

200～400 MeV 領域での陽子入射原子核反応の研究

九州大学大学院工学研究院

魚住 裕介

uozumi@nucl.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

今回、研究紹介の機会を頂戴しましたので、今まで取り組んできたことを簡単に整理して、理解できた内容を解説したいと思います。

原子核反応理論は研究室に新しく入ってくる 4 年生にとっては敷居が高く、修士を出る頃までに基本的な理解ができれば良としてきました。その大きな理由は、入門的教科書が見当たらない点にあると感じます。直接反応である(d,p)反応についての説明が良い例です。現在の教科書では、現象の表層的な紹介から始まり、その後核構造との関係、DWBA 等の説明へと続きます。しかし、多くの学生にとって疑問なのは例えば、なぜ入射 d と放出 p のエネルギーがほぼ同じになり得るのかという点です。古典的なイメージを当てはめようとします。教科書を書く先生方にとってこの点は重要ではなく、その説明は見当たりません。この理解のためのヒントとなるのは量子力学の初期に学ぶトンネル効果ですが、ヒントとして応用できるほどトンネル効果の本質を理解していない場合が多いようです。核内カスケード模型 (INC) は、量子力学で記述すべき原子核反応を古典的に記述するものです。INC の研究では、反応がどの様に起こるかをイメージして、そこに働く量子効果を古典論で表現する工夫が必要です。例えば、上記(d,p)反応を如何に INC で記述するか。これは学生にとっていい演習課題です。原子核反応理論の学習の導入部分で全体的なイメージを掴むことができれば、学習の助けが出来るのではないかと感じます。

以上の理由から本稿は、4 年生用参考書の導入部分の補足という観点も交えて執筆してみますのでご理解ください（書き終わって読み直すと、補足になっているか疑問を感じる面もありますが）。参考文献は省略させて下さい。今日はwebで簡単に調べられますし、直接私に聞いて頂くことも可能ですので。

以下では、連続スペクトルを説明する理論の中、私の研究に関連して特に重要と感じ

るものについて歴史的な背景や相互の関係などを中心に簡単に紹介します。次に、現在も並行して進めているシンチレータ検出器の研究を紹介します。

2. 核反応多段階過程の理論

私は表記の研究課題を九大着任以来続けて来て、勤続 20 年となりました。私が着任した 1990 年頃は、大阪大学核物理センター RCNP においてリングサイクロトロンが稼働を始めようとしていた時期でした。着任直後に教授から NaI(Tl)シンチレータを渡され、これを使った実験テーマを考えろと言われました。私にとっては全く新しい分野でしたので論文を集め、多くの研究者と相談して、 $(p,p'x)$ 反応断面積の測定をすることに決めました。その頃は南アフリカで 200 MeV サイクロトロンを使った $(p,p'x)$ 測定の論文が多数出始めていた時期でしたので、同様の研究を 400 MeV でやってみようという理由でした。南アは主に FKK 理論で解析していましたが、違うアプローチを考える事にしているいろいろ勉強しました。

1980 年代から 1990 年台前半は、複合核反応を説明する平衡過程理論に対応する形で発達した前平衡過程理論から、その量子力学版とされる FKK へと重心が移行した時代だったように感じます。その背景には実験データのエネルギーが高くなったことや計算機環境が向上した面もあったのでしょう。FKK は 1 次 DWBA をフォールディングした格好や状態密度の取扱い等が理解できませんでしたし、相互作用が標的核質量数に依存する事にも疑問を感じました。私は量子力学的理論と呼ばれるものの中では SCDW に注目していました。これは直接反応理論の牽引者である河合光路さんが提案したものです。同じ日本人、同じ九大の先生による理論なので最良したい気持ちも当然ありますが、多くのことを学べる理論です。余談になりますが、前平衡理論で前平衡過程と呼ぶところが、量子力学的理論では多段階直接反応過程と呼びます。また、INC 等の高エネルギー核反応モデルではカスケード過程等と呼びます。いずれの言葉を使ってもいいですし、論文でも混在している場合が見られますが、例えば INC を使って核反応を議論するときに前平衡と呼ぶのは出来るだけ避けるべきでしょう。

