

13. 日本地域における大気混濁係数の変動解析

Variation of Atmospheric Turbidity in Japanese Area

太田 幸雄*・村尾 直人*・山形 定*・深沢 達矢*・長谷川 就一*・荒生 公雄**
OHTA Sachio*, MURAO Naoto*, YAMAGATA Sadamu*, FUKASAWA Tatsuya*, HASEGAWA Shuichi*
and ARAO Kimio**

ABSTRACT: Atmospheric turbidity coefficients were calculated at five sites (Nemuro, Sapporo, Shionomisaki, Tosa-Shimizu and Ishigaki) in Japan from 1980 through 1995. The turbidity coefficients ranged 0.03-0.30 at Nemuro, 0.05-0.45 at Sapporo, 0.05-0.45 at Shionomisaki, 0.03-0.40 at Tosa-Shimizu and 0.03-0.40 at Ishigaki. In 1982-1984 and 1991-1993 they had the maximum due to large volcanic eruptions of Mt. El Chichon and Mt. Pinatubo, respectively. Except effect of the volcanic eruption, the turbidity coefficients had tendency of increase from 1955 through 1990 due to increase of human activities. Global increase of the turbidity coefficient of 0.042 may cause the decrease of the global mean surface temperature of 0.3 °C.

KEYWORDS: Variation of atmospheric turbidity, Japanese area, air pollution, volcanic eruption

1. はじめに

大気中に浮遊する微粒子（大気エアロゾル）は、太陽放射（日射）を散乱・吸収し、その結果、地表に到達する太陽放射量を変化させて、気候の変化を引き起こす。これを大気エアロゾルのアルベド効果と呼ぶ。この効果として有名なものが、大規模な火山の噴火に伴う気温の低下であり、たとえば Mass and Portman (1989) の解析では、過去 100 年間で起きた世界中の大規模な火山の噴火において、噴火後数年にわたって半球の年平均地表気温が 0.1~0.2 °C 程度低下していることが明らかにされている。なお、1991 年の 6 月にもフィリピンのピナトゥボ火山が今世紀最大級といわれる大噴火を起こしたが、その後北半球においては 1992 年の年平均地表気温が前年と比べて 0.4°C 低下しており、この気温低下の原因としてピナトゥボ火山噴火の影響が指摘されている。

しかし、この火山爆発のような自然現象によるものだけではなく、燃焼や耕作などの人間活動によっても大量のエアロゾルが大気中に放出されている。とくにバスやトラック、船舶などのディーゼルエンジンからは多量のすす粒子や硫酸粒子および SO₂ ガス（大気中で硫酸粒子に変わる）が排出され、また石炭火力や重油火力発電所からもやはり多くのすすや硫酸粒子および SO₂ ガスが排出される。これらの人間活動の結果大気中のエアロゾルが増加すれば、やはりそのアルベド効果により気候変動を起こすことが予想される。

近年、二酸化炭素やメタン等の増加による地球の温暖化が大きな問題となっているが、これらの温室効果気体の増加により見積もられる上昇量は、過去百年間の実測された全球平均気温の上昇量（0.45±0.15°C）とほぼ等しいと言われている。しかし一方、自然の気候変動の大きさもまたこの程度である。それ故、もし過去 100 年間に自然の気候変動が気温の上昇傾向にあったとすれば、温室効果気体の増加による地球の温暖

* 北海道大学工学部衛生工学科 (Dept. of Sanitary and Environmental Engineering, Hokkaido Univ.)

**長崎大学教育学部 (Faculty of Education, Nagasaki Univ.)

化は抑制されてきたことになる。この温室効果を抑制している可能性のあるものとして考えられるものが、フロンガスによるオゾン層の破壊・減少と、世界的な大気汚染の進行に伴う硫酸粒子などの人為起源エアロゾルの増加である。しかし、これまでのところではこの大気エアロゾルの濃度増加についての定量的な見積もりは行われておらず、大気エアロゾルのアルベド効果に伴う地球温暖化の抑制効果を見積もるためには、この大気エアロゾル濃度の過去数十年間の変動を明らかにすることが必要である。

なお大気エアロゾルのアルベド効果を見積もるためには、ある高度における大気エアロゾルの空間濃度ではなく、むしろ地表面から大気上端までの大気層（これを気柱と呼ぶ）の内部に含まれる全エアロゾル量が重要であり、さらにこの全エアロゾルによって引き起こされる直達日射の減衰（消散）の大きさを表す量である“光学的厚さ（optical thickness）”を求めることが必要である。この大気エアロゾルの光学的厚さは波長に依存する量であり、波長 $1 \mu\text{m}$ における大気エアロゾルの光学的厚さを大気混濁係数と呼ぶ。

