

促進耐候(光)性試験の歴史と発展(3)

前号より続く

須賀 茂雄
木村 哲也

1. 太陽エネルギー(2-2)

前号でCIE85に規定されている太陽の分光放射照度について概要を記載したが、さらに詳細について述べる。CIE85においては表4に示すように大気圏外の分光放射照度をはじめ、直達光、天空からの拡散光を含め種々の条件での分光放射照度及び0nmから特定の波長間での放射照度及びその比率等が記載されている。大気圏外に関しては25,000nmまで、その他の条件については2,450nm、または2,300nmまでの値が記載されている。

表4. CIE 85 太陽の分光放射照度分布 一覧表 *1)

Table No.	Relative air mass	spectral optical depth of aerosol extinction (at 0.5μm)	Ozone content (cm)	water vapour content (cm)	ground reflectance	cloud optical depth (at 0.5μm)	波長範囲 (nm)
Table 1 Extraterrestrial solar spectral irradiance at mean earth-sun distance							250~4000 0-250 4000-25000
Table 2 Direct normal solar spectral irradiance at sea level	1	0.1	0.34	1.42			305~2450
Table 3 Direct normal solar spectral irradiance at sea level	1	0.27	0.34	1.42			305~2450
Table 4 Global solar spectral irradiance at sea level	1	0.1	0.34	1.42	0.2		305~2450
Table 5 Global solar spectral irradiance at sea level	1	0.27	0.34	1.42			305~2450
Table 6 Direct solar spectral irradiance on horizontal plane for various model parameters	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨	1.0 1.5 2.0 5.6 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0	0.2 0.2 0.2 0.2 0.0 0.0 0.0 0.3 0.3	0.3 0.3 0.3 0.3 0.0 0.0 0.0 2.0 2.0	2.0 2.0 2.0 2.0 0.0 0.0 0.0 4.0 2.0		300~2300
Table 7 Global solar spectral irradiance on horizontal plane, for various model parameters	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨	1.0 1.5 2.0 5.6 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0	0.2 0.2 0.2 0.2 0.0 0.0 0.0 0.3 0.3	0.3 0.3 0.3 0.3 0.0 0.0 0.0 2.0 2.0	2.0 2.0 2.0 2.0 0.0 0.0 0.0 0.2 0.2	0.2	300~2300
Table 8 Global solar spectral irradiance at relative optical air mass 1.5, for overcast skies of various cloud optical depths at λ=500nm	① ② ③ ④	1.5 1.5 1.5 1.5	0.2 0.2 0.2 0.2	0.3 0.3 0.3 0.3	2 2 2 2	0.2 0.2 0.2 0.2	3.0 10.0 30.0 100.0

大気圏外と圏内では、前号でも記載したように変化する。CIE 85 Technical Report Table1. Extraterrestrial solar spectral irradiance at mean earth-sun distance (大気圏外)とTable4.Global solar spectral irradiance at sea level (大気圏内の代表)の分光放射照度分布を図7に、400nmまでの紫外部は10nm間隔、400nm以降については100nm間隔で放射照度をまとめた結果を表5に示す。太陽の放射照度は、前号で述べたように、大気圏外から地上に到達するまでに減衰される。大気圏内で減衰される要素について表6に示す。

図7. CIE 85の大気圏外と圏内の分光放射照度分布 *1)

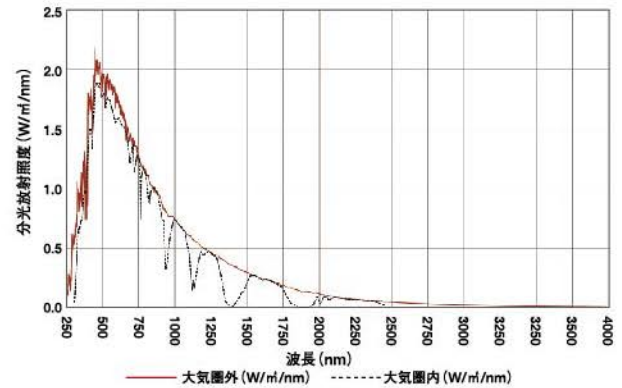


表5. CIE 85 太陽光の分光放射照度 *2)

Table 1. Extraterrestrial solar spectral irradiance at mean earth-sun distance
Table 4. Global Solar Spectral Irradiance at Sea level
Relative air mass : 1.0 Ozone content : 0.34cm
water vapour content : 1.42cm Spectral optical depth of aerosol extinction : 0.1

