

報告 (Note)

2015 年夏季の大涌谷周辺地域における SO₂ 濃度分布の推定

池貝隆宏
(調査研究部)

Estimation of the SO₂ distribution in surrounding area of Owakudani in 2015 summer

Takahiro IKEGAI
(Research Division)

キーワード：火山ガス，二酸化硫黄，ガウス型プルームモデル

1 はじめに

箱根山は東西 8km，南北 12km のカルデラを有する火山であり，中央火口丘で主峰の神山（1,438m）の北側には活発な噴気地帯である大涌谷がある。大涌谷では 2015 年 4 月 26 日から火山性地震が増加するとともに，二酸化硫黄（SO₂）を含む火山ガスの噴気活動も活発化したことから，5 月 6 日に噴火警戒レベルが 1 から 2 に引き上げられた¹⁾。そこで，神奈川県では SO₂ の常時監視体制の見直しを急遽行い，発生源としての監視を行うため，近傍の一般大気環境測定局である宮城野局に SO₂ 自動測定機を設置し，6 月 26 日から常時監視を開始した。その直後の 6 月 30 日，大涌谷で小規模な噴火が観測され，噴火警戒レベルが 3 に引き上げられた¹⁾。

その後，宮城野局で比較的高い濃度が測定されたことから，このときの大涌谷周辺地域の濃度分布を試算した。汎用的な拡散モデルを適用し濃度推計を行ったので，その結果を報告する。

2 宮城野局における SO₂ 濃度の推移

噴気口は宮城野局からの方位角 246°，西南西方向からやや南西寄りに位置し，その距離は 2.8km である。2015 年 6 月 27 日から 12 月 31 日までの宮城野局の SO₂ の 1 時間値の推移を図 1 に示した。

SO₂ の 1 時間値の環境基準値は 0.1ppm であるが，これを超えたのは，7 月 1 日から 23 日の期間に 42 時間あった。最高濃度は 7 月 14 日 14:00 の 0.147ppm であった。7 月 13 日，14 日，17 日，18 日，19 日，22 日及び 23 日の 7 日については，日間平均濃度が日平均値の環境基準値 0.04ppm を超過していた。その後は散発的にやや高い濃度が測定されるものの，ピークの濃度も漸減し，環境基準を超える状態は発生していない。なお，火山性地震も減少したため，9 月 11 日には噴火警戒レベルが 3 から 2 へ，11 月 20 日には 2 から 1 へ引き下げられた¹⁾。