大気混濁係数は、直達日射量の測定値から求めることができる。ただし、直達日射量の観測を長期・継続的に行っているのは日本および米国の一部だけであり、そのため、大気混濁係数の算出および解析についても、これまで国内においては荒生・山本(1981)によって1955年から1979年まで、国外においては米国の北カロライナにおいて1969年から1975年まで、アリゾナ州ツーソンにおいて1956年から1983年まで行われているだけである。

それ故、本研究においては、荒生・山本による1979年までの日本地域における大気混濁係数の解析をさらに1995年まで延長し、日本地域5地点（根室、札幌、潮岬、土佐清水、石垣島）における大気混濁係数の過去40年間にわたる変動を明らかにすることを試みた。根室、潮岬、土佐清水、石垣島は、いわゆる大都市・工業地帯からは遠く離れた地域であり、これらの地点における大気混濁係数の変動は、北半球中緯度域における大気の混濁状態（気柱内の大気エアロゾルの総量）の変化をほぼ代表すると考えても良いと思われる。なお、札幌については、日本の都市大気の混濁状態すなわち大気汚染状況の経年変化を調べることを目的として選定したものである。

2. 大気混濁係数

大気混濁係数について簡単に概説する。観測された地表における直達日射量を I_{obs} とする。地球は太陽の周りを楕円軌道を描いて回っているので、地球と太陽との平均距離における直達日射量に換算されたものを I とすると

$$I = (R/R_0)^2 I_{\text{obs}} \\ = \int I_0(\lambda) T_R(m, \lambda) T_M(m, \lambda) T_G(m, \lambda) d\lambda. \quad (1)$$

ここで、 R と R_0 は各々地球と太陽との間の瞬間的な距離と年平均距離である。また $I_0(\lambda)$ は、波長 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ の波長域における大気外の年平均の日射量、 T_R 、 T_M および T_G は、各々、波長 λ における空気分子の Rayleigh 散乱による透過関数、エアロゾルの Mie 散乱による透過関数、および水蒸気や二酸化炭素、オゾン等のガス成分による吸収による透過関数である。また m は、air mass と呼ばれ、太陽の天頂からの傾き（角度）を θ_0 とすると、

$$m = \sec \theta_0 \quad (2)$$

と表される。波長 λ における大気エアロゾルによる Mie 散乱の光学的厚さを τ_m とすると、大気エアロゾルによる透過関数 T_M は、次式で与えられる。

$$T_M(m, \lambda) = \exp [-\tau_m(\lambda) \cdot m] . \quad (3)$$

大気エアロゾルの粒径分布として、次式で示される Junge 分布を仮定する。

$$n(r) = \begin{cases} C \times 10^4, & 0.03 < r < 0.1 \mu\text{m}, \\ C r^{-4}, & 0.1 < r < 10 \mu\text{m}, \end{cases} \quad (4)$$

ここで $n(r)dr$ は、半径が r と $r+dr$ におけるエアロゾルの単位体積あたりの個数を示す。 C は、単位体積中

に含まれるエアロゾルの総数である。地表付近から大気上端までのエアロゾルの粒径分布がすべて(4)式で示されたJunge分布に従うものと仮定すると、大気エアロゾルの光学的厚さ τ_M は気柱内に含まれる全エアロゾルによる消散係数の総和で表され、次式で与えられる。

$$\tau_M = (2\pi^2 C / \lambda) \int Q(\alpha, m^*) \alpha^{-2} d\alpha \quad (5)$$

ここで、 α はサイズパラメーターと呼ばれるもので

$$\alpha = 2\pi r / \lambda \quad (6)$$

で与えられ、 m^* は大気エアロゾルの複素屈折率である。 Q はMie散乱による消散の効率因子と呼ばれ、 α と m^* が与えられれば、Mie散乱理論から計算で求めることができる。

なお、式(5)より、大気エアロゾルの光学的厚さ τ_M は、

$$\tau_M = \beta / \lambda \quad (7)$$

と書くことができる。すなわち、 β は

$$\beta = 2\pi^2 C \int Q(\alpha, m^*) \alpha^{-2} d\alpha \quad (8)$$

で与えられ、これが大気混濁係数と呼ばれているものである。式(7)より、大気混濁係数 β は波長 $1\mu m$ における大気エアロゾルの光学的厚さと考えることができる。

