある。試験的な計算であるため空間メッシュが粗

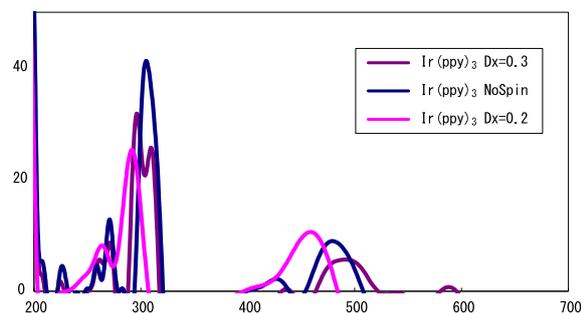


Fig.9 Ir(ppy)₃ について試験的な計算結果。スピンを考慮した場合とそうでない場合の $\Delta x=0.3 \text{ \AA}$ でのスペクトル (紫および青)。空間メッシュを $\Delta x=0.2 \text{ \AA}$ としスピンを考慮した場合のスペクトル (ピンク)。

く $\Delta x = 0.3 \text{ \AA}$ で行った。確認のため $\Delta x = 0.2 \text{ \AA}$ とした場合の結果（ピンク）の結果も同時に載せてあるが、明らかにスペクトルの形状が変わっており、メッシュサイズなどの最適化を行う必要がある。

2009年度は、2008年度に実施した試験的な動作検証を継続し、空間メッシュや時間発展のステップ幅などの計算条件に関する検討を試みた。その結果、空間メッシュを0.1まで小さくしても振動の平衡点がずれているような双極子の振動分布が見

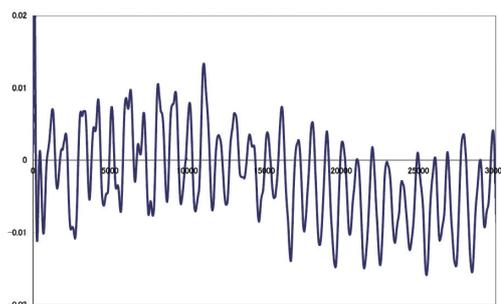


Fig.10 Ir(pppy)₃における双極子の振動分布

られた (Fig.10)。そのため、フーリエ変換後のスペクトルが、正しく記述できていない可能性が考えられた。その原因の一つとして、空間メッシュに対して時間発展のステップ幅が大きいため、時間発展の計算において計算誤差が無視できなくなっていることを考え、時間発展のステップ幅を従来の1/2程度に小さくしてみた。しかしながら、結果が大きく改善されるまでには至っていない。時間ステップ幅を小さくしたことで、計算時間は2倍程度多くかかるため、十分な確認はできていないが、時間発展の計算をより安定に行うためのアルゴリズム改良も必要であると思われた。

2010年度は、前年度の課題を踏まえて、時間発展計算における双極子の振動中心がゼロからずれる問題について検討した。この問題は、エチレン分子でも同様に認められたため、計算時間短縮のため動作検証をエチレン分子で実施した。本計算手法では、時間発展計算の前に、分子の電子状態を求めておく必要がある。そこで、電子状態計算の反復回数によって、時間発展計算の双極子振動の平均値がどのように変化するかを調べてみた。その結果、電子状態計算における反復回数が少

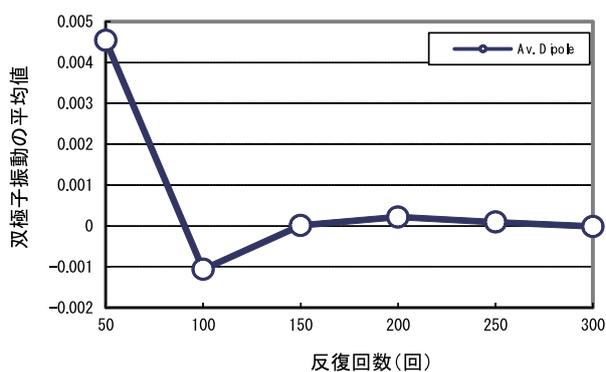


Fig.11 エチレン分子の電子状態計算の反復回数に対する双極子振動の平均値

ないと、時間発展計算の双極子振動の平均値がゼロにならず、振動の平衡点がずれてくることがわかった (Fig.11)。この結果から、反復回数が50～100回では電子状態計算の収束残差が $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 程度に留まり、安定な時間発展計算のためには、少なくとも収束残差として 10^{-12} 以下まで十分に収束させておく必要があることがわかった。

