

# 実大建物の鉛直壁面における対流熱伝達率の測定<sup>†</sup>

逸見 淳子\*

## Real scale measurement of convective heat transfer coefficient on vertical building wall

Junko HENMI

**1. はじめに** これまで熱伝達と物質伝達のアナロジーを利用した濾紙面蒸発による建物外表面対流熱伝達の把握が行われてきた<sup>1)2)</sup>。熱伝達現象はスケール効果が無視できないため、その振る舞いの把握には、系統的な検討が可能な風洞実験に加え、実スケールでの測定が欠かせない。また、濾紙面蒸発による検討は、フラックスの測定精度確保のために表面と気温との間に大きな温度差をつける必要がないため、強制対流成分の挙動を純粹に把握できるというメリットがある反面、自然対流が支配的となる静穏時の検討は困難であった。このような現象は、夏季の市街地外表面における大気加熱量の推定やアトリウム空間の温熱環境設計の上でも重要であるにもかかわらず、これまで必ずしも十分な把握がなされていない。これまで外表面対流熱伝達率の実測例としては、裏面を断熱したSAT計を用いたものがいくつか報告されているが<sup>3)4)</sup>、SAT計では測定時の表面温度が周囲の対象建物壁面とは大きく異なってしまう。本研究の目的のひとつは、壁面における鉛直方向のスケール効果を検討することであるため、SAT計では本質的に実験不可能であり、実際の壁面温度状態での測定方法を考案する必要がある。そこで本研究では、RC造3階建ての壁面の一部をコア抜きしてセンサを埋設し、さらに壁面の長短波放射収支を直接測定することで、鉛直壁面の対流熱伝達率を長期的に測定することを試みた。同時に壁面近傍に設置した超音波風速温度計(表面から10cm)により渦相関法を用いた対流熱フラックスの評価を試みた。

**2. 実測の概要** 測定は東面2階・西面の1~3階である(Fig.1)。まず壁厚270mmの外壁を径100mmでコア抜きし、円柱壁体サンプルの密度測定を行なった(2301kg/m<sup>3</sup>)。一方、同施工の隔壁(壁厚250mm)を同様にコア抜きし、5点にドリルで中心まで穴を明け、熱電対を挿入した。両端にも熱電対を這わせ、さらに片端に熱流板を貼り付けた(Fig.2)。その後、熱流板が埋まるようモルタルを盛り、厚

さが外壁に一致する円柱サンプルを作成した。このサンプルを、外壁のコア穴にモルタルを塗って埋め戻し、外壁側にも熱電対を這わせた後、周囲壁と同じように白色塗装した。コアとほぼ同位置に、5cmスパンの超音波風速温度計(壁から100mm)と長短波放射収支計(壁から350mm)をFig.3のように固定した。超音波風速温度計のデータは10Hzで、入射および反射短波・長波放射量と熱流、温度は1分ごとに収録した。

