

報告番号 甲 第 3804 号

ノンウォーターアイスのレオロジー

博士論文
1997年

山下靖幸
Yasiyuki YAMASHITA

①

ノンウォーターアイスのレオロジー

博士論文
Doctoral Thesis

山下靖幸
Yasiyuki YAMASHITA

名古屋大学理学部地球惑星科学科
Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University

目次

1. はじめに～研究の背景～

- 1.1 太陽系に存在する「氷」
- 1.2 地上からの赤外分光観測
- 1.3 惑星探査機による観測
- 1.4 クラスレート・ハイドレート

2. 氷衛星と Non-water Ice の物性

- 2.1 氷衛星の姿
 - 2.1.1 木星の衛星
 - 2.1.2 土星の衛星
 - 2.1.3 天王星の衛星
 - 2.1.4 海王星の衛星
 - 2.1.5 冥王星とカロン
 - 2.1.6 その他の小天体
- 2.2 Non-water Ice の物性測定
 - 2.2.1 密度
 - 2.2.2 相図
 - 2.2.3 弾性定数
 - 2.2.4 粘性率
 - 2.2.5 熱伝導度

3. 音速測定実験

- 3.1 弾性定数と衝撃発生圧力
- 3.2 超音波測定法
- 3.3 実験方法
- 3.4 試料の音速と空隙率
- 3.5 変形に関する予備実験と粘性率の見積

4. 応力緩和実験

- 4.1 Maxwell 粘弾性モデル
- 4.2 非ニュートン粘性の導入
- 4.3 実験方法
- 4.4 応力緩和曲線と非ニュートン粘性

5. 一軸圧縮変形実験

- 5.1 固体メタンの一軸圧縮実験
 - 5.1.1 実験方法
 - 5.1.2 固体メタンの変形様式
 - 5.1.3 固体メタンのレオロジー
- 5.2 固体窒素の一軸圧縮実験
 - 5.1.1 実験方法
 - 5.1.2 固体窒素の変形様式
 - 5.1.3 固体窒素のレオロジー

6. まとめ

謝辞

参考文献

1. はじめに～研究の背景～

外惑星系においては天体の主要構成物質として「氷」が卓越してくる。そのため木星以遠ではガスを主成分とする木星型惑星を除くほとんどの天体はその表面もしくは内部に「氷」が存在する。そのうち表面を「氷」で覆われている衛星を氷衛星 (Icy satellite) と呼ぶ。ただし、ここでいう「氷」とは単なる H_2O の固相である Water Ice を指すものではなく、外惑星系に多く存在する固体窒素・メタン・一酸化炭素・二酸化炭素・アンモニア等の Non-water Ice と呼ばれる物質を含めたものを考える。Non-water Ice は Volatile Ice と呼ばれることもあることから分かる通り融点が高い。そのため温度が 100 K 以下になるような外惑星系のような極低温下でも、単体もしくは Water Ice との混合物として大きな流動性をもつことも考えられ、外惑星系天体、特に氷衛星の表層環境を考える上ではそれらの物性を知ることは非常に重要である。この章では Non-water Ice についての基礎的な事柄について述べていく。

1.1 太陽系に存在する「氷」

惑星探査機ボイジャーが訪れるかなり以前から木星のガリレオ衛星はその高い反射能からその表面に Water Ice の存在が示唆されていた。その後地上からの赤外分光による観測により Water Ice の存在が確認されていた。その後、地上からの観測技術の向上・探査機による観測により太陽系の天体には Non-water Ice を含めた「氷」がほとんどの天体に存在することが分かった。それをまとめたものを表 1-1 に示す。ガリレオ衛星のような大型の天体のうちその平均密度等から内部まで氷があると考えられるガニメデやカリストではその圧力に応じた多くの相の Water Ice (図 1-1) が存在していると推定されている。エンケラダスやミランダではその表面の複雑さから表層部分が何度も融解した可能性があり、その原因として Non-water Ice もしくはクラスレート・ハイドレートの存在が示唆されている。タイタンはその大気にメタンが存在し更に地表付近の温度と圧力がメタンの三重点に近いことから固体メタンが存在すると考えられている。また天王星のリングはその反射能が土星のリングに比べて低いことからメタン及びその化合物の存在が示唆されている。クラスレート・ハイドレートについては 1.4 で詳しく述べる。トリトンと冥王星では現在まで Water Ice の存在を示す確固とした証拠は見つかっておらず、その表面は固体窒素を中心とした Non-water Ice の宝庫であると考えられる。

1.2 地上からの赤外分光観測

物質表面に様々な波長の光を当てたときの反射率を波長の関数として表したものを反射スペクトルと呼ぶ。使用波長は目的によって異なるが惑星科学の分野では赤外領域を使用することが多い。赤外吸収スペクトルは分子内の原子振動に起因するもので分子が異なればその赤外吸収スペクトルも必ず異なる。この事実を利用して赤外吸収スペクトルによって物質の同定・定性分析を行うことが出来る。ある天体からの太陽光の反射スペクトル強度を波長を関数としてプロットしたものをスペクトル反射曲線と呼び、これを実際の物質の反射スペクトルのパターンと比較することによりその天体の表面に存在する物質の種類・量を調べることが可能となる。地上からは近赤外以外の波長域では大気による吸収が大きいため、観測にはもっぱら波長 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 程度の近赤外を用いる。またどのような物質でも赤外による吸収パターンが見られるわけではなく通常窒素や酸素といった気体の二原子分子は赤外活性でないために赤外分光観測では同定することが出来ない。これに対して H_2O や CO_2 、 CH_4 といった気体分子は赤外活性で非常に強い赤外の吸収を持つ (図 1-2)。しかし、気体では赤外不活性な N_2 でも液体や固体になると赤外の吸収をもつようになる物質は多い (図 1-3)。また固体の場合は吸収スペクトルの形はその粒子サイズや温度によって変化することが知られている。ある天体の表面に複数の物質が混ざって存在している場合は、実験室でそれぞれの物質の混合比を変えたスペクトルを予め測定しておき、観測で得られたスペクトルと比較することにより物質の同定及びそれらの存在比を推定する方法が用いられる (図 1-4)。実際に天体の表層の反射スペクトルから物質を同定した例をガリレオ衛星とトリトン及び冥王星について示す (図 1-5、1-6)。またこれらの結果から求められたトリトンと冥王星表層における Non-water Ice の存在比について表 1-2 に示した。

1.3 惑星探査機による観測

アメリカ航空宇宙局 (NASA) は 1977 年 8 月 20 日にボイジャー 2 号、同年 9 月 5 日にボイジャー 1 号の 2 機の惑星探査機を相次いで打ち上げた。ボイジャー 1 号は 1979 年 3 月に同じく 2 号は同年 7 月に木星に接近し、木星本体はもちろんの事、エウロパ・ガニメデ・カリストといった氷衛星の素顔を初めて人類の前に示した (Smith et al., 1979)。更に 1980 年 11 月には 1 号が 1981 年 8 月には 2 号がそれぞれ土星に接近し、タイタンの素顔に迫った。残念ながらタイタンの厚い大気に阻まれ地上を観測することは出来なかったが、その大気の詳細な組成を調べた。またエンケラダスの奇妙な表層地形を明らかにした (Smith et al., 1981; 1982)。その後 1986 年 1 月にボイジャー 2 号は天王星に接近しミラン

ダ・アリエル・チタニアといった衛星表面に著しい地質活動の証拠が残っていることを発見した (Smith et al., 1986)。そして1989年8月に海王星に接近したボイジャー2号はトリトン表面のすばらしい画像を送ってきた (図1-7)。それから見ることの出来るトリトンの地形の特徴は、南半球で卓越している起伏のほとんどない再形成されたように見える平原と北半球に広く分布しているカンタロープと呼ばれるテレーンである (Smith et al., 1989)。カンタロープは今までの天体で見つかっていなかった極めて特徴的な地形であり、トリトンの表層を覆っている固体窒素をはじめとする Non-water Ice の物性がその地形が形成されたメカニズムを明らかにする鍵であると考えられている。

ボイジャーによる外惑星の衛星系の探査は太陽系の小天体の進化に新しい知見を与えた。例えば、潮汐加熱といった放射線核種の崩壊以外のエネルギーがいくつかの衛星の進化を考える上で重要であると考えられていたが、非常に小さな衛星であっても、その氷成分によって活発な地質活動が起こりうることがわかった。氷衛星の研究をさらに進めることで、初期の太陽系の状態と変遷や様々な状況での惑星の進化の道筋について多くのことを知ることになるであろう。しかし、氷衛星の進化について知らなければならないことはまだ多く残っている。そして氷衛星の進化を考えるときに Non-water Ice までを含めた考えた広い意味での「氷」の物性がそのための有効な手段になると考えられる。

1.4 クラスレート・ハイドレート

クラスレート・ハイドレート (Clathrate hydrate) は別名ガス・ハイドレートとも呼ばれ、 H_2O 分子によって形成されるカゴ状構造のなかに他の分子がゲストとして入ることによって安定となる water Ice の化合物である (図1-8)。クラスレート・ハイドレートの安定存在領域は water Ice よりも広く、たとえ Non-water Ice の安定領域外であっても、water Ice といった固体物質へ Non-water Ice の気相は多量に取り込まれる (図1-9)。タイタン、トリトンもしくは冥王星の表面に見られるメタンや窒素をクラスレート・ハイドレートとして内部に存在していたものが温度の上昇もしくは圧力の上昇によって分解し表面に出てきたものであるとする考えもある。また彗星にも存在しているのではないかと考えられている。しかし、現在求められている安定領域は平衡理論により求められたものであり実際の測定によるものではないため厳密な議論は困難である。クラスレート・ハイドレートは地球上では海底の堆積物中や南極の氷床等で実際に発見されている。クラスレート・ハイドレートの赤外吸収スペクトルは water Ice のものと極めて似ている (図1-10) ため地球外においてその存在を直接的に示すような観測例はまだないが、表層の Non-water Ice の起源である可能性だけでな

く、氷衛星の内部にはクラスレート・ハイドレートそのものが広く存在している可能性が高くその物性について十分な研究がなされるべきであると考える。

Planet	1.0	1.0	1.0	1.0
Mercury	0.38	0.38	0.38	0.38
Venus	0.72	0.72	0.72	0.72
Earth	1.0	1.0	1.0	1.0
Mars	0.53	0.53	0.53	0.53
Jupiter	318	318	318	318
Saturn	95	95	95	95
Uranus	46	46	46	46
Neptune	46	46	46	46
Pluto	0.047	0.047	0.047	0.047
Eris	0.047	0.047	0.047	0.047
Makemake	0.032	0.032	0.032	0.032
Haumea	0.047	0.047	0.047	0.047
Charon	0.012	0.012	0.012	0.012
Phobos	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Deimos	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
Io	1.0	1.0	1.0	1.0
Europa	0.93	0.93	0.93	0.93
Ganymede	1.31	1.31	1.31	1.31
Callisto	1.06	1.06	1.06	1.06
Iapetus	0.35	0.35	0.35	0.35
Titan	14.6	14.6	14.6	14.6
Enceladus	0.048	0.048	0.048	0.048
Mimas	0.048	0.048	0.048	0.048
Dione	0.11	0.11	0.11	0.11
Rhea	0.48	0.48	0.48	0.48
Cassini	0.95	0.95	0.95	0.95
Hyperion	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Aegle	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Telesto	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Calisto	1.06	1.06	1.06	1.06
Europa	0.93	0.93	0.93	0.93
Ganymede	1.31	1.31	1.31	1.31
Callisto	1.06	1.06	1.06	1.06
Iapetus	0.35	0.35	0.35	0.35
Titan	14.6	14.6	14.6	14.6
Enceladus	0.048	0.048	0.048	0.048
Mimas	0.048	0.048	0.048	0.048
Dione	0.11	0.11	0.11	0.11
Rhea	0.48	0.48	0.48	0.48
Cassini	0.95	0.95	0.95	0.95
Hyperion	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Aegle	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Telesto	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

Object	Radius(km)	Average density (g/cm ³)	Albedo	Varieries of ices identified or inferrerd
Io	1815	3.57	0.6	SO ₂
Europa	1569	2.97	0.6	H ₂ O(I)
Ganymede	2631	1.94	0.4	H ₂ O(I,II,V,VI,VII,amorphous in polar caps ?)
Callisto	2400	1.86	0.2	H ₂ O(I,II,V,VI,VII)
Rings of Saturne			0.2 - 0.6	H ₂ O(I,amorphous?)
Mimas	197	1.17	0.77	H ₂ O(I)
Enceladus	251	1.24	1.04	H ₂ O(I,formerly amorphous?) clathrate hydrate ? ammonia hydrate ?
Tethys	524	1.26	0.80	H ₂ O(I)
Dione	559	1.44	0.55	H ₂ O(I)
Rhea	764	1.33	0.65	H ₂ O(I,II)
Titan	2575	1.881	0.2	H ₂ O(I,II,V,VI,VII) clathrate hydrate ?
Hyperion	175*120*100		0.25	H ₂ O(I)
Iapetus	718	1.21	0.5 / 0.04	H ₂ O(I)
s10 - s17	10 - 100		0.5 - 0.9	H ₂ O(I) ?
Rings of Uranus			- 0.03	H ₂ O(I) ? modified CH ₄ ?
Miranda	235	1.35	0.22	H ₂ O(I) CH ₄ ?
Ariel	580	1.66	0.38	H ₂ O(I)
Umbriel	585	1.51	0.16	H ₂ O(I)
Titania	790	1.68	0.23	H ₂ O(I)
Oberon	760	1.58	0.20	H ₂ O(I)
Triton	1350	2.075	0.6 - 0.9	CH ₄ N ₂ CO CO ₂ H ₂ O(I) ? clathrate hydrate ?
Pluto	1145	1.84	0.612	CH ₄ N ₂ CO H ₂ O(I)? clathrate hydrate ?
Charon	642		0.424	H ₂ O(I)

表 1-1 外惑星系天体に存在する「氷」の一覧表

	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂ O
Triton	90%	0.1%	<0.1%	10%	-----
Pluto	>95%	2%	0.5%	-----	-----
Charon	-----	-----	-----	-----	>95%

表 1-2 トリトン、冥王星及びカロン表面の物質組成。トリトンについては Cruikshank et al., 1993、冥王星とカロンについては Owen et al., 1993 による地上からの赤外分光による見積。

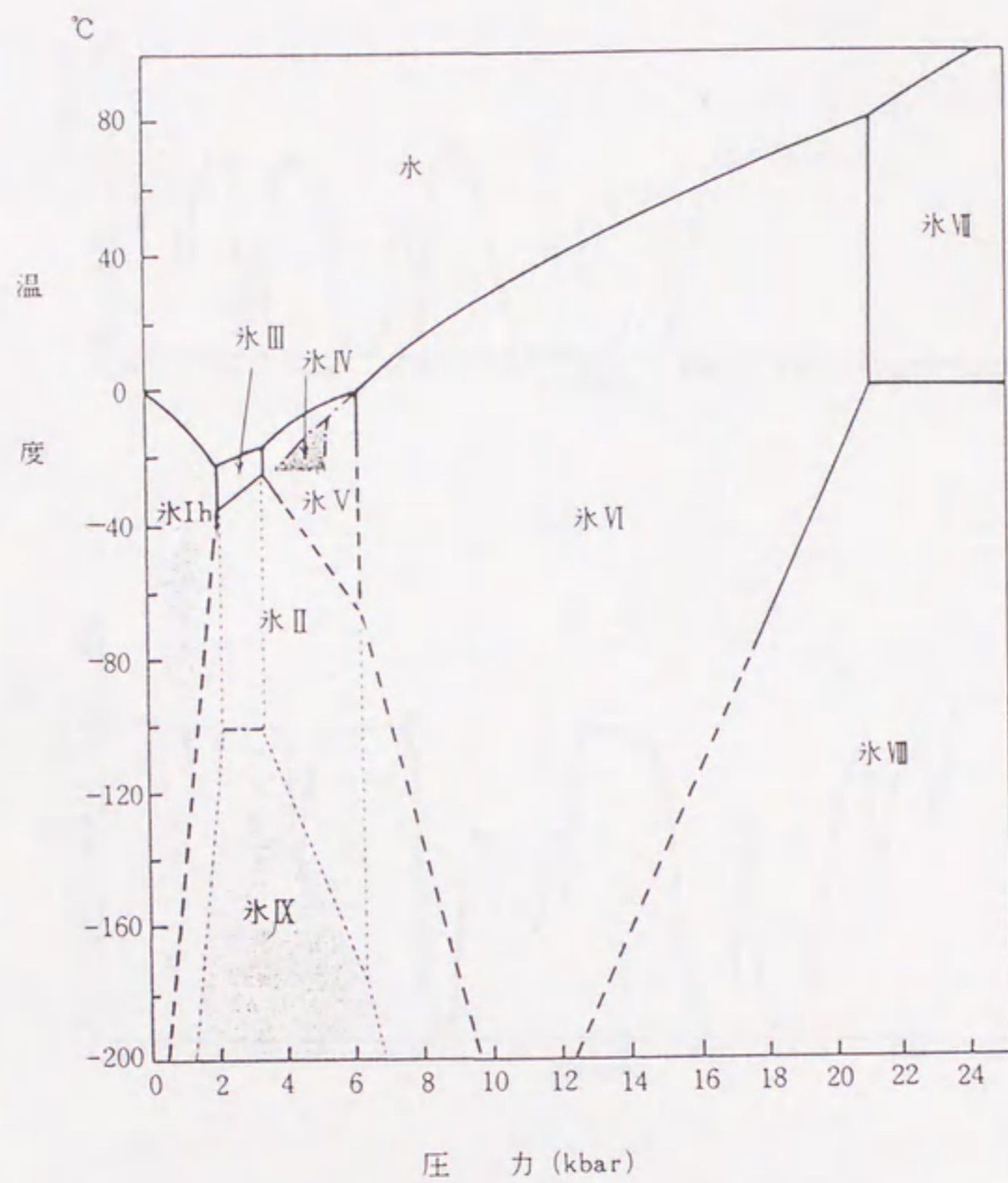


図 1-1 Water Ice の相平衡図。太い実線、点線はそれぞれ安定相境界の実測値及び推定値。前野 1988 から引用。

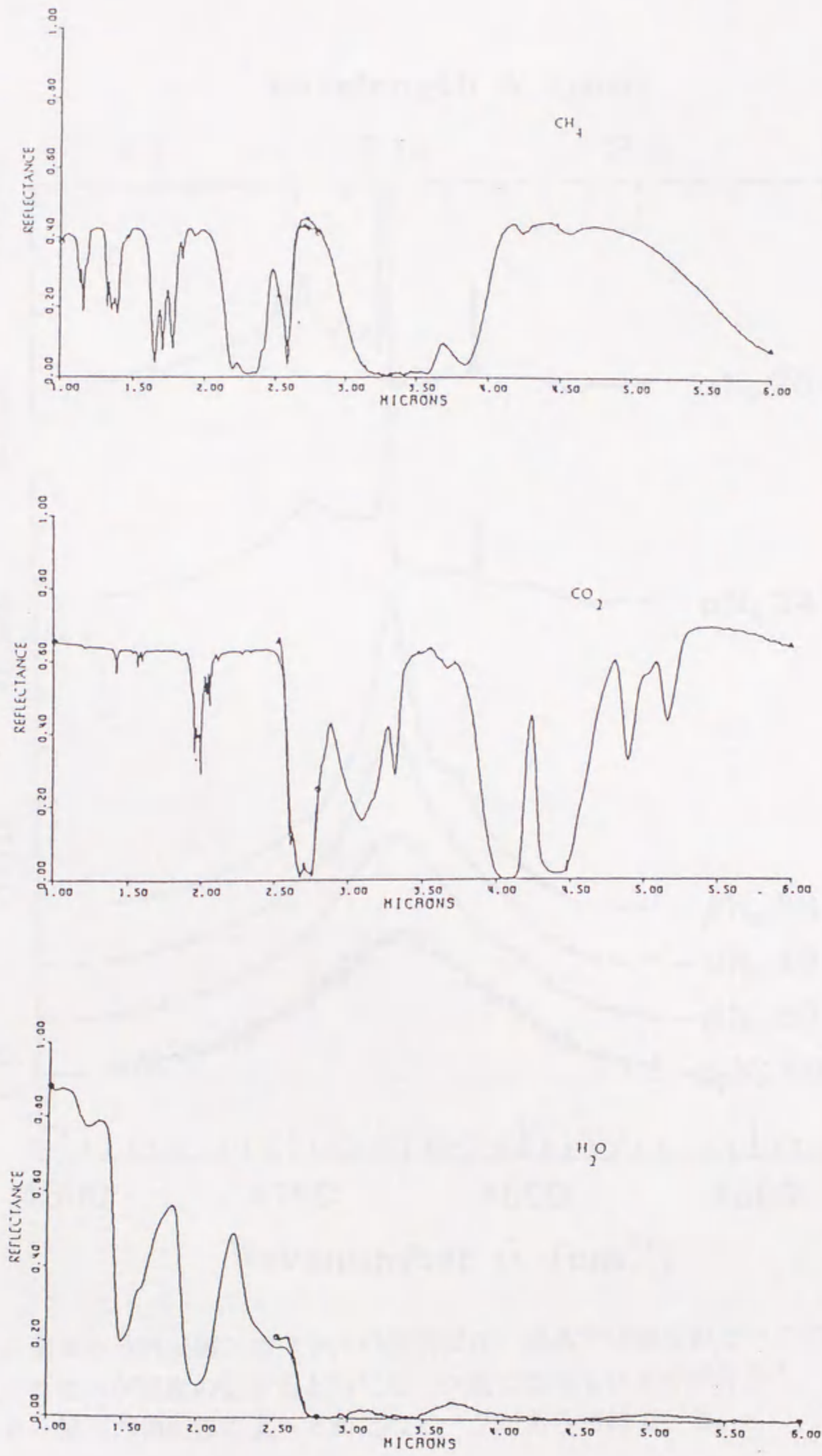


図 1-2 近赤外の反射吸収スペクトルの例。

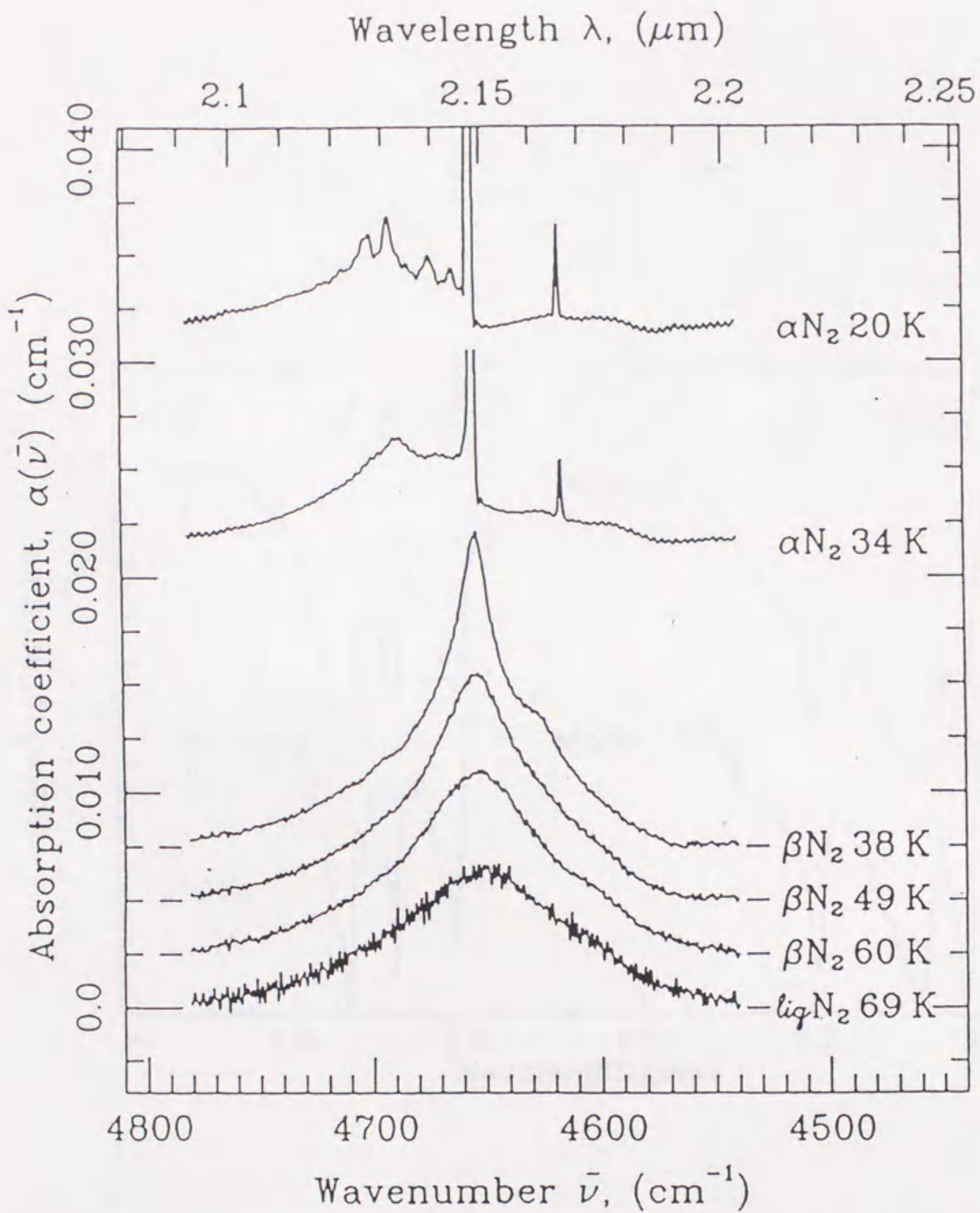


図 1-3 窒素の赤外反射スペクトルの温度変化。液体では吸収のピークはほとんど見られないが温度の低下とともにピーク鋭くなっているのが分かる。また β 相から α 相への相転移によって新たなピークがあらわれている。

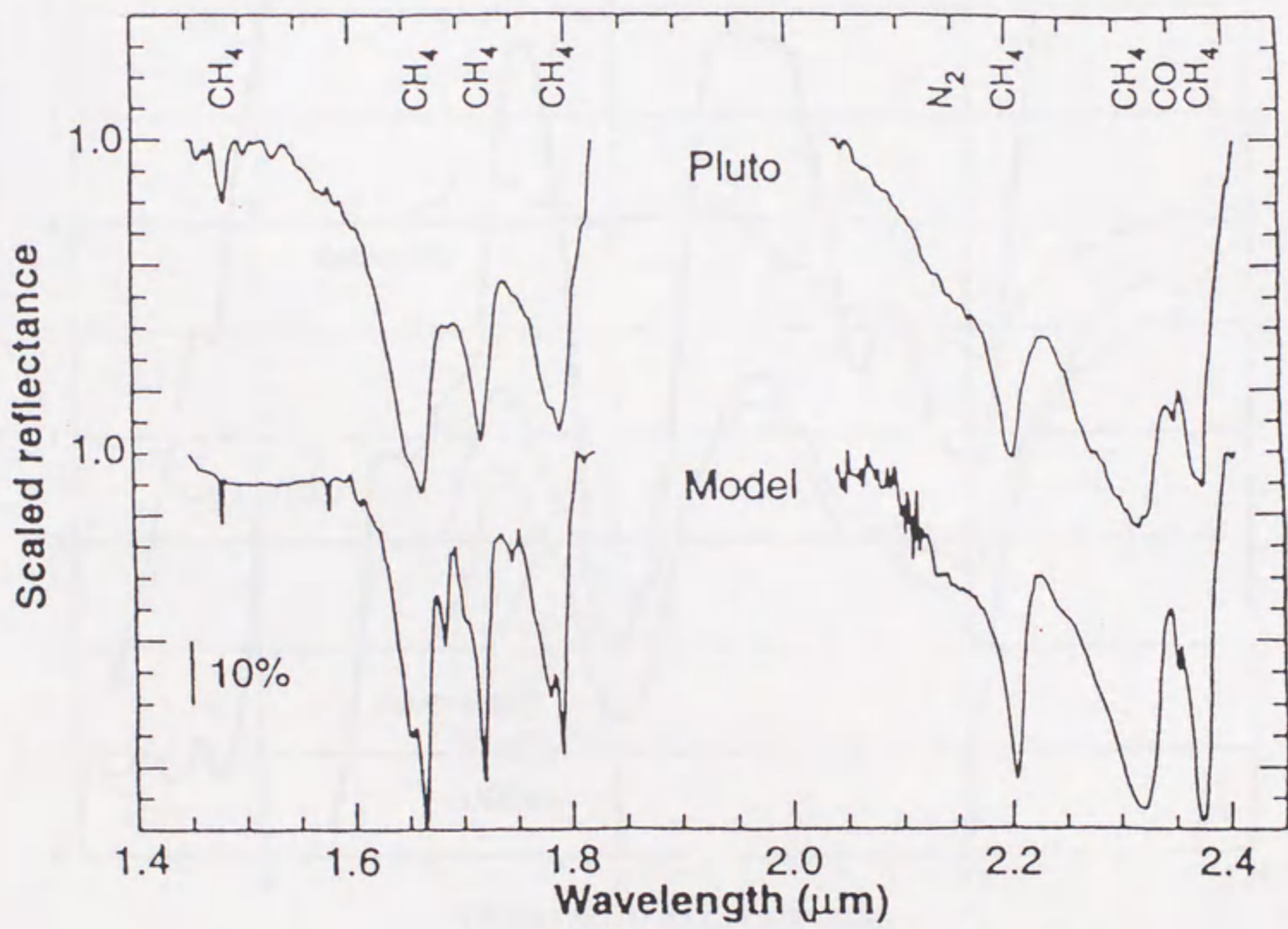


図 1-4 冥王星の実際に観測されたスペクトルと期待される分子を混合することによって得られるモデルとの比較。

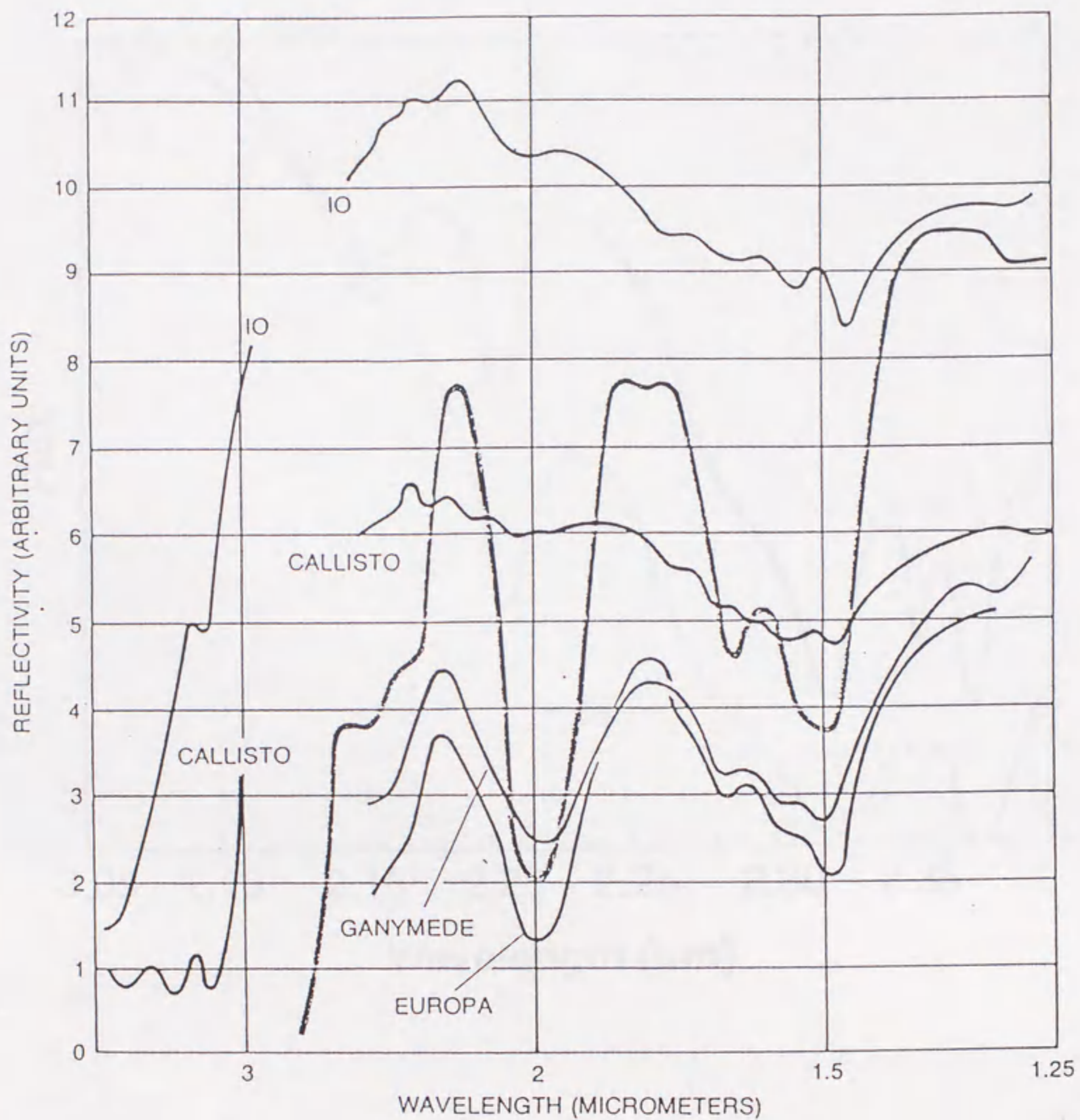


図 1-5 地上から観測されたガリレオ衛星の赤外吸収スペクトル。イオを除く 3 衛星には Water Ice の 2 μ m における典型的な吸収が見られる。

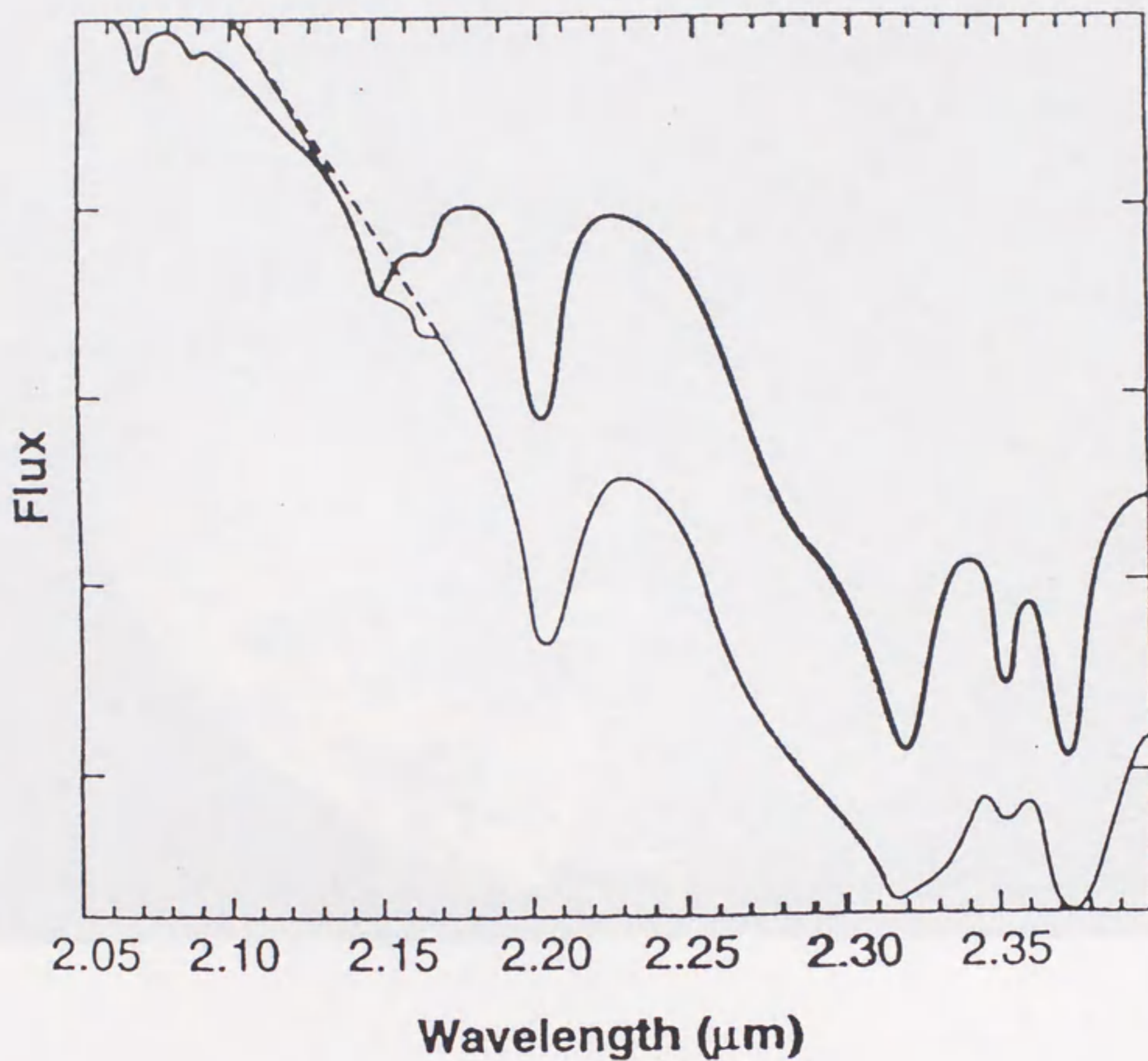


図 1-6 地上から観測からされたトリトンと冥王星の近赤外吸収スペクトル。太線がトリトン、細線が冥王星。固体窒素 (2.15 μm)、固体メタン (2.2、2.32、2.38 μm)、固体一酸化炭素 (2.35 μm) の吸収によるピークが見られる。

