リスクベース工学の新展開

2. 信頼性工学とリスクベース工学[†]

酒井 信介*

The Frontier of Risk-Based Engineering II : Reliability Engineering and Risk-Based Engineering

by

Shinsuke SAKAI*

Key words : Reliability, Risk-based engineering, Probability of failure, Consequence of failure, Human resource development

1 信頼性工学からリスクベース工学へ

前回においても述べられた通りに、機械構造物の設計、製造、メンテナンスのあらゆるステージでリスクベース工学導入の必要性が高まっている。この場合、決定論的判断ではなく、確率論的判断が求められることになるが、この変化に伴って、信頼性工学の重要性が高まってくる。これまで、信頼性工学では、破損確率評価などの理論的取り扱いが進んだ割には、実用と結びつかないきらいがあった。リスクベース工学の導入とともに、ようやくその本格的に活用されるステージに進んだといえる。今回は、リスクベース工学の評価手順を主に信頼性工学的側面から紹介する。

2 リスクベース工学の一般的手順

図1にリスクベース工学で必要となるリスク評価のフローチャートの例を示す。原理的には、リスク評価の手順はおおよそ共通しているものと考えられる。

まず、①において解析を行う枠組みを明確にすることから始める。最終的なアウトプットとして求められるものが、定性的なものであるのか定量的なものであるのかも明確にしておく。

②の段階では、評価対象とするシステムの明確化を行う。システムの特性を評価するためには、システムを適確にモデル化する必要がある。このモデル化の情報は、次のハザードのシナリオ解析においても活用される。

③においては、事故が発生したときに何が起きるのかというシナリオを漏れなく抽出する。その際に、実際に観察された現象のみではなく潜在的に生じ得る現象の予測が求められるために、注意深い検討が必要である。

④においては、異常事態が発生した結果として、どのような被害、あるいは影響度があるかを特定する。被害を測る指標は、リスク解析の目的や、解析者の関心などに依存して、決定される。

⑤の段階では、異常事態が発生する確率、もしくは損

傷確率の評価を行う。確率論的破壊力学のような信頼性工学的手法を用いたり、損傷データベースがあればそれを活用する。信頼性工学の活用が期待されるステージである。

⑥においては、異常時にどのようなシナリオが展開していくかを明確にすることを行う。このために、フォールトツリー解析 (FTA) やイベントツリー解析 (ETA) などの論理解析が活用される。この際、想定されるシナリオ

図1 リスク評価の一般的手順

[†] 原稿受理 平成18年10月18日 Received Oct. 18, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷, School of Eng., The Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656

が膨大である場合には、全てのシナリオに対してリスク評価することは時間と労力の観点から困難を伴うことも多い。この場合には、⑦の感度解析を活用する。つまり、入力変数の微小変化が結果に及ぼす影響の度合いを調査し、感度の大きな因子を重点的に解析することにより合理化される。また、このような変数は重要度が高い因子として抽出できるので、データ精度を高めるための優先順位を決定するための目安とすることもできる。

⑧のリスク評価においては、まずリスクの基準を明確にする。技術的側面からの明確化以外にも、文化的、社会的、人道的、法律的などさまざまな観点からの基準も考えられる。影響度と損傷確率の両者の評価結果を用いて、定量的リスク評価、もしくは定性的リスク評価を行った上で、リスク基準との比較を行う。この結果に基づき⑨のリスクに対する処理を決定する。リスク基準とリスク評価の結果の比較によって、その余裕の程度に応じて意思決定を行う。最終的な結果は、正確に文書化するとともに⑩に示すように第三者の専門家による厳正なレビューが望まれる。このレビューの結果、不適切と判断される部分があれば、①に戻ってリスク評価の精度を高める努力を行う。

