

Ekin Seminar Section 2.1-2.8

Shotaro ABE (ICRR, UTokyo)

29th Sep, 2025

2.1 Heat Transfer

低温装置における熱伝達は設計の成否を決定する最重要要素である。加工後に小規模修正で対処できる場合もあるが、入熱・出熱が適切な範囲に収まらなければ、装置全体が機能不全に陥る。熱伝達は固体の伝導、液体や気体の対流、空間を介した放射という三つの基本経路に大別され、材料ごとの物性値や表面状態に強く依存する。固体伝導は比較的精度よく予測できる一方で、対流や放射は不確実性が大きく、見積もりはあくまで近似に留まる。さらに、固体／固体、液体／固体、固体／気体といった界面での熱伝達は、実験設計においてしばしば支配的となる。また、Joule heating, thermoacoustic oscillations, superfluid-helium creep, gas adsorption/desorption といった一見目立たない熱源も無視できず、ときに支配的な制約因子となる。これらは配線設計・構造寸法・表面処理・真空管理など、設計段階からの考慮が必須である。

本章の最終節では、各伝熱機構を組み合わせて実際の測定プローブにおける熱収支計算が示される。この計算原理は汎用的であり、他のクリオスタットや測定系の設計にも容易に応用可能である。したがって、本節は低温工学を実践的に学ぶうえで最重要の基盤であり、設計者は例題を通じて定量的な見積もり方法を習得すべきである。

- 熱伝達を設計の出発点として捉える
 - 熱流入・流出を定量的に見積もらなければ、どんなに精緻な構造でも失敗する。
 - 「正しいオーダーに収まっているか」をまず確認することが最低条件。
- 3つの基本的伝熱形態を区別する (Sec. 2.2–2.4)
 - 固体伝導 (Sec. 2.2)：主要経路として予測が比較的容易。
 - 液体・気体の対流 (Sec. 2.3)：圧力や分子自由行程でモードが変化し、不確実性が大きい。
 - 放射 (Sec. 2.4)：表面放射率に依存し、シールド設計が性能を左右する。
- 界面での伝熱を主要課題とする (Sec. 2.5–2.7)
 - 液体／固体 (Sec. 2.5)：核沸騰・膜沸騰の遷移が冷却効率を決定。
 - 固体／固体 (Sec. 2.6)：低温では接触抵抗が支配的で、はんだ・圧接・グリース等が不可欠。
 - 固体／気体 (Sec. 2.7)：液体を使えない温度域では交換ガス冷却が選択肢となるが効率は低い。
- 見落としがちな熱源を織り込む (Sec. 2.8)
 - Joule heating： $P = I^2 R$ で配線や接触部に発生、断面積設計とヒートシンクで抑制。
 - Thermoacoustic oscillation：狭管内の自励圧力振動が液体ヘリウムを大量消費、細管設計やガス抜きで防止。
 - Superfluid-helium creep：超流動膜が壁を這い上がり、蒸発損失を生む。リムやトラップで制御。
 - Gas adsorption/desorption：表面のガス放出が熱負荷を与え、断熱消磁冷却などに偽の信号を生む。
- 総合熱収支を必ず計算する (Sec. 2.9)
 - 個々の機構理解にとどまらず、すべてを組み合わせる熱収支を算出することが不可欠。
 - 計算原理は汎用的で、他の装置設計にも容易に応用可能。

2.2 Heat conduction through solids

固体を通した熱伝導は、低温工学において最も基本的かつ予測しやすい熱伝達機構である。固体棒や管を流れる伝導熱流は Fourier の法則に従い、温度依存熱伝導率 $\lambda(T)$ 、断面積 A 、長さ L 、および両端温度差から計算でき

