熱工学における混相流^{*}

Mixed Phase Flow in Heat Engineering

一 色 尚 次^{**}

ISSHIKI Naotsugu

Keywords: 熱工学(Thermal engineering)、伝熱工学(Heat transmission)、流体力学(Fluid engineering)

1. 初めにあって

このたび日本混相流学会がいよいよ発足に到ったことはまことに喜ばしいことである。赤川初代会長はじめ関連の方々のご努力に讃辞を呈するとともに心から祝いたい。

さてその発足の日に特別講演をすることとなり、混相流と熱工学について考えてみた。

まず熱工学とまでいかなくとも、驚いたことは、わが国の風土と文化が大自然の混相流と相変化の上に成り立っていることである。

たとえば百人一首の寂蓮法師の歌に「むらさめのつゆもまだひぬまきの葉に、霧立ちのぼる秋の夕ぐれ」というのがあるが、夕日の中に雨が蒸発して対流上昇して行く相変化と混相流のありさまがよくあらわれている。ちなみに百人一首の中の約1/3が気液、固液の混相現象や霧化現象に関連している。まさに日本人の心情は混相をみつめる所に始まったと考えられた。

そこで漢字の中から混相に関連すると思われる字を任意に選び出してみると、第一表のようになる。もちろんこれは筆者の主観的選択であって決して完全ではないが、大地と水と空気から成り立つ大自然にいかにも多くの混相流や混相現象、相変化現象があるかということを、アジアの人々がそれをよく見つめてきたことがわかる。

まさに混相流学会は東洋と日本の文化的、風土的な基盤の上に出現すべくして現れたという大きな必然性と壮大で広汎な領域に立っている自覚を持つべきであろう。

筆者はこの学会が単に技術分野に止まらず、無限に広い大自然とそれを語る人文科学、哲学、文学にいたるまでの広い分野の包含と発展をされることをまず期待して止まない。

2. 熱を伴う混相現象の特色

さて問題を、熱を伴う熱工学的混相現象だけに絞って考えてみると、それはつぎの四々の大きな特色があると考えられる。それは、

* 1987.9.24 受理 (1987年7月13日、日本混相流学会設立総会における記念講演)

** 日本大学工学部

連絡先 東京都世田谷区経堂2-29-6

表 1 混相流に関係のある漢字例

雨	霏	露	混	溶	波	溝	漂	浩	浸
雲	霜	霾	沙	潤	浪	濃	瀬	淋	滓
雪	霞	靄	沸	滑	滴	淡	溢	渫	漣
雹	霰	雰	澄	濁	沢	流	渾	漪	滴
霈	霧	霍	渚	泥	潮	湿	汽	沌	淅
霄	霰	零	溶	泡	浮	濯	浚	滔	

- (1) 多彩な相変化を伴う
- (2) エネルギー変換がある
- (3) 脈動と限界がある
- (4) 熱伝達が向上する

の四者である。

まず(1)の相変化があることは、熱を伴わない単純混相流と全く違うところで、むしろ相変化のある所に混相流があると言える。

どのような相変化があるかというと、単純な固相、液相、気相の相互変化だけでなく、水溶液の濃度変化を伴うような場合を含めると第2表のようになる。第2表の現象と第1表の漢字との対応を調べるのみ興味あることである。

表 2 熱・流体混相相変化の各種

沸	騰	蒸	発	昇	華	気	化
凝	縮	吸	収	再	生	濃	縮
吸	着	蒸	着	稀	釈	燃	焼

ついで(2)のエネルギー変換は、ボイラーや水冷却原子炉内を始めとして空調、冷凍、多相MHDや二相タービンさらには無重力宇宙船内などにも及び、また気化器や燃焼バーナーなどを通じて内燃機関にも深い関連があつて、工学的な熱機器に混相流エネルギー変換はつきものである。

