

# 省エネルギータイプ三相共心形電力ケーブルの諸特性

## Properties of Energy Economizing Type Three-Phase Co-axial Power Cables

低圧配電系統は超高層ビル用幹線などの例<sup>1)</sup>を除けば、従来からCVケーブルや電線管を用いたIV電線配線が主流で、過去にあまり大きな変革はみられない。

しかし、最近の世界的な省エネルギー、省資源指向は電線路についても例外ではなく、送電効率の改善による経済性を目的とした新しい電力ケーブルの要求が強まっている。

CX-VVケーブルは、三相導体を幾何学的に中心を一致させた特異構造により、インピーダンスを非常に小さく抑えることで、送電効率を大幅に改善するなど広い意味での省エネルギー形ケーブルといえる。

本ケーブルは既にコンピュータ用高周波定電圧定周波電源装置用給電線、低力率負荷となる溶接機用電線や、誘導電動機用給電線として使用され需要が増加している。本稿では、本ケーブルの特徴及び応用例について述べる。

榎並俊一\* *Toshikazu Enami*

河野広実\* *Hiromi Kōno*

杉山耕一\*\* *Kōichi Sugiyama*

### 1 緒言

1973年の第一次石油ショック以来、世界的に省エネルギー、省資源の気運が高まり最近の石油情勢のなかでますます切迫した問題となり、'80年代の重要課題となっている。

産業界の直接のエネルギー源はいうまでもなく電力であり、電気を動力源とした機器については個々に省エネルギー検討が進められているが、これらの機器に電力を送る電路についても、いかに効率よく電気を供給するかが課題である。

配電分野で大きな比重を占める低圧配電の分野をみると、ビルの大形化、大形コンピュータの導入、その他の防災システムの拡大などによって供給電力が大容量化し、これに使用するケーブルも大サイズ化の傾向が強い。

この結果、表皮効果などの関係から導体断面積比の通電効率の低下や電圧降下の問題が生じ、送電効率を悪くしたり損失が増加する傾向が強まっている。

CX-VVケーブル(三相共心形ケーブル)は、これらの三相低圧配電分野での電力供給の効率向上をねらって1974年に開発したもので、既に各分野で実用に供されている。

### 2 省エネルギー、省資源の考え方

#### 2.1 低圧電力幹線における省エネルギー、省資源

低圧配電の分野では、従来、容量が小さいこともあって電力損失などについてはあまり論じられていない。

しかし最近、負荷設備の大形化に伴う供給電力の大容量化がみられ、また事務合理化などの目的から盛んに導入されている電子計算機では、機種によっては400Hz級の高周波が用いられるなどの多様化が目立っている。これらの使用条件に対応した給電効率向上の検討が必要である。

一般に、低圧配電は高圧配電に比べて変圧機器などの付帯設備が安価で、保守点検が容易であるなどの利点がある。しかし、その反面電流容量が増加する傾向となり、誘導電動機や溶接機負荷のように、低力率の系統では無効電力を補うために電流増加の傾向はいっそう強まり、電圧降下の問題が生じている。

この結果、力率改善策を採るか、又は線路抵抗を下げるた

めに導体サイズを大きくする対策を採らざるを得ない。前者は設備費の増加を伴い、後者は必要以上の大サイズケーブルを使用することで、導体単位断面積当たりの効率の低下を招く。

一方、いわゆる電力損失はジュール損によるものであり、導体抵抗に比例して増大することは周知のとおりである。

以上を集約すると、省エネルギー対策としては電力損失を小さく抑えることが第一であり、そのためには各種条件下での抵抗の増加を低くする必要がある。また省資源の観点からは、電圧降下制限などの使用条件に対し最小限サイズのケーブルを選定する必要がある。すなわち、両方に共通していることは、ケーブルのインピーダンスを小さくすることである。

#### 2.2 導体構造の基本的な考え方

インピーダンスは導体抵抗とインダクタンスで構成される。まず、導体抵抗について考えると、ケーブルの大サイズ化や前述のような高周波の用途では、導体の表皮効果による交流導体抵抗の増加が問題となる。これを小さく抑えるためには、導体を円筒形にすることが極めて有効であることは以前から知られていた。図1<sup>2)</sup>に円形導体と円筒形導体の表皮効果による抵抗増加の比率を示す。また、同一断面積(同一直流抵抗)でも形状によって、例えば、薄肉大円筒ほど表皮効果の影響が小さいことが分かる。

次に、インダクタンスは導体の形状や配置によって決まり、相間距離が短いほど小さくなる。すなわち、三相導体の幾何学的な中心が一致した状態、つまり相間距離が零の状態が最もインダクタンスが小さくなる。以上の考え方をまとめるとインピーダンスを小さくするためには、導体を円筒形とし、かつその幾何学的中心を一致させた構造が最も効果的であることが分かる。このように、導体配置を同軸状にしたものは単相給電用として鉄道き電ケーブルで実績があるが、CX-VVケーブルは、より応用分野の広い三相給電に活用するため、前述の理論に基づいて三相構造のケーブル、及びその端末処理方式(本稿では割愛する。)について検討し、実用化したものである。

