

# 「知って得する身近な Science」著者の西尾宣明氏ご逝去

当協会の機関誌 No-Dig Today で「知って得する・身近な Science」を連載中の西尾宣明先生が2019年2月13日早朝逝去されました。享年86歳でした。

謹んでお知らせ申し上げます。

西尾先生には、日本非開削技術協会誌「非開削技術」No.2から前号の No-Dig Today 106号まで、毎回5～6ページにわたり1号も欠かさず連載をされ、当協会が発足した平成元年より長年にわたり協会の発展に記事連載の形でご協力をいただきました。その内容は、日頃の生活で身近に感じる興味深いところに話題・視点を合わせ、ロジカルな解説を添えられており、技術テーマでありながらだれでも分かりやすいような文章やイラストを入れて紹介されており、学術誌として毎号盛り上げていただきました。

「知って得する・身近な Science」の連載は前号の No-Dig Today 第106号で最後となります。

西尾先生は、福島県双葉郡浪江町出身。1956年に東北大学機械工学科卒業後、東京ガス(株)へ

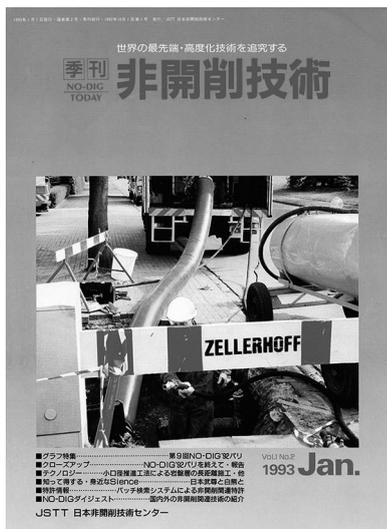
入社。ガス製造工場建設、ガス導管(本管)の建設、維持管理の業務に従事され、1989年(平成元年)に「埋設管の地震時挙動の研究」により学位を取得(東北大学・土木工学)。1994年(平成6年)に東京ガス(株)を退社された後も、当協会の機関誌へ連載にご協力いただきました。

西尾先生は、絵を描くのもプロ並みで、原稿のイラストは全てご自身でお描きになっていらっしゃいました。最後の1か月程は入院なさっていましたが、病室にスケッチブックを持ち込み、与太郎さんを描いていらっしゃいました。温かみのある絵は先生のお人柄そのものでした。

これまでのご活躍に敬意と感謝を表すとともに心よりご冥福をお祈り申し上げます。

(一社)日本非開削技術協会事務局

No-Dig Today (1993年1月1日発行)へ掲載された連載第1回を在りし日の西尾先生を偲んで、ここに再掲させていただきます。



機関紙 No-Dig Today の前身「非開削技術」No.2 (第2号) が初掲載

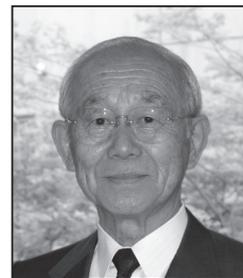


初連載の紹介

やま と た け る  
**日本武尊と白熊と**



焚き火はなぜ暖かい？



工学博士 **西尾 宣明**

元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

**焚き火はなぜ暖かい？**

昔、冬は落葉焚きの季節でした。庭の落葉を掻き集めて火をつけ、その中に栗や芋を入れて——というのが田舎での少年時代の恒例でした。少し前まではお菓子の空き箱、洗剤の空き箱、こないだ買った電気掃除機の空き箱、スーパーでの買物の包装等々、家の中を整理するための焼却を月に1回ぐらいずつするような具合で、焚き火の季節感などはすっかりどこかへ行ってしまいました。それでも、年の瀬になると、猫の額ほどもない庭から枯れ葉・枯れ枝を拾い集めて掃除をし、ごみと一緒に燃やすのが我が家の年中行事の一つでした。

幸い、我が家は不使な郊外にありますので、焚き火の場所に困ることはありません。道を隔てた畑の縁で、煙が流れて行かないかと近所に気兼ねすることもほとんどなく、思いっきり火を燃やすことができます。大きな段ボール箱全体に火がまわり、威勢よく炎が立ち上がると、寒い冬の日でも顔が火照るほどの暖かさを感じます。反対に、よく燃えるものがなくなってくると、かなり近くまで寄ってもあまり暖かく感じられません。そこで、近所の子供たちが一生懸命枯れ草などを拾ってきては、火の中に投げ入れてくれるのですが、火のまわりに散らばった枯れ草をちゃんと燃えるよう