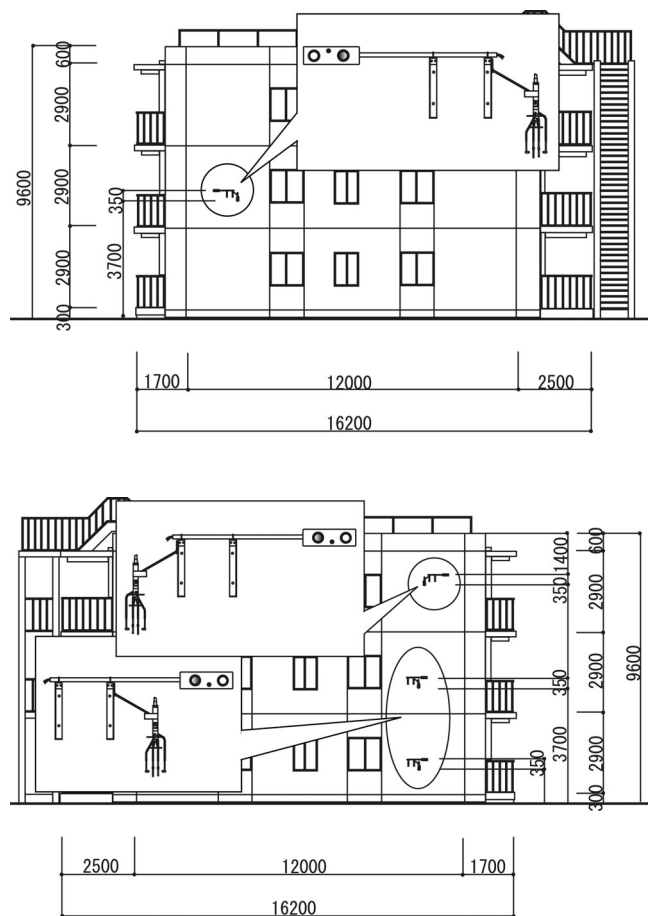


Fig.1 東西立面と測定位置

<sup>†</sup> 本論文の一部は、平成14年度日本建築学会関東支部研究発表会(平成15年3月7日)にて発表予定である。

\* 建築学専攻

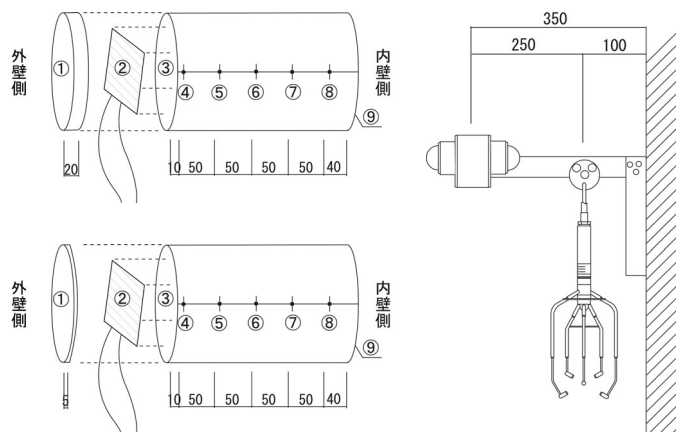


Fig. 2 壁体コアのセンサ埋設状況  
(上：東壁面、下：西壁面)

Fig. 3 放射収支計と  
風速計の設置状況

**3. 実測結果** 東面については夏季(7月11日～9月5日)、西面については12月29日と1月2日について結果を示す。

### 3-1. 東壁面における実測結果

#### (1) 壁面の熱収支による顕熱フラックス算定

外表面および内表面温度の実測値を用い、内部温度を陽解法による数値計算で求めた。初期条件に7月11日の実測プロファイル、境界条件には、外表面・内表面の実測値を採用した。この実測値を使用するにあたり外表面の実測値と長短波放射収支計で得られた $I \uparrow$ の比較を行なった。比較を行なう理由は、 $I \uparrow$ は赤外線の量を測っており、日射の影響を受けていないからである。Fig.4に示すように多少温度差はあるものの、平行に変化していることがわかる。よって、熱電対の温度は日射の影響を受けていないことがわかり、外表面温度として信用できると判断した。

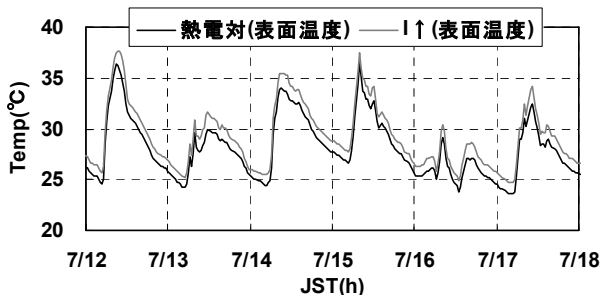


Fig. 4 外表面と $I \uparrow$ の比較

壁体の熱特性値は、含水時の熱伝導率 $=1.74(\text{W/m}\cdot\text{K})$ 、および容積比熱 $=2.0(\text{MJ/m}^3\cdot\text{K})$ を用いた。時間ステップ(1分)と温度拡散率の制限から、外表面からの第1セルを7mmとし、表面温度との温度傾度から3.5mm深さの熱流( $G_f$ )を求め、温度時間変化から求めた表層3.5mm厚さの蓄熱量( $\Delta S$ )を加えて、外表面での伝導熱流量( $G=G_f+\Delta S$ )を算定した。Fig.5に、壁体内温度の計算値と実測値の比較例(深さ130mm)を示す。放射4成分から放射収支量( $R_n$ )を求め、最終的に潜熱フラックスがないと仮定し、 $R_n-G$