\* 日立電線株式会社日高工場 \*\* 日立電線株式会社電線研究所

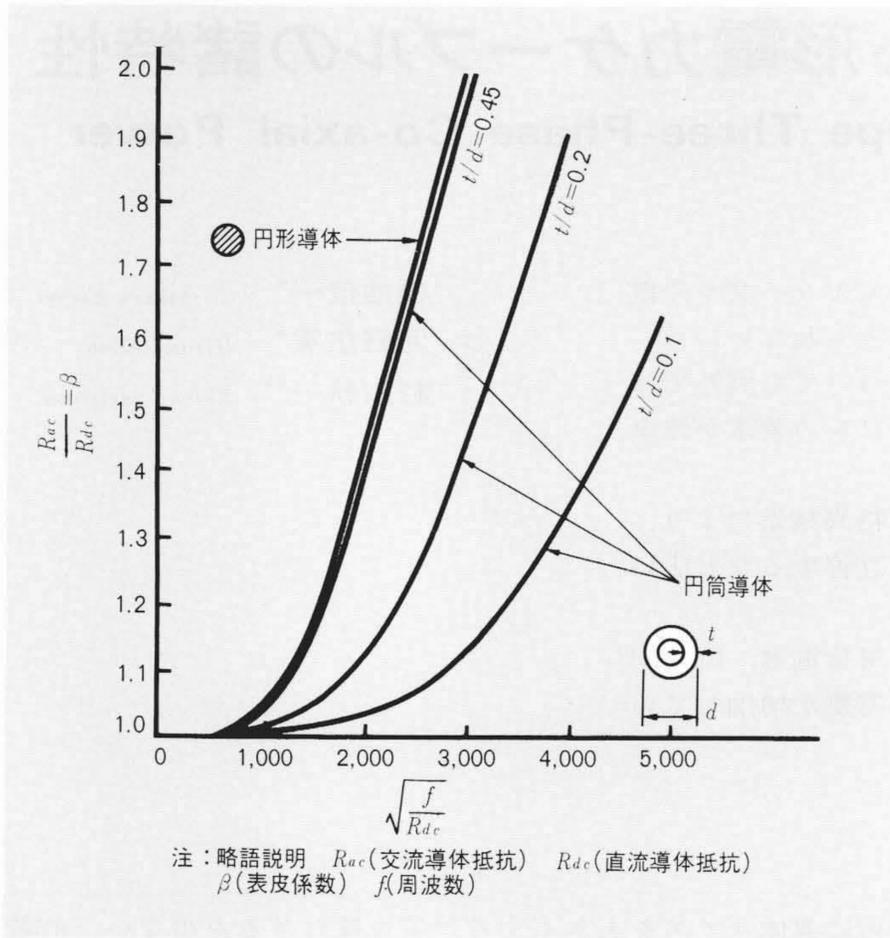


図1 導体形状による表皮効果係数 円形導体よりも円筒導体のほうが、また円筒導体でも大径薄肉円筒のほうが、抵抗、増加が少ないことが分かる。

### 3 CX-VVケーブルの構造

図2にCX-VVケーブルの外観を、図3にCVケーブル(架橋ポリエチレン絶縁ケーブル)との断面比較を示す。これから分かるように、CX-VVケーブルは三相の導体を同心円筒状に配置した特異な構造の電力ケーブルである。外径や重量は一般CVケーブルとほぼ同等である。図3のうち中空形と充実形との違いは、前者は中心部に介在物を配し、全導体を中空円筒形としてより低インピーダンスをもち、主に高周波数帯やより電圧降下条件の厳しい電路に適した構造であり、後

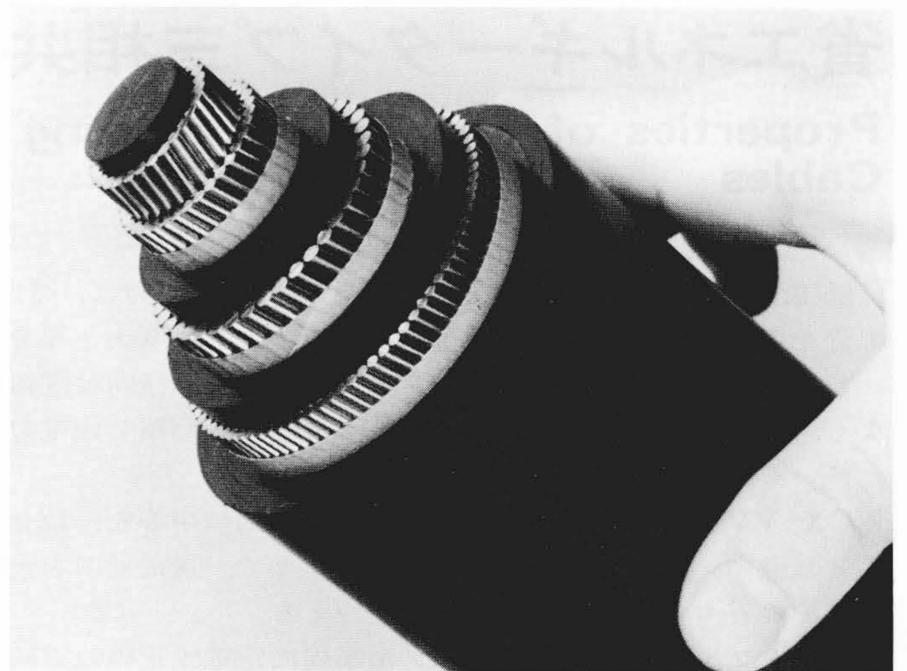


図2 CX-VVケーブル(三相共心形ケーブル)の外観 三相の導体より線を同心円筒状に配し、表皮効果係数を小さく、リアクタンスを低減したケーブルである。

者は最内層導体を充実形にし、よりコンパクト性をもたせ主に商用周波低力率用に使用される経済タイプである。

### 4 CX-VVケーブルの特性

#### 4.1 主な特長

省エネルギー、省資源の立場からCX-VVケーブルの特長を挙げると次に述べるようになる。

- (1) 表皮効果による抵抗増加が小さく、電力損失が小さい(省エネルギー)。
- (2) 低インピーダンスのため、電圧降下が小さく効率のよい給電が可能である(省資源)。
- (3) 使用条件によっては、一般ケーブルに比べて大幅に小サイズ化ができ、これにより付帯設備も小形化、簡素化できる(省エネルギー、省資源)。
- (4) 同軸構造により外部への電磁誘導を与えない。したがって、並走する弱電ケーブル側のしゃへいが簡略化できる(省資源)。

