熱交換器

特別講義

- 日時：１２月２０日（木）、13:00
- 場所：D棟201教室
- 講師：姫野龍太郎氏　（理化学研究所、情報基盤研究部情報環境室　室長）
- 講演題目：野球変化球の数値解析～コンピュータシミュレーションで魔球が作れるか～

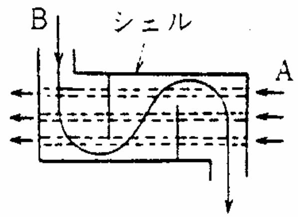
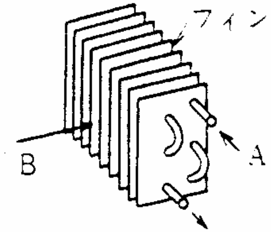
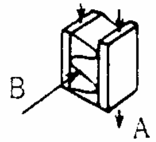
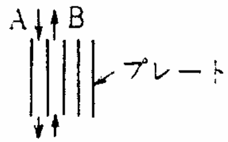
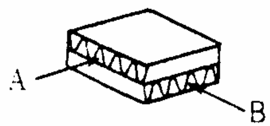
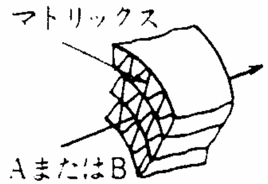
熱交換器

- 温度の異なる流体の間で熱を交換する装置
- 隔壁式熱交換器
  - 流体間に固体の伝熱壁が存在
  - 最も一般的な熱交換器―――通常熱交換器といえばこのタイプのことを指す
- 直接接触熱伝達
  - 流体と流体が直接接触する
  - 相変化を伴うことが多い
  - 冷却塔、バロメトリックコンデンサー

隔壁式熱交換器

- 最も一般的な熱交換器
- 流路の構成で様々なタイプがある
- 流路の流動抵抗が小さく、熱交換量が大きいほど性能がいい———相反する
- 相変化を伴うもの
  - 蒸発器、凝縮器
- 相変化を伴わないもの
  - 単相流熱交換器———工業上最も応用分野が多い

表 1　熱交換器の分類

流体Aの流路	流体Bの流路		形式名および説明図		
円　管	円　管		二重管熱交換器 (Double-tube H.E.)		
	シェル		シェル・アンド・チューブ熱交換器 (Shell-and-tube H.E.)		
	管列の間	裸　管	管熱交換器 (Tubular H.E.)		
		円周フィン付管	フィン付管熱交換器 (Finned Tube H.E.)		
		プレートフィン＋管	フィン・アンド・チューブ熱交換器 (Tube-in-fin H.E.)		
偏平矩形管	フィン列		コルゲートフィン熱交換器 (Corrugated Fin H.E.)		
平行平板	平行平板		プレート形熱交換器 (Plate H.E.)		
平板＋フィン列	平板＋フィン列		コンパクト熱交換器 (Compact H.E.)		
マトリックス	マトリックス		蓄熱式熱交換器 (Regererator)	回転マトリックス (Rotary h.e.) 静置マトリックス＋流路切換	
			全熱交換器 (Total H.E.)		

(H.E.＝Heat Exchanger)

表 2 各種熱交換器における熱通過率のおよその値

熱交換器形式	流体A（管内側流体）	流体B	熱通過率（管内面積基準）$W/(m^2 \cdot K)$	用途例
シェル・アンド・チューブ	空気	燃焼ガス	40～100	再生器，排熱回収
	水	沸騰する冷媒	2 000～5 000	冷凍機，バイナリーサイクル
	水	凝縮する冷媒	2 000～6 000	
	相変化有機媒体	相変化有機媒体	200 ～ 700	化学プラント
	海水	蒸発するＬＮＧ	1 500～3 500	ＬＮＧ気化器
	蒸発する水	高温ヘリウム	700～1000	高温ガス炉蒸気発生器
プレート形	空気	オイル	30～ 100	オイルクーラ
	水	水	2 300～5 800	水クーラ
コンパクト	空気	空気	50～ 200	エアクーラ
フィン付管	有機液体	空気	150～ 230	化学プラントクーラ
フィン・アンド・チューブ	相変化する冷媒	空気	400～1 000	空調機
コルゲートフィン	水	空気	200～1 000	自動車用ラジェータ

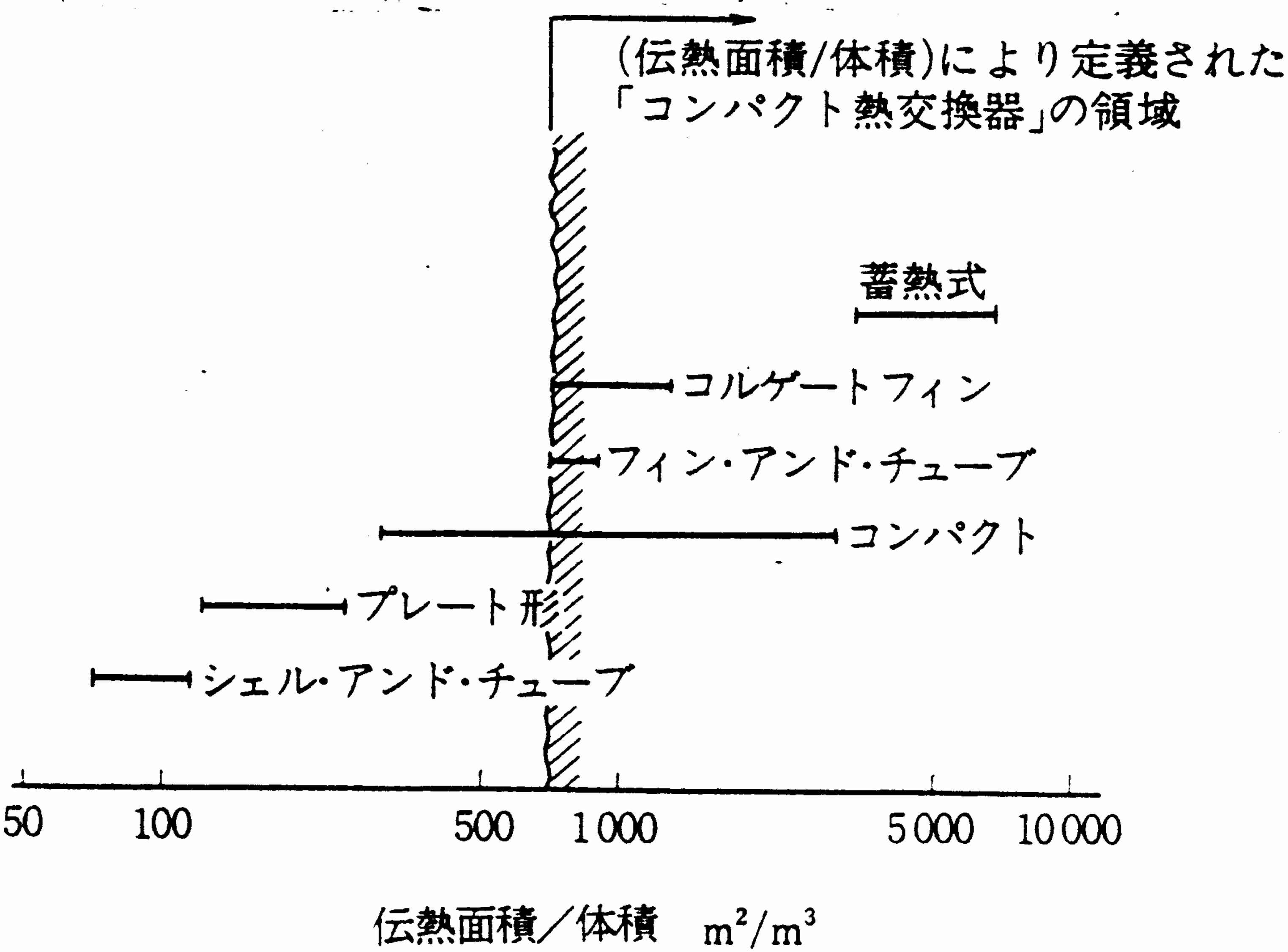


図 1　各種熱交換器の伝熱面密度

熱交換器の特性に影響を及ぼす因子

流速

圧力

伝熱面の材質

伝熱面の汚れ

伝熱面の性状

熱交換器の基礎理論

単相流熱交換器

設計上は二つの場合を考えればよい

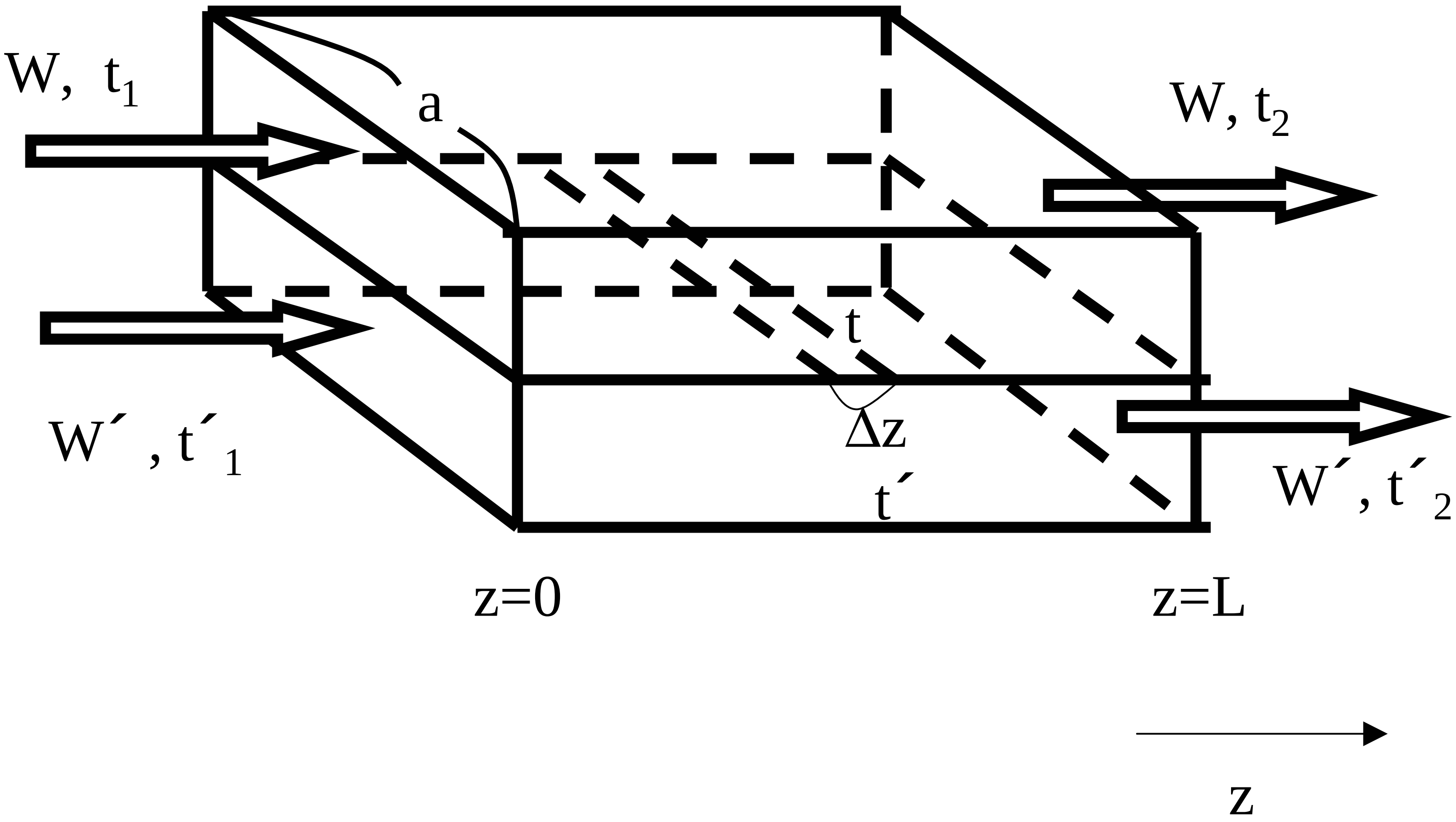
(a)伝熱面積、流量、入り口条件を与えて出口条件、伝熱量を求める場合

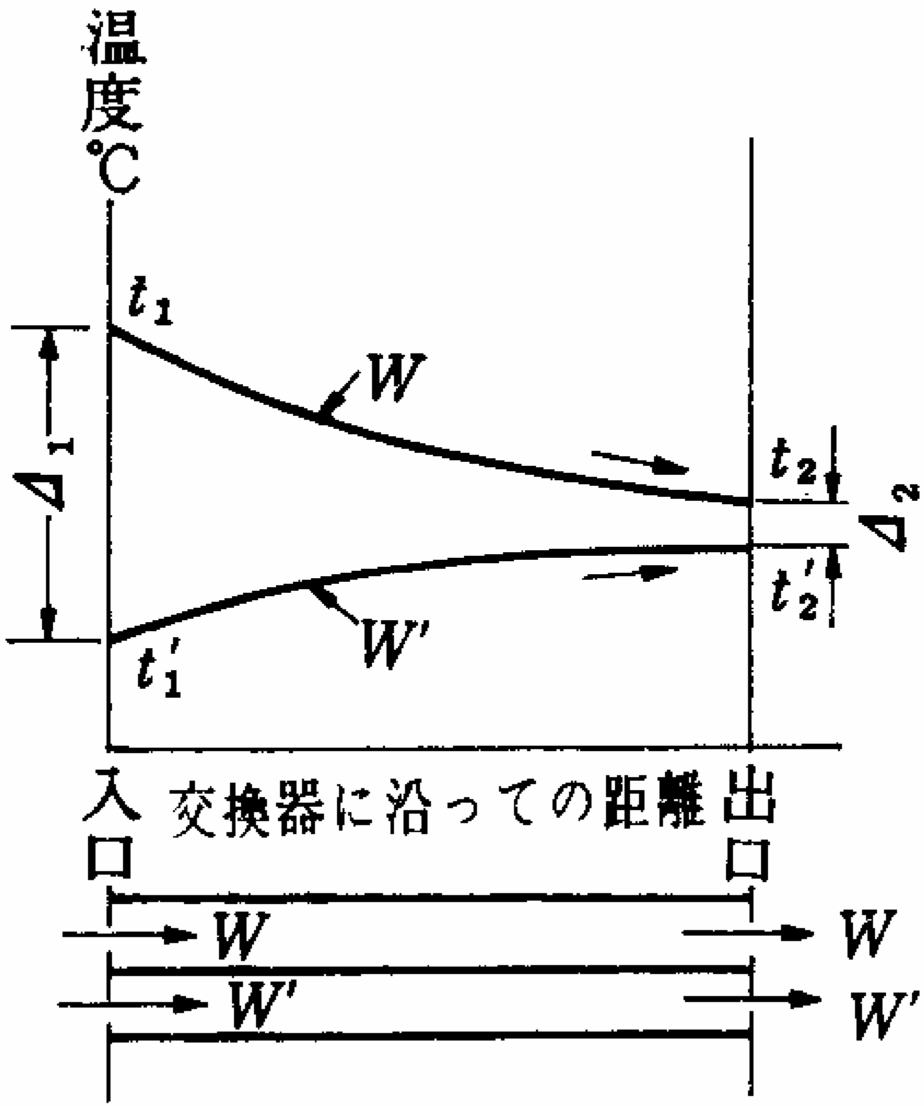
(b)入り口出口条件及び流量を与えて伝熱面積または伝熱量、を求める場合

平行平板間流路の並流型、向流型を考える

(a)伝熱面積、流量、入り口条件を与えて出口条件、伝熱量を求める場合

並流型熱交換器





第1図　並流形熱交換器

並流型熱交換器

W=GC　（質量流量G(Kg/s)と比熱C(J/(Kg・K))の積）(J/(s・K))

