

低層大気観測用車載型ライダーの開発と盆地における動作試験*

斉藤保典*¹・山村祐司*²・松井一郎*³
 杉本伸夫*⁴・野村彰夫*⁵・鹿野哲生*⁶

要旨

移動観測が可能な車載型ライダーシステムを製作し、その実証試験として善光寺平盆地（長野市）上空の24時間連続大気観測を試みた。ライダーシステムの製作にあたっては、特殊な観測車を用いずに市販車での使用が可能なこと、低層大気観測時における近距離散乱信号を効率良く受信可能なことなどを強く意識して、送受信光学系視野重なり最適設計に基づき製作がなされた。その結果、従来あまり考慮されていなかった望遠鏡副鏡の視野重なりへの影響が、特に低層観測の場合に重要であることなどが示された。本システムによる逆転層の鉛直構造分布時間変化の連続観測結果を示し、エアロゾル構造の特異的な二重分布構造について報告した。このような観測を通じて、本ライダーシステムの有効性を実証した。

1. はじめに

長野市に代表される高海拔盆地では平野部にはみられない特異な大気現象を有している。その地形に起因する局地風（長野地方気象台編，1988）、山岳気象（同；星川，1990）、接地性逆転層の多発（栗田；1988）などの他にも、関東地区からの高濃度汚染気体の信州地区への流入（栗田，1987）など、興味深い大気現象の報告がなされている。

特に逆転層に注目してみると、鉛直方向への大気拡散が抑制されるためにエアロゾルが地上から高度数100 m 程度内に高濃度で滞留することが知られており、特に長野市のような盆地の閉鎖系ではその滞留時間が長期にわたる可能性を伴う。高濃度エアロゾルの中には、自然発生エアロゾルの他に日中の生産活動により生成された人工的なもの（自動車排気ガスなど）

も含まれ、単に気象学的な興味に留まらず環境科学や都市衛生などの観点からもその挙動や構造が注目される。さらに長野市を中心とする周辺地域においては、1998年の冬季オリンピック開催に向け関連施設の建設や高速交通網の整備などが急ピッチで進められており、このような大規模都市開発が都市大気構造変化に及ぼす影響（斉藤ほか，1993）なども懸念されている。その変化をきちんと観測により把握して基礎データとして蓄積し利用していくことは十分に意義のあることである。

ライダー（レーザーレーダー）は大気構造分布を把握する上で非常に優れた計測システムの一つである。しかしながら装置が大型化するため、国内のライダーシステムには設置型が多く使用されてきた。長野市のように複雑な地形に依存した気象現象の詳細な解明のためには、移動可能なシステムにして場所を選ばずに観測が可能なライダーシステムが有効と考えられる。

本報告では、このような目的を踏まえて、特に低層大気観測を意識して製作された車載型ライダーシステムについて紹介する。次に同システムを用いて行った、強い逆転層発生時におけるエアロゾル密度鉛直構造変化の興味ある観測例について述べ、製作システムの評価を行う。

* Development of a mobile-type lidar system for observation of lower atmosphere and demonstration in the Zenkojidaire (Nagano) basin area.

*¹ Yasunori Saito, 信州大学工学部.

*² Yuji Yamamura, 信州大学工学部.

*³ Ichiro Matsui, 国立環境研究所.

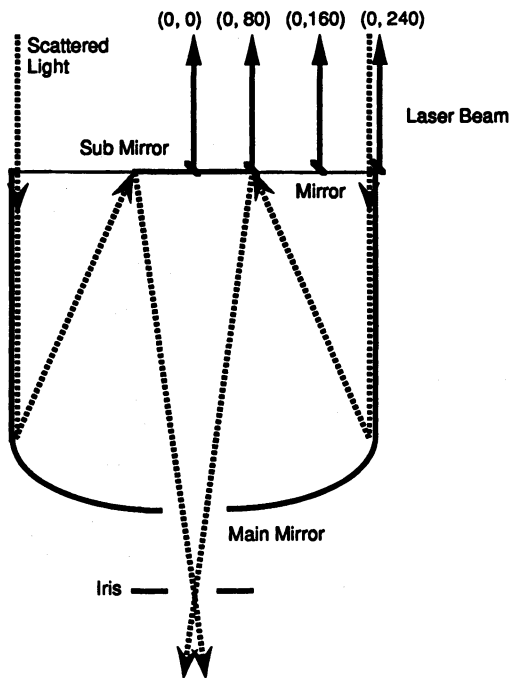
*⁴ Nobuo Sugimoto, 国立環境研究所.

