OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	4.3.4 状態方程式
Author(s)	田中, 和夫
Citation	プラズマ核融合学会誌. 1999, 75, p. 99-101
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/3347
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

4.3.4　状態方程式

自然界には我々の日常の環境からはるかに逸脱した温度，密度環境下にある物質が存在する．このような物質の内部状態を温度や密度，圧力などの物理量で表現することをその物質の状態方程式と呼ぶ．高出力レーザーの出現により，星の内部状態に匹敵するような物質の状態研究が実験室レベルで可能となってきた．

レーザーを物質に集光照射することにより発生する圧力は，膨大な値をとる．例えば，レーザー集光強度 10^{14} W/cm^2 の場合，数 Mbar の圧力を発生し，これに対応する衝撃波が物質内部へと伝搬する．既に確認されている最高圧力は，750 Mbar 程度である．レーザー核融合は，こうして発生するアブレーション圧力を利用し球状燃料ペレットを球対称爆縮させる．このように，高い圧力を発生する手法が研究室レベルで比較的簡単に得られるようになってきている．とくに近年テーブルトップレーザーの普及は目覚ましく，こうした小型レーザーを用いた状態方程式の研究も進展しようとしている[1]．ただし，本当に高い圧力を得るには，まだ大型のレーザー装置による一次元形状を維持した実験がトップデータをたたきだしている．こうした大型レーザーの代表としては，米国リバモア研究所の NOVA レーザー（ただし，この装置は，1999年 5 月にシャットダウン），米国ロチェスター大学のオメガレーザー，大阪大学の激光レーザーなどが挙げられる．

これまで状態方程式研究に用いられてきた二段ガスガン，爆薬実験と比べるとレーザーを用いた実験は，空間，時間スケールともに格段に小さく，短時間となり，計測精度はやや劣化し，データの誤差が10％程度となる．

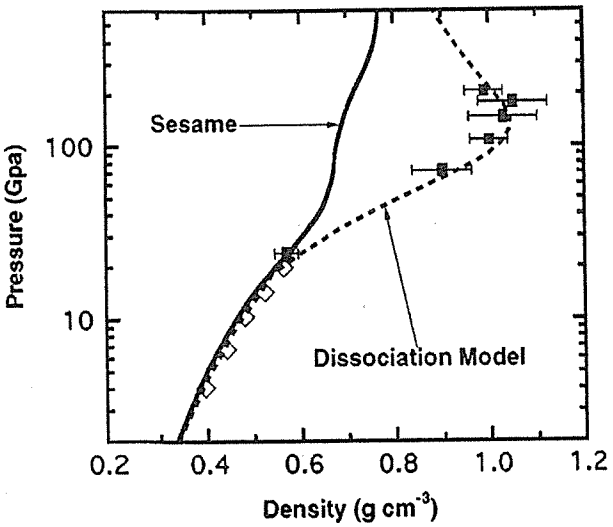

Fig. 4.3-6　DaSilva 等による重水素圧縮実験結果[5]．ノヴァレーザーシステムの 1 ビーム（波長 527 nm，パルス幅 10 ns）を使用．レーザー光は，プラスチック層 (20 μm) で吸収され，アルミ層，重水素層へと衝撃波が伝搬する．レーザー集光強度は，10^{13} W/cm^2．高速電子等による前駆加熱の影響は，ターゲット後面をマイケルソン干渉計でモニタし，衝撃波到達前の加熱による動きがないことを確認している．重水素の圧縮率は，衝撃波伝搬の側面からＸ線バックライトにより高性能Ｘ線顕微鏡で観測しピストン面と衝撃波面を同時に観測することで得られた．

