海洋光ファイバ流速センサに関する基礎的研究

(第2報：光ファイバによる流速測定のパフォーマンス向上に関する実験的検討)

正員 飯 高 弘* 佐 藤 宗 純*
村 田 吉 和** 池 田 健 治***

Fundamental Research on Optical Fiber Sensor for Ocean Flow Measurement
(Part 2: Experimental Investigation on Performance Improvement of Flow Rate
Measurement by Optical Fiber)

by Hiroshi Iitaka *Member* Sojun Sato
Yoshikazu Murata Kenji Ikeda

Summary

In the previous paper, a signal detection method (Homodyne detection method) of flow rate measurement by using optical fiber was proposed. But it was impossible to realize the reproducibility of signal detection by the method, because of extreme signal intensity change in case of a little change of surrounding temperature.

In this paper, a new signal detection method (Heterodyne detection method) is proposed. A series of wind tunnel tests was carried out using the new method. The results of the tests are summarized as follows:

- (1) The wind tunnel tests were carried out in order to confirm the proposed new method to be appropriate. The results made it clear that the reproducible and stable operation of the method independent on the surrounding conditions would be possible.
- (2) A smaller tension of an optical fiber is desirable because a high signal-to-noise ratio can be obtained. An improvement of a signal-to-noise ratio of the new method could be possible by a proper vortex generator.
- (3) A level of a signal-to-noise ratio of the new detection method shows periodic and steep changes with regard to wind speed. The phenomenon happens by the hydromechanical resonance of an optical fiber.
- (4) In the resonant phenomenon, a vortex shedding frequency locks in the resonant frequency of the optical fiber. The lock-in phenomenon makes it very difficult to measure a flow rate from a vortex shedding frequency. An experiment was carried out in smaller tension condition of optical fiber, and the resonant phenomenon were proved to be suppressed considerably.

The basis for optimal design of the optical fiber flow rate sensor was obtained by the results of the wind tunnel tests.

1. 緒 言

カルマン渦現象を利用した流速センサあるいは流量セン

* 電子技術総合研究所

** 住友電気工業株式会社

*** 明治大学理工学部

原稿受理 平成5年1月11日

春季講演会において講演 平成5年5月19, 20日

サに関する研究はすでに1950年代の中頃から船舶の対流速度の測定を対象として志波および山内らによって先駆的に行われている¹⁾。その後1960年代の後半から盛んに研究が行われ実用化の域に達している^{2)~4)}。これらの研究においてはカルマン渦周波数(以後単に渦周波数と呼称)の検出器あるいは検出体として加熱白金線等が用いられている。近年光ファイバを検出体として用いる試みはいくつか行われている^{5),6)}。しかしそれを用いて流速計測のみならず流速分布計測を実現する技術開発の研究は見当たらなかった。

前報では直交する2つの偏波モードのレーザ光を独立に通すことのできる偏波保存光ファイバを渦周波数の検出体に用いることによって長距離にわたる流速計測および流速分布計測ができることについて述べた⁷⁾。渦周波数の値は光ファイバの振動による信号のパワースペクトル（以後、単に振動パワースペクトルと呼称）が示すピークの位置の周波数（以後、単にピーク周波数と呼称）の値から得ている。基礎的な実験によって流速および流速分布計測の可能性をあきらかにした。しかし前報の信号検出方式は本来周囲のわずかな温度変化によって振動パワースペクトルのピークに関するSN比（以後、単に信号のSN比と呼称）が大きく変動する欠点があり、人為的に信号のSN比の大きい状態を見計らって計測を開始する必要があった。

人為的操作を必要とするような信号検出方式では長期自動観測の実現は望めない。再現性の良い安定した信号検出を可能にする方式の開発が不可欠である。そのような方式の開発によってはじめて信号のSN比の向上を目指すような設計検討が可能となる。このような観点から新しい信号検出方式の提起を手始めに一連の風洞実験を行った。

本報では実際の研究の過程にしたがい、つぎの順序でその結果を紹介する。

(1) 光ファイバ流速センサの設計検討の出発点を確立するため、まず温度変化などの周囲の環境条件に影響を受けにくい新しい信号検出方式を提起する。同検出方式が適切な方式であるかどうか確かめるために行った風洞実験の結果にもとづいて、周囲の環境条件によらずほぼ一定のSN比が得られることについて述べる。

(2) 風洞実験から得た信号のSN比と風速との関係について紹介し、光ファイバにかかる張力が同関係におよぼす影響について検討する。前報の成果をもとに渦発生体を用いて信号のSN比の向上を図ったので、その結果について述べる。