*⁵ Akio Nomura, 信州大学工学部.

*⁶ Tetsuo Kano, 八戸工業大学.

—1995年12月26日受領—

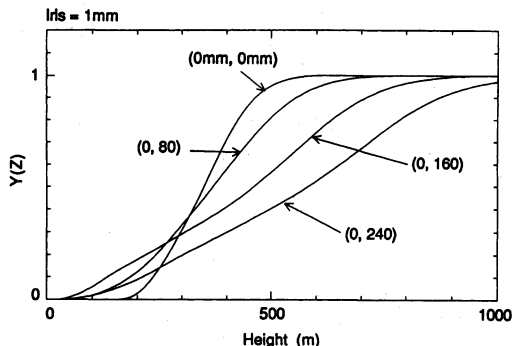
—1996年9月25日受理—



第1図 送受信光学系配置図.

第1表 視野重なり計算に用いたパラメータ.

主鏡直径	0.45 m
副鏡直径	0.20 m
焦点距離	1 m
主鏡-副鏡間距離	0.6 m
レーザー射出鏡直径	0.03 m
視野絞り直径	1 mm
レーザー射出位置	(0, 0), (0, 80), (0, 160), (0, 240)
	単位は mm
レーザービーム直径	0.01 m
レーザービーム広がり	0.3 mrad



第2図 視野重なり関数の計算結果例.

2. 車載型ライダー観測システム

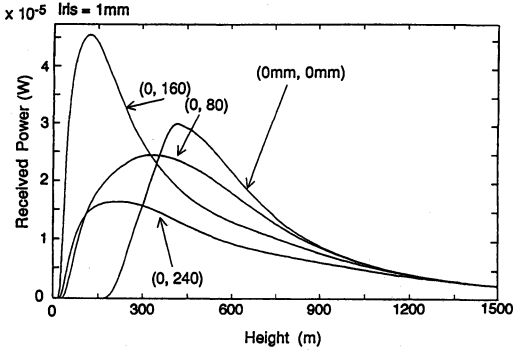
2.1 低層大気観測のための設計シミュレーション

接地逆転層等の低層大気現象をライダーにより観測する場合、送信レーザー光と受信望遠鏡視野とがなるべく低高度から重なる(視野重なり)ようにライダーシステムを設計することが重要である。このため本設計においては特にレーザー光の射出位置に配慮し、視野重なりが最も近距離から得られる条件を計算により求め設計の指針とした。

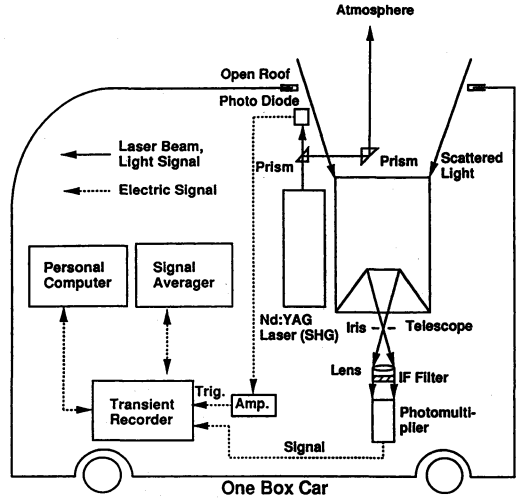
計算には、杉本ほか(1990)により与えられた望遠鏡の幾何学的モデルおよび式を使用した。視野重なり関数に及ぼす望遠鏡副鏡や視野絞りの効果を明確に表現したものである。送受信系を第1図のように設定し第1表に示す値を用いて視野重なりを計算した。第2図に、レーザー光射出位置をパラメータにした時の視野重なり関数の計算例を示す。レーザー光を望遠鏡の中心(0, 0)、副鏡内(0, 80)、主鏡と副鏡の間(0, 160)、主鏡外(0, 240)からそれぞれ射出した場合(単位はmm)を計算した。望遠鏡の中央から射出した場合には、近距離において副鏡の影の影響を受け受信光が視野絞り内に入らない。副鏡内(望遠鏡中心より少しずれた位置)から射出した場合には、その影響が小さくなるため中央から射出した場合に比べてより近距

