共同研究

異形断面線を用いたコイルばね調査報告

Report on Coil Springs with Wires of Noncircular Cross Section

異形断面線を用いたコイルばねに関する調査委員会

Committee for Surveying The Coil Springs with Wires of Noncircular Cross Section

本報告は、自動車エンジン用弁ばねを中心に近年我が国で採用が急速に拡がりつつある異形断面線を用いたコイルばねについて、自動車メーカー9社、ばねメーカー13社、材料メーカー6社および2大学が協力してその現状と問題点を調査した結果ならびに今後協力して解決すべき課題について明らかにしたものであり、その内容は以下のように要約される。

異形断面線を用いたコイルばねの現状

1. 自動車エンジン用弁ばねを中心に数年前より実用化され、現在国内ばねメーカー数社による生産量は合計月産300万個以上に達している。
2. 用途は上記弁ばねのほか、クラッチばね、自動変速機用ばね等で、懸架用その他も検討されている。
3. 線の断面形状として卵形、楕円形およびそれらを修正した多数の実用断面形状が特許出願されており、それらの一部が量産ばねに採用されている。
4. 素線径、ばね指数、断面の長短径比などの実績は、ばねの用途別にある程度一定している。
5. 丸線ばねと比較して20~30%のコスト高となる。

解析・設計面からみた利点と問題点

1. 密着高さの低減など、省スペース設計に寄与。
2. 線の断面形状とコイルの有効巻数を変化させて最適化を行なうことにより、ばねの軽量化が可能。
3. 応力分布の一様性の観点より円形、楕円形、Fuchs 卵形の素線断面を比較すると、適当な長短径比の下では、楕円断面が有利となる。
4. 応力解析の方法としては、3次元ソリッド要素を用いた有限要素法、解析と有限要素法又は境界要素法を併用した解法、フーリエ展開境界値平均法などが確立されており、いずれも実用上十分な精度で解析できるが、実務的には簡易設計法の確立が望まれる。
5. 素線の倒れなどコイルの不完全性が応力分布におよぼす影響を解明する必要がある。

加工・評価面からみた問題点

1. コイル素線の倒れは応力分布に影響するため、倒れの正確かつ迅速に測定する方法の確立。
2. 異形線の引張り破断部断面積の測定法およびコイル素線の断面形状の正確かつ迅速な測定法の確立。
3. 異形線の表面疵の検出精度の向上。

This report refers to the development of the coil springs with wires of non circular cross section which has been applied more and more to the automotive engine valve springs and to the other springs of motor cars.

Investigation on the subject had been made by the cooperation of 9 automobile manufacturers, 13 spring makers and 6 spring wire makers in Japan from October 1988 to September 1989.

The report makes clear the recent development of the noncircular wire springs (N. C. W. S.) and the problems to be solved which are summarized as follows.

Development of N. C. W. S. in Japan:

1) The springs have been mass produced for automotive engine valve springs by some Japanese spring makers since about 1984.

The total production of N. C. W. S. in Japan is more than 3,000,000 springs per month in 1989.

2) The N. C. W. S. has been applied not only to the valve springs but also to the clutch

springs and the automatic transmission springs.

Now some new applications of N. C. W. S. including suspension springs of cars are tried.

3) More than 18 types of N. C. W. S. with wire sections of oval, elliptic, and their modifications have been applied for patent. Some of them have been applied to the mass production.

4) The investigation shows that the wire size, the spring indices and the aspect ratio of the wire cross sections are in some range respectively for practical uses.

5) The cost of N. C. W. S. in mass production is 20-30% higher than the one for circular wire springs.

Merits of N. C. W. S. in Designing and Problems to be solved:

1) Small solid height of N. C. W. S. makes possible the compact designing of automotive parts.

2) Mass reduction of the springs are possible by the optimum designing which varies both of the shape of wire cross section and the effective turns of coils.

3) The stress variation around the wire cross section is smallest for ellipse comparing with circle and Fuchs' oval section.

4) The stress of N. C. W. S. can be analyzed with sufficient accuracy by the FEM using solid elements or by the analytical methods with two dimensional FEM or BEM, or the Fourier expansion collocation method developed by Nagaya.

But the conventional designing formulae must be derived for the practical use.

5) The effect of the inclination of wire cross section on the stress distribution must be made clear.

Problems in Production and Inspection of N. C. W. S. :

1) The torsion of the wire of coils about its axis varies the stress distribution which is especially important for the N. C. W. S. Therefore the practical methods of measuring the torsion must be settled for each type of the sections.

2) A practical method must be established for measuring the area of the breaking section of the N. C. W. tensile specimen.

3) The detecting accuracy must be improved for the detection of the surface flaws of the non circular wires.

1. 調査委員会活動概括

1.1 緒言

近年、技術の高度化と共にばねの使用条件も苛酷化し、ばねに対する要求性能も広範囲にわたってきた。これ等の要求を満足させるため、最近弁ばね用に異形断面線ばねの実用化が拡大しつつある。ばね技術研究会では、早くよりこれにかかわる諸問題について企画幹事会で取り上げ、調査ないし協議する必要性について関係者の間で話題となっていたが、各社の特許、ノウハウ等の関係で、同一レベルでの論議は困難視されていた。

しかし、特許出願も多数公開されるなどその適用が急速に進みつつあり、線の規格や特性の評価法等が確立せぬ間に適用が進み過ぎ、混乱を招くおそれもあることから、企画標準幹事会の答申に基づき当調査委員会が設立され、各業界より28社(自動車メーカー9社、ばねメーカー13社、材料メーカー6社)と大学2校、計38名の参加を得て1988年10月より活動を開始した。その後、応力解析法の実態調査、簡易設計法の確立、評

価方法などの確立、標準化の可能性の検討等のため、平成元年から委員会内に解析設計グループ(19名)と加工評価グループ(17名)の二つのワーキンググループ(WG)を発足させ、活発な活動を展開した。

本報告は、当委員会における審議経過の概略ならびに1988年度事業として当委員会が実施した異形断面線ばねに関するアンケート調査結果、両ワーキンググループ報告およびまとめより成る。

1.2 調査委員会審議経過

1988年10月20日 第一回委員会を開催以降、6回に亘り審議した。

[第一回]調査委員会設立の経緯説明及び異形断面線ばねの用途、期待される効果、適用を困難にしている要因、形状・寸法の標準化について討議した。

[第二回]アンケート集計結果の報告を行い、ワーキンググループを設置することが提案され、解析設計グループと加工評価グループが発足した。

[第三、四回]各WGの活動状況が報告され、質疑、自由討議を行った。

異形断面線を用いたコイルばねに関する調査委員会委員 (W.G.区分)

	氏 名	勤 務 先
	委員長 久納孝彦	慶応義塾大学 理工学部
	副委員長 鈴木栄三	鈴木金属工業(株)
	副委員長 斎藤邦茂	日本発條(株) 精密ばね事業本部技術部
○ 解析設計	長屋幸助	群馬大学 工学部
○ "	宮村紀行	三菱自動車工業(株) 乗用車技術センター設計部
△ "	宮島和夫	いすゞ自動車(株) 小型エンジン設計第一部
"	赤羽弘道	ダイハツ工業(株) エンジン試験課
"	前川慶一	日産自動車(株) 機関設計部
"	萩原好敏	(株) 本田技術研究所 朝霞研究所
"	田中義道	マツダ(株) のりーん 設計部
"	杉田平次	(株) 杉田製線工場
"	岡 芳治	住友電気工業(株) 特殊線事業部
"	井上信彦	加藤発條(株) 設計部
"	吉田茂次	三興線材工業(株) 機能材料部
"	中西光明	(株) 東郷製作所管理部
"	猿楽幸雄	日本発條(株) ばね生産本部 設計部
"	牧野宏隆	ルンジョンスリング(株) 技術部
"	佐藤雅志	村田発條(株) 線ばね製造部
ワザ-ハ-	豊福博之	三興線材工業(株) 企画部
ワザ-ハ-	今泉敏幸	中央発條(株) 技術部
○ 加工評価	鶴井義孝	中央発條(株) 技術センター 技術部
○ "	寺下 勝	三興線材工業(株) 機能ばね課
"	柴谷享男	鈴木自動車工業(株) 4 輪伝動設計部
"	森田修二	トヨタ自動車(株) 第1エンジン 部
"	山本 明	日野自動車工業(株) 第3 研究部
"	坂 勉	(株) 本田技術研究所 栃木研究所
"	峰 公雄	川鉄鋼線工業(株) 研究開発室
"	芦田真三	(株) 神戸製鋼所 条鋼開発部
△ "	富永治朗	鈴木金属工業(株) 生産技術本部
"	池永昭夫	住友電気工業(株) 特殊線事業部
"	高橋憲一	南海泉州製線鋼索(株) 技術部
"	佐藤和夫	(株) スミハツ 設計部
"	山西俊朗	(株) 東郷製作所 生産技術課
"	安部裕二	特殊発條興業(株) 技術部
"	岩崎幸和	ニスコ(株) 技術課
"	杉浦晴雄	(株) 丸上製作所 設計課
"	梅沢信正	三菱製鋼(株) ばね技術部
"	清原 博	村田発條(株)
事務局	森田晃次	(社) 日本ばね工業会