図 1 には，噴気口からほぼ北東方向，外輪山の明神ヶ岳稜線を越えて 11.5km 離れた地点にある南足柄市生駒局の濃度も表示したが，宮城

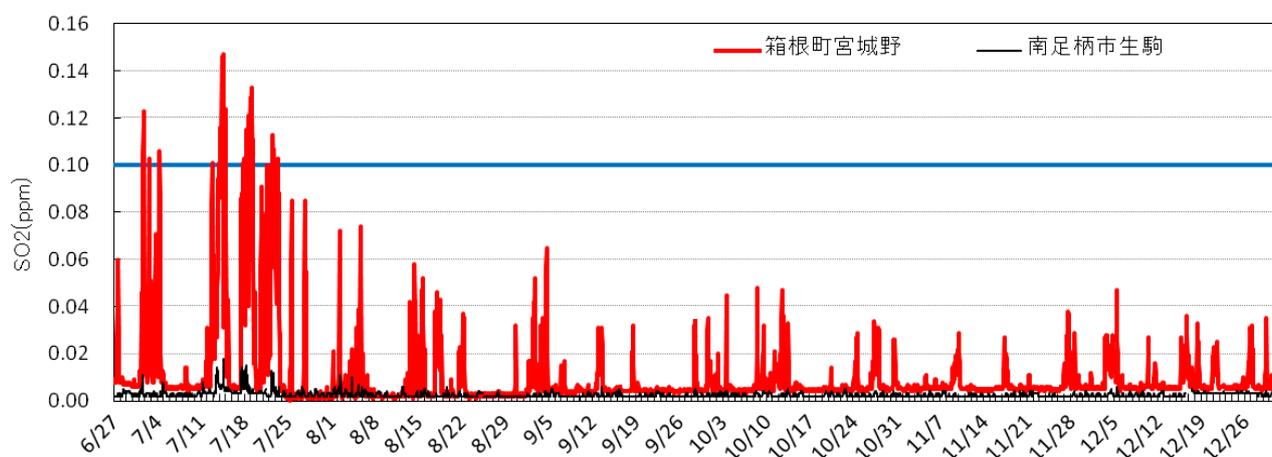


図 1 2015 年夏季における箱根周辺地域の SO₂ 濃度（1 時間値）の推移

野局で高濃度が測定された時期に生駒局の濃度もわずかながら上昇しており、火山ガスが外輪山を越流する現象が発生していた。なお、小田原市や山北町にある他の隣接局では、こうした現象は確認できなかった。

3 方法

3.1 使用したモデル

火山ガスの挙動を精度よく再現するには3次元気象モデルと拡散モデルを組み合わせたシミュレーション²⁾が多用される。しかし、本稿では実務的にできるだけ簡便に濃度分布の概況を把握することを目的とし、高度なシミュレーションによらずに汎用的な拡散モデルを適用することを試みた。拡散計算に使用したモデルは、環境汚染の推計で頻繁に利用される低煙源工場拡散モデル METI-LIS ver.3.2³⁾である。

3.2 解析対象期間

2で述べた状況を踏まえ、6月27日1:00から8月31日24:00までの1,584時間を対象に大涌谷周辺地域のSO₂濃度分布を推定した。

3.3 拡散モデルの適用方法

本稿のケースでは、発生源の排出強度に関する情報がないため、まずこれを推定する必要がある。拡散モデルはソースモデルであり、指定位置における濃度は発生源からの距離と方位、排出強度及び気象の関数として記述される。本稿のケースでは発生源からの距離と方位、気象及び指定位置の濃度が既知であることから、目的変数である指定位置の濃度、すなわち宮城野局の予測濃度が実測値と一致するまで試行錯誤的に排出強度を変えて拡散計算を行い、SO₂放出量を逆推定した。

拡散計算に使用した METI-LIS はガウス型プルームモデルであり、平地の拡散状況の再現を前提としているため、本稿のケースのような起伏のある地形に対してそのまま適用しても正確な濃度推計値を得ることは困難である。しかし、本モデルには計算領域の地形を考慮する機能があるため、計算条件を工夫すれば、ある程度実際の状況に近づけた大まかな推計ができる可能性があると考えられる。

一般的に、ガウス型プルームモデルに入力できる風は常に同一高度で水平に一樣に吹く前提

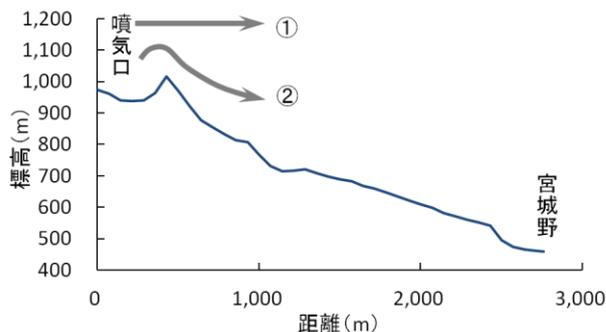


図2 噴気口-宮城野間断面図

とされる。図2に噴気口-宮城野間の断面図を示したが、モデルでは図中①の矢印で示した風を想定している。しかし、今回の場合は発生源である噴気口と推定地点である宮城野は標高差が約510mあり、この間を吹く風は②の矢印で示したような斜面を吹き降ろす山谷風となると考えられる。①の場合、煙軸の高度は一定であるが、実際は②のように煙軸をやや下向きに傾斜させた拡散を再現しなければ実態に近づけることができない。こうした推計法は METI-LIS に実装されていないので、別の方法で煙軸を下げる効果を見込む必要がある。

煙軸を下げる、すなわち鉛直下向きの拡散を大きめに補正して計算する方法としては、
 ア 発生源の標高を下げる
 イ 拡散幅を通常より大きく設定する
 の2通りの方法が考えられる。