(3) 風速の増減に対して信号のSN比の周期的かつ急峻に変化を表す実験結果にもとづいて、それが光ファイバの共振現象によると考えられることについて述べる。同共振現象は流速が増減してもカルマン渦の周波数が変化せず光ファイバの共振周波数と同一になる所謂 Lock-in 現象をとまなうので、カルマン渦の周波数からの流速測定に大きな障害になり得る。そこで理論的な考察から共振現象を抑制する対策を提起し、風洞を用いた検証実験を行ったので、この結果について述べる。

2. 温度変動によらない流速測定の実考

前報では信号検出方式として偏光子を介して直交する2つの偏波方向に等強度 I のレーザ光を偏波保存光ファイバに入力するホモダイン検波方式を用いた⁷⁾。なお説明を容易にするため以後直交する2つの偏波方向の光を X 軸偏波光と Y 軸偏波光と呼称する。

ホモダイン検波方式においては偏波保存光ファイバの出口における X 軸偏波光と Y 軸偏波光との位相差を δ とすると干渉強度 P は次式で与えられる。

$$P \propto I(1 + \cos \delta) \quad (1)$$

カルマン渦による振動揚力 L によって位相差 δ が $L=0$ のときの δ_0 から $\delta_0 + \Delta\delta$ に変化するとすれば干渉強度 P の変化量 ΔP は $\Delta\delta$ が微小の範囲で

$$\Delta P \propto \sin \delta_0 \cdot \Delta\delta \quad (2)$$

のように与えられる。以後説明のため δ_0 を静止点位相差と呼称する。

最適な信号検出のため(2)式から光ファイバの振動によって引き起こされる干渉強度 P の微小変化 ΔP を最大にするには静止点位相差 δ_0 を $\pi/2$ に設定する必要がある。しかし光ファイバは温度や圧力の変化によってその屈折率や長さが変わり光ファイバの出口などにおける光の位相が変化する敏感な特性をもつ。 X 軸偏波光と Y 軸偏波光との静止点位相差 δ_0 も温度や圧力の変化によって変わる。したがって前報で述べた信号のSN比の大幅な変化が示すように、調整の時点で $\delta_0 = \pi/2$ としてもある時間の後周囲の温度等の変化によって δ_0 が変化し検出感度がゼロになるケースが起こる。このような観点から前報の信号検出方法に変わる新しい方法が要求された。

温度変動等の周囲の環境を回避するために提起した方式にもとづいて構成した実験システムを Fig. 1 に示す。前報の実験で用いた信号検出方式と大きく異なるところは同一の周波数の光波を干渉させて検出するホモダイン検波方式ではなく異なる周波数の光波を干渉させて検出するヘテロダイン検波方式を用いていることである⁸⁾。

干渉させる2つの光波の一方の周波数を f_0 、光変調器で f_1 だけずらしたもう一方の光波の周波数を $f_0 + f_1$ とする。前者を信号光および後者を参照光とし、偏波保存光ファイバを通過する双方の偏波面が相対的に変化しないようにするため、いずれの光も X 軸偏波光あるいは Y 軸偏波光のみとなるようにする。上記のようにカルマン渦による振動

Fig. 1 System configuration of optical fiber sensor for flow rate measurement

揚力 L によって信号光の位相 ϕ が $L=0$ のときの ϕ_0 から $\phi_0 + \Delta\phi$ に変化するとすれば、等強度 I の信号光と参照光との干渉強度 Q は次式で与えられる。

$$Q \propto I[1 + \cos(2\pi f_1 t + \phi_0 + \Delta\phi)] \quad (3)$$

中心周波数 f_1 の位相変調された電気信号を FM 検波することによって、上式の周波数変動成分として次式で与えられる電気出力 ΔQ が得られる。

$$\Delta Q \propto d\phi_0/dt + d\Delta\phi/dt \quad (4)$$

温度変化による位相 ϕ_0 の変化はカルマン渦の振動揚力 L による位相変化 $\Delta\phi$ よりも一般に周波数は小さく上式の第 1 項は小さい。大きくなったとしても周波数フィルタによる除去が可能である。したがってこのようなヘテロダイン検波方式を用いることによって信号の SN 比を増大かつ一定にして再現性のある流速の測定が期待できる。