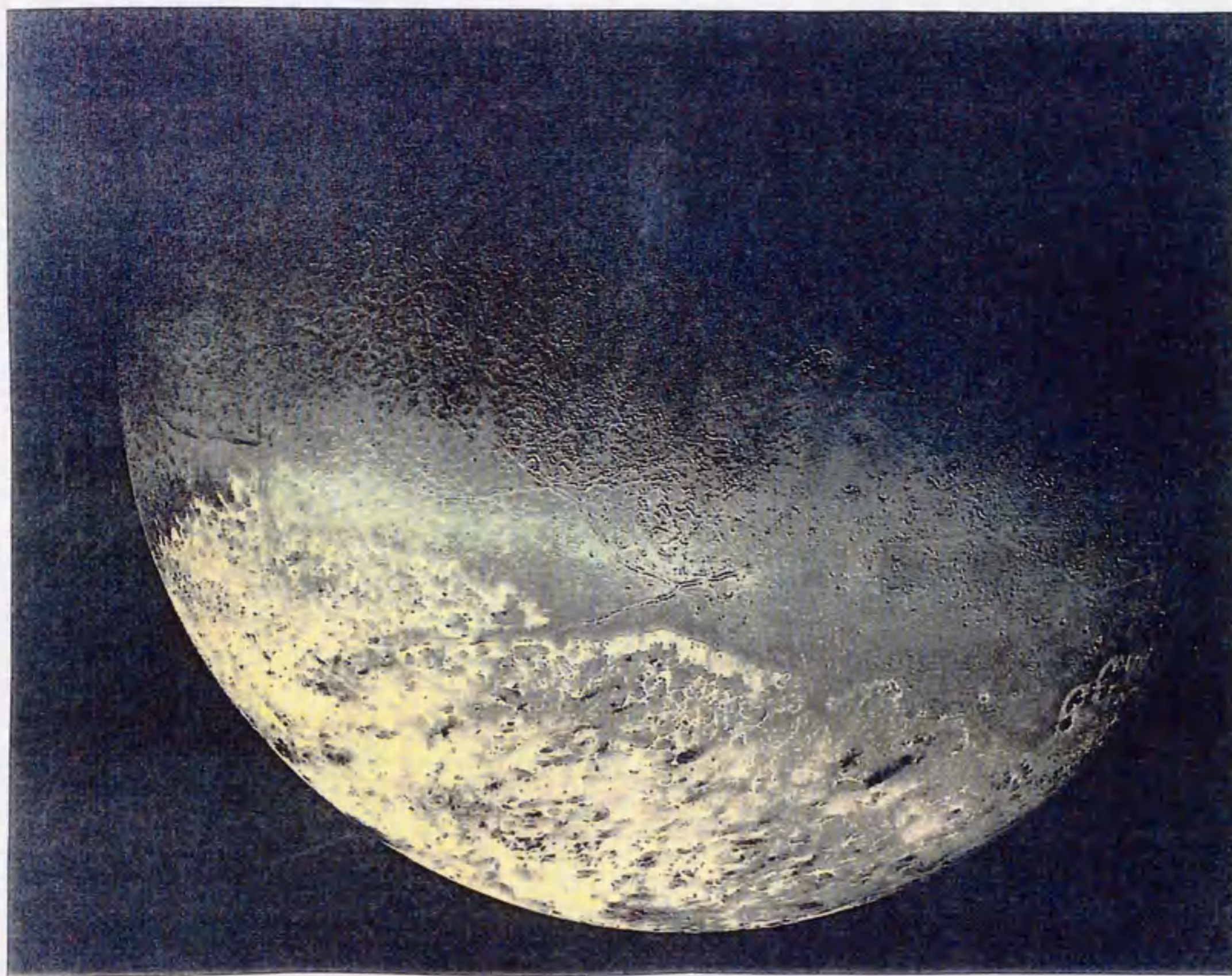


図 1-7 ヲイジャーによつて撮影されたトリトンの表面。12 枚ほどの高分解能の写真を合成したもの。

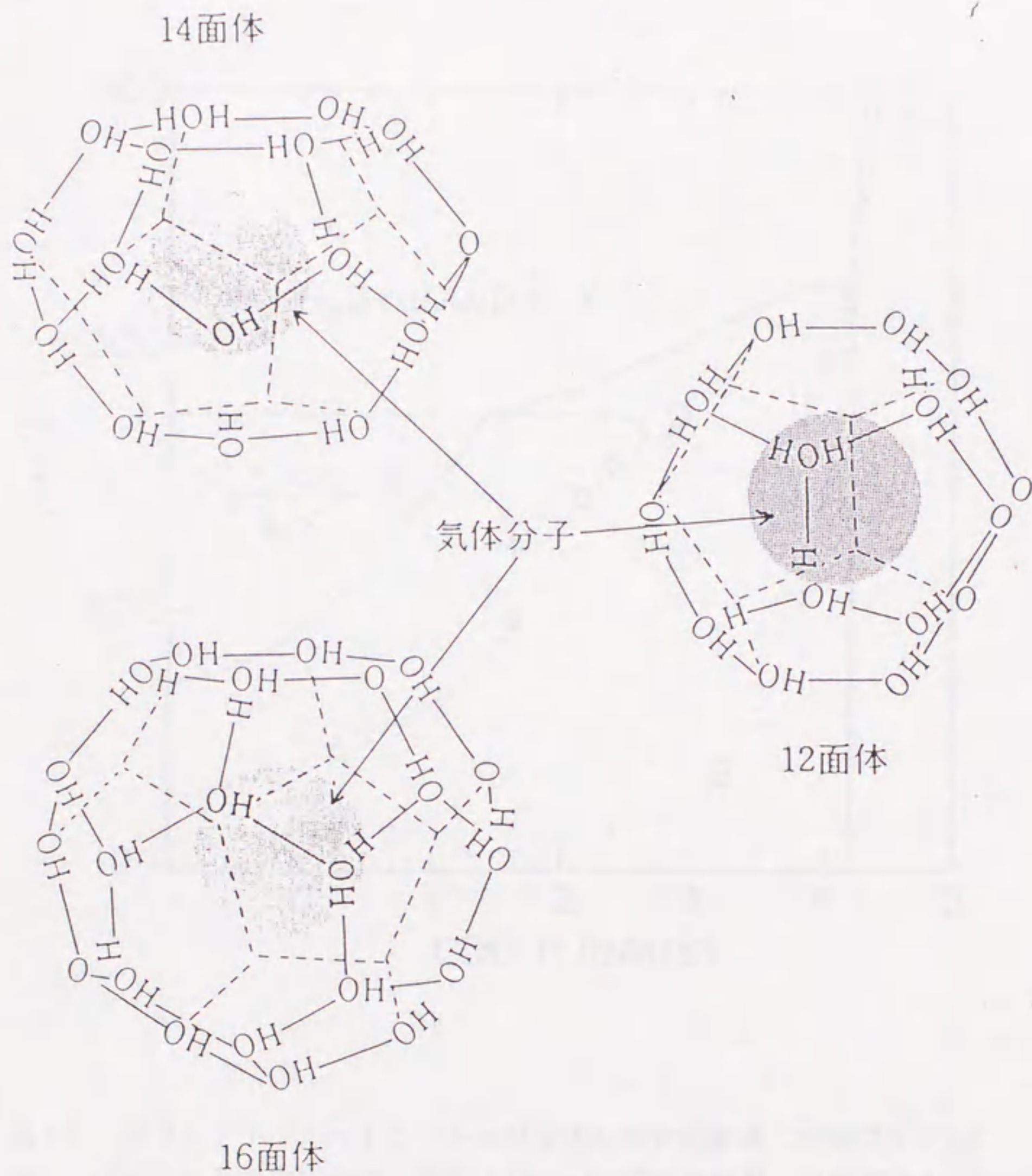


図1-8 クラスレート・ハイドレートの構造。これら三種類の籠型の構造の組み合わせによってクラスレート・ハイドレートは作られる。

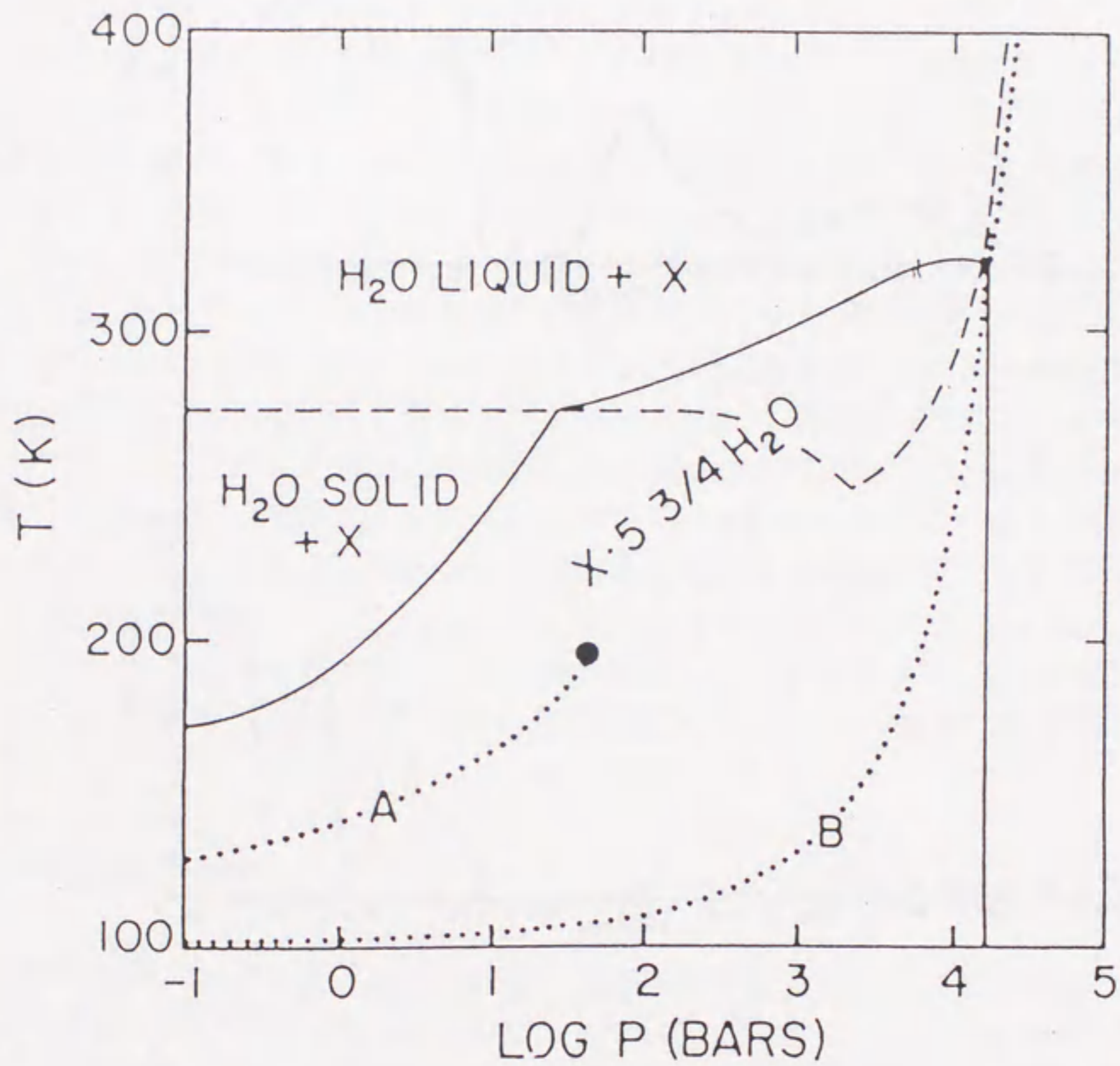


図1-9 クラスレート・ハイドレートの典型的な相安定領域。実線がクラスレート・ハイドレートの安定領域。破線は Water Ice の固液境界。点線はゲスト分子の気液境界 (A) と固液境界 (B) である。

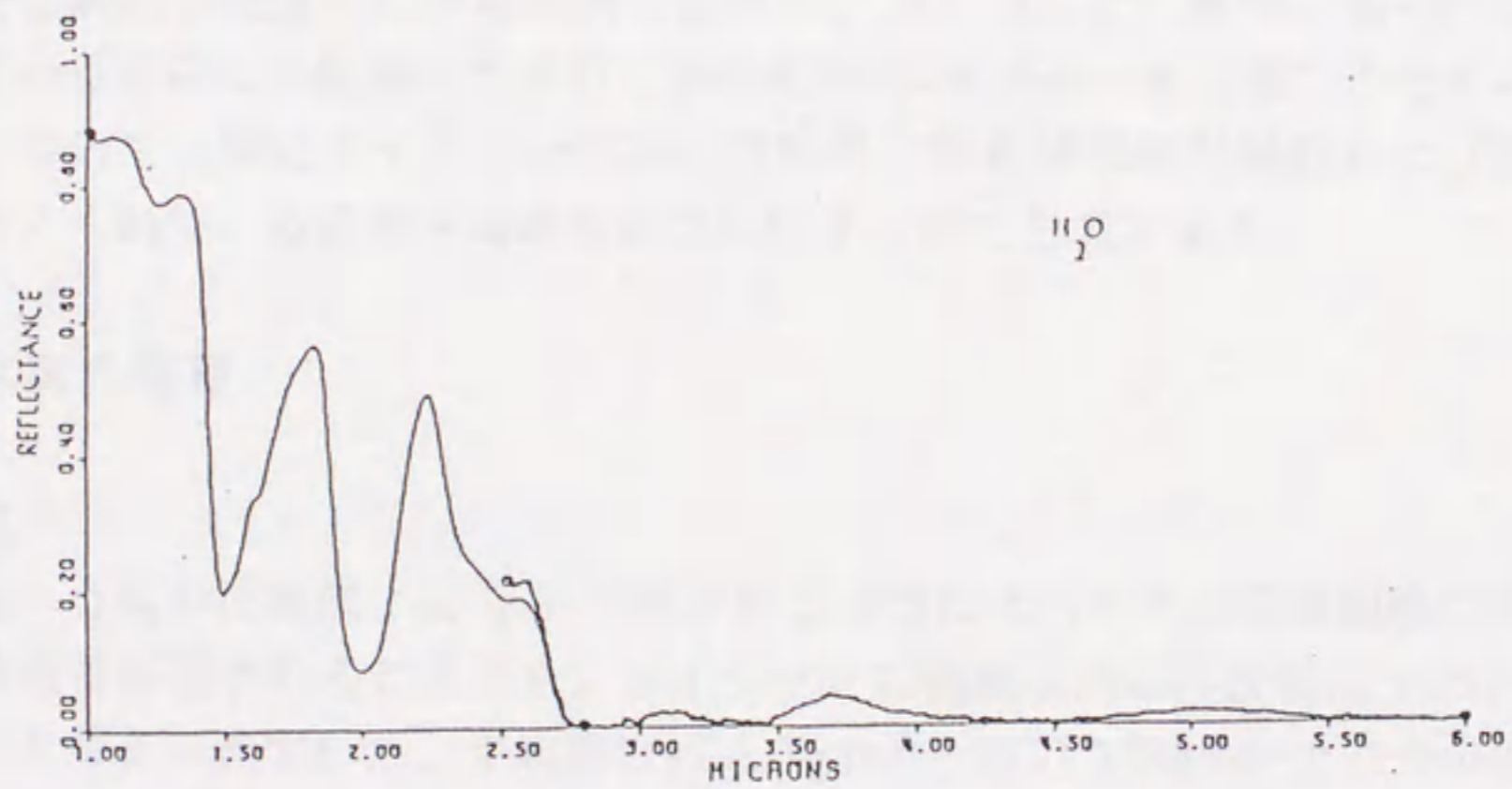
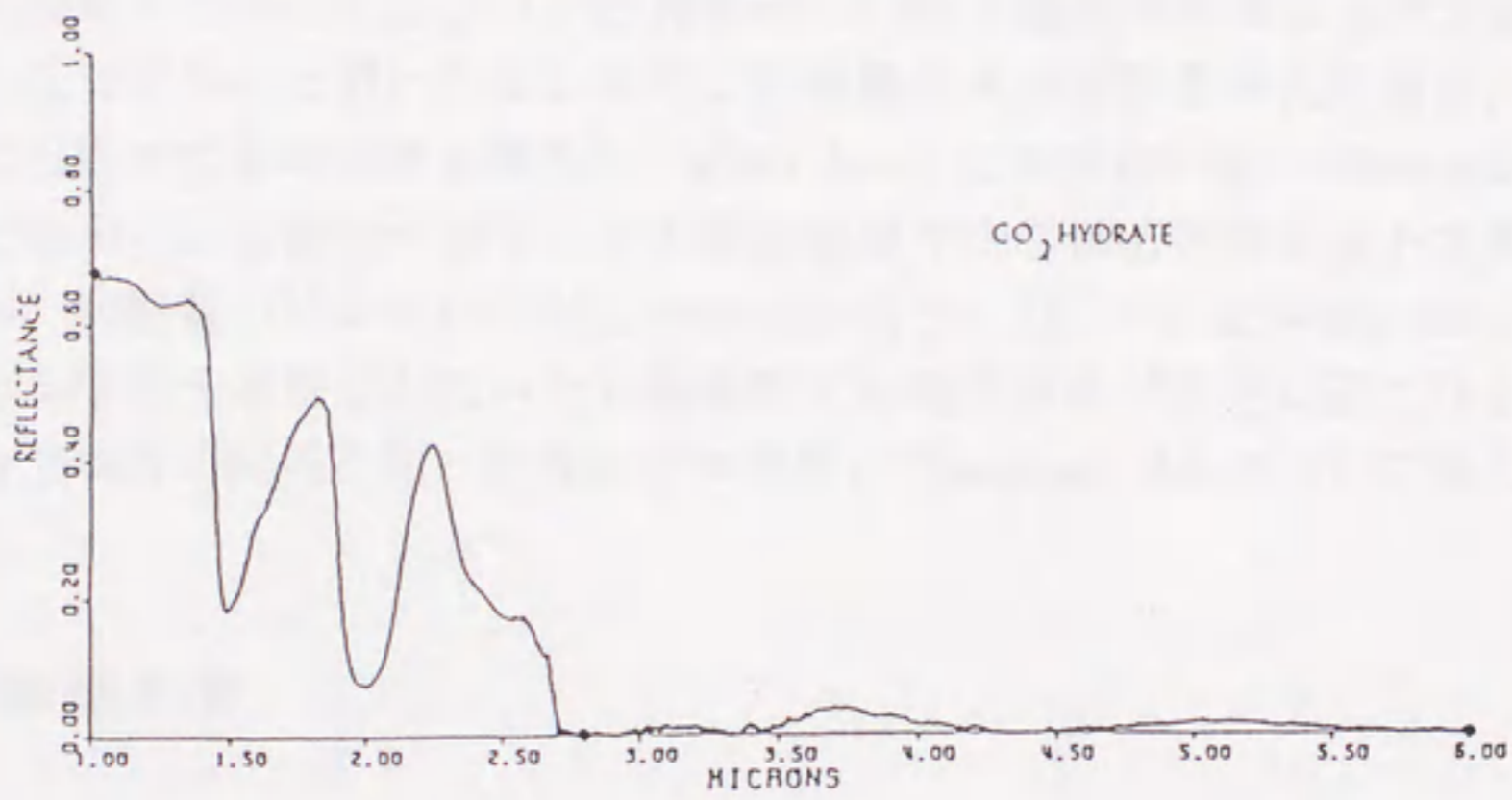
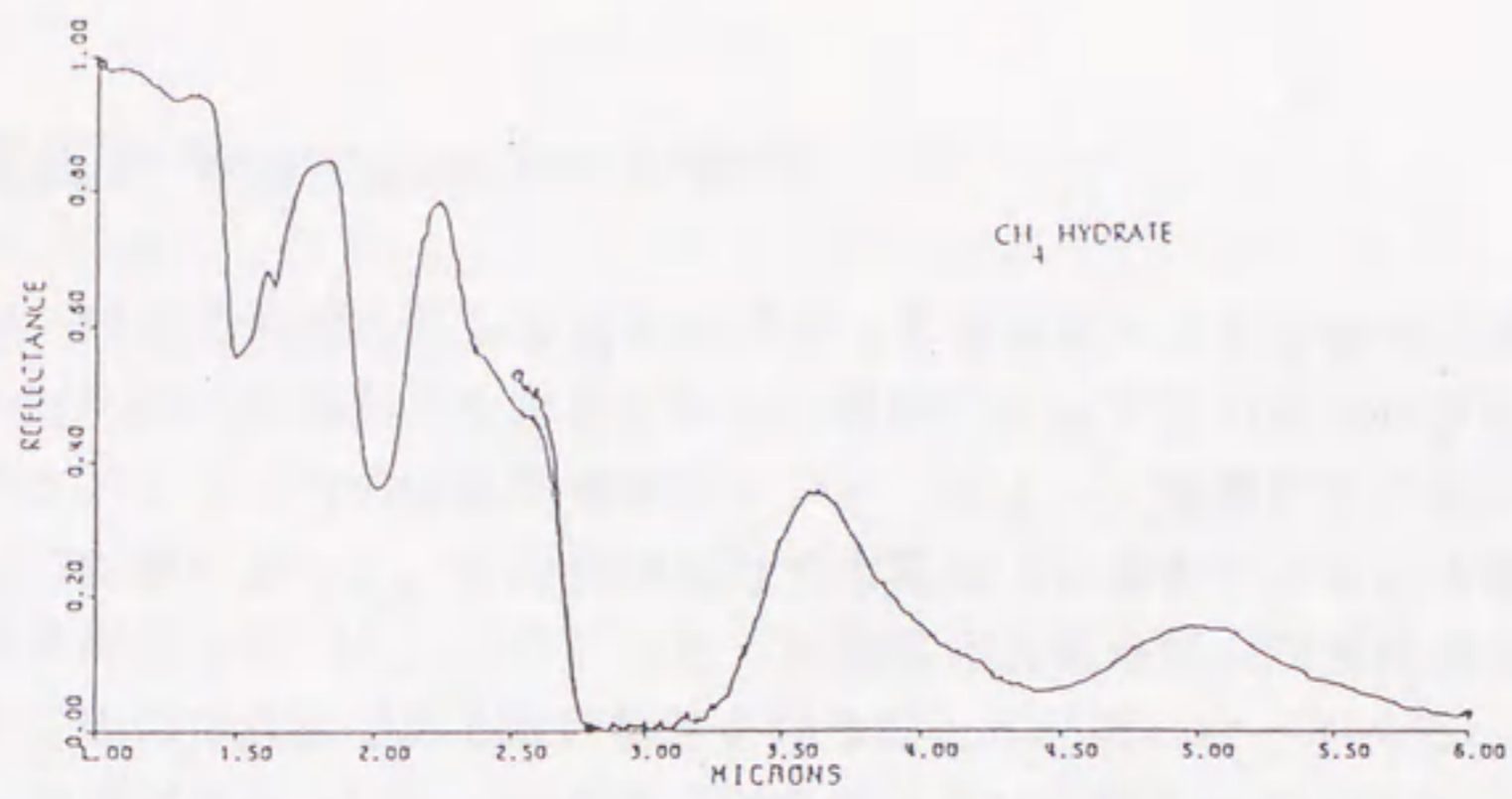


図 1-10 クラスレート・ハイドレートと Water Ice の赤外吸収スペクトルの比較。

2. 氷衛星と Non-water Ice の物性

氷衛星とはその名前のおり氷を主成分とする衛星で、その多くは表面が氷に覆われている。赤外分光など地上からの観測によってその存在は以前から知られていた。アメリカの惑星探査機ボイジャーによって実際にその姿が明らかになったのは記憶に新しい。その表面は月や火星などの岩石でできた天体の表面とは大きく異なっていた。こういった、氷衛星の表面地形、内部構造を議論するためにはその主成分である氷の物性を知ることが必要になってくる。しかし、海王星の衛星であるトリトンのように窒素やメタンの固体といった H_2O の固相以外の「氷」（以下「Non-water Ice」と呼ぶ）を主成分とする天体も存在する。氷衛星の議論する際にはこういった Non-water Ice の物性を知ることが今後さらに重要になっていくと思われる。とくに氷衛星の火成活動を考える場合、その湧出物は岩石でできた天体と異なり、water Ice よりも融点の低い Non-water Ice であると考えられる場合が多く、その表面地形や内部構造を考える上で非常に興味深い。氷衛星のマントルが Non-water Ice もしくは、それと water Ice との混合物であるならその融点が低いため極低温でも地質活動が活発に起こりうる。こういった両者の関係を知ったうえで氷衛星と Non-water Ice について考えていきたい。

2.1 氷衛星の姿

木星以遠の衛星のほとんどが氷衛星であると考えられるが、それら全てに対して十分な観測がなされているわけではない。以下は、これまでに知られている氷衛星のうち詳しい観測がなされているもの、Non-water Ice が見つかったものなどについて、特にボイジャーによって発見された特徴的な地形および現在までに考えられているそれらの成因についてまとめたものである。

2.1.1 木星の衛星

エウロパ

70%という高い反射能、図 1-5 で示されるようにスペクトル反射曲線に強い H_2O の吸収帯が現われることから、ボイジャーの観測以前から表面は water Ice からなると考えられていた。平均密度は 3.0 g/cm^3 と月の 3.5 g/cm^3 よりやや低い程度なのでケイ酸塩質の岩石が主体で、water Ice の地殻が取り巻いていると考えられる。その表面で最も目につくのが線状構造と呼ばれる、縦横に走る多数の筋である。1本の筋は、幅が数 km から数十 km、長さ数千 km にも及ぶ。この

筋は北半球では北西方向、南半球では南西に伸びる傾向がある。これらの筋は water Ice の地殻にできたクレバスに暗色の物質が管入してできたと考えられる。クレーターは数個しか見つかっていないが、古いクレーターの痕跡と考えられる palimpsest と呼ばれる平坦な褐色の斑点状円形構造が見られる。

ガニメデ

スペクトル反射曲線がエウロパとよく似ていること、平均密度が 1.94 g/cm^3 とかなり低いことから 50% 程度の water Ice が含まれていると考えられる。その表面はクレーターの多い暗い地域と多数の溝が走る明るい地域の 2 つに大きく分けられる。クレーター地域は多角形や円形、もしくは不規則な形の輪郭をもつ、孤立した暗い地帯であり、最大のガリレオ地域は直径 3000 km 以上にもなる。溝地帯はクレーター地帯を囲むように広がっており、その多くは数 km の間隔でほぼ平行に走る深さ数百 km の溝とリッジの集合である。クレーターは全面に多数分布し、その大きさも様々で、きわめて平坦なものが多い。また氷衛星に特有な底に凹みのあるピット型クレーターも多く見ついている。さらに、エウロパと同様の palimpsest が多く見られる。

カリスト

平均密度は 1.86 g/cm^3 とかなり低く、スペクトル反射曲線にエウロパやガニメデより弱い H_2O の吸収帯が現われることから、50% 以上を water Ice が占めていると考えられる。反射能が 20% 程度と低いことから地殻は不純物を多く含んだ氷の層であると見られている。表面はびっしりとクレーターに覆われていて、どのクレーターも底が浅く平坦である。また驚くべきことに最外縁の環までの直径が 3000 km を越している Valhalla と呼ばれる多重環状構造が見ついている。この成因については隕石の衝突、地殻の陥没など様々な説が考えられている。

2.1.2 土星の衛星

タイタン

平均密度は 1.88 g/cm^3 でその半分が water Ice からなると思われる。表面の様子はボイジャーの観測によっても、窒素やメタンからなる濃い大気に遮られ全く観察することはできなかった。しかし、その表面温度が 93 K とメタンの三重点に近い (図 2-1) ので圧力の変化によって、表面や内部には液体メタンや固体メタンが存在すると考えられる。

イアペトス

平均密度は 1.1 g/cm^3 と water Ice とほぼ等しく、その大部分が water Ice であると思われる。進行側半球にきわめて反射能の低い暗い部分があり、これは内部からの湧出物（メタン化合物？）が広がったものであると考えられている。

レア

追尾側半球はクレーターの密度が非常に高く起伏の激しい地形で、進行側半球は滑らかで大きなクレータが少ない地形である。これは進行側半球の表面が少なくとも一度は再生されたことを示している。

ディオオーネ

追尾側半球では暗い背景に明るい条痕が網目状に交差しているのに対して、進行側半球は一様に明るい。反射能が複雑に変化する領域は追尾側半球の中心部の狭い円内に限られ、進行側半球との境界ははっきりしない。レアと同様にここでも表面の再生が行なわれたと考えられる。

テチス

進行側半球に衛星の直径の 40% にも達する巨大なクレーターが存在する。しかし、それはかなり緩和していて床は表面と一致している。このことは地殻が現在より流動的であった時代を経験していることを示している。

ミマス

表面はクレーターですきまなく覆われている。とくに進行側半球にはその直径の 3分の1にも及ぶ巨大クレーターが見られる。しかしそれはテチスのものとは違いほとんど緩和が見られない。長い期間地殻は冷たく硬かったと考えられる。

エンケラドス

表面にはクレーターはあまり存在しない。とくに平地の部分には網目状の筋が走っているが、クレーターは全く存在しない（図 2-2）。表面の再生が行なわれたのは確実で、現在も地質活動が活発であると考えられている。また、この衛星のサイズから考えると激しすぎる地質活動を説明するために、固体メタンなどの Non-water Ice がその内部に存在すると考える説もある。