以上の大気混濁係数 β を、直達日射量の瞬間値と水蒸気(相対湿度)の測定値を基に、Yamamoto et. al. (1968)の方法により求めた。

3. 近年の日本地域の大気混濁係数

荒生・山本により、根室については1977年まで、札幌、潮岬、土佐清水については1979年まで解析されているので、本研究ではその後1995年7月までの解析を行った。また石垣島については今回初めて解析を行ったが、直達日射測定は1970年から行われているものの、欠測が多く、まとまったデータが得られているのは1984年以降であった。図1、2に、今回新たに解析された根室および土佐清水における大気混濁係数の経年変化を示す。図中で、Turbidityは大気混濁係数であり、また横軸の観測年の表記は、例えば1990の位置の縦線が1990年の1月1日を示す。直達日射データはいうまでもなく快晴か晴れの日でなければ得られないため、得られた大気混濁係数は各地点とも月に4~10個程度である。

図1より、根室においては、大気混濁係数はほぼ0.03~0.30の範囲内にあり、秋から冬にかけて小さく、春に大きな値を示している。なお、1982~1983年および1991~1993年にかけて、他の年に比べて異常に大き

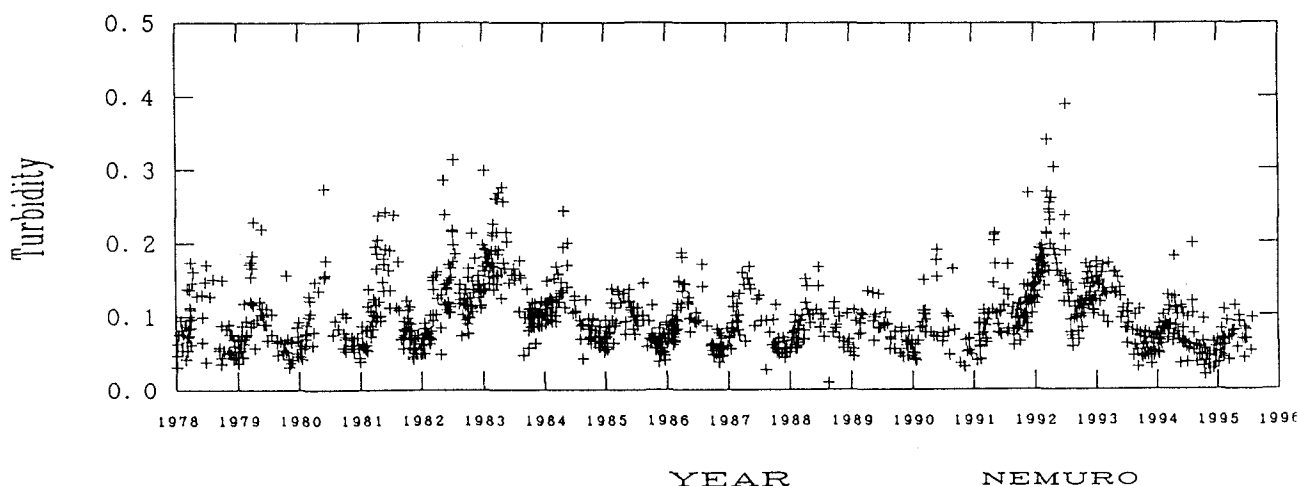


図1. 根室における大気混濁係数

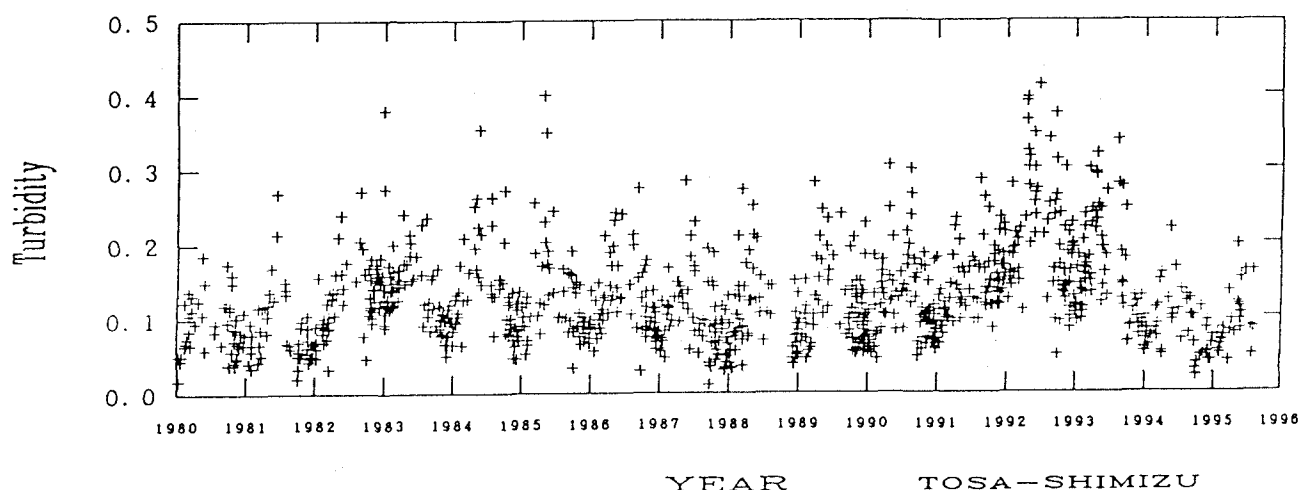


図2. 土佐清水における大気混濁係数

