

Abstract: An anemometer using scintillation of laser beams is developed. The setup propagates He-Ne laser beam through the atmosphere and filters out a spatial frequency of the scintillation of the propagated beam. As the beam pattern is moved by the wind, output signal of the filter has information of wind velocity and direction. In-door experiments are carried out and tell us that the anemometer is enable to measure the wind velocity and direction of the constant wind.

1. まえがき

二酸化炭素, メタン, 亜酸化窒素さらに水蒸気のように赤外光線を吸収する性質を持つガスは, 地球の熱収支を担っており, 地球上の生物にとって重要な物質である. しかし, それらのガスの大気含有率のバランスが崩れつつあり, それに伴う地球の温暖化が社会的な問題になって久しい. このような背景から温室効果ガスの発生機構を知る上で, その発生量を把握することが必要となっている.

筆者らは半導体レーザを用いた大気ガスの分光分析法に関する研究を続けているが, 我々の提案する方式では, 高い時間分解能で, 無侵襲かつ高精度に広い範囲の空間平均としての温室効果ガス濃度を測定することが可能である¹⁾. 現在, この測定器を応用した相関法によるガスの発生量測定について研究している. ここで問題になるのが空間平均的な風向風速の測定方法であるが, 我々は光のシンチレーション現象を利用して風速を測定することを試みた. そこで本稿では, 風速計の原理および試作した実験装置装置を用いて行った測定実験の結果について報告する.

2. 測定原理

擾乱大気中を透過した光の受光面における受信光強度のパワースペクトルの周波数帯域は, 風速に比例して変化するので²⁾, 受信光強度分布の中のある空間周波数成分に注目し, その成分の時間変動を観測することにより風速を測定できることが考えられる.

Fig. 1 の破線は, He-Neレーザ ($\lambda=0.632\mu\text{m}$) を伝搬させたときの30m先の受光面における受信光強度の空間スペクトルを規格化したものである. 伝搬距離を30mとした場合, 100m^{-1} 付近にピークが現れる. 従って, この空間周波数に, 通過特性をもつ空間フィルタを設計すれば, 効率良く受信光強度の空間的变化を検出することができる. このとき, フィルタ上を大気の流れの影響を受けたビームパターンが移動すれば, 受光素子の出力は受信感度とビームパターンの畳み込み積分を行った結果となり, その出力は風速に比例して周波数が

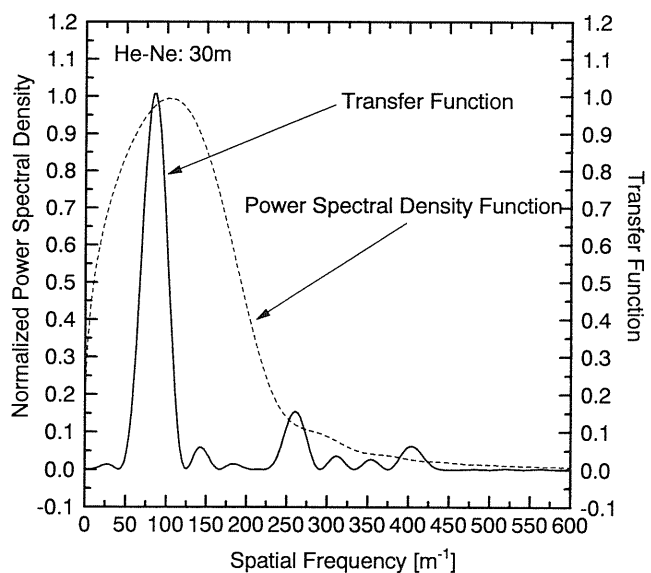


Fig.1: Theoretical spatial power spectral density of the intensity fluctuation of He-Ne laser and the transfer function of the spatial filter.

高くなる。従って、フィルタ出力信号持つ基本周波数を知れば、風速を算出できる。

3. 受光装置

実験装置の受光器は、空間フィルタを構成するようにフォトダイオードを間隔を空けて直線状に配した。各フォトダイオードからの出力信号はアナログ電子回路により順番に+1, -1の過重をかけられ、結果としてFig. 2に示すような重み関数を持つ。更に、各出力電圧をアナログ電子回路で総和することで畳み込み積分を行う。