○…ワーキンググループ リーダ

△…ワーキンググループ 幹事

[第五回] 中間報告内容の討議を行った。

[第六回] 報告内容の最終的な検討を行ったが、調査委員会の役目は略終了したと考えられ、今後に残された課題は研究委員会で行き組むこととし、その設立に備えることとした。

全体を通しての討議で確認された異形化の効果に関するコンセンサスは、密着高さの低減、重量減、耐疲労性向上、サージング軽減、外径縮小等であり、エンジン、クラッチ、懸架、ミッション等のばねに今後一層適用が拡がると予測している。一方、素線の倒れ、疵等品質保証上の懸念、コスト高などのマイナス要因に加えて、ばね設計時に線断面の長短径比等に規制がないと、寸法その他が非常に多様化することになり、線の供給面で問題が大きく、異形断面線ばねの需要拡大のためにも全体的なコンセンサスが必要、と多くの委員が感じているように伺えた。

線の断面形状は現在数種流通していて、各社の特許、独自性があり、標準化について議論不可能であることから、標準化はモデル断面について、長短径比、寸法区分迄の範囲で考える方向で検討が進められた。

解析設計グループは文献調査から始め、異形化が期待されるばね諸元の実績調査及び各社保有のソフトでの応力計算結果の比較等を行った。

加工評価グループは、異形線の特性評価方法と、製造実績についての調査及び倒れ等、ばねとしての生産管理レベル、疲労特性、ショット残留応力等の実態調査を行った。

1.3 アンケート調査項目と結果の整理、解析

1.3.1 アンケート調査項目

次の6項目とした。

1) 異形断面線ばねの用途とその重要度について

弁ばね、クラッチばね、ミッションばね、懸架ばね、その他。

2) 異形断面線ばねの適用により期待される効果について

重量、密着高さ、ばね外径、固有振動数、疲労、へたり、その他。

3) 異形断面線ばねの適用を困難にしていると思われる問題について

きず保証、ねじれ保証、形状保証、ばね設計指針、線製造コスト、ばね形状コスト、縦・横比を考慮した寸法・形状仕様の多様化、その他。

4) 異形断面線ばねは丸線ばねより製造コスト高が予想されるが、価格比の許容限度について

(ばねの用途：弁ばね、クラッチばね、ミッションばね、懸架ばね、その他毎に)

5) 異形断面線の形状・寸法の標準化について

6) 異形断面線の最適断面形状は、ばねの仕様や使用条件により異なると考えられる。これらの一般的な関

係について共同研究を行い、異形断面線ばね設計の際の基本的な考え方を明らかにしておくことについて

独自で可、共同研究が必要

1.3.2 アンケート回収状況

材料メーカー8件、ばねメーカー13件、自動車メーカー9件、大学1件、計31件の回答が得られた。質問に対する確かな回答がほとんどであり、又、充実した意見が数多く寄せられた。

図 1. 1 異形断面線ばねの適用用途

図 1. 2 異形断面線ばねの適用する理由

図 1. 3 異形断面線ばねの適用し難い理由

表 1. 1 異形断面線ばねの許容価格 (丸線比)

範囲	1.0 1.5	1.0 1.7	1.0 1.5	1.0 1.5	1.0 1.5	29 %
平均	1.25	1.33	1.24	1.21	1.11	
	弁 ば ね	ク ラ ッ チ	ミ ッ シ ョ ン	懸 架	総 合	未 回 答

図 1. 4 異形断面線の標準化の必要性

図 1. 5 異形断面線ばねの最適形状のための共同研究の必要性

1.3.3 アンケート集計結果要約

① 異形断面線ばねの用途とその重要度について

材料メーカーの未回答が半数4件と多いが、各業界の意見は一致していて弁ばね・クラッチばね・懸架ばね・ミッションばねの順である。ばねメーカーではプレスばね・タイミングベルト・兵器・弱電機器用のばねを挙げたものが僅かであるが見られた。

意見としては、設計上メリットがある場合に限りべきと明確に表明したものが1件あったが、メリットとしてD/d低減・コンパクト化・スペース縮小・密着高さ低減・高回転化・動的負荷容量の増大に寄与するため、その様な目的のばねに適用しようという考え方が伺われた。

② 異形断面線ばねの適用により期待される効果について

材料メーカーの25%2件が未回答であるが、各業界の意見は一致しており、密着高さ低減の評価が最も大きい。次いで重量減・耐疲労性向上・固有振動数・外径減少の順である。

意見でも、密着高さ低減化から重量減・外径減少・固有振動数増大・不等ピッチ可能・ストローク減少・スペース縮小に影響する等の意見が大勢を占め、コイル素線周上の応力分布の均一化による応力低減・疲労強度向上・回転数増大等の意見もあった。

ばねの内外径減少は新しいデメリットを生ずるとか、倒れ・座屈・偏芯荷重等のデメリットも検討すべきである等の慎重論も2、3見られた。

③ 異形断面線ばねの適用を困難にしていると思われる問題点について

各業界にて10%の未回答があった。総合的には線コスト増大・ねじれ保証・疵保証・ばねコスト増大・形状多様化・設計の順であるが、業界により次の特徴が見られた。

材料メーカーでは形状多様化の比重が高く、ばねコストのウェイトは低い。ばねメーカーではねじれ保証のウェイトが若干低く、自動車メーカーでは疵保証の比率が若干低い。

意見も業界により若干のニュアンスの違いが見られ、材料メーカーでは品質保証を丸線と同様にすることは困難、仕様の多様化のため標準化規制が必要としているが、ばねメーカーでは材料管理・コスト増大・ねじれ保証・疵保証を問題視しているものの、丸線並なら問題なしと云う意見が2件あった。自動車メーカーでは製造上の問題とコストアップを心配している向きもあるが、ねじれ保証・疵保証・ワイヤーでの疲労試験不可能等、保証又は評価方法がないことを挙げている。

④ 異形断面線ばねの丸線ばねとの比較において許容出来る価格比について

業界別の判断が非常に大きく分れ、材料メーカーは半数未回答であるが、価格比は1.5倍強と見、又、長短径比を考慮した整理が必要としている。ばねメーカーは30%未回答であり、1.2倍前後に推移し、機能向上メリットと製造コストの関係が大切であるとして(一部意見として10%を限度と予測)いるものの、ユーザー側から価格増大を抑えられることを予測して、許容コスト増大を悲観視した意見が3件もあった。

自動車メーカーでは適用効果の出る設計の場合には、かなりのコスト高も可と見る意見があるものの、コスト上昇の許容範囲を10%程度と見ている様であり、基本的にはコスト高を歓迎していない。

⑤ 異形断面線の形状・寸法の標準化について

材料メーカー25%、自動車メーカー10%は未回答であるが、各業界とも標準化不要とする回答は20~25%を占めた。

標準化不要の理由としては、設計の自由度減少・適用の制限・技術的進歩を制限・独自性に逆行等が挙げられている。一方それ等のことを考慮に入れても、寸法が無制限になることから来る小ロット生産によるコスト増大や納期遅延を回避するために標準化を進めるべきである、との意見が2/3と過半数を占めた。

⑥ 異形断面線ばねの最適断面形状の共同研究について

共同研究については未回答が16%で、独自研究で可が材料メーカーで1社あったが、大勢は何らかの理由で共同研究をやっても良いとしている。

委員会の進め方については、現状調査や文献の調査および解析からスタートすることの必要性を述べた意見の他に理論的な最適形状の追求、簡易計算法の確立、規格の統一化、材料評価法の確立などが望まれているが、概して全体のコンセンサスが得られることを前提としている様に感じられた。

2. 解析設計ワーキンググループ報告

2.1 活動内容

解析設計ワーキンググループの活動方針としては、

異形断面線ばねの解析設計の現状技術を調査・把握することを優先させ、ついでその結果から適当な解析手法を選択し、代表的断面形状でいくつか試算することにより、簡易設計法作成の可能性を検討することとした。

中間報告までの主たる活動内容は下記の通りであり、図2.1のフローチャートに沿い、計7回の活発なる活動を実施して、協力各社の同一モデルによる応力計算結果のばらつき検討としてまとめた。

