

プラズマ理工学から辿る科学史 マクスウェル・ボルツマンの時代

- みなさん、こんにちは！
- 今日、こうして本学科の在学生の皆さんにお会いし、お話できる機会を頂いてたいへん嬉しく思っています。
- 私は2009年の3月に退職しましたが、約13年半も前になります。
- 現役の頃には、プラズマ科学とその応用に関する教育や研究をしてきました。
- それ以来10年以上も経ってから、今日の懇話会で話す機会をいただきましたが、今更、自分の古い研究の内容を紹介しても仕方がないので、どうしようかと悩みました。
- そこで、一層のこと、もっと古い歴史にさかのぼって、今もプラズマ研究の基礎となっているマクスウェルやボルツマンの業績や、それが生まれて来た時代の科学史を話してみたら、皆さん方に興味を持ってもらえるのではないかと、このような題を考えてみました。

内 容

- 講演の内容ですが、はじめに、プラズマの幾つかの例と、プラズマ科学の基礎となっている方程式を示して、今日の主人公との関りを紹介します。
- 続いて、19世紀とはどういう時代だったのかを振り返り、その中でマクスウェルと、ボルツマンの生涯についてお話しします。
- さらに、ふたりに共通する統計熱力学の研究と、そこでの関りについて紹介します。
- その研究の中で、当時課題となったテーマ（マクスウェルの悪魔と呼ばれるパラドックス）と、今日まで議論が続いているその問題について述べたいと思います。
- 最後のところで、プラズマ応用技術に戻って、その最先端の状況について紹介します。
- 締め括りとして、マクスウェルとボルツマンのレガシーを元にした現代の科学の発展についてまとめます。

プラズマの例 (1)自然界のプラズマ

- 最初の例は太陽です。太陽自身も超高温で超高密度のプラズマですが、その周りのコロナも、温度が100万度に達するプラズマになっています。
(ちなみに、太陽の中は超高密度で超高温ですが、表面の温度は約6000度です。外部のコロナがそんなに高い温度になっているのはどうしてでしょうか?)
- 地球も大気圏上層は、電離層という低温の薄いプラズマで覆われています。高さは60～800 kmに及び、いくつかの層で構成されていますが、そのなかでE層はヘヴィサイド層とも呼ばれます。ちょっとこの人の名前を憶えて置いてください。後で出てきます。
- オーロラもプラズマ現象の一つですが、太陽風によって電離層に高エネルギーの粒子や放射線が降り注いで、磁気嵐を伴って、上層大気圏の酸素や窒素が励起されて発光するものです。そのカーテンのような下部の高さは地上約100 kmです。
- 雷は空の雲と大地の間での放電現象ですが、稲妻の中はプラズマ状態となっています。

プラズマの例 (2)人工のプラズマ

- 地上で太陽のように水素の核融合反応が起こせるようなプラズマを作り出し、そのエネルギーによって発電をさせようという、核融合プラズマの研究も進められています。
- これは、国際協力によってフランスで建設が進められている ITER というプラズマ核融合装置の設計図です。それで期待されている電子やイオンの温度は1億度以上、それらの密度は 10^{14} cm^{-3} 以上です。
- 一般の人工プラズマは、通常、気体の放電によって発生させます。
- これは、ガイスラー管の放電ですが、蛍光灯も同様です。
- 気体レーザーには、He-Neレーザー、Arイオンレーザー等がありますが、大学院から社会人の1年生の頃にはそんな研究をしていました。
- 大学に戻ってから、プラズマディスプレイの研究を始めました。
(皆さんは多分プラズマTVをご存じないと思うので、ちょっとVideoで紹介させてもらいましょう：この部分は省略。)
- 同時に、プラズマを用いた薄膜形成（プラズマCVD）やエッチングなどの半導体プロセスの研究をしてきました。
- 現役の最後には、プラズマを用いた殺菌や滅菌、細胞処理（遺伝子導入）などの研究もしました。

プラズマとは

- プラズマの実例を見ていただき、凡そのイメージは掴んでいただいたことと思います。
- プラズマは、固体－液体－気体に次ぐ第四の物質の状態とも呼ばれますが、ここで、その特性の概略をまとめておきましょう。
- 定義としては、正と負の電荷の粒子がほぼ等量混ざり合って、全体としては準中性を保っている媒質とすることができます。
- 電離気体ということですが、中国語の等離子体という表現がそれをよく表していますね。
- 導電性は電離度によって変わりますが、通常の気体放電での電離度は0.001～0.1%程度の値です。
- 正負の電荷のクーロン力によって、固有の振動数での振動が起きますが、それをプラズマ振動数と呼びます。
- 例えば、電子密度 n_e が 10^{12} cm^{-3} とすると、プラズマ振動数は約9 GHzになります。
- プラズマに、例えば正の電位の小球を挿入して、擾乱を起こすと、その周りに負の電荷が集まり、短い距離で擾乱が $1/e$ まで遮蔽されます。その距離をデバイ長と言います。

5

プラズマの基礎方程式 (1) Maxwell方程式

- プラズマの電界や磁界、あるいは電磁波との相互作用を解析する上で必要になるのがマクスウエルの式です。
- ここに示したのは現在の形式のもので、4つの微分形のベクトル式で構成されています。気体のプラズマに対しては、真空中のものを用います。
- 元々のマクスウエルが導いた式はもう少し多く、1864年の論文では8つ、1873年の著書では四元数を用いた12の方程式が記載されています。そこには、ベクトルポテンシャルやスカラーポテンシャル、ローレンツ力などが含まれています。
- それらはマクスウエルの死後に、ヘヴィサイドやヘルツによって整理されて、このスッキリした4つの式になっています。
- これから、電磁波の波動方程式が導出できます。
- また、この波動方程式から、電磁波の速度が全て光速に一致していることがわかります。
- プラズマ中では、電子やイオンによる電荷 ρ およびそれらの運動に基づく電流 $\mathbf{J}$ が存在します。
- また、磁界に対する、荷電粒子の運動の異方性から、電束 $\mathbf{D}$ と電界 $\mathbf{E}$ は誘電率テンソル $\mathbf{K}$ によって関係づけられます。
- それらを基にして、波動ベクトル $\mathbf{k}$ と電磁波の周波数 ω の分散関係式が得られます。

