



植 田 洋 匡 名 誉 教 授

## 植田 洋 匡 教 授 略 歴

### ( 学 歴 ・ 職 歴 )

昭和 17 年 1 月 27 日	奈良県奈良市に生まれる
昭和 35 年 3 月	奈良女子大学文学部附属高等学校卒業
昭和 35 年 4 月	京都大学工学部入学
昭和 39 年 3 月	京都大学工学部化学機械学科卒業
昭和 39 年 4 月	京都大学大学院工学研究科修士課程化学機械学専攻入学
昭和 41 年 3 月	京都大学大学院工学研究科修士課程化学機械学専攻修了
昭和 41 年 4 月	京都大学大学院工学研究科博士課程化学機械学専攻入学
昭和 44 年 3 月	京都大学大学院工学研究科博士課程化学機械学専攻単位取得退学
昭和 44 年 4 月	京都大学工学部助手 ( 昭和 46 年 11 月まで )
昭和 46 年 12 月	京都大学工学部講師 ( 昭和 51 年 3 月まで )
昭和 51 年 4 月	国立公害研究所主任研究員 ( 昭和 52 年 3 月まで )
昭和 52 年 4 月	国立公害研究所大気環境部大気環境計画研究室長 ( 平成 2 年 3 月まで )
平成 2 年 4 月	九州大学応用力学研究所教授 ( 平成 9 年 3 月 )
平成 9 年 4 月	京都大学防災研究所教授

### ( 公 職 歴 ・ 委 員 等 歴 )

平成 5 年	文部科学省 学術審議会専門委員 ( 平成 6 年度まで。平成 13 ~ 14 年度、平成 16 ~ 17 年度 ) 地球観測委員会委員 地球科学技術フォーラム委員
平成 9 年	日本学術会議 社会環境工学研究連絡委員会委員 ( ~ 現在 )
平成 9 年	九州大学応用力学研究所共同利用委員会委員 ( ~ 現在 )
平成 10 年	厚生省 生活環境審議会専門委員 ( 平成 13 年度まで )
平成 12 年	日本学術振興会 特別研究員等審査会専門委員 ( ~ 現在 )
平成 12 年	日本原子力研究所 環境科学研究委員会専門委員
平成 12 年	建設省九州地方建設局 環境影響評価技術検討対策委員会委員
平成 12 年	日本環境衛生センター 東アジア酸性雨シミュレーションモデル検討会委員
平成 12 年	日本環境衛生センター 奥日光森林衰退に関する検討会委員
平成 12 年	環境庁 浮遊粒子物質総合対策検討会委員
平成 12 年	環境庁 酸性雨対策検討会検討員
平成 12 年	環境庁 地球環境研究等企画委員会研究分科会委員
平成 12 年	環境省 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク検討委員会委員
平成 12 年	国立環境研究所 スーパーコンピュータ関連研究ステアリンググループ小委員会委員 地球環境モニタリング検討委員会委員
平成 12 年	財団法人計量計画研究所 大気汚染物質排出量グリッドデータ整備調査検討会委員
平成 13 年	水の週間実行委員会 ( 水資源公団 ) 水資源に関するシンポジウム運営委員会委員

平成 13 年 環境省 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク推進検討会委員  
 平成 13 年 日本学会議 社会環境工学研究連絡委員会委員  
 平成 13 年 瀬戸内海研究会議理事  
 平成 13 年 福岡空港将来構想検討委員会 専門調査委員会委員  
 平成 15 年 経済産業省 環境審査顧問会火力部会環境審査顧問（～現在）  
 平成 15 年 経済産業省 発電所の環境審査に係わる環境審査顧問  
 平成 16 年 環境省 地球環境研究企画委員会委員

（国際会議企画等委員）

昭和 61 年 1st International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (ソウル)  
 昭和 62 年 International Symposium on Transport Phenomena in Turbulent Flows (東京)  
 昭和 63 年 2nd International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (東京)  
 平成元年 IFHP/CIB/WMO International Conference on Urban Climate, Planning and Building (京都)  
 平成 2 年 福岡国際シンポジウム Global Environment and Energy Issues (福岡)  
 平成 4 年 5th International Workshop on Nitrous Oxide Emissions (筑波)  
 平成 5 年 6th International Workshop on Wind and Water Tunnel Modelling of Atmospheric Flows and Dispersion (阿蘇)  
 平成 5 年 International Symposium on Air Pollution '93 (モンレー)  
 平成 5 年 9th International Symposium on Turbulent Shear Flows (京都)  
 平成 6 年 International Symposium on Air Pollution '94 (バルセロナ)  
 平成 7 年 10th International Symposium on Turbulent Shear Flows (ペンシルバニア)  
 平成 8 年 5th Int. Conf. on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (シアトル)  
 平成 9 年 3rd International Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere (奈良)  
 平成 10 年 International Symposium on Atmospheric Chemistry and Future Global Environment (名古屋)  
 平成 10 年 6th International Conference on Atmospheric Sciences and Application to Air Quality (北京).  
 平成 11 年 1st Asian Symposium on Aerosol (名古屋)  
 平成 12 年 3rd International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (名古屋)  
 平成 12 年 7th International Conference on Atmospheric Sciences and Application to Air Quality (台北)  
 平成 13 年 12th World Clean Air and Environmental Congress'(ソウル)  
 平成 15 年 8th International Conference on Atmospheric Sciences and Application to Air Quality (つくば)  
 平成 17 年 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area (東京)

（受賞）

平成 6 年 11 月 大気環境学会学術賞（齊藤潔賞）受賞  
 平成 15 年 化学工学学会賞（池田亀三郎記念賞）受賞

（学会等）

化学工学会 化学工学英文誌編集委員（平成 9～10 年度、11～12 年度）  
 日本流体力学会 理事（平成 9～11 年度、13～14 年度）  
 年会実行委員「環境流体力学シンポジウム」実行委員長（平成 8～9 年度）

学会賞選考委員長（平成 13～14 年度）、副委員長（平成 15 年度）

日本環境学会

評議員（昭和 60～平成 10 年）

日本気象学会

日本伝熱学会

エアロゾル学会

（国際・大型共同研究）

1. ASCOT(Atmospheric Studies in Complex Terrain) Project (米国エネルギー省 昭和 59 年度 - 平成 2 年度)
2. 野外大気中における光化学スモッグ・酸性雨生成機構の研究 (日中共同研究、科学技術庁 昭和 62 年度)
3. 複雑気流下での大気汚染物質の長距離輸送 (日米共同研究、日本学術振興会・米国 NSF 昭和 63 年度 - 平成 2 年)
4. 砂漠化機構解明のための数値シミュレーション (科学技術振興調整費、科学技術庁 平成 3 年度)
5. 西太平洋における気候変動の研究 (国際共同研究、日本学術振興会、平成 3 年度)
6. 東アジア地域における対流圏大気質の特性 (国際共同研究、日本学術振興会、平成 5 年 - 6 年度)
7. Development of an Integrated Assessment Tool for Acid Deposition in Asia (RAINS-ASIA Phase )(世界銀行、アジア開発銀行、平成 3 - 6 年)
8. Development of an Integrated Assessment Tool for Acid Deposition in Asia (RAINS-ASIA Phase )(世界銀行、平成 9 - 12 年)
9. Model Inter-Comparison Study in Asia (MICS-Asia Phase ) (IIASA International Institute for Applied System Analysis、平成 9 - 11 年)
10. Model Inter-Comparison Study in Asia (MICS-Asia Phase ) (IIASA International Institute for Applied System Analysis、平成 12 - 13 年)
11. 新世紀重点研究創生プラン RR2002 「人・自然・地球共生プロジェクト」 「広域水循環予測及び対策技術の高度化」 (文部科学省、平成 14 - 18 年度)

**植田洋匡 研究業績**  
**論 文**

発表年	論 文 名	発 表 誌 名	共 著 者
1960	Flow in the entrance region of a circular tube	J. of Chemical Eng. of Japan, Vol.3, No.1, 34-38	Mizushina,T., Ito,R., Tsubata,S.
1971	Turbulent mass transfer in the entrance region of a circular tube	J. of Chemical Eng. of Japan, Vol.4, No.1, 17-22	Mizushina,T., Okada, N.
1972	Effect of free-stream turbulence on mass transfer from a circular cylinder in cross flow	Intl J. of Heat and Mass Transfer , Vol. 15, No. 6, 769-780.	Mizushina,T. Umemiya,N.
1975	Fine-structure turbulence in the wall region of a turbulent boundary layer	J. of Fluid Mechanics, Vol. 67, Part 1, 125-143	Hinze,J.O.
1975	水平円管外面を流下する層流液膜における固液間輸送現象	化学工学論文集, Vol. 1, No. 4, 611-615	宮下尚・佐伯和男・水科篤郎
1976	Effect of electrically induced convection on heat transfer of air flow in an annulus	J. of Chemical Eng. of Japan, Vol. 9, No. 2, 97-102	Mizushina,T., Matsumoto,T. and Waga,K.
1977	Turbulence structure in the inner part of the wall region in a fully developed turbulent tube flow	Proc. of the 5th Biennial Symp. on Turbulence, 110-120	Mizushina,T
1977	Eddy diffusivity near the free surface of open channel flow	Intl .J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 20, No. 11, 1127-1136	Muller,S., Komori, S., Mizushina,T.
1978	Developing combined free and forced laminar convection between vertical parallel plates with constant wall temperatures	J. of Chemical Eng. of Japan, Vol. 11, No. 1, 19-24	Nakajima,M., Fukui,K., Mizushina,T.
1978	Buoyancy effects on eddy diffusivities in thermally stratified flow in an open channel flow	in "Heat Transfer 1978", edited by J.T. Roger, et al., Hemisphere Pub. Co., Washington D.C., Vol. 1, 91-96	Mizushina,T., Ogino,F., Komori,S.
1979	Application of laser Doppler velocimetry to turbulence measurement in non-isothermal flow	Proc. of Royal Soc. of London, Series A, Vol. 366, No.1724, 63-79	Mizushina,T., Ogino,F., Komori,S.
1980	Buoyancy effects on turbulent transport in combined free and forced convection between vertical parallel plates	Intl J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 23, No. 10, 1325-1336	Nakajima,M., Fukui,K., Mizushina,T.
1981	A wind tunnel for studying the effects of thermal stratification in the atmosphere	Atmospheric Environment, Vol. 15, No. 5, 807-821	Ogawa,Y., Diosey,P.G., Uehara, K
1981	レーザーレーダーを用いた空間相関法による風向	風速の遠隔的測定, 応用物理, Vol. 50, No. 6, 616-620	清水浩・笹野泰弘・安岡善文・竹内延夫・奥田典夫
1981	Buoyancy effects on the turbulent transport processes in the lower atmosphere	Quarterly J. of Royal Meteorological Soc., Vol. 107, No. 453, 561-578	Mitsumoto,S., Komori, S.

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1982	The longitudinal vortex and its effects on the transport processes in combined free and forced laminar convection between horizontal and inclined parallel plates	Intl J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 26, No. 1, 109-120	Fukui,K., Nakajima,M.
1982	Flow instability and transport phenomena in combined free and forced convection between vertical parallel plates	J. of Chemical Eng. of Japan, Vol. 15, No. 3, 172-180	Fukui,K., Nakajima,M., Mizushina,T.
1982	Turbulence structure and transport mechanism at the free surface in an open channel flow	Intl. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 25, No. 4, 513-521	Komori,S., Ogino,F., Mizushina,T.
1982	Plume behavior in stratified flows	Atmospheric Environment, Vol. 16, No. 6, 1419-1433	Ogawa,Y., Diosey,P.G., Uehara, K.
1982	Lateral and longitudinal turbulent diffusion of scalar quantities in thermally stratified flow in an open-channel	In "Heat Transfer 1982", edited by U. Grigg, et al., Hemisphere Pub. Co., Washington D.C., Vol., 2431-436	Komori,S., Ogino,F., Mizushina,T
1982	Turbulence structure in unstably-stratified open-channel flow	Physics of Fluids, Vol. 25, No. 9, 1539-1546	Komori,S., Ogino,F., Mizushina, T.
1982	Turbulent transport in the mixed convection over a heated horizontal plane	In "Structure of Turbulence in Heat and Mass Transfer", edited by Z.P. Zaric, Hemisphere Pub. Co., Washington D.C., 367-380	Mizushina,T. Mitsumoto,S., Komori,S., Fukui, K.
1983	Characteristics of air pollution in the presence of land and sea breeze - A numerical simulation -	Atmospheric Environment, Vol. 17, No. 1, 35-42	Ozoe,H. Shibata,T., Sayama,H.
1983	Effects of external parameters on the flow field in the coastal region - A linear model -	J. of Climate and Applied Meteorology, Vol. 22, No. 2, 312-321	
1983	Numerical calculation of three-dimensional model of land and sea breezing - In the case of constant eddy diffusivities -	Proc. of 3rd Pacific Chemical Eng. Congress, Vol. 4, 401-406	Ozoe,H., Shibata,T., Sayama,H.
1983	大気拡散風洞 - 大気境界層とその中の温度成層シミュレーション -	日本航空宇宙学会誌, Vol. 31, No. 351, 131-137	小川靖・近藤次郎
1983	Turbulence structure in stably stratified open-channel flow	J. of Fluid Mechanics, Vol. 130, 13-26	Komori,S., Ogino,F., Mizushina,T.
1983	A laboratory experiment on the dynamics of the land and sea breeze	J. of Atmospheric Science, Vol. 40, No. 5, 1228-1240	Mitsumoto,S., Ozoe,H.

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1983	A laboratory experiment on momentum and heat transfer in the stratified surface layer	Quarterly Journal of Royal Meteorological Soc., Vol. 109, No. 461, 661-676	Fukui,K., Nakajima,M.
1983	Estimation of vertical air motion from limited horizontal wind data - A numerical experiment -	Atmospheric Environment, Vol. 17, No. 11, 2181-2192	Kitada,T., Kaki,A., Peters,L.K.
1984	Turbulent effects on the chemical reaction for a jet in a non-turbulent stream and for a plume in a grid-generated turbulence	Physics of Fluids, Vol. 27, No. 1, 77-86	Komori,S.
1984	室内実験による大気境界層のシミュレーション	天気, Vol. 31, No. 2, 47-53	
1984	Time-dependent thermal convection in a stably stratified fluid layer heated from below	Physics of Fluids, Vol. 27, No. 11, 2617-2623	Komori,S., Miyazaki,T., Ozoe,H
1984	Long-range transport of air pollution under light gradient wind conditions	Proc. Of 8th US-Japan Conf. on Photochemical Air Pollution, 385-424	Wakamatsu,S., Mitsumoto,S., Kurita,H., Sasaki,K.
1985	Wind tunnel observation of flow and diffusion under stable stratification	Atmospheric Environment, Vol. 19, No. 1, 65-74	Ogawa,Y., Diosey,P.G., Uehara, K.
1985	On thermophoresis of relatively large aerosol particles suspended near a plate	J. of Colloid and Interface Science, Vol. 107, No. 2, 418-428	Kanki,T., Iuchi,S., Miyazaki,T.
1985	The large-scale coherent structure in the intermittent region of the self-preserving round free jet	J. of Fluid Mechanics, Vol. 152, 337-359	Komori,S.
1985	傾度風が弱い場合の大気汚染物質の長距離輸送と熱的低気圧および総観気象の関係	大気汚染学会誌, Vol. 20, No. 4, 251-260	栗田秀實
1985	Long-range transport of air pollution under light gradient wind conditions	Journal of Climate and Applied Meteorology, Vol. 24, No. 5, 425-434	Kurita,H., Sasaki,K., Muroga,H., Wakamatsu,S.
1985	Turbulent flow structure in the near field of a swirling round free jet	Physics of Fluids, Vol. 28, No. 7, 2075-2082	Komori,S.
1985	航空機による風速の測定	天気, Vol. 32, No. 9, 1985, 501-506	光本茂記・山本一夫
1985	不安定成層乱流中の大規模渦の構造	第2回流れの動的計測シンポジウム論文集, 61-65	福井啓介・中島正基
1986	関東地方におけるスギの衰退と酸性降下物による可能性	森林立地, Vol. 28, No. 1, 11-17	高橋啓二・沖津 進
1986	大気汚染物質の長距離輸送時における硫酸塩・硝酸塩等の挙動	大気汚染学会誌, Vol. 21, No. 3, 216-225	佐々木一敏・栗田秀實・村野健太郎・水落元之

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1986	Meteorological conditions for long-range transport under light gradient winds	Atmospheric Environment, Vol. 20, No. 4, 687-694	Kurita,H.
1986	長距離輸送時における炭化水素成分の特徴とその光化学反応	大気汚染学会誌, Vol. 21, No. 3, 226-235	薩摩林光・笹井春雄・栗田秀實・
1986	A laboratory experiment on lateral diffusion of scalar quantity in the stratified surface layer,	Atmospheric Environment, Vol. 20, No. 4, 757-762	Komori,S., Fukui,K.
1986	沿岸地域から内陸の山岳地域への大気汚染物質の輸送および変質過程	大気汚染学会誌, Vol. 21, No. 5, 428-439	栗田秀實
1986	Coherent structures associated with bursting events in the wall region of open-channel flow	World Congress of Chemical Engineering, Vol. 2, 320-323	Komori,S., Sawano,R
1986	Transport phenomena in the thermal internal boundary layer	World Congress of Chemical Engineering, Vol. 3, 678-681	Komori,S., Kitada,T.
1986	An investigation of the formation of ambient NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> aerosol	Atmospheric Environment, Vol. 20, No. 10, 1969-1977	Chang,Y.-S., Carmichael,G.R., Kurita,H.
1987	関東・甲信地方におけるスギの衰退と大気二次汚染物質の分布	日本林学会論文集, Vol. 98, 177-180	高橋啓二・沖津進
1988	弱い傾度風下での大気汚染の長距離輸送の気象学的構造	天気, Vol. 35, No. 1, 17-29	栗田秀實・光本茂記
1988	Flow mechanism for the long-range transport of air pollutants by the sea breeze causing nighttime high oxidants	Journal of Climate and Applied Meteorology, Vol. 27, No. 2, 182-187	Mitsumoto,S., Kurita,H.
1988	乱流モデルによる夜間都市境界層の形成機構の検討	衛生工学研究論文集, Vol. 24, 111-117	鶴野伊津志・若松伸司・中村 晃
1988	Large-scale vortical structure in the turbulent boundary layer flow under unstably stratified conditions	in "Transport Phenomena in Turbulent Flows", Edited by M. Hirata & N. Kasagi, Hemisphere Pub. Co., Washington D.C., 325-333	Komori,S., Fukui,K.
1988	The generation of surface renewal eddies in an open-channel flow	in "Transport Phenomena in Turbulent Flows", edited by M. Hirata & N. Kasagi, Hemisphere Pub. Co., Washington D.C., 213-223	Komori,S., Hiraga,Y., Murakami,Y
1988	夜間の都市境界層と大気汚染質の動態	大気汚染学会誌, Vol. 22, No. 2, 103-114	鶴野伊津志・若松伸司
1988	大気汚染物質長距離輸送時の低級脂肪酸の挙動	大気汚染学会誌, Vol. 22, No. 2, 115-122	薩摩林光・笹井春雄・栗田秀實

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1988	Behavior of sulfate, nitrate and other pollutants in the long-range transport of air pollution	Atmospheric Environment, Vol. 22, No. 7, 1301-1308	Sasaki,K., Kurita,H., Chang,Y.-S., Carmichael,G.R., Murano,K.
1988	An observational study of the structure of the nocturnal urban boundary layer	Boundary-Layer Meteorology, Vol. 45, No. 1, 59-82	Uno,I., Wakamatsu,S., Nakamura,A.
1988	Some contributions to the algebraic stress turbulence model for the application of stratified flows	in "Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements", edited by Y. Iwasa, N. Tamai & A. Wada, 1-8	Uno, I.
1988	大気汚染長距離輸送時のエアロゾルの挙動	エアロゾル研究, Vol. 3, No. 3, 178-186	
1988	レーザ蛍光・散乱法による乱流場での二成分瞬間濃度の同時測定技術開発	流れの計測, Vol. 6, No. 9, 24-30	小森悟・神崎隆男・村上泰弘
1989	Detection of coherent structures associated with bursting events in an open-channel flow by a two-point measuring technique using two laser-Doppler velocimeters	Physics Fluids A, Vol. 1, 339-348	Komori,S., Murakami,Y.
1989	Simultaneous measurements of instantaneous concentrations of two species being mixed in a turbulent flow by using a combined laser-induced fluorescence and laser-scattering technique	Physics Fluids A, Vol. 1, No.2, 349-352	Komori,S., Kanzaki,Y., Murakami,Y.
1989	The transport and formation of photochemical oxidants in central Japan	Atmospheric Environment, Vol. 23, No.2, 363-393	Chang,Y.-S., Carmichael,G.R., Kurita,H.
1989	夜間の都市域における NO <sub>2</sub> の高濃度発現メカニズム	大気汚染学会誌, Vol. 24, 130-143	鷗野伊津志・若松伸司
1989	Mono- and di-carboxylic acids under long-range transport of air pollutants in central Japan	Tellus, Vol. 41B, No.3, 219-229	Satsumabayashi, H., Kurita,H., Yokoushi,Y., Mizuochi,M
1989	Relationship between surface renewal and bursting motions in an open-channel flow	Journal of Fluid Mechanics, Vol.203, 103-124	Komori,S., Hiraga, Y., Murakami,Y.
1989	Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer	Boundary-Layer Meteorology, Vol.49, 77-98	Uno,I., Wakamatsu,S.
1989	平板に接触した成長気泡周辺の流体の流れ	化学工学論文集, Vol.15, No.4, 824-831	神吉達夫・浅野 強・井内哲・宮崎 武

