

半導体レーザを用いた可搬型擬似ランダム変調 CW ライダの 開発と大気汚染物質の空間情報計測法の研究

Study of a portable, laser-diode random-modulation CW lidar for the
spatial measurement of air pollutants

- 代表研究者 環境庁国立公害研究所大気環境部室長 竹内 延 夫
Section Head, National Institute for Environmental Studies,
Nobuo TAKEUCHI
- 協同研究者 東京大学教養学部教授 桜井 捷 海
Professor, Dept. of Pure and Appl. Science, The University of Tokyo
Katsumi SAKURAI
- 千葉大学工学部助教授 上野 敏 行
Associate Professor, Faculty of Engineering, Chiba University
Toshiyuki UENO
- 研究協力者 東京大学教養学部助手 馬場 浩 司
Research Associate, The University of Tokyo
Hiroshi BABA

Random-modulation cw lidar (RM-CW lidar) is a new technique based on the pseudo-random code modulation of cw laser light, which was proposed by the authors. It is suitable for a small power laser source. When the diode laser is used as the light source of the RM-CW lidar, a compact, portable lidar is expected to be realized. Based on the preliminary results of a prototype diode laser RM-CW lidar, we pursued a field experiment and constructed a revised system, as well as the establishment of the RM-CW lidar theory. The error and noise of RM-CW lidar is theoretically analyzed and compared with the experiment. The new system has the laser frequency stabilizing mechanism, where the laser frequency is locked on the center of the narrow band interference filter in the receiving optics. Using a narrow band optical filter, the daytime measurement became possible. Using the portability of the system, it was used for the measurement of the boundary layer, visibility, road dust dispersion and other phenomena. In this report, the measurements of the low visibility case and of the road side dust dispersion are described. Finally the possibility of the RM-CW technique to the coherent lidar is investigated.

研究の目的

最近半導体レーザの急速な発展とともにその応用分野も急速に広がりつつある¹⁾。その応用の一つとしてライダ(レーザレーダ)への応用がある^{2), 3)}。ここで述べる半導体レーザを光源とする擬似ランダム変調 CW ライダ^{4), 5)}は、半導体レーザを光源としていること、擬似ランダム変調法を導入していること、独自の信号処理システム⁶⁾を

設計製作して使用していることに特徴がある。

半導体レーザは小型、高効率、長寿命で、信頼性が高く、廉価で、駆動電流によって動作(強度、発振波長)の制御ができるという特徴を有するが、ライダの光源として用いるには出力が小さいのが難点である。cw 動作では(パルス動作に比べて)動作が安定で、単一周波数動作(背景光の軽減に重要)も比較的容易である。この特徴を利

用してライダに用いたのが擬似ランダム変調方式である。擬似ランダム変調法 CW ライダ (Pseudo-random modulation cw lidar, 以下, RM-CW ライダと呼ぶ)^{2),3)} では大気中の散乱体の空間分布を得るために cw レーザ光を擬似ランダムコードで変調し, 受信光を復調することによって, 空間分布を得る。

ここで用いる擬似ランダムコードは不規則信号の代表例であり, 破壊強度などの理由により強いインパルスをかけられない場合の応答特性の測定に用いられている。ライダでは, 通常パルスレーザー光が光源として用いられているが, cw レーザを用いると電氣的雑音の減少, 信頼性の向上, 装置の小型化などが期待できる。擬似ランダムコードによる変調法を用いたレーダ方式は(長い周期 T に対して) 短い時間幅 Δt に対応する距離分解能を得る手法として高層の観測に用いられている⁷⁾。cw レーザの信頼性, 平均パワーとして比較的大きなエネルギーを利用できる性質に注目し, 擬似ランダムコードを採用して距離分解能を得る手法が, RM-CW ライダである。

擬似ランダム変調法は, スペクトラム拡散⁸⁾を, 用いた通信法として多重送信や秘話性の観点から実用的に使用されている⁹⁾。また, 分光学的分野でも中性子線回折¹⁰⁾や分子ビーム実験¹¹⁾での飛翔時間 (time of flight) の測定に應用されている。マイクロ波レーダーでは距離を測定する方法として 1960 年代に提案されている¹²⁾が, 空間分布を測定したり, 周期に対応する距離 ($cT/2$) より遠方を測定するには, 送信と受信を時間的に交互に行ない, その間に空白時間を置いて近距離をカットする必要があった (ICW: Interrupted cw 方式)¹³⁾。RM-CW ライダ^{2),3)}は, 近距離からの強い散乱の影響を取り除くために, レーザ光と望遠鏡視野の重なるの関係¹⁴⁾ (“幾何学的効率” または “crossover function”) $Y(R)$ を利用して, 送受信を同時に連続して行なうものである。これはレーザ光の指向性の良さを利用したもので, ビーム広がりが多いレーダ (マイクロ波) では送受光装置間を離す必要が生じる (2 局方式)¹⁵⁾。

本研究はアルゴンレーザーや 100 mW 半導体

レーザーを光源とする RM-CW ライダの基礎実験に基づいて, その特徴や有効性を生かしてさらに性能を向上させた半導体レーザー RM-CW ライダを試作し, RM-CW ライダの技術を確立し, コヒーレントライダへの応用を検討することを目的に研究が開始された。

研究の経過と成果

初年度は改良機製作のための基本設計と RM-CW ライダの誤差・雑音などに関する基本的考察¹⁶⁾, 次年度は 1 号機によるフィールド計測と製作された 2 号機による昼間におけるエアロゾルの計測などを報告した¹⁷⁾。本報告では RM-CW ライダ全体の概要とフィールド計測の成果, さらにコヒーレントライダに適用する場合の検討結果について報告する¹⁸⁾。

コヒーレントライダは検出法にコヒーレント (ヘテロダイン) 検出法を使用するものである。レーダの場合は位相の制御が容易にできるので, 周波数シフトや位相の情報が重要なコヒーレント検出法の使用が容易である。しかし, ライダの場合は周波数が高く, 現状では周波数制御が十分でないので散乱光強度を検出するインコヒーレント検出法が主として使用されている。RM-CW ライダでは cw レーザ光を擬似ランダムコードで変調するので, 周波数は安定で, またレーザ光の時間的利用率も高く, コヒーレント検出が可能な場合には非常に有効な手法である。コヒーレントライダは衛星を使った地球規模の風速分布の測定などに使用されることが計画されているが, 現在のコヒーレントライダはパルス動作のヘテロダイン検出法を使用しており, 振幅で加算可能な擬似ランダム変調 CW ライダを応用できれば効率の飛躍的な向上が期待される。それらの検討結果を最後の節に説明した。

1. 擬似ランダムコードとライダ

擬似ランダムコード¹⁹⁾はその自己相関が δ 関数に近い性質を持つ。この擬似ランダムコードには周期的なもの (M 系列, 平方剰余系列: L 系列, 双子素数列, 相補系列) と有限長 (Barker 系列, インパルス等価系列: I 系列) がある。この中で, シフトレジスタによって容易に生成できる 2 値

M 系列が最も多く使われる。

1.1 M 系列の性質

M 系列^{19), 20)}は n 個のシフトレジスタに 2 を法とするフィードバックを加えて得られる周期的な数値系列である。その周期の長さは $2^n - 1$ となり、擬似ランダムコードとしては最も長い数値系列となるので、最長系列 (Maximum length shift register sequence: M 系列) と呼ばれる。

以下ではシフトレジスタで作られる (1, 0) から成る M 系列を a_i (1, 2, 3, ..., N), それを $a'_i = 2 \cdot a_i - 1$ の関係で変換した (1, -1) から成る系列を a'_i (1, 2, 3, ..., N) とする。 δ 関数に近い自己相関 $\phi_{a', a'}$ を与える M 系列は a' である。すなわち、

$$\begin{aligned} \phi_{a', a'}(j) &= \sum a'_i a'_{i+j} \\ &= \begin{cases} N & (j=0 \text{ mod } N) \\ -1 & (j \neq 0 \text{ mod } N) \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

の関係がある。

1.2 RM-CW ライダ^{2), 3)}

時間軸を Δt で分割し、時間 $i\Delta t$ における物理量 $x(t)$ の値を x_i で表す。系に対する入力関数を x_i 、系の応答関数を g_i 、出力を y_i 、外部からの雑音を b_i とする。出力は

$$y_i = \sum_{j=1}^N x_{i-j} G_j + b_i \quad (2)$$

$$G_i = g_i \Delta t = \eta \Delta R A r \beta_i T_i^2 Y_i / R_i^2$$

で与えられる。ここで、 $x_i = p_0 \cdot a_i$ 、 p_0 は cw レーザ光パワー、 η は光学系の効率、 R_i はライダからの距離、 $\Delta R (= c \cdot \Delta t / 2)$ は距離分解能、 $A r$ は受光光学系の開口面積、 β_i は後方散乱係数、 T_i は R_i までの大気透過率、 Y_i はレーザー光が距離 R_i で望遠鏡視野に含まれる割合¹⁴⁾である。 g_i に $p_0 \cdot \Delta t$ を掛けたものがパルスライダにおける A スコープに相当する。

RM-CW ライダでは、 y_i と a'_i の相関 S_i の期待値 (実際には時間平均値) から G_i を求める:

$$\begin{aligned} S_i &= E[S_i] \\ &= E\left[\sum_{i=1}^N a'_i y_{i+1}\right] \\ &= p_0 \{(N+1)/2\} G_i + b \quad (3) \end{aligned}$$