3. 実験装置および実験方法

流体実験に用いた小型風洞の設定流速範囲は 2~20 m/s である。そのテストセクションは矩形の断面をもち内面の高さおよび幅は 30 cm、長さは 3 m である。これらの詳細は前報⁷⁾を参照されたい。小型風洞の絞り比は 4:1 で乱れ率も 1% 以内であるように設計・製作されている。計測位置であるテストセクション中央部で風速分布を計測したところ、風速 10 m/s において風速の偏差は壁面から 4.5 cm 以内の領域で $\pm 2.5\%$ 以下であった。

風洞における設定風速の測定はピトー管と差圧伝送器との組合せで行った。差圧伝送器はピトーからの差圧によって引き起こされるダイアフラムの移動も電気容量センサによって計測する機能をもつ。風速測定範囲は 0~20 m/s、計測誤差は測定範囲上限の $\pm 0.15\%$ である。差圧伝送器から出力される電気信号は 50 ms ごとに 100 回サンプリングしかつ AD 変換する。風速値は 100 回のサンプリングデータをパソコンに入力し平均化処理の後得ている。

Fig. 2 は前述のヘテロダイン検波方式を用いた計測システムの光学機器系を表す (Fig. 1 参照)。同図が示す光学機器系はすべて縦 0.9 m、横 1.8 m の除振台の上に配置され

ている。偏波保存光ファイバにできるだけ多くのレーザ光を入力するため HeNe レーザ (出力 2 mW) とレンズ (20 倍の顕微鏡対物レンズ) との距離は、レーザビームのビーム径が同光ファイバの入力端面で最小になるよう約 53 cm とした (Fig. 1 参照)。

HeNe レーザ光は Fig. 1 が示すように半透鏡で 2 分され偏波保存光ファイバに入力されない方向に向かうレーザ光は音響光学素子 (AOM) によって周波数が 80 MHz 偏移する。音響光学素子 (AOM) は超音波によりガラス中に発生した屈折率分布で光波を回折させる働きをし 1 次回折光の周波数は超音波の周波数 (80 MHz) だけ偏移する。偏移したレーザ光は偏波保存光ファイバを通過してきたレーザ光と後続の半透鏡で再結合して光検出器 (PIN フォトダイオード) に入力し信号増幅器によって 100 倍増幅する。レーザ光は光ファイバ中で受けた位相変化により中心周波数 80 MHz の位相変調波となっているので、FM 直線検波器により復調し (4) 式が示すような位相変化に比例した電気出力を得、FFT アナライザで周波数分析する。

光ファイバは前報と同様に波長 630 nm 用の楕円クラッド形偏波保存光ファイバを用いた。ナイロン被覆されたその外径は 0.9 mm ϕ である。光ファイバは風洞テストセクションの断面中央を上下に貫通させた。貫通部の上部はゴムで挟んで固定し、下部は重りで初期張力を掛けた後、油粘土で固定した。

風洞実験はまず光ファイバに張力を加えるための重りは、前報において風速にかかわらず比較的良好な SN 比の得られた 100 g と 400 g の重さのものをを用いて進めることにした。渦発生体についても前報の成果を参考にして光ファイバと同径の 0.9 mm ϕ の針金をその前方 10 mm のところに置くこととした。

4. 実験結果および考察

ピーク周波数の検出結果の代表例を Fig. 3 および 4 に示す。はじめの図は 1 回のデータ取り込みによる周波数分析の結果を表す。あとの図は 64 回の平均値を表す。64 回の平均値を得るまでの時間は約 17 秒である。設定風速は 5.8 m/s、光ファイバの初期張力すなわち重りの重さは 400 g である。両図とも振動パワースペクトルに 2 つのピークが見られる。第 1 のピークはカルマン渦の周波数に相当するピーク周波数のところに生じている。第 2 のピークの周波数はその 2 倍となっている。カルマン渦により光ファイバが左右対称に振動する場合屈折率は振動数の 2 倍の割合で変化するので、そのことが第 2 のピークの要因であると考えられる。ピーク値とその近辺の雑音成分の大きさとの比で信号の SN 比を定義すると、Fig. 3 のような 1 回毎のデータでは前報の信号検出方式の場合のようにピーク自体が検出できなくなるようなことはなかったが、雑音のため同 SN 比が 10 dB 以上変化した。しかし 64 回の平均をとると

Fig. 2 Optical instruments

Fig. 3 Vibration power spectrum (original)

Fig. 4 Vibration power spectrum (averaged)

