

【整番】 HE-02-TM-003	【標題】 BS5970 による外表面熱伝達係数の算定
分類：熱(熱伝達)／種別：技術メモ	作成年月：H18.8／改訂：Ver0.0 (H18.9) 作成者：N. Miyamoto

全 9 枚

## 1. はじめに

断熱材の厚みや放散熱量の計算では、その外表面の熱伝達係数が効いてくる。しかし JIS A9501<sup>(1)</sup>などをみてもその設定方法の記載はない。そこで、本 TS では、

BS 5970 ; 1981 Thermal insulation of pipe-work and equipment

( in the temperature range  $-100^{\circ}\text{C}$  to  $+870^{\circ}\text{C}$  )

の 34.5 Surface coefficient に示される係数の設定方法を紹介する。

## 2. 外表面熱伝達係数 f の計算式

(1) 伝熱量を概算する場合には次の熱伝達係数を用いる。但し、温度差はごくわずかとする。

放射率の低い表面(例えば研磨アルミのような輝金属表面)：  $f = 5.7$

放射率が中程度の表面(例えば平滑/メッキ加工鋼,アルミ塗料等)：  $f = 8.0$

放射率の高い表面：  $f = 10.0$

(2) 伝熱量を精算する場合は次の熱伝達係数式を用いる。なお、外気は静止空気とする。

$$f_{r+c} = q_{r+c} / (\theta_2 - \theta_m)$$

$$q_{r+c} = 5.67E \left[ \left\{ \left( \frac{\theta_2 + 273}{100} \right)^4 - \left\{ \left( \frac{\theta_m + 273}{100} \right)^4 \right\} + \{FC(\theta_2 - \theta_m)^{1.25}\} \right]$$

ここで  $f_{r+c}$  = 輻射+対流による熱伝達係数(W/m<sup>2</sup>K)、

$q_{r+c}$  = 外表面の[輻射+対流]による放熱/吸熱量即ち交換熱量(W / m<sup>2</sup>)

E = 表面放射率(表 4.1<sup>(2)</sup>)、 $\theta_2$  = 断熱材の外表面温度(°C)、 $\theta_m$  = 大気の静止空気温度(°C)

C = 係数(下記による)

層流ケース：代表寸法が 250~500mm 以下のとき

$$C = 2.88B/D^{0.25} \quad (B, D \text{ については下記による}) \rightarrow \text{Fig.41}$$

外表面形状	代表寸法 D	対流定数 B
垂直平面、垂直大径円筒面	”高さ”	1.35
水平平面—上向き伝熱面	”サイド(幅)”	1.30
水平平面—下向き伝熱面	”サイド(幅)”	0.60
水平円筒面、垂直小径円筒面	”径”	1.15

乱流ケース：代表寸法が 250~500mm を越えるとき

外表面形状	対流定数 B	係数 C
垂直平面、垂直大径円筒面	1.45	1.0
水平平面—上向き伝熱面	1.70	1.17
水平円筒	1.20	0.83

B = 対流定数(-)、D = 代表寸法(mm)、F = 定数(-)