波長範囲 (nm)	Table 1		Table 4	
	大気圏外の放射照度 (W/m²/10nm)	大気圏外の放射照度 (W/m²/100nm)	大気圏内の放射照度 (W/m²/10nm)	大気圏内の放射照度 (W/m²/100nm)
0~250		2.51		
~260	0.96			
~270	2.23			
~280	2.16			
~290	3.11			
~300	5.57	14.03		
~310	5.67		0.90	
~320	6.96		3.15	
~330	8.42		5.64	
~340	9.28		6.54	
~350	9.10		8.76	
~360	9.79		7.52	
~370	11.20		9.35	
~380	11.40		9.76	
~390	10.02		9.65	
~400	11.51	93.35	13.29	74.56
~500		186.54		169.52
~600		185.64		175.97
~700		158.14		140.24
~800		127.49		118.49
~900		101.77		92.93
~1000		80.16		71.75
~1100		66.86		52.73
~1200		55.16		36.45
~1300		46.53		42.48
~1400		39.01		7.34
~1500		32.32		11.97
~1600		27.20		25.60
~1700		23.21		26.65
~1800		18.81		9.07
~1900		14.88		0.36
~2000		12.88		3.88
~2100		10.42		8.93
~2200		8.28		8.36
~2300		7.05		7.25
~2400		5.91		4.90
~2450				0.98
~2500		5.20		
~2600		4.50		
~2700		3.91		
~2800		3.41		
~2900		2.99		
~3000		2.63		
~3100		2.33		
~3200		2.06		
~3300		1.85		
~3400		1.65		
~3500		1.48		
~3600		1.34		
~3700		1.21		
~3800		1.09		
~3900		0.99		
~4000		0.90		
~25000		11.49		
合計	1367.18		1090.40	

表6. 大気の成分と日射量の減衰 *6)

	大気の成分	存在量	存在場所・状態	吸収・散乱の別	減衰波長	直達日射虚王量への寄与 (AM=1.0)	気象データからの推算法
1	水蒸気	体積で5%以下 重量で3%以下 絶対湿度に比例	可降水量にして平均26mm その半分は地上2km以内	吸収	強い順に、1.4、1.9、 0.9、1.1、0.80、0.72 μm付近	可降水量20mmの 時、約11%	可降水量は地上での絶対 温度に比例 (10g/m ³ に対し 23mm)
2	エアロゾル	1cm ³ 中の個数 海・山岳1,000 田舎10,000 大都市100,000の見当	大きさ1mm~10μm 1μmのものは高さ約1kmで 半減、都市の汚染層は高さ 500m以下	散乱・吸収	全波長域に渡る 大きさ1.2μmのもの 波長の1.3乗に反比 例	海・山岳5%以下 田舎10%内外 大都市20%以上	濃度(視程に反比例)と汚染 層の厚さの積の増加に伴い、 指数関数的に日射は減衰
3	空気分子 (N ₂ 、O ₂ 、Ar等)	1気圧、15°Cで1.23kg/cm ³ (分子数にして2.5×10 ²⁵ 個/m ³)	6,800mの高さで密度半減	散乱	全波長域に渡る 波長の4乗に反比例	約9%	気圧に比例
4	オゾン	総量は1気圧、0°Cに直して 2~5mm(平均3mm)の厚 さ地上では50μg/m ³ 程度	大部分は、地上高さ20~30 kmのオゾン層に集中	吸収	0.2~0.3μm(強) 0.45~0.75μm(弱)	2%以下	高緯度 春・冬はオゾンが 多く、 低緯度 夏・秋は少ない
5	酸素	大気中に体積比で21%、 重量比で23%	対流圏では大気中の百分率 は高さによりほとんど不要	吸収	0.69、0.76μmの 各波長付近	約1%	全体から見れば僅かであるか ら、余り重要視しなくて良い

オゾン・酸素・水の吸収帯により、太陽の放射照度は大きく減衰する。特に短波長側の放射エネルギーはオゾンの影響を受ける。太陽は日の出から日の入りまでその高度は異なる。高度が異なると大気圏を通過する空気層の路程が変化する。そのため空気層による減衰が変化することになる。地球大気に入射した太陽直射光が地表に到達するまでに通過する空気層を「エアマス(m)」といい、大気路程ともいわれる。太陽が天頂にある時の値をエアマス1.0とし、次式で与えられる。

$$m = \eta m_0 \quad m_0 = \text{cosec } h$$

m_0 : 海面高におけるエアマス
 h : 太陽高度角(°)
 η : 標高に対する修正係数

しかし、太陽高度角が20°以下になると地球がほぼ円形で大気圏も地球と同心円のため、 m_0 の値が過大になるので、ベンボラードの精密計算結果がある。が、実用上は下記の式で十分である。その比較結果を表7に示す。

$$m_0 = [\sin h + 0.15(h + 3.885)^{-1.253}]^{-1}$$

$$\eta = p / 1013$$

h : 太陽高度角(°)
 p : 気圧(mb)

