



天 気

1986年12月
Vol. 33, No. 12

1091; 5011 (炭酸ガス濃度変動)

大気中の炭酸ガス濃度変動の国際比較観測*

光田 寧¹, 文字信貴¹, 佐橋 謙², 塚本 修³, 米谷俊彦⁴, 松井哲司⁵, 大滝英治⁶

1. はしがき

地表面や大気を保温する効果のある炭酸ガス濃度は大気中で着実に増加している。大気中の炭酸ガス収支を正確に把握するためには大気中での炭酸ガス濃度の経年変化ばかりでなく、大気と地表面との間での炭酸ガスフラックスを測定する必要がある。炭酸ガスフラックスの測定には仮定の少ない渦相関法が最も優れている。しかし、渦相関法を適用するには炭酸ガス濃度の10 Hz程度までの短周期変動を測定する必要がある、応答の速い炭酸ガス変動計の開発が待望されていた。そこで、我々も開光路を有する炭酸ガス変動計の開発にとり組んできた。とくに、1976年に開発した光路長50 cmの炭酸ガス変動計は分解能が1 ppm、ドリフトは数 ppm/時であり性能的には不満が残るが、この試作機の開発を通して開光路方式の炭酸ガス変動計の開発にはっきりした見通しをつけることができた。そして、その成果は1982年に炭酸ガスと水蒸気の濃度変動を同時に測定できる変動計を開発する際に生かされた。炭酸ガス計としては分解

能が0.8 ppm、ドリフトは1 ppm/時程度である (Ohtaki and Matsui, 1982)。これら炭酸ガス変動計の測定原理、開発経緯等については別の機会に報告したい。

最近、カナダ、米国、ソ連でも炭酸ガス変動計が試作されている (Brach *et al.*, 1981; Anderson *et al.*, 1984; Elagina and Lazarev, 1984)。しかし、これら炭酸ガス変動計は設計思想や動作特性が異なっているため、観測値を直接比較検討する際の障害となっている。炭酸ガス変動計のセンサーの違いによる測定値の差異を明らかにし、観測結果を統一的に比較可能なものにするための根拠を得る第一歩として、日本、カナダ、米国で開発された炭酸ガス変動計の相互比較観測を計画した。乱流計測器の国際比較観測の例としては、超音波風速計についての Tsvang *et al.* (1973) や水蒸気変動計についての Dyer *et al.* (1982) がある。今回の炭酸ガス変動計の比較観測も前2者と全く同じ考えに立脚している。

比較観測は1986年7月6日から20日にかけて、地形の水平方向の一様性が保証されているカナダの Winnipeg 市郊外の麦畑上で実施された。観測概要を以下に報告する。

2. 比較観測の概要

比較観測には観測の総括責任者であるカナダ農務省の Dr. R. Desjardins を中心とする研究チーム、米国ネブラスカ大学の Prof. S.B. Verma を中心とする研究チームと我々の研究チーム (岡山大学の米谷、大滝とアドバンストシステム (株) の松井) が参加した。他にオブザ

* An international comparison experiment for measuring atmospheric fluctuations of carbon dioxide by fast response instruments.

1. Yasushi Mitsuta, Nobutaka Monji, 京都大学防災研究所.
2. Ken Sahashi, 岡山大学教育学部.
3. Osamu Tsukamoto, 岡山大学教養部.
4. Toshihiko Maitani, 岡山大学農業生物研究所.
5. Tetsuji Matsui, アドバンストシステム (株).
6. Eiji Ohtaki, 岡山大学教養部.

