

日射直散分離と斜面日射量の計算

2024年7月

(株) 気象データシステム

日射直散分離と斜面日射量の計算

目次

第1章 直散分離計算	
1-1 直散分離法	1
1-2 EA 気象データに附属するプログラム SplitG の直散分離の計算条件	5
第2章 斜面日射の計算	
2-1 直達日射量と天空日射量から斜面日射量を計算する方法	6
2-2 斜面日射量の計算フロー	8
第3章 観測値とモデルによる推定値の比較	10
3-1 図 3-1 : 水平面全天日射量の観測値と水平面天空日射量の関係	12
3-2 図 3-2.1 : 水平面天空日射量の観測値とモデルによる推定値の比較	13
図 3-2.2 : 晴天指数と散乱比の関係	14
図 3-2.3 : 水平面天空日射量の観測値から求めた散乱比と水平面天空日射量の推定値から求めた散乱比の関係	15
3-3 図 3-3 : 合成モデルによる各方位鉛直面日射量の違い	16
3-4 図 3-4.1 : 北鉛直面の日射量の観測値と推定値の比較 (合成は一様分布モデルによる)	17
図 3-4.2 : 東鉛直面の日射量の観測値と推定値の比較 (合成は一様分布モデルによる)	18
図 3-4.3 : 南鉛直面の日射量の観測値と推定値の比較 (合成は一様分布モデルによる)	19
図 3-4.4 : 西鉛直面の日射量の観測値と推定値の比較 (合成は一様分布モデルによる)	20
3-5 図 3-5.1 : 北鉛直面の日射量の観測値と推定値の比較 (合成は非一様分布モデルによる)	21
図 3-5.2 : 東鉛直面の日射量の観測値と推定値の比較 (合成は非一様分布モデルによる)	22
図 3-5.3 : 南鉛直面の日射量の観測値と推定値の比較 (合成は非一様分布モデルによる)	23
図 3-5.4 : 西鉛直面の日射量の観測値と推定値の比較 (合成は非一様分布モデルによる)	24
第4章 数値指標によるモデルの評価	25
4-1 数値指標による直散分離モデルの比較 (図 4-1.1, 図 4-1.2)	26
4-2 数値指標による合成モデルの比較 (図 4-2.1, 図 4-2.2, 図 4-2.3, 図 4-2.4)	27
第5章 日射直散分離プログラムの計算例	29
第6章 斜面日射の合成プログラムの計算例	31
斜面日射の合成プログラムのソースコード (fortran90)	32
[参考文献・引用文献]	34

日射直散分離と斜面日射量の計算

日射は太陽から直接地表に到達する直達日射と、大気中を透過する過程で空気分子やエアロゾルによって散乱され天空全体から地表に到達する天空日射（散乱日射^{注1}とも呼ばれる）に大別される。直達日射量と天空日射量を別々に測定するには、太陽追尾装置を持った直達日射計や、太陽を遮蔽する装置が必要で、正しく測定するには専門的な知識を要するし、メンテナンスの手間もかかる。そのため、通常、気象台が測定している日射量は水平面が受ける日射量（水平面全天日射量という）であり、水平面全天日射量だけでなく直達日射量や天空日射量を測定しているのは、特定の気象台や大学等の研究機関に限られる。

EA 気象データに収録されている日射量は、気象台で観測された水平面全天日射量、または日照時間等から推定された水平面全天日射量である。しかし、建物の屋根面は必ずしも水平ではなく、壁面は垂直とは限らず傾斜していることもある。これらの様々な面（傾斜面または単に斜面という）が受ける日射量（斜面日射量という）を得るには、まず水平面全天日射量を直達日射量と天空日射量に分離した後、斜面の方位角、傾斜角、地物による反射率を考慮して斜面日射量に変換しなければならない。水平面全天日射量を直達日射量と天空日射量に分離する方法が日射直散分離法であり、単に直散分離法、直散分離モデルとも呼ばれる。第 1 章では、EA 気象データを操作する EADDataNavi に組み込まれた 5 つの直散分離モデルについて述べる。直達日射量と天空日射量から斜面日射量を推定する方法が合成モデルで、第 2 章では合成モデルについて述べる。分離モデルと合成モデルの目的は斜面日射量を推定することであるから、分離と合成のプロセスを経て、結果として斜面日射量が良好に推定されなければならない。第 3 章と 4 章では、5 つの分離モデルと 2 つの合成モデルによる推定値を観測値と比較し、数値指標によってモデルの精度を評価する。第 5 章では、確認用として、Perez モデルにより直散分離を行った場合の計算例を示す。第 6 章では斜面日射の合成プログラムの一例と計算例を紹介し、fortran90 によるソースコードを掲載する。

第 1 章 直散分離計算

1-1 直散分離法

水平面全天日射量 TH、法線面直達日射量 DN、水平面天空日射量 SH には、次の関係式が成り立つ。

$$TH = DN \sin h + SH \quad (1)$$

ここに、

TH : 水平面全天日射量, DN : 法線面直達日射量,
SH : 水平面天空日射量, h : 太陽高度角 [°]。

日射量の単位としては W/m^2 や $kcal/m^2h$ も用いられるが、EA 気象データに含まれる日射量、放射量の単位は $[0.01MJ/(m^2h)]$ である。TH が既知であって、DN または SH の推定式 (モデル) が与えられれば、もう一方は式(1)より容易に計算することができる。

注1 : 日射受照面が水平でなく斜面だと地物で反射した日射も斜面に入射する。したがって、天空日射と地物反射日射を区別せず、ひとまとめにして扱うのであれば、天空日射でなく散乱日射と呼ぶ方が妥当である。

すなわち、TH と DN が与えられれば、SH は次式で計算できる。

$$SH = TH - DN \sin h \quad (2)$$

また、TH と SH が与えられれば、DN は次式で計算できる。

$$DN = \frac{TH - SH}{\sin h} \quad (3)$$

TH から DN あるいは SH を推定するモデルはこれまで国内外の多くの研究者により提案されているが、EADDataNavi に組み込まれている直散分離プログラム SplitG (Program for Splitting Global Solar Irradiation into Direct and Diffuse Solar Irradiation) では、既往のモデルの中から、2つの直達日射量を推定するモデルと 3つの天空日射量を推定するモデルを採用している。ユーザはこれらの 5通りのモデルの中から任意のモデルを選択して直散分離計算を行うことができる。SplitG で採用しているモデルの概要を以下に示す。

(1) Nagata モデル [1], [2]

快晴時を前提として、時別の大気透過率 P から SH を推定する近似式である。モデルの開発には、福井大学工学部における快晴時の DN と TH の測定値、およびこれらの測定値から式(2)で計算した SH が使用されている。DN は直達日射計 MS-51(英弘精機) (1/2 開口角 3.98°) , TH はネオ日射計 MS-4(英弘精機)で測定されている。Nagata モデルは、当時日本でよく使われていた快晴時の SH を表す Berlage 式を改良する目的で作成された。これを受け、空気調和・衛生工学会方式による標準気象データの開発では、当初、直散分離に Bouguer 式 (式(26)) と Berlage 式を用いていたが、旭川以降の標準気象データの開発では、Berlage 式を Nagata モデルに置き換えた。Nagata モデルを式(4)に示す。しかし、上記のように Nagata モデルはもともと快晴時を対象として開発された式であって、様々な天候の直散分離に適用するのは開発の前提条件を逸脱していることになる。Nagata モデル以降、直散分離への適用を意図した様々なモデルが開発されているが、これらは全天候を対象としている。目的に応じ、適切なモデルを採用すべきである。

$$SH = I_0 \sin h \left(1.0 - \frac{1}{P \sin h} \right) (0.66 - 0.32 \sin h) \{ 0.5 + (0.4 - 0.3P) \sin h \} \quad (4)$$

ここに、 I_0 : 大気外法線面日射量, P : 大気透過率 [-]

(2) Udagawa モデル [3]

晴天・曇天を問わず時別の TH により DN を推定する式である。モデルの係数同定には、館野高層気象台における 1年間 (1968年1月～12月) の TH と SH の測定値が使用されている。日射量の測定はゴルチンスキー日射計によるもので、SH の測定には遮蔽リング (太さ : 4.2cm, 半径 : 50cm) が使用されている。この遮蔽リングを直達日射計の 1/2 開口角に換算すると 2.4°となる。

$$K_c = (0.5163 + 0.333 \sin h + 0.00803 \sin^2 h) I_0 \sin h \quad (5)$$

$$K_t = \frac{TH}{I_0 \sin h} \quad (6)$$

$$I_G < K_c$$

$$DN = I_0 (2.277 - 1.258 \sin h + 0.2396 \sin^2 h) K_t^3 \quad (7)$$

$$I_G \geq K_c$$

$$DN = I_0(-0.43 + 1.43K_t) \quad (8)$$

ここに、 K_t : 晴天指数 [-]

(3) Erbs モデル [4]

晴天・曇天を問わず時別の TH により SH を推定する回帰式である。モデルの係数の同定には米国の 5 都市の TH と SH の観測値が使用されている。Erbs モデルは IEA(International Energy Agency) によるモデル評価 [5]で高い評価を得ており、国際規格 ISO 52010 [6]でも採用されている。Erbs モデルは、以下のように、SH を TH と K_t のみの関数として表した簡易なものである。

$$K_t \leq 0.22$$

$$SH = TH(1.0 - 0.09K_t) \quad (9)$$

$$0.22 < K_t \leq 0.80$$

$$SH = TH(0.9511 - 0.1604K_t + 4.388K_t^2 - 16.638K_t^3 + 12.336K_t^4) \quad (10)$$

$$K_t > 0.80$$

$$SH = 0.165TH \quad (11)$$

(4) Watanabe モデル [7],[8]

晴天・曇天を問わず、時別の大気透過率 P により SH を推定する回帰式である。モデルの開発には、九州大学工学部建築学科における TH と SH の測定値が使用されている。これらの測定値は、熱電堆式全天日射計 MS-42(英弘精機)によるもので、SH の測定では幅 7cm、半径 20cm の直達日射量遮蔽バンド MB-11(英弘精機)が用いられている。この遮蔽リングを直達日射計の 1/2 開口角に換算すると約 10° になる。このように Watanabe モデルの作成に用いられた SH は、直達成分を幅が広く半径の小さい遮蔽バンドで遮蔽して測定されている。その目的は、日射応用上の観点から、直達日射量だけでなく太陽周辺の高輝度天空からの天空日射量(準直達日射)も遮蔽し、準直達日射量を天空日射量ではなく、直達日射量に含めることにあった。SplitG には、1979 年 10 月から 1982 年 9 月までの測定値に基づいて作成された式(12)、(13)を組み込んでいる。

$$SH = I_0 \sin h \frac{Q}{1+Q} \quad (12)$$

$$Q = (0.8672 + 0.7505 \sin h) P^{0.421 - \frac{1}{\sin h}} \left(1 - P^{\frac{1}{\sin h}}\right)^{2.277} \quad (13)$$

(5) Perez モデル [9]

晴天・曇天を問わず時別 TH と露点温度により DN を推定するモデルである。Perez モデルは、Maxwell [10] による DN の準理論モデルを修正したもので、欧州および米国の 15 都市における TH と DN の測定値(58,000 時間分)を用いて係数の同定が行われている。この DN は、1/2 開口角が 2.86° の直達日射計 NIP 型(Normal Incidence Pyrheliometer, Eppley 社製)により測定されている。3 章の比較、4 章の評価に見られるように、Perez の直散分離モデルは実測値の再現性が良好であるため、SplitG は、Perez モデル(14)~(25)による直散分離を推奨法と位置付けている。

$$DN = I_0[K_{nc} - \{A + B \exp(mC)\}]X(K'_t, Z, W, \Delta K'_t) \quad (14)$$

$$K_{nc} = 0.866 - 0.122m + 0.0121m^2 - 0.000653m^3 + 0.000014m^4 \quad (15)$$

$$K_t \leq 0.6$$

$$A = 0.512 - 1.560K_t + 2.286K_t^2 - 2.222K_t^3 \quad (16)$$

$$B = 0.370 + 0.962K_t \quad (17)$$

$$C = -0.280 + 0.932K_t - 2.048K_t^2 \quad (18)$$

$$K_t > 0.6$$

$$A = -5.743 + 21.77K_t - 27.49K_t^2 + 11.56K_t^3 \quad (19)$$

$$B = 41.40 - 118.5K_t + 66.05K_t^2 + 31.90K_t^3 \quad (20)$$

$$C = -47.01 + 184.2K_t - 222.0K_t^2 + 73.81K_t^3 \quad (21)$$

$$K'_t = \frac{K_t}{\left\{1.031 \exp\left(\frac{-1.4}{0.9 + \frac{9.4}{m}}\right) + 0.1\right\}} \quad (22)$$

$$\Delta K'_t = 0.5(|K'_{t_i} - K'_{t_{i+1}}| + |K'_{t_i} - K'_{t_{i-1}}|) \quad (23)$$

$$W = \exp(0.07T_d - 0.075) \quad (24)$$

$$m = \frac{1.0}{\sin h + 0.15(93.885 - Z_d)^{-1.253}} \quad (25)$$

ここに,

Z : 天頂角 [rad.], Z_d : 天頂角 [°], T_d : 露点温度 [°C] W : 可降水量 [cm],

m : relative air mass [-], i : DN を求める時刻 [-], $X(K'_t, Z, \Delta K'_t, W)$: coefficient function

Perez モデルで DN を計算するには, K'_t , Z , $\Delta K'_t$, W の組み合わせによって決まる係数 X が必要である。Perez らが作成した計算プログラムは, K'_t , Z を 6 つ, $\Delta K'_t$ を 7 つ, W を 5 つに分類し, 該当する X の値を選ぶように組まれている。整理された X の値は 1260 に及ぶ。

同プログラムでは, 式(23)の $\Delta K'_t$ の計算において, DN を求める時刻 i だけでなくひとつ前の時刻 $i-1$ とひとつ後の時刻 $i+1$ の K'_t が必要である。 K'_t は晴天指数 K_t を式(25)の m で補正した値で, $i-1$, i , $i+1$ の時刻の TH から求められる。また式(24)の W の計算では当該時刻の露点温度が必要である。DN を求める時刻 i の TH は必須である。しかし, 時刻 $i-1$, 時刻 $i+1$ の TH が不明の場合や露点温度がわからない場合についても, 係数 X は整理されている。このように, このモデルには, 汎用性を高めるため上式には表れない幾つかの工夫がなされている。コンピュータープログラムは入手可能なので[9], 開発者の意図通り計算するには, 開発者のプログラムによるのがよい。

上記のモデルのうち, Nagata モデルと Watanabe モデルは大気透過率 P と SH の関係式である。 P は大気外の日射が大気中を透過する間に散乱や吸収によって減衰する程度を表す指標であって, 次の Bouguer の式に現れる。

$$DN = I_0 P^{\frac{1}{\sin h}} \quad (26)$$

P は天気によって変わるから, Nagata または Watanabe モデルを用いて直散分離を行うためには, まず, 大気透過率 P を求めなければならない。式 (26) を式 (1) の DN の項に代入すれば式 (27) を得る。

$$I_0 P^{\frac{1}{\sin h}} \sin h + SH = TH \quad (27)$$

式(27)のSHの項にNagata式(4)あるいはWatanabe式(12)を代入し、THの観測値を与えればP以外はすべて既知となり、収束計算によりPを求めることができる。得られたPを式(26)に代入すればDNが、式(4)あるいは式(12)の右辺に代入すればSHが計算できる。

1-2 EADatavnavi に組み込まれている SplitG による直散分離の計算条件

(1) 太陽位置の計算

EA 気象データ及び EA/EPW の太陽位置は、1 時間間隔ならそれぞれ正時、正時前 30 分の太陽位置、分間隔なら、それぞれ当該分、当該分と前の分との中間の分の太陽位置である。年については、実在年 EA 気象データではそれぞれの西暦年、標準年 EA 気象データではうるう年でない選択期間の中央に近い年、すなわち、1995 年版、2000 年版、2010 年版、2020 年版標準年、及び 2086 年版将来標準年で、それぞれ 1989 年、1995 年、2006 年、2015 年、2085 年の太陽位置である。

(2) 太陽高度角の下限值

日出直後や日没直前は $\sin h$ の値が小さくなる。このような時刻に式(3)のように $(TH - SH)$ を $\sin h$ で割って DN を計算すると、 $\sin h$ の値が小さいために DN が極端に大きくなることがある。これを回避するため、SplitG では太陽高度角 h が 3° より小さい場合は $h=3^\circ$ として計算している。

(3) 大気透過率 P の上限値

Nagata, Watanabe モデルを用いて直散分離を行う場合、大気透過率 P に上限値を設定した。P は理論的には最大 1.0 であるが、理科年表に記載されている大気透過率(12 時)は最大でも 0.8 程度であること等を考慮して、SplitG では 0.85 という上限を与えている。日出直後や日没直前の太陽高度が低い時間帯では式(27)で計算した P が 0.85 を超える場合があるが、SplitG ではこのような場合でも $P=0.85$ としている。