(3) 式が RM-CW ライダにおけるライダ方程式である。以上の過程を模式図で表すと図 1 となる。

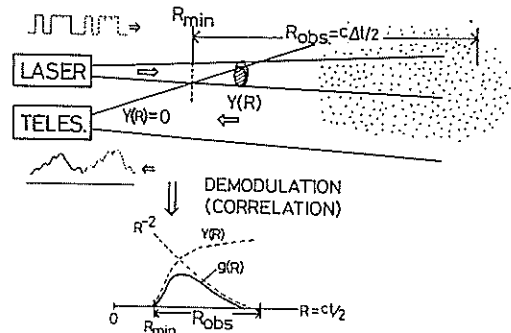


図 1. RM-CW ライダの模式図。

RM-CW ライダの信号雑音比 (S/N) は [信号の期待値/標準偏差] で与えられる:

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{S_i}{\sigma_{S_i}} \\ &= \frac{\sqrt{M} \xi p_0 \{(N+1)/2\} G_i}{\sqrt{N \mu \xi \sqrt{p_0} \{(N+1)/2\} G_i + b}} \quad (4) \end{aligned}$$

ここで M は積算周期数、 $\xi = \eta_Q \Delta t / h \nu$ は光強度信号を光電子数へ変換する係数 (η_Q は PMT の量子効率、 h はプランク定数、 ν はレーザー光の振動数) である。また

$$G = (1/N) \sum_{i=1}^N G_i$$

である。(4) 式はピークパワーが p_0 で、パルス動作 (直接検波の) ライダと比べて、雑音 ((4) 式分母) が背景光で決まるとき ($b \gg p_0 (N+1) G / 2$)、 $\sqrt{N}/2$ 倍 S/N が増加する。

2. 半導体レーザー RM-CW ライダ

2.1 光源としての半導体レーザーの特徴

半導体レーザーは小型で高効率な光源として、光通信、CD、ビデオディスク、レーザープリンタ、自動読み取り装置などの光源として実用化され、その性能は急速な進歩を遂げている^{21), 22)}。特に cw 動作の単一モードレーザーは数十 mW の出力の素子が市販品として容易に入手できるようになった。さらに位相整合が取られたアレイ状の素子により 100 mW 以上の出力のものが実用化されつつある。パルス動作と cw 動作を比べた場合、埋め込み型のダブルヘテロ構造の素子で最大出力の比は約 10~100 倍といわれている。パルス動作

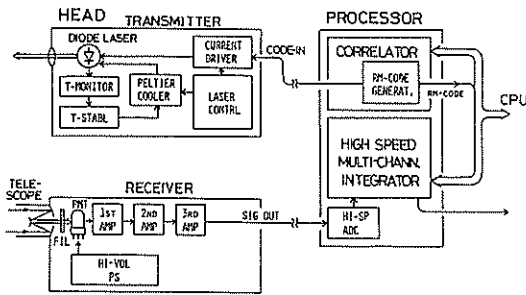


図2. 半導体レーザを光源とするRM-CW ライダの構成図。

の繰り返し周期を 1 ms とし、空間分解能に相当するパルスの時間幅を 60 ns とすると、同じピークパワーに対する RM-CW ライダの S/N の増加は (4) 式より約 65 倍となり、同じ素子構造の半導体レーザをパルス動作で最大出力を得るように動作させて用いる場合とほぼ同じである。しかし眼への安全性 (eye safety) の観点からはピークパワーが小さい方が有利であるばかりでなく、パルス動作の場合には多モードでの発振が起こりやすい。したがって単一モード動作が望ましい場合は RM-CW ライダの方が有利である。

2.2 ライダ装置

半導体レーザを光源とする RM-CW ライダ (以下 DL-RM-CW ライダ) は携帯型で、1人で操作でき、1 km 程度までの粒子・エアロゾルに基づく現象を測定できる廉価 (一般の電子測定機器と同程度) なシステムであることを目標として 1983 年から開発と研究が開始された。本研究では 1 号機^{4), 5)}を改良して高精度な 2 号機の製作を目標とした。DL-RM-CW ライダはヘッド部 (送・受光部)、信号処理部、パソコン (制御・解析・表示・記録) の 3 部から構成される。その構成を図 2 に示す。

2 号機の製作に当たっては変調波形の歪と誤差 (ghost 波形) の関係²³⁾などを詳細に理論的に検討を加えるなど行なった後、次の点を改良して設計を行なった ([] 内は 1 号機仕様)。

1. サンプル時間幅 (Δt) に最高 40 ns (通常 60 ns) を採用 [60 ns]、距離分解能 (ΔR) は最高 6 m (通常 9 m) [9 m]。

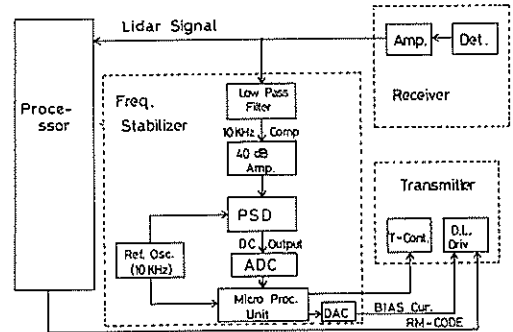
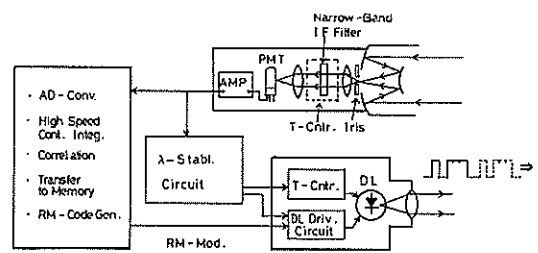


図3. 発振波長安定化回路の模式図 (a) 全体図、(b) 安定化回路の部分。

2. 周期に 1024 までの任意の繰返し (M 系列の 10 次までの回数に対応) と 12 次の M 系列 [12 次の M 系列のみ]。
3. 視野絞りによって視野角を制限し、狭帯域干渉フィルタで背景光をカットする。
4. 温度制御の DL の発振波長の安定化を採用。
5. デジタル化された信号を連続的に 2^{32} まで積算。

特に発振波長の安定化は LD が経年変化を起こすことを想定し、LD 発振波長を狭帯域干渉フィルタの中心波長にロックする機構とした。具体的には LD 駆動電流に 1 kHz で弱い変調を掛け、動作開始時に光学ファイバで極く 1 部のレーザ光を望遠鏡に導き、LD の動作温度を掃引して、干渉フィルタを通過した検出光の変調成分が最大となる温度を検出し、その温度に LD 動作温度を固定する (受信信号光が十分強い時には測定と同時にフィルタ中心波長にフィードバックを掛けることも可能である)。発振波長安定化のブロック図を図 3 に、LD 動作温度を掃引したときの変調信

表 1. DL-RM-CW ライダ 2 号機の仕様

測定距離: (エアロゾルに対し)	1 km
(雲, 排煙に対し)	3~5 km
レーザ	GaAlAs DL
波長	776~780 nm
出力	30 mW
ビーム拡がり	0.2 mrad
擬似ランダム変調	10 次 M 系列 (N=1023) または 12 次 (N=4095)
距離分解能	9 m
受光光学系	カセグレン式反射望遠鏡 (Celestron C-8)
口径	20 cm
受光視野角	0.5 mrad
干渉フィルタ	バンド幅 0.2 nm
検出器	PMT R928
信号処理	
AD 変換器	3 ビット
相関演算	専用ボード
制御・計算	16 ビットパソコン

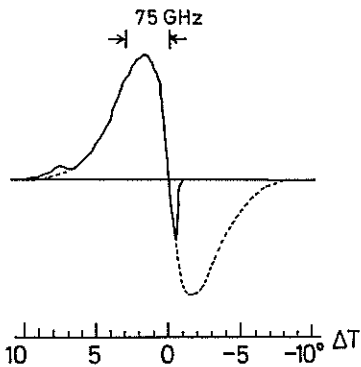


図 4. 発振波長安定化用変調信号の出力 (1 次微分成分).

号出力を図 4 に示す。変調信号は 1 次微分成分を取っているため、S 字状を示す (変調信号が 0 となるように S 字の中央部にロックする)。このようにして得られた 2 号機の仕様を表 1 に示す。

3. フィールド応用

RM-CW ライダの特徴はその可搬性により、いつでも容易に近距離のエアロゾルによる現象を測定できることにある。RM-CW ライダは 1 km 程度のエアロゾルのプロファイルの測定が当初の目標に設定した性能であるが、排煙や雲では数 km 以上の測定が可能である。昼・夜間における A-

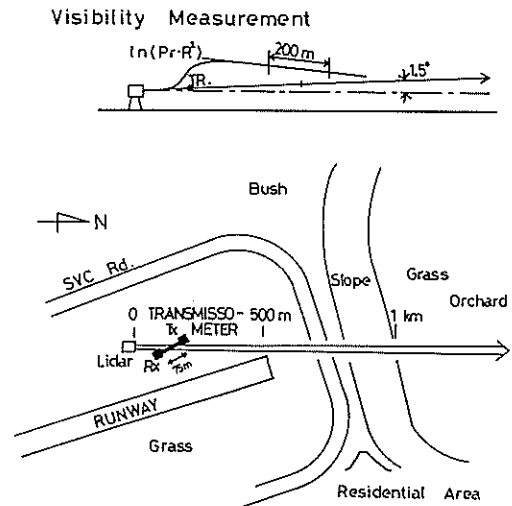


図 5. 視程測定時の装置配置図。

スコープや夜間大気境界層内のエアロゾルプロファイルや排煙、霧・霞や雲などの観測および視程、ヒートアイランド観測例については既に文献 5) や初年度、次年度の本研究報告書^{16), 17)}に述べてある。ここでは視程観測の透過率計との比較や濃霧観測の例、道路沿道やトンネル内の自動車排ガス・粉塵拡散の測定例を紹介する。