い値を示している。他の4地点においてもこの時期に同様な傾向が見られており、これは、1982年の3～4月に起きたメキシコのエルチチョン火山の大噴火および1991年6月に起きたフィリピンのピナツゥボ火山の大噴火によるものと思われる。これらの火山の噴火においては、大量の SO_2 ガスが成層圏に注入され、太陽光によって硫酸エアロゾルにまで酸化される。成層圏は対流のない安定した大気層であり、降水による洗浄効果がなく、さらに生成された硫酸エアロゾルは粒径が小さいために重力沈降が効かず、2～3年間程度成層圏内に浮遊し、そのために大気混濁係数が増加したものと思われる。

図2より、土佐清水における大気混濁係数は0.03～0.40程度であり、やはり秋から冬にかけて小さく春に大きくなる傾向を示している。また1991～1993年のピナツゥボ火山噴火による増加が顕著に現れている。

一方、札幌における大気混濁係数は0.05～0.45、潮岬では0.05～0.45、石垣島では0.03～0.40であった。

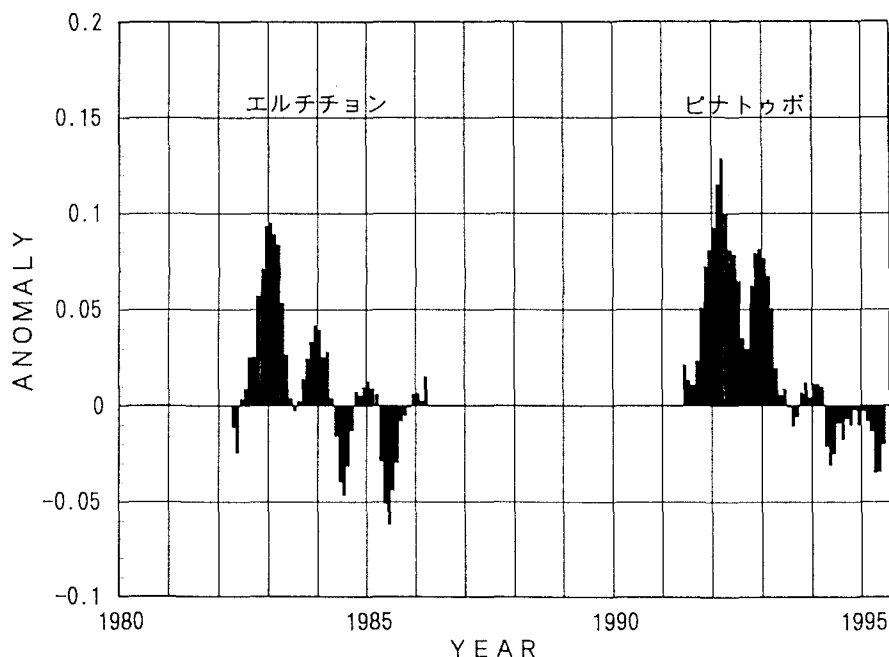


図3. 大気混濁係数の各月の3ヶ月移動平均値の噴火直前一年間の各月の値との偏差

4. 火山噴火による大気混濁係数の増加

上述したエルチチョンおよびピナツッポ火山の噴火による大気混濁係数の増加量を見積もるために、根室および土佐清水における大気混濁係数の3ヵ月移動平均をとり、噴火直前の1年間の各月の3ヵ月移動平均値に対する噴火後の各月の3ヵ月移動平均値の偏差を求めた。根室における結果を図3に示す。エルチチョン噴火よりもピナツッポ噴火の方が大気混濁係数の増加量が多いこと、ピナツッポ噴火により噴火半年後の1992年2～4月に、大気混濁係数が前年に比べて0.1と言う大きな増加を示していること、および噴火の影響は2年程度で収まっていることがわかる。