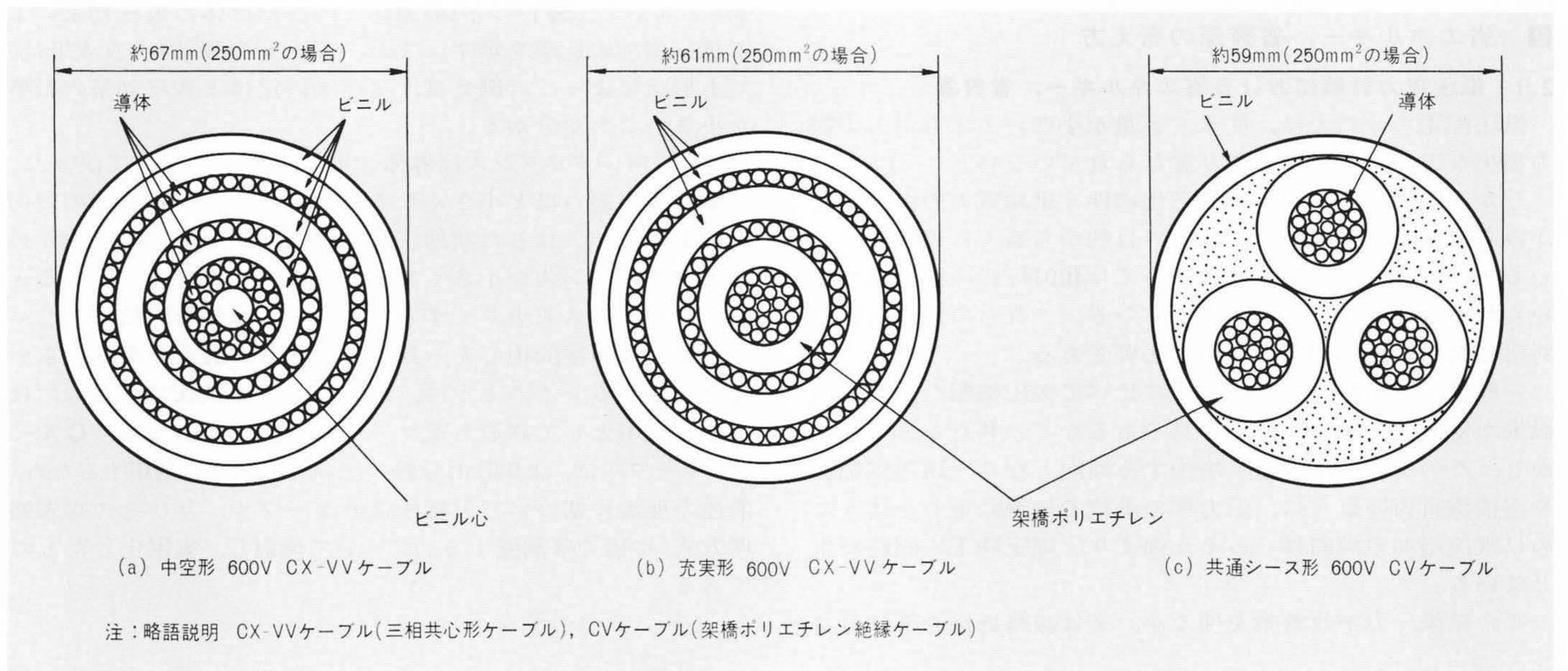


図3 CX-VVケーブルとCVケーブルの断面形状 充実形の場合、最内層絶縁体は許容電流を増加する目的で、架橋ポリエチレンを使用している。その他はビニルの絶縁、シースである。

