

配管解析入門①

有本 享三

連載をはじめるとに当たって

配管解析は設計の様々な局面で利用され、配管系の経済性と安全性に寄与している。安全に直結する配管強度の解析については配管コードにその手法が定められている。一方、配管性能の解析は経済性の検討だけではなく、強度解析に必要な荷重の予測に用いられている。

配管系に対する解析の普及は、コンピュータと数値計算技術の発展によってもたらされた。特に、有限要素法に基づく汎用プログラムにより、一般の技術者が高度な解析を身近に利用することが可能となっている。一方、配管構造系の解析作業のためには、配管コードに従う強度評価機能が組み込まれた専用ソフトが開発されている。このようなソフトのブラックボックス形態での利用が、配管構造系の解析作業の効率化を進展させた。

配管構造系の解析の信頼性を向上させるには、設計者がコードの強度評価手法の内容をよく理解してツールを利用するのが効果的である。そこで、本連載では主に配管コードに基づく強度解析・評価の手法について解説するが、まずは配管の性能解析を含めた解析の役割について明確にする。なお、解析ソフトの基礎理論に相当する有限要素法やその他の解法についてもある程度の理解が必要であるが、本連載では詳細な解説を割愛する。

以下は連載のたまかな目次である。

1. 配管解析の役割
2. 配管解析の歴史的経緯
3. 配管解析の概要
4. 配管コードにおける強度評価の背景

付録

- A. 配管コードの応力評価式
- B. たわみ係数と応力係数

各章において取り上げる内容を簡単に説明する。第1章では配管設計において解析が果たすべき役割について確認する。第2章では配管解析およびコードの発展の経緯について概観する。そして、第3章では配管設計において行われる解析作業の手順とその手法について述べる。以上の三つの章に基づき、第4章では配管コードにおける強度評価の内容についてより具体的に説明する。以上によって、配管解析ソフトに組み込まれたコードに従う評価手法が理解できるものとする。付録AとBには、各種配管コードの応力評価式およびたわみ係数と応力係数について集約する。

なお、筆者はこれまでに種々の配管解析ソフトの開発および化学設備、動力設備、原子力設備などの配管の解析に携わってきた。しかし、この間、業務を通じて得た知識は配管解析の体系からみれば限られたものである。今回の連載では、知識のすき間を埋めるために多数の文献を参考にさせていただいた。

1. 配管解析の役割

1.1 配管設計における解析

産業用設備は計画・設計の段階をへて建設され、目的とする期間の操業に供与された後に廃棄される。この流れを図示したのが Fig. 1.1 である。この図に示すように操業中には一般に定期検査および故障の修理が含まれることになる。計画・設計は設備が社会において果すべき役割を明確にし、以降の建設、操業、廃棄のすべてを安全かつ経済的に行う具体的な手順を確立するための重要な段階である。この内、配管の計画・設計作業ではその性格上、種々の部門の調整を含む広範な業務の処理が要求される。

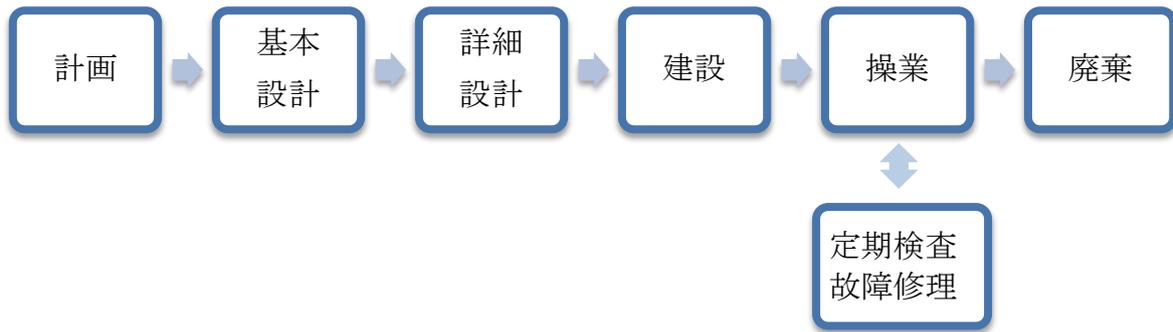


Fig. 1.1 設備の寿命

配管の計画・設計の段階における解析作業は、設備の種類と能力によってその内容が決まってくる。まず、設備の計画・基本設計の段階では、設備が目標とする性能を達成するために必要な機器の定格、管路のルートや口径などを決めることになる。このような性能評価のために、設備によっては解析ソフトが利用されることがある。たとえば、網目状の管路系であれば流量配分の解析が求められる。また、高度な設備では、配管系を含めた設備全体の過渡的な特性について、事前に解析が要求されることがある。このような配管の性能に関する解析を“性能解析”と呼ぶことにする。

配管系の性能解析からは最適な管の形状寸法が得られ、流れに沿う位置での流量と圧力さらには流体の温度が求められる。性能解析を実施しなくても基本設計の段階で流体の圧力と温度が設定され、これらは配管系の強度解析のための条件として用いられる。配管系には圧力、温度の他に、重力、風、地震、安全弁の推力などが加わることになる。これらの荷重を適切に設定することは、次の強度の解析・評価に対して大きく寄与する。そこで、重要な設備については荷重設定ためにも解析が行われることがあり、これを“荷重解析”と呼ぶことにする。たとえば、地震動から応答スペクトルを求めることや弁の急閉鎖やポンプトリップによって発生する過渡圧力を推定するための解析がこれに相当する。流体の温度変化は管の肉厚方向に応力分布を生じさせる。この温度変化を厳密に求めたい場合には、熱流動解析が必要となる。配管系に対する荷重条件が設定されると、これに基づいて寿命中での破損の有無を解析・評価することになる。この作業は配管コードに規定された評価手法に従う。