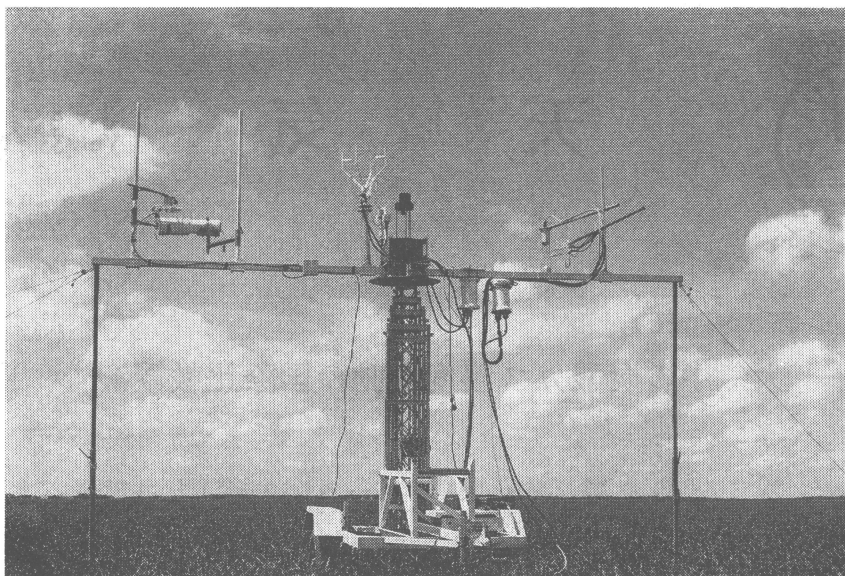


写真 1 炭酸ガス変動計の比較観測風景。

右端：日本チームの測定器 中央：カナダチームの測定器 左端：米国チームの測定器

ーパーとして、グェルフ大学の Prof. K. King をはじめ地元の気象関係の会社から研究員が参加したため比較観測に関係していたのは15名くらいにのぼった。各国の研究者は1986年7月6日までに Winnipeg 市に到着し、共同観測についての最終的な打ち合せを行った。観測場所は Winnipeg 市から南方へ約 30 km 離れた田舎町 La Salle の小麦畑が選ばれた。この小麦畑は約 1 km × 1.5 km の大きさであったが、周囲の圃場にも同じような小麦が植えられていたので地平線まで小麦畑が続いているかと思うほどであった。日本ではほとんど考えられないような理想的な環境条件を備えた観測場所であった。

各国から持参した炭酸ガス変動計をパンタグラフマスト上に設置し、地上約 3 m の位置に固定して観測を行った。この時期の主風向は SW と考えて測定器の配列が風向にほぼ直角になるようにマストの向きを調整した。パンタグラフマストは風向変化に応じて回転させることが可能であったが、本観測時には風向が定まらずマストの向きを決定するのに苦労した（写真1参照）。

データ集録はカナダチームと米国チームのそれぞれのキャラバン内で行った。日本チームのデータ集録装置はカナダチームのキャラバン内に置かせてもらった。どのチームもパソコン制御によるデータ集録装置を装備しており、簡単な乱流統計量が real time, on-site で計算さ

れるようになっていた。各国の測定器の信号をパラレル集録しておけば比較解析が容易である。そこで、キャラバンからキャラバンへとケーブルをはり、シンクロスコープで観察しながら慎重に各々の信号をやりとりしてみた。日本チームとカナダチーム間の信号のやりとりには問題がなかった。しかし、米国チームの炭酸ガス変動計の信号を日本チームのデータ集録装置に接続すると急に雑音が入ることが認められた。また、日本チームから米国チームへ超音波風速計の風成分の信号を送る際には問題が生じなかったが、温度成分の信号を送る際には発振することがわかった。各測定器の出力インピーダンスの問題、キャラバン間のアースレベルの相異等が原因していることはわかっていたが、バッファアンプの予備もなかったので解決できなかった。やむなく、パラレル集録は日本チームとカナダチーム間のみにとどめ、米国チームは単独集録することになった。

各チームとも測定器の検定、予備テストを繰り返して7月8日までには何とか観測体制をとることができた。その夜はミーティングルームで祝賀パーティーが開かれた。壁には昨日とられた一人一人の顔写真が指名手配者よろしく貼られてあった。また、部屋の中真に衝立が置かれマクビル大学の Prof. P.H. Schuepp の手になる詩が書かれていた。その詩には参加者の紹介が巧みにおり込まれ、今後の研究成果が期待されるという内容だっ

