

【整番】 SE-02-IG-001	【標題】 配管荷重のパターン分類		
分類：構造(荷重区分)/種別：初心手引き	作成年月：H26.09/改訂：Ver0.0 (H26.10)	作成者：N.Miyamoto	

全 21 枚

1. プラント設備におけるシステム設計あるいは強度設計手順の第一ステップは、当該設備に予想される荷重を見積って設計条件化することである。荷重設定が不十分だと、未検討のまま設計をパスして大きなリスクを抱え込むことになる。全般に配管系の設計では運転温度・圧力や地震震度だけで用が足りる面があるため、他の荷重が粗略に扱われる傾向は否めない。しかし、実際の配管系に負荷される可能性のある荷重はかなり多様で、例えば配管コード ASMEB31.3(*) では設計圧力・設計温度とともに次の荷重ソースを挙げている。

環境効果： 流体凝縮(→真空)、液体膨脹(→圧力上昇)、氷着(→メカ拘束)、低環境温度(→変位拘束)
動的効果： 衝撃(→流体力)、風(→外圧)、地震(→慣性力/強制変位)、振動(→力・変位)、排出反力(→力)
重量効果： 活荷重(内部流体/雪氷)、死荷重(自重/積載)
熱膨張・収縮効果： 変位拘束(外部)、温度勾配(自己)、熱膨張差(相互拘束)、
支持・拘束点/機器の移動効果： 熱膨張・収縮、作動、沈下、潮位差、風振動などに由るもの。

この分類は、配管系の複雑な荷重あるいは荷重現象を扱ううえで論理的で妥当性があるが、コード特有の抽象表現が含まれるので、設計初心者のイメージにすんなり入ってこない嫌いがある。そこで、本 TS ではできるだけ実際の設計に即した形で配管系荷重のパターン分類を行ってみた。ただ総括的でないので、逆にわかりにくくなっているのかも知れない。そこで念のため末尾に ASME B31.3 の該当項を添付しておいた。なお本 TS は、配管設計の初心者や間接的に配管設計に係わる人を対象にしているため、読む人のレベルによっては、まわりくどく書かれているところも多いと思う。我慢のほどお願いしたい。

(*)ASME B31.3 Process piping →米国機械学会規格で化学系プラント配管に適合

2. 配管系で予想される荷重パターンは表 1 のようになる。大きくは外力的なものと内力的なものに別れる。地震荷重/風波浪荷重/変位荷重などは外部から加えられる荷重で、圧力荷重/流体荷重/熱荷重などは内部的に派生する荷重である。表 2 に各荷重パターンのイメージをまとめてみた。

表 1 にはそれぞれの荷重特性を 3 つのグループ即ち機械荷重と変位荷重、長期荷重と短期荷重、定常荷重と非定常荷重の 3 グループに別けて表示している。これら荷重特性のプロフィールは次の通り。

機械荷重：重量や圧力のように負荷によって構造物に変形し釣合った後も減退することなく持続される荷重。発生応力は 1 次応力として延性破断防止の観点から降伏応力以下に制限。

変位荷重：強制変位の形をとるものの構造物の変形によって緩和されて機械荷重のような持続性を持たない荷重。発生応力は 2 次応力として主に疲労防止の観点から制限。

長期荷重：運転圧力のように比較的長期的に負荷される荷重。ある裕度を以って許容される。

短期荷重：地震荷重のように少ない頻度で瞬発的に負荷される荷重。限界値近くまで許容される。

定常荷重：荷重環境が安定し殆ど変動しないか、変動しても一定周期の荷重(通常の振動荷重然り)。

非定常荷重：荷重環境が不安定で、水撃荷重のように時間推移とともに変動し周期性のない荷重。

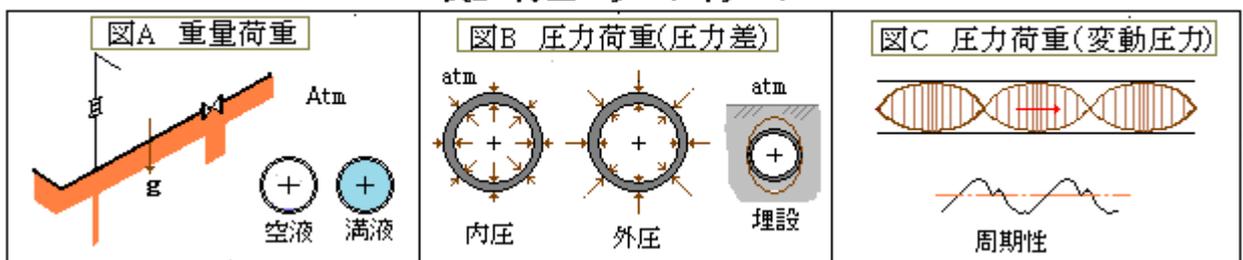
表 1 や表 2 で示される各荷重パターンについては、表 2 に続いてやや詳しく説明する。

表1 配管系で予想される荷重一覧

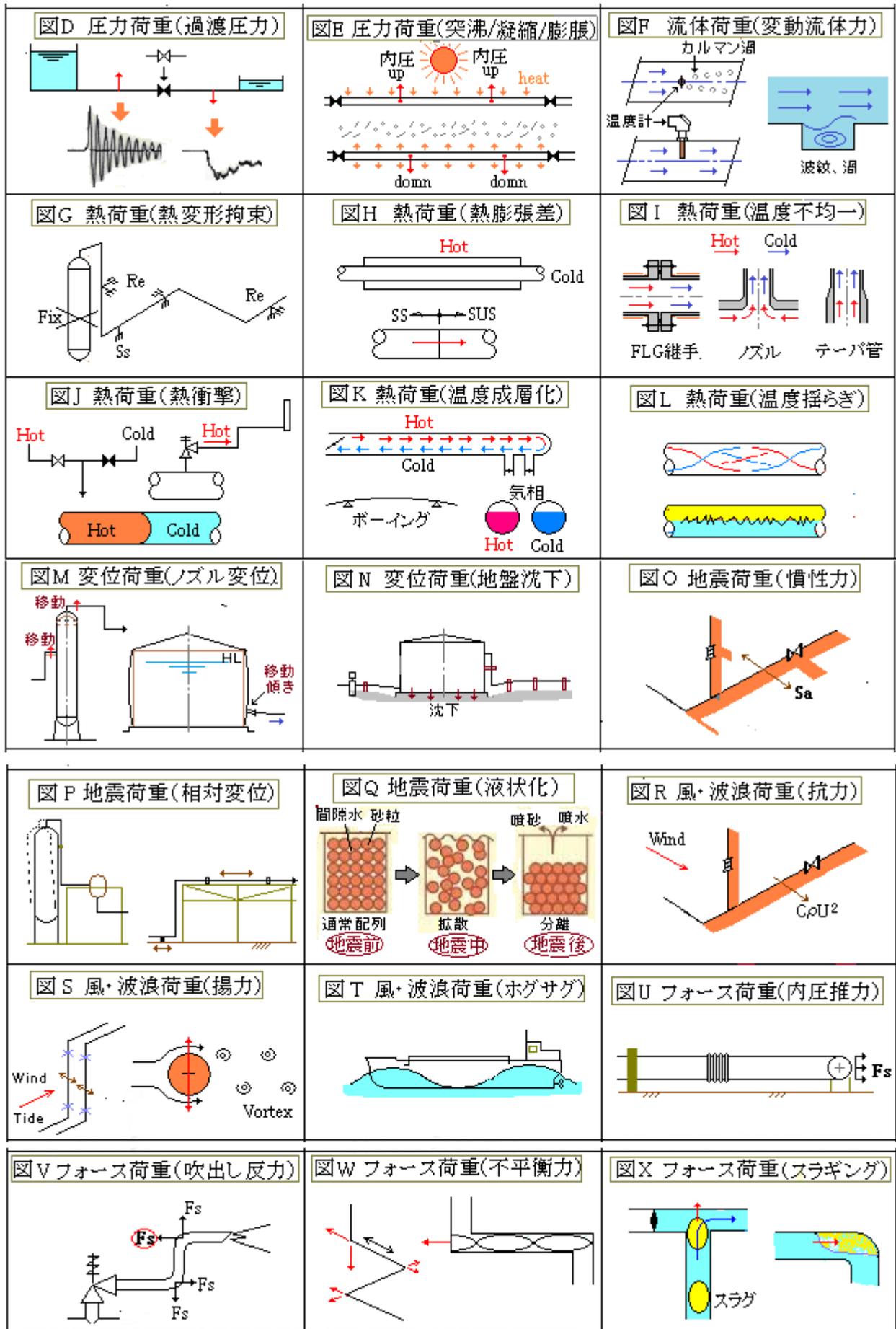
パターン		概要	荷重特性			備考
重量荷重	管体重量	管/管継手/弁類など配管躯体部分の重量	M	L	S _t	図 A
	流体重量	内部流体(特に液体/固体)の重量	M	L	S _t	
	積載重量	ラギングや雪氷付着による付加重量。	M	L,S	S _t	
圧力荷重	圧力差	管内-管外の差圧。正のとき内圧、負のとき外圧	M	L	S _t	図 B
	変動圧力	脈動流/流体振動などで発生する周期的な圧力変動	M	L,S	S _t	図 C
	過渡圧力	水撃やスラギングから派生する圧力の急上昇/急降下	M	S	U _t	図 D
	突沸/凝縮/ 凝縮	密閉流体の冷却/加熱→凝縮/膨張による圧力降下/上昇	M	L,S	S _t	図 E
流体荷重	変動流体力	管路内のできる波動や渦などによる周期的な流体力	M	L,S	S _t	図 F
熱荷重	熱変形拘束	機器/サポートなどによる配管の自由変形の拘束	D	L	S _t	図 G
	熱膨張差	異材継手や2重管等で生じる膨張差	D	L	S _t	図 H
	温度不均一	過渡的温度変化に伴う形状不連続部分の温度勾配など	D	S	U _t ,S _t	図 I
	熱衝撃	レリーフ弁作動などに伴う流体温度の急変	D	S	U _t	図 J
	温度成層化	温度の異なる流体の接触に伴う水平管上下の温度差	D	L,S	U _t ,S _t	図 K
	温度揺らぎ	温度の異なる流体が接触/混合して派生する熱的振動	D	L,S	U _t ,S _t	図 L
変位荷重	ノズル変位	熱膨張等による機器ノズルの移動による強制変位	D	L	S _t	図 M
	地盤沈下	機器/サポート類の地盤沈下による強制変位	D	L	S _t	図 N
地震荷重	慣性力	地震動によって加速されて生じる慣性力や動液圧	M	S	U _t	図 O
	相対変位	地震時機器ノズルやサポートから伝達される強制変位	D	S	U _t	図 P
	液状化	基礎の遊離/移動に伴うアンカ/サポートの機能喪失	M,D	S	U _t	図 Q
風荷重	抗力	受圧面に作用する速度圧。波浪の場合スラギング様に	M	S,L	U _t ,S _t	図 R
波浪荷重	揚力変動	管外のカルマン渦による振動あるいは流力弾性振動	M	L,S	S _t	図 S
	ホグサグ	船体変形に伴って船上配管に働く変位荷重	D	S	U _t	図 T
フォース荷重	内圧推力	特に自由型ベローズ設置に伴う一方的な推力	M	L	S _t	図 U
	吹出し反力	安全弁等吹出し時の過渡的な衝撃圧/波動圧	M	S	U _t	図 V
	不平衡力	水撃/脈動などに伴う直線区間の推力の不釣り合い	M	S,L	S _t ,U _t	図 W
	スラギング	気液2相流などにおける周期的な体スラグの衝突	M	L	S _t	図 X