6

プラズマの基礎方程式 (2) Boltzmann方程式

- 他の重要な式は粒子の速度あるいはエネルギー分布とその時間発展を解析するためのボルツマン方程式です。
- 通常の気体放電プラズマ中では、電界による加速で軽い電子が高いエネルギーをもっているのに対して、はるかに重いイオンや中性の原子分子は室温程度の速度分布にとどまります。
- ここで、6次元の位相空間を考え、その微小体積 $d\mathbf{r}d\mathbf{v}$ の中の粒子密度を与える関数を f とすると、(1)式ようになります。
- その時間発展を与える式が(2)式ですが、これがボルツマン方程式あるいはボルツマンの輸送方程式と呼ばれています。
- 左辺は、時間や場所、速度の変化に伴って、位相空間内で微小体積が $d\mathbf{r}'d\mathbf{v}'$ に移るときの粒子数密度の変化ですが、それはその間の衝突によって引き起こされます。
- 衝突項の第一項は、 dt の時間内に、別速度の粒子が衝突によって考えている速度の範囲に流入する量で、第二項は逆に衝突によって流出する量です。
- なお、ここでは簡単化のために、電子が衝突する相手の分子は静止していると仮定しています。
- (2)式の0～2次の“モーメント”を計算すると、粒子数の連続の式、運動量保存式、エネルギー保存式を導くことができます。

7

19世紀の社会

- それでは本題に戻って、19世紀の社会を見てみましょう。
- 19世紀の初めは、前世紀から続く産業革命によって、繊維工業を中心とした軽工業が特にイギリスで発展します。
- フランスでは18世紀末のフランス革命の混乱を收拾したナポレオンが皇帝となって、ヨーロッパ大陸を制圧していきます。
- ところが、1812年のロシア遠征に失敗して間もなく失脚し、その後に関かれたウィーン会議では革命以前の正統主義の体制に戻ることになります。
- 19世紀の半ばには、イギリスではヴィクトリア朝が始まり、大英帝国が絶頂期を迎えます。このころから後半にかけて第二次産業革命が起こります。
- 一方、ヨーロッパ大陸では、フランスの2月革命をきっかけに、各国で民族主義的な運動が高まって、同一民族による国民国家が形成されて行きます。特に、ドイツではビスマルクによるドイツ帝国の統合と富国強兵の政策が進められます。
- アメリカでは南北戦争を境に、産業が発展し影響力を高めます。
- 日本では、1869年の明治維新を期に西欧化が急速に進められます。

8

19世紀初めのヨーロッパ（地図1）

- これはウィーン体制の頃のヨーロッパの地図です。いわゆるアンシャン・レジームの時代です。
- この頃のドイツは、プロセインとその他多くの王国や公国などに分かれています。
- イタリアも、ローマ教皇領やほかの多くの王国に分かれています。
- この頃は、まだ、オスマン帝国の勢力範囲が広いですね。
- イギリスは、アイルランドと一緒に大ブリテン・アイルランド連合王国を形成しています。

19世紀後半のヨーロッパ（地図2）

- 70年代には、ドイツ語圏の諸国が統合してドイツ帝国が形成されています。
- イタリアもまた一つの王国になっています。
- ベルギーもオランダから独立しています。
- 東欧では、ギリシャやブルガリアなどが独立し、オスマン帝国の勢力範囲が縮小しています。

19世紀の科学技術

- さて、科学史においては、現在も使われている数学がますます完成されて行きます。
- 電気においては、クーロン、アンペール、ガウス、ファラデーから、ホイットストーン、キルヒホフ、さらに世紀の半ばから後半にかけてマクスウエル、フレミング、ポインティング、ローレンツ、テスラらが活躍します。
- 熱力学の分野では、ヘルムホルツやシュテファンから、マクスウエル、ボルツマンの確率論に基づく統計熱力学が新しく構築されていきます。
- 物理や光学の分野でも、ドップラーやブリュースター、フィゾーらから、マクスウエルによる電磁波と光の同一性の理論的な証明を経て、プランクやアインシュタインの光量子の発見につながってきます。
- また、本日の講演の主演であるマクスウエルやボルツマンによる統計的な手法の予測から、電子や原子が発見され、20世紀の量子力学の構築に繋がっていきます。
- 日本では、幕末から維新直後にかけて、何人かの留学生がヨーロッパに行っていますが、その中で、長岡半太郎がドイツ留学中にミュンヘンでボルツマンの講義を聴講しています。

11

19世紀の文学

- ちょっと寄り道をして、同世紀の文学の歴史を見てみましょう。
- イギリスでは、当時の社会風刺を描いたディケンズがヴィクトリア朝の代表的な作家です。
- ドイツでは、グリム兄弟の童話がドイツ語圏の民族国家の統一に利用されています。
- フランスでは、スタンダール、バルザックからボードレール、モーパッサンへと時代が移っていきます。
- 帝政下のロシアでも文学が花盛りで、ツルゲーネフ、ドストエフスキー、トルストイがこの時代に活躍します。
- 日本では、本格的な小説家が出てくるのは同世紀の末からですが、教育者としては福沢諭吉が後半で活躍し、慶應義塾の礎になる蘭学塾を開き、学問のすすめを著しています。

12

19世紀の音楽

- 音楽ではベートーベンやシューベルト、シューマン、ショパンから、ヨハンシュトラウス、チャイコフスキー、ブラームスから、マーラーやドヴォルザークらへと時代が移っていきます。
- 日本では、まだ邦楽が主な時代ですが、19世紀の末期には、東京音楽学校（現在の東京芸大）が創設され、洋楽の教育や作曲が盛んになっていきます。

