

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号：17360238  
 研究課題名 (和文) 実スケール雲物理実験とその成果を基礎とする降雨・大気環境・水循環統合モデルの構築  
 研究課題名 (英文) Formulation of precipitation, atmospheric environment and water circulation model based on cloud physics experiment  
 研究代表者  
 山田 正 (YAMADA TADASHI)  
 中央大学・理工学部・教授  
 研究者番号：80111665

研究成果の概要：雲物理過程解明のために行った実験よりエアロゾル量の増加に伴い雲水量も増加するがエアロゾル量が閾値を超えると生成される雲水量が一定になり飽和状態になる。また上昇風速が大きくなればなるほど雲水量が増加することがわかった。ヒートアイランドを緩和させる効果のある河川周辺で行った微気象観測により河川の大きさに関わらず水面付近の気温は周囲より低く、河川上の冷気が運ばれやすい風道がある場所の気温は 2～3℃ 周囲より低いことがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	3,800,000	0	3,800,000
2006年度	3,400,000	0	3,400,000
2007年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2008年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
総計	13,900,000	2,010,000	15,910,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：雲物理実験、エアロゾル、上昇気流、ヒートアイランド、風道、

## 1. 研究開始当初の背景

実スケール雲物理実験は、過去 10 年間にわたり計 15 回の実験を行っている。これまでに雲物理実験施設の雲生成の諸条件を制御することができるという特徴を生かし、実際の自然現象では複雑に交錯する影響因子を単純化し、それぞれの影響について解明し、微物理モデルを改良してきた。本研究では、気象状態、大気に含まれる凝結核として作用する微粒子(エアロゾル)の組成、数濃度、粒径分布などを実際の大气に近い状態に制御した実験を行ない、雲物理過程に及ぼす影響因子の相互作用について解明する。

## 2. 研究の目的

現在、水循環のトレーサーとして水安定同位体による水・水蒸気の追跡を目的とした研究が数多く行われている。しかし、室内実験や理論的研究で明らかになった成果を直接モデルへ組み込む研究が行われ、素過程と実現象を結びつける研究はなされていない。また、同位体の挙動について定量的に評価できる基礎データの収集がほとんどなされていない。そのためスケール効果や実現象における同位体の時空間的な変動要因に対する答えは依然として不明とされている。本研究では、雲物理実験施設を用いて同位体挙動の基礎データの収集・蓄積を行うとともにスケール

ル効果、時空間的な変動要因を解明する。これらの微物理過程及び同位体の挙動について明らかにし、実験成果をとりいれた実現象への適用を念頭においたモデルを構築するとともに、降雨・大気環境・水循環を一連の物理過程に基づき統合することを目的としている。

### 3. 研究方法

研究目的達成のために雲物理実験を2007年度まで行ってきたが実験施設の老朽化に伴い、研究目的を達成するための十分な実験が行えなくなった。雲物理実験結果から上昇気流が雲生成に大きな影響を与えているという結果が得られている。ヒートアイランド現象は上昇気流の発生を促していることから都市部におけるヒートアイランド現象に着目した。夏場の都市部はヒートアイランド現象により上昇風速が発生することでゲリラ豪雨を助長していると多くの科学者が指摘している。そこでゲリラ豪雨の基となる水蒸気輸送要因の一つでありヒートアイランド現象を緩和させる河川の周辺で微気象観測を雲物理実験と同時平行で行った。

#### (1) 物理実験概要

雲物理実験施設は岩手県釜石市にある廃坑となった鉱山内の排気用の高さ430m、幅5.5m、奥行き2.8mの立坑である。雲物理実験施設の概要図を図-1に示す。この立坑は海拔250m~680mに存在し250m以下は水没している、また立坑内の相対湿度はほぼ100%を維持している。

立坑内の立坑上部(以後、坑頂)に設置した大型ファンと立坑下部(以後、坑底)に設置した溶液噴霧装置で立坑内の上昇気流の強さとエアロゾル数濃度を制御し実験を行った。立坑内には3.5m間隔で踊り場があり機材を各高度に設置することにより定点観測が可能であり、本研究では定点観測で、各高度における粒子数濃度、気温の鉛直分布、坑頂での雲水量計測で、雲発生時のある大気状態における気象因子の定量評価と坑頂からゴンドラに観測機材を載せ、上下方向に移動させる移動観測で雲生成過程における気象因子の高度変化を測定した。