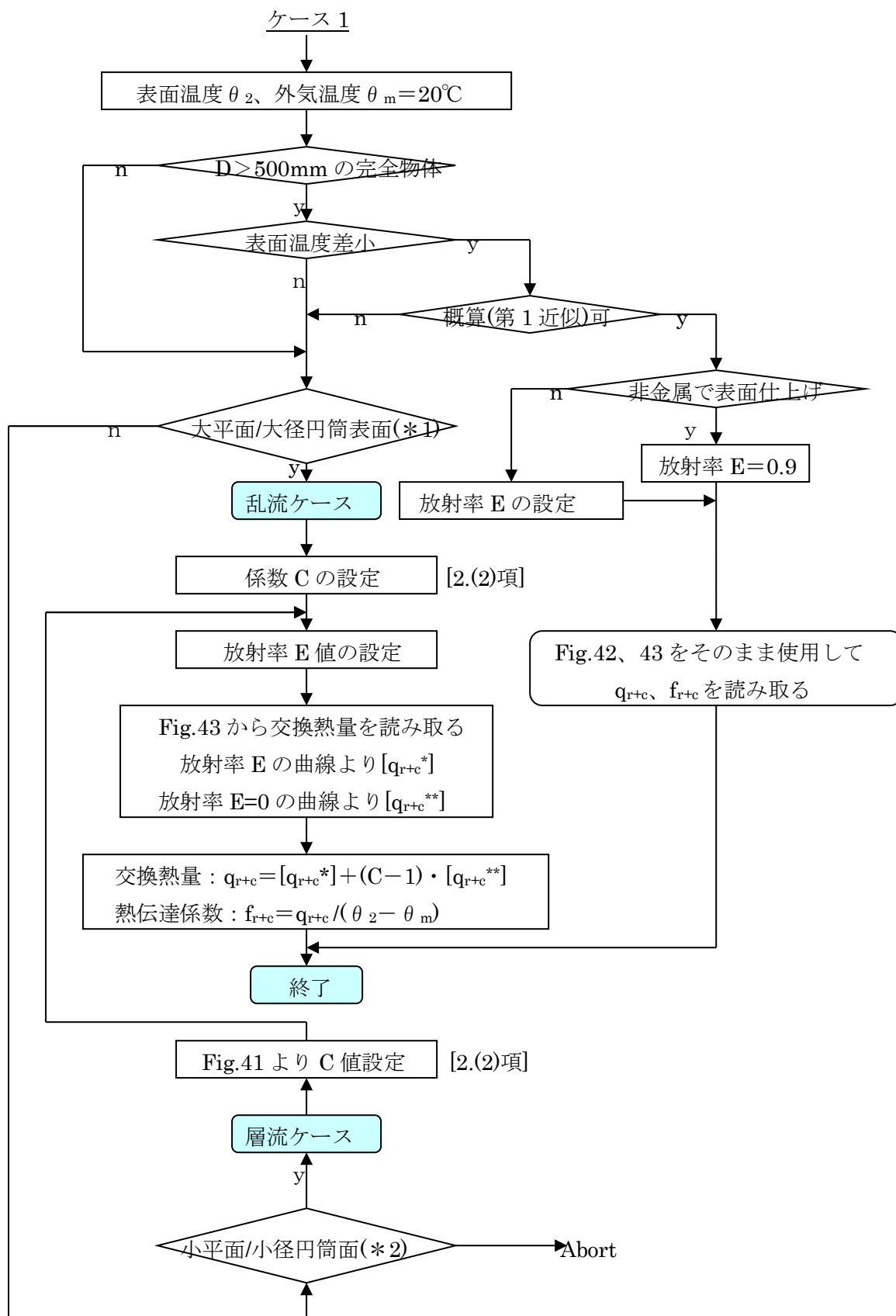
なおこの式には定数 F が含まれているが、BS5970 にはこの定数の値は与えられていないので実質  $f_{r+c}$ 、 $q_{r+c}$  は計算できない。その代わり  $f_{r+c}$  と  $q_{r+c}$  は Fig.42 と Fig.43 から求められるようになっている。ただ、算定には手順があるのでチャートの形にして次項でこれを示す。

