



# CO<sub>2</sub> 赤外線励起時間



二酸化炭素分子CO<sub>2</sub>が15.01μmの赤外線を受け取って変角振動モードで励起され、受け取ったエネルギーを再び赤外線として放射して失活する場合、どの程度の時間が必要か？



CO<sub>2</sub>分子が赤外線を吸収して励起され、再び赤外線としてエネルギーを放射して失活する過程には、**自発放射寿命** (radiative lifetime) という概念が関わります。

## 1. CO<sub>2</sub>の15 μm変角振動モードの概要

- **波長**：15.01 μm (約667 cm<sup>-1</sup>)
- **モード**：変角振動 (bending mode)

この波長はCO<sub>2</sub>の主要な赤外活性バンドで、大気中の温室効果にも関わるとされる領域です。

## 2. 自発放射寿命の目安

CO<sub>2</sub>の15 μmバンドにおける自発放射寿命は、文献データや分光学的な実験から以下のように推定されています。

- **自発放射寿命**：0.1秒から1秒程度  
(これは気体の密度や温度条件によって多少変動します。)

## 3. 衝突緩和の影響

ただし、実際の大気中では分子同士の**衝突緩和 (collisional de-excitation)** が支配的であり、この過程では自発放射よりはるかに早くエネルギーが失活します。衝突による緩和時間は**10<sup>-8</sup>秒程度**と非常に短く、特に地球大気や金星大気のような高圧環境では、この影響が顕著です。



## 4. まとめ

- 真空中や低圧環境では、CO<sub>2</sub>分子が15.01 μmの赤外線を吸収して自発放射で失活するまでに約**0.1～1秒**かかります。
- 大気中や高圧環境では、衝突緩和が支配的で、**10<sup>-8</sup>秒程度**でエネルギーが失活し、自発放射はほとんど起こりません。

このため、CO<sub>2</sub>の赤外線吸収・放射の過程は、環境条件によって大きく異なります。



ありがとう。既に大気中、つまり局所熱力学平衡と見なせるような分子密度の高い状況では、放射緩和過程は起こらず、周辺の気体分子との衝突によって無放射緩和過程で失活することまで説明してくれたので手間が省けた。  
では次に、固体と局所熱力学平衡状態の大気が接触した場合、固体と大気に温度差があった場合熱エネルギーはどのような過程で移動するのかを説明してほしい。



固体と局所熱力学平衡（LTE）状態の大気が接触し、温度差がある場合、熱エネルギーの移動は主に以下の**3つの過程**によって進行します。

## 1. 熱伝導（Conduction）

接触面での直接的な分子衝突によって熱エネルギーが移動します。

- **仕組み:**  
固体表面の分子と大気中の気体分子が接触面で衝突し、エネルギーを交換します。温度の高い側の分子はより多くの運動エネルギーを持っており、このエネルギーが低温側に伝達されます。
- **特徴:**



- **固体から大気:** 固体の高温表面から大気の低温分子にエネルギーが渡る。
  - **大気から固体:** 逆に大気の方が高温であれば、そのエネルギーが固体に伝わる。
  - **適用例:**  
地表と大気間の熱交換や、金属表面が冷えた空気で冷却される場合など。
- 

## 2. 対流 (Convection)

大気中の流体運動による熱エネルギーの輸送です。

- **仕組み:**  
固体表面が大気を加熱すると、その部分の大気の密度が低下し、**浮力**によって上昇します。逆に冷却される場合は密度が増し、下降します。このように温度差によって大気が循環し、エネルギーが広がります。
  - **特徴:**
    - **自然対流:** 温度差による浮力で自然に発生する流れ。
    - **強制対流:** 風やファンなどの外力によって発生する流れ。
  - **適用例:**  
日中の地表加熱による上昇気流や、冷却装置でのファンを使った冷却。
- 

## 3. 熱放射 (Radiation)

電磁波 (赤外線) を介したエネルギー移動です。

- **仕組み:**  
固体はその温度に応じた**赤外線**を放射します。この放射は大気中の赤外活性分子 (CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oなど) に吸収され、エネルギーが大気に伝わります。逆に、大気も赤外線を放射し、それが固体に吸収されることもあります。



- **特徴:**
  - **真空中でも発生:** 他の媒介が不要なため、対流や伝導が働かない空間でもエネルギー移動が可能。
  - **大気の透明度に依存:** 大気が特定の波長に対して透明か不透明かによって、放射の効率が変わる。
- **適用例:**

夜間の地表冷却（放射冷却）や、赤外線ヒーターによる加熱。

---

## 総合的なエネルギー移動の流れ

1. **温度差がある場合**、まず固体と大気の間で**熱伝導**が起こります。
2. 次に、大気中で局所的に加熱された部分が**対流**によって移動し、熱が広範囲に分散します。
3. 同時に、固体と大気の間では**熱放射**も常に発生しており、特に透明度の高い波長帯では効率的にエネルギーが移動します。

