

## 研究開発の中にいろいろな種類の楽しみがある

株式会社 ナイス 内藤 俣孝

ynaito@nais.ne.jp

### (1) 私の楽しい経験

- ① 高校生の頃、幾何学の問題を一ヶ月近く考え、一つの補助線を思いつき解決した時の喜びを忘れることができない。これが、私が数理物理系の学問の道を目指す動機になっているような気がする。(これは問題を解く喜びである。)
- ② 大学時期及び卒業間のない頃、群論の勉強中に微分を積分の逆元とした群の構造に熱中したことがある。この群を考えるに当たっては、実数回微分や積分の概念があるとうまい論理が作れる気がした。また、量子力学の勉強中に、時間固有値とエネルギーの関連、エネルギーが不連続量であることを知り、時間と空間が変換可能な量であると考えれば、空間にも不連続の概念があつて当然で、きれいな論理体系ができるのではないかと考えた。不確定性の原理も自然方程式に組み込めるのではないかと考え興奮した。この二つのことを考えている時は非常に楽しい時間であつた気がする。ただ、その後、原子力の仕事に入ったために、なんら成果は得られないまま私の意識から薄れていった。それは、その成果を上げる必要性がなくなったためと今では考えている。(これは新しい概念構築の楽しみである。)
- ③ 日本原子力研究所に入ってから動力炉の炉心解析計算の仕事を約15年間行った。炉内の三次元中性子束分布を計算するのに苦労した。今から30年位前のことで、計算機の容量も計算速度も小さく、差分法で解くことはほとんど不可能であつた。そのため、種々の方法が考案されていたが、私は「Leakage Iterative Method」という方法でこの問題に応えた。この方法は DIFFUSION-ACE として計算プログラム化された。この方法を用いて、種々のタイプの原子炉の解析コードを作成した。BWR 炉心解析コード STEADY-ACE, 原子力船炉心解析コード STEADY-SHIP、研究炉炉心解析コード FEDM (Z-軸方向は差分法、X-Y 方向は有限要素法) 等である。この手法の収束条件を苦労して求めた。(これは問題を解く楽しみである。) 後で少し詳しく述べる。
- ④ 今から30年位前から原子炉の解析の仕事から離れて、臨界安全性の仕事をするようになった。原子炉の解析は、核熱カップリングの計算、燃焼計算等多くの因子が複雑にからまって、力づくの計算であつた。私の趣味にはあまり合わなかつた。臨界計算は、対象とする形状や燃料組成が複雑であるが、解く方程式はボルツマンの輸送方程式だけなので、そんなに体力を使わなくても纏めることができると考えた。核データの処理から臨界安全解析までを一

貫して行えるコードシステム JACS を 20 年位前に開発した。このシステムの多群実効断面積を計算する部分は、MGCL-ACE として、原子炉の解析のセル計算部分に使用していたものである。JACS では中性子輸送計算に Sn 法やモンテカルロ (MC) 法を使用できるようになっている。MC 法を現実の炉心解析に使用することは当時ほとんど行われていなかったが、臨界安全解析の対象は複雑な形状が多く、MC 法が特に有効であると判断した。MC 法を用いることにより、差分法では困難な形状表現やメッシュ幅の影響等の問題はなくなり、計算誤差を発生する要因が大幅に減少した。(これは未だ実用化されていない新しい手法を、新しい技術 (計算機) の発展を予測して目的を達成した喜びである。)

- ⑤ 近年、連続エネルギーのモンテカルロコードが開発され、群定数の作成の必要が無くなったことにより、臨界計算の誤差の主要因は核データということになってきている。このため、計算だけで、臨界になるかならないかを、ある程度、判断できるようになった。最近の私の興味の中心は、「どのような条件がそろえば、計算だけでどこまで判断できるか」の解答を求めることである。これは計算誤差の評価法の問題で、評価対象とベンチマーク問題との類似性をどのように表現するかという問題です。「二つの対象間の距離」の概念の導入が必要です。(これには新しい概念の構築の楽しみがあります。)

以上、私が興味をもったこと及び行った仕事について述べたが、この中で、3次元拡散方程式の解法を開発したときの話をします。

## (2) Leakage Iterative Method の開発

30 年前の計算機では 3次元中性子束分布の計算を差分法の 7 点階差式を直接解くことは、計算機の容量及び計算速度からして無理であった。このため、モード展開法、疎メッシュ法、シンセシス法等種々の方法が提案されていた。私が着目したのは、Z-方向一次元と X-Y 方向二次元のシンセシス法です。この方法も幾つか提案されていたが、その収束性についての考察が不十分でした。このため実用化までには距離があった。