離から視野重なりが得られる。主鏡の外側から射出した場合についても、レーザー射出位置と望遠鏡の位置が近い場合には、望遠鏡中心から射出した場合よりも近距離から視野重なりが得られる。通常視野重なりを検討する場合、副鏡の影響を考慮した詳細な議論はほとんどないが(杉本ほか, 1990)、視野重なりが得られないことは受信信号が得られないことを意味するため、近距離を対象とした低層大気観測の場合にはこのような議論が特に重要である。第2図の結果では(0, 160)の射出位置のときに最も近距離から視野重なりが得られており、レーザー光を主鏡と副鏡の間(主鏡内側かつ副鏡外側)から射出するのが適していることがわかる。

この結果を用いて、ライダー方程式(例えば齊藤ほか, 1994)に基づいて鉛直観測を仮定したときの受信信号電力(Aスコop)のシミュレーションを行った。計算に用いたパラメータは、レーザー送信エネルギー10 mJ、光学系効率0.04で、望遠鏡パラメータは第1表と同じである。大気分子モデル(R)は(1)~(3)式で、エアロゾルモデル(M)は(4)~(6)式で与えた。



第3図 受信信号電力 (Aスコープ) シミュレーション結果例.



第4図 車載型ミー散乱ライダーシステム.

$$\beta_R(Z) = 1.54 \times 10^{-6} \times \exp(-Z/7 \text{ km}) \quad (1)$$

$$\alpha_R(Z) = S_R \times \beta_R(Z) \quad (2)$$

$$S_R = 8 \pi/3 \quad (3)$$

$$\beta_M(Z) = 2.47 \times 10^{-6} \times \exp(-Z/1.9 \text{ km}) \quad (4)$$

$$\alpha_M(Z) = S_M \times \beta_M(Z) \quad (5)$$

$$S_M = 50 \quad (6)$$

ここで β は体積後方散乱係数 ($\text{m}^{-1}\text{str}^{-1}$), α は消散係数 (m^{-1}), S は散乱パラメータ (str^{-1}) を意味する. Z は高度 (m) である. 第3図に望遠鏡により集光されて光電子増倍管に入射する光電力の距離依存の計算結果を示す. 視野重なるの開始が低高度 (近距離) になるほど大きな受信信号が得られている. これは受信信号電力が距離の二乗に反比例して減少することに由来するもので, 近距離における視野重なりは受信電力を高める点からも重要であることが示された.

通常ライダー観測においては, 観測可能の判定として信号対雑音比 (SN) が10になる条件を設定する場合が多い. この条件は, 3.8×10^{-9} (W) の受信光電力に相当し, 第3図の結果や3章での実験結果と比較すると 25 m 以下の低い高度においても十分な SN を有することが確認された.

2.2 車載型ライダーシステムの製作

車載型ライダーはこれまでに清水ほか (1980) の報告があるのみで, この時は大型で専用の計測車が必要であった. ここでは, 市販 (4ナンバー) のワンボックスカーに搭載可能で, (特別な車両免許を有しない) 観測者や研究者自身が自由に運転しながら観測場所を固定せずに観測を行うことができることを目標にして製作を行った (松井ほか, 1993).