た。おいしいワインで何回も乾杯し、明日からの観測に胸をふくらませてパーティーは終わった。しかし、今年の Winnipeg の天気は異常だった。翌 7 月 9 日から 7 月 17 日にかけて断続的に雨が降り続いた。おかげで室内で過す時間が多くなり、観測手法や炭酸ガスフラックス測定上の疑問等について議論することはもちろん、上述の詩も毎日交代で書き変えるというふうに文化面での仕事が発達になってきた。我々も日本語で詩を書きその英訳を試みたが我々の英語力ではかなり苦戦であった。とにかく、最終観測日が 7 月 20 日に設定されていたので、雨の合い間を見ては観測場所に行きデータ収集につとめた。そして、30 時間以上にわたる比較観測データを集録することができたことは幸運だった。

3. 炭酸ガス変動計の概要

日本、カナダ、米国で開発された炭酸ガス変動計はいずれも炭酸ガス分子が $4.3\ \mu\text{m}$ 帯の赤外線を吸収するという性質を利用している。以下において各研究チームが今回の比較観測で使用した炭酸ガス変動計を概観してみよう。

カナダチームの炭酸ガス変動計はカナダ農務省の工学研究所で Dr. R. Desjardins の指導のもとで作られたものである。工学研究所の試作 1 号機の概要は既に報告されている (Brach *et al.*, 1981) が、野外使用機としてはかなり大型 ($71\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$) であった。今回の比較観測で使用した炭酸ガス変動計は 2 号機である。開光路長は 20 cm に短縮されていたが、電気処理部が $25\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ もあり、依然として実験室用のテスト機の域をでていないようだった。写真 2 は炭酸ガス変動計と海上電機 (株) の超音波風速温度計と組み合わせてパンタグラフマストに取付けた様子を示している。観測期間中 Dr. R. Desjardins が、この炭酸ガス変動計は安価なので雑音が大きいと何度も言い訳をしていたが、確かに我々の炭酸ガス変動計の雑音と比べて少くとも 10 倍は大きいようである。工学研究所では高性能の 3 号機まで作成していたが、3 号機は軽飛行機に固定されていたため、今回の観測では直接比較することができなかった。いずれにしても、カナダチームの炭酸ガス変動計の性能は我々が予想していた通りのものだった。

米国チームの炭酸ガス変動計はカリフォルニアにあるローレンスリバモア国立研究所で Bingham 等によって開発されたものであり、ネブラスカ大学の Prof. S.B. Verma が所有していること、Anderson and Verma

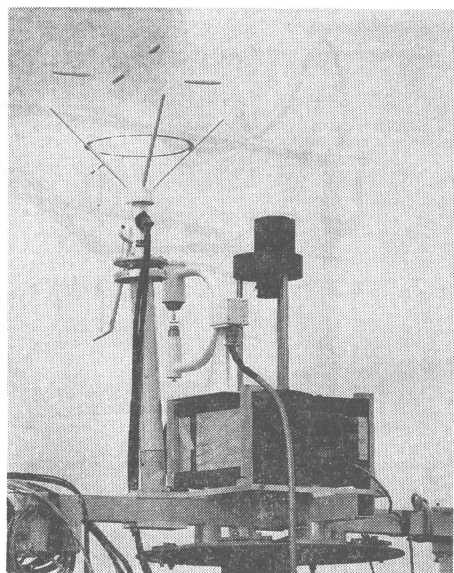


写真 2 カナダチームの測定器。右側が炭酸ガス変動計、中央部がライマンアルファ湿度計、左側が超音波風速計。

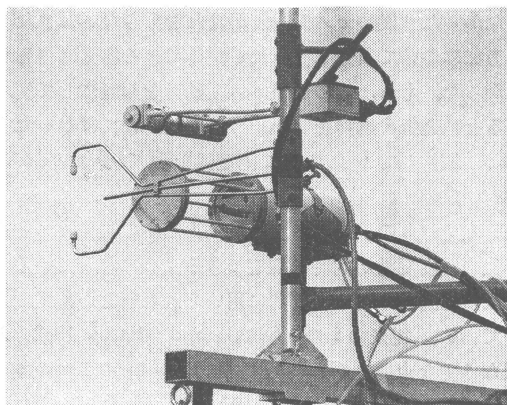


写真 3 米国チームの測定器。上部がライマンアルファ湿度計、下部右が炭酸ガス変動計、下部左が超音波風速計。

(1985)の論文によってこの測定器の動作特性は我々のものと大差ないことがわかっていたが未知の測定器であった。とくに、野外使用機としてどのように配慮されているかが知りたかった。炭酸ガス変動計の光路長は 20 cm であった。そして、光源と検出器が同じ筐体に納められてあり、光源から射出された赤外線が反射鏡によって光路内を 2 往復した後検出器に入射するような構造になっ