以上の結果をもとに Fig.10 の Ir(pppy)₃ の計算結果を見直したところ、収束残差が 10^{-10} 程度になっており、その後の時間発展計算のためには収束が不十分と考えられた。これは、電子状態計算部分の収束判定が反復回数で打ち切られていたことに起因するため、収束残差 10^{-15} を収束判定とするようにプログラムを修正した。

修正後のプログラムを用いて、Ir(pppy)₃ の電子状態計算を収束残差 10^{-15} まで収束させた後、再度、時間発展計算を試みた。その結果、双極子の振動中心がゼロからずれていないことを確認した (Fig.12)。また、これをフーリエ変換して得られた吸収スペクトルを Fig.13 に示す。Ir(pppy)₃ の薄膜実測スペクトル^[8]と比較すると、計算で求めたスペクトルは全体的なスペクトル形状を比較的良好に再現する結果

を得た。なお、計算条件についても検討し、空間メッシュを $\Delta x = 0.3 \text{ \AA}$ 、時間刻み幅は $\Delta t = 0.008 \text{ a.u.}$ 以下であれば、錯体系でも時間発展計算が発散しないことを確認している。

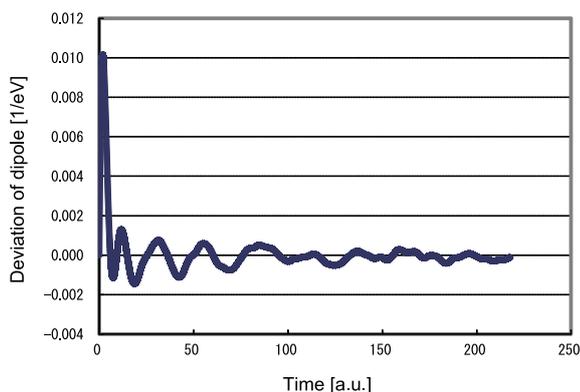


Fig.12 Ir(ppy)₃ の時間発展計算における双極子振動

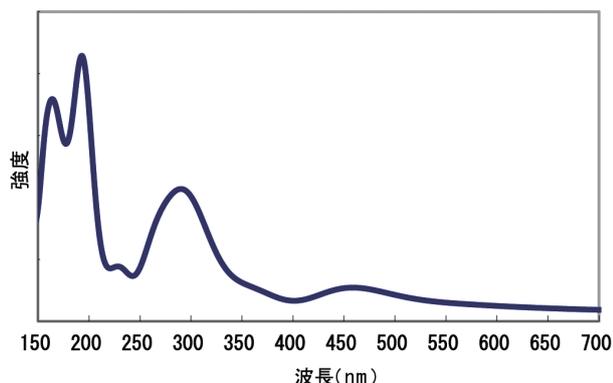


Fig.13 Ir(ppy)₃ の時間発展計算による吸収スペクトル

ここまでの検討において、計算による Ir(ppy)₃ の基本スペクトルが得られた。しかしながら、スピン軌道相互作用の有無による Ir(ppy)₃ の吸収スペクトルの違いを調べたところ、両者のスペクトルはほとんど一致し違いが見えないことが判明した。錯体分子の光吸収では、数多くの密集した励起状態が存在するため、スピン軌道相互作用の効果が明確に現れない可能性も考えられるが、一方で、本プログラムのスピン軌道相互作用部分について再度検証する必要があると考えられる。そこで、Xe 原子の計算による検証を行った。

Xe 原子では、スピン軌道相互作用により 5p 軌道が $5p_{1/2}$, $5p_{3/2}$ の準位に分裂し、その分裂幅は $9621 \text{ cm}^{-1} \simeq 1.2 \text{ eV}$ であることが原子スペクトルの実験からわかっている^[9]。Xe 原子の相対論的全電子計算からは、5p 軌道の分裂幅は 1.27 eV で実測とよく一致しているが、一方、本プログラムで計算した Xe 原子の 5p 軌道の分裂幅は $\sim 0.1 \text{ eV}$ と 1/10 程度であった。このことが、錯体系のスペクトルで違いが見えなかったことに関係しているものと考えられる。しかし現在のところ、この原因については未解決であり、今後の課題として残っている。

7. 電子状態の可視化

本手法ではスペクトル解析を行うだけでなく、時間ステップごとの電子密度分布や軌道の波動関数を可視化することで、それら電子状態の時間発展の様子を調べることができる。2009 年度の検討では、指定した時間ステップごとに電子密度や波動関数のメッシュデータを保存し、可視化を行った。Fig.14 は、Ir(ppy)₃ における HOMO の波動関数の二乗成分の時間発展を可視化した結果である。図は、それぞれ時間ステップ 1200, 2000 における波動関数の二乗分布であり、時間とともにその分布が変化の様子がわ