3 信頼性工学の活用

3・1 破損確率評価

工学上のリスク評価では、確率論的な取り扱いがたびたび出てくるので、信頼性工学は随所で用いられ、その中でも破損確率の評価手法は原理や、解析技法について理解しておくことが必要である。定量的リスク評価(レベルⅢ評価)においては、破損確率の定量評価が求められる。定性的リスク評価の場合には、破損確率の表現は、破損頻度が大、中、小というようなおおまかなくくりにより表現される。ここでは、定量的破損確率の評価の考え方を簡単に紹介しておく。破損確率の評価のために荷重-強度モデル (Stress-Strength Model) が用いられる。図2に荷重-強度モデルの概念を示す。つまり、荷重と強度のばらつきがいずれも図のように確率密度関数 (PDF) で与えられるとき、破損確率の評価は次の破損条件を満足する確率を評価することに他ならない。

$$\text{荷重} > \text{強度} \quad (1)$$

図2 荷重-強度モデル

例えば、図2の場合、荷重が $(x, x + dx)$ の間に存在する確率は、 $f_S(x) dx$ であるが、この場合の破損確率は強度がこれを下回る累積確率 $F_R(x)$ で与えられる。ここに、 $F_R(x)$ は強度 x_R の累積分布関数であり、 $f_S(x)$ は確率密度関数である。従って、この状態での破損確率は両者の積を取って以下のように与えられる。

$$F_R(x) \cdot f_S(x) dx \quad (2)$$

全体の破損確率 P_f は、式(2)を x の全領域に渡って積分することによって求められる。これが荷重-強度モデルの基本的考え方である。

荷重-強度モデルの評価においては荷重と強度のいずれについても確率密度関数が厳密に求まっている必要があるが、このようなケースはまれであるので、破損確率の近似評価手段として、各変数の平均値 μ と標準偏差 σ 程度の情報から近似的評価を行う一次近似二次モーメント法 (FOSM) がよく用いられる。簡単なケースとして確率変数が荷重 x_S と強度 x_R の2つしか存在しない場合を考える。式(1)の破損条件は

$$G(x_R, x_S) = x_R - x_S \leq 0 \quad (3)$$

と書ける。このとき、関数 $G(\cdots)$ を限界状態関数と呼ぶ。 $z = G(x_R, x_S)$ と置くと、 $G(\mathbf{x})$ が $\bar{\mathbf{x}} = (\mu_{x_R}, \mu_{x_S})$ の回りに Taylor 展開でき、かつ $\mathbf{x}$ が互いに独立であるとき、以下の近似評価が可能である。

$$\begin{aligned} \mu_z &\equiv G(\bar{\mathbf{x}}) \\ \sigma_z^2 &\equiv \left(\frac{\partial G}{\partial x_R} \right)_{\bar{x}_R}^2 \sigma_{x_R}^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_S} \right)_{\bar{x}_S}^2 \sigma_{x_S}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$G(\cdots)$ によって変換された z はやはり、確率変数であるが、 z の平均値とばらつきは安全に直接かかわる量となる。式(4)では、 z の平均値 μ_z と標準偏差 σ_z が、各設計変数の不確定性と関連付けて近似評価できることになるので、安全裕度の評価が可能である。下式で定義される信頼性指標を安全にかかわる指標として用いる。

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (5)$$

このように、式(5)に基づいて信頼性を評価する手法を一次近似二次モーメント法と呼ぶ。図3の z の確率密度分布図から明らかな通り、 μ_z が、破壊限界である $z = 0$ から $\beta\sigma_z$ だけ離れていることを意味している。

図3 信頼性指標の概念

3・2 ベイズ統計学の応用

破損確率は、標本数が増えれば、評価精度は高まるが、このようなことを前提にして構成された統計学の学問体系を標本統計学と呼び、我が国では馴染みのある考え方である。ところが、メンテナンスにかかわる確率論的取扱いについては、欧米では標本統計学よりは、もっぱらベイズ統計学が用いられる。ベイズ統計学とはベイズの定理に基づく統計学のことをいう。メンテナンスの場合には検査データに基づいて、破損確率を評価するが、この場合にはベイズ統計学の方が合理性を持つからと考えられる。

ベイズ統計学の概念を図4に示す。標本統計学では、多くの標本データ群から、破損確率を推定する。検査結果は、そのつどデータ群に追加されていく。この評価の過程には主観が入る余地はなく、客観的手順であるといえる。一方、ベイズ統計学では、破損確率の候補を主観に基づいて複数選び、個々の候補に対して確からしさ（確信度）も併せて割り当てる。主観的要素が入るので主観的確率と呼ばれることもある。検査の結果、破損が観察されるか否かに応じて、確信度を更新していくのである。更新手続きはベイズの定理に基づく。検査を行う前の確信度の分布のことを事前分布、これを検査後にベイズの定理によって更新した後の分布を事後分布と呼ぶ。