アの方法は、発生源だけが標高の高い位置にあり、計算点はほぼ同標高である場合には適用できるが、今回のケースでは図2で宮城野の例を示したように、計算点の濃度推計を行ったすべての地点で標高が異なるため、適用できない。そこで、イの方法を用いることとした。

ガウス型プルームモデルでは、拡散幅は大気安定度に依存することから、気象データから算出した大気安定度に応じて拡散幅が計算される。METI-LIS では、短期気象データの場合には、大気安定度を直接指定して拡散幅を設定する方式であり、大気安定度には Pasquill 安定度階級を用いている。そもそも Pasquill 安定度は草丈の短い平らな草原で行った実験から導かれた拡散幅と大気安定度の関係であるため、これをそのまま起伏のある山の斜面に当てはめることに無理がある。そこで、これを変更して大きな拡散幅で拡散計算できるように設定することとした。

本モデルでは、短期気象で設定する Pasquill 安定度階級は A (強不安定), B (並不安定),

C (弱不安定), DD (中立昼間), DN (中立夜間), E (弱安定), F (並安定) の 7 区分あり, 拡散幅は A から F へ順次小さくなる。

今回計算対象としたのは後述するように 138 ケースあるが, 安定度を後述する参考に示した方法で区分したところ, A が 1 時間, B が 19 時間, C が 31 時間, D (=DD+DN) が 87 時間であった。安定度 C 又は D で拡散計算を行うと, 拡散幅が小さすぎるためにプルーム下端は宮城野の計算点高度に届かず, この設定で放出量を逆推定すると放出量は過大に推計されることになる。また, 安定度 A で計算を行った場合, プルームは遠方に届かないため, やはり逆推定計算では放出量が過大になる。

以上のことから, 安定度階級を一律 B (並不安定) に設定した。算出濃度は, 計算方法の制約に起因する誤差を含むものの, 設定可能な 7 区分の中では一番現実に近い計算値が得られるものと考えられる。

3. 4 その他の拡散計算条件

3. 4. 1 計算領域

噴気口周辺の宮城野, 強羅, 仙石原等の人の居住地を含めた領域を計算するため, 図 7 に表示した東西方向 6,800m×南北方向 4,800m の領域を設定した。3. 3 で述べた計算方法の制約に係る誤差及び後述する発生源設定の誤差を考慮し, 領域の縁から 100m 間隔で計算点を設定した。空間分解能が 100m となるため, 沢筋など山腹の微地形は計算結果に反映されない。各計算点の標高を国土地理院の地理院地図 (電子国土 web) ⁴⁾ から読み取り, 標高ファイルを作成してモデルに適用した。

3. 4. 2 SO₂ 発生源

SO₂ の発生源は, 破損した温泉製造用の蒸気井のほか, 6 月 29 日に確認された新たな噴気口など複数と考えられるが, 3. 4. 1 で設定した計算領域では個別の発生源位置を細かく設定するのが難しく, 放出比率の設定もできないことから, 1ヶ所からの放出を仮定した。

3. 4. 3 浮力上昇

高橋らの報告 ⁵⁾ によれば, 噴気の温度は噴出地点によって異なるものの高いところでは 140℃ある。したがって, 本来なら浮力上昇を

見込むべきであるが, 3. 3 に示したとおり計算値には計算方法の制約に起因する誤差が含まれるため, 浮力上昇の効果もこの誤差に吸収されると考え, 浮力上昇は考慮しなかった。

3. 4. 4 気象

METI-LIS は, 長期気象及び短期気象を計算する機能を有しているが, 拡散計算の出力値は宮城野局の SO₂ 1 時間値と比較するため, 短期気象データを作成した。

3. 2 の解析対象期間には, 宮城野局は風向風速計を設置していなかったため, 箱根町消防本部で観測した気象観測データの提供を受け, 解析に使用した。

4 結果及び考察

4. 1 宮城野局高濃度と風向風速の関係

箱根町消防本部の気象観測データは, 消防本部 (以下「宮ノ下」), 仙石原分遣所 (以下「仙石原」), 湯本分署及び箱根分遣所の 4ヶ所あるが, 宮城野局近傍に位置するのは宮ノ下 (宮城野局の南南東方向 1.6km) 及び仙石原