2.1.3 天王星の衛星

オベロン

表面には断層に似たいくつかの地形が見られるが、大規模な火成活動の証拠はなく、クレーターによってほぼ飽和しつくされている。大きなクレーターが残っていることから表面は再生されていないと考えられる。

チタニア

複雑な地溝、断崖、断層など火成活動の証拠となる地形が多く見られる。またクレーターは比較的少なく、表面は内部からの湧出物 (Non-water Ice?) によって再被覆されたと思われる。

ウンブリエル

全面にわたって変化が少なく、一様に暗く灰色である。大きなクレーターが残っていることから表面の再生がなされたとは考えにくい。そのため表面の滑らかさを説明することは非常に困難になっている。

アリエル

全球的な断層のネットワークがはりめぐらされており、谷の深さは数十 km に達するものもある。大きなクレーターが見られないことから、火成活動による大規模な表面の再被覆があったと考えられる。

ミランダ

その直径はおよそ 500km と小さいため原始的に表面を変えるほどの熱源はないと思われていた。しかし、実際の表面はきわめて複雑怪奇なもので多くのクレーターに覆われ、緩やかにうねった古い平原にくいこむように、3つの「卵形地域」と呼ばれる競技場のトラックによく似た溝とリッジが平行に走る楕円もしくは台形の地域が見られる。その1つは裂け目が交差して高さ 20km もの断層崖になっている (図 2-3)。これらの複雑な地形の成因については、衝突による破壊の後再凝固したという説や内部加熱による本体の膨張によるテクトニックな運動が原因であるとする説の2つが有力である。

2.1.4 海王星の衛星

トリトン

スペクトル反射曲線に窒素、メタン及び一酸化炭素の吸収帯がみられ (図 1-6 参照) ポイジャーの観測以前から注目されていた。近年、二酸化炭素の存在も明らかになったが、water Ice の存在を示す確固とした証拠は見つかっていない。平均密度は 2.08 g/cm^3 でこれから岩石と氷の質量比を決めることができるが、これ

には当然窒素やメタンの固体といった Non-water Ice も多く混ざっていると考えられるので、正確な議論は難しいであろう。表面温度は 37K と他の氷衛星と比べて極度に低い。赤道地帯を中心とする地域はマスクメロンの皮に似た、長い地溝が交差し、その周辺に対流渦がそのまま凍結されたような模様が密集して広がる網目状の地形を示している。この「マスクメロン地帯」の東方には平原が広がり、床面が非常に平坦な直径 200 km 以上もある巨大なカルデラ状の地形がいくつもある。また、液体窒素が噴出したと思われる氷の活火山も見つかっている。クレーターは非常に少なくその表面が何度となく更新されてきたことを示している（図 1-7 参照）。

2.1.5 冥王星とカロン

冥王星の表面は固体メタン、窒素及び一酸化炭素で覆われていることが赤外スペクトルの観測によって確かめられている（図 1-6 参照）。それに対してカロンの表面には water Ice しか見られない。冥王星-カロン系の平均密度は 1.99 g/cm^3 である。冥王星は惑星であるが半径と平均密度がトリトンに極めてよく似ている（図 2-4）ため、その起源を関連させて説明しようとする考え方もある。冥王星は太陽系の中で唯一探査機によって表面が観察されていない惑星であるが、近年ハッブル宇宙望遠鏡により高分解能の観測がなされている（図 2-5）。表面にみられる濃淡はメタン化合物によるものであると考えられている。冥王星とカロンの表面物質の違いについては、その起源が異なるとする説と起源は同じで重力の違いによるメタンの散逸によるとする説がある。また固体メタンは表層だけで内部は water Ice である（図 2-6）と考えられているが、トリトンと同様に固体メタンが混入している可能性が高いと思われる。

2.1.6 その他の小天体

衛星以外にも木星型惑星のリング、彗星、小惑星など氷を主成分にする天体は多く存在する。とくに、ハレー彗星はジオットなどの探査機によって Non-water Ice の存在が確認されている。また近年発見された 1992QB₁ のように小惑星か彗星かどうかの区別がつきにくいものもあり、その間の境界が不明瞭になっていることから太陽系的小天体を一つのグループとしてまとめて考えていくことが必要であろう。

2.2 Non-water Ice の物性測定

太陽系の外惑星系に存在する Non-water Ice のうち主なものには、固体メタン、固体窒素、固体一酸化炭素、固体二酸化炭素、固体アンモニア、固体水素などが考えられ、その多くはこれらの Non-water Ice のうちの一種もしくは数種類が water Ice と混合物もしくはクラスレート化合物として存在していると思われる。しかし、Non-water Ice の物性についてはそれぞれ純粋なものについても実際の測定はほとんどなく、少ないデータから定性的な議論をしているものが多い。外惑星系の天体について議論するときには water Ice の II、III、IV などの高圧相 (図 1.1 参照) はもちろん Non-water Ice の物性測定が不可欠になってくる。water Ice の物性測定と同様に Non-water Ice の物性測定がこれから非常に重要になっていくと思われる。以下に示すように常温で固体の物質を測定するよりも多くの障害があるため測定例は少なく、Non-water Ice の物性測定は始まったばかりであるといっても過言ではない。

2.2.1 密度

例えば氷衛星において岩石と water Ice の質量比を求める際に必要となるような、物性値のうちで最も基本的な量である。Non-water Ice についても数多くの測定が行なわれているが、常圧についてだけ見ても、その温度変化を調べているものは皆無である。天体の内部構造を考える際にはその圧力変化も重要になってくるであろう。Non-water Ice の場合には比重瓶 (ピクノメーター) を用いて測定することが多い。

2.2.2 相図

常温常圧では気体である Non-water Ice の温度-圧力に対する安定領域および相転移を知ることは極めて重要であるが、water Ice のようにしっかりとした相図は作られていないのが現状である。

2.2.3 弾性定数

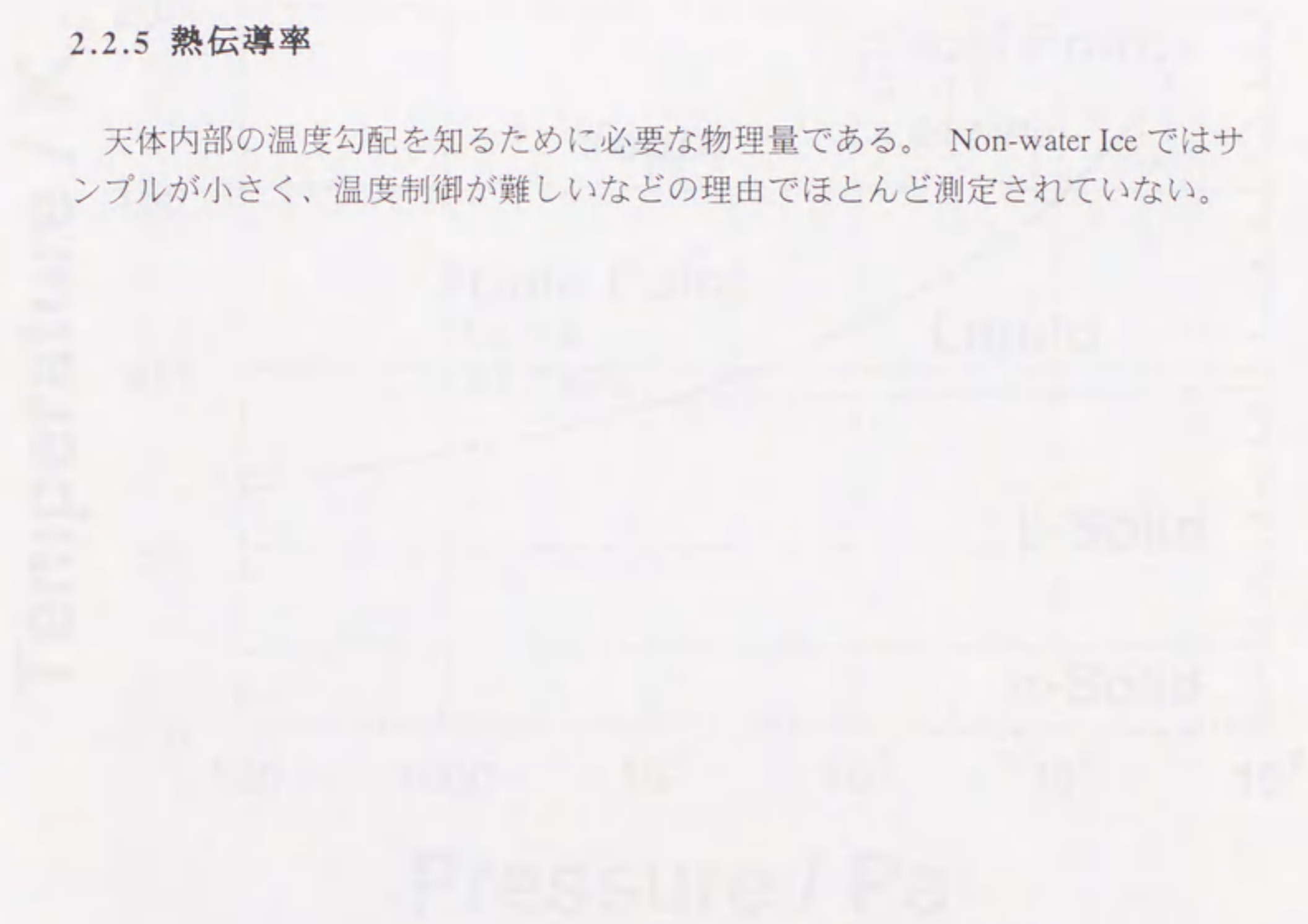
衝突によるクレーター形成といった歪速度の大きな現象を考える際に必要とってくる物性値である。Non-water Ice について測定する際には大きなサンプルを作るのが困難なため超音波測定法を用いることが多い。

2.2.4 非弾性的物性

弾性定数とは対照的に地形の緩和といった歪速度の小さな現象を考えるとときに必要な量である。極低温での変形実験が必要なためこれまでその測定は皆無である。

2.2.5 熱伝導率

天体内部の温度勾配を知るために必要な物理量である。Non-water Ice ではサンプルが小さく、温度制御が難しいなどの理由でほとんど測定されていない。



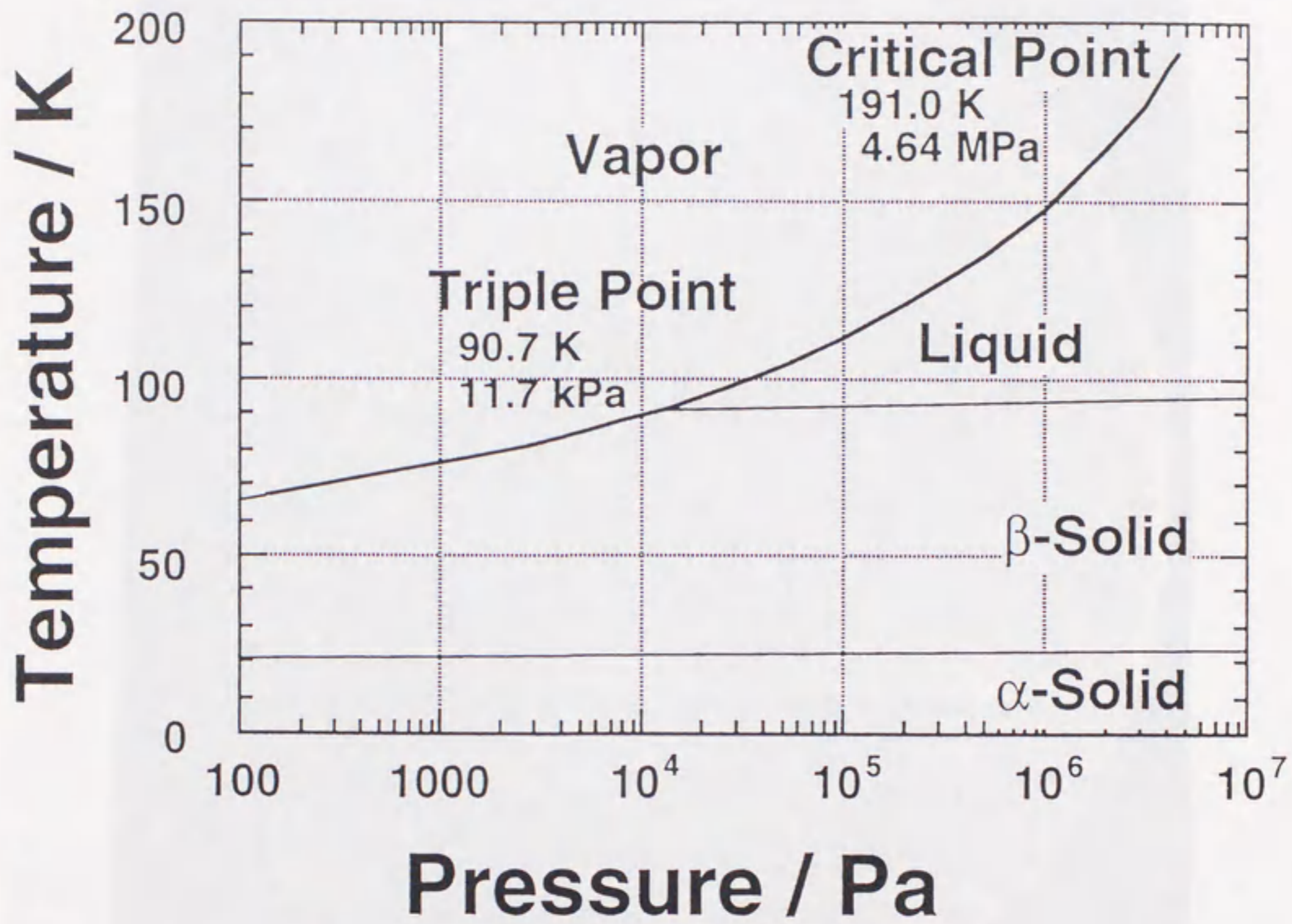


図 2-1 メタンの相平衡図。



図 2-2 ボイジャーによって得られたエンケラドスの画像。



図 2-3 ボイジャーのよって撮影されたミランダの画像。

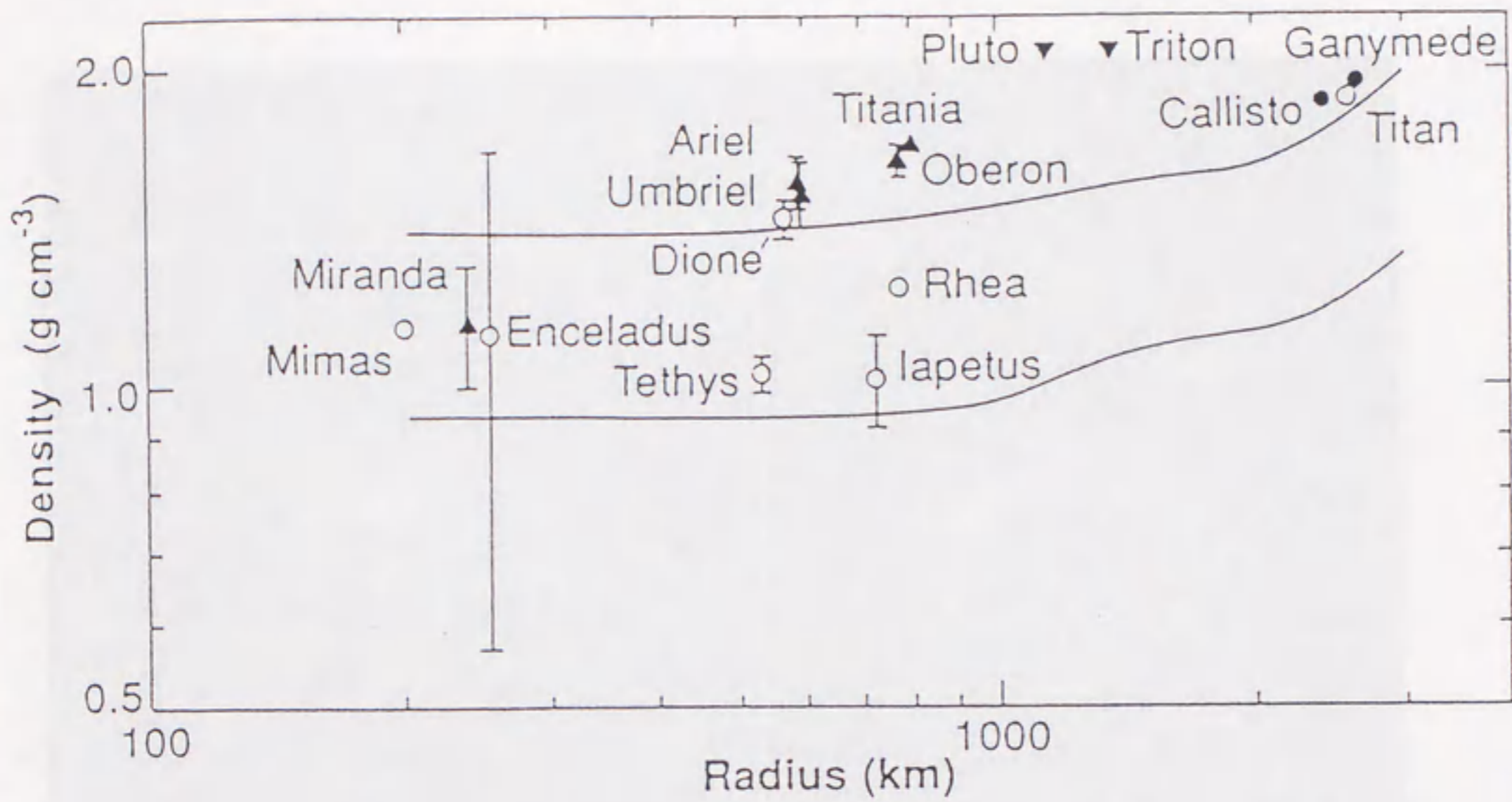


図 2-4 外惑星系の衛星の半径及び密度による比較。上部の曲線は衛星の組成が Water Ice 60%、珪酸塩鉱物 40%の場合で、下部の曲線は Water Ice 100%の場合。

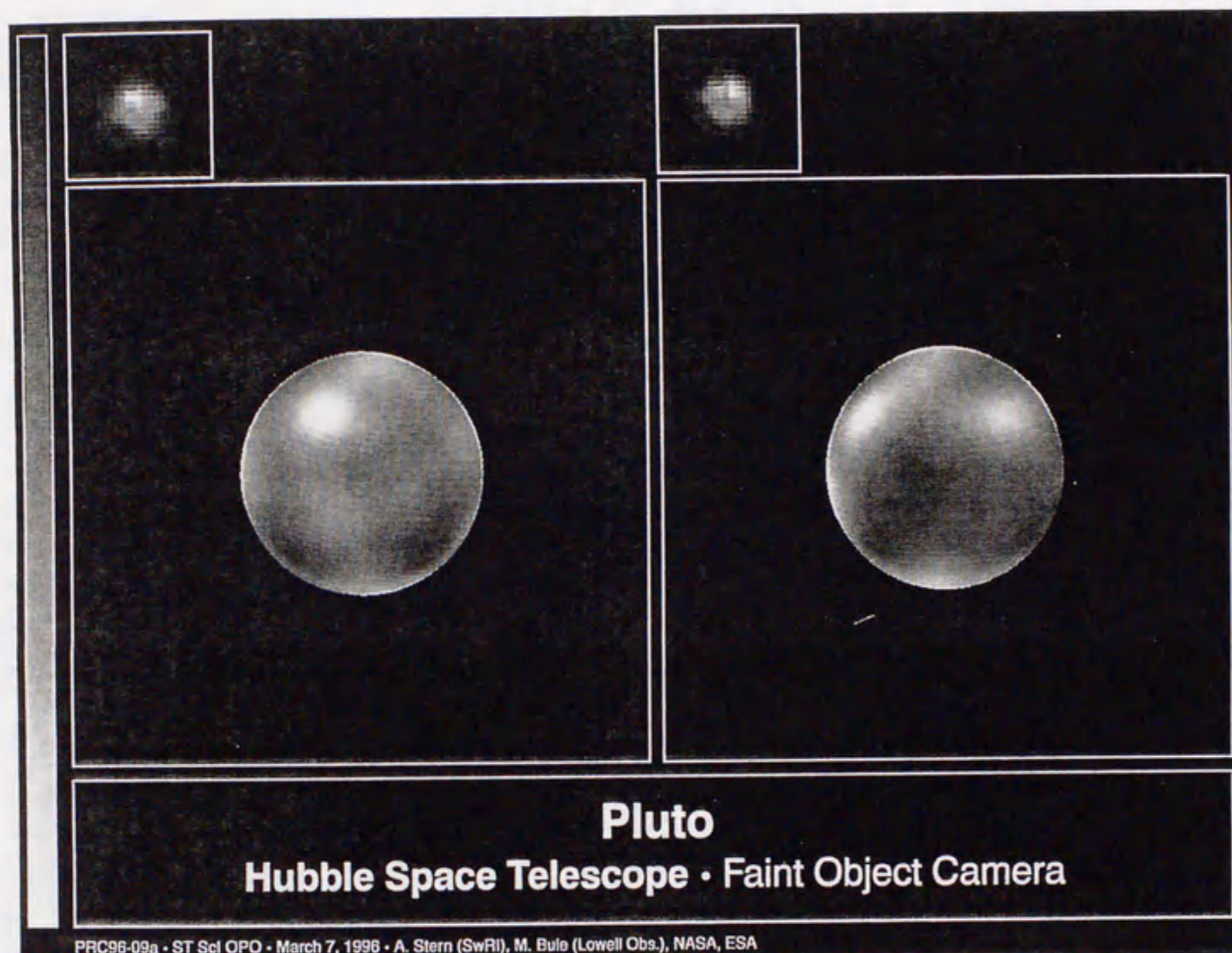


図 2-5 ハッブル宇宙望遠鏡により得られた冥王星の表面画像。

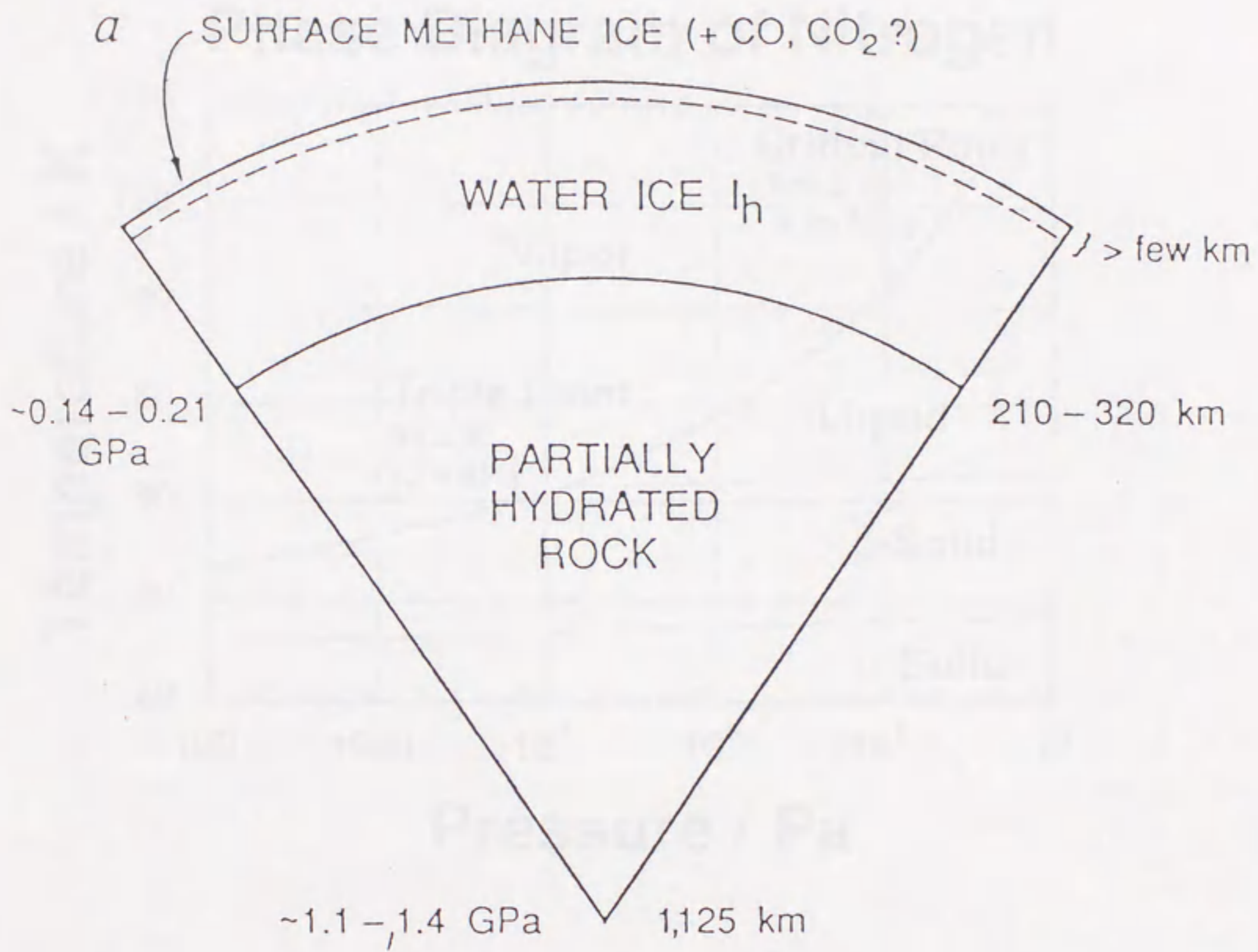


図 2-6 冥王星の内部構造モデルの一例。

Phase Diagram of Nitrogen

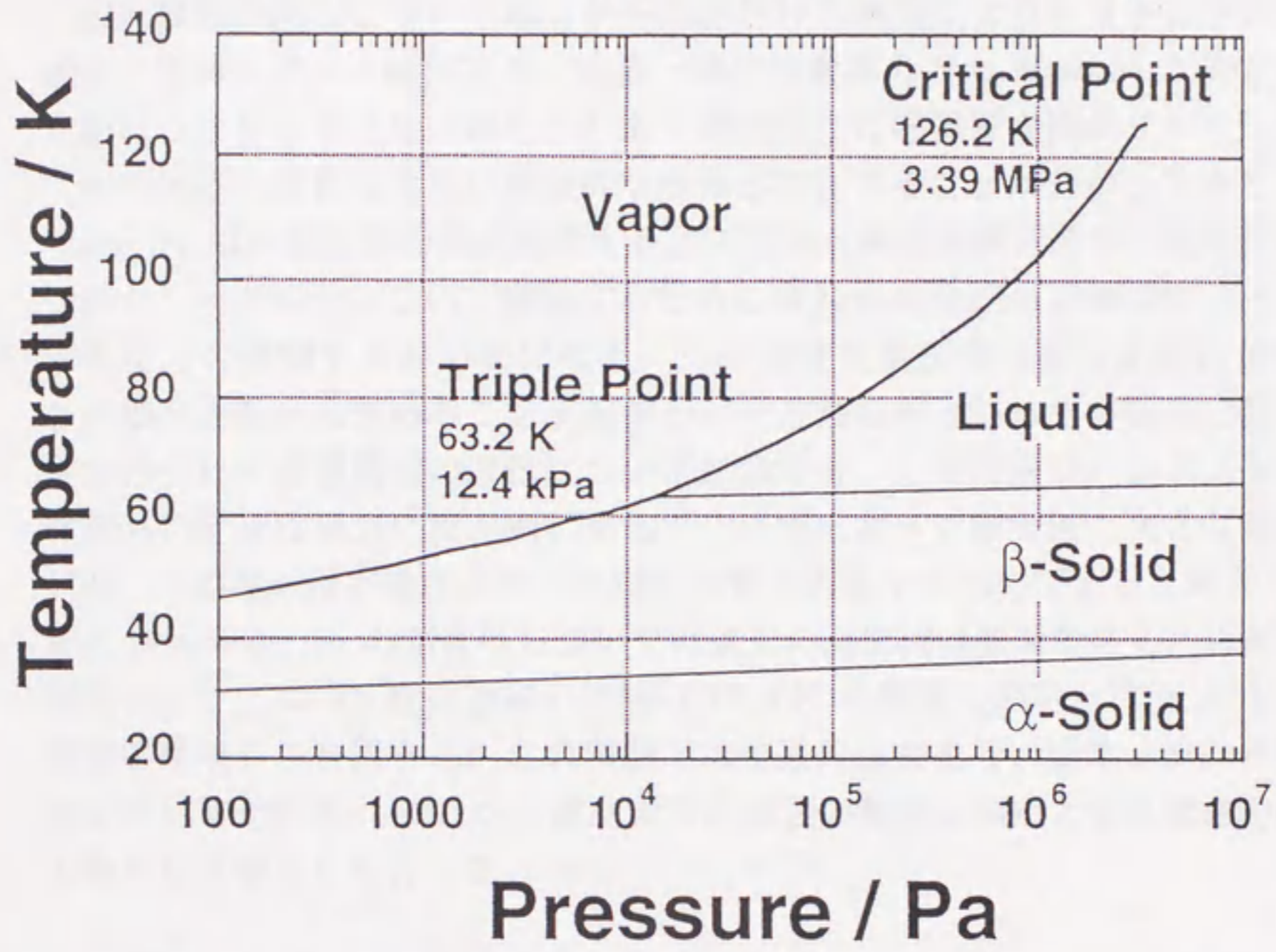


図 2-7 窒素の相平衡図

3. 音速測定実験

観測技術の向上につれて地上からの赤外分光観測によりトリトンや冥王星の表面に固体メタン、固体窒素、固体一酸化炭素等の Non-Water Ice が存在することがはっきりしてきた。特にトリトンの表面には惑星探査機ボイジャーによって他の天体には見られない特徴的な地形が存在することが分かっている。Non-Water Ice は外惑星系の形成を考える上で重要な構成物質である。例えばトリトンのクレータ形成について議論するためには Non-Water Ice の衝突によって発生する圧力の見積もりが必要になる。この衝突発生圧力は弾性定数に依存し縦波・横波速度から求めることが出来る。一方粘性率といった非弾性に関する物性が分かれば表層構造の進化について議論することが出来る。固体メタンや固体窒素の音速は過去に測定例があるが、研究によって測定値に大きな差が見られる。この違いは空隙率といった試料の質に起因するものであると考えられる。また Non-Water Ice の粘性率については過去の測定例は皆無である。以前我々は固体メタンについて低空隙率の試料の 77-90K の音速の測定と 77K における粘性率の見積もりを行った。この実験では装置の改良を行い固体メタンと固体窒素についてそれぞれ 4K から融点までの音速の精密な測定と固体窒素の粘性率の簡単な見積もりを行った。

3.1 弾性定数と衝撃発生圧力

弾性定数はレオロジーと呼ばれる粘弾性考慮した場合の物性の一端をになう重要な値である。元々の定義は弾性体内の応力と歪みとが互いに比例するとしたフックの法則における比例定数であり、その例としてラメの定数・ヤング率・剛性率・体積弾性率・ポアソン比がある。惑星科学の分野では弾性定数は天体同士の衝突現象といった歪速度が大きな現象を考える場合に特に重要になってくる。二つの固体が衝突する時にはそれぞれの固体内部に高圧力のパルスが発生する。衝突時に衝突点で発生するパルスの高さを衝突発生圧力 P と呼び、衝突する固体が同じ物質の場合に P は以下の式で表される

$$P = \frac{1}{2} \rho_0 v \left\{ V_\phi - \frac{1}{4} v (\gamma + 1) \right\}$$

ここで、 ρ_0 は初期密度、 V_ϕ はバルク音速、 v は衝突速度、 γ は Grüneisen 定数である。バルク音速は弾性定数のひとつで高速度衝突の際に発生する衝撃波の伝播速度と考えられ、縦波速度 V_p 、横波速度 V_s から以下の式で求められる

$$V_\phi = (V_p^2 - V_s^2)^{\frac{1}{2}}$$

衝撃発生圧力は実験室内での衝突実験と実際の天体スケールの衝突現象の間の

橋渡しをする基礎的かつ重要なパラメータである。

3.2 超音波測定法

前章でふれたように物質の弾性定数の測定には様々な方法があるが、本研究では試料を真空中で極低温状態に保持するようがあり、加えて作成できる試料の大きさに制限があることから超音波測定法を用いた。超音波による音速の測定方法についても多くの方法があるが、本研究では常温での測定で行うような振動子と試料の間の接着が困難であるため、出来るだけ大きな信号を取り出せるという理由からパルス透過法 (pulse transmission method) という最も単純な方法を用いた。この方法では図 3-1 に示したように入力信号と出力信号の時間差 t と測定試料の厚み L から音速を求める。測定に使用する振動子には以前は水晶振動子が用いられていたが、近年は大きな出力が得られるセラミック振動子を用いることが多く、本研究でも圧電セラミック $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ を用いた。

縦波速度 V_p 及び横波速度 V_s を測定することにより、これらを用いて以下のように様々な弾性定数を求めることが出来る。

体積弾性率 K_s

$$K_s = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

剛性率 G

$$G = \rho V_s^2$$

ポアソン比 σ

$$\sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

ただし、ここで ρ は密度である。

3.3 実験方法

この実験に用いた測定システムの模式図を図 3-2 にその外観を図 3-3 に示す。測定装置は二重のガラス製のデュワーの中に設置した。内側と外側のデュワーにはそれぞれ寒剤として液体ヘリウム・液体窒素が入る。メタンと窒素の融点はそれぞれ 90 K と 64 K なので、冷媒としては液体ヘリウムを主に用いた。メタン・窒素どちらの場合も試料用のガラスセルの内部をロータリーポンプで 0.1 Torr 程度の真空にひいてのち、ポンベからガスをセル内に充満させゆっくりと温度を下げていき液相からゆっくりと試料を固化させて空隙率の小さい均質な試料を作成した。試料作成時の冷却速度は毎分 1 K 以下に制御した。試料は直