以上のようにして設計された設備が建設されて操業している間に、定期検査によって配管部品にクラックが発見されることがある。クラックが以後の運転において生長するか否かについては、破壊力学に基づく解析に基づいて予測がなされることがある。一方で事故が発生した場合、その原因の追求には解析が有効であり、その作業は設計部門にフィードバックされることが多い。このように、配管設計が対

処すべき解析の種類は多く、安全性が特に重要とされる設備においては解析作業を効率的に進めていくための工夫が求められることになる。

1.2 解析による設計

配管設計で行われる性能解析、荷重解析および強度解析の内、強度解析については配管コードでその手法が明確に規定されている。このようなコードにおける設計と解析の規定について概説するため、Table 1.1 には ASME Section III Class 1 と ASME B31.3 の目次の一部を掲載した。いずれのコードについても Design(設計)に含まれる項目は、安全に直接結びつく強度の評価に関するものとなっている。

Table 1.1 ASME Section III Class 1 および ASME B31.3 の目次

ASME Boiler & Pressure Vessel Code (BPVC) -Section III: Rules for Construction of Nuclear Facility Components - Division 1 - Subdivision NB - Class 1 Components	ASME Code for Pressure Piping, B31.3 Process Piping
NB-1000 Introduction	Chapter I Scope and Definitions
NB-2000 Materials	Chapter II Design
NB-3000 Design	Part 1 Condition and Criteria
NB-3100 General Design	Part 2 Pressure Design of Piping Components
NB-3200 Design by Analysis	Part 3 Fluid Service Requirements for Piping Components
NB-3300 Vessel Design	Part 4 Fluid Service Requirements for Piping Joints
NB-3400 Pump Design	Part 5 Flexibility, and Support
NB-3500 Valve Design	Part 6 Systems
NB-3600 Piping Design	Chapter III Materials
NB-3610 General Requirements	Chapter IV Standards for Piping Components
NB-3620 Design Considerations	Chapter V Fabrication, Assembly, and Erection
NB-3630 Piping Design and Analysis Criteria	Chapter VI Inspection, Examination, and Testing
NB-3640 Pressure Design	Chapter VII Nonmetallic Piping and Piping Lined With Nonmetals
NB-3650 Analysis of Piping Products	Chapter VIII Piping for Category M Fluid Service
NB-3660 Design of Welds	Chapter IX High Pressure Piping
NB-3670 Special Piping Requirements	
NB-3680 Stress Indices and Flexibility Factors	
NB-3690 Dimensional Requirements for Piping Products	
NB-4000 Fabrication and Installation	
NB-5000 Examination	
NB-6000 Testing	
NB-7000 Overpressure Protections	
NB-8000 Nameplates, Stamping and Reports	

コードにおいて解析(Analysis)が設計に対してどのように位置づけられているかを、Table 1.1 に示した目次によって明らかにする。Section III Class 1 では、容器、ポンプ、バルブおよび配管の設計規定に先立ち、NB-3200 に Design by Analysis (解析による設計)の項目が存在する。一方、それ以前に確立した B31.3 ではNB-3200 に相当する項目は見当たらない。ただし、B31.1 の Chapter II Part 5 の Flexibility and Support の中に Flexibility Analysis (たわみ性解析)に関する規定がある。

一方、設計には Pressure Design (圧力設計、Section III の NB-3640、B31.3 の Chapter II Part2) の項目があることは Table 1.1 から明らかである。この項目には、設計圧力と設計温度に基づいて配管部品の肉厚を求める簡単な公式が規定されている。このような公式あるいは図表を用いて強度設計を行う手法は、Design by Analysis との対比において Design by Rule (公式による設計あるいは規則による設計)と呼ばれている。この手法は、Design by Analysis が確立する前に用いられていたものであるが、現在では(特に Section III では)Design by Analysis の前段階の評価規則として位置づけることができる。

1.3 解析の役割と経済性

配管コードにおける強度解析の規定は、配管系さらには設備の安全性に対して大きく寄与するものである。一方、コードでは明確に規定されていない性能解析および荷重解析に対しても、これらを実施して荷重を厳密に設定すれば強度解析の信頼性の向上に結び付くことになる。

一方、解析は設備の経済性の向上も寄与するものである。まず、配管系の性能解析からはシステムの経済的に最適な条件を得ることができ、したがってその解析の実施は設備の経済性の向上に直接結びつく。荷重解析および強度解析については、これを厳密に実施することで寿命中における破損の評価の信頼性が向上し、これは保守作業の低減につながる。このように、荷重解析および強度解析についても間接的には設備の経済性の向上に寄与するものであり、解析のコストの許す範囲で質・量ともに増加させるべきものとする。

2. 配管解析の歴史的経緯

どのような事柄でもその歴史をたどることでその内容の理解が深まる。配管解析の場合も同様であるが、さらに積極的にその進展の経緯を調べておく必要がある。たとえば、前章において述べたように、現在用いられている配管コードの ASME Section III class 1 と B31 の解析に対する考え方の違いを理解するためには、その制定の経緯を知っておく必要がある。そして、1950 年代に確立した B31 コードと 1960 年代に確立した Section III class 1 コードが、適用される設備が異なるとはいえ共存していることの意味を認識しておかねばならない。また、今後の配管解析の行方を占う上でも、歴史的経緯を知っておくことには意義がある。

2.1 配管解析手法の発展

配管設計で行われる性能、荷重および強度に対する各解析は、過去の工学的研究で社会的に評価された成果に基づいて確立したものである。これらの解析に最も関連の深い工学的な研究分野は以下に示す三領域である。