我が国では、科学的手続きに主観を入れることは許容されないとする風潮がある。それが故に客観性をもつ標本統計学がもっぱら用いられているものと思われる。ところが、メンテナンスに関しては、客観的データで表現できないようなものも多数含まれてくる。その代表的なものが、検査の有効性（検査有効度）である。検査有効度は、対象とする損傷モードと、用いる非破壊検査法の組み合わせに対して定義されるが、定量的表現はむずか

しく、有効である、ある程度有効である、有効でない、などのあいまいな表現によらざるを得ない。破損は、検査によって検出されるものであるから、検査有効度の取扱い抜きにしては評価できない。つまり、メンテナンスに関してはあらゆるものに客観性を求めても限界がある。そこで、エキスパートによる主観表現をうまく取り込んで、検査結果に基づいて修正していくというベイズ統計学の考え方は、メンテナンスの特性を考慮した上でとにかく破損確率に関する評価を導出するための一つの知恵であるといえる。この他、ベイズ統計学を用いると、1回の観察データを有効利用できるのも、検査データのような小標本データに向いている。また、破損したというデータのみならず、破損していないという事実もデータの更新に活用できる。データベースの活用という観点からは、データベースから得られる類似機器の破損確率分布を事前分布とし、評価対象の個別プラントデータを観察事象としてベイズ更新し、得られた事後分布を信頼性評価のための破損確率として使用するというのもよく行われる。なお、ベイズ統計学の学術的な詳細、メンテナンスの中での具体的な取扱いについては文献^{1), 2)}を参照されたい。

4 リスクベース工学導入のための課題

4・1 ガイドラインの策定

メンテナンス段階にリスクベース工学を活用する代表的なものは、リスクベース検査 (RBI) である。RBIは旧来型の画一的検査方式に置き換わるものであるが、この導入を促進するためには、規格・標準化が必要である。その代表的活動として、非原子力分野では、高圧力技術協会のRBM研究会（平成13年度発足）であり、原子力分野では、日本機械学会の維持規格分科会の下に設置されているRI-ISI作業会（平成16年度発足）がある。なお、原子力分野ではRBIとほぼ同じ考え方をリスク情報活用検査 (RII) と呼ぶ。RBIは、欧米では非強制規格の位置づけとなっており、これを実施できる実力のある事業者はこの方式を採用して活用することになる。

4・2 損傷データベースの構築

我が国にリスクベース検査を導入する際の一つの課題として、損傷データの整備が挙げられる。リスク評価は、機器の損傷確率と影響度の積から評価されるが、参照すべき損傷データベースが存在しないと、海外のデータを便宜的に利用するか、文献データによるなどのことを行わなければならない。この場合、我が国の実情とかけ離れた結果となることが懸念される。そこで、今後は我が国に固有の損傷データベースを整備していくことが重要である。損傷データベースの構築にあたっては、下記のような問題点が考えられる。

4・2・1 兆候データの収集 破損事象の対象としては、機器の故障データが用いられることが多い。一般に“故障”という用語からは、“ポンプの故障”に代表されるように、本来機器がもつべき機能が失われる状態をさすものと解釈されることが多い。配管のような静的機器にあてはめると、漏洩や破断などに対応付けが行われる

図4 ベイズ統計学の基本手考え方

ことになるが、このような事象は、いわば重大事故に分類されるもので、検査時に発見されるということは、極めてまれなことであると考えられる。このように故障データを中心に損傷データが集められてきた理由は、これまでの損傷データベースが、初めから損傷確率評価への適用を意識して収集されたものではなく、検査時の故障報告記録からデータを掘り起こしたり、法定届出義務のある報告事例をもとにデータベースとして構成する場合が多いことが理由の一つと推察される。本来、リスクベース検査では、検査段階での損傷の兆候をとらえて、検査プランニングの見直しを行うことが望まれる。従って、リスク評価においても、参照すべき損傷データは兆候のデータである。現実には、これに該当する損傷データベースはパブリックの形ではほとんど存在しないものと思われる。法的に届出義務がない損傷の兆候を自ら進んで公表することは、これまでは負のイメージしかなく、何のインセンティブも働かなかったとしても不思議はない。しかし、今後はリスク情報の活用的重要性が高まるとともに、このようなデータの意義は極めて大きなものになるので、データの公表、収集にインセンティブが働くような仕組みを考えていくことが重要になるものと思われる。幸いにして、原子力分野を初めとしてあらゆる産業で維持規格³⁾の導入が進められつつある。維持規格では、検査時に検出される欠陥に対して評価をした上で、その後の判断を行うので、損傷の兆候データを収集するための環境は整いつつあるといえる。

