HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	流体を用いた発電システム設計
Author(s)	鈴木, 亮輔; 田中, 大輔
Relation	”熱電変換技術ハンドブック,” 梶川武信監修, 舟橋良次編集委員長, ISBN: 978-4-86043-257-7, 第2節”熱電発電応用”10, pp. 579-586
Issue Date	2008-12
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/50307
Type	book part
File Information	NHGH_579-586.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

10. 流体を用いた発電システム設計

10.1　流体を用いる理由

熱は広がるものであり，有効に仕事として取り出すためには熱源を集中して配置するのが有利である。熱電発電は熱の拡散現象に付随する現象であるから集中した熱源が望ましい。しかしながら，現在のところ一つひとつの熱電素子の断面積あたりの発電効率はいまだ低いので，発電量を高めるためには，安価な熱電素子を大量に製造し，大きな断面積で発電する，すなわち熱源の大きさを広げる方策が有効となる。高熱(もしくは冷熱)の発生源は限定されているから，これらの熱源を拡大して多数の熱電素子の接合部にさらすためには熱流体を用いるのが便利である[1)~3)]。

図1に示したように流体を作用媒体として，熱を熱浴と熱電変換システムとの間で循環させることができるからである。広い受熱面をもつ熱電素子に熱流体で温度差を与えると，大きな面積で発電できるので量的に大きな発電を行うことが可能となる。

10.2　流体を用いた平板型熱電発電システムの概念

本稿ではpn素子が多数結合された**図2**に示したような平板状の数mから数十mに及ぶ大きな熱電パネルを想定して，流体を用いた場合の熱電発電システム設計の概念を述べる[3)4)]。

このような1枚の平板状熱電パネルとその両面に接する熱流体とを用いて熱電発電を行う場合，**図3**に示したように，1次元では四つの場合が可能である。①一面が無限に大きな熱浴に接触し，他面に熱流体が流れる場合。②両面に沿って熱流体が流れるがその流れの向きが同方向である場合(並流)と，③反対方向である場合(向流)。図3で，④は比較として熱流体を用いない場合を示す。④は極限状態であり，両面を無限に大きな熱源に接触させて(無限に速いきわめて多量の流体に接触させて)熱電パネルの両面をそれぞれ一定の温度に保った場合である。実験室では④のようなレイアウトで熱電モジュールの特性が評価されるが，モジュールが多数集合した熱電パネルを用いる実際の発電には④はありえない。同じように，①の例は多量に冷媒が存在する場合であるが，大規模な発電を考えた場合は実現困難であろう。よって，問題は②や③の場合にどの程度

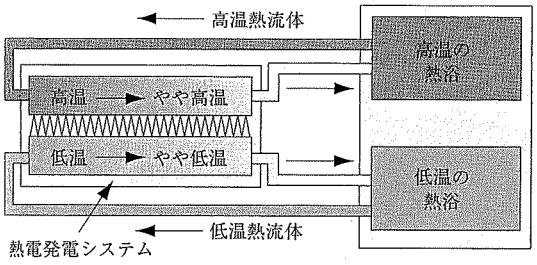


図1　高熱源と冷熱源から熱流体を用いて熱を熱電素子に与える概念図[3)]

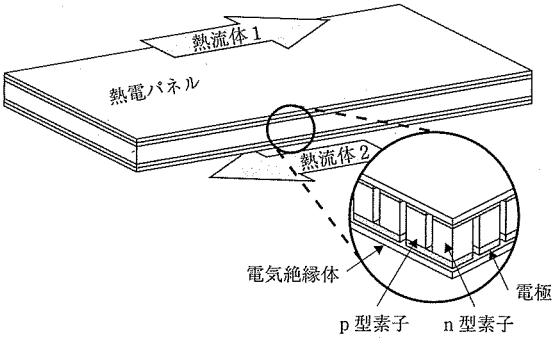


図2　熱電パネルの概念図[4)]