- (1) 材料強度
- (2) 熱移動
- (3) 流れ

材料強度に関する研究は直接強度解析に結びつくものであり、一方熱移動および流れに関するものの成果は性能解析および荷重解析で用いられる。

配管系は直管の他にエルボやティーのように複雑な形状を持つ部品から構成されており、強度あるいは管内流れの解析は各部品およびそれらが組み合わされた系に対する研究に分かれて発展してきた。通常、各部品に対しては詳細な実験あるいは解析が行われ、これらの結果を簡易的にモデル化した上で系全体についての解析手法の開発が行われる。逆に系全体の解析結果は、各部品での詳細な状態を求めるための条件として用いられる。配管解析では各部品および全体系に対する解析はいずれもが重要であり、しかも両者のレベルが調和していることが求められる。

さて、配管解析に関連する膨大な研究の中から、ごく一部であるが筆者が重要であるとするテーマをピックアップして作成した年表を Table 2.1 と 2.2 に示す。Table 2.1 は 17 から 19 世紀、そして Table 2.2 は 20 世紀に対応する。以下では、これらの年表に沿って配管解析手法の歴史について概観する。なお、

材料強度と熱移動，そして流れに関する表中の研究テーマの大部分は，Timoshenko(1953)あるいはRouse-Ince(1957)の著作において該当する解説と参考文献が含まれている．以下では，両著作で参考文献が明確に指定されていない場合，あるいは両著作に含まれていないテーマを紹介する場合のみに参考文献を示す．

Table 2.1 配管解析手法の発展(18, 19 世紀)

年 代	材料強度		熱移動	流れ	
	要素	系		要素	系
1600	<ul style="list-style-type: none"> フックの法則 (Hooke) 管の曲げ強度／内圧による破裂に関する実験 (Mariotte) 			<ul style="list-style-type: none"> 流体の粘性の定義 (Newton) 管の流れ抵抗に関する実験 (Mariotte) 	
1700	<ul style="list-style-type: none"> はりのたわみ曲線 (J. Bernoulli) 変分法によるはりの解析 (Euler) 			<ul style="list-style-type: none"> ベルヌイの定理 (D. Bernoulli) 非粘性流体の運動方程式 (Euler) 開水路における平均流速の実験式 (Chézy) 	
1800	<ul style="list-style-type: none"> 弾性体の分子論 (Navier) 応力-ひずみを用いた基礎方程式 (Cauchy) 中空円筒のラメの式 (Lame) 分子構造の仮定なしでの弾性方程式 (Green) 金属の塑性流れ実験 (Tresca) 内圧による管の塑性変形 (Saint-Venant) 回転曲げ疲労試験(Wöhler) 	<ul style="list-style-type: none"> トラスの図式解法 (Whipple) 	<ul style="list-style-type: none"> 熱伝導方程式 (Fourier) カルノーサイクル(Carnot) 熱応力の基礎方程式(Duhamel) 	<ul style="list-style-type: none"> 流体の分子論(Navier) 管内層流の圧損実験(Hagen, Poiseuille) ナビエ・ストークスの式 (Stokes) 管路要素の損失係数 (Weisbach) 内面が滑らかな管と粗い管に対する抵抗式(Darcy) ガンギエ・クッタの式 (Ganguillet, Kutter) マンニングの式(Manning) レイノルズ数(Reynolds) 水撃現象の実験(Joukowsky) 	

2.1.1 17 世紀と 18 世紀

18 世紀より前の年代では質点の力学において進展があったが，材料や流体などの連続体の数学的な取り扱いについては成果のない状態が続いた．ただし，Hooke によるいわゆるフックの法則の論文発表，そして Newton による流体の粘性の定義は 17 世紀に行われたものである．一方，Mariotte は，ベルサイユ宮殿に送水する管路の設計に関連し，管の流れ抵抗，曲げ強度および内圧による破裂に関する実験を実施した．その成果は死後の 1686 年に著作として発表された．

18 世紀になると，Jacob Bernoulli は微分法を用いて弾性はりのたわみ曲線を求める手法を 1705 年に報告した．そして Euler はこの研究を柱の座屈および棒の振動問題に発展させて 1744 年の著作で発表した．流れの分野では，今日ベルヌイの定理と呼ばれているものが Daniel Bernoulli の 1738 年の著作に含まれており，これは微分方程式からではなく代数的に導出されたものである．一方，非粘性流体の運動方程式は，はりのたわみ曲線の研究と同じく Euler によって導かれて 1755 年に発表された．一方，開水路における平均流速を求める実験式は Chézy によって 1768 年に提案されており，この式は管内流れに対しても応用された．

2.1.2 19 世紀

19 世紀に入ると，弾性論，熱伝導論および流体力学の三つの分野において，それぞれの現象に対する基本的な微分方程式が導かれた．まず，Navier は弾性体の外力による変形の定式化を分子論(molecular theory)に基づいて試み，その成果を 1821 年に出稿した．一方，Cauchy は応力とひずみを定義することで弾性体の基礎方程式を簡便に導出し，これを 1822 年に出稿した．さらに Green は，1837 年に分子構造の

仮定なしで弾性方程式を導出した(Todhunter, 1886). Fourier の熱伝導の研究成果(1822 年に出版)を踏まえ、Duhamel は弾性体に温度変化が生じている際の応力について研究し、その成果を 1838 年に報告した。ここでは、温度変化と外力によって生じる応力を重ね合わせることが可能であると述べられている。そして、この基礎式を肉厚方向に温度分布が生じている管に適用した。管に内圧および外圧が加わった際の応力分布は Lamé によって求められ、1833 年に論文発表された。一方、トラス構造の解析的および図式的解法は Whipple の 1847 年の著作で公開された。なお、熱移動に関連して付け加えると、Carnot の熱機関の研究の著作は 1824 年に出版されている。

