

温室効果気体はどのようにして大気を暖めているのか

— 「高速道路と温室効果」を読んで—

山本 哲*

1. はじめに

59巻10号掲載の「気象のABC」No.18「高速道路と温室効果」(木村 2012)をたいへん興味深く読んだ。灰色大気モデルによる大気の放射平衡を、数式の使用を最小限にして説明し、温室効果への理解を助けるものである。

そこでさらに理解を深めるため、ここで提案された「高速道路モデル」を出発点に、木村(2012)では直接述べられていない「温室効果気体はどのようにして大気を暖めているのか」について検討してみた。具体的には、気温の鉛直分布、大部分は温室効果を持たない大気全体の温度、温室効果気体増加による気温変化といった事項である。

内容は古典的なもので新規性はないが、筆者と同様、温室効果への理解を進めたいという方々、気象学をこれから勉強しようとする方々のお役に立てば幸いである。参考文献は初学者向けに日本語で書かれたものを選んだ。

2. 高速道路モデルの設定概要

はじめに、木村(2012)における高速道路モデルの設定について簡単におさらいしておく。

- 大気を単純化した東名高速道路になぞらえる(東京インターチェンジ(以下「IC」という)：大気上端～名古屋IC：地表面)。
- 自動車を赤外線の光量子に対応させる。
- パーキング・エリア(以下「PA」という)を温室効果気体に対応させる。
- 高速道路を走行するのはすべて同じ車種の車(温室

効果気体の赤外線吸収率の振動数依存性を考慮しない)とする。

- 自動車は名古屋ICのみから入り、東京ICからのみ出る。すなわち、太陽放射はまったく大気に吸収されずに地表面にのみ Q だけが与えられる(吸収される)。
- 地表面に与えられた熱エネルギーは赤外線に変換され、フラックス Q の自動車が名古屋ICから上り車線に入る。
- これに加え、下り車線で名古屋ICに到達した車と同じ台数の車が上り車線に入る。
- 各PAでは入った車と同数の車がPAから出る。このとき半数が上り車線に、半数が下り車線に入る。

なお、木村(2012)では明確には述べられていないが、地表面に達した(名古屋IC料金所を通過した)太陽放射は地表面での下向きフラックスとして考える(第1図)。地表面で上向きと下向きの放射フラックスが平衡していることが明瞭になる。

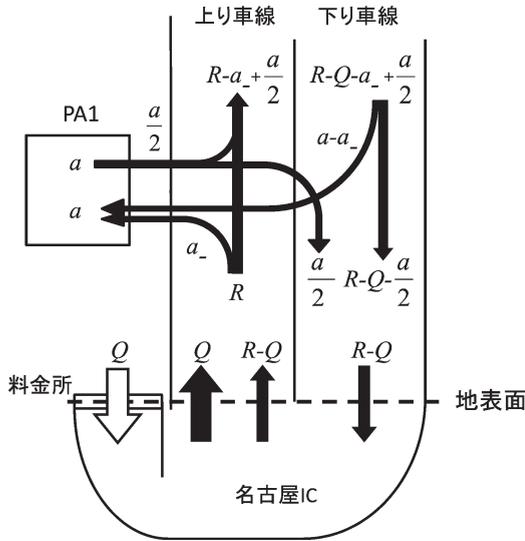
第1図には、木村(2012)が名古屋・東京間で、PAが1か所のみとした場合の車の流れを示したのにならない、PAが無限に密に存在する場合の、名古屋ICの次のPAでの車の流れをあわせて示した。1か所のみとした場合と異なり、PAには下り車線からも車が入る。PAを通過することで上り車線、下り車線とも交通量は変わりうるが、両者の差は変わらない。

3. 検討

(1) 放射平衡で説明される大気と地表面の温度

木村(2012)では、大気中の温室効果気体から下向きに放出された赤外線が地表面を加熱して地表面温度が放射平衡温度である255 Kより高くなり、地表面から上向きに放出される赤外線の強さが増すことを温室効果と説明している。このとき、気温がどうなるか興

* Akira YAMAMOTO, 気象研究所,
〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1,
© 2013 日本気象学会



