

§ 2. 仁科記念賞

「仁科記念賞は、原子物理学およびその応用の分野できわめて優秀な成果をおさめた研究者に贈るものであります。この賞の特色は、功成り名遂げた大先輩に贈られるのではなく、むしろこれからの活躍を大いに期待される若い研究者に贈られる点にあります。」（“NKZ” 創刊号（1962）43ページより）

これまでの受賞者とその業績及び当時の所属を巻末に掲げます。

2006年度の仁科記念賞の受賞者と受賞業績を以下に紹介します。

2006年度 第52回 仁科記念賞 受賞者業績紹介

研究題目 レーザーを用いたプラズマ電子加速の先駆的研究

受賞者 田島 俊樹

（日本原子力研究開発機構関西光科学研究所長）



極めて高いエネルギーに加速された粒子を用いて、物質の極微の構造とそれを司る根源の法則が探求できる。現代の物理学や自然科学を展開させ、より微細な世界で働く力の法則を明らかにしてきたものは、科学者の洞察力と共に、高いエネルギーへと電子や陽子を加速することを可能にした科学的技術的發展でもあった。これまで次々と大型の加速器が世界中で作られてきた。更に根元的な素粒子の世界を解明し宇宙の起源の理解も進めるべく、今日では数1000GeV（注1）を超える加速器が建設されている。加えて、従来の方式を凌駕できる新しい加速器技術の開発も進められている。

エネルギーを高めるため加速器が大型化してしまう理由の一つは、加速電場勾配に限界があるためである。ことに線形加速器の場合、装置の規模はもろに加速勾配

に依存する。例えば電子を加速するとして、 $-E$ (V/m) の加速電場が L (m) 続くと、電子のエネルギーは eEL (eV) になる。加速勾配 E が高ければ高いほど装置は小さくできる。残念ながら金属電極を用いる現在の方法には絶縁破壊に起因する限界があり、加速勾配は100MeV/m 程度以下（実用化されているものは高々数10MeV/m 程度）である。それよりも強い勾配（1 GeV/m やそれ以上）を実現するには、固体電極の加速管ではなくプラズマを使う以外無い。（参考文献 [1]）

プラズマは電離したイオンと電子からなり、全体としては電氣的に中性であるが、その中に「電子プラズマ波」と呼ばれる、電荷が正負に振動する波が立つ（注2）。細かく見れば強い電場がプラズマの中に立っている。もしこの強い電場をプラズマの中で進行するように作り出し、加速させる電子をうまくそれに波乗りさせて長い距離を加速し続けることができれば、加速勾配の高い、夢の加速器が出来るだろう。

田島博士は1970年代の後半、アメリカの Dawson 博士と共同でプラズマによる電子の加速の可能性に取り組み、プラズマの中にレーザーパルスを使って強いプラズマ波動を立てる方法を考察し、計算機シミュレーションを駆使して、その波動によって電子を高エネルギーに加速することが出来ることを示した。（参考文献[2]。）すなわち、田島博士達はレーザー光が強度の強い短いパルスであることに着目し、(1)プラズマ振動の周期（の半分）より短いレーザーパルスをプラズマに入射すると、(2)電子がレーザー光に揺り動かされ、大振幅の（電場 E の強い）プラズマ振動が生み出されること、(3)生み出された波はバラバラにこわれてしまうのではなくそそり立つ波となって光速に近い速度で伝わっていくこと、(4)光速に近い高エネルギーの電子は波に乗り続ける（加速され続ける）ことが出来る、という、プラズマでの電子加速の鍵となる機構を明らかにした。船が水面を速く進むとき、かき分けられた水の変動が整った航跡を作って進むように、（相対性原理のため光速を超えられないので、）レーザー光で作られたプラズマ中の加速電場はそそり立つ波の形を保つ。それを「航跡場」と呼んだ。（図1を参照。）