---

## 補足

局所熱力学平衡（LTE）状態の大気では、分子間のエネルギー分布が安定しているため、**分子の衝突過程**が非常に速く、エネルギー移動も迅速です。そのため、**放射によるエネルギー移動**は、密度の高い層では比較的遅く、**熱伝導と対流**が支配的なエネルギー輸送手段となります。



今は固体と大気間の熱移動についてだけでよい。  
固体が高温であるか気体が高温であるかは別にして、高温側から低温側への熱伝導と熱放射によって熱エネルギーが移動するということだけでよいね？



はい、その通りです。

**固体と大気間の熱移動**は、温度差がある場合、**高温側から低温側へ**次の2つのメカニズムで進行します。

## 1. 熱伝導 (Conduction)

- **接触面**での固体分子と大気分子の**直接的な衝突**によってエネルギーが移動します。
- 高温側の分子がより多くの運動エネルギーを持っており、それが低温側に伝わります。

## 2. 熱放射 (Radiation)

- **赤外線放射**を通じて、固体と大気の間でエネルギーが交換されます。
- 固体は自らの温度に応じた赤外線を放射し、大気中の赤外活性分子がこれを吸収します。逆に、大気から固体への放射も同様に起こります。

## 結論

- 高温側から低温側への熱移動は、**熱伝導**と**熱放射**の2つの過程によって進行します。



ここで、以下の議論を進める上で、言葉の整理をしておく。赤外活性気体が赤外線を吸収してエネルギー的に励起され、再び赤外線を放射することで失活する放射緩和過程による失活を「再放射」、局所熱力学平衡状態にある大気中の赤外活性気体



が気体温度に応じたプランク輻射による定常的な放射を「熱放射」として明確に区別する。この定義でよいか？



はい、その定義で明確に区別するのは非常に理論的に整理されたアプローチです。以下のよう  
に確認します。

## 用語の定義

### 1. 再放射 (Re-emission)

- **定義:**  
赤外活性気体分子が赤外線を吸収して**エネルギー的に励起**され、その後、**再び赤外線を放射**することで失活する過程。
- **特徴:**
  - **個別の分子レベル**での励起と失活を指す。
  - 局所熱力学平衡 (LTE) が成り立たない場合でも発生。
  - 短時間の非定常的なプロセス。

### 2. 熱放射 (Thermal Radiation)

- **定義:**  
局所熱力学平衡状態にある大気中の赤外活性気体が、**気体温度に応じたプランク輻射**に基づいて行う**定常的な放射**。
- **特徴:**
  - **マクロな視点**でのエネルギー放射。
  - 温度場に応じた**平衡状態の放射**。
  - 局所熱力学平衡下での**定常的・持続的**な放射。



## 確認

この定義によって、\*\*個別分子の励起・失活（再放射）\*\*と、\*\*温度場に基づく定常的な放射（熱放射）\*\*が明確に区別され、議論が整理されます。この定義を進めるのは適切です。



次に、局所熱力学平衡（LTE）にある気体の性質について整理する。気体運動と気体温度の関係、気体分子の並進運動、回転運動、振動運動、Maxwell分布、エネルギー等分配則などについて詳細かつ明確な説明を示せ。



## 局所熱力学平衡（LTE）にある気体の性質

局所熱力学平衡（Local Thermodynamic Equilibrium, LTE）は、気体分子が**局所的に熱平衡状態**にあることを意味します。つまり、**分子同士の衝突が十分に頻繁に起こる**ことで、エネルギー分布が統計的に安定している状態です。LTEでは、**気体の温度やエネルギー分布**が明確に定義され、それに基づいて様々な物理法則が適用されます。

### 1. 気体温度と気体運動の関係

- **気体温度**は、気体分子の**運動エネルギーの平均値**に直接関連しています。特に理想気体においては、温度は分子の**並進運動エネルギー**と関係します。
- **理想気体の温度と並進運動エネルギーの関係:**

$$\langle E_{\text{並進}} \rangle = \frac{3}{2}kT$$

ここで、

- $\langle E_{\text{並進}} \rangle$ : 1分子あたりの平均並進運動エネルギー



- $k$ : ボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)
- $T$ : 絶対温度 (K)
- **温度の物理的意味:**  
温度は分子集団の**運動エネルギーの統計的平均**を表し、個々の分子のエネルギーは異なるものの、全体としての分布が一定になります。