3.1 視程観測

視程は環境分野でも大気汚染の指標として重要な量であるが、航空気象の分野では空港における離着陸に不可欠な量としてその常時観測が義務づけられている。現在空港では透過率計によって水平視程が測定されているが、固定された基線長(75 m または 152.4 m)の平均値が測定されるだけで空間的变化や、離着陸時に重要となる斜め視程は測定できない。これらを測定するもっとも有

望な方法はライダである。とくに半導体レーザを光源とすることができればフラッシュランプなどの消耗品も必要なくなり、信頼性が向上するばかりでなく、装置も小型化、簡易化される。その様な観点から実際の空港で、測定光路を合わせて、測定を行なった。測定装置の配置図を図5に、測定結果を図6に示した²⁴⁾。ライダ観測データと transmissometer データとの相関係数は 0.87 と非常に高い値を示す。電源や地理的制約条件によって実際の比較した場所は 300~400 m 離れているが、そのときの風向、風速を考慮するとごくわず

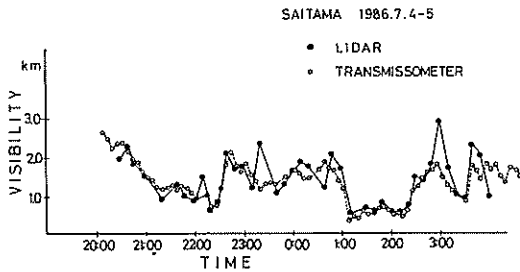


図6. DL-RM-CW ライダと透過率計による視程測定結果の比較。

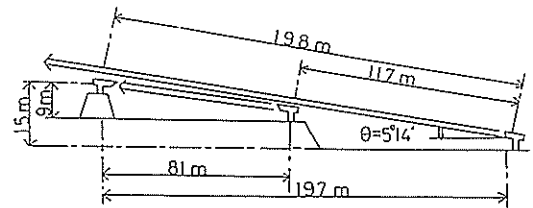


図7. 霧の鉛直断面分布測定の装置配置図。

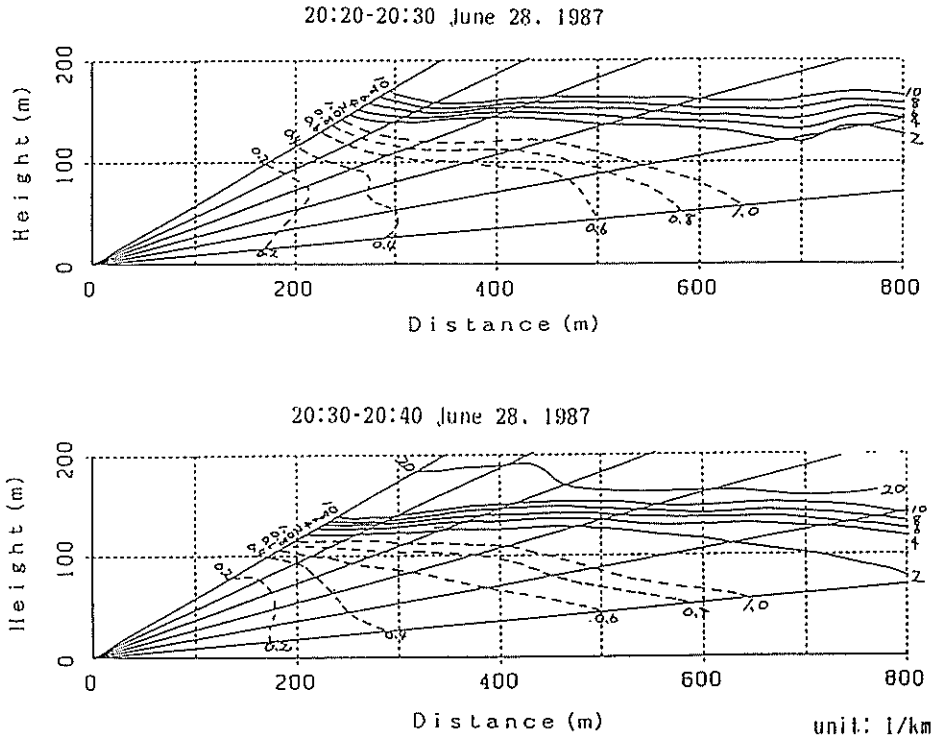


図8. 霧の鉛直断面内の分布図。図内の数値は減衰係数。

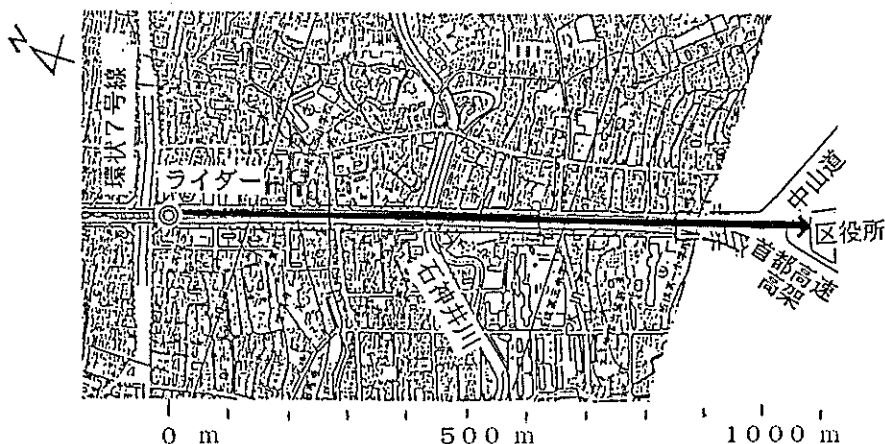


図9. 中山道の交差点付近の地図とライダーの配置状況。

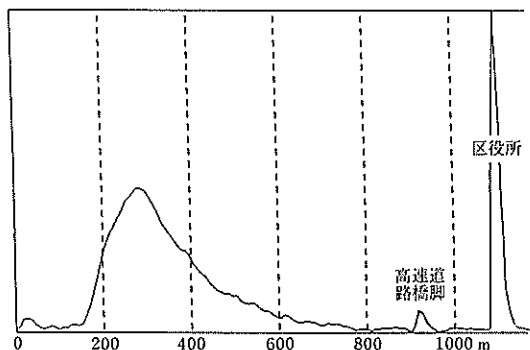


図10. 中山道に沿ったエアロゾルの濃度分布 (80秒間積算).

かの不一致も説明できる。

また視程の観測に似た例として霧の鉛直断面内の測定がある。昭和62年度に御殿場市で行なった観測についてその測定装置の配置状況を図7に、霧の濃度を減衰係数の値で求めた鉛直分布の様子を図8に示した²⁵⁾。減衰係数はKlettの手法²⁶⁾によって求めた。

3.2 道路沿道の自動車排ガス・粉塵の拡散観測

自動車走行に伴う道路沿道²⁷⁾やトンネル内²⁸⁾の排ガスの実態についてはフィールド調査や風洞を用いたシミュレーション実験が行なわれており、ライダーによる観測²⁹⁾も報告されている。ここではRM-CWライダーの携帯性を利用して、道路やトンネル内における自動車走行に伴う粉塵の拡散を観

測を行い、時系列測定データの変化分から、時間的に変化している現象を捉えた例について2例報告する。

I. 沿道方向の道路粉塵の時間変化の観測

板橋区大和町交差点(中山道と環状7号線: 図9参照)付近の中山道の中央分離帯にRM-CWライダーを設置し、道路粉塵の時間変化、とくに沿道方向の自動車走行風の影響があるかを調べた。測定は昭和61年12月8日-12日夕刻から夜間にかけて、中山道方向に沿って粉塵濃度空間分布を積算時間5秒、間隔17秒で測定した。

図10に80秒間積算したエアロゾルの濃度分布を示した。途中石神井川のところが低くなっているため、エアロゾルが濃く留まっているのが見られる。高速道路の狭い橋桁を通してレーザービームを出しているため、850 m付近で橋桁をかすめるためにピークが現れている。1.1 kmに見えるピークはレーザービームが正面の建て物に当たっていることによる。大気中に浮遊する物質の移流速度は時系列データの相互作用をとったり、2次元FFTにおける縞状ピークの傾きから求められる。図11は中山道の測定データを2次元高速フーリエ処理(FFT)³⁰⁾したものである。上二つの図では微風のため時間的変化の因果関係ははっきりしないが、下の図ではFFTのピークは粉塵濃度が信号間隔に等しい150秒の周期で変動していることを示している。自動車の走行に伴う走行風は、