熱通過率K

$$q = K(t - t')$$

q:高温側から低温側への熱流束

流路入口から z の位置で高温側からの流体から低温側の流体へ単位時間あたり伝わる熱量ΔQ

$$\Delta Q = qa\Delta z = aK(t - t')\Delta z \qquad (2)$$

これだけのエネルギーを失うことにより、高温側の流体は流れ方向にΔz だけ進む間に温度が$\Delta t(<0)$だけ変化する。（温度が下がる）

$$-W\Delta t = \Delta Q = aK(t - t')\Delta z \qquad (3)$$

一方、低温側の流体は流れ方向にΔz だけ進む間に温度が$\Delta t'(>0)$だけ変化する。（温度が上がる）

$$W\Delta t' = \Delta Q = aK(t - t')\Delta z \qquad (4)$$

以上から次の連立微分方程式が得られる。

$$-W\frac{dt}{dz} = aK(t - t') \qquad (5)$$

$$W'\frac{dt'}{dz} = aK(t - t') \qquad (6)$$

(5)÷W+(6)÷W'より

$$-\frac{d(t-t')}{dz} = aK\left(\frac{1}{W}+\frac{1}{W'}\right)(t-t') \tag{7}$$

この微分方程式を熱交換器の入り口、出口条件

$z=0$ で $t-t'=t_1-t_1'$, $z=L$ で $t-t'=t_2-t_2'$

のもとで解くと

$$\ell n\frac{t_1-t_1'}{t_2-t_2'} = aKL\left(\frac{1}{W}+\frac{1}{W'}\right) \tag{8}$$

全伝熱面積 $F=aL$ (9) を用いて

$$\frac{t_1-t_1'}{t_2-t_2'} = \exp\left\{\left(1+\frac{W}{W'}\right)\frac{KF}{W}\right\} \tag{9}$$

温度効率 ϕ, ϕ'

$$\phi = \frac{t_1-t_2}{t_1-t_1'} \tag{10}$$

$$\phi' = \frac{t_2'-t_1'}{t_1-t_1'} \tag{11}$$

エネルギーバランスから

$$W(t_1-t_2) = W'(t_2'-t_1') \tag{12}$$

$$W\phi = W'\phi' \qquad \phi' = \frac{W}{W'}\phi \tag{13}$$

一方

$$\phi = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_1'} = \frac{t_1 - t_1' - (t_2' - t_1') - (t_2 - t_2')}{t_1 - t_1'} = 1 - \frac{(t_2' - t_1')}{t_1 - t_1'} - \frac{t_2 - t_2'}{t_1 - t_1'}$$
$$= 1 - \phi' - \frac{t_2 - t_2'}{t_1 - t_1'} = 1 - \frac{W}{W'}\phi - \frac{t_2 - t_2'}{t_1 - t_1'} \tag{14}$$

これより

$$\phi = \frac{1 - \dfrac{t_2 - t_2'}{t_1 - t_1'}}{1 + \dfrac{W}{W'}} = \frac{1 - \exp\left\{-\left(1 + \dfrac{W}{W'}\right)\dfrac{KF}{W}\right\}}{1 + \dfrac{W}{W'}} \tag{15}$$

全伝熱量 Q

$$Q = \int_0^L qadz = W(t_1 - t_2) = W'(t_2' - t_1') \tag{16}$$

(16)を用いて(8)から W, W'を消去すると

$$\ell n\frac{t_1 - t_1^{'}}{t_2 - t_2^{'}} = \frac{KF}{Q}\left\{(t_1 - t_2) + (t_2^{'} - t_1^{'})\right\} = \frac{KF}{Q}\left\{(t_1 - t_1^{'}) - (t_2 - t_2^{'})\right\} \qquad (17)$$

$\Delta_1 = (t_1 - t_1^{'}),\qquad \Delta_2 = (t_2 - t_2^{'})$ と置けば

$$Q = KF\frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ell n(\Delta_1/\Delta_2)} = KF\Delta t_m \qquad (18)$$

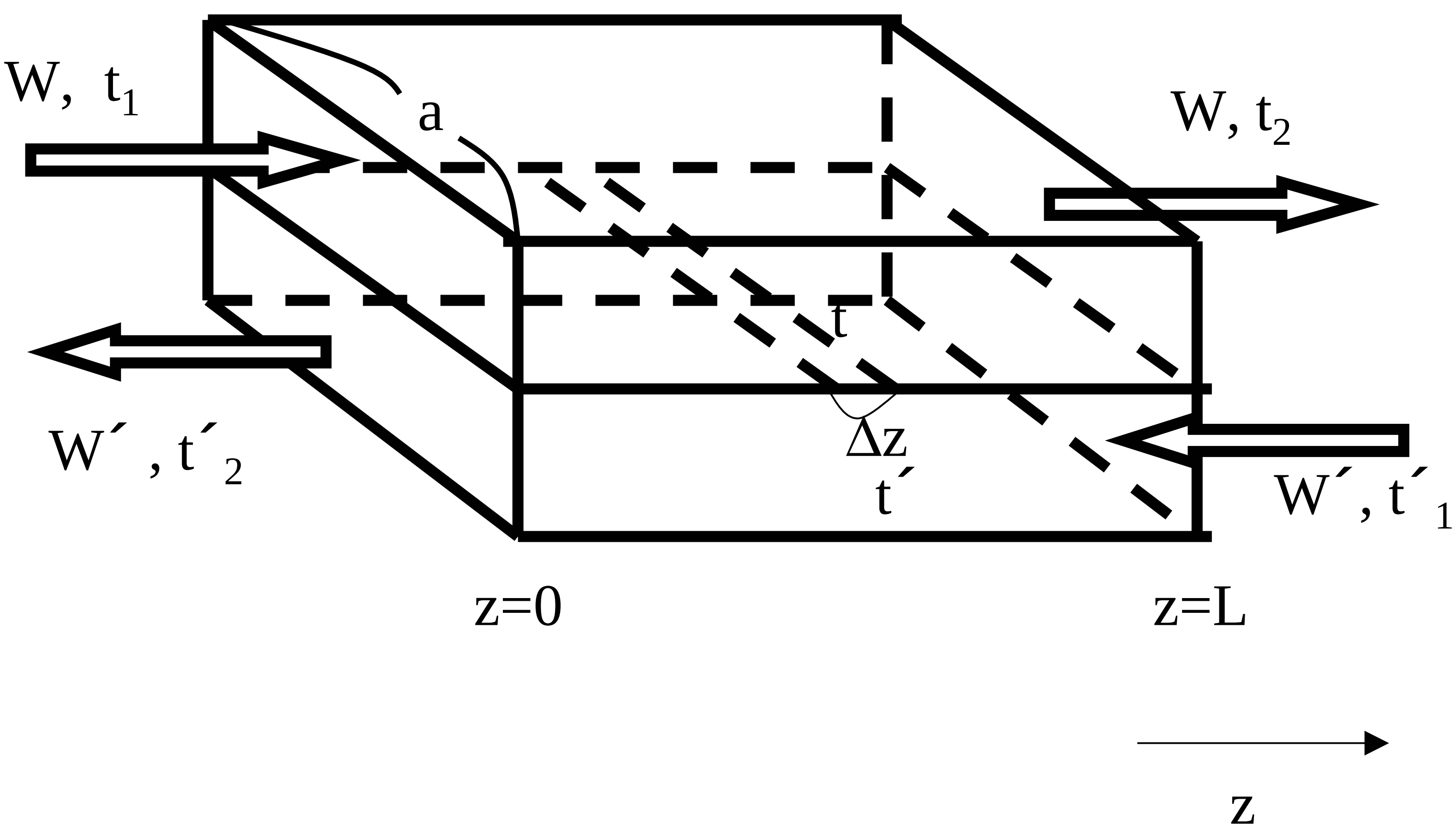
$\Delta t_m = \dfrac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ell n(\Delta_1/\Delta_2)}$ を対数平均温度差と呼ぶ

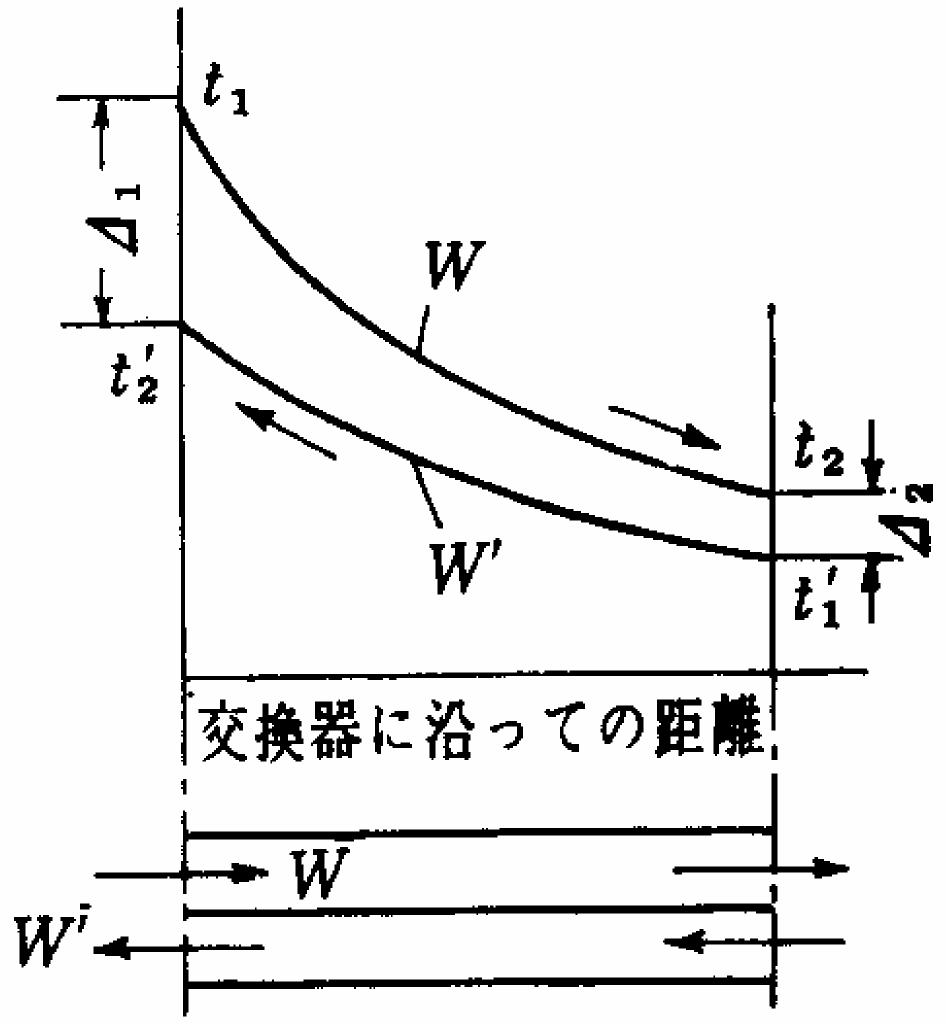
Δ_1/Δ_2が 1 に近いときには$\Delta_1/\Delta_2=1+x$　$(0<x<<1)$とおいて

$$\Delta t_m = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ell n(\Delta_1/\Delta_2)} = \frac{\Delta_2(1+x-1)}{\ell n(1+x)} = \frac{\Delta_2 x}{x-(1/2)x^2} = \frac{\Delta_2}{1-(1/2)x} = \Delta_2(1+\frac{1}{2}x)$$

$$= \Delta_2 + \frac{1}{2}\Delta_2(\Delta_1/\Delta_2 - 1) = \frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2) \qquad (20)$$

向流型熱交換器





第２図　向流形熱交換器

並流型と比較すると(1)～(3)式は同じ。

熱通過率 K　　$q = K(t - t')$　　(1)

q:高温側から低温側への熱流束

流路入口から z の位置で高温側からの流体から低温側の流体へ単位時間あたり伝わる熱量ΔQ

$$\Delta Q = qa\Delta z = aK(t - t')\Delta z \quad (2)$$

これだけのエネルギーを失うことにより、高温側の流体は流れ方向にΔz だけ進む間に温度がΔt(<0)だけ変化する。（温度が下がる）

$$-W\Delta t = \Delta Q = aK(t - t')\Delta z \quad (3)$$

向流型では低温側の流れの方向が逆。従って低温側の流体は流れ方向に－Δz だけ進む間に温度がΔt’(>0)だけ変化する。（温度が上がる）

$$W\Delta t' = \Delta Q = aK(t - t')(-\Delta z) \quad \text{即ち} \quad -W\Delta t' = \Delta Q = aK(t - t')\Delta z \quad (21)$$

よってエネルギーバランスの基礎方程式は

$$-W\frac{dt}{dz} = aK(t - t') \tag{22}$$

$$-W'\frac{dt'}{dz} = aK(t - t') \tag{23}$$

(22)÷W－(23)÷W'より

$$-\frac{d(t - t')}{dz} = aK\left(\frac{1}{W} - \frac{1}{W'}\right)(t - t') \tag{24}$$

　この微分方程式を熱交換器の入り口、出口条件

　　z=0　で $t - t' = t_1 - t_2'$, z=L　で $t - t' = t_2 - t_1'$

のもとで解くと

$$\ell n \frac{t_1 - t_2'}{t_2 - t_1'} = KF\left(\frac{1}{W} - \frac{1}{W'}\right) \tag{25}$$

$$\frac{t_1 - t_2'}{t_2 - t_1'} = \exp\left\{\left(1 - \frac{W}{W'}\right)\frac{KF}{W}\right\} \tag{26}$$

$$\frac{t_1 - t_2'}{t_2 - t_1'} = \frac{t_1 - t_1' - (t_2' - t_1')}{(t_1 - t_1') - (t_1 - t_2)} = \frac{1 - \phi'}{1 - \phi} = \frac{1 - \frac{W}{W'}\phi}{1 - \phi} \tag{27}$$

$$\phi = \frac{1 - \frac{t_2 - t_1'}{t_1 - t_2'}}{1 - \frac{W}{W'}\frac{t_2 - t_1'}{t_1 - t_2'}} = \frac{1 - \exp\left\{-(1 - \frac{W}{W'})\frac{KF}{W}\right\}}{1 - \frac{W}{W'}\exp\left\{-(1 - \frac{W}{W'})\frac{KF}{W}\right\}} \tag{28}$$

全伝熱量 Q

$$Q=\int_0^L qadz=W(t_1-t_2)=W'(t'_2-t'_1) \tag{16}$$

(16)式（向流型でも成立）を用いて(25)式から W,W'を消去すれば

$$\ell n\frac{t_1-t'_2}{t_2-t'_1}=\frac{KF}{Q}\left\{(t_1-t_2)-(t'_2-t'_1)\right\}=\frac{KF}{Q}\left\{(t_1-t'_2)-(t_2-t'_1)\right\} \tag{29}$$

$\Delta_1=(t_1-t'_2),\qquad \Delta_2=(t_2-t'_1)$　と置けば

$$Q=KF\frac{\Delta_1-\Delta_2}{\ell n(\Delta_1/\Delta_2)}=KF\Delta t_m \tag{30}$$

