

物理的メカニズムに基づいた 地球温暖化現象に関する実験的研究

An Experimental Study on Global Warming Phenomenon Based on a Physical Mechanism

高島 武雄, 野亦 雄志^{*1}, 澤井和歌子^{*2}

Takashima Takeo, Yuji Nomata and Wakako Sawai

1. はじめに

近年, 地球の温暖化が大きな問題になっている。このような地球温暖化現象は, 太陽の黒点の動向なども原因になりうるが, 2 酸化炭素などの温室効果ガスの大気中の濃度の上昇によって引き起こされていることは, ほぼ確実視されている。温室効果ガスには, 水蒸気 H_2O , 2 酸化炭素 CO_2 , オゾン O_3 , メタン CH_4 , 一酸化二窒素 N_2O , クロロフルオロカーボン類 $CFCI_3$ など多数ある。これらの気体の共通の構造は, 気体分子を横から見ると, 原子が 3 個並んでいるという点である。これらの気体には, 太陽光はほぼ透過するものの, 地球が放出する赤外線を吸収し, 地球に向けて再放出する働きがある。このため, 大気中の濃度が上昇すると, 地表面への放射エネルギーが増加して温暖化をもたらすことになる。

これらの気体のうち特に 2 酸化炭素の濃度上昇は, 主に石炭, 石油, 天然ガスなどのもともと地中に固定されていた化石燃料の大量消費によるもので, 人為的な経済活動の結果生じたものである。Fig.1 の Keeling ら⁽¹⁾ のハワイでの観測結果が示すように, 一貫して増加し続けている。温暖化がもたらす具体的な災害のひとつには, 海水の膨張や氷河の海への流入などのため, 海水面が上昇して国土の減少・消滅することが挙げられる⁽²⁾。

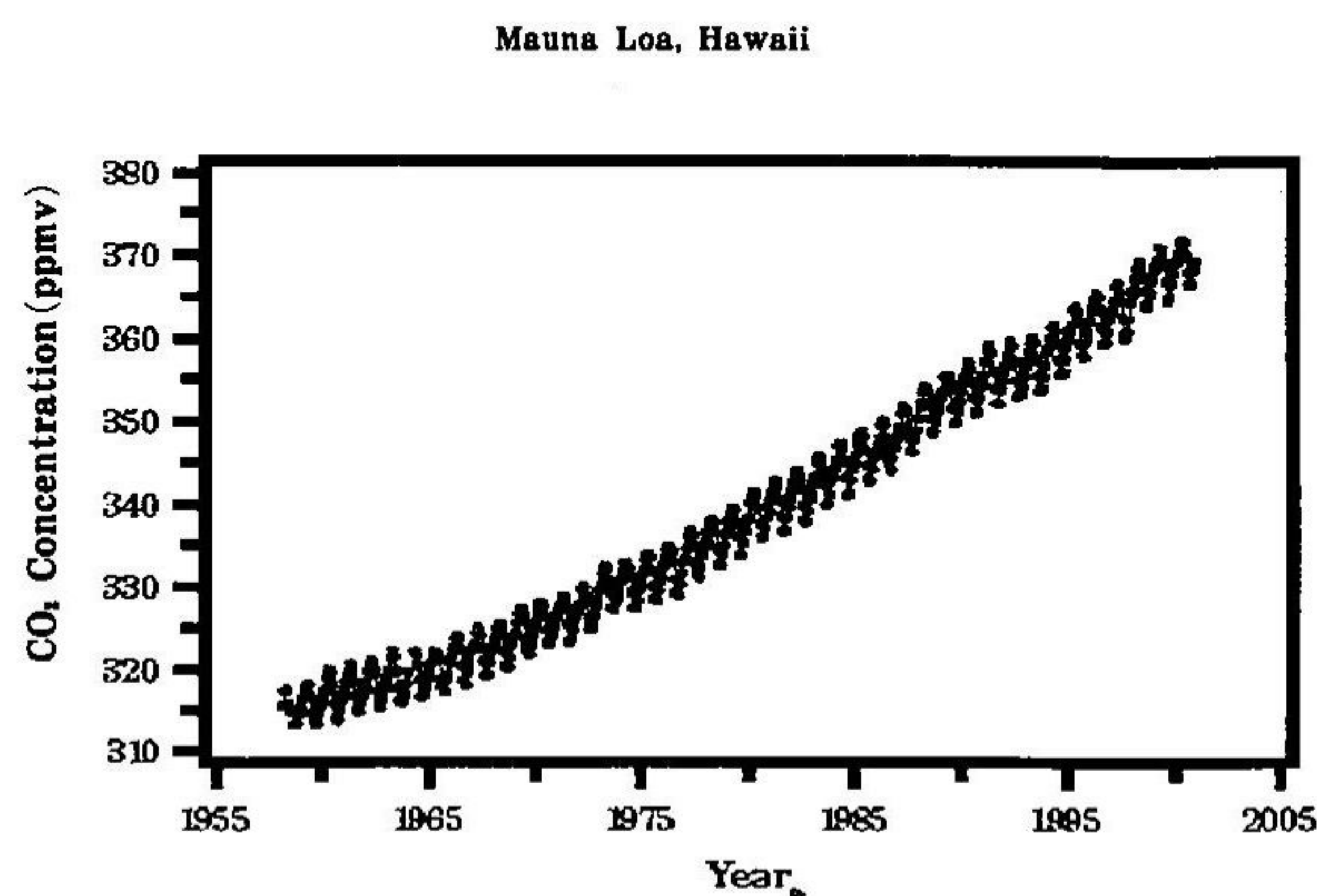
このような地球温暖化現象について, 将来の地球の温度を予測するシミュレーションは, 物理メカニズムに基づいた数式によって, 地表を細かいメッシュに分けた計算結果が, 多数報告されている。しかしながら, 現象をモデル化して, 物理的機構に基づいて実験を行い, 温暖化現象を実証する研究は, これまでには著者ら⁽³⁾の報告以外みられない。さらに, 温暖化現象そのものを説明する実験的研究は見あたらず, 比較的低年齢の教育機関で用いる教育用教材も見あたらない。

