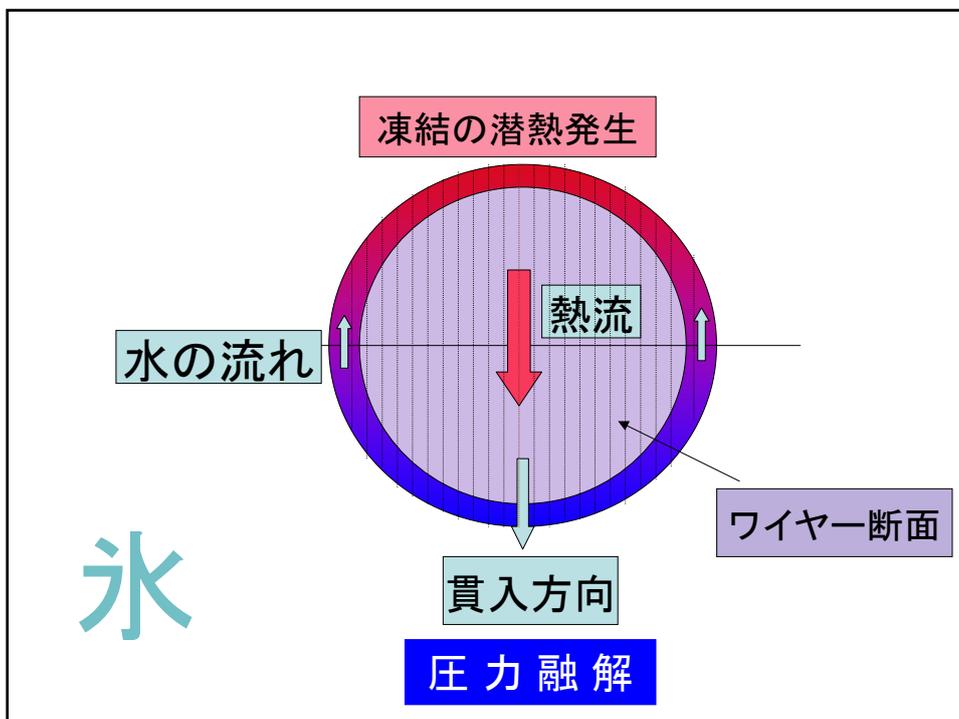
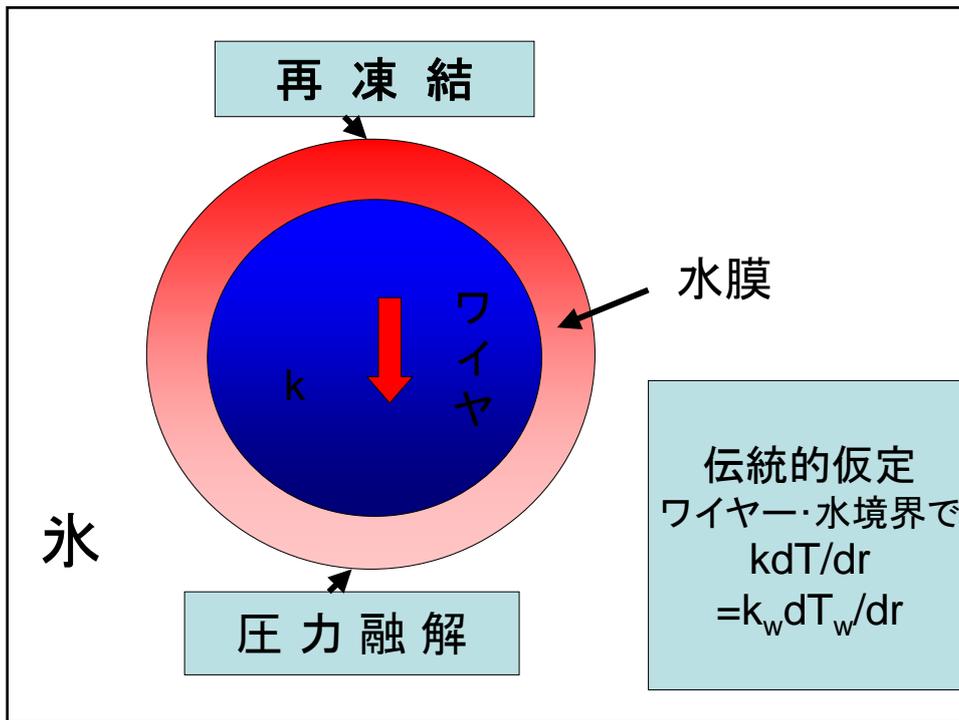


氷と雪の物理

富山大学 対馬勝年

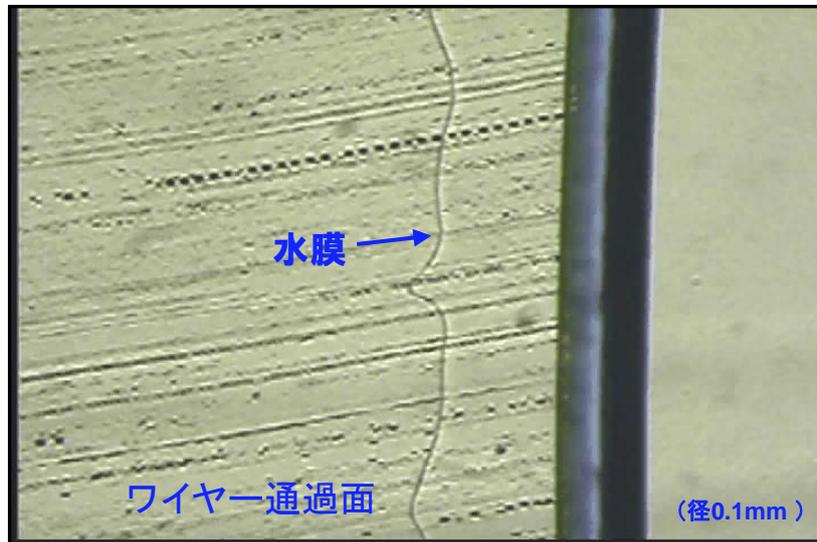
復氷の問題

圧力だけでは溶けない
融解が発生するためには
熱の供給が必要



クロメル線から発生する蒸気泡

微細蒸気泡（数 μm ～十数 μm ）



従来の復氷理論の問題点

境界条件に問題点

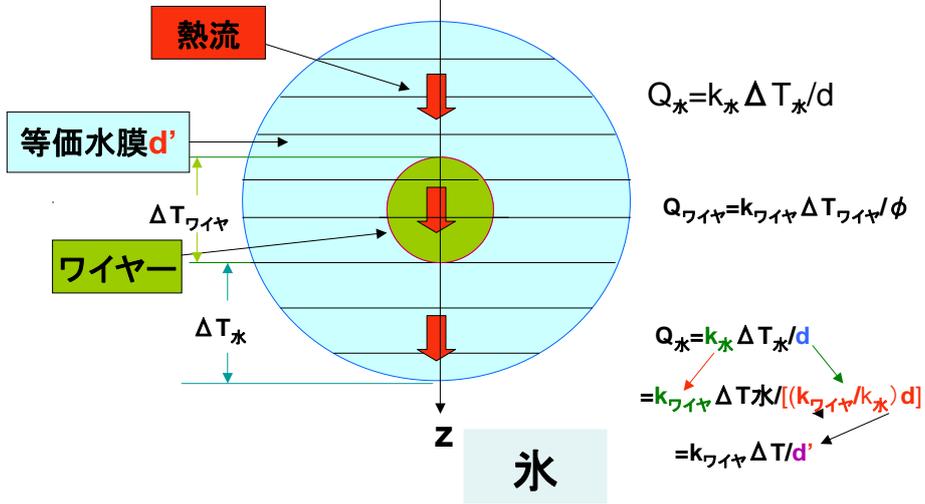
得られる水膜が薄すぎる

新しい解析法の導入

等価水膜法

従来より10倍内外厚い水膜を予想

等価水膜図



復氷研究の新たな挑戦

田中るみ (山口大学理学部地球科学教室)

復氷現象の説明は、対馬先生が長年研究に取り組んでこられた研究課題の一つで、当地球科学科においても、多数の学生が卒業研究・修士研究で実験を重ねて参りました。今回の研究会では、ここ数年、筆者が対馬先生のご指導を頂いて行った、復氷現象で未解明の課題への挑戦を報告致します。

復氷理論の検証

復氷の経路の根幹をなす、氷-水界面及び氷-ワイヤー界面の温度分布を明らかにするため、ワイヤー表面の温度分布の測定を試みた。氷に貫入するワイヤー自作を熱電対の一部とする方法を用い、ワイヤーを 360° 回転させることによってワイヤー表面の連続記録が得られ、温度分布が求められた。

ステンレス線では、Nye(1967)らによって提唱されてきた理論通りに、表面温度がほぼ正弦カーブを描いて変化する事例が確認された。一方、ワイヤー上面に蒸気泡が発生すると、上面の表面温度の降下が引き起こされ、温度分布に乱れが生じた。蒸気泡の発生や形状が、ワイヤーの表面温度や貫入速度に影響を与えていると考えられる。

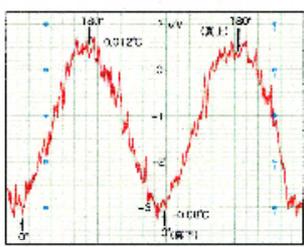


図 記録された起電力の変化。
(ステンレス表面の温度分布を示す。)