という残差の形で顕熱フラックスを算定した。

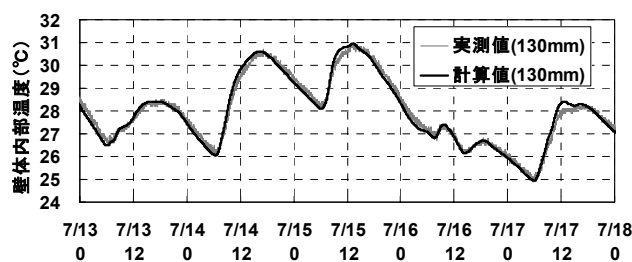


Fig. 5 壁体内温度の計算値と実測値の比較

#### (2) 渦相関法による顕熱フラックス算定

外壁と法線方向成分風速を用いて、評価時間30分で渦相関法による顕熱フラックス( $H$ )を算定した。

以上のフラックス算定結果の一例をFig.6に示す。熱収支で算定した顕熱( $R_n-G$ )と渦相関法による顕熱( $H$ )を比較すると、温度差 $\Delta T$ との対応関係は $H$ の方が良く、 $R_n-G$ は、日射の増加時には過大、日射の減少時には過小評価する傾向がみられる。夜間についても、 $\Delta T$ が正であるにもかかわらず負の値を示す時間帯が見られる。

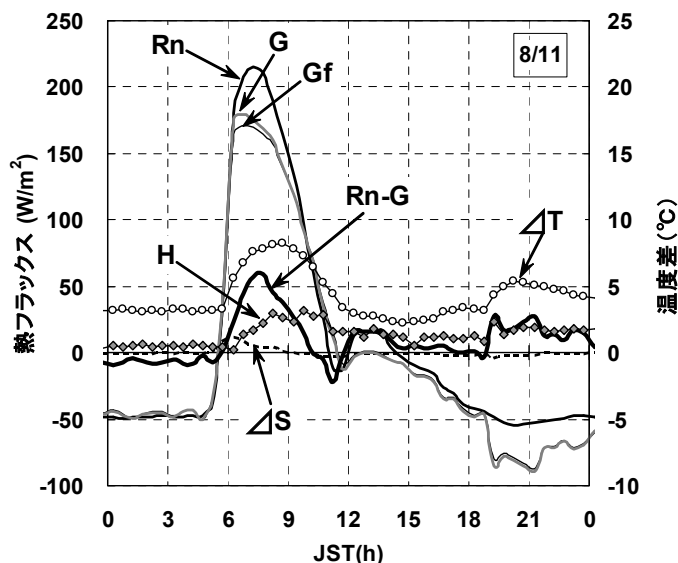


Fig. 6 熱収支( $R_n-G$ )および渦相関法( $H$ )による熱フラックス算定結果と温度差の関係(8月11日の例)

今回対象とした期間の中から降雨時を除き、さらに自然対流が支配的となる弱風時のデータに絞り込むため、3成分合成風速が0.5m/s未満のケースのみについて熱収支法( $R_n-G$ )および渦相関法( $H$ )による顕熱フラックスと $\Delta T$ の関係を示した(Fig.7)。なお、これまで室内壁用に用いられてきた $\alpha c[\text{W/m}^2\cdot\text{K}] = 1.98 \times \Delta T^{1/4}$ に相当する $1.98 \times \Delta T^{5/4}$ の式、およびべき指数を4/3と1.4とした場合の式(係数はそのまま)を併せて示している。

渦相関法による測定値は、これまでの提案式と比較的良く一致している。熱収支法の精度が相対的に悪くなっている理由は、直接法か間接法かの違いが大きいと思われるが、もう一つ降雨時のみしかデータをカットしていないため、

潜熱=0の仮定が必ずしも成り立っていないデータが含まれていることも要因と思われる。また、放射収支の測定位置とサンプル位置の僅かなズレに伴う日影の微妙な時間的ズレが、残差をとる場面で誤差となっている可能性もある。