地表の太陽の放射照度は、地表の状態(反射率)により異なる。夏場の海岸の砂浜や冬場の雪面において、日焼けが大きい。太陽が地表に到達して反射される反射率を「アルベド」という。アルベドの値は陸地・海によって異なる。また陸地でも森林地帯・都市・砂漠などによっても異なる。

道路でも舗装されているいないで異なる。また、その時の太陽の高度によっても異なる。地球全体のアルベドの平均は0.3といわれている。従って、地球が太陽から受けている太陽エネルギーの30%は宇宙に向けて反射されていることになる。アルベドの値を表8に示す。

表7. 太陽高度とエアマスの関係 *5)

h (°)	ベンボラードの精密計算結果	実用上の式	cosec h
90	1.00	1.00	1.00
60	1.15	1.15	1.15
30	2.00	2.00	2.00
20	2.90	2.92	2.92
10	5.60	5.58	5.76
5	10.39	10.32	11.47
3	15.36	15.22	19.10
1	26.96	26.31	57.30

表8. 地表の表面状態とアルベドの関係 *5)

表面状態	アルベド(%)
地表 砂漠	26
乾いた砂	18
耕地(緑の作物)	12
草地(緑)	26
雪面(新雪)	81
都市 都心	14
古い住宅地	13
郊外 コンクリート道路	28
アスファルト道路	14
碎石道路	10
森林(緑)	12
水面 太陽高度90°~50°	2.5
太陽高度30°	13.6

太陽の放射照度は、上述の要素（大気の状態・エアマス・アルベド）により異なるので注意が必要である。

太陽の分光放射照度で、よく使われる規格としては、CIE 85以外にASTM、IECの規格がある。CIE85 Table 4とASTM G 173-03、ASTM G 177-03、IEC 60904-3の波長域別の比較を紫外部は10nm間隔、それ以降は100nm間隔にまとめたので、表9に示す。また各規格の分光放射照度分布図を図8、紫外部については10nm間隔の拡大図を図9に示す。CIE85の放射照度が大きいのは、エアマス1.0に対し、ASTM G 173-03は1.5であるのが影響していると思われる。また、ASTM G 177-03とIEC 60904-3は若干の違いはあるが、ほぼ同様な数値になっている。ASTM G 177-03とIEC 60904-3の規格の放射照度は、280~400nmは0.5nm間隔、400~1700nmは1.0nm間隔、1700~4000nmは5nm間隔で規定されているので、各波長の分光放射照度が極めて分かりやすくなっている。

また各波長域の放射照度が計算されやすくなっている。最近になって、CIEも太陽の分光放射照度に関して、新しい勧告をしようとしている。これについては後日まとめたいと思う。

以上、太陽についての概要、規格における放射照度についてまとめたので、次回は、実際の太陽の放射照度測定結果についてまとめてみようと思う。

【参考文献】

- *1) TECHNICAL REPORT SOLAR SPECTRAL IRRADIANCE
Publ N° CIE 85 1st Edition 1989
- *2) ASTM G 173-03 Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiance : Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface
- *3) ASTM G 177-03^{PI} Standard Ultraviolet Direct Normal and Hemispherical Spectral solar irradiance for 37° Sun-Facing Tilted Surface
- *4) IEC 60904-3 Photovoltaic Devices
Part 3 : Measurement Principles for terrestrial Photovoltaic (PV) Solar devices with reference spectral irradiance date
- *5) 太陽エネルギー利用ハンドブック 日本太陽エネルギー学会
- *6) 太陽エネルギー (押田勇雄著) NHKブックス

図8. 太陽の分光放射照度分布 *1) *2) *3) *4)

