

# レーザー光線を用いたガスフラックスモニターの開発

香川直己

Development of a Laser Gas Flux Monitor

Naoki KAGAWA

## ABSTRACT

Latest eddy correlation method is useful to monitor the gas flux because of its fast response. However, over or under estimation of the gas flux might take place due to point detection. Therefore the author has attempted to expand the measurement span of the common method into the column space. Designed laser absorption spectrometry (LAS) system consists of two equipments, which are the quick scanning LAS and the scintillation velocimetry. In this paper we report structure of the new flux monitoring system and test results of the simultaneous monitoring of humidity and wind velocity in the open site.

キーワード：レーザー吸収分光分析法，半導体レーザー，シンチレーション，ガスフラックス  
Keywords: laser absorption spectrometry, diode laser, scintillation, gas flux

## 1. まえがき

温室効果ガスの発生量を計測する手法として，ガス濃度変動と風速変動の相互相関からガスフラックスを算出する渦相関法がある．現行の渦相関法では，ガス検出にサンプリング法を用い，また，風速測定には超音波風速計を用いており，共に測定空間が局所的である．従って，測定値の局所的な偏りを低減するためには濃度，風速の観測地点を高くする必要があり，一般的に観測塔を設けて測定を行っている．

筆者はこの渦相関法を応用し，吸収分光分析法にレーザー光線の大気揺らぎによるシンチレーションを利用した風向風速計測法を結合することで，一次元空間のガスフラックスを計測することを試みている．これは，高速波数掃引方式の吸収分光分析システムのプローブビームが大気伝搬したのちの吸収量から得られるガス濃度と，レーザービームのシンチレーションの周波数成分から得られる風速情報を同時計測し，実時間で相関演算するものである．提案する測定法では，レーザーの光学的特性を利用し，光軸上の大気に含まれるガスの濃度いわゆるカラム濃度と，同一空間中の大気の流れを同時計測できることから，被測定空間を支配する大気の主たる流れに依存するガスフラックスを観測することが可能となると考えられる．従って，従

来の渦相関法に必要な観測塔等の大規模な施設が不要となり，機動性の高いガスフラックス測定が行えることが期待できる．

現在，個々に開発を進めてきたシンチレーション風速計[1, 2]と高速波数掃引方式 LAS システム[3, 4]を統合し，新しくガスフラックス計測を目的としたレーザー吸収分光分析装置を構築している．本稿ではシステムの概要および，大気中の湿度を対象として行った予備実験の結果について述べる．

## 2. システム

### 2. 1 概要

図1に設計，開発中のガスフラックスモニターの概略を示す．この内，DSPによる信号処理部が未完成である．光源は目的とする被測定ガスに応じた半導体レーザーが選択できるが，製作した装置では，波長1.3 $\mu\text{m}$ の分布帰還形半導体レーザーを光源としている．このレーザーは光通信用に開発されたものであり，出力光はシングルモードファイバから出射され，その出力は2mW以下である．ファイバー先端からの出射ビームをコリメータにより，直径数mmの平行ビームに整形した後，ビームスプリッタでパワー分割し，一方は出力パワーモニター用の参照枝とする．他方は，ビームエキスパンダで直径20mmの平行ビームに整形し，測定

プローブ光として大気中に出射する。半導体レーザーモジュールはPID温度コントローラで温度制御し、レーザー出力の中心波長の設定および安定化を図っている。また、補助機構として、プローブ光線と同軸に可視光半導体レーザーを出射できるようにし、光軸合わせを簡便にしている。出射系に懸かる光学素子は図2に示すように、500mm四方のアルミ合金製定盤上に固定している。稼動時は樹脂製筐体で覆い、外気および外光の影響を遮蔽する。

受信系はフォトダイオードからなる受光部とアナログ演算機能を伴う光電変換回路から成っている。ここでは、シンチレーションを積極的に用いた風向風速検出とシンチレーションを抑えた吸収スペクトル検出の相反する処理を行い、それぞれに対応する2系統の電気信号を出力する。受光部は、波長1.3μmに感度中心を持つ直径4.2mmのフォトダイオードを垂直方向に4つ、水平方向に4つ十字に配列した構造になっている