る。クリオスタット設計では $\lambda(T)$ の温度依存性が強く、材料差は最大で **6 桁** に及ぶ。例えばステンレス鋼は低伝導率ゆえ外部からの熱流入を抑える構造材として選ばれる。一方、高純度金属（例：高純度銅）は極低温で非常に高い熱伝導率を示すが、欠陥・不純物に強く依存してばらつきが大きい。設計実務では、付録 A2.1 の「熱伝導率積分表」（4 K 基準）を用いると、区間平均の熱伝導率で簡便に熱流を見積もれる。さらに、電気抵抗率 ρ の測定と Wiedemann–Franz–Lorenz 則 $\lambda = L_N T / \rho$ を利用すれば、高純度金属の $\lambda(T)$ を近似的に推定でき、 $\lambda(T)$ 曲線に現れるピーク（高温側での電子散乱増大による抑制）も理解できる。

- **固体伝導は Fourier の法則に従う**

- 微小要素における伝導熱流：

$$\dot{q}_{\text{cond}} = \lambda(T) A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

- 一様断面（長さ L ）の場合：

$$\dot{q} = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT \quad (2.2)$$

- ここで A は断面積、 dT/dx は温度勾配、 $\lambda(T)$ は温度依存熱伝導率。

- **平均熱伝導率を用いて温度区間ごとの評価ができる**

- 区間平均熱伝導率を定義：

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT, \quad \Delta T = T_2 - T_1 \quad (2.3)$$

- 近似式： $\dot{q} = \frac{A}{L} \bar{\lambda} \Delta T$ （式 (2.2) に対応）。

- 設計実務では積分表（付録 A2.1）を利用することで、温度範囲に応じた熱流の評価が容易になる。

- 特に 4 K 基準の積分値を使うと差分から直接 \dot{q} を算出できる：

$$\dot{q} = \frac{A}{L} \left(\int_{4 \text{ K}}^{T_2} \lambda(T) dT - \int_{4 \text{ K}}^{T_1} \lambda(T) dT \right) \quad (2.2a)$$

- **材料ごとに熱伝導率は極端に異なる**

- 図 2.1 に示すように $\lambda(T)$ は材料によって $> 10^6$ の幅で変化。

- ステンレス鋼：低伝導率で外部熱流入を抑える構造材に適する。

- 高純度銅など：極めて高い伝導率を示すが、結晶欠陥や不純物に強く依存するため試料ごとの差が大きい。

- **Handbook 値の信頼性と例外を理解する**

- 多くの材料では handbook 値は試料間で大差ない。

- 高純度金属では欠陥や純度により大きく変動するため、個別試料での確認が重要。

- **高純度金属の伝導率は電気抵抗率から推定できる**

- Wiedemann–Franz–Lorenz law により：

$$\lambda = \frac{L_N T}{\rho}, \quad L_N = 2.44 \times 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2 \quad (2.4)$$

- ρ は測定容易であり、 $\lambda(T)$ の推定に有効。

- この式は、高温側で ρ が増大して電子平均自由行程が短くなり、 $\lambda(T)$ が低下する理由を説明する。結果として $\lambda(T)$ 曲線にピークが現れる。

- **設計において固体伝導は最も信頼性の高い伝熱経路である**

- 他の機構（気体対流・放射）に比べて理論的見積もりの信頼度が高い。

- 設計戦略：構造部材には **低伝導率材** を選んで熱流入を抑え、熱リンクには **高伝導率材** を選んで効率的に熱を伝える。

- 積分表や Wiedemann–Franz–Lorenz 則を組み合わせることで、広い温度範囲で定量的に設計できる。

- **実務的に読み手が持ち帰るべきポイント**

- 設計時は「積分表で簡便に計算」しつつ「金属純度や欠陥の影響」を常に意識する。

- **低伝導率材 vs 高伝導率材の使い分け**が設計の基本戦略である。

- 固体伝導の確実な見積もりは、熱収支設計の骨格を成す。

2.3 Heat conduction through gases (and liquids)

気体や液体を介した熱伝導は固体に比べて予測精度が低い、交換ガスを導入する設計や試料冷却評価には不可欠である。本節では、気体・液体を用いた熱伝達の二つの基本領域（流体力学的領域と自由分子領域）、さらに自由対流・強制対流の違いを整理する。液体は気体より高い熱伝導率を持ち、気体冷却は液体冷却に比べ数桁効率が劣るが、圧力制御や対流抑制を工夫することで、熱スイッチや試料冷却の制御に応用できる。