理論と実験の食い違い

遷移領域の解釈

○Drake and Shreve の説明

ワイヤー後面での不純物の濃縮→氷点降下
→温度差減少→貫入速度減少

○等価水膜法による解析

水膜厚さ増大→貫入速度減少

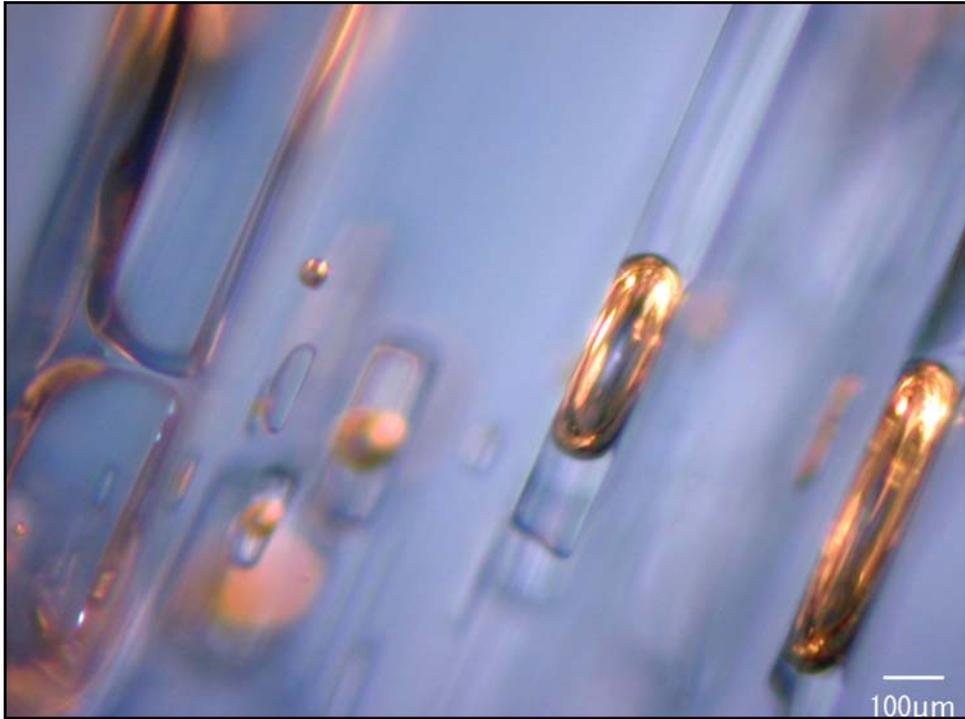
○負圧による説明

ワイヤー後面に負圧、有効貫入圧力減少
→貫入速度減少

氷の底面(0001)



チンダルの花



氷の外部摩擦機構

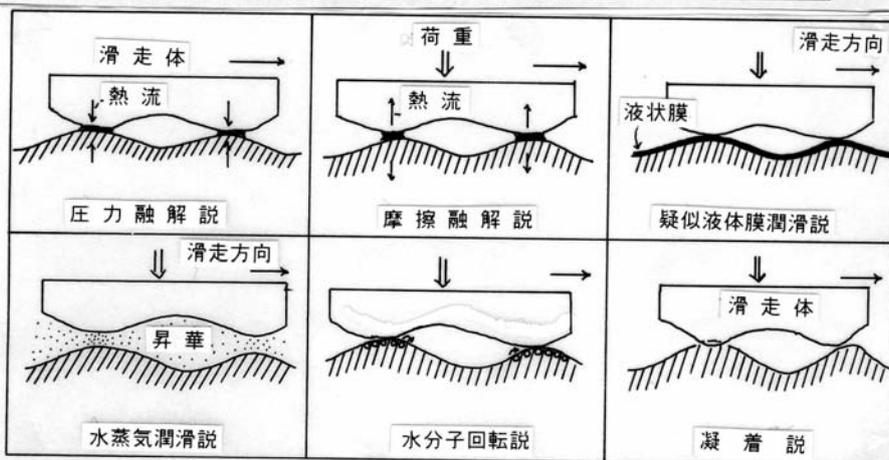
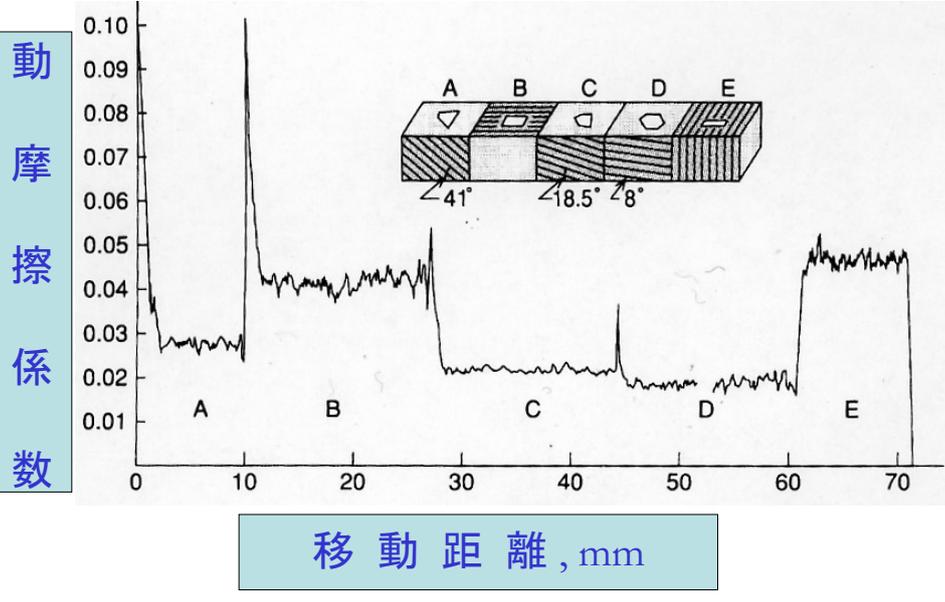
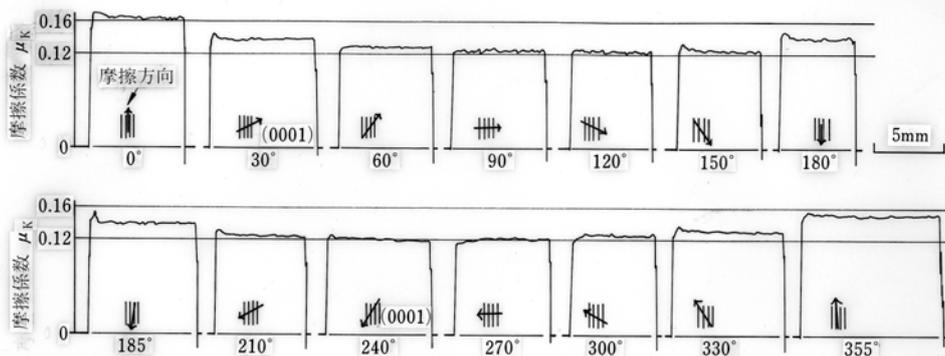


図 3.39 様々の摩擦説

氷の結晶面による摩擦の違い

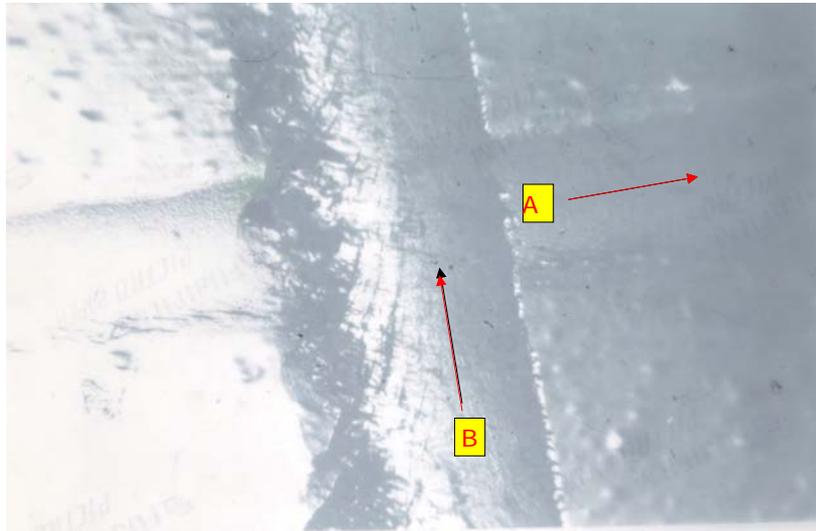


滑る方向による摩擦の違い



(10 $\bar{1}$ 0)面の摩擦曲線, -25°C , 荷重7N, 速度 $7 \times 10^{-5}\text{m/s}$,
スライダー $\phi = 2.34\text{mm}$