Table. 1 Investigation on reproducibility of a signal-to-noise ratio

Velocity (m/s)	W : 100g			W : 400g		
	AV**	SD**	SD/AV(%)	AV	SD	SD/AV(%)
2	—	—	—	—	—	—
4	9.5	0.24	2.5	6.2	1.41	22.7
6	29.8	0.54	1.8	33.8	1.20	3.6
8	20.7	0.48	2.3	17.5	0.72	4.1
10	11.1	0.27	2.4	18.3	0.53	2.9
12	17.8	0.42	2.4	15.7	0.75	4.8
14	8.3	0.17	2.1	10.5	0.65	6.2
16	5.1	0.34	6.7	8.5	0.78	9.2
18	7.4	0.29	3.9	7.8	0.69	8.9
20	4.1	0.41	10.0	3.4	0.50	14.7

*) AV : Averaged Value of SN Ratio (dB)

**) SD : Standard Deviation (dB)

Fig. 6 からも見てとれるように平均によって雑音成分が減少し、信号の SN 比のばらつきも大きくて 2 dB 程度となった。

Fig. 4 と同じデータを 10 個取得し平均値と標準偏差を求めたところそれぞれ 37 dB および 1 dB であった。また第 2 のピークについては 38 dB および 0.9 dB であった。これらの程度のばらつきならば計測の時刻によらず安定した計測ができるとみなせる。そこで以後、断りのない限り 64 回の平均を前提として得た振動パワースペクトルを対象に検討を進めることとした。

Table. 1 は同一条件で 5 回の計測を繰り返し風速に対する信号の SN 比の平均的な値と標準偏差をまとめた結果を表す。同表においては 10 種の風速に対する同 SN 比の平均値、標準偏差、およびその比のそれぞれの関係が表してある。光ファイバに張力を与えるための重りの重さは 100 g および 400 g の 2 種である。

Table. 1 の意味するところについて検討した結果をつ

ぎに示す。

①信号の SN 比の平均値は 100 g と 400 g の重りの場合では異なるが風速によって大きく変わり得る。しかし 2 m/s 以外の風速では前報の信号検出方式の場合のように信号である振動スペクトルのピークが計測時刻によって雑音のなかに埋没し見えなくなるようなことはない。

②風速が 2 m/s のところは低い周波数範囲で見られるいくつかの鋭いピークをともなう大きな雑音成分によって信号の検出ができなかった。その理由は低風速のためカルマン渦による振動揚力が小さくなり、風洞各部の振動や温度変動などによる雑音成分の中に信号成分が埋没することによると考えられる。

③風速が 20 m/s のところでは信号のばらつきが大きくなり重りが 100 g でも 400 g でも信号の SN 比の平均値に対する標準偏差の値は 10% 以上となる。その値が大きくなるのは風速の増加とともに気流に含まれる雑音成分が増えることによると解釈できる。

④総体的に重りが 400 g の場合より 100 g の場合の方が信号の SN 比がばらつきが少ない。また信号の SN 比が大きい場合はそのばらつきは小さい。重りが 100 g の場合 20 m/s 以外の標準偏差が信号の SN 比の 7% 以内である。

以上より新たに提起した信号検出方式の適用によって風速や張力等に関する設計条件が信号の SN 比におよぼす影響を解明する糸口ができたといえる。

信号の SN 比の平均値は風速によって大きく変わり得るのは、Fig. 4 が示す 5.8 m/s の場合で 37 dB であったのに対し、Table. 1 の 6 m/s の場合は 33.8 dB で 0.2 m/s の差位での 3 dB 程度も違うことから伺いしれる。このような大きな変化の要因をあきらかにするためには、信号の SN 比と風速に関する詳細な関係を把握する必要がある。

風速 2~20 m/s の範囲において 0.1 m/s 程度のきざみ

で信号の SN 比と風速の関係を風洞実験で求めた。その結果を Fig. 5 および 6 に示す。はじめの図は重りが 100 g, あとの図は 400 g の場合である。両図ともカルマン渦の周波数に相当するピーク周波数における第 1 のピークと(以後, 単に第 1 ピークと呼称), その 2 倍の周波数における第 2 のピーク(以後, 単に第 2 ピークと呼称)に関する SN 比についての関係を表す。

Fig. 5 および 6 について検討した結果を以下に示す。

(1) 両図とも光ファイバの共振状態を表すと考えられる鋭い多くの SN 比の極大の山が見られる。上記のように 6 m/s 程度の風速領域で風速が 0.2 m/s 異なただけでも信号の SN 比が大きく変わるのは図中の周期的かつ急峻な SN 比の変化による。

(2) 重りが 400 g の場合の方が 100 g の場合のときよりも④で述べたように信号のばらつきが大きいのは, 信号の

Fig. 5 Relation between a signal-to-noise ratio and a flow rate ($W: 100\text{ g}$)