第1図 地表面(名古屋IC)と名古屋ICの次のPA(以下「PA1」という)での放射フラックス(車の流れ)。白抜き矢印は太陽放射, 黒矢印は赤外線に対応する。Rは名古屋ICから上り車線に入る車のフラックス, aは上り車線および下り車線からPA1に入る(吸収される)車のフラックスの合計であり, 入ったのと同数aの車がPA1を出て, その半分(a/2)が上り車線に, 残り半分が下り車線に入る。名古屋・東京間で, PAが1か所しかない(下り車線でPAに到達する車はない)とした木村(2012)の第2図と異なり, PAが無限に密にある状態を表現しており, 上り車線からは a_+ , 下り車線からは $a-a_+$ の車がPA1に入る。aおよび a_+ はPAの位置 $\tau(=\tau_0'-\tau')$ の関数であり, PA1の位置を τ_1 として, $a(\tau_1)$ などと表記するべきであるが, 簡単のためここでは単にaなどと表記した。

味あるところである。もちろん木村(2012)で述べられているとおり, 地表面温度が上昇すれば, 地表面付近で大きな温度勾配になり, 大気が静力学的に不安定になって対流が生じ, 気温は上昇すると考えられるが, 放射平衡だけを考えた状態ではどうなるだろうか。以下, ホートン(1981), 松野・島崎(1981), 会田(1982), 田中(2004), 松田・高木(2008)を参考にして述べる。

木村(2012)の(6)式, (9)式, (10)式から

$$F_d + F_u = 2\sigma T(\tau')^4 \tag{1}$$

ここで F_d と F_u はそれぞれ下り, 上り車線の車のフラッ

クス, σ はシュテファン・ボルツマン定数, T は気温, τ' は大気上端からの光学的厚さ(東京ICからの無次元走行距離)である。

これに(11)式と(12)式を適用すれば

$$T(\tau')^4 = \frac{Q}{2\sigma}(1 + \tau') \tag{2}$$

大気中の温室効果気体が無限少の場合(温室効果気体が全く無いと放射平衡で気温が決まらない)の気温 T_* は, $\tau' \rightarrow 0$ とした極限に一致し(高度に依らない),

$$T_*^4 = \frac{Q}{2\sigma} \tag{3}$$

したがって, 大気上端($\tau' = 0$)を除き, 大気に温室効果気体がある場合は, 放射平衡が示す気温は温室効果気体がない(無限少)場合に比べて, 大気全層で, より高い値を示す。

大気下端(地表面直上)の気温は

$$T(\tau_0')^4 = \frac{Q}{2\sigma}(1 + \tau_0') \tag{4}$$

ここで τ_0' は大気全体の光学的厚さ(名古屋・東京間の無次元距離)である。

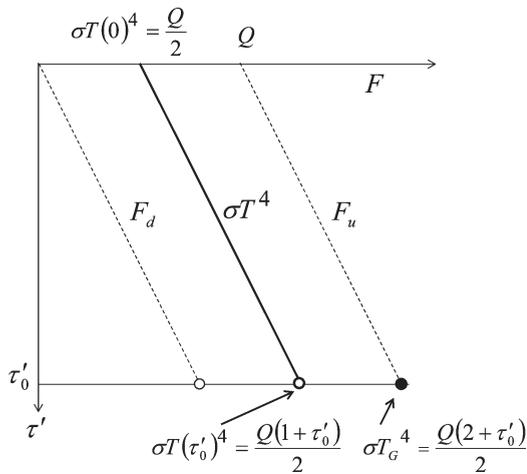
他方, 地表面温度 T_G は, 木村(2012)の(11)式から

$$T_G(\tau_0')^4 = \frac{Q}{2\sigma}(2 + \tau_0') \tag{5}$$

となり, 大気下端(地表面直上)気温より地表面温度が高く, さらに $((Q(2 + \tau_0')/2\sigma)^{1/4} - (Q(1 + \tau_0')/2\sigma)^{1/4})$ の温度不連続が存在する。これらをまとめて第2図に示した。気温は上下車線の交通量の平均の4乗根に比例することになる。

以上の説明は多くの教科書に記述されているが, 地表面での温度不連続の解釈を示したものは少ない。近藤(1982)は, 地中側を無限厚さの等温黒体と考えて放射の作用で説明している。第2節で述べたとおり高速道路モデルでは, 地表面のみに下向きフラックス Q が与えられることで, 大気下端と地表面の間で下向きフラックスの不連続が生じ温度不連続が生じる, と考えればよい。

現実には対流や熱伝導, 乱流輸送が起きるので, 実際の気体でこのような不連続が観測されるわけではない。近藤(2001)は裸地面上でしばしば観測される「極小低温層」(晴天夜間に地表面から10 cm程度の高度に出現する地表面より数度低温の層)の成因について, 放射で説明できるのはごく一部であり, 基本的には冷気の移流によるものとしている。