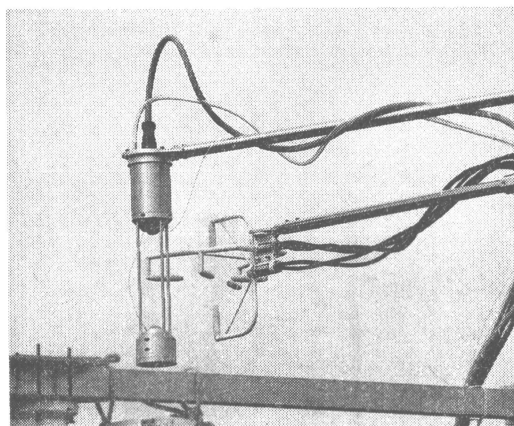
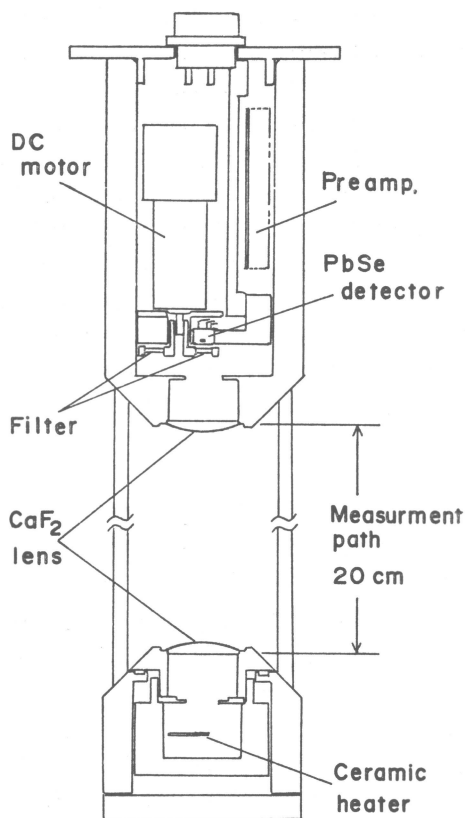


写真4 日本チームの測定器。左側が炭酸ガス変動計、右側が超音波風速計。

ていた。赤外光源を水冷しているためか筐体の大きさは直径12 cmで長さが25 cmもあった。この炭酸ガス変動計は横向きにして使用されていた(写真3参照)。この場合、鉛直成分の超音波風速計のセンサーが反射鏡のすぐ横にあり、大気の流れが乱されるような気がしてならなかった。炭酸ガス変動計が流れを乱さないような設置方法について質問してみたが納得できる答えは得られなかった。もし、この炭酸ガス変動計を鉛直にして使用すると構造上日射の影響が避けられないのではないだろうか。期待していただけに測定器を見て残念な気がした。

日本チームの炭酸ガス変動計は大気中の炭酸ガスと水蒸気の濃度変動が同時に測定できるようになっている。今回の変動計は初めて観測に用いられた新しい型式のものである。従来のもの(Ohtaki and Matsui, 1982)と異なる主な点は、(i) $2.3\ \mu\text{m}$ と $3.9\ \mu\text{m}$ の2つの参照信号 $V_{2.3}$ と $V_{3.9}$ を使用し、 $V_{2.3}/V_{3.9}$ の値が一定になるようにセラミックヒーター(赤外光源)の電流を制御していること、(ii) 赤外干渉フィルターを固定している回転円板を直流モーターで駆動していること、(iii) 電気処理系にデジタル演算方式を大幅に採用したこと、(iv) 光源部と検知部の支柱パイプを利用して光源部と検知部を共に空冷できるようにしたこと等である。このような改善に伴って、感部がすっきりして空気の流れを乱すことが少なくなると共に、従来のものに比べて光源部の温度変化によるドリフトをさらに小さくすることができた。新型1号機であったが幸いにしてほとんど故障なく作動した。写真4は炭酸ガス変動計とスパン長10 cm