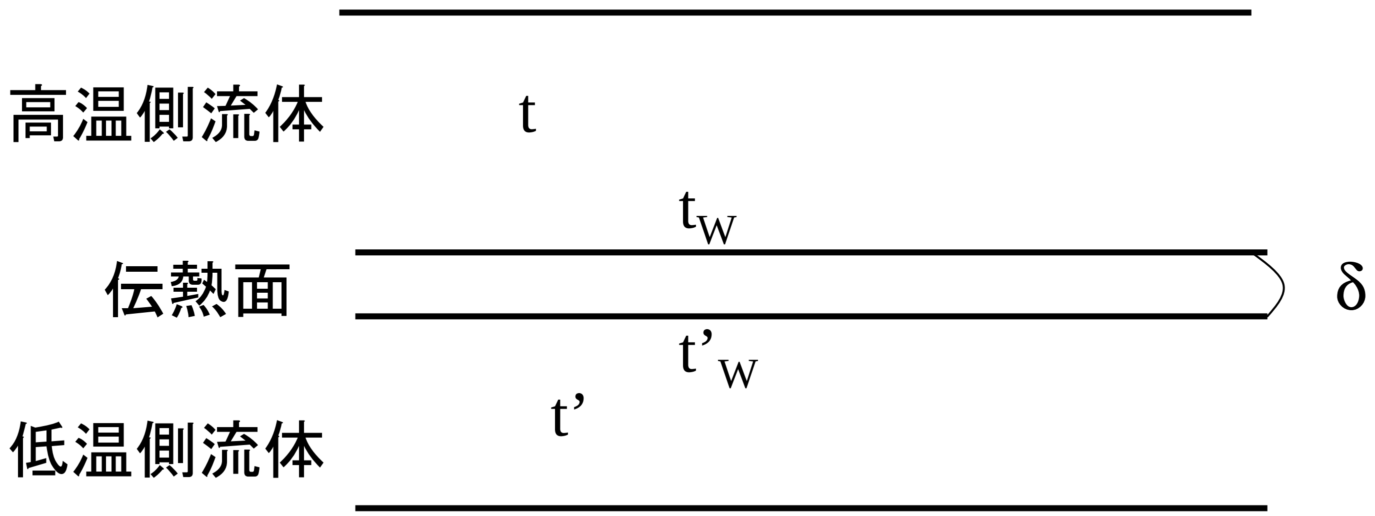
$$\Delta t_m=\frac{\Delta_1-\Delta_2}{\ell n(\Delta_1/\Delta_2)} \tag{31}$$

直交流

流路断面で完全混合

$$\phi = \frac{\dfrac{KF}{W}}{\dfrac{\dfrac{KF}{W}}{1-\exp\left\{-\dfrac{KF}{W}\right\}} + \dfrac{\dfrac{KF}{W'}}{1-\exp\left\{-\dfrac{KF}{W'}\right\}} - 1}$$

熱通過率（平行平板間流路）



$t > t_w > t'_w > t'$

熱通過率

熱交換器で重要な熱通過率Ｋ（（１）式）は高温側流体と伝熱面の間の熱伝達係数α、低温側流体と伝熱面の間の熱伝達係数α'、伝熱面の熱伝導度λ,　伝熱面の肉厚δを用いて与えられる。

$$q = \alpha(t - t_w) = \alpha'(t'_w - t') = \lambda \frac{(t_w - t'_w)}{\delta} \tag{32}$$

$$(t - t_w) = \frac{q}{\alpha} \qquad (t'_w - t') = \frac{q}{\alpha'} \qquad (t_w - t'_w) = \frac{q}{(\delta/\lambda)} \tag{34}$$

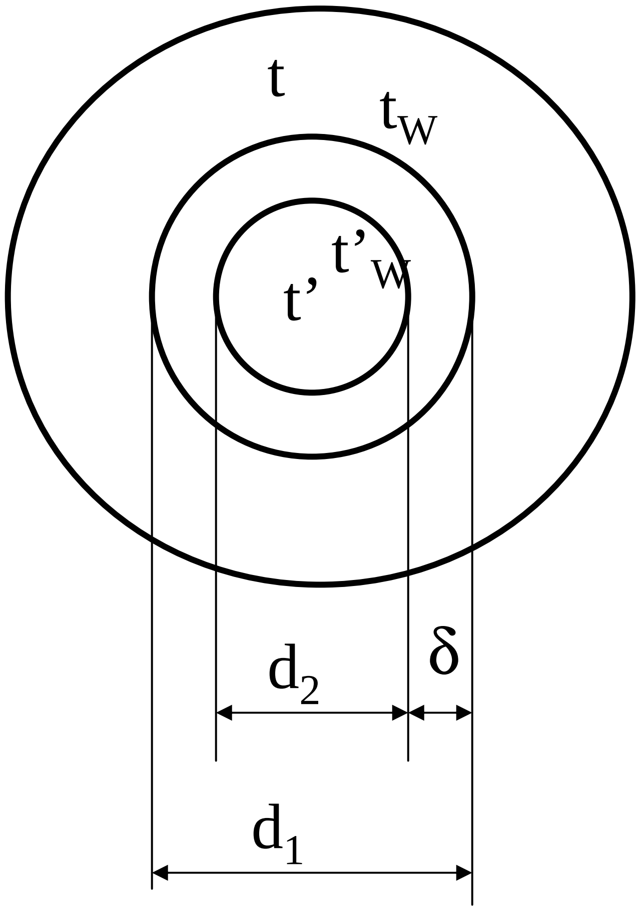
この３つの式を足して

$$(t - t') = q\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha'} + \frac{\delta}{\lambda}\right) \tag{35}$$

熱通過率の定義（(１）式）より

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha'} + \frac{\delta}{\lambda}\right) \tag{36}$$

熱通過率（二重円管）



この場合には高温側流体側と低温側流体側の伝熱面積が違うので熱流束は等しくない。

$$q_1 = K(t - t') \qquad q_2 = K'(t' - t) \tag{37}$$

$$q_1 = \alpha(t - t_W) \qquad q_2 = \alpha'(t'_W - t') \tag{38}$$

$$\pi d_1 q_1 = \pi d_2 q_2 \tag{39}$$

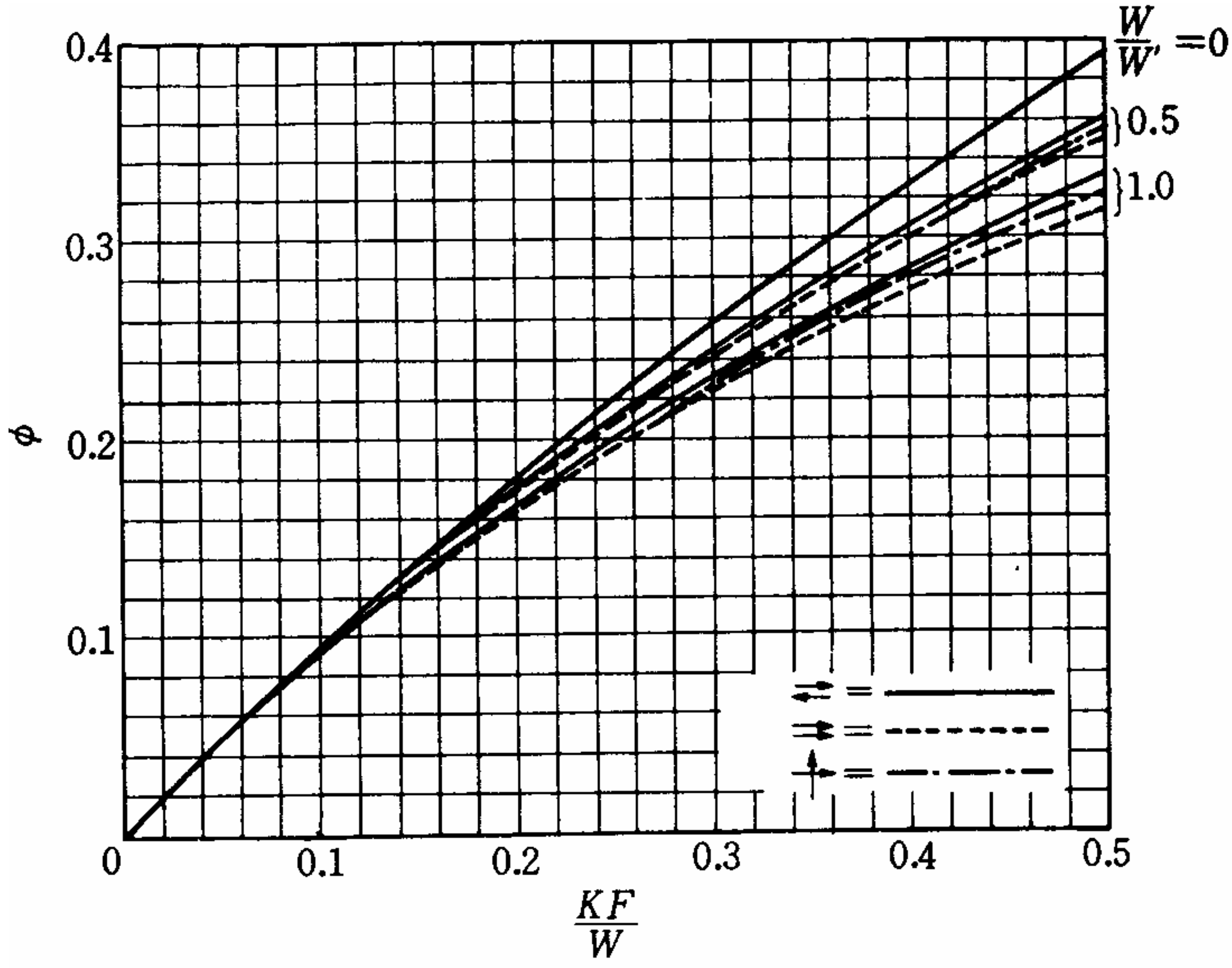
$$K d_1 = K' d_2 \tag{40}$$

円筒座標系の熱伝導の式から温度分布を求めると

$$t_W - t'_W = q_1 \frac{\delta}{\lambda} \frac{d_1}{d_1 - d_2} \ell n(d_1 / d_2) \tag{41}$$

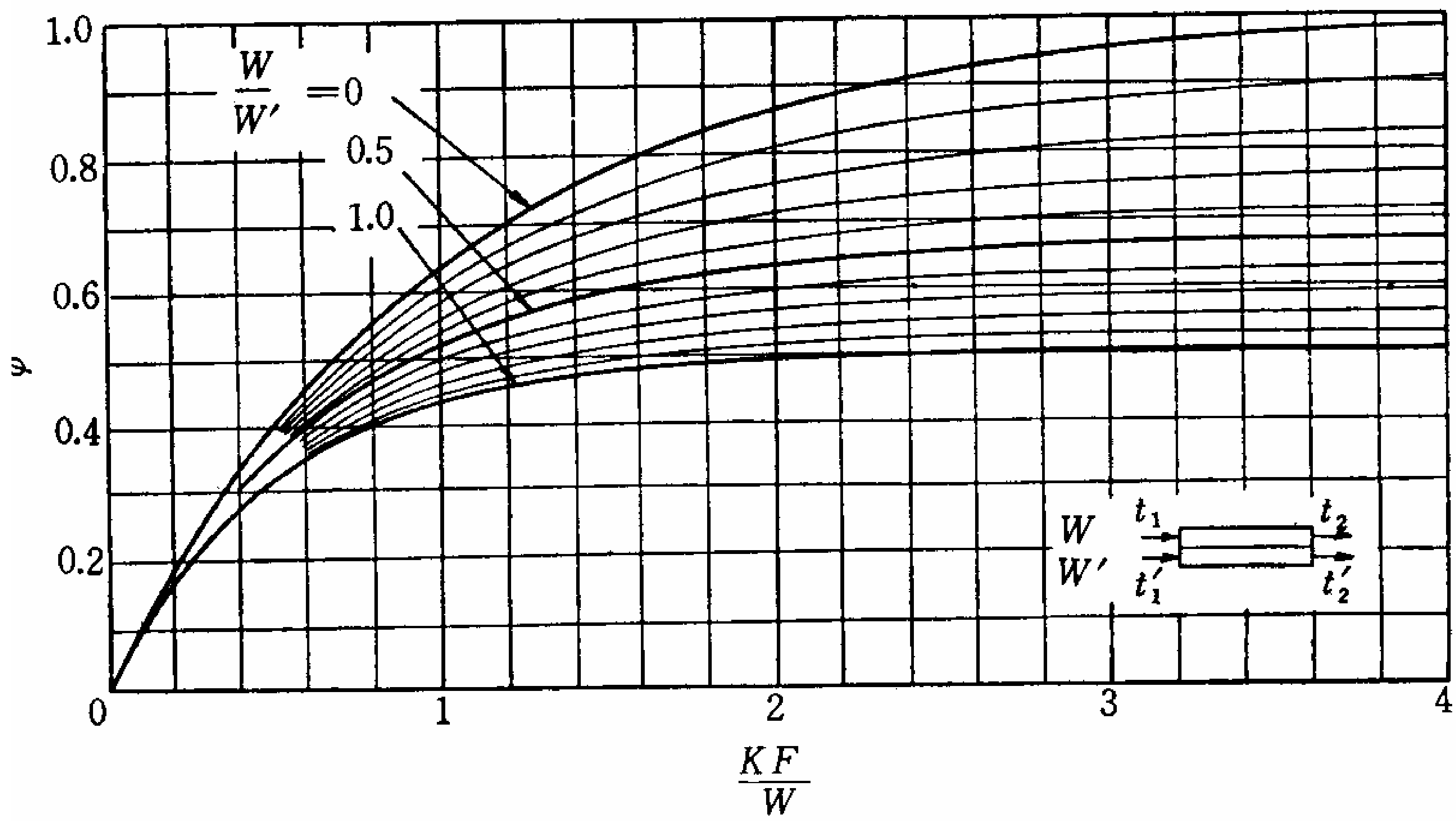
以上から

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha'} \frac{d_1}{d_2} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{d_1}{d_1 - d_2} \ell n(d_1 / d_2) \right) \tag{42}$$