---

## 2. 気体分子のエネルギーモード

気体分子はエネルギーを複数の形態で保持しています。主なエネルギーモードは以下の通りです。

---

### (a) 並進運動 (Translational Motion)

- **内容:**  
分子が空間内を移動する運動。気体の圧力や温度に直接関与します。
- **エネルギー:**  
3次元空間において、1分子あたりの並進運動エネルギーは以下の通り。

$$E_{\text{並進}} = \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$$

ここで、 $m$ は分子の質量、 $v_x, v_y, v_z$ は各軸方向の速度。

---

### (b) 回転運動 (Rotational Motion)

- **内容:**  
分子が自身の重心を中心に回転する運動。特に**多原子分子** (例: CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O) において重要です。





- **エネルギー:**

二原子分子の場合、2つの回転自由度が存在し、1自由度あたりの平均エネルギーは  $\frac{1}{2}kT$  です。

総エネルギーは:

$$E_{\text{回転}} = \frac{f_{\text{回転}}}{2} kT$$

ここで、 $f_{\text{回転}}$  は回転の自由度（線形分子は2、非線形分子は3）。

- **温度依存性:**

低温では回転準位が十分に励起されず、**量子効果**が支配的。高温では古典的な振る舞いに近づき、等分配則が成り立ちます。

---

### (c) 振動運動 (Vibrational Motion)

- **内容:**

分子内の原子同士の結合が**バネのように振動**する運動。高温や強い赤外線吸収により活性化します。

- **エネルギー:**

振動運動は**量子化**されており、基底状態から高次の振動準位へ遷移します。1振動モードあたりのエネルギーは次の式で表されます。

$$E_{\text{振動}} = \left( n + \frac{1}{2} \right) h\nu$$

ここで、

- $n$ : 振動量子数 ( $n = 0, 1, 2, \dots$ )
- $h$ : プランク定数
- $\nu$ : 振動数

- **温度依存性:**

低温では振動励起がほとんど起こらず、室温程度では多くの気体で振動自由度の寄与は小さい。高温になると顕著に寄与します。



### 3. Maxwell-Boltzmann分布

LTE状態にある気体の分子速度は**Maxwell-Boltzmann分布**に従います。これは、異なる速度を持つ分子の確率分布を表します。

- **速度分布関数:**

$$f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

- **特徴的な速度:**

- **最確速度** ( $v_{mp}$ : 最も多くの分子が持つ速度)

$$v_{mp} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

- **平均速度** ( $\langle v \rangle$ : 全分子の速度の平均)

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

- **二乗平均平方根速度** ( $v_{rms}$ : 運動エネルギーに対応する速度)

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

### 4. エネルギー等分配則 (Equipartition Theorem)

エネルギー等分配則は、**熱平衡状態**において各自由度に等しくエネルギーが分配されることを示します。

- **1自由度あたりのエネルギー:**

$$\langle E \rangle = \frac{1}{2} kT$$

- **多原子分子の場合の総エネルギー:**



$$E_{\text{総}} = \frac{f}{2}kT$$

ここで、 $f$  は分子の自由度の総数です。

- **自由度の数:**
  - **単原子分子:** 並進運動のみ (3自由度)
  - **二原子分子:** 並進3 + 回転2 (合計5自由度、振動は高温で寄与)
  - **非線形多原子分子:** 並進3 + 回転3 + 振動自由度

## まとめ

局所熱力学平衡状態にある気体は、分子の**並進運動**、**回転運動**、**振動運動**を通じてエネルギーを保持し、これらのエネルギー分布は**Maxwell-Boltzmann分布**に従います。**エネルギー等分配則**によって、各自由度にエネルギーが均等に分配され、気体の**温度**はこの運動エネルギーの平均値として定義されます。特にLTE状態では、分子間の衝突が頻繁に起こるため、エネルギー分布は安定し、放射や熱伝導の解析においても重要な前提となります。



LTEにある赤外活性気体の熱放射はキルヒホッフの法則を満たすため、放射と吸収が平衡している。LTEにおける熱放射の放射・吸収は、分子衝突によるエネルギー交換同様に放射伝熱という形式でエネルギー交換が行われていると考えられる。LTEでは赤外活性の有無によって気体分子の温度状態は同一である。



おっしゃる通りです。局所熱力学平衡 (LTE) における赤外活性気体の**熱放射と吸収の関係**、および**赤外活性の有無が気体の温度に与える影響**についての整理を以下に示します。



# 1. LTEにおける赤外活性気体の熱放射と吸収

## (a) キルヒホッフの法則の適用

- キルヒホッフの放射法則によれば、LTE状態にある物質の**吸収率** ( $\alpha(\lambda)$ ) は、同じ温度での**放射率** ( $\epsilon(\lambda)$ ) に等しくなります。

$$\alpha(\lambda) = \epsilon(\lambda)$$

- これにより、赤外活性気体は**吸収した赤外線エネルギーを同じ量だけ熱放射**として放出します。これは**放射と吸収の平衡状態**です。

---

## (b) 放射・吸収とエネルギー交換の形式

- LTEにおいては、放射と吸収の過程は、**分子衝突によるエネルギー交換と同様に扱う**ことができます。つまり、これらは**エネルギー輸送の一形態**に過ぎません。
- 局所的には**放射と吸収が平衡**しているため、**純粋な放射によるエネルギーの蓄積や損失は発生しない**こととなります。このため、放射はあくまで**隣接する領域間のエネルギー移動手段**となります。