製作したミー散乱型ライダーシステムの概略を第4図に示す. レーザー装置には屋外環境下でも長期観測に耐える信頼性を有しこれまでのライダー観測システムにおいて最も実績があり, かつ光検出器である光電子増倍管の波長感度特性が良好な Nd:YAG レーザーの第2高調波 (532 nm) を使用した. パルスエネルギー 100 mJ, 繰り返し 10 pps である. 大きさはレーザーヘッドが159 (高さ) \times 178 (幅) \times 770 (長さ), 電源は527 \times 622 \times 286 (単位はいずれも mm) と, 望遠鏡や電子・計測機器を配置しても観測者2人程度は車内を自由に動き回ることが可能であった. レーザービームは第2図の結果を参考にして, 2個のプリズムで受信望遠鏡の中心より数 cm 離れた場所 (実験的に決定) から大気中に鉛直方向に射出された. プリズムを使用したのは, 将来的に多波長 (Nd:YAG レーザーの基本波 (1.06 μm) および第3高調波 (355 nm) でのライダー観測を想定したためである. 大気からの後方散乱光は口径 35 cm のシュミットカセグレン型光学望遠鏡で受信され, 干渉フィルタ付きの光電子増倍管により電気信号に変換された. 電気信号はトランジェントレコーダにより高速 AD 変換 (50 ns/word) され, 積算器で4096回のハード的積算の後に7分毎に1データがブック型のマイクロコンピュータに転送され保存された.

3. 動作実証試験

3.1 観測結果と検討

システム動作実証試験のための観測を行った. 観測



第5図 観測場所地形図.



第6図 ライダー観測の様子.

は長野市立松代中学校の校庭（長野市松代町松代207, 海拔約 350 m）で1992年12月12日から19日まで行われた。観測期間中15日から16日にかけては快晴に恵まれ24時間以上の連続観測ができたが、他の期日においては小雪やみぞれ、また千曲川から発生する強い川霧の発生などの悪天候のため断続観測となった。観測場所の地図を第5図に、観測中の様子を第6図にそれぞれ示す。同観測場所は長野市の真南に位置し、三方を山に囲まれすぐ背後には1500 m級の山並が続き、前面には田園地帯が広がっている。平野部には見られない複雑な地形から生じる特異的な大気現象が期待された。

15日17時から16日17時までの観測結果を第7図に示す。距離分解能は7.5 m, 時間分解能は約7分である。ライダー方程式を変形して得られる次式で与えられるパラメータを使用して、大気状態の相対的な変化を10段階の濃淡表示にしたものである。

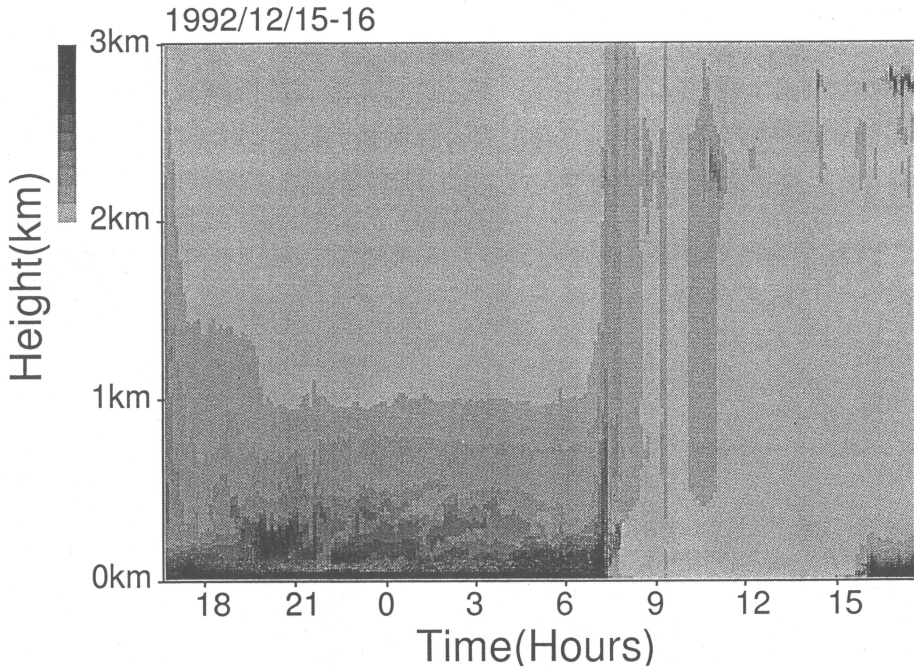
$$C\beta T^2 = (P_r - P_b) Z^2 / Y \quad (7)$$

ここで C はライダーシステムの定数, β は体積後方散乱係数, T は大気透過率, P_r は受信信号電力, P_b は背景光電力, Y は視野重なりである。視野重なりは Sasano *et al.* (1979) の手法を用いて、大気状態が一樣と考えられる14時前後の観測値を用いて求めた。