記号説明：M=機械荷重(一次荷重)、D=変位荷重(2次荷重)、L=長期荷重、S=短期荷重
S_t=定常荷重、U_t=非常荷重(過渡荷重)

表2 荷重パターンイメージ



続く



***** 各荷重のプロフィール概要説明 *****

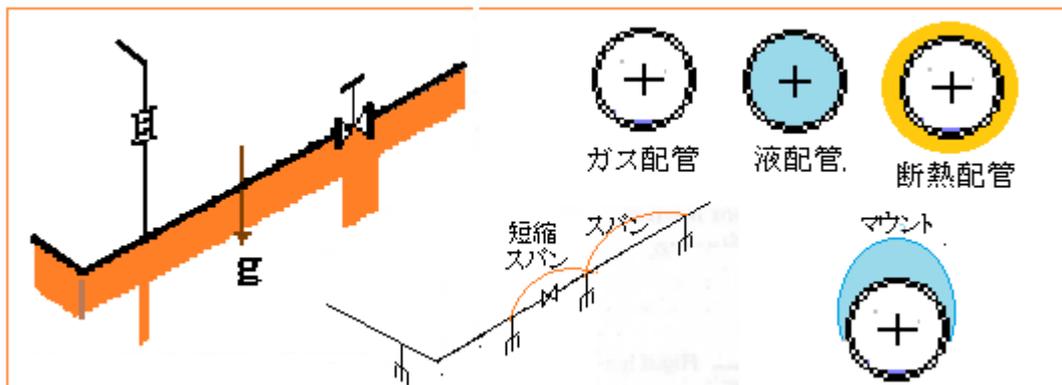
【 重量荷重—管体/流体/積載重量 】

- ① 配管自重は鉛直方向に作用して、サポートで支えられた配管全体にモーメント・フォースが分布して応力が発生する。配管自重すなわち重量荷重の大半は、圧力荷重とともに配管系の代表的な機械荷重 (=持続荷重) で、配管系の1次応力のソースである。配管コードでは例えば次のような式で長期の配管1次応力(S_L)をカウントしこれを許容応力以下に制限する。

$$S_L = PD/(4t) + 0.75iM/Z \leq \text{許容応力(降伏応力の } 2/3 \text{ 程度)}$$

ここで P=設計圧力、M=梁曲げモーメント、i=応力集中係数、D=外径、t=肉厚、Z=断面係数

- ② S_L は配管支持間隔(配管スパン)に左右される。特に弁や伸縮継手あるいは中途支持のない垂直配管は集中荷重として作用して梁曲げ応力を大きくするので、支持スパンや支持方法を工夫する必要がある。
- ③ 重量荷重には、配管重量(管,管継手,弁など配管部品/溶接重量)、内部流体重量あるいは外部積載重量がある。ごく軽い気体の場合、流体荷重は無視できるが、高圧になれば無視できない場合もある。積載荷重にはラギング類(保温材など)や計装品類などの付加荷重あるいは雪氷のような付着荷重がある。一般には雪氷は短期荷重で扱われるが、長期間、配管にマウントする場合は長期荷重扱いになる。
- ④ 重量は質量でもあるので、地震や振動の場合、動的荷重として重要な役割を演じる。長期1次応力のソースとしての影響は少なくとも、非定常状態(過渡状態)では影響が大きくなる(特に共振する時)。



【 圧力荷重—圧力差 】

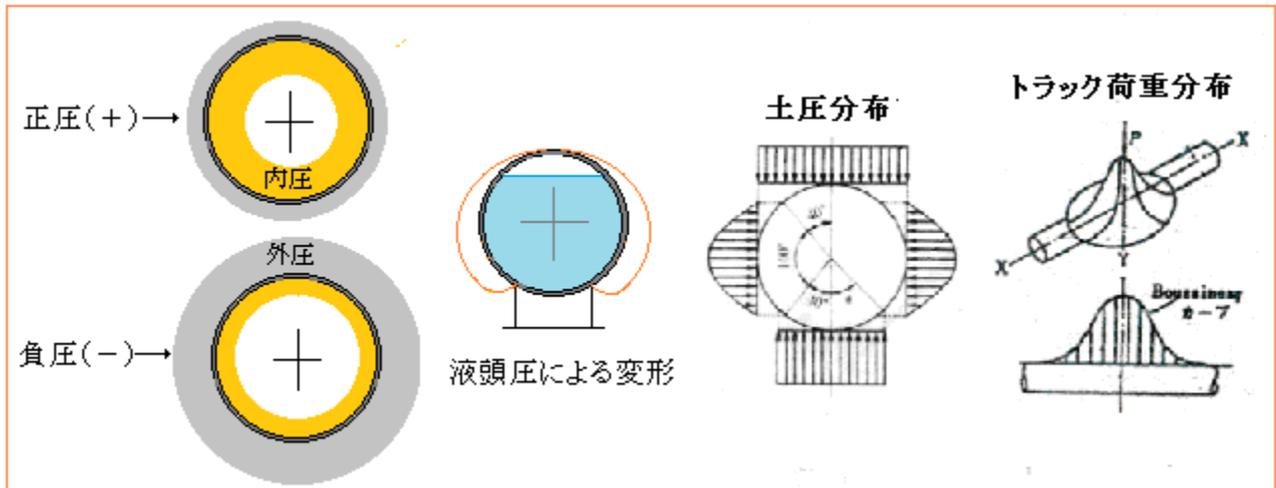
- ① 通常は圧力(設計圧力)と云っているところを、ここでは圧力差と表現した。実際、配管肉厚はゲージ圧で計算されるが、これは、管壁にかかる荷重状態を[絶対内圧-大気圧]に相当する正圧状態として考えているからである。この圧力差という概念は、負圧状態(例えば真空配管、埋設管、海底配管、槽内配管類)を定義する場合にも用いられる。
- ② 圧力差は代表的な機械荷重で、殆どの配管耐圧部品の肉厚決定に係っている。少なくとも配管肉厚は最大の圧力差に耐える必要がある。例えば薄肉パイプの場合、

$$\text{正圧状態: } PD/(2t) \leq \sigma_a \rightarrow t \geq PD/(2\sigma_a)$$

$$\text{外圧状態: } P_a = f(B, D, t) \rightarrow P \leq P_a \rightarrow t \geq g(P_a, B, D) \quad (f, g \text{ は関数を意味する})$$

ここで P=設計圧力(絶対圧力差)、 P_a =許容外圧、 σ_a =許容圧力、D=外径、t=肉厚、B=材料定数

- ③ 通常、圧力差は管断面均一として扱われている。ただ埋設管や大口径管では土圧分布や液頭圧(ρH)によって管壁に生じる曲げ応力が無視できない場合もある。
- ④ 圧力差は通常、最大運転圧力(差)にあるマージンを加えた**設計圧力**として運用され、強度上あるいは運転上の限界を示す指標にされている。この場合、いくらマージンを上乘せするかは重要で、通常は最大運転圧力を平均圧力としてこれに脈動などの変動圧力の振幅を上乘せするケースが多い。



【 圧力荷重—変動圧力 】

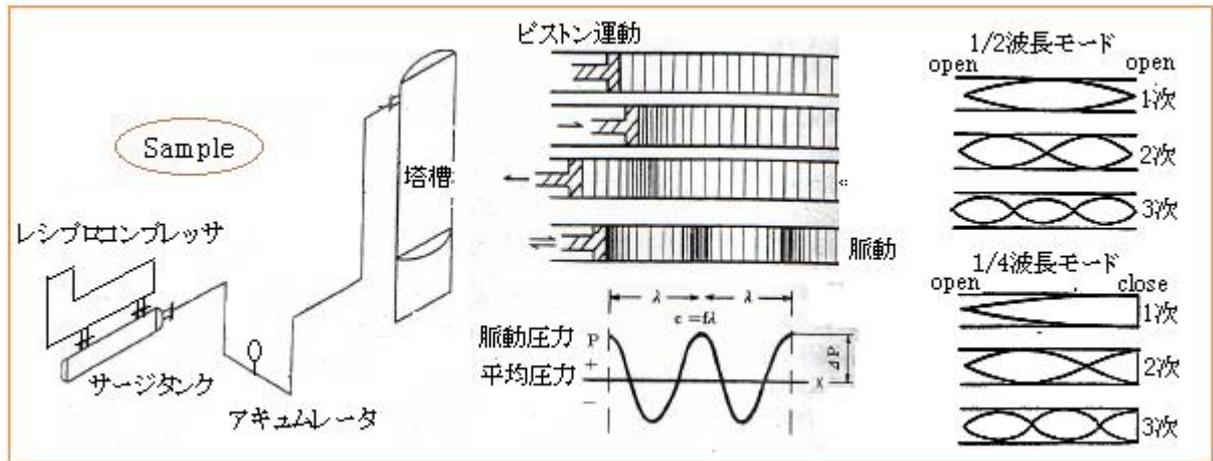
- ① 大半の配管ではその圧力は一定で余り変動しないが、往復動コンプレッサ/ポンプ等の前後ラインでは吸込/吐出流量が周期的に変動し脈動圧力が発生する。通常この脈動成分はそれほど大きくないが、場合によってはマシン通過流れの振動数(→加振振動数)と配管内の音響固有振動数または配管の機械固有振動数が接近すると、**共鳴現象**や**共振現象**が起きて脈動圧力が大きく変動し、当該ライン(管路)にある設備(機器/配管部品/計装品/基礎)に手痛いダメージを与えることがある。

音響固有振動数→内部の流体柱の固有振動数。機械固有振動数：管躯体(管柱)の固有振動数

- ② 以上の脈動圧力の発生はレシプロマシンのピストン運動に由来している。然るに遠心ポンプのように連続した回転運動でもあっても羽根通過振動(ZN振動)などによって脈動がおきる。また、マシンがなくても、配管の流れ形状によっては流体振動が起きてその振動数が管路/配管形状に由来する固有振動数に近づくと共鳴/共振が起きる。従って、**流体振動も含めて脈動のミニマム化とこれに伴う共鳴/共振の排除排除がプラント配管の設計課題**になってくる。特に音響固有振動数に由る共鳴現象は、機械固有振動数に由る共振現象のように容易に是正できないことが多く事前検討が望まれる。
- ③ 共鳴現象を回避するには、管路の音響固有振動数(流体柱の共鳴振動数)を知る必要がある。また完全な共鳴の回避が難しいときは予想される脈動圧力を推算する必要がある。非常に単純な管路については音響工学の公式や既存の簡易式を使って用が足りるが、通常の配管は複雑であるから、例えば**伝達マトリックス**を用いた**脈動解析**が必要になってくる。