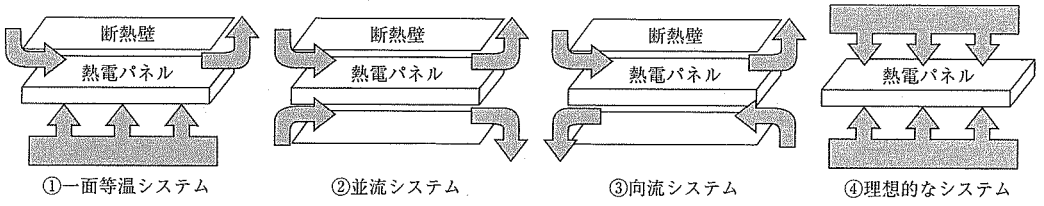


図3　熱電パネルに対する流体の配置

の発電が期待できるかにある。

例えば，②の並流の場合では，パネル上面を流れる高熱流体がパネルと接触することによって熱流体は熱を失う。すなわち，高熱流体は下流(右手)に行くほど温度が低下する。一方，パネルに与えられた熱の約90%以上は伝熱によってパネルの反対側の面にある冷熱流体に移行する。すなわち図3に例示したパネル下方の冷熱流体はパネルより与えられる熱により下流(右手)に行くほど温度が上昇する。なお，パネル通過熱のうちの一部(現状の材料では10%に満たない)が熱電変換によって電気エネルギーに変換される。したがって**図4**に模式的に示したように流体の温度は熱交換によりパネルに沿って変化する。なお，③の向流の場合では流体の向きが逆であるから流体の温度分布は②の場合と異なっている。

図4に模式的に示した温度分布は，流体の流量や熱交換の難易によって簡単に変わり得る。さらに，このようなパネル長さ方向に温度分布をもつ熱流体が熱電パネルに与える温度差によって，パネル内部に多数設けられた熱電変換素子一つの熱電発電出力に反映されるから，流体の温度制御が安定した発電には大切である。流体を用いた熱交換器の工学では流体の温度変化を解析的に扱うため，微小部分に分割して微分方程式を立てている。我々はその原理を適用して流体の温度変化から素子に与えられる温度差を算出し，すべての素子の出力の和を取ることになる。

10.3　折り返しのある多層型熱電発電システム

図3に示したように断熱壁と熱電パネルの間の流路に熱流体を流すとき，理想的な断熱体は存在しない。すなわち，数百，数千mにおよぶ大規模な流路をもつ発電システムでは断熱壁を通じて熱電発電システムの外部に漏れ出す熱も無視できなくなる。またそのような巨大な熱電発電システムをいかなる場所に設置するのかも現実には大きな問題になる。

有り難いことに流体は比較的簡単に折り返すことができる。**図5**には多数枚の平板状熱電パネルを用いたとき，流体を折り返して発電させる模式図を示した[3)4)]。このように熱電パネルを多層に折りたたむと，流路が複雑になるので設備製作コストは高くつくが，設置面積を低減でき熱の流路壁を通した漏洩を低減できる利点がある。例えば図5(c)に示した分岐型ならば，複数のパネルの両側が温度差のある流体にさらされるので熱効率の向上が期待できる。

図5(a)，(b)のように流体を180°反転させると大きな圧力損失を生じるから流動のための大きな動力が必要になる。**図6**は，流体の反転をなくすために，図5(b)を発展させて2次元および3次元で

