

低風圧・自励振動抑制型光ドロップケーブルの開発

Development of Low Wind Pressure and Self-excited Vibration Suppressive Optical Drop Cable

田邊賢吾
Kengo TANABE

有田謙志
Kenji ARITA

吉原龍夫
Tatsuo YOSHIHARA

瀬戸昭博
Akihiro SETO

金子貴皇
Takao KANEKO

インターネットの普及に伴い光ドロップケーブルが大量敷設されるようになり、風圧荷重の低減や自励振動の抑制に関する要求が強くなっている。このような要求に対して、風圧低減効果と自励振動抑制効果に優れているSZねじれ構造を持つ光ドロップケーブルを開発した。SZねじれ構造を最適化するため、数値流体解析を用いて風圧特性を検討し、さらに施工性の一指針であるケーブル束取を検証することによってSZねじれ構造の反転角とピッチを決定した。開発したケーブルは、従来と同等のケーブル特性と施工性を持つことに加え、フィールド試験の結果から風圧による張力増加量を従来比39%低減することを確認した。

Recent years in Japan, with the growth of the Fiber To The Home, large amount of optical drop cable has been installed. The optical drop cable, which is one of the aerial cables, is strongly required with low wind pressure and low vibration structure. We have optimized the SZ-spiral inversion angle and spiral pitch by analysis of using computational fluid dynamics simulations, and study of cable bundle characteristics. From the field tests, it is shown that the SZ-spiral optical drop cable performs excellent aero-dynamic characteristics of reducing 39% tension increment due to the wind pressure. The cable also achieves the same cable characteristics and workability as conventional straight cable.

1. はじめに

近年、インターネットなどの通信サービスの普及に伴い、通信事業者から加入者宅までの全区間を光ファイバで結ぶFTTH (Fiber To The Home) が急速に拡大してきている。FTTHにおいて、加入者宅近傍の光配線網は電柱を用いた架空配線が一般的であり、電柱に架渉した配線ケーブルから光ドロップケーブルを用いて加入者宅に引き落とす方式が主に採用されている。

架空配線された光ドロップケーブルが横方向から風を受けると、ケーブルに風圧荷重が加わり、電柱をはじめとした構造物に過剰な負担を加えることがある。その場合、より高強度の電柱に建て替える必要が生じたり、電柱の径間長が短く制限されたりするなど敷設費用の上昇を招いてしまう。また、風が吹き続けることにより光ドロップケーブルが振動を生じ、且つ継続すると、ケーブルやそれを引き留める周辺部材が繰り返し応力を受け疲労破壊することがある。特に光ドロップケーブルはケーブル構造に起因したギャロッピングと呼ばれる自励振動が起り易く¹⁾、この疲労破壊を助

長する恐れがある。

一方で、過去の理論的な検討や数値解析および風洞実験の結果から、架空光ケーブルの風圧荷重を低減し自励振動を抑制するには、SZねじれ構造が最も優れていることが報告されている^{1, 2)}。

今回、数値流体解析とケーブル束取の検討により、SZねじれ構造の反転角とピッチの最適化を行い、風圧低減効果と自励振動抑制効果を持ったSZねじれ光ドロップケーブルを実用開発した。フィールド試験を含む各種性能を評価したので結果を報告する。

2. ケーブル構造

図1に今回検討したSZねじれ光ドロップケーブルの構造を示す。支持線部を回転軸としてケーブル部を長手方向に周期的に捻転させた構造となっている。ここで、所定の角度ごとにケーブル部が反転する角度を反転角、反転1周期分の長手方向の長さをピッチと呼ぶ。風圧特性と施工性はこれらふたつのパラメータによって決定されることから、数値流体解析の検討と施工性の一指針であるケーブル