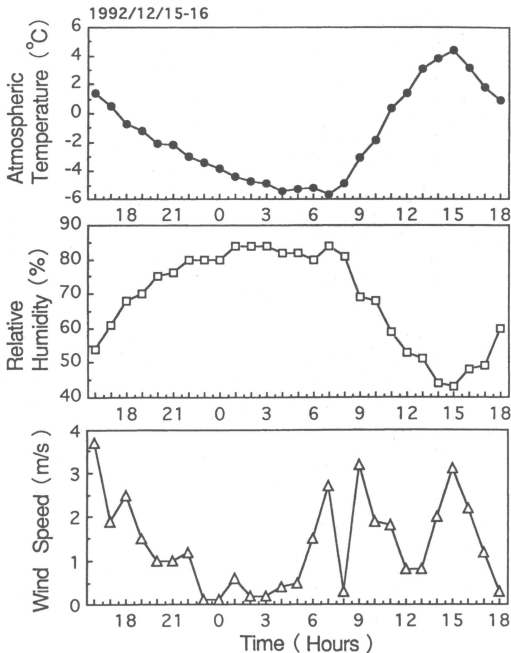
当日の天候は快晴で気象パラメータ（気温, 相対湿度, 風速）を第8図に示した。これらは観測場所から約 7.6 km 離れた長野県衛生公害研究所にて測定されたものである（第5図参照）。変化の様子は1）夕方から21時頃, 2）夜半から明け方, 3）日の出から早朝, 4）日中の, それぞれの時間帯に分けて考えられる。

1）の時間帯では、大気中に広く分布していたエアロゾルは1 km 付近以上では観測されなくなる。同時に気温の低下や風速の減少が観測されているため、これらの気象条件に影響を受けエアロゾルが降下した可能性がある反面、対流層が薄くなるとともに対流により上空に持ち上げられていたエアロゾルが吹き払われて消滅したものとも考えられる。16時から21時までのおよその降下あるいは拡散消滅の速度は500 m/時間、これに対し気温は平均0.72°C/時間の減少、相対湿度は平均4.4%/時間の増加、風速は平均1.93 m/sであった。

2）の時間帯では、エアロゾル層の上限はほぼ1 km程度で、その状況は明け方近くまで続いた。よくみると地上付近から60 m程度までに非常に濃い領域と110 mから200 m程度にかけての濃い領域との二重構造で閉じ込められた形で存在しているのがわかる。その間（60 mから110 m）は上記両領域よりは低濃度の



第7図 観測結果 (高度は地上 (海拔約 350 m) からの値).



第8図 気温, 相対湿度, 風速の観測値.

様子を呈していた。特に19時50分頃から0時30分頃までその傾向が強かった。また22時頃から4時頃にかけて上空 200 m から 500 m 程度の領域では、エアロゾルが鉛直方向へ振動しながらしだいに上空方向へ拡散

していく様子が見うけられる。地上付近ではほぼ無風状態ながら、上空では混合活動をもたらす程度の風があるものと思われる。このような極微細構造変動の検出に対してライダーシステムによる観測が非常に有用であることが再確認された。21時から7時までの気温は平均 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{時間}$ の減少, 相対湿度は平均 $0.8\%/\text{時間}$ の増加, 平均風速は 0.77 m/s (23時から5時までは 0.3 m/s)であった。

3) の時間帯では、7時30分頃の日の出(目視)とともに気温や風速が上昇し、それに伴い高濃度エアロゾルは次第に上空に拡散しながら低濃度化した。上昇速度は約 $1.9\text{ km}/\text{時間}$ で、1) の時間帯における降下または拡散消滅速度と比較して約4倍早い現象を示した。7時から9時までの気温は平均 $1.3^{\circ}\text{C}/\text{時間}$ の増加, 相対湿度は平均 $7.5\%/\text{時間}$ の減少, 平均風速は 2.1 m/s であった。