19世紀の芸術（絵画・彫刻）

- 絵画では、新古典主義のアングルやロマン派のドラクロワから、ミレーやマネらを経て、モネやルノアールらの印象派、セザンヌやゴッホらのポスト印象派の画家が活躍します。
- 彫刻家のロダンも同世紀の後半に出てきます。
- 日本では、前半から中盤に北斎や広重の浮世絵が挙げられますが、彼らはヨーロッパでのジャポニズムの広がり、特にゴッホに大きな影響を与えています。

James Clerk Maxwellの生涯

- だいぶ遠回りをしましたが本題に戻って、主人公の一人、マクスウエルの生涯について話を進めたいと思います。
- MXWは、1831年6月にエディンバラ市内で生まれました。
- 間もなく、父親の領地であるスコットランド南西部のグレンレアーに移って、豊かな自然の中で、法律家ながら多才な趣味を楽しむ父親に自由に育てられて、豊かな好奇心や創造力を培いましたが、8才の時に母親を腹部の癌で亡くしています。
- 1841年に10歳でエディンバラアカデミー（中学）に入学し、叔母の家から通いました。
- 入学したての頃は、奇妙な身なりや言葉から、級友に“Dufty”というあだ名をつけられましたが、持ち前の聡明さや機知によってすぐに名誉を回復しました。
- その間、早くも15才の時に卵型と多焦点曲線の描き方について論文を発表しています。また、そこで生涯の友となるピーター・テイトに出会っています。
- 卒業後は、父の希望で地元のエディンバラ大学に進みましたが、そこでForbsの薫陶を受けて自然哲学の勉強に力を入れています。
- 1850年に、19才でケンブリッジ大学に進学し、数学を専攻しました。親友のテイトは1年先に入学しています。最初はピーターカレッジに入りましたが、わずか2か月後にトリニティカレッジに移籍しています。
- 卒業試験では、ラウスが首席でMXWは次席でした（色々考え過ぎで表現の明晰さで損をしたようです）が、直後のスミス賞の論文で挽回しています。

15

James Clerk Maxwellの生涯（つづき）

- 卒業後は、しばらくカレッジのフェローとして残りましたが、父の体調悪化が気になり、スコットランドのアバディーン大学の教授職に応募します。
- 残念なことに、そこに着任する途上で父親は亡くなってしまいます。
- その頃の大きな出来事はキャサリンとの結婚です。彼女は同大学マーシャル・カレッジの学長の娘ですが、父を亡くして淋しくしていた彼は度々家に招かれて、食事や家族の憩いに加わったりしているうちに、7才年上の彼女に惹かれていったようです。
- 本当に彼女とは気心が通じあっていたようで、共通の乗馬の趣味だけでなく、実験の助手としても生涯支えてもらっていたようです。しかし、二人には子供はできませんでした。子供好きのマクスウエルはそのことを残念がっていたようです。

15-2

J. C. Maxwellの業績

- それでは、あらためてMXWの生涯について、業績を交えて話を進めていきましょう。
- まず注目すべきは、彼の生まれた年にファラデーが電磁誘導を発見していることですが、なにか運命的なものを感じざるを得ません。
- ケンブリッジ大学では、恩師のストークスや先輩で生涯の友となるトムソン（後のケルヴィン卿）に出会っていますが、電気の研究に先輩の後から踏み入るのに遠慮し、トムソンの許可をもらおうとしています。そのあたりに彼の持ち前の謙虚さが見えます。
- 1856年に25歳で着任したアバディーン大学では自然科学の教授でしたが、講義のノルマが大きく、なかなか自由な研究に時間が割けませんでした。そういう中でも、ケンブリッジ大学の懸賞論文に応募するために、課題の土星の輪の安定性についての研究を2年掛かりで進め、見事にアダムス賞を獲得しました。その論文では、土星の輪が石ころのような粒子の集合体で構成されていることを理論的に推論しています。
- また同時に、光の偏向による光弾性や色彩の研究、ファラデーの力線の研究も進めています。
- しかし、アバディーン大学では、彼の所属していたマーシャル・カレッジが他のカレッジに統合されてしまったために職を失い、1860年にロンドン大学のキングス・カレッジに移籍しました。
- ロンドンでは、ロイヤルソサエティでの講演に参加したりしているうちに、ファラデーと親しく交流するようになります。

16

J. C. Maxwellの業績（つづき）

16-2

- 1861年には、MXW自身がロイヤルソサエティでカラー写真の講演とデモを行い、絶賛を受けて、その会員に推挙されています。
- この頃に電磁気の研究を本格的に進めており、主要な業績となる電磁場の理論を完成させて、次々に論文を発表します。
- 1861年の論文「物理学的力線について: On Physical Lines of Force」では、磁力線考えのもとになった分子渦を機械の歯車によって力学的説明するためのモデルが考案されています（後のPPT17参照）。
- MXWの業績の代表となる論文「電磁場の力学理論: A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field」では、8つの基本方程式（成分に分けて書くと20の式）が示されています。
- ロンドンで5年が過ぎた頃、落ち着いて仕事を進めるためや、領地の管理をするために、一旦、教授職を辞してグレンレアーに戻ります。
- 6年後、1871年にはケンブリッジ大学の実験物理学の教授に就任します（実は、この職では3番目の候補者だったそうですが、前の2人が辞退しました）。
- 2年後には、電磁気学の集大成である大論文「電気と磁気に関する論考: A Treatise on Electricity and Magnetism」の書籍を刊行します。
- その後、キャベンディッシュ研究所が開設されて初代の所長を務めますが、その恩義から前世紀のH.キャベンディッシュの遺稿を整理して蘇らせます。この間も、毎年夏季にはグレンレアーに戻って過ごしていたようです。
- 1878年頃から腹部の癌で体調が悪化していく中でも、最後になる2編の論文を仕上げたり、査読などの学会の業務を遂行したりしていたようです。1879年の10月にはグレンレアーからケンブリッジに戻り、11月5日に安らかに逝去したそうです。
- 死後、1888年になってヘルムホルツが電磁波の発生に成功し、MXWの理論が証明されました。1931年の生誕100周年記念祝賀会で、アインシュタインらが追悼公演をしています。