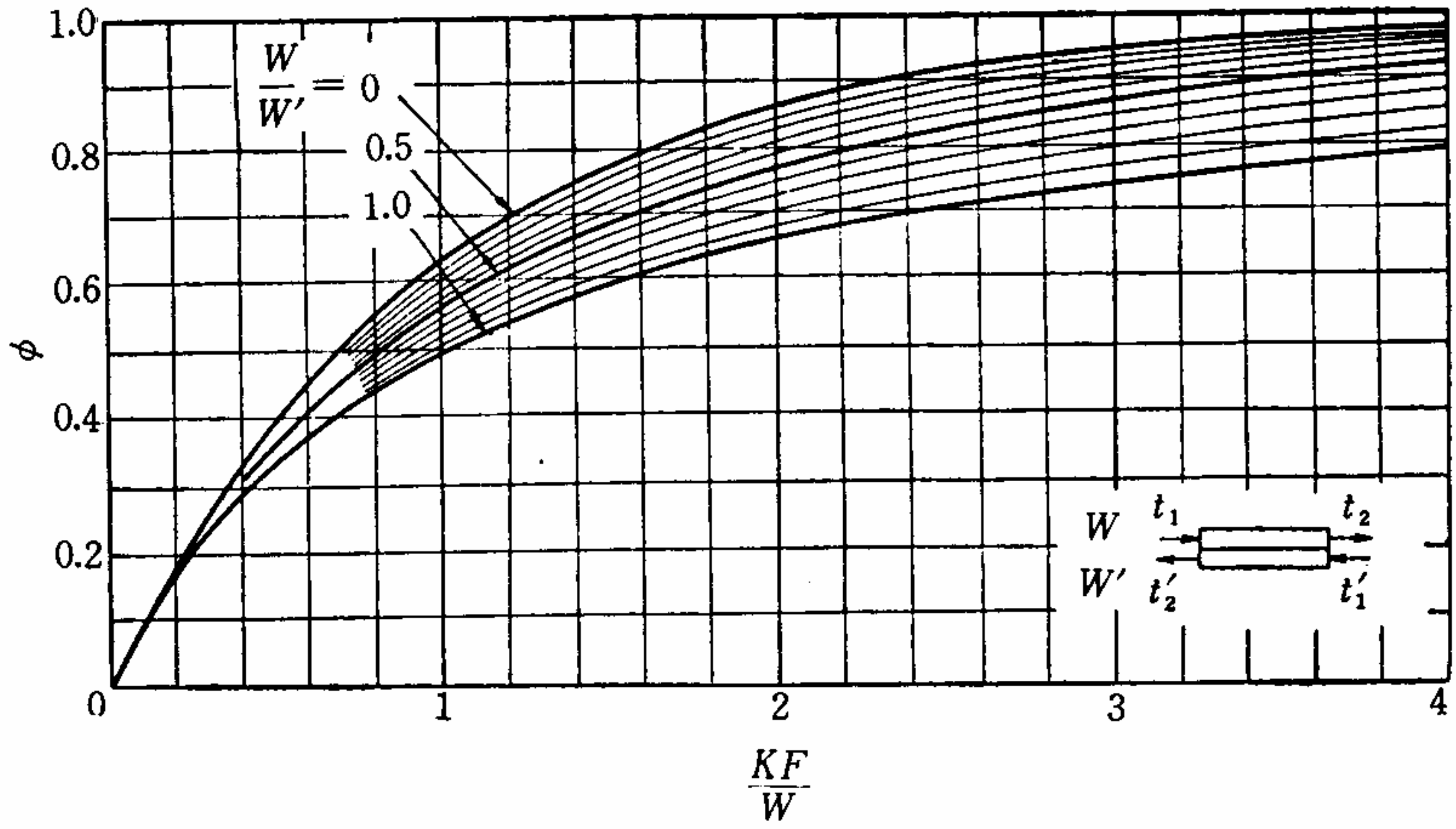


実線：向流，破線：並流，鎖線：両流体とも混合なしの場合の直交流

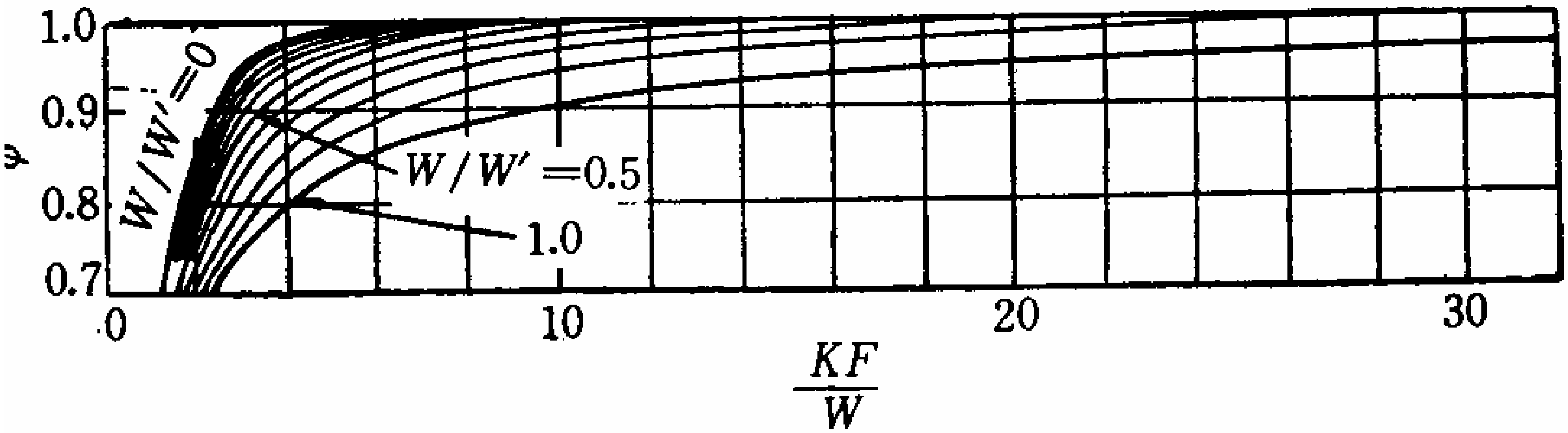
第３図　$\phi\,(KF/W < 0.5)$



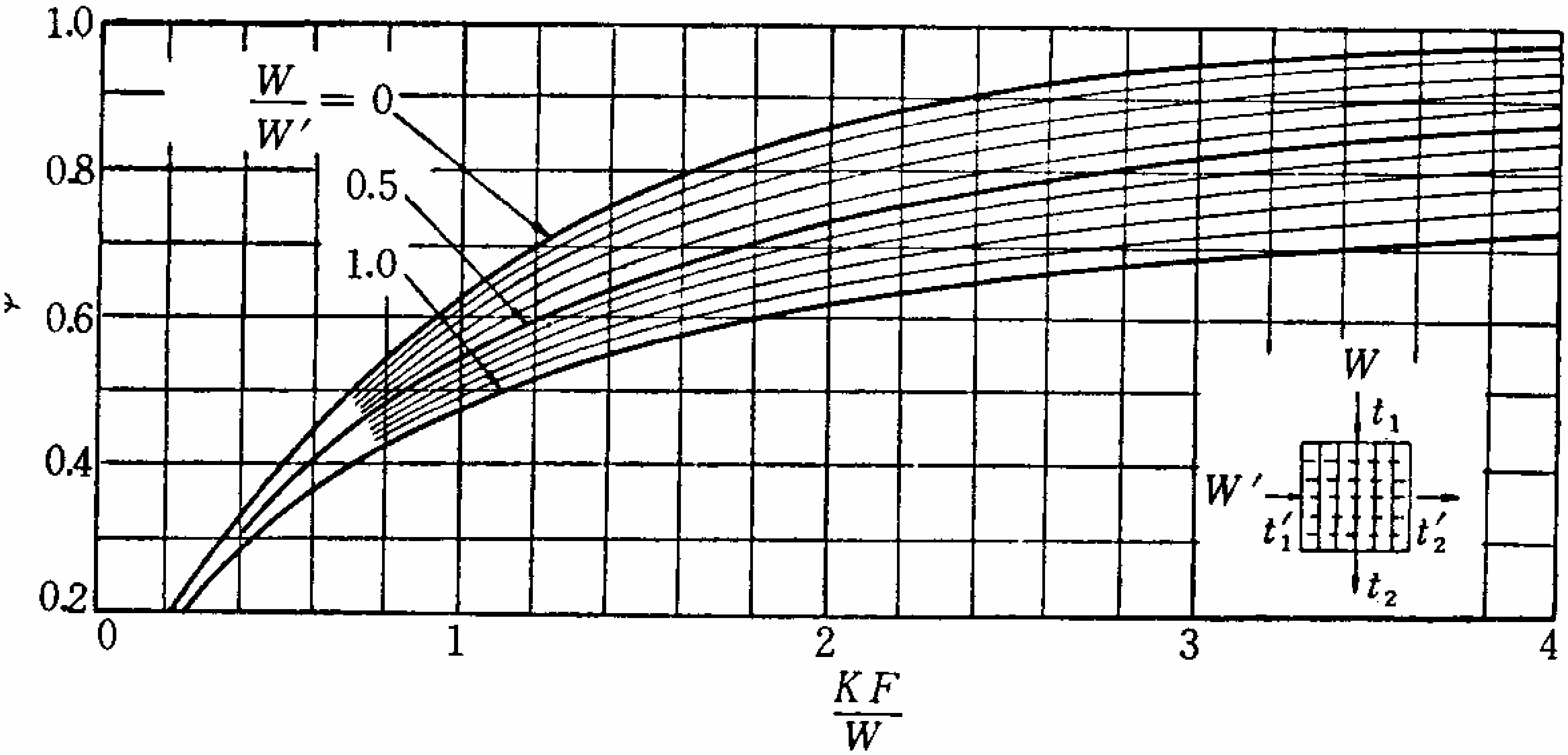
第4図　並流形の ϕ $(KF/W < 4)$



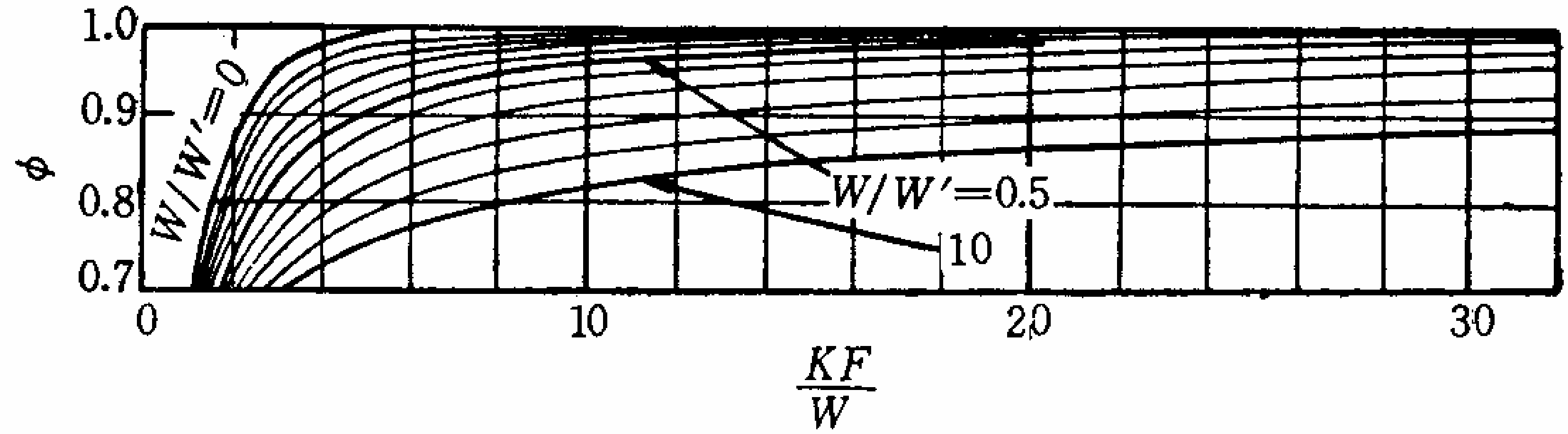
第5図　向流形の ϕ（$KF/W<4$）