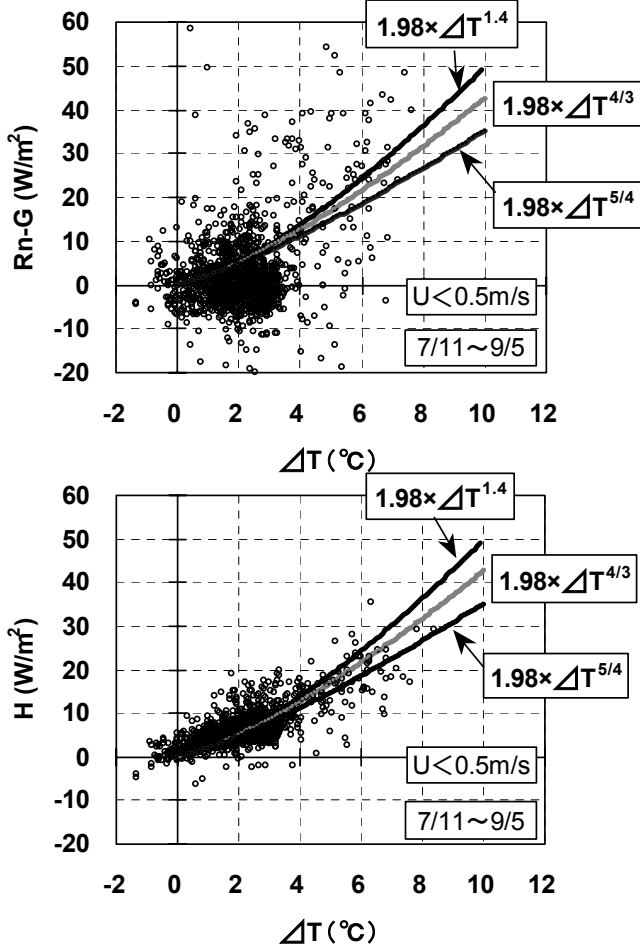


Fig.7 顕熱フラックスと温度差の関係  
(近傍風速0.5m/s以下、上：熱収支、下：渦相関法)

### (3) 対流熱伝達率の検討

ここでは、比較的良好な傾向がみられた渦相関法による測定結果について検討する。Fig.8は温度差との関係、Fig.9は近傍風速との関係を示したもので、やはり既存式の関係を示している。なお両図では、熱伝達率の精度が悪くなる温度差が小さい条件はカットし、 $\Delta T > 2^\circ\text{C}$ についてのみ表示している。風速との関係を見ると0.5m/s以下でも風速との対応関係が見られることから、純粋な自然対流ではなく、強制対流との共存状態であることが示唆される。

Fig.9の $\alpha_c = 3.68U^{4/5}$ は伝熱工学に用いられる以下の無次元式に、空気の物性値と代表長さとして測定高さの4mを代入した場合に導かれる強制対流に対する式である。

$$Nu_x = 0.0296 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re_x^{4/5}$$

ただし、壁面から10cmという距離で渦相関法を適用するには、渦径との関連で検討が必要である。5cmというスパン長さと10Hzというサンプリング周波数に対してフラックスに寄与する渦径が十分大きくないと、渦相関法によ

るフラックスは過小評価となる。水平面に関してこのような測定高度の影響を検討した結果<sup>2)</sup>によれば、地上10cmという測定高さでは、顕熱フラックスが20%~30%過小評価となっている。この式より下にプロットがみられるのは以上のような理由と考えられる。

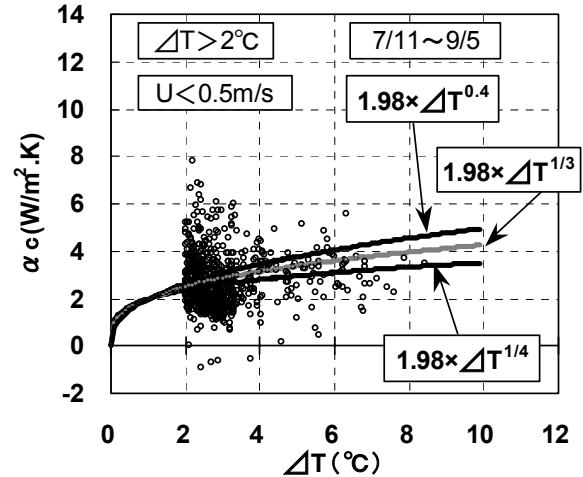


Fig.8 対流熱伝達率と温度差の関係(渦相関法)