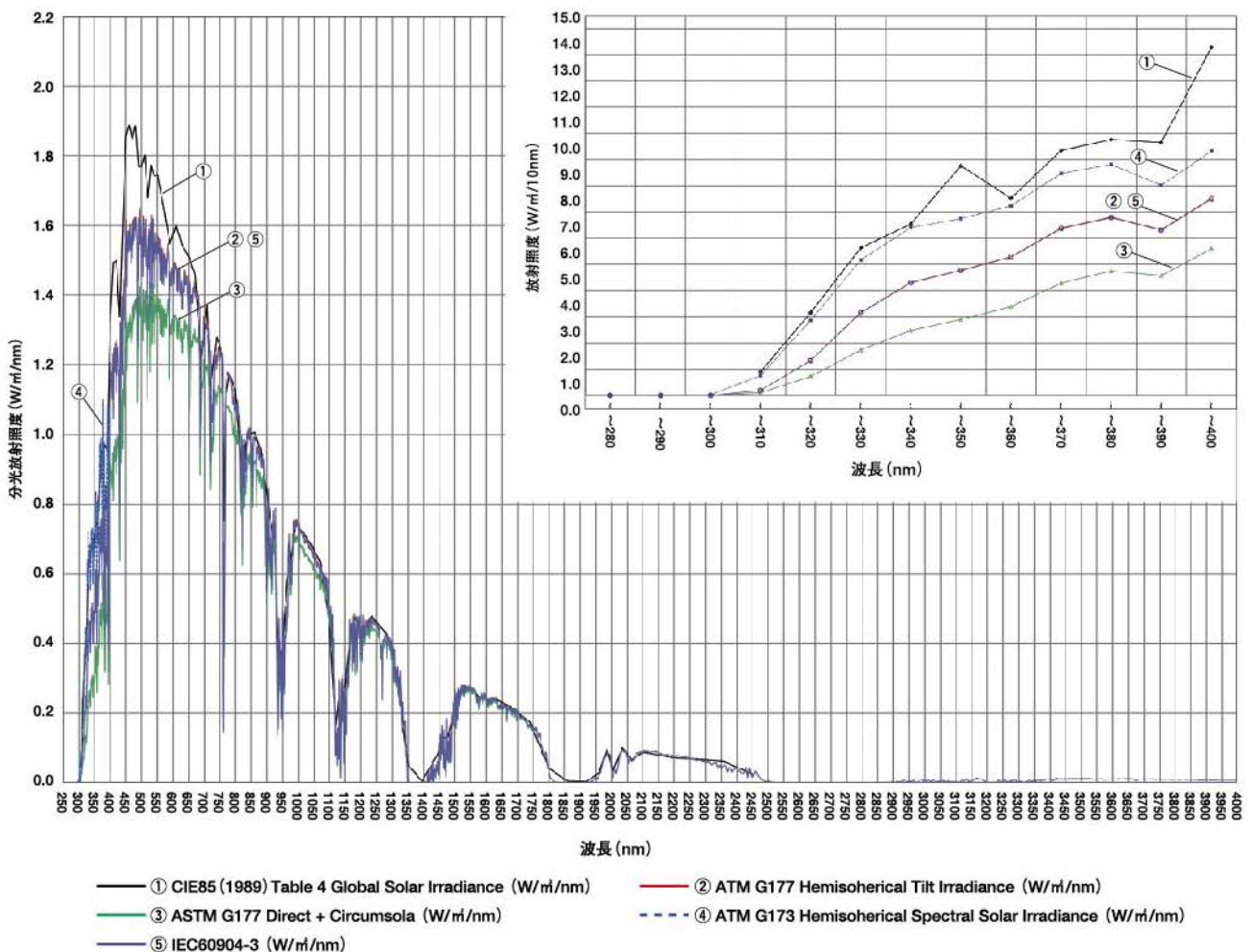


図9. 太陽の紫外部の10nm間隔の放射照度分布 *1) *2) *3) *4)

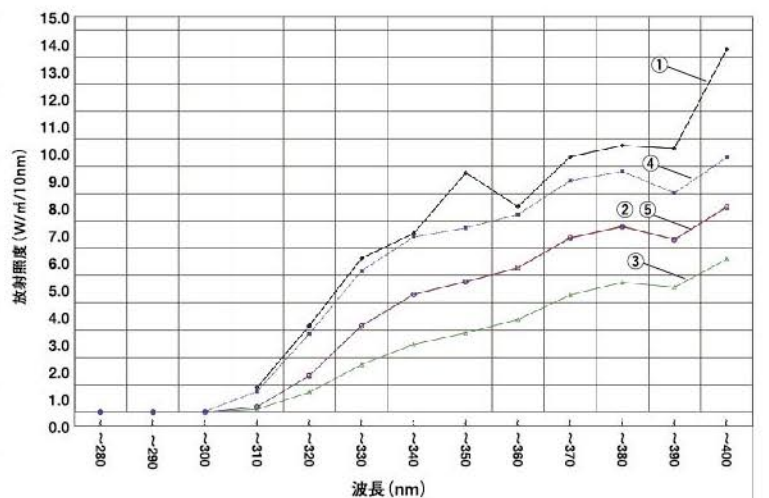


表9. CIE85 / ASTM G173-03 / ASTM G177-03 / IEC60904-3 の太陽の放射照度の比較 *1) *2) *3) *4)