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1989	The transport and formation of sulfates and nitrates in central Japan	Atmospheric Environment, Vol. 23, No.8, 1749-1773	Chang,Y.-S., Carmichael,G.R., Kurita,H
1989	Observational study of stratospheric ozone intrusions into the lower troposphere	Atmospheric Environment, Vol. 23, No.8, 1815-1826	Wakamatsu,S., Uno,I., Uehara,K., Tateishi,H.
1989	Nitrogen-dioxide pollution in the winter urban area and emission reduction strategy, -Numerical experiment-	Man and His Ecosystem, Vol. 3, 395-400	Kuroda,T., Kitada,T. Carmichael,G.R.
1989	The long range transport of photochemical oxidants and acidic species in central Japan	Man and His Ecosystem, Vol. 3, 406-411	Carmichael,G.R. Chang,Y.-S., Kurita,H.
1989	大気汚染物質長距離輸送時のジカルボン酸の挙動	大気汚染学会誌, Vol.24, No.4, 264-269	薩摩林光・栗田秀實・水庫英喜・横内陽子
1990	Photochemical formation of particulate dicarboxylic acids under long-range transport in central Japan	Atmospheric Environment, Vol.24, No.6, 1443-1450	Satsumabayashi, Kurita,H., Yokouchi,Y
1990	Combination of local wind systems under light gradient wind conditions and its contribution to the long-range transport of air pollution	Journal of Applied Meteorology, Vol.28, No.4, 331-348	Kurita,H., Mitsumoto,S.
1990	Long range transport of trace gases and aerosols in the Northeast Pacific Rim	NATO/CCMS 18th ITM on Air Pollution Modelling and its Application, Vol. 2, 491-498	Kotamarti,V.K., Sunwoo,Y. Carmichael,G.R., Kurita,H.
1990	Numerical study of the formation of acidic species in the convective-cloud streets over Japan Sea in winter	NATO/CCMS 18th ITM on Air Pollution Modelling and its Application, Vol. 2, 499-506	Kitada,T., Lee,P.C.S., Kitagawa,E.
1990	Acid deposition in central Japan	Atmospheric Environment, Vol.24A, No.8, 2035-2049	Carmichael,G.R. Chang,Y.-S., Ravishanker,B.S., Kurita,H.
1990	Behavior of secondary aerosols in the long-range transport of air pollution in central Japan	in "Aerosols -Science, Industry, Health and Environment", edited by S.Masuda & K.Takahashi, Vol.2, 381-384	Satsumabayashi, Kurita,H., Chang,Y.-S., Carmichael,G.R.
1990	Development of mist size analyzer using nichrome thin plate	In "Aerosols -Science, Industry, Health and Environment", edited by S.Masuda & K.Takahashi, Vol.1, 291-294	Yoshiyama,H., Tamori,I.
1990	Thermophoretic force on a spherical particle in a semi-infinite expanse of gas over a plate	in "Aerosols -Science, Industry, Health and Environment", ed. by S.Masuda & K.Takahashi, Vol.1, 391-394	Kanki,T., Miyazaki, T.

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1990	Aircraft survey of three dimensional aerosol distribution	in "Aerosols -Science, Industry, Health and Environment", ed..by S.Masuda & K.Takahashi, Vol.2, 978-981	Wakamatsu,S., Murano,K., Uno,I
1990	Evaluation of the effect of emission reductions on pollutant levels in central Japan	Environmental Science and Technology, Vol.24, No.9, 1355-1366	Chang,Y.-S., Shin,W-C., Carmichael,G.R., Kurita,H.
1990	平板近傍に浮遊する球粒子に及ぼす熱泳動力	化学工学論文集, Vol.16, No.4, 739-746	神吉達夫・宮崎 武
1990	A numerical study on sea/land breezes as a gravity current -Kelvin-Helmholtz billows and inland penetration of sea-breeze front-	Proc. of 3rd International Conference on Atmospheric Sciences and Application to Air Quality, 75	Sha,W., Kawamura,T.
1990	Formation mechanism of severe particulate pollution in the winter urban area	Proc. of 3rd International Conference on Atmospheric Sciences and Application to Air Quality, 12	Sha,W., Kitada,T., Kurita,H., Carmichael,G.R.
1990	Characteristics of acid rain and its transport mechanisms in Japan and North-eastern Asia	Global Environment and Energy Issues, edt. by T. Seiyama, Supplement, 99-104	
1990	Diagnostic evaluation of the transport and gas chemistry components of the STEM- Model	Atmospheric Environment, Vol.24A, No.11, 2715-2737	Chang,Y.-S., Carmichael,G.R., Kurita,H.
1990	ニクロム薄板を用いたミスト粒径分布測定器の開発	エアロゾル研究, Vol.5, No.4, , 312-319	吉山秀典・田森行男
1991	関西・瀬戸内地方におけるスギ衰退とオキシダント指数、降雨量との関係	環境学会誌, Vol.4, No.1, 51-57	高橋啓二・梨本 真
1991	スモッグチャンパーデータによる光化学反応モデルの比較検討	大気汚染学会誌, Vol.26, No.4, 246-259	大原利真・酒巻史郎・ 秋元 肇・若松伸司
1991	A numerical study on sea/land breezes as a gravity current -Kelvin-Helmholtz billows and inland penetration of sea-breeze front-	Journal of Atmospheric Science, Vol.48, No.14, 1649-1665	Sha,W., Kawamura,T
1991	大気汚染物質長距離輸送時における粒子状有機物質の人為起源、自然起源および一次排出、二次生成の寄与	日本化学会誌, No.6, 868-872	薩摩林光・山崎雄一 郎・栗田秀實・横内陽子
1991	都市の大気汚染と制御	シンポジウム「都市の気候変化と制御」講演論文集, 17-22	
1991	Numerical study on the fine structure and dynamics of land/sea breeze as a gravity currents	NATO/CCMS 19th ITM on Air Pollution Modelling and its Application, Vol.2, 499-506	Sha,W

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1991	Mass budget study of continental acidic pollutants transported with the convective clouds over the Japan Sea in winter, Emerging Issues in Asia	Proc. 2nd IUAPPA Conf. on Air Pollution, Vol.2, 87-94	Kitada,T., Lee,P.C.S.
1991	Coherent structure of turbulent longitudinal vortices in unstably-stratified turbulent flow	International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.34, 2373-2385	Fukui,K., Nakajima,M.
1991	: Long-range transport of air pollution caused by a combination of thermally-induced local winds under light gradient wind conditions	Proc. of Japan-China Symp. on Air Pollution, 65-70	Kurita,H.
1992	Observed structure of the nocturnal urban boundary layer and its evolution into a convective mixed layer	Atmospheric Environment, Vol.26B, No.1, 45-57	Uno,I., Wakamatsu,S., Nakamura,A.
1992	Diurnal variation of OH radical and hydrocarbons in a polluted air mass during the long range transport in central Japan	Atmospheric Environment, Vol.26A, No.15, 2835-2844.1	Satsumabayashi,H., Kurita,H., Chang,Y.S., Carmichael,G.R.
1993	Comparison and analysis of the chemical characteristics of precipitation in China and Japan	Scientia Atmospherica Sinca, Vol.17, No.1, 27-38	Huang,M., Liu,S.
1993	Circulation of carbon dioxide within the earth's environment	Proc. of IES/Intl Committee for Closed Ecology Experiment Facilities, 1-11	
1993	A numerical study of nocturnal sea breezes: Prefrontal gravity waves in the compensating flow and inland penetration of the sea-breeze cutoff vortex	Journal of Atmospheric Science, Vol.50, No.8, 1076-1088	Sha,W., Kawamura,T.
1993	Numerical Modeling of long-range transport of acidic species in association with meso-convective clouds across the Japan sea resulting in acid snow over coastal Japan I. Model description and qualitative verifications	Atmospheric Environment, Vol.27A, No.7, 1061-1076	Kitada,T., Lee,P.C.S
1993	重力流としてみた海陸風の特徴	月刊海洋 号外, No.5, 83-87	
1993	大気拡散と大気質の変化	気象利用研究, No.6, 8-16	
1993	Transient turbulence structure in unstable boundary layer under the condition of step cooling	Proc. of 6th EURASAP/Intl Workshop on Wind and Water, Tunnel Modelling of Atmospheric Flow and Dispersion, p.21	Fukui, K., Sha,W., Uehara,K.
1993	A thermally stratified wind tunnel for environmental flow studies	Proc. of 6th EURASAP/Intl Workshop on Wind and Water, Tunnel Modelling of Atmospheric Flow and Dispersion, p.41	Ohya,Y., Tatsuno,M., Nakamura,Y.

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1993	中部山岳地域河川上流域における河川・湖沼pHの経年的低下と酸性雨の関係について	大気汚染学会誌, Vol.28, No5, 308-315	栗田秀實・堀順一・望月博子・浜田安雄
1993	Long range transport of air pollutants in the Eastern Asia	Proc. of Intl Conference on Regional Environment and Climate Changes in East Asia, 11-16	Carmichael,G.R.
1994	Turbulence structure and transport mechanism near the air-sea interface of oceanic convective layer -A laboratory experiment-	Proc. of CREAMS'94 Intl Symposium, 43-47	Karasudani,T., Morimoto,T.
1994	Turbulent mass transfer in the convective boundary layer developing beneath the air-sea interface	Intl. Symp. on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, 288-292	Karasudani,T., Ishi-i,K., Morimoto,T., Matsumoto,S.
1994	Characteristics of background surface ozone in Japan	Atmospheric Environment, Vol.28, No.1, 25-37	Woosun,Y., Carmichael,G.R.
1994	Physical and chemical mechanisms causing high concentration spm episodes in winter	4th Intel. Conference on Atmospheric Science and Application to Air Quality, 1994, p.53 and Proc. of AGU Western Pacific Meeting, p.153	Mori,K., Kang,S.-J.
1994	Aerosol composition and seasonal cycle at Cheju Island, South Korea	4th Intl. Conference on Atmospheric Science and Application to Air Quality, p.33	Carmichael,G.R., Hong,M.-S., Zhang,Y., Chen,L.-L.
1994	Comparison and analysis of chemical characteristics of precipitation in China and Japan	4th Intl. Conference on Atmospheric Science and Application to Air Quality, p.25	Huang,M., Liu,S.
1994	Effects of oceanic stratification on the uptake of greenhouse gases	8th CACGP Symp. of the IAMAP Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution and 2nd Scientific Conf. of the Intl. Global Atmospheric Chemistry Project, p.49 and Proc. of AGU Western Pacific Meeting	Karasudani,T., Ishi-i,K.
1994	Effect of Tokyo Metropolitan area on the air quality of the Kanto Plain	in "Urban Air Pollution", Vol. 1, ed. by P. Melli and P. Zannetti, Computational Mechanics Publications, 187-219	Carmichael,G.R., Chang,Y.-S., Satsumabayashi,H., Kurita,H.

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1995	Photochemical formations of lower aldehydes and lower fatty acids under long-range transport in central Japan	Atmospheric Environment, Vol.29, No.2, 255-266	Satsumabayashi,H., Kurita,H., Chang,Y.-S., Carmichael,G.R.
1995	Characteristics of air quality in Northeast Asia and modeling of long-range transport of air quality	Proc. of the 1st Northeast Asian Workshop on Long-Range Transboundary Pollutants, 43-53	
1995	Turbulent heat transfer in the convective boundary layer developing beneath water surface	Proc. of 10th Symp. on Turbulent Shear Flows, Vol.3, 63-67	Karasudani,T., Ishi-i,K.
1995	Formation of secondary pollutants during long-range transport and its contribution to air quality in East Asia	Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science, Vol.6, No.3, 487-500	Carmichael,G.R.
1996	Seasonal variation of Aerosol composition at Cheju Island	Atmospheric Environment, Vol. 30, No. 13, 2407-2416	Carmichael,G.R., Zang,Y., Chen,L.-L., Hong,M.-S
1996	Transient turbulence structure in the unstable boundary layer under the condition of step cooling from below	Atmospheric Environment, Vol. 30, No. 16, 2811-2819	Fukui,K., Sha,W., Uehara,K.
1996	A thermally stratified wind tunnel for environmental flow studies	Atmospheric Environment, Vol. 30, No. 13, 2881-2887	Ohya,Y., Tatsuno,M., Nakamura,Y.
1996	Effects of long range transboundary pollutants on air quality in Japan -Numerical simulation of yellow sand events -	5th Intl. Conf. on Atmospheric Sciences and Application to Air Quality, p.88	Kang,S-J.
1996	Numerical study on flow pass a three-dimensional obstacle in a strong stratified layer	5th Intl. Conf. on Atmospheric Sciences and Application to Air Quality, p.150	Sha,W.
1996	Effects of long range transboundary transport of pollutants on air quality in Japan -Numerical simulation of yellow sand events-	Proc. of 2nd Intl. Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere, p.210-217	Kang,S-J., S.Y.Cho, G.R. Carmichael
1996	Effects of stratification on the flow pass a three-dimensional obstacle and lee wave vortex formation mechanism	Proc. of 2nd Intl. Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere, 216-231	Sha,W., Nakabayashi,K.
1996	An accurate second-order factorization method for time-dependent incompressible Navier-Stokes equation in spherical polar coordinates	CGER's Supercomputer Activity Report, Vol.4, 42-46	Sha W.
1997	Aerosol composition at Cheju Island, Korea	J. Geophys. Research, Vol.102, No.D5, 6047-6061	Carmichael,G.R et al.

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1997	Deposition of nitric and sulfuric air pollutants over the Japan Sea surface	Proc. of CREAMS'97 International Symp., 43-47	Kang,S-J.
1997	東アジアの大気汚染物質越境長距離輸送に関する数値研究	化学工学論文集、Vol.23, No.5, 346-355	姜 錫在
1997	代理表面法を用いた乾性沈着の評価 I .乾性沈着面上での蒸散と化学反応の影響	大気環境学会誌、Vol.32, No.4, 350-361	下原孝章、大石興弘、村野健太郎
1997	春季の移動性高気圧通過時の九州地域での二次汚染物質と火山性 SO <sub>2</sub> の挙動	大気環境学会誌、Vol.32, No.6, pp.404-424	鶴野伊津志、若松伸司他
1997	Long-range transport of air pollutants in the east Asia	Proc. of 3rd Int. Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere140 (Nara, 5-7 Nov.), 131-	Kang, S.J., Sha, W.
1997	Multicomponent gas-liquid-solid equilibrium in urban atmospheric aerosols	Proc. Intl .Symp. on Atmos. Chem. and Future Global Environ476 (Nagoya, 11-13 Nov.), 474	Morishita,T., Kang,S-J
1997	Direct numerical simulation on spiral Taylor-Gutler vortex in spherical Couette flow	CGER's Supercomputer Activity Report, Vol.5	Sha W.
1997	Influence of continental outflow events on the aerosol composition at Cheju Island	South Korea. J. Geophys. Research, Vol.102, No.D23, 28551-28574	Chen,L,-L., Carmichael,G.R. et al.
1998	A wind tunnel study of turbulent flow over a rough surface	Proc. of the 2nd Urban Environment Symposium, Albuquerque, 28-35	Roth, M
1998	Numerical study on the tropospheric oxidants budget in East Asia and effects of intruding stratospheric ozone on it	Air Pollution VI, ed. by C.A.Brebbia et al., 13-24, WIT Press, Southampton	S.-J. Kang
1998	An accurate second-order approximation factorization method for time-dependent incompressible Navier-Stokes equation in spherical polar coordinates	J. Compt. Physics, Vol.142, 47-66	Sha,W., Nakabayashi, K.
1998	Numerical study on flow pass of a three-dimensional obstacle under a strong stratification condition	J. Appl. Meteorol., 37, No.10, 1047-1054	Sha,W., Nakabayashi,K.
1998	Behavior of volatile components in urban aerosols	Proc. of 6th Int. Conf. ASAAQ, Beijing, 3-8 Nov., p.48	Takemoto,T., Kim, Y.P., Sha, W.
1998	中部山岳地域における二次粒子の挙動	大気汚染学会誌、Vol.33, No.5, 284-296	薩摩林光、佐々木一敏他

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1998	Photochemical formation and stratospheric intrusion in tropospheric oxidants budget in East Asia	Proc. of Workshop on Transport of Air pollutants in Asia, 131-140, Laxenburg (IIASA), Austria, 27-29 July	Kang, S.J.
1999	秋季および春季の中部山岳地域における大気中酸性、酸化性物質の挙動	大気汚染学会誌、Vol.34, No.3, 219-236	薩摩林光、佐々木一敏 他
1999	大気境界層中の乾性沈着	エアロゾル研究、Vol.14, No.4, 309-316	王 自発、下原孝章
1999	Development of a gas-liquid equilibrator for estimating CO <sub>2</sub> flux at the ocean surface	J. of Atmospheric and Oceanic Technology, Vo.16, No.10, 1450-1455	Katayama,H., Karasudani,T., Ishii,K., Marubayashi,K
1999	すべり境界条件を持つ対流混合層の特性	日本風工学会誌、Vol.79, 23-24	烏谷隆、山村和宏、石井幸治
2000	Behavior of volatile inorganic components in urban aerosols	Atmospheric Environment, Vol.34, 353-361	Takemoto,T., Kim, Y.P., Sha, W.
2000	Kelvin-Helmholtz billows associated with double diffusion effects	"Turbulence, Heat and Mass Transfer 3", ed. by Nagano, Y., Hanjalic, K. and Tsuji, T., 291-295, Aichi Shuppan, Nagoya	Andoh, K.
2000	Direct numerical simulation of bluff body flows using non-staggered grids	Chem. Eng. Comm. Vol.178, 157-183	Qian,S., Okada,K., Nagase,Y.
2000	A numerical study on acid rain and neutralization by yellow-sand in East Asia	Air Pollution, Vol.8, 119-128, WIT Press	Wang, Z., Terada, H.
2000	Numerical modeling of pollutant transport and chemistry during a high-ozone event in northern Taiwan	Tellus, 25B, 1189-1205	Wang, Z., Sha, W.
2000	A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow-sand over East Asia	J. Geophys. Research, Vol.105, No.D22, 26947-26959	Wang, Z., Huang, M
2001	Diurnal variations of convective activity and rainfall in tropical Asia	J. Meteorol. Soc. Japan. 79, (No.1B), 333-352	Ohsawa,T., Hayashi,T., Watanabe,A., Matsumoto,J
2001	晩秋における大気中粒子状有機物質の光化学生成	大気環境学会誌、36, No3, 174-184	薩摩林光・鹿角孝男・ 西沢宏・横内陽子
2001	Trend of acid rain and neutralization by yellow-sand in East Asia -A numerical study-	Proc. of the 1st Joint Workshop on the Long-range Transboundary Air Pollution in Northeast Asia, 73-82, Aug.24, Seoul	

発表年	論文名	発表誌名	共著者
2001	Pinonaldehyde and some other organics in rain and snow in central Japan	Chemosphere, Vol.20, 611-616	Satsumabayashi, H., Nishizawa, H., Yokouchi, Y.
2001	Numerical study on transboundary transport of acid rain and yellow sand and interaction between them	Proc. of 12th World Clean Air and Environment Congress, 201-206, (Seoul, Aug. 26-31).	Terada, H., Wang, Z.
2001	Numerical regional air quality forecast tests over the mainland of China	Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 130, 1781-1786	An, J., Huang, M., Wang, Z., Zhang, X., Cheng, X.
2001	Model intercomparison study of long range transport and sulfur deposition in East Asia (MICS-ASIA)	Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 130, 51-62	Carmichael, G.R., Hayami, H. et al.
2001	Neutralization of acid rain by yellow-sand in east Asia -A numerical study-	Proc. 7th Int. Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere, 115-122, (Tsukuba, Nov. 20-22).	Terada, H., Wang, Z.
2001	Development of multipollutant emissions inventory in Japan	Proc. 7th Int. Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere, 115-122, (Tsukuba, Nov. 20-22)	Kannari, A., Baba, T., Tonooka, Y., Matsuda, K.
2002	The MICS-Asia study: model intercomparison of long-range transport and sulfur deposition in East Asia	Atmospheric Environment, Vol.36, 175-199	Carmichael, G.R., Calori, G., Hayami, H., Uno, I. Et al.
2002	Trend of acid rain and neutralization by yellow-sand in East Asia - A numerical study -	Atmos. Environment, Vol.36, 503-509	Terada, H., Wang, Z.
2002	Changing trend in sulfur emissions in Asia: Implications for acid deposition, air pollution, and climate	Environmental Science and Technology, Vol.36, No.22, 4707-4713	Carmichael, G.R., Street, D.G., Calori, G., Amann, J. Et al.
2002	Comparison of Air Pollutants simulated by the RAQM with observations	National Rept. 5th Expert Meeting for Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia, 27-29 Aug., Kyonju	An J., Matsuda, K.
2002	Numerical study on the extratropical transition of Typhoon Bart (1999) over the Western North Pacific Ocean	10th Conf. on Mesoscale Processes. P2-12, p.7, 23-27 June, Portland	Yoshino, J., Ishikawa, H.
2002	MM5 simulation of the 24 September 1999 tornadic outbreaks in the outer rainband associated with Typhoon Bart	12th PSU/NCAR Mesoscale Model user's Workshop, 24-25 June, Boulder	Yoshino, J., Ishikawa, H.
2002	Characteristic parameters and formulative mechanism of the 24 September 1999 tornadic outbreaks in the outer rainband associated with Typhoon Bart (1999)	Int. Conf. on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall/snowfall in East Asia. p.6, 29-31 Oct., Tokyo	Yoshino, J., Ishikawa, H.

