

座談会「熱測定 of 現在・未来」

熱測定編集委員会は熱測定誌30周年記念として、会員がこれからの熱測定研究について考えるための材料を提供することを目的に、座談会を企画した。出席は、阿竹 徹（東京工業大学応用セラミックス研究所 日本熱測定学会会長）、一柳優子（横浜国立大学大学院工学研究院）、十時 稔（滋賀女子短期大学）、内藤朗人（大阪大学大学院理学研究科 大学院生）、林 英子（千葉大学教育学部）。司会は長野 八久（大阪大学大学院理学研究科分子熱力学研究センター）。収録は2003年10月11日、東京の日本熱測定学会事務局会議室で行われた。

1. ミクロとマクロを結ぶ

長野： まず、現代における熱力学の役割というところから議論を始めたいと思います。

十時： 企業の中で熱分析をやってきた経験からして、私は基礎学問と熱分析の関係をFig.1に示すような形で捉えてきました。特に企業の中では熱分析はあくまでも応用です。実際にものを作るときに如何に役立つかということです。熱分析の理論的基礎は熱力学と速度論にあると考えます。その基礎に立って、原子分子の集合状態の熱的性質の研究があって、それが大学における基礎研究を成しており、大学の研究成果を頂いて我々は熱分析として応用している。この関係は今隆盛を極めている分光分析についても見る事ができます。基礎理論が量子力学で、それに基づく基礎研究が原子分子のエネルギー状態、その応用としての分光分析という形になっている。これは単に相互に対応する関係が成り立っているというだけでなく、相互に結びつきあっている。理論では、熱力学で生じた矛盾点を量子力学が突破したという意味で、熱力学が量子力学の誕生を準備し

たと言える。また、分光分析はミクロで、熱分析はマクロである。応用の立場からすると、このミクロとマクロを結びつける形でこれからの展開があるべきだと思います。

長野： ミクロとマクロの結合という事では、一柳さんが研究されているナノスケールの世界がまさにその接点に

なっていると思います。
一柳： 原子が数十、数百個というナノスケールの世界というのは、バルク固体では予想も付かなかったような量子的、古典的な性質が見えてきて、とてもわくわくする世界ですが、ナノサイズの物性の評価法は分からないことが多くて、これからの課題となっています。例えば、X線構造解析をしようにも、回折線は非常にブロードになってしまいますし、熱測定でも予測した温度で明瞭な変化が見られるわけでもないので、非常にむずかしい。そのため、ナノサイズの評価にはいろんな分析手法を使って行く必要が出てきます。熱測定でもナノサイズのものをどうやって見てゆかというのがこれからの課題であると思います。



磁性体の例では、応用面から高密度媒体のために強磁性体を小さくすることが求められています。強磁性体はバルクではFig.2にあるように磁区を作ってエネルギー的にも安定になっている。ところが、これを小さくして行くと、もはや磁区を作らなくなります。単磁区と呼ばれるものになるのですが、今度は熱揺らぎに負けてしまって、強磁性なのに全体として常磁性体のように振舞ってしまうことになります。それが、小さければ小さい程良いといっても高

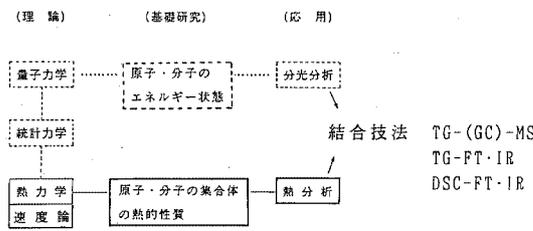


Fig.1 基礎学問と熱分析の関係

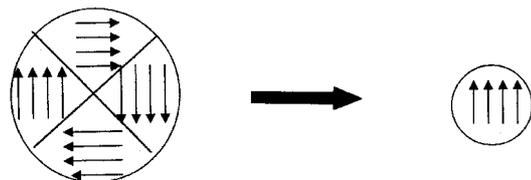


Fig.2 サイズを小さくすると単磁区になる

密度媒体ができなかった理由です。これをナノスケールで実現しようということで、新しいことと思われがちなんです。結局熱に支配されていることなんだということを出して欲しいと感じています。

阿竹： ナノに関しては、昨年1年間、徂徠先生を代表とする科研費の企画調査「ナノカロリーメトリーの開発と応用」が走り、この3月に報告書がまとめられました。それを引き継いで今私は「ナノサーモダイナミクス」という企画調査をトライしているところです。それを基に日本熱測定学会として特定領域研究を立ち上げるという目的意識を持った企画調査です。カロリーメトリーにこだわるのではなく、そもそもナノの世界で熱力学が成立しているのかがどうかが大問題であると思います。