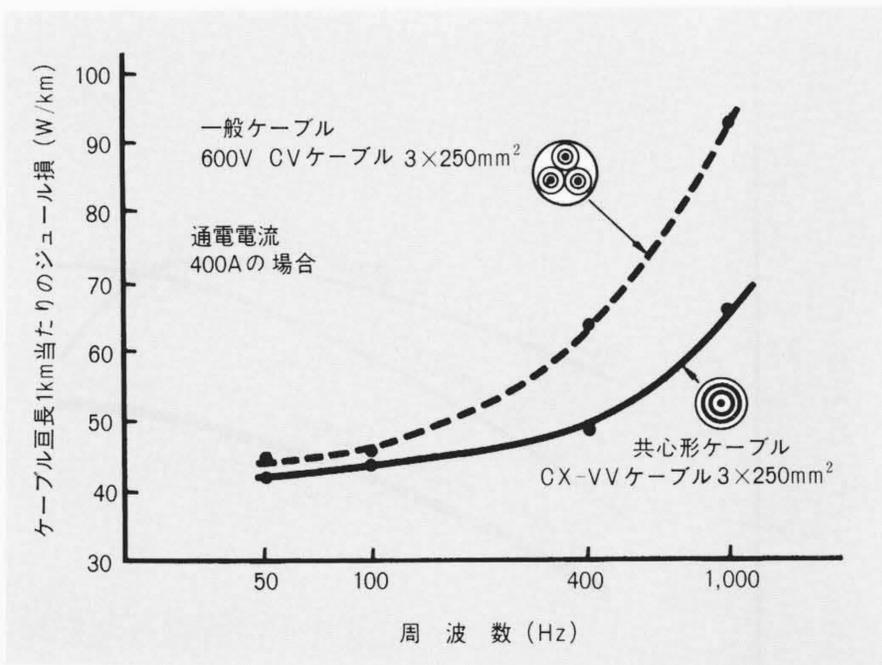


図4 抵抗損一周波数 表皮効果係数の違いから、高周波数になるに従って抵抗値の差が大きくなり、CX-VVケーブルが省エネルギーとなる。

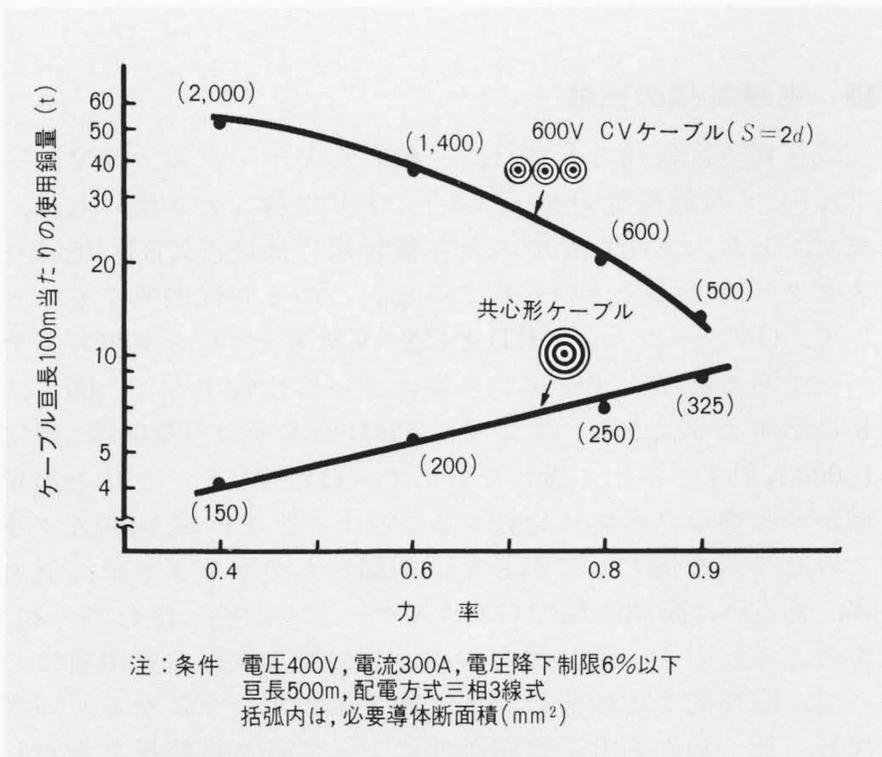


図5 使用銅量-力率 力率が低くなるとリアクタンス分が影響し、CX-VVケーブルのほうがかなりサイズの小さいものでよい。すなわち、省資源(経済的)となる。

電力損失(ジュール損)の試算例を図4に示す。同図に示すように周波数が高いほど、表皮効果による抵抗増の影響によって損失の差が大きく、省エネルギー効果が著しい。

また、省資源についての試算例として、CVケーブルとCX-VVケーブルについて同一電圧降下に抑える必要な導体サイズ(使用銅量)と力率の関係を図5に示す。三相3線1回線の条件では、低力率域で必要サイズに大きな差が生ずる。これは、インピーダンス中のリアクタンス分が共心ケーブルの場合極端に小さく、低力率でのインピーダンスが低くなるためである。

#### 4.2 インピーダンスの理論値及び実測値

##### 4.2.1 CX-VV及びCVケーブルのインピーダンス比較

表1にCX-VVケーブル、3×250mm<sup>2</sup>のインピーダンス計算値(三相平均)、及び比較のためCVケーブルの特性値を示す。CX-VVケーブルの中空形、充実形の比較では、特にリアクタンスで差があり、中空形がより低インピーダンス性を示している。なお、許容電流で両者に差のあるのは、主に電圧降

表1 CX-VVケーブルとCVケーブルの電気性能 高周波、商用周波低力率でCX-VVケーブルのほうが優れていることが分かる。

項目	品名	CX-VVケーブル 中空形 3×250mm <sup>2</sup>	CX-VVケーブル 充実形 3×250mm <sup>2</sup>	600V CVケーブル 3×250mm <sup>2</sup>
直流導体抵抗 (20℃)		0.0730 Ω/km	0.0739 Ω/km	0.0754 Ω/km
交流導体抵抗 (最高許容温度) CX-VVケーブル, 80℃ CVケーブル, 90℃	50Hz	0.0881 Ω/km	0.0950 Ω/km	0.0986 Ω/km
	400Hz	0.0995 Ω/km	—	0.174 Ω/km
リアクタンス	50Hz	0.0157 Ω/km	0.0246 Ω/km	0.0739 Ω/km
	400Hz	0.126 Ω/km	—	0.651 Ω/km
インピーダンス	50Hz pf=0.8	0.0818 Ω/km	0.0908 Ω/km	0.133 Ω/km
	50Hz pf=0.4	0.0526 Ω/km	0.0605 Ω/km	0.121 Ω/km
	400Hz pf=0.8	0.164 Ω/km	—	0.530 Ω/km
許容電流	50Hz	425A	440A	473A
	400Hz	400A	—	357A

下値でサイズが決定される中空形では耐熱ビニル絶縁(80℃耐熱)構造としているのに対し、許容電流値でサイズが決定される場合もある充実形では、許容電流を向上させるための架橋ポリエチレン絶縁(90℃耐熱)としているためである。またCVケーブルとのインピーダンス比較では、商用周波で約60%の低インピーダンス性を示し、高周波では更に大きな差となる。

##### 4.2.2 インピーダンス理論値、実測値の比較

CX-VVケーブルに三相交流を通電した場合の各相のインピーダンスは次式で示される<sup>3)</sup>。

$$Z_A = (R_A + j\omega L_A) + j\omega M_{AB} + ja^2\omega M_{AC}$$

$$Z_B = (R_B + j\omega L_B) + ja^2\omega M_{AB} + j\omega M_{BC}$$

$$Z_C = (R_C + j\omega L_C) + ja^2\omega M_{BC} + j\omega M_{AC}$$

ここに Z: インピーダンス

R: 交流抵抗(Ω)

L: 自己インダクタンス(H)

M: 相互インダクタンス(H)

$$\omega = 2\pi f$$

$$\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\alpha^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$$

f: 周波数(Hz)

j:  $\sqrt{-1}$

表2に約150mのケーブルに三相交流を流し、交流電位差計を用いて測定したインピーダンスの実測値と、上式で求めた理論値の比較を示す。理論値は実測値とよく一致している。また、各相のインピーダンス値に若干の不均衡が生ずるが、長距離給電などでこの点の改善が必要な場合には、中間接続部で相ねん架することで対処できる。また同時に行なった同サイズのCVケーブルとの比較でも、前述の表1にほぼ等しい効果が確認できた。

##### 4.3 実用線路における効果の確認

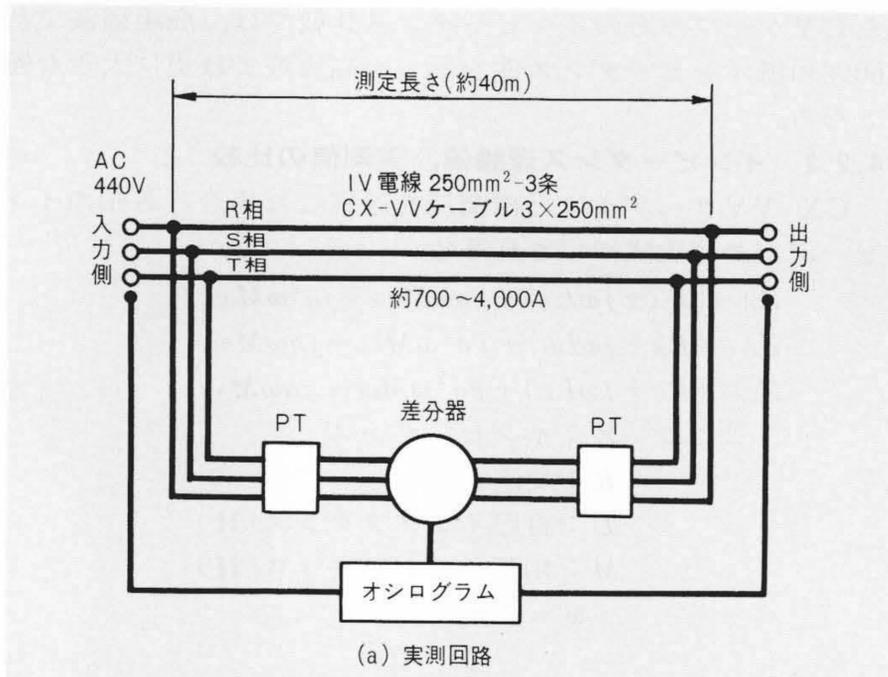
実用線路での低電圧降下特性を確認するため、CX-VVケーブルの効果が期待できる低力率負荷の例をとり、溶接(スポ