る(図3)。これは、後段の光電変換回路におけるアナログ演算を介して受信ビーム断面内における2次元空間フィルタを構成するためであり[1]、レーザー光線のシンチレーションを用いた風速計測のための中心機構となる。

## 2.2 分光分析系

半導体レーザーは出射光の波長(波数)を掃引するために鋸歯状の繰り返し電流波で駆動される。電流を任意の最大値 $I_{max}$ からレーザーのしきい値電流 $I_{th}$ まで減少させるとレーザー波長は短波長(高波数)側に推移する。吸収スペクトルの取得はこの期間で行い、これに要する時間が掃引時間となる。

次に、吸収線の最適掃引時間について述べる。吸収分光分析法は Lambert-Beer の法則

$$P_T(\nu) = P_0(\nu) \exp[-\chi(\nu)] \dots \dots \dots (1)$$

に基づく。ここで $P_T(\nu)$ は受信光パワ[W],  $P_0(\nu)$ は

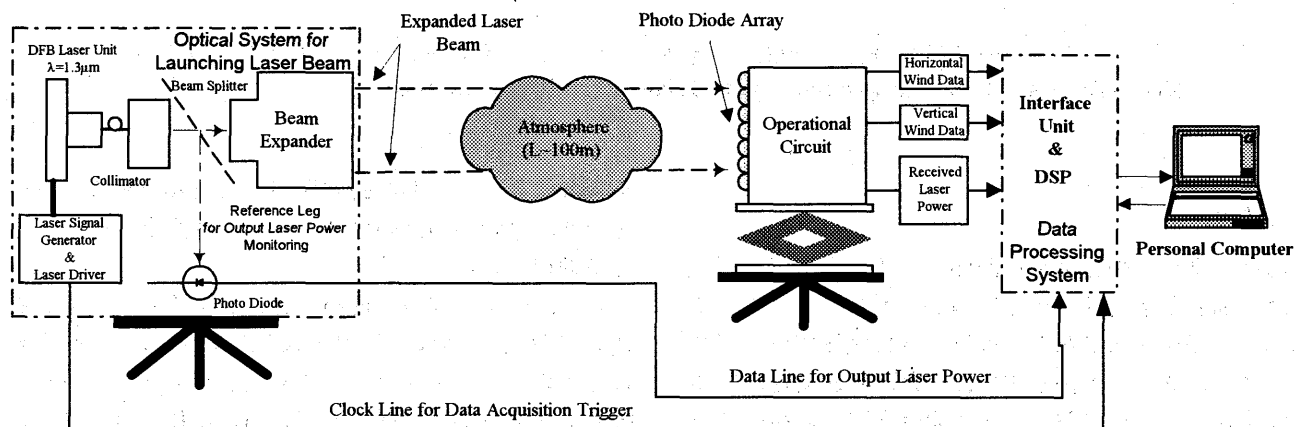


図1 レーザ光線を用いたガスフラックスモニターの概略構成  
Fig.1 Schematic diagram of the developed laser gas flux monitor.

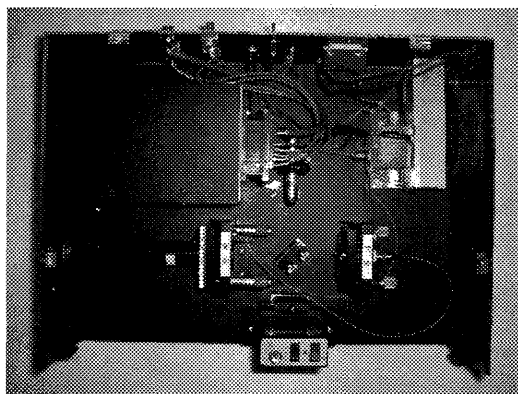


図2 上部より見た送信用光学系  
Fig.2 Top view of optical source unit.