第2図 放射平衡で得られる気温 T と上向き長波放射 F_u 、下向き長波放射 F_d との関係。気温と下向きフラックスの地表面の白抜き丸は大気下端（地表面直上）値を、黒丸は地表面の値を示す。 σT^4 のグラフは F_u と F_d のグラフの中央に両者に平行に位置する。

(2) 放射平衡温度の実現

大気中の温室効果気体の占める割合（分子数比）は水蒸気で高々数％，二酸化炭素では0.04％にすぎない。大気の大部分を占める，赤外線をほとんど吸収・射出しない窒素や酸素などの温度を放射平衡で説明できるのか疑問がわく。

実際には，大気では分子同士の衝突が頻繁に起こっており（たとえば地上付近では1秒間あたり 10^{10} 回などというオーダーである），赤外線を吸収して励起した温室効果気体分子のほとんどは，射出により基底状態に戻るより前に，他の分子と衝突して内部エネルギーを分子の並進エネルギーに変えることで基底状態に戻る（やはり地上付近で，前者はおおよそ $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 秒，後者は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 秒といった時間スケールで起こる）。この過程は大気温度を上昇させる。また，頻繁な衝突の間に，温室効果気体分子のうちあるものは衝突により励起して，赤外線を射出する。この過程では分子の並進エネルギーが失われて温度は下降する。このようにして放射場と大気物質のエネルギー交換が行われ，その場の大気物質全体の温度は放射場と平衡した状態になる。これは局所熱力学的平衡（LTE: Local Thermodynamic Equilibrium）と呼ばれる。対流圏や下部成層圏ではこれが成り立つとされ

ている（山本・田中（1970），浅野（2010）にずっとわかりやすい説明がある）。「局所」というのは，本来熱力学平衡は放射が等方的で温度も一樣な場で起こるべきところ，大気全体を見れば放射は等方的でないし温度一樣でもないが，局所的気層ではこれらの条件が満たされていると考えられる，という意味である。

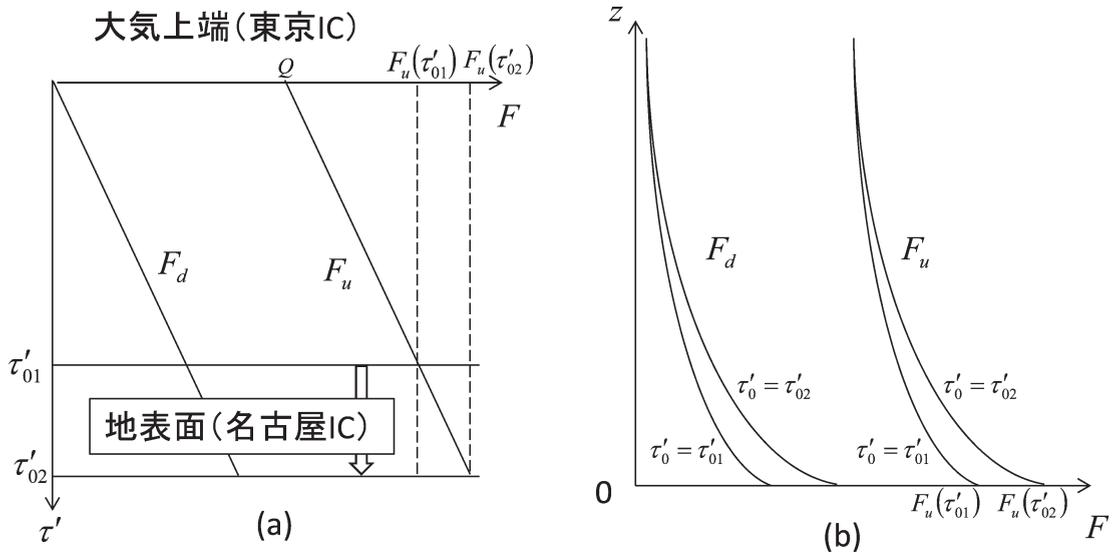
高速道路モデルでは吸収係数が赤外線の振動数に依らない（同じ車種の車しか走っていない）灰色大気の近似を行っている。PAに入る車と出てくる車は別の車なのであるが，外見上は全く見分けがつかない。もし，いろいろな振動数 ν の光量子（いろいろな車種の自動車）を考えようとするとき，光量子のエネルギーは $h\nu$ （ h はプランク定数）であることから，車種毎にエネルギーが異なることになる。この場合もちろん各PAに入る車と出てくる車は台数ではなく，エネルギーが等しくなる。LTEが成立しているのでキルヒホッフの法則が適用でき，射出される赤外線のエネルギースペクトル（PAから出てくる車の車種毎エネルギー）は，その温度でのプランク関数値と，振動数に依存した射出係数（＝吸収係数）に比例する。このスペクトルは，吸収される赤外線のエネルギースペクトル（PAに入る車の車種毎エネルギー）とは一般には一致しない。