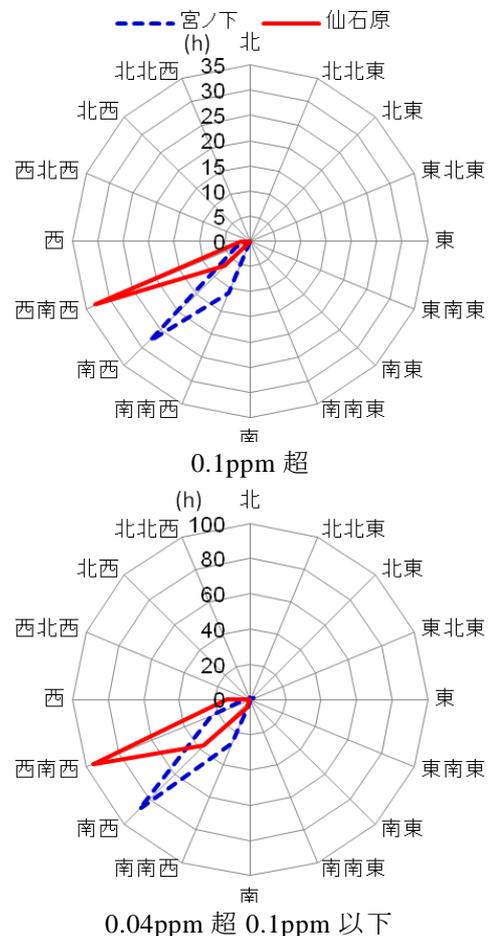


図 3 SO₂ 高濃度時の風向別出現時間

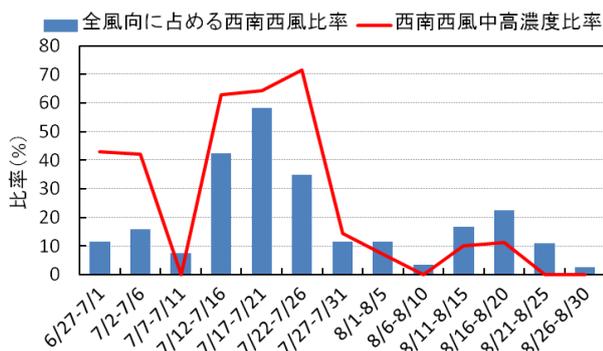


図4 西南西風下での0.04ppm超の発生状況

(同西北西方向 3.9km) の 2ヶ所である。宮城野局で日平均値の環境基準値 0.04ppm を超えたときの宮ノ下と仙石原の風向別出現頻度を図3に示した。

2で示した噴気口と宮城野局の位置関係と風向が一致したのは仙石原であった。宮ノ下は宮城野局からの距離が仙石原より短い、早川の支川沿いの小涌谷に観測点があり、宮城野局とは神山から北西方向に延びる尾根をはさんだ位置関係にあることから、宮城野局とは風況がやや異なっているものと考えられた。これに対し、仙石原は宮城野局と同じ早川本川沿いに観測点を持つことから、距離はやや離れているものの、宮城野局と類似した風況を示したと考えられた。このことから、以後の解析は噴気口→宮城野の風向風速は仙石原で代表できるとして計算した。なお、仙石原では、気温、天候は観測されていないため、それらは宮ノ下のデータを使用した。

西南西風するとき、噴気は東北東方向に流れて風下の宮城野局に到達する。西南西風の比率及びそのうち高濃度 (0.04ppm) になった比率の推移を図4に示した。図4は5日間隔で頻度を集計しているが、期間中の西南西風のパターンは6月27日～7月11日、7月12日～26日、7月27日～8月30日の3期間に区分できる。この3期間の風配図を図5に示した。7月12日～7月26日は西南西風が卓越し、他の2期間はほぼ同じパターンで東南東風が卓越していた。頻繁に0.1ppm超が測定された7月12日～26日までの期間は西南西風の頻度も高かった。一方、風向パターンがほぼ同じ7月11日以前と7月27日以降を比べると、高濃度 (0.04ppm超) になった割合は明らかに7月11日以前のほうが高かった。このことから、7月27日以降は7月11日以前に比べて噴気口における高濃度SO₂の放出量が減少したと考えられた。