発表年	論文名	発表誌名	共著者
2002	Numerical study on the rapid decaying and re-intensification of the extratropical transition of Typhoon Bart (1999) over the Western North Pacific Ocean	Int. Conf. on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall/snowfall in East Asia (29-31 Oct., Tokyo), p.6	Yoshino,J., Ishikawa, H.
2003	Simulated impacts of SO2 emissions from the Miyake Volcano on concentration and deposition of sulfur oxides in September and October of 2000	Atmospheric Environment, Vol.37, 3039-3046	An, J., Matsuda, K., Hasome, H., Iwata, H.
2004	代理表面を用いた乾性沈着機構の研究 - 酸性及びアルカリ性水面、水面、乾き面によるガス状および粒子状物質の沈着過程の分画 -	大気環境学会誌, Vol.39, No.4, 171-187	下原孝章
2004	Impacts of the eruption of Miyakejima volcano on air quality over far east Asia	J. Geophys. Res., Vol.109, D21, D21204 doi:10.1029/2004JD004762	Kajino,M., Satsumabayashi, H., An,J
2004	Effects of Miyake volcanic effluents on airborne particles and precipitation in central Japan	J. Geophys. Res., Vol.109, D19202, doi:10.1029/2003JD004204	Satsumabayashi,H., Kawamura,M., Katsuno,T. et al.
2004	Model study on particle size segregation and deposition during Asian dust events in March 2002	J.Geophys.Res.,Vol.109, D19205,doi:10.1029/2004JD004920	Han,Z.W., Matsuda,K., Zhang, R.J., Arao, K., Hasome, H.
2004	Simulations of monthly nitrate concentrations in precipitation over East Asia	Atmospheric Environment, Vol.36, 4159-4171	An, J., Wang, Z., Matsuda,K., Kajino, M. and Z. Cheng.
2004	Change of aerosol and precipitation in the mid troposphere over central Japan caused by Miyake volcano effluents	Air Pollution II, ed. by Brebbia,C.A., 141-150, WIT Press (London)	Kajino,M., Satsumabayashi, H.
2004	日本における大気汚染物質排出グリッドデータベースの開発	大気環境学会誌, Vol.39, 257-271	神成陽容・馬場剛・外岡豊・松田和秀
2005	Model study on surface ozone affected by biogenic emissions over eastern China during a summer smog episode	Tellus, Vol.57, 367-487	Han,Z., Matsuda,H
2005	海面直下で発達する熱対流混合層の乱流構造に関する数値的研究	海岸工学論文集, Vol.21, 81-85	木原直人・山下隆男
印刷中	Eddy diffusivity and its stability dependence in clear free atmosphere measured by MU Radar system	J. Atmos. Sci	Fukui,T., Horiguchi,M., Fukao,S.,Hanazaki,H.
2004	Numerical studies on the vortices in the middle layer of a large finite amplitude mountain under rotating stratified conditions	Dynamics of Atmos. and Ocean	Hozumi, Y
2004	Interaction among upper/lower potential vorticity anomalies during the extratropical transition of Typhoon Bart (1999)	J. Atmos. Sci	Yoshino, J., Ishikawa, H.

発表年	論文名	発表誌名	共著者
2004	Numerical study on the Toyohashi F-3 tornado outbreak in the outer rainband associated with extratropical transitional Typhoon Bart (1999). Part I: Environment of the tornado outbreak	Tellus	Yoshino, J., Ishikawa, H.
2004	Numerical study on the Toyohashi F-3 tornado outbreak in the outer rainband associated with extratropical transitional Typhoon Bart (1999). Part II: Mesocyclones and low-level coastal front	Tellus	Yoshino, J., Ishikawa, H.
2004	A numerical model study on the transport and land-air exchange of heat and water in the dry soil	J. Hydrometeorology	Katata, G., Nagai, H.
2004	Model study on precipitation ion composition in springtime over East Asia	Atmospheric Environment	Han,Z., Matsuda,H
2004	中部山岳地域上流域における陸水 pH の長期的低下 - 過去30年間のpHの低下と酸性雨の関係 -	大気環境学会誌	栗田秀實
2004	Increase in nitrate and chloride deposition in East Asia due to increased sulfate associated with the eruption of the Miyakejima Volcano	J. Geophys. Res.	Kajino,M., Satsumabayashi,H., Han, Z.

### 著書、総説等

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1978	拡散風洞	化学工学, Vol. 42, No. 4, 226	
1980	環境における流体力学 - 大気系 -	化学工学, Vol. 44, No. 7, 472-475	
1982	大気境界層内の乱流輸送現象	ながれ, Vol. 1, No. 3, 238-252	近藤次郎
1982	流れと乱れ	化学工学, Vol. 47, No. 12, 751-755	
1983	レーザー・ドップラー流速計による乱流計測	技報 (Matsubo Technical Report), No.3, 2-9	小森 悟
1984	第9章 測定法 9.5 流速,	伝熱学特論, 編集: 甲藤好郎ほか 養賢堂、東京, 379-388	
1984	乱流の組織的構造とその混合反応過程	流体混合 - 研究の進歩 -, 編集: 長瀬洋一ほか, 化学工学協会、東京, 18-27	小森 悟
1985	大気の流れとグラフィックス	日本機械学会誌, Vol. 88, No. 799, 633-638	
1985	大気中の流れの計測,	流れの計測, Vol. 3, No. 3, 3-8	
1986	大気環境における伝熱問題	伝熱研究, Vol. 25, No. 97, 19-22	

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1986	1.7 節 成層流	流れの可視化ハンドブック, 編集: 浅沼 強ほか, 朝倉書店, 東京, 29-32	小森 悟
1988	2.2 節 乱流に関する基礎的事項	化学工学便覧 改定 5 版, 編集 化学工学便覧編集委員会, 丸善, 東京, 112-120	
1988	2.3.3.d 節 重力場の流れ	化学工学便覧 改定 5 版, 編集 化学工学便覧編集委員会, 丸善, 東京, 129-131	
1988	大気汚染物質の大気中の移動と拡散	流れの可視化, Vol. 8, No. 29, 84-90	
1989	Pollutant dispersion and land/sea breeze circulations	in "Encyclopedia of Environmental Control", ed. by P.N. Cheremisinoff, Gulf Pub. Co., Cambridge, Volume 2, 583-630	Kitada,T.
1989	大気質の変化と酸性雨	科学, Vol. 59, No. 9, 610-619	
1989	酸性雨のシミュレーション	シミュレーション, Vol. 8, No. 3, 20-26	
1989	4.1 節 異常気象、局地気象、大気大循環、酸性雨	次世代技術における熱工学, 日本機械学会「次世代技術における熱工学問題に関する調査研究分科会」, 64-69	
1990	浮遊粒子状物質中の二次粒子の生成とその大気中での挙動	公害と対策, Vol.26, No.2, 157-162	
1990	地球規模の大気汚染	土木学会誌, Vol.75, No.4, 22-24	
1990	第 4 章 酸性雨	講座「地球環境」 - 地球規模の環境問題[ ] -, 監修 大来佐武郎, 中央法規 東京, 185-244	
1990	大気質の変化と酸性雨	「地球環境の危機」 - 研究の現状と課題 -, 編集 内嶋善兵衛, 岩波書店, 東京, 204-213	
1990	大気質の変化と酸性雨	RC85 先端領域における熱工学・熱技術に関する調査研究分科会, 研究成果報告書( ), 日本機械学会 研究協力部会, 159-163	
1991	酸性雨の発生機構とその防止策	エネルギー・資源, Vol.12, No.1, 56-61	
1991	環境汚染の影響と対策	腐食防食部門委員会資料, No.160, Vol.30, Part 1, 日本材料学会腐食防食部門委員会, 1-23	
1991	酸性雨の大気挙動のモデル化	化学工学「酸性雨」検討会資料, 1-23	

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1991	7.1.3 節 輸送と拡散	微粒子ハンドブック, 編集 神保元二ほか, 朝倉書店, 東京, 563-567	
1991	密度成層状態下の大気運動と乱流輸送現象	混相流, Vol.5, No.3, 224-238	
1991	14.2 節 酸性雨などの生成機構	地球環境工学ハンドブック, 編集 地球環境工学ハンドブック編集委員会 (茅陽一), オーム社, 東京, 629-638	
1992	Theory of Correlation Method, Workshop for Trace Gas Measurement in Both Hemispheres	Rept. No. CGER-M001-'92, Center for Global Environmental Research, 271-288	
1992	Chapter 6 Photochemical oxidants in Central Japan	in "Environmental Modeling", ed. by P.Melli and P. Zannetti, Computational Mechanics Publications, 220-252	Carmichael,G.R., Chang,Y.-S., Shin,W.C., Kurita,H
1992	第4章 大気汚染の長距離輸送	地球環境と流体力学, 編集 日本流体力学会, 朝倉書店, 東京, 58-71	
1993	1.2 節 酸性雨と越境大気汚染, 地球大気環境問題とその対策 - アジアからの視点 -	大気汚染研究協会編, オーム社, 東京, 35-45	
1993	4章 こうして酸性雨が発生する	地球環境セミナー3「地球を包む大気」, 進藤勇治編, オーム社, 東京, 61-80	
1993	大気境界層と大気拡散	伝熱研究, .61-80	
1993	4.4 節 酸性雨	「次世代技術と熱」 - 地球環境、エレクトロニクス、生体、エネルギー -, 日本機械学会編, 技法堂出版, 東京, 104-112	
1995	自然界における乱流	ながれ, Vol.14, No.1, 126-128	
1995	冬季都市型二酸化窒素汚染と排出削減効果 - 大気汚染輸送/反応/沈着モデルの応用 -	化学工学会「流れの数値解析と化学装置のモデリング」研究会, 87-95	
1996	大気汚染物質長距離輸送時の光化学反応による有機物質の生成と消滅 (I) - 炭化水素の反応および低級アルデヒド、低級脂肪酸の生成 -	全国公害研会誌, Vol.21, No.1, 2-15	薩摩林光
1996	大気汚染物質長距離輸送時の光化学反応による有機物質の生成と消滅 (II) - 粒子状有機物質の生成およびテルペンの光化学反応 -	全国公害研会誌, Vol.21, No.2, 58-66	薩摩林光
	§ 2-4 湾岸油井火災に伴う大気汚染と気候変動、「流れの科学 - 生物から宇宙まで - 」	日本機会学会編, 51-56、技報堂出版 (東京)	
1998	第27章 環境と流れ 27-1 節 密度成層乱流	「流体力学ハンドブック」, 日本流体力学会編、丸善、東京、1121-1125,	

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1998	第27章 27-4節 大気汚染	「流体力学ハンドブック」、日本流体力学会編、丸善、東京、1139-1147	
1998	6.8節 温度の測定	「化学工学ハンドブック」、化学工学学会編、丸善、東京、415-419	
	5.8節 非定常型シミュレーション・モデル	「浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル」、浮遊粒子状物質検討会編、環境庁大気保全局大気規制課監修、東洋館出版社、東京、237-251	
2001	1.3 (1) 豪雨の発生維持機構、1.3 (2)集中豪雨のメカニズム	「防災学ハンドブック」、京都大学防災研究所編集、朝倉書店、東京、54-57	
2001	9.2 (1)地球温暖化による災害とその対策、9.2 (2)酸性雨問題とその対策	「防災学ハンドブック」、京都大学防災研究所編集、朝倉書店、東京、530-542	
2001	大気エアロゾルの輸送・変質と環境影響	日本学術会議第20回混相流シンポジウム予稿集、11-18、(2001.7.12-14、北九州)	
2001	乱流の構造および拡散機構におよぼす密度成層効果	日本航空宇宙学会誌、Vol.49、No.575、293-299	堀口光章
2001	ヒートアイランドのメカニズムとモデリング	エネルギー・資源、Vol. 22, No. 4, 279-285	石川裕彦・堀口光章
2002	第2章 水の大循環サイクルと水資源	「水文大循環と地域水代謝」、丹保憲仁編、25-44、技報堂、東京	
2003	気象災害の研究の最前線	学術月報、Vol. 56, No. 7, 29-32	
2005	地球に潤いを！ - 「持続可能な砂漠緑化」への挑戦 -	未来材料、Vol.5, No.1, 2-5	

## 研究報告書

### 文部省科学研究費研究報告書

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1978	排温水の熱的挙動に関する研究	昭和52年度文部省科研費特別研究(1)「環境汚染の検知と制御」 - 水環境保全のための化学工学 - 研究報告書( ), 27-32	水科篤郎・荻野文丸
, 1979	Buoyancy effect on eddy diffusivities in thermally stratified flow in an open channel	Detection and Control of Environmental Pollution, Vol. 3, 27-35	Mizushina,T., Ogino,F., Komori,S.
1982	人工排熱の大気中の拡散に関する研究	昭和56年度文部省科研費補助金報告書, 10-12	

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1982	成層流中の乱流構造	文部省科学研究費「乱流現象の解明と制御」, Vol. 1, 4-7	小森 悟
1982	開水路流れの自由表面での乱流構造と輸送構造 ( )	文部省科学研究費「乱流現象の解明と制御」, Vol. 1, 117-122	小森 悟・松尾陽一・山本一夫
1983	海陸風の室内実験	文部省科学研究費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「広域大気汚染の動態」研究成果報告書, 160-175	光本茂記
1983	臨海地域の気流におよぼす外部パラメーターの影響	文部省科学研究費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「広域大気汚染の動態」研究成果報告書, 191-205	
1983	海陸風存在下での大気汚染の特性 - 数値シミュレーション -	文部省科学研究費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「広域大気汚染の動態」研究成果報告書, 223-236	尾添紘之
1983	変分法の海陸風場への適用性	文部省科学研究費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「広域大気汚染の動態」研究成果報告書, 323-328	
1983	長野盆地における高濃度オキシダントと気象	文部省科学研究費「環境科学」研究報告集 B180-S702, 「内陸域における局地気象と大気汚染物質の広域拡散」, 77-86	栗田秀實
1983	上田盆地・長野盆地におけるナイトスモックとオキシダントの広域移流	文部省科学研究費「環境科学」研究報告集 B180-S702, 「内陸域における局地気象と大気汚染物質の広域拡散」, 87-93	栗田秀實
1983	レーザーレーダーで観測された大気混合層の構造	文部省科学研究費「乱流現象の解明と制御」研究成果報告書, Vol. 2, 21-24	笹野泰弘
1983	円形噴流の自己保存領域での組織的乱流構造	文部省科学研究費「乱流現象の解明と制御」研究成果報告書, 河口湖集会, 5-13	
1984	重力流の乱流構造	文部省科研費「重い気体の大気中での拡散機構 - 重力流の挙動 - 」, 研究成果報告書, 4-7	小森 悟

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1984	密度成層化した壁面乱流中のスカラー量の横方向拡散	文部省科研費「重い気体の大気中での拡散機構 - 重力流の挙動 - 」, 研究成果報告書, 8-19	小森 悟・福井啓介
1984	Turbulence structure in stably stratified open-channel flow	文部省科学研究費「乱流現象の解明と制御」, 第7班複雑乱流の実験 昭和58年度 研究成果報告書, 194-207	Komori,S., Ogino,F., Mizushina,T.
1984	A laboratory experiment on momentum and heat transfer in the stratified surface layer	文部省科学研究費「乱流現象の解明と制御」第7班複雑乱流の実験, 昭和58年度研究成果報告書, 208-223	Fukui,K., Nakajima,M.
1986	佐久・上田・長野盆地における大気汚染	文部省科研費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「内陸域における大気汚染の動態」, 22-29	栗田秀實
1986	大規模海風の関東山地越え(その2)	文部省科研費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「内陸域における大気汚染の動態」, 65-71	光本茂記・栗田秀實
1986	汚染物質の気相-エアロゾル相間の平衡	文部省科研費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「内陸域における大気汚染の動態」, 160-167	Chang,Y.-S. ・ Carmichael,G.R. ・ 栗田秀實 ・ 佐々木一敏
1986	軽井沢で観測された放射霧と雨の化学組成	文部省科研費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「内陸域における大気汚染の動態」, 180-184	村野健太郎・水落元之他
1986	長距離輸送時の気象の特徴と大気汚染物質の挙動	文部省科研費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「内陸域における大気汚染の動態」, 201-211	栗田秀實
1986	沿岸地域から内陸の山岳地域への大気汚染物質の輸送過程	文部省科研費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「内陸域における大気汚染の動態」, 212-219	栗田秀實
1986	沿岸地域から内陸地域への大気汚染物質の長距離輸送をもたらす総観規模の気象条件	文部省科研費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「内陸域における大気汚染の動態」, 220-227	栗田秀實
1986	ナイトスモッグ発生時の気流の特徴	文部省科研費「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 「内陸域における大気汚染の動態」, 250-254	光本茂記・栗田秀實
1987	長距離輸送時の気象とオゾン濃度の立体構造	文部省科研費「環境科学」研究報告 B307 R11-2, 「沿岸域から内陸域にいたる広域大気汚染に関する研究」, 21-30	栗田秀實

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1987	碓氷峠を中心とした領域での三次元流れ場の日変化 - 客観解析	文部省科研費「環境科学」研究報告 B307' R11-2, 「沿岸域から内陸域にいたる広域大気汚染に関する研究」, 37-42	水谷隆一・北田敏廣・栗田秀實
1987	重力流の構造 - ドップラー・ソーダー、パイバル観測 -	文部省科研費「環境科学」研究報告 B307' R11-2, 「沿岸域から内陸域にいたる広域大気汚染に関する研究」, 55-58	光本茂記
1987	重力流ヘッド内における大気汚染物質濃度および気象要素の時間的变化	文部省科研費「環境科学」研究報告 B307' R11-2, 「沿岸域から内陸域にいたる広域大気汚染に関する研究」, 59-64	栗田秀實
1987	不安定成層乱流中の大規模渦の構造	文部省科研費「環境科学」研究報告 B307' R11-2, 「沿岸域から内陸域にいたる広域大気汚染に関する研究」, 71-76	
1987	長距離輸送時の大気汚染物質の酸化反応	文部省科研費「環境科学」研究報告 B307' R11-2, 「沿岸域から内陸域にいたる広域大気汚染に関する研究」, 95-98	Chang, Y.-S. ・ Carmichael, G.R. ・ 北田敏廣
1987	炭化水素類の光化学反応性	文部省科研費「環境科学」研究報告 B307' R11-2, 「沿岸域から内陸域にいたる広域大気汚染に関する研究」, 99-104	薩摩林光・笹井春雄
1987	イソプレンとモノテルペンの挙動とその光化学反応	文部省科研費「環境科学」研究報告 B307' R11-2, 「沿岸域から内陸域にいたる広域大気汚染に関する研究」, 105-108	笹井春雄・薩摩林光
1987	アルデヒドと脂肪酸の挙動	文部省科研費「環境科学」研究報告 B307' R11-2, 「沿岸域から内陸域にいたる広域大気汚染に関する研究」, 109-112	薩摩林光・笹井春雄・水落元之
1998	Photochemical air pollution in Czech Republic and effective control measures	Report for the Presentation of the Asahi Glass Foundation-assisted Research Findings in Japan, 1-11	Moldan B.,.
1999	Behavior of volatile components in urban aerosols	「対流圏化学グローバルダイナミクス」平成 11 年度文部省科研費(特定領域研究(A)(1) 研究成果報告書, 117-141	Takemoto, T., Kim, Y.P., Sha, W.:
2000	A deflation module for the long-range transport of yellow-sand over East Asia	「対流圏化学グローバルダイナミクス」平成 12 年度文部省科学研究費補助金特定領域研究(A)(1) 研究成果報告書, 129-139	Wang, Z., Huang, M