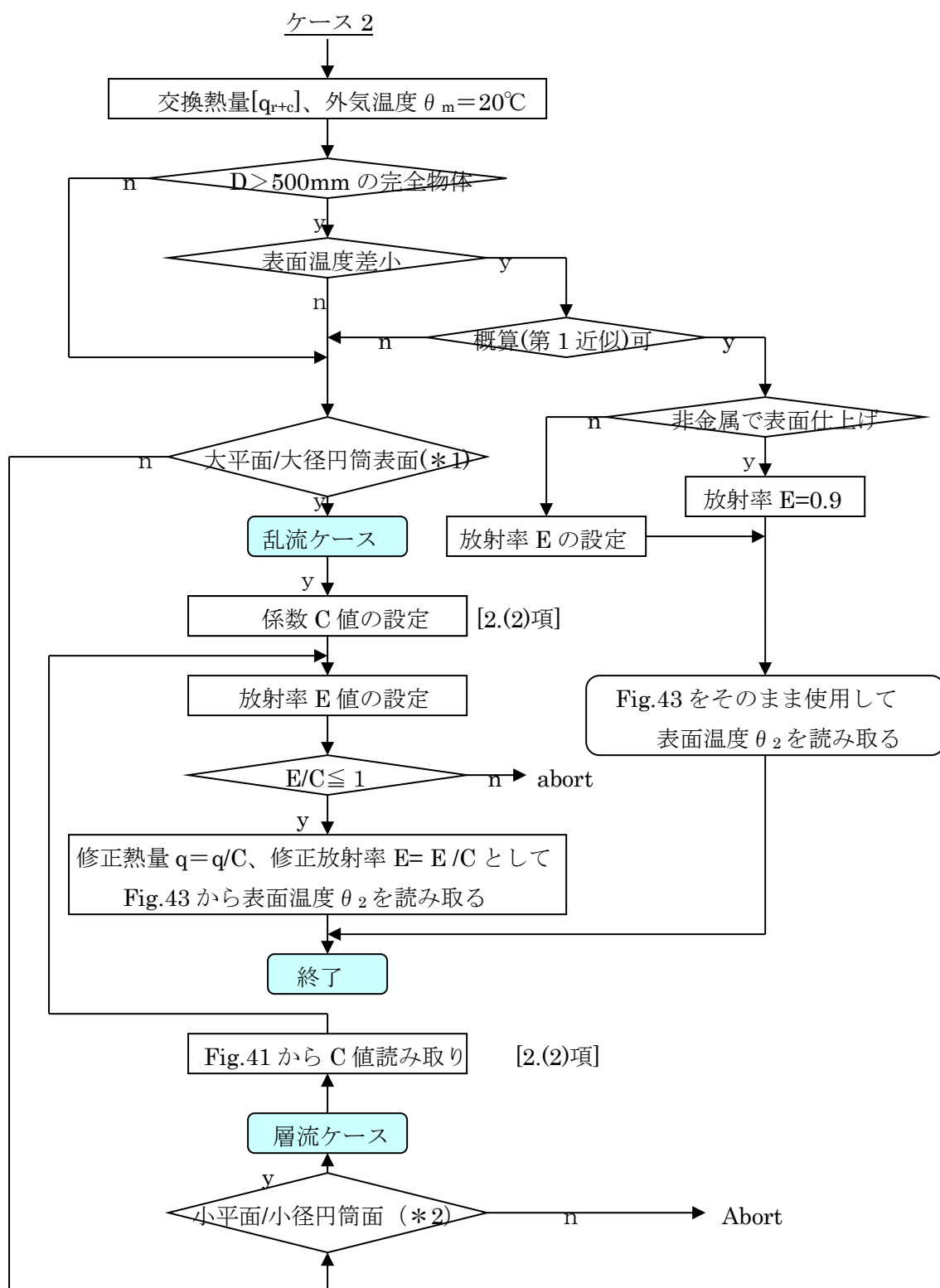
### 3. 計算の手順

次の2つのケースについて外表面の熱伝達係数  $f_{r+c}$ 、交換熱量  $q_{r+c}$  の算定手順を示す。

ケース 1. 表面温度が既知で、交換熱量が未知のとき

ケース 2. 交換熱量が既知で、表面温度が未知のとき





(\*1) 代表寸法が 300mm 程度を越えるようなもので、乱流ケースとして扱う。

(\*2) 代表寸法が 300mm 程度以下のもので、層流ケースとして扱う。

#### 4. 例題

内面温度 250°C/表皮温度 50°C/外気温 20°C の 100A 配管に設けたロックウール保温外表面の熱伝達係数を求めよ。なお、外表面材はアルミ塗装材、また配管は水平置きである。

\*\*\*\*\*

JISA9501などをみると保温材の厚さは110mm程度なので、外径は330mm程度となる。従って代表寸法D(ここでは直径)は300mmを超えるので当該表面は大径円筒面[乱流ケース]に分類される。その場合、2.(2)項の表よりC=0.83になる。また、放射率Eは表4.1より0.4~0.7、ここでは放熱を考えて安全側に0.7とする。Fig.43を用いて、

$$\text{放射率 } E=0.7/\text{表面温度 } 50^{\circ}\text{C}\text{について } q_{r+c}=280 \text{ W/m}^2$$

$$\text{放射率 } E=0/\text{表面温度 } 50^{\circ}\text{C}\text{について } q_{r+c}=130 \text{ W/m}^2$$

$$\text{従って、} q_{r+c}=[q_{r+c}^*]+(C-1) \cdot [q_{r+c}^{**}]=280+(0.83-1) \times 130=258 \text{ W/m}^2$$

$$f_{r+c}=q_{r+c}/(\theta_2-\theta_m)=258/(50-20)=8.6 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.4 \text{ k cal/m}^2\text{hr}^{\circ}\text{C})$$