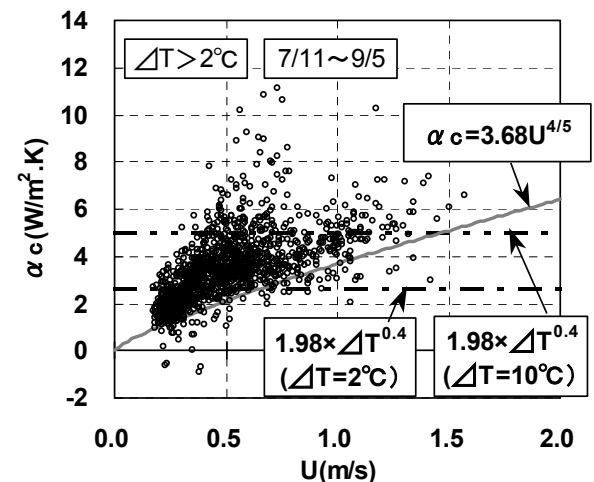


Fig.9 対流熱伝達率と近傍風速の関係(渦相関法)

### (4) 境界層厚さについて

伝熱工学の資料では、垂直平板の自然対流境界層の厚さは、助走距離1mで3cm程度であると示されている。今回、2階ベランダの軒下でも気温を測定しているため、 $\Delta T$ が大きかった日の近傍気温との差を検討してみた(Fig.10)。日射を受け壁表面温度が上昇する時間帯に、近傍の気温も軒下に比べ最大で $2^\circ\text{C}$ 程度上昇している。超音波風速温度計は原理的に日射の影響は受けないことから、壁近傍の気温が上昇していたと判断でき、従って少なくとも壁から10cmの位置は境界層の十分内部であったといえる。また、Fig.10には同位置の合成風速と上向き成分風速の変化を示した。深夜~早朝は上昇気流がほとんど唯一の風速成分とみなせ、日中についても温度差に対応して上昇気流が変化している傾向が認められる。

以上のことから、実際の建物外表面では、既存実験デー

タとは異なる、より厚い境界層が形成されていると考えられる。

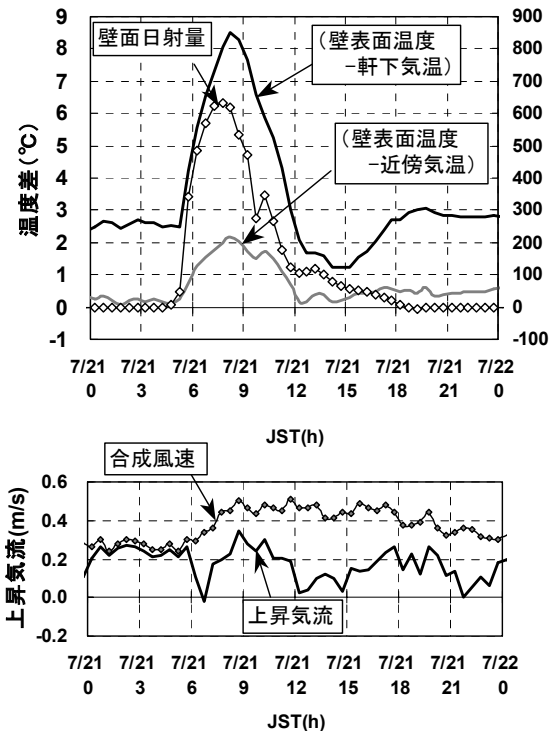


Fig10 壁面近傍の気温および風速変化の例

### 3-2. 西壁面における実測結果

#### (1) 温度差とフラックスの3高度同時測定

Fig.11に1月2日を例に、壁表面の熱流板実測値と計算から求められた伝導熱流束を示す。各階とも時間変化はよく再現しているが、日中、計算値は実測値より  $10\text{W/m}^2$  小さくなる結果となった。