にするため、火に顔を近づけてそれを整理し、フーフーと燠<sup>おき</sup>を吹くのは私の役目です。顔を近づけると、小さな炎でもかなりの熱さを感じられます。



このようなことさえも、今では昔話になってしまいました。役所がごみを回収するようになって、自分でごみを燃やすこともほとんどなくなったからです。

ところで、皆さんに質問を一つ差し上げたいと思います。

焚き火に当たって暖かく感じるのは、まわりの空気が暖められるからでしょうか？それとも——。

これは大変失礼な、子供騙しのような質問でした。熱い炎は浮力によって勢いよく上昇し、周囲の空気に対流を起こします。対流によって地面に近いところの空気は焚き火のほうに引き寄せられ、その一部は物の燃焼を助けて燃焼生成物（炭酸ガス、一酸化炭素、水蒸気など）を作り、残りは炎に熱せられて軽くなり、炎と一緒に上昇して行きます。ですから、焚き火に当たっている人のほうに暖かい風がやってくることは決してありません。風が吹いて、炎が人のほうに向かい、煙にむせて涙を流す——という場合もありますが、これは問題外です。

焚き火の熱はほとんど全部が放射（熱放射。昔は輻射と言いましたが——）によって人のほうに運ばれるのです。放射は光と同じく透明な媒体の中を直進します（むしろ、光が放射の一種と言うべきですが）。そして焚きの炎はやや白っぽいオレンジ色に見えますが、それは炎からの熱放射の中に、目に見える波長の放射がたくさん含まれているからです。炎の温度が高いほど青みを帯びた白い光が多く含まれるようになります。焚き火の中に発泡スチロールなどのプラスチック製品が入っていると、白く輝いて燃えるのを見ることができます。それはプラスチックが燃える時に高熱を発生するからです。

焚き火からの放射は光の速さで四方八方に飛び出し、風の影響などまったく受けずに一直線に空間を突っ切って行きます。ですから、焚き火に向いているほうの顔や手足は火照るほど熱いのに、背中側は少しも暖まらないことになるわけです。

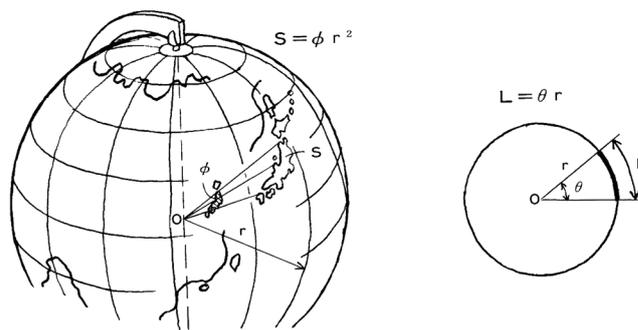
### 熱さは炎の見え方による

火に当たるとき暖かさ（熱さ）を感じる度合いは何で決まるのでしょうか。それは、大雑把に言って三つの条件で決まります。一つは炎の温度で、もう一つは炎がどれだけ大きく見えるかということです。絶対温度  $T$  の物体から出る熱放射の強さは  $T$  の4乗に比例することが知られています（ステファン・ボルツマンの法則）。そして、温度が違う二つの物体の間で放射によって伝わる熱量は二つの温度の4乗の差と、低温側の物体の表面から高温側の物体の表面がどれだけ大きく見えるかの程度に比例します。これを式にすると

$$Q_{HC} = A_C F_{CH} (T_H^4 - T_C^4)$$

のようになります。ここで、 $Q_{HC}$  は、温度が高いほう（H）から低いほう（C）に伝わる熱量を、 $A_C$  は温度が低いほうの物体の表面積を、 $F_{CH}$  は低温側の表面から高温側の表面を眺めたときにどのくらい大きく見えるかということを示す係数を、また、 $T_H$  は高温側の温度、 $T_C$  は低温側の温度を示します（ $F_{CH}$  の中に、物体表面の放射についての性質を示す係数＝放射率も含めて表しています）。