- ④ 脈動問題には多くの知見が累積している。下記の資料は必らず読むべきである。

日本機械学会「事例に学ぶ流体関連振動(第2版)」5.1-圧縮機に起因する配管内圧力脈動



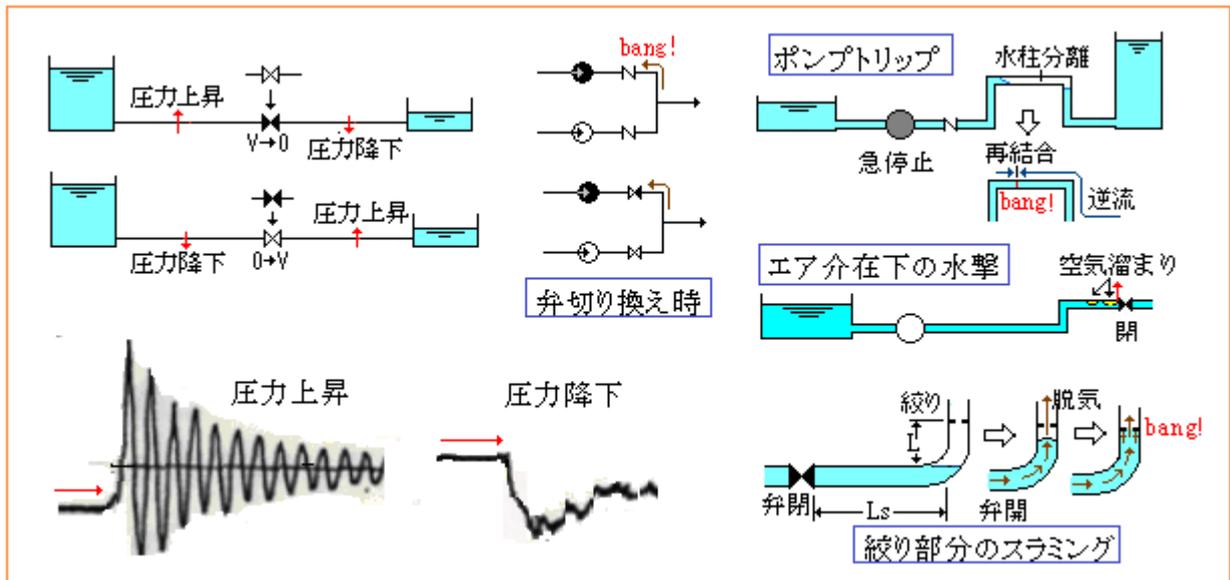
【 圧力荷重—過渡圧力 】

- ① 定常流れのラインがあって、急激な弁の遮断/開放やポンプ停止/起動が起きると、液流れの運動量の急激な変化(端的に云えば流速の急変)によって管路圧力が過渡的に変化し著しい圧力上昇や圧力降下が起きる。即ち**過渡圧力(→水撃圧力)**が発生する。これを水撃現象といい、管路中の機器/配管/サポート/基礎に衝撃的なダメージを与える。
- ② 水撃現象に似た現象にスラギングがある。管路中にあるエアやガスの溜り(気体スラグ)が、ラインの始動に際しターン部分や絞り部分の壁に当たってスルーした後、後続の液体スラグが壁面に激しく衝突して系の圧力上昇を引き起こす現象をいう。水撃現象と同様に、管路に衝撃的なダメージを与える。
- ③ この現象は脈動現象と同様に圧力波の伝播に起因しているが、脈動流が定常化しているのに対して非定常な流れ(過渡流れ)現象になってかなりのインパクトを与える。例えば弁急閉における圧力上昇は、
- $$\Delta H = (a/g) \Delta V$$
- ここで ΔH =瞬間的なヘッド圧の変化、 ΔV =瞬間的な流速変化、 a =圧力波伝播速度、 g =重力加速度
 圧力伝播速度は音速で水中では 1200m/s 程度で、平常の 1m/s から 0m/s に流速が変化したとすれば、
- $$\Delta H = (1200/9.807) \times (1 - 0) = 122.4 \text{m} (1.25 \text{Mpa})$$
- のかなり大きな圧力上昇になる。
- ④ 水撃によって様々な流体现象がおきる。電源喪失によってポンプトリップ(ポンプの急停)が起きると吐出ラインで負圧になり蒸気圧を割って蒸気相が現れ、それが逆流によって崩壊して大きな圧力上昇となる。単純なポンプ管路ではグラフなどを用いた近似計算で過渡圧力を予測することができるが、多々安全裕度が含まれている。より複雑な管路では**特性曲線法を用いた水撃解析**が行われており、かなり精度よいシミュレーションがルーチン化している。
- なお、過渡圧力に対して全て強度で対応するのはナンセンスである。まず系統的に緩和を図り、然るのちに強度設計でサポート類の損傷を回避するのが一般的である。
- ⑤ 水撃問題には多くの知見が累積している。下記の資料などが参考になると思う。

日本機械学会「事例に学ぶ流体関連振動(第2版)」5.3—水撃

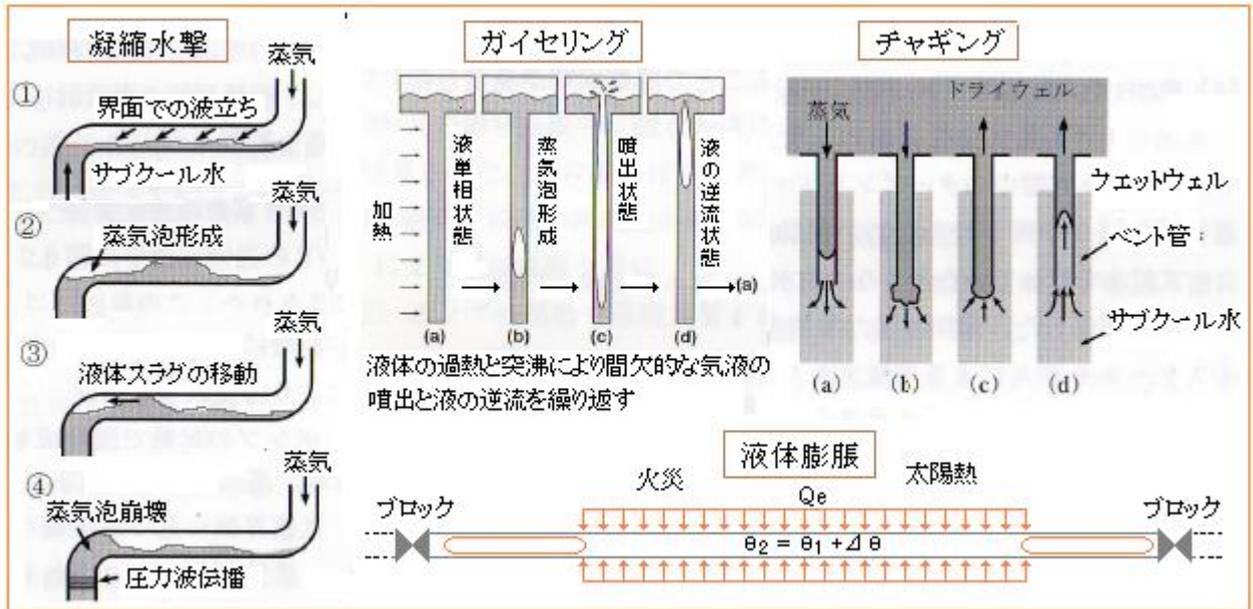
横山「水撃入門」(日新出版)

FE-06-IG-001「水撃現象のパターン分類」宮本 (TS)



【 圧力荷重—突沸/凝縮/膨脹 】

- ① 通常の設計圧力は熱的に平衡した状態を背景にして設定されているが、ある特定の状況で、ラインを継続的に加熱/冷却すると、熱的平衡が失われかなり顕著な圧力上昇や圧力降下が起きる。
- ② **突沸(ガイセリング)**は、例えば垂直配管の下部が加熱され過熱状態に達したとき突然発生する現象である。この際、水撃圧力にも似た著しい圧力上昇が起きる。特異性があるが高温のプロセスラインには多々その可能性がある。
- ③ ライン中で蒸気の急激な凝縮が起きると様々な現象が起きる。**チャギング**は冷却液に細かい蒸気泡を吹き込んだときに起きる現象で顕著な騒音とともに圧力脈動が起きる(例えば蒸気吹込み温水タンクの事例)。また**凝縮水撃**は冷却液にある程度のボリュームを持った蒸気塊が流れ込んだ時に起きる現象で、水撃やスラギングと同じように大きな過渡圧力が系内を伝播する。また過熱蒸気ラインに温度調節のため冷却水を散布したときも蒸気の凝縮によって瞬間的に圧力が降下し、場合によって負圧になる。
- ④ 両端が弁などで閉塞したラインあるいは閉塞に近い状態のラインが、**火災や太陽輻射熱で加熱されると**内部流体が膨脹して大きな圧力上昇が起きる。この現象は特に流体が非圧縮性の液体のとき顕著になる。逃がし弁の設置などを検討する必要がある。
- ⑤ 全般に特異性があるが、それでも多くの知見が得られている。次の資料がその手引きになると思う。
 - ・日本機械学会「事例に学ぶ流体関連振動(第2版)」
 - 6.2—凝縮に由る流体振動、6.3 沸騰に伴う流体振動
 - ・FE-21-TM-001 液封状態のサーマルレリーフ量の算定 (宮本)



【 流体荷重—変動流体力 】

- ① 配管内の流れには方向転換や分流/合流/縮流/拡流などの乱れがあるものの、円管流れとしての原形は保たれている。しかし流れが局所化し流れ部分と淀み部分が分離して波動や渦ができる。通常、これらの変動流体力は軽微であるが、一定の周期性があるため音響固有振動数や機械固有振動数と共鳴/共振を起こして顕著な流体振動に発達する。
- ② 管路に挿入された温度センサ(サーモウエル)の廻りには**カルマン渦**ができ、その変動流体力(変動揚力)によって渦振動が起きる。その場合、渦列の振動数とサーモウエルの固有振動数が漸近すると共振して、あたかも流体力が増幅されたように振動が激化する。周知の高速増殖炉もんじゅの温度計破損事故は2次のカルマン渦(双子渦)によるもので、この事故を契機に次の設計規準が発行されている。必読である。

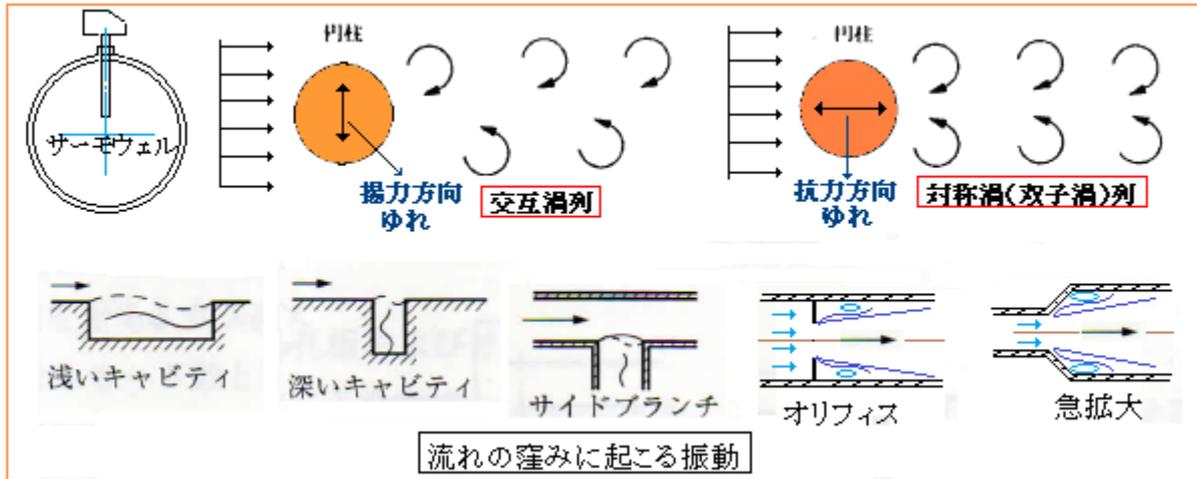
JSME S-012 配管内円柱構造物の流力振動評価指針 (1998年)