流れの基礎方程式についても Navier は分子論に基づいて導出し、その成果を 1822 年に論文として発表した。この基礎方程式は Stokes による 1845 年の論文において、動粘性係数を含む今日 Navier-Stokes の式と呼ばれる形式に置き換えられた。一方、管内層流での圧力損失に対する実験は Hagen と Poiseuille によって個別に実施され、成果はそれぞれ 1839 年と 1841 年に報告された。実験に使用した管は、Hagen が直径 2.5 から 6 mm の真ちゅう製、一方の Poiseuille は直径 0.029 から 0.142 mm のガラス製であった。

19 世紀の中ごろからは上記の弾性論の基礎式が適用できない現象についての研究が開始された。材料強度の面では塑性現象がこれに相当し、まず金属の高圧下での現象に対する実験的研究が Tresca によって 1869 年に報告された。そして、この研究に影響を受けた Saint-Venant は塑性現象の基礎方程式を導出し、これを中空円筒の内圧による塑性変形の問題に適用した結果を 1872 年に発表した。この他、材料強度の面では機関車の車軸の疲労問題に関連し、多数の疲労試験が実施されるようになった。特に Wöhler は、現物の実験、開発した疲労試験機、疲労の限界応力などの成果について 1858 年から 1870 年の間に数件の報告を行った。

流れの分野では、Weisbach は 1845 年の著作において、拡大・収縮部や弁に対する損失係数について記している。Darcy は内面が滑らかな管と粗い管での抵抗に関する実験式を導出し、1857 年に発表した。この他、開水路の平均流速を求める実験式が Ganguillet-Kutter によって 1869 年、そしてその改良式が Manning によって 1889 年に論文発表された。一方、今日レイノルズ数と呼ばれるパラメータについては、Reynolds の 1883 年の報告で発表された。この無次元量によって層流から乱流に遷移する条件が明確になった。水撃については Joukowsky により水道網の設計のために実験的および理論的研究が実施され、この現象は波動であることが明かにされた。そして、この研究の成果は 1898 年に論文発表された。

2.1.3 20 世紀前半

20 世紀に入ると塑性・クリープや乱流などの複雑な現象の解明がさらに進展するとともに、基礎的な研究成果の配管解析への応用にも努力がはらわれるようになった。降伏現象の発生条件については、せん断ひずみエネルギー理論が Huber によって 1904 年に発表されたが、von Mises も独自に同じ考えに到達していた。クリープ現象については、そのひずみ速度の実験式が Norton(1929)によって導出された。

一方、配管強度に対しては直管以外の部品に対しても研究が実施され、曲管は曲げによって扁平化することでたわみが増加することを Karman は 1911 年の報告で明らかにした。この研究は配管の強度解析においては一つのエポックになるものと考えてよい。なお、この Karman の研究内容は鶴戸口ら(1968)の解説に紹介されている。この他、フランジ継手については、Waters ら(1937)が全体構造をリング、ハブ、管に分割することで発生応力を求めている。そして、多様な配管部品に対して Tube Turns 社で疲労試験が実施されたことについては Markl(1952)によって報告されている。

Table 2.2 配管解析手法の発展(20世紀)

年代	コード	材料強度		熱移動	流れ	
		要素	系		要素	系
1900	<ul style="list-style-type: none"> ASME Sec. I Power Boiler ASME Sec. VIII Unfired Pressure Vessels ASA B31.1 Pressure Piping 	<ul style="list-style-type: none"> 降伏のせん断ひずみエネルギー理論 (Huber, von Mises) エネルギー法による曲管の解析(Karman) クリープひずみ速度式 (Norton) フランジの強度解析 (Waters ら) Tube Turns 社における配管部品の疲労試験 (Markl) 	<ul style="list-style-type: none"> ラーメンのたわみ角法 (Bendixen) ラーメンのハーディクロス法 (Cross) 	<ul style="list-style-type: none"> 円管内の層流熱伝達 (Nusselt) 	<ul style="list-style-type: none"> 水撃の図式解法 (Allievi) なめらかな直管の乱流損失実験 (Blasius) 水撃の図式解法 (Schnyder) 砂状粗面を持つ直管の乱流損失実験 (Nikuradse) ムーディ線図 (Moody) 	<ul style="list-style-type: none"> 管路網のハーディクロス法 (Cross) 流量補正法 (McIlroy)
1950	<ul style="list-style-type: none"> ASA B31.1 の改正 	<ul style="list-style-type: none"> シェル構造の解析 (Turner) 	<ul style="list-style-type: none"> マトリックス法による配管系解析(Brock) 			<ul style="list-style-type: none"> 圧力補正法 (Warga)
1960	<ul style="list-style-type: none"> ASME Sec. III Nuclear Vessels 					
1970	<ul style="list-style-type: none"> USAS B31.7 Nuclear Power Piping ASME Sec. III Nuclear Power Plant Components 	<ul style="list-style-type: none"> ORNL における応力係数の研究 (ELBOW, CORTES, LUGS, FLANGE プログラムの開発) 				<ul style="list-style-type: none"> 水撃の特性曲線法(Streeter)

管路流れに対しては、より厳密な管摩擦係数を求めるための実験が実施された。1913年に Blasius はなめらかな管、そして Nikuradse(1933)は砂状粗面を持つ管に対する実験式を発表した。その後、Moody(1944)は管摩擦に関する成果を設計者が利用しやすい線図の形に集約して報告した。熱移動の分野では、固体内の熱伝導だけでなく管内流体と管壁との間での熱伝達問題の研究がなされるようになった。たとえば、管内層流における熱伝達の研究は Nusselt(1915)によって実施された。その後、種々の管内流れの状態での熱伝達問題が理論的および実験的に研究され、熱伝達係数の形で知識が集約されていく。一方、水撃現象については 1913年に Allievi により図式解法が報告され、それが Schnyder によって 1932年に実際問題に適用された。