(4) 大気外法線面日射量 I_0

大気圏外で太陽に正対する面、すなわち法線面が受ける太陽のふく射総量は太陽定数として知られている。太陽定数は現在まで種々の値が提案されているが、SplitG では WMO 第 8 回測器観測法委員会 (CIMO-VIII, 1981) により勧告されている 1.367kW/m^2 ($4.921\text{MJ}/(\text{m}^2\text{h})$) を用いている。大気外法線面日射量 (I_0) は、太陽と地球の距離が刻々と変化することを考慮し、太陽定数そのものではなく、太陽定数に距離で補正した値である。

(5) DN の上限値

稀にはあるが、DN の計算値が $4.18\text{MJ}/(\text{m}^2\text{h})$ [$999\text{kcal}/(\text{m}^2\text{h})$] を超える場合がある。そのような場合、SplitG では計算値を $4.18\text{MJ}/(\text{m}^2\text{h})$ に置き換え、計算値と $4.18\text{MJ}/(\text{m}^2\text{h})$ との差を水平面の値に換算して SH に加算している。このような処理を行なったのは $\text{kcal}/(\text{m}^2\text{h})$ で表した DN を 3 桁の整数に収め、動的空調熱負荷計算プログラム「HASP」や住宅用熱負荷計算プログラム「SMASH」用の気象データフォーマットにおいて、桁あふれが発生することを避けるためである。

第2章 斜面日射量の計算

本章では、EA DataNavi に組み込まれている斜面日射量の計算プログラムである TilRad (Tilted surface solar irradiation calculation program) で採用した斜面日射量の計算法について述べる。

2-1 直達日射量と天空日射量から斜面日射量を計算する方法

斜面日射量は、観測または直散分離によって得られた法線面直達日射量 DN、水平面天空日射量 SH を、任意の方位角と傾斜角を有する斜面に変換し、地表面反射日射量を加算することによって得られる。すなわち、

$$TT = DT + ST + RT \quad (30)$$

ここに、TT：斜面全日射量， DT：斜面直達日射量，
ST：斜面天空日射量， RT：斜面に入射する反射日射量

DT, ST, RT は、各々式 (31)~(34) で表される。

$$DT = DN \cos i \quad (31)$$

$$\cos i = \cos \beta \sin h + \sin \beta \cos h \cos(A_s - A_w) \quad (32)$$

$$ST = SH \times F \quad (33)$$

$$RT = TH \frac{1 - \cos \beta}{2} \rho \quad (34)$$

ここに、 DN：法線面直達日射量， SH：水平面天空日射量， TH：水平面全天日射量，

I：直達日射の入射角 [°]， β：水平面に対する斜面の傾斜角 [°]，

h：太陽高度角 [°]， A_s：太陽方位角 [°]， A_w：斜面の方位角 [°]， ρ：アルベド [0~1]

式 (31)， (32) は DN を DT に変換する式， 式 (33) は SH を ST に変換する式である。式 (33) の F は ST が SH に占める割合を表す関数であり， 天空放射輝度分布の取り扱いにより異なる。式 (34) は斜面の前面の地物で反射した後， 斜面に入射する日射量を表す式である。地物による反射は， 斜面前面の被覆の状態や地物の形態等を考慮すると必ずしも完全拡散とはいえないが， 式(34)では， 応用上の簡易化のために完全拡散すると仮定されている。地物による反射日射量は， 地物の反射率（アルベド） ρ によっては非常に大きくなることがある。地物の反射率の参考値を表 2-1 に示す。都会地物の平均では ρ は 10%程度が使われることが多い。

表 2-1 地物の反射率（日本建築学会編 建築設計資料集 1 環境， p.78， 1978 による）

地 物	アルベド (%)
都会地平均	5~10
アスファルト舗装	15~20
砂利・コンクリート・舗石	15~30
白砂利	20~40
砂原	10~20
草原・田園地	5~15
枯草原	10~30
ぬれ土・森林	3~7
新雪	80~98
古雪	40~70

式 (31) の DN と式 (33) の SH は、EA 気象データの水平面全天日射量 TH から直散分離により得られる。また、式 (33) の F については、これまで国内外の研究者によりそのモデルが提案されており、それらのモデルが利用できる。従来は、F として天空の放射輝度分布を一様と仮定したモデル（一様分布モデル、isotropic モデル）がよく用いられてきた。しかし、実際の天空の放射輝度は太陽位置や天空状態（晴天や曇天など）により変化するため、天空の放射輝度分布の影響を考慮した種々のモデル（非一様分布モデル、anisotropic モデル）も提案されている。それらの中から、TilRad では Perez の anisotropic モデルを推奨法として採用した。しかし、従来から isotropic モデルが広く利用されてきたことや扱いが容易であることから、isotropic モデルもサポートしている。ユーザは、2 通りのモデルのうち、いずれか一方を選択して TT を計算することができる。モデルの概要を次に示す。

(1) Isotropic モデル（一様分布モデル）[11]

天空の放射輝度分布を一様と仮定し、斜面から天空を見る形態係数によって ST を計算するモデルである。すなわち、

$$F = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (35)$$

(2) Perez の anisotropic モデル [12]

天空日射量を分布が一様な天空日射量、準直達日射量、地平線付近からの天空日射量の 3 成分に分け、8 種類の天空状態別に天空日射量に占める各成分比率を決定するモデルである。すなわち、

$$F = (1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \quad (36)$$

$$a = \max(0, \cos i), \quad b = \max(0.087, \cos Z) \quad (37)$$

$$F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon)\Delta + F_{13}(\varepsilon)Z \quad (38)$$

$$F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon)\Delta + F_{23}(\varepsilon)Z \quad (39)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{SH+DN}{SH} + kZ^3}{1 + kZ^3} \quad (40)$$

$$\Delta = \frac{I_{dm}}{I_0} \quad (41)$$

$$m = \frac{1.0}{\sin h + 0.15(93.885 - Z_d)^{-1.253}} \quad (42)$$

ここに、 F_1 : circumsolar brightening coefficient [-],

F_2 : horizon brightening coefficient [-],

Z : 天頂角 [rad.], Z_d : 天頂角[°], Δ : atmospheric brightness parameter [-],

I_0 : 法線面大気外日射量, ε : atmospheric clearness parameter [-],

k : 1.041 [-], m : relative air mass [-]

式(36)の第1項は一樣天空日射量, 第2項は準直達日射量^{注2}, 第3項は地平付近からの天空日射量^{注3}を表している。式(36)の各項は以下のように解釈されよう。 F_1 は太陽周辺の高輝度天空からの日射量の比率, $(1-F_1)$ は天空に一樣に分布する日射量の比率であり, $(1-F_1)$ には一樣分布の形態係数である式(35)を乗じて斜面の比率に変換している。準直達日射が直達日射と同じ方向性を持つことから, F_1 には直達日射と同様に $\cos i$ を乗じるが, 更に太陽天頂角 Z の補正項 $\cos Z$ で除されており, 天頂角が大きくなる(天頂から離れる)にしたがって準直達日射量の比率が大きくなるように補正されている。地平成分は比率 F_1 とは独立しており, その比率 F_2 は面の傾斜角 β の正弦 $\sin \beta$ を乗じて補正される。この補正係数は水平面では $\sin \beta = 0$ となる。すなわち地平成分は水平面では存在せず, $\sin \beta = 1$ となる鉛直面で最大となる。

Perez の anisotropic モデル(これ以降は Perez を略し anisotropic モデルと呼ぶことにする)では天空放射輝度分布を一樣とせず, 3成分に分類している点に特徴がある。一方, 昼光の分野では, 天空の輝度分布や放射輝度分布をより詳細に分類した精緻なモデルが開発されている。この点に関しては, 本ホームページに掲載されている他の技術解説「天空放射輝度分布, 天気輝度分布, 昼光照度の推定」等を参照されたい。 ε による $F_{11} \sim F_{23}$ の値を表 2-2 に示す。

表 2-2 anisotropic モデルの係数値

ε	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1.000~1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
1.065~1.230	0.130	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
1.230~1.500	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
1.500~1.950	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
1.950~2.800	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
2.800~4.500	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
4.500~6.200	1.062	-1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
6.200~	0.678	-0.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251

2-2 斜面日射量の計算フロー

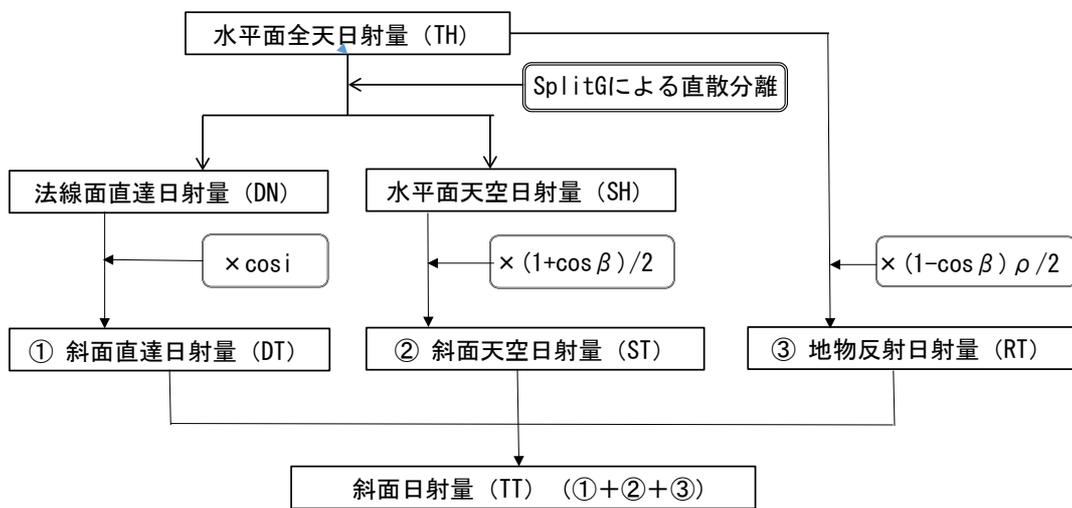
Isotropic モデルおよび anisotropic モデルを用いた斜面日射量 TT の計算フローを図 2-1, 図 2-2 に示す。Isotropic モデルは, 斜面直達日射量 DT , 斜面天空日射量 ST , 地表面反射日射量 RT の 3 成分を出力する。一方, anisotropic モデルは, 斜面天空日射量 ST を, 斜面準直達日射量 ST_b , 斜面一樣天空日射量 ST_s , 地平天空日射量 ST_h の 3 成分に分けて出力する。 ST_b とは, 天空日射量のうち太陽周辺の高輝度天空から放射される日射成分であって, DT と同じ方向性を持つ。 ST_h とは, 地平付近の放射輝度の高い天空の日射成分であり, 快晴時等の直達日射が多いときに地表面の反射日射の影響を受けて地平付近の放射輝度が高くなる点を考慮している。TilRad では, 計算値の出力の際に, 全日射に加え isotropic モデルを用いた場合は DT, ST, RT の 3 成分を, anisotropic モデルを用いた場合は, DT, T_b, ST_s, ST_h, RT の 5 成分を出力する。

Isotropic モデルによる斜面日射量 TT は, DT, ST, RT の合計値であるが, anisotropic モデルでは, 天空日射 ST が 3 つに分離されるため, 目的に応じて合成方法を選択することが可能である。

注2 circumsolar radiation. 太陽近傍の高輝度天空からの天空日射量。第二太陽と呼ばれたこともある。

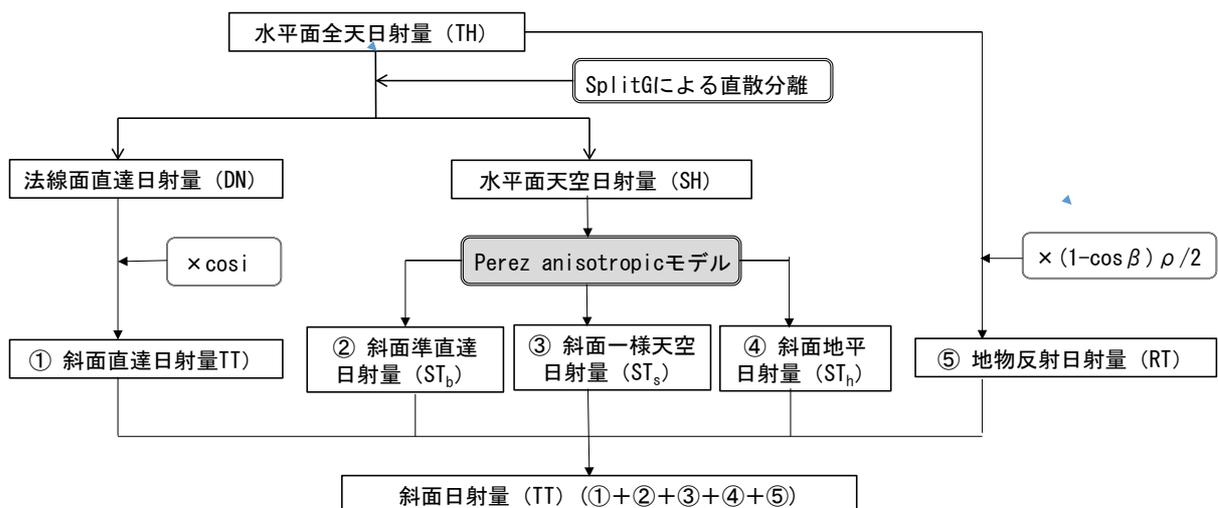
注3 地平線近傍の明るい天空からの天空日射量。

例えば、太陽光を受照する斜面では ST_b を直達日射として扱って DT に加算し、受照しない斜面では加算しないことにする。そうすると直達日射を受照する面の全日射量は大きく、受照しない面の全日射量は小さくなって鉛直面日射量の観測値とよく整合するようになる（4章参照）。したがって、建物の熱性能や空調エネルギー消費を評価する場合には、このような組み換えを行う方がよい。但し、直散分離モデルとの組み合わせによって斜面日射量推定的良好度が変わるので注意が必要である。具体的な比較・評価については4章を参照のこと。一方、日射遮蔽物の制御が目的であれば、直達日射量 DT や DT から換算した昼光照度を用いるのが妥当であろう。太陽電池の発電量のシミュレーションが目的であれば、セル特性にもよるが一般的には直達日射をそのまま使用することが多いと思われる。このような判断はユーザに委ねられるので、日射合成のプログラムに、ユーザが斜面日射量 TT の合成法を選択できる機能があるとよい。



i : 斜面への直達日射入射角, β : 斜面の傾斜角、 ρ : 地物反射率

図 2-1 Isotropic モデルによる斜面日射量の計算フロー



i : 斜面への直達日射入射角, β : 斜面の傾斜角、 ρ : 地物反射率

図 2-2 anisotropic モデルによる斜面日射量の計算フロー

第3章 観測値とモデルによる推定値の比較

1章, 2章で述べた直散分離モデル, 斜面日射の合成モデルによる推定値を観測値と比較する。筆者らは以前にも同様の比較を行った [13], [14], [15] が, ここでは, 井川ら[16]による大阪市立大学での詳細な観測値を用い, 直散分離と合成のモデルの特徴を, より明確にした[17]。日射量と観測方法等は表 3-1 の通りであるが, ここで用いたのは, 2011 年の 10 分平均値である。

比較の対象とした直散分離モデルを表 3-2 に整理した。1章で述べたように, W モデルでは準直達日射量を直達日射量 DN に含めるという観点から, 散乱日射量 SH の測定に天空遮蔽率の高い遮蔽リング (直達日射の 1/2 開口角約 10° に相当) を使用して太陽とその周辺の高輝度天空を遮蔽している。また N モデルは全天候の直散分離モデルとしてよく使用されているが, もともと快晴時を対象として開発されたモデルであって, 他の 4 モデルが全天候を対象としているのとは異なることに注意すべきである。

比較の対象とした合成モデルを表 3-3 に整理した。非一様分布モデル(1)では, 準直達日射成分, 一様分布成分, 地平成分の 3 成分のうち, 準直達日射成分を直達日射に含め, 一様分布成分と地平成分の合計値を天空日射として斜面散乱日射を合成することにする。

表 3-1 観測場所, 観測計器, 観測時間間隔, 比較に使用したデータ [16]

観測場所	大阪市立大学 (緯度34.594N, 経度135.504E), 地上高27m	
観測計器	水平面全天日射量	CMP11(Kipp&Zonen)
	鉛直面全日射量(N,E,S,W)	CMP11。地物反射を遮へいして測定
	水平面散乱日射量	MS-802(EKO)+太陽追尾装置STR-22(黒ボールを搭載して直達成分を遮へい)
	法線面直達日射量	MS-53 (EKO)+STR-22
観測時間間隔	10秒間隔 (瞬時値)。1分値は前後30秒の平均値。単位W/m ²	
使用データ	日射直散分離・鉛直面日射の合成計算には1分値から算出した10分平均値を使用。単位W/m ²	

