



Title	修正有効温度の検討
Author(s)	射場本, 勘市郎; 西, 安信
Citation	衛生工学, 11, 1-9
Issue Date	1965-10
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/36176
Type	bulletin (article)
File Information	11_1-10.pdf



[Instructions for use](#)

修正有効温度の検討

射場本 勘市郎*
西 安信**

昭和40年8月31日 受理

An Examination Of The CORRECTED EFFECTIVE TEMPERATURE INDEX

Kan'ichiro IBAMOTO
Yasunobu NISHI

Synopsis

Recently the "CORRECTED EFFECTIVE TEMPERATURE INDEX", which was presented by H.M.Vernon & C.G.Warner in 1932, is used for evaluating the conditions of thermal environment.

The authors tried to examine this index with the heat transfer theory and found out a few defects.

One of them is caused by the size of GLOBE THERMOMETER. Eq.4, indicates the globe thermometer temperature. In this equation the " α_c " is dependent on the size of globe thermometer, as shown in Fig. I.

We conclude that the normally used globe thermometer, that is 15 cm in diameter, is too small for proper measuring instrument of the thermal sensation and the equivalent sphere of human body on the thermal property is about 40 cm in diameter.

So if one uses the new globe thermometer, 40 cm in diameter, he will get proper corrected effective temperature showing in table I. But in spite of using this theoretical method it does not mean that the corrected effective temperature index is a rational index.

Facing to the basis, YAGLOU reported that the effective temperature overestimated the influence of the humidity and new index must be proposed.

So the limit of this index will be apparent.

* 産業環境工学講座教授 工博

** 大学院博士課程学生

1 序 言

筆者らは人体からの放熱を熱伝達論の立場から解析し体感温を工学的手法で定量的に表示することを試み、すでに温感線図を公表したが¹⁾、さらに環境の湿度が湿性放熱に及ぼす影響を定量的に組み込むべく研究を進めている。それに付随して過去に発表された各種温感指標の分析も合わせ行なってきた。^{2), 3), 4)}

ここで近年、特に室内環境学の分野で過信されている修正有効温度 (Corrected Effective Temperature 略して C. E. T.) について検討を試みたのでその結果をここに報告する。

2 修正有効温度

1923年 C. P. YAGLOU らにより発表された有効温度 (Effective Temperature Index) はふく射環境についてはふれていないが、実際問題としてはふく射の効果を無視するわけにはゆかないことが多く、これをふく射環境にも拡張使用する目的で修正有効温度が提案された。

歴史的にさかのぼれば1932年英国の H. M. VERNON & C. G. WARNER が当時の支配的温感指標であった乾球温度、湿球温度、さらに彼らの所産である修正有効温度と人体の生理反応についての相関を生体実験を基に検討を加えたのが始まりと思われる。⁵⁾

VERNON らはふく射を導入するため VERNON 自身が1930年に考案⁶⁾した直径15cmのグローブ温度計の示度を乾球温度の代わりに用いることを試みた。すなわち VERNON の方法は YAGLOU の有効温度図表の乾球温度目盛にそのままグローブ温度計の示度を読み替え、さらに湿球温度が $x \text{ deg.}$ 上昇(下降)したとき湿球温度は $\frac{1}{4}x \text{ deg.}$ 上昇(下降)するという関係より仮定の湿球温度を求めそれを代入する。(湿球温度が断熱飽和温度であるとする湿り空気線図上ではこの様な関係は成立しない。データを分析すれば相対湿度を ANGOT の式を基にして求めていることがわかる。)

VERNON はしかるべく修正を行なつた修正有効温度と生体の生理反応の間に相関のあることを報告している。なお、この実験において輻射の強さは気流 $20 \sim 30 \text{ cm/sec}$ のもとでグローブ温度と乾球温度の差が最大 1.5 deg. (C) 、平均して 0.5 deg. 程度でふく射壁としての効果は微少な環境である。