この年代になると構造物を個々の要素ではなく、系として解析するための手法が進展した。すなわち、19世紀からのトラスの解析手法を発展させることで、Bendixen は 1914年にラーメン構造系に対するたわみ角法を発表した。さらに、Cross はより複雑なラーメン構造系を解析するため、逐次近似法を考案して 1932年に報告した。一方、配管系の流れについては、網目状配管の流量分配の問題に対し、Cross(1936)はラーメン構造系と同様の逐次近似法を提案した。

2.1.4 20世紀後半

20世紀後半になると、大規模な化学・動力設備や商業用原子力設備の建設にともない、配管の安全性に対する要求が高まった。そして、塑性、クリープなどの材料挙動および延性破断、ぜい性破断、疲労破損などの破損様式に関する研究が広範に実施された。この年代で注目すべきことはコンピュータの出現である。Brock (1952)は、配管系のたわみ性解析手法として、コンピュータに適したマトリックス法を発表した。一方、管路網の流れ解析手法として、コンピュータ使用を前提とした流量補正法(McIlroy, 1949)

や圧力補正法(Warga, 1954)が開発された。さらに Wylie と Streeter(1978)は水撃現象の解析のために特性曲線法に基づくコンピュータ数値計算手法を開発した。

シェル構造の解析のため、コンピュータによる数値解析手法が Turner ら(1956)によって開発された。この手法は有限要素法として発展し、多様な形状の固体の構造解析だけでなく熱伝導や電磁場の問題にも適用されていった。1960年代からは有限要素法に基づく大規模な汎用プログラムの開発が開始され、現在では NASTRAN, ANSYS, MARC, ABAQUS, ADINA などの商用システムが利用可能となっている。なお、配管構造系のマトリックス解析については、パイプ要素という有限要素を用いた有限要素法による解析として位置づけられることになった。

原子力配管の強度に関する研究が、Oak Ridge National Laboratory(ORNL)において1960年代の中ごろから1980年までの間に実施された(Moore, 1977; 有本, 1999)。この研究において、ELBOW, CORTES, LUGS, FLANGE などのプログラムが個々の配管部品の解析のために開発された(Moore, 1977)。

2.2 配管設計コード制定の経緯

配管に関する研究成果の中で最低限守るべき事項が、この分野のエキスパートにより体系的に集約され、権威のある機関より発行されている。このような配管コードに基づいて配管系の強度を保証していくという考え方は米国において確立した。我国では米国で制定されたコードを取り入れ、国内の実情に合わせて修正した形の規則を制定している。

2.2.1 一般配管コード

19世紀の末から今世紀の初めにかけて、米国ではボイラの爆発事故が多発した。そこで ASME (American Society of Mechanical Engineers) は人命と財産の保護という観点から、ボイラの製造に伴う材料、設計、製作、検査に関する規定をコードとして制定した。Table 2.2 の年表に示したように、容器に対する規格である ASME Section I Power Boilers が1914年、そして ASME Section VIII Unfired Pressure Vessels が1925年に発行された。なお、安藤と岡林(1977)の著作には、容器規格の ASME コードの制定の経緯がまとめられている。

配管に対しても同様にコードの制定が計画され、1935年には最初の配管コードである ASA B31.1 Code for Pressure Piping が制定された。ここに、ASA は American Standards Association の略であり、この機関はその後1966年に United States of America Standards Institute (USASI)、さらに1969年に American National Standards Institute(ANSI)に改名されて現在に至っている。

さて、ASA B31.1 は1955年に大きく改訂され、配管系の疲労破損に対する評価が明確に規定された。すなわち、熱膨張応力による配管系の疲労破損を防止するために許容応力範囲の考え方を導入し、各配管部品に対しては応力係数(Stress Intensification Factor)によって局部応力・ひずみによる疲労の生じやすさを定量的に規定した。この改訂の背景については Markl(1955)の報告に記載されている。

ASA B31.1 には、動力設備、化学設備、パイプラインなどに対する規定が Section に分かれた状態で含まれていた。しかし、1959年からは設備の種類ごとに独立したコードが制定された。また、1978年には ANSI コードを制定してきた American National Standards Committee B31 が ASME 内の組織(ASME Code for Pressure Piping B31 Committee)に移動した。現在では、動力設備に対して ASME B31.1 Power Piping、化学設備に対して ASME B31.3 Process Piping と ASME B31.5 Refrigeration Piping、そしてパイプラインに対し

て ASME B31.4 Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids と ASME B31.8 Gas Transportation and Distribution Piping が制定されている。B31 コードで規定されている解析手法の考え方は現在においても 1955 年の改正時におけるものと基本的には変わっていない。

2.2.2 原子力配管コード

1960 年代に入ると商業用軽水炉の建設がはじまり、より安全性を考慮したコードの制定が社会的に要求されるようになった。1963 年には、まず軽水炉の圧力容器に関するコードである ASME Section III Nuclear Vessel が制定された。これは Design by Analysis の理念をはじめて明確に打ち出したコードである。すなわち、起こりうるあらゆる破損様式を想定し、これらに対して解析を実施することによって構造物の健全性を評価しようとするものである。たとえば、疲労破損に話を限定するとして、B31 コードでは熱膨張による疲労破損のみが解析対象とされているのに対し、変動圧、振動、熱過渡による疲労破損に対しても考慮がなされている。そして、疲労の評価では、B31 コードで用いられている実配管部品の疲労試験結果ではなく、丸棒または砂時計形試験片による試験結果がベースとされている。疲労破損の他にも、延性破断、熱ラチェットおよびぜい性破壊に対する評価手法も明確に規定されている。