表 3-2 比較対象とする直散分離モデル

モデル記号	モデル名	文献No	推定の対象	DNまたはSHの測定計器	推定に必要なデータ
U	Udagawa	3	全天候のDN	遮蔽リング(1/2開口角2.4° 相当)	TH, I_0 , K_t , \sinh
E	Erbs	4	全天候のSH	—	TH, K_t
W	Watanabe	8	全天候のSH	遮蔽リング(1/2開口角10° 相当)	I_0 , p , \sinh
N	Nagata	2	晴天時のSH	直達日射計(1/2開口角3.98°)	I_0 , p , \sinh
P	Perez	9	全天候のDN	直達日射計(1/2開口角2.86°)	TH, I_0 , K_t , Z_0 , m , w

データの記号

DN:法線面直達日射量, SH:水平面散乱日射量, TH:水平面全天日射量, I_0 :大気外法線面日射量, K_t :晴天指数, \sinh :太陽高度の正弦, p :大気透過率, Z_0 :天頂角, m :エアマス, w :可降水量(cm)

表 3-3 比較対象とする合成モデル

番号	モデル名	モデルの意味	斜面日射の計算法
0	一様分布モデル [11]	放射輝度が天空に一様に分布すると仮定するモデル	SH×形態係数
1	非一様分布モデル [12]	天空放射輝度を一様分布と扱うのではなく, 天空に一様に分布する散乱日射に加え, 太陽周辺の高輝度天空からの散乱日射(準直達日射), 地平の高輝度天空からの散乱日射を考慮するモデル	大気の高輝度(ε)を8区分し, ε別に整理した6係数値(全48係数)を用いて一様成分, 準直達成分, 地点成分を計算する。

3-1 水平面全天日射量と水平面天空日射量の関係

図 3-1 に、水平面全天日射量 TH と水平面天空日射量 SH の観測値の関係、及び TH の観測値と 5 つの直散分離モデルによる SH の推定値 (SH(U), SH(E), SH(W), SH(N), SH(P)) の関係を示す。SH の次の () 内はモデルの種別である。(m) は観測値であることを示す。

3-2 観測による水平面天空日射量と直散分離モデルによる水平面天空日射量の関係

(1) 水平面天空日射量 SH の観測値とモデルによる推定値の関係

図 3-2.1 に、SH の観測値 SH(m) とモデルによる推定値 SH(U)~SH(P) の関係を示す。

(2) 晴天指数と散乱比の関係

図 3-2.2 に、晴天指数 Kt と散乱比 tsr の関係を示す。散乱比 tsr とは、式(43)で表される TH に占める SH の比率であり、SH(m) 及び 5 つのモデルによって推定された SH から求めた。

$$tsr = SH/TH \quad \dots (43)$$

(3) 観測値による散乱比 tsr と推定値による散乱比 tsr の関係

図 3-2.3 に、SH(m) から求めた tsr と 5 つのモデルによって推定された SH から求めた tsr の関係を示す。

3-3 4 方位の鉛直面日射量の観測値と一様分布、非一様分布モデルによる推定値の比較

図 3-3 で、4 方位の鉛直面日射量の観測値 [北面 TTN(m), 東面 TTE(m), 南面 TTS(m), 西面 TTW(m)] を、それぞれの推定値と比較する。推定値は、TH, SH の観測値から式(31)で計算した DT に、一様分布モデルまたは非一様分布モデルによる SH の推定値を加算して求め、北鉛直面日射量では TTN(0), TTN(1), 東鉛直面日射量では TTE(0), TTE(1), 南鉛直面日射量では TTS(0), TTS(1), 西鉛直面日射量では TTW(0), TTW(1) とする。(0) は一様分布モデル、(1) は非一様分布モデルによることを表す。

3-4 4 方位の鉛直面日射量の観測値と直散分離モデルと一様分布モデルを組み合わせて推定した鉛直面日射量の比較

図 3-4.1~図 3-4.4 で、北、東、南、西各鉛直面日射量の観測値 TTN(m), TTE(m), TTS(m), TTW(m) と、TH の観測値から 5 つの直散分離モデルと一様分布モデルを組み合わせて推定した各鉛直面の日射量と比較する。

3-5 4 方位の鉛直面日射量の観測値と直散分離モデルと非一様分布モデルを組み合わせて推定した鉛直面日射量の比較

図 3-5.1~図 3-5.4 では、各鉛直面日射量の観測値と、TH の観測値から 5 つの直散分離モデルと非一様分布モデルを組み合わせて推定した各鉛直面の日射量と比較する。