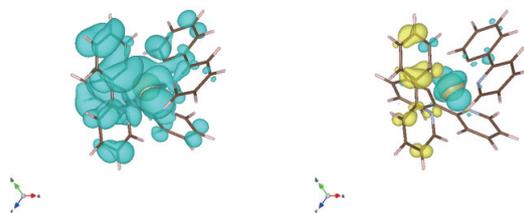


Fig.14 Ir(ppy)₃ における HOMO の波動関数の二乗成分を可視化した結果。それぞれ時間ステップ 1200 (左)、2000 (右) での描画。時間発展により、電子状態の振動の様子がわかる。

かる。このような電子状態の時間発展の様子を観察することで、励起された電子の挙動に関する理解をより深めることができると期待される。なお、可視化に際しては、メッシュデータを量子化学計算プログラム Gaussian の cube ファイル形式で保存し、可視化ソフト VESTA^[7] を用いて描画を行った。可視化データの空間メッシュ総数は～788 万点で、時間発展のヒストリデータ保存には～2TB 程度のディスク容量が必要であり、1 コマあたりの cube 形式ファイルのサイズはテキストデータで約 103MB であった。

8. まとめ

2010 年度は、燐光材料の解析に向けてスピン軌道相互作用を導入したプログラムについて、前年度に見出された課題解決のために基礎的な動作検証を継続して実施した。その結果、プログラム上のいくつかの不具合を解決し、Ir 錯体系の基本スペクトルを得ることができた。しかしながら、スピン軌道相互作用の計算部分については、依然として未解決の課題が存在していることも判明した。今後、この課題解決に向けた取組みが必要である。

これまでの報告結果^[1]を含め、高分子 LED の開発のため我々が行っている解析結果について報告した。TDDFT の利点は次の通りである。まず、励起状態をある程度記述することができるため、発光材料の解析に最適であり、次に特徴として比較的少ないメッシュでの計算にも関わらず、有機分子系材料において実測と比較的良好な一致を示す結果が得られることと、さらに精度がステップ数によるため必要な精度に合わせ必要なだけ求めることができる点があげられる。また、一度の計算により任意のエネルギー領域における吸収・発光スペクトルや誘電関数を算出することが出来るので、更に都合がよい。得られた計算結果の可視化作業を含めると、十分な計算資源があることが前提であり、地球シミュレータの利用はまさに最適である。スピン軌道相互作用の取り扱いについては、更なる改良を要するが、これまでの成果を有効に活用し、今後の材料開発をはかる予定である。

参考文献

- 1) 平成 17 年度先端大型研究施設戦略活用プログラム成果報告書、地球シミュレータ戦略活用プログラム P.11, (2006)、平成 18 年度先端大型研究施設戦略活用プログラム成果報告書、地球シミュレータ戦略活用プログラム P.9, (2007)、平成 19 年度先端大型研究施設戦略活用プログラム成果報告書、地球シミュレータ戦略活用プログラム P.43, (2008)、平成 20 年度先端大型研究施設戦略活用プログラム成果報告書、地球シミュレータ戦略活用プログラム P.75,(2009) および平成 21 年度先端大型研究施設戦略活用プログラム成果報告書、地球シミュレータ戦略活用プログラム P29,(2010)
- 2) E. Runge and E. K. U. Gross, Phys. Rev. Lett. 52, 997(1984)
- 3) K. Yabana and G. F. Bertsch, Phys. Rev. **B54**, 4484(1996)
- 4) J. Chelikowsky, N. Troullier, K. Wu, and Y. Saad, Phys. Rev. **B50**, 11355(1994)
- 5) N. Akino and Y. Zempo, MRS Proceedings **846**, DD2.3(2005)
- 6) A. W. Grice, D. D. C. Bradley, M. T. Bernius, M. Inbasekaran, E. P. Woo and W. W. Wu, Appl. Phys. Lett. **75**, 3270(1990)
- 7) http://www.geocities.jp/kmo_mma/crystal/jp/vesta.html
- 8) W. Holzer, A. Penzkofer and T. Tsuboi, Chem. Phys. **308**, 93 (2005)

9) H.E.White “Introduction to Atomic Spectra” p.275 (1934) McGRAW-HILL

外部発表等

講演等、 スーパーコンピューティング技術産業応用協議会主催 HPC スクール
「産業界でのナノシミュレーション」(2011年3月10日)