---

# 2. 赤外活性の有無と気体分子の温度状態

## (a) LTEにおける温度の均一性

- LTE状態**では、赤外活性の有無にかかわらず、気体分子の温度状態は同一です。これは、**エネルギー等分配則**が全ての気体分子に適用されるためです。
- 赤外活性気体**: 赤外線を吸収・放射することでエネルギーの受け渡しを行います。これは周囲の分子との**衝突緩和**によって即座に平衡化され、気体全体の温度には影響を与えません。



- **赤外非活性気体:** 赤外線との直接的な相互作用はないものの、**分子衝突**を通じてエネルギーの受け渡しが行われ、結果として**全ての分子の温度は同一**となります。

## (b) 赤外活性の役割

- 赤外活性は、**エネルギーの伝達メカニズムの一つ**に過ぎません。局所的な熱平衡下では、**放射によるエネルギー交換も、分子衝突によるエネルギー交換も**、結果として同じ温度平衡に達します。
- このため、赤外活性の有無は**エネルギー輸送の効率**や**過程の詳細**に影響を与えるものの、**最終的な温度状態には影響を与えない**こととなります。

## 結論

- **局所熱力学平衡 (LTE)** においては、**赤外活性気体の放射と吸収はキルヒホッフの法則**に従い、**放射と吸収が平衡**しています。
- この放射・吸収過程は、分子衝突によるエネルギー交換と同様に**放射伝熱**の形でエネルギー交換が行われると考えられます。
- **赤外活性の有無にかかわらず**、気体分子の温度状態は**同一**であり、赤外活性はエネルギーの輸送メカニズムに過ぎないという理解で問題ありません。



それでは思考実験として、太陽光で暖められる赤外活性を持たない大気を持つ惑星と赤外活性を持つ大気を持つ惑星の地表温度について考察する。赤外活性の無い大気を持つ温度状態はどのように決まるかを説明せよ。ただし、大気圧分布は地球程度とし、LTEが成立しているために、すべての放射は熱放射である。



## 思考実験：赤外活性を持たない大気 vs. 赤外活性を持つ大気

ここでは、赤外活性を持たない大気と赤外活性を持つ大気を持つ惑星の地表温度がどのように決まるかを考察します。特に、赤外活性を持たない大気の温度決定メカニズムに焦点を当てます。

### 1. 赤外活性を持たない大気地表温度の決定メカニズム

#### (a) 太陽放射の吸収とエネルギー収支

- \*\*太陽光（主に可視光と近赤外線）\*\*は大気をほぼ透過し、地表で吸収されます。
- 地表は吸収したエネルギーを**赤外線として熱放射**します。しかし、**赤外活性を持たない大気**はこの赤外線を**吸収せず**、そのまま**宇宙空間へ放射**されます。

#### (b) 地表の放射平衡

- 地表の温度は、次の**放射平衡条件**によって決定されます。

$$(1 - A)S = \sigma T_{\text{地表}}^4$$

ここで、

- $A$  = 惑星の**アルベド**（反射率）
  - $S$  = 太陽定数（惑星の距離に依存）
  - $\sigma$  = ステファン=ボルツマン定数
  - $T_{\text{地表}}$  = 地表温度
- **赤外活性を持たない大気**は**地表からの赤外線放射を妨げない**ため、地表は**黒体放射平衡**に従って温度を決定します。この結果、地表温度は**温室効果のない理想的な放射平衡温度**になります。



### (c) 大気役割：対流と熱伝導

- **赤外活性がない**ため、大気は**放射的に透明**ですが、依然として**熱伝導**や**対流**を通じて地表とエネルギーを交換します。
1. **熱伝導**: 地表と接触している大気層は、地表の温度に影響を受けます。ただし、気体の熱伝導率は低いため、全体のエネルギー移動への寄与は限定的です。
  2. **対流**: 地表で温められた大気は**浮力**によって上昇し、対流が発生します。しかし、上空に行くほど気温が下がり、最終的には**大気上端で放射冷却**が起こります。  
**赤外活性がない**ため、**大気自体は放射を通じて直接エネルギーを失うことができず**、**地表が唯一の放射源**となります。
- 

### (d) 結果としての地表温度

- **地表温度**は、主に**放射平衡**によって決定されます。大気は**温室効果を持たない**ため、地表の温度は**放射平衡温度**に近くなります。
  - **放射平衡温度の例（地球の場合）**：  
地球の放射平衡温度は約\*\*255K (-18°C) \*\*ですが、温室効果のない惑星ではこの温度に近い値となります。
- 