研究報告書（国立公害研究所、応用力学研究所、防災研究所等）

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1980	大気汚染のシミュレーション	国立公害研究所調査報告 第 15 号 B-15-'80, 41-53	
1980	安定成層流の乱流構造	国立公害研究所研究報告 第 17 号 R-17-'80, 「流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果」, 13-48	小森 悟・荻野文丸・水科篤郎
1980	不安定成層流の乱流構造	, 国立公害研究所研究報告 第 17 号 R-17-'80, 「流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果」, 49-72	小森 悟・荻野文丸・水科篤郎
1980	熱的に成層化された流れの中の乱流拡散係数に及ぼす浮力効果	国立公害研究所研究報告 第 17 号 R-17-'80, 「流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果」, 73-88	小森 悟・荻野文丸・水科篤郎
1980	成層流への乱流スペクトルモデルの適用	国立公害研究所研究報告 第 17 号 R-17-'80, 「流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果」, 89-108	小森 悟・荻野文丸・水科篤郎
1980	水平加熱平板上の混合対流中の乱流輸送	国立公害研究所研究報告 第 17 号 R-17-'80, 「流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果」, 109-122	小森 悟・光本茂記・小川 靖・福井啓介・水科篤郎
1980	大気下層における乱流輸送過程に及ぼす浮力効果	国立公害研究所研究報告 第 17 号 R-17-'80, 「流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果」, 123-143	小森悟・光本茂記・小川靖・福井啓介・水科篤郎
1980	非等温流中の乱流測定へのレーザー・ドップラー流速計の適用	国立公害研究所研究報告 第 17 号 R-17-'80, 「流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果」, 145-164	小森 悟・荻野文丸・水科篤郎
1981	湖面蒸発量の研究	国立公害研究所研究報告 第 20 号 R-20-'81, 43-68	土屋 巖・白井邦彦・増田啓子・河合崇欣・佐橋 謙
1981	水平方向の乱流構造・乱流輸送過程に及ぼす密度成層効果	国立公害研究所調査報告 第 19 号 B-19-'81, 157-173	小森 悟
1982	大気拡散実験用風洞の特性について	国立公害研究所研究報告 第 33 号 R-33-'82, 「大気運動と大気拡散過程のシミュレーション」, 17-27	小川靖・Ogawa, P.D.・上原清
1982	成層流中での煙の挙動	国立公害研究所研究報告 第 33 号 R-33-'82, 「大気運動と大気拡散過程のシミュレーション」, 29-60	小川靖・Ogawa, P.D.・上原清

発表年	論文名	発表誌名	共著者
1982	海陸風の基本的なメカニズム - 室内実験 -	国立公害研究所研究報告 第 33 号 R-33-82,「大気運動と大気拡散過程のシミュレーション」, 79-92	光本茂記・柴田 勉・尾添紘之
1982	海陸風存在下での大気汚染の特性 - 数値シミュレーション -	国立公害研究所研究報告 第 33 号 R-33-82,「大気運動と大気拡散過程のシミュレーション」, 117-133	尾添紘之・柴田 勉・佐山隼敏・光本茂記
1982	レーザーレーダーを用いた空間相関法による風向, 風速の遠隔的計測法	国立公害研究所研究報告 第 34 号 R-34-82, 143-152	清水 浩・笹野泰弘・安岡善文・竹内延夫・奥田典夫
1986	乗鞍岳山頂におけるバックグラウンドオゾン濃度	長野県衛生公害研究所研究報告, Vol. 9, 25-28	栗田秀實・内田英夫・光本茂記・溝口次夫
1992	長野市における環境大気の大気化学反応, - 炭化水素類の大気化学反応性とアルデヒド, 硝酸塩の生成 -	長野県衛生公害研究所研究報告, Vol. 10, 25-32	薩摩林光
1992	炭化水素の大気化学反応とオゾン生成	長野県衛生公害研究所研究報告, Vol. 15, 11-17	薩摩林光・笹井春雄
1995	山岳地帯および都市における大気中粒子状物質 - 粒子状物質濃度の経月変化と組成の特徴 -	長野県衛生公害研究所研究報告, Vol. 16, 8-15	薩摩林光・鹿角孝男・佐々木一敏・鹿野正明・村野健太郎
1995	大気海洋環境研究のための温度成層風洞(大気海洋システム解析実験装置)	応用力学研究所所報, Vol.75, 147-165	大屋裕二・辰野正和・中村泰治他
1995	水面下に発達する対流境界層における乱流輸送	応用力学研究所所報, Vol.78, 55-62	
1999	対流混合層の発達過程とその構造	九州大学応用力学研究所所報, No.85, 31-42	烏谷 隆・山村和宏・石井幸治
2000	アジア熱帯域における対流活動と降雨の日変化	京都大学防災研究所年報, No.43 B-1, 221 - 228	大澤輝夫・林 泰一
2001	台風 9918 号の気圧分布と海上風推算について	京都大学防災研究所年報, No.43 B-1, 273-282	藤井健・林泰一・石川裕彦・奥田昌弘
2001	大気中における粒子状有機物質濃度	長野県衛生公害研究所研究報告, Vol.23, 7-13	薩摩林光・鹿角孝男・西沢宏・横内陽子
2002	2000 年 10 月日本に豪雨をもたらした乾燥空気の起源	京都大学防災研究所年報, No.45B, 357-367	穂積 祐
2002	台風 9918 号により東海地方にもたらされた竜巻に関する数値実験	京都大学防災研究所年報, No.45B, 369-388	吉野 純・石川裕彦

発表年	論文名	発表誌名	共著者
2003	中緯度における台風 9918 号の衰弱・再発達過程に関する診断的解析	京都大学防災研究所年報、No.45B	吉野 純・石川裕彦
2003	Effects of Miyakejima volcanic effluents on airborne particles and precipitation in central Japan	京都大学防災研究所年報、No.45B, 360-378	Satsumabayashi,H., Kajino,M
2003	Piecewise potential vorticity inversion を用いた中緯度における台風 9918 号の衰弱・再発達過程に関する診断的解析	京都大学防災研究所年報、No.46B, 423-442	吉野 純・石川裕彦
2003	三宅島起源硫酸エアロゾルによる環境変化	京都大学防災研究所年報、No.45B, 379-395	梶野瑞王
2003	大規模山岳における低気圧性渦の剥離	京都大学防災研究所年報、No.46B, 347-359	穂積 祐・余 偉明
2004	エアロゾル重量測定値における残存含水量	京都大学防災研究所年報、No.47B, 425-433	梶野瑞王, Wilfried、Winiwarter , Markus Amann
2004	大規模山岳における低気圧性渦の形成	京都大学防災研究所年報、No.47B, 435-453	穂積祐、余偉明
2004	Analysis and prediction of anomalous weather and atmospheric hazards	Annuals of Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., No.47C, 45-53	Kawai, H., Iwashima, T., H., Maruyama, et al.
2004	Monitoring anthropogenic effects on land-surface phonologies in China from AVHRR using the discrete Fourier transform	Annuals Disaster Prevention res. Inst., Kyoto Univ., No.47C, 227-241	Xu, X., Levy, J.K.
2005	Direct numerical simulation of turbulent transfer in convective boundary layer beneath the gas-liquid interface	CGER's Supercomputer Activity Report, Vol.12-2004, 31-36, CGER-1061-2005, CGER/NIES	Kihara, N., Hanazaki, H
2005	中部山岳地域上流域における河川・湖沼 pH の経年的低下と酸性雨の関係について	長野女子短期大学研究紀要, Vol.11, 1-19	栗田秀實

## 地球共生に向けて - 環境流体研究から -

植田洋匡

### 要 旨

環境は、物理、化学的な素過程が多数絡み合い階層構造をなす複雑システムであり、いくつかの素過程で構成される環境現象はシステムのダイナミクスと密接に絡み合い、システム全体をも大きく変化させることがある。本研究では、環境流体に特徴的な素過程として環境流体の運動と熱、物質の輸送現象を室内実験と野外観測により調べ、それらが密度成層によって劇的に変化することを示した。この浮力効果は、運動量と熱（物質）輸送では異なり、鉛直方向、スパン方向、流れ方向とで異なり、壁面領域と外部領域とでは異なり、さらに、極端に強い成層状態では逆勾配拡散さえ起こすことを示すとともに、これらを統一的に説明できる成層乱流理論を提示した。この基礎研究をベースに、環境システムのメカニズムとダイナミクスの研究を行った。まず、環境保全を目的として、大気汚染気象システムと大気組成変動の研究を実施し、局地風が結合してできた大規模風系が中低緯度での主要な大気汚染長距離輸送機構であること、一次汚染から、光化学大気汚染、二次粒子汚染、酸性雨を一連の大気化学反応からなるシステムとして捉えることにより、個々の汚染の動態の理解と適切な環境保全対策が可能になることを示した。さらに、環境創生の研究として、砂漠緑化を目的に広域水循環システムの研究を実施し、森は雲を呼びことから、持続可能な砂漠緑化が可能で、緑化自体が新たな水資源確保の対策になりうることを示した。

**キーワード：** 密度成層、乱流拡散、酸性雨、長距離輸送、大気組成変動、水循環、砂漠緑化

### 1. はじめに

21世紀は「環境の世紀」といわれるように、環境保全と環境の創造は今世紀最大の課題の一つであり、環境研究は総合科学技術会議の重点5課題の一つにも挙げられている。研究の面からいうと、環境は、物理、化学的な素過程が多数絡み合い階層構造をなす複雑システムであり、その中で起きる現象はいくつかの素過程で構成されるが、それが地球温暖化などシステム全体のダイナミクスと密接に絡み合っており、システム全体を大きく変化させる。したがって、環境現象の解明には未解明の素過程の理解と複雑系システムとしてのダイナミクスの理解の両面が要求される。本稿では、定年退職のご挨拶に代えて、これまで

の筆者らの環境研究を紹介させて頂き、環境および環境研究に対するご理解を得ることを目的とする。

これまで、素過程に関する研究としては、環境流体の運動と、その中での熱、物質拡散の研究を中心に実施してきた。これらは「密度成層」によって劇的に変化する、「環境流体」特有の現象である。大気環境問題と関連した素過程としては、大気反応、ガス-エアロゾル平衡、乾性沈着、湿性沈着などの素過程のメカニズムの研究を行った。§2では、密度成層乱流中の輸送現象の成果をご紹介したい。この素過程研究をベースに、複雑系システムとしての「大気環境」のメカニズムやダイナミクスを探ってきた。§3では、大気汚染物質が排出され、輸送中に反応・変質して光化学大気汚染、エアロゾル汚染を経て酸性雨をもたらす一

連の大気環境問題を対象とした成果をご報告し、最後に、§ 4では新環境の創造のための研究として、砂漠緑化とオアシスネットワークの構築の研究成果をご報告したい。

## 2. 密度成層乱流の構造と輸送拡散機構

環境流体の運動を工業規模の流れと比較して特徴的なことは、(1) 高 Re 数、(2) 非定常性、(3) 地球自転に伴うコリオリ効果、(4) 成層に伴う浮力効果である。しかし、Re 数がある程度大きい場合、浮力効果など他の効果が小さければ、流れ場全体の様子は相似になり (Townsend の相似則)、Re 数依存性は少ない。流れの非定常性も重要な問題を多く含んでいるが、環境流体中の流れに関して言えば本質的な影響を及ぼすことは少ない。従って、環境流体の流れの特徴は回転と成層効果であるといえる。

環境流体は、大抵の場合密度成層状態にある。季節風など大気運動は密度 (温度) 成層によって駆動されていることから、大気は必然的に密度成層状態にある。この密度成層は、環境流体中での流動機構、拡散機構を劇的に変化させる。Fig. 2.1 は、成層によって変化する煙の拡散の相違を大気拡散風洞で可視化したものである。等温 (中立成層) 時には円錐状に広がる煙が、日中地面が加熱されて浮力的に不安定成層になると上下に大きく蛇行する。逆に、夜間下面が冷却されて安定成層になると上下の運動は抑制されて水平方向にのみ拡散するようになる。

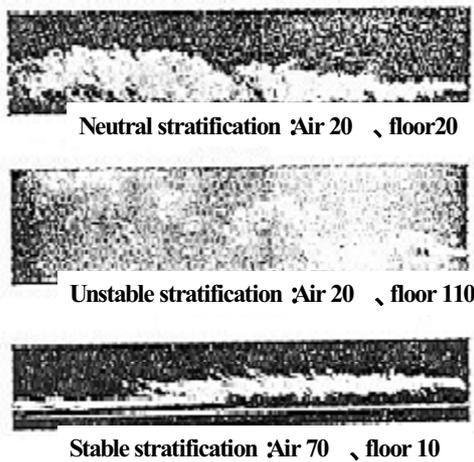


Fig.2.1. Behavior of plumes under different stratification conditions.

最も大きな特徴は浮力効果である。成層の度合 (安定度) を表すパラメータとして、バルクリチャードソン数 bulk Richardson no.  $Ri_b (= -g \delta \Delta \rho_0 / [\rho_0 (\Delta U)^2])$ 、 $g$ : 重力加速度、 $\rho_0$ : 時間平均密度、 $\delta$ : 成層流体層の厚さ、 $\Delta U$ 、 $\Delta \rho_0$ :  $\delta$ にわたっての時間平均速度差、密度差)が使われる。 $Ri_b$  が正值のとき安定成層、負のとき不安定成層、ゼロのとき中立成層という。これは重力場のなかでの運動エネルギーとポテンシャルエネルギーとの比である。安定成層のとき、フルード数 Froude no.  $Fr (= 1 / \sqrt{Ri_b})$  というパラメータもよく用いられる。局所の成層 (安定度) パラメータとしては、グラディエント・リチャードソン数 gradient Richardson no.  $Ri (= g \partial \rho_0 / \partial z) / [\rho_0 (\partial U / \partial z)^2]$  やフラックス・リチャードソン数 flux Richardson no.  $Rf (= g \overline{\rho w} / [-\overline{uw} \partial U / \partial z])$ 、乱流エネルギーの浮力による生成 (消滅) とシヤーによる生成の比、ここで、 $z$ : 鉛直上向き距離、 $u, w, \rho$ : 水平、鉛直風速変動、密度変動、オーバーバー: 平均値)が使われる。浮力の効果はこれらの成層パラメータによって記述できる。

この定義から、環境中の流れでは、長さのスケール  $\delta$  が大きいため、流速が工業規模の流れと同程度でも、安定度パラメータの絶対値は大きな値になり、浮力  $g \Delta \rho$  の効果が顕著になる。浮力は、乱流渦運動に作用して乱流構造を変化させ、さらに、この変化を通して運動量、熱、物質の乱流輸送を変化させる。

この定義から、環境中の流れでは、長さのスケール  $\delta$  が大きいため、流速が工業規模の流れと同程度でも、安定度パラメータの絶対値は大きな値になり、浮力  $g \Delta \rho$  の効果が顕著になる。浮力は、乱流渦運動に作用して乱流構造を変化させ、さらに、この変化を通して運動量、熱、物質の乱流輸送を変化させる。

### 2.1 壁面領域での成層乱流の構造と輸送機構におよぼす浮力効果

壁面境界を持つ剪断乱流場は、壁面領域と外部領域に分けられる。大気境界層の場合、接地気層と、その上空約 2000m までの気層に分けられる。壁面領域では、強い流速シヤーによって乱流渦、乱流エネルギーの大部分が生成される。外部領域では、その乱流構造も壁面領域のそれと大きく異なる。壁面領域で生成され拡散してきた乱流渦は、外部領域で流速シヤーや密度成層によって変形する。また、不安定成層時には、浮力による乱流エネルギーの生成が、安定成層時には消滅がそれぞれ活発に起こる。したがって、壁面領域と外部領域での浮力効果に相違が生じることは容易に推察できる。

壁面領域での密度効果には、モーニン・オブコフの相似則 Monin-Obukhov similarity law が成立する<sup>1)</sup>。壁面領域での速度、温度のスケールパラメータとしては、この領域で一定とみなせる摩擦速度  $u^* (= (-\overline{uw})^{1/2})$ 、 $u, w$ : 水平、鉛直方向流速変動)と、摩擦温度  $T^* (= -\overline{w\theta} / u^*)$ 、 $\theta$ : 温度変動)がある。成層状態では、さらに、浮力  $g \Delta \rho (= -g \beta \Delta \theta)$ 、 $\beta$ : 体積膨張率) が新たにパラメータとして加わり、次元解析からモーニン・オブコフ長さ  $L (= u^{*2} / \kappa g \beta \overline{w\theta})$ 、 $\kappa$ : Karman 定数) が新たな長さのパラメータになる。このとき、 $z/L$  が摩擦力と浮力による乱流エ

エネルギーの生成速度の比率で安定度のパラメータになる。各種の乱流統計量  $F$  の分布は、これら3つのスケリングパラメータでつくった同一次元の量  $F^*$  で無次元化すれば、

$$F/F^* = fn(z/L) \quad (1)$$

で与えられ、 $fn$  は  $z/L$  の普遍関数になる。これをモーン・オブコフの相似則という。

時間平均の風速  $U$  および気温  $\theta$  の無次元勾配  $\phi_M (= (\kappa z/u^*) (dU/dz))$ 、 $\phi_H (= (\kappa z/T^*) (d\theta/dz))$  も  $z/L$  の普遍関数になる。これらは、シヤー関数あるいは  $\phi$ -関数と呼ばれ、室内実験の結果は、Fig. 2.2 に示したように次式で相関できる。

$$\phi_M = 1 + 4.7 z/L, \quad \phi_H = 0.74 + 4.7 z/L, \quad \text{for } 0 < z/L < 1 \quad (2), (3)$$

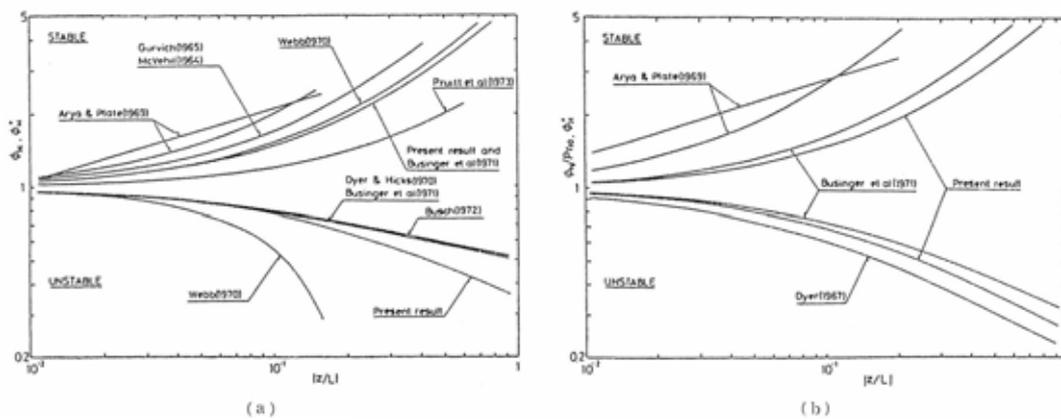


Fig.2.2. Shear functions. (a) Shear function for momentum  $\phi_M$ , (b) shear function for heat  $\phi_H$ .

$$\phi_M = (1 - 15 z/L)^{-1/4}, \quad \phi_H = 0.74 (1 - 9 z/L)^{-1/2}, \quad \text{for } 0 > z/L > -2 \quad (4), (5)$$

となる。Fig. 2.2 で、結果には大きなばらつきがあるが、後述するように外部領域と壁面領域の結果が混在していることによると考えられる。これらの欠点を踏まえて実施された Businger et al. の観測結果と本室内実験結果とは良好な一致を示す。

乱流は一見ランダム変動に見えるが、壁面領域では間歇的に発生する組織構造 (coherent structure) が乱流渦の生成・維持と運動量、熱、物質輸送を支配しており、この領域での密度成層効果は、成層が組織構造の発生頻度、従って乱流渦の発生頻度を变化させることに起因している。なお、中立、安定成層時、壁面近傍の乱流の組織構造 coherent structure (たとえば、Kline et al.) に及ぼす密度成層効果に関しては、浮力は ejection, sweep 運動の周期や相対的な寄与を变化させるように作用すると考えられる。その周期は実大気中では数 10 秒から数分になる。これら ejection, sweep 運動で乱流エネルギーの大半が生成されるが、熱や物質もこの運動の際に輸送される。このため、熱、物質の乱流拡散係数  $K_H$  は運動

量の乱流拡散係数  $K_M$  とほぼ等しくなる (Fig. 2.3)。

## 2.2 外部領域

成層乱流中では、乱流輸送は流速シヤーと浮力の両方の影響を受けるが、このうち流速シヤーは外部領域で急激に減少するため、浮力が支配的な役割を果たす。乱流構造は、密度成層による変形と浮力によって励起される運動によって著しく変化する。しかし、この変化は局所的にほぼ平衡状態になっており、自由乱流とほぼ類似の挙動を示すと考えられる。したがって、浮力効果はもはや  $z$  の関数ではなく、局所の密度勾配から決まるグラディエント・リチャードソン数  $Ri$  のみによって相関できると考えるのが合理的である。

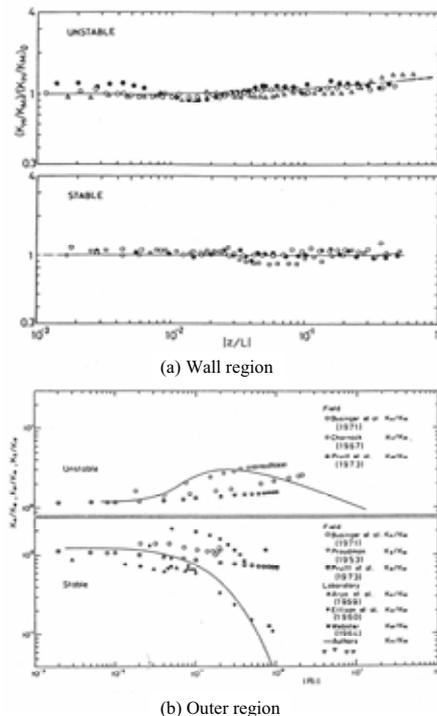


Fig.2.3. Ratio of eddy diffusivity for heat  $K_H$  to that for momentum  $K_M$ .