基本的な概念と可能性を明示したこの研究が契機になり、プラズマの中にレーザーを使って強いプラズマ波動を立てる様々な方法や電子を長く加速し続ける方法が

広く世界中で研究され、レーザーを用いたプラズマ電子加速の方法が発展した。航跡場を作るためにレーザーではなく粒子ビームを入射する方法もあり、そうした研究も活性化した。

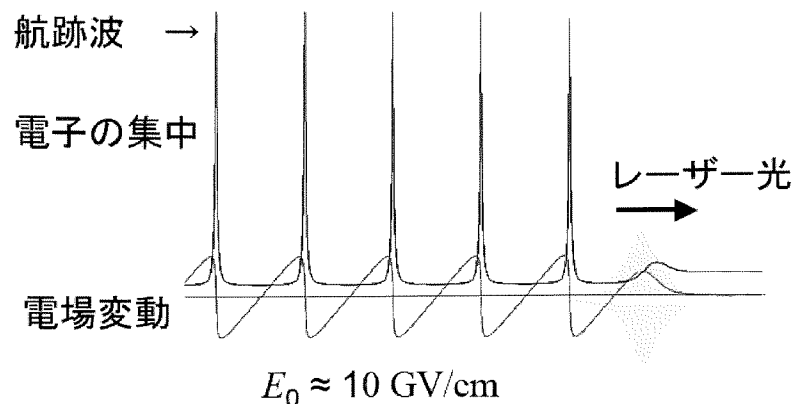


図1 レーザーによるプラズマの航跡波の励起。短いパルスのレーザーをプラズマに入射。右に進んでいるレーザー光が前面の電子を押しの後面にくぼみをつくるので、レーザー光と共に進む電場変動を作る。レーザー光が通り過ぎた後には、切り立った形のプラズマ波が生まれる。局所的に極めて強い電場が出来それが光速に近いスピードで伝わる。(註3)

プラズマの航跡場を使う原理が実際の加速実験の成功に結びつくには、強力で短いパルスのレーザーが作り出されるのを待つ必要があった[3]。今日の進展は多数の知恵と工夫の結晶であるが、そのなかから一つの鍵を挙げれば Chirped Pulse Amplification 法 (CPA 法) といって、レーザーのパルスを短く高出力にする方法 (註4) の実用化があり、その採用によって準単色の加速エネルギーが実現された[4]。最近では、レーザーパルスは100fs (10^{-13} 秒) 以下に短く、強度は10TW 以上に高くなり、プラズマの電子加速の実験では密度 $10^{19}/\text{cm}^3$ のプラズマの中で 10^9 個ほどの多量の電子が100MeV 級の高エネルギーに加速されている[5]。入射されたレーザー光パルスのエネルギーの10%近くが電子の加速に転換されており、高い

効率が得られている。(航跡場を使う方法全体を見渡すと、1 GeV を超えた電子の加速も報告されている[6])。最近の10年間に加速度的に成果が高まってきたプラズマを用いた粒子加速研究では、レーザーを入射した媒質での光学的振る舞いに相対論的効果が直接現れ、相対論的光学の進歩が重要であった。田島博士はプラズマのシミュレーション研究やレーザーを入射したプラズマの相対論光学についても指導的な役割を果たしてきた[7]。

プラズマを使った夢の加速器の研究は、GeV 級の電子の加速を実証し、長い道のりのなかで新しい局面に達した。(図2を参照。) 今後は実際の加速器に必要な条件(エネルギーが更に高くなるか、十分多数の電子を加速できるか、エネルギーを純化し、ビームを精度良く絞ることが出来るかなど)をクリアするためのチャレンジに取り組む。また、ガン治療などに代表されるように電子ビームは様々な用途の未来が探求され、プラズマ加速の長所を活かす努力も傾注されるだろう。田島博士らによる研究[2]は、これらの研究の出発点としてプラズマ航跡場という本質的な鍵を示した研究であり、現在世界で活発にしのぎを削る研究レースで不動の地位を占めている。