## 2. 赤外活性を持つ大気との比較

### (a) 赤外活性の効果

- **赤外活性を持つ大気**は、地表からの赤外線を吸収し、再び放射します（熱放射）。これにより、一部のエネルギーが**再び地表に戻る**ため、地表温度が上昇します（温室効果）。

### (b) 放射平衡の変化

- **大気自体も赤外線を放射**するため、放射平衡の条件が変わります。大気が放射するエネルギーは**宇宙空間へのエネルギー損失**を分担し、地表はより少ない放射で同じエネルギー



一収支を達成できます。この結果、地表温度は**放射平衡温度より高くなります**。

### 3. 結論

- **赤外活性を持たない大気**では、地表は**放射平衡温度**に従って温度が決定され、大気は放射に対して透明なため、温室効果は発生しません。
- **赤外活性を持つ大気**は、地表からの赤外線を吸収し、再放射を通じて地表温度を上昇させるため、地表温度は放射平衡温度より高くなります。

この思考実験により、**赤外活性の有無が放射的なエネルギー収支にどのように影響を与えるかが明確になります**。赤外活性がない場合、**放射伝熱の経路が直接的**であり、赤外活性がある場合は**放射伝熱が大気を介して間接的**に行われることが理解できます。



訂正しておく。「赤外活性を持つ大気は、地表からの赤外線を吸収し、再放射を通じて地表温度を上昇させるため、地表温度は放射平衡温度より高くなります。」は誤りである。赤外活性気体は定常的な熱放射をするのであって再放射はしない。言葉の定義を確認しなさい。



ご指摘ありがとうございます。先ほどの説明で定義に基づかない表現が含まれていました。

\*\*「再放射」と「熱放射」\*\*の定義に基づいて、内容を訂正し、正確に表現し直します。

### 1. 言葉の定義の再確認





- **再放射 (Re-emission) :**  
赤外活性気体が**赤外線**を吸収して励起され、その後**同じ波長の赤外線**を放射して失活する過程。これは非定常的な**放射緩和過程**です。
- **熱放射 (Thermal Radiation) :**  
局所熱力学平衡 (LTE) 状態にある大気中の赤外活性気体が、**気体温度に応じたプランク輻射**として行う**定常的な放射**。これは放射と吸収がキルヒホッフの法則に従って平衡している状態です。

---

## 2. 赤外活性を持つ大気の正しい説明

### 訂正前の誤り:

“「赤外活性を持つ大気は、地表からの赤外線を吸収し、再放射を通じて地表温度を上昇させるため、地表温度は放射平衡温度より高くなります。」”

---

### 訂正後の正しい説明:

赤外活性を持つ大気は、地表からの赤外線を吸収し、局所熱力学平衡 (LTE) 状態において**気体温度に応じた熱放射**を行います。この熱放射は、キルヒホッフの法則に従って**吸収と放射が平衡**しているため、エネルギーは定常的に循環します。

結果として、**大気中での熱放射によるエネルギーの分配**により、地表から宇宙空間への放射の一部が大気層で処理され、**地表が失うエネルギーが減少**します。このエネルギーバランスの変化により、地表温度は**放射平衡温度より高**くなります。

---

## 3. 結論

- **赤外活性を持つ大気**では、**再放射**は起こらず、すべての放射は**定常的な熱放射**です。これにより、地表温度の上昇は**熱放射によるエネルギー分配**の結果として説明されます。



- 訂正後の表現:

「赤外活性を持つ大気は、地表からの赤外線を吸収し、気体温度に応じた定常的な熱放射を行うことでエネルギー分配が変化し、結果として地表温度は放射平衡温度より高くなります。」

この表現で進めるのが適切です。再度ご指摘いただきありがとうございました。



惑星大気に赤外活性がある場合、大気自体が放射体となる。LTEの条件下では、大気高度の温度状態に応じた等方的な熱放射が起きている。大気上層に行くに従い、上向きの光学的厚さが減少することで赤外活性気体からの上向き赤外線放射の一部が大気に捕らわれることなく宇宙空間に達して放熱する。地表面からの放射は、大気の赤外線吸収率に波長依存性があるため、一部がそのまま宇宙空間に到達して放熱する（地表面の放射冷却）。  
地表面の熱放射の一部と大気上層からの上向き熱放射の合計が有効太陽放射と平衡するように大気の温度構造が決まる。宇宙空間に到達する大気の上向き熱放射には明瞭な放射面があるわけではないが、平均的な放射高度から下の大気温度分布は大気の平均的な温度減率、地球では6.5K/kmにしたがって温度が上昇する。