- ③ また管路流れに接して窪みがあると、流れと窪みの界面に波動が現れ窪みの内側に周期的な渦が発生する。その場合、窪みにできた波動渦の振動数と窪みや管路の音響固有振動数が漸近すると共鳴し振動が激化する。窪み部分は流れのない淀み部分であるから、その表面は丁度流れ部分と淀み部分の界面になっている。このパターンは例えば、

管路付きマンホール/ハンドホール、管路付安全弁ノズル、先止まりの分岐管
中間開度のバタフライ弁後流、半開き仕切弁(板弁)後流、オリフィス2次側

に現れる。事実これらの流れ構造では渦振動の発生が観察されている。詳しくは次の資料を参照のこと。

- 日本機械学会「事例に学ぶ流体関連振動(第2版)」 5.5はく離による自励音等
- FE-19-RP-001 流れの窪みに起きる振動の評価基準(案) 宮本



【 熱荷重—熱変形拘束 】

- ① 配管は非自立の3次元梁構造で、運転時、高温/低温の流体が流れると膨脹/収縮して全体的に変形する。この場合、仮に接続機器や支持装置がなければ、この梁構造は自由に変形して管体は少しも歪まない。然るに接続機器があると、互いの伸縮量がかち合っで見掛け上、接合点に強制変位が加わることになる。また配管サポートはその拘束方向に配管の動きを止めるので、この場合も拘束方向に強制変位が加わることになる(特に耐震性が要求される配管では水平拘束個所が多く歪みは大きくなる)。故に配管における自由変形はほとんど存在せず、熱変形拘束による熱応力(熱膨張応力)の発生は免れない。

- ② 一般の熱応力がそうであるように実質的な熱膨張応力は次式で表される(後述の表現とは異なるが…)。

$$\sigma_e = CE\alpha \Delta T$$

ここで C = 応力係数、 E = ヤング率、 α = 線膨脹係数、 ΔT = 温度差 (= 運転温度 - 停止温度)

応力は E, α が材料定数なので、温度差 ΔT (停止温度は零に近いのでほぼ運転温度) に比例すると共に応力係数 C に比例する。この係数は配管の剛性(撓み性)に大きく依存する。配管が柔な構造であれば、熱膨張応力は小さくなる(反面大きく撓む)。故に熱膨張応力の低減は、応力係数 C の低減すなわち撓み易さによって得られる。この場合応力係数 C は大変複雑でコンピュータ解析によって求めるほかない。なお $\alpha \Delta T$ は自由変形における熱ひずみ量(基準量)である。

- ③ 配管規格では、熱膨張応力 S_E は次のように制限されている。

$$S_E = iM/Z \leq 1.25(S_c + S_h) - S_L$$

ここで M = 熱変形拘束モーメント、 S_c, S_h = 停止時, 運転時の許容応力、 i = 応力集中係数、 Z = 断面係数、 S_L = 1次応力(計算値)

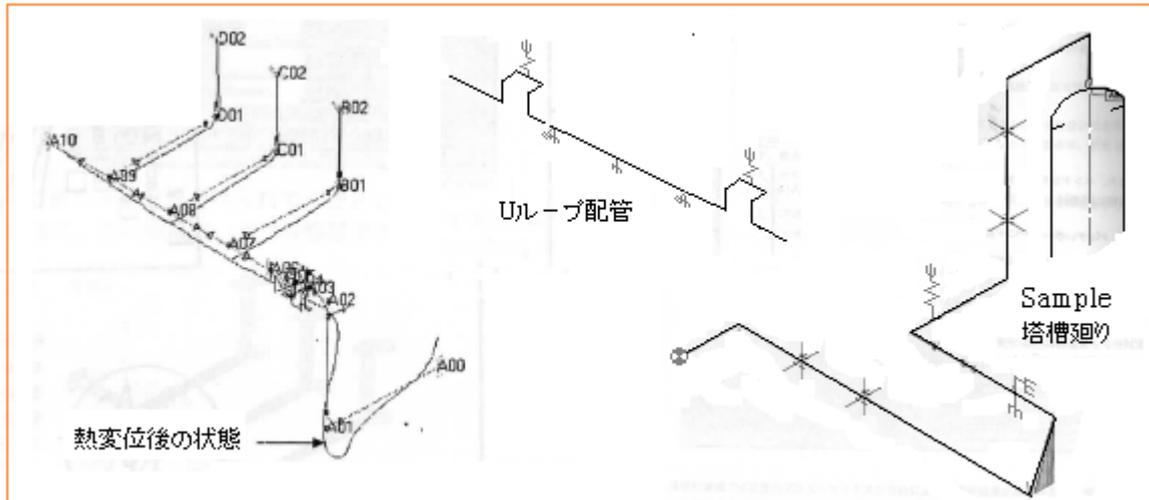
モーメント M は前項の係数 C を内包するもので、変位荷重に分類される。それ故 S_E は典型的な2次応力である。2次応力は1次応力のように延性破壊の原因にはならないので、疲労破壊防止の観点から制限されるのが妥当である。因みに上記の式を変形すると、

$$S_L + S_E \leq 1.25(S_c + S_h)$$

になり、(1次応力+2次応力)をある許容レベルに抑えようとしているが、これは配管の疲労限界を7000サイクルとしその時の公称応力に対する限界応力を安全側に $1.25(S_c + S_h)$ に採ったものと理解される。

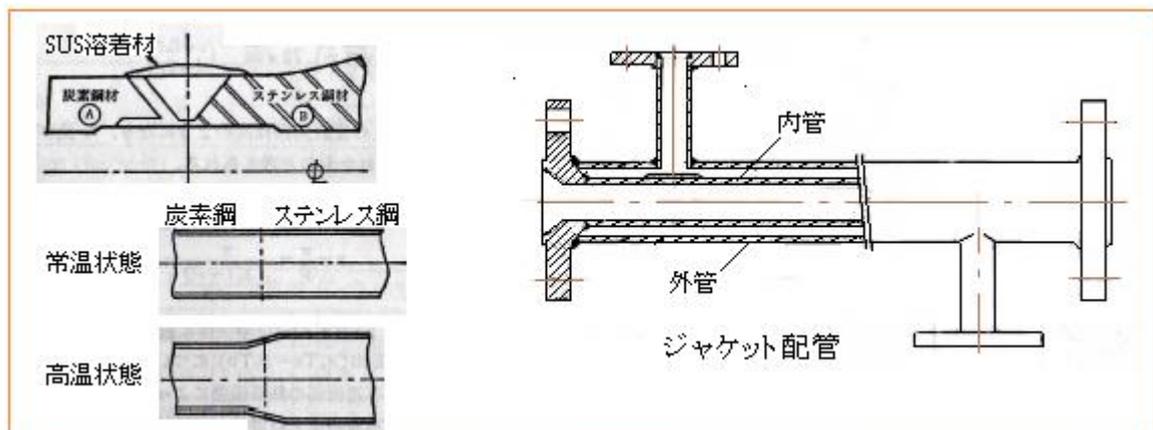
- ④ 熱変形や熱膨張応力については、配管規格の中に撓み性(flexibility)という項目が設けられており、その

中に基本的な考えが述べられている。概念的でわかりにくい所もあるが目を通しておくべきである。



【 熱荷重－熱膨張差 】

- ① 2つの管あるいは管部品を接合した構造では、各材料の線膨張係数が異なると両者のひずみ量がマッチせず相互拘束によって接合面に大きな2次応力が発生し、熱負荷が繰り返されると疲労に至る。いわゆる**異材接合問題**である。熱負荷の繰り返し回数の多い設備では異材接合は回避すべきである。
- ② 同一材質であってもジャケット管(2重管)のように外管と内管で流体温度が異なり、両者の伸縮量がマッチしないと相互拘束によって部材の交叉部分に大きな2次応力が現れる。この現象は次項の温度不均一に類似しているが、構造的には多少差異がある。



【 熱荷重－温度不均一 】

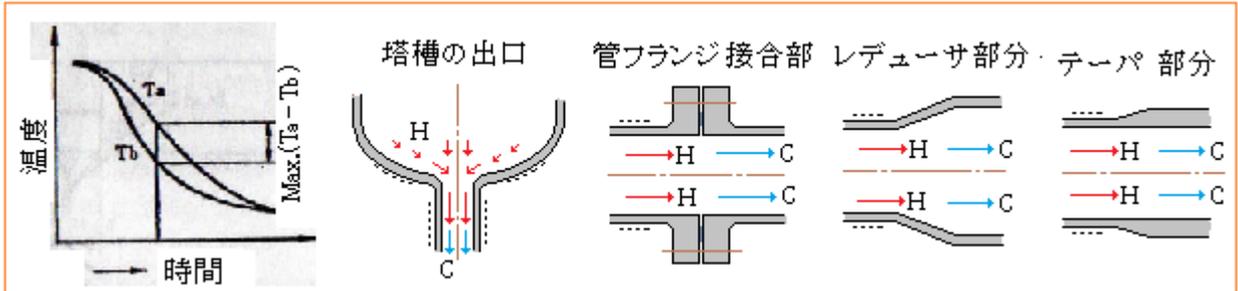
- ① フランジネック、ノズルネック、レデューサーないしテーパ形状継手のような形状不連続部では、過渡的に内部流体温度が変化する過程で、長手断面に**不均一な温度分布**(温度勾配や温度むら)ができ歪みに対し自己拘束が効いて非定常な熱応力が発生する。特に剛性の違いが著しい形状不連続部は**タガ締め構造**と呼ばれ、そのネックで発生する熱応力は**タガ締め応力**と呼ばれている。
なお厚肉管では定常状態でも内外温度差で温度勾配ができるが、外部断熱が十分であれば無視できる。

- ② 温度不均一も結局、前述の線膨張差に帰結し、次のような簡易的な熱応力式が与えられる。

$$\sigma = CE_{ab}(\alpha_a T_a - \alpha_b T_b)$$

ここで、C=応力係数、E_{ab}=両側の平均ヤング率、α_a, α_b=両側の線膨張係数、T_a, T_b=両側の平均温度
 応力係数は不連続部の形状による。厳密には FEM 解析が必要である。

- ③ プラント設備の運転では流体温度の急激な変化は極力避けるようになっている。例えば起動時の昇温は 50~100°C/hr と緩慢である。しかし、高温操作が暴走したりレリーフ弁から高温流体が噴き出す場合もある。重要度の高いラインではノーチェックというわけにはいかない。