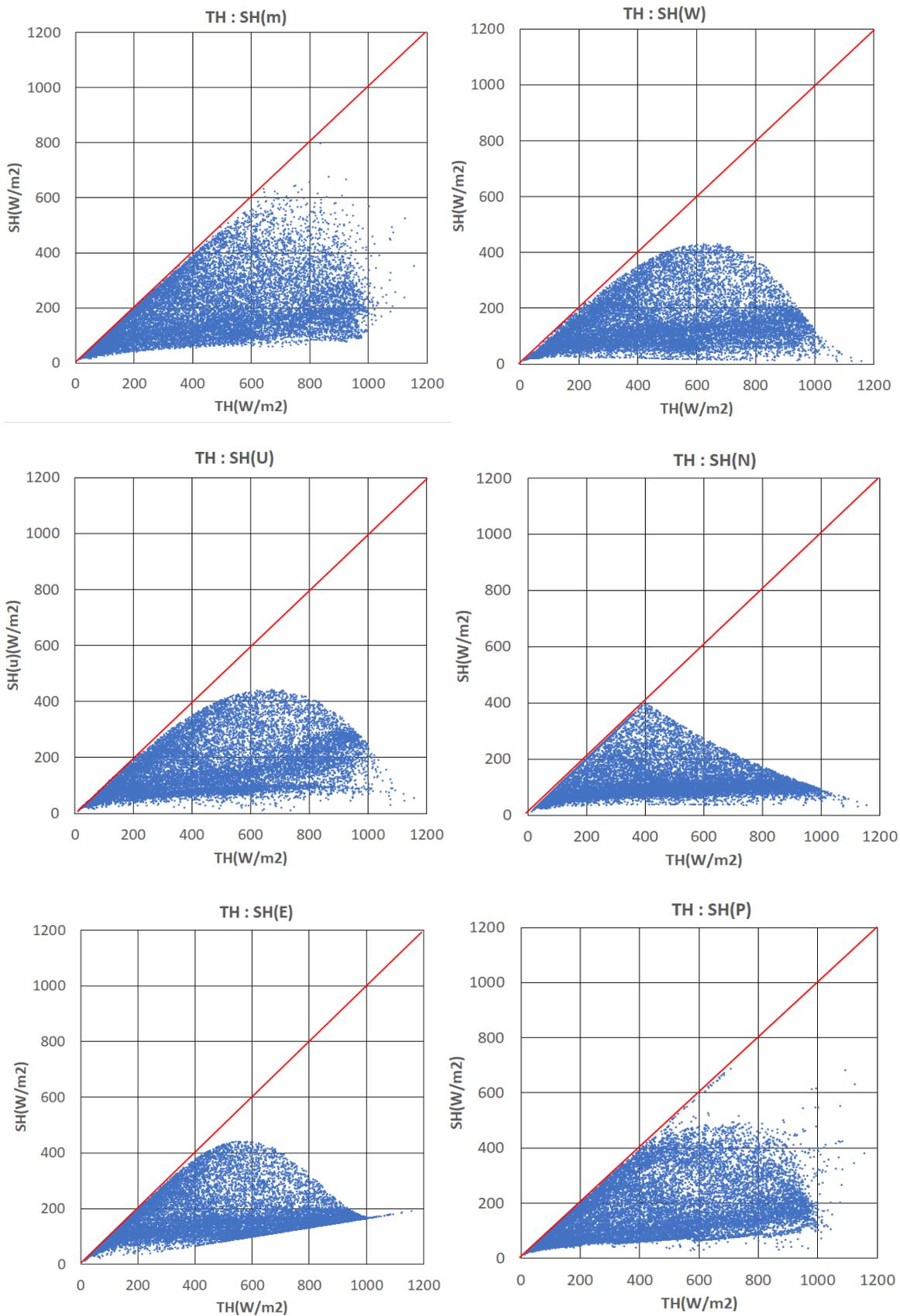


図 3-1 水平面全天日射量の観測値 TH と水平面天空日射量 SH の関係

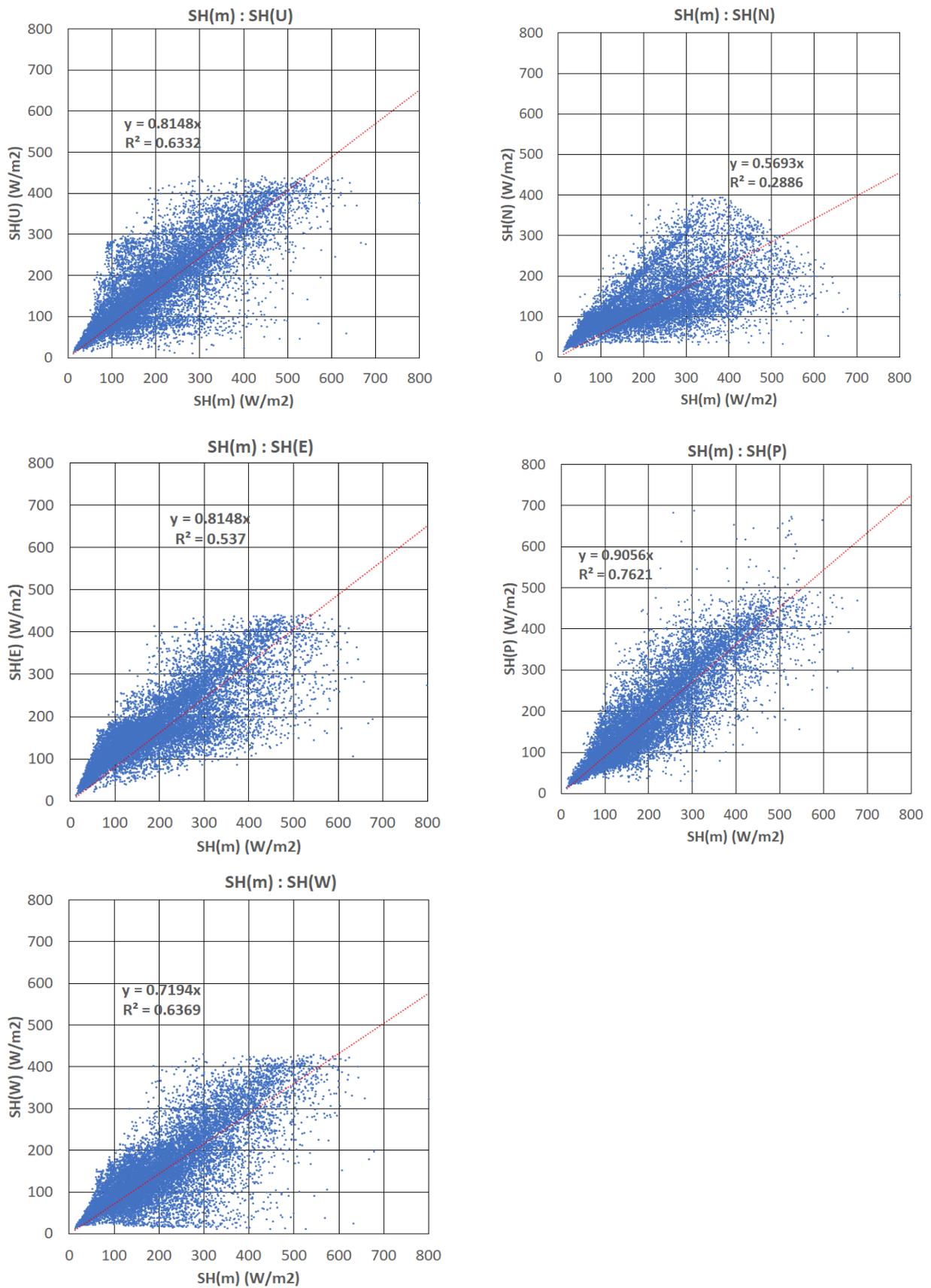


図 3-2.1 SH の観測値 SH(m)とモデルによる SH の推定値の比較

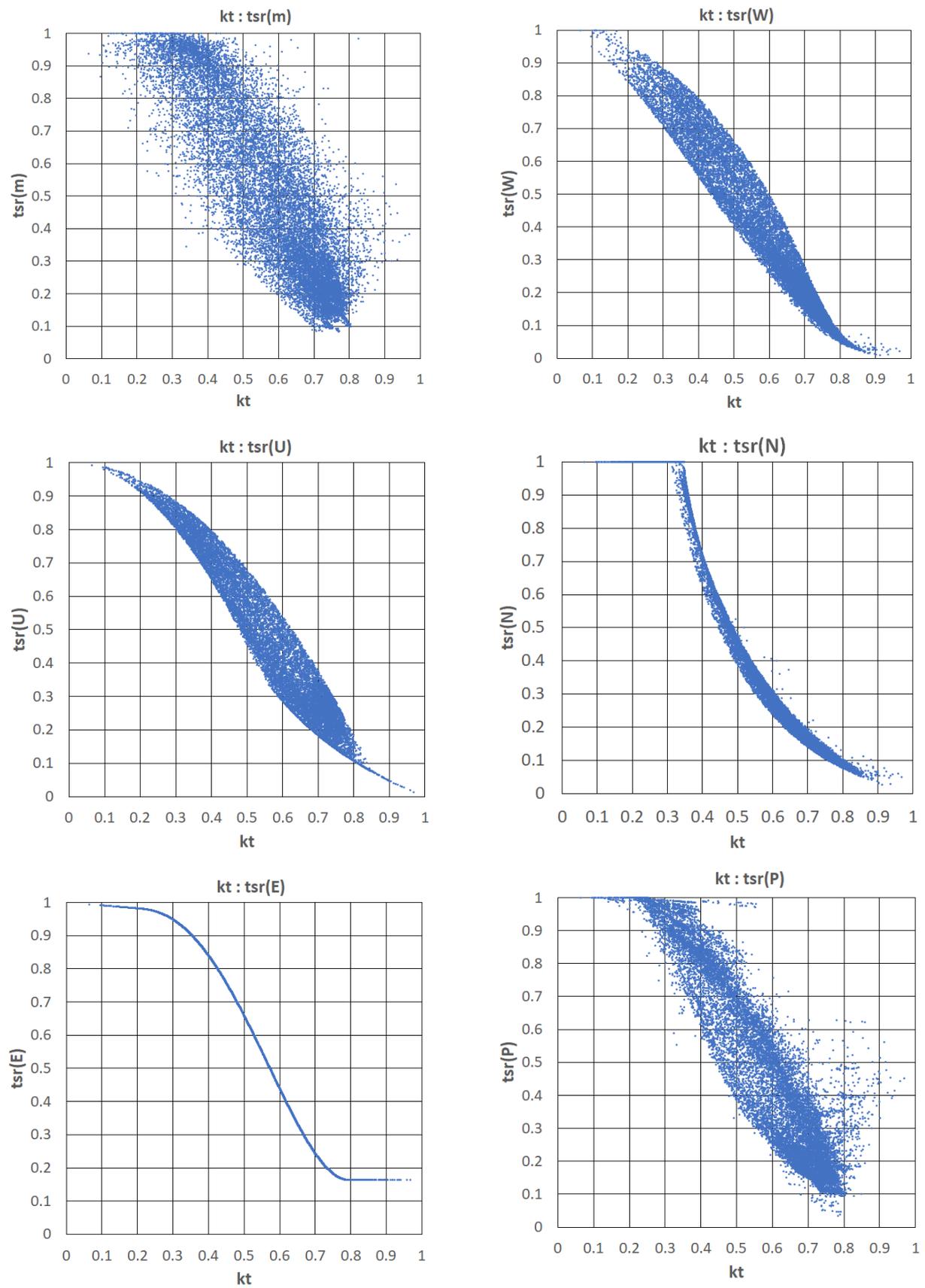


図 3-2.2 晴天指数 K_t と散乱比 tsr の関係

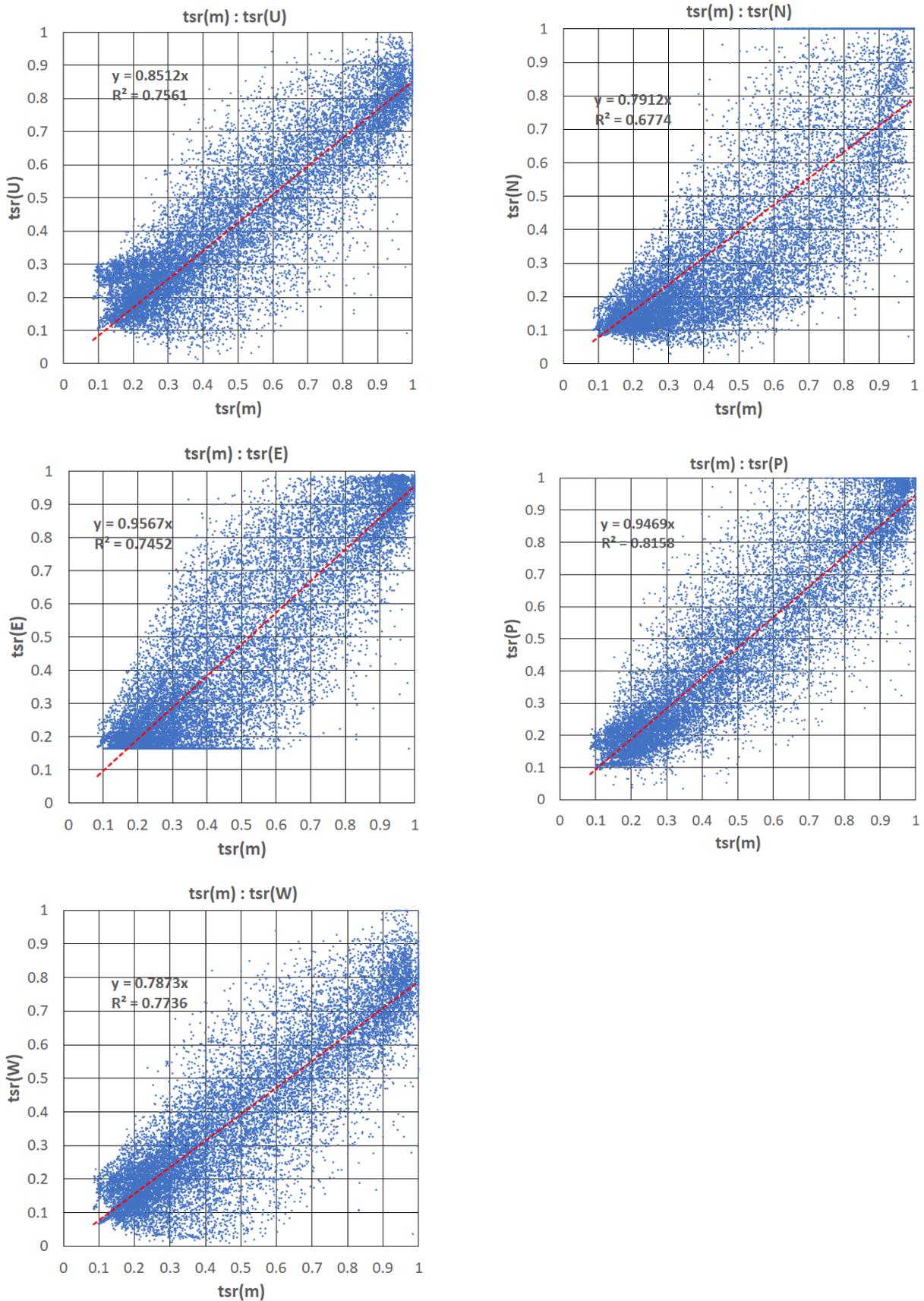


図 3-2.3 SH の観測値から求めた散乱比 tsr と SH の推定値から求めた tsr の関係

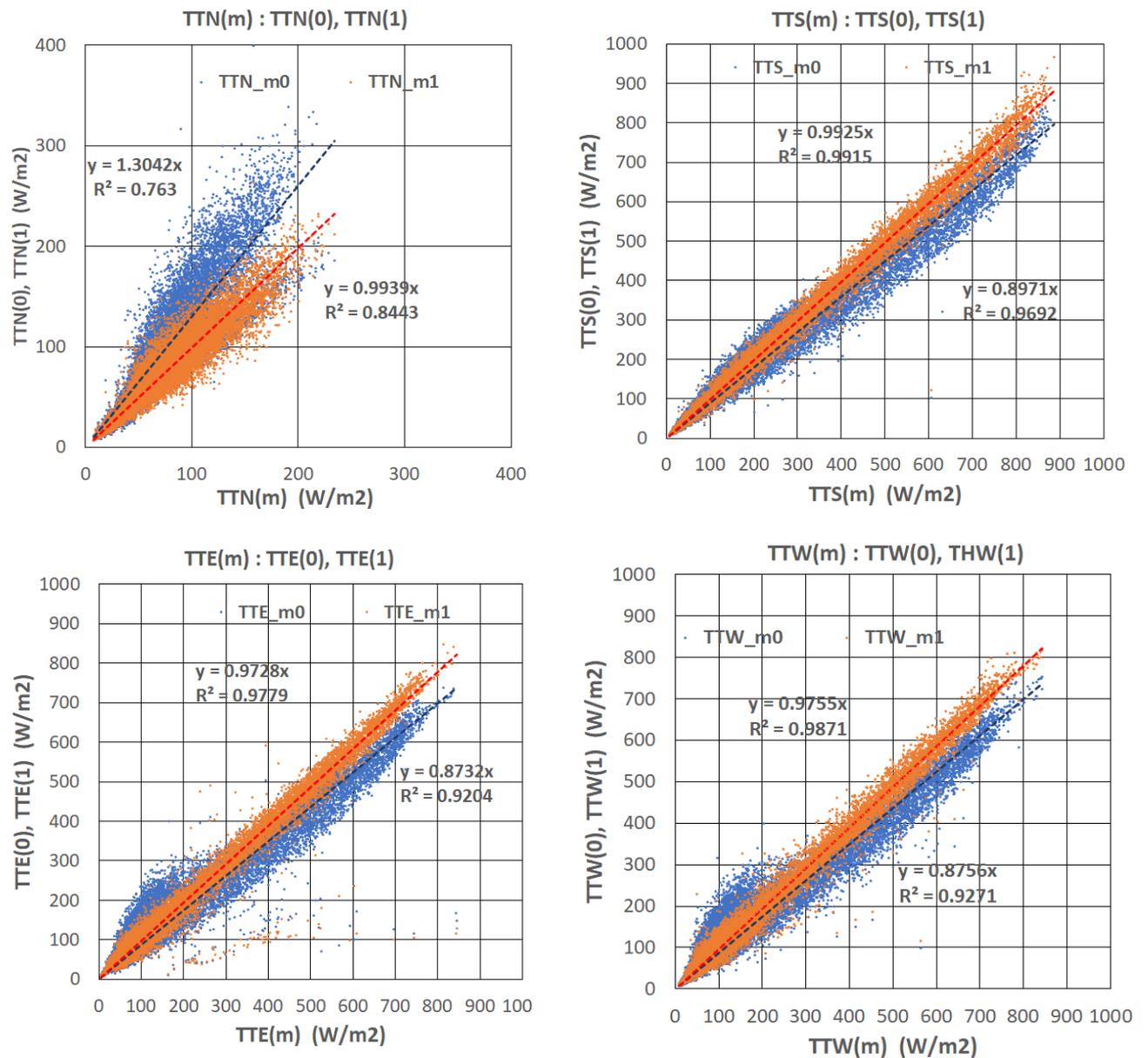
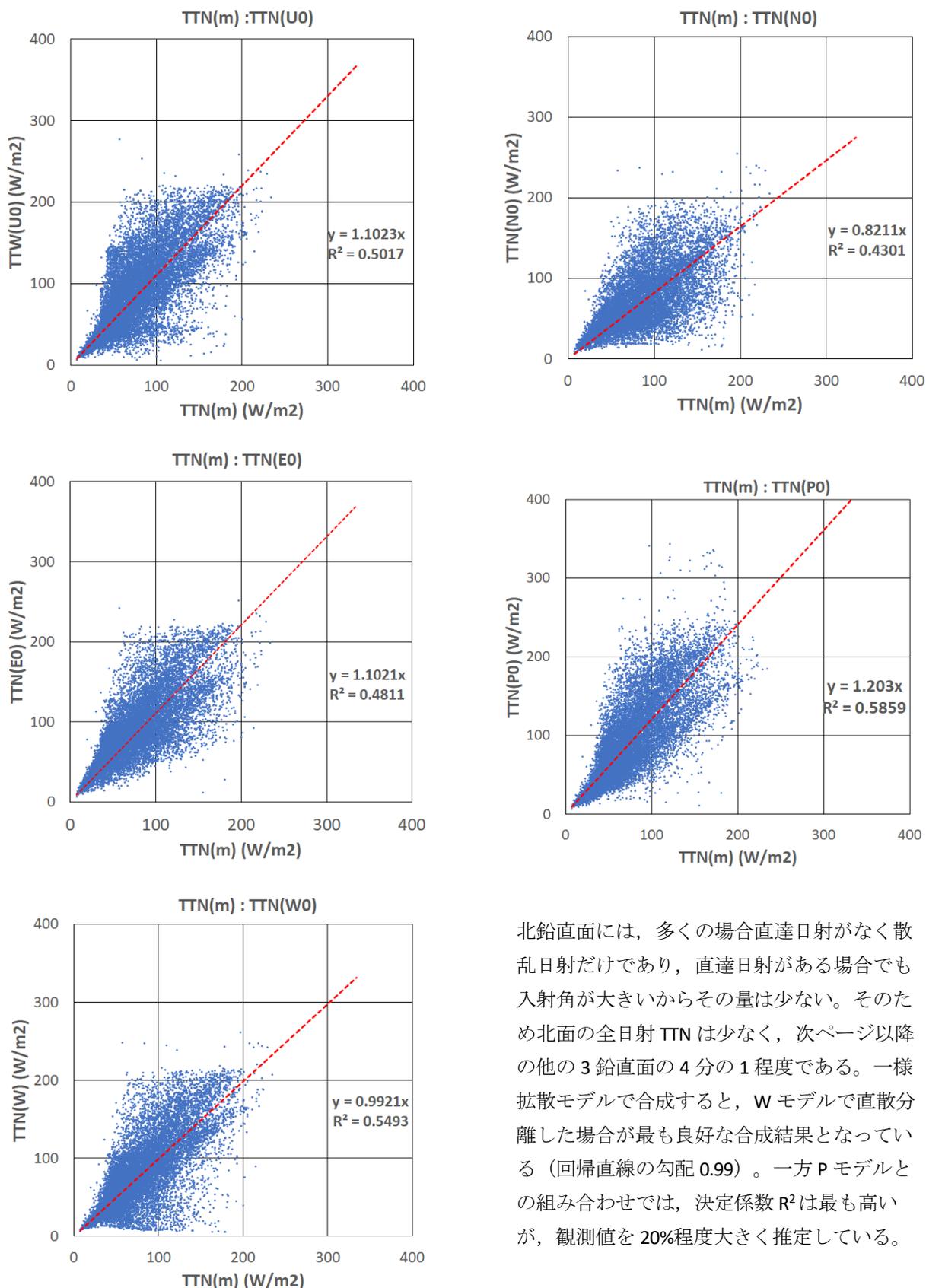


図 3-3 合成モデルによる各方位鉛直面日射量の違い

水平面天空日射量 SH の観測値に一樣分布モデル(0)及び非一樣分布モデル(1)を適用して求めた鉛直面日射量を、鉛直面日射量の観測値と比較した。TTN(m), TTE(m), TTS(m), TTW(m)は、それぞれ、北、東、南、西鉛直面日射量の観測値である。TTN(0), TTE(0), TTS(0), TTW(0)は、それぞれ SH の観測値に一樣分布モデルを適用して合成した北、東、南、西の鉛直面日射量であり、TTN(1), TTE(1), TTS(1), TTW(1)は、SH の観測値に非一樣分布モデルを適用して合成した北、東、南、西の鉛直面日射量である。

一樣分布モデルで合成した場合は、北鉛直面日射量は観測値より約 30%大きくなり、逆に東、南、西鉛直面では観測値より 10%前後小さくなる。これは一樣分布モデルでは準直達日射量が各方位に均等に振り分けられることによると考えられる。これに対し、非一樣分布モデルで合成した場合の観測値とのずれは 3%以内であり、非一樣分布モデルによる鉛直面日射量の推定値が、良好に観測値を再現していることがわかる。



北鉛直面には、多くの場合直達日射がなく散乱日射だけであり、直達日射がある場合でも入射角が大きいからその量は少ない。そのため北面の全日射 TTN は少なく、次ページ以降の他の 3 鉛直面の 4 分の 1 程度である。一様拡散モデルで合成すると、W モデルで直散分離した場合が最も良好な合成結果となっている（回帰直線の勾配 0.99）。一方 P モデルとの組み合わせでは、決定係数 R² は最も高いが、観測値を 20%程度大きく推定している。