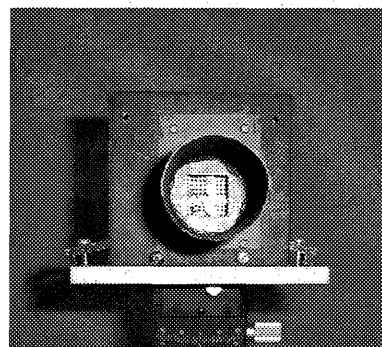


図3 正面より見た受光部  
Fig.3 Front view of receiver.

レーザ出射光パワ[W],  $\chi(\nu)$  は絶対吸収量である。これらは、全て波数 ( $\nu$  [cm<sup>-1</sup>]) の関数である。絶対吸収量  $\chi(\nu)$  はガスの種類に固有の吸収係数  $\alpha(\nu)$  [(ppm · m)<sup>-1</sup>], 伝搬光路長  $L$  [m], 及びガスの濃度  $C$  [ppm] にからなり,

$$\chi(\nu) = \alpha(\nu)CL \dots \dots \dots (2)$$

である。濃度算出には  $\chi(\nu)$  を陽にする必要があり、本システムでは、受信光パワ  $P_T(\nu)$  を出射光パワ  $P_O(\nu)$  で除した後、両辺の対数をとる。これにより,

$$-\ln\left(\frac{P_T}{P_O}\right) = \chi(\nu) \dots \dots \dots (3)$$

となる。

ここで、式(3)がシンチレーションノイズと電気系白色雑音の影響を受けたと仮定し、その状況を、絶対吸収量換算を行った後において考察するために、信号  $\chi(\nu)$  のパワ  $S_\chi$  とシンチレーションノイズの絶対吸収量換算値のパワ  $N_s$ 、電気系白色雑音の絶対吸収量換算値のパワ  $N_e$  の和で表現し,

$$S = S_\chi + N_s + N_e \dots \dots \dots (4)$$

とすると、これらの関係は図4に示すようになる[4]。なお、計算に際しては、図中に記載するパラメータを用いた。これらのパラメータは本システムの仕様と実

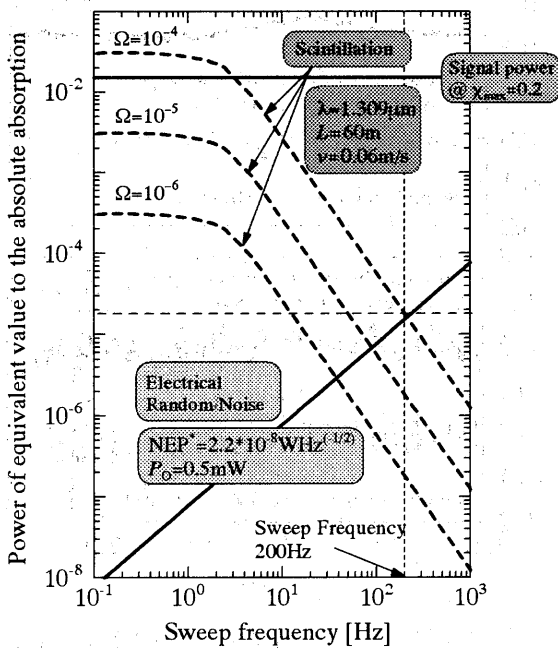


図4 掃引周波数と信号と各雑音の絶対吸収量換算のパワの関係[4]

Fig.4 Log-amplitude power of signal and noises versus sweep frequency [4].