Fig. 6 Relation between a signal-to-noise ratio and a flow rate ($W: 400\text{ g}$)

SN 比の極大の山がより急峻でわずかな風速差でも SN 比が大幅に変わることから解釈できる。

(3) 基本的には第 2 ピークの周波数からも流速測定が可能であるが, 両図が示すように 15 m/s 以上の高風速では信号の SN 比がゼロとなり, その範囲の流速計測には使えない。しかし誤りの少ない計測の実現のため第 1 ピークの自動的な探索のときに第 2 ピークの信号を用いることは有用である。

(4) 100 g の重りの場合の方が 400 g の場合よりも全体的に高い信号の SN 比が得られる。よって光ファイバの張力を 100 g にするような設計の方が期待できる。400 g の場合 14~20 m/s の風速範囲のいくつかの領域で信号が検出できないので, 渦発生体の使用などを考える必要がある。

前報の実験において渦発生体の使用はピーク検出できる流速の範囲を大きく増大させた。この成果にもとづき光ファイバの前方 10 mm のところにそれと同径の針金を張り, 重りが 400 g の場合の風洞実験を行った。その結果を Fig. 7 に示す。同図より渦発生体の使用によって 14~20 m/s の風速範囲でもピーク検出が可能であることが見てとれる。したがって信号の SN 比の増大には光ファイバに掛かる張力の調整ばかりでなく渦発生体の適用も効果のあることが確かめられた。

100 g の重りの場合についても上記と同じ渦発生体において実験を行った結果を Fig. 8 に示す。Fig. 5 が示す関係と見比べると第 1 ピークではとくに 12 m/s 以上の高い風速範囲において 10 dB 以上の SN 比をもち良好な計測が期待できることが読みとれる。また渦発生体を適用しない第 2 ピークのみでは 14 m/s 以上の風速測定は不可能であったが渦発生体の適用によって少なくとも 20 m/s までの風速測定が可能となる。したがって渦発生体は重りの重さの大小によらず光ファイバの部分における渦振動を強調する働きがありその結果信号の SN 比を増大させる有効な手段になり得るといえる。

ところで(1)で述べた周期的かつ急峻な SN 比の極大の山が Fig. 5~8 のすべてにおいて現れている。重りが 400 g の場合の低い風速領域(2~8 m/s)に対する信号の SN 比およびピーク周波数の関係を Fig. 9 に示す。これらはいずれも第 2 ピークに関するものである。第 1 ピークについても同様な関係を得ている。光ファイバの共振現象についてはいずれのピークでも吟味できるが, 以下ではより急峻な第 2 ピークに関する Fig. 9 などの関係にもとづいて検討する。

Fig. 9 から流速の増大にともないいくつかの流速範囲で信号の SN 比が鋭い変化を表す一方, 図中の矢印“↓”が指し示すようにピーク周波数が一定となることが読みとれる。このような傾向は光ファイバの共振現象によって説明できる。すなわちカルマン渦の周波数が共振周波数と一致すると流速が増大しても変化しない所謂 Lock-in 現象を

ともなうからである³⁾。

光ファイバのように張りわたされた弦が共振しているときの周波数はほぼ次式で与えられる⁹⁾。

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

上式は長さ L 、線密度 ρ の弦を力 T で引っ張り、両端を固定して横振動させたときの弦の n 番目の固有振動数 f_n を与える式である。光ファイバのような弦の場合は大きな内部摩擦のような要素はないので共振周波数は上式で計算しても差し支えないと考えられる。 $n=1$ の場合の固有振動数 f_1 は基本振動数と呼称される。鋭い共振現象は基本振動数の整数倍のところで生じるので、Fig. 9 のような周期的かつ急峻な信号の SN 比の変化を表す振動スペクトルを得た場合、隣接する SN 比の極大の山の間の周波数の差が

Fig. 7 Relation between a signal-to-noise ratio and a flow rate obtained by using a vortex generator ($W: 400 \text{ g}$, $d: 0.9 \text{ mm}$, $L: 10 \text{ mm}$)

Fig. 8 Relation between a signal-to-noise ratio and a flow rate obtained by using a vortex generator ($W: 100 \text{ g}$, $d: 0.9 \text{ mm}$, $L: 10 \text{ mm}$)