長野： ナノサイエンスと言うと、長さ、大きさによる違いが強調されていますが、光化学をやってきた経験からすると、例えばベンゼン1分子でも励起光を入れて1 ps 経てば、分子内での振動緩和が進行し、反応は完全に統計力学に支配されることになります。量子力学の世界から熱力学の世界への変化は時間軸方向にも見ることができます。熱力学がどれだけ短い時間領域まで通用するかという意味で、寺嶋正秀さんたちの温度レンズ法などによる反応初期過程の研究はたいへん興味深いものです。また、これは非平衡系における熱力学という研究材料も提供していると思います。

2. 生活教養としての熱力学教育から産業技術まで

長野： 次に、一般教養としての熱力学という話題に移りたいと思います。小中学校における理科の時間は1980年以降削減され続け、この20年間で半分になってしまいました。熱に関しては、昨年からの実施の新学習指導要領によると、小学校4年で物質の温度と体積、水の三態変化、中学校で熱エネルギーの記述があるのみです。さらに比熱が削除されるに至っています。比熱についての学習がなくなると、熱と温度を区別することができなくなります。また、熱は感性的なものに止まり、定量性が全く失われます。高等学校では理科は既に選択性になっていますから、熱についての学習はこれで終わりという人たちが相当数出るようになります。

林： 教育学部における理科の現状を申し上げますと、入学してきた学生には高等学校で選択しなかった理科の分野を重点に履修するように指導しています。しかし、基礎的な科目を除いては大学においても選択性になっています。例えばエントロピーについて言えば、物理化学とエネルギーとエントロピーの物理学という科目で履修しますが、これらは選択科目になっています。また、高校のときに物理を履修せず、大学で化学として分析化学と有機化学だけを

とって卒業した場合に、現状ではエントロピーを知らないどころではなく、熱と温度の区別さえできない小中学校教員が現れても不思議ではない状況であると思います。

長野： 昔から小学校では理科が苦手な先生が多かったのですが、最近理科を系統的に習った経験のない人たちが先生になる状況が生まれているのは極めて深刻な事態ではないかと思います。このことは熱測定研究者も含めて、研究者がこれまで理科教育に無関心であったことも少なからず原因となっていると思います。

十時： 私が現在教えているのは生活学科 (Department of Living Science) ですが、学生はほとんど理科嫌いです。衣食住というのは基本的にscienceなのに、学生はscienceとは思っていない。彼等がどうして理科嫌いなのかなと思うに、私が教える立場になってみると、多分に教え方のせいで理科嫌いになったのではないかという気がしています。「暮らしと科学」という講座で、ナメクジに塩をかけると縮むのは浸透現象であるという理屈を説明すると、塩でも砂糖でも同じであることは何人かの学生は理解してくれます。さらに浸透現象の延長として、熱力学がいかに役に立っているかの話として、海水の淡水化に利用されている逆浸透膜を教えています。逆浸透膜を開発している研究者は熱力学の有難味を忘れていないのでしょうか。熱力学は基本原理を与えている。燃料電池なんかもそうですね。

一柳： 私は物理で昨年、統計力学演習を担当しました。学生にとって、熱力学は力学、電磁気学に比べて非常に分かりにくい科目になっています。力学は時間の関数としてはっきり表されるし、電磁気学も電場、磁場という空間の関数として理解してきたのが、熱力学は温度や体積の関数なんです何が違って難しい。6N次元から始まる統計力学はなおさらです。そこで困ったときにはウイーンにあるボルツマンの墓の写真を見せて、そこに刻まれている $S = k \log W$ の式を示すことにしています。それで最終的にここに行き着くことを目指すのだと説明しています。

長野： 阿竹さんらは最近熱力学の教科書を出されましたが、その思想を教えてください。

阿竹： 教科書の「はじめに」にも書いていますが、昔から熱力学の教科書は山ほどあるが、私は熱力学の教科書はまだまだ不足していると思っています。「群象を撫でる」を逆手に取るわけではありませんが、熱力学は象のように大きなもので、ある人は鼻、ある人は尻尾しか書いていない。一人の人間で熱力学全体を書くことは不可能です。私は一