環境で生じると推測される典型的な値である。この図より、シンチレーションノイズの影響は掃引周波数を高くすることで減少するが、同時にシステムの周波数帯域幅が広がることにより電気系白色雑音の影響が増加することをがわかる。これより、図中のシンチレーションに起因する  $N_s$  と電気系白色雑音に起因する  $N_e$  が交わる箇所が最適な掃引周波数となる。

本システムにおいては、予想される最も大きなシンチレーションノイズ ( $W=10^{-4}$ ) を想定し、掃引周波数を 200Hz とした。即ち掃引時間は 5ms である。この場合、 $N_s$  および  $N_e$  は等しく  $17 \times 10^{-5}$  である。一方、 $S_\chi$  は 0.016 となり、SN 比は約 30dB となる。

### 2.3 風速検出系[2]

空間フィルタにより濾波された受信信号の垂直成分、水平成分の各出力信号(交流電圧波)は次段のアナログ演算回路において風向と風速に対応する直流電圧信号に変換される。設計製作したアナログ演算回路(風向風速抽出回路)は移相、波形整形、位相検出操作により、入力信号の変動周期に応じた PDM (pulse density modulation) 信号列を発生し、その復調により、変動周期に対応したアナログ量を出力する。更に空間フィルタは各方向毎に 1/4 周期ずらして 2 つ準備し、空間フィルタからの各出力信号が風向に対応して相互に  $\pm 90^\circ$  の位相関係を持つ様にしてある。従って、位相検出部では 2 つの入力信号間の位相関係が  $\pm 90^\circ$  である場合だけ正あるいは負の波高値を持つ信号時系列が出力される。即ち連続性のある有意な流れがある場合だけ応答する。

## 3 システムの評価実験

### 3.1 大気中湿度変動に対する応答

分光分析系の耐シンチレーション性を評価するために、屋内において大気中湿度の計測を行った。実験は電子・電気工学科棟(3号館)3階廊下に 30m の実験光路を設定して行った。また、大気擾乱が著しい条件を作るために、レーザ光軸に沿って光源から 15m の床上に上方に向けて扇風機を置いた。

レーザの駆動電流波形は繰り返し周期を 10ms とし、10ms 毎に絶対吸収量をモニターした。また、測定時間は 2.5 秒間とした。これは、最高周波数 50Hz までの絶対吸収量の変動を 0.4Hz の周波数分解能で分析できる設定である。使用したレーザの連続可同調範囲には、大小約 8 本の吸収線が存在するが[3]、実験では、1309.0377nm に中心波長を持つ吸収線を対象とした。

図5上は自然大気中、同図下は擾乱大気中で取得した 2.5 秒間の時系列データに対して、式(3)に示した絶対吸収量換算処理を施した後の 45ms 間の吸収スペクトル列を示したものである。5ms で吸収線を 1 回

掃引しており、この期間では、水の吸収と、大気擾乱に起因するシンチレーションノイズ、そして電気系雑音の絶対吸収量換算値を含む信号成分が測定される。一方、スペクトル掃引の前後の各5ms間はレーザーの波数は一定であり、この波数は吸収の影響を受けない。従って、ベースラインからのスペクトル波高値から、正味の絶対吸収量を知ることができるが、実際の波高値検出はウェーブレットによる主成分分析により行った。これにより、レーザー駆動波形に起因して掃引終了時に現れるスパイク状の不要成分や電気系白色雑音による計測誤差の低減を図っている。使用したウェーブレット関数は吸収線の形状から先験的に離散Meyer関数を用いた。

抽出した水の絶対吸収量とシンチレーションノイズの絶対吸収量換算値の2.5秒間の変動データを図6に示す。上図は自然大気中、下図は擾乱大気中の結果である。実線は水の絶対吸収量、破線はシンチレーションノイズの絶対吸収量換算値を示している。

これらの図より、著しい大気擾乱下でも水の絶対吸収量の平均値は自然大気におけるものと同程度を示し、変動の標準偏差 $\sigma$ はシンチレーション雑音の半分程度となっている。また、水の絶対吸収量はシンチレーションノイズとは異なる変動成分を含んでおり、大気中湿度変動を捉えていると考えられる。これは、