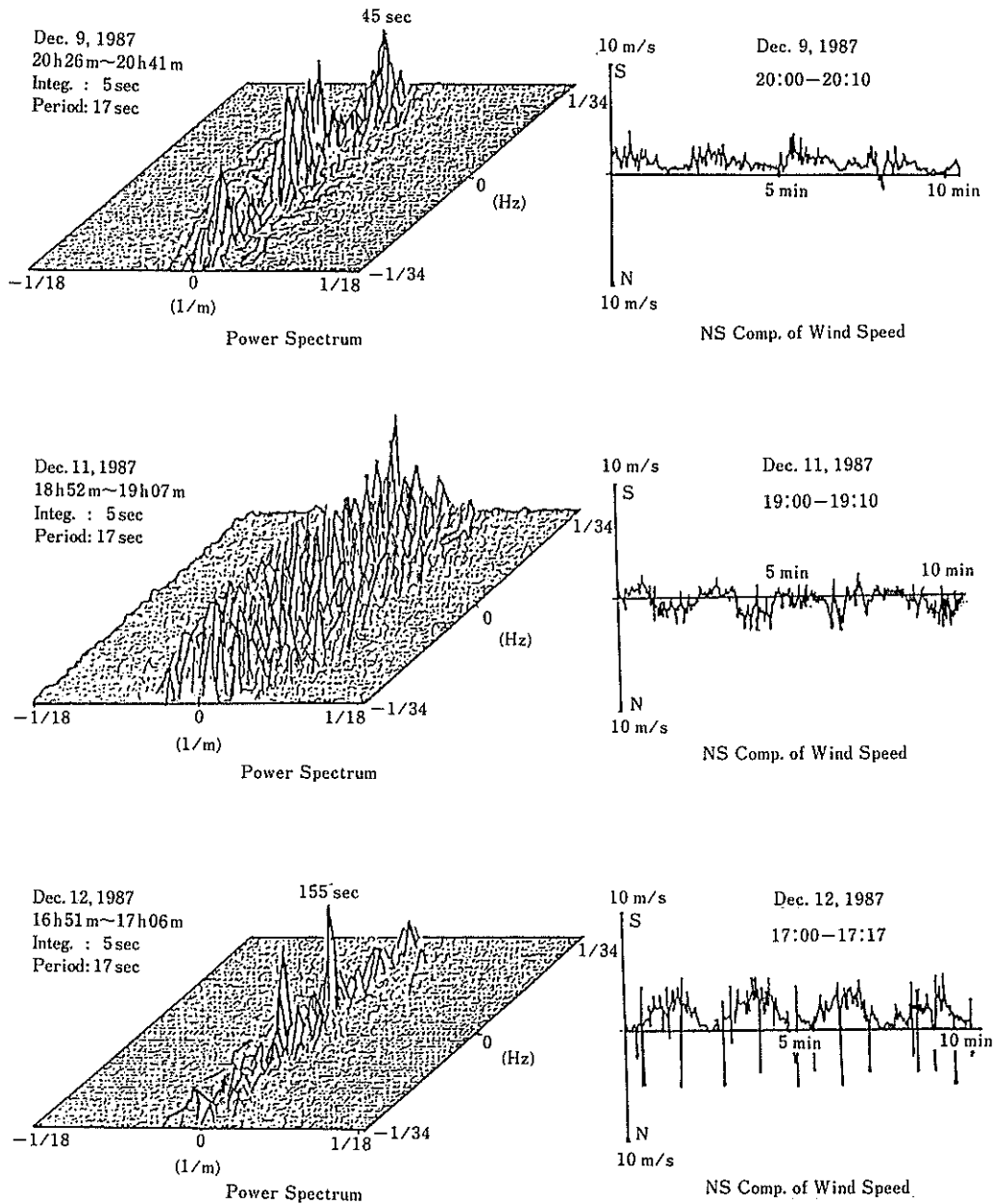


図 11. 中山道の測定データを 2次元高速フーリエ処理 (FFT) データと超音波風速計で観測された交差点付近の走行風 (下図: 約 5~10 m/s)。下図の正弦波的な変動は交差点の信号の周期による (データは気象協会からの提供)。

同時に測定した超音波風速計には図右に示すように交差点の信号周期で変調された走行風 (約 5~10 m/s) が観測されている。ライダー測定からは検出できなかったのは測定間隔が 17 秒と長かつ

たことによるとと思われる (測定間隔はその後 RAM ディスクを利用して最小 6 秒に縮められた)。ライダー測定による道路に沿った粉塵濃度の時間変化は自排局の NO_x や CO 濃度とは一致し

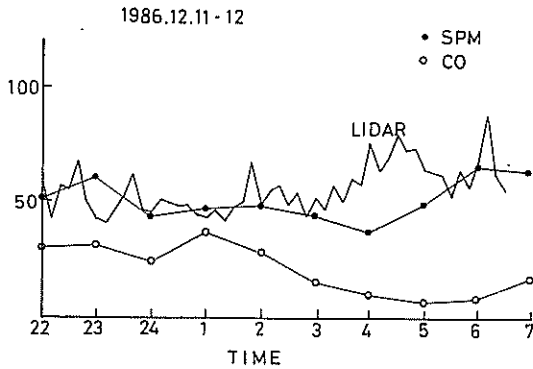


図 12. ライダによる粉塵濃度時間変化と一般局測定値.

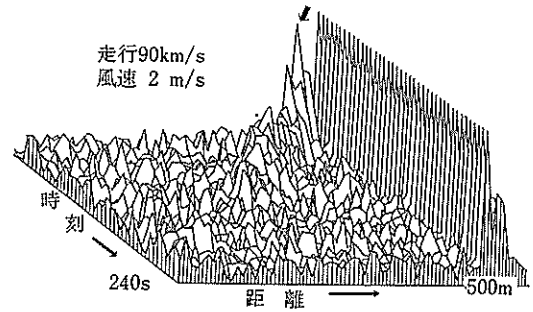


図 14. 海底トンネルの粉塵の移動状況. 6 秒間隔の 40 ファイル (240 秒) の A スコープを位置をずらして鳥かん図的 (陰線処理) に表示. 右端のピークは道路斜面からの反射.

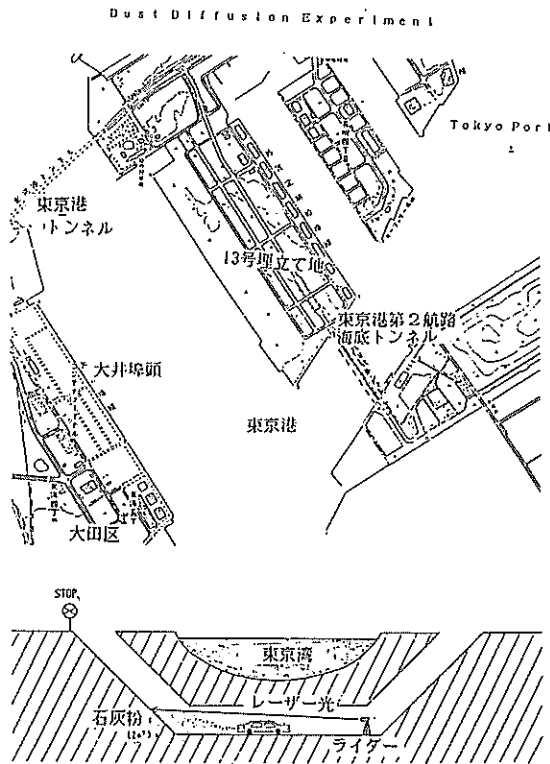


図 13. 東京湾第 2 海底トンネル付近の地図とライダー装置の設置状況.

ないが、付近の一般測定局の粉塵濃度測定値と比較すると良い相関が得られている (図 12)。

II. トンネル内舞い上がり粉塵の移流の観測

昭和 62 年 2 月 22 日 (日) の午後、閉鎖された

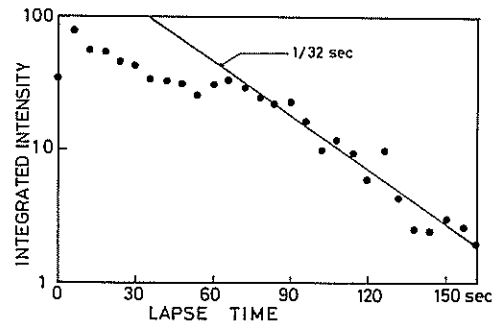


図 15. 石灰粉の積分濃度 (距離自乗補正後、距離方向に積算) を自動車通過後の経過時間の関数として表示したもの.

東京港第 2 航路海底トンネル内の舟底状の道路 (図 13 参照) に沿って RM-CW ライダを設置し、道路上 2 箇所 1 m×1 m の大きさに撒かれた石灰粉が自動車 (1 台) の走行によって巻き上げられて生じた粉塵の移流を積算時間 5 秒、休止時間 1 秒 (合計 6 秒) の周期で測定した。時系列データ (A スコープ) を原点をずらして表示した例を図 14 に示す。6 秒間隔の 40 ファイル (240 秒) を位置をずらして鳥かん図的 (陰線処理) に表示してある。右側の 2 列のピークはレーザービームが上り勾配の道路面に当たっている様子を示している。石灰粉は自動車の走行によって巻き上げられ、しだいに弱められながら、風下側 (手前) へ流される。ライダー測定データを距離自乗補正後に、距離方向に積算した石灰粉の積分濃度を自動車通過後の経過時間の関数として図 15 に表示し