第1図 日本チームの炭酸ガス変動計測定感部の光学系のブロック図

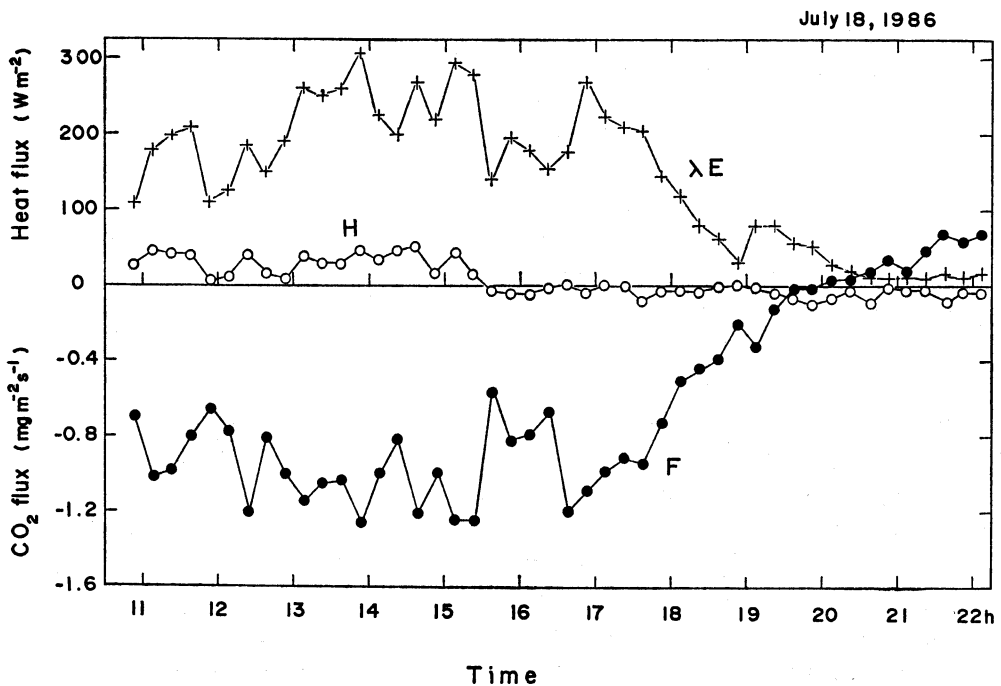
の超音波風速計がパンタグラフマスト上に取付けられている様子を示している。炭酸ガス変動計の詳細については別の機会で述べることにして、ここでは日本チームが使用した炭酸ガス変動計の測定感部の光学系ブロック図を示しておく(第1図参照)。

各研究チームの炭酸ガス変動計の特性をまとめて第1表に示しておく。

その他オブザーバーとして今回の比較観測に参加された研究者のうち、グェルフ大学のProf. K. Kingと地元マントバの原子力エネルギー会社の環境研究部に所属しているDr. B. D. Amiroの仕事ぶりを紹介しておく。Prof. K. Kingは農技研におられた井上栄一先生に教わったそうである。物静かな紳士であった。朝早くから夜遅くまで観測車に早替りさせたレンタカー内に閉じ込めり黙々とデータ収集に努められている姿には心から敬服した。今回は小麦群落上での炭酸ガス濃度差、温度差、

第1表 比較観測に参加した各国の炭酸ガス変動計の特性

	日 本	カ ナ ダ	米 国
光路長 (cm)	20	20	20×4
検知器	PbSe (−15°C)	PbSe	PbSe (−30°C)
光 源	セラミック	ニクロム線	白金線
冷却方法	空 冷	空 冷	水 冷
フィルター波長 (μm)	4.3 (for CO ₂) 2.6 (for H ₂ O) 3.9 (for ref.) 2.3 (for ref.)	4.3 (for CO ₂) 3.9 (for ref.)	4.3 (for CO ₂) 3.9 (for ref.)
測定回数 (Hz)	30	30	50
電気演算	デジタル	アナログ	アナログ
直線性	良	不 良	不 良
測定範囲 (ppm)	±200	0~1300	±175
雑 音 (ppm)	<0.3	5	≈0.2
ドリフト (ppm/時)	<1	*	≈0.5



第2図 炭酸ガス(F), 顕熱(H), 潜熱(λE) 輸送量の日変化例. 1986年7月18日 Winnipeg の小麦畑上で測定. 測定高度は3m, 小麦の平均草高は0.8m.