なお、当該表面を層流ケースとして検討すると、表41よりC=0.78程度(計算でも然り)。従って

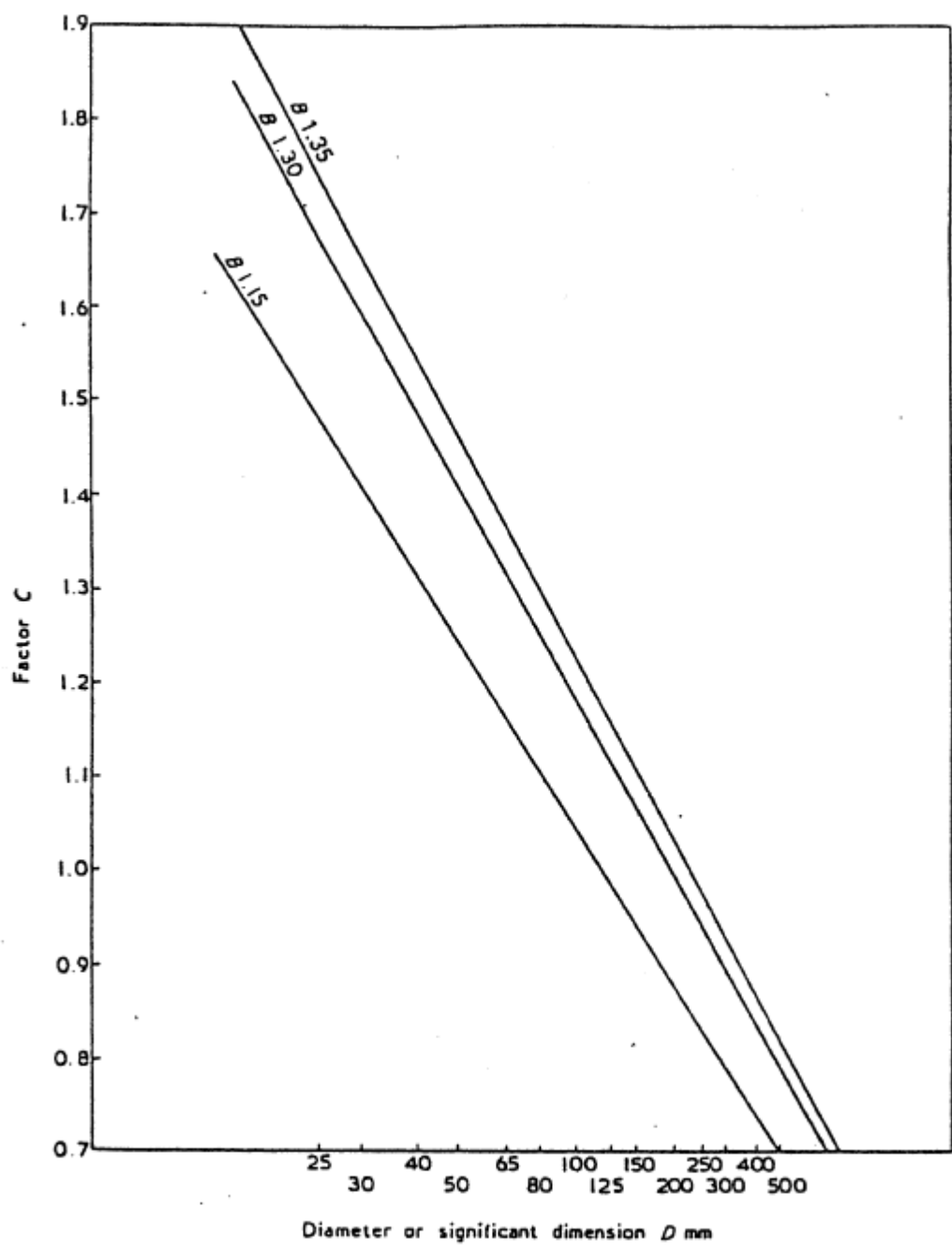
$$q_{r+c}=[q_{r+c}^*]+(C-1) \cdot [q_{r+c}^{**}]=280+(0.78-1) \times 130=251 \text{ W/m}^2$$

$$f_{r+c}=q_{r+c}/(\theta_2-\theta_m)=251/(50-20)=8.37 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.2 \text{ k cal/m}^2\text{hr}^{\circ}\text{C})$$

(実際は、予め保温厚さを仮定しているのので、以上で得られた熱伝達係数を用いて保温厚みを計算し仮定が大きく狂っていないことを確認する必要があるが、ここでは割愛する。)