摩擦痕の異方性



氷表面の摩擦痕

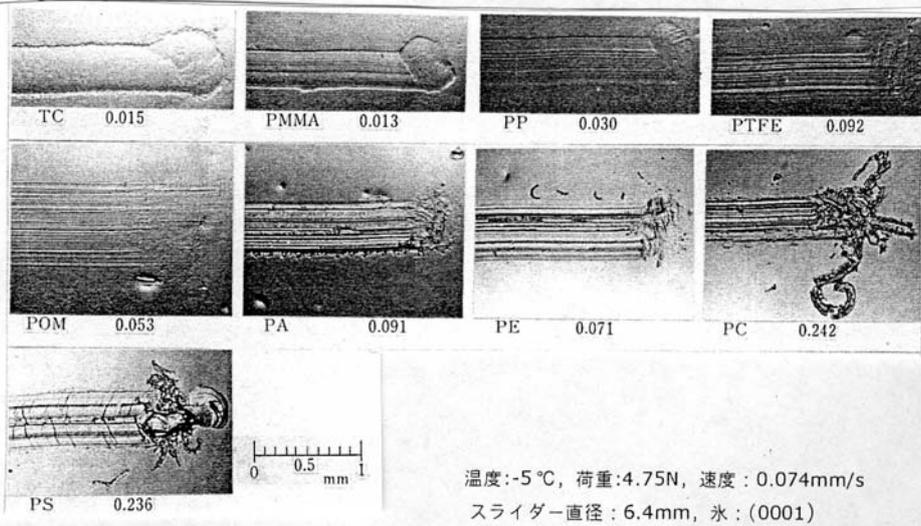


図 3.42 各種スライダーによって単結晶氷の表面に刻まれた摩擦痕

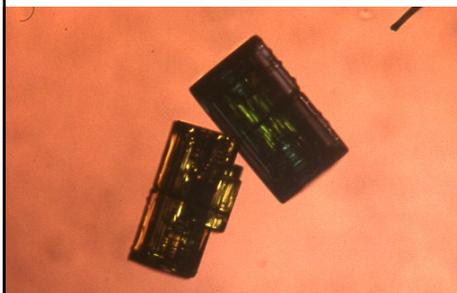
摩擦融解説のパラドックス

- 摩擦融解 → 氷を解かす熱が必要
- 摩擦が大きいとき → 融解
.....水潤滑を可能にする
- 摩擦が小さすぎて、融解が発生できないとき

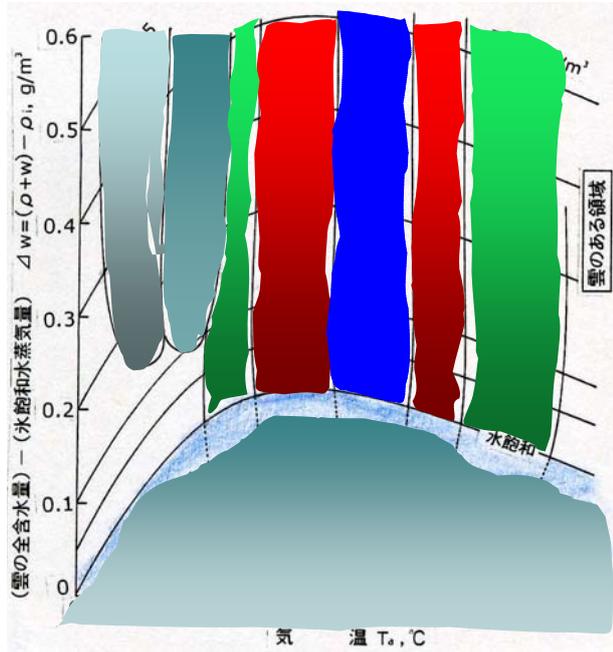


摩擦融解説では摩擦が大きくなる

雪結晶



中谷 ダイヤグラム



奇形雪結晶

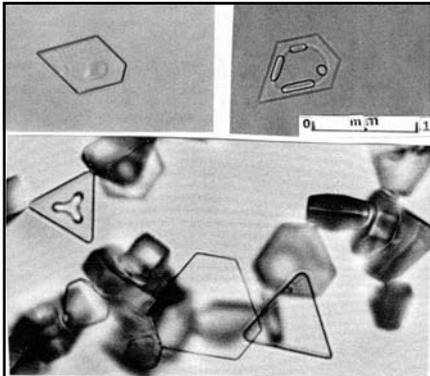


図 8.9 人工の酸性的の雲（硝酸や硫酸を含む雲）から発生した奇形雪結晶

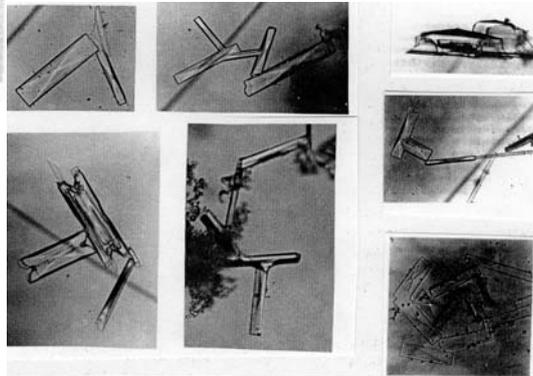
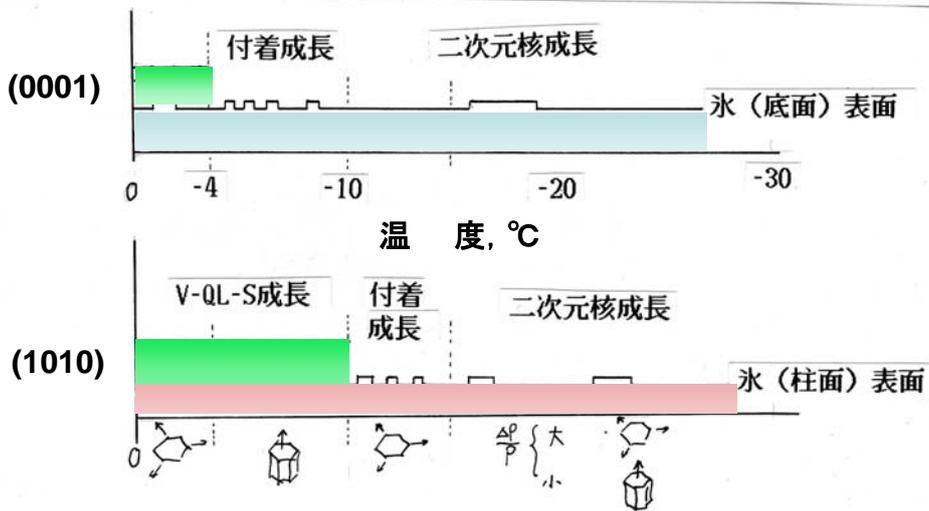


図 8.10 天然の降雪結晶中に見つかった奇形雪（富山市の降雪）

氷の表面構造と結晶成長



氷の飽和水蒸気圧

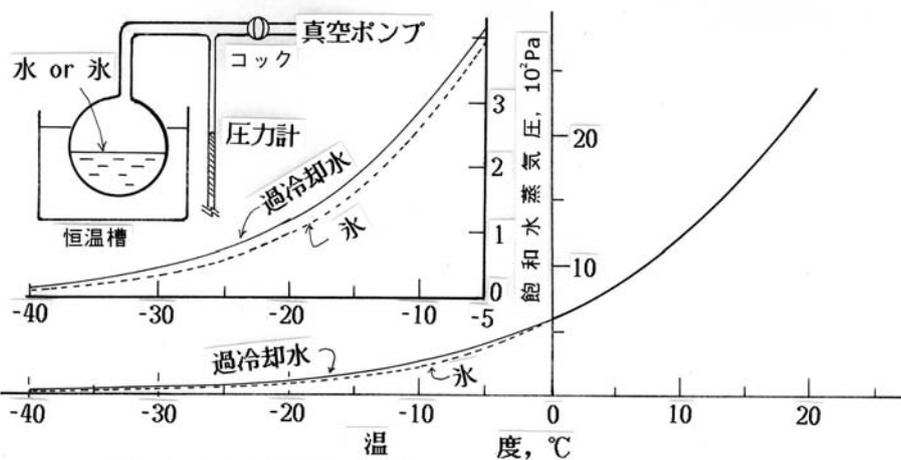
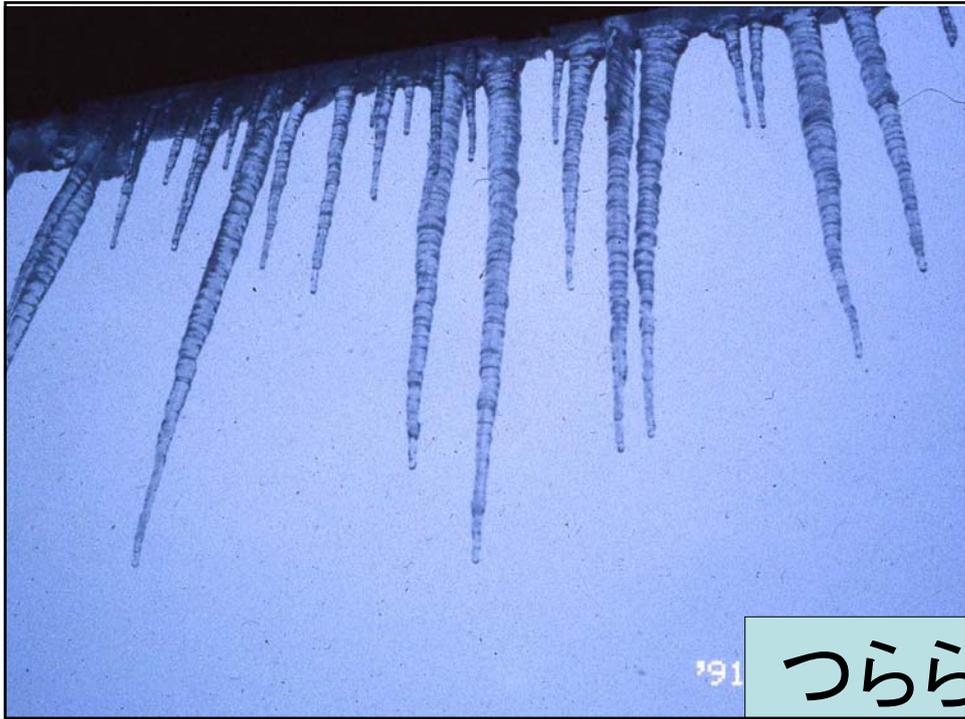
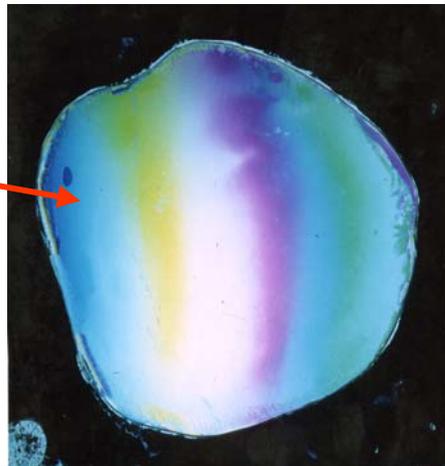
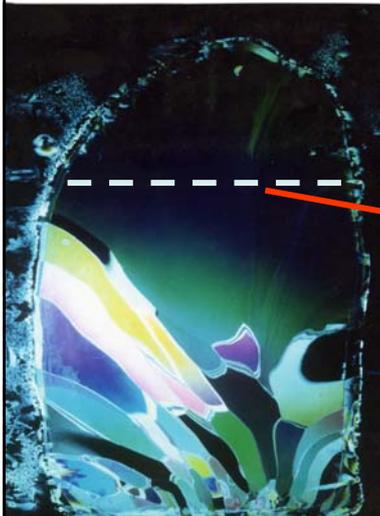