束取の検証により最適化を行った。ケーブルの構造寸法については、従来光ドロップケーブルで使用している周辺部材と整合性を維持するため、従来ケーブルとほぼ同等とした。

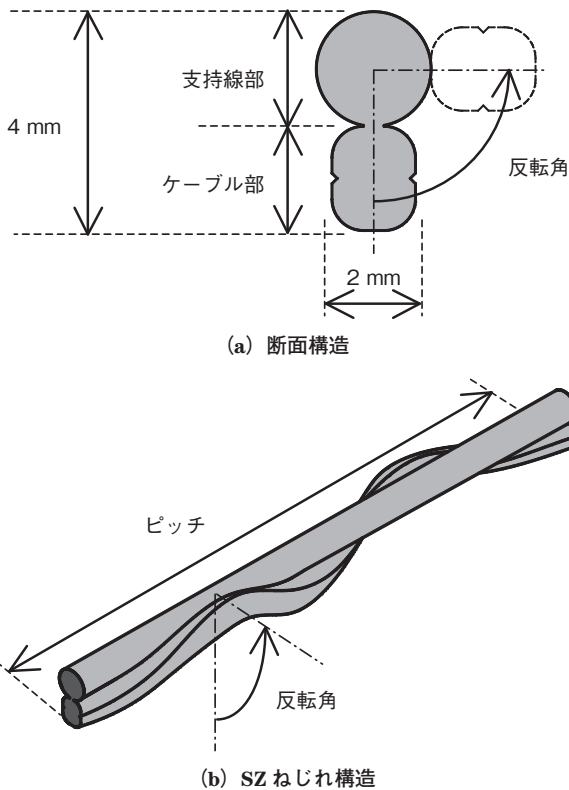


図1 SZねじれ光ドロップケーブルの構造

3. 数値流体解析

今回、多くのSZねじれモデルを検討する必要があるため、風圧特性の評価については数値流体解析を用いることとした。

3.1 風圧特性と評価指標

風圧の一般論と本稿における評価指標について簡単に説明する。

一般にケーブルが風を受けると受風面と背面に圧力差が生じ、これが風圧となる。図2に示すようにケーブルが風軸方向に受ける力を抗力 F_D (N)、風軸に垂直な方向の力を揚力 F_L (N) とすると、無次元化した値はそれぞれ次式で得られる。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 dl}, \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 dl} \quad (1)$$

ここで、 C_D 、 C_L 、 ρ 、 V 、 d 、 l をそれぞれ、抗力係数、揚力係数、空気密度 (kg/m^3)、風速 (m/sec)、ケーブル断面の代表長 (m)、ケーブル長さ (m) とした。無次元数であるこれら係数は、風軸方向とケーブル断面軸とのなす角度 (迎角 β) に依存し、数値流体解析を用いることによって求めた。数値流体解析では風軸方向に対して解析モデルを回転させることにより、迎角分布 $0 \sim 360^\circ$ の範囲を求めた。このとき、

すべての迎角分布において抗力係数 C_D が最大となる値をケーブルの風圧荷重の指標とした。ケーブル構造を最適化するために抗力係数の最大値が小さくなるようにした。

また、風圧によって生じる自励振動については次式に示す Den Hartog 判別式³⁾を用いた。

$$S = C_D + \frac{\partial C_L}{\partial \beta} \quad (2)$$

この判別式では $S < 0$ となることが自励振動の発現する条件となる。つまり、すべての迎角分布において $S > 0$ となる場合、自励振動を発現しない抑制効果に優れたケーブル構造となる。

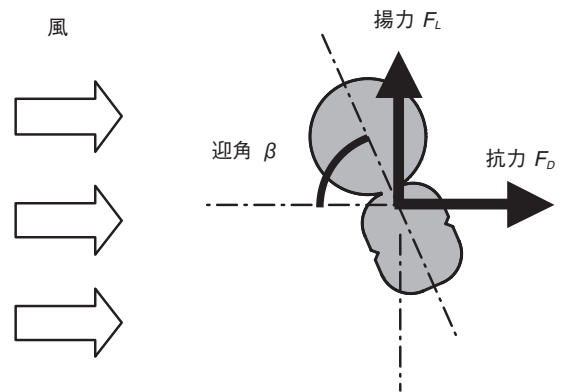


図2 ケーブル断面と風圧荷重

3.2 解析概要

今回行った数値流体解析の概要を表1に示す。乱流モデルについては、レイノルズ平均ナビエストークス (Reynolds Averaged Navier-stokes equation) 方程式に基づく標準 $k-\epsilon$ モデルを適用した。

表1 数値流体解析概要

解析ソフト	FLUENT (ANSYS社)
解析概要	非圧縮性流体の定常解析
空気密度	1.225 kg/m^3
流入条件	40 m/sec の一様流
流出条件	外部圧力 = 0