高エネルギー核反応モデルとしては現在、INC や QMD が広く知られています。これらはシミュレーションであり、大きな自由度が取り扱えるという利点があります。低エネルギー側からエネルギーを上げて行った前平衡理論や量子力学的理論は、量子効果を如何に取り入れるかに重点が置かれたのだと推測されます。原子核反応は量子力学によって取り扱うものです。ところが、核データが対象とするような連続スペクトルを量子力学で計算することはほとんど不可能です。これは残留核に多くの状態が混じるためですが、低エネルギー理論はこの影響は小さくないと考え、理論毎に特徴あるアプローチをとっています。高エネルギーモデルでは、核内 NN 衝突が大きなエネルギー移行を伴うため、核構造の影響が小さく古典的に取り扱えると考えます。粒子伝播の取扱でも、高

エネルギーモデルと低エネルギーモデルとでは違う考え方になっています。低エネルギーモデルではポテンシャルに因る屈折や回折が無視できないと考え、歪曲波の効果を取り入れています。一方、高エネルギーモデルは伝播を古典的に取り扱い、その代わり中間子等の自由度や核のダイナミクスを取り入れるという発想に基づいています。

高エネルギーモデルでは、1990 年頃は INC に代わって BUU モデルが主流となっており、様々な実験データの分析に使われていました。私もドイツの BUU グループと一緒に仕事をする機会に恵まれ、色々と勉強させて頂きました。数百 MeV の重イオン衝突では、原子核の形状や密度が大きく変化すると考えられます。低エネルギーの理論ではそのような取り扱いは出来ません。動的理論である TDHF では可能ですが、高エネルギー状態を記述出来ません。BUU はボルツマン方程式の発展形として提案されたように記憶しています(?)。実際、TDHF の近似としてブラソフ方程式が導出されます。衝突項は TDHF からは導けませんが、波動関数の部分を古典的分布関数で置き換えたことにより、高エネルギー状態を記述できるようにして BUU を導いたと解釈することが出来ます。

QMD は BUU を多体系へ拡張したモデルとして提唱されました。高励起状態の温度の目安として複合粒子放出率が利用されるので、QMD への期待は大きかったでしょう。BUU ではテスト粒子により分布関数を求めますがこの際、分布を滑らかにするため粒子にガウス分布を持たせる場合があります。これが QMD でのガウス波束のアイデアに発展して行ったのかもしれませんが(?)。70 年代後半頃には CMD (=Classical Molecular Dynamics) が検討されていました。論文では CMD ではなく、Equation of motion と呼ばれており、厳密な古典的運動方程式です。核子間ポテンシャルを調節して NN 断面積を再現するように選ぶと、原子核基底状態の形や大きさ、核内核子運動量分布を再現できます。これらは基底状態の最も基本的な量なので、古典論と量子論とが対応すると言えるのかもしれませんが。CMD の計算結果は 300~400 MeV (p,p'x)反応の実験データと概ね一致します。ただし、パウリ禁則を含まないため、前方の高エネルギー部分は大きく過大評価します。CMD は厳密な理論で、近似的に量子効果を取り込む隙間がありません。QMD は、CMD にパウリ禁則を持ち込むように拡張したものとも解釈できます。

1995 年頃、仁井田浩二さんが QMD コードを作って公開して下さったので直ぐにそれを頂いて、INC、BUU、CMD と比較・分析して少しずつ理解を深めていくことが出来ました。RCNP の最初の 400 MeV (p,p'x)反応データは QMD と比較しました。多くのデータを再現できましたが、QMD のパラメータは最適化が未だ十分出来ていなかったようで、実験値との一致が悪い場合があります。このとき、標的原子核基底状態の半径や密度分布を調べると、標準的な値からずれていました。ハミルトニアンを修正して、標準の原子核基底状態に近づけてやると(p,p'x)反応の結果を改善できました。この内容は 2005 年の Physical Review C で発表しました。