著者らが行った研究⁽³⁾では, ①自然対流伝熱による熱移動量を正確に評価することが困難なこと, ②温室効果ガス層の厚さが短く温度上昇が顕著とはいえない, という問題点があった。

そこで本研究では, 文献 (3) の研究の問題点を改善して, 「温室効果ガスによって地球表面温度が上昇する温暖化現象」という地球環境問題理解のための簡単な実験を行った。さらに, 実験結果を理解するための物理モデルを作成して計算を行い, 実験値の妥当性を検討した。

具体的には, 温室効果ガスを入れた容器の下方に冷却水を循環させる水槽を設けて, これを宇宙面とし, 上方を断熱して地表模擬面 (以下, 地表面とする) とした。このようにすることで, 上方ほど温度が高くなるため, 大気 of 自然対流による熱の移動が無視でき, control surface におけるエネルギー収支式は, 放射による熱移動の熱流量のみを考えればよいことになり, 問題を簡単に行うことができる。

実験は, 大気容器を下方から太陽を模擬した蛍光灯または電球で加熱する。容器に乾燥空気を入れた場合と温室効果ガスを満たした場合を比較して, 大気が温室効果ガスの場合には地表面温度が上昇することを示した。容器は円筒型と直方体型の 2 種類用い, ①円筒型容器を用いた実験による温暖化



Source: Dave Keeling and Tim Whorf (Seripps Institution of Oceanography)

Fig.1 Increasing of CO_2 concentration measured by Keeling et al.⁽¹⁾

^{*1} 2000 年度機械工学科卒業 現 群馬大学工学部 学生

^{*2} 2001 年度機械工学科卒業 現 (株) カルビー

の実証と, ②地表面の放射特性の相違と温暖化の関係の解明, を試みた. さらに, 大気層容器壁の放射特性の影響が軽減できる, 直方体型の容器による実験によって, ③温暖化の実証と物理モデルに基づいた大気放射率を算出した.

記 号

Q: 単位面積あたりの熱流量 (W/m^2)
 T: 温度 (K または $^{\circ}\text{C}$)
 α : 吸収率 (—)
 ϵ : 放射率 (—)
 σ : ステファン・ボルツマン定数 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$)

添 字

a: 吸収または大気
 c: 宇宙面
 e: 地表面
 g: 温室効果ガス
 s: 太陽
 t: 通過

2. 実験装置と方法

2.1 円筒型装置 Fig.2 に円筒型実験装置を示す.

内径 46mm, 長さ 1m のアクリルパイプで大気層を模擬する. 大気層の自然対流による熱の移動の影響を消すために, 上面を地表面, 下面を宇宙模擬面 (以下, 宇宙面とする) として, 上面が下面より高い温度になるようにした. 地表面とした上面は, 断熱性を考慮した厚さ 50mm の発泡スチロール表面にカーボン紙を張り付けたものとした. パイプ上端は大気層を密閉するために, ゴム栓を設け, ガス取り出し用の金属パイプを貫通させた.

地表面と宇宙面の温度には, それぞれ表面にアルメルクロメル熱電対を取り付け, 冷接点を介してペンレコーダーで測定した. 大気層のアクリルパイプの外側にはアルミ箔を巻き, 光を逃がさないようにし, さらにその周囲に厚さ 30mm の発泡スチロールを巻いて断熱を施した. また, 断熱性を確認するためにパイプの高さ 450mm の位置の壁の温度を測定した.

太陽光を模擬した光源には, 太陽光の波長分布に比較的似ている 60W の白熱電球を 100V で使用した.

容器下端には, 長さ 50mm のアクリル円筒両端をアクリル板で閉じた冷水循環容器を取り付け, 冷水を循環させ宇宙面とした. この冷水循環容器と大気層アクリルパイプ下端の間には, Oリングを介しフランジを設けてボルトナットで固定した. 宇宙面は, 透明アクリル板製の冷水循環容器の上面で模擬した.

地表面温度 T_e と宇宙面温度 T_c は, カーボン紙表面および容器上面に取り付けた, 直径 $50\mu\text{m}$ のアルメ

ルクロメル熱電対を用いて検出し, 冷接点を介してペンレコーダーで測定した.

温室効果を示さない大気としては乾燥空気を, 温室効果ガスとしては, 95% CO_2 と HFC-134a をそれぞれ用いた. 実験は大気が乾燥空気の時の T_e を測定した後, 温室効果ガスを注入し, そのときの T_e を測定して, 両者の温度を比較した.

さらに地表面の放射率 ϵ の温暖化におよぼす影響を調べるため, 地表面を, 黒体面 (カーボン紙), テフロン面, コンクリート粉末を貼り付けた面, ステンレス面としたときの, 地表面温度を測定して評価した.

