

## 高速道路と温室効果

木村 龍治\*

### 1. はじめに

「細かいことにこだわるのは僕の悪い癖」とは、「相棒」の杉下右京の口癖であるが、私の場合、何でも気象にこじつける悪い癖が生じてしまった。今回は、高速道路上を走行する車と大気放射の類似性について考察する。

温室効果を理解するためには、大気中を飛び交う赤外線の振る舞いを理解する必要がある。大気には温室効果気体 (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>など) が存在し、赤外線を吸収したり、放射したりしている。第1図はそのイメージである。

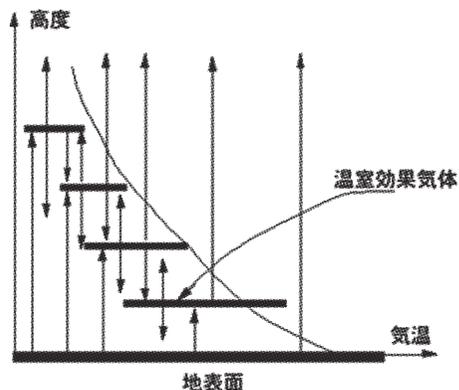
赤外線は、大気中のあらゆる方向に飛び交っているが、気温の鉛直分布を決めるのは、主に、上向き・下向きの赤外線の強度なので、ここでは、2つの向きだけに着目する (大気放射学では「2方向近似 (two-stream approximation)」という)。2方向という点が、高速道路を連想させるのである。東名高速の場合、東京方面が上り線であるから、名古屋を地表面、東京を大気上端に対応させてみよう。

自動車は、赤外線の光量子に対応する (ここでは、可視光線は考えない)。光量子のエネルギーは  $h\nu$  ( $h$  はプランクの定数、 $\nu$  は振動数) であるから、振動数の異なる光量子を車種の異なる自動車に対応させる。赤外線は見えないが、自動車は見えるので挙動が分かりやすい。温室効果気体に対応するものは、パーキング・エリア (以後 PA と略す) である。自動車=赤外線の出入りがある点が温室効果気体に似ている。このようなアナロジーをさらに推し進めると、どういうことになるのだろうか。

### 2. 放射過程の高速道路モデル

実際の高速道路は複雑なので、ここでは、大気を念頭において、東名高速道路を以下のように単純化する。

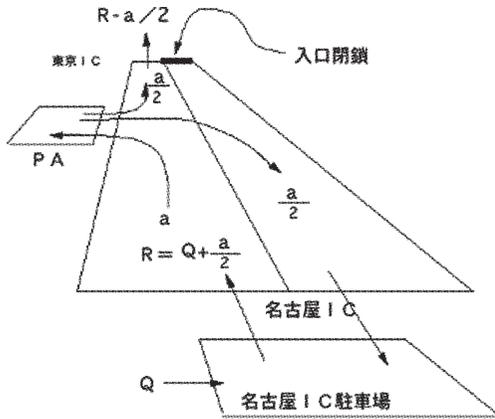
- 1) 東名高速道路には多くのインターチェンジ (以下 IC と略す) がある。途中の IC は、太陽放射の温室効果気体への吸収に対応させることが可能であるが、本稿では、簡単のために、太陽放射はまったく吸収されずに地表面に届くと仮定する。この仮定に対応して、名古屋と東京以外の IC はすべて閉鎖する。車の出入口は、終点の名古屋と東京だけである。
- 2) 太陽放射に含まれる赤外線を無視すると、大気上端から下向きに赤外線は入射しない。高速道路でいえば、東京 IC の入口が、何かの事情で閉鎖されている状況を考える (第2図)。東京 IC は、出口だ



第1図 大気中の上向き・下向きの赤外線 (上下方向の矢印) と温室効果気体 (太い横線) のイメージ。

\* Ryuji KIMURA, 放送大学。

© 2012 日本気象学会



第2図 高速道路の車の出入り。

けが通行可能である。

- 3) 温室効果気体の赤外線吸収率は振動数依存性をもつ。高速道路でいえば、車種によって、PAに入る数が異なるということである。実際は、PAに入るか入らないかは、ドライバーの意思によるので、車種とは関係ない。ここでは、車種とドライバーの意思を一体化し、PAに入りやすい車種と入りにくい車種があると考え、そして、簡単のために、高速道路には、同じ車種の車しか走っていないと仮定する（このような近似（吸収係数が赤外線の振動数によらないとする近似）を大気放射学では「灰色大気の近似」という）。
- 4) 放射伝達の問題では、ある面を通過する放射フラックスを問題にする。高速道路では、単位時間に、ある場所を通過する自動車の台数が放射フラックスに対応する。正確に言えば、1台の自動車が一量のエネギーを積んでいて、そのエネギーのフラックスを問題にするべきであるが、煩わしいので、エネギーと自動車を一体化して考えることにする。以下、フラックスという言葉がよく出てくるが、1秒間に、ある場所を通過する自動車の台数と考えていただきたい。
- 5) 放射過程では、放射フラックスと気温との関係を問題にする。高速道路モデルでは、シュテファン・ボルツマンの放射法則を念頭において、PAに停車している車の台数が気温（絶対温度）の4乗に対応するものとする。