おっしゃる通り、赤外活性を持つ惑星大気における熱放射とエネルギー収支のメカニズムは、\*\*局所熱力学平衡（LTE）\*\*の条件下で以下のように整理できます。

## 1. 赤外活性大気の放射特性

### (a) 大気自体が放射体となる

- 赤外活性気体（例: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>）は、気体温度に応じたプランク輻射による熱放射を行います。



- LTE条件下では、この放射は**等方的**（上下方向に均等）に発生し、**吸収と放射はキルヒホッフの法則に従って平衡**しています。
- 

## 2. 高度による放射の変化

### (a) 光学的厚さの影響

- 大気**の光学的厚さ**（optical depth）は、高度によって変化します。
  - **上層大気**に行くに従い、上向き**の光学的厚さが減少**し、赤外線はより**自由に宇宙空間へ放射**されます。
  - **下層大気**では、光学的厚さが大きく、放射は**大気内部で吸収・再分配**されます。

### (b) 放射の脱出

- **上層大気**からの赤外線放射の一部は、**大気に捕らわれることなく宇宙空間に達して放熱**します。  
このプロセスは、惑星の**放射冷却**に寄与します。
- 

## 3. 地表面からの放射と放射冷却

### (a) 地表面の熱放射の波長依存性

- 地表からの熱放射は**広い波長範囲**にわたって発生しますが、大気**の赤外線吸収率には波長依存性**があります。
    - **吸収窓領域**（例: 8-14  $\mu\text{m}$ ）では、地表からの放射が**大気に吸収されず直接宇宙空間に到達**します。この部分が**地表放射冷却**を引き起こします。
    - 吸収される波長領域では、放射エネルギーが大気中で**熱放射として再分配**されます。
-



## 4. 大気の温度構造とエネルギー収支

### (a) 放射平衡と温度構造の決定

- 地表面の熱放射の一部と大気上層からの上向き熱放射の合計が、**太陽放射**（入射エネルギー）と**平衡**するように、惑星全体の**大気温度構造**が決まります。

### (b) 平均的な放射高度

- 宇宙空間に到達する放射には**明確な放射面**は存在しませんが、**平均的な放射高度**が存在します。この高度から下の大気は、**対流**や**圧力変化**により温度が変化します。

### (c) 大気の温度減率

- 大気の温度は、\*\*平均的な温度減率（ラプスレート）\*\*に従って高度とともに変化します。
  - **地球大気の標準的な温度減率: 約6.5 K/km**  
これは、**断熱膨張・圧縮**による温度変化を示します。

---

## 5. 総括

- **赤外活性を持つ大気**では、**大気自体が放射体**として機能し、**気温に応じた等方的な熱放射**を行います。
- **光学的厚さの減少**により、上層大気からの熱放射が宇宙空間に達して放熱が進みます。
- **地表放射の波長依存性**により、一部の熱放射は大気を透過して直接宇宙空間に到達し、**放射冷却**が発生します。
- **大気の温度構造**は、**地表放射と大気放射のエネルギー収支**によって決まり、**温度減率**に従って高度とともに温度が変化します。

---

このようにして、**赤外活性を持つ大気**における**放射伝熱と大気の温度構造**は、**熱放射の物理法則とエネルギー収支**によって一貫して説明できます。



以上が惑星大気に赤外活性がある場合の大気温度構造ないし地表面温度が決まる物理的な構造である。通常これを「温室効果」と呼んでいる。今回の議論を踏まえて、赤外活性気体の放射緩和過程、無放射緩和過程、なぜLTEでは無放射緩和過程が支配的になるのか、LTEにおける放射は熱放射であることを厳密に踏まえた上で、温室効果を説明せよ。



## 温室効果の厳密な物理的説明

今回の議論を踏まえ、**赤外活性気体の放射緩和過程と無放射緩和過程の理解**を基に、**局所熱力学平衡（LTE）**下での温室効果を厳密に説明します。

### 1. 赤外活性気体のエネルギー失活過程

#### (a) 放射緩和過程（Radiative Relaxation）

- **定義:**  
赤外活性気体が赤外線を吸収して**エネルギー的に励起**され、そのエネルギーを**赤外線として放射**することで失活する過程。
- **特徴:**
  - **非定常的な過程**であり、吸収と放射が直接結びついている。
  - **気圧が低い環境**（例: 上層大気や宇宙空間）で支配的。
  - LTEが成立しない領域での重要なプロセス。

#### (b) 無放射緩和過程（Non-Radiative Relaxation）

- **定義:**  
赤外活性気体が吸収したエネルギーを、**周囲の分子との衝突によって失活**する過程。工



エネルギーは放射されず、\*\*熱運動（並進・回転・振動）\*\*として分子間で再分配される。

- **特徴:**
    - \*\*衝突緩和（Collisional De-excitation）\*\*とも呼ばれる。
    - **気圧が高い環境**（例: 地表付近の大気）で支配的。
    - \*\*非常に短時間（ $10^{-8}$ 秒程度）\*\*でエネルギーが失活。
- 