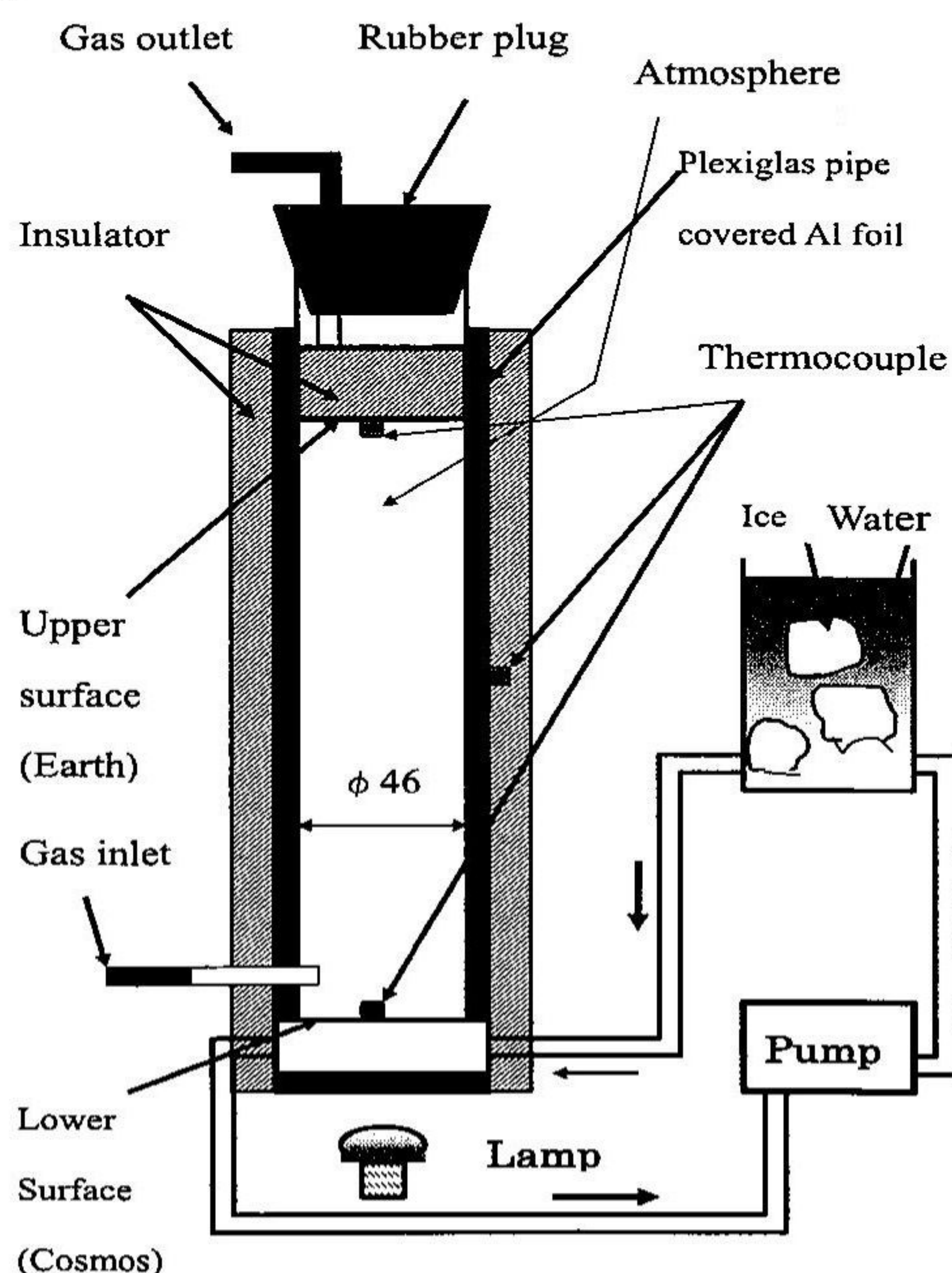


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus of cylindrical type vessel

2.2 直方体型装置 Fig.3 に直方体型実験装置を示す. 大気層容器は, 縦 320mm, 横 500mm, 高さ 300mm の箱を厚さ 3mm のアクリル板で作製し, 中央を板で半分に分け, 温室効果ガスを満たす部屋と, 乾燥空気を満たす部屋の二つを用意した. 大気層容器周囲にはアルミ箔を貼り光を逃がさないようにし, 断熱を考慮し容器外側に厚さ 20mm の発泡スチロールを貼り付けた. 地表面は黒体面と見なせるよう黒いカーボン紙を貼り付けた. 宇宙面は, 大気層とアクリル板で隔てられた流路高さが 20mm の冷水循環容器を作り冷水を循環させた容器の上面とした.

地表面と宇宙面の温度は, 円筒型装置と同様にそれぞれの表面に熱電対を取り付け測定した. 太陽光を模擬した光源には 20W の白色蛍光灯 4 本並べたものを使用した. 大気容器内にはシリカゲルを入れて