部には自信がある、でも他の部分は他の本を読んでくださいと言うつもりで書きました。熱力学はいろんな教科書を読んで学ぶべきだと思っています。それぞれに味がある。

十時： ある意味で熱力学はまだ完成された学問ではないと言えるのではないしょうか。つまり、基本則はあるけれども、展開の仕方は教科書によってみんな違う。

3. 民間企業の要求と熱測定研究者

長野： 十時さんは東レリサーチセンターに長年勤められてきて、民間が熱測定に対してどのような要求を持っているかを熟知されていることと思います。

十時： 民間研究者の要求の1つは大学との連携の在り方に関わることです。もう1度、Fig.1を見て頂きたいのですが、熱分析は、大学でおやりになっている原子分子の熱量測定の上に成り立っている。これを熱分析に移植して役立てるとというのが私たちの役割だと認識しています。ところが、現状では熱分析と熱量測定のための障壁がものすごく高い。大学での研究成果を熱分析に応用しようと思っても、我々にはなかなか理解できないし、応用するのが非常に難しい。ところが、分光分析の方はそうでないように思えます。大学の研究と現場の分光分析とは割合に障壁なくツアーカーで行っているように見えます。この見方は私だけの考えでなくて、Wunderlichが1985年にThermochimica Actaにこういう文章を書いています。「熱分析の教育には特別な問題がある。昔は、熱分析に携わっている人はごく少数であったうえ、彼らにとって熱力学の勉強は基礎教育の一環としてごく当然のことと考えられていた。しかし、この20年で熱分析に関係する人が100倍にも増えた結果、この中には熱力学の基礎教育のない人々も大勢含まれるようになった。X線結晶学やNMR分光学をはじめとする他の分野では、それに必要な基礎訓練は担当者自身でできるが、熱分析ではそうではない。」さらにWunderlichは2000年のThermochimica Actaの「21世紀の温度変調熱量測定」という題で書かれた論文の中で「熱分析の教育」という項を設けていますが、その中で上記のような状況のもとで、温度変調DSCがあつという間に普及してしまった結果、事態の悪化に拍車がかかった、と言っています。民間の人は原理をよく理解しないまま使っている、とも言っています。私もほぼ同感です。私たちの要求は大学にぜひともこの障壁を下げる努力をして欲しいと思います。日本熱測定学会としても援助してもらいたいと思います。熱測定討論会も民間からすると敷居が高い感じがします。

阿竹： 敷居を無くしましょう。

十時： 熱分析は、企業にとって現場の問題解決ができるかどうかで価値が決まります。生産現場には、その要求は

山のようにあります。企業の現場は「熱分析の宝の山」です。しかし、企業の熱分析を育てるには大学での研究成果を旨く移植してゆく必要があります。一方、熱量測定について言えば、熱伝導率などを含む広い意味での熱力学量に対するニーズは確かに減ってきています。これは、重化学工業などがだんだん廃れてきたことによるものと思います。熱分析の需要はありますが、優秀な人は直ぐに開発研究に引き抜かれるので、日本の企業で熱分析が育つかについては私は悲観的です。ただ唯一の救いは最近独立分析会社というのが沢山設立されていますが、その中には研究開発部門からスピンオフしてできた会社があります。そこでは、研究者がお金を稼ぎながら、熱分析の方法論の研究もやっていけるんじゃないかなと期待を持っています。

内藤： DSCが使い方を理解されないまま普及してしまっていると言うことは、裏を返せば理解しなくても使えているということなんですか。

十時： 装置は何百万円かで手に入るし、試料をいれてボタンを押せば測定ができて、融点とかガラス転移温度は求めることができる。しかしそれだけで終わっているということなんです。単に測り屋として求められた数値を出すだけではなく、企業の熱分析研究者は生産工程の改善

など、生産現場の問題解決に取り組まねばならないということです。そのためには熱分析装置の使い方をよく分かっていることが役立つ。

林： 私たちの研究室では高感度DSCを製作して研究をしていますが、この夏イギリスから薬学の方が生体関連物質の測定をしに来ました。融解の後にベースラインがシフトするのは熱容量が変化するためなのですが、測定されている薬学の方にとってそれはどうでもよいことなのです。

十時： ものづくりをやっている人たちはそれでよいのです。実際転移温度さえ手に入れば十分用が足りているのです。しかし、熱を専門にする人はそうであってはいけないと私は思います。

林： 私たちの高感度DSCを千葉大の企業向けの展示に出したことがあるのですが、企業からは高感度であることに関心が示されません。5 Kを1週間かけて測って、細かいピークが出てきてもそれが何なんだということになる。