- 気体伝導は設計上不可欠だが予測精度は低い

- 交換ガスによる試料冷却，加速，クリオスタット広温度範囲操作に利用される。
- 液体冷却に比べ効率は数桁低い、低圧域では熱スイッチとして活用できる。
- 長尺で低熱伝導率の試料の温度均一化にも有効。

- 熱伝達の二つの圧力領域を理解する

- 流体力学的領域（常圧付近）：平均自由行程 $l \ll d$ ，分子衝突支配で熱伝導率は圧力に依存しない。
- 自由分子領域（低圧）： $l \gg d$ ，分子が衝突せず壁間を移動し，熱伝導率は分子数密度に比例し圧力依存となる。
- 遷移条件は $l \approx d$ で起こる。
- ヘリウムの平均自由行程：

$$l = 2.87 \times 10^{-3} T^{1.147} / P \quad (\text{cm, K, Pa}) \quad (2.5)$$

- 低温ほど $l = 1 \text{ cm}$ となる圧力は小さくなる（Table 2.1）。

- 流体力学的領域の熱伝導を見積もる

- 分子数密度 $N \propto P$ ，平均自由行程 $l \propto 1/P$ より， λ は圧力に依存しない。
- 二平板間（面積 A ，間隔 d ，温度差 ΔT ）の熱流：

$$\dot{q}_{\text{gas}} = A \bar{\lambda} \Delta T / d \quad (2.6)$$

- $\bar{\lambda}$ ：温度範囲の平均熱伝導率。式 (2.6) は対流を無視した下限。
- 対流抑制にはギャップを小さくする，あるいはガラスウールや綿などの充填材を用いる。
- 液体の熱伝導率は気体の 3–15 倍大きい（Fig. 2.3）。
- 気体の λ は比熱 C_V に比例し，分子量が大きいほど低い：

$$\lambda \propto c C_V, \quad c \simeq 1.5\text{--}2.5 \text{ (He, H}_2, \text{N}_2, \text{O}_2) \quad (2.7)$$

- 自由分子領域の熱伝導を見積もる

- $l \gg d$ の場合，熱流は圧力に比例。
- Knudsen, Kennard による二表面間の熱流：

$$\dot{q}_{\text{gas}} = k a_0 P A_i \Delta T \quad (2.8)$$

- k : He=2.1, H₂=4.4, 空気=1.2 (White and Meeson 2002)。
- a_0 ：アコモデーション係数（表面との適合度），実際は 0.3–1.0 程度。設計では $a_0 \approx 0.5$ と見積もるのが実用的。
- この領域では圧力制御により熱スイッチとして利用可能。

- 自由対流と強制対流を区別して理解する

- 自由対流：浮力により流体が動く。熱伝達係数 h は低い。
- 強制対流：外力（ポンプ，ファン等）で流体を動かし， h は大幅に向上。

- 設計上の重要な理解

- 気体冷却は効率が低い、圧力制御で熱スイッチとして機能する点が大きな利点。
- 流体力学的領域では圧力に依存せず、充填材や隙間制御で対流を抑えることが実用的。
- 自由分子領域では圧力に比例するため、ガス圧制御で熱結合を自在に調整できる。
- 液体は気体よりも大きな熱伝導率を持つが、利用可能な温度域や取り扱い条件に制約がある。

2.4 Radiative heat transfer

クリオスタットでは高温部と低温部の温度差が大きく、放射熱伝達の寄与は無視できない。熱流を抑える最も有効な手段は、高温面と低温面の間に放射シールド（金属、アルミ蒸着 Mylar など）を挿入し、視野因子を減らすことである。放射は表面放射率 ε に強く依存し、反射率 R_f とは $\varepsilon = 1 - R_f$ の関係にある。設計では、Stefan–Boltzmann 則と有効係数 E の理解、材料・表面状態による ε の管理、段階化シールドと multilayer insulation (MLI) の活用が要点となる。