図 2.5 氷と過冷却水の温度による飽和水蒸気圧の変化

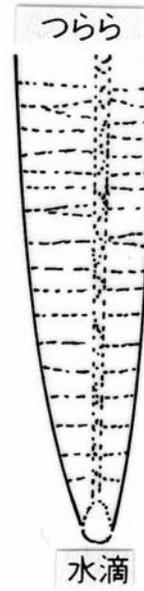
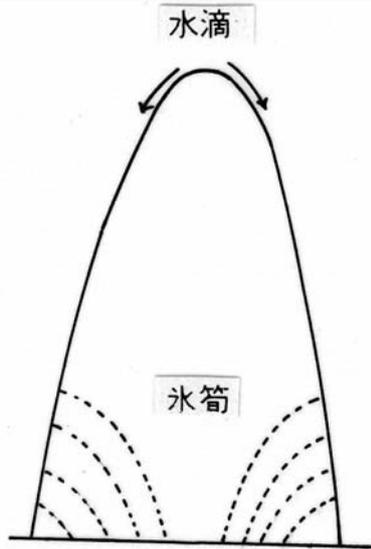


黒部峡谷関電トンネルで氷筍にであう

志合谷トンネル出口付近に巨大単結晶氷筍

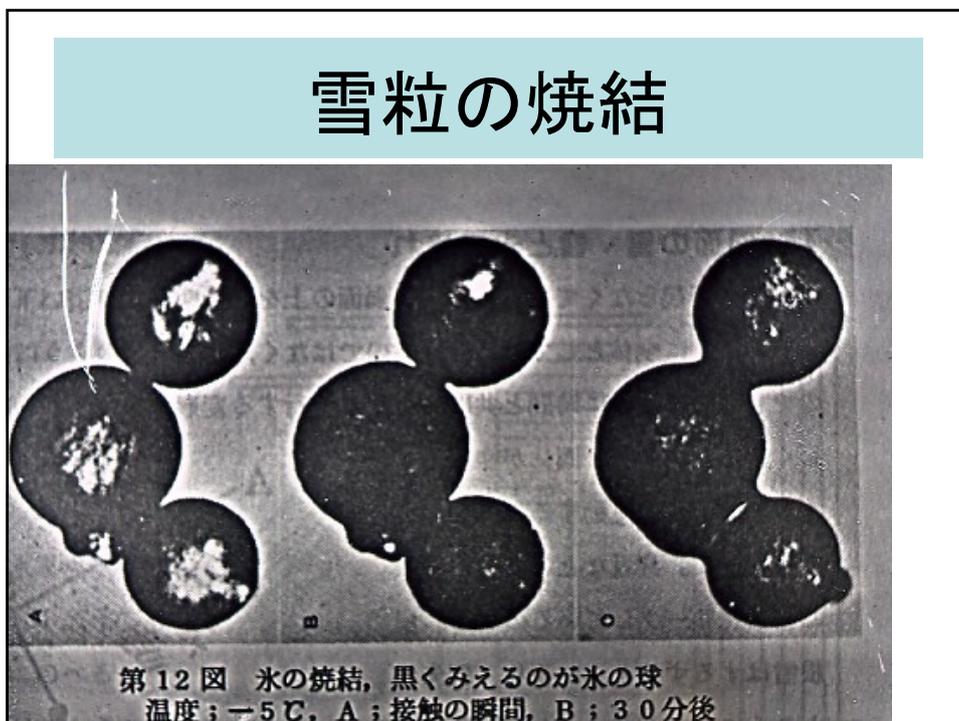
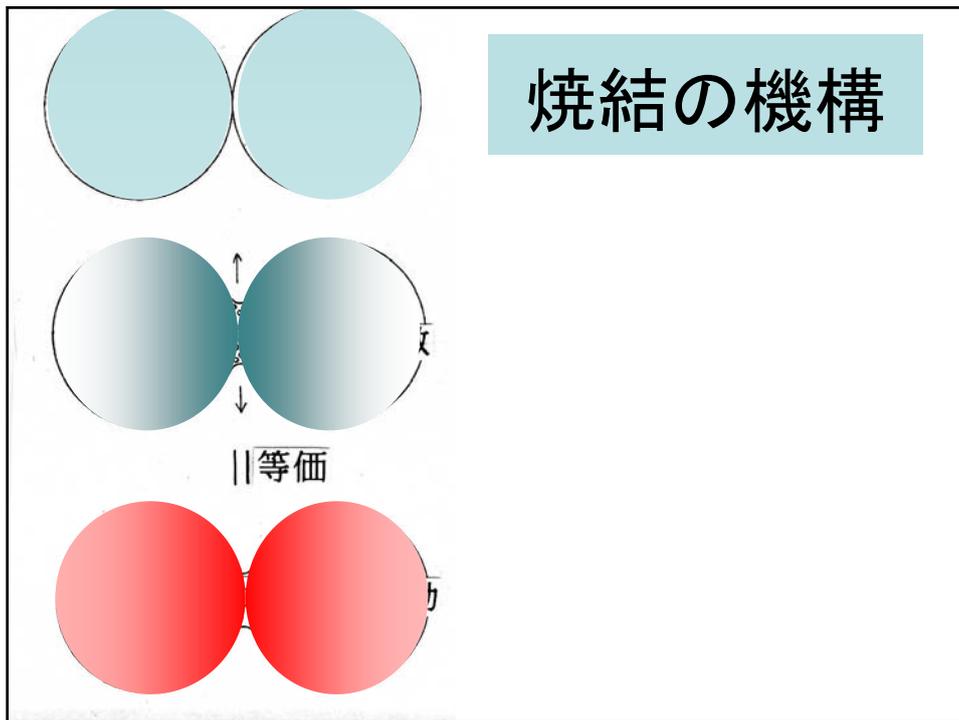