QMD や CMD の基底状態においても、核内核子の運動を相関関数により調査すると、

無相関的であることが分かります。要するに、平均一体場中の独立粒子運動という描像が成り立っています。QMD ではガウス波束を導入して多数回計算を繰り返すことにより、様々な状態の重ね合わせを再現するとしています。これは核反応に限った話です。CMD も QMD も、基底状態波動関数の主要成分が再現出来ているので、 $(p,p'x)$ 反応の計算では大きな問題となりません。

以上のことから、400 MeV $(p,p'x)$ 反応では、反応を記述する波動関数の主成分の寄与が支配的であるため、パウリ禁則以外の量子効果は大きな影響を持たず古典的な取扱いがかなり良い近似になると結論してもいいと思います。上で述べたように QMD や CMD の基底状態では独立粒子描像が成り立つため、INC や BUU の基底状態との違いは無いと考えられます。従って、INC と BUU、QMD では、 $(p,p'x)$ 反応の計算に限ると同じ結果になるはずです。実際の計算では多少違う結果になりますが、本質的な違いではないという事です。

$(p,p'x)$ 反応の計算精度を改善するには、高次成分の効果を新たに取り入れる必要があると分かります。ポテンシャルも計算結果に影響しますが、これについても次節で議論します。

3. INC に関する研究

INC に関する論文は 2000 年を過ぎてから多く発表されるようになってきました。ADS 研究が活発になった事や、PHITS 等輸送計算コードが活躍するようになった事などが理由だと思います。ここでは、INC に新たな量子効果を加えて、 $(p,p'x)$ 反応等の予測精度を上げる研究について述べます。前節で議論したように、INC と BUU、QMD は $(p,p'x)$ 反応に限ると本質的な違いはありません。QMD と BUU は多体系を時間発展させるために運動方程式に縛られるので、高次効果を新しく加えるのは簡単ではありません。一方、INC は完全なシミュレーションであり、容易に改良ができます。

400 MeV 領域 $(p,p'x)$ 反応は、INC の研究に大きなメリットがあります。例えば INC は、2 体の hard collision を仮定しますが、これに対応する連続スペクトルの幅が 400 MeV の反応では大きな割合を占めるため、実験データとの比較が容易です。また、中間子の寄与が無視できるので、小さい自由度の中で議論ができます。さらに INC は、核子の直線的な軌道を仮定しますが、200~400 MeV は光学ポテンシャル実部がゼロに近い領域です。

INC を改善するときには注意が必要です。INC は多くの仮定等を含んでいるため、それらの中のどれを見直すか判断が難しいと思います。例えば、NN 断面積やその角分布を少し変えてもいいでしょう。軽核が標的の場合、断面積はかなり小さくなってしまいます。ここで所謂 1 step 過程は高エネルギー部分が再現するため問題ありませんが、2 step、3 step はその回数が極端に少なくなっており、ここに原因があると予想されます。NN 断面積を思い切って 2 割から 3 割大きくする（勿論変え過ぎです）と結果は大変良くなり

ます。しかし、重核の結果は大きく過大評価します。目の前のデータを再現する事だけ考えると危険です。多くのデータ、標的核やエネルギーなども考慮すべきです。さらには $(p,p'x)$ 反応だけでなく (p,nx) 反応、 (p,dx) 反応、 $(p,\alpha x)$ 反応、さらには $(d,d'x)$ 反応など多くの反応を統一的に再現できる方法を採用すべきです。

‘統一的に’という要請は、物理的な根拠が明確な方法により満たされるはずですが。高次効果としてまず、クラスター生成を記述出来るようにするため、核子相関を取り入れます。上に述べてきた観点から、基底状態の取扱いが重要な意味を持つ可能性があります。相関以外にも注意すべき点がありますが、まだ十分に検討していないため省略します。その次に直線的軌道の修正をしたいと思います。これは INC の低エネルギー化において取扱うので、本節の後半で言及します。