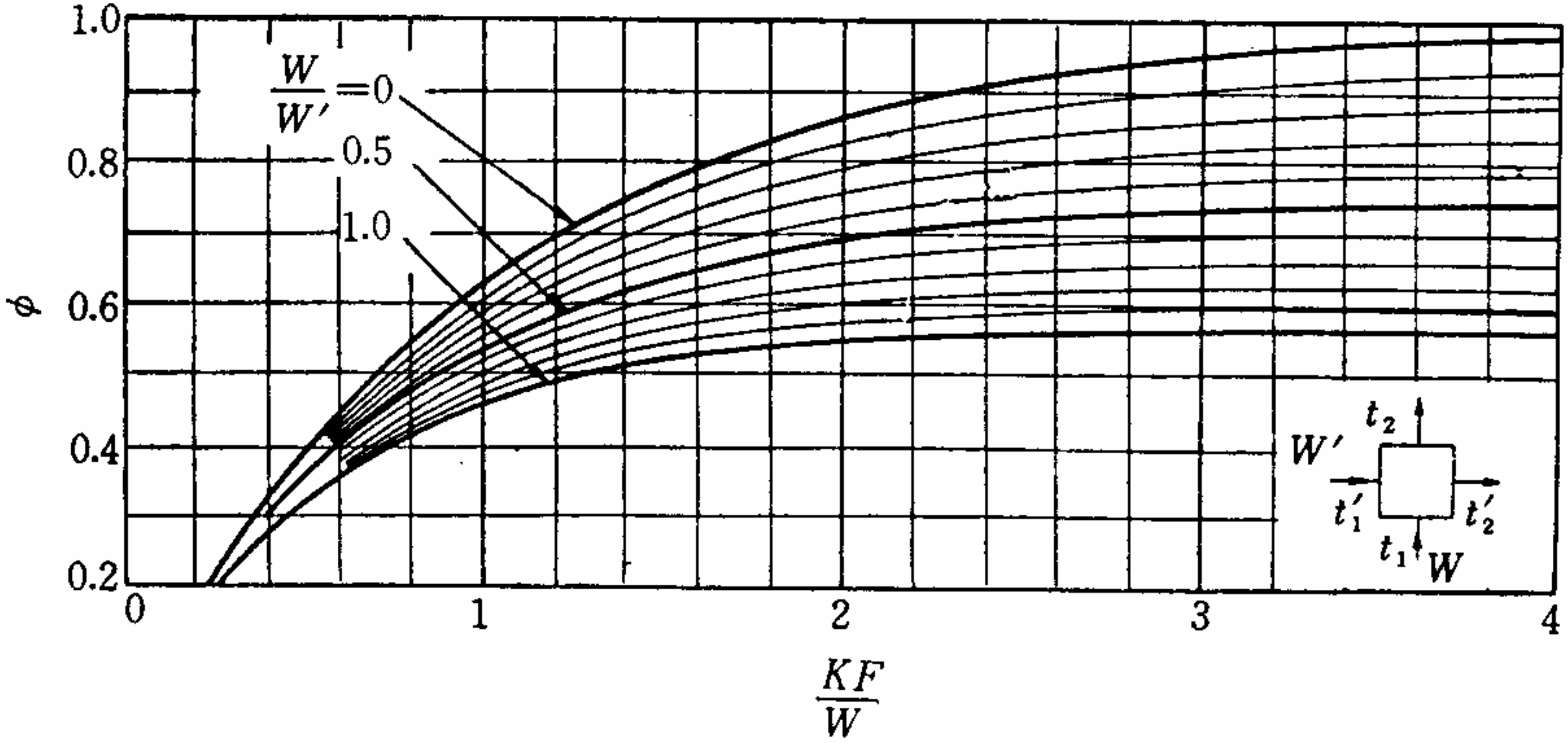
第6図　向流形の φ（$KF/W < 32$）



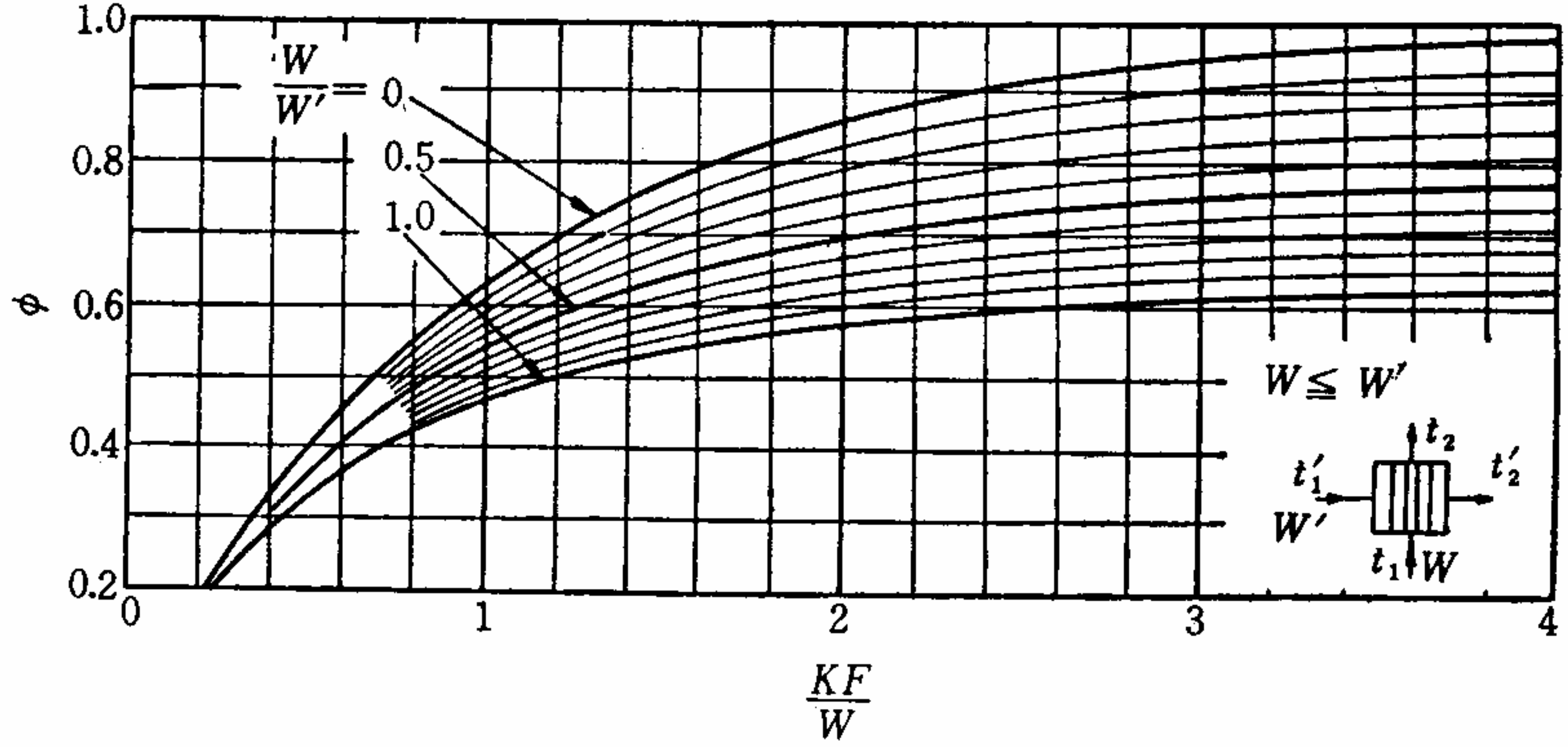
第７図　両流体とも横方向に混合しない直交流形の ϕ（$KF/W<4$）



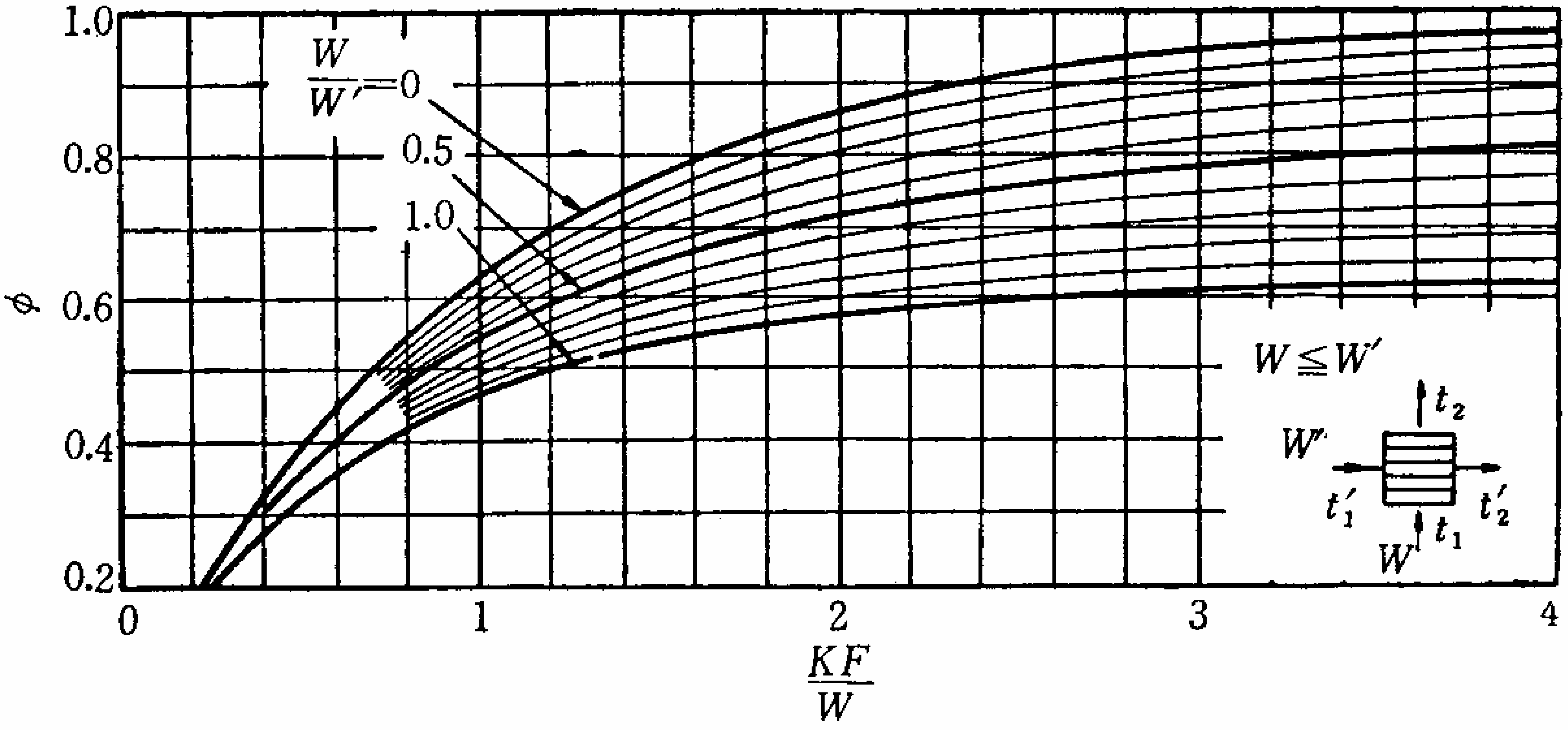
第8図　両流体とも横方向に混合しない直交流形の ϕ ($KF/W < 32$)



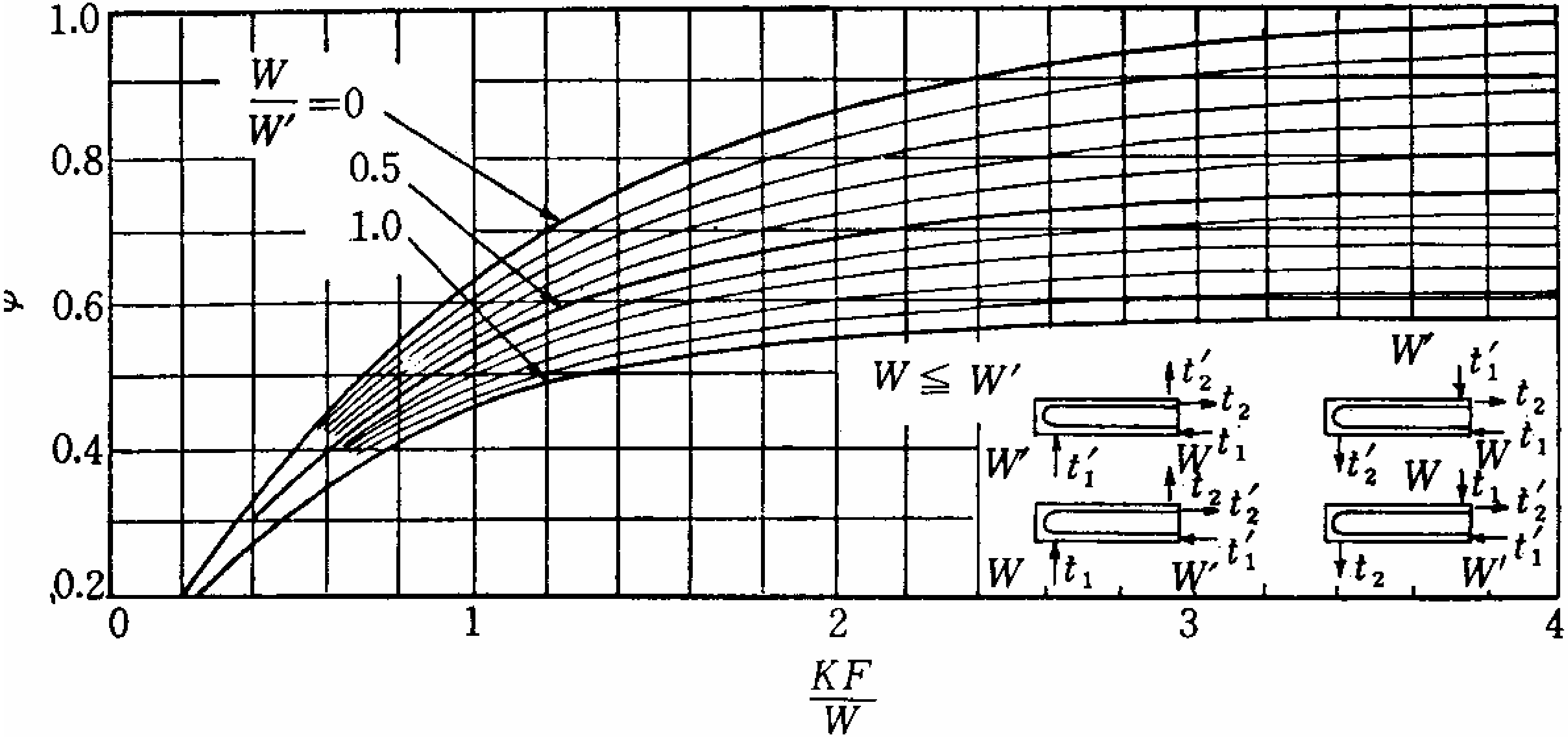
第9図　両流体とも各断面で横方向に混合する場合の直交流形の ϕ（$KF/W<4$）