氷筥とツララ

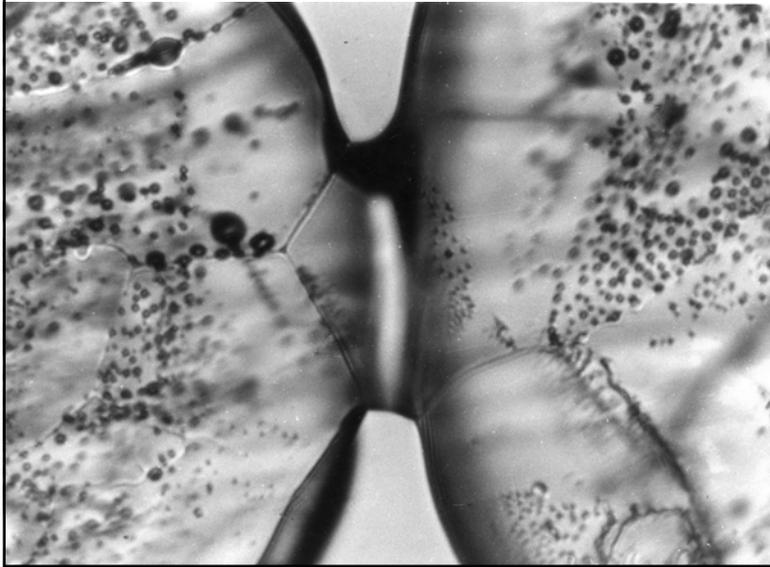


氷筥

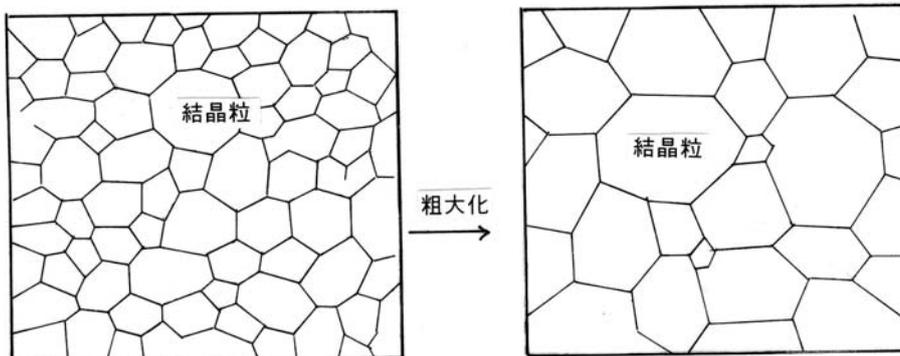




雪粒間の焼結



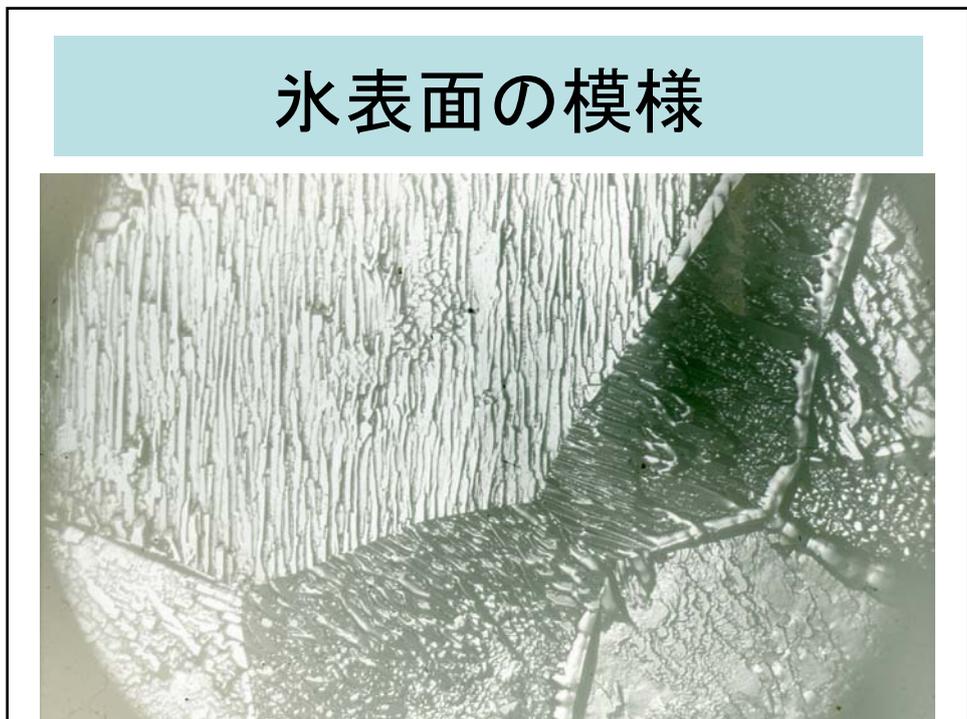
多結晶氷の粗大化



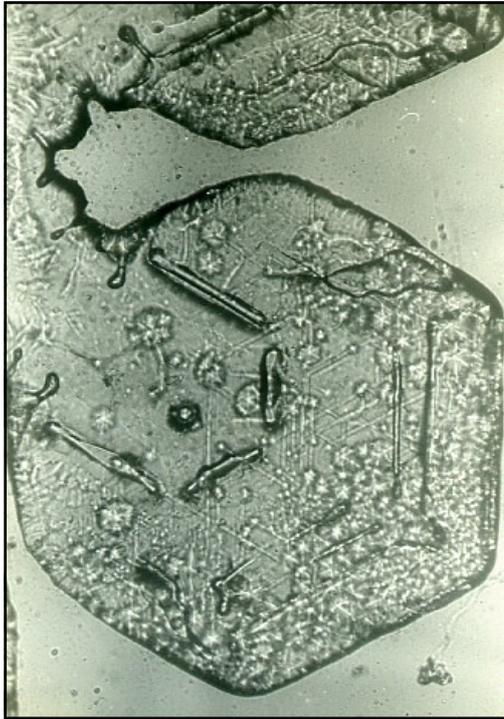


水に浸った
雪粒
の粗大化

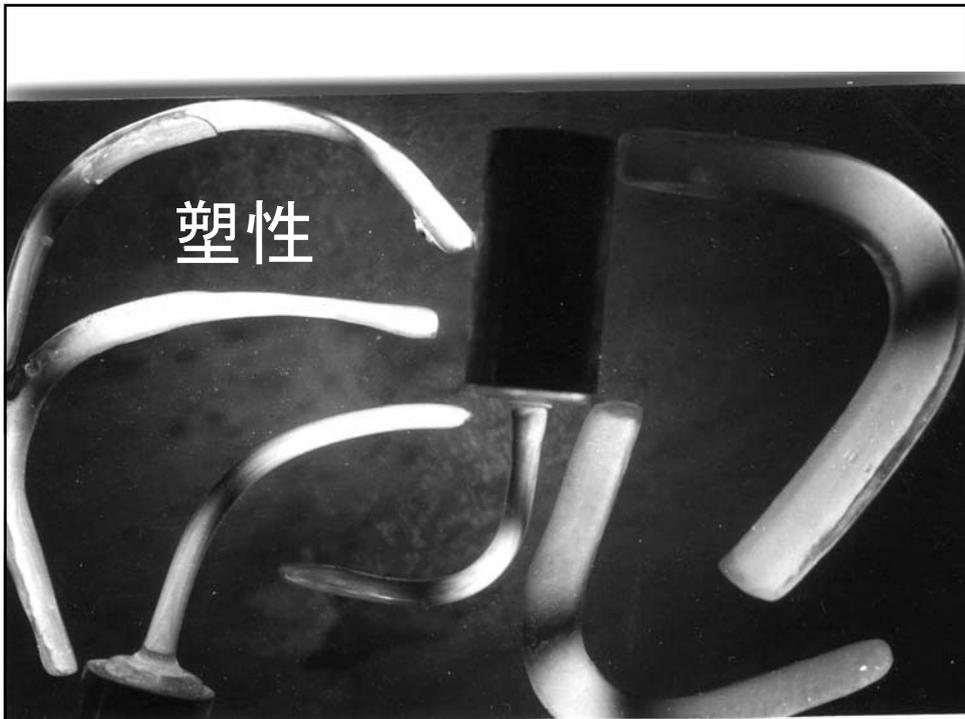
曲率による
平衡温度
の違いが
駆動力



氷表面の様相



雪結晶の表面に作られたエッチャネル



塑性

氷の反発係数(弾性)

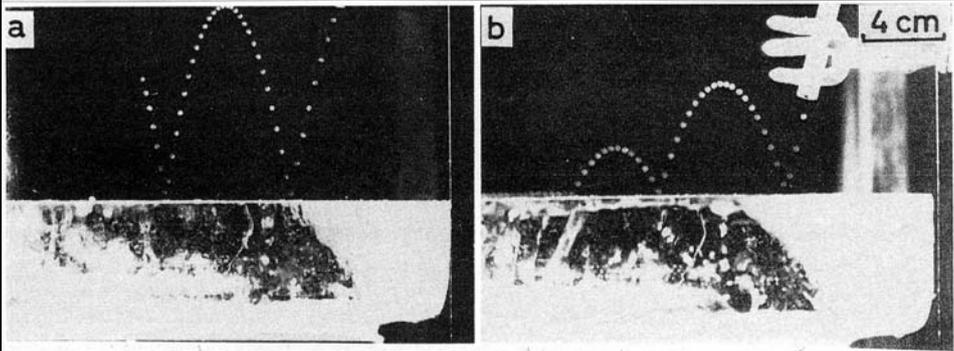
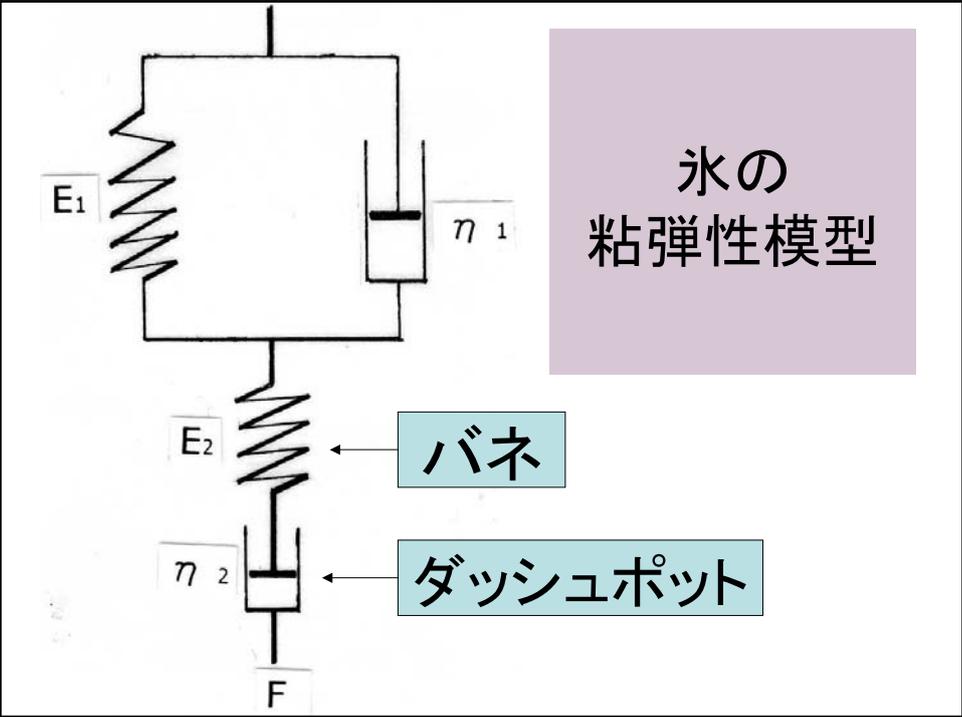
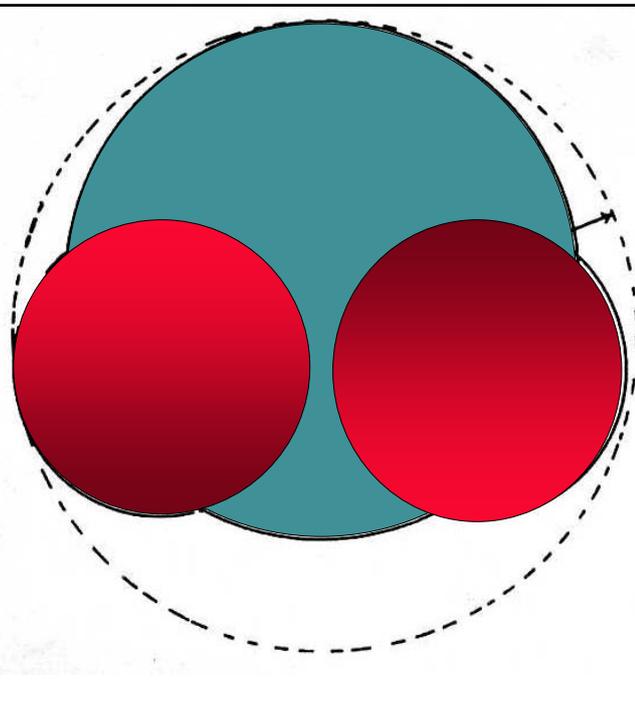