池田ダイアグラムは、基底状態を記述する殻模型構造とクラスター構造を持つ励起状態とが共存することを示唆します。原子核理論の人が言う基底状態は一般に、最低エネルギー状態を指すので注意が必要です。‘現実の’基底状態は、最低エネルギー状態に所謂励起状態が混じって存在しています。典型例は BCS 状態であり、魔法数など閉軌道の崩れの要因となります。クラスター構造は、平均場が十分に形成されない軽核において議論される場合が多いのですが、これは重い原子核にクラスター構造が現れないという意味ではありません。重い原子核の基底状態は殻模型の典型として説明されますが、 α 崩壊では‘現実の’基底状態に含まれるクラスター励起状態が関与します。

前節の理論の中で最も厳密に基底状態を与えるのは TDHF です。スレータ行列式により最低エネルギー状態を与えます。AMD も同様ですが、これは TDHF の近似であり、しかも核子の一粒子波動関数をガウス型に固定するため良い近似とは言えないと考えられました。これに対して堀内昶さんの 96 年頃の解説の中では、TDHF のような平均場理論とは違って AMD では反応において現れる異なるチャンネルの重ね合わせを表現する目的で計算を多数回繰り返すため、波束をガウス型に固定する方が良いと主張していました。しかし、その後の AMD ではガウス型に固定しない方法を研究しています。固定した場合の結果と、固定しない場合とが同じであったか否かは興味ある所ですが、計算方法にも因るでしょう。話は逸れましたが、基底状態はいずれも最低状態しか取っていない事がここで指摘したい点です。他の理論も全て平均場中の単一粒子運動になります。QMD は多粒子相関の理論には違いありませんが、その相関は弱くて一体ポテンシャルを作る効果しかありません。上では相関が無いと言いましたが、これと矛盾するものではありません。

AMD では多数回の計算によって波動関数の計算に現れる多くのチャンネルを確率的に求めるとしていますが、この点に一つ落とし穴があります。量子効果の中でも重要な干渉を再現することは出来ません。勿論、干渉の影響は全体から見ると大きなものではな

いかかもしれませんが、計算精度を上げようとするとう当然無視できなくなってきました。干渉の効果が見られる典型例としては核子のクラスター化があります。要するに重陽子やヘリウムのような複合粒子を作る過程です。この過程は一般に正のエネルギー状態で起こります。古典力学的な観点からは、正エネルギーは非束縛なので、クラスターの生成を説明する事は出来ません。クラスター生成反応では、このような過程が重要となります。なお、AMD の基底状態にはクラスターが出来ているように見えますが、パウリ斥力の影響に因る所が大なので、軌道角運動量を与えるとクラスター構造は薄れて独立粒子的になります。

INC の改良の一つとして、核子相関を取り入れています。この内容は、2010 年 11 月に九州大学で開催された核データ研究会のプロシーディングとほぼ同じで、クラスター生成反応に着目して発表しています。ここでは、研究過程の背景の部分を中心に紹介しますが、内容はプロシーディングと一部重複もあります。また、同研究会で吉岡君が発表した論文の内容にも少し触れます。

陽子入射クラスター生成反応は長年研究されてきましたが、十分理解されていません。中でも α クラスター生成は特に注目を集めており、多くの理論が提唱されてきました。反応断面積を求めるモデルとしては、エキシトンモデルに基礎を置くモデルが精力的に議論され、ピックアップ過程に基づくモデルとクラスターロックアウトに基づくモデルの 2 つがありました。当然、両方とも寄与するはずですが、不思議なことに片方ずつしか議論されていません。今日 INC でもピックアップ過程に対応するコアレスセンスモデルを取り入れています、ロックアウトは誰もやっていません。話を聞くと、核内での $N+d$ や $N+\alpha$ のような散乱断面積が分からないからと言っていました。強引な対策として NN 断面積を何倍かに大きくして、CM 系角分布は NN の場合と同じにするという手が考えられます。しかしこの方法では、 $N+\alpha$ 散乱の角度分布が再現できません。実験データでは、陽子入射反応からの α 放出は前方に強く出る傾向が見られますが、運動学のために大きく違う結果になってしまうのです。 $N+d$ や $N+\alpha$ など全てについて、それぞれの散乱断面積と角分布を都合の良いように勝手に作ってしまうのも一つの手です。しかし上で述べたように、一般性の保証が最重要なのでこの方法は採らないことにしました。