3.3 解析結果① 〈剛体モデル〉

まず、SZねじれ構造のケーブルと従来のストレート構造のケーブルの風圧特性を、剛体モデルを使って比較した。SZねじれ構造は、反転1周期分をひとつのモデルとして考えた。反転角が $\pm 90^\circ$ 、ピッチが2 mのSZねじれ構造のケーブルと従来のストレート構造のケーブルについて、抗力係数 C_D および判別値 S の迎角との関係について解析した結果を図3および図4に示す。

図3より、従来のストレート構造は抗力係数 C_D の最大値が1.6であるのに対し、SZねじれ構造はすべての迎角分布で1未満となる。図4より、従来のストレート構造は判別値 S が負となる迎角が存在するのに対し、SZねじれ構造はすべての迎角分布で0.8以上となる。このように、SZ

ねじれ構造は、従来のストレート構造と比較して抗力係数 C_D の最大値は小さく、判別値 S の最小値は大きくなり、且つ安定する。つまり、従来構造よりもSZねじれ構造のケーブルは風圧低減効果と自励振動抑制効果を持つことになる。

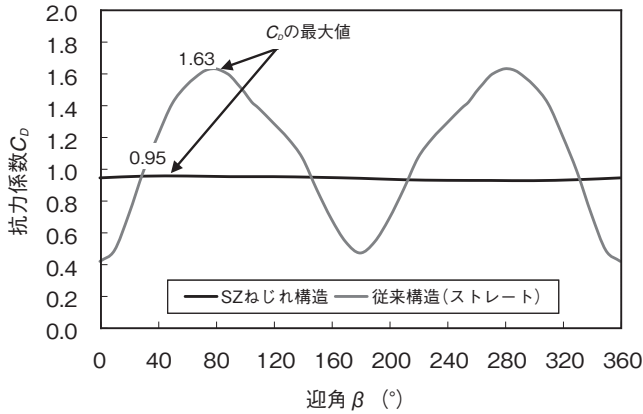


図3 迎角 β - 抗力係数 C_D の関係

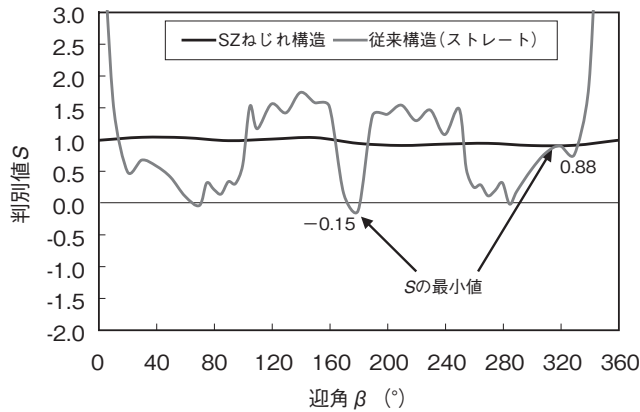


図4 迎角 β - 判別値 S の関係

異なる代表的な反転角についても同様の解析を行い、すべての迎角分布における抗力係数 C_D の最大値と判別値 S の最小値をそれぞれ求めた。結果を表2に示す。反転角が $\pm 90^\circ$ 以上のSZねじれ構造は従来のストレート構造と比較して抗力係数の最大値が70%以下となる。つまり、風圧荷重を従来比30%以上低減する効果があることがわかる。また、判別値 S の最小値は常に0.6以上であり、自励振動の抑制に対しても安定して優れていることがわかる。

なお、本解析においてSZねじれ構造のピッチと抗力係数 C_D および判別値 S との関係性を調べたが、有意な依存性は確認できなかった。

表2 抗力係数 C_D と判別値 S

反転角 ($^\circ$)	抗力係数 C_D の最大値	判別値 S の最小値
$\pm 0^\circ$	1.63	-0.15
$\pm 45^\circ$	1.29	0.08
$\pm 90^\circ$	0.95	0.88
$\pm 135^\circ$	1.05	0.64
$\pm 360^\circ$	0.97	0.95

*従来構造 (ストレート)

3.4 解析結果② (多体系モデル)