重み関数の周期 $2d_0$ は、使用するフォトダイオードの大きさに依存するが、本測定装置では、光電子社製のフォトダイオードSP-101を選択した。このダイオードは素子の直径が3mmであり、従って、空間フィルタの1周期 $2d_0$ は12mmである。乱れの外部スケールの存在により、必要以上に長いフィルタは無意味であることと、ビームパターン内に受光部が完全に包含されることを考慮し、SP-101の素子数を4個(2周期:24mm)とした。Fig. 1の実線はフィルタの空間周波数伝達関数を描いたものである。重み関数が矩形であるために、サイドローブが生じ、打ち切りのために各ローブの幅が広がっているが、ローブの広がりによるローブ同士の干渉の影響は無い。この場合、伝搬光路を30m程度にとれば、空間フィルタの主ローブは乱れの大きな空間周波数に当たることが分かる。このとき、第一サイドローブは、乱れの大きさが最大値の10%程度となる空間波数に現れており、このサイドローブによる検出信号の大きさは、主ローブによるその約1%程度に抑えられることが期待できる。

Fig. 3はフォトダイオードの配置を正面から見た場合の概略図である。この図のように実際の受光部はa~dの4組の受光アレイがあり、15個のフォトダイオード(フォトダイオード b_2 と d_2 は共通)で4つのフィルタを構成している。実際の測定では、#c, #dで垂直方向の風速を、また#a, #bで水平方向の風速を検出する。フィルタ#aとフィルタ#b、フィルタ#cとフィルタ#dは1/4周期ずらして配置されており、お互いの出力信号の位相差の正負により風向を検出する。例えば、上昇する流れを検出した場合、フィルタ#dの出力信号はフィルタ#cの出力信号との同一周波数成分の間に-90度の位相差が生じ、下降気流であれば+90度の位相差となる。同様に、受光部に向かって左からの流れを検出すればフィルタ#aとフィルタ#bの出力信号の間に-90度の位相差が生じ、逆の場合+90度の位相差となる。

4. 屋内測定実験および結果

この受光装置を用いて本学電子・電気棟の廊下にて屋内測定実験を行った。シンチレーション光源として、He-Neレーザを使用し、伝搬光路長は30mに設定した。レーザ光線はビームエキスパンダとレンズによりビーム径を広げ、伝搬途中でのビーム広がりの影響を抑えた。この結果、受光部におけるビームの直径は約50mmとなり、受光部のフォトダイオード・アレイをビームパターン内に完全に収めることができた。レーザ光線は床上1mの廊下の中央を伝播させた。廊下の大気は静穏であり、30m程度の伝搬ではシンチレーションが発生しにくいので、光源から15m離れた伝搬光路中央の床上に電気ヒーターを置き、上昇気流を発生させた。また、ヒーター上方に超音波風速計を設置し、測定環境の風向風速の代表値を計測した。

Fig. 4はヒータによる上昇気流を500ms間にわたって測定したときのフィルタ各チャンネルの出力である。

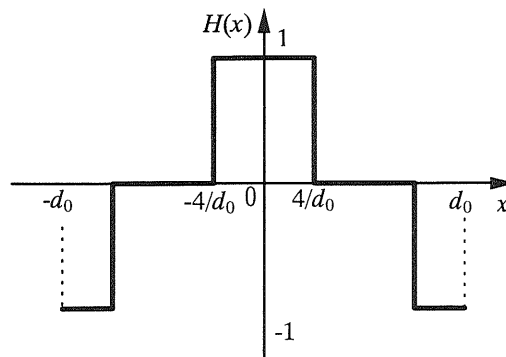


Fig.2 Weighting function of the spatial filter

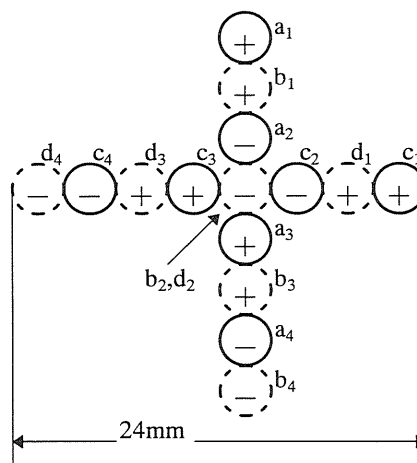


Fig.3 Front view of photo-diodes' allocation.

Fig.4(a)は水平方向，Fig.4(b)は垂直方向の出力結果である．これらの時系列データの直角位相スペクトル（クオドラチャスペクトル）と同相スペクトル（コスペクトル）を計算したものがFig.5である．水平方向成分のスペクトルFig.5(a)において，空間フィルタの構成上，フィルタ# aの出力信号の各周波数成分がフィルタ# bの出力信号の同一周波数成分に対して -90 度の位相ずれを起こした場合，つまり，左方からの風を検出した場合，直角位相スペクトルは正值を示す．また，垂直方向成分のスペクトルFig.5(b)では，上昇成分を検出した場合，直角位相スペクトルが正值を示す．Fig.5(a)においては，顕著なピークが観測できないが，(b)では，直角位相スペクトルに $20\text{Hz}\sim 60\text{Hz}$ にかけて4つの正值のピークが見られる．測定原理に基づけば，上方への空気の流れが支配的であるという結果を示している．