4) の日中には、十分な対流活動の結果厚い混合層内に拡散してエアロゾル濃度が低下し、あるいは上層の風に吹き払われてエアロゾルからの十分な受信信号は確認されなかった。地表面付近は16時前後から再び高濃度のエアロゾルが出現している。出現の様子は気温降下と相対湿度上昇に非常に良く連動していることがわかる。また高度 2.8 km 付近に見受けられるものは雲によるものである。9時から15時までの気温は平

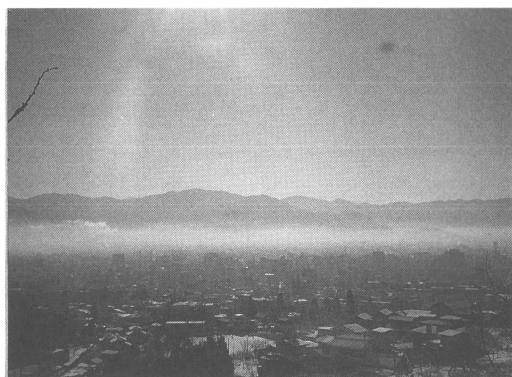
均1.23°C/時間の増加, 相対湿度は平均4.3%/時間の減少, 平均風速は1.94 m/sであった。

3.2 逆転層内二重構造について

本観測において特に興味をもたれた点は、2)の時間帯に見られた逆転層内二重構造である。逆転層が地面付近でのみ発生した(いわゆる接地逆転層のみ)とすると、このような二重構造にはならないと思われ、またエアロゾル発生源がこの時間帯に逆転層上層にあることは考えにくい。長野市のような盆地(特に観測地点のように山裾に位置する場合)における逆転層の発生には放射性逆転の他に地形性逆転の影響も無視できない。これは重い冷気が盆地斜面に添ってゆつくりと盆地の低地へと流れ込むもので(伊東, 1961), このことが開放系を有する平野部などの逆転層と比べてその発生機構や鉛直分布構造を複雑にしている。またその逆転の状況は放射による冷却のはげしい晴天の夜間に著しいことが知られている(気象学ハンドブック編集委員会, 1961)。これらのことを考慮して逆転層の二重構造を次のように仮定して考察した。

19時30分程度までは接地性逆転による影響が強く地表面のみに高濃度領域が表れるが、その後の気温の低下に伴い山斜面からの冷気が流れ込み、先に出来た逆転層(より冷たい層)の上層にも高濃度領域が形成されたものと思われる(特に19時30分から21時頃までの約150 mから300 mでの高度領域が顕著)。22時頃から4時頃までにみられる上空方向(200 m以上)への(微細な)拡散の様子から、山斜面からの流れ込みは22時以降はなかったものと考えられ、地形性逆転層の厚さは200 m程度を上限としてその増加が止まる。その後地上付近の気温低下はさらに続き、最低気温を示した4時頃から明け方にかけては接地逆転層がさらに発達し両者は一致した形となって1つの厚い逆転層となったものと思われる。バルーンとの同時観測を行っていないので詳細な検討はできないが、局地気象現象の1つとして大変興味深い。

第9図は観測地点とほぼ反対側の盆地斜面から写した(第5図参照)1993年1月3日9時30分頃の長野市内の状況である。写真左にみられる排煙(煙突高さ80 m)の状況や近くの低い山の高度から推定すると、高度100 mから200 m程度に非常に濃いエアロゾル層(煙突からの煙だけではない)があり、地上付近ではそれより低濃度の様子が確認される。日時は異なるものの、高濃度エアロゾルの滞留域は必ずしも地上付近のみではないことが知られる。



第9図 長野市内大気状況(1993年1月3日午前9時30分頃)。

4. おわりに

車載型ライダーシステムの製作を行い、動作実証試験として盆地内大気連続観測を行った。低層大気観測に特に留意して設計製作を行った結果、低層大気観測では送受信光学系の視野重なり関数が特に重要であること、視野重なりには副鏡の影響が無視できないことなど、従来あまり考慮されてこなかった点についての有用な示唆が得られた。観測結果からは逆転層発生時におけるエアロゾル鉛直構造分布に興味ある二重性の現象が示され、その説明として接地性逆転と地形性逆転を考慮することにより説明を試みた。