乾燥状態を維持した。

大気其自然対流による熱の移動の影響をなくすため地表面を上とした。

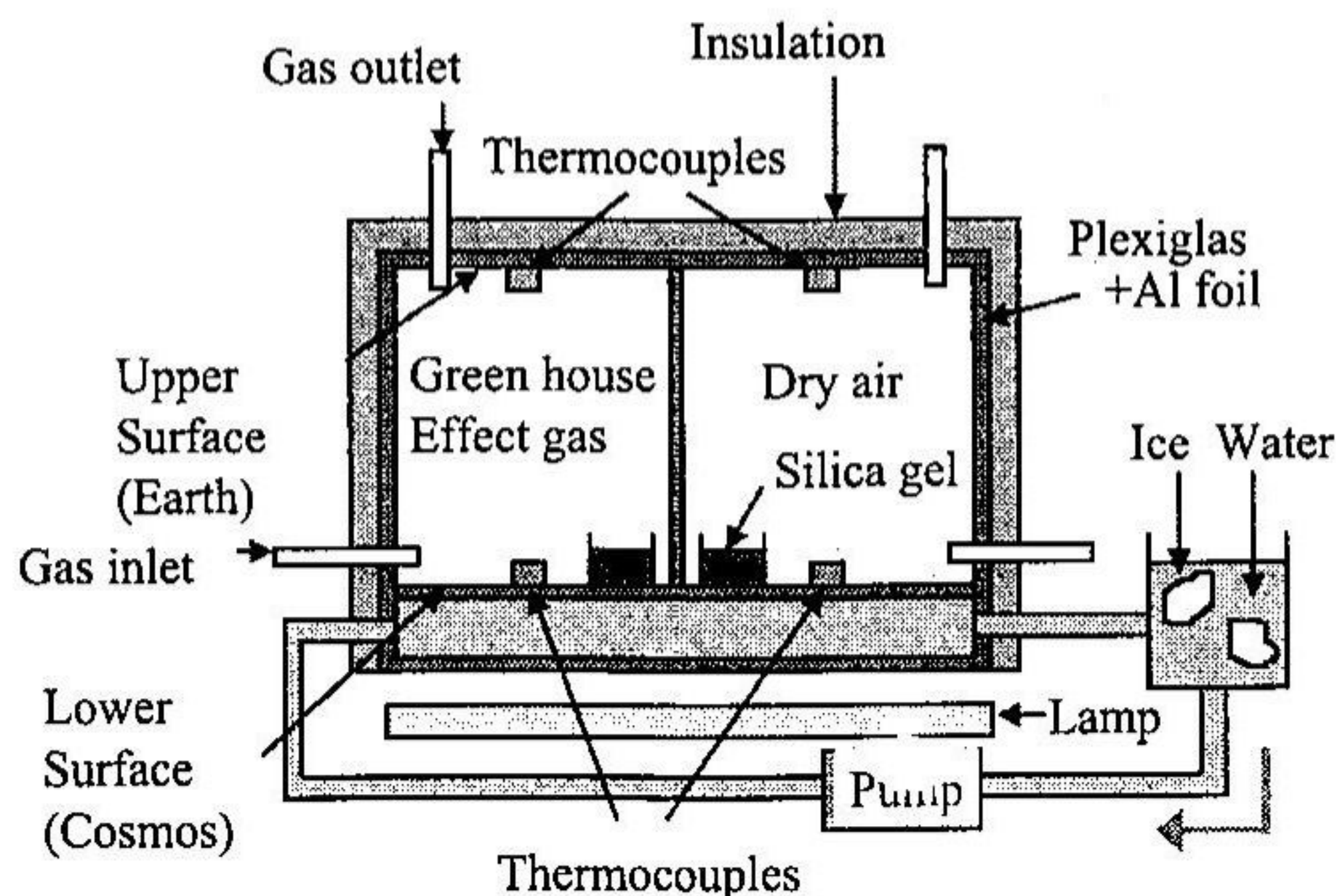


Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus of cubic type vessel

3. 熱収支モデル

実験結果を説明する物理モデルを作成した。Figs.4,5 に熱収支モデルを示す。Fig.4 は大気が温室効果のない乾燥空気の場合、Fig.5 は温室効果ガスの場合である。図中の Q_e は地表から放射される熱流量、 Q_s はランプによって地表に入る熱流量、 Q_c は宇宙から出て放射で地表に入る熱流量、 Q_g は温室効果ガスから宇宙面・地表面に放射される熱流量、 Q_w は冷水が持ち去る熱流量を示す。Figs.4,5 中の添字の a は大気または吸収、t は透過を表す。