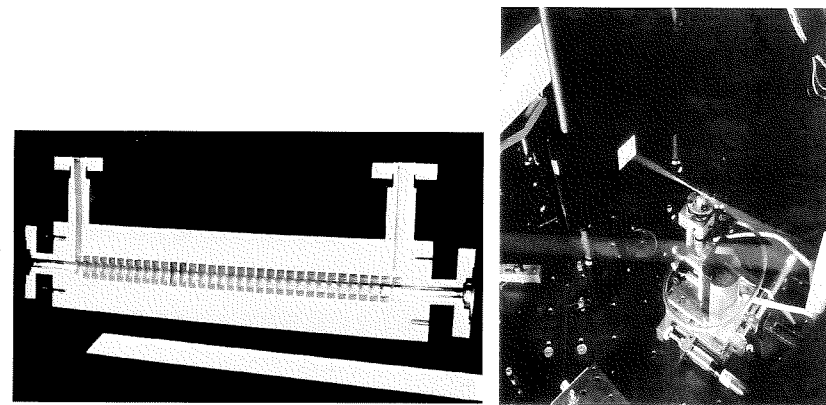


図2 マイクロ波を使う通常の加速器の内部 (進行波型電子リニアック加速管の例)(左) とレーザーを使うプラズマ電子加速の実験装置 (ミシガン大学の例)(右)

参考文献

- [1] この間の事情を説明した文献としては、例えば
 西田靖：「プラズマを利用する粒子加速器」日本物理学会誌48巻（1993）173.
 中島一久：「超高強度場科学の最前線—レーザー高エネルギーの可能性—」
 日本物理学会誌56巻（2001）667
- [2] T. Tajima and J. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43, 267 (1979)
- [3] K. Nakajima et al., Phys. Rev. Lett. 74, 4428 (1995)
- [4] E. Miura et al., App. Phys. Lett. 86, 251501 (2005)
- [5] S. Mangles, et al., Nature London 431, 535 (2004),
 C. Geddes, et al., Nature London 431, 538 (2004),
 J. Faure, et al., Nature London 431, 541 (2004).
- [6] W. Leemans et al., Nature Phys. 2696 (2006)
- [7] G. A. Mourou, T. Tajima, S. V. Bulanov, Reviews of Modern Physics 78, 309 (2006).

補足説明

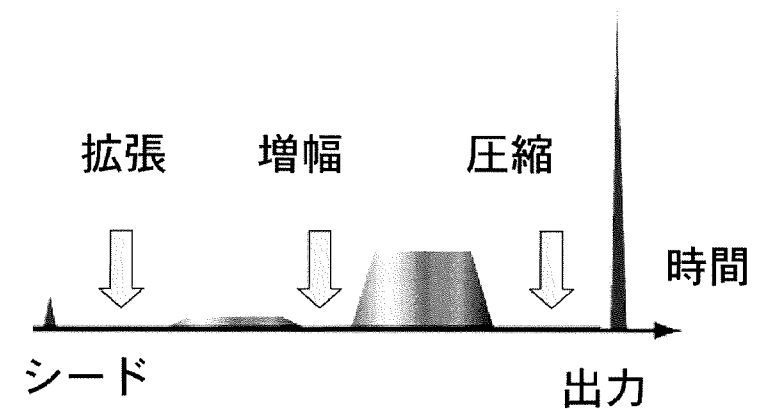
註1 eV は物理や化学で使われるエネルギーを測る単位（一つの電子が1Vの電位差で得るエネルギー）。常温下では、約 $1/40$ eVのエネルギーが配分される。GeV（ギガeV）は 10^9 eVのこと。あとで出てくるT（テラ）は 10^{12} をさす。

註2 プラズマ波は電子の密度の粗密波であり、電位の正負を伴っている。電子はイオンよりずっと軽いので、プラズマの中に電位の変動があると、イオンは動かず、電子だけ電位のマイナスの所からプラスの所へと動き出す。電子が集まるとそこは電位が減っていくが（電子の減ったところは正に向かう）、電子にも重さがあるのでいったん動き出すと電位がゼロになっても止まらず、電子の運動を止めるくらい電位が負になるまで電子が集まる。するとその反発力で逆の運動が起き、振動する。