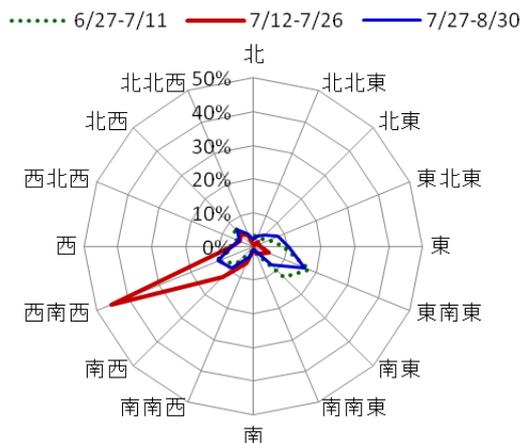


図5 仙石原風配図

4. 2 噴気口におけるSO₂放出量

図3から、宮城野で高濃度が観測される風向は、西南西風か南西風の場合にほぼ限られる。西南西風または南西風が吹いて噴気が風下の宮城野局に到達した時間は対象期間 1,584 時間中 446 時間あり、このうち高濃度 (0.04ppm 超) となったケースは、天候が雨の場合を除くと 138 時間あった。宮ノ下の気象観測では、快晴、晴れ、曇り、雨、霧雨の5区分で天候が記録されており、霧雨は雨に区分した。山間部のため、霧雨には当たらない霧の発生も考えられるが、その判別はできないため、この138時間にはこうしたケースも含まれる。これらの各ケースについて、拡散計算により噴気口におけるSO₂放出量を逆推定し、日放出量に換算した結果を図6に示した。図6において棒のない部分は計算対象外区間である。

時間当たり放出量のピークは、宮城野局で0.124ppmが観測された7月14日23:00の9,200kg/hであったが、日量換算すると7月17日の96トン/日が最大であった。この数値は、気象庁が紫外線スペクトロメータを用いて観測

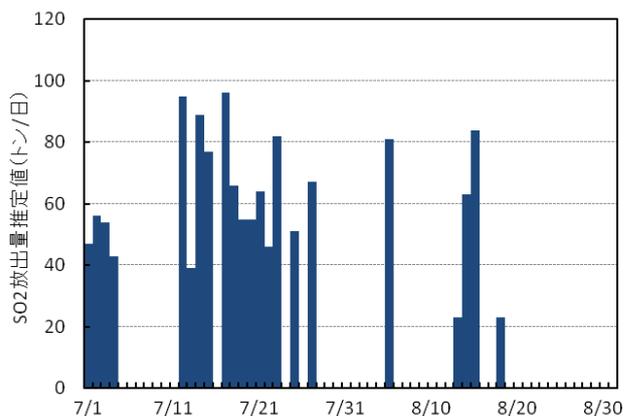


図6 SO₂日放出量推定結果

している浅間山の比較的静穏な時期の放出量（2015年では3月下旬から5月中旬が該当し、観測値は3月27日70トン/日、4月16日90トン/日、4月23日60トン/日、5月8日100トン/日、5月18日70トン/日）⁶⁾と同程度であった。

8月以降は西南西または南西の風の頻度が低下したために推定できた放出量の数値が少ないが、7月中にはなかった放出量の少ない日が8月になると見られるようになり、8月13日及び18日はピーク時の7月17日の1/4以下に減少していた。以上のことから、図4でも確認したように、7月をピークに高濃度SO₂の放出量は漸減したと考えられた。

4.3 高濃度時の濃度分布

風向ごと（16方位）の噴気の到達状況を把握するため、図6で推定した放出量を用いて風下で高濃度が予想されるケースの濃度分布を推定した。風下で高濃度域が広がる気象条件を選び、その日の推定放出量が図6にないケースでは直近の推定放出量を当てはめ、拡散計算を行って得られた推定濃度を北から風向別に表1に示した。表1では、噴気口を中心に各方位の人が居住する地区の最も噴気口寄りの地点における推定濃度を記載した。推計地点の位置は、図7中に表示した。地区名称の下段の記述は、噴