しかるに1950年米国で修正有効温度⁷⁾ (Equivalent Effective Temperature Corrected for Radiation)として乾球温度には VERNON と同じく直径15cmのグロー

1) 射場本勘市郎; 温感についての工学的研究とその暖冷房への応用 1956

2) 同上

3) 射場本勘市郎, 西 安信; 不快指数の不解性, 衛生工学 No10 1965 p9

4) 射場本勘市郎, 西 安信; 温熱環境の試作測器, 衛生工学 No9 1964 p33 など

5) Vernon, H.M.; Warner, C.G.; The Influence of the Humidity of the Air on Capacity for Work at High Temperatures. Journal of Hygiene, London Vol.32 431 1932

6) Vernon, H.M.; The Measurement of Radiant Heat in Relation to Human Comfort. J. Physiol. Proc. Vol.70 1930

7) American Journal of Public Health and Nation's Health, YEAR BOOK Vol.40 1950 p143

ブ温度計の読みを、さらに湿球温度には相当湿球温度 (Equivalent Wet Bulb Temperature) として絶対湿度一定のまま気温がグローブ温まで上昇した時に示すべき仮定の湿球温度 (Fig. 6 参照) を読み替えて用いる様定めてある。その後、我国におけるこの分野の参考書にはこの手法を引用してある。⁸⁾

3 ふく射計としてのグローブ温度計の意義

グローブ温度計を空気中に放置したとき、グローブ温度、周囲空気及び周壁との間には次の方程式が成立つとされている。

$$T_p = T_g + 2.37\sqrt{v} (T_g - T_a) \quad (1)$$

但し T_p : 平均周壁温 [°C]

T_g : グローブ温度 [°C]

v : 気流 [m/sec]

T_a : 気温 [°C]

(上式は直径 15 cm のグローブ温度計についてのみ適用)

ここで上式とは別にグローブ温度計と周囲との間に熱平衡式を立ててみると

$$\alpha_{rg}(T_g - T_p) + \alpha_{cg}(T_g - T_a) = 0 \quad (2)$$

$$\therefore T_p = T_g + \alpha_{cg}/\alpha_{rg} \cdot (T_g - T_a) \quad (3)$$

又は

$$T_g = \frac{\alpha_{cg} \cdot T_a + \alpha_{rg} \cdot T_p}{\alpha_{cg} + \alpha_{rg}} \quad (4)$$

但し α_{cg} : 対流熱伝達率 [Kcal/m²h°C]

α_{rg} : ふく射熱伝達率 [Kcal/m²h°C]

Suffix g: globe を意味する

球の外面の熱伝達率 α_c は RANZ & MARSHALL による次の関係式から求められる。^{9)*}

$$Nu = 2.0 + 0.6 Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

但し Nu : Nusselt Number

Pr : Prandtl Number

Re : Reynolds Number

(5)式に示す様に対流熱伝達率 α_{cg} は球の寸法及び風速によつて大きく左右される値であり、たとえ風速が同じであつても球の直径が違えば巾広く変化する。その関係を Fig. 1 に示す。