(3) 温室効果気体濃度増大による効果

人為的な温室効果気体濃度増大による地球温暖化が懸念されている。高速道路モデルではどう説明されるか興味がある。以下，松野・島崎（1981）を参考に検討する。

濃度が増大すると光学的厚さが増大する。第3図に示すとおり，光学的厚さの増加に比例して，地表面の上向き放射はさらに増大することになり，地表面温度はさらに上昇することを示す。

光学的厚さが増す（PAの数が増える）と，地表面に与えられた日射（単位時間当たりに，名古屋IC料金所から入る自動車の台数） Q より，地表面下向き赤外線放射（下り車線で名古屋ICに到達する自動車の台数，第1図の $R-Q$ ）の方が大きくなる。高速道路への唯一の入口での流入量より，入口の無い下り車線の交通量の方が大きいということはある意味不思議なことにも思われるかもしれない。これはあらかじめ高速道路に車が走っているものと考えればよい。3(1)項で述べたとおり，交通量が増えれば温度も上昇する。地表面（名古屋IC料金所）には単位時間あた



第3図 温室効果気体の光学的厚さが τ'_{01} から τ'_{02} に増加した場合の長波放射フラックス F の変化の概念図。(a)東京ICから名古屋ICまでの光学的厚さの増加に伴い地表面(名古屋IC)はグラフ上で τ'_{01} から τ'_{02} に移動する。光学的厚さの増加に比例して、地表面上向き放射フラックス $F_u(\tau'_0)$ は増大する。(b)高度分布で示したもの。温室効果気体の密度が地表面から高度とともに指数関数的に減少することを考慮している。

り Q が入り、同じ台数が大気上端(東京IC)から出ていく平衡状態にあり、走行している車の台数には増減はない。

温室効果気体が増え続ければ無限に温度が上昇するのだろうか。このモデルでは大気は日射に対しては完全に透明と仮定している。地表面温度が上昇して太陽表面温度に近づけば、地球放射と太陽放射のスペクトルは近づき、この仮定は破綻する。

4. 議論

前項での検討をまとめる意味で、放射平衡で得られた、温室効果気体が存在しない(無限少の)大気と、温室効果気体が存在する気温の高度分布の概念図を第4図に示した(より厳密な図が松野・島崎(1981)や会田(1982)にある)。

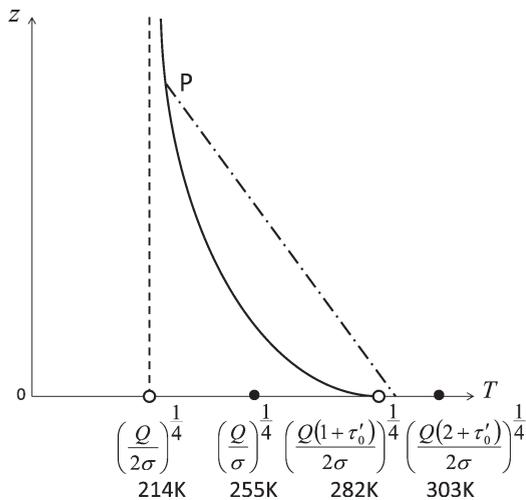
地表面温度は、温室効果気体が存在するときの方が高い。地表面の放射特性には両者で違いはなく、これは大気中の温室効果気体から射出される赤外線の効果といえる。

気温についても全層で温室効果気体が存在するときの方が高い。大気中の温室効果気体は赤外線を吸収して、LTE過程を経て大気物質全体の温度を上げる働きをするとともに、赤外線を射出して温度を下げる働

きもするが、結果的には吸収による温度上昇が勝ることになる。(なお、成層圏の気温については後述する)

放射平衡では、温室効果気体が存在する場合の温度分布は地表面で不連続であることに加え、下層大気が静力学的に不安定であり、実際の温度分布とは大きく異なる。このことにより対流が生じた場合の気温分布を第4図に概念的に示している。大気は深い層にわたり対流により加熱される。気温分布は放射平衡での気温分布と比べ高温側に移動し、赤外放射は大気を冷却する方向に作用していることを示唆する。とはいえ、対流による気温上昇は、もともとは温室効果気体が赤外線を吸収していることによりもたらされており、吸収が重要である、ということには変わりはない。