表1 大涌谷周辺地域の最大濃度推定結果

単位:ppm

日時	風向	風速 (m/s)	放出量 (kg/h)	推定地点										
				婁子 西 1,080m	温泉荘 別荘地 西北西 1,340m	仙石原 1,246 北西 2,180m	仙石原 中心部 北北西 2,100m	上湯場 北 630m	下湯場 北北東 870m	早雲郷 別荘地 北東 900m	強羅 東北東 1,230m	宮城野 局 東北東 2,800m	二ノ平 東 2,130m	南長尾 東南東 1,500m
8/19 21:00	北	0.9	950	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8/4 16:00	北北東	2.2	1,610	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8/24 4:00	北東	1.3	950	0.08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8/24 5:00	東北東	1.3	950	0.33	0.06	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8/24 20:00	東	2.0	950	0.40	0.35	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—
8/24 14:00	東南東	2.8	950	0.09	0.32	0.13	—	—	—	—	—	—	—	—
8/24 11:00	南東	2.9	950	—	0.05	0.10	0.06	—	—	—	—	—	—	—
8/16 17:00	南南東	1.4	950	—	—	0.04	0.15	0.24	—	—	—	—	—	—
7/20 12:00	南	1.7	1,610	—	—	—	0.18	1.6	0.03	—	—	—	—	—
7/12 17:00	南南西	2.2	1,780	—	—	—	0.06	1.6	0.23	0.07	—	—	—	—
7/14 23:00	南西	2.1	9,200	—	—	—	—	1.1	0.64	2.0	0.08	0.11	—	—
7/14 14:00	西南西	5.5	3,250	—	—	—	—	—	0.01	0.51	0.51	0.14	0.11	0.07
8/18 16:00	西	3.8	950	—	—	—	—	—	—	0.01	0.15	0.01	0.09	0.19
8/15 22:00	西北西	1.8	950	—	—	—	—	—	—	—	0.01	—	0.05	0.24
8/15 20:00	北西	1.8	950	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.05
8/6 20:00	北北西	1.8	950	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注) "—"は、計算値が0.01ppm未満

気口からの方位及び距離を示している。

宮城野局の計算値が0.01ppmを超えたケースは3ケースあったが、計算値を実測値と比較すると、7月14日23:00が実測値0.124ppmに対し計算値0.11ppm、同14:00が実測値0.147ppmに対し計算値0.14ppm、8月18日16:00が実測値0.028ppmに対し計算値0.01ppmであった。8月18日の数値のずれがやや大きい、このケースの風向は西風であった。このことから、計算点から見た噴気口の方位が風向とずれる場合、すなわち計算点が噴気口の風下に位置していないケースでは過小評価される傾向があることが考えられる。この差は、3.3で示したように、拡散幅を補正したとしても平地での利用を前提としたモデルを起伏のある地形に適用したことに伴う誤差と考えられる。しかし、計算点が噴気口の風下に位置する場合には、概ね妥当な計算値が得られると考えられる。

人の居住する地区で最も濃度が高くなったのは7月14日23:00であり、最大濃度は早雲郷別荘地の2.0ppmであった。噴気口から最も近い人の居住地である上湯場（噴気口の北630m）でも濃度は1.1ppmとなった。このときの等濃度線図を図7に示した（下図には国土地理院発行2万5千分1地形図「箱根」を使用）。図7において、宮城野局では0.11ppm（実測濃度は

していた。最も SO₂ 濃度が高くなったのは、7月14日23:00早雲郷別荘地の2.0ppmであった。ピーク時には火山ガスが外輪山を越えて南足柄市まで到達していた。

2) SO₂ の日放出量のピークは7月17日の96トン/日であり、静穏期の浅間山と同程度であった。その後は高濃度 SO₂ の放出頻度が減少したと考えられた。

参考

3. 3で記述した大気安定度の判別は、通常は風向と日射量の関係をもとに行うが、利用できる気象観測項目は、風向風速、気温、湿度、雨量、天候であるため、日射量を推定しないと大気安定度の判別ができない。