私が開発した Leakage Iterative Method では、炉心を Z-方向のチャンネルと X-Y 方向の層に分割します。各集合体チャンネル毎に 1次元計算を行い、各層からの漏洩割合を求め、それを用いて層毎の 2次元計算を行い、各チャンネルからの漏洩割合を求めます。これを用いて、また、1次元計算を行い、各層からの漏洩割合を求めます。この繰り返し計算を収束するまで行います。この繰り返し行列の表現がもとまれば、そのスペクトル半径が 1 以下が収束条件となります。この行列表現を求めるのに苦労した。チャンネルからの漏れ量は層毎にしか求まっていない。しかも、2次元メッシュ

数の数だけある。それらの漏れ量を2次元メッシュについて積算し、しかも、層内の各Z軸メッシュに振り分ける必要がある。この積算、分配の操作をしながら計算する繰り返し演算行列をなかなか求めることができなかつた。行列の教科書を見ても書いてなかつた。ある時、積算行列と分配行列の表現方式に気が付いた。その後は、非常に明快に繰り返し行列を表現でき、収束の条件を明確に示すことができた。また、その条件が物理的直感と非常によく一致していた。この積算行列と分配行列の表現法を思いついたときの快感は今でも忘れられない。分かってしまえばあたりまえであるが、そこへたどり着くまでに多くの時間を要した。

この仕事は以下のことが動機となった。シンセシス法による中性子拡散コードを作成しようとしたが、繰り返し計算がなかなか収束しない。これが本質的なことか計算コードのプログラムミスによるものかが分からなかつた。作成を依頼したプログラマーからは、この手法は本質的にだめなのではないかと言われた。そのために、収束条件をなんとしても明確にしたかった。そのためには、繰り返し行列を求める必要があり、式の表現形式をいつも考えていた。繰り返し行列の表現が分かって収束条件を示すことができた。収束すると分かれば、プログラムの誤りを探す元気もでき、単純なプログラムミスが見つかった。

この表現方式は、疎メッシュ法などの表現にも使用できると考えているが使われた例を見ていない。この行列は特別複雑な性格を有するものではないが、足したり、割ったりする演算子の表現に便利である。デラックのデルタ関数のように、物理表現のために導入された関数がその後種々の分野で使用され、数学の分野の発展にも貢献したということもあり、必要が新しい表現を生み出すことがあることが分かった。

### (3) 教訓

空間の不連続表現、微積分の群論表現等は今でも時々思い出すことはあるが、実質的成果を上げることができなかつた。これは、新しい概念を構築する仕事であるが、その仕事が完結しなくても本人はなんら困ることがない状態にあったためと考えている。

軽水炉特性解析コードシステムや、臨界安全コードシステムの開発は、仕事としてやったために、一応役立つものができたと考えている。後者の仕事の喜びは、それまでほとんど実用化されていなかったMCコードを大量に使用して工学的成果を上げた達成感である。但し、力仕事で瞬間的感激は少なかつた。

Leakage Iterative Methodの開発は、高校時代の幾何学の問題を解く楽しみと共通したところがあり、懐かしい仕事である。また、利用範囲も大きいはずであるので、誰かが利用してくれれば有難く思う。

私にとって大きな喜びを与えるのは、新しい概念を構築する研究です。しかし、この研究は方法論があるわけではなく、その必要性を周囲の者がなかなか理解してくれない。そのため、頓挫することが多いと考える。少なくとも自分自身はその研究の必要

性を認識することが非常に重要なことだと思います。私が、現在興味を抱いている「計算だけでどこまで言えるか」の研究は「対象をシミュレーションするとはどういうことか」という自然表現の本質に係わる問題なので、何か新しい概念を生むことができると考えているが、この研究の必要性がどの程度認識されるかが成果が上がるかどうかの分かれ目であると考えている。新しい概念を要求される仕事に取り組めば、解決しなければならない問題がたくさんあり、問題を解く喜びにも多くめぐりあえるのではないかと思います。研究者であれば「できる問題」をやるのではなく、「できたらすごい問題」をやって下さい。

炉物理は計算機を用いて自然方程式（ボルツマンの輸送方程式）を解き、それを工学的設計に役立てるという方法論に先鞭を付けたものであり、若い研究者の更なる活躍を期待したい。