- (1) 解析設計文献調査及び研究者による公表論文の解説と討論。
- (2) 未公開技術の参加と各社の協力度把握を目的とした、解析設計アンケート調査。
- (3) 断面形状検討の為に異形断面線ばねの特許出願状況調査。
- (4) 異形断面線ばね諸元の現状実績調査及び、今後異形化が要望される用途別ばね諸元の現状調査。
- (5) 上記調査に基づき決定した計算モデル・計算条件での協力各社ソフトによる応力計算結果のとりまとめとばらつき検討。

図2.1 解析設計ワーキンググループ活動フローチャート

2.2 文献調査

解析設計グループでは、異形断面線ばねに対する技術の現状を把握することが必要との観点から、まず文献調査を行なった^{11)~12)}。これまで行なわれた研究は、そのほとんどが末端の影響を無視した静的応力解析^{11)~8)}で、解析方法は有限要素法(FEM)、境界要素法(BEM)、差

分法(FDM)、フーリエ展開境界値平均法(FECM)と多岐にわたっている。一方ばね定数、固有振動数、サージング、動的応力等を求める異形断面線ばねの例は少なく、ただ一例が公表されているにすぎない⁹⁾。このことから、解析例も多く、かつ設計上の基本となるねじりとせん断のみによる静的応力解析例(末端無視)に調

表 2. 1 文献調査の概要

番号	著者・論文名・文献 No	論文紹介者	内容の概要および討論事項
1	神谷・豊福, 任意断面素材を用いたコイルばねの設計について	豊福 博之 (三興線材)	<p>本研究では円筒コイルばねの中心に一定静荷重を受ける場合のばね素線のねじりモーメントを応力の積分値として表わして、それより応力と外力の関係を素線の曲がりを導入して導いた。ついで応力関数を導入し、それを有限要素法 (FEM)、境界要素法 (BEM) および差分法 (FDM) の三つを使って数値計算し、それらの結果を比較した。その結果 FEM と BEM の結果が良く一致することが明かにされている。</p> <p>本研究では曲がりの影響をはじめから基礎方程式のなかに導入したことに特徴があるが、せん断力によるせん断応力成分が無視されているので、最大応力値は真の値より若干低目になると思われる。</p>
2	長屋, 任意形状断面を有する円筒コイルばねの応力解析 (第 1 報: フーリエ展開境界値平均法による解析解), 日本機械学会論文集, A 編 (1985), 2293-2302.	長屋 幸助 (群馬大)	<p>本研究では、ねじりとせん断を受ける真直棒の基礎方程式を用い、任意断面の境界処理にはフーリエ展開境界値平均法 (FECM) を用いている。真直棒については楕円断面について、厳密解との比較がなされており、誤差はほとんど認められない。一方棒の曲がりの影響について Wahl と同様の手法によって解析し、円の内側と外側の応力については Wahl の結果と比較し、良好な一致を示すことを明かにしている。</p>
3	佐藤・ほか 5 名, 任意断面を有する円筒コイルばねの応力解析 (第 2 報: 異形断面ばねの開発および実験), 日本機械学会論文集, A 編 (1985), 2303-2308.	佐藤 雅志 (村田発條)	<p>本研究は上記 (2) (4) の数値計算を行い、実験結果との比較検討を行なったものである。実験では測定誤差の影響を少なくするため、直径 11 mm の円形丸棒・卵形断面棒を用い、この 2 種類の真直棒について曲げ・せん断ねじりの実験を行い、数値計算と一致することを確認している。ついで素線径 11 mm、コイル中心径 100 mm の大型のコイルばねを製造し、上記と同様の実験を行っている。数値結果との比較では、丸線と断面の倒れの少ない卵形断面線の実験値と計算値は良く一致している。しかし断面の倒れの大きい卵形断面線の実験値と計算値に誤差が認められる。これは理論式を組み立てる仮ねじり中心に及ぼす倒れの影響が小さいと仮定されているためと思われる。</p>
4	大河内・今泉・市川, 円筒コイルばねの素線断面形状の最適化, ばね技術研究会, 昭和 63 年度秋期, 前刷集, (1988), 29-32 大河内・今泉・市川, 同上, 日本機械学会論文集, A 編 (1989), 55 巻 517 号, 2033-2041.	今泉 敏幸 (中央発條)	<p>本研究の解析方法は、せん断力による応力とねじりによる応力をそれぞれ足し合わせてせん断応力成分を作るが、断面外周上の境界条件を満たすため、場の方程式は有限要素法により解いている。しかし曲がりの影響に対する取扱には特徴があり、曲がりによるねじり中心の動量を直接応力式に代入して求めている。本方法はもともと解析の基礎を平面問題の有限要素法に置いているが、曲がりの影響を上記のような方法で導入することにより、ばねとしての応力問題の解析を可能にしている。本論文ではさらに最適な断面形状のばねを探索し、その結果を示している。</p>

番号	著者・論文名・文献 No	論文紹介者	内容の概要および討論事項
5	日本発条(株)異形断面コイルばねの解析・設計について	山本 秀夫 (日本発条)	本方法はばね一巻きの半分を一端を固定し、他端にせん断力とねじりモーメントを付加して、3次元ソリッド要素を用いた有限要素法で解析し、1/4周の位置での応力をばねの応力値として代用したものである。本研究は円弧の部分ソリッド要素で直線的に接続しながら作っていること、端末の影響が考えられること、わずかなねじり中心のずれが要素の分割次第でかなり変動し、正しく求められるのかどうかなどの問題点が一見認められるが、円形断面についてはWahlの結果とも一致しており、実用上の精度は得られている。また断面形状を種々変化した解析を実施しており、その結果をもとにして異形断面コイルばねの特性計算式を設定し、設計時に適用している。
6	K.Nagaya,"Stresses of a Helical Spring of Arbitrary Cross Section with Consideration of End Effects", Transaction of American Society of Mechanical Engrs. (Jour.Vib.Acoust Stress and Reli. in Design), Vol.109(1987), 289-301.	長屋 幸助 (群馬大)	上記の研究では、いずれもピッチ角の影響を無視したため、ばね圧縮時の端末の正しい影響は評価できない。とくに曲げモーメントの影響はまったく無視されている。本研究はピッチ角・曲げモーメントならびに端末の影響をすべて考慮した異形断面線の応力を求めたものである。解析では合力、合モーメントの計算に伝達マトリックス法を適用し、応力の計算法は文献(2) ⁽³⁾ と同様である。丸線の場合については、他著者の結果との比較検討がなされているが、異形断面線の場合については比較の資料が無いため精度の検討はなされていない。
7	M.Abe, ほか4名, Development of High Strength Valve Spring., SAE Paper, 890220(1989)	斉藤 邦茂 (日本発条)	本研究は丸線の高強度の弁ばね用のスプリングの開発を目的としたもので、異形断面線ばねとは直接関係は無いが、解析ではコイルの接触によるヘルツ圧を考慮しているところに特徴がある。弁ばね等の場合は一般に密着長が小さいので、コイルとの接触による応力問題も今後検討する必要がある。

査対象を絞り、いくつかの重要な論文について研究者からの説明を受け、討論を行なった。その内容を表2.1に示す。これらの方法を比較すると、文献(3)は弾性学による解を解析的に求めており、式の離散化を行っていないため、その面での精度は他の方法より優れている。しかし曲がりの影響はWahlの方法により導入されているが、この点での精度の検討が十分にされていない。一方文献(5)は離散化による数値解法の誤差は認められるが、曲がりの影響を直接応力関数に組み込んでいるので、その点での精度は他より良いと思われる。しかしいずれの解法も近似解法であり、厳密解との比較ができない現状では、どの方法がもっとも精度が良いかは一概には言えないように思われる。

2.3 解析設計アンケート調査

解析設計WGアンケートは、ばね関連メーカー14社に依頼した。アンケートの内容から、公開されている技術及び未公開の技術も含めて現状技術を把握するとともに、各社の協力がどの程度得られるのかを知り、本WG

で技術的調査が可能であるかを検討した。本アンケートにより次のような結果が得られた。

- 1) 検討されている異形断面としては楕円形及び卵形が半数以上である。
- 2) 端末の影響を無視した静的解析に関して6つ以上の解析プログラムが完成しており、解析精度は3-5%と考えられている。又、動的解析は実施されていない。これらの解析プログラムはほとんどが公表できないとしているが、今後要請が考えられる数値計算結果の提出については全社の協力が得られることが分かった。
- 3) 現在生産されている異形断面線ばねの長短径比は1.1-1.4の領域にあり、平均値は1.2である。以下にアンケート調査結果の全文を掲載する。

① 会社名

加藤発条, 神戸製鋼所, 三興線材工業, 村田発条, 三菱製鋼, 理研発条工業, 杉田製線, スミハツ, 川

鉄鋼線工業, 日本発条, 丸上製作所, 特殊発条工業, プレジジョンスプリング, 東郷製作所, 以上14社(順不同).