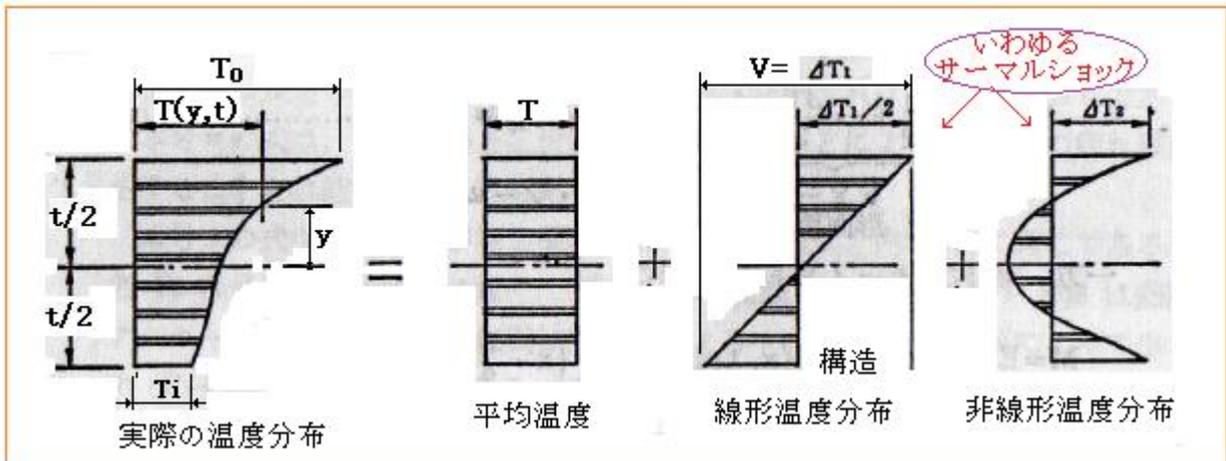


【 熱荷重—熱衝撃 】

- ① 熱衝撃(いわゆるサーマルショック)も内部流体温度が変化する過程で発生する。分類上は前項で述べた温度不均一に属するが、肉厚方向にきつい温度勾配ができるので特に分離して扱われることが多い。その場合、平均温度は前項の温度不均一として扱われ、温度勾配分の ΔT₁, ΔT₂ が熱衝撃として扱われている。
- ② 熱衝撃で発生する過渡的な熱応力は、通常、次のようにカウントされている。

$$\sigma = E\alpha \{ \Delta T_2 / (1 - \nu) + E\alpha \Delta T_1 / \{ 2(1 - \nu) \} \}$$

ここで E=ヤング率、ν=ポアソン比、α=線膨張係数、ΔT₁=線形温度分布、ΔT₂=非線形温度分布

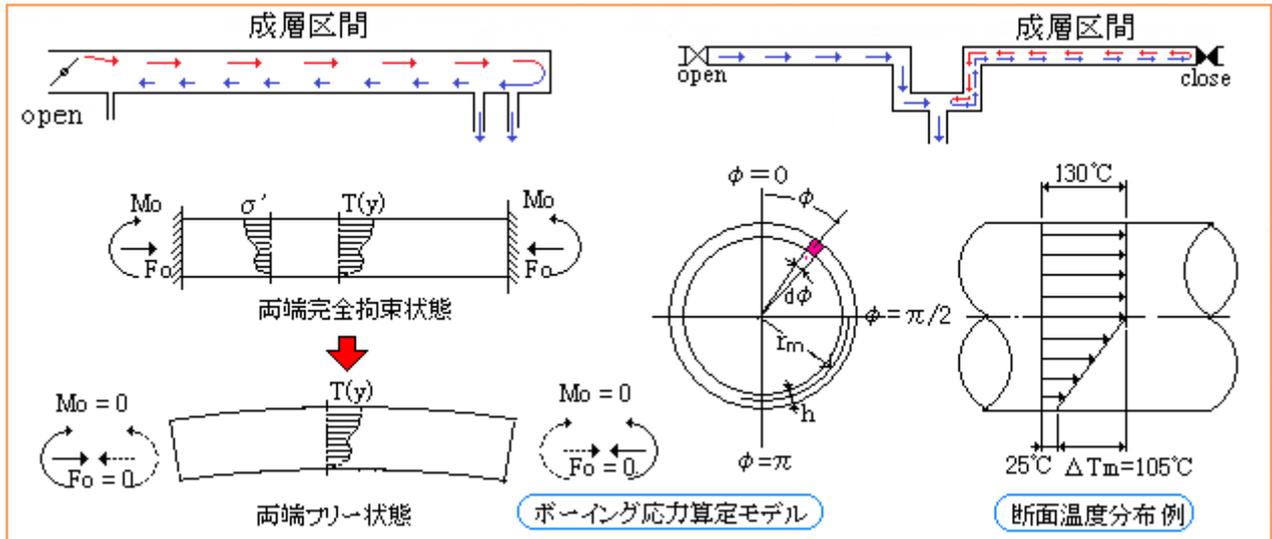


【 熱荷重—温度成層化 】

- ① 流れが停頓した水平管路の一端から、より高温(あるいはより低温)の流体を流し込むと自ずと、比重の重い低温側流体が下側に、比重の軽い高温流体が上側にシフトして成層化することがある。更に先止まり状態ないしこれに近い状態の管路では、成層化したまま管内に循環流れが起きる。この場合、管断面の上下で温度差があるので、配管は長手方向に弓なりになりいわゆるボーイングが起きる。ボーイングの事例としては LNG 配管のクールダウン操作時に起きるボーイングがよく知られている。主蒸気配管の

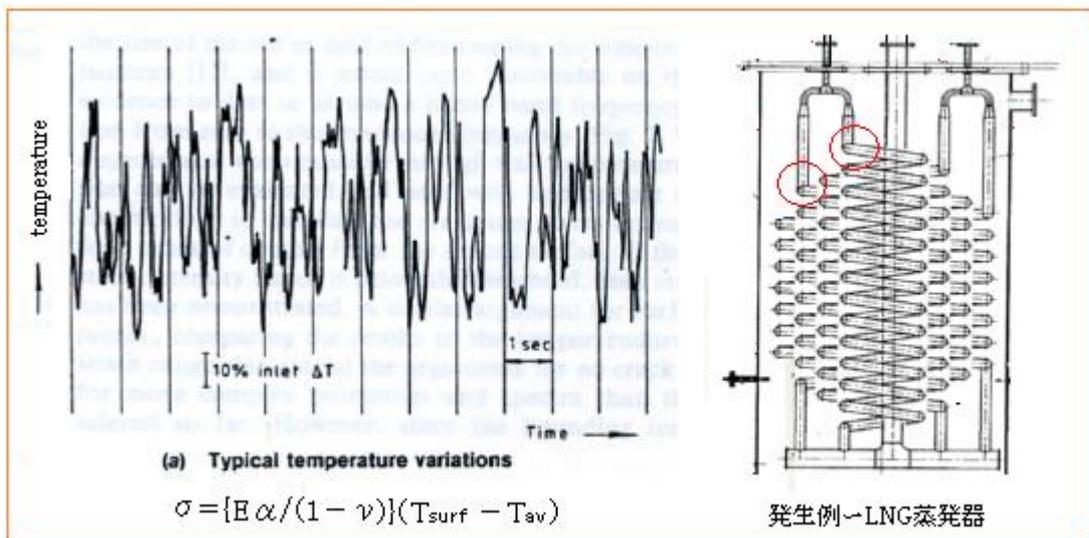
スタートアップ運転でも起きる。液体 Na の循環運転でも起きる。時間をかけて流し込む必要がある。

- ② ボーイングが起きると、長手方向に熱膨張差がでて断面上下方向に分布した熱応力が現れる。疲労破損の事例は聞かないが、サポートの変形/破損の例は多いようだ。配管変形やサポート反力は、通常の配管構造解析プログラムで解析できる。設計的にはボーイングの発生の可否と管断面の上下温度差を予測することも必要である。熱流体シミュレーションが好適である。



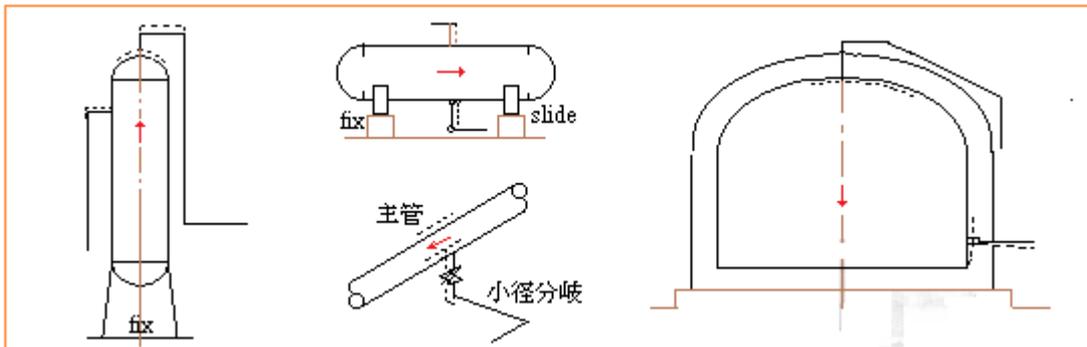
【 熱荷重－温度揺らぎ 】

- ① もともと熱交のチューブで起きる温度振動で、流体温度の変動が周期化したもの。ストライピングとも呼ばれる。配管でもインライン熱交につながるライン、温度成層化したラインあるいは密度波振動のある2相流ラインなどで発生する。
- ② 通常ストライピングは無視されやすい。これは温度揺らぎ(温度振動)に関するデータが不十分だからである。また損傷があってもヘアクラック程度に収まるからである。しかし下図に示す LNG 気化器のチューブでは 100°C 程度の温度振幅が発生して管の突合せ溶接部が幾度も破断している。



【 変位荷重－ノズル変位 】

- ① 配管は機器に比べて撓みやすいため、機器の膨張/収縮によるノズル変位は殆ど接続配管の変形で吸収される。ノズル変位は機器の固定位置を設定すれば、比較的容易に得られる。大型タンクの側壁などのノズルは内部の水頭圧で側壁が湾曲し傾角をもつことがあるが、たいていは直交変位になる。LNG等の低温液貯槽、高温の多段塔、タービン復水器などではかなり大きなノズル変位がでる。
- ② 配管でも大径の主管やヘッダパイプの熱移動は、小径の分岐配管の変形で吸収される。小径分岐ライン分離して応力解析するときは、主管やヘッダの熱移動量をインプットしなければならない。
- ③ 配管の応力解析では通常、ノズルをアンカ点(→リジッド)として解析するが、塔槽熱交類ではノズル廻りの胴板のシェル変形があるので決してリジッドな剛境界ではなくバネ境界になっている。そこでノズル廻りの**バネ定数(剛性係数)**を求めて解析に使用すれば、ノズル反力やサポート反力あるいは配管応力は格段に降下する。確かにノズルアンカを剛として計算するのは安全側であるが、配管を引き回して無用な撓み性を持たせるのは疑問である。
- ④ 多くの場合、ノズル変位は熱膨張/収縮によるものであるが、設備によっては内圧や自重による変位が含まれることがある。この場合、内圧や自重が機械荷重だからといって配管に生じる応力を1次応力で扱う必要はない。

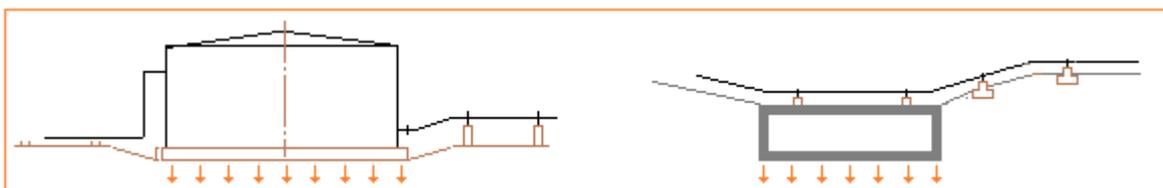


【 変位荷重－地盤沈下 】

- ① 管体重量や土圧のように固定して変動しない荷重を除いて、大半の配管荷重は**リピート性**があり繰り返し配管に作用して疲労に至る。例えば流体圧力や熱変形拘束あるいはノズル変位は、運転ごとに反復返され、水撃圧力や熱衝撃はポンプトリップ等のイベントごとに反復される。しかし地盤沈下のような荷重は、沈下が進行するたびに一方的に増加してゆき、リピート性は全くないので疲労には至らない。
- ② このような特異性のある荷重による応力をいかに制限するか？わずかに ASME Sect. III の Subsect. NC という規格に次のような規定がありよく引用されている(他の規格にはこの種の制限は見当たらない)。

$$iM_D/Z \leq 3S_c$$

ここで i =応力係数、 M_D =繰返しのないアンカ移動モーメント、 Z =管断面係数、 S_c =常温の基本許容応力(≒常温の降伏応力/1.5)。沈下量の予測がポイントになる。