物がどれだけ大きく見えるかを示す尺度として立体角（単位＝ステラジアン）という単位があります。こ



立体角と平面角

れの定義を一口で説明するのは難しいので、逆に、立体角がどんな性質のものかを説明しましょう。

点Oを中心とする半径  $r$  の球面を考えます。この球面の上にある図形が描かれていて、その面積を  $S$  とします。点Oから図形  $S$  を見るときの立体角を  $\phi$  と表せば、 $r$  と  $S$ 、それに  $\phi$  の間には次の関係があります。

$$S = \phi r^2$$

これは、むしろ、 $S$  と  $r^2$  の比 ( $S/r^2 = \phi$ ) によって立体角  $\phi$  を定義するというのが正しい言い方でしょう。

ところで、 $S$  を球面全体の面積とすれば、よく知られた公式によって

$$S = \pi r^2$$

と表されます。ですから、球面全体を見るときに立体角は  $\phi = 4\pi$  ステラジアンということになります。これは定数で、半径  $r$  の大小には無関係です。このことは、相似な立体図形に対する一般の  $\phi$  の値についても言えます。つまり、距離  $r$  の位置にある面積  $S$  の図形に対する立体角  $\phi$  は、距離が2倍 ( $2r$ ) で面積が4倍 ( $4S$ ) の図形に対する立体角と同じです。立体角は図形までの距離や図形の面積を直接表すものではなく、その図形が「どれだけ大きく見えるか」だけを示す値なのです。

球面での立体角  $\phi$  と面積  $S$  の関係は平面上の円についての角度  $\theta$  と円周上の弧の長さ  $L$  の関係と似ています。弧の長さは

$$L = \theta r$$

と表されます。そして、円周一回りの長さが

$$L = 2\pi r$$

で、円周全体を眺めるときの角度は  $\theta = 2\pi$  ラジアンとなっています。この角度 ( $360^\circ$  に相当する) は円の半径  $r$  の大小には無関係な定数です。



このように定義された立体角  $\phi$  を使って物がどんな大きさに見えるかを表すことができますが、焚き火の炎から感じる熱さは炎がどんな大きさに見えるか、つまりどんな大きさの立体角に見えるかによってきまるのです。

炎の大きさが2倍 (面積は4倍) でも、その距離が2倍離れていれば立体角は同じになりますから、同じ熱さを感じられることとなります。

### 黒焦げになった？ 日本武尊

昔、日本武尊が東国の夷を征伐した時、今の静岡県焼津のあたりで敵に追い詰められ、草むらに火を放たれてしまいました。火は武尊の周囲を取り囲み絶体絶命の危機に陥りましたが、彼が草薙剣で草を薙ぎ払うと火は敵のほうに向かって燃え進み、形勢逆転して勝利を取めることができました。それ以来、草薙剣は天皇家の三種の神器の一つとして祭られることになったのだそうです。

神代の昔話に理屈っぽく目くじらを立てると言われるかも知れませんが、私には、そのとき日本武尊が焼け死にもせず生き延びられたことがとても腑に落ちません。かりに敵が放った火は高さ3メートルの炎を上げ、武尊から10メートルに迫って周囲360度を包囲していたものとします。そのとき武尊の体の表面から見える炎の大きさは、おおよそ次のように計算されます。