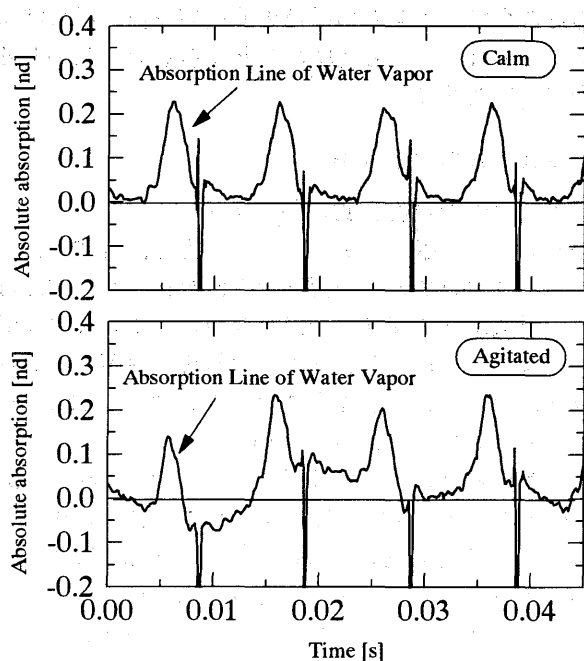


図5 静穏な大気中（上）と擾乱大気中（下）で取得した水の吸収スペクトル列

Fig.5 Examples of the logarithmic applied normalized signal sequences. The upper was obtained under the calm atmospheric condition, while the lower was obtained under the agitated condition.

高速波数掃引方式によるシンチレーションノイズの抑圧効果を定性的に示しているといえる。

### 3.2 実環境における風速の検出

屋外に図7に示す測定系を組み、鉛直方向の風速に対するシンチレーション風速計の応答を評価した。光路は長さ30m、地面からの高さを1.2mとした。また、光軸に沿って等間隔に設置した超音波風速計の出力を同時計測し、風速の比較対象とした。

測定結果の一例を図8に示す。各々、上図がシンチレーション風速計および2台の超音波風速計による個々の計測結果であり、下図はシンチレーション風速計による計測結果と2台の超音波風速計の計測結果の平均値を比較したものである。上図において、実線はシンチレーション風速計による測定結果を、細実線および破線は2台の超音波風速計による計測結果を示している。また、下図においては2台の超音波風速計の平均値を破線で示している。

いずれの測定結果においても上図において、シンチレーション風速計および個々の超音波風速計による指示値は相互に相違が見られる。しかし、下図において2台の超音波風速計の計測結果の平均値とシンチレーション風速計の指示値を比較すると定性的ではあるが変動の傾向に一致が見られる。このことから、シンチレーション風速計は被測定空間中に局在する流速の空

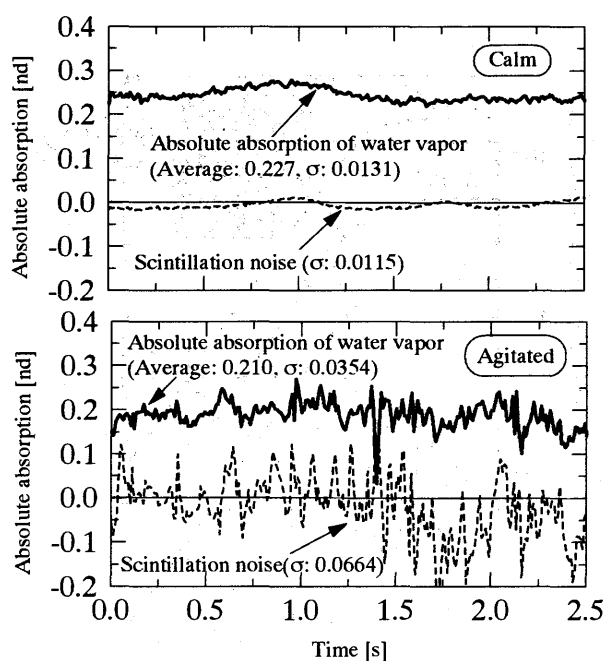


図6 自然大気中（上）と擾乱大気中（下）で計測した水の絶対吸収量とシンチレーションノイズ

Fig.6 Temporal data sequences obtained under the calm and agitated atmospheric condition: Solid lines show the absolute absorption of the water vapor, dotted lines are the scintillation equivalent to the absolute absorption.