#### (2) 河川周辺の微気象観測概要

観測は大河川である荒川と都市中小河川である目黒川で行った。荒川と目黒川の観測サイトの概要を図-2に示す。荒川の観測サイトは河口から21~23kmで埼玉県の川口市と東京都北区赤羽との県境に位置する場所である。左岸側に高規格堤防が整備されており、その堤防上には幼稚園から中学校までの学校がある。高水敷は両岸共にサッカー、野球

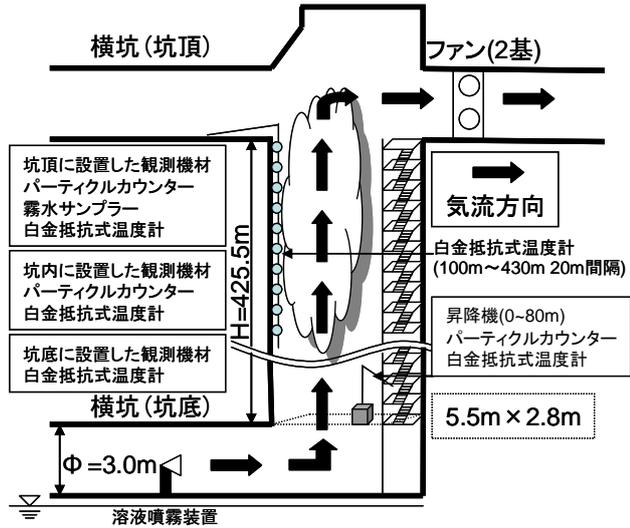


図-1 雲物理実験施設の概要図

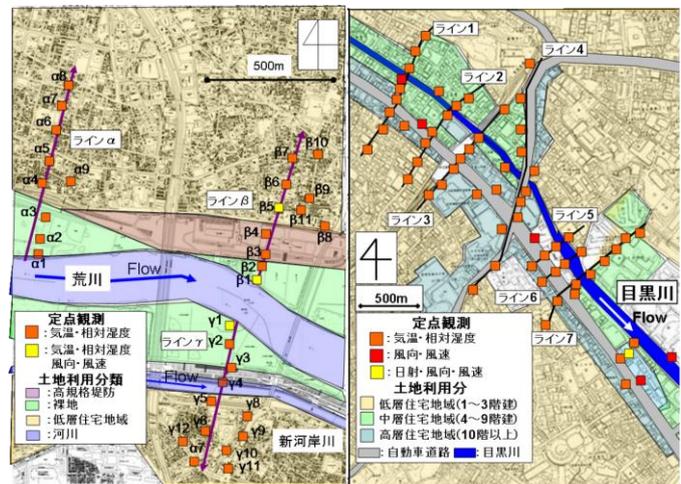


図-2 荒川と目黒川における観測概要

等のグラウンドがあり右岸側は新河岸川に挟まれている。そして両岸堤内地は住宅街と町工場からなる低層住宅地域である。この観測サイトでは高規格堤防の有無による河川からの風が堤内地への流入しやすさの違いにより熱環境緩和効果がどう変化するかを評価するために河川に対して横断方向に3本の観測測線を設けた。

目黒川の観測サイトは河口から4.4kmから5.8km地点の河川から両岸方向へ500m以内の約1.6km<sup>2</sup>である。目黒川の護岸はカミソリ堤防で川幅は河口から5.4kmの地点を境に上流側12~15m、下流側は25~30mとなっており、その境で潮位の影響を受けないように上流側の河床が下流側より1m程度高い構造となっている。周囲の土地利用は河川右岸側に片側2車線の自動車道路が河川から50から100m離れた位置にあり、その道路と河川沿いには階層が5階以上のビルやマンションなどの中層と高層の構造物が立っており、それ