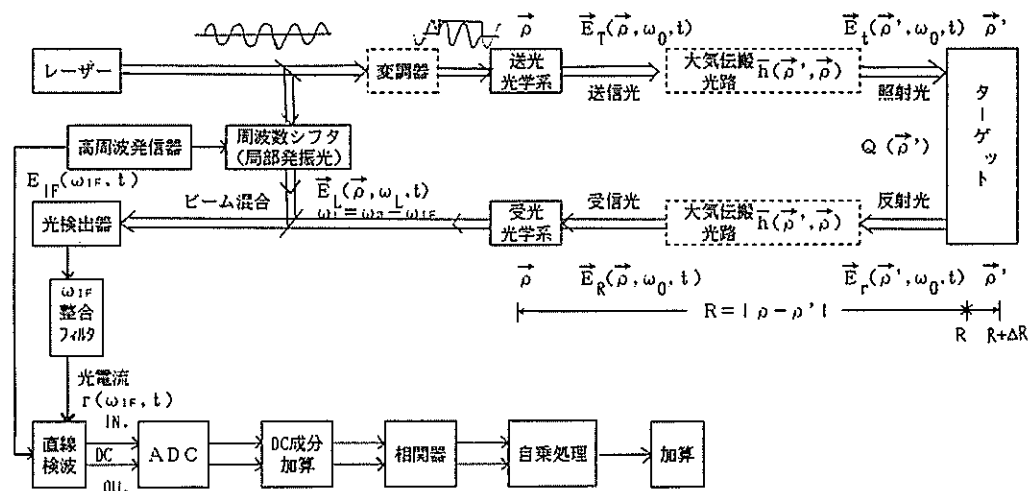


図 16. コヒーレント・ミアダの構成模式図。

た。60 秒（風速 1.8 m/s として移流距離 110 m）以後はトンネル断面内に一様に広がり、32 秒の時定数で減衰して行くものとみなせる。

以上の 2 例はライダー観測によって排ガスや巻上げ粉塵の挙動が実時間で観測できる可能性を示している。以上は 1 号機による夜間やトンネル内のように薄暗いところでの測定例である。狭帯域のフィルタを備えた 2 号機は昼間のエアロゾルの観測が可能³¹⁾であるので、2 号機を用いれば昼間の観測が可能である。

4. コヒーレント RM-CW ライダの検討

4.1 コヒーレント検出の概念

コヒーレントライダ (CL) は概念を得るために大気中を伝搬する CL の模式図を図 16 に示す。簡単のため送・受光光学系は口径が d の同じ（または同じ大きさの）ものを考える。ここではまだレーザー光は cw であるとする。送信レーザー光（振幅 E_T 、周波数 ω_0 ）は距離 R で散乱されて受光光学系に戻ってくる（振幅 E_R ）ものとする（大気中を伝送中に受ける揺らぎの影響は 4.2 節で扱う）。そのとき

$$\text{受光面での光電流: } i(t) = e\eta P(t)/h\nu \quad (1)$$

(e は電子の電荷、 η は光電検出器の量子効率、 h はプランク定数、 ν は周波数)

$$\text{受光面入射光パワー: } P(t) = |E(t)|^2 A/z_0$$

($z_0 (= 2/c\epsilon_0)$ は自由空間のインピーダンス、 A は受光面積)

光波の振幅:

$$E(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t) + E_L \exp(j\omega_L t)$$

(局部発振光 (LO): 振幅 E_L 、周波数 ω_L 、レーザー光: E_0 、 ω_0 、 ω は角周波数)

中間周波数 ($\omega_{IF} = \omega_0 - \omega_L$) 光電流成分:

$$i_{IF} = 2\langle i_0 i_L \rangle^{1/2} \exp(j\omega_{IF} t)$$

中間周波信号成分 (パワー): $\langle i_{IF} \rangle^2 = 4i_0 i_L$

中間周波雑音成分 (パワー): $\langle i_N \rangle^2 = 4e i_L B$

パワーの SN 比:

$$S/N = \langle i_{IF} \rangle^2 / \langle i_N \rangle^2 = i_0 / eB = \eta P_0 / h\nu B \quad (5)$$

である。(5) 式はサンプリング時間幅 ($1/B$) における光電子数に一致し、コヒーレント検出では SN 比が量子リミットを与える。CL では SN 比の計算に大気の揺らぎによる位相面の歪の影響を考慮する必要があり、また測定物理量によって SN 比の式が異なる。CL の SN 比の考察と RM-CW-CL^{18), 32), 33)} に対する検討を以下で行なう。

4.2 Extended Huygens-Fresnel の原理

CL では大気の揺らぎの影響が大きいので、大気中を伝播するレーザー光の振幅の状況を Shapiro ら³⁴⁾の取扱いにしたがって概要を述べる。

(1) 送信波は直線偏光の準単色波で

$$E_T(\rho, t) = \begin{cases} (2P_T/c\epsilon_0)^{1/2}\xi_T(\rho) & 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (6)$$

であるとする。 ρ は射出瞳内での2次元ベクトルで、一様な平面波の場合(4.1節)には

$$\xi(\rho) = (4/\pi d^2)^{1/2} \exp(j2\pi f_1 \cdot \rho)$$

($|\rho| < d/2$, f_T は波長の逆数の大きさの射出瞳内の2次元ベクトル)である。

(2) 距離 $z=L$ にあるターゲット上の点 $\rho' = (x', y')$ に入射する波動は

$$E_L(\rho', t) = \int d\rho E_T(\rho, t-L/c) h_L(\rho', \rho) \quad (7)$$

と表される。Extended Huygens-Fresnel の原理によって、近軸光線に対して

$$h_L(\rho', \rho) = (j\lambda L)^{-1} \exp[jkL(1 + |\rho' - \rho|^2/2L^2)] \cdot \exp[\chi(\rho', \rho) + j\phi(\rho', \rho) - \alpha L/2] \quad (8)$$

と表される。 k は波数 ($2\pi/\lambda$), $\chi(\rho', \rho)$, $\phi(\rho', \rho)$ は揺らぎによって引き起こされた対数振幅と位相の変動分である。

(3) ターゲット表面で受信器へ向かう波動は

$$E_L(\rho', t) = E_L(\rho', t) Q(\rho') \quad (9)$$

となる。 $Q(\rho')$ は ρ' におけるターゲットの複素振幅反射係数で、大きさを有するトポグラフィックなターゲットでは glint と speckle を生ずる。glint は一般に鏡面反射として扱われ、speckle は不規則な表面からの diffuse な反射として incoherent で統計的性質を示す。エアロゾルは面積が小さいので glint と speckle を示さない。

(4) 受光器入射瞳での受信光の振幅は大気透過の反転性により次式となる。

$$E_R(\rho, t) = \int d\rho' E_L(\rho', t-L/c) h_L(\rho, \rho') \quad (10)$$

(5) (5) 式の電流 S/N 比 (パワー) から雑音のパワースペクトル (パワー/バンド幅) は $S_{nn}(\omega) = h\nu_0/\eta$ で与えられることが分かる。(5) 式の分子から光電流の信号分はパワー P_0 の $1/2$ 乗に比例するので光電流を $r(\omega_{IF}, t) = P_0^{1/2}$ で定義する:

$$r(\omega_{IF}, t) = (c\epsilon_0/2)^{1/2} \int d\rho E_R(\rho, t) \xi_L^*(\rho) + n(t) \quad (11)$$

$n(t)$ は平均値が0のガウス型の複素白色雑音である。LOが十分強いヘテロダイン検出の極限を考えているので、雑音はLOのショット雑音で決まり、(5)式に示されるように全体を P_L で標準化して、雑音のパワースペクトルは $S_{nn}(\omega) = h\nu_0/\eta$ である。(S/N比を決める変動の主成分は大気のゆらぎである。)

4.4 スペクトル幅、視野角等の必要条件

CLが効率的に動作するために必要な条件は以下の通りである:

(1) [受光面積と視野角] 受光面上で同一時間の波面の位相は 2π 以内に収まっていなければならないので $Ar\Omega \leq \lambda^2$ (Ar は受光光学系の開口面積, Ω は視野角) が満足されなければならない (Siegman のアンテナ理論)。これは光の波長で整合が取れていなければならないので大気の揺らぎの影響があるときには厳しい条件である。また、レーザビームが有効に利用されるには、その広がりには視野角よりも狭い必要がある。

(2) [位相整合] 受光面上で受信信号光、局部発振光 (LO) の位相が一致する必要がある。ここでは最適状態 $\xi_L(\rho) = \xi_T^*(\rho)$ を仮定する。

(3) [中間周波数とゲート時間] 受光側での検出器のゲート時間内での中間周波ビート信号の位相の変化は 2π 以下でないと有効な検出ができない。距離分解能と中間周波数の間には $(2 \cdot \text{距離分解能}/c) \cdot \omega_{IF} \leq 2\pi$ が満たされないと効率が悪くなる。

(4) [スペクトル幅] スペクトル幅にはレーザスペクトル幅 $\delta\nu \leq$ フィルタ帯域幅 $\Delta\nu_{IF} <$ 中間周波数 ν_{IF} の関係がある。 $\delta\nu$ は

$$\delta\nu = \{(\delta\nu_0)^2 + (1/2\pi\tau_s)^2 + (\Delta\nu_{Dop})^2\}^{1/2}$$

である。ここで $\delta\nu_0$ はレーザ固有のスペクトル幅, τ_s は大気の揺らぎの相関時間, $\Delta\nu_{Dop}$ はドップラー幅である。幅 Δt の矩形パルスはスペクトル幅 $1/\Delta t$ に広がるので単一パルス CL では $1/\Delta t$ を $\delta\nu_0$ に取り込む必要がある。M 系列変調の

場合はパワースペクトルが中心成分を除いて、幅 Δt の矩形パルスが周期 $N\Delta t$ で繰り返す場合と同じく、周波数間隔 $1/(N\Delta t)$ の規則的なスペクトル列になる。したがって、M 系列や周期的パルス列の場合には個々のスペクトル成分の幅が十分狭ければ矩形パルス幅による広がり逃げる事ができる。

以上 (1)~(4) は CL に共通の条件である。中期周波数成分が振幅のまま積算して意味を持つためには次の条件が必要である。

(5) [コヒーレンス時間] コヒーレンス時間 $>$ 積算時間 $>$ M 系列周期。コヒーレンス時間 τ_c は $1/2\pi\delta\nu$ で決まる。ここで $\delta\nu$ は個々のスペクトル成分について考えれば良い。したがって、長いコヒーレンス時間を実現するにはレーザのスペクトル幅が狭く、大気揺らぎの影響が少ないことが必要である。