表2 インピーダンスの理論値と実測値  $R+jX$ を示し、 $R$ は交流導体抵抗、 $X$ はリアクタンスである。

	600V CX-VVケーブル, $3 \times 250\text{mm}^2$ (充実形)	
	理論値	実測値
第1導体	0.0930 $+j0.0616$	0.0951 $+j0.0652$
第2導体	0.0460 $+j0.0123$	0.0457 $+j0.0116$
第3導体	0.0691 $+j0.001$	0.0684 $+j0.001$
平均値	0.0694 $+j0.0246$	0.0697 $+j0.0259$

(単位 $\Omega/\text{km}$ , なお周囲温度 $10^\circ\text{C}$ で実測)  
注: 略語説明  $j(\sqrt{-1})$

ットウエルダ)用給電線路に使用中の電路について、CX-VVケーブル及び従来配線のIV電線(ビニル絶縁電線)配線系統の各々について比較実測を行なった。溶接機負荷は激しい変動負荷であり、その解析を容易にするため、幹線の両端末の電圧の差、すなわち電圧降下そのものを直接電磁オシログラムで読み取る方法をとった。図6に測定回路の略図、及び測定波形(電圧差)例を示す。同様な方法で実測したCX-VVケーブル、IV電線線路の両者を比較するため、実測データをケーブル長100m、電流1,000Aの同一条件に換算した電圧降下値はCX-VVケーブルでは1.9V、IV電線では6.0Vであり、CX-VVケーブルは同断面積のIV電線(金属管内配線)に比べて約 $\frac{1}{3}$ の電圧降下値にとどまっている。



注: 略語説明 PT(計器用変圧器)

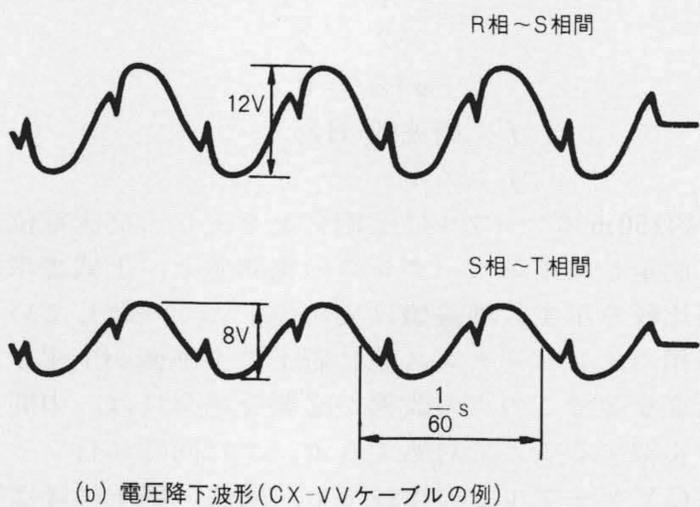


図6 電圧降下の実測 一次、二次側の電圧差を知るため計器用変圧器は同一仕様のものを使用した。右図の波形は一次、二次側の電圧差、すなわち電圧降下そのものを表わしている。