- ② 貴社ではこれまで異形断面線ばね(非円形断面のコイルばね)に対する解析設計を行ったことがありますか [棒グラフは上から a), b) …に対応(以下同)]

- a) ある(引きつづいて御回答下さい)
b) ない(以下の回答は必要ありません)

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

- ③ 解析設計の方法はどのようなものですか(複数回答可)

- a) 初等材料力学による方法
b) 有限要素法
c) 境界要素法
d) その他 差分法
e) フーリエ展開境界値平均法

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

- ④ 貴社の解析設計の範囲は以下のどれにあてはまりますか(複数回答可)

- a) 末端の影響を無視した静的解析
b) 末端を考慮した静的解析
c) 定常振動解析
d) 非定常振動解析
e) その他

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

- ⑤ 貴社で解析設計したコイルの断面形状は次のどれにあてはまりますか(複数回答可)

- a) 楕円形断面線ばね
b) 卵形断面線ばね
c) レモン形ばね
d) その他
e) 長方形
f) 正方形
g) 台形

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

- ⑥ 貴社で生産している異形断面線の長短径比の表と短径の表をできれば用途別にグラフ化して御提出下さい(作表には別表を御参照下さい)

- ⑦ 貴社で用いている解析設計の精度は, たとえば弁ばねに適用した場合, 静的な場合でどの程度とお考えですか

- a) 1%以下
b) 3%以下
c) 5%以下
d) 8%以下
e) 10%以下
f) 検討していないので解らない
g) その他

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

- ⑧ 貴社で用いている解析方法を公表している場合, またはこれから公表してもよい場合は次に御回答下さい

- a) すでに公表済である
b) これから公表する予定である
c) 解析設計分科会にだけは公表可
d) 公表できない
e) その他
f) 無記入

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

⑨ 解析設計プログラムの公表について

- a) 無条件で公表しても良い
b) 通常のソフトと同様に販売ルートに載せて公表しても良い
c) 条件付で公表しても良い
d) 公表できない
e) 無記入

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

⑩ 分科会では、現在開発されている解析法(解析プログラム)の精度を何等かの形状を限定して検討したいと考えております。分科会から依頼した場合、その形状について、貴社の方法による数値計算結果を御提出いただくことに協力していただけるでしょうか

- a) 協力しても良い
b) 協力できない

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

⑪ 将来のばね技術の発展を考えた場合、本分科会としてはどのような断面のばねを検討すべきとお考えですか

- a) 楕円形
b) 卵形
c) 生産面から見て作りやすい形状
d) 用途に合った断面形状
e) 無記入

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

⑫ 異形断面線ばねについての文献等を御存知でしたら、以下へ題目と文献名、巻、号、ページ数を御記入下さい 文献参照

⑬ 異形断面線ばねにかんする特許、実用新案等についてご存知でしたら以下へ記入下さい

表2.2参照

⑭ その他本分科会に関する御意見等を御記入下さい

- a) b/a と円形断面換算径の標準化をまずすすめてください
b) 各社の応力修正係数と b/a の関係を提示願い、その効用について整理し、理想断面の資料としてほしい
c) 合理的形状と設計式の作成を進めてほしい
d) 外国でどの様に検討されたか、文献を集めて調査したい

図2.2 弁用のばね

図2.3 クラッチディスク用のばね

図2.4 オートマチックトランスミッション用のばね

表 2. 2 異形断面線ばね特許出願状況

出願国	特/実	出願年度	出願番号	実例(略図)	内 容
日 本	特許	昭和25	13809	内側 外側	$a > b$ 断面厚さ方向寸法: 内外端ほど細い
米 国	"	34	814043	↑ ↑	断面内側…曲率半径 小 断面外側…曲率半径 大 例: 内側 楕円+外側 円
ソ 連	"	50	579473	↑ ↑	断面内側…曲率半径 小 断面外側…曲率半径 大 接線で結ぶ
日 本	"	54	138906		たる形コイルばね 断面形状: 長方形あるいは楕円
"	"	"	138907		たる形コイルばね 断面形状: コイル径最大部…円 端部…徐々に楕円か長方形
"	実案	"	116091	内側 外側	断面形状: 中空の楕円
"	"	"	119415		円すいコイルばね 断面形状: コイル径最大部…円 コイル径変化により矩形
"	特許	57	31928	内側 外側	たる形あるいは円すいコイルばね 断面内側…楕円 断面外側…円
"	"	58	64350	↑ ↑	断面内側…楕円 } をベースに 断面外側…円 } 外側に扁平部あり
"	"	"	77512	↑ ↑	断面内側…楕円 } をベースに 断面外側…円 } 横/縦 > 1.1
"	"	"	176404	↑ ↑	断面内側…曲率半径 大 断面形状…曲率半径 小 例: 半円+半楕円
"	"	"	225484	↑ ↑	断面内側…楕円 } をベースに 断面外側…円 } 大きな円弧で結ぶ
"	実案	59	3319	↑ ↑	引張ばね 断面内側…楕円 断面外側…円
"	特許	"	95089	↑ ↑	断面内側…3つ以上の複数個の円弧で接続 断面外側…円
"	"	"	95233	平面図	曲率小の円弧 } を滑らかに接した形状で巻回す 曲率大の円弧 } 断面形状: 卵形
"	特許	"	227576	内側 外側	断面内側…楕円 } をベースに 断面外側…円 } 外側円部を凹ます
"	"	60	5891	↑ ↑	断面形状: 楕円 縦/横の範囲を特定
"	"	"	5892	↑ ↑	断面内側…楕円 } をベースに 断面外側…円 } 縦/横の範囲を特定
"	"	"	156727	↑ ↑	断面形状: 楕円 短軸とコイル軸とが平行、あるいは所定角度傾斜

2.4 異形断面線ばね特許出願状況調査

異形断面線ばねの断面形状検討のため、1950年から1985年までの特許・実用新案を調査した。表2.2のとおり約20件に及ぶ出願があるが、フックス卵形(半円+半楕円)及び楕円をベースにしたものがほとんどである。

2.5 用途別丸線ばね諸元の現状調査

2.5.1 調査の目的及び内容

異形断面線の設計解析は、かなり複雑で広範囲にわたっている。将来実用式を導くには領域を限定する必要がある。現在使用されている各種丸線ばねの諸元を調査した。調査の内容としては、ばねメーカーよりばねの用途別に、次の3項目についてそれぞれ現在使用されている範囲及び使用頻度の高い範囲を提出してもらうこととした。

(1) 線径 (2) ばね指数 (3) ピッチ角

2.5.2 結果並びに考察

4社(村田発条、三興線材、東郷製作所、日本発条)から10種類のばね諸元の報告があった。その中で異形断面を比較的要望されているエンジン用弁ばね、クラッチトーションスプリング、クラッチプレッシャースプリング、プランジャースプリングについてまとめた。

その結果を表2.3および図2.5に示し、以下に説明を加える。表中()内数値は使用頻度の高いものを示す。

(1) 線径

いずれのばねも2.3~5.0mmの範囲で使用頻度が高く、特に3.0~4.0mmが最も使用頻度が高い。

(2) ばね指数

クラッチトーションスプリングについては3.0~5.0、エンジン用弁ばね、クラッチプレッシャースプリング、プランジャースプリングについては5.0~7.0の範囲で使用頻度が高く、6.5~7.0の間で最も使用頻度が高い。

(3) ピッチ角

クラッチトーションスプリングについては7.0~9.0°、エンジン用弁ばね、クラッチプレッシャースプリング、プランジャースプリングについては、5.7~6.8°の範囲で使用頻度が高く、6.0~6.3°の間で最も使用頻度が高い。

2.6 応力計算

前節までの調査を前提とし、代表的な形状・諸元のばねについて、各解析方法の比較を行った。

異形断面線ばねの応力計算に当たり、対象断面として表2.4に示すように円形、楕円、フックス卵形の3種類とした。

線径、コイル径(重心径)については前掲の用途別丸線ばね諸元の現状調査結果から弁ばねとして使用頻度の高い線径φ4、ばね指数6からコイル径をφ24とした。

表2.3 用途別ばね諸元

線径	単位(mm)			
	エンジン弁ばね	クラッチトーションSP	クラッチプレッシャーSP	プランジャーSP
A社	2.3 ~ 5.5 (4.5, 5.5)	1.4 ~ 8.0 (3.0, 4.0, 6.5, 8.0)	—	—
B社	2.6 ~ 4.7 (3.1~3.5)	0.6 ~ 7.5 (3.0~5.0)	0.9 ~ 7.0 (3.0~4.0)	1.4 ~ 4.0 (2.8~3.5)
C社	2.9 ~ 6.0 (3.0~5.0)	1.3 ~ 5.5 (2.3~5.0)	1.0 ~ 6.5 (2.3~5.5)	2.6 ~ 5.0
D社	(3.4~3.8)	(2.3~5.0)	—	—