註3 図1は、Tajima & Dawsonの論文[2]で示されたシミュレーション結果を、今日の計算機能力でより大規模に再現し描き直したself-consistentな非線型計算の結果。パラメータは以下のとおり：

- (1) レーザー強度： $\sim 10^{18}$ W/cm²
- (2) プラズマ密度： $\sim 10^{19}$ /cm³
- (3) 航跡場強度： ~ 10 GV/cm
- (4) レーザーパルス長： ~ 15 fs (fsは 10^{-15} 秒)

註4 Chirped Pulse Amplification法（CPA法）はレーザー強度を高めパルス長を制御する方法。下図に示すように、小振幅のレーザーパルスを分光器（プリズムの様な働き）で分け時間方向に引き延ばしたパルスにする。スペクトルに分けるのでパルスの頭と尻尾で振動数が変わるようなパルスになる。そのパルスを増幅し、強度を上げた後、スペクトルを合成し、短い（高強度の）レーザーパルスを作る。



研究題目 ランダムスピンの系における「西森線」の発見

受賞者 西森 秀稔（東京工業大学大学院理工学研究科教授）



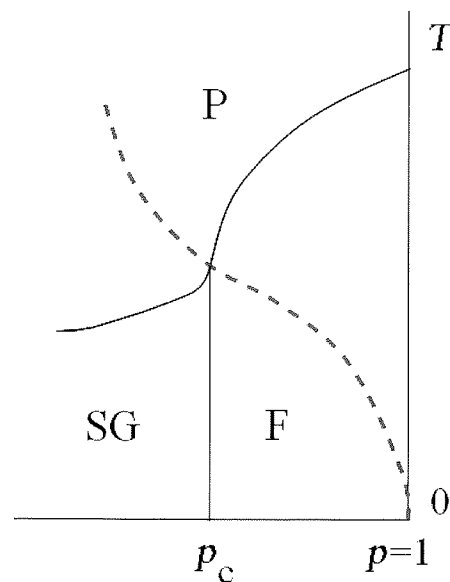
平衡統計力学の近年の進展をふり返ってみると、1970年代までのスケーリング理論・くりこみ群の発展により、空間的に一様な系における相転移・臨界現象という重要な問題には一通りの解答が得られたと考えられる。

その後は、空間的に非一様な系で生じる非自明な現象の研究が一つの中心課題となった。ランダムスピン系、即ち、ランダムな相互作用をもつスピン系は、空間的に非一様な系の典型的な問題である。この問題は、定義が簡単であるにもかかわらず、理論的・数理的にきわめて難しく、また、物理的にきわめて深い内容をもっている。

1980年代、西森氏は、ランダムスピン系の問題のもつ局所ゲージ変換についての対称性を徹底的に吟味した。そして、系のパラメタが特殊な条件を満たせば、ランダム系に特有の平均の取り扱いに伴う困難が消失し、実質的に、一種類のランダムさだけがある簡単な問題に還元する事を発見した [文献1]。例えば、となり合うスピン間の結合が確率 p および $(1-p)$ で強磁性的又は反強磁性的になっているモデルでは、この p と温度 T を両軸とする相図上のある曲線上でこのようなことが起こる。この曲線は「西森線」の名で呼ばれている（左図の破線）。物理的には、この線はランダムな効果を2単位系の熱的效果すなわち温度に換算した関係を表すものであり、この線より上では熱的ゆらぎの方が大きく、下ではランダムな効果が大きい。図中でPは常磁性相、Fは強磁性相、SGはスピングラス相を表す。

西森氏は、西森線上では、一般次元のイジング型ランダムスピン系の内部エネルギーを厳密に計算できることを示し、さらに、いくつかの量についての厳密な不等式を導いた [文献1,2]。三次元を含む一般次元で、相互作用するスピン系についてこのような厳密な結果が得られたこと自体大変興味深い。