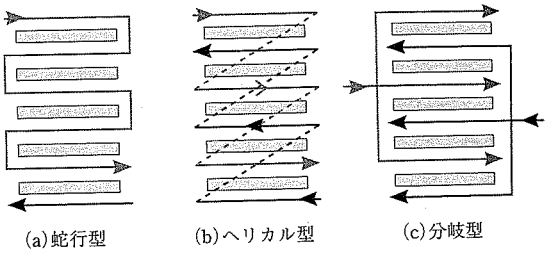


図5　流体を折り返し多層の平板状パネルで発電するシステムの例

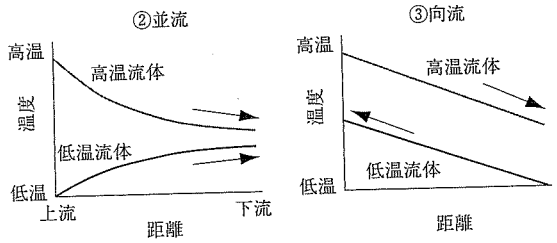


図4　流体の温度変化の模式図

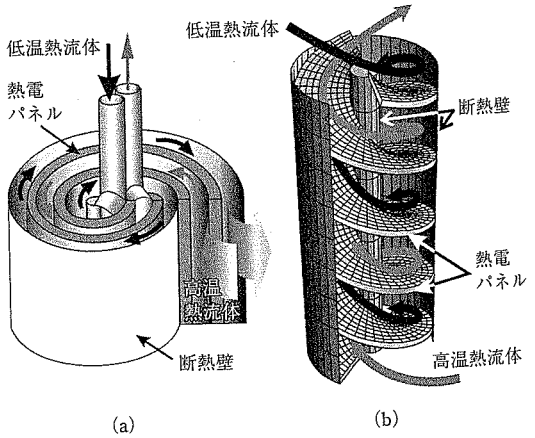


図6　流体を折り返す熱電発電システムの概念図[3)4)](口絵⑬参照)
(a)は二重の巻き寿司型，(b)は複らせん型

流体を無理なく折り返すシステム(ヘリカル型)の例を示した[3)4)]。これらは2種類の熱流体がほぼ同量流れる場合を想定している。流体の一方に，空気のような回収の必要のない安価で多量の流体を用いる場合は，さらに有効な形状，アイデアがありうる[5)~12)]。例えば自動車のラジエータや瞬間湯沸かし器のようなクロスフローを用いる3次元の熱交換器型である[5)~7)]。いずれにせよ，将来このような曲面をもつ熱電パネルが作成可能になれば，さらに多数の形状の熱電発電システムが実現可能となろう。

10.4　多層平板の熱電発電システムの出力計算

現在のπ型熱電モジュールを多数組み合わせて製造される図2に示したような平板型パネルを用い，流体の折り返しのない形状を想定して，熱電パネルを多層にして考える[3)4)]。**図7**に示したように，面に垂直な方向にのみ熱が流れるようにパネルは設計され，面内方向には熱は流れないと仮定する。n枚の長さlのパネルの間に$n+1$種類の流体が流れるとき，微小部分dxでの熱収支を微分方程式で書く。入り口から距離xの位置における上からj番目の流体温度$T_j(x)$は，流体の単位時間あたりの流量M_j，比熱C_{pj}と流路の幅wを用いて

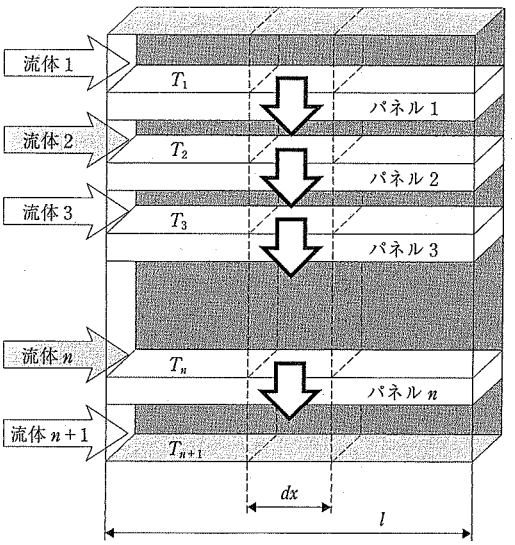


図7　多層平板状熱電パネルの熱移動モデル[3)4)]

$$\frac{d}{dx}\begin{pmatrix} T_1(x) \\ T_2(x) \\ \vdots \\ T_n(x) \\ T_{n+1}(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mp A_{11} & \pm A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \pm A_{12} & \mp(A_{12}+A_{22}) & \pm A_{22} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \pm A_{n-1,n} & \mp(A_{n-1,n}+A_{n,n}) & \pm A_{n,n} \\ 0 & 0 & 0 & \pm A_{n,n+1} & \mp A_{n,n+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(x) \\ T_2(x) \\ \vdots \\ T_n(x) \\ T_{n+1}(x) \end{pmatrix} \tag{1}$$

と書ける。i番目の熱電パネルのj番目の流体に対する係数$A_{i,j}$と総括熱伝達係数K_iはそれぞれ

$$A_{i,j} = \frac{K_i w}{M_j C_{\mathrm{p},j}} \tag{2}$$

$$K_i = \frac{1}{\dfrac{1}{h_{\mathrm{h},i}} + \dfrac{d}{\lambda} + \dfrac{1}{h_{\mathrm{c},i}}} \tag{3}$$

ここで，パネルの厚さはd，$h_{\mathrm{h},i}$および$h_{\mathrm{c},i}$はそれぞれ高温側，低温側表面における熱伝達率で，添字のhおよびcはそれぞれ高温流体，低温流体を示すことにする。熱伝達率はパネル表面にフィンなどをとり付けることによって数倍から数十倍に拡大することが可能である。また，p型およびn型熱電変換材料の熱伝導率をλ_{p}およびλ_{n}，とすると

$$\lambda = \frac{\lambda_{\mathrm{p}} \cdot s_{\mathrm{p}} + \lambda_{\mathrm{n}} \cdot s_{\mathrm{n}}}{s_{\mathrm{p}} + s_{\mathrm{n}}} \tag{4}$$