径 17.5 mm、高さ 7.5-14.0mm の円筒形のものをガラス製の試料フォルダの内部に作成した。試料用のセルは長さが 20 mm、外径が 20 mm の中空の円筒形である。ガラスデュワーは外部からの熱放射を減らすために内部に銀メッキが施されているが、縦にスリットがいてあり外部から実験装置を見ることが出来る。更に試料セルもガラス製であるので装置の外部から試料の様子を観察することが出来る。温度は金+0.07%鉄-クロメル熱電対を用いて試料の上部と下部の 2 カ所で測定した。音速測定にはパルス透過法を用い、振動子には共振周波数 10 MHz が圧電セラミックを使用した。弾性波の波形データはオシロスコープ（サンプリング周波数 250 Mhz）によりモニターし、更に GPIB インターフェイスを介してマイクロコンピュータを用いて記録した。図 3-4 に実際に記録された弾性波の波形データの例を示す。様々な温度で波形データを記録し、それをから音速を見積もった。試料の両端での温度勾配は ± 2 K 以内であった。温度は内側のデュワーに送り込むヘリウムの流量によって ± 1 K 以内に制御した。ただし固体メタンの横波の 20 K 以下の測定時には内側のデュワーの真空度が悪くなり温度制御がうまくいかず ± 5 程度の温度制御しか出来なかった。また、測定した全ての温度範囲で固体メタン・窒素どちらの試料もクラックや空隙を生じることはなかった。

3.4 試料の音速と空隙率

固体メタンの 4 K から 90 K における縦波及び横波速度の変化を表 3-1 及び図 3-5 に示す。測定した試料ごとに異なる記号でプロットしてある。誤差の範囲はそれぞれの記号の大きさ以下である。縦波及び横波速度はどちらも温度の減少とともにその値が大きくなっていることが分かる。固体メタンの α 相から β 相への転移温度である 20.4 K 付近でどちらの値も大きく変化している。今回測定した 64 K 以上の値は我々が以前測定した結果 (Yamashita et al., 1992) ともよく一致していることが分かる。縦波・横波速度のどちらもこれまで測定されているもの (Wolf et al., 1973; Tarasenko, 1975) よりも大きな値が得られた。ただし、20 K 以下での横波速度は前節で示した理由から Wolf et al., 1973 より小さい値しか得られなかった。試料中にクラックや空隙が存在すると超音波の散乱及び減衰が起こり出力信号の波形の立ち上がりが鈍り、得られる音速の値は見かけ上、小さくなる。これらのことから本研究で作成した試料は非常に空隙率が少ないということが分かる。

同様にして固体窒素の 4 K から 64 K における縦波及び横波の変化を表 3-2 及び図 3-6 に示す。異なる記号は違った試料を用いた測定であることを示す。縦波及び横波は両者とも温度が下がるとともに速度が大きくなることが分かる。ま

た固体窒素の α 相から β 相への転移温度である 35.6 K 付近で大きくそれらの値が変化している。今回の測定結果は過去の研究における測定結果 (Bezuglyi et al., 1969) と比べてほとんど差はみられなかった。

今回の広い温度範囲での精密な測定によって衝突発生圧力を定量的に見積もることが可能になった。これによって固体メタンや固体窒素による基礎的な衝突実験の準備が整ったと言える。

3.5 変形に関する予備実験と粘性率の見積

実験装置の特色を生かしてデュワーの外側から試料の様子を観察しながら固体窒素の試料をピストンで押したところ 50K という極低温でも容易に流動することが分かった (図 3-7)。通常物質が凍り付き高い粘性率を持つような極低温領域においては、このような固体窒素の高い流動性は固体メタンの場合と同様の驚くべき特徴である。この流動現象を利用して粘性率の見積もりを行った。固体窒素をニュートン流体と仮定し、試料用セル内の流れをポアゼイユ流と近似する (図 3-8) と以下の関係式を使ってことによって粘性率 η を見積もることが出来る (Landau and Lifshitz, 1987)

$$\eta = \frac{\Delta p}{8v_0 l} \left[R_2^4 - R_1^4 - \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{\ln(R_2/R_1)} \right]$$

ここで l は管の長さ、 R_1 と R_2 は管の内径と外径、 Δp は圧力差、そして v_0 は中心のロッドの進む速度である。本研究では $\Delta p = 5$ MPa、 $l = 20$ mm、 $R_1 = 4$ mm、 $R_2 = 8.7$ mm、 $v_0 = 0.1$ mm/sec という値を用いることによって、固体窒素の 50 K での粘性率を 10^7 Pa sec と見積もることが出来た。この粘性率は Water Ice や固体二酸化炭素に比べて著しく低く、77 K における固体メタンとほぼ同じ値である (Yamashita et al., 1992)。トリトンの表層の主要構成物質は固体窒素だと考えられているが、固体窒素の粘性率が極低温でもこれほど低いことから、Maxwell モデルにおける緩和時間は数時間～数日と考えられ、トリトンの表層は北半球に広がるカンタロープ平原のような数キロメートルの高低差のある地形をそれ自身で支えることが不可能であると考えられる。

測定装置の改良によって広い温度範囲での音速測定が可能になった。精密な測定を行うことによって固体メタンと固体窒素の衝突発生圧力を定量的に求めることが可能になった。粘性率の見積もりについてはまだ定量的とは言えないが、固体窒素の低い粘性率は、トリトン表面についての観測事実と対比した場合にその高低差のある地形は固体窒素と固体メタンのみの地殻で形成される単純な一層モデルでは説明できないことを示している。

temperature /K	Vp /m/sec	Vs /m/s	Vs /m/s
4	3370		
5	3370		
6	3370		
7	3346		1979
8	3346		
9	3346		
10	3323		1973
11	3323		
12			1967
14	3300		
16		1930	
17	3277	1922	
18	3211	1915	
19		1900	1906
20		1896	
22	3148		
24	3127	1893	
25			1888
27		1878	
30		1878	
31	3028		
34		1864	
37	2972		
40		1840	
41	2918		
45		1816	

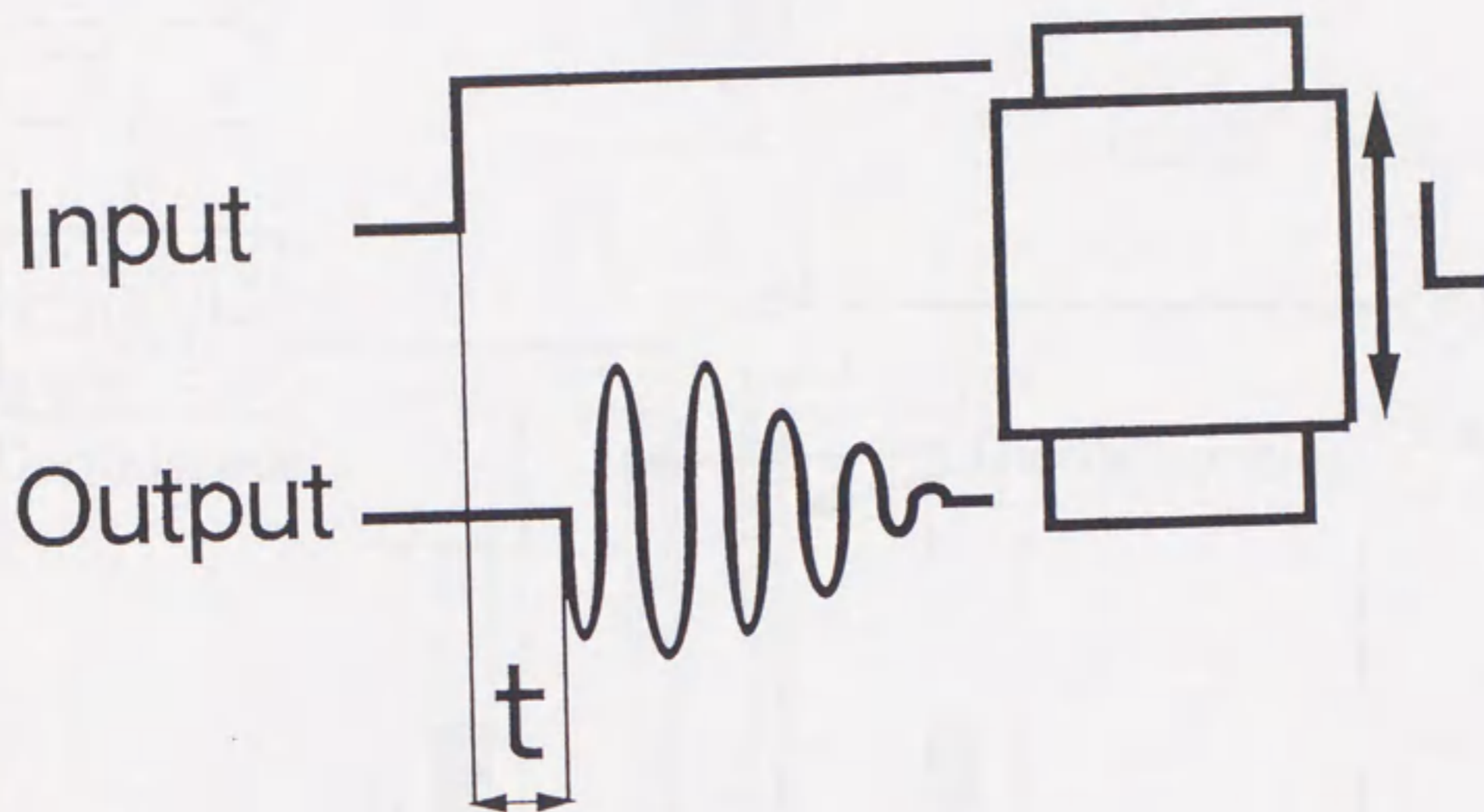
表 3-1 固体メタンの弾性波速度

temperature /K	Vp /m/sec	Vs /m/s	Vs /m/s
46	2865		
50	2831	1793	
54			1774
55	2766	1767	
59			1749
60	2719	1745	
62			1725
65	2658	1668	
70		1614	
71			1621
72	2586		
75	2559	1569	
78	2518		
85		1488	

表 3-1 固体メタンの弾性波速度 (つづき)

temperature /K	Vp /m/sec	Vp /m/sec	Vp /m/sec	Vs /m/sec
4		1833		
5		1830		
10			1831	
11				885
14	1787			
15		1786		
20		1770		877
26				871
28		1730		870
30				869
31		1728		
32		1722		869
34			1724	
35		1692		848
36		1655		
37		1613	1590	
40				824
43			1559	
44		1548		
47				822
49		1524		
50			1537	821
52				818
53		1492		
55		1488	1509	817
58			1488	810
60	1472			804
61			1461	
62		1460		
64	1418			

表 3-2 固体窒素の弾性波速度



$$V = \frac{L}{t}$$

V: Sound Velocity
 L: Sample Length
 t: Travel Time

図 3-1 パルス透過法による音速の測定の概略図。

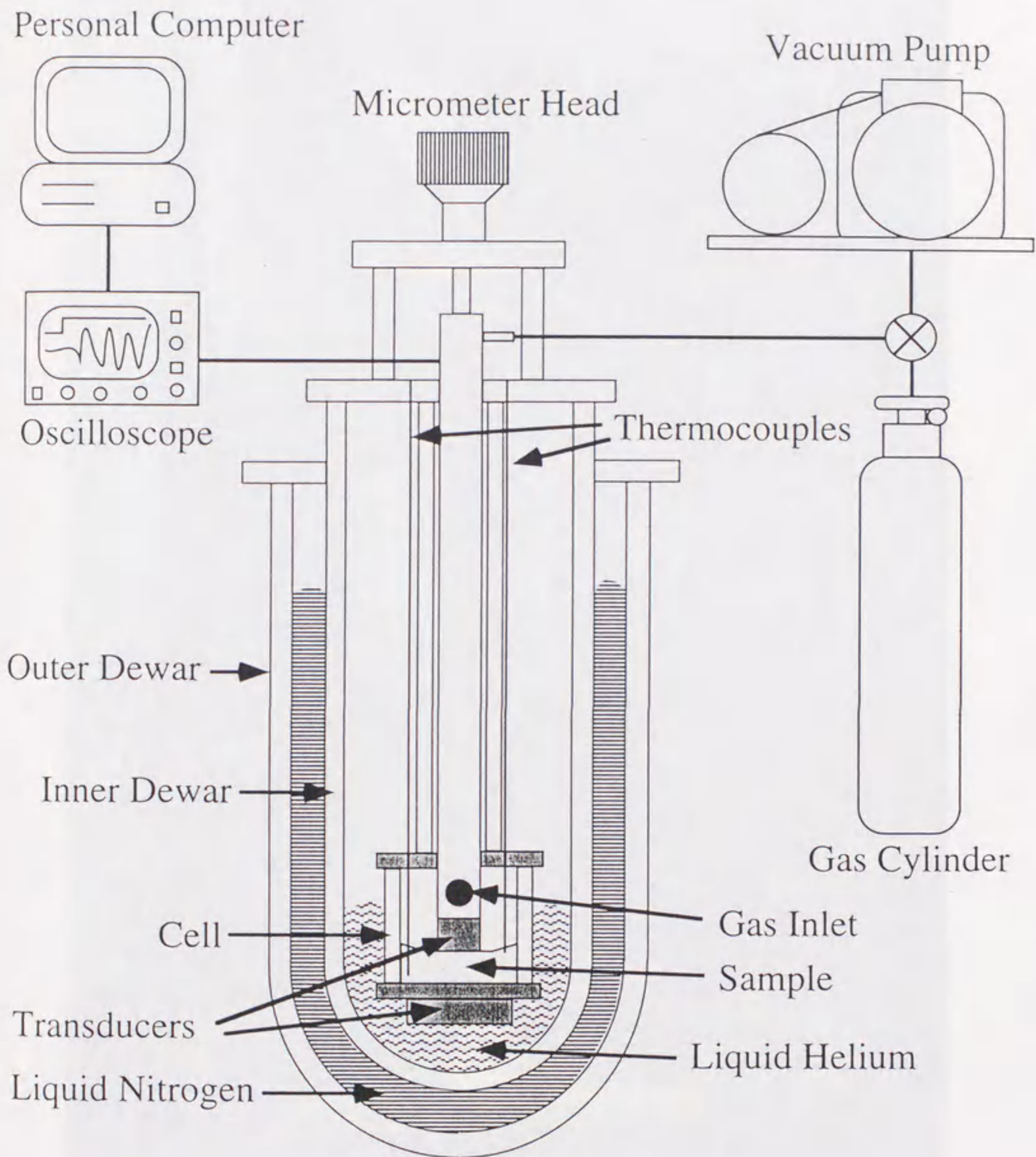


図 3-2 極低温音速測定装置の模式図。

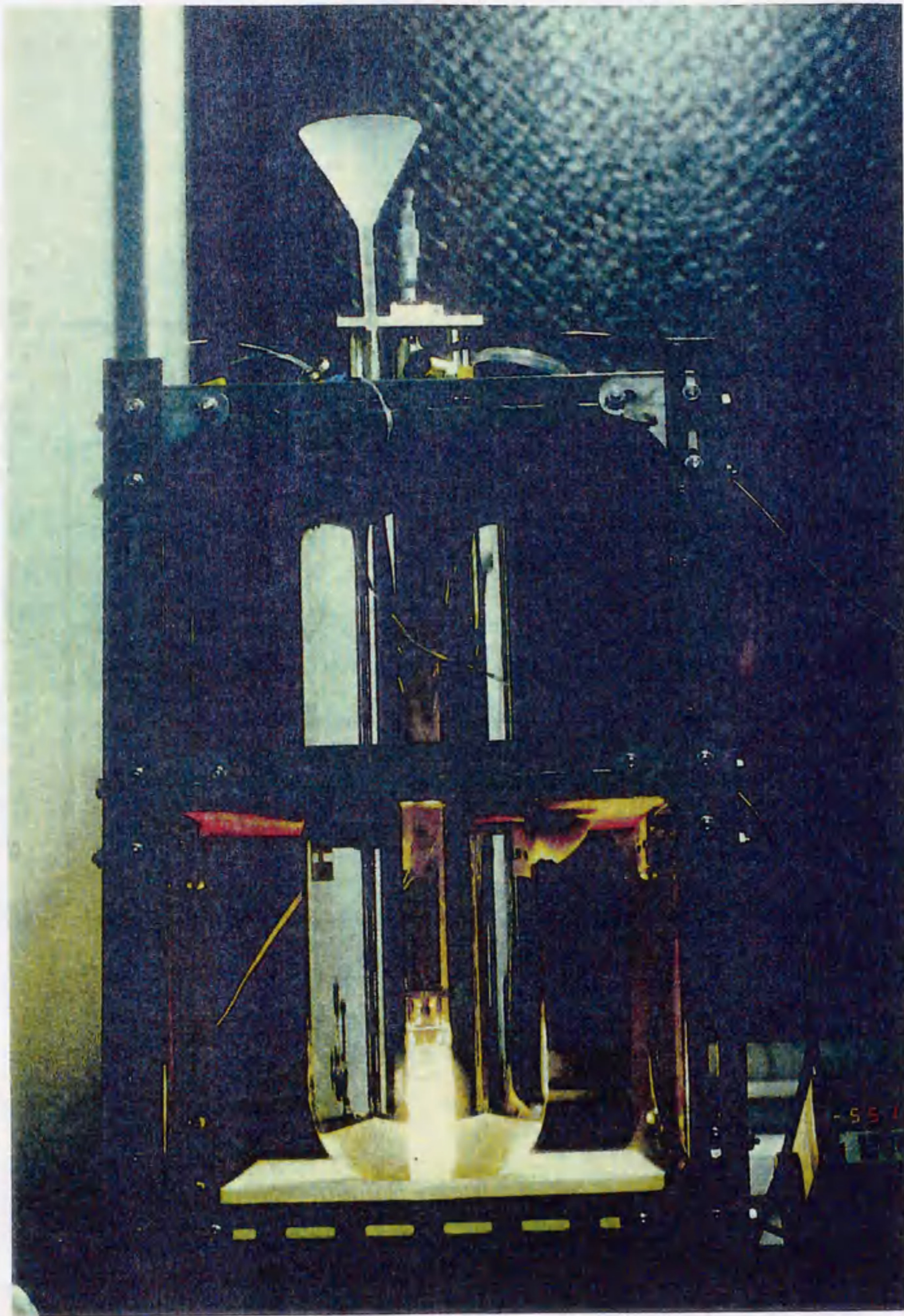


図 3-3 極低温音速測定装置の外観。装置の高さはおよそ 1 m である。

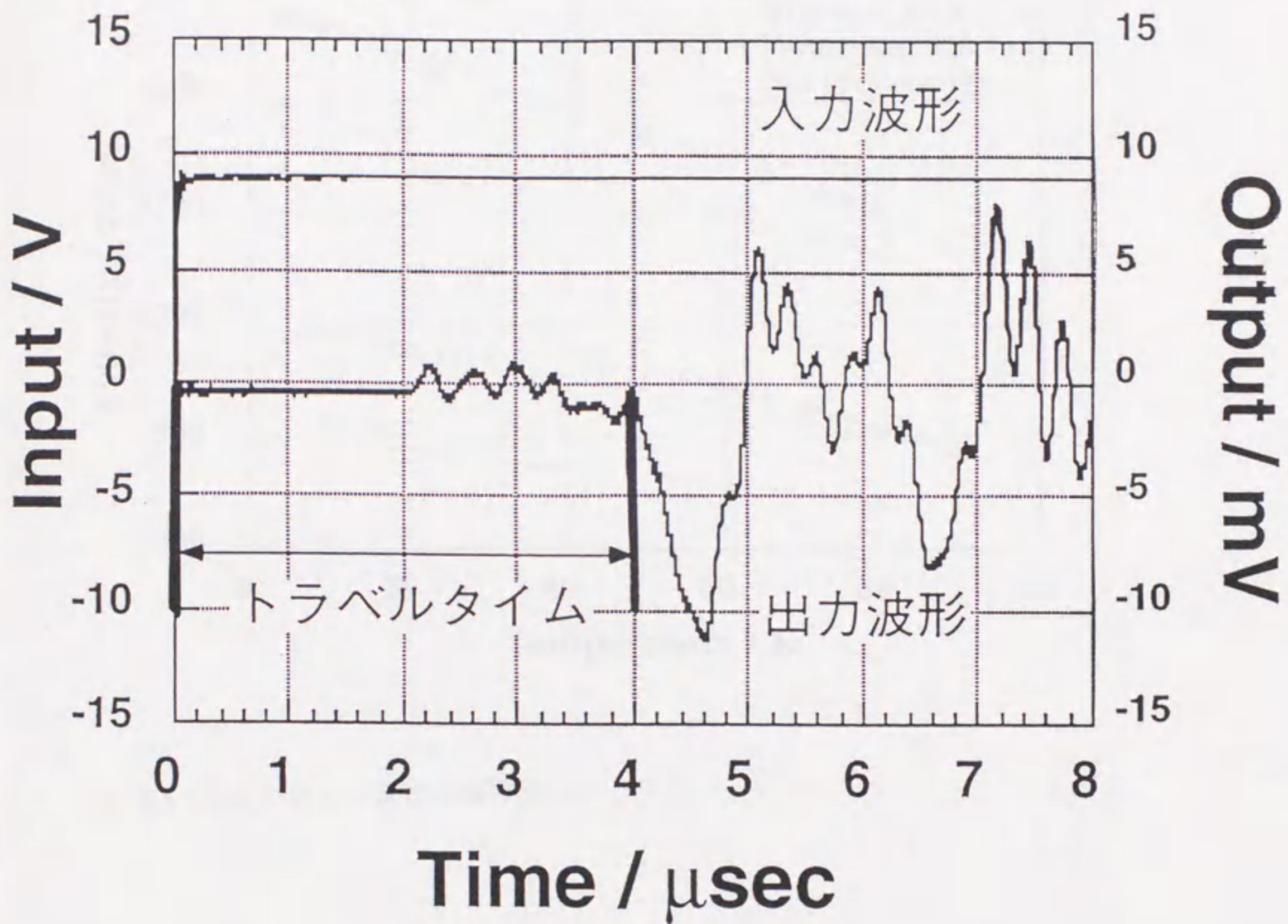


図 3-4 実際に得られた波形データの例。縦軸は左側が入力波形に、右側が出力波形に対するもの。

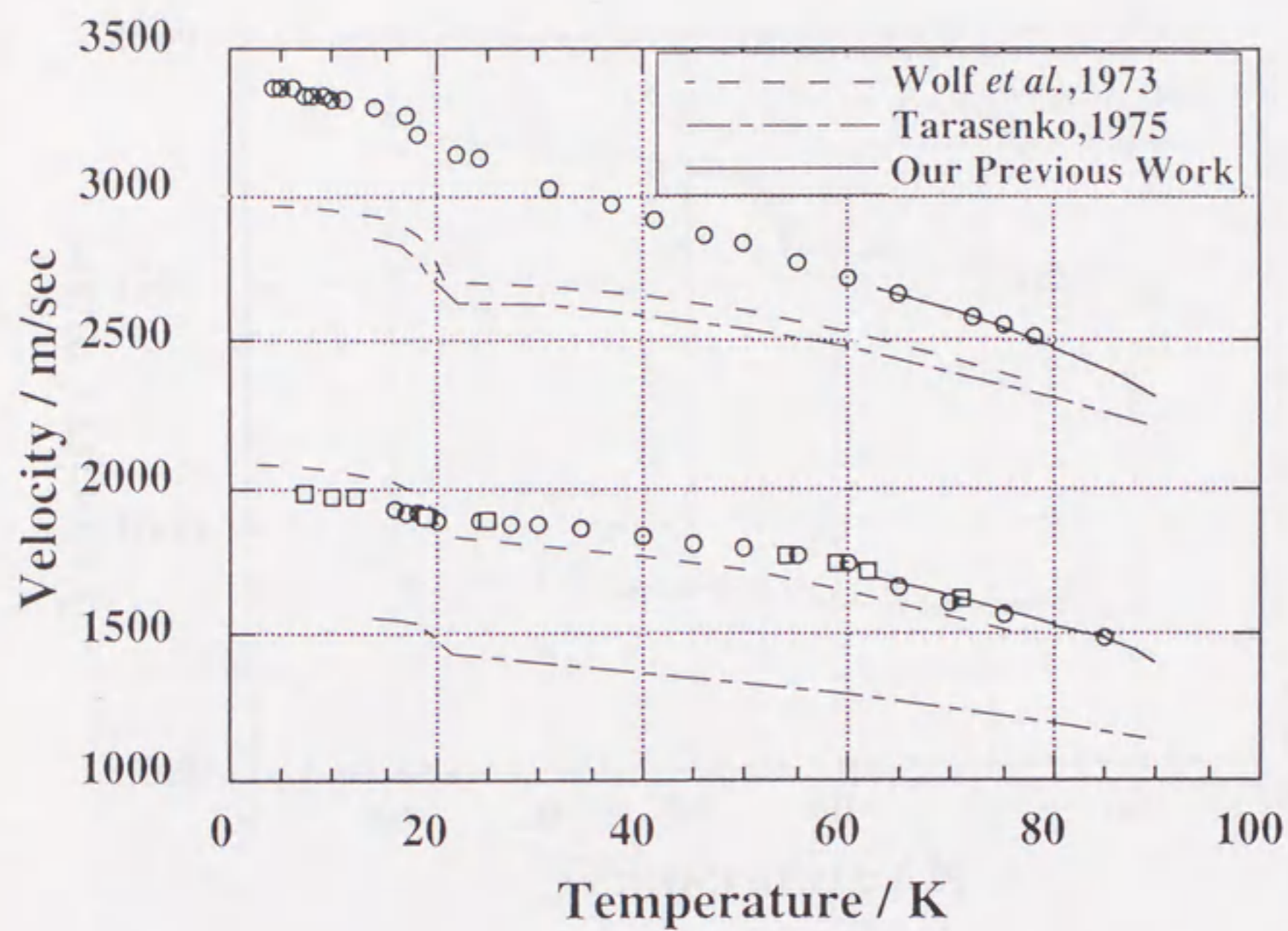


図 3-5 固体メタンの音速の温度変化。

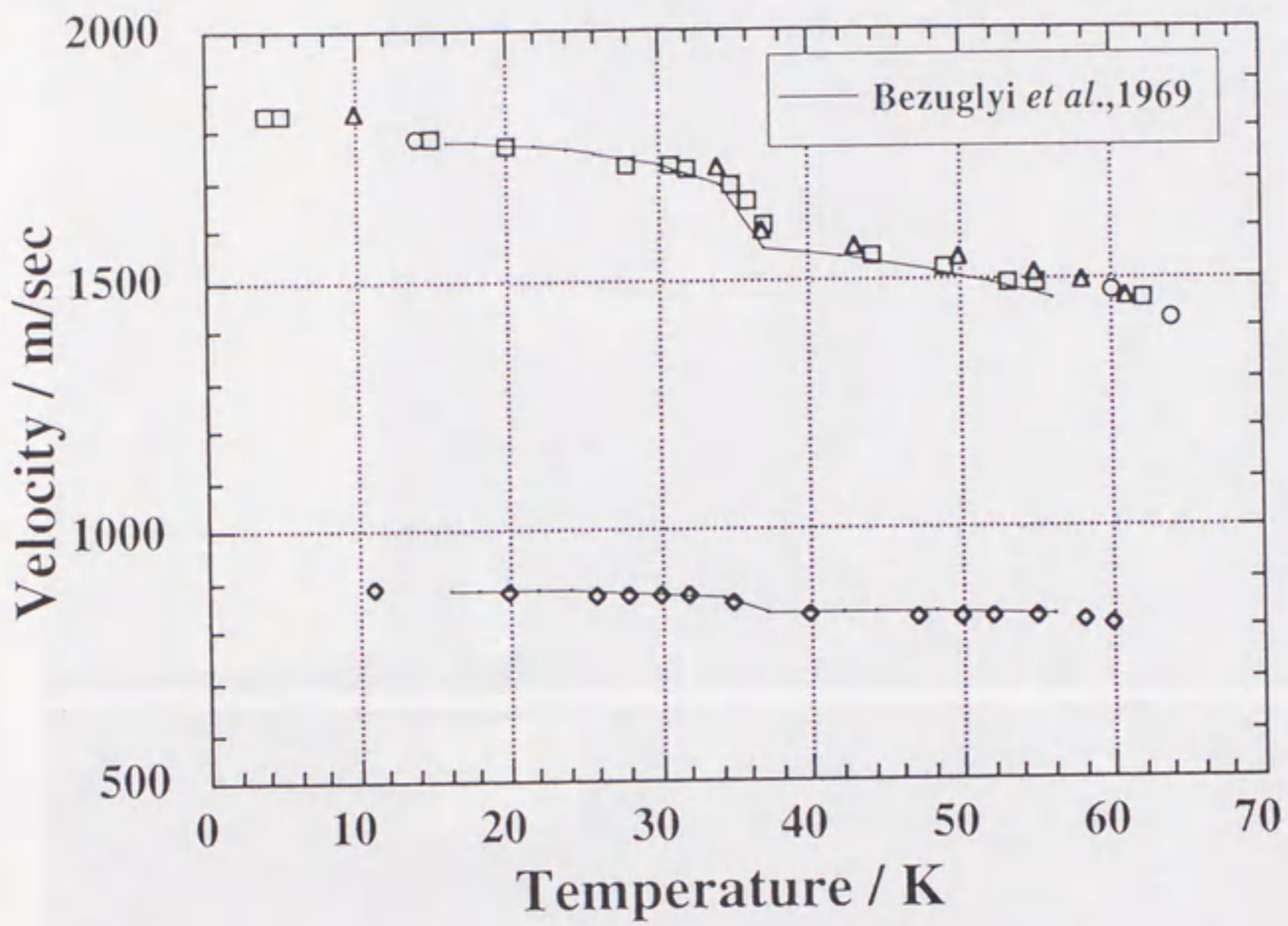


図 3-6 固体窒素の音速の温度変化。



図 3-7 固体窒素の 50 K における変形の様子。中心の茶色のロッド部分が試料の中に押し込まれていることが分かる。試料の上部の白濁部分は圧力が下がったため気相から直接固化した窒素である。

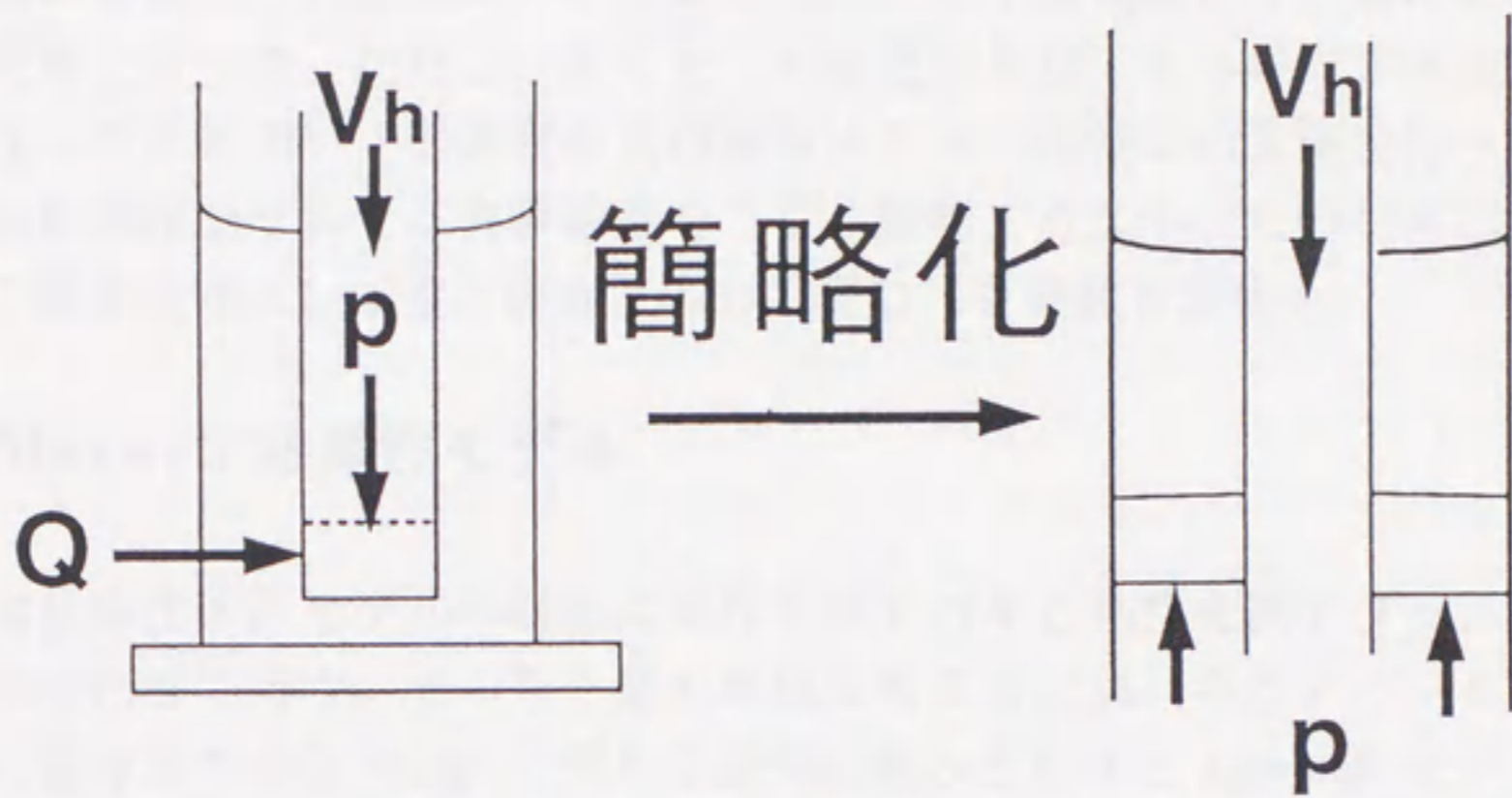


図 3-8 ニュートン流体を仮定した場合のポアズイユ近似の概略。

4. 応力緩和実験

前章の音速測定の際においても変形に関する予備実験を行い固体窒素の粘性率の見積を行った。ただし、あくまで大雑把な見積であるので本実験では更に粘弾性モデルを用いて固体窒素及び固体メタンの粘性率の見積を行った。また単純な粘弾性モデルでは実験結果をうまく説明できなかったため非ニュートン粘性の概念を導入して歪み速度と応力とのべき乗数を求めた。