純放射等を測定され、いわゆる熱収支法によって炭酸ガスや熱のフラックスを評価する仕事をされていた。Dr. B.D. Amiro は若いせいもあってか気楽な人だった。測定器の入ったトランクと小形の観測塔を肩にかつ

いでやってきて、あっという間に測定を開始していた。彼のトランクの中にはバッテリーも入っていて、15分毎の顕熱、潜熱のフラックスが real time で計算されメモリー内に蓄えられるようになっていた。とにかく、どの

人の場合もそうであったが、各自思い思いの場所にさつさと塔を立て観測を開始するその早業には感心してしまった。

4. 炭酸ガスフラックスの測定例

比較観測の報告書は各研究チームのデータ解析が終了し、相互チェックを行ってからまとめられることになっているので、ここでは我々のチームが測定した麦畑上での炭酸ガスフラックスの日変化例を紹介する。測定器は地上3mのパンタグラフマスト上に設置した。小麦は出穂期にあり、その平均草高は0.8mであった。当日は高層雲と高積雲が全天の6~9割を占め、時々雲のあい間から日射がもれるという変わり易い天気であった。また、前日まで降っていた雨のため圃場は非常にぬかるんでいた。Winnipeg は夏時間を採用していたので1時間進んでいたとはいえ、日没は遅く21時25分頃であった。

第2図は1986年7月18日に測定した炭酸ガス (F)、顕熱 (H) と潜熱 (λE) 輸送量の時間変化を示している。日中には小麦群落の光合成活動を反映して F が負の値をとり炭酸ガスが鉛直下向きに輸送されていることを示している。その下向きの炭酸ガス輸送量は14時から15時にかけて最大となり、約 $1.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。この値は出穂期にある日本の小麦群落上での炭酸ガス輸送量の最大値とよく似ている (Ohtaki, 1984)。16時以降には下向きの炭酸ガス輸送量は徐々に減少し、日没直前の20時には小麦群落の呼吸作用が顕著となり炭酸ガスが上向きに輸送され始めている様子がよくわかる。圃場が十分湿っていたので群落上の熱輸送を支配していたのは潜熱 (λE) である。昼間の λE は F と逆位相ではあるが非常によく似た変化を示している。これは蒸散と光合成が共に主として、作物の気孔によって律せられていることによっていることを反映している。顕熱 (H) は日中でも 50 W m^{-2} 以下であり、15時30分頃すでに鉛直下向きの熱輸送に転じている。このような H の変化は水田上での顕熱輸送の結果 (Ohtaki, 1984) とよく似ている。圃場が雨あがりでドロドロの粘土みたいになっていたことから今回の H の日変化も理解できるように思える。

各研究チームの炭酸ガス変動計の詳細な性能比較の結果は別の機会に報告したい。

5. おわりに

日本、カナダ、米国で開発された炭酸ガス変動計の性

能比較を目的とした Winnipeg での野外観測は終わった。今後は各研究者が自分のところの測定結果を9月30日までにまとめ、それを他の研究者に送り、各自それに対する意見を返すことになっている。このようなやりとりを繰り返して最終的な意見をまとめようというのである。今回の比較観測に参加した研究チームが少なかったので結果のまとめも比較的順調に進行することと思っている。また、次のステップとして、ソ連で開発された炭酸ガス変動計との比較観測を計画している。この比較観測が実現すれば、現在開発されている4種類の炭酸ガス変動計の性能が日本の炭酸ガス変動計の性能を介して相互に比較可能となるだろう。

最後に、本観測の遂行に当たって協力していただいた Dr. R. Desjardins を初めとするカナダ農務省の方々、Prof. S.B. Verma を初めとするネブラスカ大学の方々に感謝すると共に、日本国内において協力していただいた気象研究所の花房龍男、藤谷徳之助両氏をはじめ多くの人々にここで謝意を表したい。なお、この研究は日本学術振興会・国際共同研究費によって行われたものである。記して感謝する。