第4.1表 種々の面の放射率ε

物 質	温 度 [°C]	放射率	物 質	温 度 [°C]	放射率	
純粋金属(電気抵抗の著しく高いものを除く)	常温	0.04	鋳鉄(黒皮)	常温	0.7~0.8	
	540	0.07		1093		0.95
	1093	0.14		常温~540		0.79
	1650	0.25				
色面(塗料, れんが)	常温	0.95	ガラス	90	0.88	
	540	0.70	水および平滑な水面	0	0.97	
	1093	0.45	紙	95	0.89	
	1650	0.35	木	70	0.91	
暗色塗装面	常温	0.95	ゴム(硬)	23	0.95	
	540	0.85	ゴム(軟)	24	0.86	
	1093	0.80	ルーフィングペーパー	21	0.91	
	1650	0.75	各種耐火材料	常温	0.9	
アルミニウム塗料 鉄(研磨)	常温	0.4~0.7		540	0.3~0.8	
	常温		0.06	1093	0.3~0.9	
	540		0.12	1560	0.2~0.9	
	1093		0.22	1650	0.28	
鋳鉄(研磨)	常温	0.07	溶融軟鋼	315	0.29	
	540	0.14	溶融鋳鉄			
	1093	0.23	研磨面に油の付着した場 合			
	1650	0.28	清潔な面	常温	0.06	
圧延鋼板	常温	0.56	0.02 mm の油付着	◇	0.22	
			0.05 mm	◇	0.45	
			0.2 mm	◇	0.81	



NOTE. See 34.5.5, 34.5.7 and 34.5.8.

Figure 41. Modifying factor C for heat-loss curves (streamline flow)