8) 日本建築学会編; 建築学便覧 P 1401 1956 丸善 など

9) 日本機械学会編; 伝熱工学資料 P 41 1962

* 球外面の対流熱伝達率については諸氏の実験公式が提案されている。末尾の APPENDIX に主なものを掲げる。

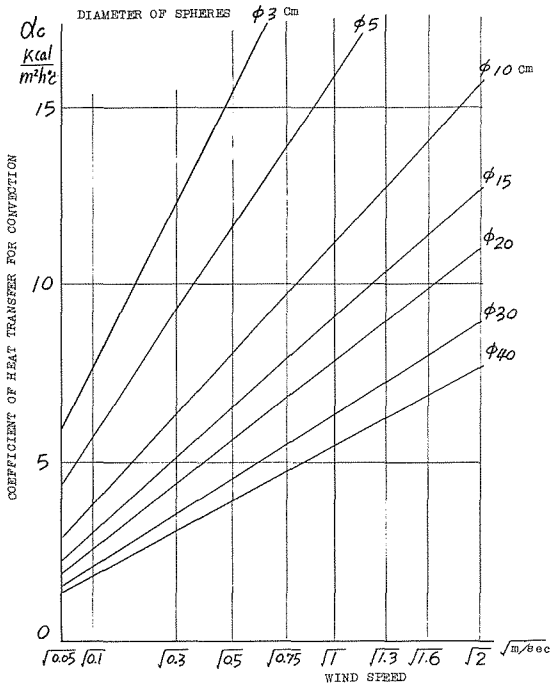


Fig.1, 球の対流熱伝達率
Coefficient of Heat Transfer
between Spheres and Air

このことより(4)式にて示されるグローブ温度計の示度は、気温 T_a 、周壁温 T_p および気流 v が与えられても球の寸法が違えば Fig. 2 に示す様に変化する。同様に球の寸法を固定したとき、気流と示度の関係を Fig. 3 に示す。Fig. 1 から知れる様に球の寸法によってふく射効果の現われ方が違ってくるのであるから、直径 15 cm のグローブ温度計がふく射を評価する温感計器として妥当かどうかということが問題となる。(直径 15 cm の由来をさかのぼれば VERNON は手許にあつた浮子を利用して製作したと聞く)

グローブ温度計の示度から直ちにふく射の影響を人体と同等に表わす様な、理想的には人体に等しい形状の、かつ同一のふく射率を

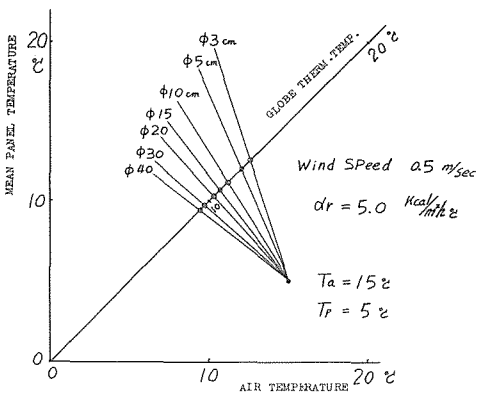


Fig.2. グローブ温度計の寸法と示度の関係
Relation between Globe
Thermometer's Diameter
and Indication

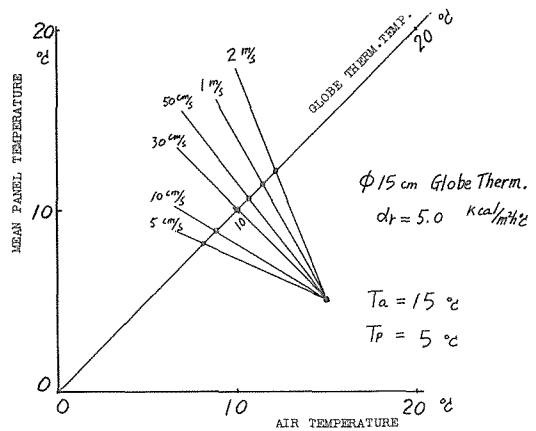


Fig.3. 気流とグローブ温度計の示度の関係
Relation between Indication of Globe Thermometer and Wind Speed.