電磁気現象の力学的モデル

- それでは、電磁気現象に対して、マクスウェルが考えた力学的モデルについて説明しましょう。
- 旋回する磁場の力線について、歯車のようなモデルを考えましたが、隣同士の歯車を同じ方向に回転させるためには、遊び歯車を挿入する必要があります。
- そこで、マクスウェルは6角形の棒状のものを考え、それを分子渦とよび、その隙間に、小さな潤滑小球を埋め込んで、それを電気微粒子と名付けました。
- 一様磁場中では、分子渦と隙間の電気微粒子がそれぞれ反対方向に回転し、分子渦が手前向きの磁界を作ります。
- 電磁誘導を説明するには、例えば、下の図でAからBの方向に電流を流すと、A-Bより下の分子渦は時計方向に回りますが、A-Bより上の列の渦は反時計方向に回ります、それによって青色の電気微粒子はCからDの方向に動き、その方向に電流が流れます。
- しかし、暫くすると青色の電気微粒子は回転運動をするようになって、場所は移動しなくなります。
- 電磁誘導が磁界の変化するときだけに起こることと整合しています。
- ただ、マクスウェル自身では、モデルはあくまで建築の足場のようなもので、建物（理論体系）が出来てしまえば、後に残さないという考えだったようです。

17

マクスウェルの足跡

- マクスウェルが生涯に動いた場所（楕円で囲んだところ）を1～7までの番号によって順番に示します。
- エディンバラで生まれた所は、今も生誕記念館として残されており、下記のWEBのページから中の展示物を見ることができます。
<http://clerkmaxwellfoundation.org.india-street/housetour.html>
- 少年期に育って、晩年にも毎年夏を過ごしたグレンレアーの実家は、死後50年を経た1929年に火災で大きく損傷しますが、最近になって外観は補修されて、見学ができるようです。
- その家やのどかな近くの風景も、下記のURLの短いビデオで楽しむことができます。
<http://www.glenlair.org.uk/a-birds-eye-view-of-glenlair.html>
- キャベンディッシュ研究所でも、マクスウェルがいた当時の通りに面した建物の外観が保存されているようです。

18

Ludwig Eduard Boltzmann の生涯

- さあ次は、話を二人目の主人公であるボルツマンに移しましょう。
- ボルツマンは 1844 年の 2 月にウィーンで誕生しました。父親は政府の税務官で、比較的恵まれた家庭でした。MXW より 13 才年下ということになります。
- 幼少期はウィーンから少し西にあるリンツで過ごしています。学業も常に優秀でピアノもブルックナーからレッスンを受けたことがあるようです。
- その頃、蠟燭の明かりの下で長時間勉強に励んだせいで、目を悪くしてしまったそうです。晩年はそれが相当悪くなって、自身で論文を読んだり書いたりできなくなってしまっていたようです。この幼年期に、15 歳で父親を亡くしています。
- 1863 年に 19 歳でウィーン大学に入学し、3 年後に博士号を取得して卒業しましたが、そこで在籍したシュテファンの研究室は自由闊達で雰囲気が大変よかったようで、後々まで懐かしんでいます。
- その頃、彼は師のシュテファンから MXW の論文を紹介されましたが、英語を習っていないので、英文法の本も一緒にもらって勉強したそうです。
- 大学の級友には、かなり年上のロシュミットがいて、彼を兄貴のように慕って、終生親しく付き合っています。そこには、後にし烈な論争を交わすマッハもいました。
- その後、ロシュミットがシュテファンの研究室の助教授になっており、ボルツマンは卒業後に助手に採用されています。
- 3 年後に、グラーツ大学の教授に採用されますが、それ以降の詳細は業績のところでお話しすることにして、ここでは概略だけ見ていきましょう。
- 4 年後に数学教授としてウィーン大学に戻りましたが、やはり物理がやりたくて、好条件を出してくれたグラーツ大学に再び赴任し、同時にヘンリエッタと結婚しています。それからの 14 年間は彼の生涯の中で最も充実した楽しい時期だったようです。
- しかし、1880 年頃から色々ながあり、体調の悪化や精神的な鬱状態が起こり、あちこちの大学を放浪して、最後はウィーンに戻りますが、1906 年 9 月に静養先のドゥーノという所でついに自殺してしまいます。

19

Boltzmann の業績

- さて、業績の話に移りましょう。1865 年に 21 才で初論文を出しています。
- グラーツ大に移っていた間に、短期間ドイツのキルヒホフやヘルムホルツの研究室を訪ねて議論をしています。またクラウジウスと自分の先権性の論争もしています。
- 1872 年に、ボルツマン輸送方程式やエントロピーに関する H 定理に関して、自身の業績の中で最も重要な論文を発表しています。
- 1877 年には、微視的状态数 W とエントロピー S の間の有名な関係式についての論文を発表しています（この式は墓碑にも刻まれています）。
- 1884 年には黒体放射に関するシュテファン・ボルツマンの法則を発表しています。この頃までがボルツマンの業績として絶頂期です。
- 1888 年にベルリン大学のキルヒホフが亡くなり、その後任に応募して採用が許可されますが、その頃の体調の悪化や、国の間での手続きの問題、長男の死亡などと、色々な悪状況が重なって精神状態が錯乱し、逡巡したあげく、着任を断念します。
- しかし、グラーツには居られなくなって、理論物理学の研究所を新設してくれるという好条件でミュンヘン大学に移籍します。しかし、そこでも精神状態が安定せず、ウィーンが恋しくなって、シュテファンの後任の職に戻ります。
- ところが、そこに宿敵のマッハが哲学の教授として戻ってきて、その後、長きにわたって、決定論（エネルギー論）的な立場と確率論（原子論）的な哲学的立場の違いでの論争に巻き込まれ、一時、ライプチヒ大学に移りますが、そこにも論敵のオストヴァルトがいました（尤も、彼とは個人的には仲良く付き合っていたようです）。
- その後、再びウィーン大学に戻り、哲学の講義で好評を得たりして、皇帝に謁見もしましたが、やはり精神状態や体調が安定せず、ついに休養先で自殺してしまいます。
- 彼の業績もなかなか正当な評価が得られず、それは 20 世紀に入ってからのことでした。