温室効果のしくみとして「大気中の温室効果気体が赤外線を吸収して温度が上昇する」「地表面で放射された赤外線を温室効果気体が吸収して再放射することで地表面を温める」などとしばしば説明される。これらの表現は実際に起きていることの一面を述べたもので、これらは不可分な現象であり、総合することではじめて温室効果気体の役割全体を説明できる。また、「再放射」という語は、温室効果気体が吸収した地表面からの赤外線をあたかも折り返して射出するような様子を連想させるが、実際には気温に対応した赤外線



第4図 放射平衡で得られる気温 T の高度分布 (概念図)。温室効果気体が存在する大気 (実線) と温室効果気体が存在しない (無限少) 大気 (破線) について示す。あわせて地表面温度を黒丸で示す。第3図bと同様、温室効果気体の密度は地表面から高度ともに指数関数的に減少することを考慮している。横軸下の数値は温室効果気体の光学的厚さ τ'_0 を2とした場合の温度であり、ほぼ現実大気の値を説明する。一点鎖線は対流が生じた場合の気温分布を概念的に示したものである。実線の曲線と斜めの一点鎖線の交点 P より下層が対流圏、上層が成層圏になぞえられる。

を全方向に射出しているのであり、単に「放射」あるいは「射出」がよい。吸収した赤外線と射出する赤外線は別のも (一般に両者はスペクトル型も異なる) であり、そのことが理解されるような説明が望ましい。

温室効果気体が赤外線を射出して冷却する性質を知っておくことは、成層圏での気温構造を理解するのにも役立つ。第4図で成層圏は、対流が及んだ層より上の、ほぼ等温の層に対応する。この層でも温室効果気体があるときの方が無いときより温度は高い。実際の成層圏ではよく知られたとおり高度が高くなるほど気温が高くなる。これはオゾン層を考慮することで説明できる。オゾン層ではオゾンが太陽放射の一部である紫外線を吸収するとともに、温室効果気体が下層大気からの赤外線を吸収して加熱され温度の逆転を形成

するが、これらと温室効果気体の赤外線射出による冷却が平衡している。温室効果気体の濃度が上昇すると、この冷却が強まり、成層圏の気温は低下する。

5. まとめ

「温室効果気体はどのようにして大気を暖めているのか」を、気象学をこれから勉強する方々の参考となるよう、木村 (2012) の提案した高速道路モデルを出発点として整理した。温室効果気体が赤外線を吸収・射出することによる大気の加熱・冷却、放射場と大気物質温度の平衡 (局所熱力学平衡)、温室効果気体からの赤外線による地表面の加熱と主としてそれに起因する対流などの過程が重要である。

これまで環境教育や啓発の場では、温室効果の説明として、二酸化炭素など温室効果気体が赤外線を吸収する性質が強調されてきたように思う。「エネルギーを吸収して温度が上がる」というのは直感的にわかりやすいが、実際の地球上で起こっていることを考えれば、温室効果気体が赤外線を射出する性質についても、あわせて強調できると、より深い理解につながる。このことが、地球温暖化という、とても大きな地球科学課題をただしく科学的に理解することにも結びつくと考えられる。

参考文献

会田 勝, 1982: 大気と放射過程—大気の熱源と放射収支を探る。気象学のプロムナード 8, 東京堂出版, 280pp.
 浅野正二, 2010: 大気放射学の基礎。朝倉書店, 267pp.
 ホートン (Houghton), J.T., 廣田 勇, 会田 勝 訳, 1981: 大気物理学。みすず書房, 224pp.
 木村龍治, 2012: 高速道路と温室効果。天気, 59, 957-961.
 近藤純正, 1982: 大気境界層の科学—大気と地球表面の対話。気象学のプロムナード 4, 東京堂出版, 219pp.
 近藤純正, 2001: 地表面の熱収支の研究, わかるということ—2001年度藤原賞受賞記念講演一。天気, 48, 651-659.
 松田佳久, 高木征弘, 2008: 金星大気の温室効果の特徴—地球の温室効果と比較して。天気, 55, 887-899.
 松野太郎, 島崎達夫, 1981: 成層圏と中間圏の大気。大気科学講座 3, 東京大学出版会, 290pp.
 田中 浩, 2004: 大気科学とその周辺。現代図書, 641pp.
 山本義一, 田中正之, 1970: 高層大気の放射特性。天気, 17, 481-490.