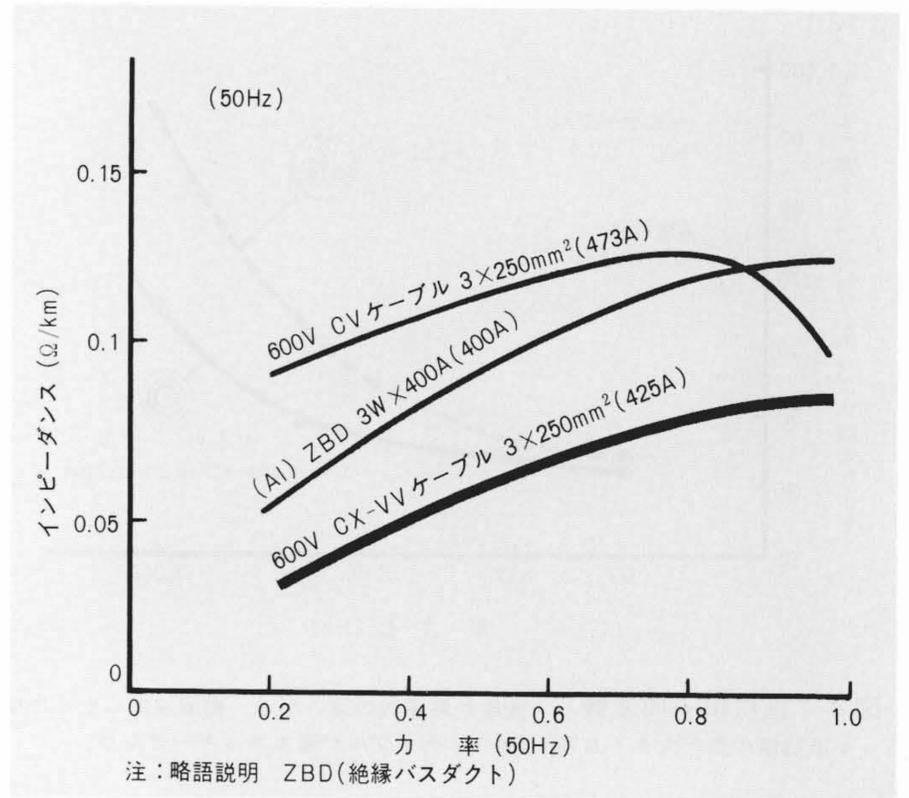


図7 力率-インピーダンス特性 力率が低い範囲で非常に差が生ずる。

### 5 各種幹線の比較

低圧屋内配電用としては、一般にCVケーブル、VVケーブル(ビニル絶縁電力ケーブル)、IV電線などが用いられ、また、ビル、工場などでの大容量幹線には最近ZBD(絶縁バスダクト)<sup>4)</sup>が多く用いられている。このうち代表的なものとして、CVケーブル、ZBDとCX-VVケーブルを本稿の主テーマである低インピーダンス性について比較すると、図7、8に示すようになる。ここで、ZBDは本来大容量幹線(通常1,000A以上)として適したもので、CX-VVケーブルと適用域がやや異なり単純に比較することはできないが、400Aクラスのサイズを例として示した。同図から分かるように、低力率、あるいは高周波域でCX-VVケーブルが特に優れている。また、これらを一般に電力幹線として要求される諸項目について、定性的な比較を行なうと表3に示すようになる。いずれも一長一短があり、使用条件によって各々の特長を生かした使い方が行なわれるべきである。

表3 各種幹線の特長比較 CX-VVケーブルは低インピーダンス性、CVケーブルは取扱い性、ZBDは電流容量が大きくとれるなど、各々異なった特長をもつ。

種類	600V 共心ケーブル (CX-VVケーブル)	600V 架橋ポリエチレン 電力ケーブル(CVケーブル)	絶縁バスダクト (ZBD)
電流容量 (許容電流)	△	○	◎
低インピーダンス性 (低電圧降下性)	◎	△	○
無誘導性 (外部への電磁障害)	◎	○ (ただし、3心ケーブル)	○
取扱い性 (可とう性など)	○	◎	△
分岐の取出し	△	○	◎
端末処理 (盤への接続)	○	○	○
保守点検	○	○	△