20

ボルツマン家の墓

- ボルツマンの墓についても数奇な運命をたどります。
- 彼が最初に埋葬された墓は、第一次大戦もあったせいか、いったん見捨てられ、忘れ去られてしまいます。
- その後、そこには別の人が埋葬されたそうです。
- 1929年になって、その墓が再発見されましたが、上の場所を壊さないように、下からボルツマンの遺骨が取り出され、ウィーンの中央墓地に移設し、胸像付の墓碑が作られたそうです。
- それが、このボルツマン家の墓になります。
- それをクローズアップしてよく見てみると、左右に奥さんと次男の名前があり、その下に孫の名前があります。
- Ludwig Boltzmann という同名です。実は、幼くして亡くなった長男も同名でした。
- その孫の名前の下に1923-1943年とありますが、20才でロシア（ソ連）のモスクワで亡くなっています。
- 時期として、ナチスドイツがソ連に攻め込んで敗れた頃ですので、戦死だったと思われます。

21

ボルツマンの足跡

- ボルツマンの足跡も、また番号順に示します。
- ウィーンで生まれ、幼少期をリンツで育って、またウィーンで大学教育を受けましたが、研究者として最も充実した時期はグラーツで過ごした比較的短い14年の期間です。
- そこで4人の子供を授かり、子煩悩な父親としても伝記に残っています（5人目はグラーツを離れてから後に生まれました）。
- また、学生に対しても優しく指導し、時には家に招いてピアノを聞かせたりしています。講義もクリアーで上手かったと伝わっており、後に長岡半太郎もそのような感想文を残しています（東洋学芸誌）。
- 経済的に困っている学生には、なるべく単位を落とさないように、とりえを見つけるようにしたという話も残っています。
- 一方、先ほどは述べませんでしたが、マクスウェルも丁寧な講義をしていたようですが、内容が難しく、突然、自分の考えていることを板書したりするので、ついてくる学生が次第に減ってしまったりしたようですが、好奇心のある学生には存分に指導したようです。
- ボルツマンは、晩年に目まぐるしく移籍して回っていますが、最後は、とうとう静養先のドゥイーノ（現在はイタリア）のホテルで自殺してしまいます。

22

マクスウェルとボルツマンの関わり

- ここで、統計熱力学における双方の関わりについてお話ししましょう。
- そこには、ヘルムホルツやクラウジウス、ギブスらも関わってきます。
- マクスウェルに13年遅れてボルツマンが誕生しますが、その頃には熱力学が盛んになっており、ヘルムホルツによる熱力学の第一法則やトムソンの熱力学第二法則が発表されます。また、クラウジウスはエントロピーの概念を創生して熱力学の第二法則の不可逆性を説明します。
- また、1857年にヘルムホルツが熱の原子論的運動論を展開します。マクスウェルは1860年に気体分子の速度分布を記述する式を導出し、1866年には気体の動力学論に関する論文を発表して、2分子の衝突における相互作用を推定しています。
- ボルツマンは、1868年にそれを一般化した **Maxwell-Boltzmann** の速度分布を導いた論文発表をしています。また、1872年には **Boltzmann** 方程式の論文を出しています。
- 多少前後しますが、そのころに熱力学第二法則のエントロピー増加の統計力学的な理論に対して、マクスウェルやロシュミットから不可逆性や時間反転についてのパラドックスが出されています。それについては、また後ほど取り上げます。
- この頃に、遠く離れたアメリカで独自に熱力学を研究していたのがギブスですが、**MXW**はその業績を紹介しています。ギブスは後に「統計力学原理」を出しています。
- 1877年に、ボルツマンは、あの有名な統計力学的エントロピーの定義式についての論文を出します。
- **MXW**は死の前年に「ボルツマンの定理について」の論文を執筆し、アンサンブル平均の概念を使って **BZM** の定理を発展させますが、それが死の年 1879年に公表されます。
- ボルツマンは、同年にシュテファン・ボルツマンの法則の論文を出します。
- ボルツマンはキャベンディッシュ研究所を訪ねますが、それはマクスウェルの死後のことでした。そこで、**MXW**方程式の基になった力学的モデルの有無を尋ねています。

23

ボルツマンとマクスウェルの人物像

- ここで改めて、二人の人物像を比較してみましょう。元の写真の向きの都合で、右側がマクスウェルで左側がボルツマンになっています。
- どちらも好奇心旺盛で創造的なところは同じですが、性格的には対照的で、マクスウェルは思慮深くてスマートなタイプです。一方、ボルツマンは思いつくままに猛進するタイプですが、時に思い悩み逡巡する躁鬱的な所があったようです。
- 性格の違いは、二人のプロポーズのスタイルにも見えます。マクスウェルは美しい詩を書いて送りましたが、ボルツマンは長い手紙を書いています。
- 彼の言い分では、こういう公式なことは文書で書く必要があるそうです。その内容には、今のサラリーはこれこれで、何とか暮らしはできるかも知れないが、不自由な思いをさせるかも知れない云々、とあったそうです。フィアンセからの返事は、私が必要なのは貴方だけです、というものでした。
- マクスウェルは、ケルビンやテイトなどの友人と頻繁に手紙を交わして、研究の評価を慎重に聞いたりしています。ボルツマンは、議論を交わすのが好きで、時には公開討論で闘牛のようなスタイルで議論したそうです。
- お互いに仕事を評価し、特にボルツマンはマクスウェルを敬愛していました。例えば、マクスウェルがああ電磁気学の方程式を発表した時、これらを記したのは神ではなかろうかと、ファウストの一節を使って感嘆したそうです。
- ところが、不思議なことに、二人は直接会ったことも、文通した痕跡もないようです。