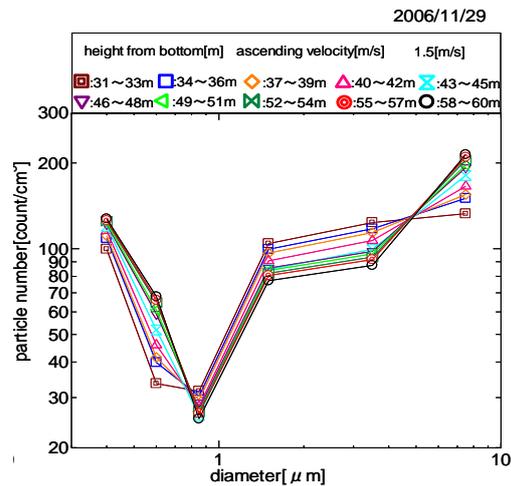
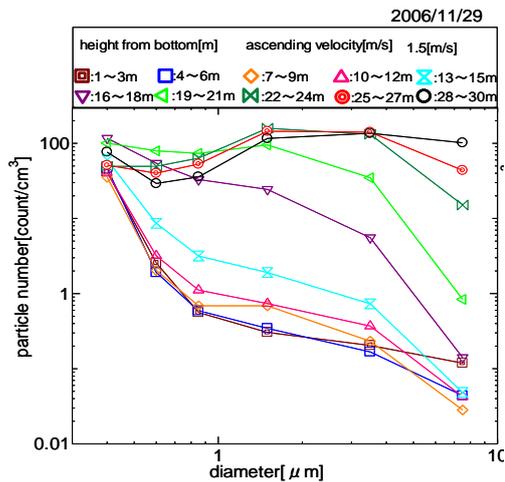


図-3 雲底付近の粒径分布の高度変化

以外は低層と中層の建物が入り混じって建てられており、河川周辺は目黒川を都市河川といえるような典型的な土地利用をしている地域である。この観測サイトでは中小河川がもつ河川周辺の熱環境緩和効果及び川幅の違いによる効果の差を見るために、河川に対して横断方向に川幅が13m前後の場所で4側線、25m前後の場所で3側線の気温観測ラインを設け上流側からライン1から7とした。荒川と目黒川のいずれの観測線においても4から10個の気温計を設置した。両観測サイトでは河川からの冷涼な空気が風により運ばれてくることによる緩和効果と河川上冷気のにじみだし効果による熱環境緩和効果の定量評価をすることを目的としている。

#### 4. 研究成果

##### (1) 雲物理実験

##### ① 雲底付近の粒径分布の高度変化

図-3は坑底から60mまでの粒径分布を示している。坑底から10m~21mにおける粒径が0.5~5.0 $\mu\text{m}$ の粒子数が高度上昇に伴い急激に増加し、粒径が5.0 $\mu\text{m}$ の粒子数も坑底から13mから増加し始めている。高度上昇に伴う粒子数濃度の増加は、付近に相対湿度が不飽和-飽和-過飽和へと変化する層が存在し、相変化する水蒸気が小粒子と凝結し粒径が成長しているものと考えられる。また、坑底から30~60mでは粒径が0.3~0.7 $\mu\text{m}$ と5.0 $\mu\text{m}$ が増加し、粒径が0.7~5.0 $\mu\text{m}$ の粒子数が減少している。Kohlerの理論で示されている様に粒子の溶質含有率や、過飽和度により活性化した粒子と活性化せず過飽和度が減少した際に小粒径に移行していく粒径があることを示している。