その後、当然、原子力配管に対しても、ASME Section III の設計理念に基づいたコードの作成が、社会的に要請されるようになった。この作業は、1960 年代の初期から ASA の B31.7 Section Committee-Nuclear Power Piping において実施された。配管解析の場合、容器のような詳細解析をすべての部品に対して行うことは経済的に無理があり、応力係数(Stress Indices)による簡易解析を導入する必要がある。このためには、各種の配管部品に対して応力係数を規定しなければならないが、この時点では一部の部品の研究が十分でなかったものと考えられる。1966 年には、応力係数についての検討のため、Welding Research Council (WRC)の Pressure Vessel Research Committee 中に Ad Hoc Committee が設置された。この Committee で作成された研究計画案は、1968 年に Atomic Energy Commission の同意を得た(Rodabaugh と Pickett, 1970)。しかし、同年には社会的な要請によって USAS B31.7 Nuclear Power Piping の案が出版された。Moore(1977)は、この案で規定された応力係数は Battelle Memorial Institute の Rodabaugh が 6 ヶ月近くで作成したものであり、大部分が工学的判断(engineering judgment) に基づくものであったと述べている。その後、応力係数についての見直しが Oak Ridge National Laboratory (ORNL)と Rodabaugh によって実施され、その成果は逐次コードに反映された。

USAS B31.7 は 1971 年に ASME Section III Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components に統合された。この ASME Section III では、配管系を重要度によって Class1, Class 2 および Class3 に分けている。Class1 は重要度の高い部分に適用されるコードで、Design by Analysis の理念に基づいている。重要度の低い部分には Class2, 3 が適用され、これらは基本的に B31 コードと同じ強度解析理念に基づいている。

2.2.3 高速炉に対するコード

高速炉は材料のクリープ域で運転されるため、この現象に関連する破損様式の評価法を確立する必要がある。1979 年にはこの目的のために ASME Code Case 1592 が制定された。しかし、この Code Case には、実用的な配管解析に必要な応力係数による簡易解析手法が規定されていなかった。その後、ASME Section III Class 1 を高温域に拡張した Code Case N-47 が制定された。また、Class2, 3 を同様に拡張した

ものとして、1981年にはCode Case N-253-1が発行された。このCaseには、Class2、3配管における応力係数による簡易解析手法を改良した規定が含まれている。

2.2.4 国内のコード

国内ではASMEコードを参考にして独自のコード（省令、告示、自主基準）が制定された。まず、動力設備の配管に対しては日本電気協会の規定として、JEAC 3706-1970“圧力配管および弁類規程”が制定された。この規定は1967年版のANSI B31.1に基づいている。また、動力設備配管の耐震解析に対しては、同じく日本電気協会の指針としてJEAG 3605-1983“火力発電所の耐震設計指針”が発行された（2009年に第4回改訂）。ここで、ボイラ主要配管の応力評価手法は1982年版のANSI B31.1、そして液化ガス燃料燃焼設備の配管に対する応力評価手法は後述の消防法“危険物の規制に関する規則”に基づいている。化学設備の中で高圧ガス製造設備の配管に対しては、高圧ガス保安協会の自主基準として、KHK S0302-1978“高圧ガスの配管に関する基準”が制定された。この基準として1961年に最初に制定されたものは1966年版のANSI B31.3に基づいていた。1978年には本基準が改訂されたが、この際1973年版のANSI B31.3が参考とされた。

国内におけるパイプラインに関する法規として、1972年には石油パイプライン事業法が制定された。この法を補完するものとして、技術上の基準を定める省令および基準の細目を定める告示が制定された。これらの法規は当時の我国の実情に即し、既往のものに捕らわれずに作成されたものであるとされている。次に1973年には、危険物の移送の取り扱いを行う施設(移送取扱所)に関する規程が、消防法を補完する政令、総理府令、告示によって制定された。この移送取扱所の技術上の基準は、石油パイプライン事業法に関連する基準に準じて制定されている。さらに1975年にはコンビナート等保安規則が制定されることによって、コンビナートにおける各事業所間で高圧ガスを授受する導管に関する規則が規定された。このコンビナート導管に関する規定も石油パイプライン事業法の流れをくむものであるが、導管が地上設置されることが多いことを考慮して地上管に対する規定がより詳細なものとなっている。

原子力設備（軽水炉）に対する技術基準として、我国では1970年に通産省告示501号“発電用原子力設備に関する構造等の技術基準”が制定された。この基準は1963年版のASME Section IIIと1962年版のANSI B31.1を参考に行っている。すなわち、配管構造系の解析理念としてはASME Section IIIのClass 1の考え方は採用されなかった。1980年には告示の全面的な改正が行われ、この際にはASME Section IIIの1974年版（一部1977年版を含む）が参考にされている。この改正された告示には、Class1配管の解析手法に基づく規定が含まれた。

高速炉については動力炉・核燃料事業団において構造基準の整備が行われた。1981年には高速炉“もんじゅ”の設置許可申請書の一部として、“高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針”が制定された(岡林, 1984)。この方針はASME Code Case N-47に対応するものであるが、配管系の強度解析では応力係数による配管の簡易解析に関する規定が含まれている。

参考文献

有本享三, 1999, “Mr. E. C. Rodabaughと配管解析のバックグラウンド”, 配管技術, Vol. 41(5), pp. 65-68.

安藤良夫, 岡林邦夫, 1977, “原子力プラントの構造設計”, 東京大学出版会.

鶴戸口英善, 中桐 滋, 加納 巖, 1968, “薄肉彎曲管の応力と変形について”, 高圧力, Vol. 6(3), pp. 1329-1336.