熱あるいは物質の鉛直拡散の成層度依存性(乱流拡散係数の成層時と中立時の比  $K_H/K_{H0}$  の  $Ri$  数依存性)を Fig. 2.4 に示した。これは大気境界層中での観測値であり、実線は室内実験から得られた半理論式である。

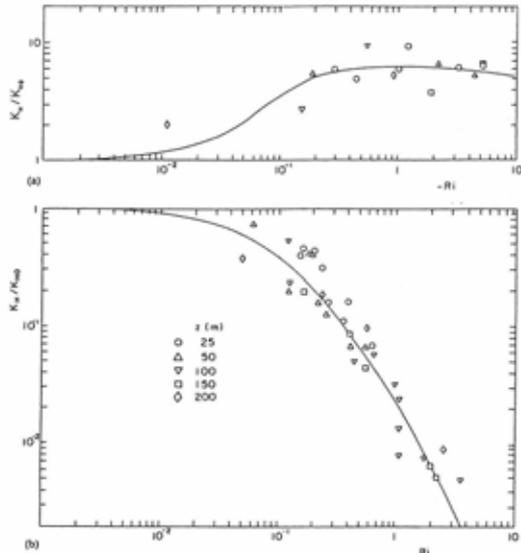


Fig.2.4. Stratification effect on turbulent diffusion coefficient for heat  $K_H$  relative to that for neutral condition  $K_{H0}$ .

乱流拡散は、成層状態によって4桁以上も変化する。中立成層時の  $K_{H0}$  は風速にはほぼ比例して変化するのに対して、密度成層によって圧倒的に大きく変化する。このことは、環境流体中の拡散過程では成層の度合いが最も支配的なパラメータであることを意味する。

この拡散におよぼす密度成層効果は、「乱流渦」自体の構造変化を通して起きる。本来(中立成層)、ランダム運動に近い乱流運動は、不安定成層時には上下方向の運動が特に活発化して乱流拡散を促進する。逆に、安定成層時には、乱流から波状運動へ遷移する結果、乱流拡散は抑制される。さらに、極端に強い安定成層状態では、逆勾配拡散が起こることさえある。例えば、温度勾配に逆らって、低温側から高温側へ熱が拡散する奇妙な現象が起こることがある。

このように大きな変化をもたらす密度成層効果を詳細に見ると、非常に複雑である。前述のように、密度成層は、壁面近傍(壁面領域という)と外部領域(自由乱流領域)とは本質的に異なる効果を持つ。また、密度成層は、運動量の拡散と熱、物質の拡散とでも異なった効果をもたらす、さらに、鉛直方向(浮力方向)と流れ方向、スパン方向拡散の場合にもそれぞれ異なる効果をもたらす。

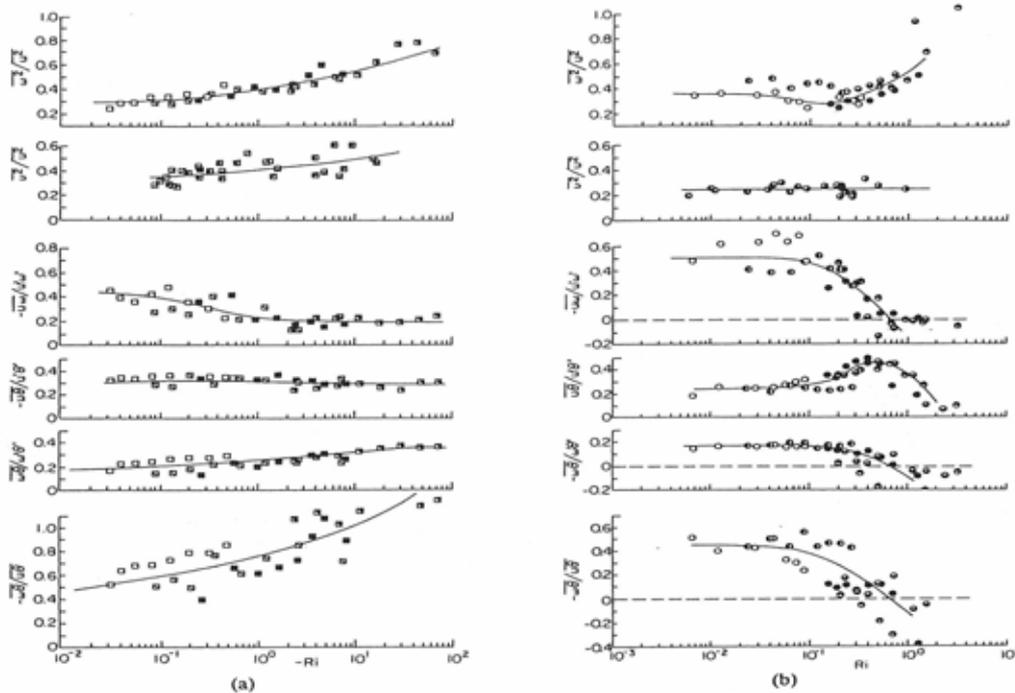


Fig.2.5. Change of turbulence quantities with gradient Richardson number  $Ri$ . (a) Unstable stratification, (b) stable stratification.

不安定成層状態の乱流構造にとって支配的なのは、熱い渦の上昇と冷たい渦の下降運動、つまり浮力によって励起される上昇・下降運動である。この運動は不安定度の増大にともなって、低波数域から高波数域にまで及ぶ。このことから、乱れ強度は増大し、運動量、物質（熱）の乱流拡散はともに促進される。特に、鉛直方向の乱流拡散が促進される結果、強不安定域では鉛直フラックスが流れ方向フラックスより大きくなる。物質（熱）と運動量の乱流拡散係数の比  $K_H/K_M$  は特異な挙動を示し、 $Ri=10$  で 1 になる (Fig. 2.3)。

運動量の拡散に対する成層効果と熱、物質拡散の成層効果の相違は、ベクトルである運動量の 3 方向成分の基礎方程式とスカラーである熱、物質の基礎方程式の相違によってもたらされる。運動方程式では圧力項を含み、さらに鉛直方向の運動方程式のみ浮力項を含む。この相違が中立成層時でもスカラーの拡散を約 1.2 倍大きくする。安定成層状態では、本来ランダム運動に近い乱流運動は、浮力によって組織化されて内部重力波に遷移していき、運動量、熱及び物質の輸送は抑制される。強い安定成層状態では、局所的にしかも間欠的に強いシャーが発生して、シャー・インスタビリティによって波状運動の破碎が起こる。この瞬間にだけ熱や物質の鉛直輸送が行われるため、運動量と物質（熱）の輸送機構には明瞭な違いが現れる (Fig. 2.3)。

安定成層がさらに強くなると、速度、濃度、温度の勾配に逆らって運動量、物質、熱の輸送が起こる。Fig. 2.5(b) で  $-\overline{uw}/u'w'$ ,  $-\overline{w\theta}/w'\theta'$  が負の値になる。これは逆勾配拡散 counter-gradient diffusion と呼ばれ、熱の場合、低温側から高温側に熱の流れる現象である。

この逆勾配拡散は、熱(物質)拡散の場合、Pr 数 (Sc 数) によっても異なり、空気のような低 Pr 数流体 ( $Pr < 1$ ) では高波数側から起こり、高 Pr 数流体では低波数側から起こる。

強安定成層での逆勾配拡散は、異なった温度の流体塊の温度成層流中での上下振動（浮力振動）として理解できる。すなわち、乱流渦の生成時に一様に分散された高温、低温の乱流渦は浮力により上下振動するが、これが内部重力波と同期することにより、局所的にまた周期的に発現する。

最近、逆勾配拡散を含め乱流フラックスは、浮力振動数  $N$  (Brunt-Väisälä 振動数) で時間振動し、逆勾配拡散もこの周期で現れることが示されている。これを Fig. 2.6 (回転効果を表すコリオリパラメータ  $f$  (回転角速度) がゼロのとき) に示した。乱流エネルギーやポテンシャルエネルギーも同様に時間振動する。このような極限現象は、典型的な非線形現

象に見えるが、かなりの部分は線形過程として説明できることが Hanaszaki & Hunt によって証明されている。すなわち、乱流フラックスや乱流エネルギーの時間振動のメカニズムは、ランダムな大きさと向きの波数ベクトルを持った内部重力波的な浮力振動がフラックスに積分効果として寄与する(単一の波数成分では輸送には寄与しない)ことを、「線形」理論である RDT (rapid Distortion Theory) により明らかにしている。

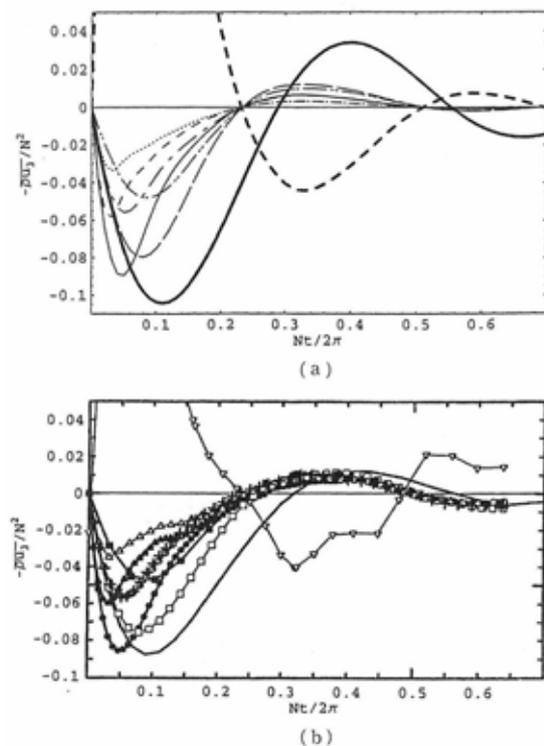


Fig.2.6. Time evolution of vertical density (heat) flux  $-\rho u_3 / N^2$  in rotating stratified turbulence after isotropic condition.

(a) Rapid distortion theory (Pr = 1):

- ,  $N=2, f=0$ ; ———,  $N=1, f=10$ ;
- ,  $N=1, f=20$ ; - - - -,  $N=2, f=10$ ;
- · - ·,  $N=2, f=20$ ; · · · ·,  $N=2, f=40$ ;
- · · · -,  $N=4, f=20$ ; - · - · -,  $PEo=4KEo, N=2, f=20$ .

(b) Direct numerical simulation (Iida and Nagano, 1999) (Pr=0.71):

- ,  $N=2, f=0$ ;
- ,  $N=1, f=10$ ; ▲,  $N=1, f=20$ ; □,  $N=2, f=10$ ; ○,  $N=2, f=20$ ;
- △,  $N=2, f=40$ ; ■,  $N=4, f=20$ ; ▽,  $PEo=4KEo, N=2, f=20$ .

さらに、同じスカラー量であっても、浮力を生むスカラー（アクティブスカラー）と大気汚染物質のようなパッシブスカラーの拡散に対する浮力効果も異なることが最近判明してきている。アクティブスカラーとパッシブスカラーのいずれも同一の拡散方

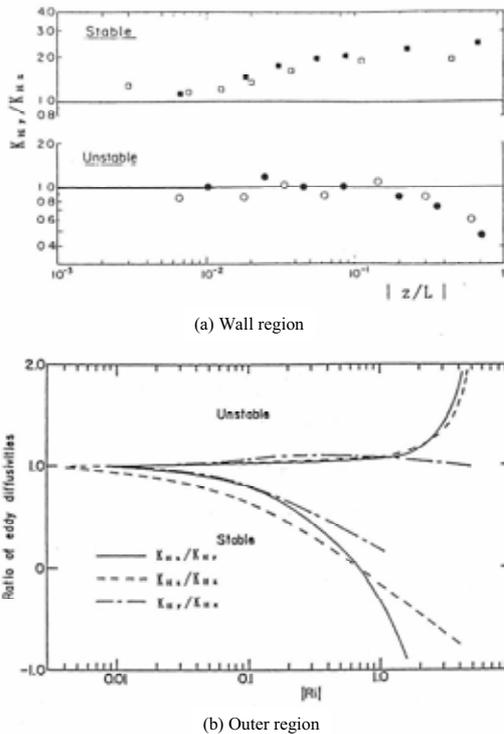


Fig.2.7. Stratification effects on turbulent diffusion coefficient for heat in vertical, spanwise and streamwise directions,  $K_{Hz}$ ,  $K_{Hs}$ ,  $K_{Hx}$ .

程式に従うが、この拡散方程式と鉛直方向の運動方程式から導出されるスカラー量のフラックス方程式に違いが生じること、即ち、フラックス方程式に含まれる浮力項に違いが生じることから、当然のこととして理解できる。非線形性の弱い安定成層流については、その違いが初期条件や境界条件に強く依存することが、RDTにより明らかにされつつある。

また、鉛直方向と水平方向との成層効果の相違は、浮力が鉛直方向にのみ働くことを考えると当然のことである。 $u, v, w$  を含んだ乱流統計量の安定度依存性がそれぞれ異なることから、乱流拡散についても水平方向の拡散に及ぼす浮力効果は、鉛直方向のそれと著しく異なることが予想される。

安定成層下では、流れ方向、スパン方向、鉛直方向の乱流拡散はいずれも減衰するが、鉛直方向の拡散の減衰が最も強く、ついでスパン方向、水平方向の順である。その結果、安定成層流中に排出された煙は鉛直方向に拡がらないで、水平方向に拡散して扇形になる。一方、不安定成層では、上下運動が誘起されるが、鉛直方向の運動エネルギーが圧力変動との相関を通して水平方向に分配されて、乱流拡散は3つの方向ともほぼ同一の増加率で促進される。しかし、不安定度が極端に大きくなると ( $Ri < -1$ )、鉛直方向の拡散だけが極端に大きくなる (Fig. 2.7)。

気液界面を通しての運動量や熱、物質の交換も密度成層流の輸送現象のひとつである。すなわち、気液界面をステップ状に密度変化する密度成層と考えると、気液界面近傍の乱流輸送は成層乱流の「極限現象」と見なして上記の議論が適用できる。気液界面近傍での乱流の変形、輸送機構の変化は、乱流運動が波状運動（重力波、表面張力波）に遷移するために起こり、乱流拡散係数は気液界面でゼロに漸近する。また、水面の冷却や水面を吹走する風によって海面の下部（液側）に発生する乱流の場合にも、乱流渦は同様の挙動を示し、大気海洋相互作用を通しての  $CO_2$  など温暖化物質の海洋への uptake などがその例である。

### 3.3 成層乱流のモデル

成層乱流の理論としては、混合距離理論と  $k-\epsilon$  モデル ( $k$ : 乱流エネルギー、 $\epsilon$ : 乱流エネルギー消散率) や  $k-l$  モデル ( $l$ : 乱流渦スケール) が一般に使われている。しかし、これらは乱流渦の等方性を前提としており、鉛直方向にのみ働く浮力特性（非等方性）を取り入れた理論の展開が必要である。

乱流輸送におよぼす浮力効果は、運動量と熱（物質）のそれぞれで異なり、鉛直方向、スパン方向、流れ方向とで異なり、さらに壁面領域と外部領域とでは異なる。また、極端に強い成層状態では逆勾配拡散さえ起こる。これらを統一的に説明するには、乱流応力、乱流熱流束に関する輸送方程式に頼らざるを得ない。

Reynolds 応力  $-\overline{u_i u_j}$  に対する方程式は

$$D \overline{u_i u_j} / Dt - \text{Diff}[\overline{u_i u_j}] =$$

$$P_{ij} + G_{ij} + \phi_{ij} - (2/3) \epsilon \delta_{ij} \quad (6)$$

と書ける。ここで、 $P_{ij}$ ,  $G_{ij}$  はそれぞれ風速シヤーによる生成項、浮力生成項、 $\phi_{ij}$  は圧力変形項であり、添字の 1, 2, 3 はそれぞれ  $x, y, z$  方向を意味する。Diff[ ] は乱流拡散項である。上式の各項のモデル化、いわゆるクロージャー問題の試みは、Gibson & Launder, Mellor & Yamada, Rodi, Uno & Ueda などにより行われている。大気境界層の場合、成層の効果のほかに、建物や植物群落などによる機械的な攪乱効果を考慮に入れる必要がある。例えば、Uno & Ueda<sup>17)</sup> は建物等の機械的擾乱による乱流エネルギー  $k$  の生成、エネルギー消散率  $\epsilon$  の増加を定式化して次式を得ている。

$$Dk / Dt - \text{Diff}[k] = P + G - \epsilon + 0.5 \eta C_d A(z) [U^3 + V^3], \quad (7)$$

$$D\epsilon / Dt - \text{Diff}[\epsilon] = C_{1\epsilon} \epsilon / k (P + G) - C_{2\epsilon} \epsilon^2 / k + (3/4) (\epsilon / k) \eta C_d A(z) [U^3 + V^3], \quad (8)$$

ここで、 $P = -\overline{u_i u_j} \partial U_i / \partial x_j$  (繰り返し添字は  $i, j$ )

=1, 2, 3 の和)、 $G = -g_i \beta \overline{u_i \vartheta}$ である。また、 $A(z)$ は建物表面積密度 ( $m^{-1}$ )、 $\eta$ は建物の占める体積割合、 $C_d (=0.2)$ は抗力係数である。 $\varepsilon$ 方程式中の係数  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C'_{2\varepsilon}$ はそれぞれ安定成層状態の接地気層での相似則および圧力変形項の理論的考察から以下のように決定される。

$$C_{1\varepsilon} = 1.92 - f + 2.77 Rf / (3.52 + Rf), \quad (9)$$

$$C'_{2\varepsilon} = 1.92 - 0.48 f, \quad (10)$$

ここで、フラックス・リチャードソン数  $Rf$ は  $Rf = -G/P$ 、また、 $f(z) = [\iota / (\kappa z)]^2$ で与えられる。 $\iota$ は dissipation length scale と呼ばれ、 $\iota = C_\iota k^2 / \varepsilon$ で表される。ここで、 $C_\iota = 0.12$ 。

浮力効果の鉛直、水平方向に対する差異、運動量、熱に対する差異、地面の存在の影響は、代数型応力モデル (algebraic stress model) を用いて次のように定式化できる。

Reynolds 応力方程式の左辺は  $k$ -方程式の左辺と同じ挙動をすると仮定すると、次式(11)が成り立つ。

$$D \overline{u_i u_j} / Dt - \text{Diff}[\overline{u_i u_j}] = \overline{u_i u_j} / k [D k / Dt - \text{Diff}[k]] \quad (11)$$

これに、式(6)と式(7) (右辺最終項は省略)を代入すると、代数型の応力方程式、次式(8)が得られる。

$$P_{ij} + G_{ij} + \phi_{ij} - (2/3) \varepsilon \delta_{ij} = \overline{u_i u_j} / k (P + G + \varepsilon) \quad (12)$$

さらに、圧力変形項について Gibson & Launder のモデル化を用いると、最終的に Reynolds 応力  $-\overline{uw}$  は以下のように表される。

$$-\overline{uw} = C_m (k^2 / \varepsilon) \partial U / \partial z, \quad (13)$$

ここで、

$$C_m = \omega \overline{w^2} / k, \\ \omega = [1 - C_2 + 1.5 C_2 C_2' f - E_{H1} (1 - C_3) (1 - C_{2t}) \alpha B] / [E_M - 1 + E_{M1} (1 - C_3) B] \\ \overline{w^2} / k = (2/3) [C_1 - 1 + P / \varepsilon (C_2 - 2 C_2 C_2' f) + G / \varepsilon (3 - 2 C_3) / [C_1 + 2 C_1' f + (P + G) / \varepsilon - 1]] \\ \alpha = E_H [1 + E_H \cdot 2RB(1 - C_{3t}) - 1], \\ B = (g\beta) (k^2 / \varepsilon^2) \partial \Theta / \partial z \\ E_H = \{C_{1t} + C_{1t}' f + [(P + G) / \varepsilon - 1] / 2\}^{-1}, \\ E_{H1} = \{C_{1t} + [(P + G) / \varepsilon - 1] / 2\}^{-1} \\ E_M = \{C_1 + 1.5 C_1' f + (P + G) / \varepsilon - 1\}^{-1}$$