図 3-4.1 北鉛直面の日射量 TTN の観測値と推定値の比較（合成は一様分布モデルによる）

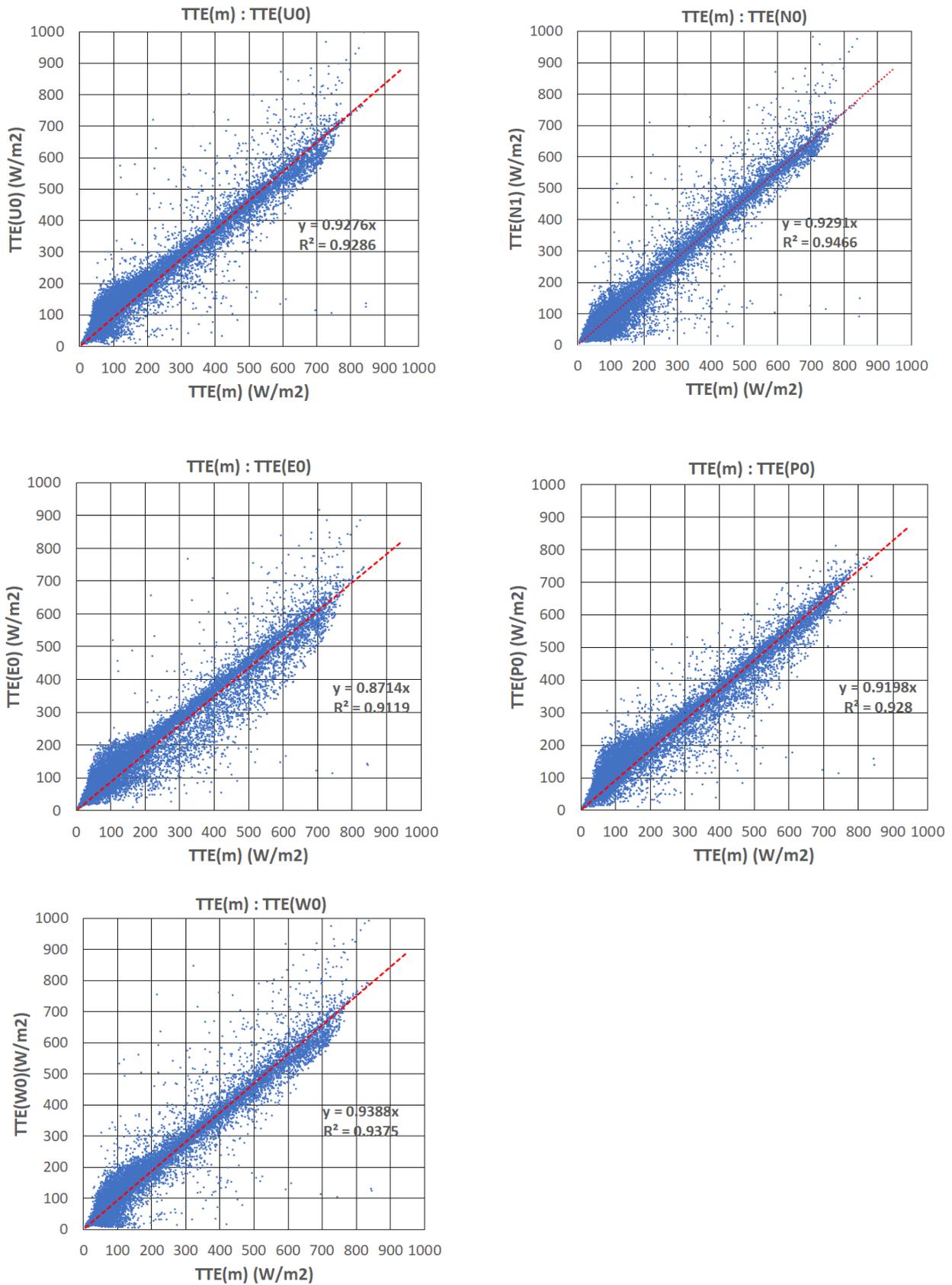


図 3-4.2 東鉛直面の日射量 TTN の観測値と推定値の比較（合成は一様分布モデルによる）

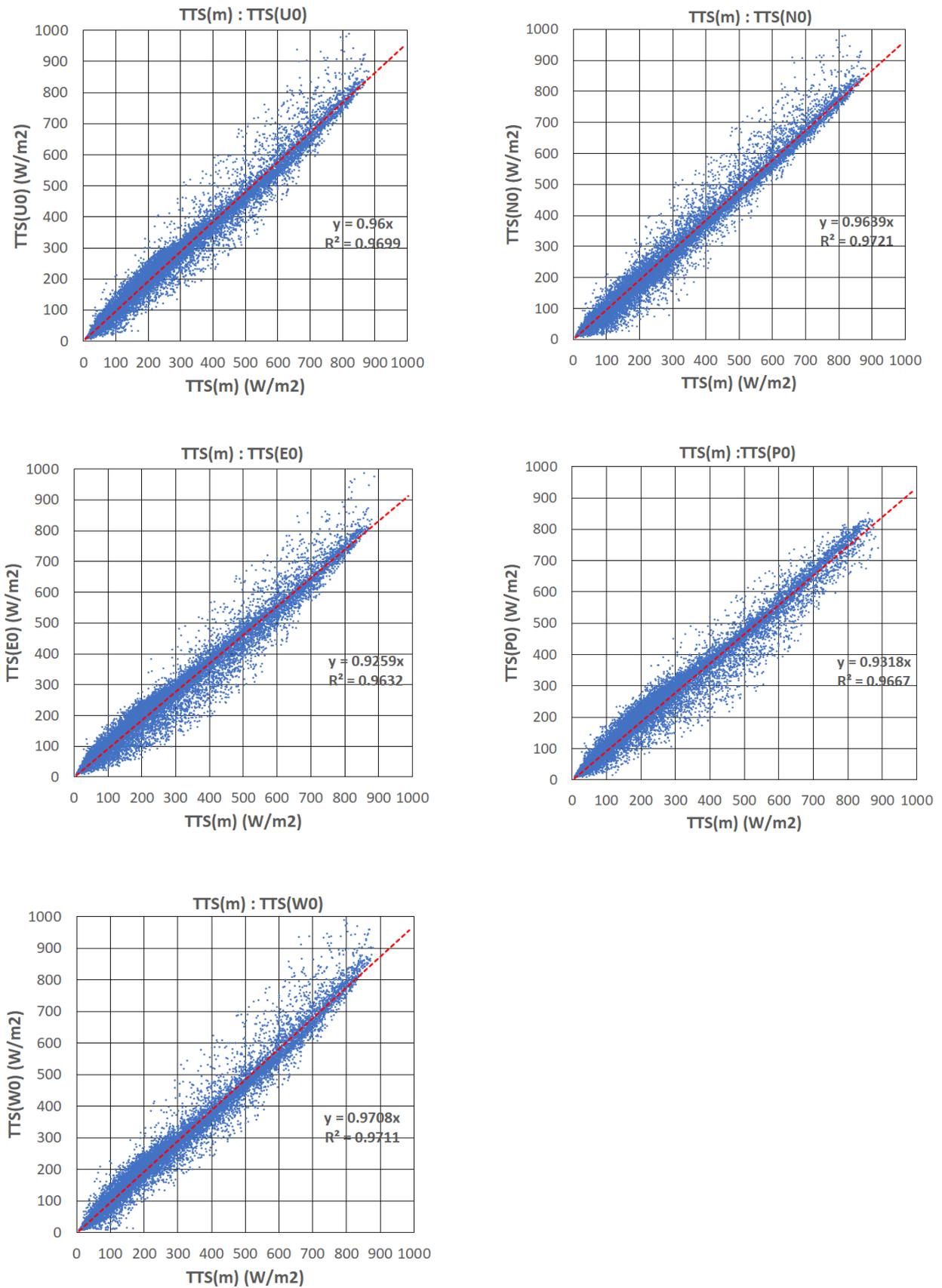


図 3-4.3 南鉛直面の日射量 TTN の観測値と推定値の比較 (合成は一様分布モデルによる)

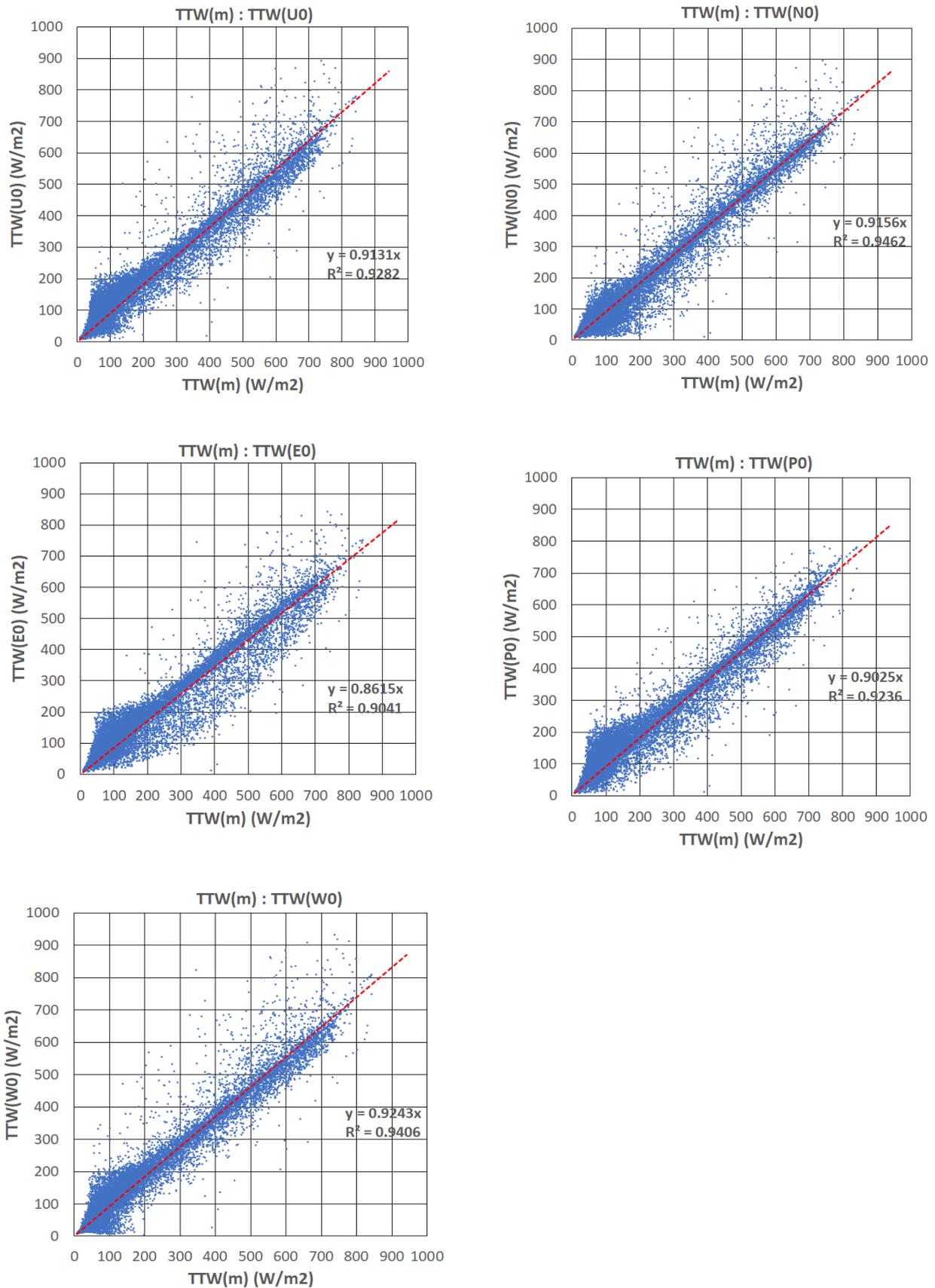


図 3-4.4 西鉛直面の日射量 TTN の観測値と推定値の比較 (合成は一様分布モデルによる)

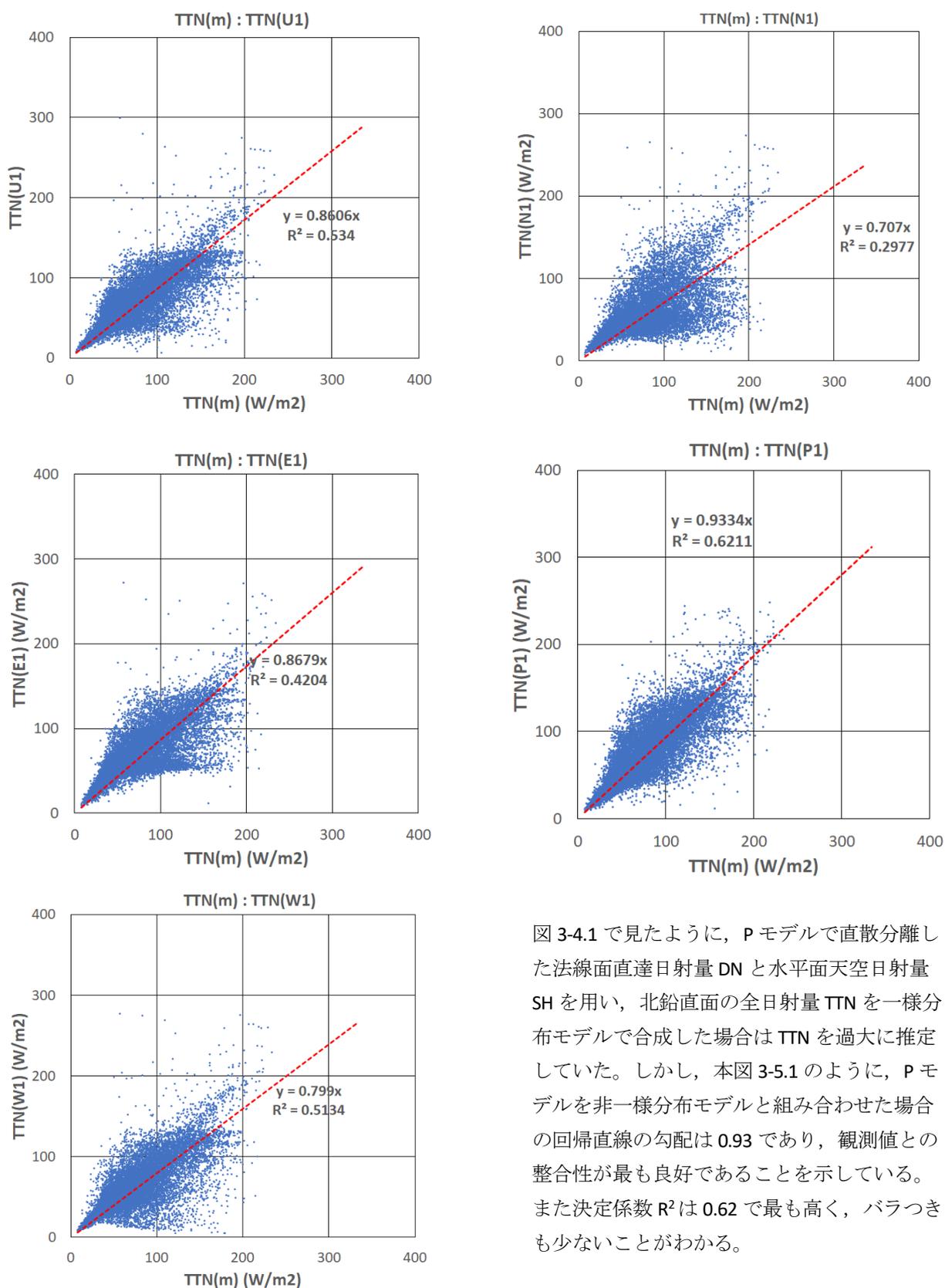


図 3-4.1 で見たように、P モデルで直散分離した法線面直達日射量 DN と水平面天空日射量 SH を使い、北鉛直面の全日射量 TTN を一様分布モデルで合成した場合は TTN を過大に推定していた。しかし、本図 3-5.1 のように、P モデルを非一様分布モデルと組み合わせた場合の回帰直線の勾配は 0.93 であり、観測値との整合性が最も良好であることを示している。また決定係数 R^2 は 0.62 で最も高く、バラつきも少ないことがわかる。

図 3-5.1 北鉛直面の日射量 TTN の観測値と推定値の比較（合成は非一様分布モデルによる）

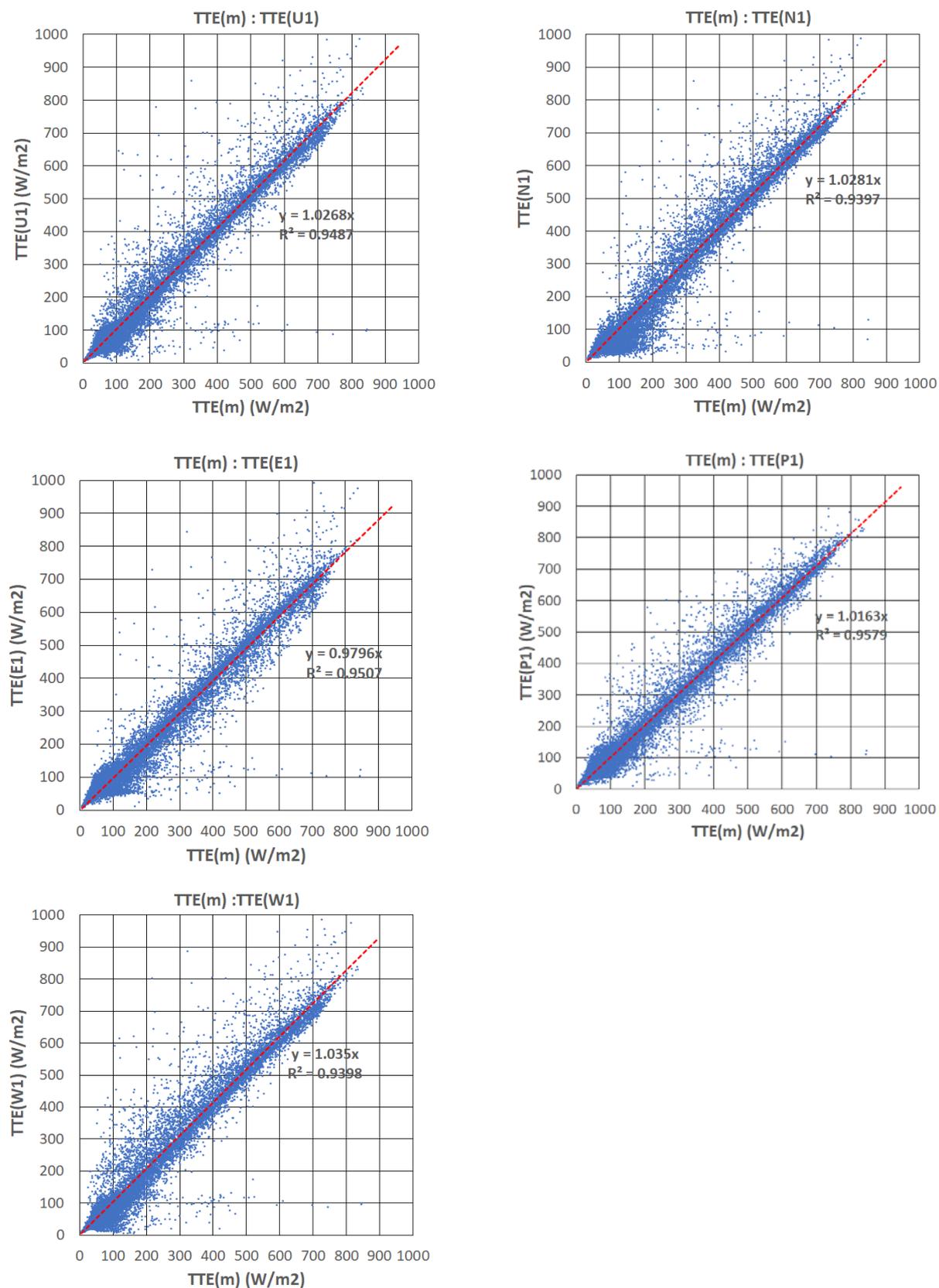


図 3-5.2 東鉛直面の日射量 TTE の観測値と推定値の比較 (合成は非一様分布モデルによる)