5. 日本地域における大気混濁係数の推移

上記5地点について今回の解析結果について年平均をとり、これまで荒生・山本によって解析された1955年から1979年までの結果を加えて、1955年から1994年までの年平均値を求めた。しかし、そのような一年毎の平均値の時系列では、かなり変動が激しく全体的な傾向をつかみにくいので、次に3年毎の移動平均をとった。図4にその結果を示す。まず、大都市である札幌においては、1960年代後半と1982～1984年および1991年以降に極大がみられる。これは、1960年代後半では、この時期札幌では暖房に石炭を使用しており、その石炭ばい煙により冬季に深刻な大気汚染に見舞われたためと思われる。その後札幌においては、熱供給センターを設置して市の中心部を集中暖房化したこと、および暖房用の燃料が石炭から石油に切り換えられたために大気汚染は沈静化し、大気混濁係数も減少したものと思われる。また、1982～1984年および1991年以降の増加は、前述したような火山噴火によるものである。

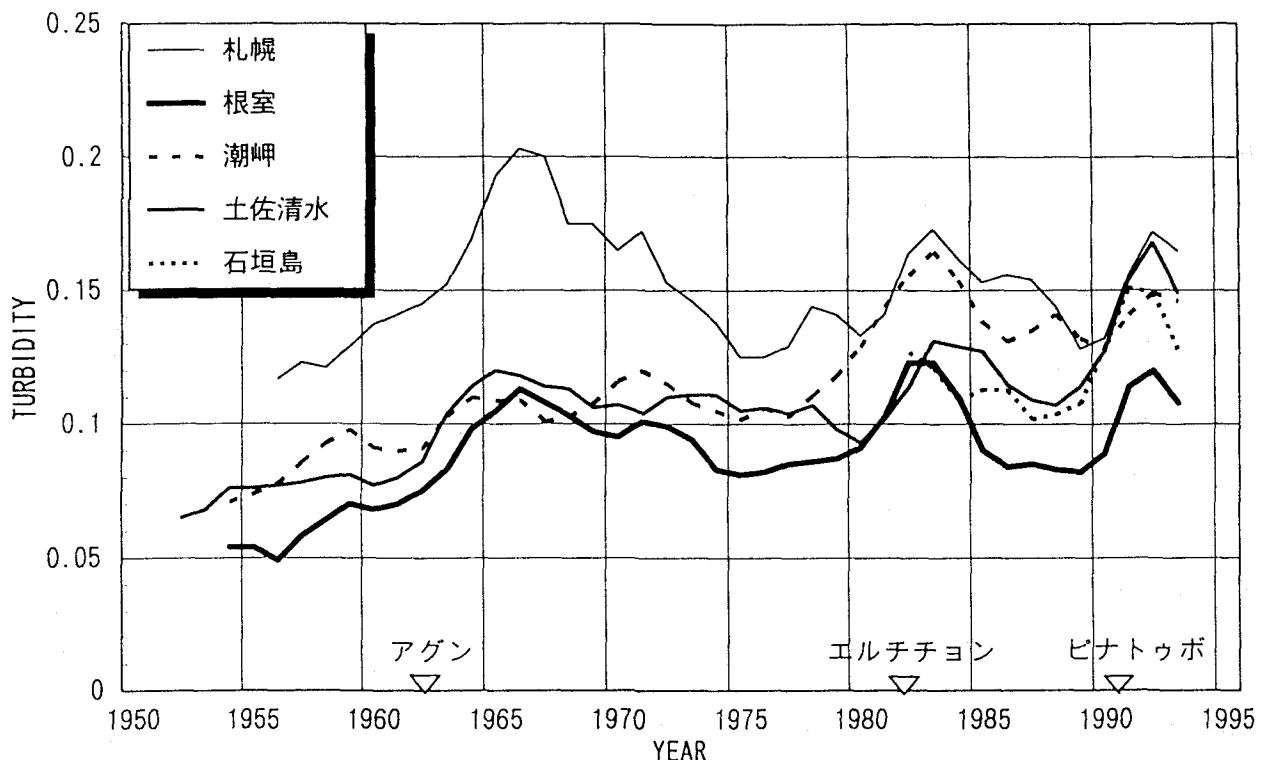


図4. 日本各地における大気混濁係数の3年移動平均値の推移

次に、大都市である札幌を除いて、根室、潮岬および土佐清水における大気混濁係数の推移をみると、1960年代中頃、1982～1984年および1991年以降に極大がみられる。1960年代中頃の増加は、1964年のインドネシアのアグン火山の噴火と、さらにこの時期に日本においても公害問題が多発し大気汚染が激化して、日本周辺全体の大気エアロゾル濃度が増加したためとも考えられる。1982～1984年および1991年以降の増加は、前述したようにエルチチョンおよびピナツッポ火山の噴火によるものである。

また、火山噴火がない、あるいはその影響がおさまったと考えられる時期を見ても、1950年代から1990年までの間に、全体として大気混濁係数の増加傾向が見うけられる。これは、一つには日本自身の経済成長・工業化に伴って大気エアロゾルの放出量が多くなっていることも考えられるが、さらに、近年、中国および韓国等の工業化が進展し、中国および韓国等で排出された汚染物質（大気エアロゾル）が偏西風によって日本まで長距離輸送されてきているためとも考えられる。

6. 大気エアロゾルの増加に伴う気温低下量の推定

図4より、火山噴火の影響のないと思われる1955年頃と1988～1989年の静穏な時期の大気混濁係数を比べると、この34年間で大気混濁係数は根室で0.042、土佐清水、潮岬で0.050程度増加している。そこで、もしも地球全体で大気混濁係数が0.042増加した場合に、地球の平均気温がどの程度変動するか、すなわち、大気エアロゾルの増加に伴う気候影響に関する見積もりを行った。