4.4 パルス方式と RM-CW 方式のコヒーレントライダ

ヘテロダイン (またはホモダイン) 検出法を用いた CL で散乱体の空間分布を得る方法としては FM-CW 方式もあるが通常はパルス方式が用いられており、CO₂ レーザを光源とする CL で、風速³⁵⁾、エアロゾル濃度³⁶⁾、水蒸気濃度³⁷⁾が測定されている。RM-CW ライダ^{4), 5)}は矩形パルスの距離セルに対する 1 次結合である。したがって振幅に関して加算する場合には、周期的繰り返しパルスの CL でも (スペクトル幅を除き)、ほぼ同様の取扱いが可能である。以下では RM-CW 方式コヒーレントライダ (RM-CW-CL) を取り扱う。レーザ光 (角周波数 ω_0) は時間幅 Δt を単位として M 系列コード (1, -1) に従って (0, π) の位相変調を受け、大気中へ送出される (振幅 $E_T(\omega_0)$)。レーザ光は対象物質 (距離 $ic\Delta t/2$ における散乱係数 Q_i : Q_i は直接検波方式の応答関数の平方根に比例) によって後方散乱され、望遠鏡に集光される。基準となる時間より $i\Delta t$ 後に受光される受信々号光の振幅 $u_e(\omega_0)$ は途中の大気揺らぎの影響を考慮し、

$$u_{ei}(\omega_0) = E_R(\omega_0) \sum a_{i-j} Q_j + E_b(\omega_b) \quad (12)$$

となる。ここで a_i は (1, -1) からなる M 系列、 E_b

(ω_b) は背景光 (周波数 ω_b) の振幅である。受光望遠鏡で局部発振光 (振幅 E_L , 角周波数 $\omega_L = \omega_0 - \omega_{IF}$) と混合され、(11) 式に相当する中間周波 ω_{IF} 成分の光電流 $u_i(\omega_{IF})$:

$$u_i(\omega_{IF}) = E_R \xi_L \sum a_{i-j} Q_j + n_i(\omega_{IF}) \quad (13)$$

を得る。 ξ_L は局発モードに依存する定数であるが、簡単のために光電流への変換係数なども含める。この $u_i(\omega_{IF})$ と中間周波の基準信号とを混合して DC 成分 $u_i(\text{DC})$ を得る。RM-CW-CL ライダでは ω_{IF} との混合 (ダブルヘテロダイン) によって直線検波を行うのが特徴である。振幅成分を変調コードと相関をとると自己相関関数が δ 関数に近い性質を持つので、応答 Q_j が得られる。 $u_i(\text{DC})$ を M 回積算後の変調コードとの相関値の期待値は

$$S_i(\text{DC}) = ME_R \xi_L \xi_{IF} \{ (N+1)Q_i - \sum Q_j \} \quad (14)$$

となる。第 2 項を差し引き、自乗することによって散乱体濃度の空間分布 Q_i^2 を求めることができる。

4.5 直線検波における SN の式

直線検波 (包絡線検波) されて得られた直流成分 S_{RM} は (14) 式第 1 項と雑音成分 ((14) 式では期待値を取るときに落ちた) からなる:

$$S_{RM,i} = M(N+1)S_i + M \sum n_{i+a_i} \quad (15)$$

ここで $S_i = E_R \xi_L \xi_{IF}$ とおいた。 n_i は $\langle n_i \rangle = 0$, $\langle n_i^2 \rangle = 1$ に規格化したガウス分布を取る雑音であると仮定する。 $\langle S_i \cdot n_j \rangle = 0$, $\langle n_i \cdot n_j \rangle = 0$ ($i \neq j$) を仮定すると

$$\langle S_{RM,i}^2 \rangle = M^2(N+1)^2 \langle |S_i|^2 \rangle + MN \quad (16)$$

となる。 $CNR = [\text{信号成分}] / [\text{雑音成分}]$ と定義すると

$$CNR_{RM} = M^2(N+1)^2 \langle |S_i|^2 \rangle / MN \approx MN \cdot CNR_p \quad (17)$$

となる。ただし $CNR_p = \langle |S_i|^2 \rangle$ である。後方散乱係数 β_i は S_{RM}^2 に比例するので

$$\begin{aligned} SNR &= E[S_{RM,i}^2] / \{ \text{Var}[S_{RM,i}^2] \}^{1/2} \\ &= M^2(N+1)^2 CNR_p / \{ M^2(N+1)^4 \text{Var}[|S_i|^2] + 2M^3 N(N+1)^2 CNR_p + M^2 N^2 \}^{1/2} \end{aligned} \quad (18)$$

で与えられる。RM-CW-CL では一般に信号レベ

ルが低いので、 $CNR(=N \cdot CNR_p) < 1$ ($M=1$ のとき)が成立し、 $SNR = MN \cdot CNR_p$ となる。 CNR_p は E_T^2 すなわちパワー P_T に比例するので、 $SNR = MN \cdot CNR_p$ は SNR が平均パワーで決まることを示している。

4.6 大気の揺らぎの影響

大気の揺らぎは信号光の位相面を歪ませ、光の波長で影響するので、コヒーレント検出に大きな影響を与える。これには空間的な波面の歪と周波数領域での影響とがある。大気の揺らぎは通常Kolmogorovのモデルを用いて試算される。空間的な波面の歪から受光系開口での横方向の口径は横方向コヒーレンス長 ρ_0 に制限される：

$$\rho_0 = [2.91k^2 \int_0^L dz C_n^2(z) (1-z/L)^{5/3}]^{-3/5} \quad (19)$$

光路 L にわたって構造関数 C_n^2 が一定のとき、 $\rho_0 = 0.945(k^2 L C_n^2)^{-3/5}$ となる。 ρ_0 は距離 L とともに減少するが、 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 、 $L = 1000 \text{ m}$ のときに $\rho_0 > 0.1 \text{ m}$ であるためには $C_n^2 < 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ である必要がある。 C_n^2 の代表値は揺らぎがほとんどないときに $C_n^2 \approx 5 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 、中程度の揺らぎのときに $C_n^2 \approx 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 、激しい揺らぎがあるときに $C_n^2 \approx 5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ であると言われている。周波数領域での位相の歪に対しては波長 $1 \mu\text{m}$ の領域では十分なコヒーレンス時間を得るにはほとんど揺らぎがないことが必要となる。

5. まとめ

RM-CWライダの取り掛かりは著者の一人(桜井)がM系列の擬似ランダム変調法を分光実験に応用しており、これがCWライダにも適用できないか検討したことに始まる。まずArレーザを光源とした擬似ランダム変調CW(RM-CW)ライダを製作し、夜間、十数kmまでのエアロゾルの観測が観測された。その後光源に半導体レーザを使用した小型のライダシステムの製作に取り掛かった。

効率良くデータを取得するために、連続してデータを取り込める信号処理器を設計製作するとともに、市販で容易に入手可能なICを利用するために入力信号の取り込みを並列のゲートを用意

して1/5のスピードに落とすなどの工夫を行い、1号機とそれを改良した2号機を製作した。

完全な実用機としては、半導体レーザの高出力化と安定化(経年変化がなくなること)がさらに発展し、全体をカスタムICを用いて小型化することが必要であるが、技術的にはほぼめどがついたといえる。

現在光ヘテロダイン検出を用いた計測技術が急速な発展を遂げているが、ヘテロダイン検波の場合には同じ平均パワーならばパルス動作でもRM-CWでも同じ S/N を与える。この場合、受信信号光が振幅の状態で加算できることを仮定している。現実には使用されているコヒーレントライダでは各パルスごとに振幅を自乗してから加算しているので、振幅の相乗効果が少ない。この振幅加算はコヒーレント時間内に行うときに有効なので、一般のパルスコヒーレントライダではその間に含まれるパルス数はそれほど多くなく、効果は少ないが、RM-CWライダの場合には大きな効果を発揮する。ただし、コヒーレントライダの場合には大気のじょう乱による位相乱れなど S/N を低下させる要素が加わるので果たしてコヒーレント(すなわちヘテロダイン)検波が良いかどうかは具体的に検討する必要がある。

最近原子の励起状態を利用したアトミックフィルタの研究が活発である。これを利用すると昼間でもほとんど背景光なく測定が可能となる。これらの技術を用いると昼夜の測定で性能にあまり差がない半導体レーザのRM-CWライダが可能となる。

最後に本研究に当たって、国立公害研究所大気物理研究室や東京都環境科学研究所の皆様はじめ、多数の方にお世話になったこと、また、日産科学振興財団研究助成金を初めとして、文部省環境科学特別研究費、明星電気(株)、シャープ(株)のお世話になったことを記し、感謝する。

引用文献

- 1) 例えば、中島尚男：半導体レーザ入門(広済堂産報出版、東京)172pp(1984).
- 2) N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba and K. Sakurai: *Appl. Opt.*, 22 1382 (1983).