図 3.45 氷の板への氷球 (直径 2.6mm) 衝突

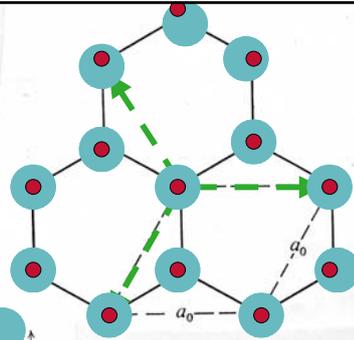
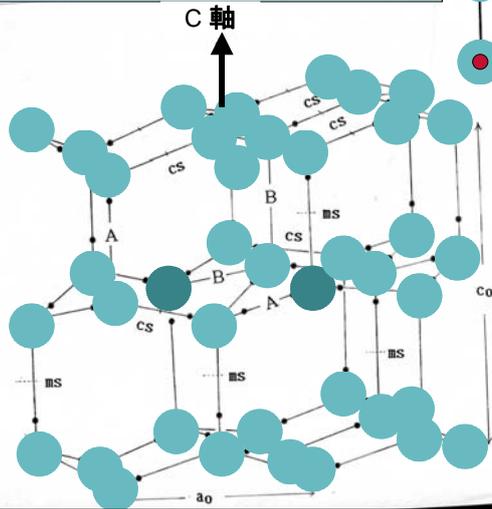


ストロー氷(シャーレ内の水の凍結)



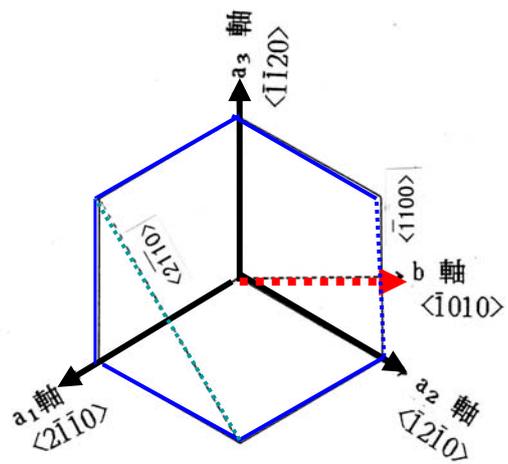
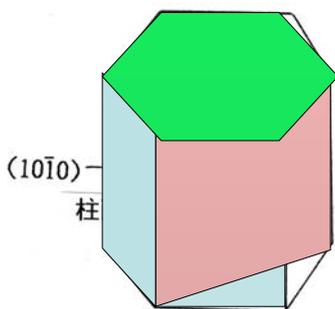
水分子