十時： そういうことはあるんですが、耐えなければならぬ。希なことですが、実際に役に立ったときはものすごく感謝されます。しばしば熱は大事だと主張するのですが、そう主張しておきながら、なぜわざわざこんなことを言わね





左から内藤，阿竹，林，一柳，十時，長野

ばならないのかと自己嫌悪に陥ることがあります。X線屋やNMR屋がそんな主張をするのを聞いたことがない。熱分析に特別な思い入れを感じているからなのか、弱さを感じているからなのか。燃料電池を開発している人も熱力学を理解してやっている人はほとんどいないんじゃないかな。

4. エントロピー

阿竹： 燃料電池をやる人は熱測定学会に入るべきなのに入っていない。こういう人たちはエントロピーが大事なのに、電位だけで議論している。

長野： 熱力学も150年が経って、エントロピーの重要性も明らかなので、中学高校くらいでエントロピーを教える工夫があってもよいと思います。

十時： エントロピーを理解するには、具体的な事例が必要。ゴム弾性は非常にわかりやすい例だと思います。

長野： 熱力学が大切なのは、物事がなぜそちらの方向に進むのかを示しているからだだと思います。物質がどのように変化するかという事実を知るだけでなく、なぜそのような変化するかという疑問を持つことは理科教育の根幹をなす部分です。その面白さをつかめば自分でどんどん勉強するようになる。したがって、私は熱力学を積極的に理科教育に取り入れる価値は大いにあると考えています。ぜひ林さんたちには努力して頂いて、次の学習指導要領には熱力学が入っているようにしてもらいたいと思います。

阿竹： 熱測定学会にワーキンググループを作って、長い視野に立って取り組まれてはいかがでしょうか。

5. 標準状態圧力から国際貢献

長野： 次に、熱測定学会が国際的に果たすべき役割という話題に移りたいと思います。昨年から熱測定学会が取り組んでいる標準状態圧力の問題も、日本だけの問題ではないので国際的な活動ということになります。

阿竹： 標準状態圧力は、20年余り前にIUPACのI.1委員

会で激論の末、101.325 kPaから100 kPaに変えられました。その変更の理由はSI単位になって気圧が単位として使えなくなったので、標準状態圧力も丸めてしまえというものでした。気体の平衡定数を求めるときに、本来無次元の値にするために、圧力を標準状態圧力で割らなくてはならない。それまでは単位として気圧を使っていれば、標準状態圧力で割る操作が不要であった。しかし、教育的観点からすると、いちいち標準状態圧力で割って無次元にする手続きがあった方がむしろ良い。それを、その計算が面倒だという理由だけで、標準状態圧力を変えてしまったのです。そもそも単位と標準の値とは別のもので、単位が変わったから値も変えてしまえというのはscienceとして誤りです。

それから、101.325 kPaというのは特別な値ではないとよく言われる。世界中の天気図を見ても101.325 kPaは何処にも無いではないかというのです。それだったら、標準重力加速度 9.80665 ms^{-2} というのも何処にも無い。無いけれども決めたら動かさない。IUPACが標準状態圧力の変更を決めたときに、沸点は1気圧のまま残してしまった。どうせ変えるなら、沸点も100 kPaでの値に変えるべきであった。しかし、それまでの膨大な沸点のデータを書き換えることができないものだから、それを残してしまった。その結果、normal boiling pointとstandard boiling pointという2つの沸点ができて混乱している。

私は化学便覧基礎編改訂5版の編集委員会で、熱力学のデータベースが標準状態圧力で混乱していると申し上げました。すると、30人余りの日本化学会の編集委員から、熱力学を専門とするあなた方(日本熱測定学会)はこの20年間何をしてきたのですかと指摘されました。私がこの問題を日本熱測定学会として取り組むべきであると主張してきたのは、これが私たちの責任であると考えからです。私たちが日本化学会とIUPACを動かして、混乱を收拾させねばならない。

長野： 確かに過去においては、日本の研究者は欧米の成果を輸入しておればよい時代があった。しかし、今はもう違う。我々も科学に対する責任を自覚するという意味では、これは良いきっかけになると思います。