基本振動数 f_1 に等しければ共振現象であるとみなせる。

光ファイバの共振現象が生じてるかどうかについて検討するため、2種の重り (100 g, 400 g) を用いておこなった風洞実験の結果から得た隣接する信号の SN 比の極大の山の間の周波数の差と風速の関係を Fig. 10 に示す。同図から隣接する極大の山の間の周波数の差が風速とともに増大することが読み取れる。このような傾向は気流中で光ファイバが風圧を受けて実効的な張力が増大するためであると考えられる。風速が 4 m/s の場合同周波数の差はおもりに 100 g および 400 g のそれぞれに対し 230 Hz および 300 Hz 程度である。風速がゼロの場合は光ファイバに掛かる張力は重りで与えた初期張力に等しいと考えられる。そこで Fig. 10 が表すように最小 2 乗法を用いて隣接するピークの周波数の差と流速との関係を示す回帰直線をもとめ外挿によって風速ゼロの場合の周波数 (以後、単に外挿周波数と呼称) を得ると、図中に示すように重りが 100 g の場合は 125 Hz, 400 g では 227 Hz となる。

Fig. 9 Examination of a flow rate measured by optical fiber sensor with a vortex generator ($W: 400 \text{ g}$, $d: 0.9 \text{ mm}$, $L: 10 \text{ mm}$)

Fig. 10 Dependence of a frequency interval on a flow rate

光ファイバの長さ $L(=30\text{ cm})$ および線密度 $\rho(=0.71 \times 10^{-3}\text{ kg/m})$, ならびに張力 L は 100 g あるいは 400 g の重りによってのみ与えられるとしてそれらの値を(5)式に代入すると基本振動数はそれぞれ 62 Hz および 123 Hz となる。Fig. 10 は第2ピークに関する関係を表すので、これらの基本振動数を2倍にして外挿周波数の値と比較すると、とくに 100 g 重りの場合は両者の値はよく一致し 400 g の場合でもそれらの差異は8%以内であることが分かる。

4種の重りに対する外挿周波数の関係をFig. 11に示す。図中には張力 T が重りのみによるとして(5)式から基本振動数をもとめさらに2倍して得た理論的な関係も実線で示してある。

Fig. 11 について検討するとつぎのことが分かる。

(a) 光ファイバの固定方法の差異にもよらず外挿周波数は重りすなわち初期張力の増大とともに高くなる傾向をもつ。このような傾向は両端固定の場合の理論的な関係式((5)式)が表す傾向と一致する。

(b) 重り 100 g のケースにおける外挿周波数は理論値よりも大きいとは逆に、 200 g 以上のケースでは理論値より

Fig. 11 Examination of a resonant phenomenon

Fig. 12 Relation between a signal-to-noise ratio and a flow rate obtained by using a vortex generator ($W: 0\text{ g}$, $d: 0.9\text{ mm}$, $L: 10\text{ mm}$)

も小さいという一定の傾向が見られる。しかし理論値との差異も大きくて15%程度でほぼ一致している。

これらによりFig. 9が表す信号のSN比の周期的かつ急峻な変化は、光ファイバの共振現象によるものと見なせることが分かり、今後の検討の方向があきらかになった。ただし、(b)で述べた一定の傾向については、風洞の性能や風速の増加とともに気流に含まれる雑音成分が増大するなどのことを考慮すると断定できないので今後の課題とした。

(5)式の示すところによると張力 T がゼロであれば共振現象は生じない。ゼロでないまでも T が小さければ弦振動の復元力が当然小さくなるので、気体をもつ粘性の効果すなわち流体抵抗が無視できなくなり、Fig. 9が示す信号のSN比が急峻に変わるようなことは起こらないと予想できる。そこで重りを使用せずすなわち初期張力ゼロでの光ファイバの両端を固定した状態で風洞実験を行った。この結果をFig. 12~14に示す。

Fig. 13 Relation between a peak frequency and a flow rate obtained by using a vortex generator (2nd component, $W: 0\text{ g}$, $d: 0.9\text{ mm}$, $L: 10\text{ mm}$)

Fig. 14 Examination of a flow rate measured by optical fiber sensor with a vortex generator ($W: 0\text{ g}$, $d: 0.9\text{ mm}$, $L: 10\text{ mm}$)

以下ではまず Fig. 12 の意味するところについて検討する。

(A) 重りに関する条件のみが異なる Fig. 8~9 とを見比べると、Fig. 7, Fig. 8, Fig. 12 の順に信号の SN 比の急峻な変化が减小する傾向が見てとれる。Fig. 7 および 8 は重りがそれぞれ 400 g と 100 g のケースである。したがって重りすなわち初期張力を小さくすることによって急峻な SN 比の変化をともしう鋭い共振現象が抑制できることが分かる。この理由は上述のように光ファイバの復元力に比してその流体抵抗が増大することによると解釈できる。