これらの熱収支モデルを数式化する。いずれの場合も、地表に出入りする単位面積あたりの熱流量 (W/m^2) で考える。

乾燥空気と温室効果ガスの場合の地表での熱収支はそれぞれ式(1), (2)となる。

$$Q_e = Q_s + Q_c \quad (1)$$

$$Q_{e,a} = Q_s + Q_{c,a,t} + Q_g \quad (2)$$

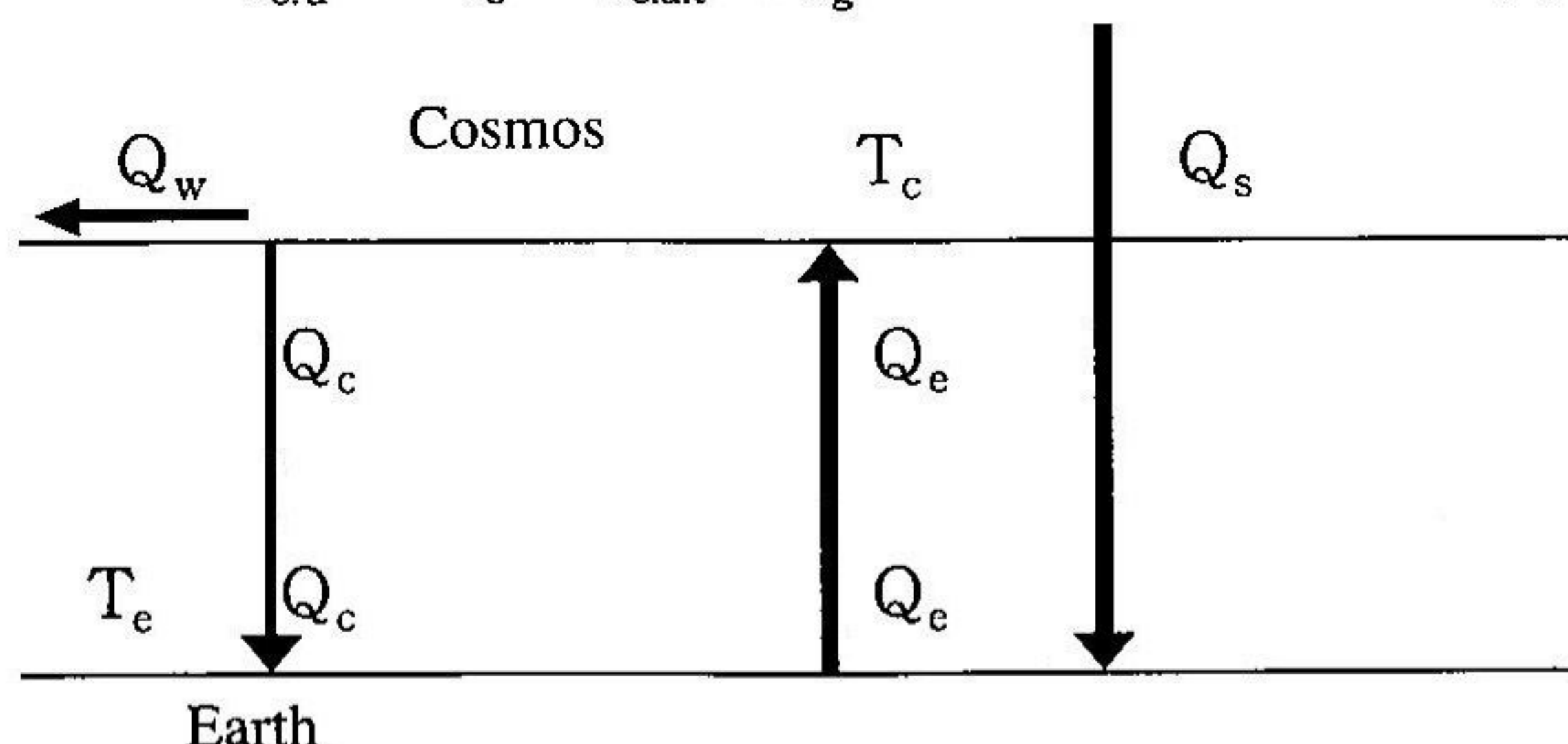


Fig.4 Heat balance model without greenhouse effect gas

両者の Q_s は等しいと仮定すると次式となる。

$$Q_{e,a} = Q_e - Q_c + Q_{c,a,t} + Q_g \quad (3)$$

式(3)の熱流量を、温度を用いて表すと次式のようにになる。

$$\begin{aligned} \epsilon_e \sigma T_{e,a}^4 &= \epsilon_e \sigma T_e^4 - \epsilon_c \sigma T_c^4 \\ &+ \epsilon_c (1 - \alpha_a) \sigma T_{c,a}^4 + \epsilon_a \sigma T_a^4 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 ϵ_e と ϵ_c は、それぞれ地表面、宇宙面の放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 α_a と ϵ_a は、それぞれ温室効果ガスの赤外線に対する吸収率と放射率を表す。また、 T_a は大気の大気代表温度で、 $T_{c,a}$ と $T_{e,a}$ の平均値を用いた。

地表面と宇宙面を黒体と仮定して、 $\epsilon_e = \epsilon_c = 1$ とし、吸収率と放射率は同じとすると、式(4)は次式となる。

$$T_{e,a}^4 = T_e^4 - T_c^4 + (1 - \alpha_a) T_{c,a}^4 + \alpha_a T_a^4 \quad (5)$$