である。ここで，p型およびn型熱電素子一つの断面積がそれぞれs_{p}およびs_{n}である。なお，式(1)の符号は，図3に示したように流体の流れ方向によって適宜選択される。簡単のために流体jに接するパネルiの表面に熱電素子の接合部が露出し，接点温度がパネル表面温度$\theta_{i,j}(x)$に等しいと仮定すると，

$$\theta_{i,i}(x)=T_i(x)-\frac{K_i}{h_i}\left(T_i(x)-T_{i+1}(x)\right) \tag{5}$$

$$\theta_{i,i+1}(x)=T_{i+1}(x)+\frac{K_i}{h_{i+1}}\left(T_i(x)-T_{i+1}(x)\right) \tag{6}$$

パネル内のすべての素子が直列に接続されている場合には，その起電力Eはp型およびn型熱電素子のゼーベック係数の差αを用いて，すべての素子に生じる起電力の和であるから

$$E=\sum_{i=1}^{n}\left|\sum_{\text{panel}}\alpha\left(\theta_{i,i}-\theta_{i,i+1}\right)\right| \tag{7}$$

$$E=\sum_{i=1}^{n}\left|n_x n_y\int_0^w\int_0^l\alpha\left(\theta_{i,i}(x)-\theta_{i,i+1}(x)\right)dxdy\right| \tag{8}$$

ここで，n_xとn_yはxおよびy方向への熱電素子の数密度であり，$n_x n_y=1/(s_p+s_n)$の関係がある。パネルの電気抵抗R_iは

$$R_i=n_x n_y wld\left(\frac{\rho_p}{s_p}+\frac{\rho_n}{s_n}\right) \tag{9}$$

ρ_pとρ_nはp型およびn型熱電素子の(電気)抵抗率である。パネルの最大出力Pは外部負荷抵抗を内部抵抗R_iと等しいとおいたときに得られる。

$$P=\frac{E^2}{4\sum_{i=1}^{n}R_i} \tag{10}$$

以後，この出力Pについて議論する。

10.5　パネル1枚で並流の場合の出力

熱電パネルが単層で並流にさらされているとき，流体温度はその入り口温度をT^{in}とすれば，これを境界条件として式(1)を解いて

$$T_h(x)=\frac{M_h C_{p,h}T_h^{in}+M_c C_{p,c}\left(\left(T_h^{in}-T_c^{in}\right)\exp\left(-DKwx\right)+T_c^{in}\right)}{M_h C_{p,h}+M_c C_{p,c}} \tag{11}$$

$$T_c(x)=\frac{M_h C_{p,h}\left(T_h^{in}-\left(T_h^{in}-T_c^{in}\right)\exp\left(-DKwx\right)\right)+M_c C_{p,c}T_c^{in}}{M_h C_{p,h}+M_c C_{p,c}} \tag{12}$$

$$D=\frac{1}{M_h C_{p,h}}+\frac{1}{M_c C_{p,c}} \tag{13}$$

となる。よって起電力と出力P_1は

$$E=\frac{M_h M_c C_{p,h}C_{p,c}n_x n_y d\alpha\left(T_h^{in}-T_c^{in}\right)\left(1-\exp\left(-DKwl\right)\right)}{\left(M_h C_{p,h}+M_c C_{p,c}\right)\lambda} \tag{14}$$

$$P_1=\frac{M_h^2 M_c^2 C_{p,h}^2 C_{p,c}^2 n_x n_y d\alpha^2\left(T_h^{in}-T_c^{in}\right)^2\left\{1-\exp\left(-DKwl\right)\right\}^2}{4wl\left(M_h C_{p,h}+M_c C_{p,c}\right)^2\left(\frac{\rho_p}{s_p}+\frac{\rho_n}{s_n}\right)\lambda^2} \tag{15}$$

ここでは行列式を用いた解法を示したが，ラプラス変換やフーリエ変換を用いた解法でも同じ解を得る[13)~15)]。ここでは最も簡単なモデルにおける解を示した。パネルが多層になると微分方程式(1)の解は一般に複雑になるが，すべての流路について流体の運ぶ単位時間あたりの熱量$M_i C_{p,i}$が同じであり，総括熱伝達係数K_iが一定値Kである場合に限って，上式はきわめて簡単な形に纏めることができる。

$$P_2=MC_p\frac{Kd}{\lambda}Z\left(T_h^{in}-T_c^{in}\right)^2\cdot L\left(s_p,s_n\right)\cdot\Phi_{1P}(X) \tag{16}$$