- 3) 竹内延夫, 杉本伸夫, 桜井捷海, 馬場浩司, 上野敏行: レーザー研究, 11, 763 (1983).
- 4) N. Takeuchi, H. Baba, K. Sakurai, T. Ueno: *Appl. Opt.*, 25 63 (1986).
- 5) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行, 井戸田 健, 新井敏弘, 常見真人, 石河直樹, レーザー研究, 13, 353 (1985).
- 6) H. Baba, S. Hoshina, K. Sakurai and N. Takeuchi: *Rev. Sci. Instr.*, 56, 1926 (1985).
- 7) R. F. Woodman: *Radio Sci.*, 15, 417 (1980).
- 8) R. C. Dixon: *Spread Spectrum System* (John Wiley & Sons, New York, 1976).
- 9) G. R. Cooper and R. W. Nettleton: A spread spectrum technique for high capacity mobile communications, Proc. 27th Ann. Vehicular Technol. Conf., (Florida 1977).
- 10) D. L. Price and K. Skold: *Nucl. Instr. & Methods*, 82, 208 (1970).
- 11) C. V. Nowikow and R. Grice: *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 12, 511 (1979).
- 12) S. E. Craig, W. Fishbein and O. E. Rittenback: *IRE Trans. Mil. Electr.*, 153 (1962 April).
- 13) 阪本捷房, 滝 保夫, 宮川 洋, 鈴木 務, 小林久志, 神田隆吉: 符号化パルスレーダ方式. 東京大学工学部電気工学科紀要, 12号1 (1964, 3月).
- 14) 竹内延夫, 佐藤 健: レーザー研究, 15, 296 (1987).
- 15) R. E. Nathanson: *Radar design principles* (McGraw-Hill, New York, 1969).
- 16) 竹内延夫, 桜井捷海, 上野敏行: 日産科学財団研究報告書, Vol. 9, 334-339 (1986).
- 17) 竹内延夫, 桜井捷海, 上野敏行: 日産科学財団研究報告書, Vol. 10 (1987).
- 18) 竹内延夫: 科研費「光波利用センシング」第2回シンポジウム予稿, 61 (1988).
- 19) 佐藤 勇: 擬似ランダム系列, 相関係数およびスペクトル (磯部孝編) III-2, 東大出版会 170 (1967).
- 20) G. Hoffmann de Visme (伊理正夫, 伊理由美訳): 2値系列, 共立出版 143pp (1977).
- 21) 伊藤良一: 応用物理, 53, 128 (1984).
- 22) 末松安晴, 荒井滋久: レーザー研究, 15, 347 (1987).
- 23) 上野敏行, 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海: 電子情報通信学会誌, J-71C, 870 (1988).
- 24) 竹内延夫, 大井 紘: 科研費環境科学「レーザーセンサー班」研究報告集, B-331-R52-3 14 (1987).
- 25) 平山 力, 竹内延夫, 遠峰菊郎, 阿部成雄, 道本光一郎: ライダーによる霧の鉛直分布観測. 天気, 35(10) 15-18 (1988).
- 26) J. D. Klett: *Appl. Opt.*, 20, 211 (1981).
- 27) 伊瀬, 他: 東京都環境科研年報 (1987) 84-91.
- 28) 伊瀬, 他: 東京都環境科研年報 (1983) 3-10.
- 29) 笹野, 他: エアロゾル研究, 2 128-133 (1987).
- 30) 竹内延夫, 他: 気象学会 (1986年春), No. 336.
- 31) H. Baba, et al.: *Laser & Opt. Remote Sensing*, ThA4, 9.28-10.1, 1987, Cape Cod, USA.
- 32) N. Takeuchi: Proc. Int. Quantum Electr. Conf. (IQEC'88). PTu19 Tokyo 1988, July.
- 33) N. Takeuchi: On the Random Modulation cw coherent Lidar. 14th Int. Laser Radar Conf., 6-13, San Candido, Italy, June 20-24, 1988.
- 34) J. H. Shapiro, B. A. Capron, R. C. Harney: *Appl. Opt.*, 20, 3292-3313 (1981).
- 35) M. J. Post, R. A. Richter, R. M. Hardesty, T. R. Lawrence, F. F. Hall, Jr.: *SPIE*, 300, 60-65 (1981).
- 36) M. J. Post, F. F. Hall, Jr., R. A. Richter, T. R. Lawrence: *Appl. Opt.*, 20, 3292-3313 (1981).
- 37) R. M. Hardesty: *Appl. Opt.*, 23, 2545-2553 (1984).

研究発表

[印刷物]

- 1) N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba, and K. Sakurai: Random modulation cw lidar. *Appl. Opt.*, 22, 1382-1386 (1983).
- 2) 竹内延夫, 杉本伸夫, 桜井捷海, 馬場浩司, 上野敏行: 大気汚染計測擬似ランダム変調 CW ライダー. レーザー研究, 11, 763-771 (1983).
- 3) 馬場浩司, 山腰直樹, 桜井捷海: 多目的マルチカラーレーザーレーダの試作, レーザー研究, 12 (6), 321-326 (1984).
- 4) H. Baba, S. Hoshina, K. Sakurai, and N. Takeuchi: High-speed multichannel photon counter for time-resolved laser spectroscopy. *Rev. Sci. Instrum.*, 56, 1926-1929 (1985).
- 5) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行, 井戸田 健, 新井敏弘, 常見真人, 石河直樹: 半導体レーザーを光源とする擬似ランダム変調 CW ライダーの試作と動作特性. レーザー研究, 13, 353-364 (1985).
- 6) N. Takeuchi, H. Baba, and K. Sakurai, T. Ueno: Diode-laser random-modulation cw lidar *Appl. Opt.*, 25, 63-67 (1986).
- 7) 竹内延夫, 佐藤 健: 干渉フィルターを有するライダーにおける幾何学的効率の考察. レーザー研究, 15, 296-306 (1987).
- 8) 竹内延夫: 最近のレーザーレーダ技術, 電子通信学会誌, 67, 524-527 (1984).
- 9) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行: 半導体レーザーを光源とする擬似ランダム変調 CW ライダー, 応用物理, 56(12), 1005-1011 (1987).
- 10) 上野敏行, 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海: M系列を用いた擬似ランダム変調法 CW レーザレーダの応答測定と誤差, 電子情報通信学会論文

誌, 171-C, 870-878 (1988).

- 11) 上野敏行, 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海: M 系列擬似ランダム変調法を用いたレーザーライダーの応答測定, レーザー研究, 16(3), 101-118 (1988).

口頭発表

(国際会議)

- 1) N. Takeuchi, K. Sakurai, N. Sugimoto, H. Baba, M. Kondo (1982): RM-CW lidar. 11th International Laser Radar Conference, Madison, Wisconsin, D-6, 108-110, NASA Conf. Pub. No. 2228.
- 2) N. Takeuchi, H. Baba, K. Sakurai, T. Ueno (1984): Random-modulation cw lidar using an optical fiber head. Conf. Lasers Electro-Opt., Anaheim, California, WL-3, 6, 20.
- 3) N. Takeuchi, H. Baba, K. Sakurai, T. Ueno (1984): Construction of compact RM-CW lidar systems, 12th Int. Laser Radar Conf., Provence (France), 18, 8, 17.
- 4) N. Takeuchi, H. Baba, K. Sakurai, T. Ueno, N. Ishikawa (1986): Visibility and aerosol measurement by diode-laser random-modulation cw lidar, 13th Int. Laser Radar Conf., B-4, Toronto, 8, 11.
- 5) H. Baba, K. Sakurai, N. Takeuchi, and T. Ueno (1987): Improved diode-laser random modulation cw lidar. Top. Mt. on Laser and Optical Remote Sensing: Instrumentation and Technique. Cape Cod ThA4, Sept. 28-Oct. 1.
- 6) N. Takeuchi, K. Sakurai (1988): Lidar Systems Using Pseudo-Random code Modulation 14th Int. Laser Radar Conf., 6-1, San Candido, Italy, June 20-24.
- 7) N. Takeuchi (1988): On the Random Modulation cw Coherent Lidar. 14th Int. Laser Radar Conf., 6-13, San Candido, Italy, June 20-24.
- 8) N. Takeuchi (1988): On the Scheme of Amplitude Integration at an Atmospheric Coherent Lidar, Int. Quantum Electronics Conf. (IQEC '88). PTu Tokyo July 13-21.
- を用いた可搬小型レーザーライダーの検討, 第23回大気汚染学会, 宮崎, Nov., No. 841.
- 5) 竹内延夫, 杉本伸夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 佐藤家郷, 石河直樹 (1983): GaAlAs 半導体レーザーを用いた可搬型 RM-CW ライダーの設計と製作, 応用物理学会, 千葉, 4aK6.
- 6) 竹内延夫, 桜井捷海, 上野敏行 (1983): 擬似ランダム変調 CW ライダー, 光と電波 130 委員会, 東京, July.
- 7) 竹内延夫, 馬場浩司, 保科 聡, 桜井捷海, 佐藤家郷, 石河直樹 (1983): 半導体レーザーを用いた可搬型 RM-CW ライダーの動作特性, 応用物理学会, 仙台, Sep., 27aS6.
- 8) 竹内延夫, 上野敏行, 桜井捷海, 馬場浩司 (1983): 擬似ランダム変調 CW-DIAL の検討, 応用物理学会, 仙台, Sep. 27aS7.
- 9) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 佐藤家郷, 石河直樹 (1983): 可搬型 RM-CW ライダーの製作と動作特性. 第 9 回レーザ・レーダ (ライダー) シンポジウム, 鬼怒川, No. 21, 11, 10, 46-47.
- 10) 竹内延夫 (1983): 半導体レーザーを光源とする可搬型擬似ランダム変調 CW ライダーの開発, 第 24 回大気汚染学会, 三重, Nov., No. 337.
- 11) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行 (1984): 光ファイバーを用いた擬似ランダム変調 CW ライダ, 電子通信学会, 東京, 春, No. 1052.
- 12) 馬場浩司, 桜井捷海 (1984): 擬似ランダム変調多目的マルチカラーレーザーライダー (1), 第 31 回応用物理学関係連合講演会, 東京, la-K-4, 4, 1.
- 13) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行 (1984): 光ファイバーを用いた RM-CW LIDAR の動作特性. 第 31 回応用物理学関係連合講演会, 東京, la-K-5, 4, 1.
- 14) 上野敏行, 馬場浩司, 桜井捷海, 竹内延夫 (1984): M 系列変調方式によるレーザーライダーの応答測定誤差, 第 23 回計測自動制御学会学術講演会, 小金井, No. 2401, 7 月
- 15) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行, 媒田秀雄, 石河直樹 (1984): 半導体レーザーを光源とする擬似ランダム変調ライダーの試作. 計測自動制御学会第 10 回リモートセンシングシンポジウム, 東京, No. 10, 11, 5.