### 3. 温室効果気体を含まない大気モデル

まず、温室効果気体を含まない大気中の赤外線の挙動が、高速道路モデルでどのように表現されるか考察する。

地表面に与えられた日射  $Q$  によって、地表面温度が上昇し、その温度に応じた上向きの赤外線が宇宙に逃げる。高速道路でいえば、フラックス  $Q$  の自動車が名古屋ICから入り、東京ICから出ていく状態に対応する。車はスムーズに流れ、途中の自動車のフラックスは場所によらず一定である。東京IC（大気上端）から宇宙に逃げるフラックスは  $Q$  で、入射する日射のエネギーフラックスに等しい（放射平衡が成り立っている）。もちろん、下向きの赤外線フラックスは存在しない（東京ICでは、下り線には車は1台も走っていない）。

### 4. 温室効果気体による赤外線の吸収

放射フラックス  $F$  が厚さ  $dh$  の温室効果気体を含む大気層を通過したとき、 $dF$  だけフラックスが吸収されるとする。このとき、

$$dF = -k\rho F dh \quad (1)$$

の関係がある。ここで、 $k$  は吸収係数、 $\rho$  は温室効果気体の密度である。高速道路モデルでいえば、 $dF$  は、単位時間にPAに入る車の数（右辺にマイナスがついているのは、高速道路の車のフラックスが、その数だけ少なくなるからである）、 $\rho$  は、高速道路上の渋滞の度合い、 $dh$  は、隣り合うPAの間隔である。PA-Aを通り過ぎた車は、次のPA-Bに到達する前に、PA-Bに入ろうかどうか思案するだろう。 $dh$  が長いと、入ろうと思う車の数が増えると考え。

温室効果気体が高さによって連続的に分布しているということは、高速道路でいえば、かなりの数のPAが存在することを意味する。その間隔を  $dh$  と考える。大気放射学では、

$$k\rho h = \tau \quad (2)$$

を「光学的厚さ」という。 $h$  は、名古屋ICからの走行距離である。 $\tau$  は無次元なので、いわば、特徴的なスケールで規格化された無次元走行距離ということが出来るだろう。走行距離を  $\tau$  で表せば、(1)式から予想されるように、高速道路上の車のフラックスは、名

古屋から東京に向けて指数関数的に減っていく（ピア・ブーゲー・ランバートの法則）。 $\tau=1$ の距離で、 $1/e$ は約37%に減る。

5. 温室効果気体からの赤外線の放射

温室効果気体は、温度に応じて、赤外線を放射する。高速道路モデルでは、PA から車が上下線に入る。赤外線は上方にも下方にも放射されるのに対応して、PA から高速道路に乗る車は、半分が上り線に、半分が下り線に入ると考える。

この設定は、現実の東名高速と相容れない。現実の高速道路では、上りと下り線ははっきり区別されており、PA もそれぞれ別になっている。そのため、上り線の車がPA に入って、目的地を変更して、下り線に戻ることは不可能である。ここで考察する仮想的な高速道路では、上り線も下り線も同じPA に駐車し、PA から出る車の半分は上り線に、半分は下り線に入ることが可能である。本稿で考察する高速道路は、現実の高速道路のモデルではなく、大気を高速道路になぞらえたものである、と解釈していただきたい。

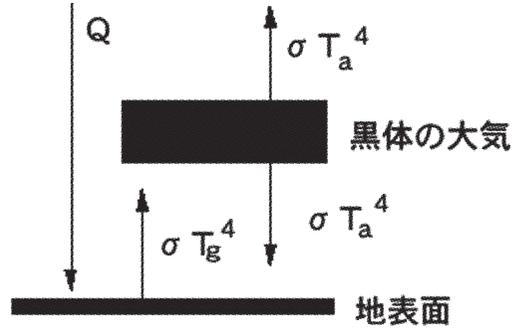
6. 温室効果の簡単な説明

簡単のために、名古屋・東京間で、PA が1カ所しかないとする（第2図）。名古屋ICから入る車のフラックスを  $R$  とする。  $R$  のうち、フラックス  $a$  の車がPA に入るとする。定常状態（平衡状態）では、PA に入った車のフラックスと同じだけの車が再び高速道路に入る。その半分が下り線に入るから、PA を通過した後の高速道路上のフラックスは、第2図に示すように、