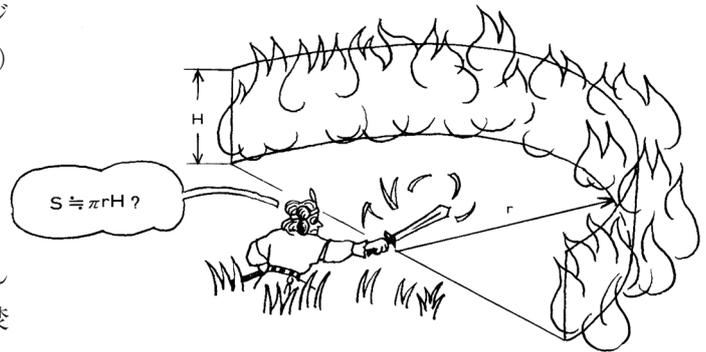
武尊のほうを向いている炎の面を図のような円筒の一部として見れば、その面積は

$$S \approx \pi rH$$

となります。これから、炎を見る立体角は

$$\phi = \frac{S}{r^2} = \frac{\pi H}{r} = 0.94 \text{ ステラジアン}$$

となります。これがどれほど大きな数字なのかは次のような例で示すことができます。



火に囲まれた日本武尊

(1) 太陽を見るときにの立体角は約0.00007ステラジアンです0.94ステラジアンはその約13,000倍です。つまり、太陽を13,000個一度に見るような大きさに相当します。もっとも、草が燃える時の炎の温度は絶対温度にして1,200度ぐらいなのに対して、太陽の表面積は約6,000度ですから、感じる熱さは (受け取る熱景に比例するものとして) その約1/625程度になります (熱量がほぼ温度の4乗に比例することに注意)。結局、日本武尊はかんかん照りの太陽20個分の熱を前方から受け、背中にも同じ熱を受けている勘定になります。これにはとても耐え切れないはずですよ。

(2) 3m離れた位置の炎だったらどんな大きさが0.94ステラジアンになるかを計算してみると、幅4m、高さ2mということになります。これは6畳の部屋の広い方の側面 (幅2間、高さ1間と少し) 全体が真っ赤な炎になっていて、自分はその反対側に立ち竦んでいるのと同じ状態です。このときどれほどの熱さを感じるか、想像するだけでも焼け死んでしまいそうです。しかも、同じ炎が後ろにも迫っているのです。



いくら草薙剣で炎を押し戻したとしても、熱放射はやはりこちらに向かってやってきますから、その間に日本武尊が焼芋のようにならなかったのは実に不思議な話です。

### 熱放射を防ぐには――

太平洋戦争の終り近く、東京が空襲を受けて焼け野原になったとき、日本武尊と同じような経験をした人のお話を聞いたことがあります。当時学生だったその

人が、下宿に向かってだんだん近づいてくる火の手を逃れて交差点を横切ろうとすると、その通りの彼方何キロメートルか向こうに火の壁が見え、通りに沿って熱風が通り抜けているように思われたそうです。マントを防火用水の水で濡らして頭から被り、一目散に駆け抜けると、その間にすでにマントは乾いてしまっているのだそうです。炎を見る立体角が大きいとどんな恐ろしいことになるかを、このお話は証明しています。

ところで、熱放射を防ぐ方法の一つとして、私が学生の時に先生が次のようなことを教えてくれました。それは、高温の物体と、熱を受取る側の低温の物体の間に、薄い鉄板などをおくだけなのです。その板は熱容量が小さいのですぐに熱くなりますが、低温の物体に伝わる熱量は間に何も無い場合の半分になります（厳密には、高温の面と低温の面がほぼ同じ面積で向き合っているときに成り立つことですが）。このことは、熱放射の伝わり方が、高温の面から挿入した板へ、そしてその板から低温の面へという二段階の現象になるためです。先のステファン・ボルツマンの式を使って、高温側から板（中間の温度になります）に伝わる熱量と板から低温側に伝わる熱量とが等しいという条件で計算すると比較的容易にそれを確かめることができます。板をもう一枚挿入すると、伝わる熱量は1/3に減少することも、同じ計算で確かめられます。

ただし、このお話は定常状態、つまり低温の物体の温度が熱を受け取っても変わらない場合に限られます。たとえば、高温側がガスの炎で低温側がボイラーの水管のような場合です。水管が受け取った熱は中の水に移され、水蒸気を作るために消費されますが、次々に新しい水が補給されますので水管の温度は変わりません。ところが、大和武尊のように自分を冷却してくれるものがなにもない場合には、自分自身がどんどん熱を蓄え、温度が上がって、大変なことになるはずで

## 霜が降りる——放射冷却

冬になると、天気予報で放射冷却という言葉をよく聞きます。きびしい放射冷却を受けると、地面は固く凍ったようになり、外に立てば足元から冷えてくるのが分かります。この放射冷却は、例のステファン・ボルツマンの法則による熱伝達が地面と宇宙の間に起き

ているのが原因なのです。ビッグ・バンに続く断熱膨張の結果、現在の宇宙の温度は絶対温度で3度（3Kと表します）まで下がっているのだそうです。

これに対して、地面の温度は270K前後（摂氏零下数度）ですから、宇宙に対する放射熱の供給源として十分な資格を持っています。しかも、地面から宇宙を見る立体角は $2\pi$ ステラジアンに近い大きさで、とても効率よく放射が伝わる条件を備えています。また、土の熱伝導率がかなり小さいので、地表面から熱が奪われるのに対して地中からの補給が間に合わず、地面の温度はどんどん下がって行きます。気温が摂氏0度以上のときでも地面が凍ることがあるのは、伝熱の相手が3Kというべらぼうに低い温度の物体(?)だからなのです。