ばね指数

ばね指数	単位(度)			
	エンジン弁ばね	クラッチトーションSP	クラッチプレッシャーSP	プランジャーSP
A社	5.8 ~ 8.6 (7.0~7.1)	3.0 ~ 7.9 (3.5~3.6)	—	—
B社	6.0 ~ 12.0 (6.0~7.0)	3.0 ~ 11.0 (3.5~4.0)	4.0 ~ 14.0 (5.0~7.0)	4.0 ~ 9.5 (6.0~7.0)
C社	4.4 ~ 8.8 (6.0~7.0)	2.9 ~ 11.3 (3.0~6.6)	4.3 ~ 8.6 (5.0~7.0)	6.4 ~ 7.7
D社	4.0 ~ 7.0 (5.5~6.5)	3.0 ~ 7.4 (3.0~5.0)	—	—

ピッチ角

ピッチ角	単位(度)			
	エンジン弁ばね	クラッチトーションSP	クラッチプレッシャーSP	プランジャーSP
A社	4.4 ~ 7.0 (6.1~6.2)	4.4 ~ 9.9 (7.2~7.4)	—	—
B社	5.5 ~ 9.5 (5.9~6.5)	8.5 ~ 12.7 (8.5~9.0)	5.2 ~ 7.2 (5.5~6.5)	5.0 ~ 8.1 (6.0~6.5)
C社	3.4 ~ 9.1 (5.1~7.4)	3.4 ~ 9.1 (7.0~9.1)	5.1 ~ 8.0 (5.7~6.8)	4.6 ~ 6.3
D社	5.5 ~ 7.0 (6.0~6.8)	6.5 ~ 8.5 (7.0~8.0)	—	—

() 内は、使用頻度の高いもの

□ 使用範囲
■ 使用頻度の高い領域

図2.5 用途別ばね諸元の比較

表 2. 4 応力計算用ばね諸元

断面形状	円形断面	楕円断面	フックス卵断面
断面寸法 (mm)	$d=4.0$	$b=4.382$ $a=3.652$	$b=4.382$ $a=3.652$
コイル重心径 D (mm)	24.0	←	←
荷重 P (kgf)	50.0	←	←
ピッチ角 α (rad)	0.0	←	←
縦弾性係数 E (kgf/mm ²)	21000.0	←	←
横弾性係数 G (kgf/mm ²)	8100.0	←	←

表 2. 5 各社の応力計算方法

項目	会社	A	B	C	D	E	F
解析方法		FEM	BEM	FEM	FEM	FEM	FECM
計算機	機種	CALMA社製	IBM9370	IBM550-VOB	(NDG) MV/4000	HITAC M260-D	PC-9801vm
	記憶容量	-----	16MB	8MB	4MB	1MB	0.64MB
	コンパイル時間	-----	-----	20 秒	-----	不要	不要
計算モデル	計算時間	10~15 分	5 分	1 分	8 秒	15 分 10秒	18 分
	要素	3次元アイソプラストリック (ANSYS)	-----	8節点四角形	三角形近似	8節点ソリッド (SAPIV)	-----
	節点数	891 (イ,ロ) 715 (ハ)	-----		83	1261	-----
	要素数	800 (イ,ロ) 640 (ハ)	-----	160	136	1008	-----
	備考		表面の node 54ヶ				断面外周 (半周) 50分割

イ：円形断面，ロ：楕円断面，ハ：フックス卵断面

楕円、フックス卵形の長径(b)、短径(a)については長短径比(b/a)が1.2で、かつ円形と等価断面積を有する表中に示す寸法とした。

荷重50kgfについては、円形断面線ばねとして60kgf/mm²程度の応力が発生するような値とした。

ピッチ角については、現状調査結果に示すように大部分のばねが10°以下であること及び各社ともピッチ角の影響を考慮していない応力計算ソフトであると思われるため、今回はピッチ角をゼロとした。

弾性係数については一般的に採用していると思われる値を選定した。

このような条件のもとに、ばねメーカー6社(加藤発条、三興線材工業、中央発条、東郷製作所、日本発条、村田発条)に各断面の応力計算を依頼した。

各社の解析手法、使用計算機、計算モデルを表2.5に示す。

解析手法は有限要素法(FEM)を使用しているところが多いが、一部の会社では境界要素法(BEM)、フリーエ展開境界値平均法(FECM)を使っている。計算機もパソコンから大型コンピュータまで多岐にわたっている。また、要素の種類、節点数、分割方法等

の計算モデルも会社によって異なる。

図2.6～図2.8に断面形状別に各社で計算した応力分布を示す。いずれの断面についても、その最大応力位置付近の6社間のバラツキは4～5%程度であり、解析手法が異なるにも拘らず各社の応力分布は比較的よく一致する。したがって、どの解析手法も設計上充分なものとする。

図 2. 6 円形断面の応力分布

図 2. 7 楕円断面の応力分布

図 2. 8 フックス卵形断面の応力分布

図 2. 9 応力分布 (6社の平均)

図2.6の円形断面の応力については、古くから一般的に使用されているワールの理論により、コイル内側と外側の応力を求めると 59.8 kgf/mm^2 及び 37.7 kgf/mm^2 となり今回の結果とよく一致する。

図2.7の楕円は弁ばねとしての使用実績はないが、図示したように最大応力も他の断面と比べて低く、最大応力の位置も 30° 付近にあり、有用な断面と思われる。

図2.8のフックス断面は比較的使用されている形状であるが、最大応力は円形とほぼ同等であり、コイル内側から $45^\circ \sim 80^\circ$ の範囲に位置している。

なお、文献(たとえば(3))によれば、これらの異形断面の応力分布は長短径比、ばね指数により変化するとされている。

図2.9に、これら3種類の断面について6社の平均を示し、応力分布を比較した。断面形状の違いによる応力分布の状態がより鮮明になる。

2.7 解析設計W・G・まとめ

異形断面線ばねの解析設計に関する調査研究を行ってきたが、これまでの調査結果をまとめると次のようである。

- (1) 解析・設計に関する文献はかなり公表されており、そのいくつかについての調査を行なった。その結果有限要素法(FEM)、境界要素法(BEM)、差分法(FDM)、フーリエ展開境界値平均法(FECM)などによるかなり厳密な解析がすでに行なわれており、実用上十分な精度で異形断面線ばねの応力解析ができることがわかった。
- (2) 解析設計に関する技術の現状に関するアンケート調査を行なった結果、端末の影響を無視した静的解析に関して6つ以上の解析プログラムが完成していることが判明した。またW・Gに対する数値計算の協力がこれらのプログラムを保有する企業から得られることがわかった。
- (3) 異形断面線ばねはすでに実用化されており、かなりの数の特許出願が公開されているが、フックス卵形および楕円をベースにしたものがほとんどであった。
- (4) アンケート調査ならびにばねの用途別諸元調査により素線径、ばね指数、断面の長短径比などをある程度用途別に分類できることがわかった。この結果は将来実用近似式を導くのに利用できるものと思われる。
- (5) 上記(1)の解析のばらつきを具体的に調査するため、円・楕円・フックス卵形断面ばねについて、使用頻度の高いばね諸元を抽出し、その応力計算を関係各社の協力を得て行なった。いずれの場合も、解析法の違いがあるにもかかわらず、その結果は非常に良く一致した。すなわち、本解析で用いられた計算ソフトはいずれも十分な精度を有し、かなりの水準に達しているといえる。また、ばらつきの原因は種々考えられるが、厳密解の公表されていない現状では、どの方法が正しいかを特定することは困難である。

これらの解析で楕円形断面線ばねは卵形断面線ばねに比べ、適当な長短径比の下では最大応力値が小さくなり、応力的に有利となることが判明した。

3. 加工・評価ワーキンググループ報告

3.1 活動内容

加工・評価ワーキンググループによる調査の目的は、異形断面線及び異形断面線を用いたコイルばねの加工上及び評価法上の問題点摘出である。

この目的に沿って1989年1月より計7回審議した結果を報告する。

- (1)市場に於て月産300万本以上の生産実績のある弁ばねを主として審議した。
- (2)異形断面形状については各社各様であり、なおかつ特許がらみのため、審議項目から除外した。
- (3)現在生産されている試作用ならびに量産用異形断面線の寸法一覧表を作成し、現状分析の一助とした。
- (4)加工上の問題点については、ばねコイルリング時の困