ここでZはよく知られた性能指数である。

$$Z=\frac{\left(\alpha_p-\alpha_n\right)^2}{\left(\sqrt{\rho_p\lambda_p}+\sqrt{\rho_n\lambda_n}\right)^2} \tag{17}$$

$$L\left(s_p,s_n\right)=\frac{s_p s_n\left(\sqrt{\rho_p\lambda_p}+\sqrt{\rho_n\lambda_n}\right)^2}{\left(\lambda_p s_p+\lambda_n s_n\right)\left(\rho_p s_n+\rho_n s_p\right)} \tag{18}$$

$$\Phi_{1P}(X)=\frac{\left(1-e^{-2X}\right)^2}{16X} \tag{19}$$

ここでXは無次元長さであり，次式で定義される。

$$X=\frac{Kwl}{MC_p} \tag{20}$$

関数$\Phi(X)$はパネルの枚数，流れの方向で異なる特徴的な無次元関数であり，式(19)で示した$\Phi_{1P}(X)$は単層向流の場合の無次元関数である。なお，$L(s_p,$

s_n)は断面積の関数であり，素子の寸法を次式のように定めると最大値1となる。

$$\frac{s_n}{s_p}=\sqrt{\frac{\rho_n\lambda_p}{\rho_p\lambda_n}} \tag{21}$$

よって上式で素子寸法を最適化したパネルを用い，あるパネル枚数，流れ方向での最大出力 $P_2=P_3$ は

$$P_3=\Phi_{1P}(X)_{\max}\cdot MC_p\frac{Kd}{\lambda}Z\left(T_h^{in}-T_c^{in}\right)^2 \tag{22}$$

となる。

10.6　発電システムの最大出力

発電システムの最大出力 P_3 は材料の性能指数 Z と温度差の二乗に比例するのはもちろんであるが(ここでは入り口温度差であることに注意)，そのほかにも流量 M，総括熱伝達係数 K などに依存する。関数 $\Phi(X)$ は材料や流体の物性に依存せず発電システムの構造のみを反映している。とくにパネルの大きさに注目すると，パネルの無次元長さ X が式(22)で関係する項は無次元関数 $\Phi(X)$ のみである。

1枚のパネルによって発電するときを想定すると，発電システムの最大出力 P_3 は**図8**に示した無次元関数 $\Phi(X)$ に比例する。パネル長さ X が小さいときは流体にさらされる素子の個数が少ないため発電出力が小さいが，ある長さ以上になると，素子の個数が多いために内部抵抗が大きくなりすぎること，および，流体間の熱交換によりパネルに与えられる温度差が小さくなること，によって発電出力が減少する。これらの相反する特性により関数 $\Phi(X)$ に最大値が生じる。したがって，発電の操業にあたっては関数 $\Phi(X)$ の把握が重要であり，流体の性質とパネルの特性がシステムの設計に大きな影響を与える。

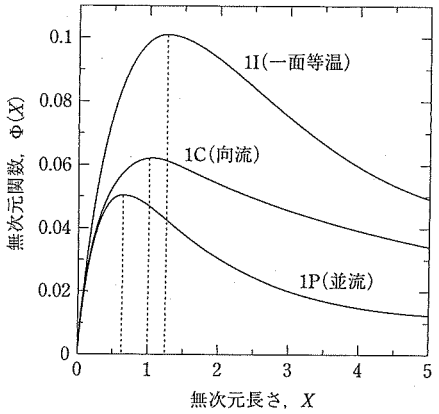


図8　単層パネルにおける無次元関数 $\Phi(X)$[3)4)]

図3①に示した一面を等温に保つ場合(1I)は，向流や並流に比べて大きな出力を得ることができるが，等温に保つために無限の熱流体が必要であることを考えると現実的ではない。同一物質で同一流量の高温，低温流体を用いる場合，1Cと表した向流の方が大きな発電が可能である。1Pと表した並流では下流になると二つの流体の温度差が接近するため著しく発電能力が低下する。ただし，大きな発電パネルを準備できない場合は1Pの方が，単位パネル長さあたりでは効率の良い発電が可能である。

10.7　多層パネルの場合

多段の場合に報告されている関数 $\Phi(X)$ を**図9**および**図10**と**表1**に示した[3)4)]。どの関数 $\Phi(X)$ もシステムの構造を反映してある特定のパネル長さ $X=\delta$ で最大値 $P_3=\gamma$ をとる。δ と γ の関係を**図11**に示した。

例えば4層にパネルを分割して向流で流す場合(4CH)，単層の1Cに比べ，γ は96.3%に低下する。しかし，発電に必要なパネル長さ δ は1Cの22.5%であって，設置面積を1/4以下に縮小できる。また4枚となるパネルの全長は1Cの90%に収めることができる。例えば，廃熱のように熱流体は廉価であるが，高価な熱電パネルの使用量が制限されるとき，多層にパネルを分割することが有利になる。このように無次元関数 $\Phi(X)$ を用いて無次元長さ X に対する最大出力を検討して発電システムを設計できる。