なお、熱の乱流フラックス  $\overline{w\theta}$  についても同様な式が導出される。モデル定数は、 $C_1 = 1.8$ 、 $C_2 = 0.6$ 、 $C_3 = 0.5$ 、 $C_1' = 0.6$ 、 $C_2' = 0.3$ 、 $C_{1t} = 2.9$ 、 $C_{2t} = 0.45$ 、 $C_{3t} = 0.33$ 、 $C_{1t}' = 0.6$ 、 $R = 0.7$ で与えられる。

### 3.4 回転成層乱流

環境流体中では、密度成層とともに回転(地球の自転)の効果の本質的に重要である。近年、回転の効果についても直接数値シミュレーション DNS により活発に研究が行われてきている。成層乱流においては浮力振動(内部重力波)、回転乱流では慣性振動(慣性波)の重要性が指摘され、また、回転乱流(成層なし)では、非等方乱流が時間とともに等方化するのに対して、一方、成層乱流では等方化は起こらないことが示されている。これらの現象も、Rapid Distortion Theory RDT でかなりの部分が線形的なメカニズムとして説明できることが示されている。

成層と回転が共存する場合についても、DNS と RDT (Hanazaki, 2000)の両面から調べられている。成層と回転が共存する場合には、慣性重力波(回転の効果を受けた内部重力波)が現れ、乱流フラックスや乱流運動エネルギーに時間振動をもたらす。Fig.5 は、初期状態で等方乱流であった成層回転乱流中の鉛直乱流フラックスの時間発展を示す。乱流運動エネルギーや乱流フラックスの時間発展において、そのごく初期の段階と最終段階では成層が支配的な役割を果たす。初期段階では、鉛直密度フラックス  $\rho w / (\rho_2 w_2)^{1/2}$  ( $t \rightarrow 0$ )は成層のみに支配され、その値は初期の運動エネルギー  $KE_0$  とポテンシャルエネルギー  $PE_0$  によって決まる。また、最終段階では、それらは浮力振動数  $N$  の2倍の振動数  $2N$  で時間振動する。その中間時間帯で回転の影響が現れる。回転は、乱流運動エネルギーの3方向成分と、浮力に伴うポテンシャルエネルギーの間のエネルギー分配を時間的に変化させる。このとき、浮力パラメータである浮力振動数  $N$  と回転効果を表すコリオリパラメータ  $f$  (回転角速度)の比  $f/N$  が重要なパラメータになる。しかし、慣性重力波による振動が、スペクトルやフラックス振動に及ぼす影響、熱、物質輸送に及ぼす影響等未解明の部分が多く残されている。

以上のように、環境流体は成層・回転流体と特徴づけられる。この中での輸送現象には密度成層効果が支配的な役割を果たしている。このことは、運動量と熱、物質移動の強い相互作用を意味しており、従来の流体力学や輸送現象論の枠を越えた問題である。この解明こそが「環境流体力学」の基礎をなすものであると言えよう。研究推進にあたって、これまで野外観測と理論面での研究が多く行われてきたが、実験的な基礎研究をもっと推進していく必要がある。筆者も、大型拡散風洞(国立環境研究所)、密度成層風洞(九大・応力研)、大気拡散風洞(中国環境科学研究院)の設計製作に携わってきたが、今後これらを用いた研究が大きく進展することを期待したい。

#### 4 . 大気環境システムのダイナミクス (大気組成変動)

大気汚染に関連した素過程と汚染物質が長時間、長距離輸送されるとき発生する種々の大気汚染を Fig. 4.1 に示した。一次汚染物質は光化学反応などの素過程を経て二酸化窒素や光化学オキシダントなどのガス状二次物質汚染、硫酸塩、硝酸塩エアロゾルなどの二次粒子汚染、酸性雨など様々な大気汚染を引き起こす。これらの大気組成変化は一連の大気反応からなる一体のシステム、「大気環境システム」と考えることができる。

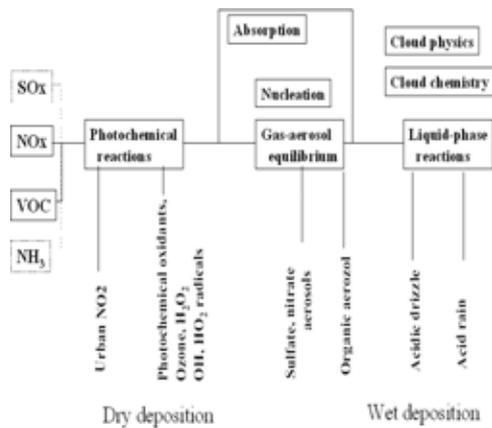


Fig.4.1. Physical and chemical processes and various air pollutants during long range transport of air pollutants.

関東甲信地域では、夏季晴天日には局地風結合型の大規模風が形成されて、汚染物質はほぼ同じ経路をとって輸送される。Figs. 4, 2, 4. 3 には、この輸送経路に沿って実施した大規模観測の結果と、大気組成変動予測モデル結果との比較を示した。NO<sub>x</sub> はおもに大規模発生源で排出され、その高濃度域は汚染気塊の北上とともに移動し、正午頃東京で最高濃度に達する。排出される NO<sub>x</sub> の主成分は NO (90%) であるが、光化学反応の進行とともに NO → NO<sub>2</sub> 転換がおこなわれ、NO<sub>2</sub> は大規模発生源地域の下流部でピーク濃度に達し、都市型の NO<sub>2</sub> 汚染を引き起こす。その後、北上する汚染気塊の中では NO<sub>2</sub> は炭化水素類との光化学反応により、PAN (Peroxyacyl nitrate), ガス状硝酸、硝酸塩エアロゾルに転換されるため、NO<sub>x</sub> 濃度は急激に減少する。日没後、大規模発生源地域風下側で再び NO<sub>x</sub> 濃度は増加して、夜半にピーク濃度に達する。これは接地逆転層の形成と自動車交通量の日変化に対応するものである。

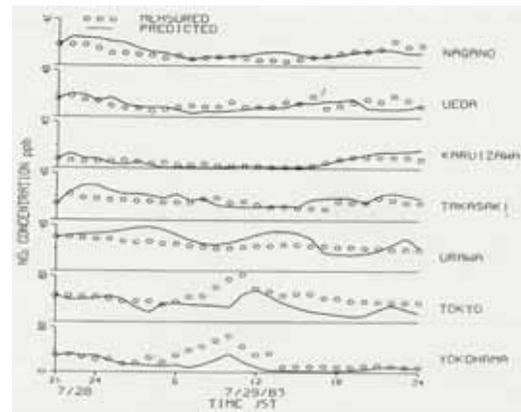


Fig. 4.2. Time variation of NO<sub>2</sub> concentration at observation sites along the long-range transport route.

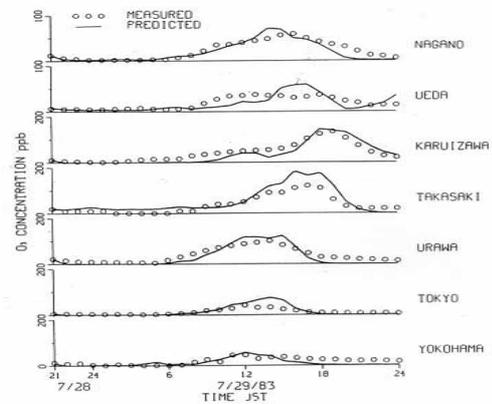


Fig. 4.3. Time variation of O<sub>3</sub> concentration at observation sites along the long-range transport route.

このとき残存するオゾンや過酸化ラジカルとの反応によって NO<sub>2</sub> の反応生成も進んで、NO<sub>2</sub> 濃度も再びピークに達する。NO<sub>2</sub> の反応生成には時間遅れがあるため、夜間の濃度ピークは NO<sub>x</sub> のピーク時間の約 2 時間前に現われ、朝のピークは 2 時間程度遅れる。

オゾンは、日出後、光化学反応の進行とともに生成される (Fig. 4. 3)。また、混合層の発達によって、前日から残存している上空のオゾンが取り込まれるため、オゾン濃度は 8 ~ 9 時頃から急上昇し、大都市域では正午頃ピークに達する。この汚染気塊が発生源の少ない関東平野の奥部に輸送される際には反応がさらに進んで、濃度は浦和、高崎で 100ppb を越え、碓氷峠 (軽井沢) を越える頃には 150 ppb に達する。PAN もオゾンとほぼ同じ速度で生成され、その濃度はオゾン濃度の 1/10 程度に達する (Fig. 4. 4)。

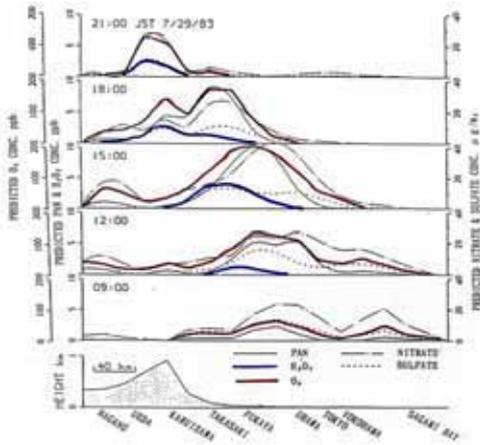


Fig.4.4 Time variation of predicted secondary pollutant distributions along the long-range transport route.

過酸化水素はオゾン等に比べてはるかに酸化性が強く、その挙動は植物影響等の環境影響との関連で注目される。過酸化水素はオゾン、PANより生成速度が遅いが、汚染気塊が深谷、高崎間に達する15時頃には濃度が5 ppb程度にまで上昇する。このような酸化性汚染物質の生成や、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、炭化水素から硫酸、硝酸、有機酸への酸化過程を担う物質は、OHやHO<sub>2</sub>ラジカルである。これらのラジカルは光化学反応過程で生成され、また反応性が非常に高いため、日照時間帯にのみ存在し、16時頃最高値に達する。

汚染気塊中の硝酸の生成もオゾンの生成とほぼ平行して進行し、浦和付近でほぼ完了する。これに伴ってNO<sub>x</sub>濃度は急激に減少し、逆にガス状硝酸が

顕著に増加する。さらに平野部から関東山地、碓氷峠に達すると、粒子化が進行して硝酸塩エアロゾルが増加して、所謂、光化学スモッグを呈する。これは、平野に比べて気温が約10℃低く、相対湿度も高くなるためにガス-エアロゾル平衡がエアロゾル側に片寄ることによる。一方、SO<sub>2</sub>は、大規模発生源地域である横浜、東京で高濃度を示す。SO<sub>2</sub>はNO<sub>x</sub>酸化速度の1/3程度での比較的遅いスピードで酸化されて、粒子状の硫酸塩エアロゾル、硫酸ミストが生成されていく。

二次汚染物質の沈着量の最大になる位置は、いずれも大規模発生源地域から100km以上下流で発生する。汚染物質の生成速度の順に、NO<sub>2</sub>、硝酸塩、PAN、オゾン、過酸化水素、硫酸塩の順に下流にずれる (Fig. 4.4)。長距離輸送の経路が地形的にほぼ固定されていることもあって、関東平野の北東部では二次汚染物質による高い負荷を受けることになる。

東京湾岸から長野に亘る長距離輸送の全経路について、24時間に亘っての、窒素系、硫黄系汚染物質の収支を Fig. 4.5 に示した。NO、NO<sub>2</sub>は9対1の割合で放出される。このうち、NOはごく一部沈着するが、ほとんどはNO<sub>2</sub>に転換される。このNO<sub>2</sub>も、その15%はそのまま沈着し、一部はPANの形で、他のほとんどはガス状硝酸の形で地面に沈着する。窒素系汚染物質で特徴的なことは、ガス状硝酸が他のガス状汚染物質に比べて沈着速度が数倍-10倍大きいことである。このため、窒素系汚染物質の重要な除去機構は、ガス状硝酸の形での沈着である。逆に、粒子の沈着速度は小さいために粒子の形で沈着する量はごくわずかである。しかし、硝酸が一旦

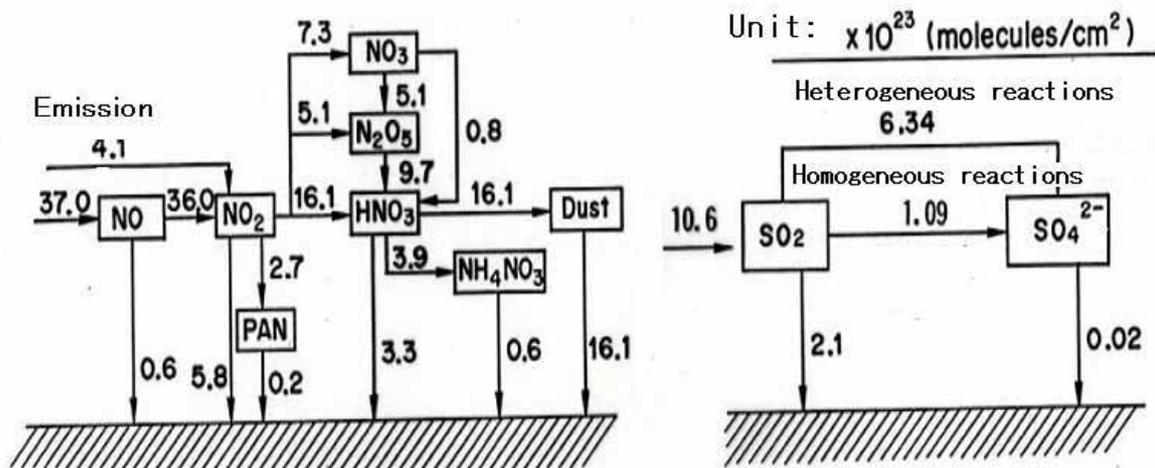


Fig. 4.5. Budget of nitrous and sulfur compounds in a day.

粒子化して硝酸塩エアロゾルになったとしても、ガス - エアロゾル平衡を通してガス状硝酸に戻り、これが沈着除去される。このようにして、窒素系汚染物質は排出量の過半が一日で地面に沈着し、大気中に滞留する量は少ない。

一方、排出された  $\text{SO}_2$  は、その 2 割が地面に沈着し、残りのほとんどは酸化されて粒子化する。硫酸塩粒子の生成には異相系の反応が重要な役割を果たす。この場合も粒子の沈着速度は小さいため、硫酸塩の形で地面に沈着するのは  $\text{SO}_2$  の沈着量のわずか 1% 程度で、残りの硫酸塩は大気中に残留することになる。これが硝酸塩エアロゾルとの著しい相違である。即ち、窒素系汚染物質は一日で過半が沈着除去されてしまうのに対して、硫黄系汚染物質は長寿命で、二次粒子の形で長時間大気中に滞留し、これの除去は雨、雲、霧による湿性沈着に待たなければならない。

降雨時には汚染物質の変質と沈着の状況は大きく変化する。日中降雨および夕刻降雨について、湿性沈着と乾性沈着の比較、気相、液相反応の寄与の比較を Table 1 に示す。まず、気相反応と液相反応の寄与についてみると、硝酸はおもに気相反応で生成される。液相での生成量が少ないのは、 $\text{NO}_x$  の液相への溶解速度が小さいことによる。逆に、 $\text{SO}_x$  の溶解速度は大きく、硫酸イオンの液相反応と気相反応による生成量の比率は、日中降雨で 1.4 倍、夕刻降雨で 5.3 倍になっており、液相反応と気相反応の寄与はほぼ同オーダーと考えることができる。

全沈着量についてみると、硝酸イオンの沈着量は、日中降雨では硫酸イオンの 2 倍、夕刻降雨で 1.5 倍である。全沈着量に占める乾性沈着と湿性沈着の寄与についてみると、硝酸イオンについては乾性沈着と湿性沈着はほぼ拮抗する。これは気相反応でガス状硝酸が大量に生成され、その乾性沈着速度が他のガス状汚染物質に比べて 1 桁大きいことに起因する。逆に、硫酸イオンの場合、気相反応でサブミクロンのエアロゾルが生成され、その乾性沈着速度が極端に小さいために、乾性沈着量は湿性沈着量より 3 桁小さい。その結果、硫酸イオンの場合、一旦生成されると、大気中に長時間滞留して大気中から除去は湿性沈着によってのみ行われていることを示唆している。このため、関東甲信地域での  $\text{SO}_x$  の排出量が  $\text{NO}_x$  排出量の 1/4 程度であるにもかかわらず、粒子状態で滞留する硫酸塩は全硝酸（粒子状硝酸塩 + ガス状硝酸）濃度とほぼ同じレベルにあり、湿性沈着量も硝酸イオンの 1/2 程度の止まる。

これらのことを反映して、ガス状の汚染物質のうち、溶解性の極端に高い硝酸と過酸化水素は降雨に

Table 1. Summary of the wet deposition and liquid phase production/destruction processes integrated over the entire storm event. Parentheses refer to powers of 10, i.e.  $5.7(23)$  is read as  $5.7 \times 10^{23}$ , expressed in molecules.

	Dry deposition	Wet deposition	Liquid reaction	Gas reaction	Total mass Before precip.	Total mass After precip.
Daytime precip.						
$\text{SO}_2$	1.3 (22)	3.2 (22)	-8.6 (22)	-6.3 (22)	3.6 (23)	2.2 (23)
$\text{SO}_4^{2-}$	2.6 (20)	1.8 (23)	8.6 (22)	6.3 (22)	4.2 (23)	3.4 (23)
$\text{NO}_3^-$	9.7 (22)	3.6 (22)	2.6 (18)	2.9 (23)	7.9 (23)	4.9 (23)
Evening precip.						
$\text{SO}_2$	1.3 (22)	3.8 (22)	-1.6 (23)	-3.0 (22)	3.1 (23)	1.7 (23)
$\text{SO}_4^{2-}$	1.3 (22)	3.7 (22)	1.6 (22)	3.0 (22)	4.3 (23)	3.2 (23)
$\text{NO}_3^-$	3.5 (22)	5.7 (23)	4.3 (19)	3.5 (23)	6.0 (23)	4.0 (23)

よって濃度が著しく減少し、降雨期間中にほとんど全量が除去される。比較的溶解度の小さいオゾンも濃度は減少するが、これは日射の減少による光化学反応生成の減少と、水滴への溶け込みのためである。

以上のように、大気環境を反応、粒子化、乾性沈着、湿性沈着などの素過程を含む一連の大気組成変化システムとしてみると、気相、液相、異相反応それぞれの寄与割合、1日を通しての物質収支、降雨のある場合の乾性沈着と湿性沈着の寄与割合など、一連の大気汚染現象に統一的な解釈を与えることができる。

さらに、汚染物質の排出削減効果の見積も行うことができる。例えば、二次大気汚染や酸性雨の場合、排出削減によりその濃度が比例的には減少しないことが多いが、特に、 $\text{NO}_x$  単独の排出削減の場合、 $\text{NO}_2$  濃度はそれ程減少せず、オゾン濃度は都市域でむしろ増加するなど、逆効果を生じることさえあること、また、 $\text{NO}_2$  汚染や二次粒子汚染は初冬季に激化するが、この時期にはオゾン濃度は高くないものの大気中での光化学反応が中心的な役割を担うことなどが、システム論的なアプローチによってはじめて定量的に見積ることができる。

これらの研究を踏まえて、国際共同研究プロジェクト RAINS-Asia (Regional Air Pollution Information and Simulation in Asia)、LTP (Long-range Transboundary Transport of Air Pollutants in North East Asia) MICS-Asia (Model Intercomparison Study in Asia) に参加して、東アジアを対象とした領域規模の環境システムに関する研究を実施してきた。RAINS-Asia プロジェクトは世界銀行とアジア開発銀行の支援を受けて 1990 - 98 年に 2 度に

分けて実施された。このプロジェクトは、エネルギー需要をベースに、その将来予測、硫酸化物  $\text{SO}_x$  を対象とした排出量予測、輸送・反応・沈着量予測、土壌への限界負荷量予測のモジュールとそれらの統合モデルを構築するもので、これを用いて東アジア全域での排出量、沈着量、限界負荷量分布を提示した。また、政策決定者向けに、大気汚染物質のソース・リセプター関係、排出抑制コスト見積りのモジュールを提供した。東アジアの排出量分布を Fig. 4.6 に示した。この地域での特徴は、中国の排出量が圧倒的で日本の20倍、韓国の13倍あること、東南アジアの排出量はまだ小さいこと、インドシナ半島付近では海上船舶からの排出量が多いことである。この排出量を基に計算した硫酸化物の沈着量の分布を Fig. 4.7 に示した。ここで、沈着は湿性沈着と乾性沈着を合計したものである。 $\text{SO}_2$  から硫酸塩への反応速度定数や、降雨、雪による除去速度、乾性沈着速度などのモデルパラメーターは、季節、緯度による変化が考慮されている。沈着量の最も大きな地域は重慶を中心として中国の中部から南部に広がっている。これが、中国東北部を経て朝鮮半島から西日本に伸びている。また、インドや東南アジアでは、大都市、大工業地帯に対応して沈着量の大きな地域が点在している。