- 放射伝熱は Stefan–Boltzmann 則に従う（まず「式」を押さえる）

- 単一表面からの放射熱流：

$$\dot{q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A T^4$$

- 二表面間の正味交換： $\dot{q}_{\text{net}} = E A \sigma (T_2^4 - T_1^4)$

- $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 。 E は 0–1 の係数で、表面の反射様式（specular/diffuse）と幾何（球・円筒・平板）に依存。

- 幾何と反射様式が「有効係数 E 」を支配する（どこが効くか）

- 球・円筒では外側表面の反射様式が支配的、平行平板では反射様式に実質依存しない。
- 実測では specular/diffuse の差は小さく、 $E_{\text{spec}}/E_{\text{diff}} \sim 0.5\text{--}1$ (Scott 1963)。
- 設計帰結：視野を切る工夫（baffles, helical strips, floating shields）が E を下げる本丸。

- 放射率 ε は材料・表面状態で桁違いに変わる（何を磨くか）

- 研磨した高伝導金属（Ag, Cu, Au, Al）： $\varepsilon \sim 0.01$ （さらに低温で低下）。
- 抵抗率の高い金属（brass, Pb, Ni, stainless）： $\varepsilon \sim 0.03\text{--}0.1$ 。
- 非金属（phenolic, glass）： $\varepsilon \sim 0.9$ 。
- 酸化・汚染で $\varepsilon \rightarrow 0.3\text{--}0.6$ に悪化し得る（清浄維持と表面処理が重要）。
- Drude モデルから $\varepsilon \propto \sqrt{\rho/\lambda}$ （ ρ : dc 抵抗率, λ : 放射波長）で、純金属は低温ほど ε がさらに低い。
- 室温で支配波長 $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$, 4 K で $\lambda \sim 700 \mu\text{m}$ （長波長側まで配慮）。

- 「 T^4 依存」を段階化で殺す（どう減らすか）

- $\dot{q}_{\text{net}} \propto T_2^4 - T_1^4$ のため、中間温度の多段シールドで寄与を劇的に削減。
- N 枚の floating shield により概ね $\sim 1/(N+1)$ に低減 (Scott 1963)。
- 例：外側を LN_2 温度で熱固定、内側を 50–80 K ステージで更に分割。

- Superinsulation / MLI は決定打（どう仕上げるか）

- 30–80 層の aluminized Mylar/Kapton（蒸着 Al 厚 $\gtrsim 80 \text{ nm}$ が最適；Nast 2000）で室温放射を遮断。
- 十分な真空（ $< 10^{-2} \text{ Pa}$ ）で見かけ熱伝導率 $\lambda_{\text{app}} \sim 10^{-5} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ に到達。
- スペーサ（silk/Nylon net）や crinkled Mylar で接触点を減らし、固体伝導のショートを回避。
- 過圧縮は厳禁（層間接触が増え λ_{app} 悪化）。目安は 30 層/cm 程度 (Timmerhaus & Flynn 1989; Flynn 1997)。
- 大表面積による吸着ガス対策として bake-out と getter（活性炭）を併用。運用前は LN_2 で一晚予冷してから LHe 充填。
- MLI の最適化により外側 LN_2 デュワーを省略できるケースがある。

- 設計の実装指針（どこに何を施すか）

- bore 上部に多段の金属シールドや helical strip を配置し、直視・直射の放射経路を遮断。
- neck 等の非クリティカル部は黒色シールドで散乱光を吸収し、試料部は研磨・金メッキで ε を最小化。
- シールドは蒸発冷ガスでブリード冷却し、放射・伝導の両方で流入を抑える。

- 実務的に読み手が持ち帰るべきポイント

- まず視野を切る（ E を下げる幾何）：多段・遮蔽・螺旋で直射経路を断つ。
- 次に表面を作る（ ε を下げる材料・処理）：磨く・鍍金する・汚さない。
- 最後に層で仕上げる（MLI を最適化）：十分な真空、適正層密度、過圧縮回避、吸着ガス対策。
- 放射は「 T^4 」なので、段階化（intercept）が最良の武器。数枚の良いシールドと適切な MLI が、複雑な冷凍機の能力に匹敵する省熱効果をもたらす。