(3)の脈動と限界の存在は、バーンアウト現象、溢流現象、レーリーの不安定、限界ウェーバー数、等多くの限界現象が混相流と深い関連をもっていることから生ずることであつて、原子炉を始めとする各種機器の安全性の確保に重要な関連を持つ。

(4)の熱伝達の向上は単相流より気液、固液、固気のいずれの混相流もほとんど全部が熱伝達率の改善向上に役立っていることに関するものであり、この特色は多くの実際的な工業的利用につながっている。

3. 混相流による運動エネルギー変換について

前述のように混相流がエネルギー変換に関連する例は極めて多いが、とくに運動エネルギー変換について筆者が経験した例について述べる。

その一つはサーモプレッサーである。これは図1の原理図を示すようにダクト内の高温ガス的高速流の中に水を吹き込んで急冷却し、モーメントを保存しつつガス密度を上昇させることによってガスの全圧を上げ、ディフューザー後の静圧をダクト入口前の静圧より上昇させるもので、熱流体力学的な圧力上昇装置であるのでサーモプレッサーなる名称がついている。その始めの用途は船用ガスタービンの排ガス利用によるタービン出力の増大であった。今を去る32年前、筆者はMITに行き、すぐにこのプロジェクトの研究助手として参加したが、すばらしく大きい実験装置に感激した。しかし、実験結果は思わしくなかった。それは水噴射から冷却完了にいたるまでの二相流の過渡プロセスに大きな内部摩擦的ロスがあることであった。

図1 サーモプレッサーの原理

すなわち液を微細化し、それを加速し、それに熱伝達しつつ蒸発させ拡散するという過渡的混相流段階はすべて相対速度による摩擦の発生というエネルギー損失の上に成り立っている。結果的にその間かなりの圧力降下が必要であり、それにさらにディフューザー効率の悪さも手伝って遂にサーモプレッサーは所期の効果を挙げずに中止となった。しかしそのシステムの簡単さは多くの人の目を引いた。

このプロジェクトに刺激され後に、筆者は同じような考え方を図2のような二相流 MHD (Magneto-Hydro-Dynamics) 発電に持ち越して、水銀や NaK のような金属微粒子をガスで加速するエネルギー変換を試み、基礎実験を行ったがいずれも失敗している。

そこで結論的に筆者が感じているのは、混相流によって全圧や運動エネルギーを増大させる

図2 He加速二相流液体金属MHDと H_2O 蒸気タービンの複合サイクル案

ことは極めて難しいということである。逆に言えば混相流は大きな内部摩擦があってエントロピーは増大しつつあり、運動エネルギーの増幅には向いていないということである。

勿論世の中には多くの気水エゼクター、インゼクターなどが使用されているが、それはその簡単さのためであって、決して効率は良くない。

また各種ボイラ、液冷原子炉、化学工場、等で多くの混相機器が使用されているが、それらはすべて熱媒体であって運動エネルギーやモーメントの媒体ではない。

また鉱山や海洋開発に多くの混相エアーリフトが使われているが、それもシステムの簡単さが生かされているものであり、ポンプ効率は必ずしも良いものではない。また図3に示すようなヘッド差原子力発電やフロンタービンシステムや二相流タービンについても同様であり、そ

図3 液体金属二相流ヘッド差原子力機関

の特色はシステムの簡単さにあり、力学的効率は低い。

最近では荷電した液滴を高速ガスで吹き飛ばし電荷に抗して運動させて高電位を得る固気流のEHD発電があるが、やはり運動エネルギーロスは大い。

このような気液流に代わり、完全なピストン形の固気流となると運動エネルギー変換効率は極めてよくなる。考え方によれば現在の内燃機関はガスとピストンの固気流と考えてよく、またタービンはガスとブレードの固気流である。

この線に沿って筆者は25年前に、船研において図4に示すような回流ピストン機関を考え、試作した。これは図のように陸上トラック状の管路内を図5に示すピストンが多数高速で回流するもので、その間に高圧ガスが膨張してピストンの運動エネルギーに変換され、ついで圧縮する。