Fig.41 代表寸法-修正係数 C の関係

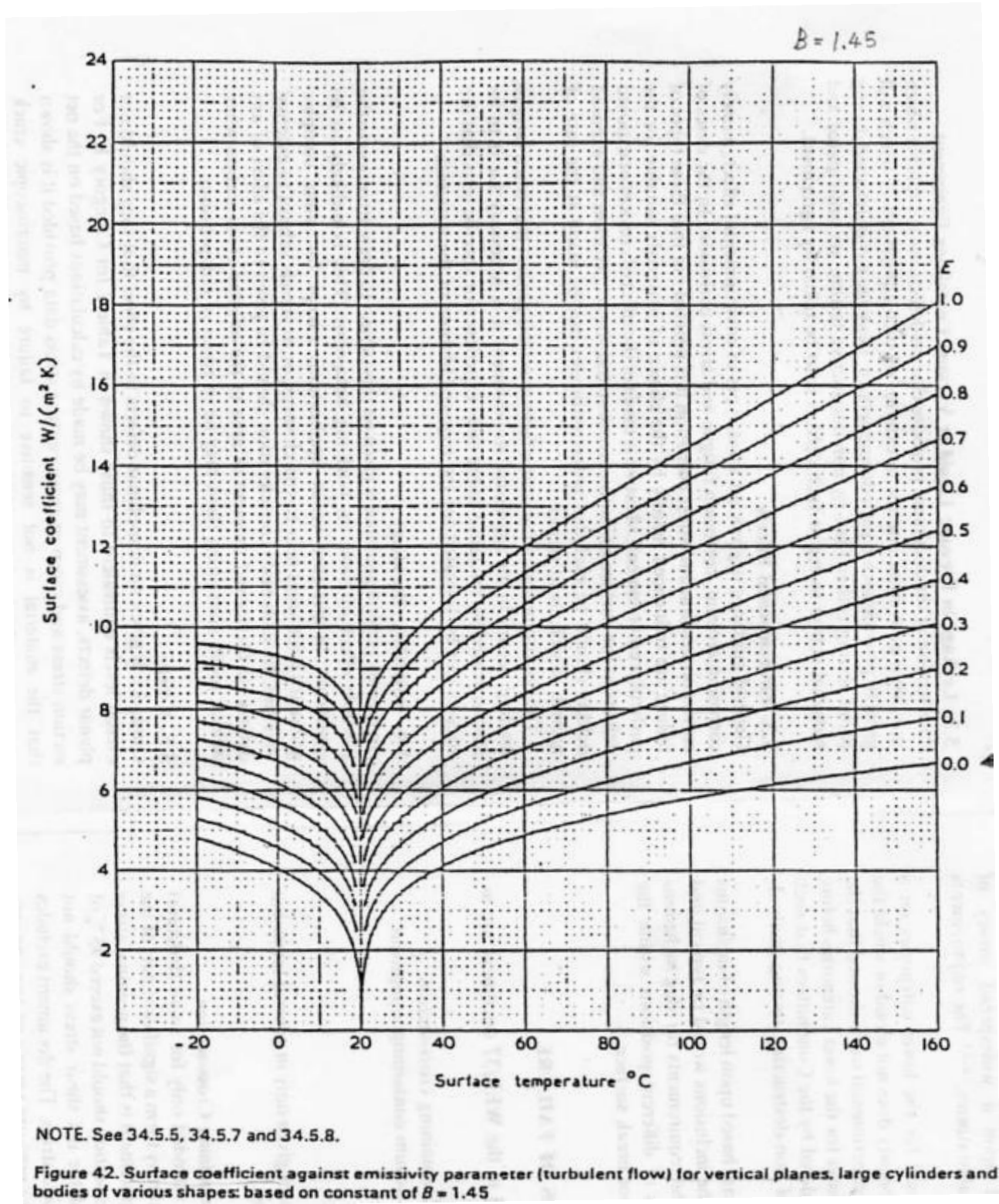
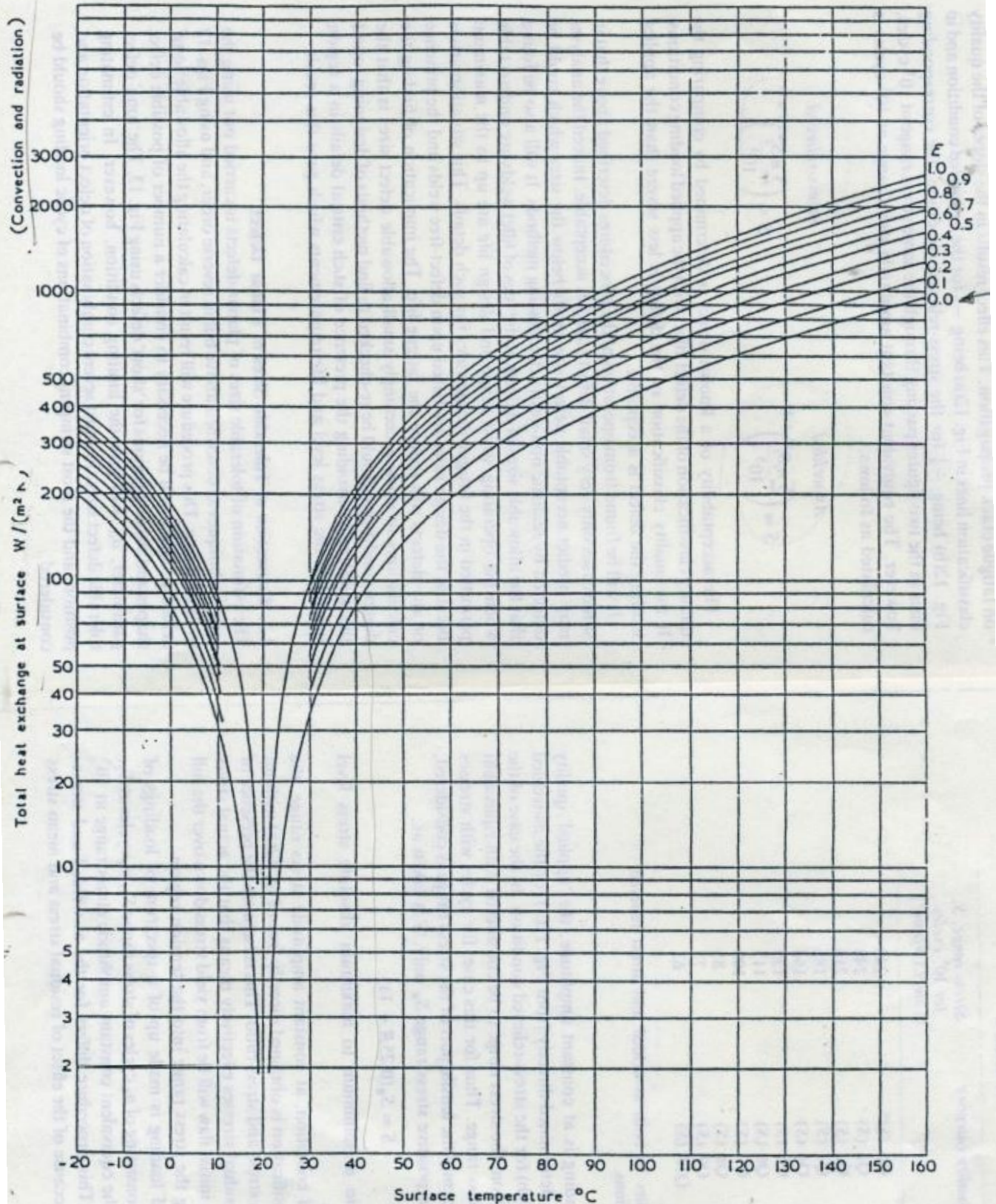