【 地震荷重—慣性力 】

- ① 地震時、地盤がある加速度 α である方向に動くと、地盤上にある質量 M の構造物も同じ方向に動くとするが、慣性は反対方向に働いて、

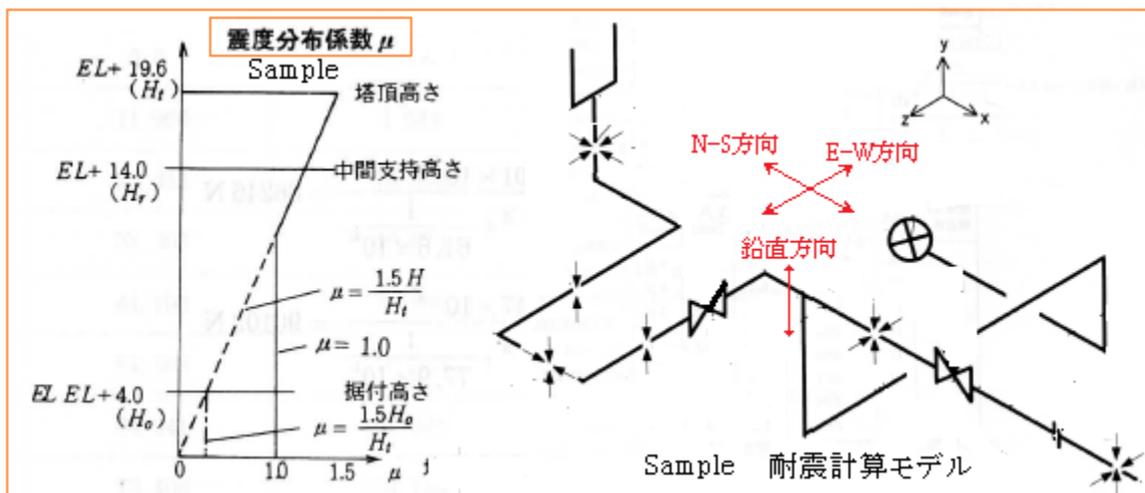
$$M\alpha = (W/g)\alpha = WK = KW \quad (\text{ここで } W=\text{重量、} g=\text{重力加速度}(9.8\text{m/s}^2)、K=\text{震度}=\alpha/g)$$

なる慣性力が構造物に生じ、これによって構造物内にモーメント・フォースが派生して地震応力になる。

- ② もともこの慣性力は地震方向に振動する変動荷重であるが、機械荷重として延性破断を起こすので長期 1 次応力(内圧/自重等による応力)+短期 1 次応力(地震慣性力による応力) \leq 降伏応力の形で制限を受ける。また変動荷重としては、次項の相対変位による 2 次応力と組み合わせて、トータルの応力として弾性挙動内に収まるように制限される(実質、通常の熱変形拘束応力の制限に同じ)。
- ③ 配管において地震慣性力の影響を緩和し縮小するのは、耐震レストレント(耐震サポート)を配置して配管構造をできるだけ剛にする必要がある。しかしこれは高低温の配管における撓み性の確保と矛盾を生じる。レストレントを多用すれば配管移動は拘束され熱応力は許容を越える。例えばレストレントに油圧スナバを使うとかいう手もあるが、メンテも含めてコスト高になる。従ってレストレントをうまく配置して熱応力と地震応力を許容内に収めることが耐震設計のポイントになる。
- ④ 配管の耐震設計に関しては**高圧ガス設備等耐震設計指針(高圧ガス保安協会)**を抜きには語ることはできない。耐震レベルに応じて震度設定/耐震計算法/応力評価法などの情報が完全に近い形で提供されている。たとえ高圧ガスを扱う配管でなくても準用できる。重要度の低い配管でも指針にある簡易法を用いれば、ある程度の耐震性を持たせることができる。配管関連の指針の構成は以下の通り。

- ・レベル 1 耐震性能評価 [耐震設計設備・基礎]編
- ・レベル 2 耐震性能評価 解説編
- ・レベル 1 耐震性能評価 (配管系)編

ただこれらの指針は原子力設備や海外のプラント設備には転用できない。海外であれば ASME の関連規定をローカルコードで運用することになると思う。



【 地震荷重—相対変位 】

- ① 地盤が共通であっても、そのプラント設備の機器/配管/建屋/架構類が同じ動きをするわけではなく

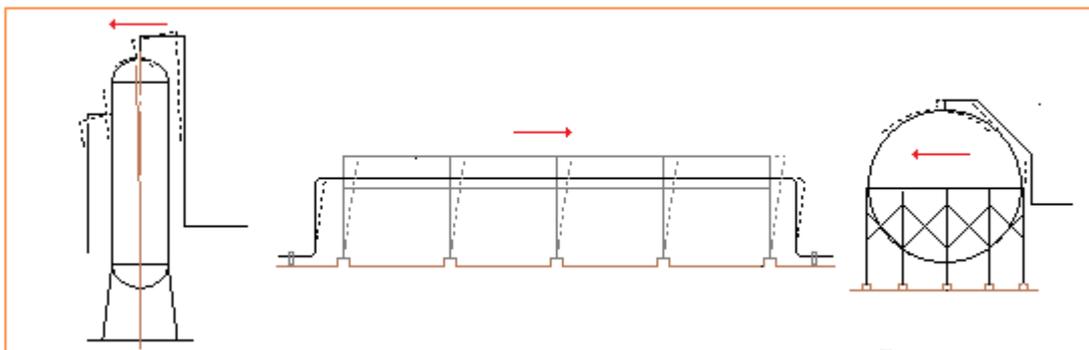
個々の揺れは異なっている。一方、配管は機器ノズルや配管サポートで支持拘束されているがこれら支持拘束点の位置は様々で建屋、架構、地表であったりするため、配管は、接続機器ノズル及各サポートごとに異なる相対変位で揺れるといっても過言ではない。特に質量の大きな機器/構造物の高い位置にある支持拘束点は揺れやすい。

- ② 通常の耐震解析は前項の地震慣性力(→震度)とこの地震相対変位を荷重条件として実施される。その場合、相対変位は基準レベルを決めて設定する(一般には地表面基準)。相対変位は強制変位とみなされ、解析から得られる応力は2次応力に分類される。そして当該地震サイクルで生じる

短期1次応力(慣性力による応力)+短期2次応力(相対変位による応力)

は疲労防止の観点から制限を受ける。

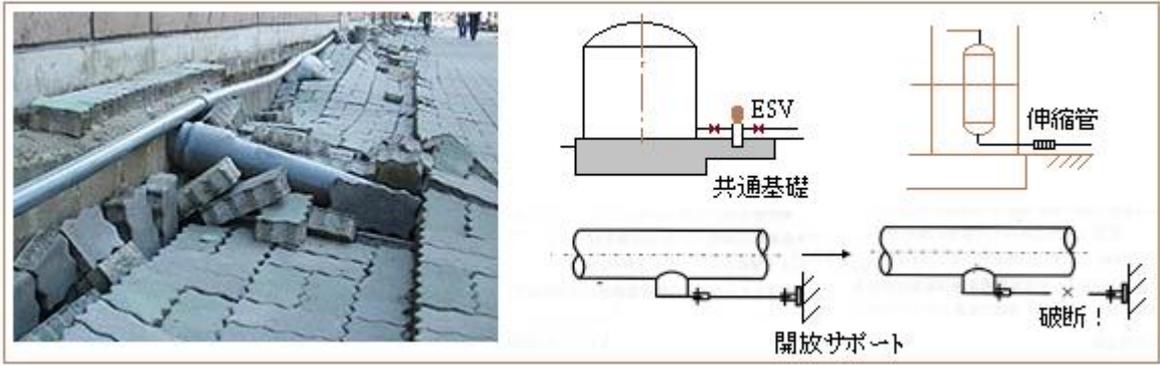
- ③ 各支持拘束点の相対変位の算定は実際のところ煩雑である。そこで前述の耐震設計指針では簡易的な基準や計算法を与えている。かなり安全側に設定されているのかもしれないが、便利である。



【 地震荷重—液状化 】

- ① 常態では砂質地盤は粒子同士の摩擦で安定を保っているが、地震で揺さぶられると繰返しせん断によって体積の減少→間隙水圧の上昇→安定地盤の喪失が起きて液状化してしまう。もし機器/配管/架構などの基礎地盤が運悪く砂質地盤にあると、基礎は任意に沈下/浮上/移動して配管形状は保てなくなる。
- ② 液状化における基礎の沈下/浮上/移動量及び移動方向がわかれば、配管系の解析はある範囲で可能である。しかし地盤や基礎の挙動に関するデータはまだ不十分で指針的なものは見当たらない(多分作成途上?)。移動量は大きいので配管解析は塑性域に及ぶはずである。
- ③ 配管系の液状化対策として次のようなものがあげられる。回避的な設計が無難である。
- ・液状化のある砂質地盤を避けて地上配管を設置する。
 - ・タンクなどの強固な機器設置床を張り出した共通基礎上に配管の支持拘束点を設置する。
 - ・余分な引き回しや伸縮管継手などを用いて配管の可撓性を可及的にアップする。
 - ・解放サポート即ち地震時シャーピンのように切れて支持拘束を放棄するサポートを用いる。
- ④ 次の高圧ガス保安協会の指針が参考になるので一読されたし。

高圧ガス設備等耐震設計指針 レベル2 耐震性能評価 解説編 9.3



【 風荷重・波浪荷重－抗力 】

- ① 流れの中に直交しておかれた物体は流体をせき止める形になり、流れ方向に次の流体力を受ける。

$$F_D = \left\{ \frac{1}{2} \rho U^2 \right\} C_D A \quad (N)$$

ここで ρ = 流体密度 (N/m²)、 U = 自由流れの流速 (物体前面への流体の近寄り速度) (m/s)、
 C_D = 抗力係数(-)、 A = 流れに対す直交する面の面積(m²)

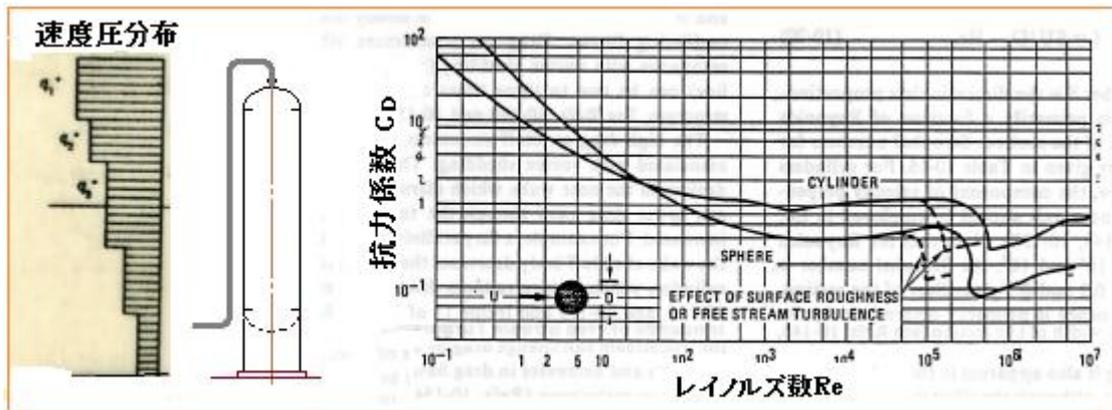
この流体力を抗力(ドラッグフォース)という。外面に風圧を受ける配管(円筒構造物)の場合は、特に
 単位長さ当りの風荷重(kg/m) : $F_w = p \cdot c \cdot k \cdot D \cdot \sin \alpha \quad (N/m)$