難さより、異形断面線の伸線加工の方が問題である。製造限界や難度を明確化した資料を作成した。

(5)品質評価・保証については線メーカー、ばねメーカーの現状での評価方法、保証方法をおのおのアンケート方式により調査した。

(6)製造コストについては審議項目となるのかどうかワーキンググループ内の意見統一が出来ていないが、線メーカーより異形断面線の長短径比と伸線加工時の使用ダイス枚数について言及された。

3.2 異形断面線の製造実態

3.2.1 製造工程及び製造管理項目

現在異形断面線を製造しているのは国内4社で、本調査委員会メンバーである3社の状況を総括して以下に述べる。

図3.1 オイルテンパー異形線の製造工程 異形線伸線 工程増

図3.2 伸線速度と長短径比の関係

図3.3 ダイスコストと長短径比の関係

表3.1 特性評価法の実態

特 性	検査箇所	測定数 (n)	検 査 方 法		
寸法	コイル両端	1or2	長径、短径をマイクロメーターにて測定		
形状	1or抜取		投影機拡大、標準図面と照合		
ねじれ	コイル両端	1or2	片端固定、分度器、角度計、エンコーダー等にて測定	中央固定、角度測定器にて両端のネジレ角度差測定	
疵	コイル両端	1or5	酸腐食法にて疵チェック		
	全長		中間丸線での渦流探傷	最終異形での貫通型渦流探傷 短径側疵保証深さ (丸×1.5)	最終異形での回型渦流探傷 短径側 S/N比 7→2~5に劣化
引張強さ試験	コイル両端	1	断面積は標準断面積		1 m重量から算出
			絞り算出の断面積は破断面の 短径×長径の平均で算出		
張り試験	コイル両端	1	長径を100d		丸線相当径を100d
捲付け試験	コイル両端	1	短径サイズに長径を捲付け	丸線相当径に短径を捲付け	長径又は短径に短径を捲付け
回転曲げ疲労試験			実施せず		

図3.1に代表的な製造工程を示すが、異形断面線と丸線の違いは、丸線伸線の後段加工部分が分割され、異形ダイスを通過させる伸線におきかえられることである。異形ダイスの枚数は異形度が大きくなる程増え、1～3枚であるのが現状である。異形断面線の伸線速度はダイス磨耗のため丸線に比べ30～50%と低くせざる

得ず、丸線伸線—異形伸線と連続すると全体的な能力低下となるため分割せざるを得ないケースが多い。

又異形線ダイスはダイス削孔加工が難しく、1ダイス当りの加工費が丸線の5倍であり異形度が大きくなる程ダイス費もアップする。以上の状況を図3.2、図3.3に示す。

図3.4 渦流探傷での検出力推定曲線

図3.5 寸法の実績例

3.2.2 異形断面線品質評価方法の実態

表3.1に品質項目別での検索箇所、測定数、検査法を示す。

寸法、形状については、長径、短径をマイクロメーターで実測しているが、全体の形状は定量的に捉え難く、投影機で拡大し標準図面と照合する感覚的な検査に頼らざるを得ない。

ねじれは1～2 m サンプルの片端、又は中央を固定して他端側のねじれを角度計等で測定しており、実用的精度は充分であろう。

大きな問題点として、疵の保証レベルの丸線に対し

での低下があげられる。両端の酸洗疵検査での検出能は何ら変わらないが、渦流探傷での全長疵保証については、プローブは円形であり、通過材は異形であるため、短径側ではコイルとの距離が大となり、感度低下がおこる。

図3.4に回転プローブ型探傷法における検出力推定の実験結果を示すが、丸線及び長径側のS/N比7に対して短径側は3.7である。具体的な検出可能疵の深さは明確にできないが、3～5割は丸線に比し劣ると思われる。(例えば丸線で0.06mm 疵の検出リゼクトを可とするならば、それが約0.08mmになる訳である。)

次に問題と考えられるのは、引張試験での断面積算出が困難であることであり、特に絞り部の断面積は長、短径の平均に頼らざるを得ない。若干の精度低下が予測されるが実際の強度レベルは余裕を持っているため、実用的なマイナス面はないと考えられる。

自径捲付試験による表面観察の場合、自径の決め方及び捲方向を短径側にするか長径側にするか、各社、各様である。

本質的な問題点ではないが、厳密に考えれば今後統一化が必要であろう。

3.2.3 異形断面線の品質レベルの実態

図3.5に寸法実績例を示すが、公差 $\pm 0.03\text{mm}$ に対し $\pm 0.02\text{mm}$ 以内に大体入っていて問題ない。長短径比1.2と小さい所では長径が小さ目、1.3と大きい所では短径が大き目と丸線サイドになる傾向が見られる。

ねじれの実績を図3.6に示す。ねじれ $20^\circ/\text{m}$ と大きなねじれの1例があるが、大体最大値 $11^\circ/\text{m}$ に入っている。平均的に $5^\circ/\text{m}$ のねじれがあるものと認識する必要がある。

図3.6 ねじれの実績例

図3.7 渦流探傷マーキングの実績例

図3.8 端面酢洗疵検査不良率の実績例

図3.9 引張試験検査の実績例

図3.7、3.8に表面疵検出の実績を示す。端末サンプルでの酸洗疵不良は丸線にくらべ増加する傾向が見られ、ダイスの焼付きによるすり疵の影響と考えられる。渦流探傷のマーキング部ではすり疵等の増加が考えられるにも拘らず検出疵は減少する傾向にあり、これは前述の如く検出能力の低下が影響していると想像される。

図3.9は引張試験の実績例であるが、異形断面線であるためにバラツキが大きくなるという傾向は全く認められない。

3.3 異形断面線ばね加工の実態

3.3.1 調査の目的と方法

異形断面線ばねの製造に関し、弁ばね等を製造しているメーカーは限定されているものの、現状では断面形状が各社すべて異なっているため正確に数字で比較評価する事は困難である事が当初から予想されたため、アンケート方式により概略の全体像を把握する事にした。

アンケート調査に際しては、異形断面線ばねに関し歴史が浅く、当事者でなければ判らない固有技術にか

かわる面が多い事から、実際の製造面での問題等に対しては、現在製造中のメーカーに限定して回答をお願いした。また調査の方法として、全社の基準を合わせる意味からも、弁ばねを中心に従来の丸線の弁ばねと比較して回答してもらう様にした。

3.3.2 アンケート調査の内容

- (1) 異形断面線ばねの用途・製造実績の現状
 - 1) ばねメーカー数
 - 2) 異形断面線ばねの用途
 - 3) 素線のサイズ範囲
 - 4) 素線の長短径比範囲
 - 5) 素線サイズの種類
- (2) 加工精度
 - 1) 指定高さ時荷重
 - 2) ばね定数
 - 3) コイル直径
 - 4) 外側面の傾き
 - 5) 自由高さ
 - 6) 密着長
 - 7) コイル素線のたおれ
- (3) 加工性
 - 1) 製造上留意している工程
 - 2) D/dの加工限界
- (4) 品質
 - 1) 従来と異なる品質項目
 - 2) コイル素線のたおれ検査法
- (5) 耐久性
 - 1) 疲労試験方法
 - 2) 疲労試験結果

3.3.3 アンケート回答結果の整理と解析

- (1) 異形断面線ばねの用途、製造実績の現状について

- 1) ばねメーカー数

今回のアンケート結果から、製造実績のある異形断面線ばねのメーカーは、現在5社であることが分かった。

- 2) 異形断面線ばねの用途

異形断面線ばねの用途としてエンジン弁ばね、クラッチ、ミッション用としていずれも自動車に用いられている。各々のばねメーカー数は、弁ばね5社、クラッチ用ばね3社、ミッション用ばね2社である。現在のところ弁ばね、クラッチ、ミッション以外への使用実績はないが、将来的には用途、メーカー数とも増加するものと思われる。

図3.10 各社弁ばね用素線のサイズ (mm)

図3.11 各社のクラッチ用ばね素線のサイズ (mm)

図3.12 各社のミッション用ばね素線のサイズ (mm)

- 3) 素線の寸法範囲

弁ばね用素線は長径サイズで約2 mm～6 mm、クラッチ用ばね素線では約1 mm～7 mm、ミッション用ばね素線では約1 mm～5 mmが使用されている。図3.10～図3.12に各用途別に素線サイズの実績をプロットして示す。

- 4) 素線の長短径比

素線の長短径比は、弁ばねでは1.05～1.4、クラッチ用ばねでは1.1～1.4、ミッション用ばねでは1.15～1.4の範囲にある。表3.2を見てわかるとうり、各社とも長短径比をある程度標準化して設定しているが、長短径比は断面形状あるいはD/dにより選択される場合があるので、全体としてはかなりばらついた分布となっている。