注: ◎は非常に良い。○は良い。△は劣る。

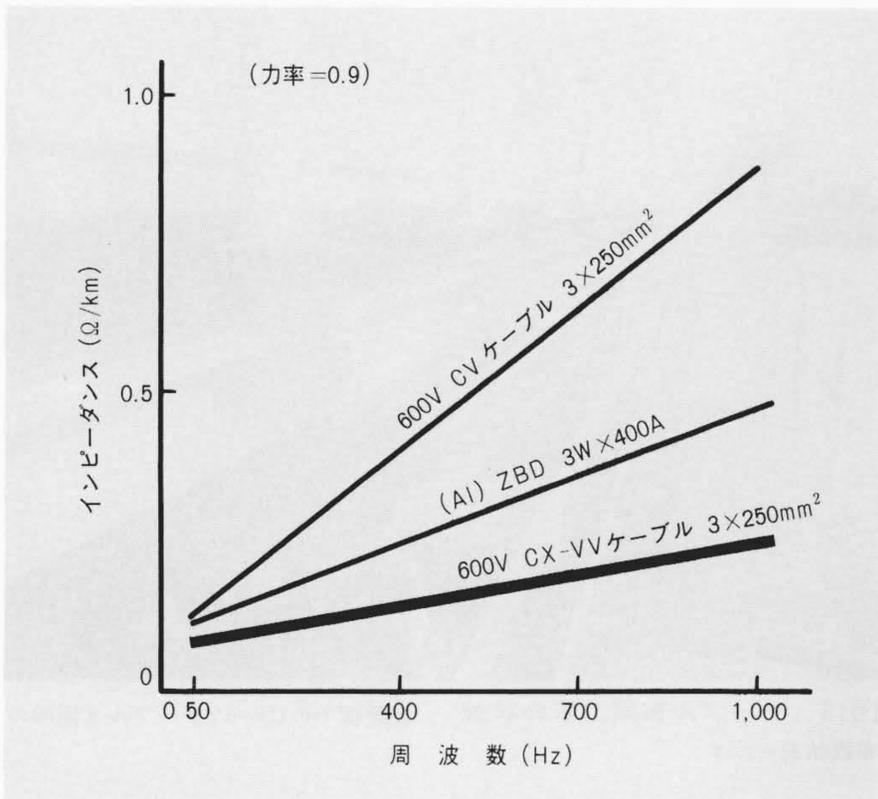


図8 周波数-インピーダンス特性 表皮効果, リアクタンスの差が, インピーダンスの差となって表われている。

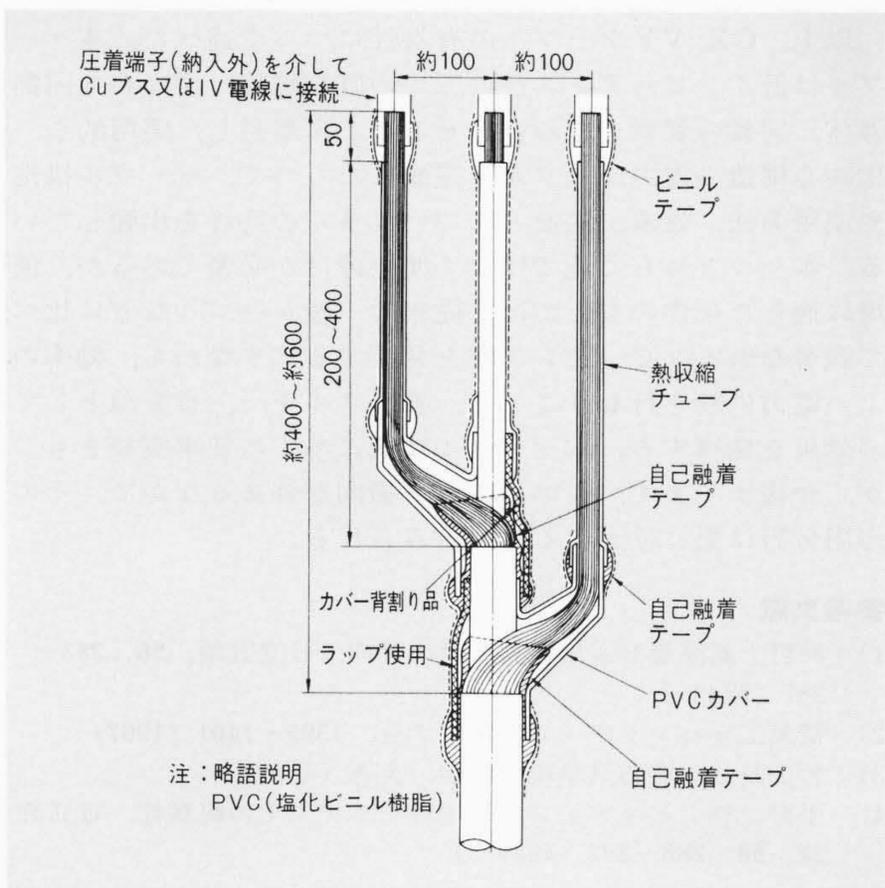


図9 CX-VVケーブル端末処理の構造 盤内ターミナルに直接接続を行なう場合に用いるタイプで, 2人×30分程度で作業が行なえる。

### 6 端末処理構造

三相導体が同軸配置のため, 端末部での各相導体の引出し, 絶縁処理をいかに効率的に行なうかが, 開発当初からの課題であった。溶接による工法, 相間に補強リングを用いた同軸圧縮接続工法など, 各種の検討結果を経て現在図9に示すような, ビニル絶縁カバーを用いた簡便な端末処理工法を開発し, 実用化している。これによれば, 一般の3心ケーブル端末処理とほぼ同程度の作業時間で処理することができ, また, 盤内ターミナルブスバーへの接続も比較的容易に行なうことができる。

### 7 各種用途例

CX-VVケーブルは, 特に高周波域で優れた特性を発揮することから, 1974年に高周波電子計算機電源用として使用されて以来, 主に高周波用として普及してきたが, 1978年に低力率用として自動車車体溶接用として使われ, 最近では低圧長距離給電電動機負荷の電源用として注目を集めている。

#### 7.1 主な用途例

周波数区分による主な用途例, 及び効果を図10に示す。

#### 7.2 低力率回路での実用例

具体例として最近ある河川に設けた水門用ゲート(図12参照)の開閉用低圧電動機給電用として検討した結果を, 実用例(条件を表4に示す。)として次に述べる。この例では, 低力率のほかケーブル巨長が600mにも及び, 起動時の電圧降下対策が

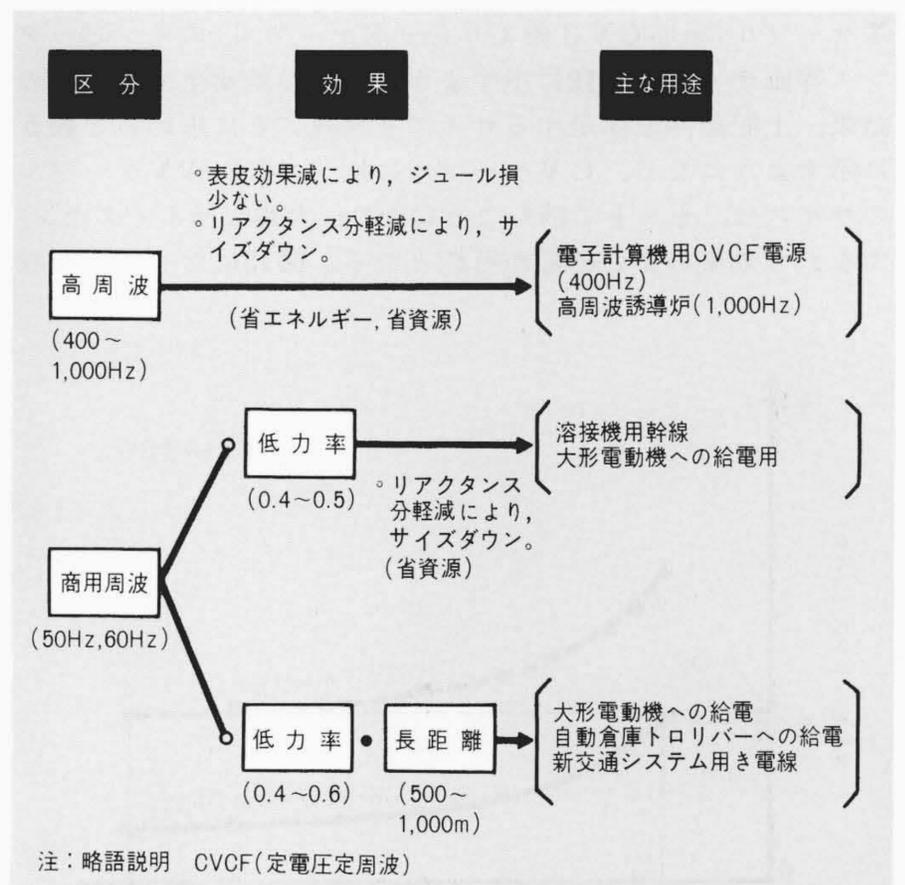


図10 CX-VVケーブルの用途例 高周波, 低力率で効果を発揮する。



図11 河川水門ゲートの外観 四つの水門用ゲートが, 8基の電動機で駆動される。

表4 実用例の使用条件 低力率、長距離給電の例で、野外での給電線は通常この表に示すように長距離となることが多い。

項目	数値
電圧 (V)	460
電流 (A)	330~430
配電方式	三相3線式
力率 (%)	40
周波数 (Hz)	60
ルート長 (m)	465~630
周囲温度 (°C)	40
電圧降下制限 (V)	40

重要課題であった。当初使用が計画されていたCVケーブルとの比較を行なうと力率0.4では、CX-VVケーブルとCV-Tケーブル(単心CV3条より合せ形ケーブル)のインピーダンス等価サイズは図12に示すように大きな差が生ずる。その結果、上記条件を満足するサイズを系統ごとに求めると表5に示すようになる。CVケーブルに比べてCX-VVケーブルのサイズは、 $\frac{1}{4}$ ~ $\frac{1}{3}$ で済むことになり、大幅なサイズダウン、すなわち効率のよい給電が可能となる。図13にケーブル布設