西森線は、ランダムスピン系の問題でもっとも興味のある「スピングラス相」の中には入り込まない。これによって、スピングラス相の存在する範囲についての厳



密な制限が得られる。さらに、進んだ議論により、西森線はスピングラス相、強磁性相、常磁性相の三相が接する多重臨界点を通過することがわかっている。これによって、スピングラス系の相図や多重臨界点の近傍での臨界現象について、多くの厳密な情報が得られる [文献1]。

西森線の議論は、イジング型以外のランダムスピン系に拡張され、また、動的な問題にも拡張されている。

近年、西森線は、情報理論においても重要な役割を果たすことがわかってきた。「雑音のある回線を通して如何に情報を送るか？」という誤り訂正符号 (error correcting codes) の問題は、情報理論の創始者シャノン以来の重要な課題であるが、この問題を解決するために、ランダムスピン系が有用であることがわかってきた。

簡単に言えば、送信したい情報を格子状のイジング型スピンの ± 1 で表現し、そのスピン配位が基底状態になるような相互作用の組 J をつくる。そして、もとの情報を送る代わりに、この相互作用を送信する。受け手の側では、受信した J を持つスピンモデルを作り、その基底状態を求めれば、各スピンの $+1$ 又は -1 の値が送るべき情報を再現する。この方法の方が ± 1 の情報を直接送るより通信のエラーによる誤りを修復しやすいことが示されている。この問題に関して、西森氏は、基底状態を使うよりも西森線上の平衡状態を使う方がより通信エラーの影響を少なく出来ることを示した [文献3]。さらに、西森氏は、上記の基礎的な研究をさらに発展させ、ランダムスピン系と西森線の特性をベースにした誤り訂正符号と画像修復のアルゴリズムを提唱している [文献4]。

以上のように、西森氏の研究は、限定されたスピン系モデルから出発して、それをスピン系の問題の中でも適用範囲を広げ、さらには情報理論にまで踏み込むという波及効果の大きなものであり、さらなる発展が期待出来る。

主要論文

- [1] H. Nishimori, Internal energy, specific heat and correlation function of the bond-random Ising model, Prog. Theor. Phys. **66** (1981) 1169.
- [2] H. Nishimori, Exact results on the Ising spin glass in finite dimensions, Prog. Theor. Phys. **76** (1986) 305.
- [3] H. Nishimori, Optimum decoding temperature for error-correcting codes, J. Phys. Soc. Jpn. **62** (1993) 2973.
- [4] H. Nishimori and K. Y. M. Wong, Statistical mechanics of image restoration and error correcting codes, Phys. Rev. E **60** (1999) 132.

研究題目 水・非晶質水の相転移・ポリアモルフィズムの
実験的研究

受賞者 三島 修

(物質・材料研究機構ナノ物質ラボ主席研究員)



結晶は、構成単位である原子や分子が並進対称をもって規則的に格子点に配置されている。温度や圧力の変化に伴って、この規則構造に変化が生じ、相転移が起きる。凝縮系の一つである非晶体（アモルファス）では、結晶と違い、構成原子・分子は決まった格子点上ではなく、乱雑に配置している。そのため、アモルファスに複数の相が存在し、それらの間で一次相転移がおきるということは、あり得ないと考えられてきた。三島氏は、水を過冷却してできる氷のアモルファスにおいて、通常の低密度状態の他に高密度状態が存在することを発見し、二つのアモルファス状態間の相転移を観測した。この事実に基づいて、結晶におけるポリモルフィズム（多形）に対応して、アモルファスには、「ポリアモルフィズム」があることを確立した。さらに、過冷却液体の水にも高密度状態と低密度状態が存在することも明らかにし、その間の「相境界線」に相当する曲線とその終端である第二臨界点の温度・圧力平面における位置を実験的に予測することに成功した。三島氏のこれらの一連の研究は、地球上至る所で重要な役割を演じている「水」の物理化学的特性についての理解を深めることに大きく寄与した。それに留まらず、アモルファス・液体の研究、特にそれらの分子シミュレーションによる研究に多大な刺激を与えてきた。