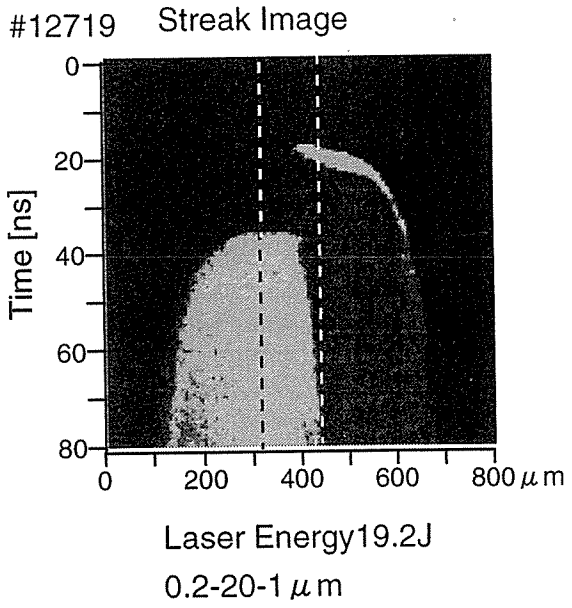

Fig. 4.3-7　比較的小型のレーザー（エネルギー 20 J）を用い，多層膜飛翔体を飛ばした実験結果．多層膜飛翔体は，アルミ (0.2 μm)，ポリイミド (20 μm)，タンタル (1 μm) からなり，レーザー（波長 1,053 nm，パルス幅 1 ns，強度 10^{13} W/cm^2）は，アルミ面から照射．タンタルは，薄いために希薄波がポリイミド面から侵入する衝撃波と出会うたびに衝撃波加速を得，多段加速を受ける．この場合，シミュレーションとも良い一致を示し，10 km/s を超えるタンタル膜の加速が観測された．