有するマネキンを用いるべきであろう。しかしその様なものは容易には得られないだろうしまた測定においての不便さもまぬがれない。人体と熱的に等価な球の寸法は次の方法によつて見当つけることができよう。まず人体を理想化して直径30cmの円筒模型放熱体と等価であると見なすのはほぼ妥当と思われる。直径30cmの円筒と各種寸法の球の対流熱伝達率を比較してみたのがFig. 4である。

Fig. 4の関係から通常風速域では人体等価球の直径はほぼ40cmであると考えられよう。また直径15cmの球の等価円筒の直径はわずか8cmでありこの寸法のグローブ温度計をふく射効果を表わす温感計器として用いることは不合理と考えられる。

ふく射率については太陽などの直射を除けば一般に比較的低温の低い長波長ふく射が問題となるので皮膚面や衣服表面はほぼ黒体と考えてよい。

4 修正有効温度の手法の検討

修正有効温度を求めるとき有効温度図表の乾球温度にグローブ温度計の示度を読み替えることは次の様に考えられる。

人体からの放熱のうち湿性放熱量を固定して乾性放熱量についてのみ考えると次の熱平衡式が成立つ。

$$H_r + H_c = \alpha_r m (T_s - T_p) + \alpha_c m (T_s - T_a) \quad (6)$$

$$= (\alpha_r m + \alpha_c m) (T_s - T_o) \quad (7)$$

$$T_o = \frac{\alpha_r m \cdot T_p + \alpha_c m \cdot T_a}{\alpha_r m + \alpha_c m} \quad (8)$$

但し T_s : 平均皮膚温又は平均衣面温

Suffix m: mは人間を意味する。

T_o は作用温度 (Operative Temp.) としてすでに理論的取扱いのされているものである。すなわち乾性放熱は体表面と気温および周壁温との合成による T_o との間の熱交換と考えられる。このことは T_o 或は T_p が任意の値をとつても(8)式にて定まる T_o が等しければ、その環境の温熱条件は生体にとって熱的に等価であると考えてよい。この関係を示したのがFig. 5である。 T_o^* を通過する任意の風速線上にてきまる T_{an} , T_{pn} の組合せは等しい T_o を与える環境である。

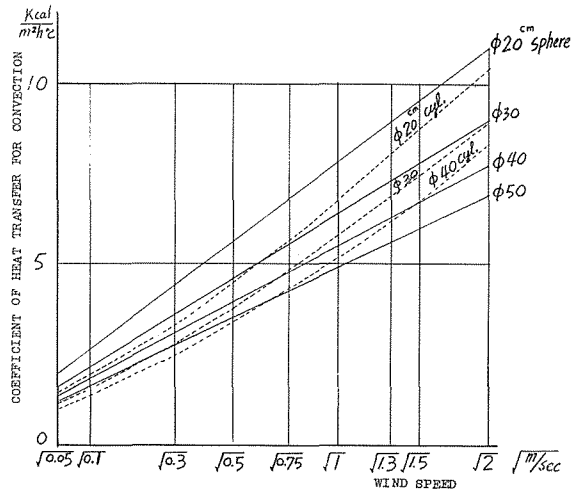


Fig. 4. 人体等価球の寸法
Equivalent Sphere of Human-body on Thermal Property

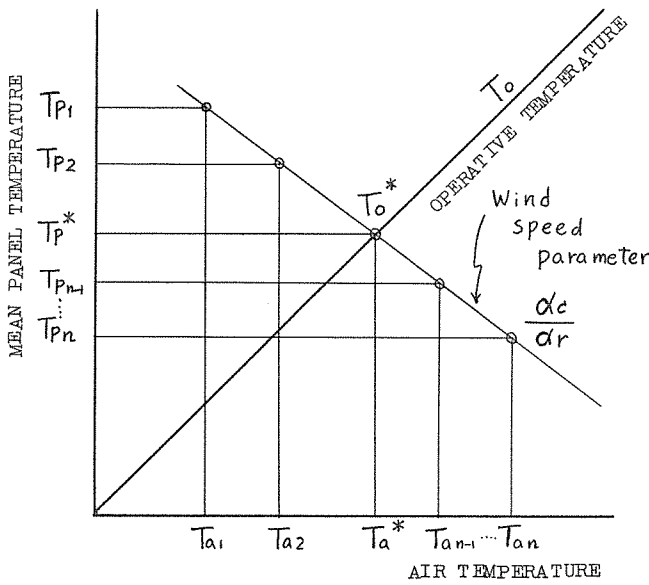


Fig.5. 作用温度と気温、周壁温の関係
Relation between Air Temp., Mean Panel Temp. and Operative Temperature