次に図5に示すような、ケーブルが風圧によって弦のように振動した場合の自励振動について考える。多体系モデルを使ってケーブルを軸方向に微小領域に分割していき、 i 番目の位置における振動変位をモード関数 ${}^n\phi_i$ で表すと、以下のようになる。

$${}^n\phi_i = \sin\left(n\pi\frac{\Delta xi}{L}\right) \quad (3)$$

ここで、 n 、 Δx 、 L をそれぞれ、振動モード数、分割長さ (m)、固定端長さ (m) とした。この変位の影響を考慮した自励振動の判別式は以下のようになる。

$$D = \frac{\sum_i {}^n\phi_i^2 S_i}{\sum_i {}^n\phi_i^2} \quad (4)$$

ここで、 S_i は i 番目の位置における (2) 式の判別値である。各微小領域はそれぞれ数値流体解析を用いて求めた。Den Hartog判別式 (2) 式と同様に、すべての迎角分布において判別値 $D > 0$ となる場合、自励振動を発生しない条件となる。このことから、 $D > 0$ となるケーブル構造が自励振動抑制効果に優れていると判断した。なお、振動モード数は実用的な範囲で $n = 1, 2, 3$ とした。

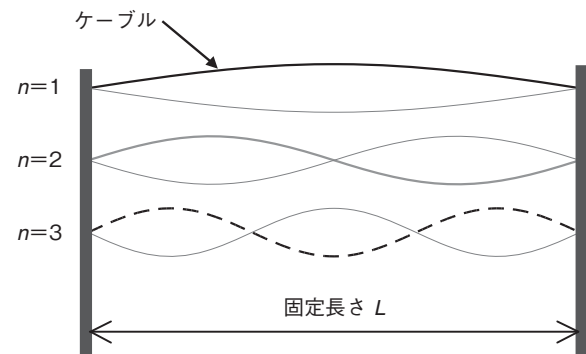


図5 ケーブルの振動モード

SZねじれ構造の反転角が $\pm 90^\circ$ 、ピッチが2 mのとき、固定端長さ L と最小判別値 D_{min} との関係を図6に示す。ここで、最小判別値 D_{min} とはすべての迎角分布における判別値 D の最小値である。

図6より、振動モード数 $n=1$ では固定端長さ L が1.8 m以下の領域で最小判別値 D_{min} が負となる。 $n=2$ では固定端長さ L が2.4 m以下で、 $n=3$ では3.6 m以下の領域で D_{min} が負となる。一方、固定端長さ L が大きい領域では最小判別値 D_{min} は、どの振動モードでも常に正の値で一定に収束していく。

このような現象は次のように説明できる。SZねじれ構造のケーブルは、剛体モデルでも示したように少なくとも反転1周期で自励振動抑制効果がある。しかし、このような弦振動を考慮すると、振動の腹の位置にあたる微小領域、つまり振動変位 ${}^n\phi_i$ が大きい微小領域の判別値 S_i が支配的

になってくる。そのため、ある微小領域の判別値 S_i が正であっても、振動の腹付近の判別値 S_i が負であれば、結果として全体の判別値 D は負となる場合が生じる。振動モード $n=1$ でみれば、ケーブル軸方向で $L/2$ 付近の判別値 S_i が重要ということになる。反転角が $\pm 90^\circ$ の場合は、弦振動の節と節の間隔がSZねじれのピッチより短くなると、最小判別値 D_{min} が負となる固定端長さ L が生じてしまう。

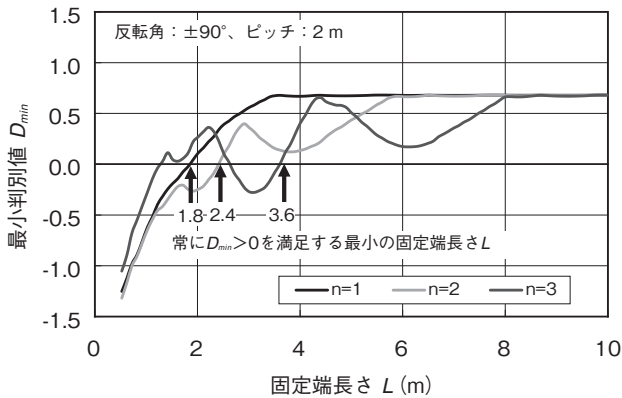


図6 固定端長さ L - 最小判別値 D_{min} の関係

異なるピッチについても同様の解析を行い(反転角は $\pm 90^\circ$)、常に最小判別値 $D_{min} > 0$ を満足するような最小の固定端長さ L を求めた。結果を表3に示す。表3の結果から、SZねじれ構造のピッチが大きくなると、常に自励振動を発生しない最小の固定端長さ L も大きくなるのがわかる。このとき、固定端長さ L は光ドロップケーブルの布設径間長(スパン長)とみなせるので、最小のスパン長を4mと想定すると、ピッチは2m以下に設計しなければならないことがわかる。