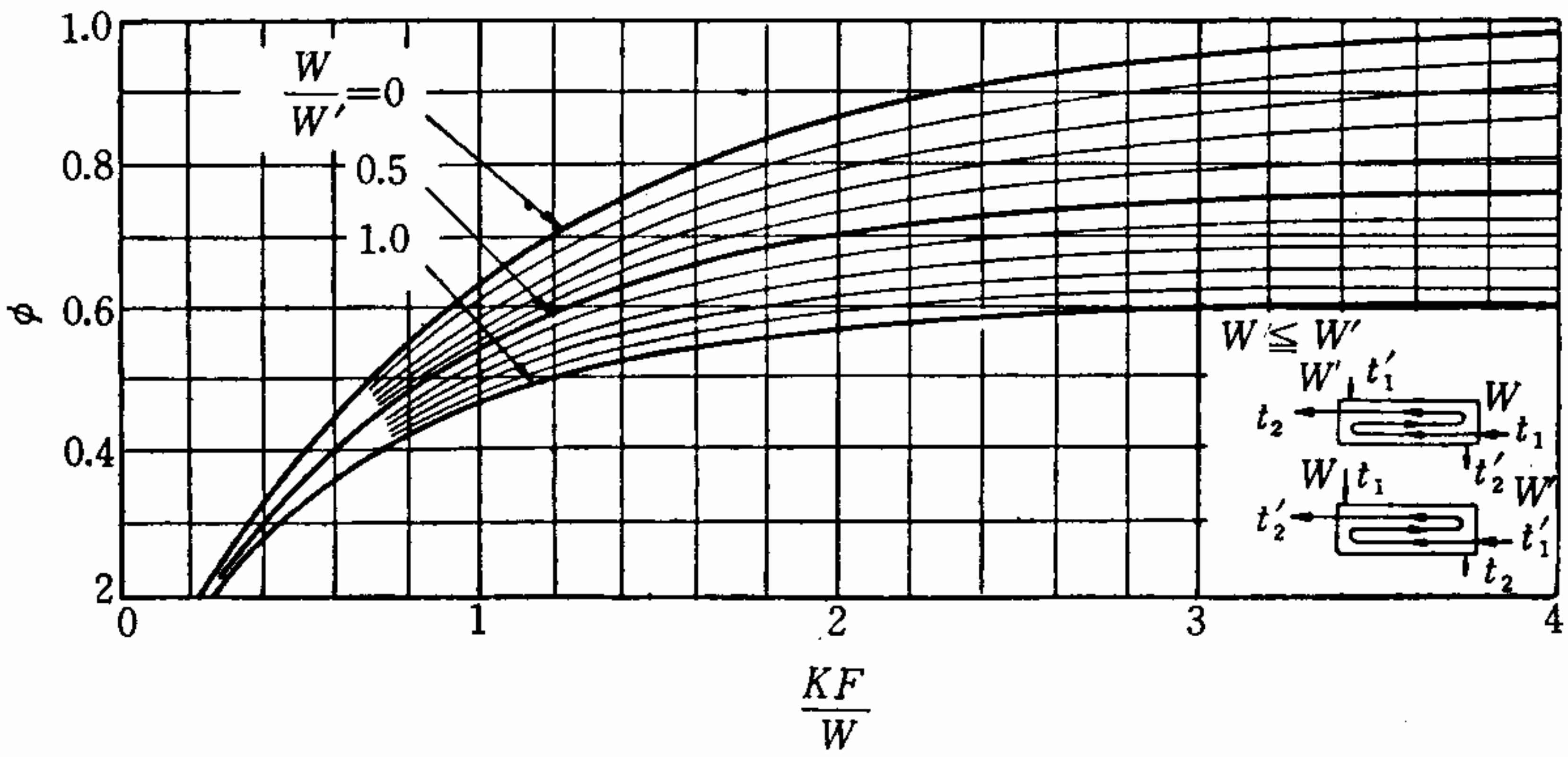
第10図　W' 側のみ混合する直交流形の ϕ



第11図　W 側のみ混合する直交流形の ϕ

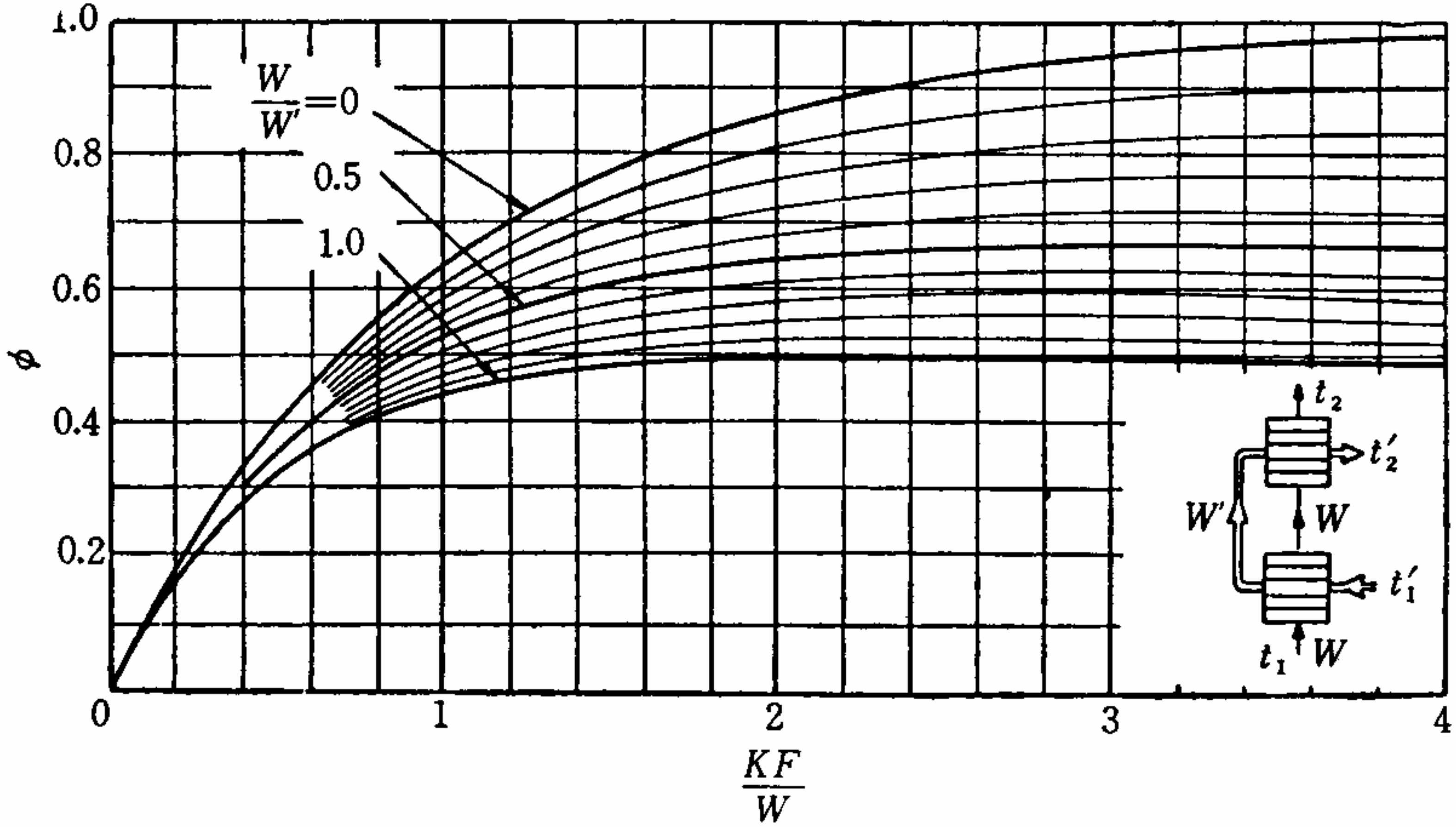


第12図　二重平行流形の ϕ

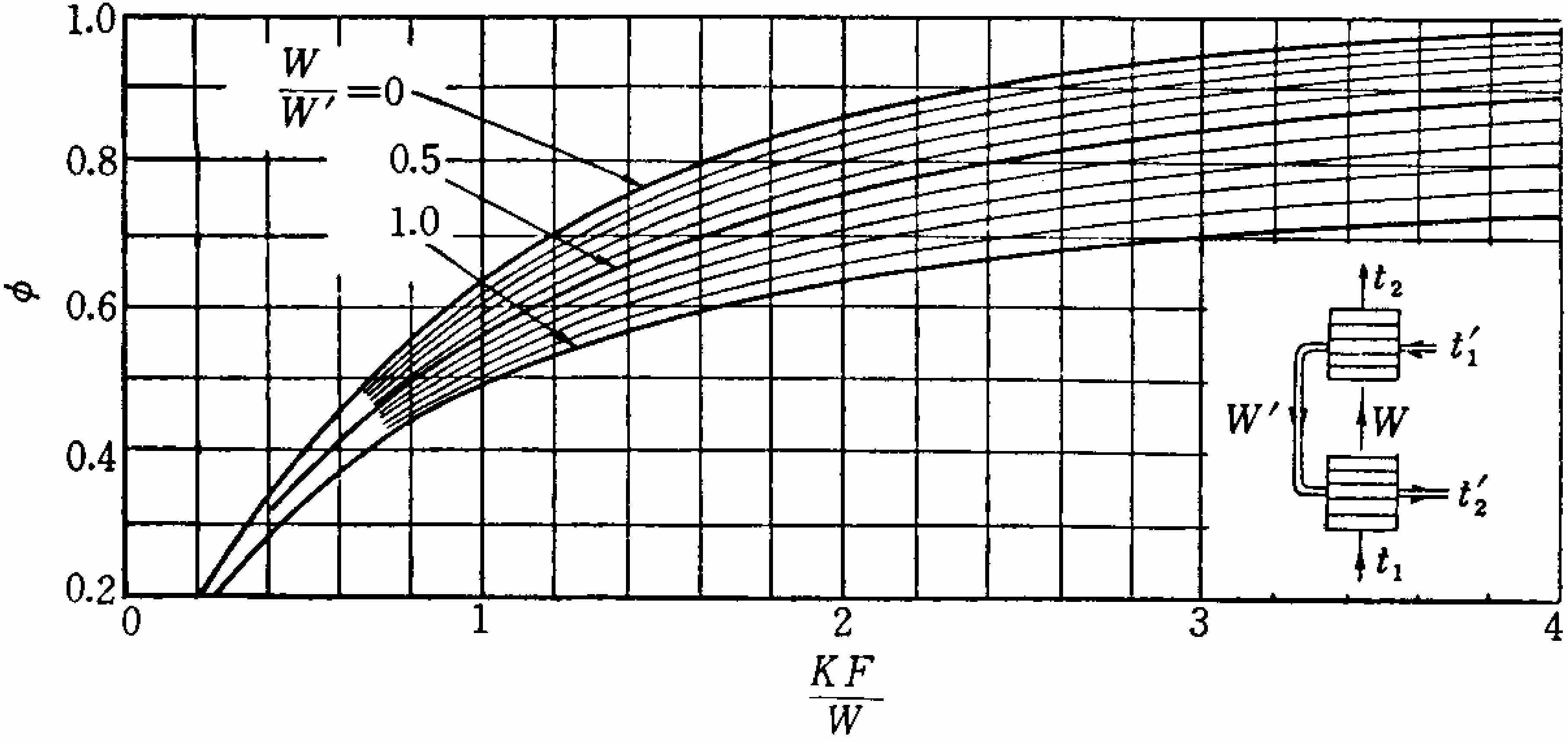


第 13 図　三重平行流の ϕ

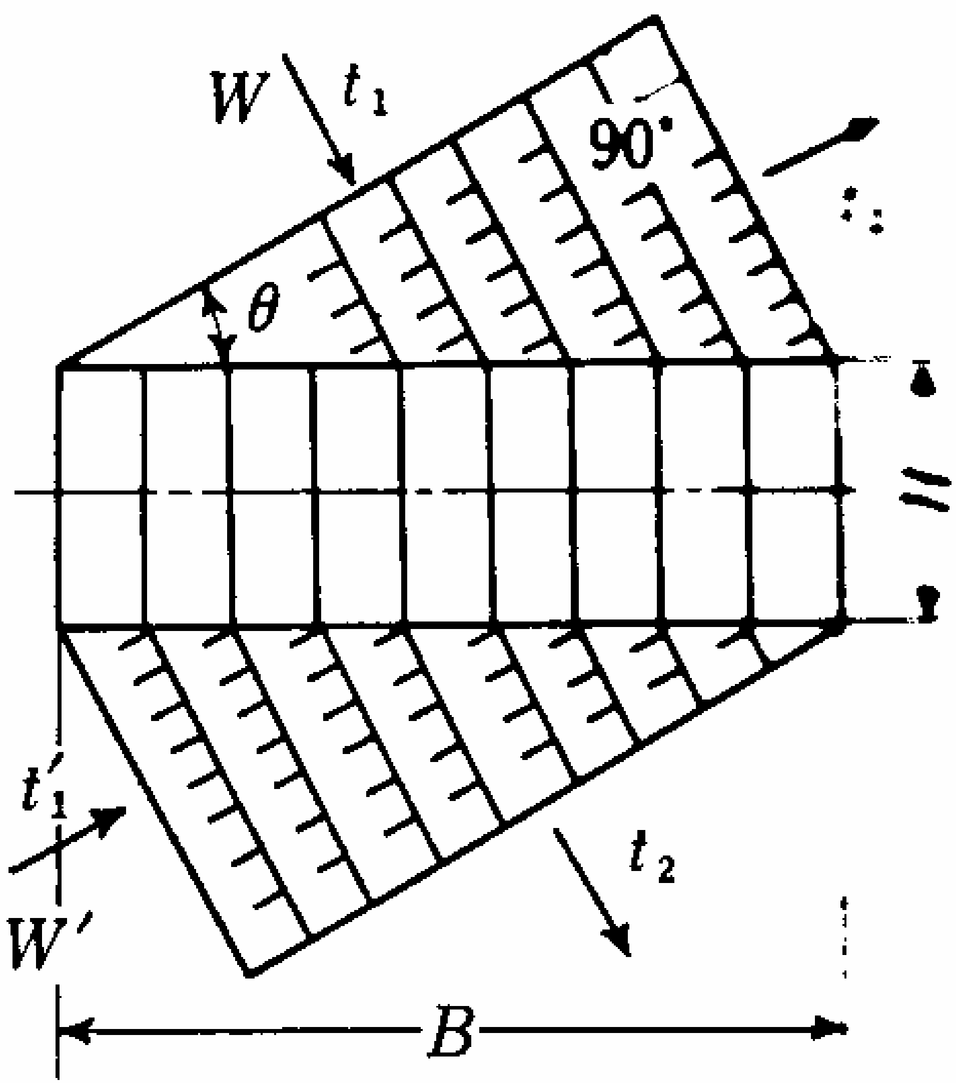
第13図　三重平行流の ϕ



第14図　直交流形熱交換器を結合した場合の総合の ϕ（その1）



第15図　直交流形熱交換器を結合した場合の総合の ϕ（その2）



第16図

向流型と直交流型の組み合わせ

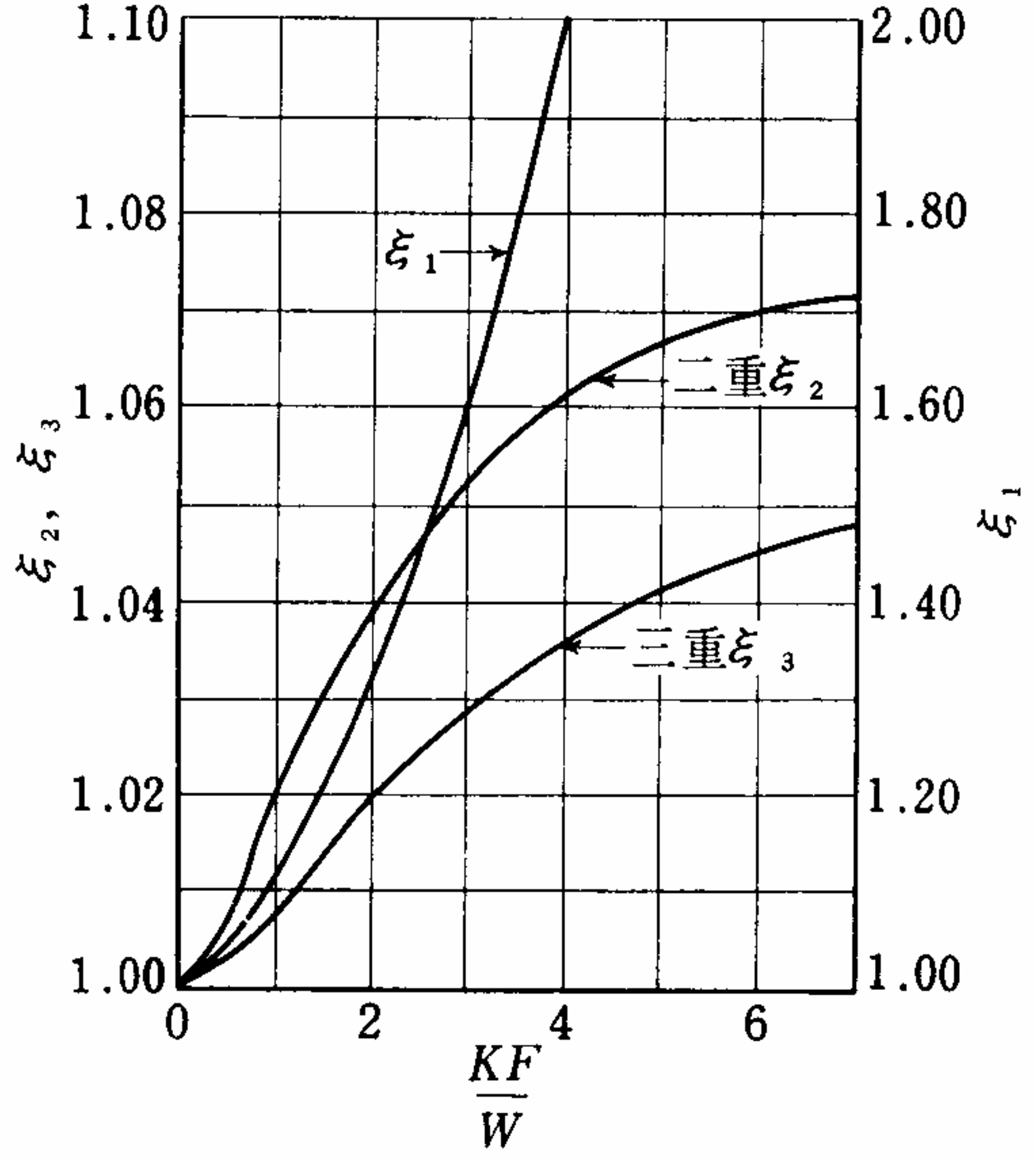
向流型に換算して温度効率ϕを求める

(KF/W) : 実際の値

(KF/W)' : 向流型に換算した値

$$\left(\frac{KF}{W}\right)' = \left(1 + \frac{1}{\xi_1} S\right)\left(\frac{KF}{W}\right)$$

$$S = \frac{B}{H} \sin\theta \cos\theta$$


ξ1
二重ξ2
三重ξ3
ξ2, ξ3
ξ1
1.10
1.08
1.06
1.04
1.02
1.00
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0
2
4
6
KF/W

第 17 図

(b)入り口出口条件及び流量を与えて伝熱面積または伝熱量、を求める場合

平行平板間流路の場合

熱交換量と対数平均温度差の関係

$$Q = KF\Delta t_m \qquad \Delta t_m = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ell n(\Delta_1 / \Delta_2)}$$

入り口出口温度条件が与えられればΔt_mが求まる。これと熱交換係数Kから熱交換量あるいは伝熱面積が決定される

平行平板間流路以外の場合

平行平板間流路と同じ方法を用いる

$$Q = KF\Delta t_m$$

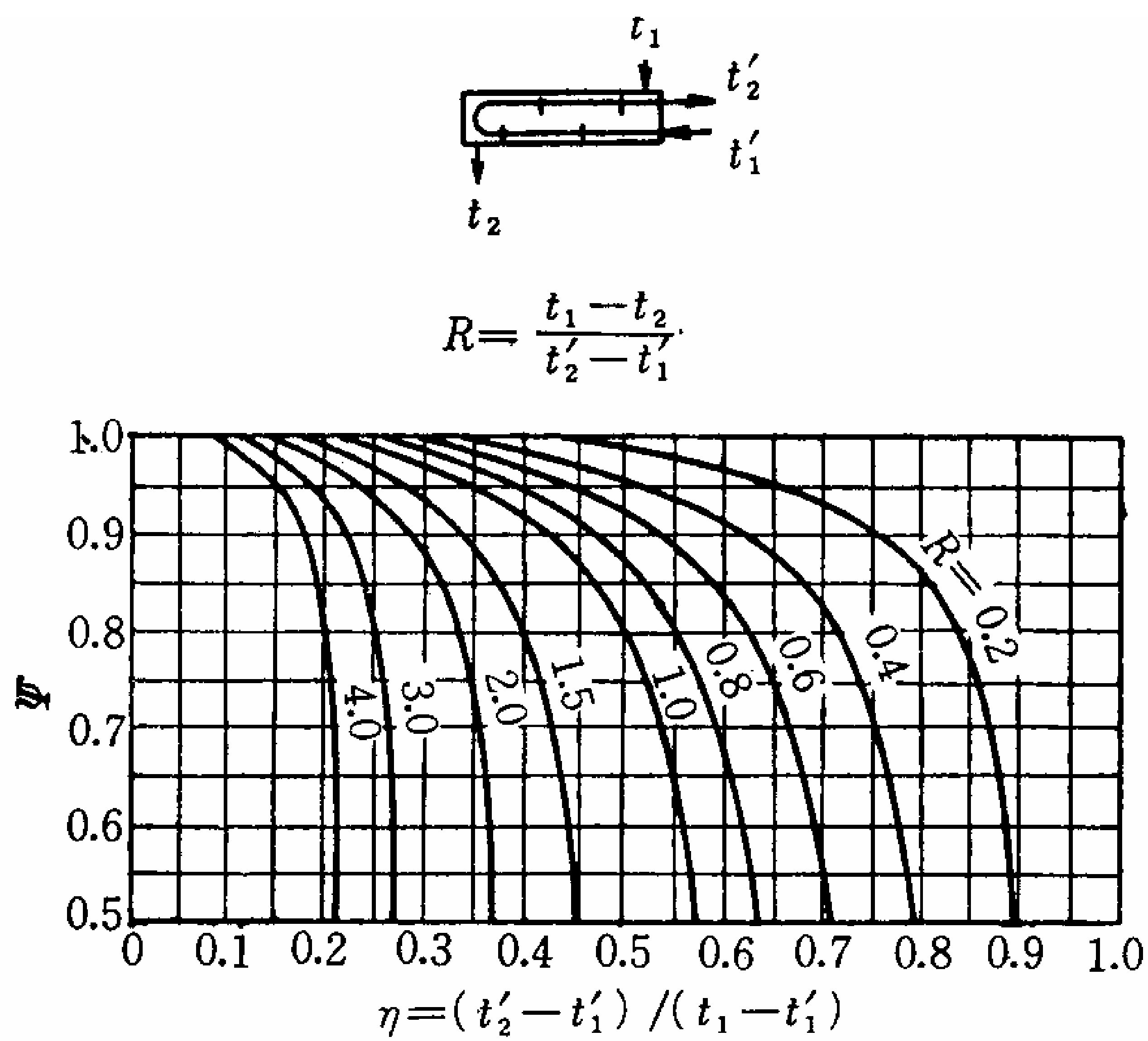
ただしΔt_mとしては次の値を用いる

$$\Delta t_m = \Psi \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ell n(\Delta_1 / \Delta_2)}$$