2.5 Heat conduction across liquid/solid interfaces

試料を効率よく冷却する最も直接的な方法は、液体ヘリウムや液体窒素への**直接浸漬**である。設計上の律速は液体内部の伝導ではなく、**液体／固体界面**での熱伝達である。熱流束の増加に伴い、**非沸騰（自然対流）→核沸騰→膜沸騰**に遷移し、膜沸騰では表面が気体膜に覆われ**実質的に断熱**となるため**冷却性能は約 1 桁低下**する。膜沸騰には**ヒステリシス**があり、復帰には ΔT を十分に下げる必要がある。

- 液体浸漬冷却の効率は「界面」で決まる
 - － 問題の核心は液体内部ではなく、**液体／固体界面の熱伝達**。
 - － **膜沸騰**が立つと気体膜により熱結合が遮断され、性能が**約 1 桁劣化**。
 - － 設計原則：**有効な冷却は核沸騰領域まで**。膜沸騰を避ける条件設定（熱流束・表面向き・圧力・形状・表面状態の最適化）が重要。
- 液体ヘリウム（LHe）での定量式と運用知見
 - － 非沸騰・低熱流束（ $\ll 10^3 \text{ W m}^{-2}$ ）：自然対流支配。
 - * 垂直面が最良，上向き面は低下，下向き面は最悪（気泡滞留で断熱）。
 - － 核沸騰開始（ $\gtrsim 10^3 \text{ W m}^{-2}$ ）：

$$\frac{\dot{q}}{A} \approx 6 \times 10^4 \Delta T^{2.5} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-2.5}]$$

保守設計値（Schmidt 1981）：

$$\frac{\dot{q}}{A} \approx 1 \times 10^4 \Delta T^{2.5} .$$

- － 臨界熱流束 $\sim 10^4 \text{ W m}^{-2}$ で**膜沸騰**に遷移：一定熱流束のまま ΔT が $\sim 0.5 \text{ K}$ から $\gtrsim 10 \text{ K}$ に**急増**（幾何に依存）。
- － ヒステリシス：高 ΔT 側から冷やすと膜沸騰が低 ΔT まで持続し、十分に冷やしてから核沸騰へ**急減**して復帰。
- 液体窒素（LN₂）での定量式と運用知見
 - － 核沸騰領域（大気圧）：

$$\frac{\dot{q}}{A} \approx 5 \times 10^2 \Delta T^{2.5} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-2.5}]$$

実験範囲は $\frac{\dot{q}}{A} \sim 10^2\text{--}10^3 \Delta T^{2.5}$ （Richards et al. 1961; Seader et al. 1965）。

- － 臨界熱流束 $\sim 2 \times 10^5 \text{ W m}^{-2}$ と**約 20 倍高い**が、遷移時の ΔT は $\sim 10 \text{ K}$ から $\mathcal{O}(10^2) \text{ K}$ に**急増**（試料径に依存）。
- － ヒステリシス：高 ΔT 側から戻すと膜沸騰が相対的に低い ΔT まで持続後、核沸騰へ復帰（「指を一瞬入れても凍らない」現象の背景）。
- LHe と LN₂ の比較（どちらを選ぶか）
 - － 臨界熱流束：LN₂ は LHe の**約 20 倍**（ 2×10^5 vs 10^4 W m^{-2} ）。
 - － 遷移 ΔT ：LN₂ は LHe の**約 20 倍**（ $\sim 10 \text{ K}$ vs $\sim 0.5 \text{ K}$ ）。
 - － 核沸騰領域の熱伝達率（同一 ΔT 比較）：LN₂ は LHe の $\sim 1/100$ 。

$$\text{LHe: } 6 \times 10^4 \Delta T^{2.5} \quad \text{vs} \quad \text{LN}_2 : 5 \times 10^2 \Delta T^{2.5} .$$