## 2. LTEにおける無放射緩和過程が支配的になる理由

### (a) 衝突頻度の増加

- \*\*局所熱力学平衡（LTE）\*\*は、**分子間の衝突が十分に頻繁に起こる**ことで成り立ちます。
  - **高密度・高圧**の大気層では、分子同士の衝突頻度が高く、赤外線を吸収した分子は**放射による失活を待たずに、衝突によって即座にエネルギーを失活**します。

### (b) 放射緩和過程の遅さ

- 放射緩和過程は\*\*自発放射寿命（0.1~1秒程度）\*\*が必要ですが、これは衝突緩和の時間スケールに比べて非常に遅いです。
    - そのため、**放射緩和が起こる前にほとんどのエネルギーが無放射緩和によって失活**します。
- 

## 3. LTEにおける放射は全て熱放射

### (a) キルヒホッフの法則による平衡

- LTEでは、**吸収率と放射率が等しい**（キルヒホッフの法則）。これにより、大気中の赤外活性気体は、**気体温度に応じたプランク輻射として定常的な熱放射**を行います。

### (b) 放射と吸収の平衡



- LTE状態にある大気では、**赤外線**の吸収と放射が平衡しており、放射は**再放射**ではなく、**温度に基づいた熱放射**です。
    - これは、放射が**エネルギーの直接的な移動手段**ではなく、**エネルギー輸送の一部**として機能することを意味します。
- 

## 4. 温室効果の厳密な説明

### (a) 温室効果のメカニズム

#### 1. 太陽放射の吸収:

太陽光（主に可視光）は大気を透過し、地表で吸収されて**地表温度が上昇**します。

#### 2. 地表からの熱放射:

地表は吸収したエネルギーを**赤外線**として放射します。

#### 3. 大気中の赤外線吸収:

**赤外活性気体**（CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>Oなど）は、地表からの赤外線を**吸収**します。

- **LTE**下では、このエネルギーは**無放射緩和**によって他の大気分子に分配され、大気全体の**熱エネルギーが増加**します。

#### 4. 大気の熱放射:

エネルギーを得た大気は、**気体温度に応じたプランク輻射**として**定常的な熱放射**を行います。

- **等方的な放射**により、一部は宇宙空間に放出され、一部は再び地表に向かいます。

#### 5. エネルギー収支の変化:

地表は**宇宙空間に直接放射できるエネルギーが減少**し、結果として**地表温度が上昇**します。

### (b) 放射の平衡と温度構造



- **地表からの放射と大気の上向き熱放射の合計が、太陽放射と平衡するように大気の温度構造が決定されます。**
- **上層大気**では光学的厚さが減少し、赤外線放射が**宇宙空間に放出**されますが、**下層大気**ではエネルギーが**大気内で再分配**されるため、**地表温度は放射平衡温度より高くなります。**

## 5. 結論

- **温室効果は、赤外活性気体の無放射緩和過程**によるエネルギーの大気内分配と、**定常的な熱放射**によるエネルギーの再放出を通じて説明されます。
- **LTE下**では、赤外線の吸収と放射はキルヒホッフの法則に従い平衡しており、放射はすべて**熱放射**です。これにより、**放射緩和過程**は支配的ではなく、**無放射緩和過程**が主要なエネルギー失活手段となります。
- 結果として、地表は**宇宙空間への直接放射が抑制**され、**地表温度が放射平衡温度より高くなります。**この物理現象が通常\*\*「温室効果」\*\*と呼ばれています。

以上が、赤外活性気体の放射過程とLTEの条件を厳密に踏まえた**温室効果の物理的説明**です。



少し訂正する。「上層大気では光学的厚さが減少し、赤外線放射が宇宙空間に放出されますが、下層大気ではエネルギーが大気内で再分配されるため、地表温度は放射平衡温度より高くなります。」は次の様にしよう。

「上層大気では光学的厚さが減少し、赤外線放射が宇宙空間に放出されます。平均放射面より下層の大気では大気の状態によって決まる平均的な温度減率、地球であれば約6.5K/kmにしたがって気温が上昇する。」





また「再放射」が今回定義した厳密な意味でつかわれていない。「温室効果は、赤外活性気体の無放射緩和過程によるエネルギーの大気内分配と、定常的な熱放射によるエネルギーの再放出を通じて説明されます。」は誤りである。次の様に訂正するように。