- 岡林邦夫, 1984, “高速増殖炉の高温構造設計”, 原子力工業, Vol. 30(8), pp. 17-27.
- Brock, J. E., 1952, “A Matrix Method for Flexibility Analysis of Piping Systems,” *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 19(4), pp. 501-516.
- Cross, H., 1936, “Analysis of Flow in Network of Conduits or Conductors,” Bulletin No. 286, University of Illinois, Engineering Experiment Station.
- Green, G., 1839, “On the Laws of the Reflection and Refraction of Light at the Common Surface of Two Non-Crystallized Media,” *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 7, pp. 1-24.
- Markl, A. R. C., 1952, “Fatigue Tests of Piping Components,” *Trans. ASME*, Vol. 74, pp. 287-303
- Markl, A. R. C., 1955, “Piping-Flexibility Analysis,” *Trans. ASME*, Vol. 77, in *Pressure Vessel and Piping Design – Collected Papers 1927-1959*, ASME, New York, N.Y., 1960, pp. 419-441.
- McIlroy, M. S., 1949, “Pipeline Network Flow Analysis Using Ordinary Algebra,” *Journal of American Water Works Association*, Vol. 41(5), pp. 422-428.
- Moody, L. F., 1944, “Friction factors for pipe flow,” *Trans. ASME*, Vol. 66, pp. 671-678.
- Moore, S. E., 1977, “Contribution of the ORNL Piping Program to Nuclear Piping Design Codes and Standards,” *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technol.*, Vol. 99(1), pp. 224-230.
- Nikuradse, J., 1933, “Stromungsgesetze in rauhen Rohren,” *VDI-Forschungsheft 361, Beilage zu “Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens” Ausgabe B Band 4*, (“Laws of Flow in Rough Pipes”, National Advisory committee for Aeronautics Technical Memorandum 1292, Washington, November)
- Norton, F. H., 1929, “Creep of Steel at High Temperature,” McGraw-Hill Book Co., Inc.
- Nusselt, W., 1915, “Das Grundgesetz des Wärmeüberganges,” *Gesundheits-Ingenieur*, Vol. 38(42), pp. 477-482.
- Rodabaugh, E. C. and Pickett, A. G., 1970, “Survey Report on Structural Design of Piping Systems and Components,” TID-25553. (U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information: www.osti.gov で公開)
- Rouse, H. and Ince, S., 1957, “History of Hydraulics,” Iowa City: Iowa Institute of Hydraulic Research, State University of Iowa, (高橋裕, 鈴木高明訳, 1974, “水理学史,” 鹿島出版会)
- Timoshenko, S. P., 1953, “History of Strength of Materials,” McGraw-Hill Book Co. (最上武雄 監訳, 川口昌宏 訳, 1974, “材料力学史,” 鹿島出版会).
- Todhunter, I., (edited and compiled by Pearson, K.), 1886, “A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials from Galilei to Lord Kelvin,” University Press, Cambridge. (村上一男, 並川宏彦, 村上一實 訳, 1986, “弾性学と材料力学の歴史-16,” 大阪産業大学論集 自然科学編 Vol. 74, pp. 11-22.)
- Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., and Topp, J. L., 1956, “Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures,” *Journal of Aeronautical Sciences*, Vol. 23, pp. 805-824.
- Waters, E. O., Wesstrom, D. B., Rossheim, D. B., and Williams, F. S. G., 1937, “Formulas for Stresses in Bolted Flange Connections,” *Trans. ASME*, Vol. 59(4), pp. 161-169.
- Wraga, J., 1954, “Determination of Steady State Flows and Currents in a Network,” *Proceeding Instruments Society of America*, Vol. 9(5), Paper No. 54-43-4.
- Wylie, E. B. and Streeter, V. L., 1967, “Fluid Transients,” McGraw-Hill. (竹中利夫監訳, 1973, “流体過渡現象,” 日本工業新聞社)

連載の目次と掲載号

(青文字は未発表)

1987年1月号：“配管解析入門(1)”

連載をはじめるに当たって

1. 配管解析の役割

- 1.1 配管設計における解析
- 1.2 解析による設計
- 1.3 解析の役割と経済性

2. 配管解析の歴史的経緯

- 2.1 配管解析手法の発展
 - 2.1.1 17世紀と18世紀
 - 2.1.2 19世紀
 - 2.1.3 20世紀前半
 - 2.1.4 20世紀後半
- 2.2 配管設計コード制定の経緯
 - 2.2.1 一般配管コード
 - 2.2.2 原子力配管コード
 - 2.2.3 高速炉に対するコード
 - 2.2.4 国内のコード

1987年3月号：“配管解析入門(2)”

3. 配管解析の概要

- 3.1 配管設計における解析の流れ
- 3.2 重要度分類
- 3.3 性能解析
- 3.4 運転状態の分析
- 3.5 荷重の種類とその解析
 - 3.5.1 荷重の種類
 - 3.5.2 荷重解析
 - (1) 内圧・温度
 - (2) 地震
 - 3.5.3 荷重条件の設定
 - (1) 設計荷重条件
 - (2) 運転荷重条件

1987年4月号：“配管解析入門(3)”

- 3.6 圧力による設計

3.6.1 規則による設計

- (1) 直管
- (2) 曲管・マイタベンド
- (3) 分岐部
- (4) フランジ継手

3.6.2 圧力・温度レイティング

3.7 強度解析

- 3.7.1 破損様式とその評価
- 3.7.2 応力係数による簡易解析
 - (1) 簡易解析手法
 - (2) たわみ係数
- 3.7.3 詳細解析

1987年5月号：“配管解析入門(4)”