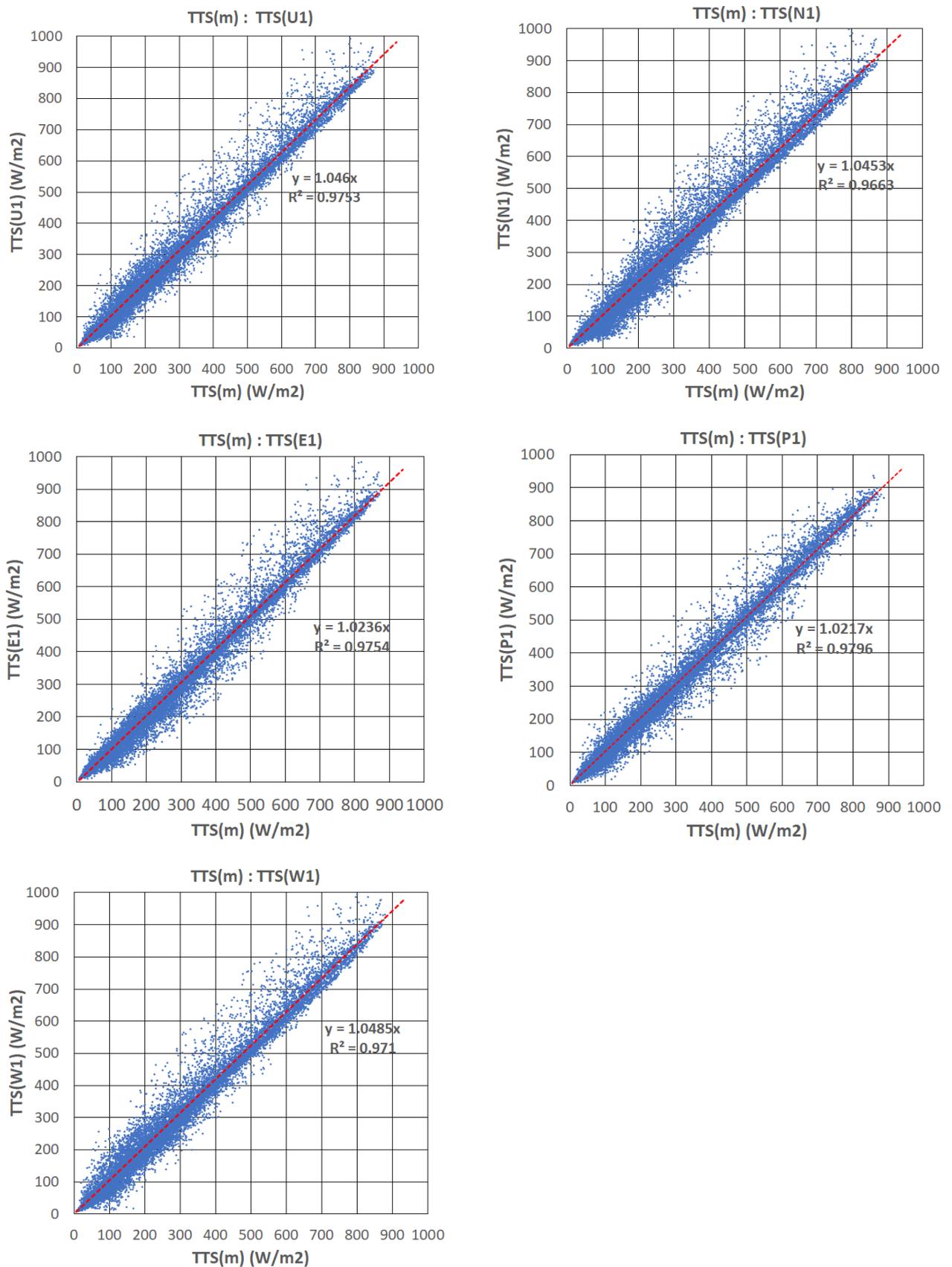


図 3-5.3 南鉛直面の日射量 TTS の観測値と推定値の比較（合成は非一様分布モデルによる）

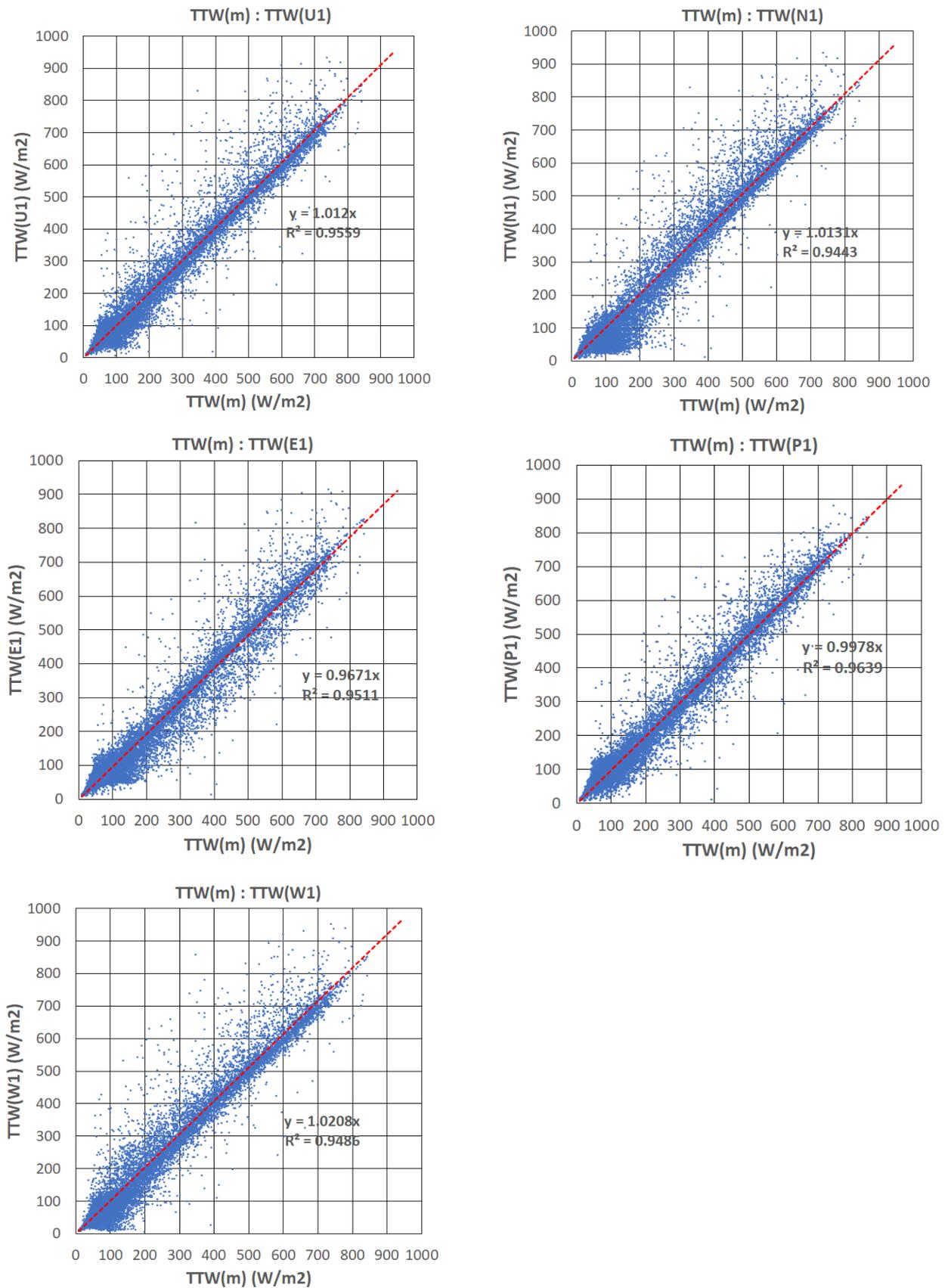


図 3-5.4 西鉛直面の日射量 TTW の観測値と推定値の比較（合成は非一様分布モデルによ

第4章 数値指標によるモデルの評価

直散分離モデル及び合成モデルによる推定的良好度を数値指標により評価する。評価に用いる数値指標を表4-1に、各数値指標の計算法を表4-2に整理する。なお、本章での評価に用いた観測値は、第3章と同様、表3-1の大阪市立大学における井川ら[16]による2011年の10分平均値である。

表4-1 モデルによる推定的良好度を表す数値指標

記号	意味	評価判定基準
F	原点を通る回帰直線の勾配	1に近いほど良好
R2, CC	決定係数, 相関係数	1以下の数値で, 1に近いほど良好
RMSE, MAE, MBE	平均平方二乗誤差, 平均絶対誤差, 平均誤差	0に近いほど良好

表4-2 各数値指標の計算法

記号	計算式	特徴
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$	平均平方誤差 (Root Mean Square Error)。観測値と推定値の差の二乗を合計してデータ数で割り、平方根をとった値。MAEと同様な目的に使用する指標であるが、MAEに比べて外れ値をより大きな誤差として評価する傾向がある。
MAE	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - y_i $	平均絶対誤差 (Mean Absolute Error)。観測値と推定値の差の絶対値を合計してデータ数で割った値。推定値の外れ度を表す指標である。
MBE	$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)$	平均誤差 (Mean Bias Error)。観測値と推定値の差を合計してデータ数で割った値。推定値の偏りを表す指標である。
CC	$CC = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - ax)(y_i - ay)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - ax)^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - ay)^2}}$	相関係数 (Correlation Coefficient)。xとyの共分散 (covariance, 下式の分子) を、xの標準偏差 (standard deviation, 下式の分母の左の項) とyの標準偏差 (下式の分母の右の項) で割った値。-1~1の値。
R2	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - fx_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - ay_i)^2}$	決定係数 (Coefficient of Determination)。予測式の精度 (予測式がデータをどの程度説明できるか) を表す値。最小二乗法による直線回帰式の場合、相関係数の二乗と決定係数は一致するが、本節での回帰直線は原点を通るというという拘束条件を付しているため、直線回帰式を求めた場合はCCを二乗してもR2にはならない。

xi : 観測値, yi : モデルによる推定値, ax : xi の平均値, ay : yi の平均値, n : データ数

4-1 数値指標による直散分離モデルの比較

図 4-1.1(a), 図 4-1.1(b)で, SH の観測値と, 直散分離モデルにより計算した SH を比較する。図 4-1.2(a), 図 4-1.2(b)では, TH と SH の観測値から計算した散乱比 t_{sr} と, TH の観測値と直散分離モデルで得た SH から計算した t_{sr} を比較する。比較は表 4-1 で整理した数値指標により行う。

図 4-1 の SH の比較を見ると, P モデルがすべての数値指標で最も良好な値となっている。図 4-2 の t_{sr} は, P モデルが, すべての数値指標が最良ではないものの, 良好な値となっている。以上より, 総合的には P モデルが最も良好であると評価される。

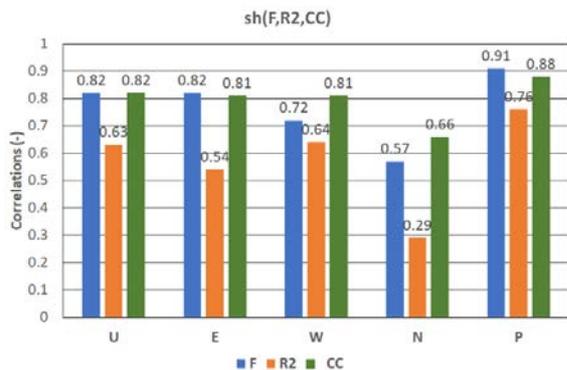


図 4-1.1 (a) SH の観測値と推定値の F, R2, CC

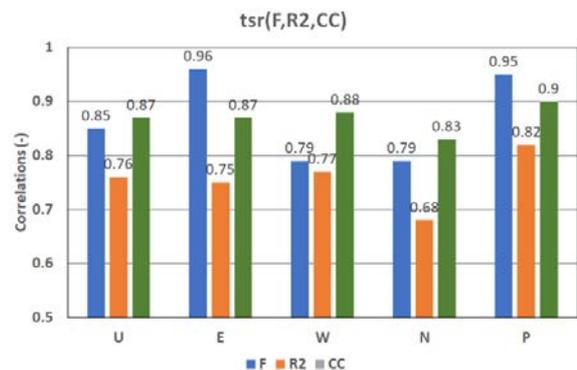


図 4-1.2 (a) t_{sr} の観測値と推定値の F, R2, CC

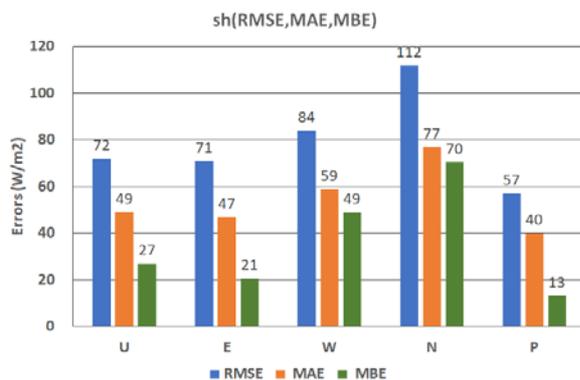


図 4-1.1 (b) SH の観測値と推定値の RMSE,MAE,MBE

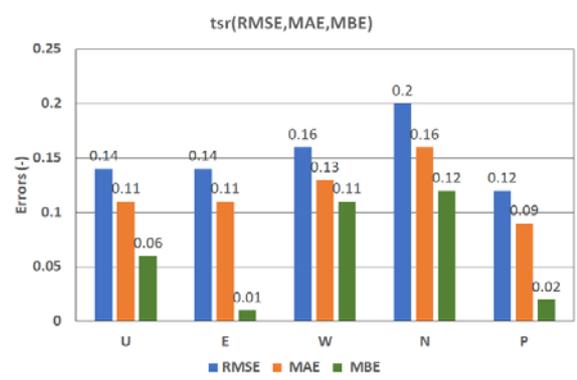


図 4-1.2 (b) t_{sr} の観測値と推定値の RMSE, MAE, MBE

4-2 数値指標による合成モデルの比較

図 4-2.1, 図 4-2.2, 図 4-2.3, 図 4-2.4 で, 鉛直面日射の観測値と推定値の数値指標を比較する。それぞれ, 北面, 東面, 南面, 西面の比較図である。

評価の基準を, 水平面天空日射量 SH, 法線面直達日射量 DN の観測値(m)を用いて各方位の鉛直面日射量を合成した場合とする。(m_0)は一様分布モデルで合成した場合であり, (m_1)は非一様分布モデルで合成した場合である。(m_0)を各方位の鉛直面日射量の観測値と比較すると, ずれが大きく, 特に北面のずれが顕著であることがわかる。これは一様分布モデルの限界を表している。一方(m_1)は 4 方位共, 最もよく観測値を推定しており, P モデルと非一様分布モデルを組み合わせた場合である (P_1) がこれに次ぐ。以上により, 直散分離モデルと合成モデルの組み合わせでは, P モデルと非一様分布モデルが最も推奨される。

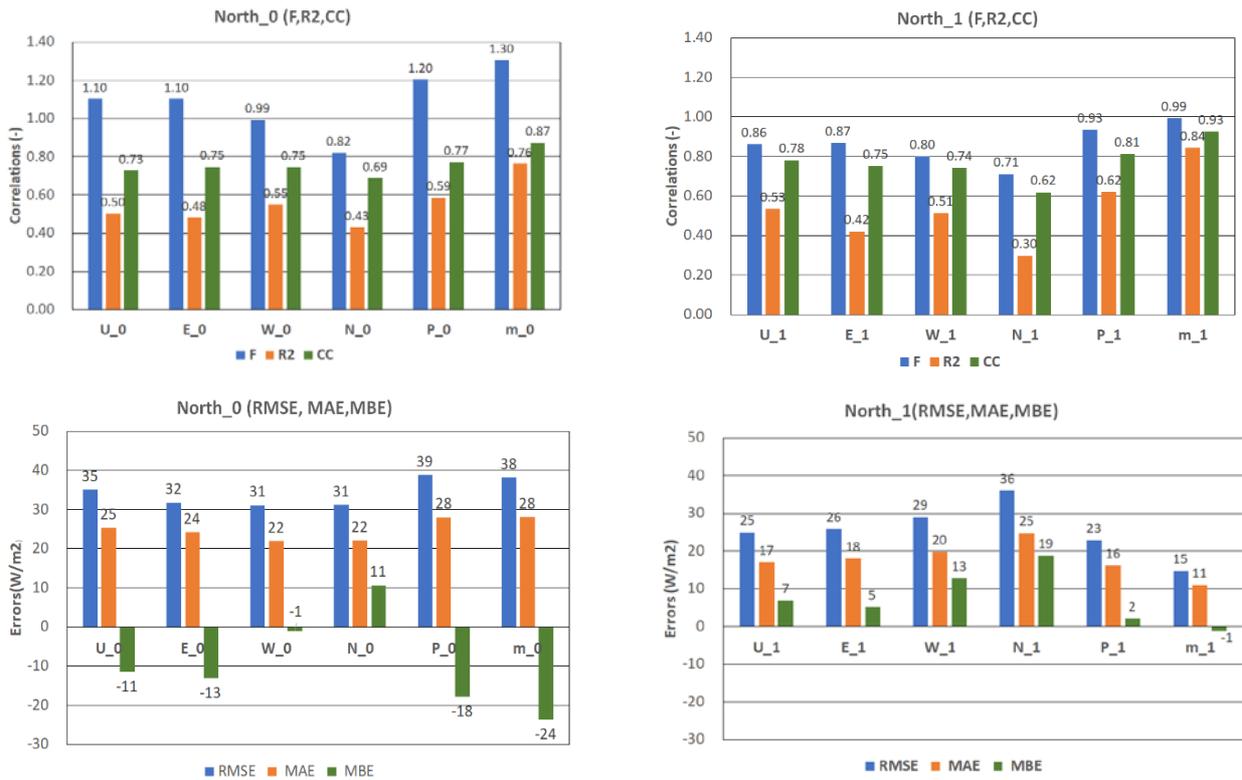


図 4-2.1 北鉛直面日射量の観測値とモデルによる推定値の数値指標による比較
 上段は F, R2, CC。下段は RMSE, MAE, MBE。0 (左側) は一様分布モデルで、1 (右側) は非一様分布モデルで合成。U, E, W, N, P は直散分離モデルだが、m は直散分離モデルによらず SH の観測値を使用した場合。