さらに、 $T_c = T_{c,a}$ の場合は次式となる。

$$T_{e,a}^4 = T_e^4 + \alpha_a (T_a^4 - T_c^4) \quad (6)$$

式(5)または式(6)から、実験値を用いて吸収率 α_a を計算することができる。

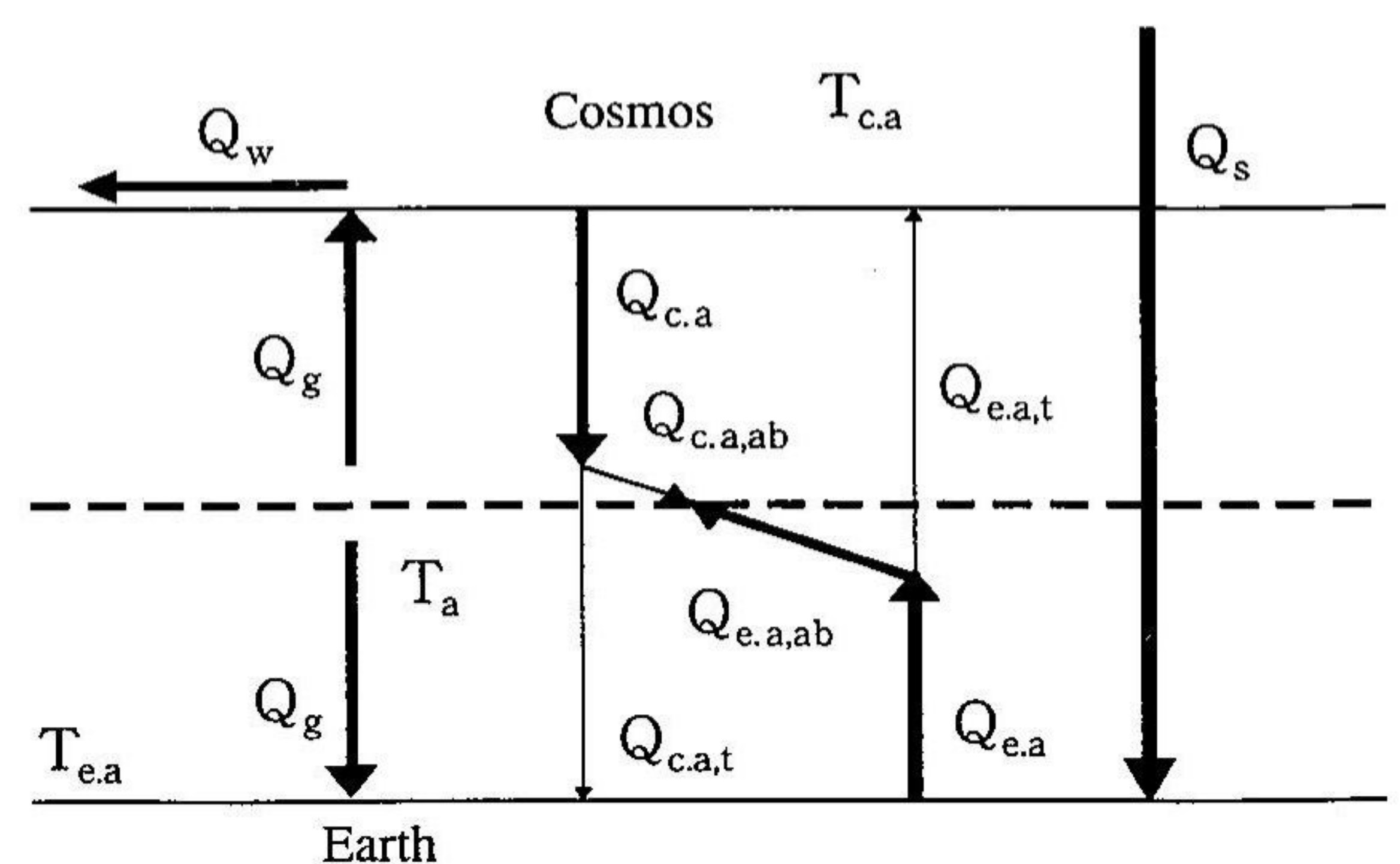


Fig.5 Heat balance model with greenhouse effect gas

4. 実験結果

4.1 円筒型実験装置による実験 円筒型実験装置を使用し、地表面を黒体面とし CO_2 、HFC134a を注入した時の実験値を Table 1 に示す。

温室効果ガス注入時の温度は乾燥空気比べて CO_2 で $0.8^\circ C$ 、HFC-134a で $1.8^\circ C$ 高くなった。これらの結果から温室効果ガスによる温暖化は検証されたと考えられる。

Table 1 Experimental results used cylindrical type apparatus

Atmosphere	T_e °C	$T_{e,a} - T_e$ °C	T_c °C
Dry air	28.0	—	8.75
CO ₂	28.8	0.8	9.0
HFC-134a	29.8	1.8	8.5

次に円筒型装置を使用し、大気を温室効果ガスのCO₂、HFC134aとした時の、地表面放射率 ϵ の温暖化に対する影響の実験結果をTable 2とFig. 6に示した。

物質は固有の放射率をもち、黒体面を1とした時の放射熱流量の割合を表す。実験で使用した地表面と上昇温度 ΔT (°C)はそれぞれTable 2にまとめた。放射率が大きくなると上昇温度も大きくなるはずであるが、テフロンでは放射率の小さい表面に較べあまり上昇しなかった。その理由としては次のような原因が考えられる。すなわち、表で示した放射率 ϵ は300Kの光の波長に対する値であるが、 ϵ は実験時の温度によって異なる。使用した白熱電球は高い温度のため300Kの時の放射率と異なる値を示していると考えられる。また、ステンレスとテフロンの ΔT の値が近いことから、テフロンの放射率を高く評価しすぎていると思われる。

Table 2 Effect of earth surface on surface temperature

Earth	Emissivity ϵ	Atmosphere	ΔT (°C)
Black body	1.0	CO ₂	0.95
		HFC134a	1.54
Teflon	0.85	CO ₂	0.61
		HFC134a	0.57
Concrete	0.65	CO ₂	0.74
		HFC134a	0.95
SUS304	0.22	CO ₂	0.53
		HFC-134a	0.46