10.8　まとめ

本稿では，平板状熱電パネルを用い，その両面に熱流体を流して発電する場合について，15の発電システムを検討した。総括熱伝達係数 K を用いて，流体の流量 M と発電量の関係を示した。二つの流体の流量が等しいとき，複雑な発電出力式は簡単になり，無次元関数 $\Phi(X)$ を導入することで発電システム間の良否を検討できる。発電パネルを多段に分割し，多層に積み重ねることによって，少ないパネル使用量で単層パネルとほぼ同量の発電が可能になる。大きな発電量を得るためには，材料の性能指数の向上は大切であるが，システムの設計も同程度に

表1　多層平板に対する無次元関数 $\Omega(X)$

$$\Phi_{1P}=(1-\exp(-2X))^2/16X,\Phi_{1C}=X/4(1+X)^2,$$

$$\Phi_{1I}=(1-\exp(-X))^2/4X,\Phi_{2X}=(1-\exp(-X))^2/8X,$$

$$\Phi_{2PM}(X)=\frac{\left\{-1+\sqrt{2}-\left(1+\sqrt{2}\right)e^{2\sqrt{2}X}+2e^{(1+\sqrt{2})X}\right\}^2}{2\left\{2-\sqrt{2}+\left(2+\sqrt{2}\right)e^{2\sqrt{2}X}\right\}^2X},$$

$$\Phi_{2CM}=\left(1-e^{-X}\right)^2/8X,\Phi_{2CH}=1/2X(2+\coth X)^2,$$

$$\Phi_{2IM}=\frac{\left\{-\sqrt{5}e^{X/2}+\sqrt{5}\cosh\left(\sqrt{5}X/2\right)+3\sinh\left(\sqrt{5}X/2\right)\right\}^2}{8X\left\{2+3\cosh\left(\sqrt{5}X\right)+3\sqrt{5}\sinh\left(\sqrt{5}X\right)\right\}},$$

$$\Phi_{2I}=\frac{e^{(-1-\sqrt{5})X}\left\{\left(-3+\sqrt{5}\right)e^{X/2}-2\sqrt{5}e^{\sqrt{5}X/2}+\left(3+\sqrt{5}\right)e^{(1/2+\sqrt{5})X}\right\}^2}{32X\left\{-2+7\cosh\left(\sqrt{5}X\right)+3\sqrt{5}\sinh\left(\sqrt{5}X\right)\right\}},$$

$$\Phi_{3CM}=\frac{\left\{-1+(1+2X)\cosh\left(\sqrt{2}X\right)\right\}^2}{6X\left\{\sqrt{2}(2+X)\cosh\left(\sqrt{2}X\right)+\sinh\left(\sqrt{2}X\right)\right\}^2},$$

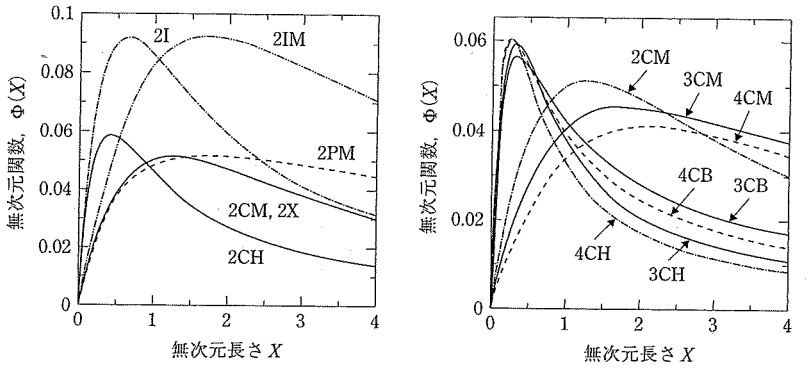
$$\Phi_{3CH}=\frac{\left\{2X\cosh\left(X/\sqrt{2}\right)+\sqrt{2}\sinh\left(X/\sqrt{2}\right)\right\}^2}{3X\left\{(2+4X)\cosh\left(X/\sqrt{2}\right)+\sqrt{2}(2+X)\sinh\left(X/\sqrt{2}\right)\right\}^2},$$