24

熱力学の法則

- さて、ここで問題のマクスウエルが悪魔の問題の戻らないといけな
いのですが、まずは、熱力学の法則の中身を見てみましょう。
- この法則は第一から第三までの法則で構成されます。
- 第一法則は、エネルギー保存の法則で熱と仕事の等価性です。
- 第二法則は、見方によって幾つかの違った言い方がされていますが、
内容的には同じものです。
- この法則でエントロピー（熱量を温度で割った次元の量）が出てき
ますが、不可逆変化ではエントロピーが増大するという法則で、そ
れによって、第二種永久機関は実現不可能ということになります。
- 第三法則は、エントロピーの基準ゼロ点が絶対零度になるというこ
とです。
- 永久機関については、それが実現できたと見せかける例はありませ
んが、実際にはこれまでに実現できていません。
- その一つの例が、戦後の広島で考案されたこの「平和鳥（水飲み
鳥）」という玩具です。
- 勝手に動き続けているように見えますが、何処どこにトリックがあ
るのでしょうか？

25

エントロピーと不可逆性

- ここでエントロピーの定義と、その不可逆変化における増大の法則を見てお
きましょう。
- 熱力学では、温度 T の物質（あるいは系）が外から微小な熱量 ΔQ をもらった
ときの状態変化におけるエントロピーの微小変化 ΔS を、 $\Delta Q/T$ の比で定義し
ます。
- 不可逆変化では、その ΔS は正に、すなわち増えることになります（簡単な説
明は右図にしておりますので、見ておいてください）。
- エントロピー S は状態量であり、絶対零度を基準にして、その状態によって
決まります。
- エントロピーを用いて、ヘルムホルツやギブスが与えた自由エネルギーの式
を示します。
- 例えば、ヘルムホルツの式を見ると、自由に使えるエネルギーは物質(系)の
もつ全内部エネルギーから ST を差し引いたものになります。逆に言えば、そ
の分は使えなくなってしまった分と言えます。
- ボルツマンは、物質(系)の巨視的な状態に含まれる微視的な状態の数を W と
して、それをエントロピーと結びつけています。
- この式から、状態の数 W 、つまり状態乱雑さの度合い、が増すとエントロ
ピーが増大していくことになります。
- 自然界や人間生活の中では、殆ど全てが不可逆変化なので、エントロピーは
限りなく増大して、自由に使えるエネルギーが減っていくことになります。

26

マクスウエルの悪魔

- このエントロピー増大則に対して、最初に逆説を唱えたのはマックスウエルで、その後も、ロシュミットやツェルメロが熱力学の第二法則の統計学的理論に対して、それぞれの逆説を唱えています。
- ここでは、マクスウエルが提案し、トムソンによって命名された“マクスウエルの悪魔”という仮想実験について見ていきましょう。
- 本学科のサマーキャンプでも、このゲームをやっているようですね。
- ここに、マクスウエルが友人のテイトに送った手紙の一節を示していますが、分子程度の小さい粒子の動きや速度を識別できる微小な生き物を仮想し、仕切りついた箱の扉を開閉させます。
- まず、右の部屋Aから平均速度より遅い粒子が来た時に扉を開き左の部屋Bに入れます。次は、左のBから来た早い粒子を右のAに入れます。この作業を繰り返していくと、Aには平均速度より速い粒子が、Bには遅い粒子がたまっていき、秩序だった状態、つまりエントロピーの下がった状態になって、仕事を取り出すことができます。
- このパラドックスに対して、ボルツマンは統計的な確率の問題として回答します。
- 例えば、箱の中の粒子の数を増やしていったら、その確率の変化を調べてみてください。
- しかし、最も本質的なことは、熱力学第二法則が従来の決定論的な絶対法則ではなく、確率論的な法則という異なった性質をもつところなのです。

27

情報理論におけるマクスウエルの悪魔

28

- マクスウエルの悪魔も、一旦息を潜めていたように見えたのですが、20世紀の情報科学の発展とともに息を吹き返して来ました。
- 1929年にシラードエンジンというものが提案されて、情報学エントロピーという概念が創出されます。その中でエントロピーが減少する例が示唆されました。
- その後、あのシュレディンガーが、生物系でのネガトロピー（負のエントロピー）を提唱します（尤も、これは後年に否定されています）。
- その後、情報の観測におけるエントロピーの必要性の有無について議論が起こったり、情報の消去の際にエントロピーの増大を伴うという説が提案されます。
- 20世紀の終盤になって、非平衡統計力学という分野が発展してきて、そこにおいて、微小系において熱力学の第二法則がわずかの確率で敗れることがあり、その確率まで特定されてきています。
- マクスウエルの悪魔の存在の有無に対する最新の答えとして、東大の沙川らの論理を紹介しましょう。
- 下図のシラードのエンジンを動かしてみましょう。平衡状態で静かに仕切り板を挿入します。そこで粒子が右にあるか左にあるかを測定します。測定でその情報を獲得したデーモンは情報エントロピーを $I = \ln 2$ だけ減少させます。
(註) 情報エントロピーは情報が分らない状態を正に取ります。
- そして、観測結果のフィードバックとして。もし左にあれば何もしない、右にあれば準静的に仕切りごと右の箱を左に移動します。ここでも仕事はしていません。
- その状態で、左の半分の空間にある粒子は、等温断熱膨張で $E_{\text{ext}} = k_B T \ln 2$ の仕事を外部にすることができます。
- このサイクルにおいて、メモリも含めた系全体での仕事の差し引きを考えると、デーモンの仕事の方が外部にする仕事より大きくなってしまい、永久機関は不可能となります。

マクスウェルの悪魔を実現（ゆらぎの熱力学）

- 永久機関の実現はともかくとして、微小なデーモンが実現できるかどうかの実験的研究も行われてきました。
- その例の一つが、NTTの研究所において行われた、ナノレベルのデバイスを用いて、熱電子を選別して発電するという試みです。
- この実験では、電子の通路は電位差によって左に下がっており、電流は左に流れようとしませんが、検出器で電流の熱雑音を観測して、右向きの電子があれば出口のトランジスタをONにして扉を開きます。それを繰り返して、逆向きの電子を右に送っていくことによって電位差をさかのぼって行くので、負の電力消費、すなわち発電が起きることになります。
- ただし、この実験で実際に観測された電流は10 mVの電位差に対して 10^{-19} Aだったので、電力としては 10^{-21} W（zeptowatt）のオーダーということです。
- その他にも、いろんな微小デバイスを用いた実験が行われてきています。
- このような研究で、新しい科学の領域が情報学や統計力学、生物学の分野で発展してきています。