間平均値を示すものであると考えられる。即ち、被測定空間を支配する主成分流を観測できると言える。これにより、一次元空間内のガスフラックス測定が可能となると期待できる。

#### 4. 屋外における風速・湿度の同時計測実験

図7と同様な30mの測定光路を屋外に設け、本システムを用いて大気中湿度変動と上昇気流の風速の同時計測を行った。湿度計測においては、3.1節の評価実験で使用した1309.0377nmに中心波長を持つ吸収線を対象とした。また、この測定においては、測定光路の中間地点に光軸と同じ高さになるように超音波風速計一台を設置し、本システムとの同期計測を行った。

観測結果の例として、図10および図11に2002年11月25日12:37と11月26日17:12の測定結果を示す。両日も好天であった。また微風状態であり、地熱による対流が妨げられにくい条件であったと考えられる。

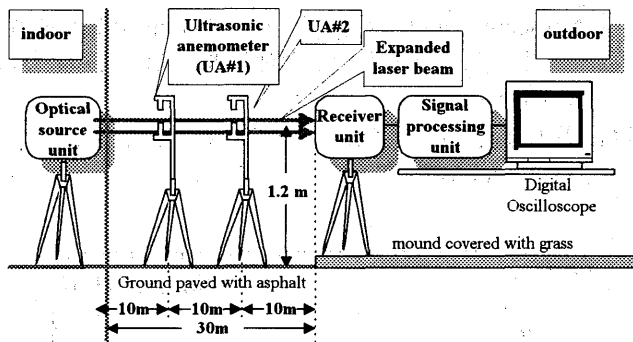


図7 風速測定実験のためのシステム構成。

Fig.7 Setup for outdoor experiments for wind velocity monitoring.

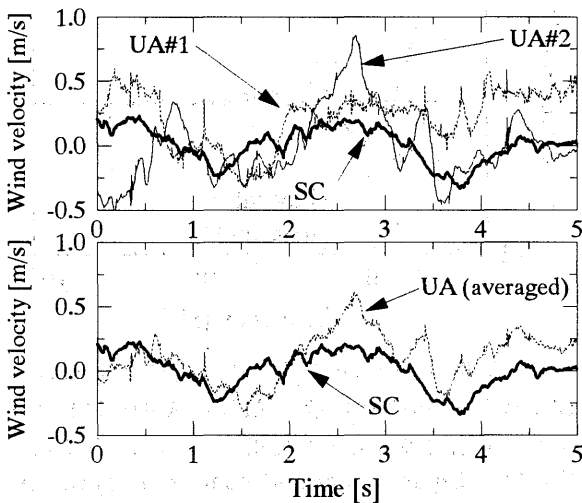


図8 5秒間の風速の測定結果。

Fig.8 A result obtained by the 5s time window.

各図とも上部に水分による吸収スペクトルから求めた絶対吸収量を示す。図中において、細実線は10ms毎のデータである。これらのデータの標準偏差は図に示した屋内実験における大気擾乱状態下での絶対吸収量の計測結果にほぼ等しい。太実線はその結果を平滑化したものである。なお、当日の気温、相対湿度から本実験時においては0.05~0.1程度と予想され、計測