4・2・2 動的機器と静的機器の区別 原子力分野の確率論的安全評価 (PSA) においては、評価のベースとなる損傷データはポンプのような動的機器の故障率データに類するものが中心である。故障に対応するデータをベースとする理由は、PSA で評価対象とするのが、炉心損傷頻度 (CDF) のような、重大事故に対応しているためと考えられる。しかし、配管のような静的機器に対してリスク評価を行う場合、上記のように兆候データをもとに評価することに意義がでてくる。静的機器の場合、動的機器の故障データとは、根本的に特性が異なるので、データベースの構築にあたってはそのことをよく理解しておくことが重要であろう。スウェーデン原子力庁の発行する SKi⁴⁾ レポートにまとめられている両者の違いを対比して表 1 に示す。

4・2・3 データフォーマットの整合性 データフォーマットは、本来、利用目的に照らし合わせて最適なデータ項目が記述されているべきである。これまで、我が国で開発されてきた損傷データベースは、その開発目的が必ずしもリスク評価への適用を意図したものではなかったために、データフォーマットもさまざまなものであったものと考えられる。例えば、SKi レポート⁴⁾ では、図 5 に示すような配管直径と、き裂発生下の条件付破損確率の関係が示されている。炭素鋼では、配管径とともに破損確率が上昇し、ステンレス鋼ではこの逆となる傾向を見て取ることができる。このことを見てもわかるように、損傷確率は材料に依存するのみならず、配管径にも依存し、

表 1 静的機器と動的機器の差異

特性	静的機器 (配管)	動的機器 (ポンプ)
対象の境界	不明確 (連続体であるが故に)	明確
損傷率の定義	1/(時間・基本量) 基本量の定義はあいまい	1/(時間 or デマンド)
破損頻度	まれ	頻繁
機能単位	材料、寸法、環境、作動流体	標準化が容易
破損モード	広範囲: SCC, 疲労, リーク	限定される

図 5 配管破損の条件付確率

その依存の傾向は材料によっても異なる。このことは、配管については損傷データベースの構築に当たって、配管径も重要なデータ項目であることを示す。しかし、このようなデータは、データベース構築時に意識して集めないと、故障記録などから読み取ることは、多くの労力を要するし、最も悪いケースでは記録が残っていないこともあろう。今後、産業界の壁を越えてデータベースを共有し、相互利用を図るためにはデータベースのフォーマットを整合化することが重要となろう。SKi レポートでは、設計時に決定されて後に、供用時には変更できないようなパラメータを属性 (attribute) データと呼び、供用時の内部流体や運転状況などのように個別のプラントの状況によって決まるパラメータを影響 (influence) データと呼ぶ。本来、属性データと影響データは分離して表現すべきで、データベースフォーマットを作成する際にもこのことを意識することが重要であろう。

4・2・4 統計確率モデルの構築の必要性 図 6 に、検査時に破損の兆候データが得られると仮定したときの、破損、つまり漏洩、もしくは破断の確率を評価するための 3 つの手順を示す。兆候の段階では、小さな欠陥が検出されるので、破損確率を評価するためには、破損に至る確率を求めることが必要になる。まず一つ目の手段として、実験データが得られればよいが、内圧を有する配管について、き裂部材の統計実験を行うことは、コストと労力から考えて現実的ではない。従って、何らかの統