式(7)より、 β の0.042の増加に対する各波長での大気の光学的厚さ τ_m の増加量を求め、デルタP3近似法により放射伝達方程式を解き、大気上端での太陽放射反射率 A を求めた。なお、モデル大気として成層圏、自由対流圏（高度2～10km）および大気境界層（地上～高度2km）の3層から成るものを仮定した。成層圏エアロゾルは硫酸粒子とし、自由対流圏エアロゾルの光学特性値（粒径分布および複素屈折率）は航空機観測により得られたものを用いた。また大気境界層内のエアロゾルの光学特性値としては、北海道ニセコ山麓において捕集された大気エアロゾルの組成分析値を基に算出されたものを用いた。

Budyko(1969)によると、緯度 ϕ ($x = \sin \phi$)における地球-大気系の熱収支は次のように与えられる。

$$Q(x)(1 - A(x)) - I(x) = D(x), \quad (9)$$

ここで、 $Q(x)$ は大気上端に入射する太陽放射量、 $A(x)$ は大気上端での太陽放射の反射率、 $I(x)$ は大気上端から放出される赤外放射量、 $D(x)$ は緯度帯間の熱フラックスの発散量である。なお、 $I(x)$ および $D(x)$ については、地表気温 T_s との間に次のような経験式が得られている。

$$I(x) = a + bn + (a_1 + b_1 n) T_s(x), \quad (10)$$

$$D(x) = \nu (T_s(x) - T_{so}), \quad (11)$$

ここで、 a , b , a_1 , b_1 は定数、 n は雲量、 ν は定数、 T_{so} は全球平均の地表気温である。

放射伝達方程式を解いて得られた $A(x)$ を式(9)に代入し、さらに式(10)を用いて地表気温 T_s を求めた結果、大気エアロゾルの増加すなわち大気混濁係数の0.042の増加により、地表気温は0.3℃下降することがわかった。

以上のように、地球規模で大気混濁係数が0.042（波長0.5 μm での大気の光学的厚さが0.084）増加すれば地球の平均気温を約0.3℃低下させる可能性がある。この気温低下率は、根室における過去35年間の大気混濁係数の増加量を、地球平均の大気混濁係数の増加量と仮定して得られたものであり、過大な見積もりとなっていると考えられる。しかし、この0.3℃という値は、上述したように過去100年間の地球平均気温の上昇量とほぼ同じ大きさであること、および日本地域においては大気エアロゾルはこれまで増加傾向にあったことが明らかとなったことなどから、今後地球温暖化のより正確な予測を行っていく上で、大気混濁係数（気柱内の大気エアロゾル全量）の地球規模での変動および各地の大気エアロゾルの光学的な特性を明らかにしていくことが、重要な課題となる。