- 5) 素線の寸法の種類

アンケート調査の結果、各社共、弁ばね、クラッチ用ばね、ミッション用ばね共、量産品はせいぜい10種類程度以下であるが、試作品は30種類を越えている。断面形状を標準化しているメーカーは5社中4社、その都度設計しているメーカーが1社となっているが、メーカー間で全て断面が異なっている事から、業界全

体では素線の種類は相当数に上るものと推定出来る。

A B C D E はばねメーカー各社、比は長短径比、丸

6) 各社の標準化状況を表3.2に示す。

換は等価丸線換算を示す。

表3.2 各社の素線寸法標準化状況

(mm)

A				B				C				D				E			
長径	短径	比	丸換	長径	短径	比	丸換	長径	短径	比	丸換	長径	短径	比	丸換	長径	短径	比	丸換
3.00	2.19	1.37	2.56	3.30	3.02	1.09	3.16	2.50	2.08	1.20	2.24	3.50	3.043	1.15	3.26	1.88	1.50	1.25	1.70
3.03	2.40	1.26	2.70	3.54	2.96	1.20	3.24	2.60	2.17	1.20	2.34	3.71	2.970	1.25	3.32	1.94	1.55	1.25	1.75
3.33	2.88	1.16	3.10	3.70	3.17	1.17	3.42	2.70	2.25	1.20	2.43	4.43	3.540	1.25	3.96	2.00	1.60	1.25	1.81
3.40	3.07	1.11	3.23	3.77	3.34	1.13	3.55	2.80	2.33	1.20	2.51					2.06	1.65	1.25	1.87
3.55	2.83	1.25	3.20	3.87	3.47	1.12	3.66	2.90	2.42	1.20	2.60					2.13	1.70	1.25	1.92
3.55	3.06	1.16	3.30	3.93	3.42	1.15	3.67	3.00	2.50	1.20	2.69					2.19	1.75	1.25	1.98
3.60	2.87	1.25	3.25	4.26	3.56	1.20	3.89	3.10	2.58	1.20	2.78					2.25	1.80	1.25	2.04
3.60	2.99	1.20	3.30	4.30	3.50	1.23	3.88	3.20	2.67	1.20	2.87					2.31	1.85	1.25	2.09
3.65	2.92	1.25	3.30	4.30	3.53	1.22	3.94	3.30	2.75	1.20	2.96					2.38	1.90	1.25	2.15
3.66	3.15	1.16	3.40	4.40	3.62	1.22	3.99	3.40	2.83	1.20	3.05					2.44	1.95	1.25	2.21
3.71	3.20	1.16	3.45	4.40	4.01	1.10	4.20	3.50	2.92	1.20	3.14					2.50	2.00	1.25	2.26
3.77	3.12	1.21	3.45	4.46	3.85	1.16	4.14	3.60	3.00	1.20	3.23					2.56	2.05	1.25	2.32
3.80	3.10	1.23	3.40	4.50	3.68	1.22	4.07	3.70	3.08	1.20	3.32					2.63	2.10	1.25	2.38
3.88	3.10	1.25	3.50	4.50	3.74	1.20	4.10	3.80	3.17	1.20	3.41					2.69	2.15	1.25	2.43
3.88	3.21	1.21	3.55	4.50	3.81	1.18	4.14	3.90	3.25	1.20	3.50					2.75	2.20	1.25	2.49
3.93	3.14	1.25	3.55	4.52	3.68	1.23	4.12	4.00	3.33	1.20	3.59					2.81	2.25	1.25	2.55
3.95	3.10	1.27	3.50	4.64	3.89	1.19	4.25	4.10	3.42	1.20	3.68					2.88	2.30	1.25	2.60
4.03	3.30	1.22	3.65	4.70	3.88	1.21	4.27	4.20	3.50	1.20	3.77					2.94	2.35	1.25	2.66
4.11	3.28	1.25	3.70	4.70	4.33	1.09	4.51	4.30	3.58	1.20	3.86					3.00	2.40	1.25	2.72
4.21	3.36	1.25	3.80	4.77	4.07	1.17	4.45	4.40	3.67	1.20	3.95					3.06	2.45	1.25	2.77
4.24	3.32	1.28	3.80	4.95	4.11	1.20	4.51	4.50	3.75	1.20	4.04					3.13	2.50	1.25	2.83
4.32	3.45	1.25	3.90	5.07	4.21	1.20	4.62	4.60	3.83	1.20	4.13					3.19	2.55	1.25	2.89
4.36	3.74	1.17	4.00	5.10	4.11	1.24	4.58	4.70	3.92	1.20	4.22					3.25	2.60	1.25	2.94
4.43	3.54	1.25	4.00	5.15	4.28	1.20	4.69	4.80	4.00	1.20	4.31					3.31	2.65	1.25	3.00
4.45	3.98	1.12	4.14	5.30	4.61	1.15	4.94	4.90	4.08	1.20	4.40					3.38	2.70	1.25	3.06
4.50	3.73	1.21	4.10	5.40	4.53	1.19	4.95	5.00	4.17	1.20	4.49					3.44	2.75	1.25	3.11
4.52	3.54	1.28	4.05													3.50	2.80	1.25	3.17
4.54	3.63	1.25	4.10													3.56	2.85	1.25	3.23
4.60	3.67	1.25	4.15													3.63	2.90	1.25	3.28
4.65	3.95	1.18	4.15													3.69	2.95	1.25	3.34
4.66	3.72	1.25	4.20													3.75	3.00	1.25	3.40
4.71	3.76	1.25	4.25													3.88	3.10	1.25	3.51
4.75	4.07	1.17	4.42													4.00	3.20	1.25	3.62
4.76	3.94	1.21	4.35													4.13	3.30	1.25	3.74
4.77	3.80	1.26	4.30													4.25	3.40	1.25	3.85
4.77	3.91	1.22	4.30													4.38	3.50	1.25	3.96
4.88	3.89	1.25	4.40													4.50	3.60	1.25	4.08
4.90	4.05	1.21	4.45													4.63	3.70	1.25	4.19
4.95	4.10	1.21	4.50													4.75	3.80	1.25	4.30
4.99	3.98	1.25	4.50													4.88	3.90	1.25	4.42
5.04	4.17	1.21	4.60													5.00	4.00	1.25	4.53
5.10	4.07	1.25	4.60													5.63	4.50	1.25	5.10
5.40	4.53	1.19	5.00													6.25	5.00	1.25	5.68
5.48	4.53	1.21	5.00													6.88	5.50	1.25	6.23
6.05	5.15	1.17	5.70													7.50	6.00	1.25	6.79
6.10	5.08	1.20	5.54													8.13	6.50	1.25	7.36
																8.75	7.00	1.25	7.93

A B C D E はばねメーカー各社、比は長短径比、丸換は等価丸線換算を示す。

(2) 異形断面線ばねの加工精度について

1) 製品の公差

図3.13に各々のメーカーで弁ばねを例に、異形断面線ばねの製品公差を自社の丸線ばねの公差と比較して調査した結果を示す。調査した6項目について、全て各メーカー共自社の従来の丸線での弁ばねと同水準の公差を設定している事が分かる。

2) コイル素線のたおれ

各社共10°以内であり、うち1社は5°以内との回答を得た。コイルングの際、ピッチ角に応じて素線がねじられるため、素線のたおれは異形断面線ばねが従来の丸線ばねと最も異なる点の1つであり、どの程度に抑える事が出来るかがポイントである。

(3) 異形断面線ばねの加工性について

1) 製造上留意している工程

異形断面線ばねの製造にあたり、丸線ばねと比較して種々の困難さを伴う事は容易に想像し得る。図3.14に各社に於いてどのような加工上の問題に留意しているかのアンケートに対する回答結果を示す。

第1位は、5社中5社共コイルングを挙げているように、素線のたおれを抑えながらコイルングする事。また、そのためのツール設計、コイルング時の出来ばえの管理等が問題点となっている。このことは、たおれの影響は自由長、密着長、ピッチ、荷重等各部におよぶので、異形断面線ばね製造の急所である事を示している。

第2位は、4社回答の素材検査。丸線と異なり、ねじれの程度が大きくなるとコイルングに悪影響が出る。

図 3.13 弁ばね公差比較

表 3.3 ショットピーニング後の残留応力比較

	測定位置	表面からの深さ (mm)				
		0	0.05	0.10	0.15	0.20
A社	内径側 応力比	1.00	0.96	1.03	0.78	0.88
	ピッチ間 応力比	1.00	1.00	0.92	0.90	1.00
B社	応力最大位置 応力比	1.00	1.01	0.96	1.00	1.00