図4 回流ピストン機関本体配置図・案

図5 回流ピストン機関ピストン概念図

これは理想的な形での固気流の運動エネルギー変換であって、いわゆる quasi static な変換がされると考えたものである。

このシステムは一個ずつのピストンでは考え通り実現したが、多数のピストンの連続流はピストン衝突による破壊によってうまく行かず中止した。

このような大胆かつ理想追求的な実験があったことを示し若い人への刺激としたい。

4. 臨界と安全

4. 1 混相流の臨界特性と脈動

そもそも液相と気相、液相と固相というような混相流には、液面がある時でもない時でもその平均速度、相対速度、存在比、等によって多くの流れのパターンがあることはよく知られていて、とくに熱が存在するときは凝縮や沸騰の発生のためパターンが変動し、全体が急に別のパターンに変わることがある。ところがその変革はなだらかではなく急に変わることが多くそ

こにある臨界点が存在するのも混相流の特色であり、また同時に脈動や振動を伴うことの多いのも特色である。

筆者がはじめて経験した臨界は戦時中の航空機エンジンのエアーロックに関するものであり、潤滑油の温度がある点以上になると粘性が低下し急に気泡が集結して大きくなる。また高空の低圧になるとそれが助長される。その関係については無次元数は見い出せなかったが、大変おもしろいものであった。

筆者が関係したさらに三つの関連事項について述べて熱的混相流の特性の一端を示したい。

その第一は臨界ウェーバー数の存在に関するものであり、第二は船用原子炉、第三は高速炉水-Na熱交等に関するものである。

4. 2 臨界ウェーバー数

筆者は前記のサーモプレッサーの実験の一環として液の霧化の基礎実験を行い、²⁾図6のような基礎実験装置にて、液滴を加速空気流で霧化する実験を行った。その霧化状況は図7に示すような興味ある形状を示す。

図6 液滴の臨界ウェーバー数実験装置

その結果わかったことは、液滴がこわれないうえにその形を保つ臨界ウェーバー数 W_e があることである。ここで D を液滴直径、 u を相対速度、 ρg をガス密度、 σ を液の表面張力とすると W_e は

$$W_e = \frac{\rho u^2 D}{\sigma} \quad (1)$$

であって、図7では $u = 20\text{m/s}$ くらいの所に臨界があるのがわかる。

このような実験を多くの液体に対しておこなって、総合的に臨界ウェーバー数 (W_{ec}) を測定した結果が図8である。図のように粘性が増すほど W_{ec} は増大する。

このように混相流では常に霧化、分散が行われるが、しかしある相対速度以下では安定であることがわかり、この事実は多くの混相流に多くの示唆を与える。

現在でも噴霧流内の最小液滴の径は式(1)の W_e 数を臨界ウェーバー数 (水では約10) として与えている。

図7 水滴が急激な衝撃流にさらされたときの霧化現象
(始めの水滴径は1.76mm、 Δt は露出時間)

図8 Γ 数 (図中に示す) に対する臨界ウェーバー数 We_{crit} の変化

4. 3 船用原子炉の動揺特性

筆者は船舶技術研究所時代に船用水冷原子炉 (PWR, BWR) の動揺時の沸騰特性について研究をした。これは静止しているチャンネルではなくローリングやヒービングを受けている沸騰もしくはそれに近いチャンネルの挙動の問題である。

筆者らはまずロープで吊したガラスのチャンネルを上下に大きく振ったり傾斜させたりして、中に電熱による沸騰を生じさせたところ、中で大きな気泡の共振的振動が生じた。その状況を図9の写真に示す。図のように上死点の近傍で重力が減ると急激に気泡が生長する。この現象はその後宇宙船内機器での現象や大きな地震のさいの炉心での現象に対して注目されている。