$$R - a + a/2 = R - a/2 \tag{3}$$

である。一方、PA から下り線に入ったフラックス  $a/2$  が、名古屋ICから出る。もしも、地表面に与えられた赤外線が地中に逃げていかなければ、そのエネルギーは、地表面温度を上げ、熱放射として、再び、上空に放射されるはずである。高速道路の場合は、名古屋IC から出た車はすべて、駐車場に入り、（定常状態では）同じ台数の車が上り線に入る。従って、上り線に入る車の数は、

$$R = Q + a/2 \tag{4}$$



第3図 大気を1層の黒体として扱ったモデル。  
 $T_a$ は気温、 $T_g$ は地面温度。 $\sigma$ はシュテファン・ボルツマンの定数。

で与えられる。それ故、東京ICから出ていく車は  $Q$  になって、放射平衡が成り立つ。

さて、 $Q$  に対応して、シュテファン・ボルツマンの法則に従って決まる温度を放射平衡温度という。地球の場合、255K であることが知られている。地表面から  $Q$  より大きいフラックスが上向きに放射されるということは、地表面温度が255K より高くなることを意味する。この昇温はPA（温室効果気体）の存在によって生じるので、温室効果という。

7. 黒体大気モデルと灰色大気モデル

第3図は、大気を1層の黒体と見なしたときの上下方向の赤外線フラックスを示したものである。「一般気象学」（小倉 1999）では、このようなモデルを使って、放射平衡が成立すると、地面温度  $T_g$ 、気温  $T_a$  に対して、 $T_g > T_a$  になることを説明している。この図を高速道路モデルに当てはめると、名古屋ICから入った車がすべてPA に入ることに対応している。放射平衡が成り立つと、同数の車が高速道路に入る。その半分が東京方面に向かう。その数が  $Q$  と釣り合っている。従って、名古屋ICから入る車は  $2Q$  になる。それに対して、本稿の高速道路モデルでは、 $k$  が小さければ、名古屋ICから入った車の一部はPA に入らないまま、東京ICから出る。灰色大気といわれる所以である。

8. 放射伝達方程式

大気と同じように、PA が高速道路に沿って、密に設置されているとしよう。このとき、上り車線の車のフラックス ( $F_u$ ) の変化を表す方程式は、名古屋IC

からの無次元走行距離  $\tau$  に対して,

$$dF_u/d\tau = -F_u + \sigma T(\tau)^4 \tag{5}$$

と書ける. 右辺第1項は, 単位時間に PA へ入る車の数, 第2項は, PA から高速道路の上り車線に入る車の数である (この項は温度の関数として表示してある).

下り車線の車のフラックス ( $F_d$ ) の変化を表す方程式は, 名古屋 IC からの無次元走行距離  $\tau'$  に対して, (5)式と全く同じ式になる. すなわち,

$$dF_d/d\tau' = -F_d + \sigma T(\tau')^4 \tag{6}$$

しかし,  $F_u$  と  $F_d$  を連立させようとする, 上り線と下り線で座標の向きが逆になっているのは, 大変, 具合が悪い. そこで, 2つの座標系の関係を考える. 名古屋・東京間の距離を無次元長さ  $\tau_0$  とすれば,

$$\tau' = \tau_0 - \tau \tag{7}$$

である. 従って,

$$d\tau' = -d\tau \tag{8}$$

(5)式に代入して,

$$dF_u/d\tau' = F_u - \sigma T(\tau')^4 \tag{9}$$

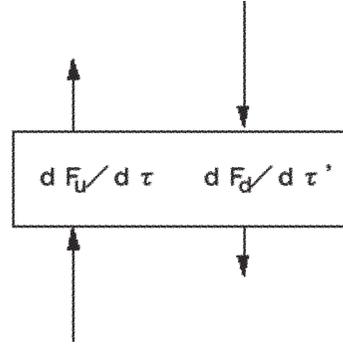
が成り立つ. (6)式, (9)式は, 赤外線の上方向の伝達を記述する放射伝達方程式 (シュヴァルツシルトの方程式) と同じ形をしている.