ここで p = 速度圧(N/m²) [$h \leq 16m$ のとき $p = 60\sqrt{h}$ 、 $h > 16m$ のとき $p = 120h^{1/4}$]

h = 高さ(m)、 c = 風力係数、 k = 地域係数、 α = 風向き－配管の傾角、 D = 管(胴)の外径(m)
 で運用される(実質的には前式と同じ)。速度圧は $(1/2) \rho U^2$ に該当する。風力係数は抗力係数に同じで
 ラック配管などでは割増しになると思う。応力解析では自重/地震慣性力と同じように分布荷重で扱う。
 何らかの事情で波浪に曝されるパイプの場合は、衝撃がかかるので次式でカウントする必要がある。

$$F_D^* = DLF \cdot F_D \quad \text{ここで } DLF = \text{動荷重係数} (> 1)$$

- ② 風荷重による応力は通常、短期扱いになるが、場合によっては長期扱いになるので注意する。大きな円筒構造物では不規則振動を考慮した制限の対象になることもある。風荷重全般については
 建築基準法施行令、建築物荷重指針(日本建築学会)、あるいは「耐風構造」(岡内ら・丸善)
 が参考になる。



【 風荷重・波浪荷重－揚力変動 】

- ① 流れの中におかれた物体は抗力と共に揚力を受ける。翼の場合は、揚力は一方向に作用して自重と
 均衡を保つが、流れに直交する長い管の場合は流れに対し対称断面を持つので、直交方向に揚力が

不安定になり背後にできる交互渦(1次)あるいは双子渦(2次)によって振動が起こる。流体荷重の項で述べたサーモウエル廻りのカルマン渦に同じである。

- ② カルマン渦の振動数 f_c は次の通り。ストローハル数は通常、0.2 程度である。

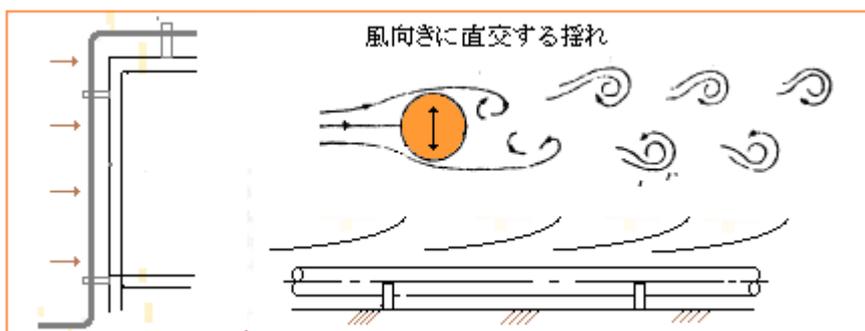
$$f_c = i S_t U / d$$

ここで i = 次数(1,2,3...)、 S_t = ストローハル数(-)、 U = 近寄り流速(m/s)、 d = 管外径(m)
また管の単位長さ当りの揚力は次式で与えられる。

$$F_L = \left\{ (1/2) \rho U^2 \right\} \alpha C_L D \quad \text{ここで } C_L = \text{揚力係数、} \alpha = \text{応答倍率}$$

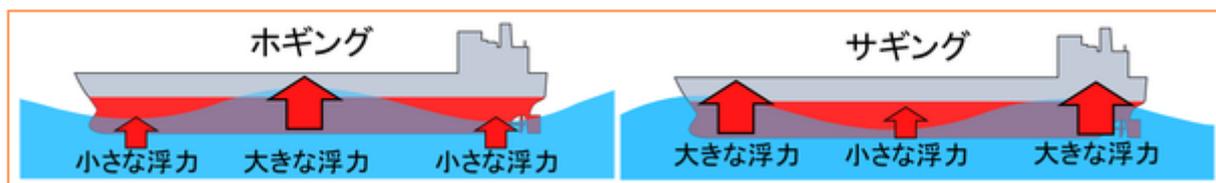
揚力係数は通常 0.66 程度。渦振動数が配管の機械固有振動数に漸近すると共振して 15~50 倍近くの応答倍率になる。

- ③ カルマン渦振動は塔槽類やスタック類でよく観察され、配管には稀であるが、それでも風や水流に曝されるヤード配管や海底配管には可能性がある所以要注意になる。



【 風荷重・波浪荷重—ホグザグ 】

- ① ホギング/ザギングは、船舶やタンカーが波浪による浮力変動によって上反りになったり下反りになったりする様をいう。その際、甲板にある送油配管や船内の配管は強制変位を受け 2 次応力を発生する。非常に激しい波浪の場合は決して無視できないレベルになるので、可とう管などを考慮する必要がある。

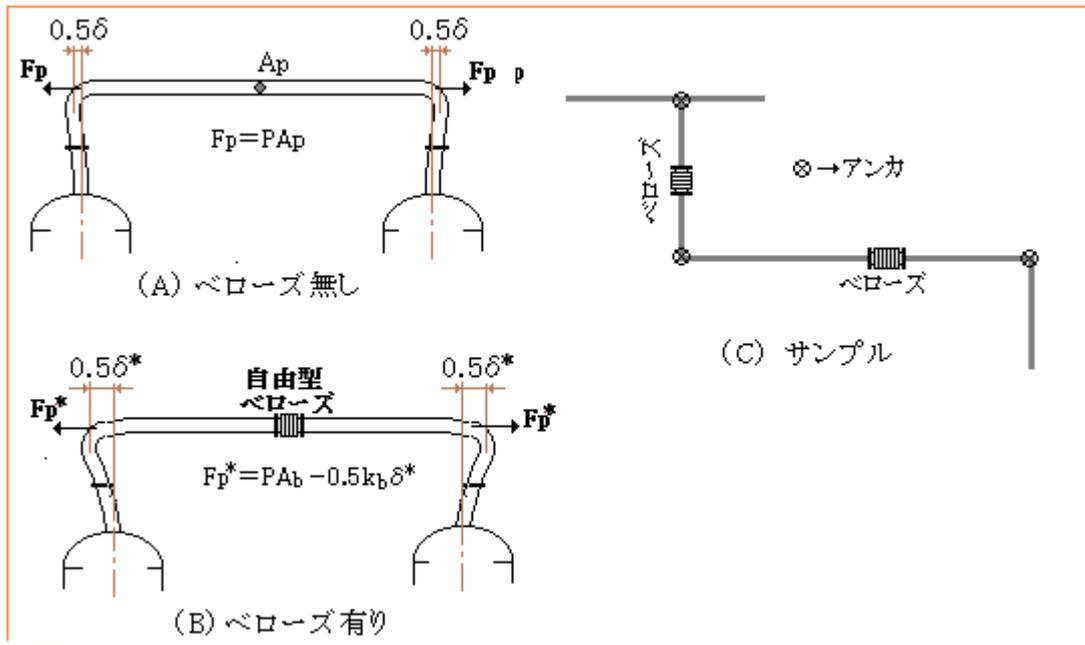


【 フォース荷重—内圧推力 】

- ① 配管の直線区間には下図(A)のように、両端の内圧推力によって軸力 F_p (= 圧力 x 管断面積) が働いているが、管の軸方向バネ定数がかかなり大きいため軸方向変位 δ は十分小さくよほど区間長さが長くない限り無視できる(変位による隣接区間の応力は無視)。然るに、伸縮自在の自由型伸縮管継手を直線区間に挿入すると、軸力は若干減少するものの、伸縮管(ベローズ)のバネ定数が管の軸方向バネ定数に比べ格段に小さくなるため軸方向の伸び δ^* は非常に大きくなり、ベローズは破損してしまう。
- ② 自由型伸縮管継手を使用する場合はよほど低圧でない限り、下図(c)のように区間が変わるごとにターン部分の交叉部近傍にアンカを設けて内圧推力を閉じ込める必要がある。その方法については

EJMA 「Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association Inc.」

に例示されているので参照されたし。



【 フォース荷重－吹き出し反力 】

- ① 機器や配管ヘッド等に設けられた圧力レリーフ弁(SV)やラプチャディスク(RD)が作動すると、その2次側放出端に次のような吹き出し反力が発生する。

$$\text{一般の流れ： } F_1 = WV_1/g + (P_1 - P_a)A = \{\rho V_1^2 + (P_1 - P_a)\}A$$

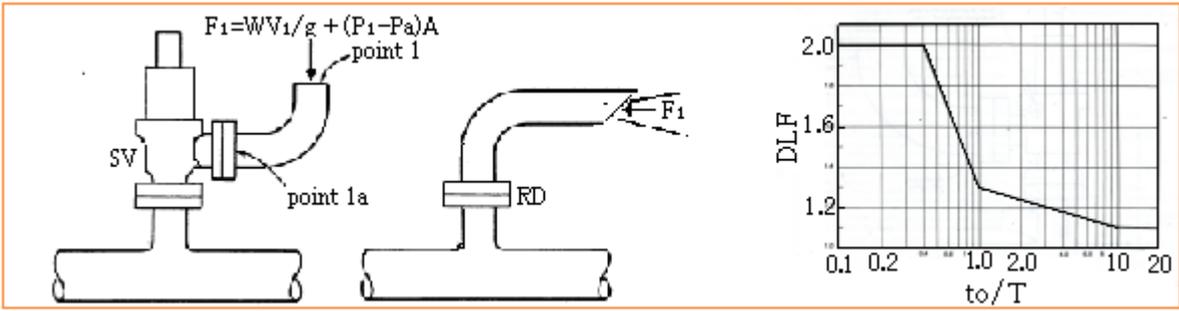
$$\text{気体流れ： } F_1 = \{\kappa M^2 P_1 + (P_1 - P_a)\}A$$

ここで F_1 = 吹き出し反力(kgf)、 W = 吹き出し量(kg/sec)、 V = 吹き出し速度(m/s)、 P_1 = 吹き出し口静圧(kg/m²)、

P_a = 大気圧(kg/m²)、 A = 吹き出し面積(m²)、 M = マッハ数、 ρ = 流体密度(kg sec²/m⁴) = γ/g 、

この場合の吹き出し反力は定常的なもの。吹き出しの瞬間には F_1 に DLF(動荷重係数, > 1) を乗じる必要がある。なお気体流れの場合は放出口でチョーク(閉塞)が起きて音速($M=1$)になることが多く吹き出し反力は $F_1 = \{(1 + \kappa)P_1 - P_a\}A$ でカウントされる。

- ② 実際の SV/RD の作動後には水撃現象と同様な過渡的なプロセスが含まれる。特に SV/RD の2次側配管が長くて放出口まで距離があると、衝撃波とこれに続く過渡流れが先行してかなりの過渡振動が発生することがある。また、定常の吹き出しプロセスであっても、PCVの作動メカに起因してチャタリングやフラッタリングのような弁体の揺動が派生することがある。
- ③ 通常、吹き出し口は PCV/RD のノズル付根から離れているので作動時大きなモーメントが付根に作用するので、応力解析では最大反力[DLF x F_1]を短期集中荷重としてインプットする。
- ④ PCV/RD に係るハード設計には次の ASME B31.1 Power Piping の規定が最もフィットしている。
ASME B31.1 Appendix II Non-mandatory Rules for The Design of Safety Valve Installations