放射冷却は大気が非常に乾燥していて、星がきれいに見える夜に起きるものです。水蒸気（水でも氷でも同じですが）は放射に対して完全に透明ではなく、放射を吸収したり吐き出したりする能力を持っています。ですから、空気が湿っていると（その時、大抵曇っていますが）地面と大気中の水蒸気、それに水蒸気と宇宙の間の放射が生じて、丁度先の例のように高温と低温の物体の間に板を挿入したのと同じ状態になります。そして、放射冷却は起きにくくなります。

星空の夜には放射冷却がきびしく、地面の温度は容易に氷点下に下がります。そして、地表面近くに漂っていた水蒸気は冷やされて地面のうえで凍ります。これが霜というものです（宇宙空間への熱放射を妨げるのは10kmという厚い大気層に含まれる水蒸気で、地表面近くの水蒸気だけならほとんど妨げになりません）。

霜はまた、降りやすい場所と降りにくい場所があることに気がきます。降りやすいのは枯れ草の上、乾燥した地面の上（とくに、鋤起こした畑の土くれなどの出っ張った部分など）、空き地に置かれた材木や板切れの上、それに屋根の上などです。屋根の上は宇宙に対して見晴らしがいい（宇宙を見る立体角が大きくとれる）ので絶好の条件になっていますが、よく見ると、最近の、断熱材をしっかりと使っている屋根ほど霜が降りやすく、一見寒々としたあばら家の屋根のほうが霜のつき方が少ないようです。つまり、よそから熱の補給を受けにくい条件のところに霜が降りやすいことが分かります。外に置いた自転車の屋根に真先に夜露や霜が降りるのは、地面や車体の他の部分からの熱の

補給を受けにくく、ほとんど孤立無援の状態にあるからです。その次に悪条件なのが後部のトランクルームの上面、次にエンジンルームの蓋で、そこにも遅かれ早かれ霜が降りることになります。また、いくら風通しがよく冷えそうな感じの場所でも、両側に建物が迫っていて空の見える面積が少ない場所には滅多に霜は降りません。霜が降りるためにはある程度気温が低いことも必要ですが、宇宙を見る立体角が大きくて放射冷却が起きやすいことが不可欠の条件なのです。

### 白熊はなぜ白い？

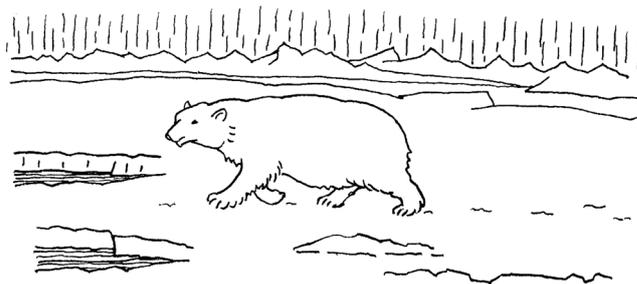
黒っぽいものは放射を吸収しやすく、白っぽいものは放射を反射しやすく吸収率が低いことはよく知られているとおりです。一方、物体は自分の温度の4乗に比例した強さで熱を放射しますが、放射の強さ（放射率）はまた吸収能の大きさに比例することがボルツマンによって証明されています。

高い温度の物体から熱を吸収すると同時に自分も熱を放射しているわけですが、差引き自分が受け取る熱量が最初に書いた式で表されることになります。そして、吸収能が大きいほどFCHと書いた係数も大きくなりますから、同じ温度差でも受け取る熱量が多くなります。太陽熱で物を暖めようとするとき黒い色を塗ったりするのはその吸収能を大きくするためなのです。

○ ○ ○

私の会社で、一時同じ場所で仕事をしたことのあるNさんから、ステファン・ボルツマンの法則をめぐる面白い話をうかがったことがあります。その中に、Nさんが学生するとき、先生から「北極の白熊はなぜ白いか」という問題を出された話がありました。結局先生から正解を聞かないままに卒業してしまったそうですが、これを私に考えて欲しい（そして「導管技報」に書いてくれないか）というお願いを受けたことがあります。