4. 配管コードにおける強度解析の背景

- 4.1 コードが対象とする破損様式
- 4.2 応力とひずみの性質
 - 4.2.1 力による応力と変位による応力
 - 4.2.2 応力とひずみの非線形性
 - (1) 塑性
 - (2) クリープ
 - 4.2.3 多軸応力・ひずみの評価
 - 4.2.4 応力とひずみの分類

1988年7月号：“配管解析入門(5)”

4.3 延性破断とクリープ破断

- 4.3.1 概要
- 4.3.2 単純なモデルにおける挙動
 - (1) 引張試験
 - (2) クリープ試験およびクリープ破断試験
 - (3) 許容応力
 - (4) 材料モデル
- 4.3.3 内圧を受ける配管部品
 - (1) 直管の延性破断
 - (2) 直管のクリープ破断

- (3) 直管の肉厚算定式
- (4) 直管以外の部品の肉厚算定式
- 4.3.4 内圧と曲げ・ねじりモーメントを受ける配管部品
 - (1) 直管の塑性崩壊
 - (2) 直管のクリープ挙動
 - (3) 応力係数による 1 次応力評価式
 - (4) 直管以外の部品の応力係数
- 4.3.5 詳細解析における 1 次応力評価式
- 4.4 過大な塑性・クリープ変形
 - 4.4.1 概要
 - 4.4.2 単純なモデルにおける挙動
 - (1) ラチェット
 - (2) 弾性追従
 - 4.4.3 直管における挙動
 - 4.4.4 直管以外の部品における挙動
 - 4.4.5 配管系における弾性追従
 - 4.4.6 簡易解析における評価式
 - 4.4.7 詳細解析における評価式
- 4.5 疲労破損とクリープ疲労破損
 - 4.5.1 概要
 - 4.5.2 単純なモデルにおける挙動
 - 4.5.3 直管における挙動
 - (1) 内圧
 - (2) 曲げ・ねじりモーメント
 - (3) 温度分布
 - 4.5.4 直管以外の部品における挙動
 - (1) 内圧
 - (2) 曲げ・ねじりモーメント
 - (3) 温度分布
 - 4.5.5 継手における挙動
 - (1) 内圧
 - (2) 曲げ・ねじりモーメント
 - (3) 温度分布
 - 4.5.6 簡易解析における評価式
 - (1) B31 コード
 - (2) Sec. III class 1 コード

- 4.5.7 詳細解析における評価式
- 4.6 弾・塑性およびクリープ座屈
 - 4.6.1 概要
 - 4.6.2 単純なモデルにおける挙動
 - 4.6.3 直管における挙動
 - (1) 外圧
 - (2) 軸力
 - 4.6.4 直管以外の部品における挙動
 - (1) 外圧
 - (2) 軸力
 - 4.6.5 評価式
- 4.7 脆性破壊

1989 年 6 月号：“配管解析入門(6)”

- 付録 A 配管コードの応力評価式
- A.1 はじめに
- A.2 動力設備に対する初期のコード
 - A.2.1 ANSI B31.1-1973
 - A.2.2 ABS-1988
- A.3 動力設備に対する最近のコード
 - A.3.1 ANSI/ASME B31.1-1989
 - (1) 力による応力
 - (2) 変位による応力
 - A.3.2 JEAC 3706-1986
 - A.3.3 JEAG 3605-1983

1990 年 2 月号：“配管解析入門(7)”

- A4 化学設備に対するコード
 - A.4.1 ANSI/ASME B31.3-1987
 - (1) 力による応力
 - (2) 変位による応力
 - A.4.2 ANSI/ASME B31.5-1983
 - A.4.3 KHK S 0302-1978
 - (1) 力による応力
 - (2) 変位による応力
 - A.4.4 JEAC 3709-1985
- A5 パイプラインに対するコード
 - A.5.1 ANSI/ASME B31.4-1986

A.5.2 ANSI/ASME B31.8-1986

A.5.3 ANSI/ASME B31.11-1986

A.5.4 コンビナート等保安規則 導管

A6 建築設備

A.6.1 ANSI/ASME B31.9-1982

A.6.2 建築設備耐震設計指針

1990年4月号：“配管解析入門(8)”

A7 原子力設備（軽水炉）に対するコード

A.7.1 ASME Sec. III

A.7.1.1 ASME Sec. III Class 1 配管

- (1) 配管系部品の評価
 - (a) 1次応力強さ
 - (b) 1次+2次応力強さ
 - (c) 1次+2次+ピーク応力強さ
 - (d) 応力係数
 - (e) Test Loadings
- (2) フランジ継手に対するモーメントの制限
 - (a) ボルト
 - (b) フランジ本体
- (3) 解析上の注意
 - (a) 弾性係数
 - (b) コールドスプリング

1990年11月号：“配管解析入門(9)”

A.7.1.2 ASME Sec. III Class 2 配管および Class 3 配管

- (1) 力による応力
- (2) 変位による応力
- (3) 力による応力と変位による応力を加算した値
- (4) フランジ継手に対する強度評価
 - (a) 任意形状のフランジ継手
 - (b) おだやかな圧力・温度条件で用いられる規格フランジ継手
 - (c) 高強度ボルトを用いた ANSI B16.5 フランジ継手

A.7.1.3 ASME Code Case N-155

A.7.1.4 ASME Code Case N-253

A8 動力設備に対する改正後のコード

A9 原子力設備（高速炉）に対するコード

1991年2月号：“配管解析入門(10)”

付録B 強度評価式で用いられるたわみ係数と応力係数

B.1 はじめに

B.2 たわみ係数と応力係数の分類

B.3 グループ A の係数

B.3.1 概要

B.3.2 たわみ係数

B.3.3 応力係数

B.3.4 グループ A の特徴

B.4 グループ B の係数

B.5 グループ C の係数

B.6 グループ D の係数