次に風速であるが，スペクトルに複数のピークが存在する理由として， 500ms 間で風速の変動があったことが考えられる．そこで，時系列データを 125ms 毎の4つの区間に分割し，それぞれの観測区間の直角位相スペクトルを計算したところ，各区間に対して，1つの正值のピークが現れた．それぞれのピーク周波数と空間フィルタの周期から風速を計算し描画したものがFig.6(a)である．また，Fig.6(b)は，超音波風速計による垂直成分と水平成分の風向風速の測定結果である．水平方向成分に関しては，超音波風速計では風速を観測している．試作したシンチレーション風速計では直角位相スペクトルのピーク周波数を特定することができず，風速を算出することができなかった．一方，垂直成分に関しては，本装置で測定した風向風速が，超音波風速計の指示値に近いものとなった．

垂直成分では本装置による測定結果と超音波風速計の指示値がほぼ一致し，水平成分において大きな相違が生じた理由として，測定方式の次元の違いが挙げられる．本装置が光軸に沿った一次元の測定をしており，光軸方向の空間平均風速を求めているのに対し，超音波風速計は極限られた狭い区間の風速を観測している．Fig.6(b)において，局所的な観測結果である超音波風速計の示す風向が一定ではないことが判る．このことを考慮すれば，水平成分に関しては光軸方向の空間的な平均風速の成分はほとんどなく，その結果，本装置で

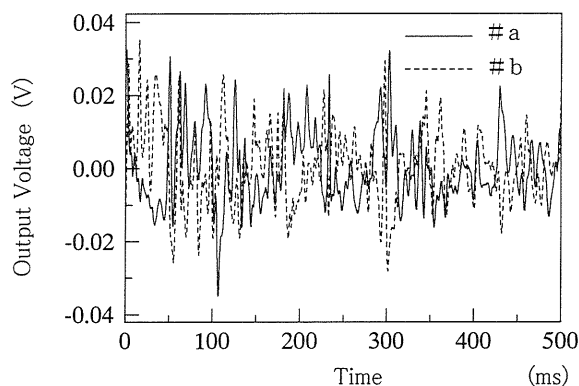


Fig.4(a): Outputs of the spatial filters for the horizontal wind.

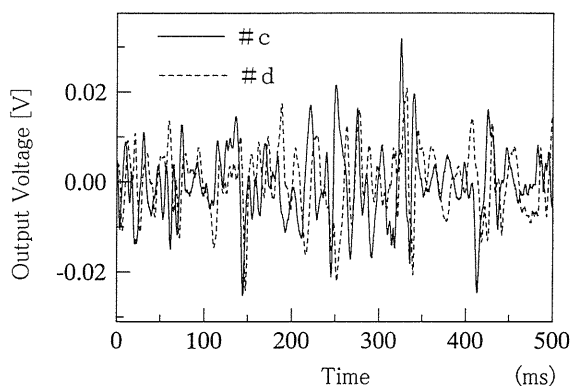


Fig.4(b): Outputs of the spatial filters for the updraft.

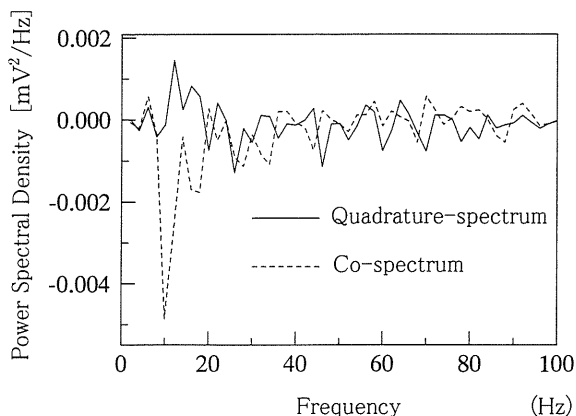


Fig.5(a): Quadrature-spectrum and Cospectrum of the horizontal component shown in Fig.4(a).

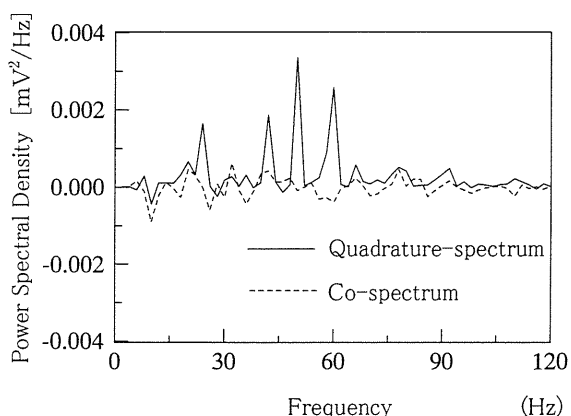


Fig.5(b): Quadrature-spectrum and Cospectrum of the vertical component shown in Fig.4(b).