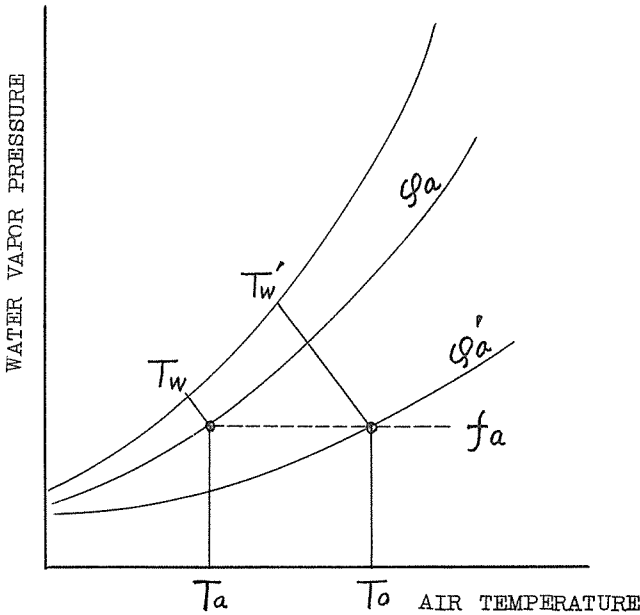


Fig.6. 湿り空気線図上での相当湿球温度の表示
Equivalent Wet Bulb Temp. on the Psychrometric Chart.

(4)式および(8)式において $\alpha_{rg} = \alpha_{rm}$
 $\alpha_{cg} = \alpha_{cm}$ とすれば

$$T_g = T_o (= T_a^* = T_p^*) \quad (9)$$

ここで人体と熱的に等価のグローブ温度計の示度は T_o に等しいという関係が得られる。有効温度図表は気温と周壁温が等しい環境で適用すべきものであるゆえ、乾球温度と T_o とを読み替えることによつてふく射が導入されることになる。

湿性放熱のうち大部分は体表面と空気中の水蒸気分圧差に基づく物質伝達現象に伴うものなので、ふく射壁の存在は湿性放熱にはほとんど影響を及ぼさないと考えてよい。したがつて有効温度図表の湿球温度目盛に測定された湿球温度をそのまま用いれば実際のものを生じる。すなわち気温が T_a から T_o に変動すると見なすとき湿球温度は水蒸気圧一定という拘束をつけたまま Fig. 6. に示す様に T_w から T_w' (相当湿球温度) に読み替えて用いるべきである。

T_o は現実に人体等価グローブ温度計にて得られる量であるが、 ϕ'_a および T_w' は対象としている環境にあつては物理的に意味をもたない量である。 ϕ'_a および T_w' は気温 T_o 、水蒸気圧 f_a なる環境の下でのみ得られる。

T_w' は湿球温度に対応して湿グローブ温度計の示度ではなかろうかとの期待も起こるが次の関係より否定される。

湿球温度計の熱平衡式

$$\alpha r_w(T_w - T_a) + \alpha c_w(T_w - T_a) + \beta_w(P_w - P_a) = 0 \quad (10)$$

グローブ温度計の熱平衡式

$$\alpha r_g(T_g - T_p) + \alpha c_g(T_g - T_a) = 0 \quad (11)$$

同一寸法の湿グローブ温度計の熱平衡式

$$\alpha r_g(T_{wg} - T_p) + \alpha c_g(T_{wg} - T_a) + \beta_{wg}(P_{wg} - P_a) = 0 \quad (12)$$

但し P_{wg}, P_a : 水蒸気圧 [mmHg]

β_w, β_{wg} : 蒸発に伴う熱伝達率 [$\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}\cdot\text{mmHg}$]