図6 配管損確率評価のための統計的アプローチ

計的な評価により求める必要がある。統計モデルの代表的なものは確率論的破壊力学 (PFM) を用いる手法である。この方法は、破壊力学を用いて疲労き裂進展をコンピュータシミュレーションにより評価し、モンテカルロ法により破損確率を求めるものである。その際、荷重や材料特性のばらつきを考慮に入れる。代表的な PFM 解析コードとして、米国の国立研究所で開発された PRAISE コードがあり、配管系の解析を得意とする。国内でも、PASCAL⁵⁾のような PFM 解析コードが開発され、次第に利用可能となりつつある。しかし、このような PFM により破損確率を評価することは、各種パラメータの統計分布に関する情報に加えて、解析コードが必要となる。従って、破壊力学に関するある程度の専門知識と、計算負荷が必要になる。その意味で現場レベルでこの手段によって破損確率を評価することは、ある程度の困難が伴うことが予想される。この PFM 解析は、いわば詳細解析として位置づけ、これとは別に、ある程度精度は犠牲にするものの簡易に評価する手段も必要となろう。もちろん、予め PFM 解析との比較などによって精度の検討は行っておく必要がある。このような簡易統計モデルの考え方として、ベイズの定理を応用する方法がある。このように、兆候データをもとに損傷データベースを構築する場合には、リスク評価への応用も考えて、統計モデルを併せて構築しておくことが重要であると考えられる。

4・2・5 サンプルサイズ 損傷確率を求めるためには、対象となるサンプル全体の数を母数として、破損事象の件数を分子として評価する必要がある。検査データとして故障データのみしか記録していない場合には、分母の評価が困難となってしまう。つまり、破損確率評価へ応用することを意識した上で、必要となる情報を残しておかないと、有効にリスク評価に適用できないことになる。

今後、損傷確率評価への応用を意識した損傷データ収集が行われたとしても、急速にサンプル数が増えることは期待できない。このように、データ数の不足を補うためには既述のベイズの定理が活用されることが期待される。

4・2・6 データの公開方法 損傷の兆候データをパブリックデータベースとして共有できれば、リスク評価への適用が促進されるものと期待できる。その一方で、兆候段階のデータが公開されると、提供者に対する負の側面と見られてしまうのではないかと懸念が提供者側に生じてしまうのではないかと推察される。利用者に

は、十分にデータベースの適切な利用法を理解してもらう必要があることはいうまでもないが、その一方でデータベースの公開方法を明確しておく必要がある。そうでなければ、データ所有者は安心して損傷データを提供できないであろう。

4・3 人材育成

その一方で、国際的な競争激化の中で、企業にとっては裏方業務としての認識が支配的なメンテナンスにかかる費用は一定もしくは減少傾向にあり、設備が老朽化する中で、設備当たりの維持補修費用が上昇すると見込まれることから、より効率的な維持管理技術の適用が求められている。リスクベース工学は、事業者が主体となって評価、判断することを求めている。このためには人材育成が急務である。

4・3・1 保全分野における絶対的な人数の不足 産業界のニーズの一つは、保全分野にたずさわる絶対的な人数が減少していることである。これは「2007 年問題」に示されるように、保全分野においても、必要とされる人材は減少しており、あと 10 年もすれば、保守保全に必要な人材を確保できない恐れがある。

一方で、電力やガス、大型プラントなどの設備のメンテナンスにあたっては、このような人材不足とコスト削減を背景として、外注化が進んでおり、設備に対するノウハウや目的自体が分からず、メンテナンスに対する目的意識が欠如してしまっていることが指摘されている。

アウトソーシングの流れは、コスト的な面からも大きく変えることは難しいため、関連会社を含め、全体を効率的にマネジメントする能力が保全現場においては求められている。

4・3・2 技術伝承の困難さ このような絶対的な人材の不足は、一方で、技術の伝承を困難にしている。特にプラントや大型生産設備については、海外での建造が中心であり、保全を体験する現場自体が減少してしまっている。メンテナンスにおいては OJT による経験が重要であることを考えると、それを会得するための現場が減少することは、十分なメンテナンス能力を持った人材育成ができないことを意味する。

これに対応するために、多くの企業では社内で蓄積した知識やノウハウをデータベース化し、熟練者が蓄積していた情報を会社全体で共有化する動きを見ている。しかし、システム上でこれらの知識が共有化されていたとしても、技術者がその知識やノウハウを実際の現場で応用できなければ、単なる“情報”にすぎず、データベースは本当の意味で機能しているとは言えない。熟練技術者の知識やノウハウが、過去の失敗事例に基づいていることを考えると、経験する場が少なく、失敗も許されない若手技術者にとって、熟練技術者からの技術・技能伝承は比較的困難であると言える。