29

プラズマプロセスの機構

- だいぶ違う方向に話が進んでしまいましたが、最後に、話題を半導体のプラズマプロセスに戻しましょう。
- プロセス装置では、真空チャンバに原料ガスを低ガス圧下で導入して、プラズマを発生させて生成した正イオンや反応性の高い中性ラジカルを利用して、薄膜堆積やエッチングを行います。
- 生成されたプラズマの特性や、イオン・ラジカルなどの組成などの情報を理解して、基板への輸送過程を制御し、最適化をはかるために、それらの計測やシミュレーションが行われます。
- そこでは、電力注入における電界や磁界、あるいは電磁波の伝搬の過程のマクスウェルの式を用いた解析や、電子のエネルギー分布をボルツマン方程式で解析すること、さらにイオンや中性粒子の密度分布を解析する化学反応を取り入れた連続の式での解析が必要になります。
- プロセスの最適化のためには、基板に入射するイオンの速度やラジカルの入射量を制御し、その効果を分子ダイナミックスで調べることも行われています。

30

プラズマプロセスの数値解析

- 私の研究室では、実験的なプラズマの診断をやってきました。
- ここでは、1枚でプラズマプロセスの概要が分かるように、シミュレーションの結果を借りて紹介したいと思います。
- ここに示したのは、誘導結合プラズマ(ICP)装置の例です。真空チャンバーの上部の誘電体の蓋の上に、渦巻き状のコイル電極（アンテナ）が設置されています。
- チャンバーの中には、下部電極があり、その上にシリコンウエハが置かれています。
- 電極に高周波（主に13.5 MHz か27 MHz が用いられています）の電界を印加すると、コイルの周りに磁界ができます。するとチャンバーの中に誘導電流が流れて電力が注入されて行き、高密度のプラズマが生成されます。
- これは、IH調理器と同じような電磁誘導の原理に基づいていますが、下部電極には、イオンエネルギーの制御などの目的で、もう一つの電源が繋がれています（こちらは、400 kHz などの低周波）。
- この装置で、Siのエッチング用の塩素を含むガスのプラズマについて、電界、電力注入、塩素の原子や分子のイオン密度、塩素ラジカル、それからエッチングでの生成物の SiCl_x の空間分布を解析したのが右の図です。
- これらは、私の長年の友人であるミシガン大学のKushner教授のグループの研究成果の一部です。

31

最先端半導体の構造とプロセス

- そのようなプロセスで作られる半導体の構造を見てみましょう。
- 現在、主に使われているシリコンウエハの直径は300 mm です。これは昔のLPレコード盤と同じと言っても、皆さんはご存じないかも知れませんね。CDやDVDが120 mmなので、その6倍以上の面積になります。CPUなどのチップが約10 mm四方なので、1枚のウエハで約500個のチップが一度に作られることになります。
- ここでは、1個のMOS-FETの大きさは数100 nm四方で、最小のゲート幅で見れば約45 nmですが、最先端のものでは、これが10 nm以下のレベルにまで小さくなっています。
- そのFETのゲートの構造も、さらに微細化と高性能化のために、平面型から3次元の立体的なフィンタイプや積層（スタック）タイプに代わってこうとしています。
- これらのデバイスをつなぐ回路の配線も立体的に作られており、そのために、絶縁層をして穴を開け、配線のパターンを作るという操作が繰り返されます。

32

フラッシュメモリーの構造

- これは、最近のフラッシュメモリーの構造ですが、SSDなどの普及に向けて、大容量化が進められており、構造も急激に多層化が進められてきています。
- この例では、絶縁層と金属層が積層されており、縦の深い孔の側面にも、絶縁層や電荷をためる記録層と電極の金属が同軸上に積層されています。この縦の配線に対して、横の金属層の電極は右側の階段状の所で上に取り出され、縦横のマトリクスが構成されます。
- この図のものでは、孔の直径はが100 nm、深さは4500 nmで、そのアスペクト比（深さ／孔径）は45にもなります。（例えば、直径1 mmで長さが45 mmの針金を1万分の一に縮小したものと想像してみてください。）
- このような深孔のエッチングに用いられているのが、右下図のようなCCPと呼ばれる平行平板型の2周波プラズマ装置です。
- この装置では、プラズマの径方向の一様性ととも、基板へのイオンの入射エネルギーの精密な制御が行われています。

33

MaxwellとBoltzmannのレガシー

- 最後のまとめに代えて、今日の二人の主人公のレガシーが、その後どのように活用され、発展してきたかを述べます。
- マクスウエルは電磁気学、ボルツマンは統計熱力学の創始者とされていますが、実際には、二人は両方の分野に貢献しています。
- マクスウエルが予言した電磁波はヘルツの実験によって発見されますが、ボルツマンが予言した原子は、1887年のヘルツによる光電効果の発見、1897年のJJトムソンによる電子の発見、プランクやアインシュタインによる光量子仮説による黒体放射の理論、1905年のブラウン運動の実験、さらには、その後の量子力学の確立によって、確かなものとして証明されていきます。
- その後、それぞれの理論が量子力学を取り入れて、現在の学術体系に発展してきています。
- また、マクスウエルの電磁気だけでなく、光学や色彩学も併せた研究分野は、無線通信や光通信、レーザーなどの光電子工学へと発展し、ボルツマンの統計力学は、新しい形で情報理論や、非平衡統計力学、分子生物物理学などの分野に生かされています。