Fig.42 表面温度－全熱伝達係数の関係

縦軸：全熱伝達率 ( $f_{r+c}$ ) / 横軸：表面温度



NOTE. See 34.5.7 and 34.5.8.

Figure 43. Total heat exchange to still atmosphere at 20  $^{\circ}C$  (turbulent flow): based on constant of  $B = 1.45$

Fig.43 表面温度－全交換熱量( $q_{r+c}$ )の關係  
 縦軸：全交換熱量( $q_{r+c}$ ) / 横軸：表面温度

## 【 解 説 】

1. 機器配管の断熱構造では、内部の熱は静止した大気や周辺気体に逃げる。その場合、いくら表面温度差があるかで断熱寸法が決まってくる。例えば保温配管では

$$q = \alpha (\theta_o - \theta_s) \quad \text{----- (1)}$$

$$q = 2\pi (\theta_o - \theta_r) / \{1 / \{\ln(d_1/d_0) / \lambda + 2 / (\alpha d_0)\}\} \quad \text{----- (2)}$$

から、次の式が得られる。

$$d_1 \ln(d_1/d_0) = (2\lambda / \alpha) (\theta_o - \theta_s) / (\theta_s - \theta_r) \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 $d_0$  = 管外径、 $d_1$  = 保温外径、 $q$  = 熱通過量(放熱量)、

$\lambda$  = 保温材の熱伝導率、 $\alpha$  = 外表面熱伝達率

$\theta_o$  = 内部温度、 $\theta_s$  = 表面温度、 $\theta_r$  = 外気温度、

この式から保温外径  $d_1$  が得られ、保温厚み  $t = (d_1 - d_0) / 2$  が求まる。実際の設計では、表面温度  $\theta_s$  ではなく放熱量  $q$  を指定して(1)式から  $\theta_s$  を計算し(3)式から保温厚み  $t$  を求めることもある。ただ、何れの場合(表面温度  $\theta_s$  既知/放熱量既知)であれ、表面熱伝達率  $\alpha$  がわかっていることが必須である。しかし、表面の伝熱は輻射+対流になり係数  $\alpha$  の計算はややこしい。その点、BS5970 は

外気条件：気温 20°C & 静止空気

のもとで、手早く外表面熱伝達率を求められるようになっており便利である。

2. 上記の(1)式を変形すると  $\alpha = q / (\theta_o - \theta_s)$  であるから、表面温度差  $(\theta_o - \theta_s)$  でいくら放熱  $q$  があるかという問題になる。静止した外気に曝される外表面の伝熱は**輻射**と**自然対流**によって行われる。BS5970 はこれらを次のように表現している。以下 BS の表記による。

$$\text{輻射による交換熱量： } q_r = 5.67E \{ \{ (\theta_2 + 273) / 100 \}^4 - \{ (\theta_m + 273) / 100 \}^4 \}$$

$$\text{自然対流による交換熱量： } q_e = \{ FC (\theta_2 - \theta_m)^{1.25} \}$$

輻射伝熱については灰色体を仮定したステファン-ボルツマン式がそのまま用いられている。

自然対流伝熱については、

面の広がり小さく自由度が少ない表面 → 空気の対流を層流

面の広がり大きく自由度が多い表面 → 空気の対流を乱流

に双分して扱っている。層流の場合、自然対流の伝熱式は<sup>②</sup>

$$q = (\lambda \theta / L) \cdot k (G_{rx} P_r)^{1/4} = (\lambda \theta / L) \cdot [ \beta g \theta L^3 \rho^2 / \mu^2 x (\mu / \rho) / (\lambda / C_p / \rho) ]^{0.25}$$