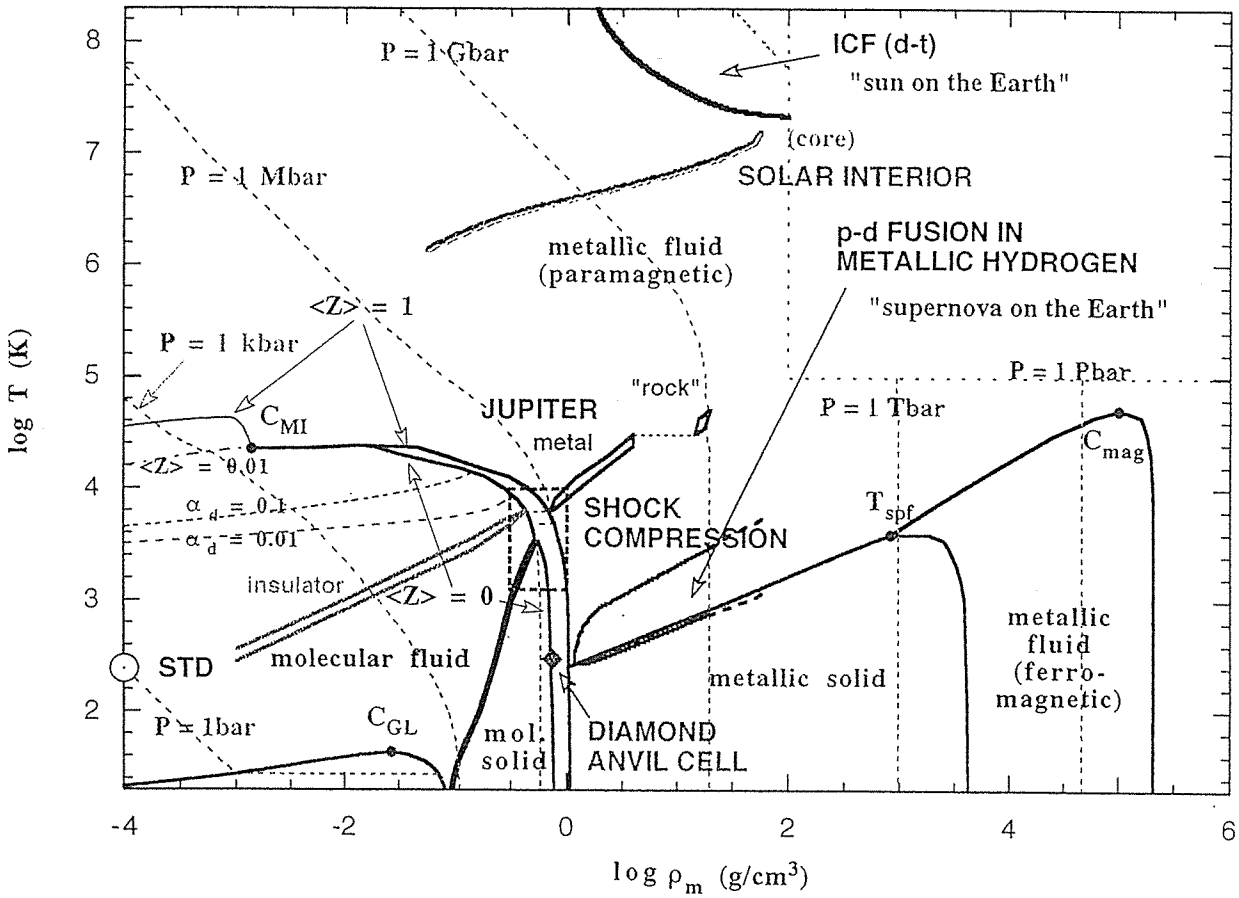

Fig. 4.3-8　一丸による水素の相図[1]．圧力表示のある破線は，等圧線，＜Z＞は，電離度，α_d は分子の解離度，C_{GL} は気液相転位の臨界点を表す．

またレーザー照射して発生するプラズマとレーザーとの相互作用から発生する高速電子，X線により，衝撃波伝搬前方の物質が先に加熱される前駆加熱が起こる．こうした課題は，現在さまざま方法で克服されようとしている．

Koenig ら[2]は，比較的小型レーザーで初めて圧力10－50 Mbar 領域において，Phase Zone Plate [3]という位相板を挿入することで，レーザーの集光強度の空間分布をフラット（200 μm 径）にし，アルミを標準試料として，横に並べた金ターゲットの衝撃波速度と同時計測を行い，状態方程式テーブル SESAME [4]の結果と10％程度の誤差で一致していることを示し，こうしたレーザー衝撃波実験が実際に状態方程式研究に使用可能であることを示した．

近年の実験では，L. DaSilva ら[5]が慣性核融合の燃料である液体重水素の状態をレーザー衝撃波を用いて調べた結果がまず注目に値する．Fig. 4.3-6 に示すように，NOVA レーザーを用い，圧力領域 1－2 Mbar においては，従来考えられていた以上に重水素が圧縮された．圧縮密度は，1 g/cm^3 を超えることが判明し，理想気体における強い衝撃波による到達密度限界（一次元の場合元の密度の 4 倍）を超えている．これは，水素分子が解離することで内部エネルギーが減少し圧縮性が良くなることに起因していると説明している．図では，横軸に密度，縦軸に圧力をとり，実験データ点（■）とともに分子解離モデルによる予測曲線（点線）が示されている．これまでのガス銃によるデータ（◇）も 0.2 Mbar 程度まで示されている．SESAME（実線）の予測とは，異なることが明らかである．この実験結果は，慣性核融合用のターゲット設計にも重要な関わりを持つ．現在，進行中の米国の国家プロジェクト "National Ignition Facility (NIF)" は，2007年の点火，利得実験をめざしている．ここで使用されるターゲット設計において DaSilva 等の結果を用いると従来の出力より核融合出力が 2 倍（一次元シミュレーション）から 9 倍（二次元シミュレーション）改善されるという結果が示された[6]．