このような観測結果は試作した車載型ライダーシステムが、特に、限定された地域に発生する特異的な大気現象の観測に有効であることを示すものである。今後はライダー観測例を増やし、またバルーンなどの同時観測を行うことによってさらにその有効性を確かめるとともに、局所気象予報・災害の解明などへ役立てていきたい。

謝辞

本研究遂行にあたり次の方々に感謝致します。福岡大学浅野直人教授には多大な協力支援を頂きました。長野市立松代中学校小林市郎校長および小林中弘教頭には観測場所を提供して頂くと共に、観測に際して種々の便宜をはかって頂きました。長野県衛生公害研究所広沢伊市郎研究員には気象観測データを提供頂きました。

本研究の一部は平成4年度文部省科学研究費重点領域「人間-環境系」(公募:課題番号04202224)によるものである。

参 考 文 献

- 伊東彊自, 1961: 大気汚染と制御, 地人書館, 67-69.
- 気象学ハンドブック編集委員会編, 1961: 気象学ハンドブック, 技報堂, 923 pp.
- 栗田秀實, 1987: 傾度風が弱い場合の東京湾地域から中部山岳地域への大気汚染物質の長距離輸送(I), 全国公害研究誌, 12, 55-65.
- 栗田秀實, 1988: 長野県衛生公害研究所, 天気, 35, 335-336.
- 斉藤保典, 杉本伸夫, 1993: 長野市の急激な都市化に伴う大気環境のレーザーモニタリング, 文部省科研費重点領域研究「人間-環境系」研究広報 No. 18, 平成4年度研究成果報告, N-36B-13, 276-278.
- 斉藤保典, 野村彰夫, 鹿野哲生, 1994: スペースライダー特性のシミュレーション評価-雲, エアロゾル, Na原子層観測を例として-, 天気, 41, 251-259.
- Sasano Y., H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda, 1979: Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination, Appl. Opt., 18, 3908-3910.
- 清水 浩, 笹野泰弘, 竹内延夫, 松戸 修, 奥田典夫, 1980: 大気拡散観測用コンピューター化車載型レーザーレーダー, 国立公害研究所研究報告, 第16号, 17-32.
- 杉本伸夫, 松井一郎, 笹野泰弘, 1990: 低層大気構造観測用ライダーにおける幾何学的効率と送受信光学系の設計, 光学, 19, 687-693.
- 長野地方気象台編, 1988: 信州の気候百年誌, 33-37, 65-68.
- 星川和俊, 1990: 中央アルプス西駒演習林における夏季の気象特性, 信州大学環境科学論集, 12, 86-92.
- 松井一郎, 杉本伸夫, 斉藤保典, 1993: 大気混合層モニタリング用小型ミ-散乱型レーザー・レーダの開発, 第16回レーザーセンシングシンポジウム, p1., 71-72.

国際学術研究集会への出席補助金受領候補者の募集のお知らせ

-国際学術交流委員会-

国際交流事業(天気32巻5号p232)の一環として国際学術交流運用規定(天気41巻7号p444)に基づき、国際学術研究集会への旅費もしくは滞在費の補助を下記により行いますので、希望者は期日までに応募願います。

記

1. 対象の集会

- A: 1997年6月1日~11月30日および
B: 1997年12月1日~1998年5月31日の期間外国で開かれる国際学術研究集会

2. 応募資格

日本気象学会会員で国際学術研究集会に出席し論文の発表もしくは議事の進行に携わる予定のもの。ただし、ほかから援助のあるものは除く。

3. 募集人員

若干名

4. 補助金額

開催地域を考慮し最高15万円程度

5. 応募手続

所定の申請書類(日本気象学会事務局備付)を期日までに国際学術交流委員会(〒100 東京都千代田区大手町1-3-4 気象庁内日本気象学会気付)に提出する。大学院生は指導教官の推薦状を併せて提出する。

期日: A 1997年3月15日

B 1997年9月15日

注: 申請書は最新の様式のを日本気象学会事務局から取り寄せること。申請書の様式は断りなく変更することがある。古い様式の申請書で応募しても受理しない。

6. 補助金受領者の義務

当該集会終了後30日以内に集会出席の概要を「天気」に掲載可能な形式で1ページ(2000字)程度にまとめ、報告書として委員会に提出する。