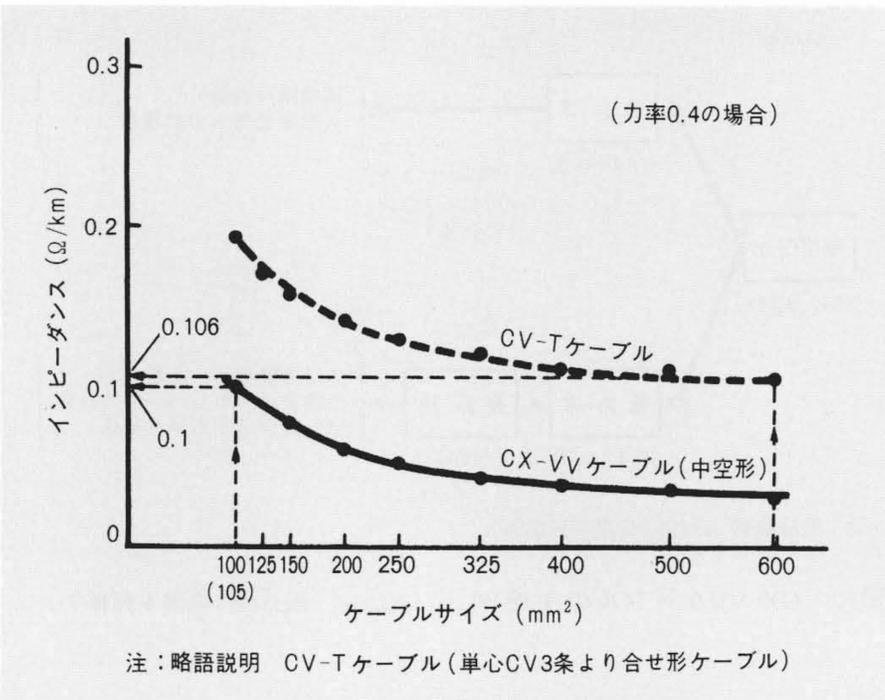


図12 等価インピーダンスのサイズ比較 力率0.4程度では、リアクタンス分が極端に小さいCX-VVケーブルのほうが、かなりインピーダンスが小さい。

表5 水門ゲート開閉電動機用給電線検討結果 CV-Tケーブル, 3×400~600mm<sup>2</sup>が必要であるのに対し, CX-VVケーブル, 3×105~125mm<sup>2</sup>と約 $\frac{1}{4}$ 程度のサイズで抑えられる。

幹線 No.	起動電流 (A)	ルート長 (m)	CX-VVケーブル (中空形)		CV-Tケーブル	
			サイズ (mm <sup>2</sup> )	電圧降下 (V)	サイズ (mm <sup>2</sup> )	電圧降下 (V)
1	330	630	105	36.0 (7.8%)	500	39.6 (8.6%)
2		"	"	"	"	"
3		585	"	33.4 (7.3)	400	37.4 (8.1)
4		"	"	"	"	"
5	430	"	125	38.2 (8.3)	600	46.2 (10.0)
6		535	105	39.8 (8.7)	"	42.3 (9.2)
7		"	"	"	"	"
8		465	"	34.6 (7.5)	400	38.8 (8.4)

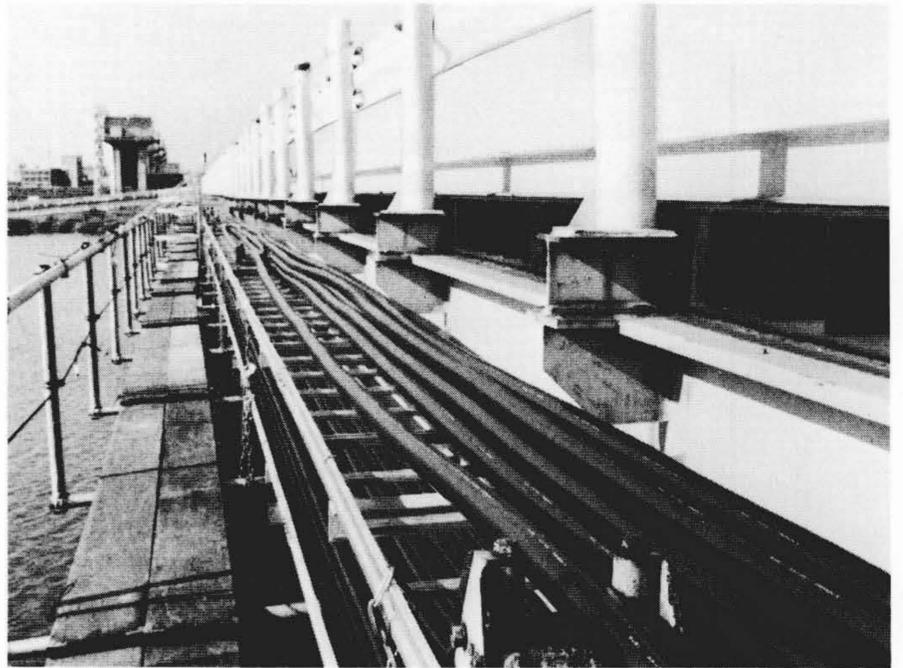


図13 ケーブル布設工事の状況 仮設橋でのCX-VVケーブル8回線の布設状況を示す。

状況を示す。

### 8 結 言

以上、CX-VVケーブルの有為性について述べた。本ケーブルは低インピーダンス性の二つの既知理論、すなわち円筒導体、同軸の要素を組み合わせることに着目し、実用的な三相共心構造の電力ケーブルを完成したもので、ケーブル構造や使用方法、端末工法などについて多くの特許を出願している。本ケーブルも万能ではなく使い分けが必要であるが、使用に適した条件のもとでは、従来の一般ケーブルなどに比べて顕著な低インピーダンス性を発揮する。すなわち、効率のよい電力供給を行なうことで、省エネルギー、省資源としての効果を発揮する。本ケーブルは既に多くの使用実績をもつが、今後ますます、省エネルギー指向が強まるなかで、その応用分野は更に拡大するものとみられる。

### 参考文献

- 1) 河野：超高層ビル用電力幹線の動向，日立評論，56，283~287（昭49-3）
- 2) 電気工学ハンドブック：電気学会，1399~1401（1967）
- 3) 竹山説三：電磁気学現象理論，丸善（昭29）
- 4) 平野，外：ビルディング用絶縁バスダクトの耐震性，日立評論，56，288~292（昭49-3）