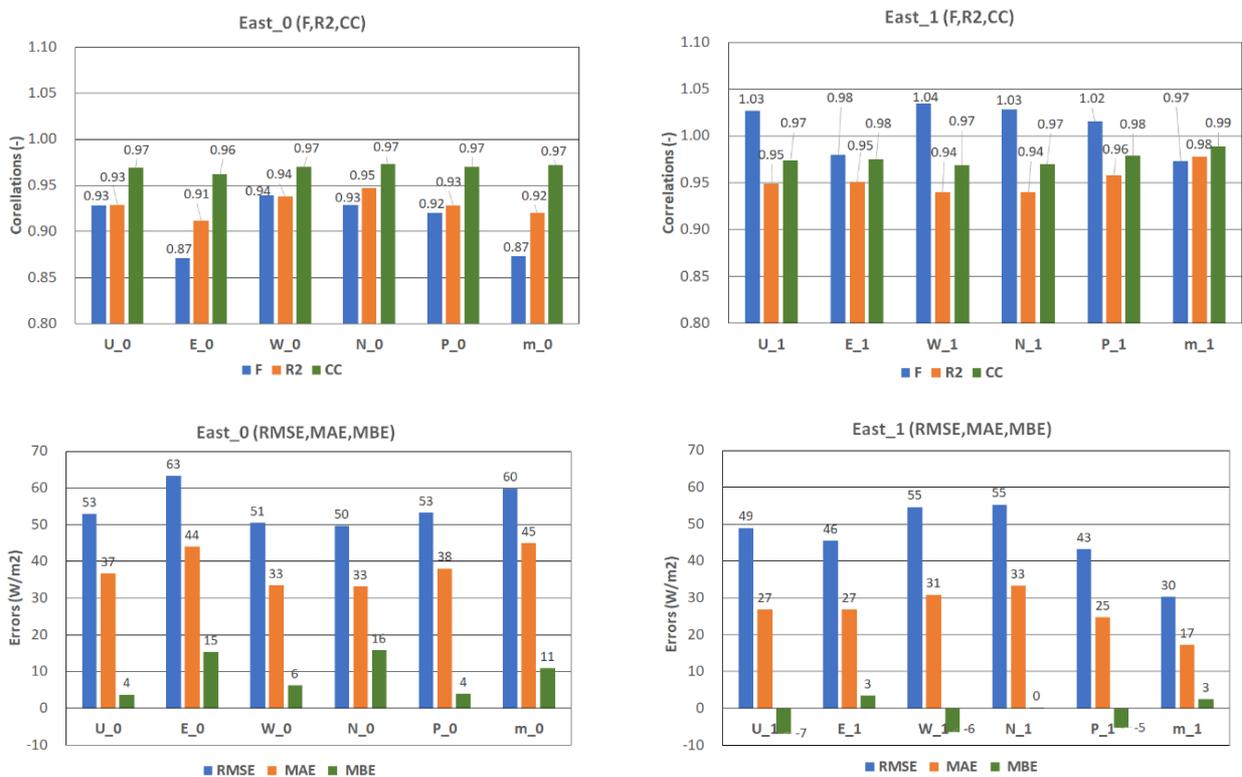


図 4-2.2 東鉛直面日射量の観測値とモデルによる推定値の数値指標による比較

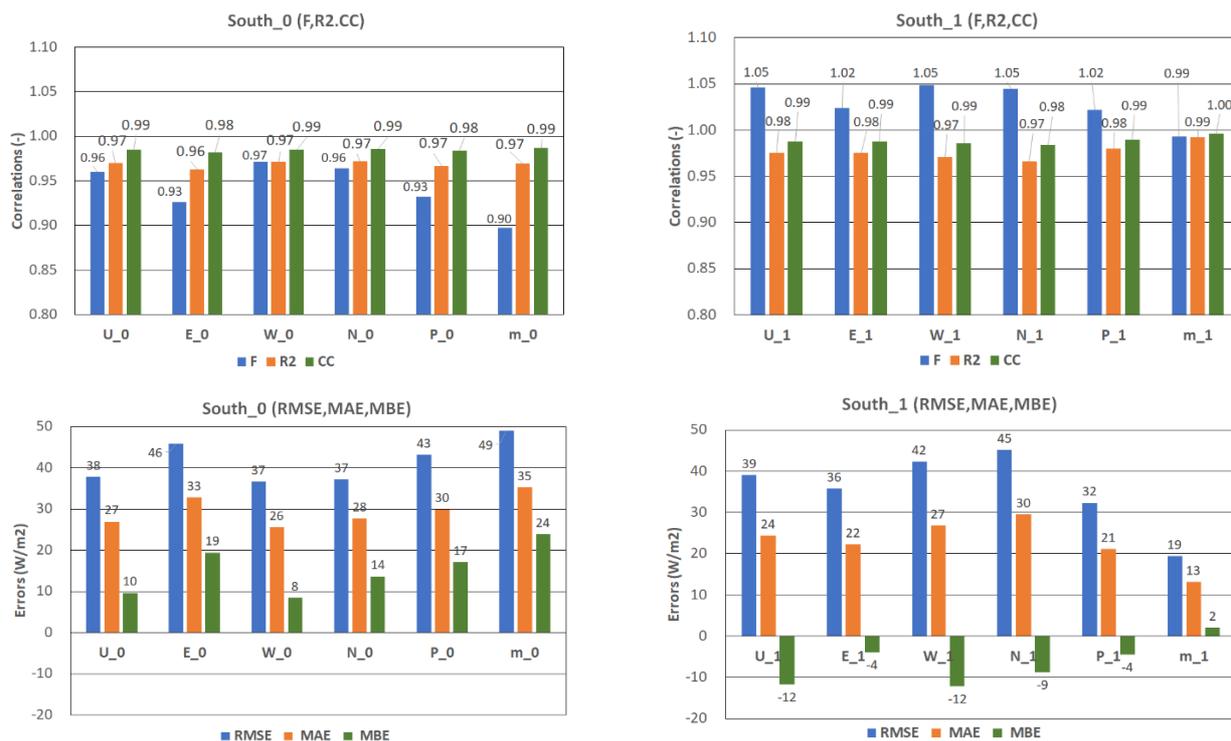


図 4-2.3 南鉛直面日射量の観測値とモデルによる推定値の数値指標による比較

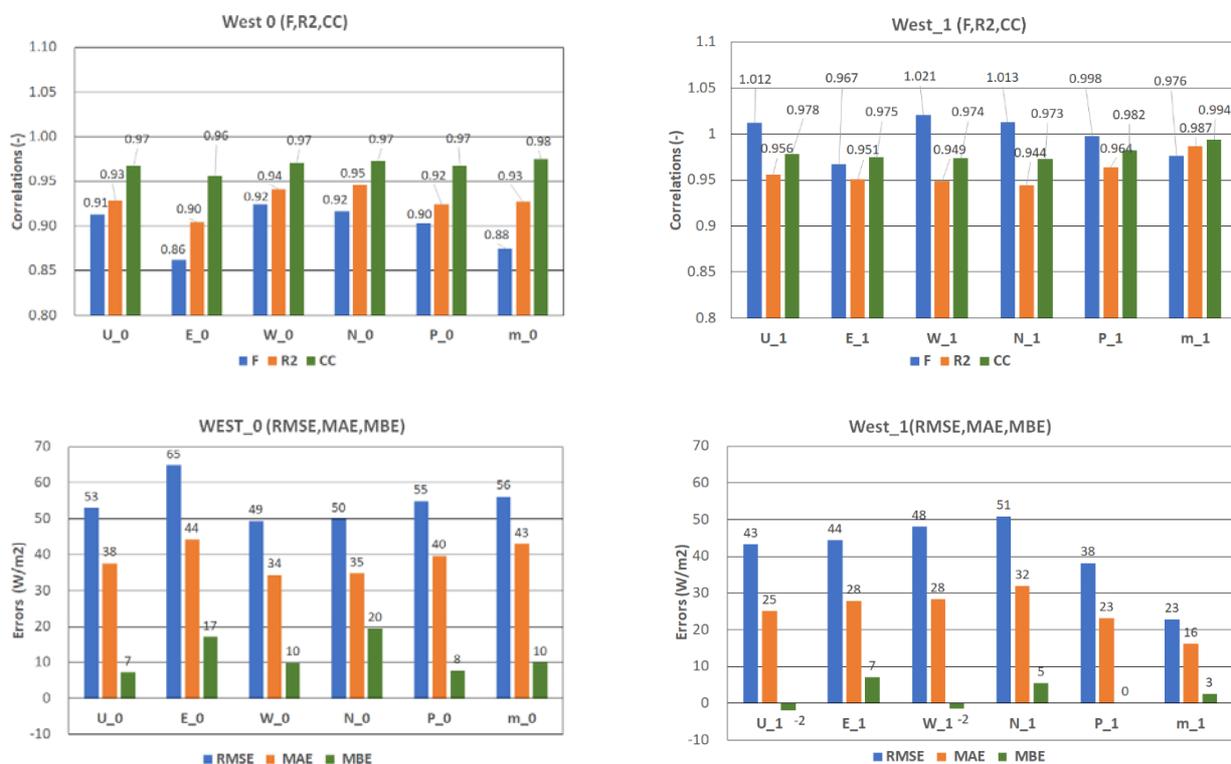


図 4-2.4 西鉛直面日射量の観測値とモデルによる推定値の数値指標による比較

第5章 日射直散分離プログラムの計算例

第4章4-1で、5つの直散分離モデルによって得られた天空日射量を、観測値と6つの数値指標（F：原点を通る回帰直線の勾配，R2：決定係数，CC：相関係数，RMSE：平均二乗誤差，MAE：平均絶対誤差，MBE：平均誤差）で比較した。その結果，Pモデルによる数値指標が最も良好であった。PモデルとはPerezらによる直達日射の推定式[9]を用いた直散分離法（表3.2参照）で，SplitG（1.1参照）に組み込まれている。そのコンピュータープログラムは入手可能なので^{注4}，開発者の意図通りに計算するにはそれを入手して用いるのがよい。SplitGには，U（Udagawa），E（Erbs），W（Watanabe），N（Nagata）の各モデルも組み込まれている。これらの計算式は第1章1-1(1)～(4)の通り明確で，プログラミングも比較的容易である^{注5}。

Pモデルには，第1章1-1(5)で説明したように， $X(Kt, Z, \Delta Kt, W)$ で表される係数が組み込まれている。Ktはエアマスで補正した晴天指数，Zは天頂角， ΔKt は推定対象時刻前後の時刻のKTの差の絶対値，Wは可降水量（cm）で，それぞれ6，6，5，7段階に分かれ，掛け合わせると1260となる。 ΔKt の7番目は推定対象時刻前後の時刻の日射量が両方とも無い場合に対応する。Perezらのプログラムでは，Kt, Z, ΔKt , Wの閾値を，それぞれ，ktbin, zbin, dktbin, wbinで定義している。Pモデルをプログラムを実行するには，計算対象時刻(current reading)だけでなく，前時刻(previous reading)と次の時刻(next reading)の全天日射量が必要で，これらから計算対象時刻，前時刻，及び次の時刻のKtが求められる。ただし，第1章1-1(5)で述べたように，プログラムの汎用性を高めるため，前時刻または次の時刻の全天日射量が無い場合，両方とも無い場合についても係数値が準備されている。計算対象時刻の全天日射量が無い場合や天頂角が間違っている場合（天頂角が90°以上の場合）は，本プログラムの計算対象外としている。また可降水量は，引数として受け取った露点温度からプログラム内部で計算しているが，露点温度が無い場合についても係数値が準備されている。前時刻または次の時刻の全天日射量が無い場合は，それぞれに引数として-999.0を受け渡す。露点温度が無い場合も同様に，引数として-999.0を受け渡す。

表5-1に，つくばの2015年10月1日の日の出から12時50分までの10分間隔の気温（℃），相対湿度（%），水平面全天日射量（kJ/m²h），水平面天空日射量（kJ/m²h），法線面直達日射量（kJ/m²h）の観測値，観測値に基づく露点温度（℃），太陽高度（°），大気外法線面日射量（kJ/m²h）の計算値，SplitGに組み込まれているPモデルによる天空日射量（kJ/m²h），直達日射量（kJ/m²h）の推定値を整理した。図5-1には直達日射量と天空日射量の観測値と計算値を時系列で比較図を示した。表5-1は計算が正しいかどうかの確認用として用いていただきたい。

第4章4-2で4方位の日射量を一様分布モデル[11]と非一様分布モデル[12]により合成し，観測値と比較したが，これらの比較により，P直散モデルと非一様分布モデルの組合せの6数値指標（F, R2, CC, RMSE, MAE, MBE）が最も良好で，観測値との整合性が最も高かった。このことから，本解説では，Pモデルによる直散分離と非一様分布モデルの組合せを推奨する。合成モデルの計算例とプログラムは第6章を参照されたい。

注4 文献[9]には次の記述がある。The models are available as Fortran 77 functions with clearly specified input and output parameters. The source codes are available on 3.5-inch or 5.25-inch diskettes upon request to SERI or the ASRC for a minor processing fee.

注5 ただし，Nモデル，Wモデルには大気透過率Pの収束計算が含まれる。

表 5-1 水平面天空日射と法線面直達日射の観測値と推定値 (2015年10月1日, つくば)

つくば EA地番：301 緯度：36.050° 経度：140.130° 標高：43m 年月日：2015年10月1日

時	分	気温	相対湿度	露点温度	太陽高度	晴天指数	大気外法線面	水平面全天	水平面天空	法線面直達	Perez 天空	Perez 直達
		°C	%	°C	°	—	kJ/m ² h					
6	10	14.4	90	12.7	6.4	0.350	819.3	32.0	24.5	67.0	23.3	77.7
	20	14.2	91	12.7	8.4	0.401	819.3	48.0	32.9	103.0	30.3	121.2
	30	14.2	89	12.5	10.4	0.501	819.3	74.0	43.9	167.0	38.3	198.1
	40	14.4	87	12.3	12.4	0.496	819.3	87.0	49.9	173.0	35.7	239.3
	50	15	87	12.9	14.3	0.473	819.3	96.0	49.2	189.0	47.0	198.1
7	0	15.2	85	12.7	16.3	0.466	819.3	107.0	57.1	178.0	56.9	178.6
	10	15.3	83	12.5	18.2	0.394	819.3	101.0	55.1	147.0	76.1	79.7
	20	16.1	82	13.0	20.1	0.511	819.3	144.0	58.7	248.0	77.5	193.4
	30	16.4	78	12.5	22.0	0.592	819.3	182.0	66.1	309.0	70.3	298.0
	40	16.3	77	12.2	23.9	0.551	819.3	183.0	68.8	282.0	89.7	230.3
8	0	17.3	78	13.3	25.7	0.703	819.3	250.0	107.6	328.0	85.4	379.0
	10	17.4	77	13.1	29.3	0.401	819.3	152.0	114.1	82.0	123.0	62.7
	20	18	74	13.1	31.1	0.426	819.3	171.0	118.1	108.0	131.8	80.0
	30	17.6	74	12.7	32.8	0.579	819.3	245.0	149.5	185.0	136.6	209.9
	40	18.1	72	12.7	34.5	0.369	819.3	164.0	123.9	74.0	142.7	39.3
9	0	18.5	71	13.0	37.7	0.623	819.3	289.0	208.6	142.0	140.1	263.0
	10	19.1	69	13.0	39.2	0.534	819.3	258.0	186.1	122.0	157.7	170.1
	20	19	69	13.0	40.7	0.475	819.3	238.0	171.4	109.0	181.3	92.8
	30	19.4	69	13.3	42.0	0.543	819.3	281.0	198.8	130.0	172.5	171.7
	40	19.4	69	13.3	44.6	0.457	819.3	244.0	212.7	48.0	188.2	85.7
10	0	19.9	68	13.5	45.7	0.392	819.3	215.0	196.2	28.0	185.0	44.8
	10	19.6	65	12.6	46.8	0.315	819.3	177.0	173.6	5.0	162.0	21.9
	20	20.1	65	13.0	47.7	0.304	819.3	175.0	161.7	19.0	161.8	18.8
	30	21.2	64	13.8	48.6	0.578	819.3	362.0	157.0	268.0	217.2	189.3
	40	22.4	62	14.3	49.3	0.237	819.3	139.0	137.6	2.0	136.5	3.5
11	0	21.9	64	14.4	50.4	0.318	819.3	190.0	189.3	1.0	182.0	11.0
	10	22.5	65	15.1	50.7	0.524	819.3	318.0	198.1	162.0	226.6	123.5
	20	21.8	65	14.5	50.9	0.716	819.3	440.0	141.6	398.0	128.4	415.5
	30	21.5	67	14.8	51.0	0.676	819.3	420.0	134.2	377.0	163.2	338.7
	40	21.5	66	14.5	50.9	0.676	819.3	420.0	134.2	377.0	163.2	338.7
12	0	21.7	67	14.9	50.7	0.304	819.3	175.0	161.7	19.0	161.8	18.8
	10	21.8	66	14.8	50.3	0.214	819.3	135.0	135.0	0.0	124.4	0.8
	20	21.7	66	14.7	49.8	0.197	819.3	125.0	125.0	0.0	124.4	0.8
	30	22	68	15.4	49.2	0.214	819.3	135.0	135.0	0.0	134.2	1.0
	40	21.9	69	15.5	48.5	0.169	819.3	106.0	106.0	0.0	105.7	0.4
12	0	21.9	68	15.2	47.6	0.176	819.3	109.0	109.0	0.0	108.6	0.5
	10	21.9	68	15.2	47.6	0.124	819.3	76.0	76.0	0.0	76.0	0.0
	20	21.9	68	15.2	47.6	0.124	819.3	76.0	76.0	0.0	76.0	0.0
	30	21.9	68	15.2	47.6	0.135	819.3	82.0	82.0	0.0	82.0	0.0
	40	21.8	69	15.5	46.7	0.135	819.3	82.0	82.0	0.0	82.0	0.0