Suffix w: wet を意味する

wg : wet Globe を意味する

(11), (12)式よりグローブ温度と湿グローブ温度の関係式が導かれる。

$$\alpha r_g(T_{wg} - T_g) + \alpha c_g(T_{wg} - T_a) + \beta_{wg}(P_{wg} - P_a) = 0 \quad (13)$$

(10)および(13)式を比較すれば同形の式ではあるが $\alpha c_w, \beta_w$ は湿球温度計の球部の寸法によつてきまる値であり、ここで注目している湿グローブ温度計についての $\alpha c_g, \beta_{wg}$ と比較するとかなり大きな値である。

結局 $T_g = T_0$ であつても T_a と T_w の関係を表示している湿り空気線図上では T'_w と T_{wg} とは無関係であることがわかる。

ちなみに湿球温度計では球部に当る風速を $5 \text{ m}/\text{sec}$ 以上としなければ断熱飽和温度は得られないとされているから、球部の直径を 5 mm と見なせば理論的に $\alpha c_w = 50 [\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}\cdot\text{C}]$, $\beta_w = 171 [\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}\cdot\text{mmHg}]^{**}$ となる。同じ条件の下では直径 40 cm の湿グローブ温度計の $\alpha c_g, \beta_{wg}$ はそれぞれほぼ $1/4$ となる。

またグローブ温度計を用いるに当つて気流の適用範囲のないこともつけ加えておく。

以上の結論として、特別の高温ふく射環境でない限り修正有効温度を求めるには人体と熱的にほぼ等価であると考えられる直径 40 cm のグローブ温度計の示度を用いることがより理にかなつていくことがわかる。

5 φ15修正有効温度とφ40修正有効温度の比較

使用するグローブ温度計の寸法によつて修正有効温度は差を示すので、表記の様にそれを区別して呼ぶことにする。ある参考書に用いられている例題をもとにしてこれらの差について比較を試みる。

例題

乾球温度 25 C , 湿球温度 20 C , 風速 $1 \text{ m}/\text{sec}$, かつグローブ温度 30 C のとき $E \cdot T$, φ $15 \text{ C} \cdot E \cdot T$ および φ $40 \text{ C} \cdot E \cdot T$ を比較せよ。

** 蒸発に伴う熱伝達率については特に発汗に伴う熱移動の問題と合せて近く発表の予定である。

解

(3)式より $T_p=39.0^{\circ}\text{C}$ を得る。

(4)式より $T_g \phi 40=31.7^{\circ}\text{C}$ を得る。

相当湿球温度はそれぞれ

$$T_w' \phi 15 = 21.5^{\circ}\text{C}$$

$$T_w' \phi 40 = 22.0^{\circ}\text{C}$$

YAGLOUの有効温度図表のBasic Chart およびNormal Chart からE.T, $\phi 15$ C.E.T, $\phi 40$ C.E.Tを求めた結果はTable 1に示される。

	Basic Chart	Normal Chart
E.T	21.2 $^{\circ}\text{C}$	18.8 $^{\circ}\text{C}$
$\phi 15$ C.E.T	24.5 $^{\circ}\text{C}$	22.7 $^{\circ}\text{C}$
$\phi 40$ C.E.T	25.6 $^{\circ}\text{C}$	23.8 $^{\circ}\text{C}$

Table 1. E.T, $\phi 15$ C.E.T, $\phi 40$ C.E.T の関係
Relation between E.T, $\phi 15$ C.E.T and $\phi 40$ C.E.T.