(B) 重りがゼロの場合では、100 g あるいは 400 g の場合と異なって約 12 m/s 以上の風速で第 2 ピークの信号の SN 比は小さくゼロになるケースが生ずる。

(C) 第 2 のピークに関する関係において共振らしい現象が見られるのは、重りすなわち初期張力がゼロであっても風速がゼロでなければ上述のように実効的な張力が働く効果によると考えられる。

鋭い共振現象の抑制は上記の Lock-in 現象の消去を促す。Fig. 9 との比較のため同一の風速範囲 (2~8 m/s) に対する第 2 ピークの信号の SN 比およびピーク周波数の関係を Fig. 13 に示す。同図より単純な直線的な関係と異なる細かい不連続な変化は残るが、あきらかに Fig. 9 の矢印“↓”が指し示すようなピーク周波数の平坦部分がなくなり Lock-in 現象が顕著でなくなっていることが読みとれる。第 1 ピークについても同様な結果を得ている。よって流速測定にとって望ましいピーク周波数と風速との関係が得られることが期待できる。

重りを使用しないで得た第 1 ピークに関するピーク周波数と風速との関係にもとづいて求めた風速 (以後、設定風速との区別のため測定風速と呼称) と設定風速との関係を Fig. 14 に表す。図中のグラフは 2.1~20 m/s の風速の範囲で得た 150 個の実験値を単につなぎあわせたものである。測定風速は Roshko の式¹⁰⁾ すなわち次式を用いて得た。

$$f_v = (0.212 - 4.5/R_e)U/d \quad (6)$$

ただし f_v : カルマン渦周波数, U : 流速, d : 光ファイバ径, R_e : レイノルズ数である。

Fig. 14 から測定風速と設定風速との関係をグラフは細かくギザギザした線で表されるが、同図の右上の角から左下の角を結んで得られる理想的な直線上をほぼ通ることが見てとれる。したがって Lock-in 現象は起きているがそれが小さくなり計測精度が向上したことが読みとれる。理想的な直線を敢えて描かなかったのは、その直線と図中のグラフが重なり同グラフが見にくくなるからである。最小自乗法を用いて回帰直線の傾き a と分散 s を求めた結果、図中で示すように回帰直線の傾斜は理想的な直線の傾きに対して 2% 程度、分散は約 0.16 (m/s) である。これらの数値は前報で述べた信号検出方法 (ホモダイン検波法) で得た結果と同程度である⁷⁾。したがって計測精度の観点から

も本報で起したヘテロダイン検波法の採用は無理のないことが分かった。

なお 0 g と 100 g の中間の 50 g の重りを用いて行った実験でも同様な結果を得、光ファイバの共振現象を抑制し計測精度の向上を図るにあたっては光ファイバにかかる張力を小さくする設計を行うことが有効であることが分った。しかし光ファイバに加えるべき張力の最適値は、上述のように光ファイバの流体抵抗との兼ね合いから決まると考えられる。よって光ファイバの張力を最適なものにするには流体抵抗の大小を左右する光ファイバあるいはそれを内蔵するケーブルの断面形状と張力との関係をあきらかにする必要がある。

5. 結 言

本報で得た結果を以下に示す。

(1) 前報のホモダイン検波方式の短所を克服するため、周囲温度の変動によらない信号検出が行えるヘテロダイン検波方式を新たに提起した。この方式を用いて風洞実験を行い、カルマン渦による光ファイバの振動パワースペクトルの大幅な変化は回避でき同一風速において同スペクトルの SN 比がほぼ一定になることをあきらかにした。この結果から信号検出の自動化、ならびに流速や光ファイバに加える張力等が信号の SN 比に与える影響の解明を行う基礎を得た。

(2) 振動パワースペクトルの多くに 2 つのピークが得られた。第 1 のピークはカルマン渦周波数のところで生じ第 2 のピークはその 2 倍のところで生じた。この理由は光ファイバの振動が左右対称に生ずる成分をもつ場合屈折率変化が方向性によらないので振動周波数の 2 倍になることによる。

(3) 光ファイバの張力による影響をあきらかにするため、前報で良い結果を得た 2 種の重り (100 g と 400 g) を用いてそれぞれの信号の SN 比と風速との関係を得る風洞実験を行った。100 g の場合には風洞で設定可能なすべての風速範囲 (2~20 m/s) で信号検出ができるが、400 g の場合には 15 m/s の付近で信号検出ができないケースが生ずることが分った。そこで前報の成果にもとづき光ファイバと同径の渦発生体をその前方 10 mm のところに設置し実験を行ったところ、400 g の場合では 100 g の場合と同様に信号の SN 比が増大するとともに 15 m/s の付近でも信号検出ができることが分った。