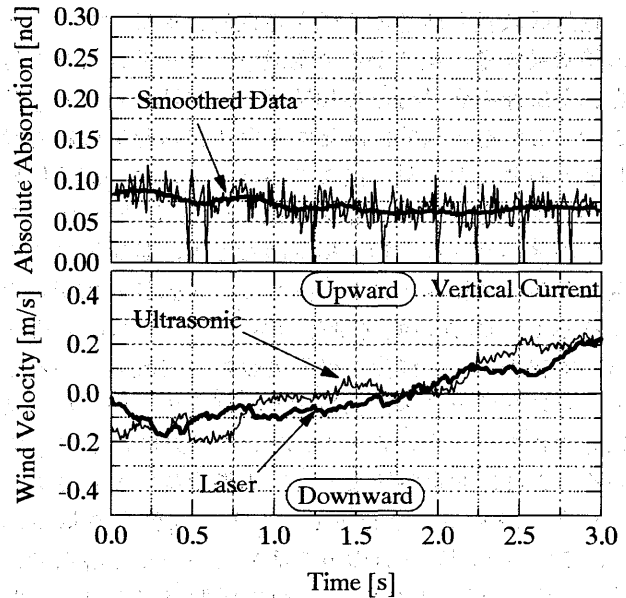


図7 2002年11月25日12時37分(JST)の水蒸気の絶対吸収量と風速の変動。

Fig.7 Absolute absorption of water vapor and wind velocity at 12:37 on 25 Nov. 2002 (JST).

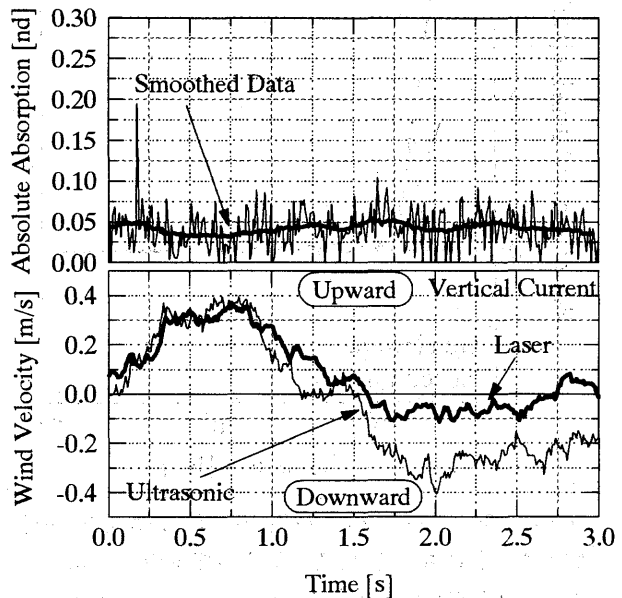


図8 2002年11月26日17時12分(JST)の水蒸気の絶対吸収量と風速の変動。

Fig.7 Absolute absorption of water vapor and wind velocity at 17:12 on 26 Nov. 2002 (JST).

結果は概ね妥当と言える。

また、各図下に同期計測した風速を示す。実線はレーザ（シンチレーション風速計）による計測結果であり、細実線は一台の超音波風速計による風速の計測値である。測定時間全体の変動傾向において両者は同様の変化が認められるが、指示値が大きく異なる時間帯もある。これは空間的な測定次元の相違によるものと考えられる。

絶対吸収量と風速の変動を定性的に比較すると、水の絶対吸収量の緩やかな変動成分はレーザにより計測された風速の変動分との相関が一部に認められる。そこで、これを定量的に評価するために水蒸気の絶対吸収量と風速の変動量の同相スペクトルおよび直角位相スペクトルを求めた。結果を図10、図11に示す。これらのスペクトルは相互相関関数の周波数領域での表現である。同相スペクトルは2つの変動量の相関の程度を示し、物質の輸送量やガスフラックスに対応する。本報告では、湿度を絶対吸収量で表現しているため、ガスフラックスに相当する物理量す。いずれの結果も同相スペクトルが1 Hz 以下で正方向に上昇している。これは測定時間より長い周期変動での水蒸気フラックスがあることを示しており、緩慢な蒸散があり、これが11月25日の方が活発であったと解釈できる。このことは11月26日の絶対吸収量が前日より低