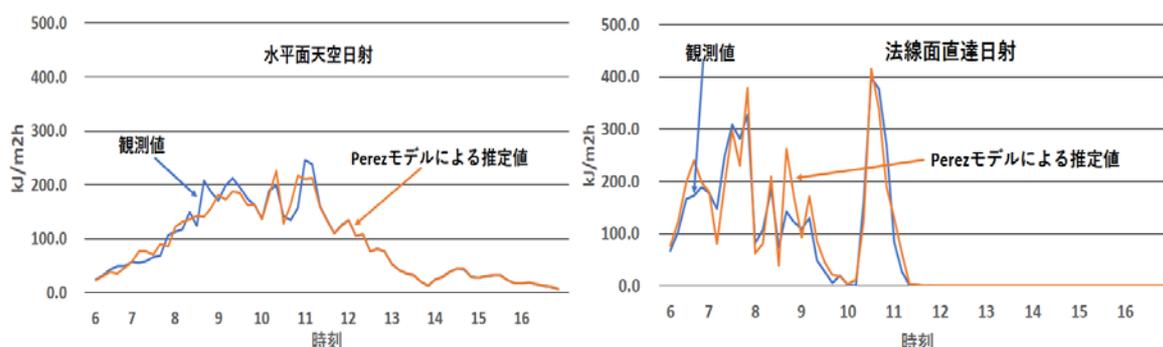


図 5-1 水平面天空日射量と法線面直達日射量の観測値と推定値 (つくば 10 分値, 2015 年 10 月 1 日)

第6章 斜面日射の合成プログラムの計算例

通常入手可能な日射量は水平面全天日射量 TH であるが、屋内環境や熱負荷のシミュレーションに必要な日射量は、壁面、屋根面等の水平面でない面に入射する斜面日射量 TT である。 TT は、 TH から直散分離によって推定された法線面直達日射量 DN と水平面天空日射量 SH から推定する。本章では、 DN と SH を与え、 TT を推定するプログラムの例として `tiltrad.f90` を紹介する。

第3章、4章の比較、特に図3-3でみたように、 TT を、一様分布モデルによって推定するか、あるいは非一様分布モデルによって推定するかにより TT にかなりの差が生じること、及び非一様分布モデルによる方が観測値を良好に再現することがわかった。図4-1のように、直散分離モデルだけを比較すれば Perez モデルが最も良好であるが、Perez モデルで直散分離して得た DN 、 SH を一様分布モデルにより合成すれば必ずしも良好な鉛直面日射量の推定値は得られず、非一様分布モデルで合成を行わなければあまり意味がないという結果も得られた(図4-2)。すなわち、直散分離は TT を得るためのひとつの段階であり、 TT を良好な精度で推定するには、直散分離モデルと相性の良い合成モデルとを組み合わせなければならない。

直散分離モデルを選択し、 DN 、 SH をユーザに提供するのは容易である。しかし、 DN と SH から TT を推定する計算は、シミュレーションプログラムに組み込まなければならない。何故なら、壁面や屋根面の傾斜角や方位角は多様なため、 TT を入力データとして与えるやり方には限界があるからである。しかし、多くの場合、プログラムに組み込まれている合成モデルは一様分布モデルであり、非一様分布モデルはあまり普及しているとはいえない。本章の巻末に添付した `tiltrad.f90` は、コメント行を除けば100行足らずの短いものであるから、シミュレーションプログラムの開発の参考にしていただければ幸いである。

プログラムによる計算例を表5-1に示した。計算例には、観測値を得ることが困難な鉛直面以外(傾斜角 30°)の斜面も加えた。一様分布モデルと異なり、非一様分布モデルを使用する場合は、準直達日射の扱い等でユーザの選択肢が発生する。この点を含め、必要な入力データ、出力される計算結果等をプログラムのコメント行に記述した。

表5-1 `tiltrad.f90` による計算例 (2006年7月13日：年間通し日数194日)

太陽定数 (MJ/m ² h)		太陽高度角 (°)	太陽方位角 (°)		アルベド (-)		水平面全天 (MJ/m ² h)			法線面直達 (MJ/m ² h)		水平面天空 (MJ/m ² h)	
4.92		72.8	-39.5		0.2		3.25			2.29		1.06	
斜面 傾斜角	選択肢 (def)	斜面 方位角	斜面 直達	斜面 天空	斜面 反射	斜面 全日射	斜面 傾斜角	選択肢 (def)	斜面 方位角	斜面 直達	斜面 天空	斜面 反射	斜面 全日射
90	0	0	0.52	0.53	0.33	1.38	30	0	0	2.16	0.99	0.04	3.19
90	1	0	0.7	0.27	0.33	1.3	30	1	0	2.91	0.34	0.04	3.29
90	2	0	0.52	0.45	0.33	1.3	30	2	0	2.16	1.09	0.04	3.29
90	0	-90	0.43	0.53	0.33	1.29	30	0	-90	2.11	0.99	0.04	3.14
90	1	-90	0.58	0.27	0.33	1.17	30	1	-90	2.85	0.34	0.04	3.23
90	2	-90	0.43	0.42	0.33	1.17	30	2	-90	2.11	1.07	0.04	3.23
90	0	90	0	0.53	0.33	0.86	30	0	90	1.68	0.99	0.04	2.71
90	1	90	0	0.27	0.33	0.59	30	1	90	2.27	0.34	0.04	2.65
90	2	90	0	0.27	0.33	0.59	30	2	90	1.68	0.92	0.04	2.65
90	0	180	0	0.53	0.33	0.86	30	0	180	1.63	0.99	0.04	2.67
90	1	180	0	0.27	0.33	0.59	30	1	180	2.2	0.34	0.04	2.58
90	2	180	0	0.27	0.33	0.59	30	2	180	1.63	0.91	0.04	2.58

斜面日射の合成プログラムのソースコード (fortran90)

```

1  subroutine tiltrad(def, sc, nyear, nday, sh, sA, Aw, beta, albedo, Ig, Ib, Id, tiltIb, tiltId, tiltRef, tiltIt)
2  !+++++
3  ! 水平面全天日射量, 法線面直達日射量, 水平面天空日射量から, 任意斜面の直達日射量, 天空日射量, 地物反射日射量, 及び
4  ! 全日射量を計算するプログラム。
5  ! 天空日射の分布を一樣(isotropic)とするか, 非一樣(anisotropic, Perez et. alによる)とするかをdefにより切り替える。
6  ! 一樣分布モデルを選択する場合は, def=0とする。非一樣分布を選択する場合は, 準直達日射(circumsolar radiation)を
7  ! 直達日射に含めるならdef=1, 天空日射に含めるならdef=2とする。本プログラムでは, 熱負荷計算や建物の熱環境評価では
8  ! def=1, 直達光の制御や太陽光発電のシミュレーションではdef=2を推奨するが, これらの選択はユーザーが決める。
9  ! 本プログラムを修正すれば, 上記以外の組み換えも可能である。
10 ! -----合成計算に必要な入力データ (defのみ整数, それ以外は実数) -----
11 !   def                : def=0 のとき, 天空一樣分布
12 !                   : def=1 のとき, 天空非一樣分布(準直達日射を直達日射とする)
13 !                   : def=2 のとき, 天空非一樣分布(準直達日射を天空日射とする)
14 !   sc                : 太陽定数 (日射量の単位と同じ単位で与える)
15 !   nyear, nday       : 計算対象年 (西暦年), 年間通し日数(1~365, 西暦年が閏年なら1~366)
16 !   sh, sA, Aw, beta, albedo : 太陽高度(°), 太陽方位角(°), 斜面方位角(°), 斜面傾斜角(°) 地物反射率 (0~1)
17 !   Ig, Ib, Id        : 水平面全天日射量, 法線面直達日射量, 水平面天空日射量
18 ! -----プログラムにより得られる計算結果 (すべて実数) -----
19 !   tiltIb, tiltId, tiltRef, tiltIt : 斜面直達日射量, 斜面天空日射量, 斜面地物反射日射量, 斜面全日射量
20 ! -----プログラム内部で定義して使用している主な変数 (すべて実数) -----
21 !   r                : 太陽定数から大気外法線面日射量を求める補正係数
22 !   extIb, Zd, Z, incos : 大気外法線面日射量, 天頂角(度), 天頂角(ラジアン), 斜面への日射入射角の余弦
23 !   circum, horiz, backs : 斜面準直達日射量, 斜面地平日射量, 斜面一樣天空日射量
24 !   ep, am, de, k1, F1km, F1k, f1, F2km, F2k, F2 : 非一樣分布モデルに使用する係数y
25 ! +++++ 202005 by H. Akasaka +++++
26   implicit none
27   integer def
28   real sc, nyear, nday, sh, sA, Aw, beta, albedo, Ig, Id, Ib, tiltIb, tiltId, tiltRef, tiltIt
29   real circum, horiz, backs, n0, d0, m0, nyu, r, extIb, Zd, Z, incos, a, b, ep, am, de
30   real F1km(3, 8), F1k(3), F1, F2km(3, 8), F2k(3), F2
31   real:: dr=3.14159265/180.0, k0=1.041
32   integer k, m
33 ! ----- def値の確認(def値が, 0, 1, 2以外の場合はプログラムを停止させる) -----
34   if(def.ne.0. and. def.ne.1. and. def.ne.2) then
35     write(*,*)'error_** : defの値が間違っています。', def
36     stop
37   end if
38 ! ----- 入射角の余弦incosの計算 -----
39   incos=cos(dr*beta)*sin(dr*sh)+&
40     sin(dr*beta)*cos(dr*sh)*cos(dr*(sA-Aw))
41   if(incos.lt.0.0) then
42     incos=0.0
43   end if
44 ! ----- 一樣分布モデルの斜面直達日射tiltIb, 斜面天空日射tiltIdの計算 -----
45   if(def.eq.0) then
46     tiltIb = Ib*incos
47     tiltId = Id*(1.0+cos(dr*beta))/2.0
48     goto 200
49   end if
50 ! ----- 非一樣分布モデル(Perezモデル) -----
51 ! ----- 準直達成分, 一樣成分の係数F1 -----
52   data ((F1km(k, m), k=1, 3), m=1, 8)/&
53     -0.008, 0.588, -0.062, &
54     0.130, 0.683, -0.151, &
55     0.330, 0.487, -0.221, &
56     0.568, 0.187, -0.295, &
57     0.873, -0.392, -0.362, &
58     1.132, -1.237, -0.412, &
59     1.062, -1.600, -0.359, &
60     0.678, -0.327, -0.250 /
61 ! ----- 地平成分の係数F2 -----
62   data ((F2km(k, m), k=1, 3), m=1, 8)/&
63     -0.060, 0.072, -0.022, &
64     -0.019, 0.066, -0.029, &
65     0.055, -0.064, -0.026, &
66     0.109, -0.152, -0.014, &
67     0.226, -0.462, 0.001, &
68     0.288, -0.823, 0.056, &
69     0.264, -1.127, 0.131, &
70     0.156, -1.377, 0.251 /
71 ! ----- 非一樣分布モデルの斜面準直達日射量circum, 斜面天空一樣日射量backs, -----
72 ! ----- 地平天空日射量horiz, 及び斜面直達日射tiltIb, 斜面天空日射tiltIdの計算 -----

```

tiltrad.f90 Page 2

```

73      n0=nyear-1968.0
74      d0=3.71+0.2596*n0-int((n0+3.0)/4.0)
75      m0=dr*0.9856*(nday-d0)
76      nyu=m0 + dr*(1.914*sin(m0)+0.02*sin(2.0*m0))
77      r=1.0+0.033*cos(nyu)
78      extlb=r*sc
79      Zd=90.0-sh
80      Z=dr*Zd
81      a=incos
82      b=cos(Z)
83      if(b < 0.087) then
84          b=0.087
85      end if
86      ep=((Id+Ib)/Id+k0*Z**3.0)/(1.0+k0*Z**3.0)
87      am=1.0/(sin(dr*sh)+0.15*(93.885-Zd)**(-1.253))
88      de=Id*am/extlb
89      if(ep<1.065) then
90          m=1
91      else if(1.065<=ep.and.ep<1.230) then
92          m=2
93      else if(1.230<=ep.and.ep<1.500) then
94          m=3
95      else if(1.500<=ep.and.ep<1.950) then
96          m=4
97      else if(1.950<=ep.and.ep<2.800) then
98          m=5
99      else if(2.800<=ep.and.ep<4.500) then
100         m=6
101      else if(4.500<=ep.and.ep<6.200) then
102         m=7
103      else if(6.200<=ep) then
104         m=8
105      end if
106      do k=1,3
107         F1k(k)=F1km(k,m)
108      end do
109      F1=F1k(1)+F1k(2)*de+F1k(3)*Z
110      circum=Id*F1*a/b
111      if(circum<0.0) then
112         circum=0.0
113      end if
114      backs=Id*(1.0-F1)*((1.0+cos(dr*beta))/2.0)
115      do k=1,3
116         F2k(k)=F2km(k,m)
117      end do
118      F2=F2k(1)+F2k(2)*de+F2k(3)*Z
119      horiz=Id*F2*sin(dr*beta)
120      if(horiz<0.0) then
121         horiz=0.0
122      end if
123 !-----def値による準直達日射circumのtiltIbまたはtiltIdへの組み込み-----
124      if(def.eq.1) then
125         tiltIb = Ib*incos+circum
126         tiltId = backs+horiz
127      else if(def.eq.2) then
128         tiltIb = Ib*incos
129         tiltId = circum+backs+horiz
130      end if
131 !-----地物による反射日射量の計算（一様分布モデル、非一様分布モデル共通）-----
132 200 tiltRef= Ig*albedo*(1.0-cos(dr*beta))/2.0
133      tiltIt = tiltIb + tiltId + tiltRef
134      end subroutine tiltrad

```

【参考文献・引用文献】

- [1] 永田忠彦：天空日射に関する Berlage の式に対する疑問，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.381-382（1975）
- [2] 永田忠彦，沢田庸二：晴天空による水平面散乱日射の式の試案，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.519-520（1978）
- [3] 宇田川光弘，木村建一：水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定，日本建築学会論文報告集，No.267，pp.83-90（1978）
- [4] D.G.Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie: Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation, Solar Energy, Vol.28, No.4, pp.293-302（1982）
- [5] J. A. Davies, D. C. McKay, C. Luciani and M. Abdel-Wahab: Validation of Models Estimating Solar Radiation on Horizontal Surfaces, International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme Task IX Final Report, Atmospheric Environment Service Downs View, Ont., Canada, IEA, Paris, France（1988）
- [6] ISO 52010-1, Energy performance of buildings – External climatic conditions - Part 1: Conversion of climatic data for energy calculations
- [7] 浦野良美，渡辺俊行，林徹夫，高尾直樹，村高秀人：水平面全天日射量観測値から方位別日射量を推定する方法について，日本建築学会九州支部研究報告，No.27，pp.97-100（1983）
- [8] 渡辺俊行，浦野良美，林徹夫：水平面全天日射量の直散分離と傾斜面日射量の推定，日本建築学会論文報告集，No. 330，pp.96-108（1983）
- [9] R. R. Perez, P. Ineichen, E.L. Maxwell, R.D. Seals and A. Zelenka : Dynamic Global to Direct Conversion Models, ASHRAE Transactions Research Series, pp.154-168（1992）
- [10] E.L. Maxwell, A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation, August, 1987, SERI/TR-215-3087
- [11] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan : A Rational Procedure for Predicting the Long-term Average Performance of Flat Plate Solar Energy Collectors, Solar Energy, Vol.7, No.2, pp.53-74（1963）
- [12] R.Perez, P.Ineichen, R. Seals, J.Michalsky and R. Stewart: Modeling Daylight Availability and Irradiance from Direct and Global Irradiance, Solar Energy, Vol.44, No.5, pp.271-289（1990）
- [13] 曾我和弘，赤坂 裕，二宮秀興：全天日射量から直達日射量と天空日射量を推定する各種モデルの比較と評価，日本建築学会計画系論文集，No.512，pp.17-24（1998）
- [14] 曾我和宏，赤坂 裕，二宮秀興：全天日射量から斜面日射量を推定する各種モデルの比較，日本建築学会計画系論文集，No.519，pp.31-38（1999）
- [15] K. Soga, H. Akasaka and H. Nimiya: A Comparison of Methods to estimate hourly total irradiation on titled surfaces from hourly global irradiation on a horizontal surface, BS'99, 635-642（1999）
- [16] 井川憲男，永村一雄，ファーナム クレイグ：日射量による昼光照度，PAR，UV-A，UV-Bの推定，日本建築学会環境系論文集，第81巻第726号，pp.679-685，2016年
- [17] 赤坂裕，井川憲男，武田和大：各種日射直散分離法と傾斜面日射の計算法の比較，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，2020年