この手法を踏まえて、1975年から2000年までの26年間の推移を調べた結果は以下のとおりである。まず、排出量は、アジア全体で17.1 t g/yrであったものが、1995年には39.3 t g/yr、年率で4.3% yr増加した。このうち、中国の占める割合が圧倒的で、10.4 t g/yrから25.7 t g/yrに増大した。この間、日本と台湾だけが減少傾向にあったが、1990年代前半にはタイや韓国も横ばいかやや減少傾向に転じた。さらに、1995年以降中国の排出量は減少に転じ、その結果アジア全体の排出量は横ばい状態になった。排出量の減少は、硫黄分の多い石炭から低硫黄炭への転換、効率の悪いプラントの廃棄、省エネルギーなどの排出削減努力によるが、同時に、大気汚染に対する危機意識と1997-98年に起こった経済危機もその原因である。なお、中国の排出量は2001年以降再び増加傾向に転じている。これに対して、インドや東南アジアでは増加の一途で（Fig. 4.8 下段）特にインドの排出量は2000年には7.5 t g/yrで年率5% yrの増加で、その傾向はますます強くなっている。

硫酸化物の沈着量の分布をみると、1975年には5000mg/ m<sup>2</sup> yr以上の高い沈着量の地域が重慶付近に限られていたのが、1985年には華中や韓国にも見られ、1500mg/ m<sup>2</sup> yr以上の地域は中国の南部から中部

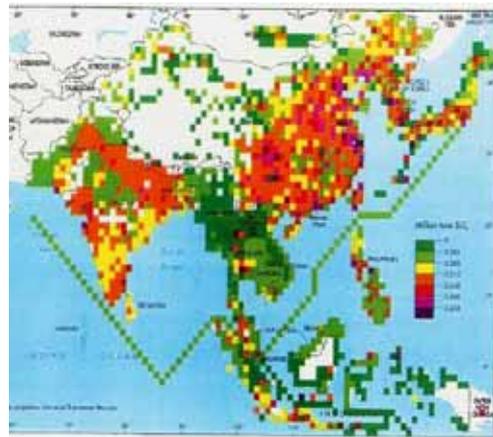


Fig. 4.6. Annual sulfur emissions in Asia, 1990

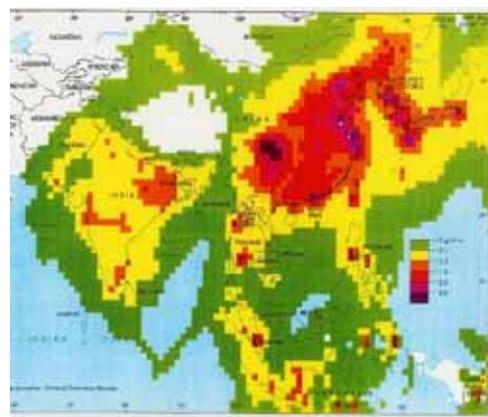


Fig. 4.7. Sulfur deposition in Asia, 1990.

全体に拡大した。1995年には東南アジアにも点在するようになった。この26年間を通してみると（Fig. 4.9）インド、東南アジアの増加は著しく、300%以上のところが過半を占める。日本だけは減少傾向にある。日本では1960年代後半に脱硫装置の設定が義務付けられ、排出量は急減した。1975年以降の26年間の期間中も25%減少している。

国別にみた沈着量の年々変化と発生源の寄与率を Fig. 4.8 に示した。中国からの寄与は、1975年の20%程度から中国の排出量増加と日本の排出量の減少を反映して1995年にはほぼ40%にまで達している。韓国からの寄与も20%弱ある。なお桜島などの火山の寄与も20%弱ある。中国やインドの場合は、自国の寄与が圧倒的で、沈着量は自国の排出量を直接反映したものになっている。また、マレーシアの場合には、マラッカ海峡の船舶の寄与は約10%ある。

年間の沈着量には排出量の他に気象条件の年々変動も影響する。排出量を一定として計算した結果によると、降水量の年々変動は東アジア全域の沈着

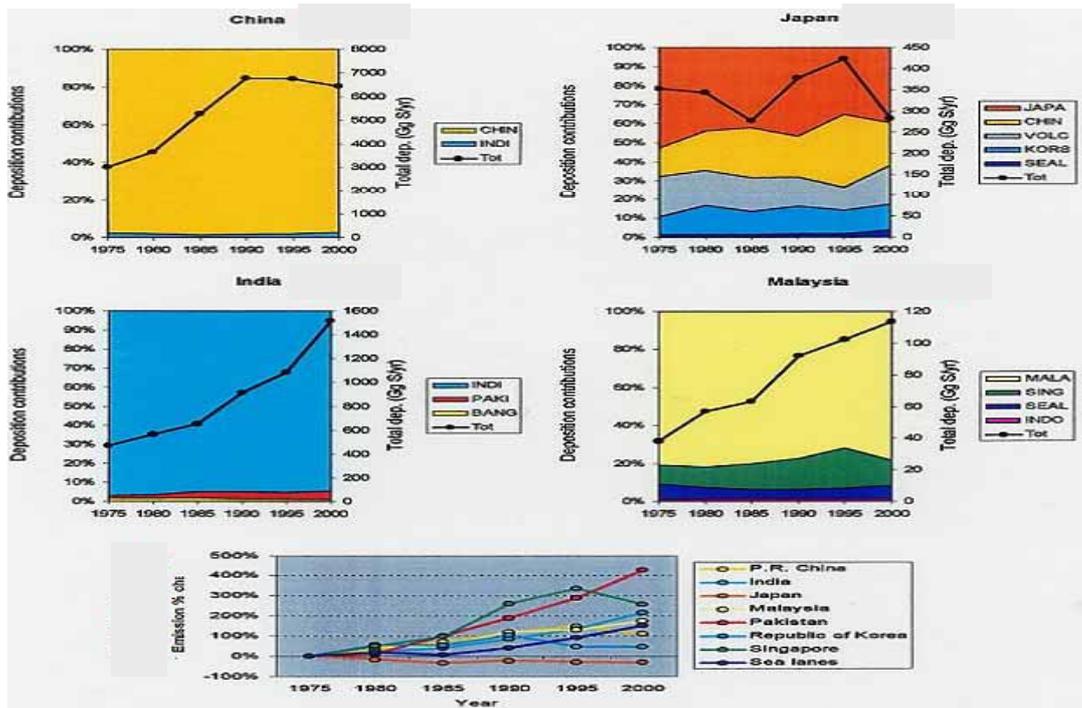


Fig.4.8. Long term trend of sulfur emission and deposition and contribution of different emission sources.

量分布を変化させる。エルニーニョ年であった1997年には少雨であったインドネシアでの沈着量は減少し、多雨であったインドで大きな沈着量をもたらした。我が国のように他国からの越境長距離輸送の影響が強い場合には、沈着量は気候変化、特にENSO等に伴う降水量の年々変動に大きく左右され、それが大きな沈着量変動として現れる。しかし、中国やインドのように、沈着量への寄与が圧倒的に自国の排出である場合には、気象の年々変動はせいぜい±10%程度の沈着量変動にとどまる。

硫酸化物を対象とした RAINS-Asia プロジェクトに続き、現在、MCS-Asia プロジェクトを実施している。ここでは、東アジアを対象に、窒素酸化物、オゾン、粒子状物質と酸性雨の研究を行ってきた。オゾンの研究では、人為起源汚染物質の光化学反応と東アジア特有の活発な成層圏起源オゾンの降下現象<sup>66)</sup>を調べ、そのオゾン収支から東アジアの濃度が世界最高濃度になっている原因を明らかにした。

浮遊粒子状物質の研究では、主成分である黄砂の飛散プロセスのモデリングを行って、東アジアでの濃度も世界最大であることを示すと共に、黄砂による中和作用が酸性雨を緩和させていることを示した。特に、中国については、酸性雨問題の深刻な中南部と北部地域との相違は黄砂の中和作用の差が原因であること、この10年間で酸性雨地域が揚子江南部から北上して黄河地域にまで急拡大していることを定量的に示した。

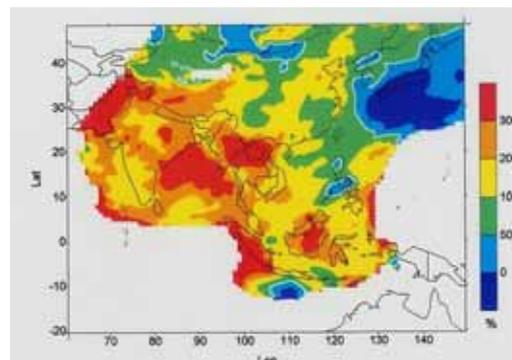


Fig. 4.9. Relative change of annual total sulfur deposition in 1975-2000 period.

## 5. 水循環システムと砂漠緑化による環境創生

2002年度から、文科省「人・自然・地球共生プロジェクト」の一環として広域水循環の予測モデルの高度化と水循環対策技術の高度化を目指した研究プロジェクトを開始した。産官学および理、工、農学が連携した組織を組んで、次の方針のもとに研究を実施している。水資源確保、砂漠環境改善、水災害軽減の具体化に寄与する知見と手法獲得。産官学及び世界各国研究機関の連携による世界最高レベルの研究コンソーシアムでの研究推進。衛星、現地観測データと地球シミュレータを活用した高精度シミュレーション結果の融合による、全球的な気候変動と地域砂漠気候の高精度相関把握。理学の広域気候変動・水循環予測技術と工学、農学の砂漠化防止技術の総合的な結合による水資源確保、砂漠環境改善手法の高度化。

### 5.1 地球規模の水循環と乾燥地域の分布

地球はその表面積の74%が水に覆われた「水惑星」である。しかし、世界人口の半数は飲料水不足など何らかの形で水問題を抱えており、水問題は全地球的な緊急の課題である。また、将来地球温暖化等により水循環の変動が予想され、さらに深刻な状況に陥る可能性を秘めている。

乾燥地は地球上の陸地面積の40%を占めており、世界人口の1/5の生活基盤をなしている。そのうちの70%、陸地面積の約1/4が乾燥地域、半乾燥地域とよばれ、砂漠あるいは砂漠化の影響を受けている地域である。

全球的に見て、東西平均した年降水量は、赤道域での最大値約2,000mmから、緯度が増すと急減して、亜熱帯で極小値をとり、中緯度で増大して緯度45度付近で極大に達し、極域でゼロに近い値にまで減少する。亜熱帯での降水量の低下は大気の南北循環(ハドレー循環)と関係している。熱帯大気は熱せられて上昇し亜熱帯で降下して熱帯に戻るが、熱帯で圏界面にまで上昇する間に冷却されてほとんどの水分を消失し、乾燥した空気が亜熱帯に降下する。これに対して、蒸発量の分布は気温分布とほぼ対応して緯度方向に減少する。その結果、亜熱帯では蒸発量が降水量をはるかに上回ることであり、乾燥傾向になる。

乾燥地域の形成は大陸と海洋の分布の影響を受けて東西方向にも変化する。その変化は大気大循環と海洋循環に関連しており、大気大循環として貿易風(東風)、温帯偏西風(西風)を考え、海洋循環として海洋東側(大陸の西岸)での極向きの暖流、西側(大陸東岸)での寒流を念頭におくと理解できる。

世界の乾燥地の分布を Fig. 5.1 に示した。亜熱帯では本来乾燥傾向にあるが、太平洋高気圧や大西洋高気圧などいくつかの高気圧ができて緯度線上に不均一に並び、北半球の場合、大陸東岸地域(中国華南地域や北米フロリダ地域など)では高気圧中心から右回りに吹き出す風が北上する暖かい海流上を吹くことになり、加湿されて大量の降水をもたらすことになる。したがって、亜熱帯での乾燥地は、乾燥地は、大陸の西側から中央部にかけて分布し、広大な地域が年降水量100mm以下になっている。特に、北アフリカからアラビア半島、中央アジアにかけて広大な砂漠を形成している。この他に、北米の西海岸、南アフリカ、南米大陸の西側地域およびオーストラリアの西部から中央部に見られる。

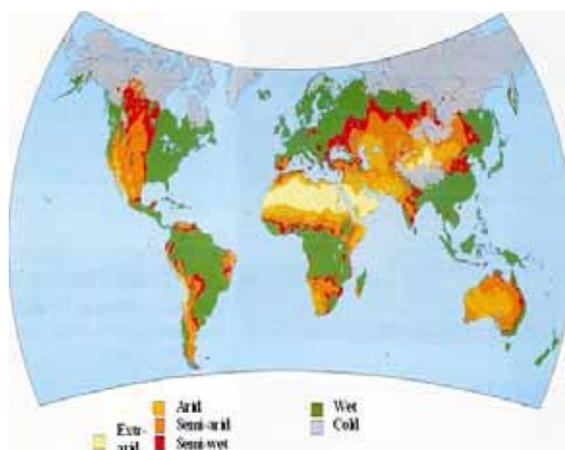


Fig. 5.1. Global distribution of arid area (UNEP, 1997).

この生命の源である「水」を質、量とも確保する取り組みの一環として、乾燥地域を対象とした緑化や造水技術の開発に挑戦している。

### 5.2 水循環予測モデルシステム

乾燥、半乾燥地域では、降水量が少なく、降水量が年によって4-5倍変動するのが普通である。この意味で予測モデルの性能が「厳しく」要求される。水循環予測モデル・システムとして、まず、海域については大気モデルと海洋モデル、波浪モデル、モデル間インターフェースをなす大気海洋相互作用(海面過程)の結合、陸域については大気モデルと陸面水文モデル、モデル間インターフェースをなす大気・植生・土壌間相互作用(陸面過程)モデルの結合を進め、これら海域、陸域のモデルと統合した「水循環モデル・システム」を構築してきた。また、水循環で重要な物理過程である、海面過程、陸面過程、雲物理・降水過程、雲放射過程、拡散過程を理論的、実験的に再検討し、定式化を精緻化を行ってきた。

以上、モデル統合と物理過程のモデリングの精緻化により、水循環予測の高度化をねらっている。

陸面過程のモデルは、は大気、植生及び土壌の多層モデルと植生層内の日射及び長波放射伝達の計算過程により構成されている。大気については、風速、温度、比湿、霧水、乱流統計量及び  $\text{CO}_2$  濃度を乱流クローザーモデルを用いて予報的に計算し、植生層については葉面上での日射、長波放射を含む熱収支、蒸散、落下液のフラックスを含む水収支、日射による  $\text{CO}_2$  同化作用、呼吸作用を計算する。土壌については、乾燥土壌特有の水分の吸・脱着過程がはじめて導入されており、世界的にも唯一の精緻なモジュールである。モデル結果の一例を Fig. 5.2 と Fig. 5.3 に示した。

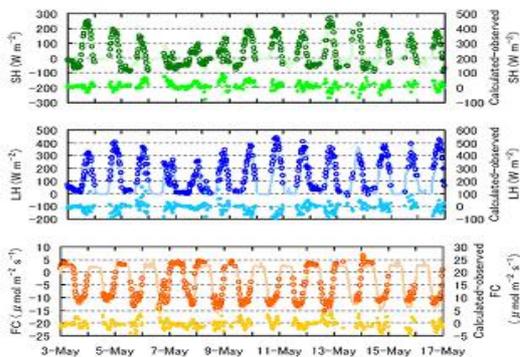


Fig. 5.2. Variation of sensible heat flux SH, latent heat flux LH and  $\text{CO}_2$  flux FC over winter wheat field. - : Model prediction, : observation.

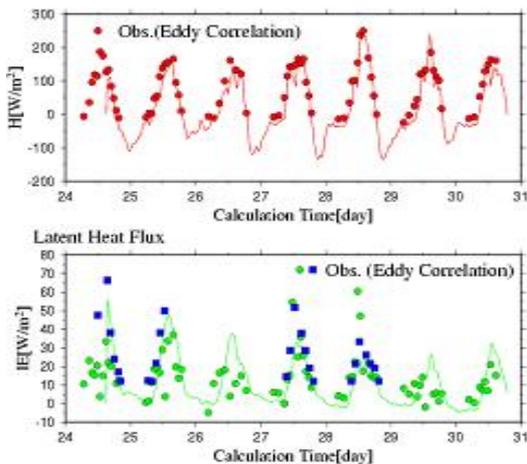


Fig. 5.3. Variation of sensible heat flux and latent heat flux over extremely dry sand desert surface. - : Model prediction, : observation.

### 5.3 砂漠緑化

このプロジェクトでは、西アジア、中央アジア地域を対象とした水資源確保、砂漠緑化、オアシス創生を目指して研究を進めている。この地域は降水量は少ないものの、気温が高く、比湿も高い。砂漠緑化の第一のポイントは、高温多湿の気流が流入して霧、雲の多発する地域では、一旦樹木が成長すると、樹木が霧水を捕捉し(「樹雨」(きさめ)という)その捕捉水量が欧米の降水量にも匹敵することが見込まれることである (Fig. 4.4)。もう一つのポイントは、緑化面積をある程度広くとれば、これが局地風を生み、「森が雲を呼ぶ」といった「正のフィードバック」効果が期待できることである。即ち、高温多湿気流に緑化地域から蒸発散した水蒸気が付加され、これがトリガーになって緑化地域内での降水を促し、正味の降水量 (= 降水量 + 樹雨量 - 蒸発散量) の増加が見込めることである。この意味で、砂漠緑化には気象学的な視点からの適地の選定が重要である。

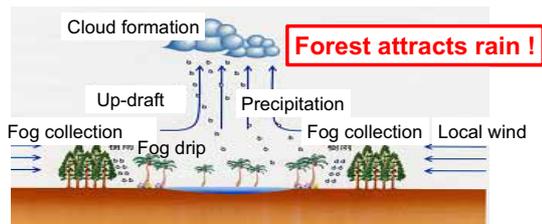


Fig. 5.4. Schematic diagram of precipitation enhancement by desert greening.

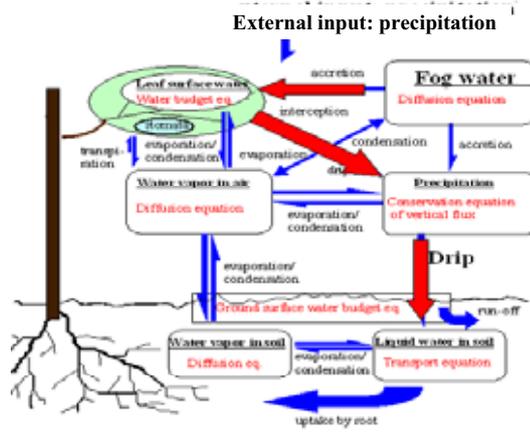


Fig. 5.5 Water exchange processes.

前述の陸面過程モジュールは植生層および土壌層を多層に分割して、その内部での水分交換過程 (Fig. 5.5) を熱の交換過程と連立させて解くもので、草木による霧水、低層雲水の捕集量 (樹雨フラックスは

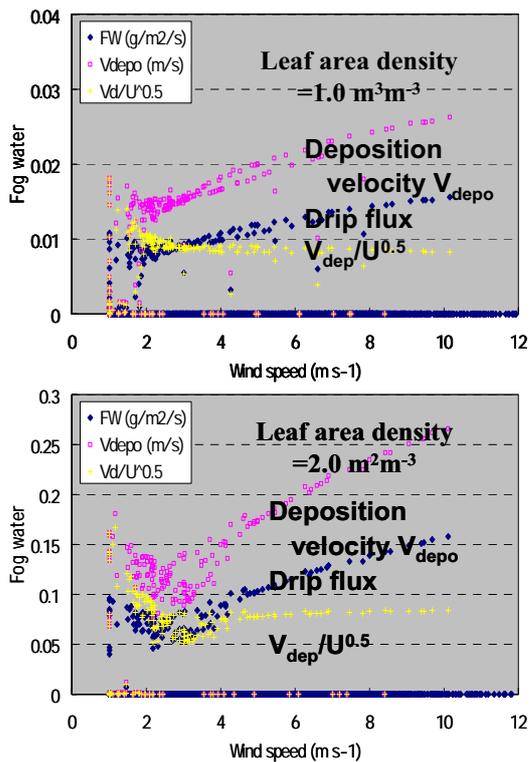


Fig.5.6 Deposition velocity  $V_{depo}$ ,  $V_{depo}/U$  and fog drip flux  $FD$  for low grass and coniferous tree.