この式を変形すると

$$q = k (\theta^{1.25} / L^{0.25}) [ (\beta g C_p / \mu)^{0.25} \rho^{0.5} \lambda^{0.75} ]$$

ここで温度差  $\theta$  を  $(\theta_2 - \theta_m)$ 、代表寸法  $L$  を  $D$  と表記すると、

$$q = A (k / D^{0.25}) (\theta_2 - \theta_m)^{1.25} \quad \text{ここで } A = (\beta g C_p / \mu)^{0.25} \rho^{0.5} \lambda^{0.75}$$

$A$  は空気の物性に拠るパラメータ、 $(k / D^{0.25})$  は形状/寸法/方位に拠るパラメータであり、ここでは

$$A (k / D^{0.25}) = FC$$

と表現されるものである。説明がないので、よくわからないが、係数  $C$  は形状/寸法/方位に拠るパラメータに相当し、 $F$  は空気の物性に拠るパラメータに相当するよう思える。根拠はない。

乱流の場合もだいたい同じような考えによっていると思われる。

輻射及び自然対流による交換熱量(放熱量/吸熱量)は、上記のように、[表面温度差]と

[表面仕上に依存の放射率]、[形状/寸法/方位に依存のパラメータ]、[空気物性に依存のパラメータ]



タ]

によって決まる。後者の値は断熱構造で固定されるので、結局、交換熱量  $q_{r+c}$  とこれを単純に表面温度差で割った熱伝達係数  $f_{r+c}$  は温度差の関数である。強制対流伝熱における熱伝達係数の多くが、温度差によらず決まることを考えれば、この熱伝達係数は定数的ではなくむしろ変数的である。

3. 以上のように輻射伝熱も自然対流伝熱も表面温度差の関数であるので、BS5970 では、横軸に表面温度差をとって、(輻射伝熱+自然対流)伝熱量をひとつのグラフから得られるようにしている。Fig.42、43 が然り。しかし放射率  $E$  の変化(0~1)は処理できても、対流伝熱の変化は処理は難しい。そこで、ひとつのグラフから、自然対流伝熱のいろんな[形状/寸法/方位パラメータ]が処理できるようにその手順を与えている。3. の計算手順チャートはこれをしめしている。

ケース 1 は、表面温度が既知で熱交換量が未知の場合である。この場合、 $q_{r+c}$  を

$$q_{r+c} = q_{r+c}^* - q_c^* + Cq_c^* = q_{r+c}^* + (C-1)q_c^* = q_{r+c}^* + (C-1)q_{r+c}^{**}$$

とする。即ち、 $B=1.45$ ( $C=1$ )のときの  $q_{r+c}^*$  からそのときの対流分  $q_c^*$  を取り除いた上で、新たに、実際の対流分  $Cq_c^*$ (即ち  $C=1$  のときの対流分  $q_c^*$  に実際の  $C$  を乗じたもの)を加えて全熱交換量  $q_{r+c}$  としている。対流分  $q_c^*$  は Fig.43 のグラフで  $E=0$  即ち輻射伝熱無しとして得られ、 $q_{r+c}^{**}$  に同じ。

ケース 2 は逆に、熱交換量が既知で表面温度差が未知の場合である。この場合

$$q_{r+c} = q_{r+c}^* - q_c^* + Cq_c^* = q_r^* + Cq_c^*$$

これを辺々  $C$  で割って

$$q_{r+c}/C = q_r^*/C + q_c^* \quad (q_c^* \text{ は } C=1 \text{ 即ちグラフの作成ベースの対流熱量になる})$$

この式は、修正熱量  $q=q/C$ 、修正放射率  $E=E/C$  として Fig.42 から温度差を読み取ることに等しい。

従って、チャートの手順によるとき、ひとつのグラフ(Fig. 43)から、自然対流伝熱の種々の[形状/寸法/方位](パラメータ  $C$  による)に対し全交換熱量を得ることができる。

なお、表面温度差が小さい時は輻射伝熱量の割合が高くなって、対流分を上記のように調整しなくても十分、近似値が得られるので Fig.42 をそのまま使用できるとしている。

引用文献：

- (0) BS5970:1981 Code of practice for Thermal insulation of pipework and equipment  
(in the temperature range  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+870\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- (1) JIS A9501-1990 保温保冷工事施工基準
- (2) 槌田ほか「新訂伝熱工学演習」(学献社)