日射量は日照時間からの推定が可能⁸⁾であり、天候とも関連が深い。日射量、日照時間はともに天候が悪くなるほど減少するので、この関係を利用すれば天候からも日射量を推定できると考えられる。日照時間は近傍に観測点がないが、天候は宮ノ下で観測が行われていることから、これを用いて日射量を推定した。

本稿の対象地域近傍で天候と日射量とともに観測している AMeDAS 東京の日中の天気概況と日射量1時間値について、2013~2015年の3年分のデータの対応関係を月別時刻別に整理した。AMeDAS の天気概況区分は多岐にわたるが、その日の主たる天候を「晴」、「曇」、

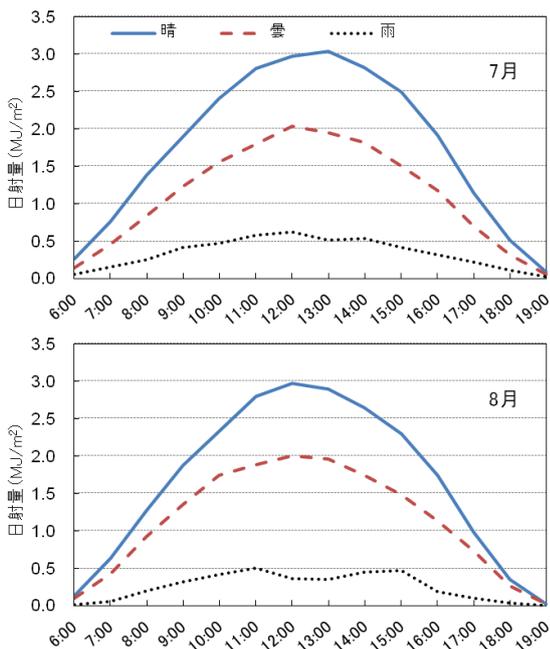
「雨」の3つに区分した。このとき、「晴後曇」など主たる天候がわからないものは対象から除外し、「晴時々曇」、「晴後一時曇」等は主たる天候を区分「晴」に分類した。次いで、3つの天候区分ごとの時刻別日射量の平均値を求めた。判別に使用した7月及び8月の天候別日射量の推移を参考図に示した。この関係が仙石原にも当てはまるものと考え、宮ノ下の天候をこれに適用した。宮ノ下の天候は4. 2で示したように5区分あるが、快晴及び晴れを区分「晴」、曇りを区分「曇」、雨及び霧雨を区分「雨」に分類した。これを参考図に当てはめ、任意の時刻の日射量を読み取り、仙石原の風速とともに Pasquill 安定度階級分類表⁹⁾に当てはめ、大気安定度を判別した。

謝辞

本稿の検討を行うにあたり、気象観測データを提供していただいた箱根町消防本部の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 気象庁火山監視・情報センター：箱根山の火山活動解説資料（2015）
- 2) 石川裕彦：噴煙及び火山性ガスの拡散シミュレーションとその火山防災への応用，科学研究費補助金特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」2003年度報告書
- 3) 産業環境管理協会：低煙源工場拡散モデル，<http://www.jemai.or.jp/tech/meti-lis/download.html>（参照；2015.8）
- 4) 国土地理院：地理院地図，<http://maps.gsi.go.jp/>（参照；2015.8）
- 5) 高橋清，伊藤司郎，前田憲二郎：箱根大涌谷の噴気ガスの特性，防災科学技術総合研究報告，**8**，13-19（1966）
- 6) 気象庁：浅間山火山ガス（二酸化硫黄）放出量，http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/306_Asamayama/306_So2emission.htm（参照；2015.8）
- 7) 神奈川県環境科学センター：平成12年度神奈川の大气汚染，42（2000）
- 8) 吉門洋：アメダス日照データと毎時全天日射量の関係，公害，**26**，1-8（1990）
- 9) 公害研究対策センター：窒素酸化物総量規制マニュアル〔新版〕，79-82（2000）



参考図 天候別日射量の推移