寒い北国で太陽の熱を効果的に吸収するためには、白熊も黒い毛皮を着ればよいと思われるのに、なぜ白い毛皮を着ているのでしょうか。神様はいつでも合理的に物を作っていますから、白熊が白いのにも何か理由があるはずで、（参考までに、白熊の正式な名前



白熊の住む世界

は北極熊です)

それから長い間、この問題は私の胸に引っかかっていましたが、なかなか納得のいく説明を見つけることができませんでした。ところが、たまたま天気予報にでてくる放射冷却のことが気になって考えているうちに、ようやくその答えが分かったように思えてきたのです。あまり自信はありませんが、私の考えは次のようなものです。

○ ○ ○

まず、保護色ということが考えられます。あたり一面真っ白い氷と雪の世界では、体を白くして敵や獲物から身を隠すことが生存のために好都合に違いありません。しかし、こんな答えでは面白くも可笑しくもありません。やっぱりステファン・ボルツマンの法則にからんだ、しかももっともらしい答えが欲しいわけです。第一、北極には黒っぽい色の動物だってたくさんいますから、保護色説だって怪しいものです。

そこで、こんなふうを考えてみました。

地球上には平均して1分間に1cm<sup>2</sup>当たり約2カロリーの熱が太陽から届いています。しかし、北緯60度よりも北になると、たとえ真夏でも太陽は50度ぐらいの高さにしか上がりません。そのため太陽の光は人気の層を斜めに突っ切ってくることになり、赤道近くと比べてずっと弱い光しか届きません。まして、冬になると太陽は地平線の下に隠れて、時々ちょっと顔を出すだけです。このように、太陽の光がいくらも届かない世界では、一生懸命それを捕らえようとするよりも、食物から得た熱をなるべく外へ逃がさないようにするほうが賢い考え方なのではないでしょうか。

まして、この広い世界に自分より温度が高いものは、太陽以外には何一つ存在しないのです。空も海も、

そして氷の平原もみな自分より低い温度で、ステファン・ボルツマンの法則に従って白熊から熱を奪おうと周りを取り囲んでいるのです。温度の高低の関係を逆にすれば、まるで火に包囲された日本武尊のような状況にあるわけです。ですから、放射率（したがって吸収能も）の小さい白い毛皮を着て、体温の損失を防ぐのがはるかに有利なのです。

ざっと、これが白熊の問題に対する私の答えです。

ところが、ここにまた新しい問題が見つかってしまいました。それは、「赤道に近い国の人たちは色が黒く、北欧など緯度が高い国の人ほど色が白い（皮膚も髪の毛も）傾向がありますが、それはなぜでしょうか」というものです。このことも太陽の光に関係していることは確かです。ただ、白熊の原理（ステファン・ボルツマンの法則）がそのまま当てはまるかどうかは疑問です。もっと別な理由が絡んでいて、それほど単純なものではなさそうです。

道路を掘らない技がここにある

# No-Dig Today



## 広告掲載のご案内

本誌「No-Dig Today」『工法ナビ』への広告掲載をご希望の方はNo-Dig Today 編集室またはJSTT事務局までお問い合わせください。

発行年4回：4月・7月・10月・1月の1日発行  
 広告サイズ： 1頁＝縦255mm×横175mm  
 1/2頁＝縦120mm×横175mm

### 広告のお申し込み・お問合せ

No-Dig Today 編集室  
 (株)LSプランニング .....  
 Tel 03-5621-7850 Fax 03-5621-7851  
 (一社)日本非開削技術協会事務局 .....  
 Tel 03-5639-9970 Fax 03-5639-9975

## 環境にやさしい非開削技術

### ■ No-Dig Today 広告掲載料金

掲載場所	サイズ	刷色	掲載料金
表2	1頁	カラー	200,000円
表3			180,000円
表4			250,000円
前付	1/2頁	モノクロ	150,000円
後付			1頁
			70,000円

※広告掲載料金は1掲載当たりの金額です。(消費税別)

### ■ 工法ナビ バナー広告掲載料金

掲載場所	掲載期間	掲載料金
TOPスペース	6ヶ月	60,000円
技術区分内スペース	上半期(4月1日～9月30日)	18,000円
	下半期(10月1日～3月31日)	

※広告掲載料金は1掲載当たりの金額です。(消費税別)