さて筆者らは、15気圧まで圧力上昇できる加圧チャンネルを用いて動揺時のバーンアウト低下率を実験したが、動揺時の最大加速度に比例して図10のように直線的にバーンアウト熱流束

図9 上下動をうける熱水チャンネル内のボイドの発生
(3が上死点、6が下死点で3、4附近に黒くボイドが見える。)

図10 ヒービング加速度 g_n の増大によるバーンアウト熱流束の現象率 q_{BO}/q_{BOO}

が低下することが確認され、また加圧水のときにはサブクールを大きくするほど、つまり逆に加圧水の圧力を高くしておくほど動揺時のボイドの発生率が低く安全であることがわかった。原子力船「むつ」の原子炉の圧力はこの線に沿って高く設定されているが、まだ動揺時の実船実験がされていないのは残念である。その意味で原子力船「むつ」はまさに筆者にとっては熱力学的混相流との闘いのせめぎ合いであり、「むつ」が残るかぎりその宿題は残っている。

そしてこの例等に見られるように水と蒸気の二相流におけるバーンアウトは混相流の熱限界もしくは流動限界の大きな分野を形成するものであって、極めて多くの仮説や研究成果が出されているのはよく知られている通りである。⁴⁾それを一般化すると熱影響化の混相流には必ずある限界があるということである。

4. 4. 熱的脈動の発生

さて船用原子炉の研究を進めているうちに、PWRの二次蒸気発生器に単管式貫流ボイラのモデルを造り実験したところ極めて激しい脈動が発生することを発見した。これは今までのボイラの貫流ボイラでは見られたことのなかった激しい脈動で、出口圧力計が振り切れそうである。

ところが丁度そのころ高速炉のNa-水加熱器でも同じような激しい脈動が起ることが見いだされてきた。筆者はそのころピッツバーグのWH社を見学したが、垂直形式の小さいNa-水加熱モデルでも同じことが生ずるのを見た。⁵⁾

それを色々検討の末、図11のように水の沸騰曲線を書くとき、従来のボイラのように熱負荷 q が一定に近い加熱方式の時は曲線との交点が一つであり安定であるが、もしPWR熱水や、高温Naのように温度一定に近い加熱をするときは、水と蒸気の混相流のボイド率の大小によ

図11 IIの間の変化

て沸騰曲線が図のように上下I、IIの間を変化し、しかも時間遅れがあるのでぬれ面とドライ面が交互に生じ、まずぬれ面の間に大きな蒸気塊が生じて出口の水を吹き飛ばし、ついでドライ面の間に水が侵入してしばらくそのままいて蒸気が収縮しぬれ面となれば再び同じことを繰り返す、というまるで蒸気機関のピストンのような運動が生ずるということがわかった。

この現象は熱的混相流の脈動の中で筆者が出会った最大の脈動であり、その原因を知った時は大変感激したものである。この防止方法は入口に絞りを設け、出口をオープンにし、しかも長手方向を出来るだけ細分してヘッダーで隣りの管と連結して圧力の分散を計ることであり、

今はどのようなNa-水加熱器でも実施している所である。

原子炉での混相流は以上のトピックス以外に多くの現象が炉の安全性と信頼性に強く関係する。たとえばチェルノブイリ事故に関係した炉心非常冷却装置やBWRのベーパーサプレッション装置、ポンプ停止時のコーストダウンの安全性、Na-水反応の事故発生時の対策、等々はいずれも過渡的混相流現象に関係するものであり、混相流の解明が原子炉の安全確保に極めて重大である。

これらをさらに普遍化すると、原子炉ならずとも熱的混相流の解明はすべての機器の安全性と信頼性に関係するということであり、混相流研究者の使命が大きいことを示すものである。