三島修氏は、1984年博士研究員としてカナダに滞在中、低温で水に圧力を加えることにより、これまで知られていなかった高密度の非晶質状態を見いだした [1]。この高密度非晶質「氷」(high density amorphous, HDA) では、既に知られていた低密度の非晶質水 (low density amorphous, LDA) とは異なる X 線散乱写真が撮影され、新しい「相」と考えるべきであることが明らかになった。帰国後の実験的研究によって、低密度非晶質 (LDA) に更に圧力を加えていくとある圧力で高密度非晶質 (HDA) に転移し、逆に HDA を減圧していくと LDA に転移することを

明らかにした。図1は、温度135Kにおけるその様子を示している。加圧の場合は、圧力0.35GPa（1GPaは1万気圧）付近で、減圧の場合は0.05GPa付近で、約2割程度の体積変化が観測されている。磁性体の相転移で観測されている磁化のヒステリシスと類似したヒステリシスが、HDA-LDAの転移では圧力に対する体積変化において存在することを図1は見事に示している。これらの一連の実験によって、単一成分の物質の非晶質という乱れた構造にも多形があること（ポリアモルフィズム）を疑問の余地なく示すことに成功した[1-4]。これらの研究は、非晶質氷のみならず、水の液体状態（過冷却液体を含む）の様々な特異な現象の理解を深め、1980年代後半以降の分子シミュレーション研究に大きな刺激を与えた[5]。

90年代に入って、三島氏はさらに、HDAとLDAそれぞれを昇温して液体（過冷却状態）にしたときにあらわれる高密度液体（high density liquid, HDL）と低密度液体（low density liquid, LDL）の実験的研究に取り組んだ。低温・高圧下では、結晶化が速やかに進行するので制御が困難な実験であり、様々な創意工夫が必要であったが、この研究の結果、液・液相転移も存在する可能性を強く示唆する結果を得ることに成功した[6]。ついで、この「液・液相転移」の境界線の位置を確定するための実験を試みた[7]。図2は、いろいろな相の重水（D₂O）氷が融解する圧力（P）と温度（T）の曲線（融解曲線）である。特徴的な現象が相IVとVの融解曲線で見いだされる。相IVでは約200Kで、相Vでは約225Kで突然融解曲線が折れ曲がっている。三島氏は、この折れ曲がり点が過冷却低密度液体（LDL）と高密度液体（HDL）の境界（「液・液相転移」）にあるとした。相IVとVに対して相IIIでは融解曲線は低圧に至るまで折れ曲がりが見いだされず滑らかな曲線となっている。このことは液・液相転移の境界がP~0.03GPa、T~230K付近で消えていることを示唆している。三島氏はこれから臨界点（critical point）の存在を主張している。この解析については、研究者間でまだ議論があるようであるが、これらの観測はHDLとLDL状態という二つの過冷却液体状態の「水」の存在を示している実験結果といえる。新たな「水の不思議」の発見とも言える。

三島氏によるこれら一連の実験的研究は、その後の非晶質の多形の研究に大きな影響を与え、シリコン、リン、シリカや炭素などの純粋物質の液・液相転移を含む

ポリアモルフィズムの研究を触発・促進し、新しいアモルファス・液体像を生む端緒を切り開くことになった。単一の無定形物質である「水」に「高密度水素結合ネットワーク構造」と「低密度水素結合ネットワーク構造」という二つの構造が存在することは、それまでの我々の常識を覆すものであった。三島氏のポリアモルフィズムの研究は他の物質に遥かに先駆けておこなわれ、初期の主要な研究成果である1984年と1985年の論文[1,2]の年度毎の引用数（Citation Index）は、発表当時少なかったが、その後ほぼ単調に20年以上を経た今日まで増え続けている。

氷に圧力をかけると融解することは、水と氷の相境界線の傾きが通常の物質とは異なり負であるためである。この延長として、氷Iの結晶の圧力誘起非晶質化の発見は位置づけられる。これが高密度の非晶質氷の発見につながるとともに、多くの研究グループによる圧力誘起非晶質化のメカニズムについての研究の駆動力となり、さらに国内外の理論、実験グループの研究を加速し、そこから液体やガラスの新しい見方が生まれた。