4.1 Maxwell 粘弾性モデル

通常粘弾性体のモデルの構築は弾性を表すバネと粘性を表すダッシュポットを組み合わせて行う。そのうち最も単純なモデルにはバネとダッシュポットを並列に組み合わせた Voigt モデルと直列に組み合わせた Maxwell モデルがある(図 4-1)。本実験の解析には応力緩和を扱うので Maxwell モデルを用いた。以下に Maxwell モデルの構成方程式を示す

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{\dot{\sigma}}{G}$$

この式を時刻 $t \geq 0$ において歪みが一定であるという条件で解くと以下の式が得られる

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

ただし、ここで τ は緩和時間で $\tau = \eta/G$ で定義される。この結果から歪みが一定の条件ではその応力は指数的に減少していくことが分かる。

4.2 非ニュートン粘性の導入

通常物質の変形においてはその粘性は必ずしもニュートン流体に従わない場合が多い。そこで歪み速度と応力との間に $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$ の様なべき乗の関係が成り立つ様な非ニュートン粘性を導入する。この場合には Maxwell モデルの構成方程式は以下のように表される

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n + \frac{\dot{\sigma}}{G}$$

この式を前節と同様にして時刻 $t \geq 0$ において歪みが一定であるという条件で解くと以下の式が得られる

$$\sigma = \left\{ (n-1)(At - C) \right\}^{\frac{1}{1-n}}$$

ただし、ここで C は積分定数である。このことから非ニュートン粘性を導入した場合は、歪みが一定の条件ではその応力の緩和は時間の分数関数として表すことができる。

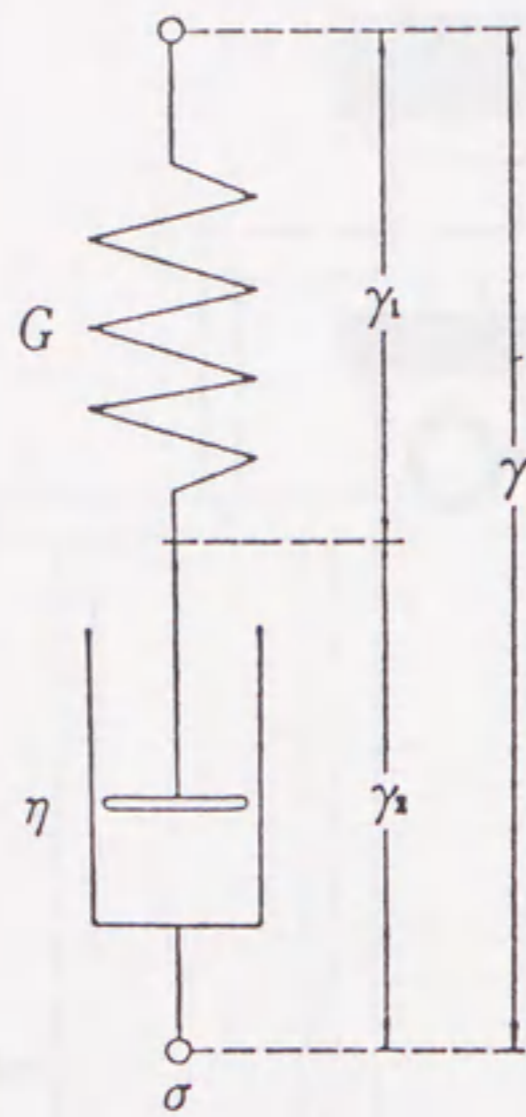
4.3 実験方法

本実験に用いた測定システムを図 4-2 に示す。基本的なシステムは前章の音速測定実験のものと同じである。測定装置は二重のガラス製のデュワーの中に設置した。内側と外側のデュワーにはそれぞれ寒剤として液体ヘリウム・液体窒素が入る。メタンと窒素の融点はそれぞれ 90 K と 64 K なので、冷媒としては液体ヘリウムを主に用いた。メタン・窒素どちらの場合も試料用のガラスセルの内部をロータリーポンプで 0.1 Torr 程度の真空にひいてのち、ポンベからガスをセル内に充填させゆっくりと温度を下げていき液相からゆっくりと試料を固化させて空隙率の小さい均質な試料を作成した。試料作成時の冷却速度は毎分 1 K 以下に制御した。試料は直径 17.5 mm、高さ 7.5-14.0 mm の円筒形のものをガラス製の試料フォルダの内部に作成した。試料用のセルは長さが 20 mm、外径が 20 mm の中空の円筒形である。ガラスデュワーは外部からの熱放射を減らすために内部に銀メッキが施されているが、縦にスリットがいてあり外部から実験装置を見ることが出来る。更に試料セルもガラス製であるので装置の外部から試料の様子を観察することが出来る。温度は金+0.07%鉄-クロメル熱電対を用いて試料の上部と下部の 2 カ所で測定した。試料の両端での温度勾配は ± 2 K 以内であった。温度は内側のデュワーに送り込むヘリウムの流量によって ± 1 K 以内に制御した。また測定により変化した温度範囲で固体メタン・窒素どちらの試料もクラックや空隙を生じることはなかった。応力は中心のロッドに取り付けた最大荷重が 200 kgf のロードセルによって測定した。そのデータは 12 ビット A/D 変換器を通して 0.1 秒おきにマイクロコンピュータに記録した。

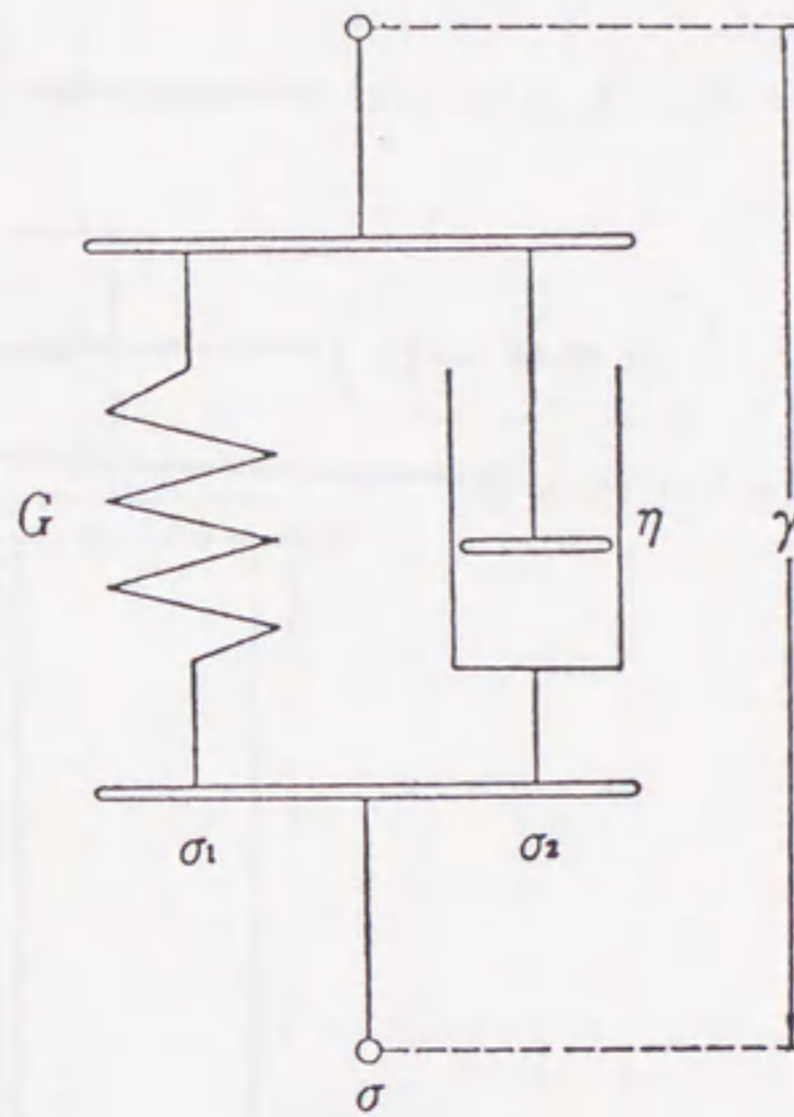
4.4 応力緩和曲線と非ニュートン粘性

40 K における固体窒素の応力緩和曲線を図 4-3 に、77 K 及び 7 K における固体メタンの応力緩和曲線を図 4-4、4-5 に示す。これらの曲線は一見すると指数関数的に応力が減少しているように思えるが、実際にはこの曲線は単純な指数関数ではフィッティングする事は出来なかった。このことから固体窒素・メタンはどちらも 4.1 節で書いたような単純な Maxwell モデルでは表せられない事が分かった。そこで 4.2 節で議論した非ニュートン粘性の導入した Maxwell モデルより導いた分数関数でフィッティングを行った。図 4-3、4-4 及び 4-5 中の点線で示したのがその回帰曲線である。この結果から固体窒素の 40 K におけるべき乗数 $n=1.9$ 、固体メタンの 77 K と 7 K におけるべき乗数をそれぞれ $n=1.9$ 、 $n=3.8$ と求めることが出来た。この値を用いて 0.1 MPa における固体窒素と固体

メタンの見かけの粘性率を求めた。ここで必要となる剛性率については、3章で得られた音速のデータを用い 3-2 節で述べた関係式を用いて見積もった値を使用した。ただしその際に必要となる固体窒素及び固体メタンの密度に関してはそれぞれ Scott 1976、Prokhvatilov and Isakina 1983 の値を用いた。これによって粘性率を 40 K の固体窒素については 5×10^{10} Pa sec、77 K 及び 7 K の固体メタンについてはそれぞれ 1×10^{11} Pa sec、 1×10^{13} Pa sec と見積もることが出来た。ここで求めた値のうち、固体窒素の粘性率について前章で求めた 50 K における値と比べると 3~4 桁の違いが生じている。この原因としては前章ではニュートン粘性を仮定しているのに対して今回は非ニュートン流体を仮定しているという違いが考えられる。また今回の実験は試料の外側を試料作成のためのガラスセルが覆っているため、これによって試料の変形が妨げられている可能性が高い。以上のような問題点をはっきりさせ、また固体窒素及び固体メタンの大まかなレオロジーを示した点から考えてもこの応力緩和実験の意義は大きい。ここで、これまでに得られている Non-water Ice の物性値についてまとめたものを表 4-1 に示す。ただしこれ以上の定量的な測定については次章の一軸圧縮変形実験に委ねることとする。



(a) 単純マクスウェル模型



(b) 単純フォークト模型

図 4-1 最も単純な粘弾性モデル

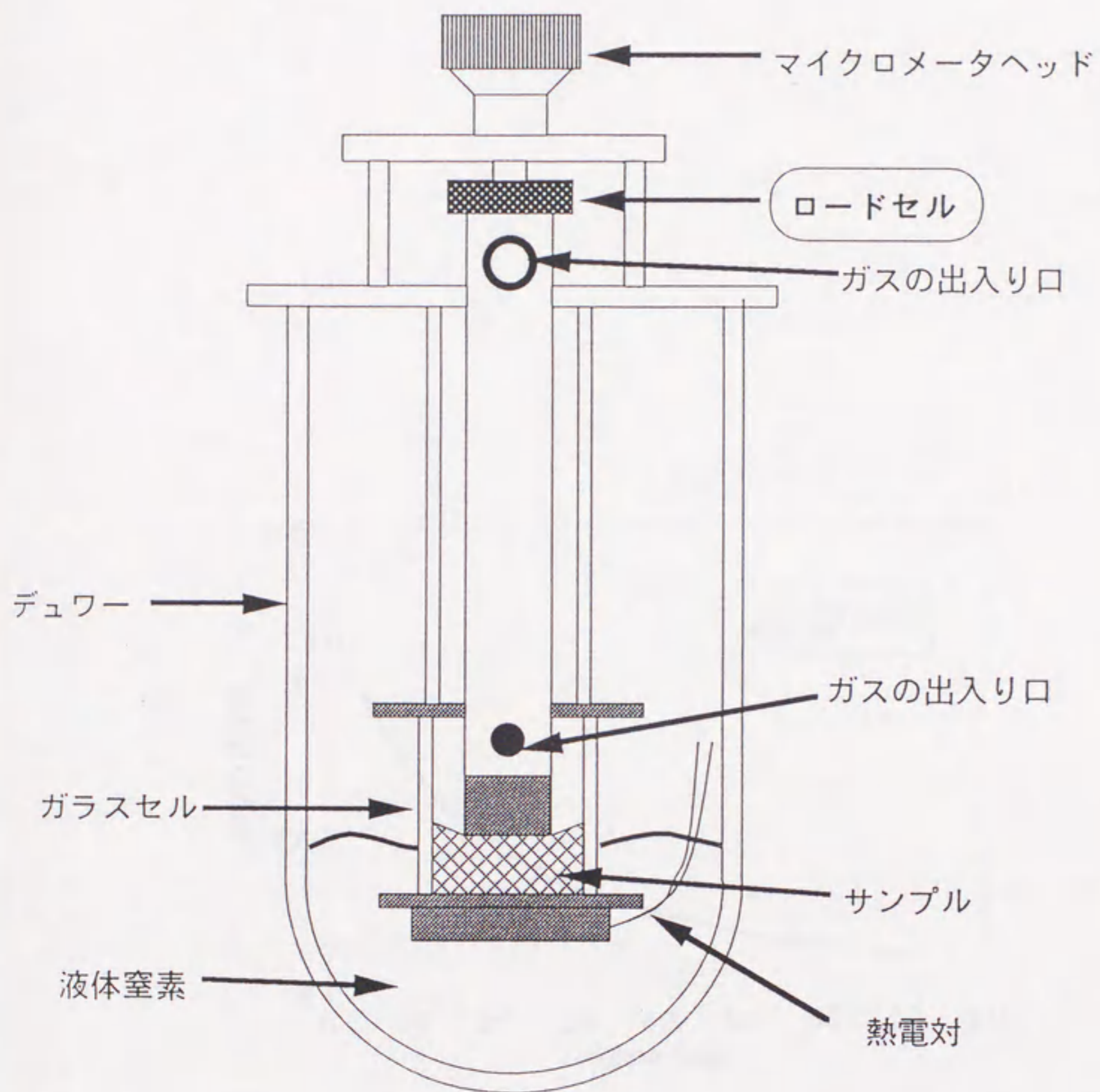


図 4-2 極低温応力緩和実験装置の模式図

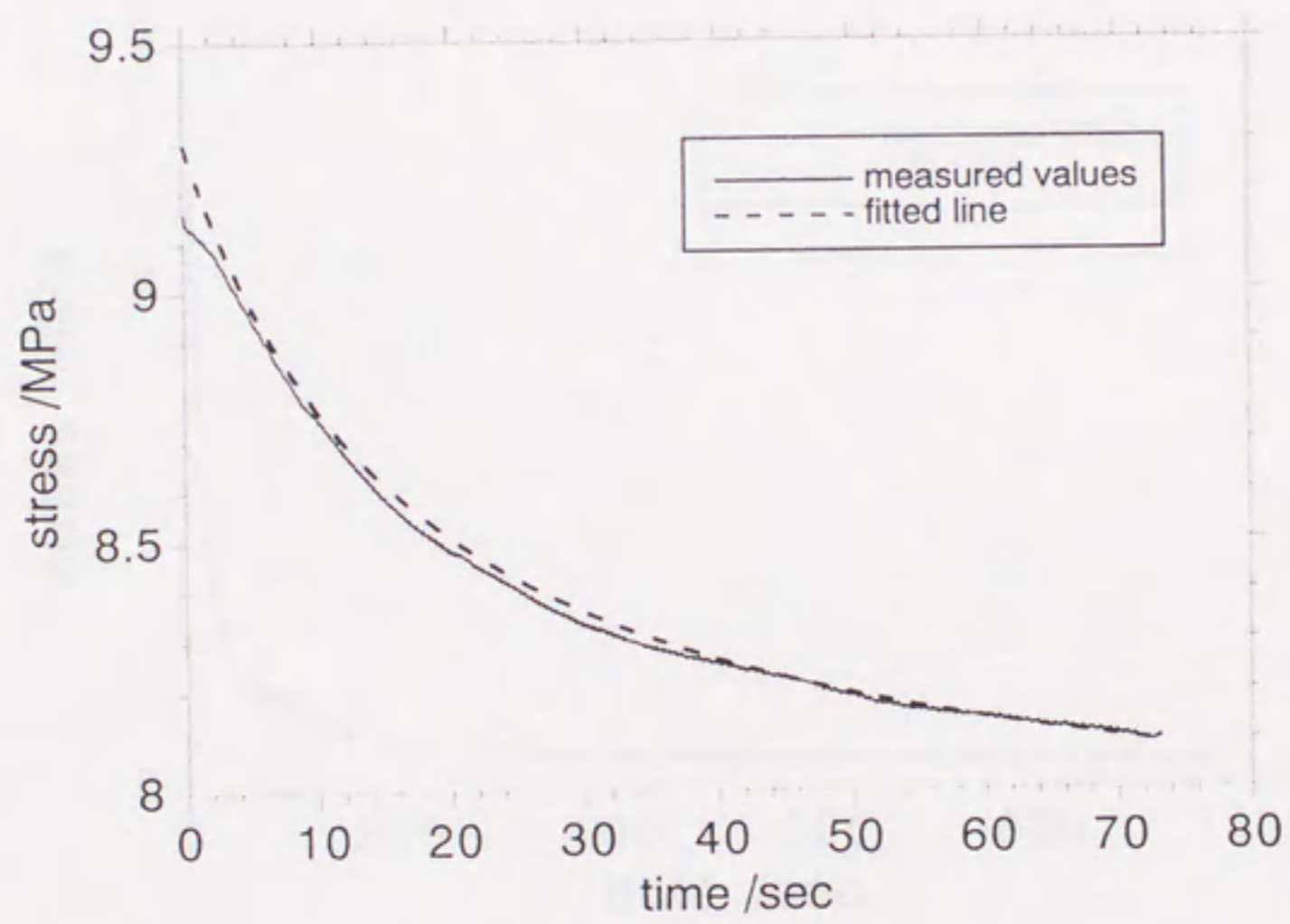


図 4-3 固体窒素の 40 K における応力緩和曲線。

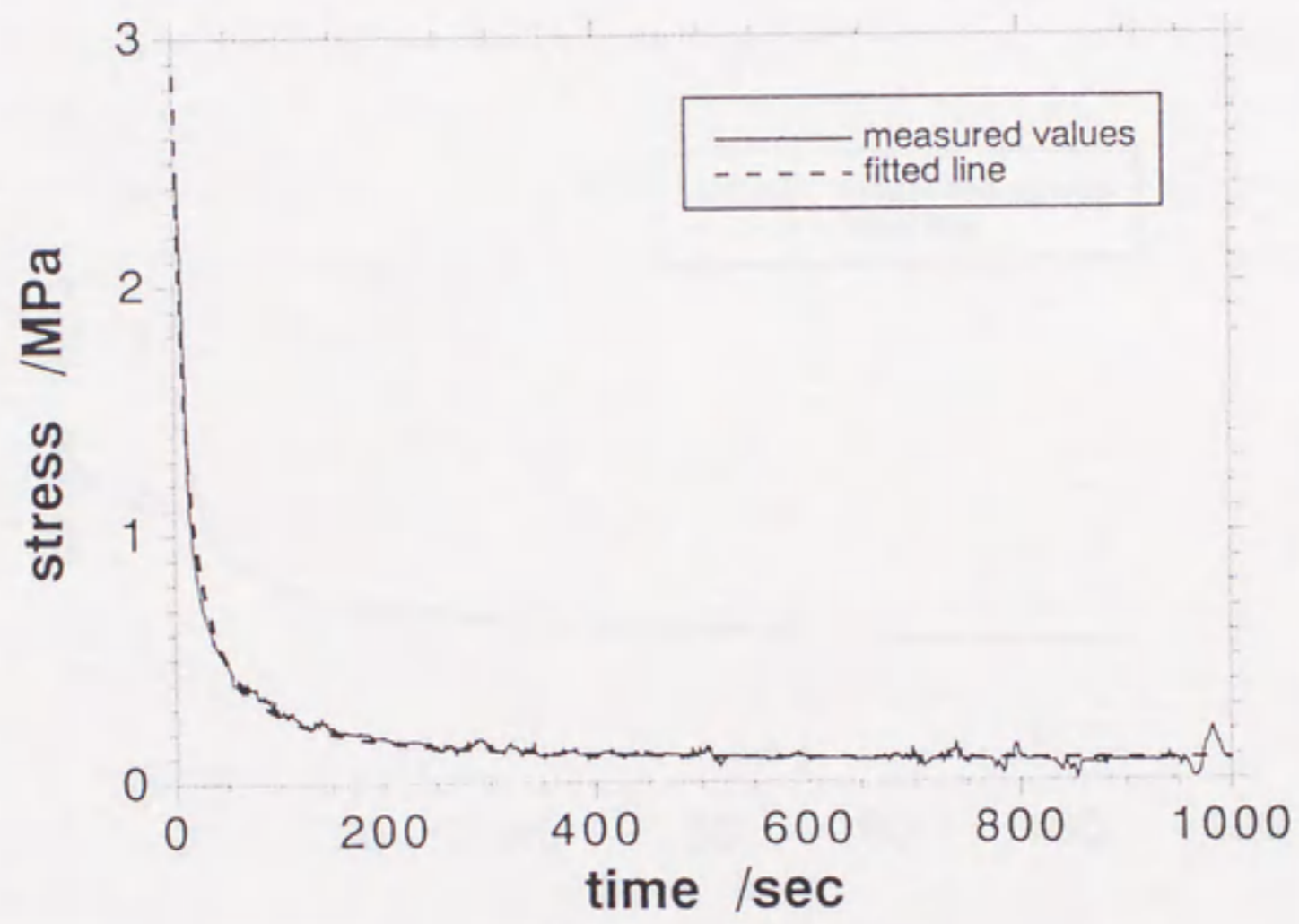


図 4-4 固体メタンの 77 K における応力緩和曲線。

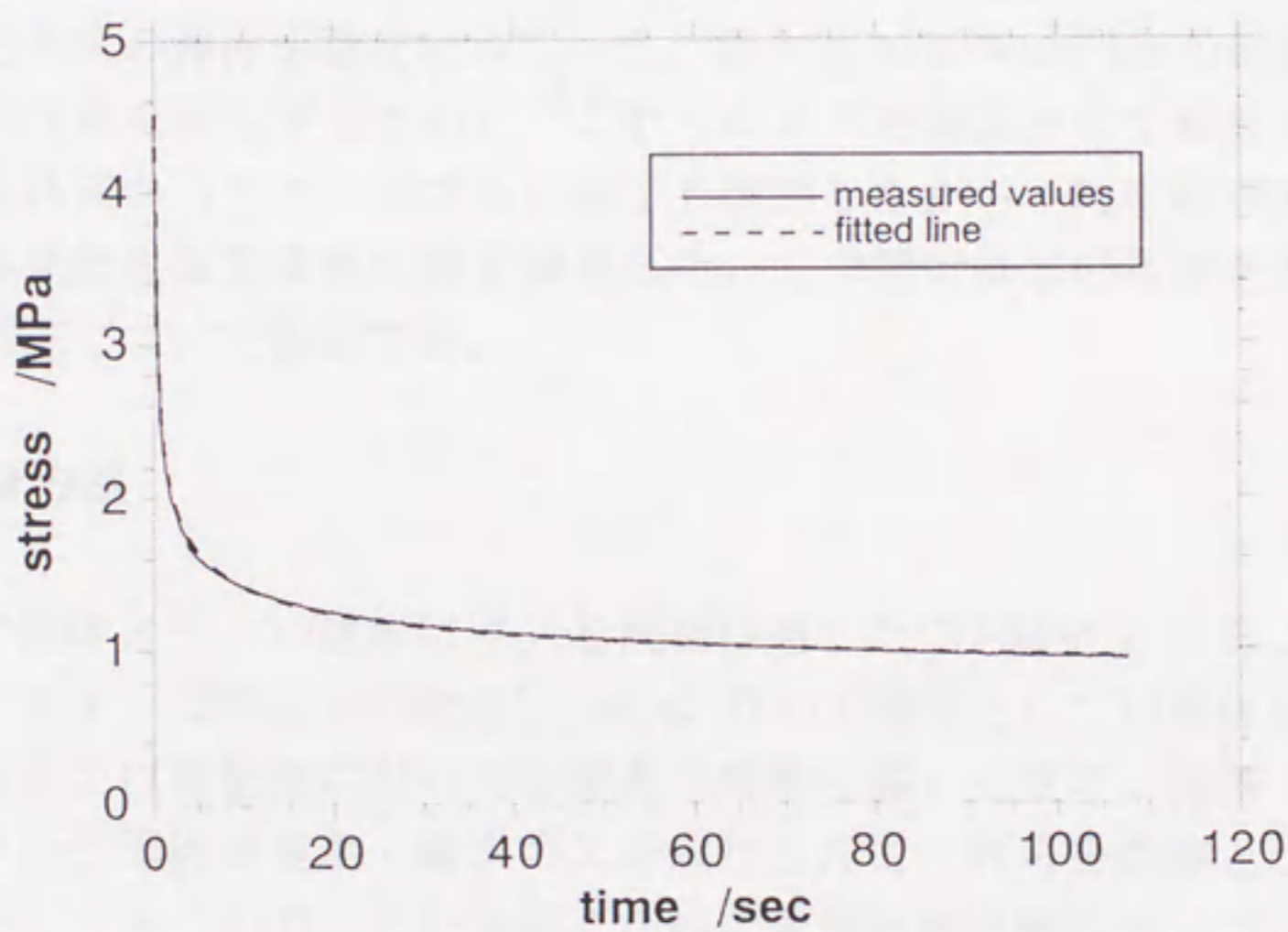


図 4-5 固体メタンの7Kにおける応力緩和曲線。

5. 一軸圧縮変形実験

5.1 固体メタンの一軸圧縮実験

海王星の衛星であるトリトンや冥王星をはじめとした外惑星系の天体には固体メタン、固体窒素、固体二酸化炭素、固体一酸化炭素といった H_2O の固相以外の「氷」である Non-Water Ice が存在することが地上からの赤外分光およびボイジャー等の惑星探査機の観測から分かっている。外惑星系の天体の奇妙な表面地形やその内部構造の進化あるいは衝突などによる形成過程を知る手がかりとして、Non-Water Ice の物性を知ることは非常に重要である。しかしこれまでに Non-Water Ice の物性はほとんど調べられていないのが実状である。我々はこれまでに音速を測定することにより Non-Water Ice のうち固体メタン、固体窒素、固体二酸化炭素の弾性定数を求めている。我々は Non-Water Ice の粘性率といった非弾性的性質を測定するために、これらのガスを凝固させて結晶を作成し極低温下でも外部からそのサンプルの様子を観察しながら一軸圧縮実験を行うことの出来る極低温変形実験装置を開発した。この節ではこの装置を用いた固体メタンの測定について報告する。

5.1.1 実験方法

多結晶の固体メタンの試料はガスを液相に通したのち固化させることにより準備した。メタンの常圧での融点は 90 K なので寒剤としては液体窒素を用いた。固体メタンは極低温においても窒素や酸素と激しく反応し潮解（この場合は固体メタンが周囲の窒素・酸素ガスを取り込んでそれらを溶液として溶解すること）してしまうので、これを防ぐために変形実験装置のサンプル用ガラスセルは二重構造にしてある。今回の実験に用いた極低温一軸圧縮装置の模式図を図 5-1 にその外観を図 5-2 示す。試料の作成及び変形を行う実験装置はガラスデュワーの中に置かれている。デュワーは外部からの輻射熱を軽減するために、その内側は銀メッキが施されている。ただし、外部からの試料の観察が可能なように縦にスリットが切ってある。試料用のセルは中空な円筒形のガラス製で高さは 15 mm で直径は 10 mm である。熱電対は金+0.07%鉄-クロメルを用い試料用セルを固定しているアルミニウムの台に取り付けてある。サンプル作成のために内側と外側のガラスセルをそれぞれ 0.1 Torr 程度の真空にひき、そのあと内側のセルにメタンガスを充填する。そのあとデュワー内に少しずつ液体窒素を満たしていくことによりセル内のメタンを冷却し液相を通してゆっくりと固化させる。試料作成時の冷却速度は毎分 1 K 以下に制御した。このようにし

て非常に空隙率が低くクラックのない試料を作成した。この方法を用いて作成した試料の空隙率の低さは3章において示されている通りである。試料の形状は直径 10 mm、高さ 6~7 mm の円柱形である。変形実験は試料用セルを試料から取り外した後に行う。図 5-3 に示すようにサンプルを作成した場所に残したまま内側のガラスセルを引き抜きセルを端に移動させることにより測定が可能な状態になる。この装置で測定可能な温度は 64 K 以上で、また現在制御可能な歪速度は $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ である。作成可能なサンプルは直径が 10 mm、長さが 5~20 mm である。実験時の温度は 64~77 K で、歪速度は $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ である。77 K 以下の温度はデュワー内を真空にひいて圧力を下げることにより達成した。温度制御の精度は ± 1 K である。変形用のロッドの変位はステップモーターの回転によりマイクロメーター・ヘッドを駆動することにより行った。応力はロードセルにより測定し、そのデータは 12 ビット A/D 変換器を通して 0.1 秒おきにマイクロコンピュータに記録した。試料の変形は歪みがおよそ 50% になるまで行った。全ての実験過程における試料の変形はビデオカメラを使って記録した。

5.1.2 固体メタンの変形様式

液相を等してゆっくりと固化させた固体メタンはグレインサイズが 2~3 mm の透明な結晶になる。今回の実験で作成した固体メタンの試料の画像を図 5-4 に示す。温度は 77 K で、直径 10 mm、長さ 6.8 mm の試料が出来ているのが分かる。試料の上部に見えてるのは引き抜かれた試料用のガラスセルである。変形実験中の試料について示したのが図 5-5 である。試料の歪みはおよそ 40% である。試料の中央部分が膨れるような形で変形していることが見て取れる。試料はクラックを生じることなく変形していくことから、試料の観察から ductile な変形をしていることが分かる。

今回の実験について試料の変形の様子を知るために応力-歪み曲線をまとめたものが図 5-6 である。この図から分かるように今回行った全ての実験範囲において応力は最大値をもつ。この応力を最大差応力と呼ぶ。このような緩やかな最大値をもつ様な変形は ductile な変形であると考えられる。以上のことから、今回の実験における温度・歪み速度の範囲では固体メタンは全て ductile に振る舞うという事が分かる。

5.1.3 固体メタンのレオロジー

今回の実験結果について歪み速度と最大差応力の関係についてまとめたもの

が図 5-7 である。この図は両対数でプロットしてあるので、それぞれの温度に関してフィッティングした直線の傾きが 1 ではないことから歪み速度と応力の間にはべき乗の関係が成り立ち、そのべき乗数は $n=1.9\pm 0.2$ と求めることが出来た。この値は 5.4 節で応力緩和実験の結果から求めた値である $n=1.9$ と等しい。これらのことから 3 章のように固体メタンの粘性をニュートン流体と仮定したのは妥当な近似ではなかったと言える。通常べき乗則が成り立つような場合、その物質の変形は結晶がある面を境にして滑り変形を行う転移クリープに支配されていると考えられる。しかしその場合には $n=3\sim 5$ 程度の値を持つことが普通である。今回の固体メタンの場合にはそれに比べて n の値が小さいのでその変形の転移クリープのみでは説明できない。点欠陥の拡散によって起こる拡散クリープは通常 $n=1$ であるので、固体メタンの変形は転移クリープと拡散クリープの重ね合わせとして理解できる。

次に温度と最大差応力についての関係についてまとめたものが図 5-8 である。温度についてはその逆数、差応力については対数でプロットしてあるのでそれぞれの歪み速度について直線でフィッティングすることにより以下の関係式から固体メタンの変形に関する活性化エネルギー Q を見積ることが出来る

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

この式を用いると固体メタンの活性化エネルギー $Q=2$ kJ/mol と求めることが出来た。この値は 243~268 K における Water Ice について Kirby et al., 1987 によって得られてる値 $Q=90$ kJ/mol と比べると非常に小さく、固体メタンの極低温での流動性をよく示していると考えられる。