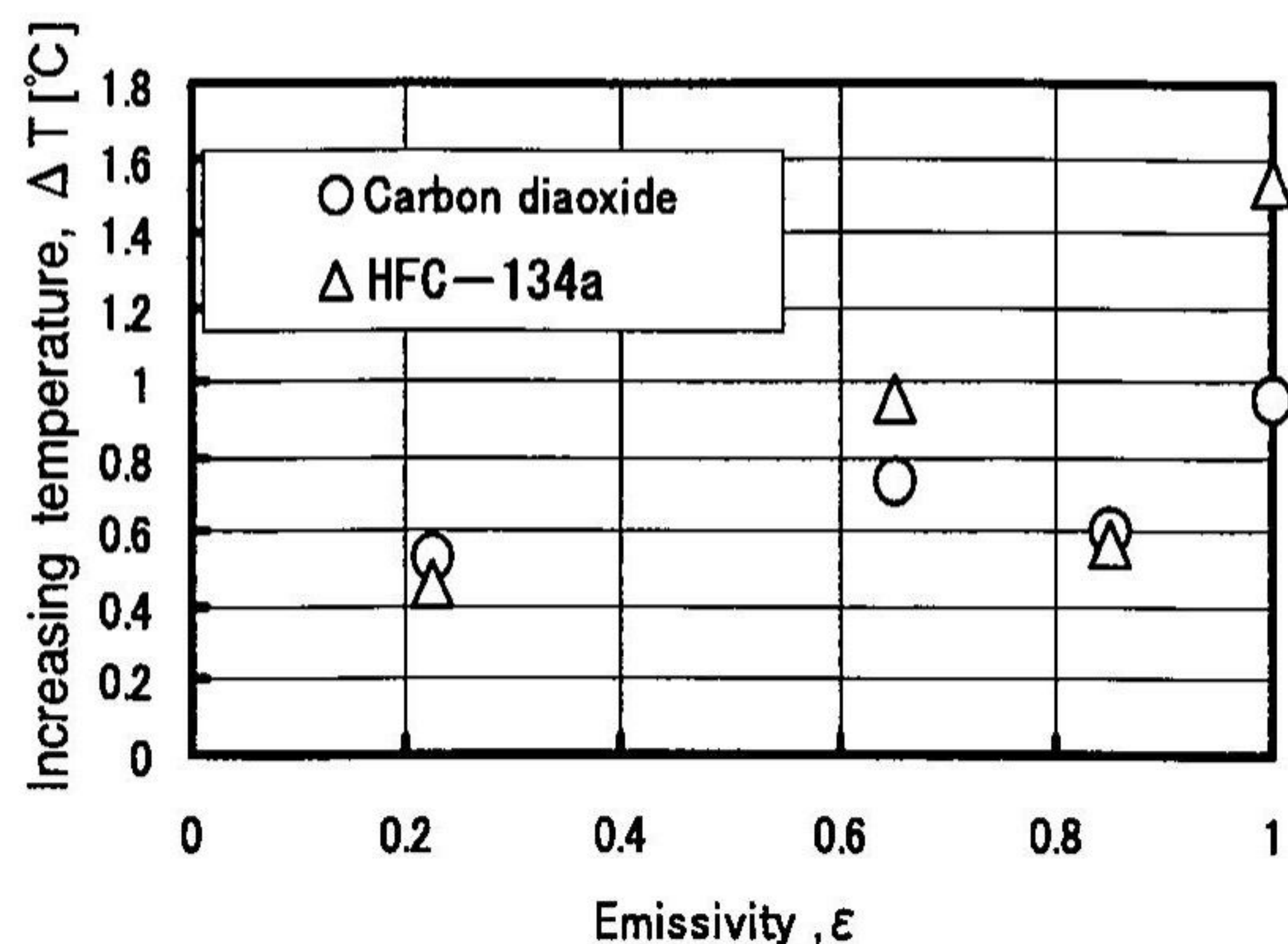
**Fig.6** Effect of emissivity of earth surface on surface temperature of earth

Fig.7に乾燥空気から開始して、CO₂とHFC-134aを注入したときの T_e と T_c の測定データを示した。乾燥空気を満たし、冷水を循環させ、ランプを点灯した状態ではほぼ定常になった時間をゼロとした。

CO₂を注入すると T_c が上昇し、少し遅れて T_e が減少する。十分にCO₂を注入した後、ガス入口と出口を閉じる。約10×60秒で定常となり、乾燥空気の地表面温度より0.5°C温度が上昇した。続いてHFC-134aを注入すると、約46×60秒ではほぼ定常となり、1.8°C温度の上昇が認められた。さらに乾燥空気を注入し、定常になった後CO₂を注入した。その結果は0.2°Cの温度上昇にとどまった。これは乾燥空気に水蒸気が含まれていたためと考えられる。

測定した実験値をTable 3にまとめた。大気が温室効果ガスの場合の地表面温度 $T_{e,a}$ は、大気が乾燥空気の場合の T_e に比べて、CO₂で平均0.35°C、HFC-134aで1.49°C高くなった。これらの結果から、温室効果ガスによる地表面温度の増加、すなわち温暖化は検証されたと判断した。

式(5)または式(6)を用いて計算した α_a は、CO₂で0.05、0.06となった。これらの値は文献値(4)の約1/2となった。HFC-134aの赤外線 α_a は、0.17、0.20となった。

4.2 直方体型実験装置による実験 直方体型実験装置を使用し地表面を黒体面としCO₂、HFC-134aを注入した時の実験値をTable 4に示す。この型の容器では、熱収支モデルが適用できると考えられる。このモデルを適用して求めた大気の吸収率も併せて示した。CO₂の結果は、文献値(4)によく一致することが分かった。