このモジュールを用いて計算できる。樹雨フラックス  $FD$  は霧水量  $CLW$  と霧水の沈着速度  $V_{DEPO}$  の積として次式のように表すことができる。

$$FD = V_{DEPO} \times CLW$$

低草および針葉樹に対する計算結果の一例を Fig. 5.5 に示した。沈着速度  $V_{DEPO}$  は風速  $U$  とともに増加するが、 $V_{DEPO}/U^{0.5}$  はほぼ一定になる。低草（草高 0.3m）の場合、風速  $U=5\text{m/sec}$  で  $V_{DEPO}=0.020\text{m/sec}$  程度であるが、針葉樹（樹高 5.0m、幹高 1.0m）は  $V_{DEPO}=0.20\text{m/sec}$  で低草に比べて効率よく（10倍）霧水を捕捉する。

本研究では、水循環予測モデルシステムを用いて、紅海に面した海洋性砂漠と海岸線に平行に 1500km にわたってのびる山脈の斜面地域を砂漠緑化の適地に選定した。サウジ第二の都市ジェッダ、イスラムの聖地メッカ、高原都市タイフに亘る東西 150km、南北幅 100km の領域を緑化した場合の降水変化の一例を Table 1 に示した。

現況の被植率は、衛星データ NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) の解析から高原部で 3%以下、砂漠部でゼロである。これに低草と常緑針葉樹を植えた場合の（2種類の砂漠緑化についての）

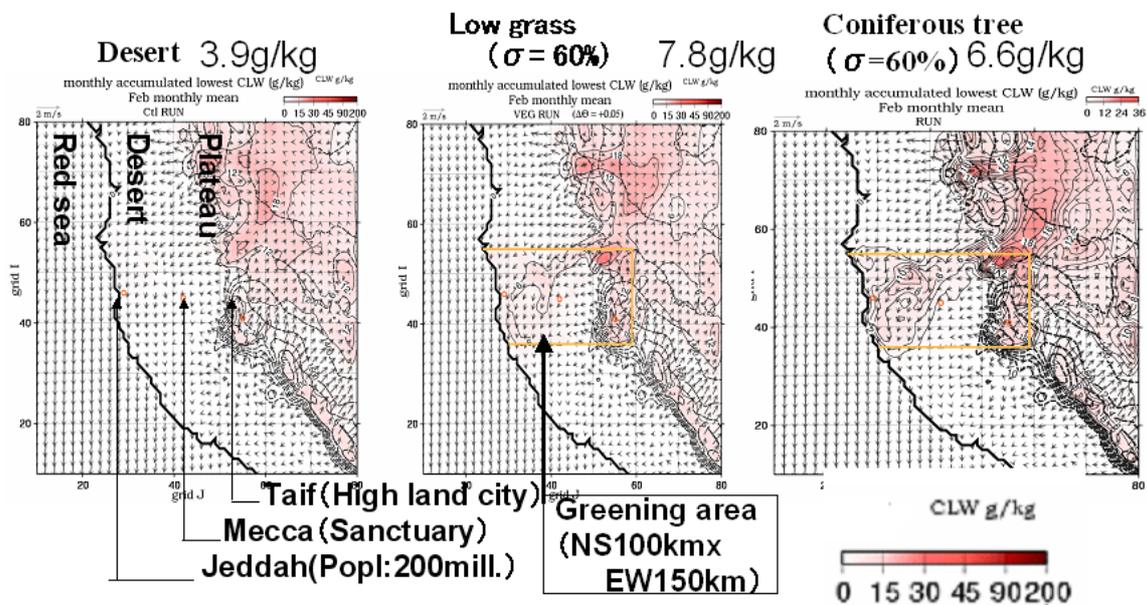


Fig. 5.7. Enhancement of monthly fog and low-level cloud water caused by desert greening of low grass and by that of coniferous trees for 100km x 150km area..

緑化前後の霧水、低層雲水量 *LCW* の変化を Fig. 5.4 に示した。低草で緑化すると蒸発散が活発になって緑化領域での *LCW* は2倍に増える。針葉樹で緑化した場合にもほぼ同様の *LCW* の増加が見込める。

緑化前後の水文変化を Table 5.1 に示す。境界条件は2004年1月と2月についてのものである。1月、2月の月降水量は年最高と最低を記録した。

Table 5.1 から明白なように、砂漠緑化により降水量 *P* は数10%増大するものの、蒸散量 *LHF* は低草原にした場合現状の数倍に増大する。したがって、蒸散量が降水量を大幅に上回ることになり、自立的な植物成長は望めない。一方、常緑針葉樹林では蒸散量の増加はせいぜい数10%にとどまるが、降水量の最低になる2月には蒸散量が降水量を遙かに上回る。

一方、霧水量 *CLW* は砂漠緑化により数倍増大する。緑化植物による霧水捕捉量(樹雨量) *FD* は、常緑針葉樹林で月間10-20mm、年間200mm程度期待できる(低草原ではその1/10)。これを加えると、降水量の最低になる2月でも正味の降水量(=降水量 *P* + 樹雨量 *FD* - 蒸発散量 *LHF*) は正になり、自立的な植物成長が期待できる。

Table 5.1 Change of hydrology before and after desert greening.

a) February 2003 (minimum precipitation)

	Rain <i>P</i> mm/month	Fog drip <i>FD</i> mm/month	Evap. EVAP mm/month	( <i>F+FD</i> )- EVAP mm/month
Control run	0.69		6.6	-5.9
Evergreen forest (100kmx10km)	0.71	9.4	9.7	0.4
Low grass (100kmx150km)	1.43	0.9	64.0	-61.7

b) January 2003 (maximum precipitation)

	Precip. <i>P</i> mm/month	Fog drip <i>FD</i> mm/month	Evap. EVAP mm/month	( <i>F+FD</i> )- EVAP mm/month
Control run	59.9		8.1	51.8
Evergreen forest (100kmx10km)	67.3	20.5	9.4	78.4
Low grass (100kmx150km)	75.4	1.5	25.4	51.5

以上のように、常緑針葉樹をある程度育てると、後は自立的に成長を続けることができる。即ち、砂漠緑化は持続的発展を遂げることが可能である。

自立的な森林成長を可能にする第一のポイントは、緑化地域から蒸発散した水蒸気が、トリガーになって蒸発散 雲生成 降水 蒸発散の水循環サイクルを加速するとともに、高温多湿の流入気流に雲生成 潜熱放出・上昇気流 積雲生成・降水の「正のフィードバック」効果を生むことが期待できることである。もう一つのポイントは、霧、雲の多発地域で一旦樹木が成長すると、樹木が霧を捕捉し(「樹雨」(きさめ)という)その捕捉量が欧米の降水量にも匹敵することが見込めることである。従って、樹木がある程度成長すると、その後は「自立的」に生育していくことが期待できる。

乾燥、半乾燥地域では、降水量が少なく、降水量が年によって4-5倍変動するのが普通である。砂漠緑化計画には干ばつ等この変動を十分考慮されなければならない。Fig. 5.8 に高原都市アブハでの降水量の変動を示したが、エルニーニョ・南方振動 *Nino3* やインド洋ダイポールモード *DMI* などの影響がみられる。この意味で大気海洋大循環と緑化による水循環変動の両面から広域水循環予測モデルの性能が厳しく要求される。現在、この種の数値実験を地球シミュレータを使って繰り返し実施、長期間安定した森林成長が確保できる緑化計画の策定を目指している。

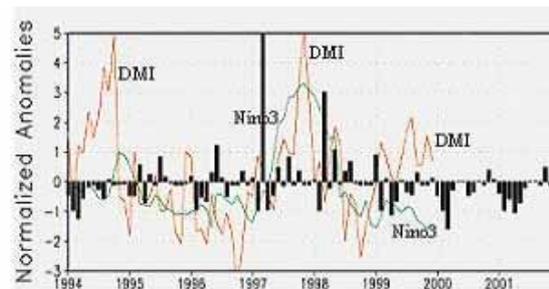


Fig. 5.8. Normalized anomalies of precipitation at Abha (hill station in Saudi Arabia) and indices of ENSO *Nino3* and Indian dipole mode *DMI*.

#### 5.4 水環型オアシス・ネットワークの構想

限られた水資源の効率的利用と再利用に基づく快適な生活空間や高い生物生産を有する環境の創生を目指した計画研究も実施している。Fig. 5.9 に「水循環型オアシス・ネットワーク」の概要を示す。ここでは、加湿帯を設け有効な蒸発散を促すと共に、山

間部回収帯での霧あるいは降水の回収効率を向上させることにより、対象とする地域全体における水循環量または系内保持水量を人為的に増加させる。また、循環型または節約型など水利用率の高い技術を適応することにより、水消費量の少ない生活空間、生物生産システムを形成する。

海洋性砂漠に水循環型オアシス・ネットワークを構築するためには、まずその構成単位である地区ごとに独立した小規模な水循環型オアシスを分散的に構築するところから始め、次の段階として、それらを繋げて行くことによって大規模な水循環型オアシス・ネットワークを創生する。

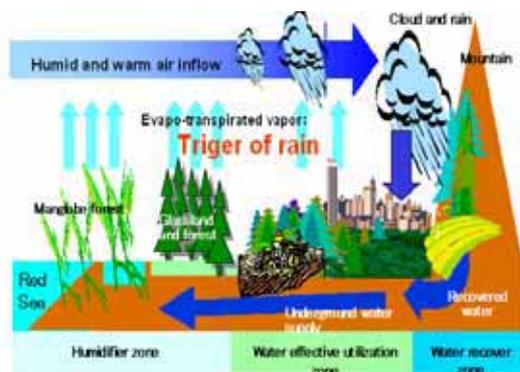


Fig. 5.9. Concept of water saving oasis network.

### 5.5 造水技術

砂漠緑化やオアシスでの快適な生活を維持するためには、造水・集水技術が必要である。ここでは、自然エネルギーを最大限に利用し、造水コスト 100 円/ton を目標に乾燥地に適用できる技術として、霧水捕集、空調機のドレン利用、海水池蒸気回収、太陽電池利用逆浸透膜淡水化、太陽熱発電併用淡水化、氷蓄冷空調併用淡水化を検討した。造水量とコストの見積もりを Table 5.2 に示す。

Table 5.2 Scale and cost of water production methods.

Apparatus	Amount of water production (ton/day)	Cost (¥/ton)
Net collector	500	200
Air conditioner	0.4	1000
Sea water pond	0.1	8.8x10 <sup>4</sup>
Solar battery	40	1.1x10 <sup>3</sup>
Solar heat	500	92
Ice thermal storage system	70	162

森林が自立成長に達するまでの期間は、これを補助する技術、すなわち緑化メカニズムのトリガーとなる技術が必要である。霧水、雲水のネット捕集は経済的に有望であり、乾燥地の各国で試みられている。大都市周辺では排水の再利用が可能であるが、サウジアラビアでも水供給の 0.6%を賄っているにすぎない。将来は、下水の高度処理を進め、この比率を高めていくことになる。

数 10-100km 四方の大規模緑化には降水促進技術の検討も必要である。現在、気象変化に関する国際協定では、戦略目的を禁止しているが平和目的での適用は奨励されている。中国ではすでに 20 省で人工降雨、雹害防止、霧除去の目的で気象変化事業がルーチン化されている。積雲や過冷却霧に対してはよう化銀やドライアイス、液体二酸化炭素の散布が行われているが、数値シミュレーションやレーダー観測技術が発達し、cloud seeding に用いる機能性の氷晶核材料の開発も進んでいる現在、降雨促進技術の開発に真剣に取り組む時期にきている。

サウジアラビアの場合、生活水の大規模供給は地下水の集水と海水淡水化が半々を担っている。海水淡水化には現在逆浸透膜法が採用されているがこれの改良や新しい方式が検討されている。これを駆動する電源としては太陽熱が有望である。米国モハベ砂漠ではすでに 20 年の実績があり、黒部ダムに匹敵する 380MW を 8 円/kWh のコストで発電している。年間の日照時間数の分布を Fig. 5.10 に示した。日照時間は日本で 1500 時間であるのに対して乾燥地では 3500 時間にも達しており乾燥地のメリットを最大限に生かせる動力源として非常に有望である。中東は、これまで石油で世界のエネルギーを供給してきたが、将来は太陽熱からのエネルギー供給を担うことになるかもしれない。

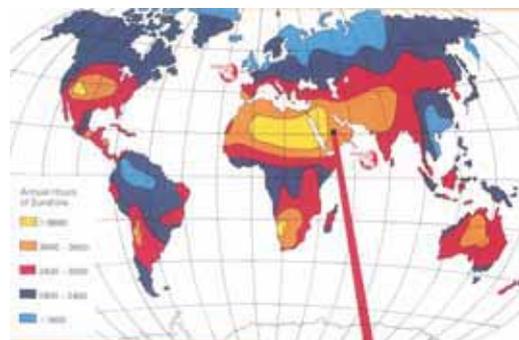


Fig.5.9. Map of yearly sun- insolation duration.

このように、砂漠緑化は砂漠化防止の有力な手段であるばかりでなく、二酸化炭素の吸収を通して地球温暖化の抑制の面でも地球環境保全に貢献できる。さらに、森は雲をよび水資源確保の有力な方策になりうる。以上、膨大な太陽エネルギーを享受している乾燥地域に太古の時代のレバノン杉の森の復元を目指した研究がはじまっている。

## 6. おわりに

これまでに、環境を多数の物理、化学、生物学的素過程が複雑に絡み合って階層構造をなすシステムとみて、環境流体特有の力学過程、拡散過程と反応、平衡、乾性・湿性沈着など大気汚染に係る素過程の研究を進めてきた。これと併行して、複雑系システムとしての大気汚染気象システム、大気組成変動、水循環システムのメカニズムとダイナミックスの研究を実施してきた。これらの研究を通して「環境流体力学」と「環境モデリング」の学域の構築を目指してきた。前者は基礎研究であり、後者は総合化研究と言えよう。

数値研究が全盛になりつつある現在、素過程に関する基礎研究の重要性は益々増大している。成層乱流についても、大気境界層上空や海洋混合層の下部は大気、海洋環境中では圧倒的に広大な領域を占めるにも拘わらず、そこでの拡散過程、間欠的に生起する乱流や二重拡散などの素過程は未解明のままである。これらを含めて、環境流体に与える影響が大きく、流体力学の基本に拘わる未解明の課題が多数ある。今後、環境流体の運動を構成する波動と渦動と乱流、それぞれの研究の更なる発展とこれらを統一的に記述する理論構築を目指した研究が強く望まれる。

環境モデリングの分野では、これまで開発されてきた数値モデルやモジュールの統合、換言すれば、統合モデルの構築が進みつつある。本研究でも、輸送、拡散、反応、沈着モデルを統合した大気組成変動の統合モデルシステムや気象、海洋、波浪モデルを統合した海域モデル、気象、陸水モデルを統合した海域モデル、さらにこれら2つを統合した広域水循環モデルシステムの構築を進めてきた。これらを武器にして、将来、環境問題と防災を一体にした総合化研究の新たな展開が強く期待されることである。

## 謝 辞

本稿は、防災研およびこれまで在職した京都大学

工学部、国立環境研究所、九州大学応用力学研究所の諸先生方、同輩、後輩の方々との共同作業の成果である。ここに改めて、お世話になった方々に感謝する次第である。上記の研究機関では、時代を代表する諸先生方のご薫陶を得た。今は亡き水科篤郎先生、桐栄良三先生、大山義年先生にはご冥福をお祈りしたい。近藤次郎先生には心から感謝する次第である。

## 参考文献

- Monin, A.S. and Obukhov, A.M.: Basic turbulent mixing laws in the atmospheric surface layer. *Tr. Akad. Nauk SSSR Geofiz. Inst.*, No.24, 163-187 (1954).
- Fukui, K., Nakajima, M. and Ueda, H.: A laboratory experiment on momentum and heat transfer in the stratified surface layer. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 109, 661-676 (1983).
- Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and Bradley, E.F.: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.* 28, 181-189 (1971).
- Kline, S.J., Reynolds, W.C., Schraub, F.A. and Rindstadler, P.W.: The structure of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 30, 741-773 (1967).
- Komori, S., Ueda, H., Ogino, F. and Mizushima, T.: Turbulence structure in unstably stratified open-channel flow. *Phys. Fluids*, 25, 1539-1547 (1982).
- Komori, S., Ueda, H., Ogino, F. and Mizushima, T.: Turbulence structure in stably stratified open-channel flow. *J. Fluid Mech.* 130, 13-26 (1983).
- Gibson, M.M. and Launder, B.E.: Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer. *J. Fluid Mech.* 86, 491-511 (1978).
- Ueda, H. and Hinze, J.O.: Fine-structure turbulence in the wall region of a turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.* 67, 125-143 (1975).
- Ueda, H., Mitsumoto, S. and Komori, S.: Buoyancy effects on the turbulent transport processes in the lower atmosphere. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 107, 561-578 (1981).
- Leinhard, J.H. and Van Atta, C.W.: The decay of turbulence in thermally stratified flow. *J. Fluid Mech.* 210, 57-112 (1990).
- Komori, S. and Nagata, K.: Effects of molecular diffusivities on counter-gradient scalar and momentum transfer in strongly stable stratification. *J. Fluid Mech.*, 326, 205-237 (1996).
- Hanazaki, H. and Hunt, J.C.R.: Linear processes in unsteady stably stratified turbulence. *J. Fluid Mech.*, 318, 303-337 (1996).
- Ueda, H., Komori, S. and Fukui, K.: A laboratory experiment on lateral diffusion of scalar quantity in the stratified surface layer. *Atmos. Environ.* 20, 757-762 (1986).
- Komori, S., Ueda, H., Ogino, F. and Mizushima, T.: Lateral and longitudinal turbulent diffusion of scalar quantities in thermally stratified flow in open-channel. *Heat Transfer 1982*, Vol.2, 431-436 (1982).
- Mellor, G.L. and Yamada, T.: Development of a turbulence closure model for planetary boundary layers. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851-875 (1982).
- Rodi, W.: Calculation of stably stratified shear-layer flows with a buoyancy-extended k- turbulence

- model. In "Turbulence and Diffusion in Stable Environments", Edt. by J.C.R. Hunt, Oxford Press, Oxford (1985).
- Uno, I. and Ueda, H.: Some contributions to the algebraic stress model for the application of stratified flows. In "Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements", Edt. by Y. Iwasa, et al., 1-8 (1988).
- Mansour, N.N., Shih, T.-H. and Reynolds, W.C.: The effects of rotation on initially anisotropic homogeneous flows. *Phys. Fluids*, A3, 2421-2425 (1991).
- Bardina, J., Ferziger, J.H. and Rogallo, R.S.: Effect of rotation on isotropic turbulence: Computation and modeling. *J. Fluid Mech.*, 154, 321-336 (1985).
- Cambon, C. and Jacquin, L.: Spectral approach to non-isotropic turbulence subjected to rotation. *J. Fluid Mech.* 202, 295-317 (1989).
- Hanazaki, H.: Linear processes in stably and unstably stratified rotating turbulence. *J. Fluid Mech.* (in press).
- Iida, O. and Nagano, Y.: Coherent structure and heat transfer in geostrophic flow under density stratification. *Phys. Fluids* 11, 368-377 (1999).
- Tsujimura, S., Iida, O. and Nagano, Y.: Effects of rotation on unstably stratified turbulence. *Proc. Int. Conf. on Turbulent Heat Transfer 2*, Manchester, U.K. vol.1, 558-571 (1998).

## **Research How to Co-exist and Co-prosper with Earth from Environmental Fluid Mechanics**

Hiromasa UEDA

### **Synopsis**

Environment is a complex system which consists of by many physical and chemical processes in a intertwined state and have a hierarchical structure. Environmental phenomenon composed by several processes and related to the dynamic of the system sometimes changes the system as a whole. In this work environmental fluid motion and heat and mass transfer were investigated by means of laboratory experiment and field observation, and were revealed to be changed substantially by density stratification. This buoyancy effect is characteristic in environmental fluid motion, and is different for momentum and heat (mass) transfer and different for vertical, streamwise and spanwise directions and for wall region and outer region and, moreover, often causes contergradient diffusion under extremely stable stratified conditions. A turbulence model for stratified flows was proposed to explain all these phenomena successfully. Based on this fundamental study, mechanism and dynamics of environmental systems were investigated. For environmental protection, air pollution meteorology system and atmospheric composition change were investigated. It was found that a large wind system made up with several local winds is the main long-range transport mechanism in low- and mid-latitudes and treatment of all air pollution phenomena, i.e., primary pollution, photochemical oxidants, secondary aerosols and acid rain, as one system with atmospheric chain reactions makes it possible to understand the details of each pollution and to work out its countermeasure. For creation of new environment, desert greening was investigated by developing an advanced model system for regional hydraulic cycle and was shown to be sustainable if appropriate location was selected meteorologically. The desert greening itself can be a countermeasure for a new water resource at which forest attract rain.

**Keywords:** stratification, turbulent diffusion, acid rain, long-range transport, atmospheric composition change, hydrological cycle, desert greening