結局正しいと考えられる $\phi 40$ C.E.T に比べて $\phi 15$ C.E.T は75%程度しかふく射効果を表わしていないことがわかる。

あ と が き

いままで室内環境学の分野で無批判に用いられてきた修正有効温度について熱伝達論の立場から理論的解析を加えた結果、グローブ温度計の寸法に起因する不合理さを見出した。従来用いられてきた直径15cmのグローブ温度計では人体に比べてふく射を過少に評価するので、その歪を除くため直径40cmのグローブ温度計を用いることが必要と考えられる。

しかしここに提案した方法を用いることにより修正有効温度が正当化されるものではない。すでにYAGLOUやその他の研究者により有効温度そのものが特に気湿の評価という点で不完全さを有していることが指摘されている。¹⁰⁾ 修正有効温度の基盤である有効温度の歪を考え合せるなら在来の修正有効温度の不都合さは明白であろう。

10) YAGLOU, C.P.; A Method for Improving the Effective Temperature Index, ASHVE Trans. Vol. 53 1947 P307

APPENDIX

球の強制対流熱伝達率については諸氏により理論的考察をへた実験公式が提案されている。主なものを下に掲げその関係をグラフに示す。

McADAMS の式¹¹⁾, ¹²⁾

$$1. \quad Nu = 0.37 Re^{0.6} \quad 17 < Re < 7 \times 10^4$$

$$2. \quad Nu = 0.33 Re^{0.6} \quad 20 < Re < 3.15 \times 10^6$$

RANZ & MARSHALL の式¹³⁾

$$Nu = 2.0 + 0.6 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad 1 < Re < 7 \times 10^4$$

弓削の式¹⁴⁾

$$Nu = 2.0 + 0.55 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad 10 < Re < 1.8 \times 10^3$$

$$Nu = 2.0 + 0.34 Pr^{1/3} Re^{0.566} \quad 1.8 \times 10^3 < Re < 1.5 \times 10^5$$

KUDRJASCHEF の式¹⁵⁾

$$Nu = 2.0 + 0.33 Re^{0.5}$$

CARRY の式¹⁶⁾

$$Nu = 0.37 Re^{0.53} \quad 44000 < Re < 1.5 \times 10^5$$

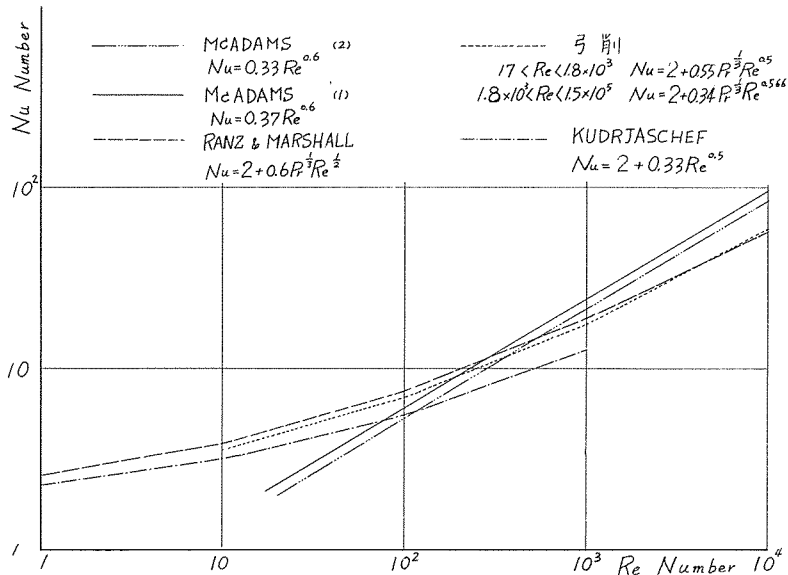


Fig. 7. 球の強制対流熱伝達率について諸氏の式
Data for Heat Transfer between
Sphere and Air

11) McADAMS, W.H; Heat transmission 3rd Ed. P265 McGraw Hill

12) Gröber 他 坪内訳; 熱伝達の基礎 P268 朝倉書店 (1963)

13) 日本機械学会編; 伝熱工学資料 P41 (1962)

14) 甲藤好郎; 伝熱概論 P163 養賢堂 (1964)

15), 16) 12) に同じ