い値を示していることから妥当と判断できる。

## 5. むすび

本稿では、開発中のレーザ光線を用いたガスフラックスモニターについて述べた。これは、個々に開発を進めてきた高速波数掃引方式LASシステムとシンチレーション風速計を統合したものであり、ハードウェア的には完成に近い。そこで、個々の機能の評価実験および水蒸気を測定対象とした試験測定を行った結果、本システムの有効性を確認することができた。現在、DSP (Digital Signal Processor)を用いたオンラインの計測システムへの改良を図っており、長時間の連続測定を可能としつつある。更に、装置の操作性を向上させると共に、実環境での長周期のガスフラックスの動態を明らかにしてゆく予定である。

## 参考文献

- [1] 香川直己ほか、電学論, 118-C, pp.1792-1797, (1998).
- [2] N. Kagawa, *et al.*, *Proc. of SPIE*, **3707**, pp.70-79(1999).
- [3] 香川直己, 福山大学工学部紀要, 22, pp.1-6, (1998).
- [4] 香川直己ほか, 福山大学工学部紀要, 24, pp.15-21, (2000).

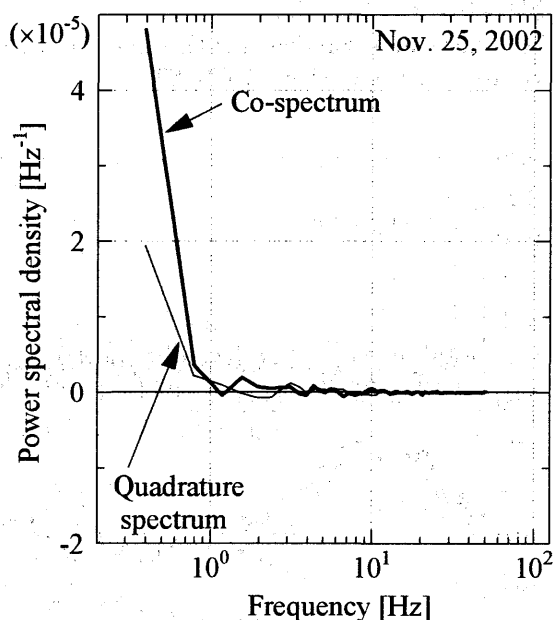


図10 2002年11月25日12時30分(JST)から約10分間の水蒸気の絶対吸収量と風速の変動量の同相スペクトル(実線)および直角位相スペクトル(細実線).  
Fig.10 Co-spectrum and quadrature spectrum between absolute absorption of water vapor and wind velocity obtained by 10-minute measurement at 12:30 on 25 Nov. 2002 (JST).

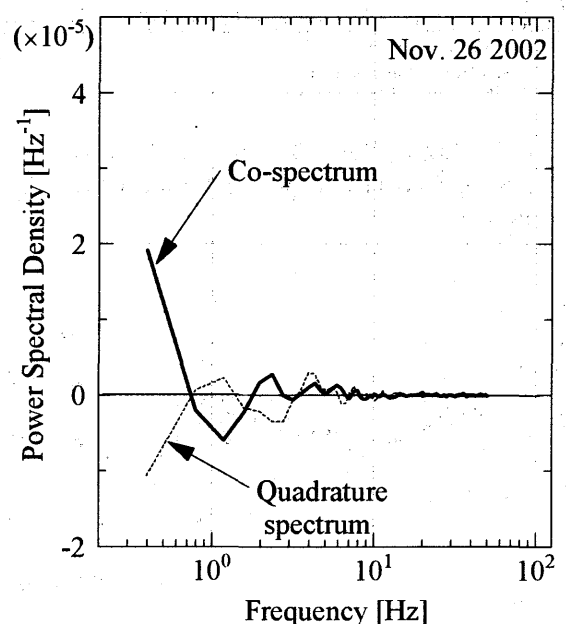


図11 2002年11月26日17時10分(JST)から約10分間の水蒸気の絶対吸収量と風速の変動量の同相スペクトル(実線)および直角位相スペクトル(細実線).  
Fig.11 Co-spectrum and quadrature spectrum between absolute absorption of water vapor and wind velocity obtained by 10-minute measurement at 17:10 on 26 Nov. 2002 (JST).