最後に今回の実験によって得られたべき乗数 n と活性化エネルギー Q を用いて以下の関係式を用いて 0.1 MPa における固体メタンの見かけの粘性率を求めた

$$\eta = \frac{\sigma}{3\dot{\epsilon}}$$

得られた粘性率は 77 K では 2×10^7 Pa sec、64 K では 7×10^7 Pa sec と見積もることが出来た。この値は 4 章での非ニュートン粘性を考慮した見積りよりも 3 章で求めたニュートン流体を仮定した見積りに近い値である。このことから試料の外を覆っているガラスセルは試料の変形を大きく妨げていることが示唆される。また今回得られた固体メタンの粘性率は同程度の homologous 温度における Water Ice の粘性率と比べて 5~7 桁程小さな値である。このことから極低温下においても如何に固体メタンが変形しやすいかが理解できる。

5.2 固体窒素の一軸圧縮実験

トリトン表面に固体窒素が存在することは地上からの望遠鏡を使った近赤外観測により発見された (Cruikshank et al., 1984)。惑星探査機ボイジャー2号によって、北半球のカンタロープ・テレーンや南半球に見られる衝突クレーターの痕跡のほとんど見られない平坦な平原といった非常に特徴的なトリトンの表層地形が明らかになった (Smith et al., 1989)。このような表層構造の形成を明らかにするためには Non-water Ice、特にトリトン表面の主要構成物質である固体窒素の非弾性的な物性を知る必要がある。その後の地上からの高分解能の観測によって、更に冥王星表面でも固体窒素が発見された (Owen et al., 1992; 1993)。固体窒素は上記以外の外惑星系の形成過程を考える上でも非常の重要な Non-water Ice のひとつであり、表層での地形進化を研究する上で、例えば粘性率といったその非弾性的性質を知ることが必要不可欠である。しかし、これまで固体窒素の非弾性的物性は全く調べられていない。この章では極低温一軸圧縮実験装置を用いた多結晶の固体窒素の変形実験を行い、その非弾性的物性について議論する。

5.2.1 実験方法

多結晶の固体窒素の試料はガスを液相通したのち固化させることにより準備した。窒素の常圧での融点は 64 K なので寒剤としては液体ヘリウムを用いた。今回の実験で用いた極低温一軸圧縮装置の模式図を図 5-9 に示す。試料の作成及び変形を行う実験装置は2重のデュワーの中に置かれていて、外側のデュワーは液体窒素用、内側のデュワーは液体ヘリウム用である。どちらのデュワーも外部からの輻射熱を軽減するために、その内側は銀メッキが施されている。ただし、外部からの試料の観察が可能なように縦にスリットが切っている。試料用のセルは中空な円筒形のガラス製で高さは 15 mm で直径は 10 mm である。固体窒素は極低温においても酸素と激しく反応するが、本実験では液体ヘリウムを使用するため内側のデュワーは真空に引きヘリウムガスで満たすので、前節の固体メタンの変形実験とは異なりサンプル用ガラスセルは一重である。熱電対は金+0.07%鉄-クロメルを用い試料用セルを固定しているアルミニウムの台に取り付けてある。試料はセルの内部をロータリーポンプにより 0.1 Torr 程度の真空にひいてからガスを送りゆっくりと成長させる。試料作成時の冷却速度は毎分 1 K 以下に制御した。このようにして非常に空隙率が低くクラックのない試料を作成した。この方法を用いて作成した試料の空隙率の低さは3章において示されている通りである。試料の形状は直径 10 mm、高さ 6~7 mm の円柱形である。変形実験は試料用セルを試料から取り外した後に行う。この際の手順は前節で述べた固体メタンの変形実験と同様である。実験時の温度

は 4~56 K で、歪速度は $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ である。温度制御の精度は $\pm 1 \text{ K}$ である。変形用のロッドの変位はステップモーターの回転によりマイクロメーター・ヘッドを駆動することにより行った。応力はロードセルにより測定し、そのデータは 12 ビット A/D 変換器を通して 0.1 秒おきにマイクロコンピュータに記録した。試料の変形は歪みがおよそ 50% になるまで行った。全ての実験過程における試料の変形はビデオカメラを使って記録した。

5.2.2 固体窒素の変形様式

ビデオテープに記録された固体窒素試料の変形前の様子を図 5-10 に示す。温度は 56 K で、直径 10 mm、長さ 6.8 mm の試料が出来ているのが分かる。液相を等してゆっくりと固化させた固体窒素はグレインサイズが 2~3 mm の透明な結晶になる。変形実験中の試料について示したのが図 5-11 である。試料の歪みはおよそ 50% である。試料の中央部分が膨れるような形で変形していることが見て取れる。試料はクラックを生じることなく変形していくことから、試料の観察から ductile な変形をしていることが分かる。一方、5 K における変形中の固体窒素試料の様子を示したのが図 5-12 である。上部から中央部にかけてクラックが入っており brittle な変形をしていることが分かる。

今回の実験について試料の変形の様子を知るために応力-歪みを実験温度別にまとめたものが図 6-12~6-15 である。これら図から分かるように今回行った実験範囲のうち 56 K、45 K の全てと 30 K の一部については、それらの応力曲線は最大値をもつ。このような緩やかな最大値をもつ様な変形は ductile な変形に分類できる。それに対して 5 K では応力曲線はあるところで応力が不連続に減少している部分がある。これはクラックが開いたため応力が急に開放されたためであると考えられる。同じ様な傾向が 30 K の大きな歪み速度の実験について見られる。このような変形様式は brittle 破壊に分類することが出来る。この場合には応力が急激に減少する直前の応力を最大物質強度と呼ぶ。以上のことから、今回の実験における温度・歪み速度の範囲では概ね固体窒素は高温では ductile に変形し、低温では brittle に破壊するという事が分かった。

固体窒素のレオロジー

今回の測定結果について歪み速度と最大差応力もしくは最大物質強度の関係についてまとめたものが図 5-17 である。この図は両対数でプロットしてある。5 K と 30 K の矢印が書いてあるデータについてはモータが最大トルクを越えてしまったために脱調を起こしたもので、プロットされている最大物質強度はその下限値である。56 K と 45 K での結果に関してはフィッティングした直線の傾き

が1ではないことから、歪み速度と応力の間にはべき乗の関係が成り立つ。直線の傾きからべき乗数は $n=2.2\pm 0.1$ と求めることが出来た。この値は5.4節で応力緩和実験の結果から求めた値である $n=1.9$ とほぼ等しい。これらのことから3章のように固体窒素の粘性をニュートン流体と仮定したのは妥当な近似ではなかったと言える。またこの n の値は前節で求めた固体メタンの値に極めて近い。このことから固体窒素の変形は固体メタンと同様に転移クリープと拡散クリープの重ね合わせであると考えられる。30 K と 5 K での実験についてはまだ測定点が少ないことと最大差応力もしくは最大物質強度の下限しか見積もれていない測定が多いことから n の値は見積もることは出来なかった。図中には brittle と ductile の境界を直線で表されている。歪み速度による依存性がほとんどないことから、固体窒素の α 相と β 相の転移温度である 35.6 K を境にしてその変形メカニズムが大きく異なっていることが考えられる。

次に温度と最大差応力についての関係についてまとめたものが図 5-18 である。温度についてはその逆数、差応力については対数でプロットしてある。それぞれの歪み速度について直線でフィッティングすることにより固体メタンの場合と同様に固体窒素の変形に関する活性化エネルギー Q を見積もることが出来る。ただし図から明らかのように相転移の温度である 35.6 K をより低温では brittle な変形をしていることから 45 K と 56 K のデータを用いて高温側の β 相についての活性化エネルギーを求めた。前節でも用いた活性化エネルギーに関する関係式を用いると固体窒素の β 相についての活性化エネルギーは $Q=4$ kJ/mol と求めることが出来た。この値は Water Ice の $Q=90$ kJ/mol と比べると非常に小さく、前節で求めた固体メタンの値とほぼ同じ値である。この結果は極低温での固体窒素の β 相の流動性をよく示していると考えられる。

最後に今回の実験によって得られたべき乗数 n と活性化エネルギー Q を用いて前節で用いた関係式を用いて 0.1 MPa における固体窒素 β 相の見かけの粘性率を求めた。得られた粘性率は 56 K では 2×10^8 Pa sec、45 K では 9×10^8 Pa sec と見積もることが出来た。この値は5章での非ニュートン粘性を考慮した見積と4章で求めたニュートン流体を仮定した見積との丁度間くらいの値である。また今回得られた固体窒素の β 相の粘性率は同程度の homologous 温度における固体メタンよりは1桁程大きな値であるが、Water Ice の粘性率と比べて4~6桁程小さな値である。このことから極低温下においても如何に固体窒素の β 相は変形しやすいと考えられる。

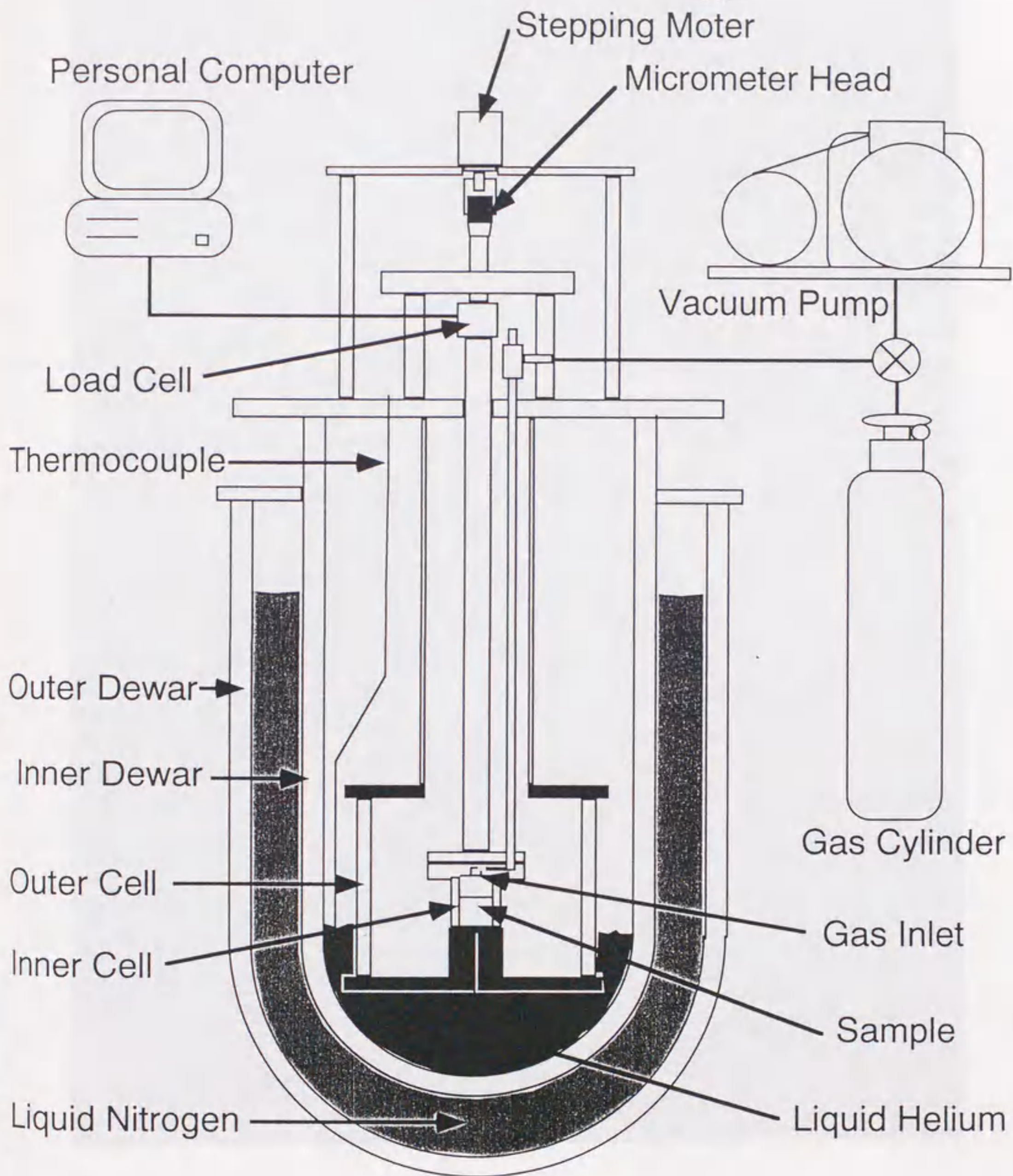


図 5-1 極低温一軸圧縮実験装置の模式図。固体メタンの変形に用いたもの。

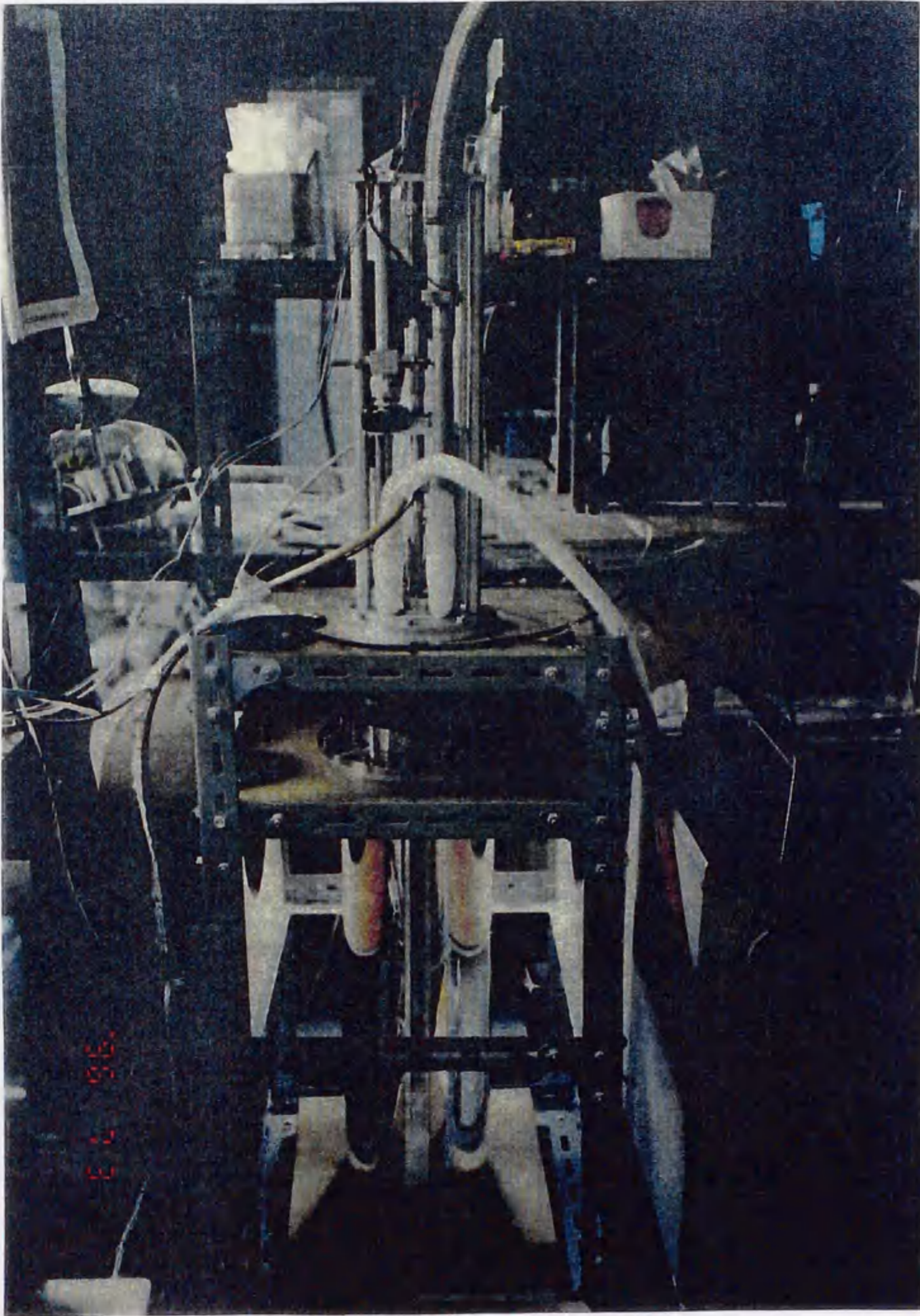


図 5-2 極低温一軸圧縮実験装置の外観。高さはおよそ 1.2 m である。

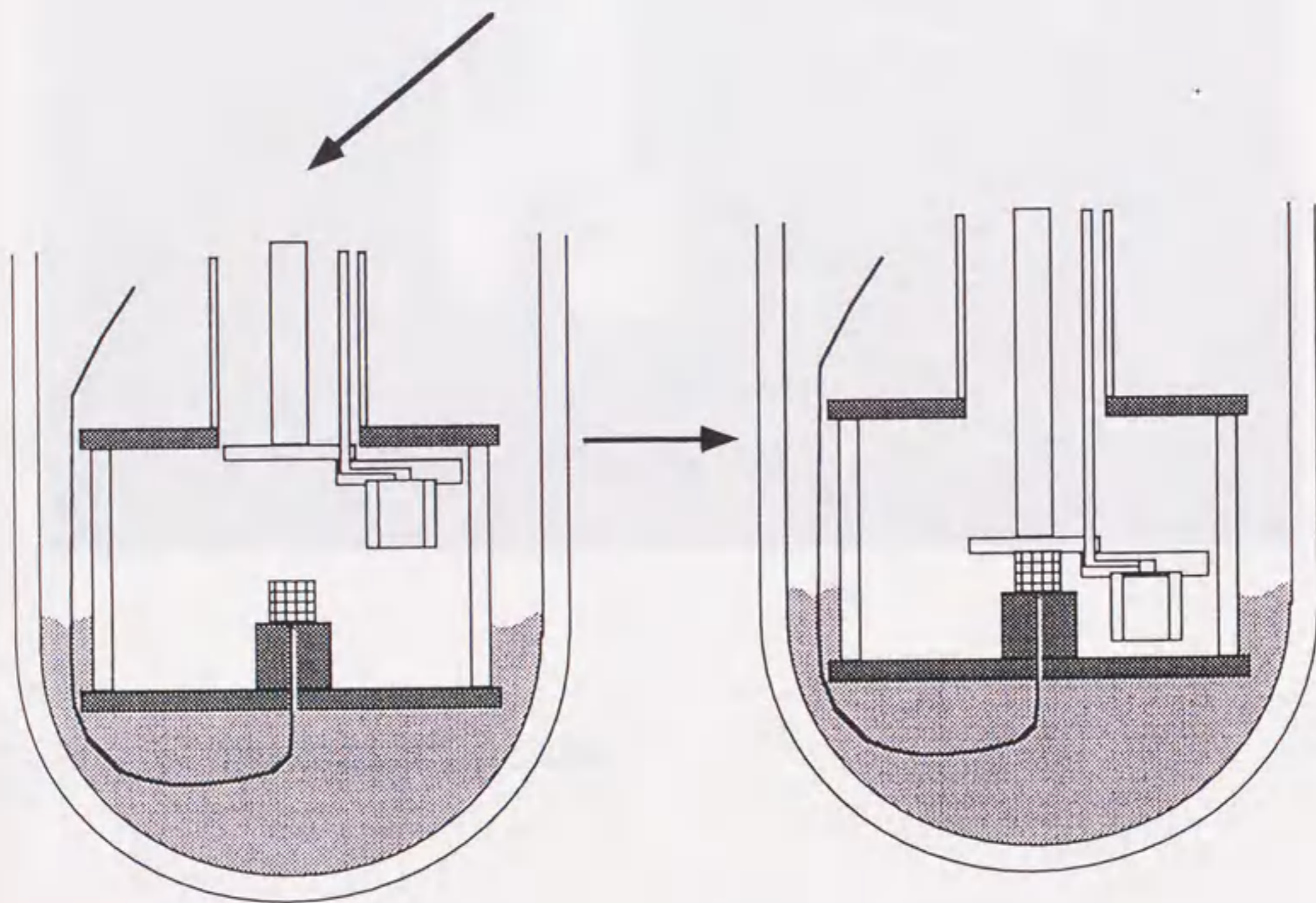
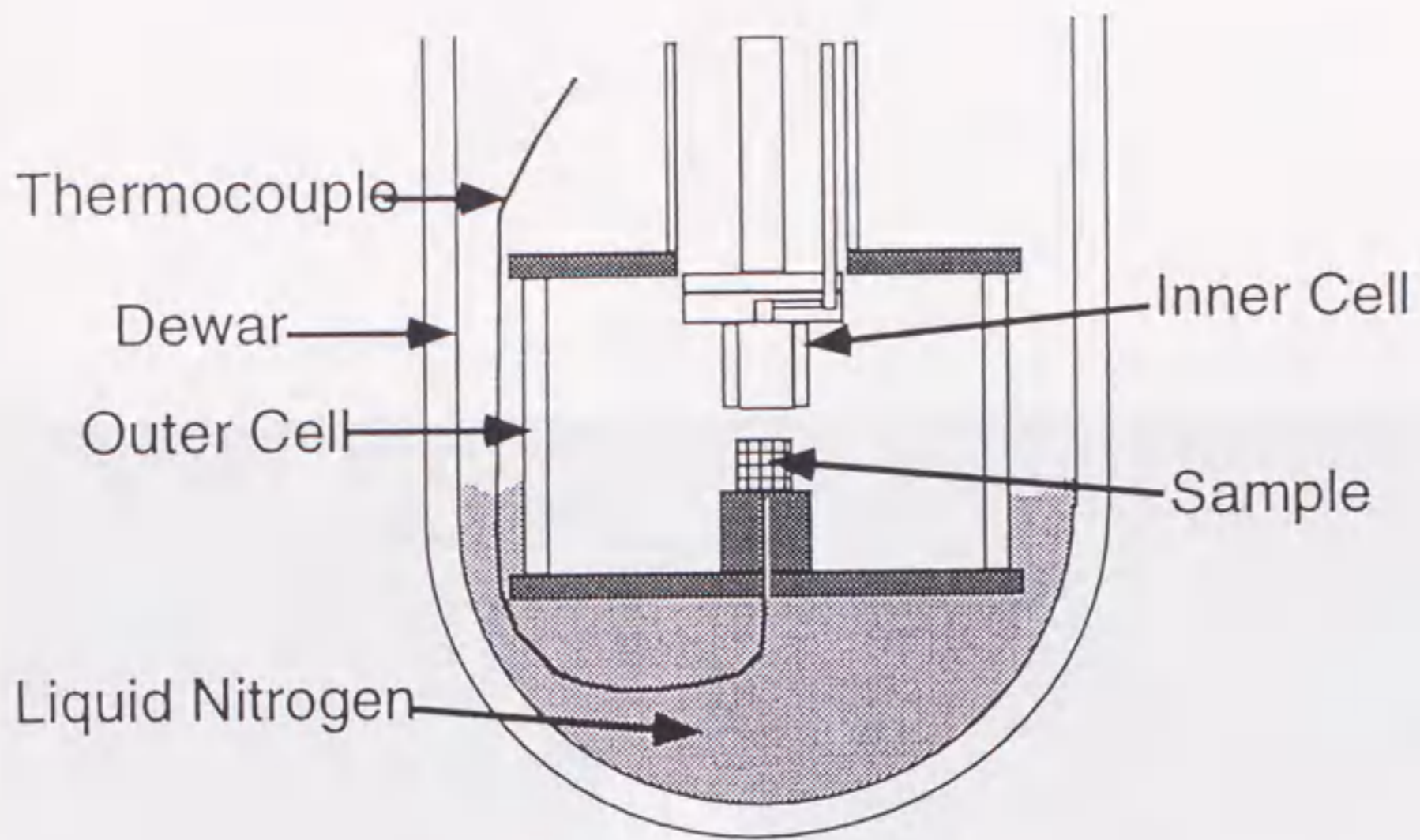