5. 熱伝達の向上

5. 1 混相流の伝熱特性

熱的混相流の大きな特長は伝熱性の大きな自由度、たとえば熱伝達率を大きく向上したり、もしくは逆に小さくできるという点にある。

その研究例や応用例は枚挙にいとまがないくらいであり、混相流の実用上から欠かすことの出来ない分野であろう。

5. 2 気液系の応用

まず第一の応用は空気やガスで冷却するとき、その熱伝達率の向上に水を噴射することであろう。さきのサーモプレッサーでの水噴射は圧力と運動エネルギーの向上においては失敗したが、運動エネルギーの損失を問題としない熱伝達向上の点では極めて効果的である。

筆者は多孔質の断熱材や衣類を巻いた円筒を空気流の中に置きその断熱効果を計測したことがあるが、空気内に水を噴射すると冷却熱伝達が急激に増大することが認められた。これはもともと軽装で富士山腹の風雨中を行進した人々が凍死した遭難事件にヒントを得ての研究であって、多孔質が通気性が良く、かつ円筒と断熱面との間のギャップが大きい程、つまり衣服がゆるい程熱伝達は大きい。

このようなことは最近では多くの空冷機器の性能向上に利用されているようである。その分野はある種の空調機器ばかりでなく、電子機器や重電機器の急速冷却に利用されているようである。

また冷却ではないが火炎を水中に吹き込んで温水を造る通称水中燃焼ボイラーは燃焼ガスと空気との混相域を形成させて相互の熱交換をはかるものであって異色の軽量ボイラとしてプール加熱、消雪温水などに利用されている。

5. 3 固気、固液系の利用

まず固気系の応用は最近では極めて目ざましいものがある。その第一は流動床ボイラや反応層の利用でありとくに低質油や石炭やバイオ燃料などの燃焼と熱伝達やガス化に多数研究され、また実用化している。また太陽熱利用もある。

その第二は固体微粒子をガス内に浮遊させて熱伝達の向上をはかる研究で、これはまだ実用化されていないが大変興味ある分野である。

また特に超高温の分野でスラグ熱交換器がある。これはたとえば1200℃以上のHeガスや燃焼ガスなどの熱を熔融スラグや熔融塩などの熔融に利用し、それを別室で滴下して他のHeガスや空気などの加熱に利用し、自らは再び固化するものである。図12には固気熱交換器の一例を示す。

また製鉄業でのスラグを空気流で飛ばし粉碎しつつボイラに熱を与えるスラグ風砕ボイラも固気流のよい例である。

図12 移動層(粒子)式熱交換器による含じん高温ガスの排熱回収

ついで固液系はすでに多くの化学反応や触媒に利用されているが、筆者の関係する熱工学方面では氷蓄熱のためのシャーベット製造やPCM (phase change material) との反応などの多くの伝熱増進に使用されている。

5. 4 損耗の問題

固気、気液系的高速流は熱伝達を向上させるが一方では損耗(Erosion)と腐食(Corrosion)を増大させる。その極端な一例がサンドブラストのような工作利用である。

熱工学における一例は図13に示すようなNa液中への高速水噴流によって生ずる高温三相流による他管の損耗(Wastage)であり、これはNa-水熱交換器における小リーク現象と呼ばれているものであり、ジェット流量と損耗時間等についての多くの研究がある。

図13 小リークによる混相流ジェットの形成と損耗のメカニズムの推定スケッチ

6. その他のトピックス

熱的混相流のトピックスは以上のことがらに止まらない。とくにハイトックやベンチャービジネスがらみの対象は雲のように拡がっている。それらを思い付くままに順不同に挙げるとつぎのようなものとなるであろう。

(1) 金属の超微粒化

最近の粉末冶金の進歩によって各種の金属を微粉や超微粒化する技術がさかんに進んでいる。

その方法は多数あるが、液相としてガス気流と衝突指せたり、また液面と衝突して急冷させることなどが多く行われていて、従来バーナーの燃焼用アトマイゼーションと同様であり、多くの固気、固液、液液反応が研究され、かつ応用されている。