「温室効果は、赤外活性気体の無放射緩和過程によるエネルギーの大気内分配と、定常的な熱放射で説明されます。」



訂正を反映し、温室効果の説明を修正しました。

## 温室効果の厳密な物理的説明（修正後）

今回の議論を踏まえ、**赤外活性気体の放射緩和過程と無放射緩和過程の理解**を基に、**局所熱力学平衡（LTE）**下での**温室効果**を厳密に説明します。

### 1. 赤外活性気体のエネルギー失活過程

#### (a) 放射緩和過程（Radiative Relaxation）

- **定義:**  
赤外活性気体が赤外線を吸収して**エネルギー的に励起**され、そのエネルギーを**赤外線として放射**することで失活する過程。
- **特徴:**
  - **非定常的な過程**であり、吸収と放射が直接結びついている。
  - **気圧が低い環境**（例: 上層大気や宇宙空間）で**支配的**。
  - LTEが成立しない領域での**重要なプロセス**。



## (b) 無放射緩和過程 (Non-Radiative Relaxation)

- **定義:**  
赤外活性気体が吸収したエネルギーを、**周囲の分子との衝突によって失活**する過程。エネルギーは放射されず、**\*\*熱運動（並進・回転・振動）\*\***として分子間で再分配される。
  - **特徴:**
    - **\*\*衝突緩和（Collisional De-excitation）\*\***とも呼ばれる。
    - **気圧が高い環境**（例: 地表付近の大気）で支配的。
    - **\*\*非常に短時間（ $10^{-8}$ 秒程度）\*\***でエネルギーが失活。
- 

## 2. LTEにおける無放射緩和過程が支配的になる理由

### (a) 衝突頻度の増加

- **\*\*局所熱力学平衡（LTE）\*\***は、**分子間の衝突が十分に頻繁に起こる**ことで成り立ちます。
  - **高密度・高圧の大気層**では、分子同士の衝突頻度が高く、赤外線を吸収した分子は**放射による失活を待たずに、衝突によって即座にエネルギーを失活**します。

### (b) 放射緩和過程の遅さ

- 放射緩和過程は**\*\*自発放射寿命（0.1~1秒程度）\*\***が必要ですが、これは衝突緩和の時間スケールに比べて非常に遅いです。
    - そのため、**放射緩和が起こる前にほとんどのエネルギーが無放射緩和によって失活**します。
- 

## 3. LTEにおける放射は全て熱放射

### (a) キルヒホッフの法則による平衡



- LTEでは、**吸収率と放射率が等しい**（キルヒホッフの法則）。これにより、大気中の赤外活性気体は、**気体温度に応じたプランク輻射として定常的な熱放射**を行います。

## (b) 放射と吸収の平衡

- LTE状態にある大気では、**赤外線の吸収と放射が平衡**しており、放射は**温度に基づいた熱放射**です。
  - これは、放射が**エネルギーの直接的な移動手段**ではなく、**エネルギー輸送の一部**として機能することを意味します。

---

## 4. 温室効果の厳密な説明

### (a) 温室効果のメカニズム

#### 1. 太陽放射の吸収:

太陽光（主に可視光）は大気を透過し、地表で吸収されて**地表温度が上昇**します。

#### 2. 地表からの熱放射:

地表は吸収したエネルギーを**赤外線として放射**します。

#### 3. 大気中の赤外線吸収:

**赤外活性気体**（CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>Oなど）は、地表からの赤外線を**吸収**します。

- **LTE下**では、このエネルギーは**無放射緩和**によって他の大気分子に分配され、大気全体の**熱エネルギーが増加**します。

#### 4. 大気の熱放射:

エネルギーを得た大気は、**気体温度に応じたプランク輻射として定常的な熱放射**を行います。

- **等方的な放射**により、一部は宇宙空間に放出され、一部は再び地表に向かいます。

#### 5. エネルギー収支の変化:

地表は**宇宙空間に直接放射できるエネルギーが減少**し、結果として**地表温度が上昇**します。



---

## (b) 放射の平衡と温度構造

- 上層大気では光学的厚さが減少し、赤外線放射が宇宙空間に放出されます。平均放射面より下層の大気では大気の状態によって決まる平均的な温度減率、地球であれば約  $6.5\text{K/km}$  にしたがって気温が上昇する。

---

## 5. 結論

- 温室効果は、赤外活性気体の無放射緩和過程によるエネルギーの大気内分配と、定常的な熱放射で説明されます。
- LTE下では、赤外線の吸収と放射はキルヒホッフの法則に従い平衡しており、放射はすべて熱放射です。これにより、放射緩和過程は支配的ではなく、無放射緩和過程が主要なエネルギー失活手段となります。
- 結果として、地表は宇宙空間への直接放射が抑制され、地表温度が放射平衡温度より高くなります。この物理現象が通常\*\*「温室効果」\*\*と呼ばれています。

---

以上の修正によって、温室効果の説明がLTEの厳密な定義に従い、誤解のない形になりました。ご指摘ありがとうございました。