- － 設計含意：大熱流束に耐える必要がある場合は LN₂ の**高い臨界熱流束**が有利。ただし**小さな ΔT で強い結合**が必要な場合は LHe の**高い核沸騰伝熱**が有利。
- 膜沸騰は避けるー核沸騰までを使う（実装指針）
 - － 熱流束管理： \dot{q}/A が臨界値に近づかないよう配線・接触部の **Joule 発熱**を抑制（Sec. 8.5.3）。
 - － 表面向き：垂直・上向きを優先，下向きは回避（気泡滞留対策）。
 - － 幾何・粗さ・圧力：気泡離脱に有利な形状・表面処理，適切な圧力・サブクールの設定。
 - － ヒステリシス対策：膜沸騰に入ったら ΔT を十分に下げて核沸騰へ**確実に復帰**させる。
- 参考（1 K 未満の境界抵抗）

- $^3\text{He} / ^4\text{He}$ と各種固体の thermal boundary resistivity の集成 (Lounasmaa 1974)。
- ヘリウム系の広範な熱伝達データ (Van Sciver 1986)。
- 実務的に読み手が持ち帰るべきポイント
 - 核沸騰を使い、膜沸騰は避ける——界面が律速であり、膜沸騰は性能を約 1 桁落とす。
 - \dot{q}/A と ΔT をまず見積もる：LHe では $6 \times 10^4 \Delta T^{2.5}$ (保守 $1 \times 10^4 \Delta T^{2.5}$)，LN₂ では $5 \times 10^2 \Delta T^{2.5}$ を基準に設計。
 - 向きと形状が効く：垂直／上向きを選び、気泡滞留を避ける幾何にする。
 - 冷媒の選択は要件で決める：小 ΔT で強結合なら LHe，臨界熱流束重視なら LN₂。
 - ヒステリシスを前提に運用手順を設計：復帰のための ΔT 低減プロトコルを持つ。

2.6 Heat conduction across solid/solid interfaces

固体／固体界面での熱伝導は低温で意外なほど小さく、温度低下とともにさらに悪化する。これは試料固定・温度計取り付け・配線の熱固定・熱スイッチの律速となる。本質的には電子伝導 (Wiedemann–Franz–Lorenz 則) だけでは説明できず、実測の熱流は電子伝導の予測を 10^2 – 10^5 倍も上回ることが多い——界面フォノン伝導が支配的であることを示唆する。設計では、接合方法・加圧力・表面処理 (特に金メッキ)・グリースの是非を系統的に最適化して、界面熱抵抗を抑える。

- 低温で界面抵抗が支配的になる (まず現象を理解する)
 - 温度が下がるほど界面熱コンダクタンスは低下し、バルクの $\lambda(T)$ より界面が律速になりやすい。
 - 電子伝導の見積もり (WFL) に対し、実測の熱流は 10^2 – 10^5 倍大きい \Rightarrow フォノン寄与が支配。
- 接合方法の基本順位と例外 (どう組むか)
 - 基本順位：はんだ接合 > ワニス／接着 > 圧接。
 - 重要な例外：高圧・金 (Au) 仕上げの圧接は大幅に性能向上し、最良クラスに逆転し得る。
- はんだ接合を使いこなす (最も確実な高コンダクタンス)
 - インジウムはんだが典型的に最良：20 K で $\sim 100 \text{ W}/(\text{cm}^2 \text{ K})$ に達する。
 - 作製指針：母材を下地メッキ後、純 In を挟んで加熱・圧縮し、薄い接合層 ($\sim 25 \mu\text{m}$) を均一に形成。
- ワニス・接着剤は次善策 (面積で稼ぐ)
 - 7031 varnish, Epibond 121 などは中程度のコンダクタンス。広い接触面積や薄塗りで性能を確保。
 - 金属–高分子–金属の界面抵抗データは Lounasmaa (1974) 等を参照。
- 圧接は「力」と「表面」で決まる (式で設計する)
 - 経験式 (Berman & Mate 1958)：

$$\dot{q}_{\text{pressed}}(T) = \dot{q}(100 \text{ lb}, 4.2 \text{ K}) \left(\frac{F}{445 \text{ N}} \right) \left(\frac{T}{4.2 \text{ K}} \right)^y \quad (2.14)$$