また石炭などの固体を音速くらい的高速気流で加速し互いに衝突させて微粉化する方法もあり、大変興味がある。

(2) 金属の凝着やCVD

最近の電子工学で盛んに利用されている素子は金属を固体面に凝着させるものが多く、電荷による加速も加わる一種の固気流動現象としての理論的説明が望まれる。またCVD（化学的蒸着）はさらに化学反応が加わったものとして、複雑であるが、応用の方が先行しているようである。

(3) スプレー印字や着色印刷

ワープロやコピー機械の印字や印刷には多くの方法があるが、ノズルからのインクのスプレーを電子的に制御するものがあり、またノズルからの流出の発生に急激な沸騰を使用するものがある。

これは熱的な混相流（液と蒸気）をエネルギー利用するのではなく、情報に利用しようとするものであり極めて異色で未来的である。

(4) 液々現象の利用

今までは相の異なるものの現象ばかりをとり挙げてきたが、液相には同相で互いに溶解しないで分離している液々現象が多くある。

例えば油水分離、フロン-水接触熱交などがこれに属する。

とくに高温の水や油の中に直接フロンを吹き込んで蒸発沸騰させるフロンボイラが排熱回収に利用された例もあり大変興味深い。

(5) 混合液や溶液

同じ液々現象でも混合液や溶液は熱的な作用によって蒸発、濃縮もしくは凝縮、吸収等を行うときには局部的に成分や濃度が異なり異質の液々現象に近づく。

よって筆者はこの混相流学会の取り扱う混相の中に上の(4)とこの(5)のような広義の液々相をも含めることを提案するものである。

7. 結言

霧立ちのぼるの百人一首から始まって、大自然からハイテックにいたる混相流現象につき、筆者の経験例を交えて広く論じてきた。

思えば今まで水是水、ガスはガス、と別々に論じられてきた異相の学問がこの混相流学会でいっしょに論じられるようになったことは大変すばらしいことである。

現在は世界の東と西、南と北の人々が互いに反発しあうのではなく、互いに融和する混相平和の時代である。混相流学会の創立が、その意味で技術ばかりでなく世界の相互理解と平和にも貢献することを祈ってこの筆をおきたい。

文 献

- (1) 原理はAsher H. Shapiro "Compressible Fluid Flow" The Ronald Press Co.
New York 260-262(1953).
- (2) N. ISSHIKI; Proc. ARS-ASME 11th 355(1956).

- (3) 一色 ; 日本機械学会誌 **68** 553(1965).
 (4) 一色 ; 同上 **65** 522(1962).
 (5) 一色ほか ; 日本機械学会論文集 **B47** 421(1981).

国際会議のお知らせ

粒状物質の測定と制御に関する国際会議

1988 International Conference on Measurement and Control of Granular Materials

- 日 時 : 1988年9月21~24日
 場 所 : Shenyang (瀋陽 中国)
 主 催 : Shenyang International Conference Center for Science and Technology
 後 援 : 東北工学院(中国)、日本粉体工学会ほか日、英、米、伊、ソ連6団体
 テーマ : 測定 (粒状物質の組成・湿分・温度・形状・重量、エアロゾルの濃度、管内粒状体の流動・速度・濃度、容器内粒状体のレベル、その他)
 制御 (鉱業、金属、動力、石炭、建設、石油、化学、医学その他の粒状体に関連するすべてのプロセス制御)
 言 語 : 英語
 発表申し込み先 : Prof. Zhang Hong-xun
 P.O.Box 321, MCGM '88
 Northeast University of Technology
 No.1, Section 1, Wenhua Road
 Shenyang, P.R.China
 備 考 : 論文概要 (400~500語) 締切: 1988年2月15日
 採択通知: 1988年4月15日
 論文締切: 1988年6月15日
 見学会およびツアーも用意されます。