また年齢別の人員構成からの懸念もある。担当者の中で、親と子ほどの年齢差があると、コミュニケーションも十分に成立せず、単に情報の受け渡しが行われるだけに終わることが指摘されている。

4・3・3 規制への対応 強制的保安検査が縮小され、任意の定期自主検査が拡大する傾向にあつては、保全・メンテナンスも競争の時代に入ってきたと言える。優れた保全・メンテナンスを効率的に実施する企業が今後生き残ると考えられ、そのためには優れた保全・メンテナンス技術者の確保が必要不可欠となっている。

規制という観点から考えると、今後わが国での安全規制がリスクベースに進むにあたって、これまでの決定論的扱いよりは確率論的取り扱いが求められる。また規格や制度のグローバルスタンダード化に伴い、リスクマネジメントに対応できなければ国際競争力を失うという危惧がある。このことは、国際的な商取引にも影響を及ぼすことが懸念されている。プラントや大型生産構造物については、リスク的取り扱いのグローバルスタンダードに対応できる能力が必要になる。このようなことを実施するだけの人材確保が全く間に合っていない状況にある。

4・3・4 物理現象を幅広く捉える能力とそれを運用する能力の欠如 メンテナンスや保全といった分野では、専門性よりも、実際に生じた、もしくは生じている現象から、どのようなリスクが想定されるのか、幅広い視点から分析し、想像する能力が要求される。

4・4 安全文化の醸成

工学上の技術としてみたとき、リスクベース工学は、それほど特殊の技術を要求するわけでもなく、一見容易に実現できるようにも見える。それにもかかわらず、我が国ではなかなか定着しない、という現実がある。旧来型の決定論的規格に基づく規制方式にも捨てがたい良さがある。学識経験者により策定された規格は、国により策定され、事業者側はこの規格の遵守により、安全の確認できる。規制側としても、規格への適合により容易に監査が実現できる。ところが、このような管理方式は、事業者の実態と合わなくなったときに、不合理な管理方式を形式的に継続しなければならなくなる。また、最新技術が開発されれば、本来管理方式も迅速に合理化されるべきところ、なかなか柔軟に対応できない、などの問題を生ずる。欧米では、このような不合理を改善するこ

とこそが、真の安全に結びつくことであり、また結果として企業競争力にも結びつくことを理解しているからこそ、リスクベース工学が広く普及しているものと思われる。リスクベース工学は、既述の通りに、誰かが決めた方式に従っていればよいというのではなく、自らが評価し、判断して意思決定することが求められる。その意味では、事業者自身に高いレベルの評価能力が求められる。そして、その結果として起きることには自らが責任を持つことが前提である。一方、規制する側は、これまでのような白か黒かというような監査方式では対応できないので、規制する側も評価するための努力が求められることになろう。これは、単なる技術の導入、ということを超えて安全文化の考え方を、大きく変えるものであると考えられる。

参 考 文 献

- 1) S. Sakai, "Application of Bayesian Theorem to the Establishment of Probability of Failure Data for Equipments at Risk Based Inspection Planning -1- Principle of Bayesian Theorem", Journal of High Pressure Institute of Japan, Vol.42, No.5, pp.284-290 (2004).
- 2) S. Sakai, "Application of Bayesian Theorem to the Establishment of Probability of Failure Data for Equipments at Risk Based Inspection Planning -2- Application in Guidelines", Journal of High Pressure Institute of Japan, Vol.43, No.1, pp.22-27 (2005).
- 3) K. Kashima, "Outline of Nuclear Fitness for Service Standard", Maintenology, Vol.4, No.3, pp.11-16 (2005).
- 4) R. Nyman, D. Hegedus, B. Tomic and B. Lydell, Reliability of Piping System Components—Framework for Estimating Failure Parameters from Service Data, SKI Report 97 : 26, Stockholm, Sweden : Swedish Nuclear Power Inspectorate. (1997).
- 5) K. Shibata, K. Onizawa and Y. Li, "Development of Probabilistic Fracture Mechanics Code and its Manual", JAERI-DATA/Code2001-011 (2001).