### 9. 放射平衡温度

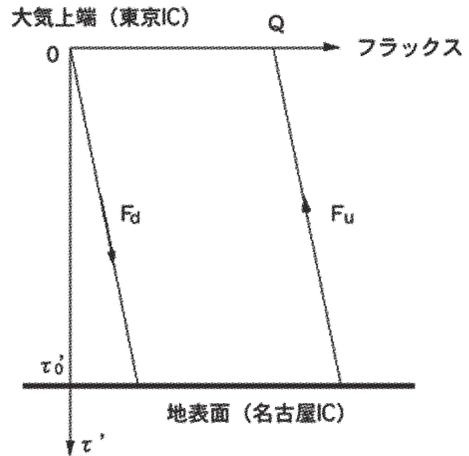
放射平衡とは, 放射の吸収と射出が釣り合っ, 温度が変化しない状態である. 高速道路でいえば, 自動車数が時間的に変化しない状態 (すなわち, 定常状態) に対応する. このとき, 高速道路上の車の数に溜まりが生じない.

第4図から予想されるように, 車の溜まりがない状態は,

$$dF_u/d\tau' - dF_d/d\tau' = 0 \tag{10}$$



第4図 高速道路上の車の溜まり.



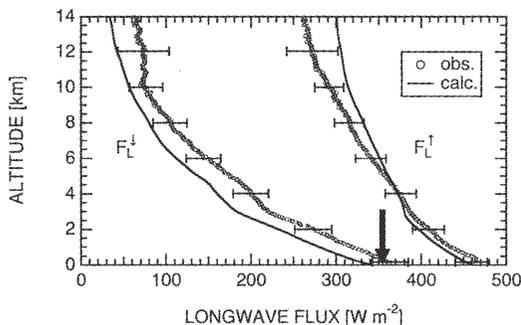
第5図 上下線の車のフラックス.

と書ける. この条件 (定常状態の条件) の下に, (6), (9)を解けば,

$$F_u = (Q/2)\tau' + Q \tag{11}$$

$$F_d = (Q/2)\tau' \tag{12}$$

を得る (大気上端 ( $\tau'=0$ ) で,  $F_u=Q$ ,  $F_d=0$  という境界条件を使った). 第5図に示すように, 下り方面のフラックス ( $F_d$ ) は, 東京 IC では0であるが, 名古屋に近づくにつれて増加する. 名古屋 IC に達すると, そのフラックス+名古屋 IC から流入する  $Q$  (太陽放射に対応) のフラックスが上り車線に入り, 次第に数を減らしながら, 東京 IC に向かう. 東京 IC から出るフラックスは  $Q$  で, 放射平衡が成り立って



第6図 放射ゾンデで観測した赤外線フラックスの鉛直分布 (Asano *et al.* 2004). 左のグラフが下向きフラックス, 右のグラフが上向きフラックス. 横軸上の下向きの太い矢印は, 放球時の地上観測結果. エラーバーがついているグラフが観測結果. エラーバーがついていないグラフは理論値.

いる. このようなフラックスの分布に対応して, 放射平衡温度が決まるのである.

しかし, 現実の対流圏の気温分布が, このような放射過程だけで決まっているか, ということ, そうではない. 放射平衡温度は, 地表面付近で大きな温度勾配になり, 大気が静学的に不安定になって, 対流が生じる. そのため, 対流圏の気温の鉛直分布は, 放射平衡から大きくずれ, それに応じて, 放射のフラックスの鉛直分布も第5図と実際とはかなり異なっている. 対流まで考慮した平衡状態を「放射対流平衡」という. 第6図は, 実際に, 放射ゾンデで測定した, 大気中の赤外線のフラックスの分布である (Asano *et al.*

2004). 第5図と比較してみたい.

### 10. 高速道路モデルから学んだこと

- 1) 大気中を上下に伝播する赤外線は, 高速道路の上下線の車の流れに似ている. 大気中に存在する温室効果気体は, PA に対応する.
- 2) 上向き赤外線の一部は温室効果気体に吸収され, 再び, 大気中に放出される. そのエネルギーの半分は上向きに, 半分は下向きに放出される.
- 3) 下向きに放出された赤外線は, 地表面を加熱し, 地表面から上向きに放出される赤外線の強さを増す. それが温室効果である.

### 参考文献

会田 勝, 1982: 大気と放射過程. 東京堂出版, 280pp.  
 浅野正二, 2010: 大気放射学の基礎. 朝倉書店, 267pp.  
 Asano, S., Y. Yoshida, Y. Miyake and K. Nakamura, 2004: Development of a radiometer-sonde for simultaneously measuring the downward and upward broadband fluxes of shortwave and longwave radiation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 623-637.  
 近藤純正, 2000: 地表面に近い大気の科学. 東京大学出版会, 324pp.  
 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.  
 小倉義光, 1999: 一般気象学 (第2版). 東京大学出版会, 320pp.  
 柴田清孝, 1999: 光の気象学. 朝倉書店, 182pp.  
 田中 浩, 2004: 大気科学とその周辺. 現代図書, 641pp.