氷の構造

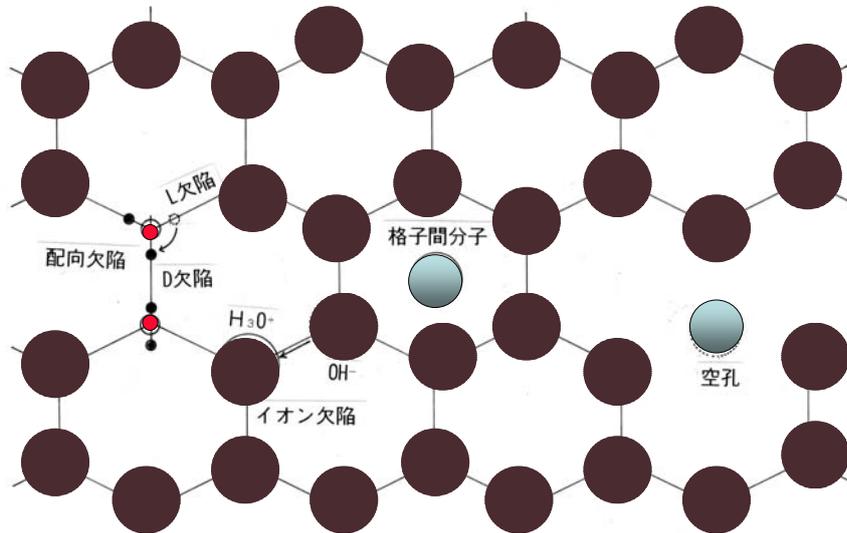


a軸
と
C軸

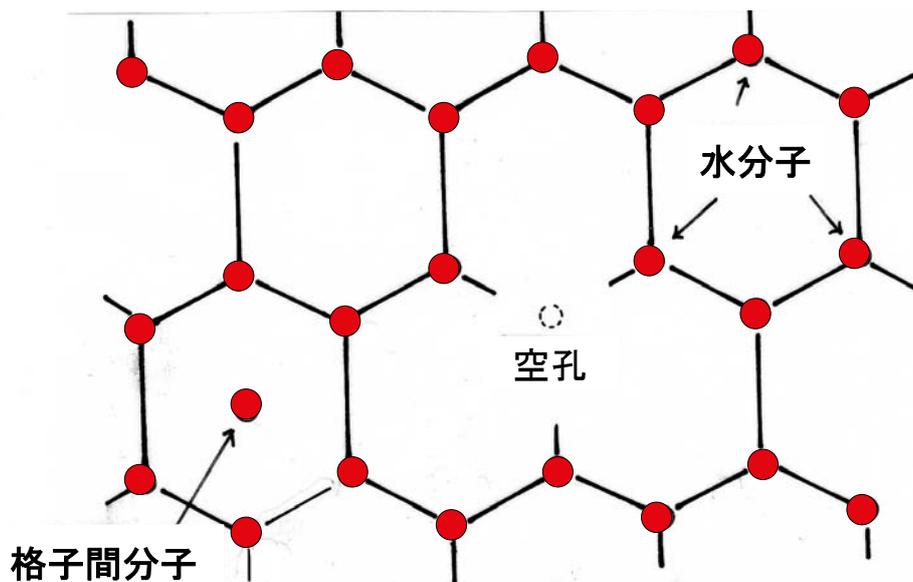
氷の結晶面と結晶方位



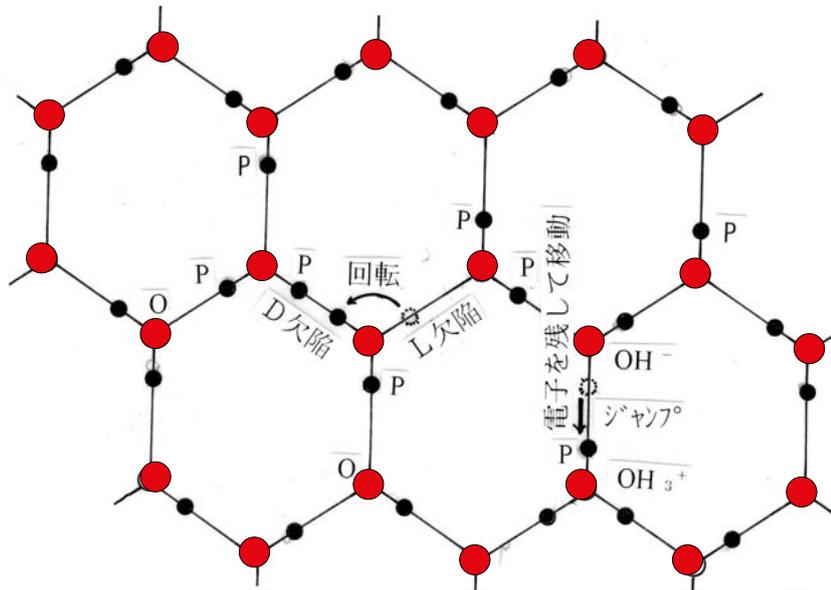
氷の各種欠陥



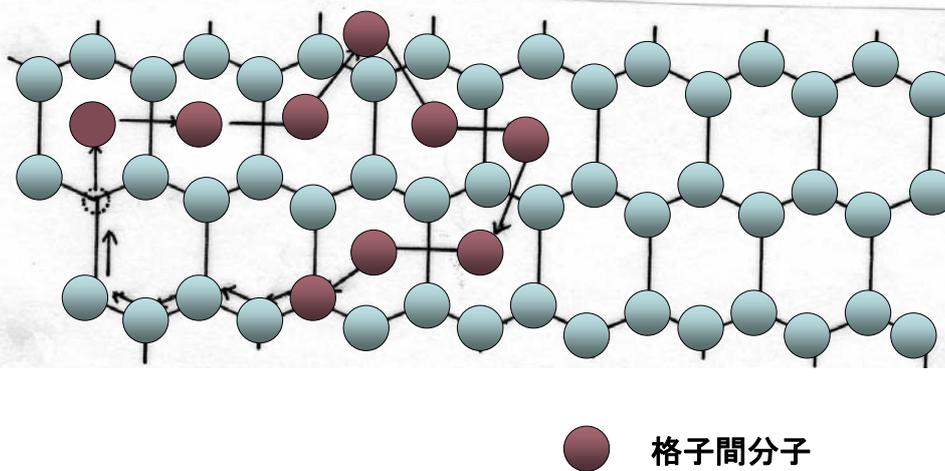
空孔と格子間分子



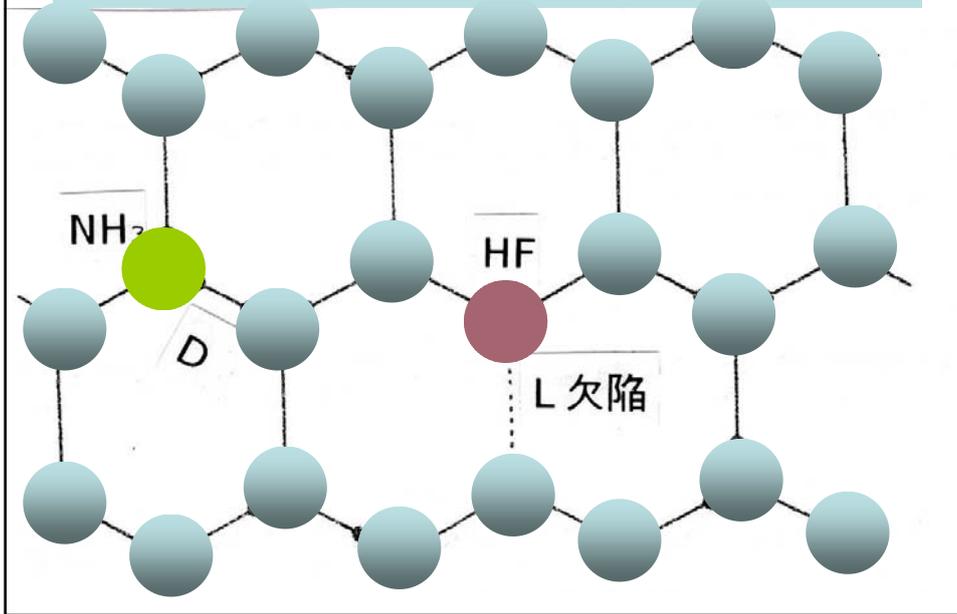
D,L欠陥(回転)とイオン欠陥(ジャンプ)