表3 ピッチと固定端長さ L

ピッチ (m)	常に $D_{min} > 0$ を満足する 最小の固定端長さ L (m)		
	$n=1$	$n=2$	$n=3$
1	0.7	0.9	1.5
2	1.8	2.4	3.6
4	3.6	3.9	6.1
8	7.3	7.8	12.3

4. ケーブル束取

従来のストレート構造の光ドロップケーブルの施工方法を変えることなくSZねじれ光ドロップケーブルを取扱うには、従来ケーブルと同様なケーブル束形状(図7)にすることが求められる。従来ケーブルの束形状は層状にケーブルを整列巻きして結束している。一方、SZねじれ構造の場合、ケーブルを整列巻きする際にねじれをストレート形状に変形させる必要がある。また、ケーブルを束から繰り出す際にはSZねじれの状態に戻す必要があるため、変形は材料の弾性域内で行わなければならない。実際に種々のSZねじれ光ドロップケーブルを製作しながら

検証を行った。

表4に代表的な反転角についてケーブル束取の良否について検証した結果を示す。ケーブル束取の良否は、(a) 整列巻きが可能かどうか (b) 束部に落ち込みが生じていないか (c) 束部にねじれが生じていないか (d) 束から繰出し後にケーブルに異常が生じていないか、で判断した。また、このとき、ケーブルの取回し性についても、8の字取りが可能かどうか調べた。

表4の結果からわかるように、単位長さ当たりのねじれ量が増えると変形への反発力が強くなり、整列巻きが悪くなる結果となった。また、反転角の大きいサンプルにおいては繰り出し後のケーブルの取回し性が悪く、施工しにくくなるという影響が懸念された。

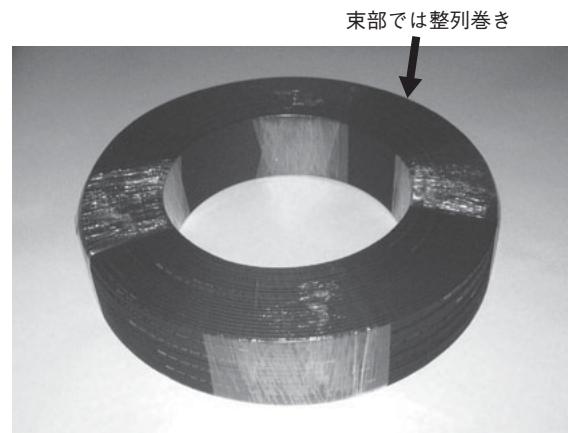


図7 ケーブル束形状

表4 ケーブル束取の検討

反転角 ($^\circ$)	ピッチ (m)	ケーブル束取 良否	取回し性 (8の字取り)
± 45	2	○	○
± 90	2	○	○
± 135	2	$\Delta \sim \circ$	○
± 360	2	×	×

5. 開発ケーブル性能

以上の検討から、風圧特性と施工性に最適なSZねじれ構造を実現するため、反転角を $\pm 90^\circ$ 、ピッチを2mに決定し、

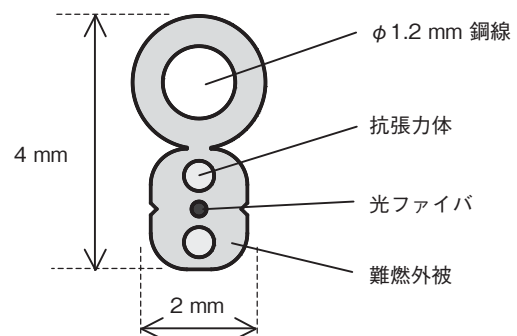


図8 開発ケーブル断面構造

新たにSZねじれ光ドロップケーブルを開発した。図8に開発ケーブルの断面構造を示す。

5.1 ケーブル特性

表5に開発ケーブルの伝送特性、機械特性、温度特性等を評価した結果を示す。

各評価項目において、良好な特性が得られ、従来ケーブルと同等の性能を有することを確認した。

表5 ケーブル特性評価の結果

項目	試験条件*	結果
伝送損失	OTDR	0.25 dB/km以下
曲げ特性	R=15 mm, ±180°, 10 cyc	0.01 dB以下
側圧特性	1200 N/25 mm	0.01 dB以下
衝撃特性	φ20 mm, 300 g, 1 m	0.01 dB以下
捻回特性	10 N, ±90°/m	0.01 dB以下
しごき特性	200 N, R=60 mm, 90°	0.01 dB以下
温度特性	-30 ~ +70°C /cyc, 3 cyc	最大損失変動 0.1 dB/km以下
燃焼特性	JIS C 3005 (傾斜)	自己消炎