$$\Phi_{3CB}=\frac{\left[\sqrt{2}\left\{-1+(1+4X)\cosh\left(2\sqrt{2}\right)X\right\}+(1+6X)\sinh\left(2\sqrt{2}X\right)\right]^2}{12X\left[\sqrt{2}\left\{-1+(3+4X)\cosh\left(2\sqrt{2}X\right)\right\}+2(2+3X)\sinh\left(2\sqrt{2}X\right)\right]^2},$$

$$\Phi_{4CM}=\frac{\left[\begin{array}{l}-2e^{(1+3\sqrt{5})X/2}\left(-1+e^X\right)\left(11+3e^X\right)\\+e^X\left\{-11-5\sqrt{5}+\left(7-3\sqrt{5}\right)e^X\right\}\\+e^{(1+3\sqrt{5})X}\left\{-11-5\sqrt{5}+\left(7+3\sqrt{5}\right)e^X\right\}\\+e^{\sqrt{5}X}\left[-10+6\sqrt{5}+e^X\left\{11-3\sqrt{5}+\left(3-\sqrt{5}\right)e^X\right\}\right]\\+e^{2\sqrt{5}X}\left[-10-6\sqrt{5}+e^X\left\{11+3\sqrt{5}+\left(3+\sqrt{5}\right)e^X\right\}\right]\\e^{(1+\sqrt{5})X/2}\left[-1-\sqrt{5}+e^X\left\{8-6\sqrt{5}-\left(7-3\sqrt{5}\right)e^X\right\}\right]\\+e^{(1+5\sqrt{5})X/2}\left[-1+\sqrt{5}+e^X\left\{8+6\sqrt{5}-\left(7+3\sqrt{5}\right)e^X\right\}\right]\end{array}\right]^2}{\begin{array}{l}4X\left\{\left(5-3\sqrt{5}\right)e^X+10e^{\sqrt{5}X}+\left(5+3\sqrt{5}\right)e^{(1+2\sqrt{5})X}\right\}^2\\\cdot\left\{\left(-3+e^X\right)\left(-1+e^{\sqrt{5}X}\right)+\sqrt{5}\left(-1+e^X\right)\left(1+e^{\sqrt{5}X}\right)\right\}^2\end{array}},$$

$$\Phi_{4CH}=\frac{\left\{\begin{array}{l}5e^{2\sqrt{5}X}-5\sqrt{5}e^{(1+\sqrt{5})X}-5e^{2(1+\sqrt{5})X}+5\sqrt{5}e^{(1+3\sqrt{5})X}\\-2\left(5+\sqrt{5}\right)e^{3(1+\sqrt{5})X/2}-2\left(-5+\sqrt{5}\right)e^{(1+3\sqrt{5})X/2}\\+2\left(5+\sqrt{5}\right)e^{(1+\sqrt{5})X/2}+2\left(-5+\sqrt{5}\right)e^{(3+5\sqrt{5})X/2}\end{array}\right\}^2}{4X\left\{\begin{array}{l}-8e^{(1+\sqrt{5})X}+4\left(5-2\sqrt{5}\right)e^{(1+\sqrt{5})X/2}-20e^{(3+5\sqrt{5})X/2}\\-5e^{(2+\sqrt{5})X}-20e^{3(1+\sqrt{5})X/2}+4\left(5+2\sqrt{5}\right)e^{(1+3\sqrt{5})X/2}\\+15e^{\sqrt{5}X}+\left(9-10\sqrt{5}\right)e^X+\left(9+10\sqrt{5}\right)e^{(1+2\sqrt{5})X}\end{array}\right\}^2},$$

$$\Phi_{4CB}(X)=\left\{-1+e^{5X}(1+45X)\right\}^2/4X\left\{2-9e^{5X}(3+10X)\right\}^2$$



(a)2層パネル　　(b)3，4層パネル

図9　多層パネルにおける無次元関数 Φ(X)[3)4)]