図 5-3 極低温一軸圧縮実験装置における試料作成から変形実験までの手順。

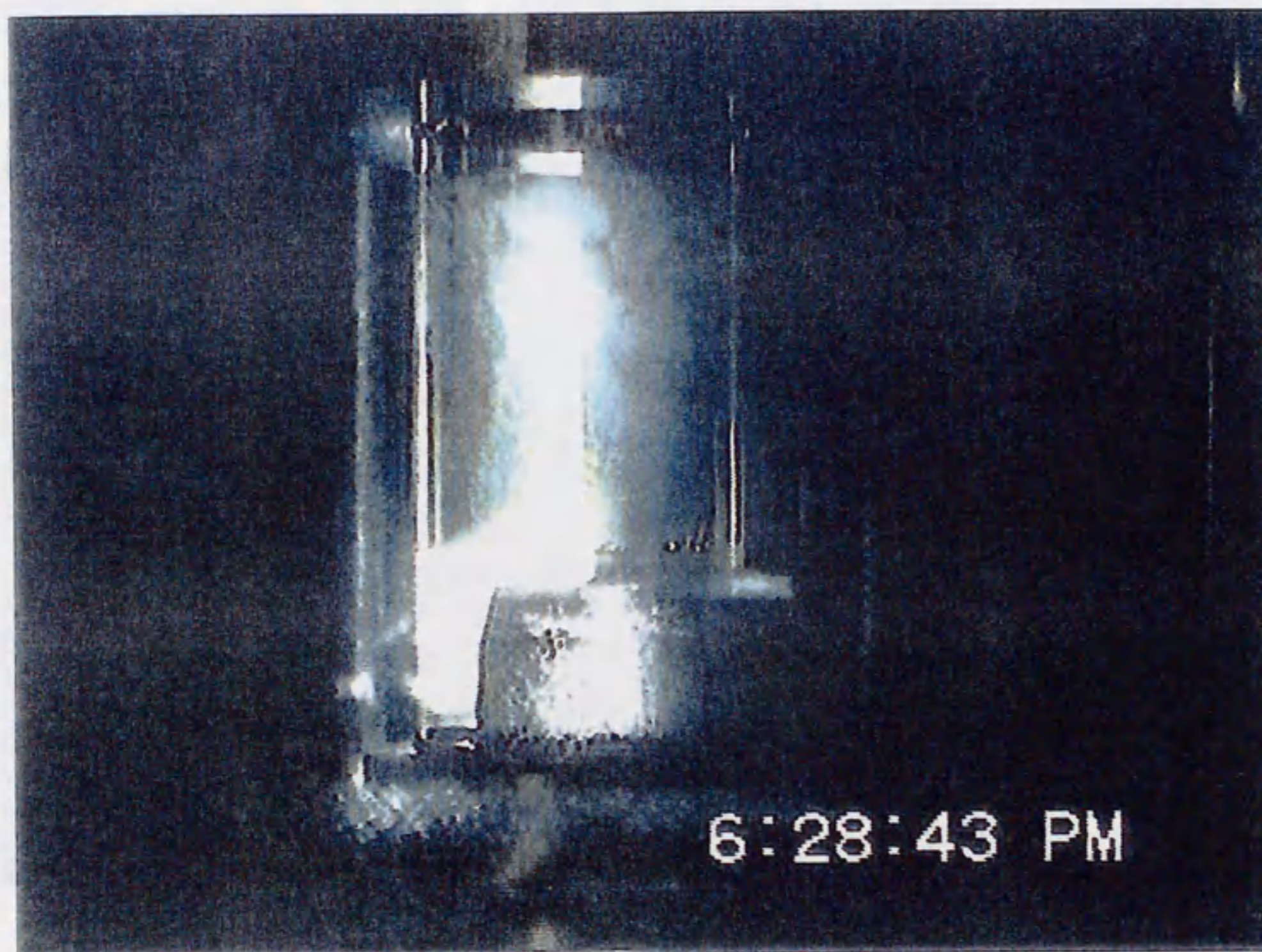


図 5-4 変形実験前の固体メタン試料。

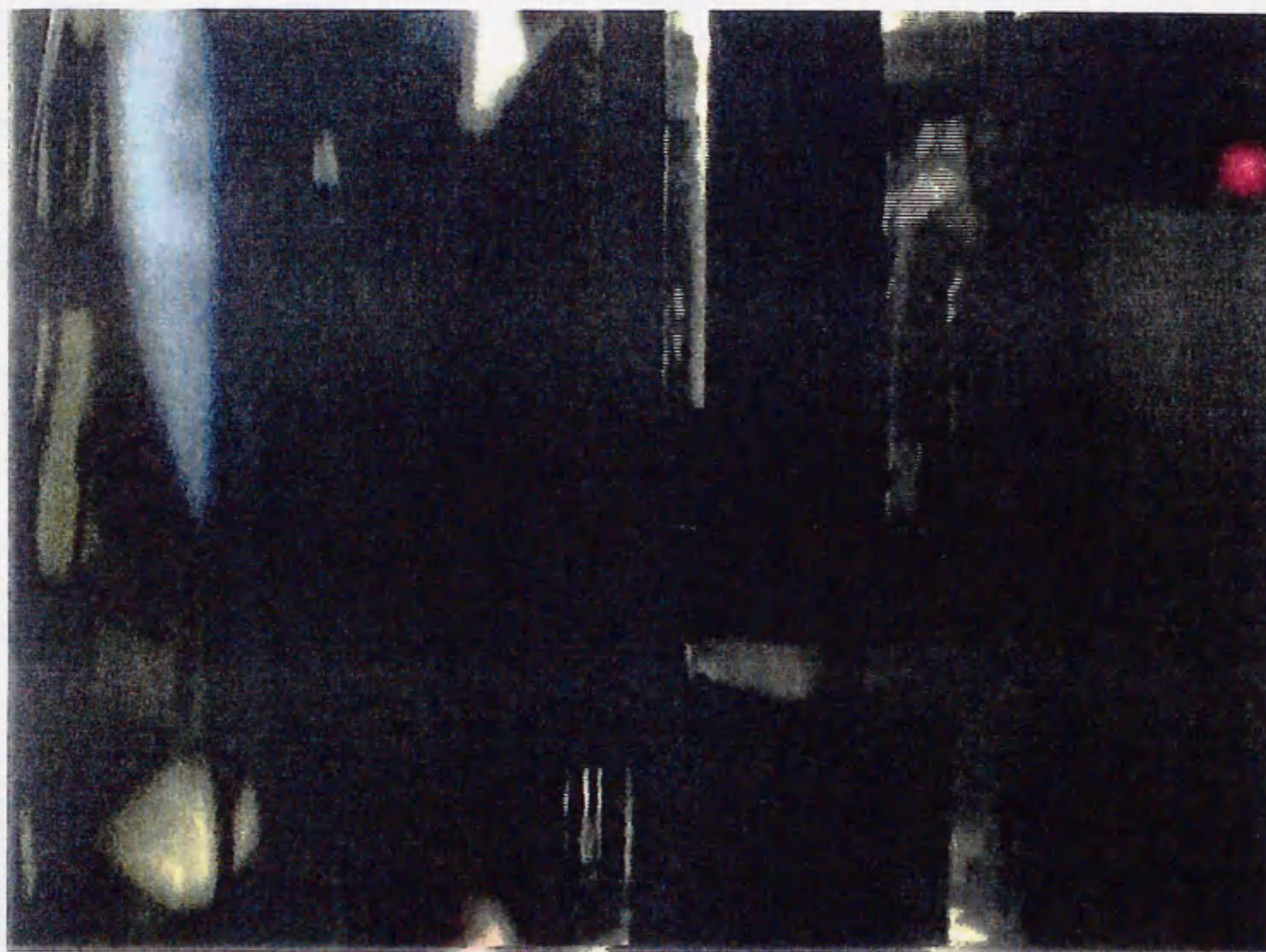


図 5-5 変形実験中の固体メタンの試料。

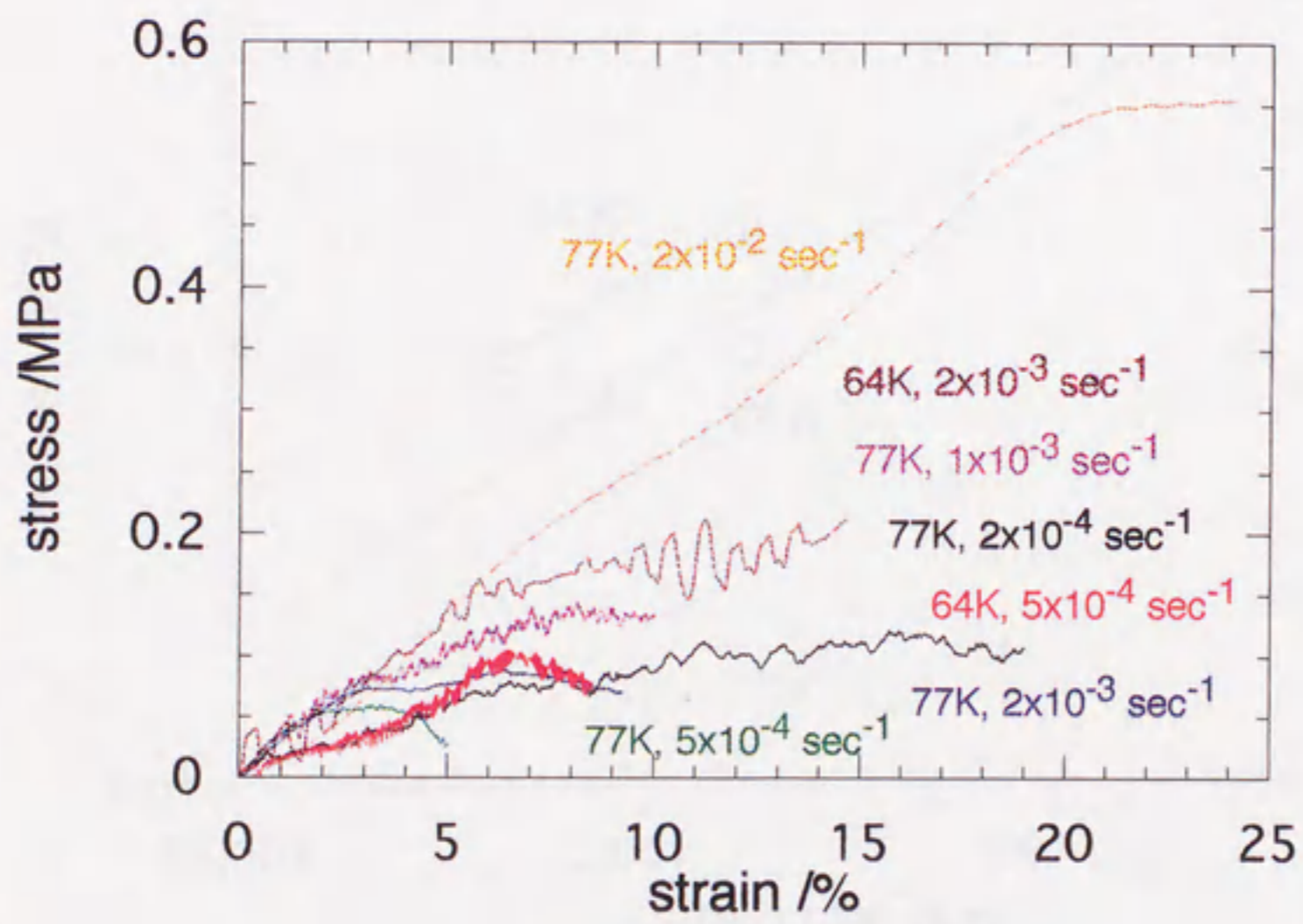


図 5-6 固体メタンの等歪速度実験による応力-歪み曲線。

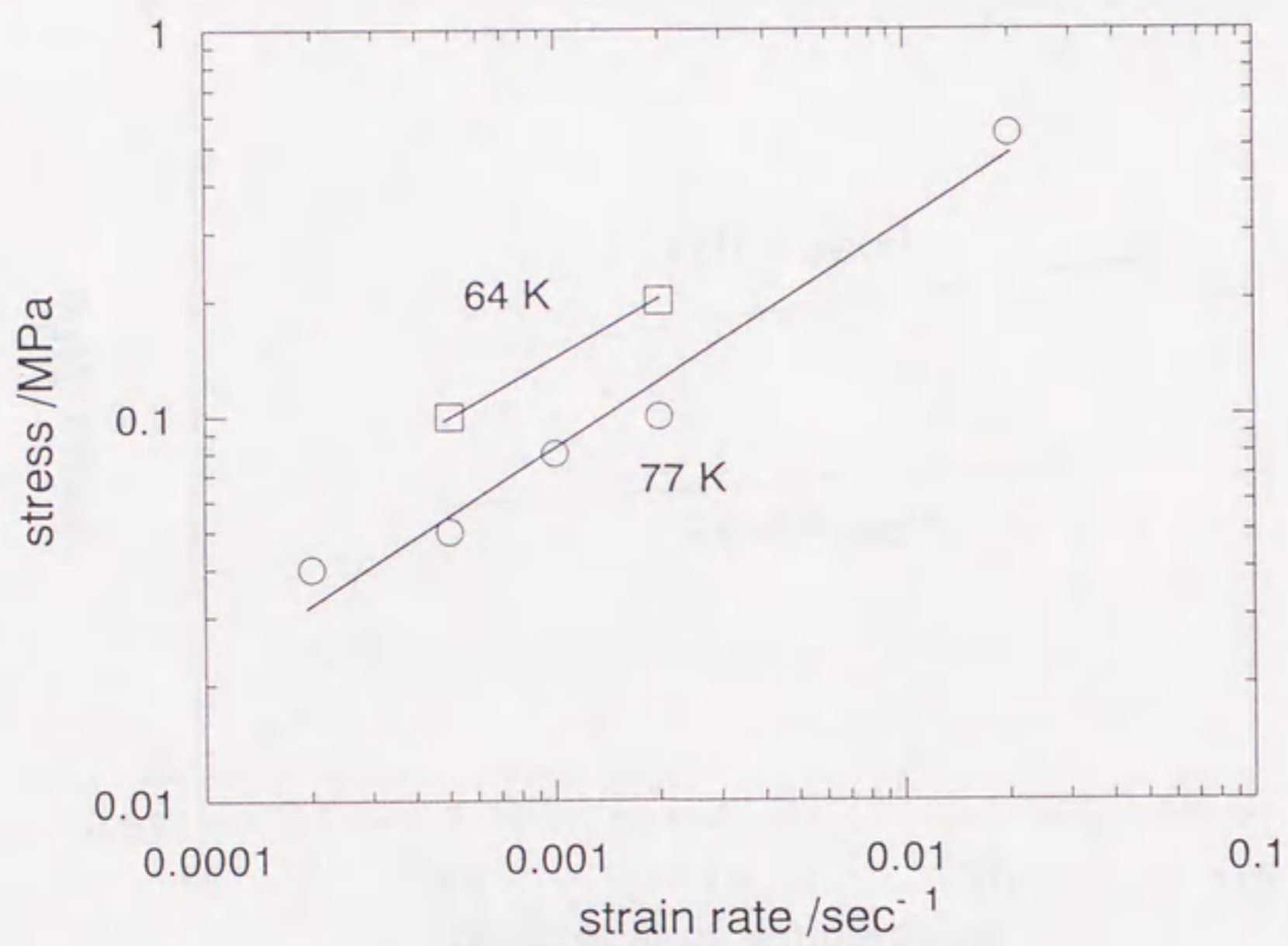


図 5-7 固体メタンの変形時の歪み速度と最大差応力の関係。

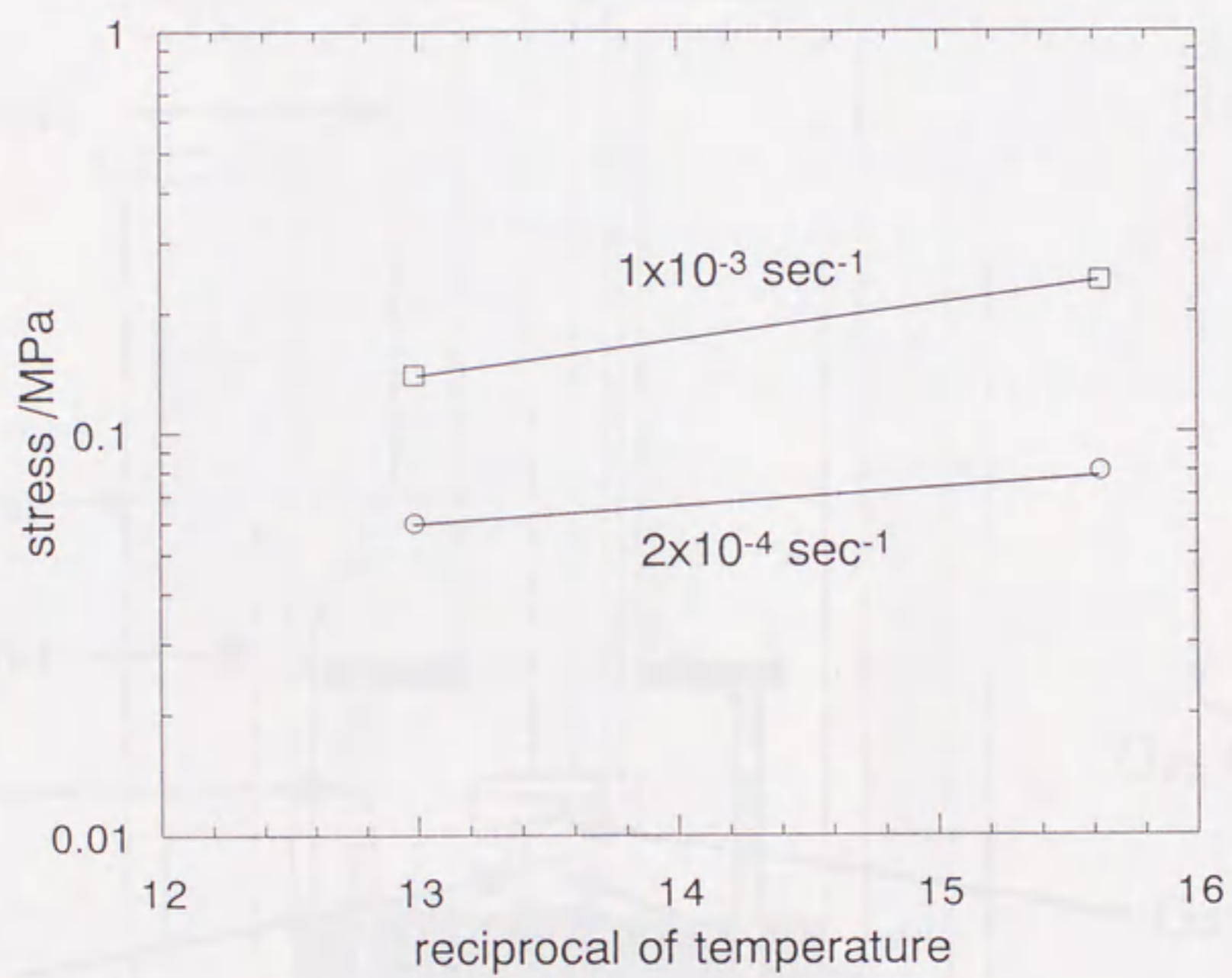


図 5-8 固体メタンの変形時の温度と最大差応力の関係。

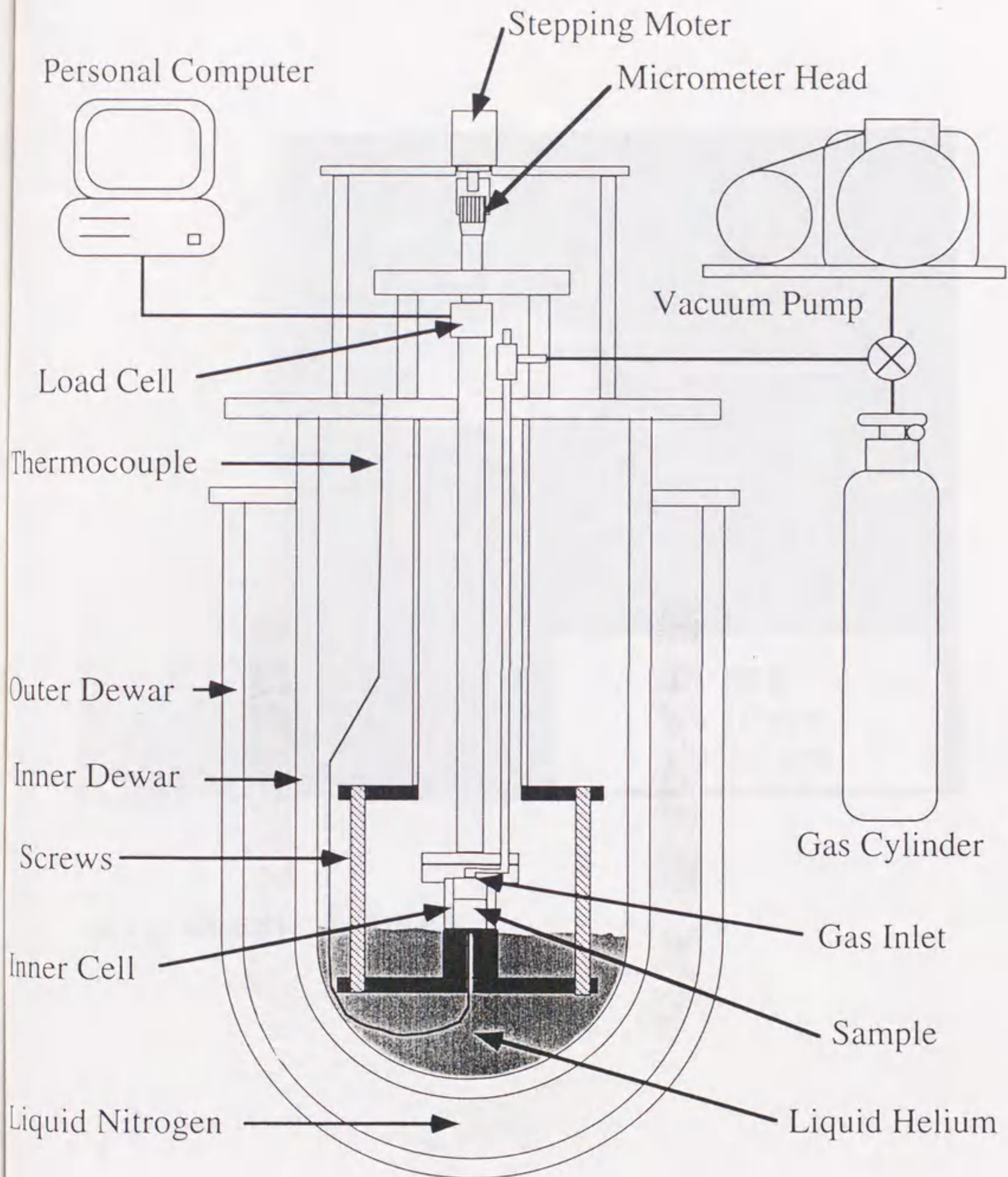


図 5-9 極低温一軸圧縮変形実験装置の模式図。固体窒素の変形に用いたもの。

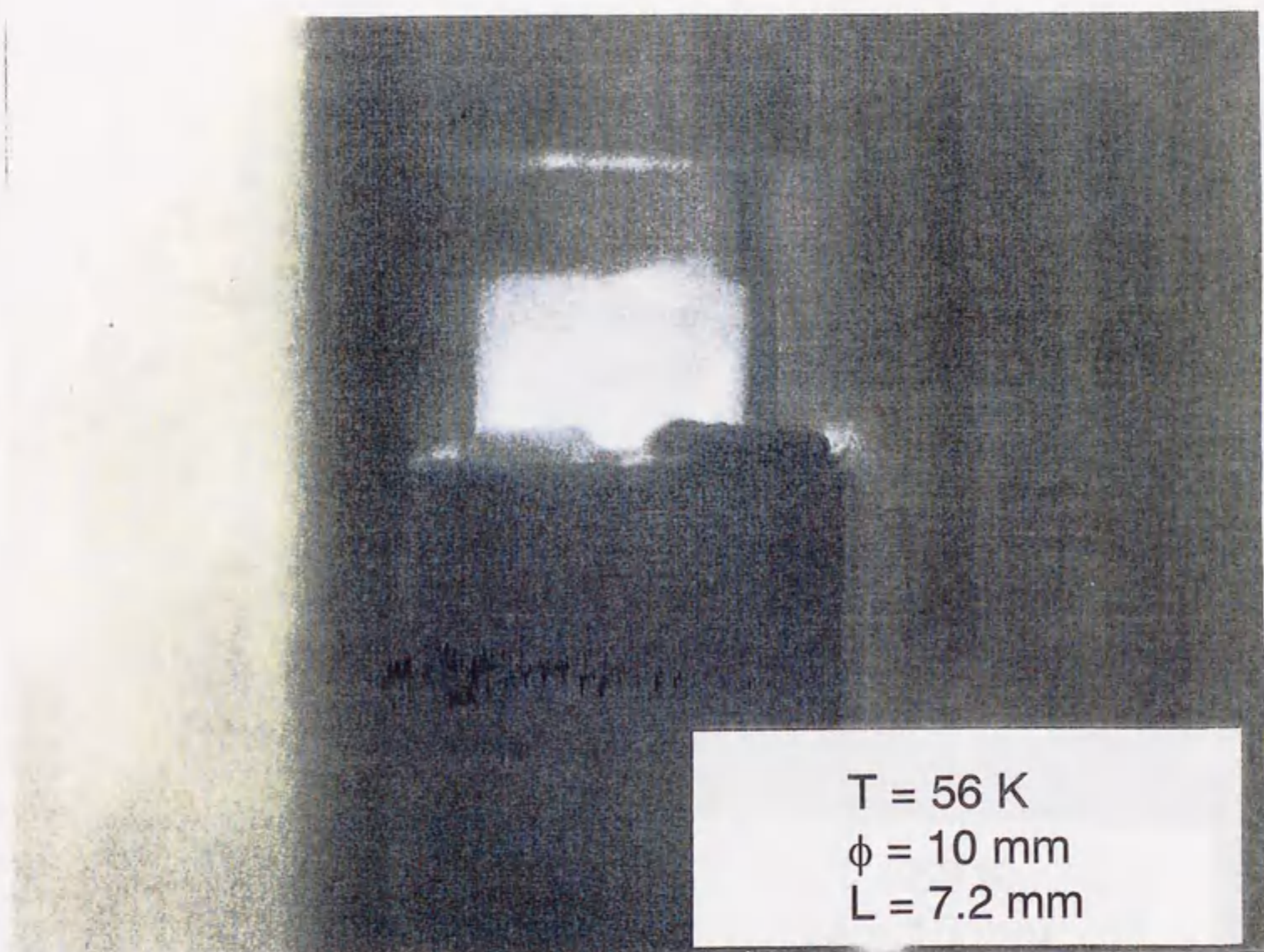


図 5-10 変形実験前の固体窒素試料

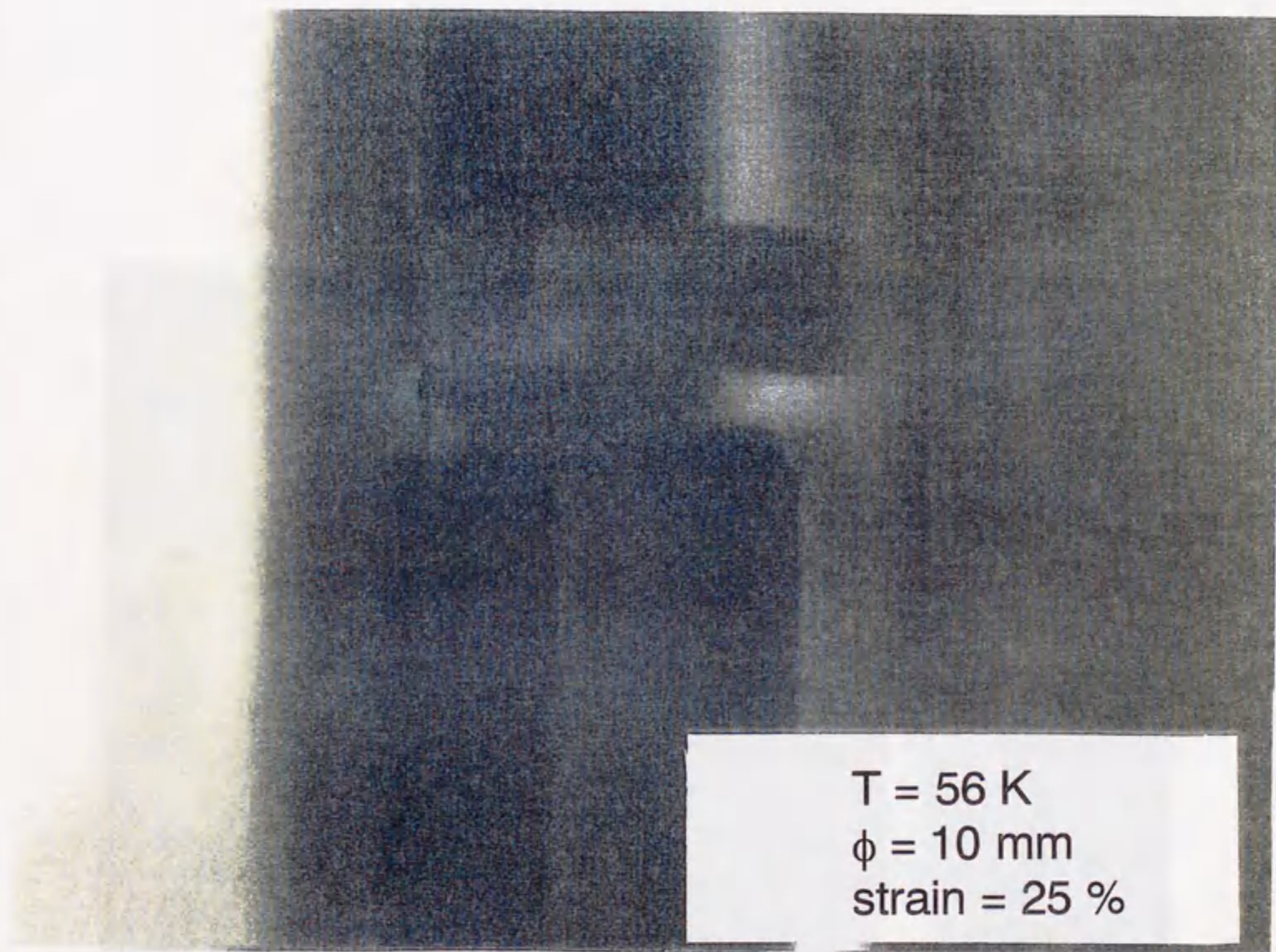


図 5-11 ductile に変形中の固体窒素試料

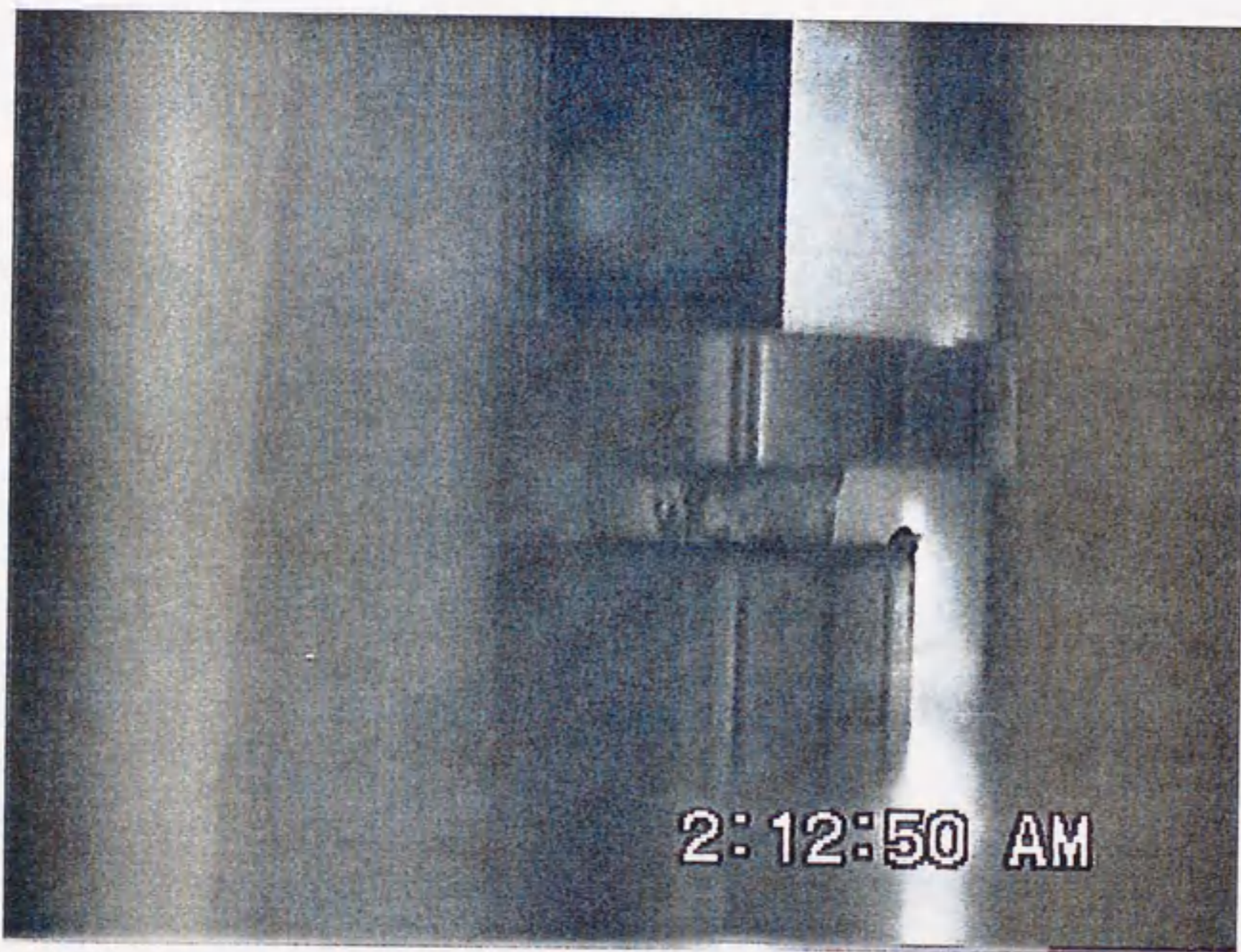


図 5-12 brittle に破壊してクラックが出来た固体窒素試料。

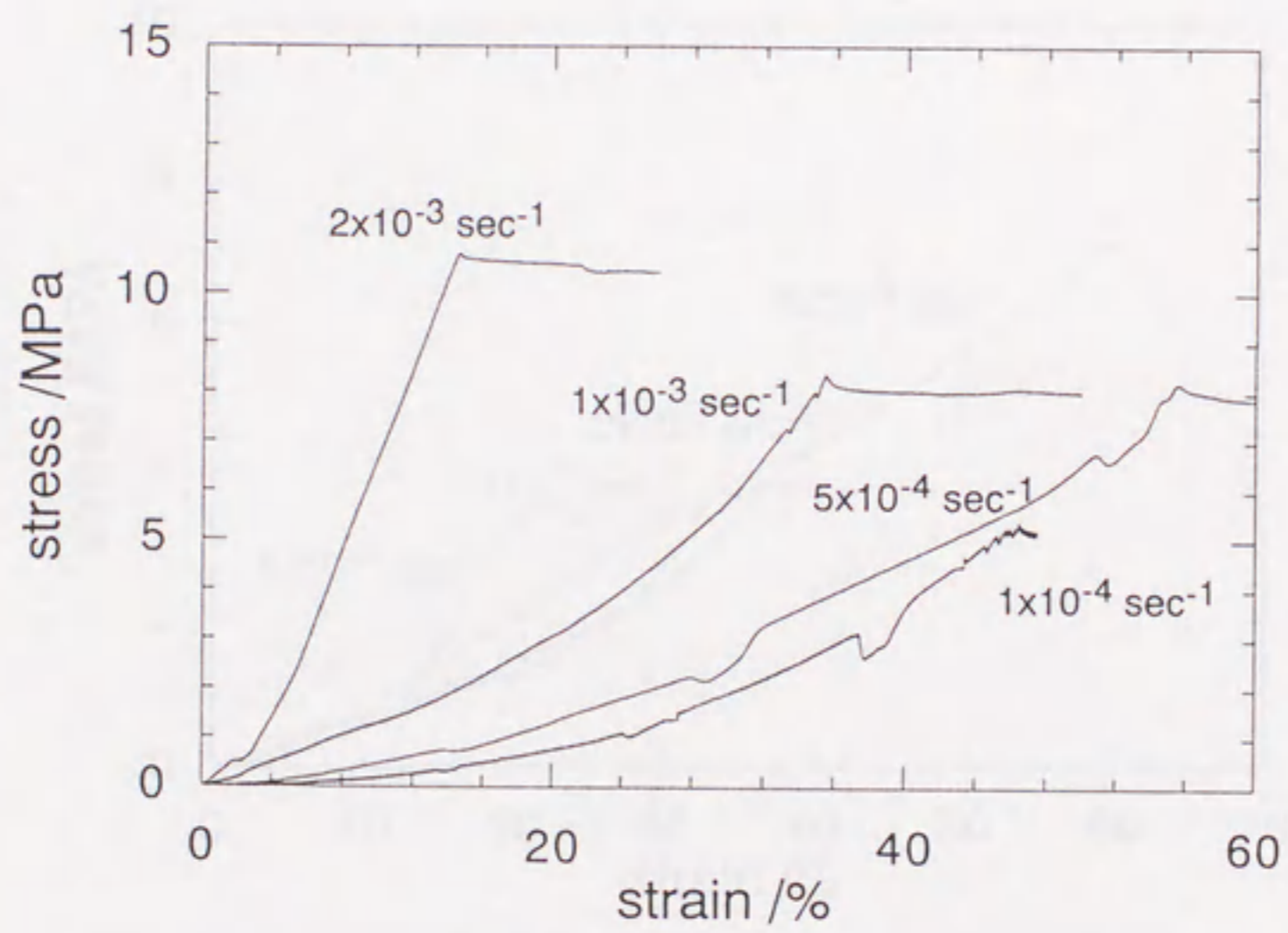


図 5-13 固体窒素の 5 K での等歪速度実験による応力-歪み曲線。

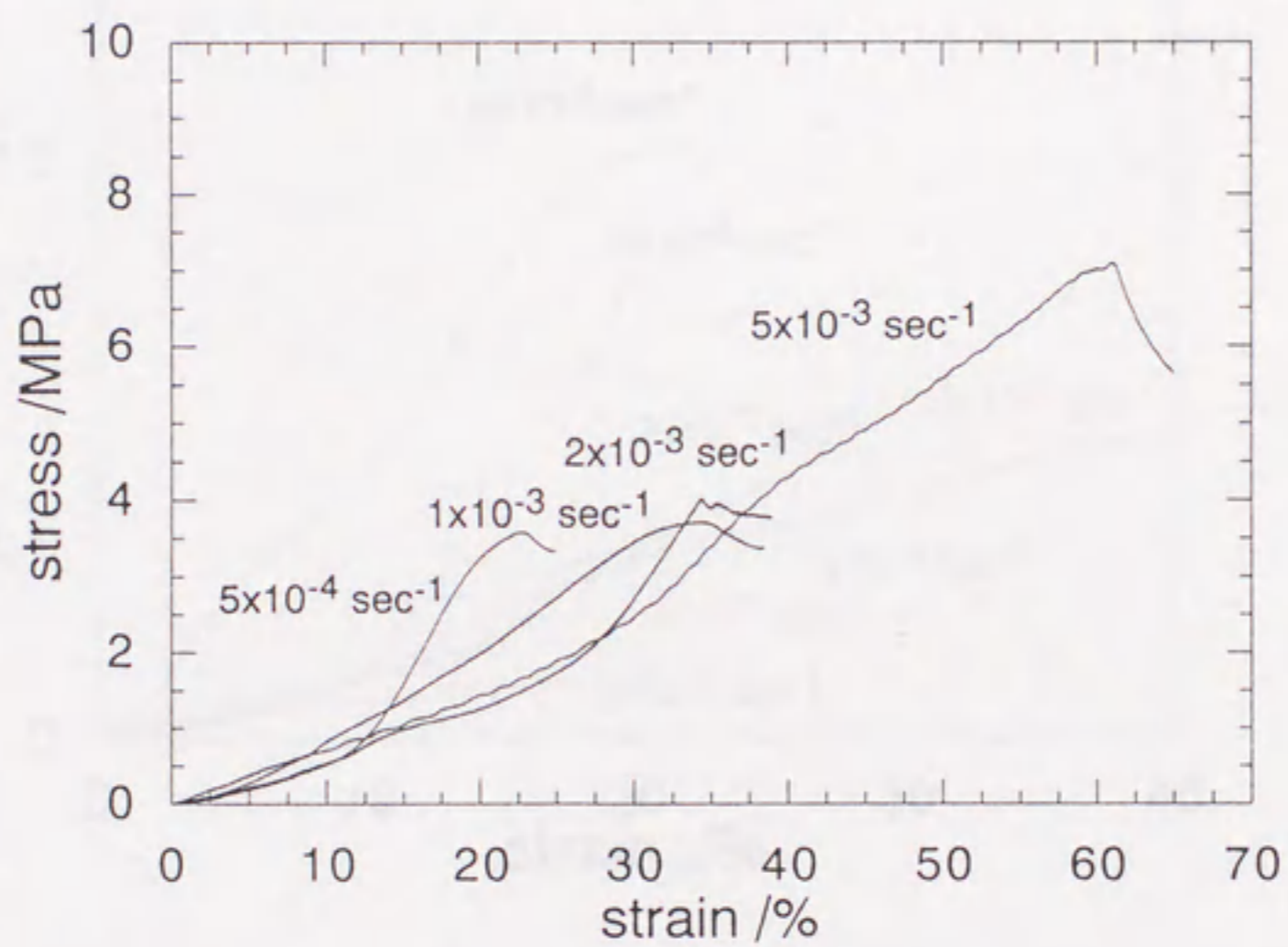


図 5-14 固体窒素の 30 K での等歪速度実験による応力-歪み曲線。

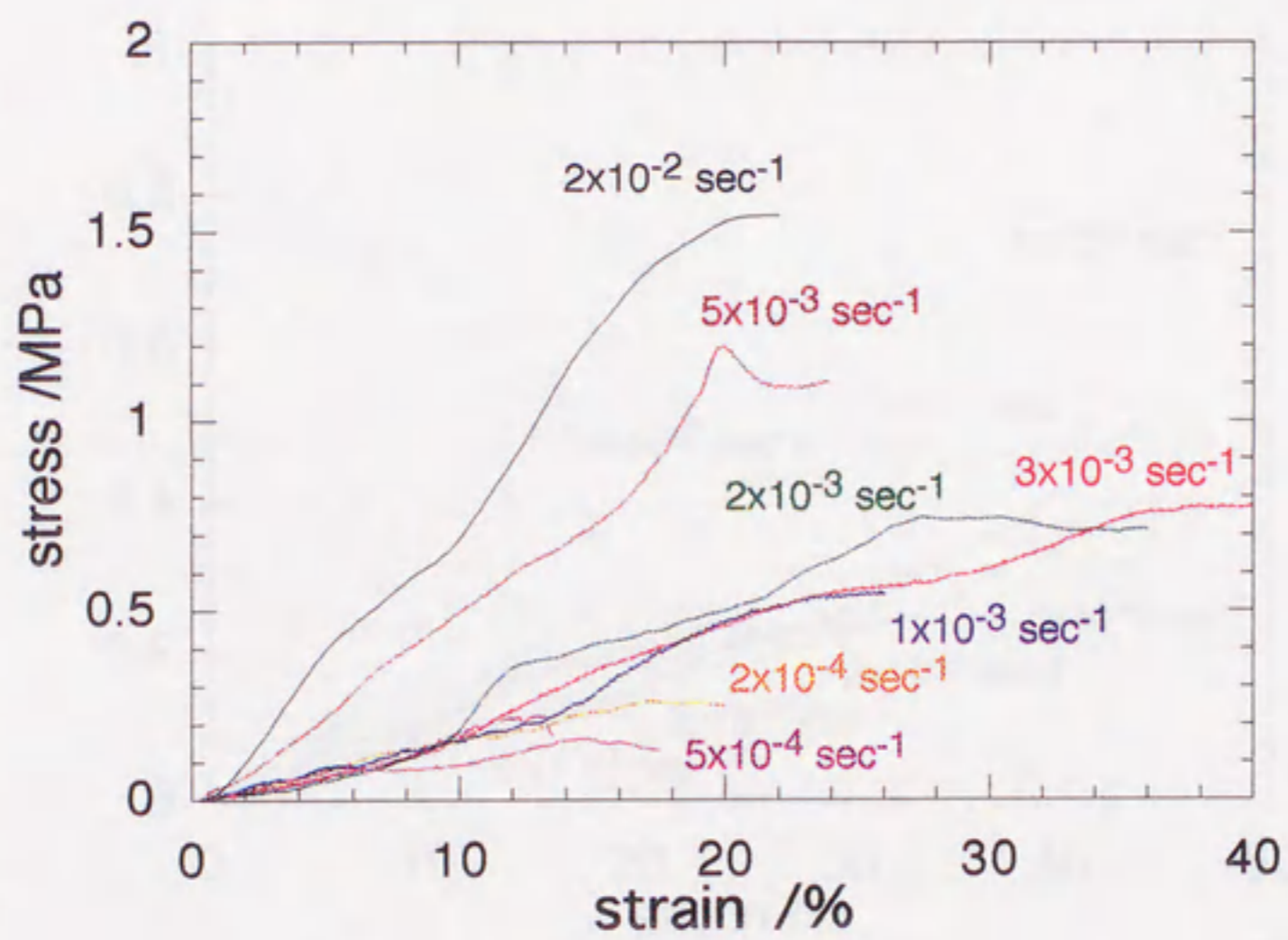


図 5-15 固体窒素の 45 K での等歪速度実験による応力-歪み曲線。

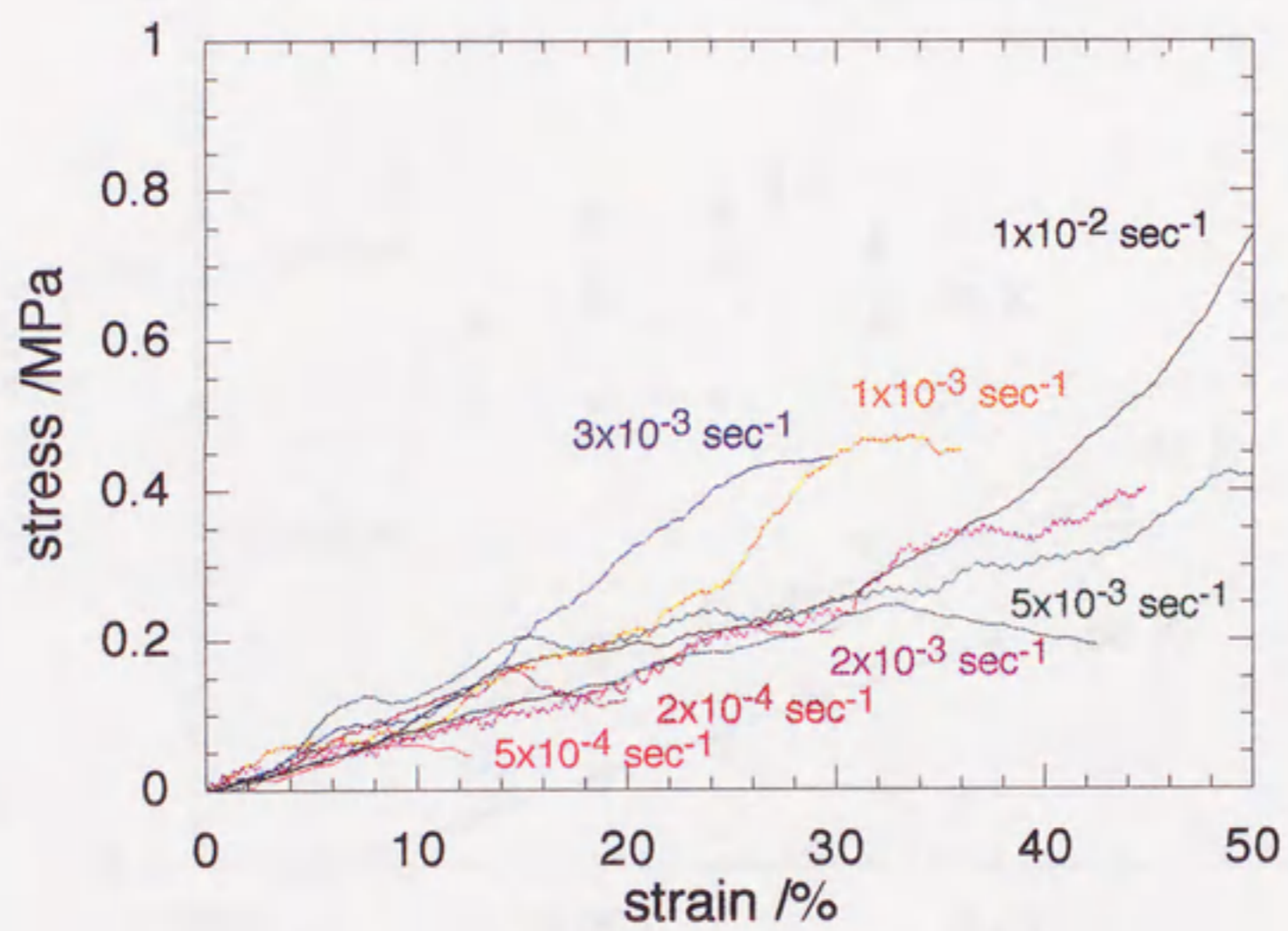


図 5-16 固体窒素の 56 K での等歪速度実験による応力-歪み曲線。

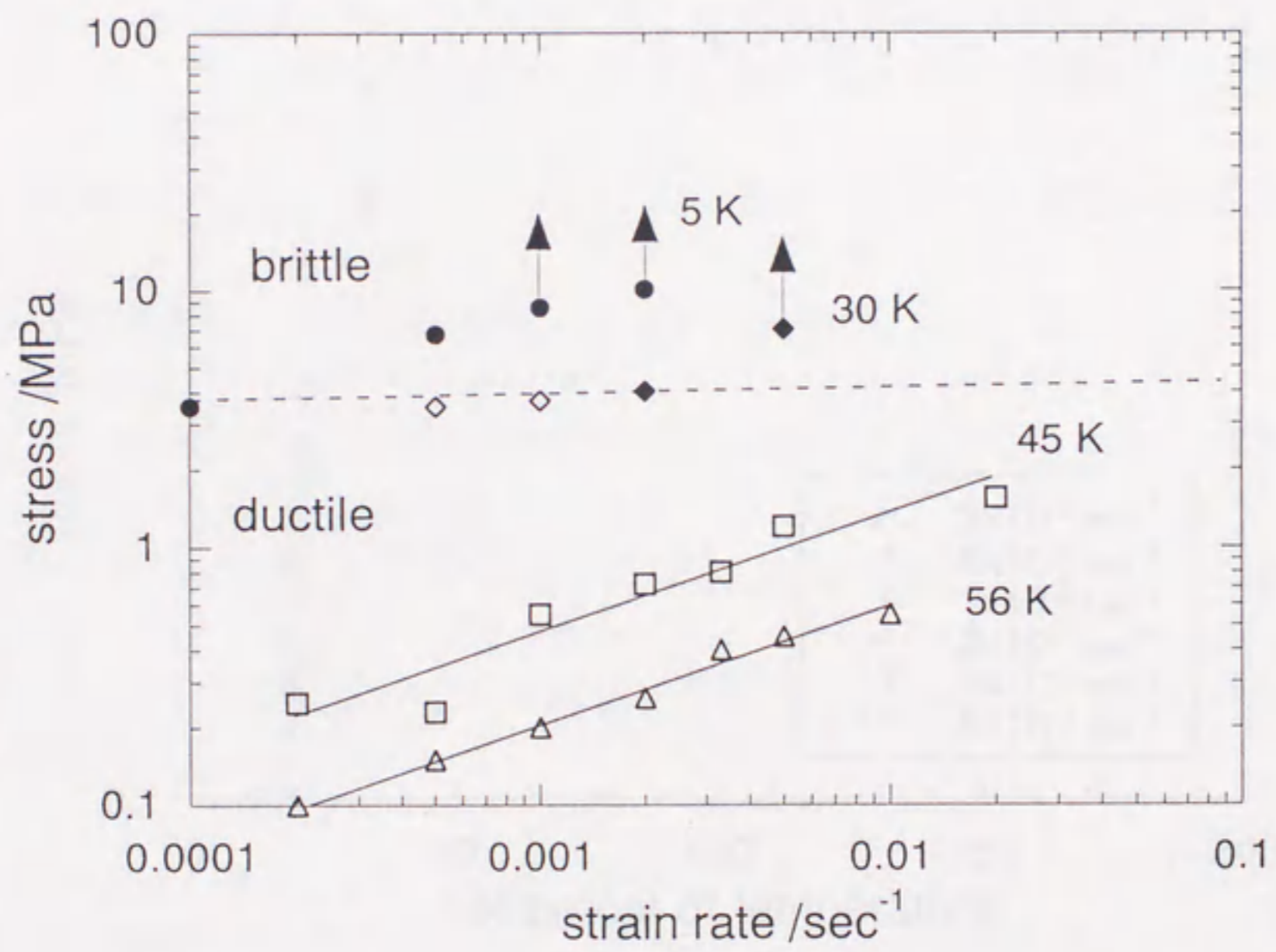


図 5-17 固体窒素の変形時の歪み速度と最大差応力の関係。破線は ductile-brittle 境界。塗りつぶされている記号は brittle な破壊を起こした場合の最大物質強度。

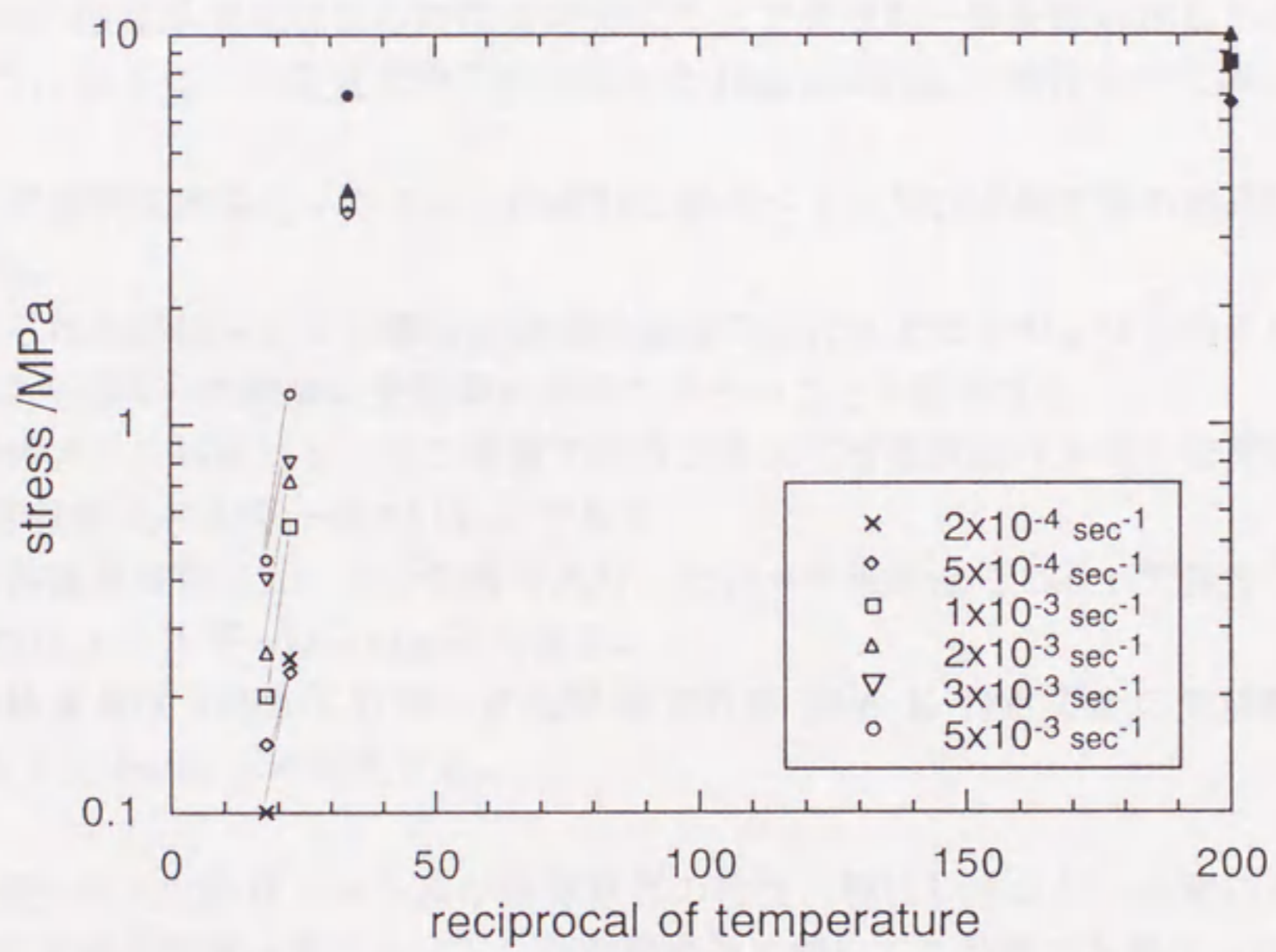


図 5-18 固体窒素の変形時の温度と最大差応力の関係。塗りつぶされている記号は brittle な破壊を起こした場合の最大物質強度。

6. まとめ

本研究は Non-water Ice のうち特にトリトン表層に多く存在する固体窒素、固体メタンを中心にして、それらの弾性・非弾性的な物性を測定しレオロジーについて議論したもので、特に固体窒素については初めて変形実験を行いそのレオロジーについて言及することができるようなデータが得られた。

この研究ではまず、極低温で固体窒素や固体メタンといった Non-water Ice の空隙率の小さいクラックのない試料が作成できるようになった事が非常に重要である。更に液体ヘリウム温度までの広い温度領域で内部の試料を常時モニタしながら音速測定もしくは変形実験を行うことが可能な装置を開発できたことは今後外惑星系構成物質の物性を研究する上で大きな一歩を踏み出したことになろう。以下にこの研究で明らかになった Non-water Ice の物性について挙げる。

1. 冷却速度を非常に小さくして作成した固体メタン及び固体窒素の結晶は透明である。
2. 得られた固体メタンの弾性波速度は過去の研究によるものよりも大きかった。これは今回用いた試料の空隙率が非常に小さいことを意味する。
3. 固体メタンは非ニュートン物質であり、そのべき乗数は 1.9 ± 0.2 で変形に関する活性化エネルギーは 2 kJ/mol である。
4. 固体窒素は非ニュートン物質であり、そのべき乗数は 2.2 ± 0.1 で変形に関する活性化エネルギーは 4 kJ/mol である。
5. 固体窒素は α 相から β 相への転移点である 35.6 K 付近でその変形様式が ductile から brittle へと変化する。

今回分かった固体メタン及び固体窒素の物性、特にレオロジーを用いるとこれらを主構成物質とするトリトンの表層構造に関してこれまでと異なった描像が得られる。

トリトンの北半球に広がる高低差のある地形が続く「マスクメロン地帯」に関しては、これまで薄い低粘性の固体窒素及び固体メタンの地殻の下に高粘性の Water Ice の層がありそれが地形を支えていると考えられてきた。しかし、低温 α 相では固体窒素は変形様式が変わりかなり高粘性になることが今回の結果から示唆されるため Water Ice の層を考えることなしに「マスクメロン地帯」に広がる地形を支えることが可能である。このように今回の結果はトリトンの表層構造にかなりの制約条件を与えるものである。

最初に述べたように Non-water Ice の物性研究はこれまでほとんど手つかずの状態であった。この研究はその入り口を開いたに過ぎないかも知れないがその意義は非常に大きいと考える。実際の外惑星系の構成物質を考えた場合、それはそれぞれが単体で存在しているとは考えにくく、固溶体や水和物をつくっている場合もあるであろう。現時点では単体の Non-water Ice の物性が分かっているだけでなく、2種類以上の Non-water Ice の混合系に関する相平衡図すら存在しない状況である。これらのことをひとつひとつ調べ Non-water Ice に関する系統的な研究がすすめば、外惑星系天体の表層構造にとどまらず、これらの天体の形成についての理解が大きく進む事が期待できる。

謝辞

理学部装置開発室の鈴木和司さんには実験装置の設計段階から数多くの知識を提供していただき、また実際の製作・改良の際にはその高い技術を提供していただきました。また同じく装置開発室の三輪治代美さんには装置の真空技術について多くの助言を頂きました。日頃から多くの助言や激励を頂いた装置開発室の皆様へ感謝の念を表します。理学部極低温施設の黒川俊和さんには液体ヘリウムによる冷却技術についての知識と定常的に液体ヘリウムを提供していただきまして、まことに感謝に堪えません。超音波技術に関しては名古屋大学の米田明助手、変形実験に関する技術に関しては同じく山田功夫助教授、高野雅夫助教授から多くの有益なアドバイスを頂きました。更に研究に対するアドバイス、激励等を名古屋大学の藤井直之教授、熊澤峰夫教授、渡邊誠一郎助教授にいただきました。深く感謝いたします。

様々なゼミにおいて先輩として有益なそして時には厳しい忠告を与えてくれた名古屋大学の熊谷博之助手、東京大学物性研究所の近藤忠助手、愛媛大学の井上徹助手、宇宙科学研究所の飯島祐一助手、東京大学地震研究所の武井康子さんに感謝いたします。また同学年という非常にフランクなつき合いの中にあっても何度となく叱咤激励を頂きました名古屋大学の沖村康之君、名和一成君、比嘉道也君に、そしていたらない先輩の話につきあってくれた後輩である中澤暁君、住田達哉君に感謝いたします。

最後に本研究の共同研究者であり、指導教官でありました宇宙科学研究所の加藤學教授には大変お世話になりました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- Allen, M., M. Delitsky, W. Huntress, Y. -H. Ip, R. Schwenn, H. Rosenbauer, E. Shelley, H. Balsiger, and J. Geiss, Evidence for methane and ammonia in coma of comet P/Halley, *Astron. Astrophys.*, **187**, 502-512, 1987
- Arakawa, M., and N. Maeno, *Physics and Chemistry of Ice*, 464-469, Hokkaido University Press, 1992
- Bezuglyi, P. A., N. G. Burma and R. Kh. Minyafaev, Elastic constants of polycrystalline methane in the temperature range 14.4-77 °K, *Sov. Phys. Solid State*, **8**, 596-600, 1966.
- Bezuglyi, P. A., L. M. Tarasenko and Yu. S. Ivanov, *Sov. Phys. Solid State*, **10** (7), 1660-1664, 1969
- Binzel, R., Pluto. *Scientific American*, **262** (6), 26-33, 1990
- Brown, R. H. and Cruikshank, D. P., The Moons of Uranus, Neptune and Pluto. *Scientific American*, **253** (1), 28-37, 1985
- Cook, T., and G. Davey, The density and thermal conductivity of solid nitrogen and carbon dioxide, *Cryogenics*, **16**, 363-369, 1976
- Cruikshank, D. P., C. B. Plicher, and D. Morrison, Pluto: Evidence for methane frost, *Science*, **194**, 835-837, 1976.
- Cruikshank, D. P. and Morrison, D., The Galilean Satellites of Jupiter. *Scientific American*, **234** (5), 108-116, 1976
- Cruikshank, D. P., and P. M. Silvggio, The surface and atmosphere of Pluto, *Icarus*, **41**, 96-102, 1980
- Cruikshank, D. P., R. H. Brown, and R. N. Clark, Nitrogen on Triton, *Icarus*, **58**, 293-305, 1984.
- Cruikshank, D. P., and J. Apt, Methane on Triton: Physical state and distribution, *Icarus*, **58**, 306-311, 1984.
- Cruikshank, D. P. and Silvggio, P. M., 1980 : The Surface and Atmosphere of Pluto. *Icarus*, **41**, 96-102
- Cruikshank, D. P., R. H. Brown, L. P. Giver, A. T. Tokunaga, Triton : Do we see to the surface?, *Science*, **245**, 283-286, 1989
- Cruikshank, D. P., T. C. Owen, T. R. Geballe, B. Schmitt, C. DeBergh, J-P. Maillard, B. L. Lutz, and R. H. Brown, Tentative detection of CO and CO₂ ices on Triton, *Bull. Am. Astro. Soc.*, **23**, 1208, 1992.
- Cruikshank, D.P., T. L. Roush, T. C. Owen, T. R. Geballe, C. DeBergh, B. Schmitt, R.

- H. Brown and M. J. Bartholomew, Ices on the surface of Triton, *Science*, **261**, 742-743, 1993.
- Drapatz, S., H. P. Larson, and D. S. Davis, Search for methane in comet P/Halley, *Astron. Astrophys.*, **187**, 497-501, 1987
- Eberhardt, P., U. Dolder, W. Schulte, D. Krankowsky, P. Lämmerzahl, J. H. Hoffman, R. R. Hodges, J. J. Berthelier, and J. M. Illiano, The D/H ratio in water from comet P/Halley, *Astron. Astrophys.*, **187**, 435-437, 1987
- Eberhardt, P., D. Krankowsky, W. Schulte, U. Dolder, P. Lämmerzahl, J. J. Berthelier, J. Woweries, U. Stubbemann, R. R. Hodges, J. H. Hoffman, and J. M. Illiano, The CO and N₂ abundance in comet P/Halley, *Astron. Astrophys.*, **187**, 481-484, 1987
- Hovi, V. and E. Mäntylä, Ultrasonic investigation of the elastic constants of solid carbon dioxide, *Ann. Acad. Scient. Fennicæ A VI*, **24**, 1-11, 1959.
- Jeffrey, G. A. and McMullan, R. K., 1967 : The Clathrate Hydrates. *Progr. Inorg. Chem.*, **8**, 43-108
- Johnson, T. V. *et al.*, The Moons of Uranus. *Scientific American*, **256**, 4, 40-52, 1987
- Kato, M., Y. Iijima, Y. Okimura, M. Arakawa, N. Maeno, A. Fujimura, and H. Mizutani, Impact experiments on low temperature H₂O ice, *Physics and chemistry of Ice* (Edited by N. Maeno and T. Hondoh), Hokkaido University Press, 1992, Sapporo
- Keeson, W. H. and J. W. L. Köhler, New determination of the lattice constant of carbon dioxide, *Physica*, **1**, 167-174, 1934
- Keeson, W. H. and J. W. L. Köhler, The lattice constant and expansion coefficient of solid carbon dioxide, *Physica*, **1**, 655-658, 1934
- Kinosita, J., Neptune. *Scientific American*, **261** (5), 60-69, 1989
- Kirby, S. H., W. B. Durham, M. L. Beeman, H. C. Heard and M. A. Daley, Inelastic properties of ice I_h at low temperatures and high pressures, *J. Phys. C1*, **48**, 227-232, 1987.
- 小森長生, 現代の惑星学. 東海大学出版会, 1992