阿竹： もはや我々の言うことこそが正しいのだと主張できるくらいに、我々の力量は高まっている。日本熱測定学会として世界に働きかける非常に良いテーマであると思います。もう一つの国際貢献は国際会議の開催です。ICTACが来年、イタリアのサルジニア島で開かれますが、その次の2008年の会議を日本に招くよう働きかけることが幹事会で認められました。もとIUPACの会議であったICCTは来年中国で、2006年はアメリカのコロラド州で、2008年は未定ですが多分ヨーロッパ。そこで2010年にこれを日本に誘致するために、来年中国にプランを持って行くこと

になっています。2006年のアメリカで開かれるICCTは、第16回のSymposium on Thermophysical Propertiesと合同で非常に大きな会議になります。Calorimetry Conferenceは今年、日本熱測定学会とジョイントでハワイで行われました。また、来年は第3回のInternational Symposium on the New Frontiers of Thermal Studies of Materialsを横浜で開きます。このように、これまで日本の熱測定研究者は海外の国際会議に参加するだけだったのですが、これからは私たちが国際会議でも中心的役割を担う時代です。

長野： 世界的に見て熱測定分野の研究がどちらかというところ衰退している中で、日本は例外的にアクティビティを保っていると言えるのではないのでしょうか。私の燃焼熱測定分野では、海外の研究者は過去に完成させられた技術遺産に頼って研究を続けている状況で、もはや自力で新しい技術を開発する能力を失っています。新しい技術を開発できるのは事実上我々だけになってしまっています。

阿竹： 衰退しているのではなくて、本来熱測定に組織すべき人々を組織できずにいると言うべきではないですか。20世紀最後の熱測定誌(Vol.27, No.5)の巻頭言にも書きましたが、21世紀は熱力学の時代です。熱測定分野はもっともっと大きく発展するべきなのだと思います。

6. 熱測定学会に期待すること

長野： それでは最後に、それぞれ皆さんご自身の研究との関わりで、日本熱測定学会に期待することを述べて頂きたいと思います。

一柳： 私は境界領域でいろいろな方と接することが楽しみで、そこからナノの世界の新しいモデルなども積極的に提案して行けたらと思います。ボルツマンは自殺してしまっただけで、熱測定学会は真実を追求するために共に何かを見出そう、創りだそう、という形で議論できる場でありたいですね。それから、標準状態圧力の問題もここから変えていけるようになることを期待します。

林： 私にとって熱測定学会は熱測定の基礎知識を得るために重要で、熱測定誌に組まれている講座などで基礎知識の不足を補っていきたいと思います。

長野： 林さんは教育学部に居られるのですから、理科教育を発展させる課題にも熱測定学会のメンバーと連携してぜひ取り組んでください。

内藤： 以前熱測定誌にも投稿したのですが、たまたま熱測定という研究手段を使っているからというのではなくて、それぞれの研究において、なぜ熱測定という研究手段が選



ばれるのか、なぜ熱測定でなくてはならないのか、ということ意識してアピールする。この事が関連分野の研究者の目を熱測定に向けさせ、組織するのに繋がるのではないかと思います。有機伝導体の物性という研究をしていて思うことです。

十時： 企業で熱分析の生き残る道は、先ほど言いましたように問題解決型の研究者を育てる他にない。そのために、熱測定学会に期待したいと思います。

阿竹： 21世紀は熱力学の時代です。ナノが騒がれているのはチャンスなんです。これまで物理が対象にしてきたのは、短距離は秩序、長距離は無秩序というものでしたが、最近私が興味を持っているのは、レンジ畑の秩序です。遠くから見ると秩序があって、近寄るとまだら、無秩序。逆になっています。長距離の秩序はエントロピー的寄与が小さいので熱力学的に扱うのが困難ですが、自己組織化とかナノスケールの熱力学ではこれが面白いのではないかと思います。

長野： エントロピーの寄与が小さいということは、熱測定としては非常に難しいことへの挑戦ということになるわけですね。

内藤： 熱力学の時代というのはそのまま熱測定の時代ということになるのですか。

阿竹： 熱測定というのは、熱量測定と熱分析を合わせたものとして日本で作られた言葉です。でもそれは「測定」しか言っていないと受け取られることがあります。私はそこに熱力学が入らなくてはならないと考えます。熱力学で括らなければならないのに、測定技術だけに限定されてしまうのは不満なんです。熱力学の視点を持つものはすべて包含されるべきだと思います。

長野： それではこれで座談会を終わります。熱測定、熱力学の将来について大変有益な討論ができたと思います。また、日本熱測定学会の在り方についても、今後の運営に反映されるべきご意見を聞くことができました。長時間ありがとうございました。