プロシーディングで述べた方法は、クラスターを単一粒子ではなく複合粒子として取り扱うので NN 断面積を使うことができ、その意味では一般性が保証されています。提案したクラスターロックアウトの取扱いでもう一つの重要なポイントは、標的核基底状態にクラスター状態を取り入れて重ね合わせとして表現した事です。これは池田ダイアグラムの応用です。現実の基底状態波動関数が、様々な成分の重ね合わせから出来ていることを、多数回の繰り返し計算によって再現しています。

クラスター生成の計算で難しいのは、運動学の取扱いです。例えば、 p と n がくっつい

て d になる過程ですが、これは 2 体の過程に見えますが核内で起こっているため実は多体過程です。INC でコアレスセンスモデルを取り扱っている人たちは、2 体のエネルギー和をとって d の進行方向は運動量の合成から決めているようです。この方法では確かに、ピックアップ過程だけで実験データをかなり再現できます。INC と比較できるデータは少ないですが例えば、南アの 150~200 MeV ($p, \alpha x$) は非常によく再現できます。 (p, dx) も悪くはありませんが、前方角では特に高エネルギー部分で大きく不足します。不足の部分をロックアウトで埋めることが出来れば良いのですが、 $(p, \alpha x)$ 等と同時に一致するように調節することはできません。さらに重要な点は、より高エネルギーではどうかという点です。当然、ロックアウトの寄与が主になります。我々は現在、ロックアウトが主となる方法の方が正しいだろうと考えていますが、高エネルギーのデータを測定して検証する必要があります。エキシトンモデルの研究ではピックアップとロックアウトを同時に取り扱わなかったのが不思議だと述べましたが、これは実験データのエネルギーが数十 MeV と低かったため、片方だけで十分という面もあったでしょうし、区別する必要もなかったのでしょう。

この方法が正しいと考えるもう一つの理由は、この方法でクラスター入射反応を計算できる事です。例えば、 $(d, d'x)$ 反応を良く再現することができます。その結果は吉岡君の論文をご覧ください。ピックアップ主体の方法では計算できません。QMD でも入射 d が直ぐに壊れてしまうので、まったく再現しません。この結果から現在提案している方法は、様々な反応に適用できるだろうと考えています。

$(p, p'x)$ 反応で軽核が標的の時、INC 計算では 2 step 以上の回数が極端に少なく、対応する部分のスペクトルがかなり小さくなってしまいうことを上で少し触れました。これにもクラスター状態が寄与すると考えています。以前は、連続状態に埋もれた巨大共鳴状態の存在の可能性を考えました。実際に、この効果を INC に取り入れると実験データを良く再現します。そのような高励起巨大共鳴状態の可能性に関して、実験、理論両研究者と議論しましたが、結局実証することは諦めました。クラスター状態の影響についても確証はありません。状況証拠は二つあります。一つ目は波束の衝突を計算すると、波束間に引力のみが働く場合でも反射が起こる点です。核データ研究会のプロシーディングに斥力も含む場合の計算例を載せています。引力のみの場合であっても反射が起こり、似たような結果となります。二つ目は、クラスター状態での核子相関の強さです。非摂動的な原子核の中にあってその性質が際立つ訳ですから、その非摂動性はかなり強いと想像されます。以上から、核内クラスターに入射粒子が衝突してクラスターが壊れる際には、摂動的にスパッと結合が切れるのではなく、散乱状態を経てエネルギー・運動量を分配すると予想されます。例えば、核内 d クラスターに入射粒子が衝突する場合、 d 中の pn 間が引力的であれば d ロックアウトが起こり、斥力的であれば pn 散乱が起こるということです。この効果を INC に入れて計算すると、実験データをよく再現するように