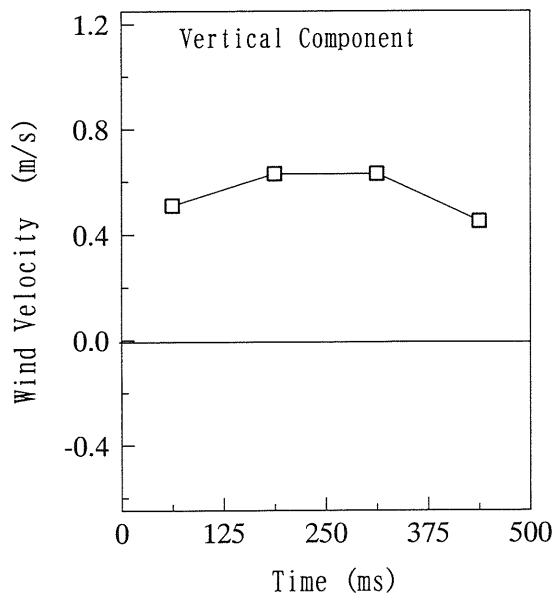


Fig.6(a): Vertical wind velocity obtained from peak frequencies of the quadrature-spectra.

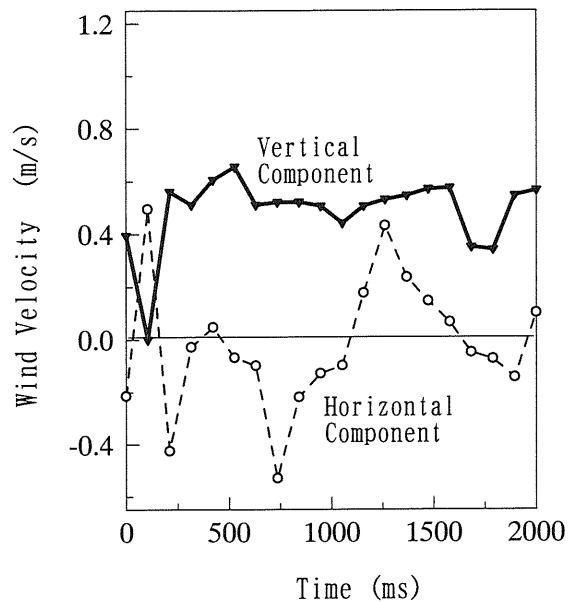


Fig.6(b): Wind velocity monitored with an ultrasonic anemometer.

風向風速を観測できなかったと考えられる。一方、垂直成分では、ヒーター上空の上昇気流が非常に強いために、一次元観測結果においても極端に風速の速い特定の地点の風速が支配的となったと推測できる。しかし、確証を得るには、風向風速の多点同時観測を行い、その結果と本装置の測定結果を比較検討する必要がある。

5. むすび

本稿では、レーザ光線のシンチレーションを利用した風速測定装置について、測定原理と、測定手法の有効性の確認のために試作装置を用いて行った、屋内動作実験の結果について述べた。

実験の結果、本装置では上昇気流のような比較的定常な気流の場合、平均風速、風向を測定することができる可能性があることが判った。しかし、本装置が実環境で使用できるかを確認するためには、超音波風速計などを用いた同時多点観測を対照実験として行うことが必要である。更に、最適測定時間窓の設定、風速、風向情報抽出のオンライン化などを行う必要がある。測定時間窓に関しては、現在、情報量規範に基づいた測定時間窓の設定を検討中である。また、アナログ信号処理による情報抽出を行っているが、将来的には、DSPなどを用いてデジタル信号処理による方法も行う予定である。更に、CCDカメラを用いて、2次元空間フィルタを構成することを検討している。

謝辞

本実験を行うにあたり、鴨川 歩氏、濱野治男氏（現（株）清水合金製作所）の協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- (1)平岡孝之, 香川直己, 王 明, 和田修己, 古賀隆治, “大気中微量ガス濃度測定のための高速波数掃引方式TDLASシステムの開発,” 電気学会論文誌, Vol.117-C, No.11 (掲載予定) .
- (2)V.I.Tatarskii, ”The effect of the turbulent atmosphere on wave propagation,” Israel Program for Scientific Translation Ltd.(1971).