(4) 信号の SN 比が増大するのは、渦発生体と光ファイバから放出されるカルマン渦の周波数が同じであるため、光ファイバが渦発生体によるカルマン渦によっても同一の周波数で揺られ、その周波数の振動が強調されることによるとみなせる。そこで以後同一の渦発生体を用いて実験を続けることとした。

(5) 風速の増減によって信号の SN 比が周期的かつ急

峻に変化する。この変化が光ファイバの共振現象によるものであるかどうかをあきらかにするため風洞実験の結果をもとに隣接する SN 比の極大の山の間の周波数の差の値と流速との関係を得たところ、同周波数の差が流速の増加とともに増大する傾向があきらかになった。この傾向は風圧の増加にともない光ファイバに掛かる実効的な張力が増大することによると考えられる。

(6) 上述の関係を用いて流速ゼロのポイントでの周波数の差を外挿によってもとめ弦振動の理論式が与える共振周波数の値と比較した結果ほぼ一致することが分った。4 種の重り (100, 200, 300, および 400 g) を用いて行った風洞実験をもとに同周波数の差と張力との関係を得、弦振動の理論式が与える共振周波数と張力との関係とを比較したところ双方の関係がほぼ一致し同一の傾向を示すことがあきらかになった。したがって上述の流速の増加にともなう信号の SN 比の周期的かつ急峻に変化は光ファイバの共振現象によるといえることが分った。

(7) 弦振動の理論式の示すところによると張力ゼロのとき共振周波数はゼロになるので共振現象は起こらない。張力がゼロに近づくにつれて共振現象が起こりにくなりその効果も小さくなると期待できる。そこで重りを用いないで風洞実験を行った結果、共振現象による Lock-in 現象の効果がほぼ除去でき計測精度の向上が図れることが分った。重りを 50 g にした場合でも同様な結果を得た。光ファイバにできるだけ張力のかからないようなケーブルの設計・製作は共振現象を抑制するために有効である。

以上よりヘテログイン検波方式を用いることにより、光ファイバセンサケーブルに関する適切な振動力学的設計条件、流体力学的設計条件、光学的設計条件を得るための出発点ができた。これらの設計条件を得るためいくつかの結果を得たがいずれも小型の熱風風洞を用いた実験から得たもので自ずから限界があった。大型の水槽あるいは風洞を用いて実験を行い、光ファイバの太さやその振動部分の長さなどの効果をあきらかにし実用的な光ファイバケーブル

についての設計資料を得ることが当面の研究課題であると考えている。

本研究は科学技術振興調整費「海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究」において行われた。研究推進の過程で明治大学理工学部根本俊雄教授から貴重な御助言および御支援を頂いた。ここに深い感謝の意を表します。また風洞実験の実行にあたって御支援頂いた電子技術総合研究所環境エネルギー研究室田中忠良室長に対し、ここに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 志波：新型速度計，造船協会論文集，第 97 号，1955 年 5 月，pp. 127-134
- 2) 土屋，尾方，植田：カルマンうずを利用した流量計，日本機械学会誌，第 72 巻，第 607 号，1969 年 8 月，pp. 1072-1080
- 3) 山崎，石川，栗田：カルマン渦流量計，計測と制御，第 10 巻，第 3 号，1971 年 3 月，pp. 173-188
- 4) 栗田：カルマン渦流量計，計測と制御，第 18 巻，5 号，1979 年 5 月，pp. 407-412
- 5) J. H. Lyle, C. W. Pitt: Vortex Shedding Fluid Flowmeter using Optical Fiber Sensor, Electronics Letters, Vol. 17, No. 6, March 1981, pp. 244-245
- 6) P. A. Leilababy, J. D. C. Jones, A. D. Kersey, M. Corke, D. A. Jackson: Monomode Fiber Flowmeter, Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors, Stuttgart, Sept. 5-7 1984, pp. 35-38
- 7) 飯高，佐藤，村田，石田：海洋光ファイバ流速センサに関する基礎研究(第 1 報)，日本造船学会論文集，第 171 号，1992 年 6 月，pp. 251-261
- 8) 佐藤，飯高：光ファイバ流速センサに関する検討その 2 (風洞実験)，電気学会計測研究会資料，IM-92-29，1992 年 7 月，pp. 1-10
- 9) スレーター，フランク (柿内訳)：力学，丸善，1960，pp. 127-129
- 10) A. Roshko: On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets, NACA Report, No. 1191, 1954