なります。状況証拠は揃っているように思いますが、注意深く進めて行く必要があります。

余談になりますが、QMD や AMD は molecular dynamics ですので、クラスター生成は自然に取り込まれると期待されていました。実際に重イオン衝突からのクラスター生成では満足すべき結果が報告されていますが、エネルギースペクトルの低エネルギー側だけが示されていて、高エネルギー側は議論されておらず十分とは言えません。低エネルギー側は、核子間の運動量差が小さいためコアレスセンス的過程が支配的となり、QMD や AMD でも終状態の取扱いによってある程度の再現が期待できます。一方、高エネルギー側や陽子入射反応の場合には、核子間の運動量差が大きいためクラスター生成の計算は困難になります。MD モデル改良の方向性として、波束の干渉とその後の脱励起を取り入れる事が考えられますが、いずれも定量化は困難ではないでしょうか。

最近では低エネルギーでの INC 計算の改良をしています。この内容は吉岡君の論文をご覧ください。2011 年原子力学会春の大会でも発表予定です。低エネルギーでは、スペクトルにおける直接反応と蒸発過程との間が狭くなり、INC が記述できる部分が相対的に小さくなります。また、ポテンシャルの影響が大きくなるため、入射粒子の軌道が直線では近似できなくなります。前節で紹介した量子力学的前平衡理論では歪曲波を取り扱っています。弾性散乱と似た軌道になるという近似です。実際には違いますが、どの程度違うか分かりません。Nuclear Schwinger Dyson Method は一つの可能性ですが、その結果の検証は困難です。QMD では一体ポテンシャル中の古典的粒子軌道を計算します。この軌道がどの程度正しいかの目安の一つは、弾性散乱に対応する計算です。NN 衝突を外して計算するとその結果は全く違う角度分布となります。QMD のポテンシャルの物理的な解釈は検討すべきですが、QMD の場合他に方法はありません。これは QMD だけでの問題ではなく、微視的 NN ポテンシャルでも核構造と弾性散乱とを同時に精度良く説明するものではありません。そもそも、波として伝搬する現象を粒子軌道で表すことに無理があります。INC でも一体ポテンシャルを取り入れて、曲線的な粒子軌道の計算を試みた例がありますが、違う方法を取るべきです。確率量子化法は波動を粒子軌道で表すものですので、これを INC に上手く取り込むことができれば良いはずですが。NN 散乱の取扱いと同じ考えを NA 散乱に適用する方法も可能かもしれません。この場合は量子の散乱の運動量と位置をどのように決めるか、上手い方法が必要になります。

今後の計画では、実験は INC の検証のためにエネルギーを上げて、600 MeV から 3 GeV の領域で実験をする必要があると考えます。また、標的核も現在ビスマスまでデータを取得していますが、ウラン、トリウムまで質量数を上げて行き、INC の一般化を確かなものにしたいと思っています。高エネルギーでの実験がなかなか上手く行かないため、100 MeV 以下の領域で各種反応をセットとして測定する実験もやるつもりでいます。た

だし、低エネルギーではクラスター生成への核構造の影響が大きくなって現在のパラメータを変える必要があるでしょうから、INC 研究には高エネルギーの方が良いと考えています。

4. シンチレータ検出器の研究

連続スペクトル測定用の検出器は、無機シンチレータを主として使います。これをカロリメータ的に使って粒子のエネルギー測定をします。エネルギー分解能よりもアクセプタンスの広さの方が重要となるためです。二重微分断面積を決定するには、粒子エネルギーと発光量との関係や、検出効率を調べる必要があります。NIM-A に発表しましたので、ここでは簡単に説明します。