34

おわりに

- 講演を終わるにあたって、皆さんに言葉を一つお贈りしたいと思います。
- それは、主人公と同じ19世紀に生きたフランスの詩人で評論家のアナトール・フランスという人の次の言葉です。
- The whole art of teaching is only the art of awakening the natural curiosity of young minds.
- 意識をしてみると、
教育というものの神髄は、若き心に宿る天性の好奇心を
呼び覚ます技芸に他ならない
といったところでしょうか。
- すなわち、我々教員にできる最大の役目は、若い皆さんの「好奇心」を呼び覚ますことです。
- そこで、早速ですが、次の提案をしたいと思います。
- 今日の話に少しでも興味を持っていただけたら、皆さん自身で、電気関連の科学史について、アンペールやガウスから、ファラデーを経て、マクスウェルとその後の人たちについて、その業績や繋がりを調べてみてはいかがでしょうか。

35

伝 記

- 今日の話の基になった二人の伝記について、それぞれに3冊程度の本を紹介しておきます。
- 英文のもの（Kindle版もある）や、和訳されたものもあります。
- まず簡単に概要を見てみたいという人には、米沢先生の岩波新書をお勧めします。
- もっと手っ取り早い方法としては、下記のキーワードで検索すれば、YouTubeの動画で、それぞれ1時間程度のビデオも見られます。

[BBC James Clerk Maxwell, YouTube](#)

[Ludwig Boltzmann: the genius of disorder, YouTube](#)

36

謝 辞

- 皆様方には、熱心にご清聴いただきありがとうございました。
- マクスウエル、ボルツマンとともにお礼を申し上げます。
(Maxwellの従姉のJemimaの絵にBoltzmannのイラストを合成しました)
- この後のPPTには、参考資料を何枚か添付していますので、ゆっくりご覧下さい。

Appendixes

付録として、以下の資料を添付しています。

1. Maxwell's original equations
2. 参考文献
 - 2-1 James Clerk Maxwell
 - 2-2 Ludwig Eduard Boltzmann

Errata

p.4, ppt No.7

$$\frac{\partial}{\partial t}f + \boldsymbol{v} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{r}}f + \boldsymbol{\alpha} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{v}}f \equiv J(f) \quad \rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial t}f + \boldsymbol{v} \cdot \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{r}}f + \boldsymbol{\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{v}}f \equiv J(f)$$

p.7, ppt No.13 音学 → 音楽

p.17, ppt No.34 Gibbsの写真 →

p.18, ppt No.36 Bibliography → Biography



統計熱力学の年譜

Joule 熱の仕事等量

Helmholtz 熱力学第一法則

Kelvin 絶対温度と絶対零度の提唱

Kelvin 熱力学第二法則の定式化

Kelvin ジュール・トムソン効果

Maxwell マクスウエルの速度分布

Maxwell 気体の動力学的理論について

分子間の斥力 $\propto r^{-5}$

Maxwell マクスウエルの悪魔

Van der Waals 状態方程式の提唱

Gibbs 相平衡, 統計集団, 自由エネルギー, 化学熱力学に関する論文 2 編

Maxwell 質点系のエネルギー分布に関するボルツマンの理論について

Helmholtz 自由エネルギー

Tait らとの議論を通して Boltzmann の膨大な著作が英語圏で評価を得ていく

Gibbs 熱統計力学のアンサンブル理論の定式化

Gibbs 「統計力学原理」出版

Maxwell (1831 – 1879)

Gibbs (1839 – 1903)

Boltzmann (1844 – 1906)

1850 Clausius 熱力学第二法則の定式化

1854 Clausius クラウジウスの定理

1862 Clausius 「ディスグレゲーション」の概念

1865 Clausius エントロピーとして巨視的な概念

Loschmidt ロシュミット数の導出

1868 Boltzmann マクスウエル・ボルツマン分布

1872 Boltzmann H定理, ボルツマン方程式

1876 Loschmidt ロシュミットのパラドックス (不可逆性の問題)

1877 Boltzmann エントロピーと確率の関係

1879 Boltzmann シュテファン・ボルツマンの法則
Boltzmann 1884 上記を熱力学理論で証明

1881 Boltzmann 1879年のMaxwellの論文についての研究報告 (1882 Phil. Mag. 14にも)

1900 Plank 黒体放射の法則 (エネルギー量子)

1905 Einstein 光電効果 (光量子)

1906 Nernst 熱力学第三法則



統計熱力学の年譜

- マクスウエルとボルツマンの関わりをもう少し広い範囲に広げて、統計熱力学の発展の年譜を見ていきましょう。
- そこには、ジュールやトムソン（ケルビン卿）、さらにクラウジウスやヘルムホルツらの先見的で先導的な仕事があげられます。
- 彼らによって熱力学の第一法則と第二法則が確立され、定式化されて行きました。
- その過程において、クラウジウスはエントロピーの巨視的な概念を提唱しています。
- 1850年代になって、マクスウエルが気体分子の動的運動論に基づいて速度分布を導きます。
- それに刺激を受けたボルツマンは、熱平衡状態におけるマクスウエル・ボルツマン分布の検証を行い、さらに速度分布関数の時間発展に関するボルツマン方程式を導出します。これらに先立って、ボルツマンはエントロピーの原子論による試案について、クラウジウスと先権性の論争をしています。
- エントロピーの概念の解釈において、ボルツマンは確率論的な状態数との関係を定式化して、エントロピー増大に関する H定理を導きます。
- 一方、ギブスはエネルギー論と原子論の立場の違いを明確にせずに熱力学第二法則を説明し、統計熱力学のアンサンブル理論を確立します。彼の「統計力学原理」によって、古典的な統計力学は完成したと言われています。
- その後、ボルツマンの方は黒体放射についてのシュテファンの研究を進めて、熱力学的理論による照明を与え、シュテファン・ボルツマンの法則を確立します。
- プランクはその理論的な解析を進める中で、放射に対するエネルギー粒子の概念を着想しており、それがアインシュタインの光粒子の発見に繋がっていきます。
- 20世紀入って、ボルツマンの弟子のネルンストによって熱力学第三法則が提唱されます。