##### ② 上昇風速と雲水量の関係

坑頂において雲水サンプラーで採取した雲水量と上昇風速の関係を図-4に示す。噴霧溶液数濃度の増加に伴い、雲水量が増加している。雲水量は上昇風速に対してほぼ線形関係

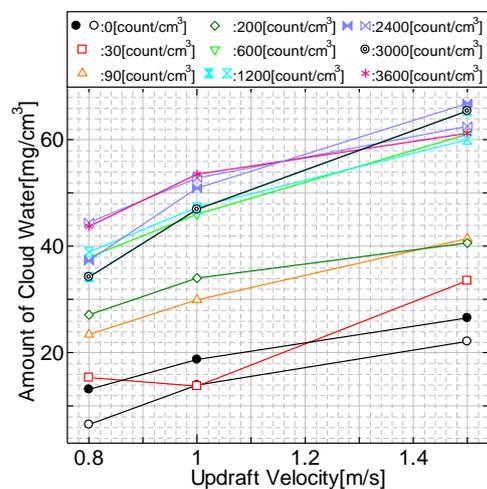


図-4 上昇風速と雲水量の関係

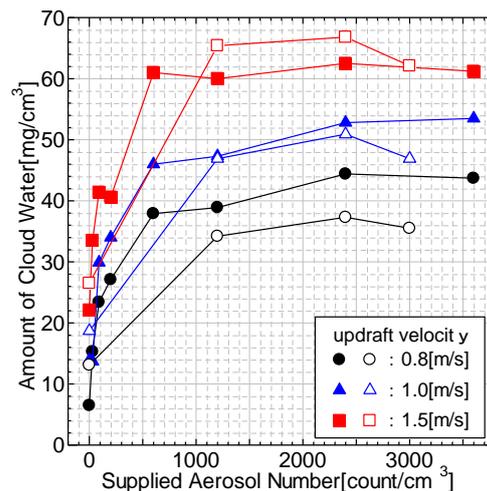


図-5 噴霧数濃度と雲水量の関係

にあり、上昇風速が強くなるほど雲水量も増加することがわかる。上昇風速増加による水蒸気フラックスの増加が雲粒の成長を促進

すると考えられる。

③噴霧数濃度と雲水量の関係  
坑底での溶液噴霧数濃度と坑頂で採取した雲水量の関係を図-5に示す。坑底における溶液噴霧数濃度が  $500\text{count}/\text{cm}^3$  以上になると坑頂で採取される雲水量が一定になることがわかる。また上昇風速が強くなると雲水量は増加するが、雲水量が一定となるエアロゾル供給量の閾値は、風速によらず一定であることがわかる。

(2) 河川の気候冷却効果

①河川からの距離と気温の関係

図-6に荒川における真夏日の14時の平均気温と河川からの距離の関係を示す。これは荒川の赤羽地区における各観測ラインの気温分布を示したものである。どの観測ラインにおいても河川付近の気温が一番低く河川からの距離が離れるにつれて気温が高くなっている。これより河川は大気を冷却する効果があり、河川付近は涼しいといえる。

次に図-7に目黒川における各ラインの河川横断方向の気温分布図を示す。川幅15mを横断するライン1と2では河川沿いの気温が一番低い。川幅30mライン3と4は右岸側の河川から100~150mの区間の気温が一番低い。次に川幅が30mの区間の気温分布をみるとどのラインにおいても河川沿いの気温が低く河川から距離が離れるにつれて気温が高くなる。これらのことから目黒川のような中小河川においても大気冷却効果はあり河川沿いは涼しいが、川幅が狭いため河川冷却効果が弱い場所や都市部で熱源があるような場所ではその効果は打ち消される可能性があると思われる。

②風道効果

荒川の観測サイトにおける観測ラインαとβは河川に対して横断する道路上であるために河川から冷気が流入しやすい通りである。それに対して観測ポイントα9、β11は観測ラインαとβから住宅地の入り組んだ細い道にあり体感でも風を感じない場所である。そこで風通りの良し悪しによる気温差をみるために図-8に風道と脇道の気温差の関係を示す。これは図-6で示した各観測ラインの回歸直線から求めたα9とβ11に対して河川からの同じ距離のポイントα9とβ11との気温差を