注1) 応力比 = 異形断面の応力 / 丸線の応力

A社: $3.70 \times 2.85 / \phi 3.3 \text{ mm}$, B社: $3.77 \times 3.12 / \phi 3.45 \text{ mm}$

2) 測定: X線応力測定装置

3) 材質: SWOSC-V

図 3.14 各社ばね製造時の留意点に対するアンケート複数回答結果

図 3.15 各社に対するアンケート複数回答結果

ショットピーニングについては素線内側へのショットの当たり方が異なり、残留応力への影響が考えられる。しかし、従来の丸線でも巻き数、ピッチ等により変化するため、それに応じてショットピーニングの管理をしている。表3.3に残留応力を丸線と比較実測した例を示す。

研削工程については素線のたおれの影響により、自由長、密着長のバラツキが大きくなった分をカバーするためと推定される。

2) 加工限界 D/d

異形断面線ばねにとって D/d (D は内外径の平均値, d は長径) は断面の設計上重要な意味を持つので、加工限界の D/d を調査した。限界となると丸線でも定説がないのが実情であり、結局実績値を聞くにとどまったが、各社共 3 ~ 4 の間で実績があり、この程度であれば弁ばね等の設計には何等问题ないと言える。

(4) 異形断面線ばねの品質について

1) 従来の丸線ばねと異なる品質項目

図3.15にアンケート結果を示す。

トップはコイル素線のたおれで全 5 社共挙げており、その他、自由長、密着長、キズ、残留応力、ピッチ等について 1 ~ 2 社より回答があった。3.2.項の加工精度と合わせ考察すると、部分的に工程能力が低下する場合、他の工程で補う事により、製品全体での品質保証を図っているものと思われる。

2) コイル素線のたおれ検査法

異形線ばねの品質上のポイントであるコイル素線のたおれ検査法について調査した。その結果、樹脂等に埋め込み、カット断面を検査する破壊検査法と、コー

図 3.16 各社の異形線ばね疲労試験結果

ントレーサー、投影機によりコイル外側の素線外縁部の輪郭から計測する非破壊検査法と各々2社ずつの回答があった。また1社は、たおれそのものの測定はしないかわりに、密着長の検査で代用可能との回答もあった。

(5) 異形断面線ばねの耐久性

異形断面線ばねの耐久性を調査するための疲労試験方法について調査したところ、従来の丸線ばねと同様の方法、すなわち星型疲労試験機、エンジンヘッド部分を使用したモーターリング試験等を行っている事が分かった。また丸線の場合、介在物の影響や表面処理効果等の調査に時有効である回転曲げ試験は、異形線には適用出来そうにないとの意見も得た。各社の異形線ばねの疲労試験結果を図3.16に示す。

図3.17 疲労試験結果 (文献3.1)

図3.18 疲労試験結果 (文献3.2)

応力値は計算上のピーク値によりプロットしてあり、介在物折損はなかった。従来の丸線ばねと耐久性を比較するため、参考文献^{14)~15)}中の結果を図3.17、図3.18に示す。図3.17は従来工程、図3.18は従来法が対象となるが、両者と図3.16を比較してみて、耐久性に違いはないものと思われる。

3.3.4 加工評価 WG のまとめと今後の課題

(1) コイル素線のたおれ

コイル素線のたおれは、応力ピーク値、ピーク位置等に影響を及ぼすため、今後たおれ角度の影響を高精度に求める事が必要と思われる。コイル素線のたおれの測定方法は、一部の会社を除き破壊試験で測定しているが、よりスピーディでかつ信頼性のある測定方法の開発が必要と思われる。

(2) 断面形状の測定

現在、製造中の異形断面線ばねの断面形状は各社まちまちであり、形状測定法も統一されていない。このため、例えば引張試験の際、破断部の断面積の算出をどうするか未解決の問題である。

(3) 疵の保証精度

素線の表面疵を保証するための渦流探傷において、プローブと素線のクリアランスが一定でないため、クリアランスの広い箇所を検出力が相対的に低下する。特に回転型で問題になるものと思われる。

4. まとめ

弁ばねを主体とした異形断面線ばねの現状はほぼ明らかになった。個別のばねについては顧客のそれぞれのニーズにあわせて各社各様に対処しているのが実態であり、技術目標が一義的に定まらず、解析設計面、加工評価面それぞれに課題をかかえていることも判明した。要約すると次のようになる。

4.1 解析設計面

- (1) 各社の解析手段は異なっているが、実用上十分な精度で応力解析されている。
- (2) 楕円断面の方が、円形断面、およびフックス卵形断面より応力的に有利な場合が存在するとの知見が得られた。
- (3) 日常の設計に用いている現場的な簡易設計法については、各社がどのように実施しているか解明されていない。

4.2 加工評価面

- (1) 流通している断面形状は各社各様であるが、ばね素線のねじれ、およびばねの倒れなど、重要管理項目については何らかの方法で計測・管理されている。
- (2) 素線表面の疵保証のため渦流探傷が実施されているが、円形断面にくらべ検出精度がやや低い。

4.3 今後の課題

以上の調査結果により、下記課題についてなお検討する必要があるものと思われる。これらの検討は研究委員会等で早急に研究活動を行なうのが適当と考えられる。

- (1) 楕円断面線ばねとフックス卵形断面線ばねの応力面からみた優劣の詳細な比較検討と実用的なばね断面の選定。

- (2) (1)で選定された断面のばねの応力を求める実用近似式の作成。
- (3) ばねのピッチ角, 端末, 素線の倒れおよび動的な影響の検討と, 端末の影響を無視した静的応力解析結果の適用限界の検討。
- (4) 標準化へ向けての具体的な検討。
- (5) ばねの素線の倒れは, 一部の企業を除き破壊試験で測定されているが, よりスピーディ, かつ信頼性のある測定方法の検討。
- (6) 断面形状測定法の統一化, 引張試験の時の破断部断面積の算出法の検討。
- (7) 素線の表面疵を保証するための渦流探傷検出精度の検討。特に回転型の場合, クリアランスの影響の改善。

5. 謝 辞

貴重なお意見, および調査資料の提供にご協力をいただきました各委員, ならびに関係各位に深く謝意を表します。本調査結果がばね技術発展の一助になることを祈念するものであります。

引 用 文 献

- 1) Nicholas P. Chironis, "Ovate Cross Sections Make Better Coil Spring", Product Engineering, January 27(1969), 86.
- 2) 今泉, 卵形断面コイルばねの特性についての一考察, ばね技術研究会1984年度春季講演会前刷(1984.6), 13-15.
- 3) 長屋, 任意形状断面を有する円筒コイルばねの応力解析(第1報: フーリエ展開境界値平均法による解析解), 日本機械学会論文集, A編, 51-470(1985), 2293-2302.
- 4) 佐藤, 任意形状断面を有する円筒コイルばねの応力解析(第2報異形断面はの開発および実験), 日本機械学会論文集, A編, 51-470(1985), 2303-2308.
- 5) 神谷・豊福, 任意形状断面素材を用いたコイルばねの設計について, ばね技術研究会1985年度秋季講演会前刷(1985), 25-28.
- 6) 長屋, 任意形状断面を有する円筒コイルばねの応力解析(第3報: 端末の影響を考慮した平行圧縮ばねの場合), 日本機械学会論文集, A編, 52-473(1986), 240-248.
- 7) K. Nagaya, "Stresses in a Helical Spring of Arbitrary Cross Section with Consideration of End Effects", Trans. ASME, J. Vib. Acoust. Stress and Reliability in Design, Vol. 109 (1987), pp.289-301.
- 8) 大河内・今泉・市川, 円筒コイルばねの素線断面形状の最適化, ばね技術研究会1985年度秋季講演会前刷(1988), 29-32.
- 大河内・今泉・市川, 同上, 日本機械学会論文集, A編, 55-517(1989), 2033-2041.
- 9) K. Nagaya, "Dynamic Stress Analysis of a Coil Spring of Arbitrary Cross-Section to General Transient Excitations, Journal of Sound and Vibration, Vol. 128-2(1989), 307-319.
- 10) M. Abe, T. Taniguchi, K. Saitoh, N. Takamura "Development of High Strength Valve Spring, SAE Paper No. 890220(1989).
- 11) 宮村, 長野, 油圧式ラッシュアジャスタについて, 自動車技術, 38-9(1984), 1110-1116.
- 12) Miyamura, and S. Nagano, "Hydraulic Lash Adjuster", JSAE Review(1985-12), 28-35.
- 13) 山本秀夫, 社内資料 [1989] 日本発条㈱
- 14) 俊野, 重野, 高木, 多段ショットピーニングによる疲れ強さの向上, ばね論文集, 第32号 p.31 (1987)
- 15) 柴田, 山本, 橋本, 1988年度ばね技術研究会春季講演会前刷集, p.11