(国内)

- 1) 竹内延夫, 杉本伸夫, 桜井捷海 (1982): 擬似ランダム変調 CW ライダー I 概要, 応用物理学会, 東京, 4aG3.
- 2) 桜井捷海, 馬場浩司, 竹内延夫, 杉本伸夫, 近藤真通 (1982): 擬似ランダム変調 CW ライダー II, 装置と実験, 応用物理学会, 東京, 4aG4.
- 3) 竹内延夫, 桜井捷海, 杉本伸夫, 馬場浩司, 近藤真通 (1982): 擬似ランダム変調 CW ライダーの特性とエアロゾル観測. 第 9 回レーザ・レーダ (ライダー) シンポジウム, 長野, No. 37, 71-72.
- 4) 竹内延夫, 杉本伸夫 (1982): 擬似ランダム変調法を用いた可搬型レーザーライダーの検討, 第 23 回大気汚染学会, 宮崎, Nov., No. 841.
- 5) 竹内延夫, 杉本伸夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 佐藤家郷, 石河直樹 (1983): GaAlAs 半導体レーザーを用いた可搬型 RM-CW ライダーの設計と製作, 応用物理学会, 千葉, 4aK6.
- 6) 竹内延夫, 桜井捷海, 上野敏行 (1983): 擬似ランダム変調 CW ライダー, 光と電波 130 委員会, 東京, July.
- 7) 竹内延夫, 馬場浩司, 保科 聡, 桜井捷海, 佐藤家郷, 石河直樹 (1983): 半導体レーザーを用いた可搬型 RM-CW ライダーの動作特性, 応用物理学会, 仙台, Sep., 27aS6.
- 8) 竹内延夫, 上野敏行, 桜井捷海, 馬場浩司 (1983): 擬似ランダム変調 CW-DIAL の検討, 応用物理学会, 仙台, Sep. 27aS7.
- 9) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 佐藤家郷, 石河直樹 (1983): 可搬型 RM-CW ライダーの製作と動作特性. 第 9 回レーザ・レーダ (ライダー) シンポジウム, 鬼怒川, No. 21, 11, 10, 46-47.
- 10) 竹内延夫 (1983): 半導体レーザーを光源とする可搬型擬似ランダム変調 CW ライダーの開発, 第 24 回大気汚染学会, 三重, Nov., No. 337.
- 11) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行 (1984): 光ファイバーを用いた擬似ランダム変調 CW ライダ, 電子通信学会, 東京, 春, No. 1052.
- 12) 馬場浩司, 桜井捷海 (1984): 擬似ランダム変調多目的マルチカラーレーザーライダー (1), 第 31 回応用物理学関係連合講演会, 東京, la-K-4, 4, 1.
- 13) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行 (1984): 光ファイバーを用いた RM-CW LIDAR の動作特性. 第 31 回応用物理学関係連合講演会, 東京, la-K-5, 4, 1.
- 14) 上野敏行, 馬場浩司, 桜井捷海, 竹内延夫 (1984): M 系列変調方式によるレーザーライダーの応答測定誤差, 第 23 回計測自動制御学会学術講演会, 小金井, No. 2401, 7 月
- 15) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行, 媒田秀雄, 石河直樹 (1984): 半導体レーザーを光源とする擬似ランダム変調ライダーの試作. 計測自動制御学会第 10 回リモートセンシングシンポジウム, 東京, No. 10, 11, 5.
- 16) 竹内延夫 (1984): 光ファイバーを用いた擬似ランダム変調ライダー. 第 25 回大気汚染学会, 宇部, No. 960, 11, 9.
- 17) 竹内延夫, 媒田秀雄, 石河直樹, 井戸田 健, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行 (1985): 半導体レーザー擬似ランダム変調 CW ライダーの特性と夜間エアロゾル観測への応用. 第 32 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 29pZE12, 3, 29.
- 18) 井戸田 健, 媒田秀雄, 竹内延夫, 新井敏弘 (1985): RM-CW ライダーにおける昼間時エアロゾル測定のための考察—発振波長特性. 第 32 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 29pZE13, 3.

- 29.
- 19) 竹内延夫, 馬場浩司, 上野敏行, 桜井捷海, 石河直樹(1985): 半導体レーザーを光源とする擬似ランダム変調 CW ライダーの動作特性. 第 10 回レーザー・レーダ(ライダー)シンポジウム, 福井, F2, 5. 17.
- 20) 竹内延夫, 上野敏行, 馬場浩司, 桜井捷海(1985): 半導体レーザー RM-CW ライダーの動作特性と測定誤差 (I) 幾何学的効率と回路雑音の影響. 第 46 回応用物理学関係連合講演会, 京都, 4pM16, 10. 4.
- 21) 上野敏行, 馬場浩司, 桜井捷海(1985): 半導体レーザー RM-CW ライダーの動作特性と測定誤差 (2) 非線形歪みの影響. 第 46 回応用物理学関係連合講演会, 京都, 4pM17, 10. 4.
- 22) 竹内延夫, 大井 紘(1985): 半導体レーザーを光源とする擬似ランダム変調 CW ライダーの動作特性, 環境科学特別研究発表会レーザーセンサー班発表会, 東京, 11
- 23) 竹内延夫(1985): 可搬型 RM-CW ライダーによる夜間エアロゾルの観測, 第 26 回大気汚染学会, 東京, 11. No. 707.
- 24) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行, 石河直樹(1985): 半導体レーザー擬似ランダム変調 CW ライダーの特性と性能評価. 日本リモートセンシング学会第 5 回学術講演会, 東京 12, 137-138.
- 25) 上野敏行, 佐藤 健, 馬場浩司, 桜井捷海, 竹内延夫(1986): 擬似ランダム変調 CW ライダーにおける変調歪みの影響, 昭和 61 年第 6 回レーザー学会学術講演会, 横浜, 2.
- 26) 桜井捷海, 馬場浩司, 大野正夫, 竹内延夫, 上野敏行(1986): 半導体レーザーを用いた擬似ランダムコード FM 変調 CW-DIAL の提案. 第 33 回応用物理学関係連合講演会, 東京,
- 27) 竹内延夫, 佐藤 健, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行, 石河直樹(1986): 可搬型ライダーによる夜間斜め視程観測と TRANSMISSOMETER 観測との比較, 日本気象学会春季大会, 東京, 1986. 5.
- 28) 竹内延夫, 佐藤 健, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行, 石河直樹(1986): 半導体レーザー擬似ランダム変調 CW ライダーによる夜間フィールド観測, 第 11 回レーザーダシンポジウム, A1, 八戸, 9. 24.
- 29) 小田晴男, 常見真人, 石河直樹(1986): 空港用視程計とレーザーダの実測比較, 第 11 回レーザーダシンポジウム, F3, 八戸, 9. 25.
- 30) 竹内延夫, 佐藤 健(1986): 狭帯域干渉フィルターを有するレーザーライダーの幾何学的効率の検討, 第 47 回応用物理学学会学術講演会, 29Fa 6, 札幌, 9. 29.
- 31) 竹内延夫, 大井 紘, 桜井捷海, 馬場浩司, 上野敏行(1986): 擬似ランダム変調 CW ライダーの原理とフィールド測定への応用, 第 1 回環境科学シンポジウム, 2D08, 東京, 11. 13.
- 32) 竹内延夫(1986): 可搬型擬似ランダム変調 CW ライダーによる視程観測, 第 27 回大気汚染学会, 京都, 743, 11. 18
- 33) 馬場浩司, 竹内延夫, 桜井捷海, 石河直樹, 藤山照男, 上野敏行(1987): 改良型半導体レーザー擬似ランダム変調 CW ライダー, 第 34 回応用物理学関係連合講演会, 30aZK1, 東京, 3. 30
- 34) 桜井捷海, 馬場浩司, 竹内延夫, 椿 雅博, 佐藤家郷(1987): 半導体レーザー擬似ランダム変調 CW ライダにおける波長安定化—分散素子への波長ロック, 電子通信学会全国大会, 3. 29, 日吉.
- 35) 竹内延夫, 佐藤 勲, 馬場浩司, 桜井捷海(1987): 半導体レーザー携帯型ライダーによる道路・トンネル内の排ガス観測とその FFT 解析, 気象学会, No. 329, 筑波, 5. 26-28.
- 36) 竹内延夫(1987): 擬似ランダム変調コヒーレントライダーの検討. 応用物理学, 19pZA8, 名古屋, 10. 19
- 37) 竹内延夫(1988): ダブルヘテロダイン擬似ランダム変調コヒーレントライダーの考察, 応用物理学, 31pZM5, 東京, 3. 31
- 38) 竹内延夫(1988): 擬似ランダム変調コヒーレントライダー, レーザー学会, 19pIII4, 東京, 2. 19.
- 39) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行(1988): CW 半導体レーザーを光源とする擬似ランダム変調レーザーレーダ, レーザー学会, 19pIII1, 東京, 2. 19.
- 40) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行(1988): 擬似ランダム変調 CW ライダーによる道路粉塵の観測, レーザーシンポジウム, A2, 岡山, 5. 27.
- 41) 竹内延夫(1988): 擬似ランダム変調コヒーレント CW ライダーの検討, レーザーシンポジウム, C6, 岡山, 5. 27.