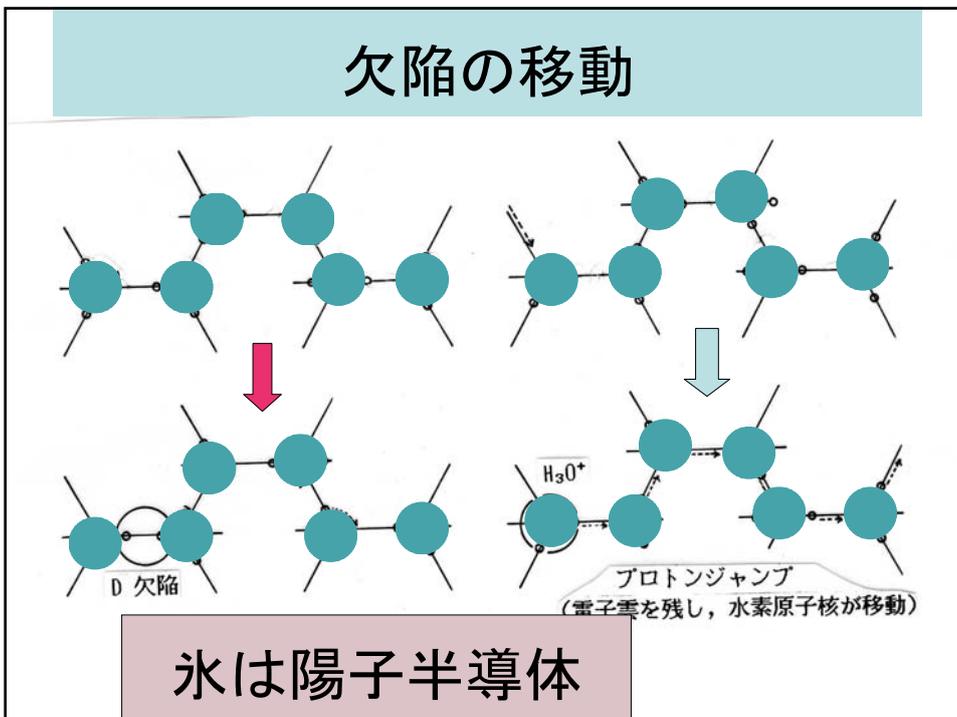
格子間分子の移動



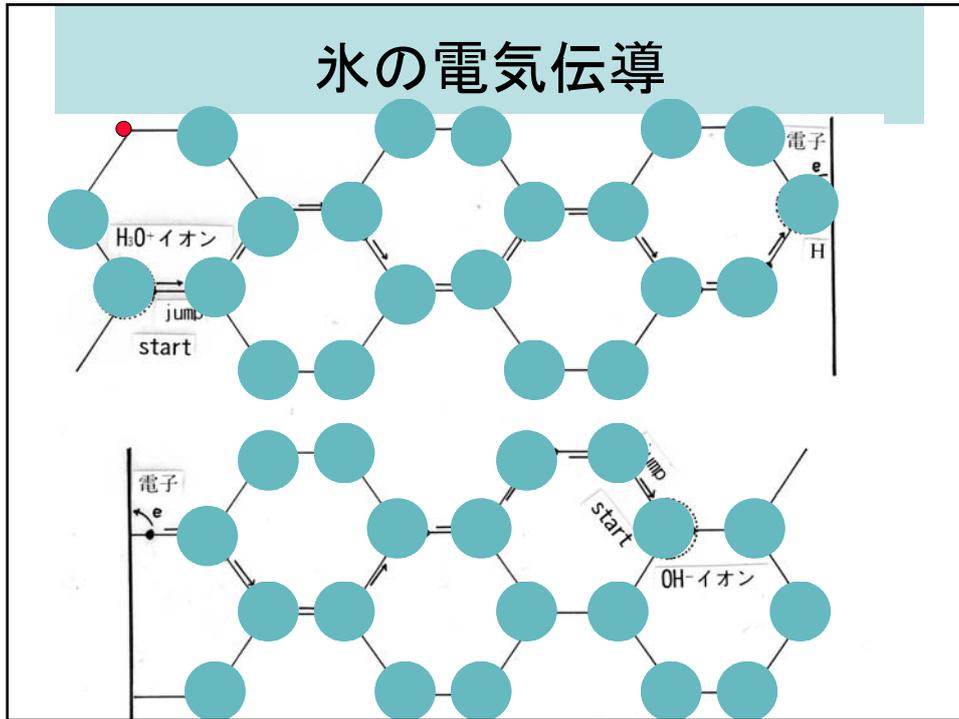
異物による欠陥の形成



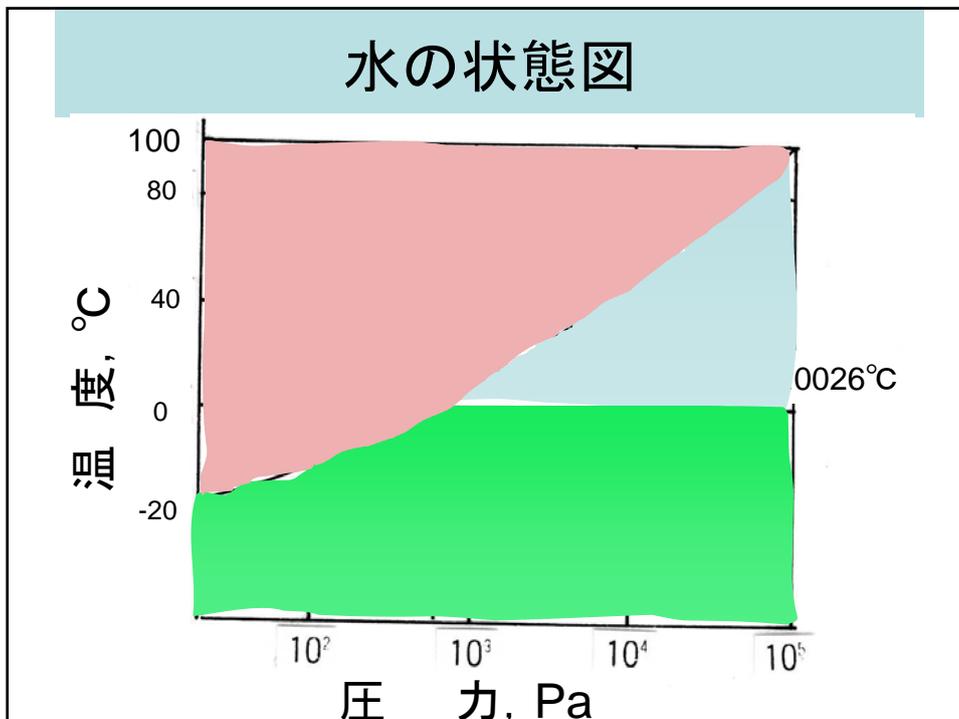
欠陥の移動



氷の電気伝導



水の状態図



氷の熱伝導率

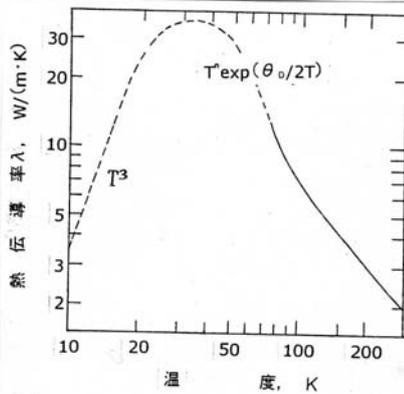


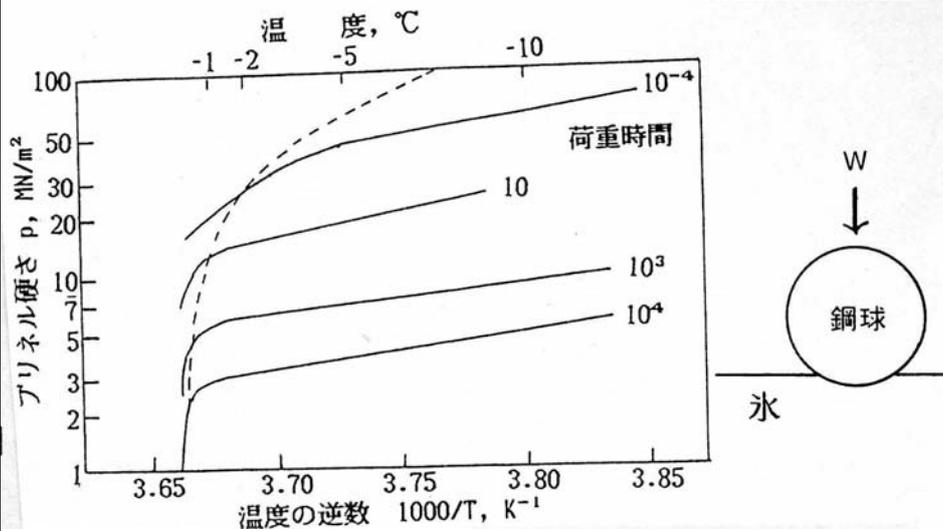
図 2.9 氷の熱伝導率の温度依存性

表 2.7 氷の方向による熱伝導率 λ, W/mK の違い

表 2.6 物質の熱伝導率

| 熱伝導率 | W/mK |
|--------|-----------|
| 銅 | 403 |
| アルミニウム | 236 |
| ニクロム | 13 |
| 鉄 | 84 |
| 水 | 0.58 |
| 木材 | 0.2 ~ 0.1 |
| おがくず | 0.06 |
| 毛布 | 0.043 |
| 綿 | 0.03 |
| 灰 | 0.02 |
| 空気 | 0.024 |
| 水蒸気 | 0.016 |
| フロン | 0.0085 |

氷の硬さ



氷の付着強さ

表 3.6(1) 氷のせん断付着強さ, MPa(=10kgf/cm²)

| Loughborough | | Sallario | | Brunner | |
|--------------|------|----------|------|---------|------|
| 銅 | 0.87 | 金属 | 0.95 | ホリスチレン | 0.59 |
| 鉄 | 1.30 | 金属酸化面 | 0.88 | ハラフィン | 0.46 |
| アルミニウム | 1.55 | スキラッカー | 0.62 | シリコングリス | 0.31 |
| | | | | ホリカホネト | 0.29 |
| | | | | ナイロン | 0.34 |
| | | | | ホリアビレン | 0.64 |

表 3.6(2) Landy & Freiburger, 接触角とせん断付着強さ, MPa

| 材 料 | 接触角 | せん断強さ | 材 料 | 接触角 | せん断強さ |
|---------------|-------------|-------|--------------|-----|-------|
| テフロン FEP | 110 ~ 114 ° | 0.18 | ホリビニリデンフロライト | 82 | 0.56 |
| テフロン(PTFE) | 108 | 0.32 | アクリル(PMMA) | 80 | 0.64 |
| ホリエチレン | 94 | 0.26 | ホリヘキサメチレン | 70 | 0.30 |
| ホリクロロフルオロエチレン | 90 | 0.31 | アチハマイト | | |

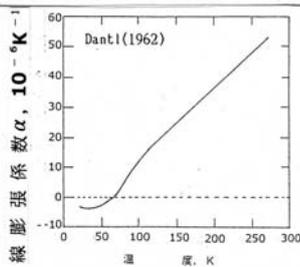


図 2.3 氷の線膨張係数

表 2.4 氷の線膨張係数 (理科年表)

| 温度 °C | 氷の線膨張係数 10 ⁻⁶ K ⁻¹ |
|----------|---|
| 0 | 52.7 |
| -50 | 45.6 |
| -100 | 33.9 |
| -200 | 0.8 |

他の物質の線膨張係数, 10⁻⁶ K⁻¹

| | |
|------------|------------|
| ガラス | 8 ~ 10 |
| バイレックスガラス | 3 ~ 3.6 |
| アルミニウム | 20 |
| 真鍮 | 19 |
| アクリル(PMMA) | 80 |
| コンクリート | 6.8 ~ 12.7 |
| パラフィン | 106 |
| インバー | 0 ~ 1.5 |

分子間に見ると、各分子は平面的な周期性なポテンシャルの谷間近くで熱振動している。温度が高くなると、各分子の熱振動が増すので、分子が少し高い位置に上がる。隣接する分子間で最接近したとき、より大きな反発力が働くので、ポテンシャルの間隔が少し広げられる。これが熱膨張である。

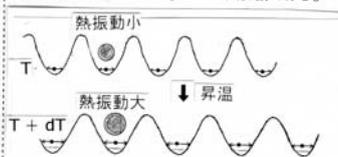
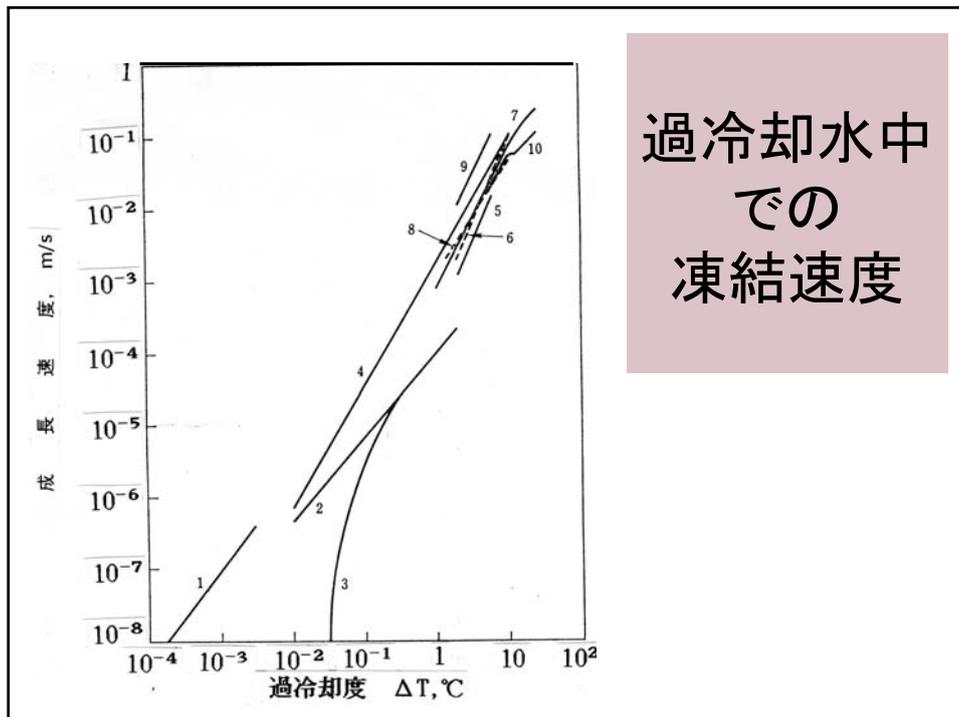


図 2.4 氷の熱膨張



図 2.5 お神渡り

氷の膨張係数



水の過冷却

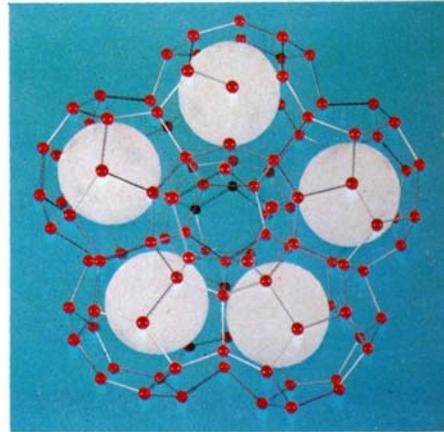
氷晶核の侵入が防止されれば
水は容易に過冷却する

クラスレート氷：メタンハイドレート

fields in Siberia.

The exploratory techniques being studied for the recovery of heavy oil, such as steam injection or injection of hot gases, Davidson says, might be applied to gas hydrates, although the inaccessibility and harsh environment of the Arctic will forestall attempts to harness the energy for

A model of the molecular structure of the gas hydrate. Enormous pressures and low temperatures shape water molecules (red balls) into a network that traps methane molecules (white balls) in spherical cages.



クラスレート氷

ゲスト分子に対し、水分子が圧倒的に少ない条件下で結晶が形成されていくとき、クラスレートになることがある