#### (2) 壁面近傍の下降気流と温度の関係

Fig.12に12月29日の21時40分からの5分間を例に超音波風速温度計による近傍気流と気温の関係を示す。左側の図は2階の結果で、normalは法線方向成分風速、upwardは上昇気流を表す。気温が下がり始めると、遅れて下降流が始まる。下降流がピークに達するとその場の冷気が無くなり気温上昇が起こり、下降気流が弱まって最後は止む。このパターンの繰り返しになっている。なお、法線方向成分はほとんど0で、空気がほとんど混合しないで下降していることがわかる。右側の図は、2階と3階の気温変動を比較したもので、壁近傍の冷気層が形成される時間が3階の方が短く、冷気層が下から形成されていく様子がわかる。このように、壁近傍の冷気形成に関して興味深い測定結果が得られた。

**4. まとめ** 東壁面の熱収支による対流熱フラックスの算定法に関しては、精度の面で検討の余地が残された。熱収支法では  $10\text{W/m}^2$  程度が精度限界と考えられることから、壁面の日射反射率が高くフラックスの絶対値が最大

$50\text{W/m}^2$  程度と小さかったことが結果的に大きな要因であった。一方、渦相関法は鉛直壁面に対しても有効で、実在壁面からの顕熱フラックスの概略値と境界層の概要を把握することができたことは成果といえる。西壁面においては、3高度測定は条件がいい日でも2~3時間しか日射が当たらず、時間範囲が短く、対流熱伝達率を求めるには難があった。試行錯誤を重ねたが、西壁面においてはこれ以上の解析は行なえず、自然対流時の伝達率の高さ方向変化は、夏の測定に委ねるといった結果となった。

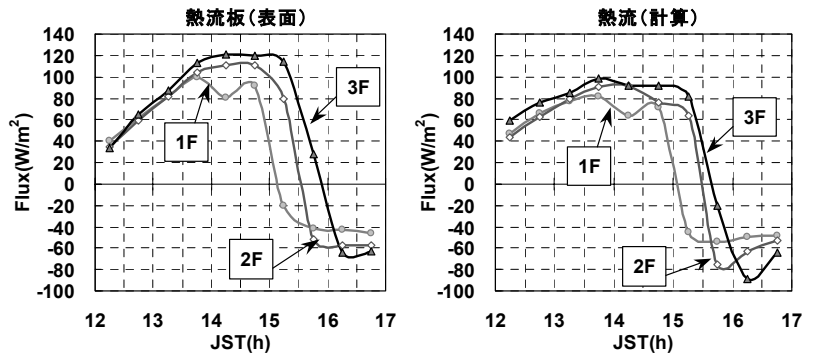


Fig.11 伝導熱流束比較

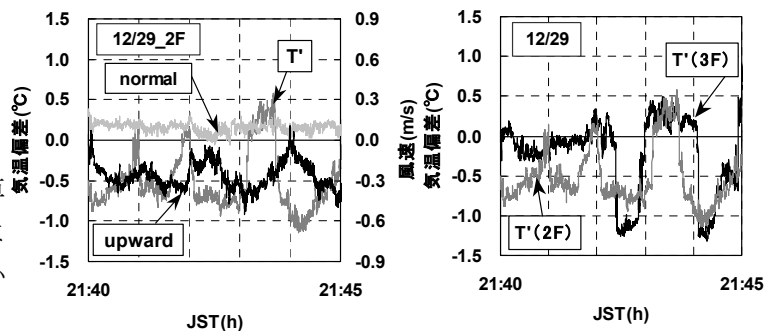


Fig.12 下降気流と温度の関係

#### 参考文献

- 1) 成田健一・野々村善民・小笠 顕、自然風下における窓面對流物質伝達率の実測—都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その1)、日本建築学会計画系論文報告集、第491号、49-56、1997
- 2) 成田健一・野々村善民・小笠 顕：都市表面における対流物質伝達率に関する風洞実験—都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その2)、日本建築学会計画系論文報告集、第527号、69-76、2000
- 3) 小林定教・黒谷靖雄：夏季の屋上面对流熱伝達率に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集、第465号、11-17、1994
- 4) 竹田佳香・松尾 陽・田川裕一：建物外表面の対流熱伝達率に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(環境)、5-6、1997
- 5) 成田健一・西川朋志：渦相関法によるアスファルト舗装面の顕熱流の実測、日本建築学会中国支部研究報告集、第19巻、321-324、1995

審査委員(主査) 教授 成田 健一  
 審査委員(副査) 教授 市橋 重勝  
 審査委員(副査) 助教授 川村 清志