文 献

- Anderson, D.E. and S.B. Verma, 1985 : Turbulence spectra of CO_2 , water vapor, temperature and wind velocity fluctuations over a crop surface, *Boundary-Layer Meteorol.*, **33**, 1-14.
- , ———, and N.J. Resenberg, 1984 : Eddy correlation measurements of CO_2 , latent heat, and sensible heat fluxes over a crop surface, *Boundary-Layer Meteorol.*, **29**, 263-272.
- Brach, E.J., R.L. Desjardins and G.T. St Amour, 1981 : Open path CO_2 analyser, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **14**, 1415-1419.
- Dyer, A.J., J.R. Garratt, R.J. Francey, I.C. McIlroy, N.E. Bacon, P. Hyson, E.F. Bradley, O.T. Denmead, L.R. Tsvang, Y.A. Volkov, B.M. Koprov, L.G. Elagina, K. Sahashi, N. Monji, T. Hanafusa, O. Tsukamoto, P. Frenzen, B.B. Hicks, M. Wesely, M. Miyake and W. Shaw, 1982 : An international turbulence comparison experiment (ITCE 1976), *Boundary-Layer Meteorol.*, **24**, 181-209.
- Elagina, L.G. and A.I. Lazarev, 1984 : Measurements of the frequency spectra of turbulent CO_2 fluctuations in the atmospheric surface layer. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **502-506**.
- Ohtaki, E. 1984 : Application of an infrared carbon

dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport, *Boundary-Layer Meteorol.*, 29, 85-107.

——, and T. Matsui, 1982: Infrared device for simultaneous measurement of fluctuations of atmospheric carbon dioxide and water vapor, *Boundary-Layer Meteorol.*, 24, 109-119.

Tsvang, L.R., B.M. Koprov., S.L. Zubkovskii, A.J. Dyer, B. Hicks, M. Miyake, B.W. Stewart and J.W. McDonald, 1973: A comparison of turbulence measurements by different instruments; Tsimlyansk field experiment 1970, *Boundary-Layer Meteorol.*, 3, 499-521.

日本気象学会誌 気象集誌

第II輯 第64巻 第5号 1986年10月

森山 茂：地球の氷期サイクルに関する一仮説：(I) 三つの仮定を用いての $\delta^{18}\text{O}$ 観測データの再現

杉 正人：ダイナミック・ノーマルモード・イニシャルゼーション

巽 保夫：時間的に変化する境界を持つ局地スペクトルモデルとその多層プリミティブモデルへの応用

里村雄彦：粘性シアー流中の地形性擾乱

玉木克美・宇加治一雄：回転流体中に生成される停滞性傾向圧渦

安成哲三：北半球夏季におけるモンスーンの長周期変動と偏西風循環の相互作用

T.N. KRISHNAMURTI and S.L.-NAM：外向長波放射と発散風循環との関連について

R.H. JOHNSON：中規模積雲対流系における下部対流圏の昇温および乾燥化：積雲対流のパラメタリゼーションへの示唆

真木雅之・播磨屋敏生・菊地勝弘：盆地における夜間冷却に関する熱収支的研究

荒生公雄・田中正之：太陽周辺光のエアロゾルの光学的特性と地面反射に対する依存性

岡田菊夫・石坂 隆・武田喬男：名古屋の都市大気におけるサブミクロン粒子の挙動と性状

中島映至・高村民雄・山野 牧・塩原匡貴・山内豊太郎・後藤良三・村井潔三：太陽放射とエアロゾルの測定から推定されたエアロゾルの粒径分布の整合性

中沢哲夫：8年間の OLR データから求めた30-60日周期振動の平均的特性

中根英昭・笹野泰弘：掃引型ライダー観測によってとらえた海風前線の構造

NEWS

世界の異常天候とその影響評価

世界の異常天候とその影響評価については、アメリカの NOAA から気象庁気候変動対策室へ “Climate Impact Assessment” が未着であり、掲載することができ

ませんでした。入手できしだいまとめて掲載する予定です。

(天気編集委員会)