荷電粒子の検出効率は、中性子やガンマ線の場合と違って 100%と学習します。しかし、厳密には違います。特に、荷電粒子のエネルギーが 100 MeV を超えると大きく変化します。粒子が検出器内部で静止するまでに走る距離が 10 cm、20 cm になってくると、この間に核反応を起こしたり、検出器から飛び出したりする割合が増加します。この場合、粒子のエネルギーの一部が検出器に付与されなくなり、正しいエネルギー情報が失われてしまいます。つまり、ここで言う検出効率は全エネルギーピークの割合であり、ガンマ線の場合と同用です。核反応の寄与は比較的簡単に調べることが出来て、PHITS 及び Geant4 の計算結果とも一致します。例えば、400 MeV では 60~70%の陽子が核反応を起こしてエネルギー情報を失います。一方、飛び出しの効果は体系に影響を受けるので、少し面倒になります。核弾性散乱と多重クーロン散乱の影響に因るのですが、PHITS、Geant4 共に過小評価します。自作のプログラムで計算すれば、実験データに一致します。

シンチレータの発光量は、粒子エネルギーとの間に非線形の関係があります。また、粒子の種類によっても発光量が変わります。透過型の検出器を使う場合、検出器中で停止する場合と通り抜ける場合があります、注意が必要です。この場合、全付与エネルギー E が同じであっても発光量は同じではありません。 dE/dx が異なるためです。発光量の dE/dx 依存性は古くから Birks の式を使って議論されています。ただし、 dE/dx が同じであっても粒子の種類が違えば発光量は変わります。これはイオントラック構造と関係があると言われていますが、詳しい事は分かっていません。放射線の生物学的影響を表す RBE にも粒子依存性がある事が分かっており、これもトラック構造に関連すると考えられています。最近、トラック構造の粒子依存性やエネルギー依存性を定量的に調べる目的で、微視的モンテカルロ法によるトラック構造の計算を始めました。この計算では、イオンと物質中電子一個一個との相互作用を考慮し、さらに電離電子の追跡も同様に行います。興味深い結果が出始めていますので、近々中に発表したいと考えています。

5. 終わりに

すべての論文は一面的であり、その研究の良い面しか書いていません。論文を書くときはセールスポイントを強調すべきで、不足する点や課題をわざわざ説明していると主題から焦点が外れて分かり難くなってしまうからです（学生の卒論などでは逆に、自身の研究の問題点ばかり強調するものが時々見られます。真面目な学生ほどこの傾向は強いように感じます）。理論や計算に関する論文では、この傾向は強いかもしれません。したがって、読むときには注意が必要です。可能であれば自分で実際に試して確認するといいいのですが、現在では簡単で無いかも知れません。いろんな理由から成果を急がないといけない雰囲気になっているからです。性急に論文を書き上げても、業績が増えるだけで理解は表層的に止まります。要するに、論文の一面的な主張を鵜呑みにして、あれこれ実験や計算をやるだけになってしまいます。新しい考えや、技術等を独自に生み出す実力を身に付けるには、効率のいい方法を考える必要があります。

本稿では、20年の研究を振り返って整理しました。目的の一つを新4年生への導入的解説として、重要と感じる理論の特徴や相互関係を簡潔に述べました。数式は一切使わないで言葉で説明しました。数式を盛り込んだ説明は正確であり、説明者にとっても簡単ですが、多くの文献が存在しますし学生にはハードルが高いので敢えて挑戦しました。正確さを欠く場合もあるかもしれませんが、狙いは違う所に置いているのでご理解をお願いします。また、記憶だけを頼りに書きましたので、一部記憶が定かでない箇所や、私の勝手な憶測の箇所には(?)を付けました。他にも記憶違い等あるかも知れません。お手数ですが、ご一報頂けると幸いです。

最後に謝辞を述べます。以上の内容は仁井田さん、河合先生、渡辺先生をはじめ多くの研究者や学生のご協力によって得られたものです。特に、中野正博先生には大変お世話になり、多くの内容を教えて頂きましたし、本稿にも目を通して頂きました。心から感謝いたします。