水のポリアモルフィズムの発見は、水の不思議な現象を、新規な二状態モデルによって統一的に説明しようとする研究の流れの発端となった。それにより、水の物理化学的特性、とりわけ長年謎であった純水の過冷却状態における比熱と等温圧縮率の発散的挙動や水溶液のガラス化について、理解を深めることに大きな寄与した。それに留まらず、それらの分子シミュレーションによる水と水溶液の研究に多大な刺激を与え、相補的な役割をも果たしてきた。これらの業績は、仁科記念賞に値する。

主要論文

- [1] O. Mishima, L. D. Calvert and E. Whalley, Nature, 310, 393 (1984), 'Melting' ice I at 77K and 10kbar: a new method of making amorphous solids.
- [2] O. Mishima, L. D. Calvert and E. Whalley, Nature, 314, 76 (1985), An apparently first-order transition between two amorphous phases of ice induced by pressure.
- [3] O. Mishima, K. Takemura and K. Aoki, Science, 254, 406 (1991), Visual

observation of the amorphous-amorphous transition in H_2O under pressure.

- [4] O. Mishima, J. Chem. Phys., 100, 5910 (1994), Reversible first-order transition between two H_2O amorphs at $\sim 0.2 \text{ GPa}$ and $\sim 135 \text{ K}$.
- [5] O. Mishima and H.E. Stanley, Nature, 396, 329 (1998), Relationship between liquid, supercooled and glassy water.
- [6] O. Mishima and H.E. Stanley, Nature, 392, 164 (1998), Decompression-induced melting of ice IV and the liquid-liquid transition in water.
- [7] O. Mishima, Phys. Rev. Lett., 85, 334 (2000), Liquid-liquid critical point in heavy water.

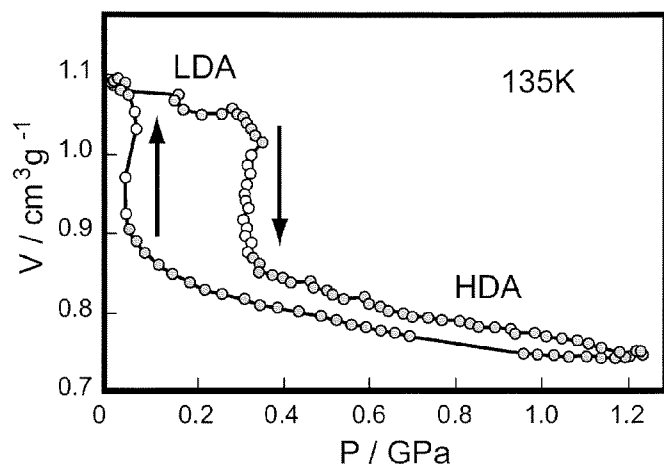


図1 約135Kの非晶質水の圧力(P)と体積(V)の関係図。低密度非晶質水(LDA)に圧力を加えていくと約0.35GPaで急激に体積が約20%小さくなり高密度非晶質水(HDA)に相転移する。HDAを減圧すると0.1GPa以下でLDAに転移する。高温では、LDAが低密度水に、HDAが高密度水になり、液・液相転移が起きると暗示された。

図2 水は低温で結晶化しやすく液・液相転移や臨界点の直接証明が難しい。氷の融解曲線からこれらの存在が間接的に暗示された。氷の結晶相はいくつか知られているが、図の圧力(P)と温度(T)の相図は重水の各結晶相の融解曲線を示す。氷IV相と氷V相の融解曲線が予想された液・液相転移線(破線, L-L transition)でそれぞれ折れ曲がり、これは低密度水(LDL)と高密度水(HDL)の違いのためと考えられた。また、氷III相の融解曲線が連続的であることから、臨界点(c.p.)が存在して液・液相境界が消えたと推測された。(PNPはpossible newphaseを表す。)