- Landau, L. D., and E. M. Lifshitz, *Fluid mechanics, 2nd Ed., Course of theoretical physics 6*, pp. 51-55, Pergamon Press, 1987.
- Lunine, J. I., and Stevenson, D. J, Thermodynamics of Clathrate Hydrate at Low and High Pressures with Application to the Outer Solar System, *Astrophys. J.*, **58**, 493-1985
- Maass, O. and W. H. Barnes, Some thermal constants of solid and liquid carbon dioxide, *Proc. Roy. Soc.*, **A111**, 224-244, 1926.

- 前野紀一, *氷の科学*, 北海道大学図書刊行会, 1988
- Manzhelii, V. G. and A. M. Tolkachev, Densities of ammonia and methane in the solid state, *Sov. Phys.*, **5**, 2506-2510, 1964.
- Manzhelii, V. G., A. T. Tolkachev, M. I. Bagatskii, and E. I. Voitovich, Thermal expansion, heat capacity, and compressibility of solid CO₂, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **44**, 39-49, 1971.
- McKinnon, W. B., and S. Mueller, Pluto's structure and composition suggest origin in the solar, not a planetary, nebula, *Nature*, **335**, 240-243, 1988
- Mizutani, H., Y. Takagi, and S. Kawakami, New scaling laws on impact fragmentation, *Icarus*, **87**, 307-326, 1990
- Moroz, V. I., M. Combes, J. P. Bibring, N. Coron, J. Crovisier, T. Encrenaz, J. F. Crifo, N. Sanko, A. V. Grigoryev, D. Bockelée-Morvan, R. Gispert, Y. V. Nikolsky, C. Emerich, J. M. Lamarre, F. Rocard, V. A. Krasnopolsky, and T. Owen, Detection of parent molecule in comet P/Halley from the IKS-Vega experiment, *Astron. Astrophys.*, **187**, 513-518, 1987
- Owen, T., Titan, *Scientific American*, **246 (2)**, 76-85, 1982
- Owen, T., T. Geballe, C. de Bergh, L. Young, J. Elliot, D. P. Cruikshank, T. Roush, B. Schmitt, R. H. Brown, and J. Green, Detection of nitrogen and carbon monoxide on the surface of Pluto, *Bull. Am. Astro. Soc.*, **24**, 3, 961, 1992
- Owen, T. C., T. L. Roush, D. P. Cruikshank, J. L. Elliot, L. A. Young, C. deBergh, B. Schmitt, T. R. Geballe, R. H. Brown and M. J. Bartholomew, *Science*, **261**, 745-748, 1993
- Proctor, T. M. Jr., Low temperature speed of sound in single-crystal ice, *J. Acoust. Soc. Am.*, **39**, 972, 1966
- Prokhvatilov, A. I. and A. P. Isakina, Lattice parameters, thermal expansion coefficients, and vacancy density in solid CH₄, *Sov. J. Low Temp. Phys.*, **9**, 213-218, 1983.
- Ranalli, G., *Rheology of the earth*, pp. 66-87, Allen & Unwin, 1987.
- Scott, T. A., Solid and liquid nitrogen, *Phys. Rep.*, **27**, 85-157, 1976.
- Smith, B. A., L. A. Soderblom, T. V. Johnson, A. P. Ingersoll, S. A. Collins, E. M. Shoemaker, G. E. Hunt, H. Masursky, M. H. Carr, M. E. Davies, A. F. Cook II, J. Boyce, G. E. Danielson, T. Owen, C. Sagan, R. F. Beebe, J. Veverka, R. G. Storm, J. F. McCauley, D. Morrison, G. A. Briggs, and V. E. Suomi, The Jupiter System Through the Eyes of Voyager 1. *Science*, **204**, 951-972, 1979
- Smith, B. A., L. A. Soderblom, R. Beebe, J. Boyce, G. Briggs, M. Carr, S. A. Collins, A. F. Cook II, G. E. Danielson, M. E. Davies, G. E. Hunt, A. Ingersoll, T. V. Johnson, H. Masursky, J. McCauley, D. Morrison, T. Owen, C. Sagan, E. M.

- Shoemaker, R. Storm, V. E. Suomi, and J. Veverka, The Galilean Satellites and Jupiter : Voyager 2 Imaging Science Results, *Science*, **206**, 927-950, 1979
- Smith, B. A., L. A. Soderblom, J. M. Boyce, G. A. Briggs, A. Bunker, M. Carr, S. A. Collins, A. F. Cook II, J. N. Cuzzi, G. E. Danielson, M. E. Davies, C. J. Hansen, G. E. Hunt, A. P. Ingersoll, T. V. Johnson, H. Masursky, J. L. Mitchell, D. Morrison, T. Owen, J. B. Pollack, C. Sagan, E. M. Shoemaker, V. E. Suomi, R. G. Storm, R. J. Terrile, and J. Veverka, Encounter with Saturn: Voyager 1 imaging science results, *Science*, **212**, 163-191, 1981
- Smith, B. A., L. Soderblom, R. Batson, P. Bridges, J. Inge, H. Masursky, E. Shoemaker, R. Beebe, J. Boyce, G. Briggs, A. Bunker, S. A. Collins, C. J. Hansen, T. V. Johnson, J. L. Mitchell, R. J. Terrile, A. F. Cook II, J. Cuzzi, J. B. Pollack, G. E. Danielson, A. P. Ingersoll, M. E. Davies, G. E. Hunt, D. Morrison, T. Owen, C. Sagan, J. Veverka, R. Storm, and V. E. Suomi , 1982 : A New Look at the Saturn System : Voyager 2 Images. *Science*, **215**, 504-537
- Smith, B. A., L. A. Soderblom, R. Beebe, D. Bliss, J. M. Boyce, A. Brahic, G. A. Briggs, R. H. Brown, S. A. Collins, A. F. Cook II, D. Crisp, S. K. Croft, J. N. Cuzzi, G. E. Danielson, M. E. Davies, T. E. Dowling, D. Godfrey, C. J. Hansen, C. Harris, G. E. Hunt, A. P. Ingersoll, T. V. Johnson, R. J. Krauss, H. Masursky, D. Morrison, T. Owen, J. B. Plescia, J. B. Pollack, C. C. Porco, K. Rages, C. Sagan, E. M. Shoemaker, L. A. Sromovsky, C. Stoker, R. G. Storm, V. E. Suomi, S. P. Synott, R. J. Terrile, P. Thomas, W. R. Thompson and J. Veverka, Voyager 2 in the Uranian system: Imaging science results, *Science*, **233**, 43-64, 1986
- Smith, B. A., L. A. Soderblom, D. Banfield, C. Barnet, A. T. Basilevsky, R. F. Beebe, K. Bollinger, J. M. Boyce, A. Brahic, G. A. Briggs, R. H. Brown, C. Chyba, S. A. Collins, T. Colvin, A. F. Cook II, D. Crisp, S. K. Croft, D. Cruikshank, J. N. Cuzzi, G. E. Danielson, M. E. Davies, E. De Jong, L. Dones, D. Godfrey, J. Goguen, I. Grenier, V. R. Haemmerle, H. Hammel, C. J. Hansen, C. P. Helfenstein, C. Howell, G. E. Hunt, A. P. Ingersoll, T. V. Johnson, J. Kargel, R. Kirk, D. I. Kuehn, S. Limaye, H. Masursky, A. McEwen, D. Morrison, T. Owen, W. Owen, J. B. Pollack, C. C. Porco, K. Rages, P. Rogers, D. Rudy, C. Sagan, J. Schwartz, E. M. Shoemaker, M. Showalter, B. Sicardy, D. Simonelli, J. Spencer, L. A. Sromovsky, C. Stoker, R. G. Storm, V. E. Suomi, S. P. Synott, R. J. Terrile, P. Thomas, W. R. Thompson, A. Verbiscer and J. Veverka, Voyager 2 at Neptune: Imaging science results, *Science*, **246**, 1422-1449, 1989
- Soderblom, L. A., 1980 : The Galilean Moons of Jupiter. *Scientific American*, 242, 1, 68-83

- Soderblom, L. A. and Johnson, T. V., The Moons of Saturn. *Scientific American*, **246** (1), 72-86, 1982
- Stahl, F. A., R. P. Wolf, and M. B. Simmonds, Ultrasound propagation in solid methane, *Phys. Letters*, **27A** (8), 482-483, 1968
- Tarasenko, L. M., Ultrasound studies of polycrystalline methane, *Sov. J. Low Temp. Phys.*, **1**, 688-689, 1976.
- Thomas, P. J., and G. Schubert, Power law rheology of ice and the relaxation style and retention of craters on Ganymede, *J. Geophys. Res.*, **93-B11**, 13755-13762, 1988
- Tolkachev, A. T., and V. G. Manzhelii, Densities of solidified gases, *Sov. Phys.*, **7** (7), 1711-1713, 1966
- Wolf, R. P., F. A. Stahl and J. A. Watrous, Ultrasound velocity in solid CH₄, *J. Chem. Phys.*, **59**, 115-120, 1973.
- Yamashita, Y., M. Kato, K. Suzuki, Y. Iijima, and A. Yoneda, Impact properties of solid methane: Crystal growth and ultrasonic measurement, *Proc. 25th ISAS Lunar Planet. Sympo.*, 136-140, 1992
- Yamashita Y., Physical properties of solid methane and carbon dioxide: Crystal growth and ultrasonic measurement, Master's thesis, Nagoya University, 1993
- Yamashita, Y., M. Kato, K. Suzuki, Y. Iijima, and A. Yoneda, Elastic and inelastic properties of non-water ice: Solid nitrogen and solid methane, *Proc. 27th ISAS Lunar Planet. Sympo.*, 180-183, 1994
- Yamashita, Y. and M. Kato, Experimental deformation of solid nitrogen, *Proc. 29th ISAS Lunar Planet. Sympo.*, 170-173, 1996
- Yamashita, Y. and M. Kato, Viscoelastic properties of polycrystalline solid methane and carbon dioxide, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1327-30, 1997