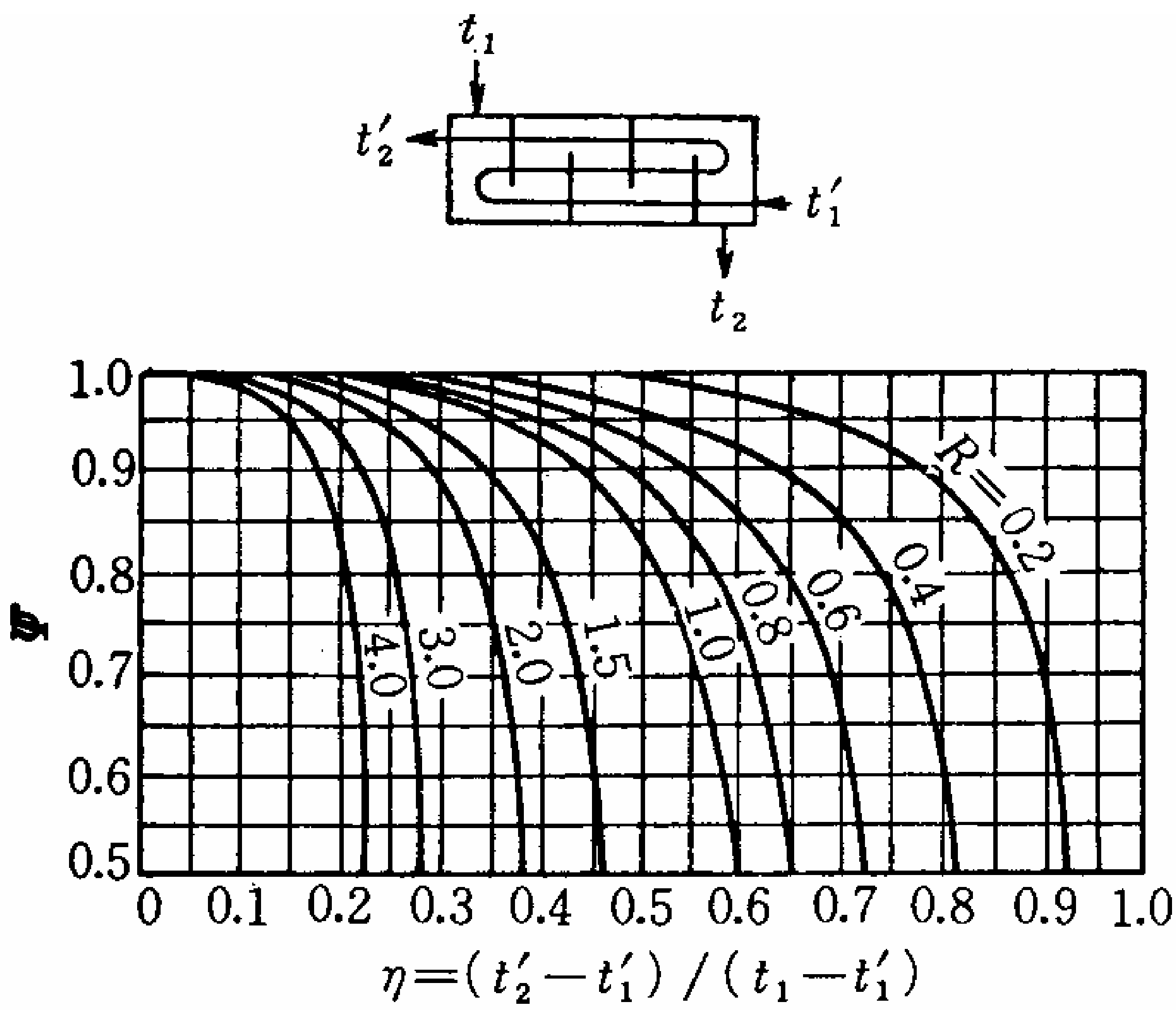
は$R=(t_1-t_2)/(t'_2-t'_1)=W'/W$をパラメータとして

ηの関数として図表で与えられる

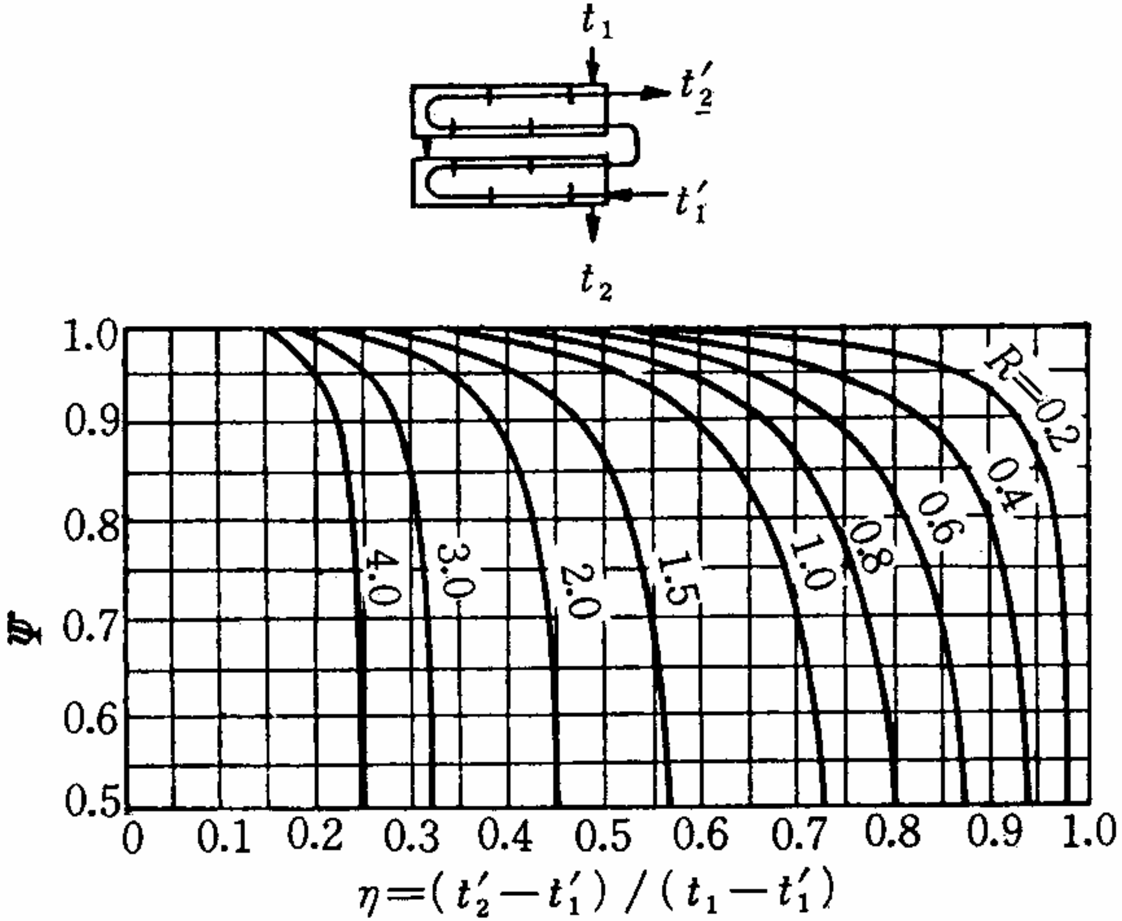
$$\eta = \phi' = \frac{t'_2 - t'_1}{t_1 - t'_1}$$



第18図　二重平行流の修正係数 Ψ



第19図　三重平行流の修正係数 Ψ



第 20 図　四重平行流の修正係数 Ψ

直交流

両流体とも混合しない場合

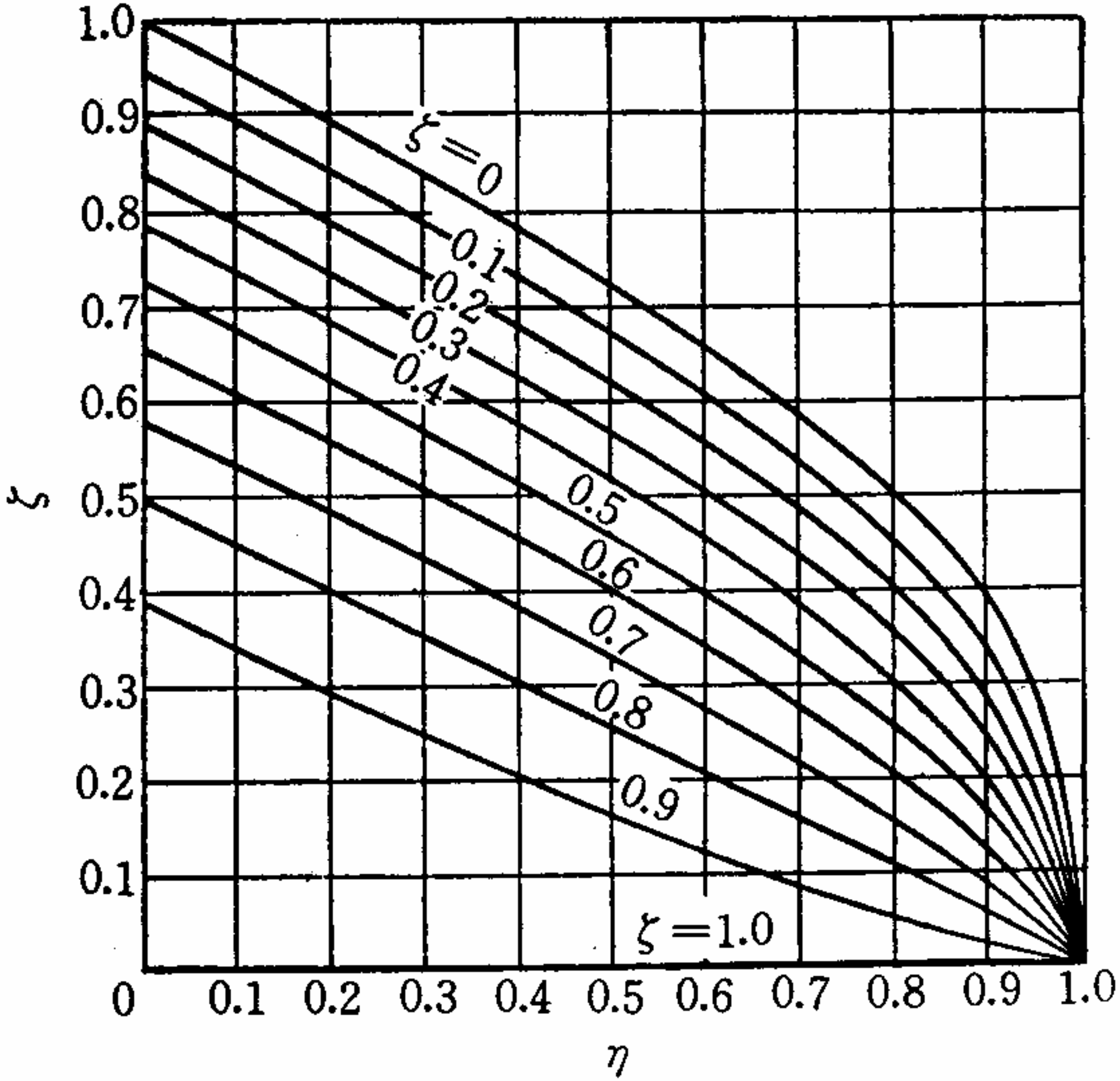
$$\eta = \phi' = \frac{t_2' - t_1'}{t_1 - t_1'}$$

$$\xi = \phi = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_1'}$$

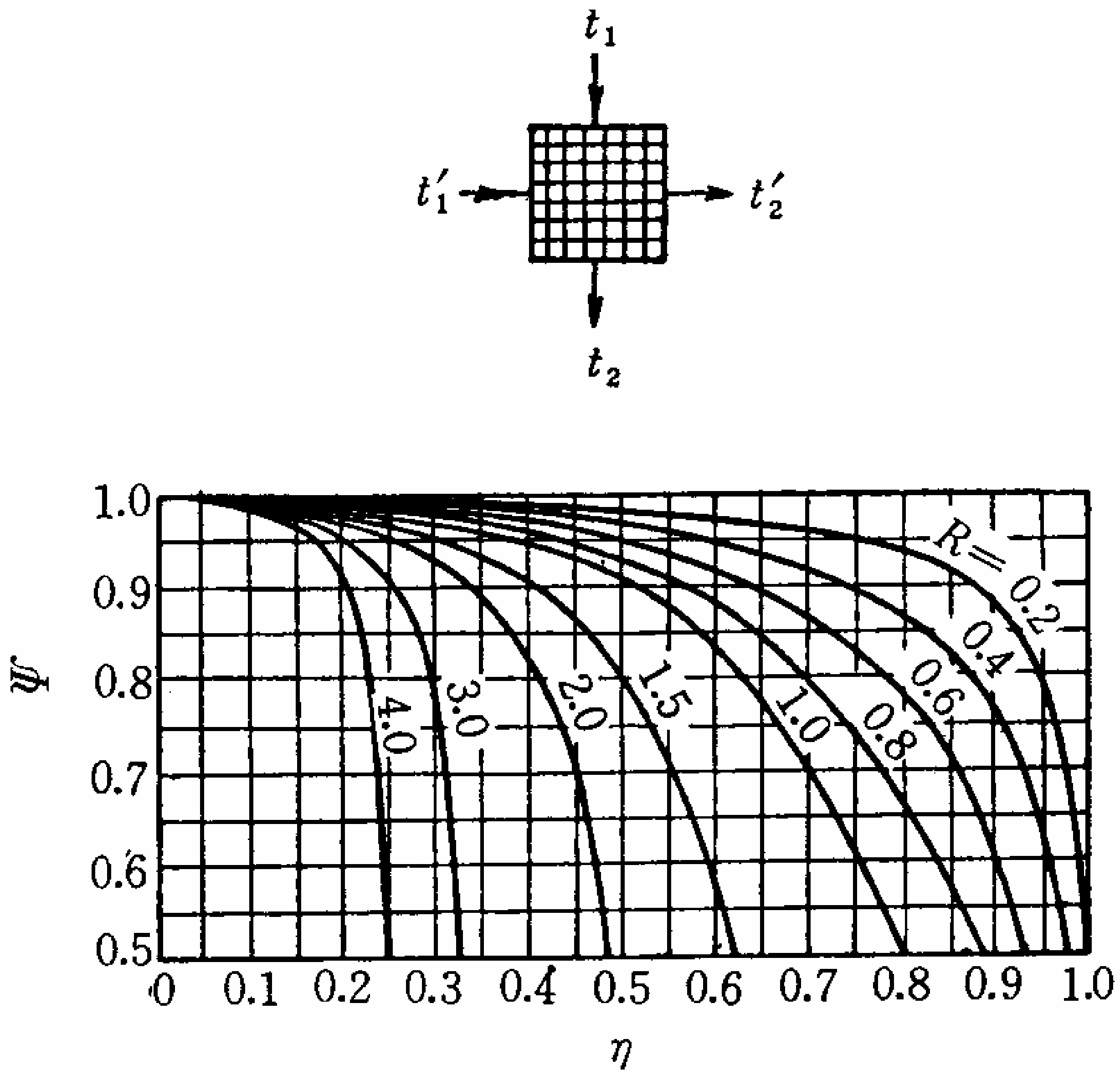
$$\zeta = \frac{\Delta t_m}{t_1 - t_1'}$$