*測定波長：1.55 μm

5.2 施工性

施工性を検証するため、実際に開発ケーブルと従来ケーブルをケーブルリールから繰り出し、径間長40mで架渉するまでの時間について測定した。表6に評価結果を示す。作業時間の値は従来ケーブルを1としたときの相対値で示す。

開発ケーブルは従来ケーブルと同等の作業時間で施工が可能であることを確認した。

表6 施工性の評価結果

	従来ケーブル	開発ケーブル
作業時間 (相対値)	1.00	1.01

5.3 フィールド試験

開発ケーブルのフィールドにおける風圧特性を検証するため、海岸から約1kmの地点に従来ケーブルと開発ケーブルを架渉し、ケーブルの水平張力を測定した(図9)。このとき、自励振動の発生有無についても目視により確認した。

表7に風速17 m/sec時の評価結果を示す。表中、水平張力の増加量は、無風時から強風時までの張力の変化量を

ケーブル断面の代表長で除したものであり、従来ケーブルを1としたときの相対値で示す。

この結果から、開発ケーブルは従来ケーブルと比較して水平張力の増加量を39%低減する効果があることがわかる。自励振動についてはいずれのケーブルにおいても最大振動振幅に大きな変化がみられず、検証には至らなかった。

表7 フィールド試験結果

	水平張力の増加量 (相対値)	自励振動
従来ケーブル	1.00	発生なし
開発ケーブル	0.61	発生なし

6. まとめ

風圧低減効果と自励振動抑制効果を持ったSZねじれ光ドロップケーブルを新たに開発した。フィールド試験の結果から、開発ケーブルは風圧による張力増加量を39%低減する効果があることを実証した。また、開発ケーブルは従来ケーブルと遜色ない一般特性を持っていることを確認した。

本SZねじれ光ドロップケーブルは従来ケーブルとほぼ同等の製造工程および装置によって製造することが可能であり、FTTH普及促進の一助となることが期待される。

参考文献

- 1) 松尾, 山下, 大島:「光ケーブルにおける低風圧・自励振動抑制形状の検討」, 電子情報通信学会技術研究報告, OCS, Vol.110 No.176 P63-68 (2010)
- 2) 松尾, 榊原, 川嶋, 中村, 岡田, 寺村:「架空光ケーブルにおける低風圧・風圧振動抑制形状の検討」, 電子情報通信学会技術研究報告, OCS, Vol.108 No.309 P63-66 (2008)
- 3) Den Hartog: "Mechanical Vibration", McGraw-Hill (1934)

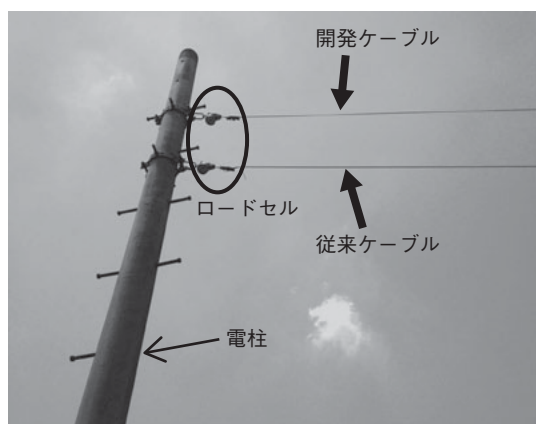


図9 フィールド試験実施状況

昭和電線ケーブルシステム(株)

田邊 賢吾 (たなべ けんご)

通信システムユニット 技術開発部 技術開発課 主査

通信ケーブルの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

有田 謙志 (ありた けんじ)

通信システムユニット 技術開発部 技術開発課 主査

通信ケーブルの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

吉原 龍夫 (よしはら たつお)

通信システムユニット 技術開発部 技術開発課 主査

通信ケーブルの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

瀬戸 昭博 (せと あきひろ)

営業本部 通信システム営業部 通信営業 G 主査

通信ケーブルの設計・販売に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

金子 貴皇 (かねこ たかお)

通信システムユニット 技術開発部 技術開発課長

通信ケーブルの研究・開発に従事