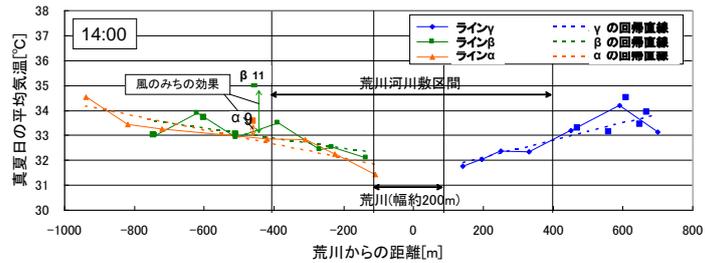


図-6 風道と脇道の気温差の関係

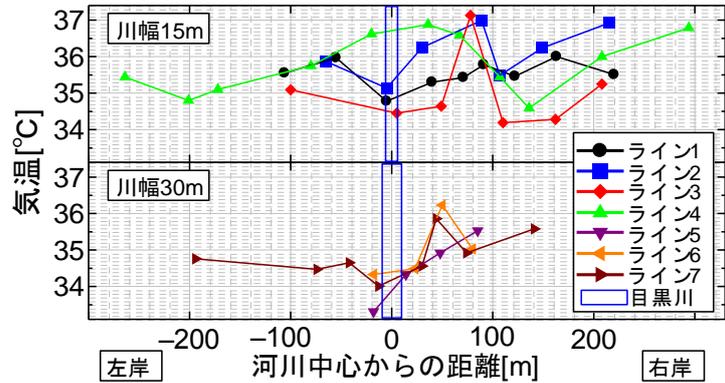


図-7 目黒川における各ラインの河川横断方向の気温分布図

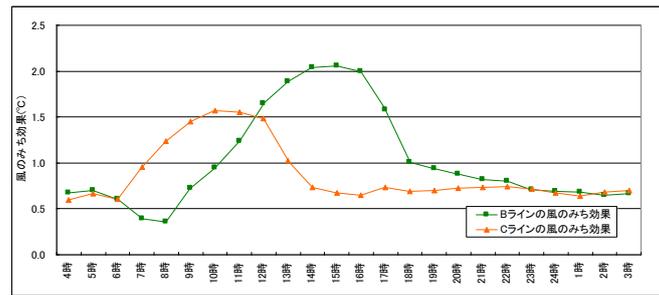


図-8 風道の効果

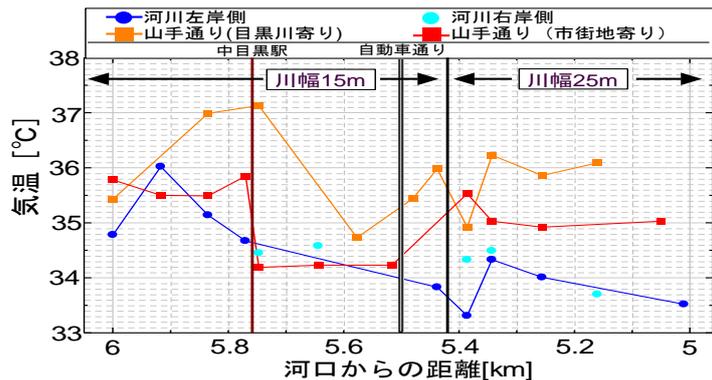


図-9 目黒川と自動車通りの河川縦断方向

時系列で示したものである。風通りの良い方が悪い方よりどの時間でも気温が低い、また観測ラインβでは日中最大 $2.1^{\circ}\text{C}$ 気温差があることから風道を作ることは熱環境を緩和させるために重要である。

次に目黒川と自動車通りの河川縦断方向の気温分布を図-9に示す。使用したデータは

猛暑日で5日間のデータを平均したものである。図-9から中目黒駅から河川と自動車通りが最接近する区間で自動車通りと河川沿いの気温差が1℃以内であるのに対して、それ以外の自動車通りと河川沿いの気温差は2℃以上自動車通りの気温が高い。この気温差が1℃以下になるのは河川と自動車通りが再接近する部分で河川からの冷気が入り込み大気を冷やしていると考えられる。よって中小河川でも風道効果をもつといえる。

### (3) まとめ

雲の微物理解明のための実験と河川周辺での微気象観測から得られた知見を以下に示す。

- ①エアロゾル量が増加するほど雲水量が増えるが、あるエアロゾル量が閾値を超えると生成される雲水量が一定になる。
- ②上昇風速が増加するほど雲水量が増加する。
- ③雲粒は高度上昇に伴い大きい雲粒と小さい雲粒が増加する現象が確認された。これからKohlerの理論で示されている様に粒子の溶質含有率や、過飽和度により活性化した粒子と活性化せず過飽和度が減少した際に小粒径に移行していく粒径があることが示された。
- ④河川周辺は大河川である荒川のみならず中小河川である目黒川でも河川沿いは周辺地域より気温が低く大気を冷却する効果がある。
- ⑤荒川の河川周辺で風道効果のある道とそうでない道では、日中2.1℃の気温差がある。
- ⑥目黒川でも風道効果があり風道がある通りの気温がない道より1~2℃気温が低い。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① 小田村康幸、加藤拓磨、山田正：河川からの風が都市の熱環境に与える緩和効果、水工学論文集、第53巻、pp. 295-300、2009、査読有
- ② 加藤拓磨、中根和郎、山田正：小規模水面における水の蒸発メカニズムに関する基礎的実験、水工学論文集、第3巻、pp. 343-348、2009、査読有
- ③ 加藤拓磨、手計太一、土屋修一、山田正：打ち水による熱環境緩和作用、水工学論文集、第52巻、pp. 277-282、2008、査読有
- ④ 笹尾将登、土屋修一、山田正：実スケール雲物理実験における時空間変化する粒子数濃度と雲水量の関係、水工学論文