R. Cauble ら[7]は，レーザーの代わりに，X 線を衝撃波ドライバーに用い，薄い金フォイルを 70 km/s の速度で飛翔させ，金フォイルにぶつけるフォイル衝撃法により 100 ps 程度の時間内で 750 Mbar の圧力発生を報告した．さらに，このフォイル衝撃法において衝撃波インピーダンス整合の原理[8]を応用した提案に基づき[9]，田中ら[10]は，比較的小型のレーザーで実験を実施した．レーザービームの空間プロファイルを，通常こうした実験で使用されるような特殊な技法でレーザー強度の均一化をはかることはしなかったが，安定にレーザー集光スポット直径 500 μm で厚み 0.5 μm の Ta フォイルを 10 km/s 以上の飛翔速度まで加速することができた．Fig. 4.3-7 には，この実験で得られたデータを示す．図は，横軸空間，縦軸時間を示し，加速された Ta フォイルが速度計測用のガラスステップに衝突し，発光したところを可視ストリークカメラで捉えたものである．こうした手法が確立されれば，高い精度でかつ，高速電子などの前駆加熱の影響を極力抑えたレーザー衝撃波法による状態方程式研究が可能となる．

また，理論研究の最近の進展は，一丸ら[11]による金属水素と Pychnonuclear Fusion の提案が挙げられる．一連の論文の中で，金属水素，非金属水素の相転位に関わる自由エネルギー，クーロンエネルギーの収支から木星の過剰赤外輻射の 5 分の 1 程度が説明できるとしている．また，金属水素を生成すれば，pD 反応（陽子－重水素）による反応が支配的となり，これまで考えられていたより，20－30桁以上の核融合反応率増倍が可能となる．こうした反応は，白色わい星内の核反応で起こっていると考えられる．こうした金属水素の生成は，地球上でも断熱限界ぎりぎりに圧力を上げていき，密度 100 g/cm^3，温度 1,000 K 以下の状態を重水素で生成することにより可能であるという提案である．そこで示されている水素の相図を Fig. 4.3-8 に示す．圧力表示のある破線は等圧線を，$<Z>$は電離度を，α_d は分子の解離度を，C_{GL} は気液相転位の臨界点をそれぞれ表す．

今後の研究の動向としては，慣性核融合研究からは，重水素の状態方程式データを数 Mbar 以上の領域で取得していくことが求められている．さらに一丸らの提唱する超高密度領域の研究へ拡張することも考えられる．レーザー飛翔体加速でも如何にして飛翔体そのものの温度を上げずに（できれば固体状態のまま）飛翔させ，被対象物質に衝撃をあたえるかということは，より精度の高い状態方程式研究には欠かせない．また，こうした温度制御されたフォイルの加速研究は，慣性核融合研究の燃料球爆縮過程でも求められていることであり，宇宙物理，慣性核融合，高密度プラズマにおける状態方程式研究は，お互いに密接に絡み合っている．今後は，こうした複数の分野からの研究者がお互いの興味を背景にして，共通する部分のうちそれぞれが得意とするところを担当しながら数年ごとに重点テーマ設定を行い，複合的に進める新しい研究手法が望まれる．

（田中和夫）

参考文献

[1] M. Yoshida *et al.*, Appl. Phys. Lett. **73**, 1 (1998).
[2] M. Koenig *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 2260 (1995).
[3] R.M. Stevenson *et al.*, Opt. Lett. **19**, 363 (1994)
[4] T-4 Handbook of Material Properties Data Bases, LA-10160-MS, UC-34, Los Alamos National Laboratory, Nov. 1984 *(unpublished).*
[5] L. DaSilva *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78**, 483 (1997).
[6] T.R. Dittrich *et al.*, Phys. Plasmas **6**, 2164 (1999).
[7] R. Cauble *et al.*, Phys. Rev. Lett. **70**, 2102 (1993).
[8] *High Velocity Impact Phenomena*, edited by R. Kinslow (Academic Press, New York, 1970).
[9] M. Yoshida, *private communication.*
[10] K.A. Tanaka *et al.*, *submitted to* Phys. Plasmas.
[11] 一丸節夫：物理学会誌 **53**, 2, 93 (1998) およびそこに上げられている参考文献．；S. Ichimaru *et al.*, Phy. Plasmas **6** 2649 (1999).