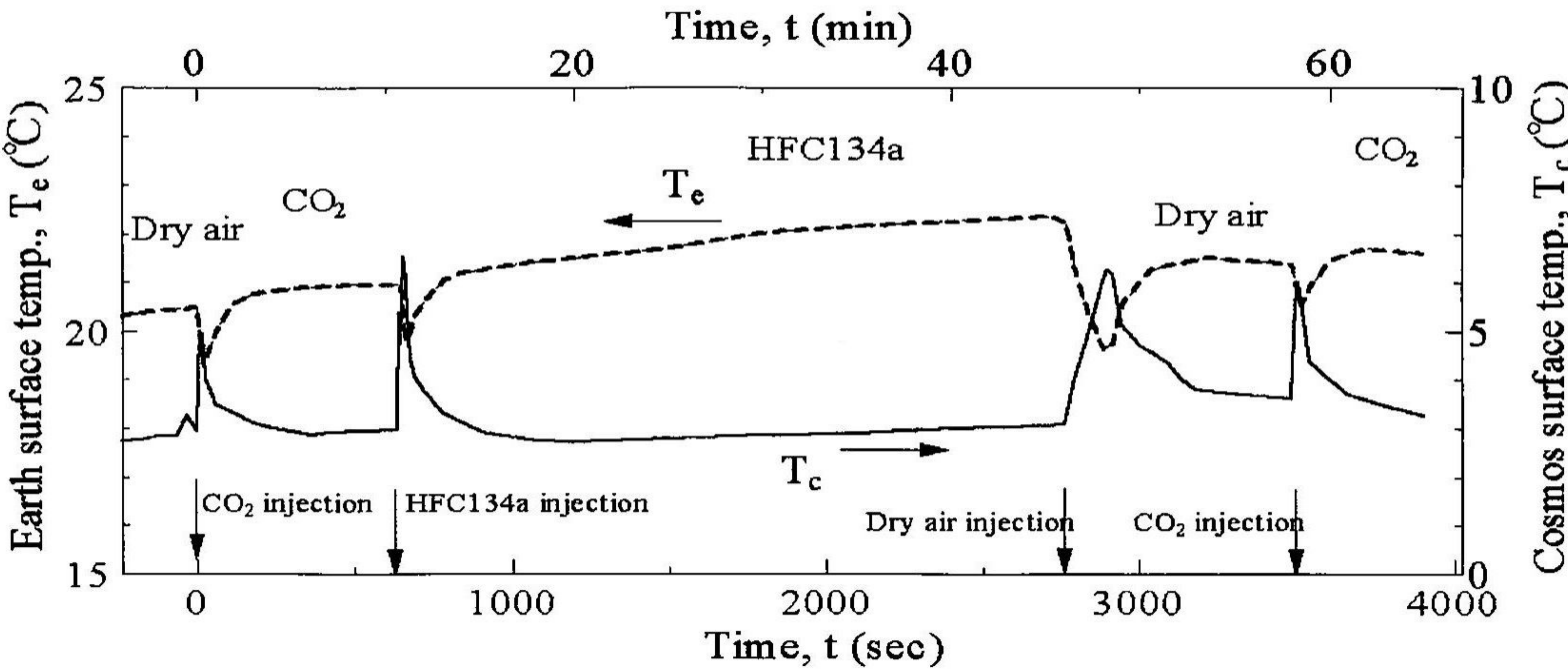


Fig.7 Experimental results of upper surface(Earth) temperature and lower surface (Cosmos) temperature

Table 3 A sreise of experimental results used cylindrical type apparatus

No.	Atomos- phere	$T_{e.a}[^{\circ}\text{C}]$	$T_{c.a}[^{\circ}\text{C}]$	$T_a[^{\circ}\text{C}]$
1	Dry air	22.2	3.5	13.0
2	HFC-134a	24.0	3.6	13.8
3	Dry air	20.5	3.0	11.8
4	CO ₂	21.0	3.0	12.0
5	HFC-134a	22.4	3.1	12.8
6	Dry air	21.4	3.6	12.5
7	CO ₂	21.6	3.4	12.5

Table 4 Experimental results used cubic type apparatus

Atomos- phere	$T_{e.a}[^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T[^{\circ}\text{C}]$	$T_{c.a}[^{\circ}\text{C}]$	$T_a[^{\circ}\text{C}]$	$\alpha_a[-]$
Dry air	13.8	—	9.09	11.4	—
CO ₂	14.0	0.20	8.84	11.4	0.18
HFC-134a	15.1	1.30	9.16	12.1	0.44

- (3) 円筒型装置を用いて、地表面の放射率が増加するほど温暖化が激しくなることを実験的に示した。
(4) 直方体型装置の結果を説明するための物理モデルに基づいた吸収率 α_a の計算を行い、CO₂では0.18、HFC-134aでは0.44となることを示しCO₂の吸収率の値は理論値と良く一致すること確認した。

【謝辞】本研究を行うに当たって、助言をいただいた横浜国立大学教育人間科学部堀雅宏教授と横浜市立鶴見工業高校の渡辺祐司教諭に感謝の意を表する。

文 献

- (1) <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/graphics/sio-mlgr.gif>
(2) 朝日新聞朝刊, 2002年8月6日。
(3) 高島・ほか2名, 機械学会関東支部ブロック講演会講演論文集, 129(2000)。
(4) H.C.Hottel and J.D.Keller:Trans.AIChE, 38, 531, (1942)。

takasima@oyama-ct.ac.jp

「受理年月日 2002年9月30日」

5. まとめ

地球温暖化現象を理解するため、物理モデルに基づいた簡単な実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 円筒型, 直方体型両方の実験装置でも, 2酸化炭素や代替フロン(HFC-134a)で, 地表を模擬した面の温度が, 乾燥空気の場合より上昇することから, 温室効果ガスによって温暖化が生じることを実験的に示した。
(2) 2酸化炭素より代替フロン(HFC-134a)の方がはるかに温暖化を引き起こしやすいことを示した。