集、第51巻、pp. 319-324、2007、査読有

- ⑤ 加藤拓磨、手計太一、山田正、日野幹雄：都市内緑地とその周辺における気温と湿度の鉛直・水平構造特性、水工学論文集、第50巻、pp. 505-510、2006、査読有
- ⑥ 加藤拓磨、山田正、日野幹雄：都市内緑地とその周辺における気温と湿度の空間構造、中央大学理工学研究所論文集、第12号、pp. 63-71、2006、査読有
- ⑦ 加藤拓磨、土屋修一、山内格、江花亮、山田正：水辺が都市の熱環境に与える影響、環境技術、第35巻、pp. 35-40、2006、査読無
- ⑧ 土屋修一、小林勝、平野廣和、山田正：ドップラーソーダによる東京都臨海部の夏季における風の特性と日変化に関する研究、第19回風工学シンポジウム論文集、pp. 49-54、2006、査読有

[学会発表] (計23件)

- ① 大野修平、小田村康幸、山田正、加藤拓磨、気温計測における移動観測の制度に関する研究、第36回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、2009、CD-ROM (II - 29)。(2009年3月13-14日)
- ② T.Kato、Y.Odamura、T.yamada：Space Variance of Meteorological Factor in Condensation Process using Artificial Cloud Experiment System、4th Conference of APHW、2008、CD-ROM (S4\_11)。(2008年11月3-5日)
- ③ T.Kato、Y.Odamura、T.Yamada、Urban Thermal Environment Mitigation Effect of Evaporation Heat in Tokyo、Japan、4th Conference of APHW、2008、CD-ROM (S3\_12)。(2008年11月3-5日)
- ④ 小田村康幸、加藤拓磨、前村良雄、木内豪、山田正：河川の大气冷却効果に関する研究、第63回土木学会年次講演会講演要綱集、CD-ROM (II-47)、2008。(2008年9月10-12日)
- ⑤ 小田村康幸、加藤拓磨、伊藤将文、前村良雄、木内豪、山田正、河川の熱環境緩和効果と風速の関係、水文水資源学会2008年度研究発表会要旨集、2008、pp. 292-293。(2008年8月26-28日)
- ⑥ T.Yamada：Integrated Analysis for the Water Cycle Simulation based on Hydro-meteorology、World Environmental and Water Resources Congress 2008 Ahuqua' a、2008。(2008年5月12-16日)
- ⑦ 小田村康幸、加藤拓磨、山田正：凝結過程における気象因子の鉛直構造、関東支