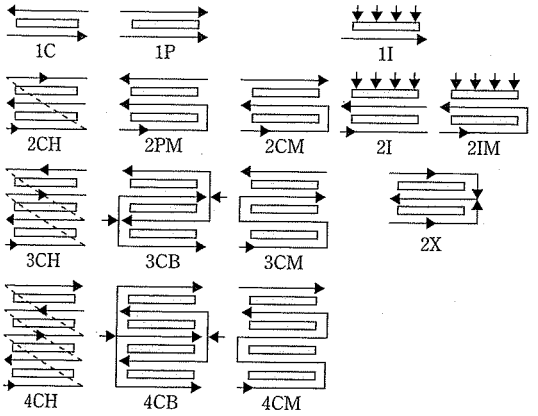


図10　多層パネルへの流体の流れ方向

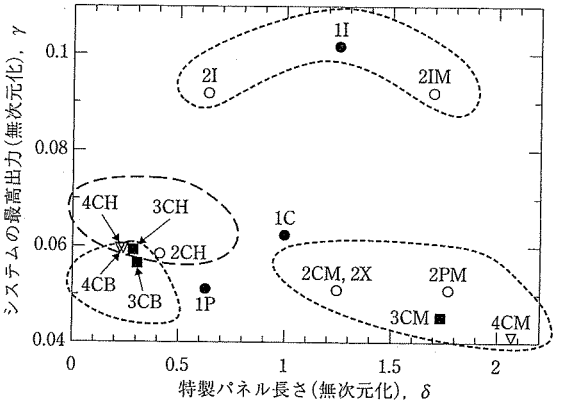


図11　無次元関数 Φ(X) を最大にするパネル長さ δ とその最大値 γ の関係[3)4)]

重要であり，流体の特性向上，パネル表面における熱伝達促進，適切なパネル厚さ，等を検討する必要がある。

平板以外に，図6に例示した多重円筒，多重円管，二重らせん型，などについて，同様に無次元関数 Φ(X) を用いて無次元長さ X に対する最大出力を著者らは報告している[5)~11)]。円筒や円管ではパネル半径の効果も現れて複雑になるが，考え方は同様である。また流体力学，伝熱工学の基礎から，熱伝達係数が流速に依存する効果や，乱流から層流になる効果，なども大切である。これらの効果は，解析解では取り扱えず，計算機を用いた流体力学，伝熱学の数値解となる。計算機の進歩によって，これらシミュレーションは今後のシステム設計に重要であろう[16)17)]。

【参考・引用文献】

1) K. Ono and R.O. Suzuki : *J. Metals,* Dec. 49-51(1998).
2) K. Ono and R.O. Suzuki : Proc. XVII Intern. Conf. of Thermoelectrics(ICT98), The Inst. Elect. Elect. Eng. (IEEE), pp. 515-518(1998).
3) R.O. Suzuki, D. Tanaka and S.-I. Toda : Proc. 22nd Intern. Conf. on Thermoelectrics, The Inst. Elect. Elect. Eng. (IEEE), pp. 550-553(2003).
4) R.O. Suzuki and D. Tanaka : *J. Power Sources,* **124**(1), 293-298(2003).
5) T. Kyono, R.O. Suzuki and K. Ono : *IEEE Transactions on Energy Conversion,* **18**(2), 330-334(2003).
6) R.O. Suzuki, S.-I. Toda, S. Yoshikawa and K. Tamayama : Proc. Joint Intern. Conf. on Sustainable Energy and Environment, Vol. 1, pp. 167-170(2004).

7) S.-I. Toda, R.O. Suzuki, K. Kondo, S. Nakai, S. Yoshikawa and K. Tamayama : Proc. 23rd Intern. Conf. on Thermoelectrics, The Inst. Elect. Elect. Eng. (IEEE)#042, pp. 1–4(2004).

8) R.O. Suzuki and D. Tanaka : *J. Power Sources*, **132**(1–2), 266–274(2004).

9) R.O. Suzuki : *J. Power Sources*, **133**(2), 277–285(2004).

10) R.O. Suzuki, D. Tanaka and S.-I. Toda : Proc. 23rd Intern. Conf. on Thermoelectrics, The Inst. Elect. Elect. Eng. (IEEE)#006, pp. 1–4(2004).

11) R.O. Suzuki and D. Tanaka : Proc. 25th Intern. Conf. on Thermoelectrics, The Inst. Elect. Elect. Eng. (IEEE), pp. 305–310(2006).

12) C. Lertsatitthanakorn, N. Khasee, S. Atthajariyakul, S. Soponronnarit, A. Therdyothin and R.O. Suzuki : *Solar Energy Materials & Solar Cells*, in press(2008).

13) B. Mathiprakasam, T. Sutikno and J. Beeson : Proc. 4th Intern. Conf. on Thermoelectrics, The Inst. Elect. Elect. Eng. (IEEE), p. 61(1982).

14) J. Esarte, G. Min and D.M. Rowe : *J. Power Sources*, **93**, 72–76(2001).

15) A.K. Pramanick and P.K. Das : *Intern. J. Heat Mass Transfer*, **49**, 1420–1429(2006).

16) G. Min and D.M. Rowe : *Energy Conversion and Management*, **43**, 221–228(2002).

17) J. Yu and H. Zhao : *J. Power Sources*, **172**, 428–434(2007).

＜鈴木　亮輔／田中　大輔＞