【 フォース荷重—不平衡力 】

① 配管に水撃/スラギングあるいは脈動があると配管が揺れ動いてサポートが破断したり配管溶接部で疲労破損することがある。これは前述の[圧力荷重—過渡圧力/変動圧力]から派生する2次的な荷重即ち不平衡力による。即ち配管直線区間の両端(ターンエンド)に作用する内圧推力が時間的にずれて、その差が揺れとなって現れたもの。

② まず水撃/スラギングの場合。非定常状態例えば過渡状態では、次の運動量の時間変化(→不平衡力)とその見返りとしてのサポート反力がターンエンド間の直線区間に発生する。

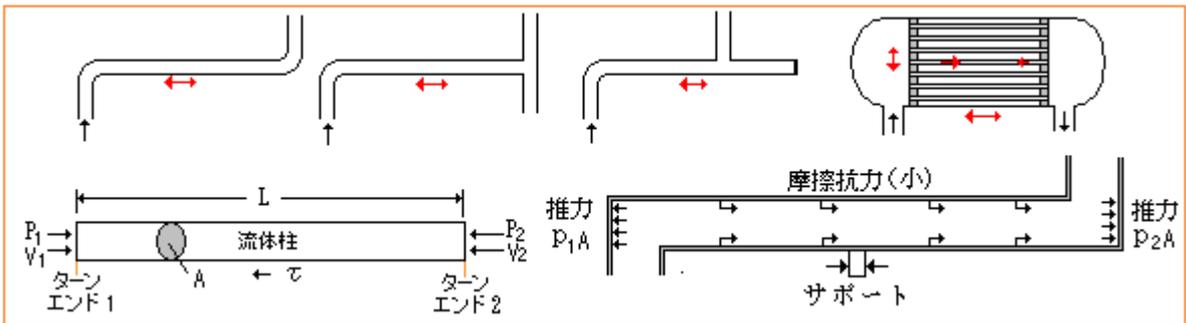
$$\partial (mV) / \partial t = P_1 A_1 - P_2 A_2 - (\rho / 2) \lambda \int_s (A / D) V^2 dx + \rho_1 A_1 V_1^2 - \rho_2 A_2 V_2^2$$

具体的な不平衡力は次の通り。右辺の内圧推力差 $(P_1 - P_2)A$ が支配的になる。

$$F = (P_1 - P_2)A + \rho (V_1^2 - V_2^2)A \quad (\text{サフィックス 1,2 は区間の始端と終端を示す})$$

ここで、 P =静圧、 V =流速、 ρ =流体密度、 A =管断面積

P_1, P_2 は過渡的に時間変化する。水撃解析結果から最大の $(P_1 - P_2)$ を読み取る。設計では更に上記の F 値に動的荷重係数 DLF を乗じて運用する。



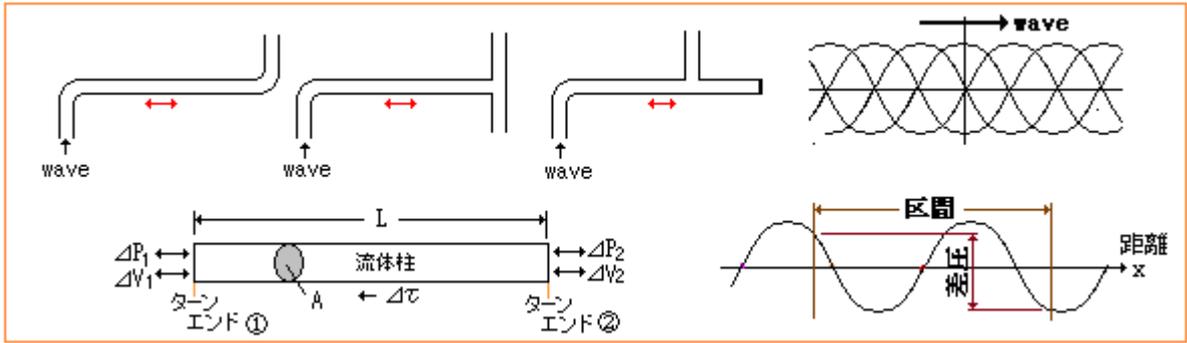
③ 次に脈動の場合。現象的には水撃の場合と同じで、ターンエンドを通過する圧力は時間変化し各々のターンエンドを通過する任意時刻における圧力は異なっているため、その差圧変動が内圧推力の差となって不平衡力が発生する。考察によれば、

$$F = 2P_{max} A \sin(\pi fL/c)$$

ここで F =不平衡力(N)、 P_{max} =脈動解析等で当該ターンエンド間で想定される静圧変動量(N/m²)

A =管断面積(m²)、 f =波動の振動数(Hz)、 c =流体音速(m/s)、 L =ターン区間長さ(m)

水撃のような衝撃性はないので、 DLF を乗ずる必要はない。 P_{max} は、管内に共鳴があると非常に大きくなる。小径の配管が激しく揺れるのはそのせいである。なお、脈動に限らず流体振動の多くは変動圧力を持つので、流体振動で観察される配管の揺れは例外なく不平衡力によるものとみてよい。

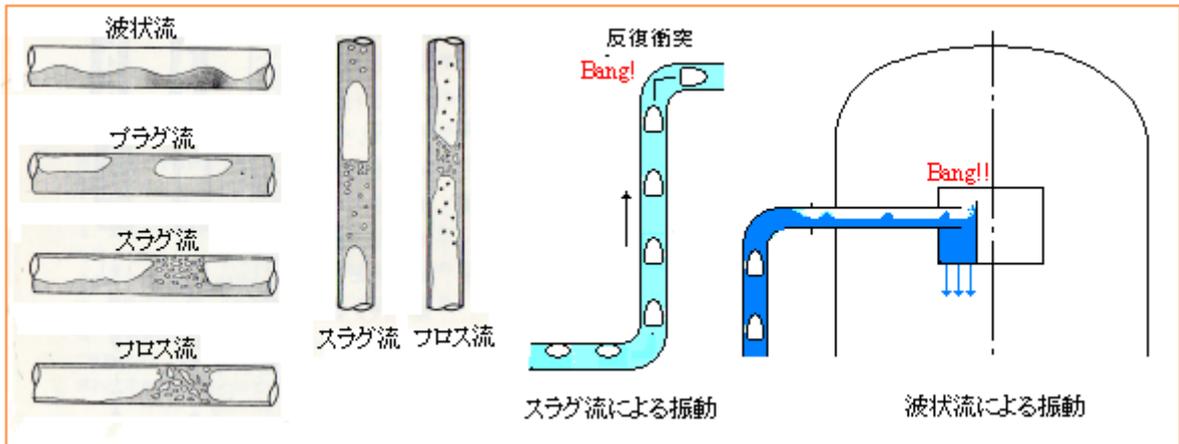


【 フォース荷重—周期的スラギング 】

- ① 2相流にはいろんなフローパターンがあるが、波状流、プラグ流あるいはスラグ流では、波状の液体スラグ、フロス流やスラグ流では塊状のスラグが交互にターニングエンドの壁に衝突して衝撃振動となる。特にスラグ流におけるスラギングは大きく騒音問題や損傷トラブルを引き起こす。
- ② スラギングは弁の急閉による水撃に似ており、次の衝撃力 F_s が壁に加えられる。

$$F_s = \Delta P A_s = \rho C V A_s$$

ここで、 ΔP =衝撃による圧力上昇(N/m²)、 A_s =衝突面積(m²)、 ρ =流体密度(Ns²/m⁴)、 C =流体音速(m/s)、 V =液体スラグの衝突速度(m/s)



【 添付-ASME B31.3 の 301.4~301.8 】

301.4 環境の効果

アベンディクス F, F301.4 参照。

301.4.1 冷却：圧力への影響。 配管システムでガス又は蒸気を冷却すると、内部真空を生じるほどに圧力が低下することがある。このような場合、配管は低下した温度で外圧に耐えることができるようにするか、又は真空を破壊する措置を講じなければならない。

301.4.2 液体の膨張効果。 設計で、配管部品内の静止流体の加熱が原因となって生じる、高くなった圧力に耐えるようにするか、又はその圧力を逃がすような措置を講じなければならない。322.6.3(b)(2)も参照。

301.4.3 大気氷着。 配管システムの最低設計温度が 0°C (32° F) 未満の場合、大気中の水蒸気の凝縮及び氷の生成の可能性を考慮し、結果として生じる機能不全を設計で回避する措置を講じなければならない。このことが当てはまるのは、締切り弁、制御弁、排出配管を含む圧力逃し装置、及びその他の部品の可動部表面である。

301.4.4 低環境温度。 変位応力解析では、環境の低温条件に留意しなければならない。

301.5 動的効果

アベンディクス F, F301.5 参照。

301.5.1 衝撃。 配管の設計に当たっては、外的条件又は内的条件(流量の変化、水撃、液体又は固体の脈動、一時的気化及び間欠的気化を含む)によって引き起こされる衝撃力を考慮しなければならない。

301.5.2 風。 風に暴露される配管の設計に当たっては、風荷重の作用を考慮しなければならない。解析方法は、ASCE 7、「建物及びその他の構造物の最低設計荷重」に記述されたものでもよい。

301.5.3 地震。 配管は、地震に誘発される水平力に耐えるように設計しなければならない。解析方法は、ASCE 7 に記述されたものでもよい。

301.5.4 振動。 配管は、衝撃、圧力脈動、乱流渦、コンプレッサの共振及び風のような振動源から生じる振動の、過度の有害な作用を排除するように設計し、配置し、支えなければならない。

301.5.5 排出反力。 配管は、流体の急な減圧又は排出による反力に耐えるように設計し、配置し、支えなければならない。

301.6 重量の効果

配管の設計に当たっては、他の原因による荷重及び外力と組み合わせられた、次の重量の効果を検討しなければならない。

301.6.1 活荷重。 活荷重には、輸送される媒体又は試験に使用する媒体の重量を含む。環境と運転条件の両方に起因する、雪及び氷の荷重を考慮しなければならない。

301.6.2 死荷重。 死荷重は、配管部品、断熱材の重量、及び配管によって支えられるその他の積載永久荷重から成る。

301.7 熱膨張及び熱収縮の効果

配管の設計に当たっては、他の原因による荷重及び外力と組み合わせられた、次の熱による効果を考慮しなければならない。アベンディクス F, F301.7 も参照。

301.7.1 拘束による熱荷重。 これらの荷重は、配管の自由な熱膨張及び熱収縮が、拘束又はアンカによって妨げられたときに生じる押圧力及びモーメントから成る。

301.7.2 温度勾配による荷重。 これらの荷重は、配管の湾曲の原因となる、比較的厚肉の管を通る高熱流又は層状二相流に起因することがある、急激な温度変化若しくは不均一な温度分布の結果生じる管壁の応

力から発生する。

301.7.3 膨張特性の違いによる荷重。 これらの荷重は、異種金属配管、ライニング配管、ジャケット付き配管、又は金属-非金属配管のような、熱膨張係数の異なる材料が組み合わせられている場合に、熱膨張の差から生じる。

301.8 支持体、アンカ及び端末機器の動きの効果

配管の設計に当たっては、配管支持体、アンカ及び接続されている機器の動きの効果を検討しなければならない。こうした動きは、機器、支持体又はアンカのたわみ及び/又は熱膨張、並びに地盤沈下、潮の干満又は風振動から起こることがある。