- 部技術研究発表会、第 35 回、CD-ROM(II-051)、2008。(2008 年 3 月 10-11 日)
- ⑧ 佐藤航、加藤拓磨、山田正：大規模河川からの風が市街地の熱環境に与える効果、関東支部技術研究発表会、第 35 回、CD-ROM(II-093)、2008。(2008 年 3 月 10-11 日)
- ⑨ 小田村康幸、笹尾将登、加藤拓磨、土屋修一、山田正：雲生成時に空間変化する雲粒の粒子数濃度、土木学会年次学術講演会、第 62 回、CD-ROM(II-010)、2007。(2007 年 8 月 12-14 日)
- ⑩ 加藤拓磨、土屋修一、渡辺睦人、蛭原雅之、前村良雄、森久保司、山田正：大規模河川が都市熱環境に与える効果、土木学会年次学術講演会、第 62 回、CD-ROM(II-086)、2007。(2007 年 8 月 12-14 日)
- ⑪ 加藤拓磨、土屋修一、山田正：河川が周辺熱環境に与える影響、関東支部技術研究発表会、第 34 回、CD-ROM(II-038)、2007。(2007 年 3 月 13-14 日)
- ⑫ 小田村康幸、笹尾将登、土屋修一、山田正：実スケール雲物理実験における雲粒の粒子数濃度と雲水量の鉛直構造、関東支部技術研究発表会、第 34 回、CD-ROM(II-017)、2007。(2007 年 3 月 13-14 日)
- ⑬ S. Tsuchiya, K. Yamauchi, T. Yamada : The Effect of Aerosol Influence to Cloud Microphysics using Artificial Cloud Experiment System、The 3rd Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference in Thailand、CD-ROM( ST1-01-A02-400)、2006。(2006 年 10 月 16-18 日)
- ⑭ T. Kato、S. Tsuchiya、K. Yamauchi、R. Ebana、T. Yamada : Mitigation Effect of Water Body upon Urban Climatic Environment in Tokyo, Japan、The 3rd Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference in Thailand、CD-ROM(ST1-01-A06-417)、2006。(2006 年 10 月 16-18 日)
- ⑮ 土屋修一、笹尾将登、山田正：実スケール雲物理実験によるエアロゾル数濃度と雲水発生量の関係、土木学会年次学術講演会、第 61 回、CD-ROM(II-051)、2006。(2006 年 9 月 20-22 日)
- ⑯ 笹尾将登、土屋修一、加藤拓磨、山田正：大規模河川周辺部における都市熱環境の緩和効果、土木学会年次学術講演会、第 61 回、CD-ROM(II-057)、2006。(2006 年 9 月 20-22 日)
- ⑰ 山内格、加藤拓磨、土屋修一、山田正：打ち水熱環境緩和メカニズムに関する研究、土木学会年次学術講演会、第 61 回、CD-ROM(II-058)、2006。(2006 年 9 月 20-22 日)
- ⑱ 加藤拓磨、山田正、日野幹雄：小スケールの蒸発に関する基礎的実験、土木学会年次学術講演会、第 61 回、CD-ROM(II-060)、2006。(2006 年 9 月 20-22 日)
- ⑲ 手計太一、平野文昭、加藤拓磨、山田正：パン蒸発計蒸発量に与える気候因子の影響に関する一考察、水文・水資源学会 2006 年度研究発表会要旨集、CD-ROM(7)、2006。(2006 年 8 月 29-31 日)
- ⑳ 笹尾将登、土屋修一、山田正：準実スケール雲物理実験による雲底付近の雲粒生成過程に関する研究、関東支部技術研究発表会、第 33 回、CD-ROM(II-1-6)、2006。(2006 年 3 月 14-15 日)
- ㉑ 加藤拓磨、手計太一、山田正、日野幹雄：一様水面の蒸発に関する基礎的実験、関東支部技術研究発表会、第 33 回、CD-ROM(II-1-37)、2006。(2006 年 3 月 14-15 日)
- ㉒ 笹尾将登、土屋修一、山田正：上昇風速及びエアロゾルが雲粒の成長に与える影響、土木学会年次学術講演会、第 60 回、CD-ROM(II-002)、2005。(2005 年 9 月 7-9 日)
- ㉓ 加藤拓磨、土屋修一、手計太一、山田正：打ち水の都市熱環境緩和作用に関する研究、土木学会年次学術講演会、第 60 回、CD-ROM(II-009)、2005。(2005 年 9 月 7-9 日)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山田 正 (YAMADA TADASHI)  
中央大学・理工学部・教授  
研究者番号：80111665

### (2) 研究分担者

平野 廣和  
中央大学・総合政策学部・教授  
研究者番号：80256023  
(平成 20 年度から連携研究者)  
藤吉 康志 (FUJIYOSHI YASUJI)  
北海道大学・低温科学研究所・教授  
研究者番号：40142749  
(平成 20 年度から連携研究者)  
太田 幸雄 (OHTA YUKIO)  
北海道大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00100058  
(平成 20 年度から連携研究者)  
大石 哲 (OHISHI SATORU)  
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授  
研究者番号：30252521  
(平成 20 年度から連携研究者)

### (3) 連携研究者

該当者なし