あるいはRとηを与えてΨを求める

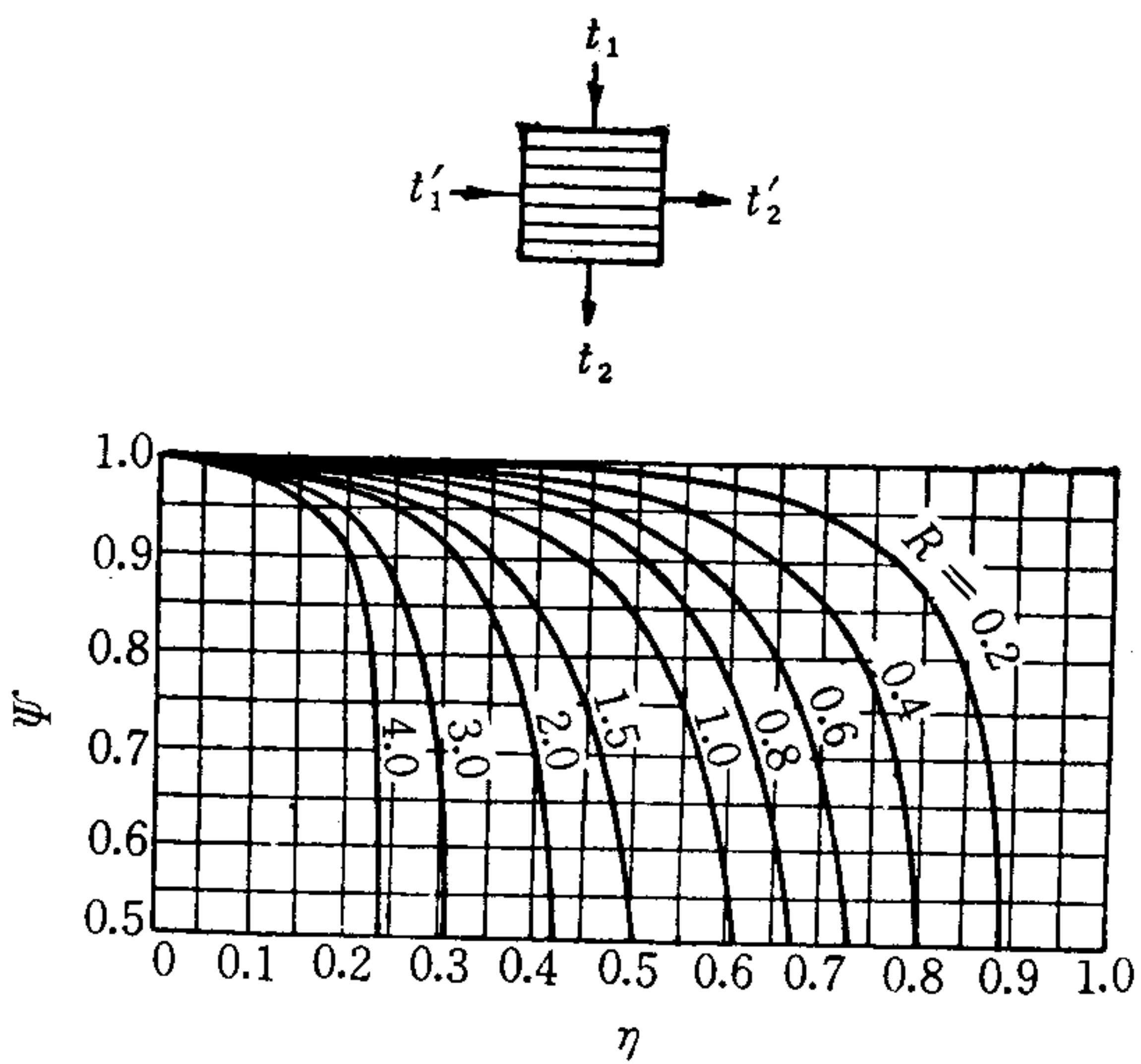
いずれも図表による



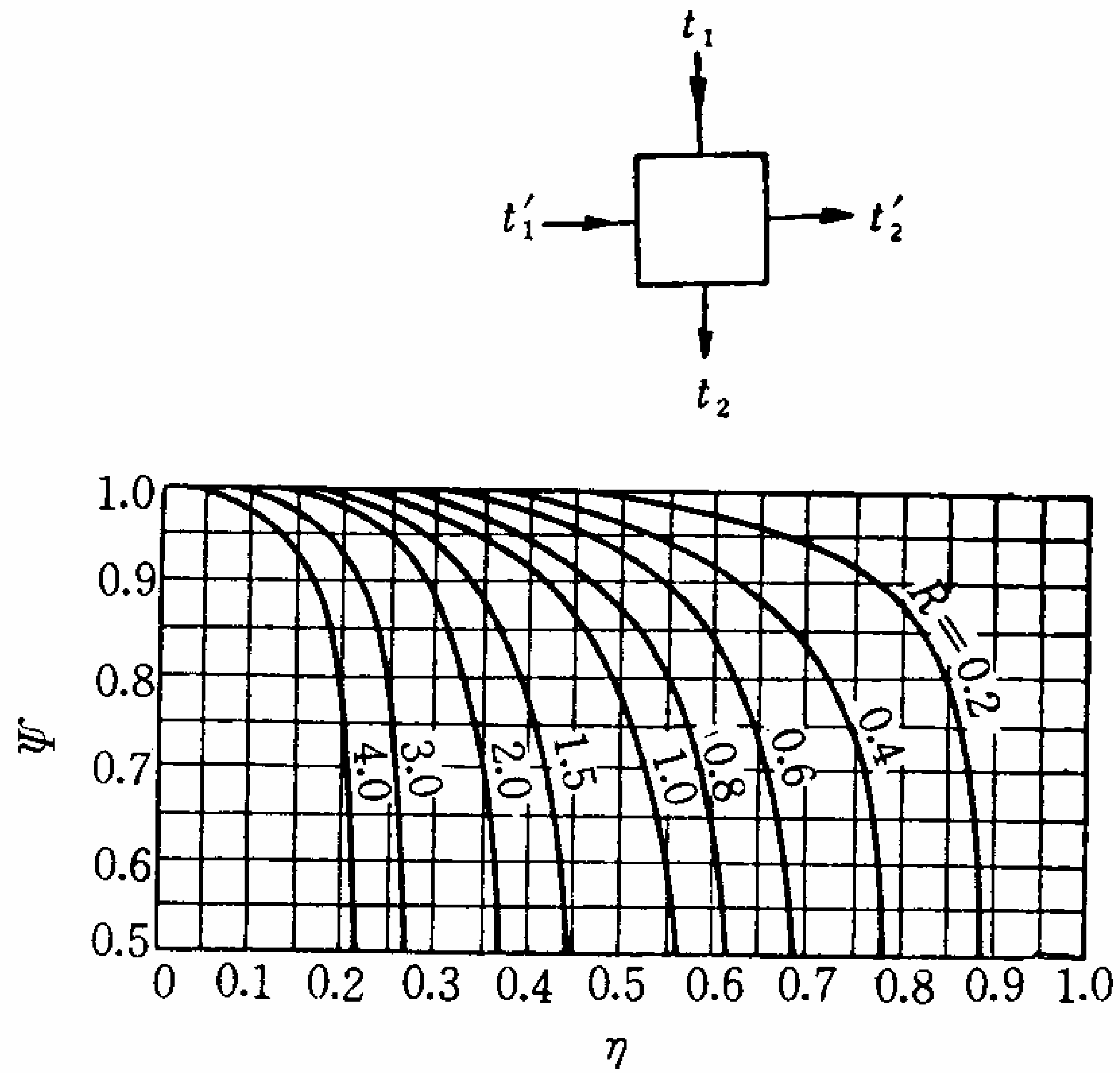
第21図　直交流で両流体とも混合しない場合の Δt_m を求める線図



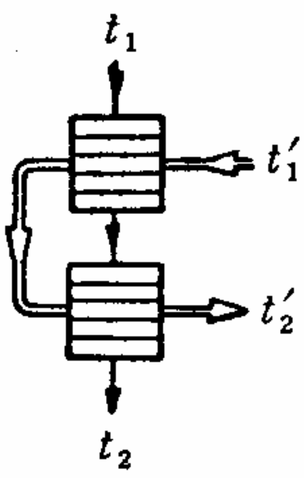
第22図　直交流で両流体とも混合しない場合の修正係数 Ψ

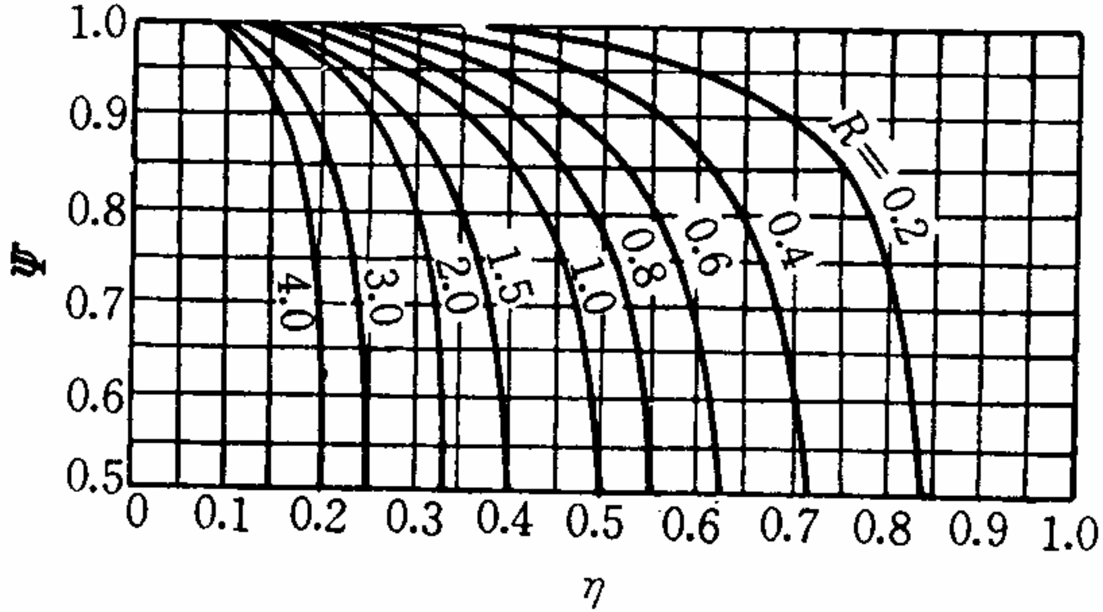


第 23 図　直交流で入口温度 t_1 側の流体のみ混合する場合の修正係数 Ψ

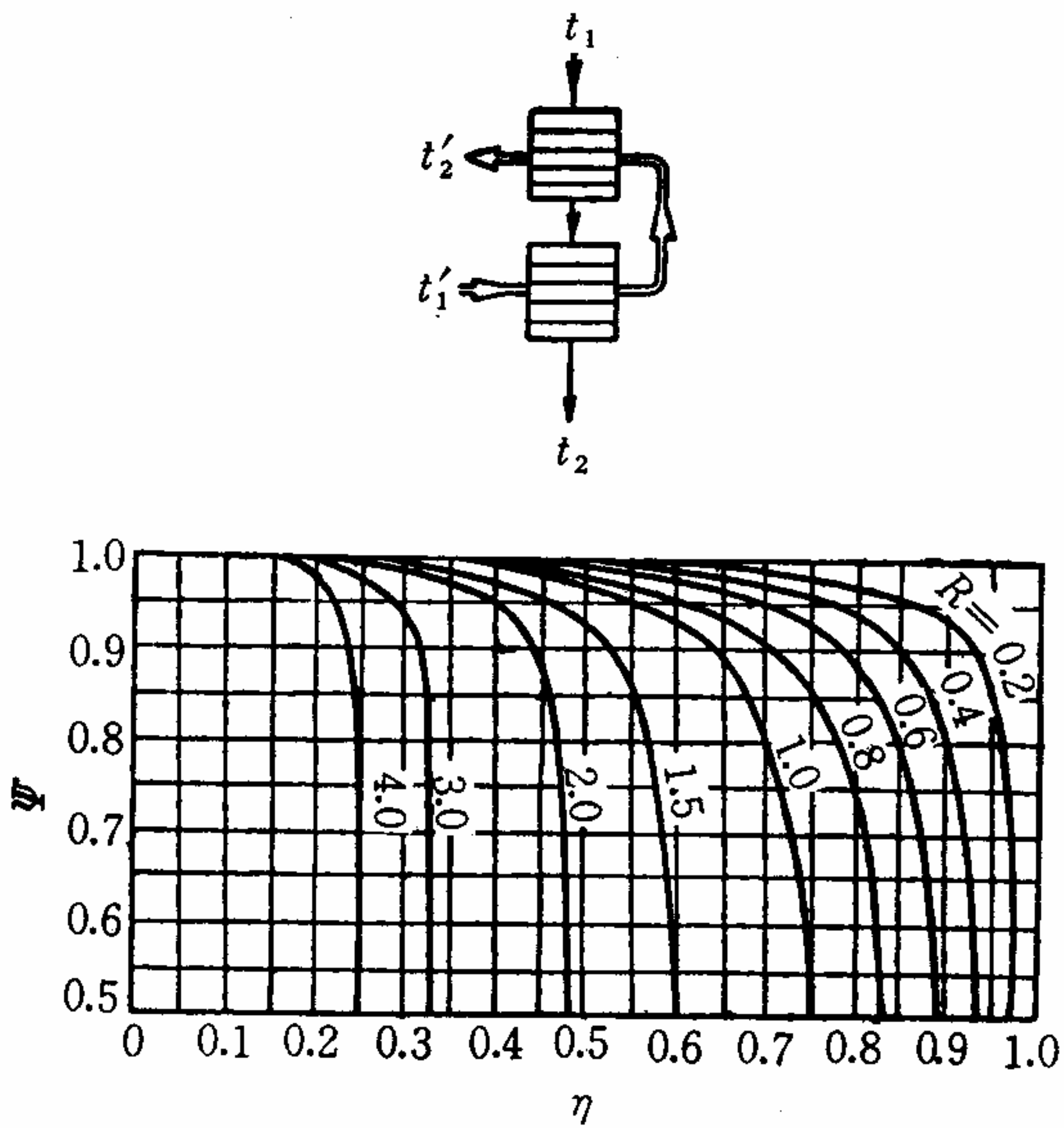


第 24 図　直交流で両流体とも混合する場合の修正係数 Ψ





第 25 図　直交流形熱交換器を結合した場合の総合修正係数 Ψ（その 1）



第 26 図　直交流形熱交換器を結合した場合の
総合修正係数 Ψ（その 2）