- 指数 y は材料依存：Cu/Cu, Au/Au で $y \approx 1.3$ ，sapphire/sapphire で $y \approx 3$ 。
- Au/Au 圧接が最良：酸化膜が形成されず、微視的接触面積が増えて性能向上。金メッキで他金属界面も改善。
- 高圧側ではコンダクタンスは力 F にほぼ比例、面積依存は弱い (実効接触斑点が支配)。
- 圧力カテゴリーごとの作法 (実装の目安)
 - 低圧 ($\lesssim 1 \text{ MPa}$)：ボルト 1 本等の軽荷重。グリース併用でコンダクタンスが数倍改善、面積比例の色合いが強くなる。
 - 中圧 (In 箔の降伏超え)：0.05–0.1 mm の In 箔を挟むと面積比例でスケール、均一性が向上。
 - 高圧 (多点締結・厚圧板)：Ni/Au めっきなどで性能が顕著に向上。例：77 K, 総荷重 20 kN で $\sim 70 \text{ W/K}$ が報告 (2 個目)。
- グリースの使いどころ (可否判断のコツ)
 - 低圧・大面積では Apiezon N などが数倍の改善を与える事例多数。
 - 高圧・小面積では逆効果になり得る (固体伝導経路の阻害／層内断熱)。
 - 可動界面 (熱スイッチ) には不適 (低温で凍結・ポンプアウト困難)。
 - 金めっきと高圧の組合せではグリース無しが望ましいケースが多い (クロスオーバー荷重が低下)。

- 材料選定と表面処理（何をどう仕上げるか）
 - Au/Au 仕上げがベストプラクティス。Cu/Cu より **~20 倍**高いコンダクタンスの報告（2 個目）。
 - 絶縁支持が必要な場合は、**MnO₂ 粉末層**や薄板積層で意図的に抵抗を増加（Mikesell & Scott 1956）。
- 実務的に読み手が持ち帰るべきポイント
 - 順序立てて最適化：1) 接合方式（In はんだ → Au/Au 圧接）→ 2) **力 F の最大化**（均一に高圧）→ 3) 表面処理（金メッキ・平坦化・清浄）→ 4) グリースは**低圧・大面積のみ**。
 - 式 (2.14) で設計する：目標 $\dot{q}/\Delta T$ から必要荷重を逆算， y は材質に応じて 1.3–3 を採用。
 - 温度が下がるほど厳しくなる：低温運用ほど「はんだ/Au 化/高圧」の効果が大きい。
 - 熱スイッチ用途では圧接の**力可変性**が利点。グリース無し・Au 表面で再現性を確保。

2.7 Heat conduction across solid/gas interfaces

液体冷媒を使えない温度域では、固体／気体界面を介した熱伝達が重要となる。特にヘリウムや窒素の交換ガスが利用され、自由対流あるいは強制対流によって試料冷却が行われる。自由対流では、固体により加熱された気体の密度低下によって浮力が生じ、気体が上昇して熱を運ぶ。強制対流では外力により流体を動かし、熱伝達率は自由対流を大きく上回る。本節では、**気体冷却が液体冷却に比べて数桁効率が低いこと**，設計評価では**自由対流と強制対流を区別して理解する必要があること**を強調する。

- 固体／気体界面での熱伝達は交換ガス利用に不可欠である
 - 液体クライオジェンの温度域外で試料温度を制御する際に必須。
 - ヘリウム（ ~ 4.2 K）や窒素（ ~ 77 K）の交換ガスを用いて試料を熱的に結合する。
- 自由対流は浮力によって駆動される
 - 固体に接した気体が加熱され密度が低下 → 浮力で上昇 → 熱を輸送。
 - 熱流束は次式で表される：

$$\dot{q}_{\text{conv}} = h A_{\text{surf}} \Delta T$$
 - h : 対流熱伝達係数， A_{surf} : 固体表面積。
- 自由対流のデータが存在する
 - Fig. 2.9：ヘリウムガス（4.2 K）の自由対流係数。
 - Fig. 2.10：窒素ガス（77 K）の自由対流係数。
 - 液体冷却（Fig. 2.5, 2.6）と比較すると、**気体冷却は数桁効率が低い**。
- 強制対流では効率が大幅に増加する
 - ポンプやファンで気体を流動させると h が自由対流より数桁大きくなる。
 - 設計評価では自由対流と強制対流を必ず区別する。
- 設計上の含意
 - 液体を利用できない温度域では不可避の冷却手段だが、性能を過大評価せず**補助的な冷却**と位置づける。
 - 実装時はギャップや充填材で対流の形態を制御することも考慮。

2.8 Other heat sources

低温実験では、明示的な熱伝達以外にも複数の「隠れた熱源」が冷却性能を左右する。本節では代表的な 4 種類——**Joule heating**, **thermoacoustic oscillations (Taconis 振動)**, **superfluid-helium creep**, **gas adsorption/desorption**——を整理する。これらは設計段階から考慮すべき重要な熱負荷要因であり、場合によっては液体 He 消費や測定精度に決定的な影響を与える。

- **Joule heating は最も基本かつ厄介な熱源**
 - 抵抗 R に電流 I が流れると $\dot{q} = I^2 R$ の発熱が生じる。
 - 発生箇所：試料内部，接触部，リード線。装置完成後に問題化することも多い。
 - リード線の最適寸法条件では、最小熱流入は以下の値となる：

$$\dot{q}_{\text{min}}/I \approx 84 \text{ mW/A } (290 \rightarrow 4 \text{ K}), \quad \dot{q}_{\text{min}}/I \approx 18 \text{ mW/A } (77 \rightarrow 4 \text{ K}) \quad (2.16)$$

- 対策：リード線の断面積最適化，77 K ヒートシンク設置，蒸発ガス冷却リード（固体銅線の ~ 40 分の 1 に低減），高温超伝導リード（60–4 K 区間でさらに有効）。
- 背景磁場変化により渦電流が流れ，過渡 Joule heating が発生。対策はシールドにスリットを設けること。
- **Thermoacoustic oscillations (Taconis 振動) は液体 He 消費を増加させる**
 - 管の一端が室温，他端が液体 He に接する細管内で熱励起圧力振動が生じる。
 - 直径 ~ 1 cm 以下の細管で自励発生しやすいが，8 cm 程度でも起こり得る。
 - 液体 He を毎時数百 mL 消費，低音の唸り音として観測される。
 - 対策：細管に数 mm の小孔を設けて減衰。ただし空気侵入を防ぐ位置設計が必要。
 - 応用例：pulse-tube cryocooler の原理や，液面計（振動周波数変化で液面高さを検知）。
- **Superfluid He II の creep が蒸発損失をもたらす**
 - He II は容器壁を這い上がり，上部で蒸発して損失を生じる。
 - 平滑金属表面で 1 cm 周長あたり 2×10^{-7} L/s の損失（ガラスでは清浄度により 1/3 \sim 3 倍変動）。
 - 損失は到達最低温度の限界を規定する。
 - 対策：液面直上に小孔板を設けて流れを制御。ただしポンプ効率は低下。専用の超流動室を設計するのが望ましい。
- **Gas adsorption/desorption が測定結果を歪める**
 - 冷表面でガスが吸着・脱離し，温度ドリフトや偽の熱容量を生じる。
 - 例：ガラス表面で 3 K \rightarrow 2 K に冷却すると 30×10^{-6} mol/m² の吸着，脱離に ~ 10 mJ/m² が必要。
 - 精密比熱測定（10 K 以下）や断熱消磁冷却（1 K 以下）で大きな誤差要因となる。
 - 解決策：交換ガスを避け，機械式または超伝導式 heat switch を利用。
- **設計上の含意**
 - Joule heating は不可避。最小値の目安（式 2.16）を把握し，リード構造を工夫して削減する。
 - 細管設計では thermoacoustic 振動を想定し，液体 He 消費を防ぐ工夫を盛り込む。
 - 超流動 He では壁 creep による損失を見込み，抑制構造をあらかじめ導入する。
 - 吸脱着による偽の熱容量や熱リークを過小評価せず，特に精密測定ではガス管理を徹底する。