①CIE 85 (1st Edition 1989) : Table 4. Global Solar Irradiance at sea level Air Mass 1.0, Aerosol Optical Depth 0.10, Water Vapor 1.42 cm, Ozone 0.340 cm, ground reflectance 0.2
 ②③ASTM G173-03 : Table 2. Standard Air Mass 1.5 Direct Normal and Hemispherical Spectral Solar Irradiance for 37° Sun-Facing Tilted Surface
 ④ASTM G177-03^{E1} : Table 2. Standard Ultraviolet Direct Normal and Hemispherical Spectral Solar Irradiance for 37° Sun-Facing Tilted Surface
 ⑤IEC 60904-3 : Table 1. Reference solar spectral irradiance distribution

Wavelength h (nm)	① CIE85 Table 4 Global Solar Irradiance (W/m ² /10nm)	① CIE85 Table 4 Global Solar Irradiance (W/m ² /100nm)	② ASTM G173-03 Hemispherical Tilt Irradiance (W/m ² /10nm)	② ASTM G173-03 Hemispherical Tilt Irradiance (W/m ² /100nm)	③ ASTM G173-03 Direct + Circumsola (W/m ² /10nm)	③ ASTM G173-03 Direct + Circumsola (W/m ² /100nm)	④ ASTM G177-03 Hemispherical spectral solar irradiance (W/m ² /10nm)	④ ASTM G177-03 Hemispherical spectral solar irradiance (W/m ² /100nm)	⑤ IEC60904-3 (W/m ² /10nm)	⑤ IEC60904-3 (W/m ² /10nm)
~280			2.3650E-23		1.2700E-26		5.8000E-17		2.3600E-23	
~290			2.9460E-09		2.2942E-10		2.1188E-06		2.9394E-09	
~300			0.0015	0.0015	6.1732E-04	0.0006	0.0242	0.0242	0.0015	0.0015
~310	0.90		0.1889		0.1030		0.7585		0.1884	
~320	3.15		1.3317		0.7238		2.8682		1.3276	
~330	5.64		3.1597		1.7349		5.1714		3.1503	
~340	6.54		4.3118		2.4738		6.4067		4.2992	
~350	8.76		4.7808		2.8999		6.7471		4.7669	
~360	7.52		5.2938		3.3864		7.2318		5.2784	
~370	9.35		6.3838		4.2846		8.4700		6.3653	
~380	9.76		6.8071		4.7479		8.8128		6.7873	
~390	9.65		6.3274		4.5696		8.0146		6.3090	
~400	13.29	74.56	7.5169	46.1018	5.5961	30.5198	9.3239	63.8048	7.4951	45.9674
~500		169.52		139.5789		115.1223	合計63.8290			139.1746
~600		175.97		151.0134		133.7710				150.5756
~700		140.24		139.2287		125.9229				138.8350
~800		118.49		113.1858		103.4803				112.8571
~900		92.93		94.5323		87.7153				94.2569
~1000		71.75		56.3128		52.9121				56.1489
~1100		52.73		64.5969		60.9781				64.4089
~1200		36.45		31.5327		30.0761				31.4505
~1300		42.48		43.0461		41.1478				42.9206
~1400		7.34		11.9353		11.4662				11.9009
~1500		11.97		6.8998		6.7123				6.8793
~1600		25.60		25.5357		24.8095				25.4614
~1700		26.65		22.1121		21.5052				22.0471
~1800		9.07		15.0962		14.7266				15.0532
~1900		0.36		0.2320		0.2268				0.2318
~2000		3.88		2.7910		2.7428				2.7825
~2100		8.93		6.8618		6.7555				6.8423
~2200		8.36		8.4818		8.3558				8.4568
~2300		7.25		6.9960		6.9070				6.9758
~2400		4.90		4.8375		4.7878				4.8248
~2450		0.98								
~2500				2.2663		2.2498				2.2595
~2600				0.0408		0.0405				0.0405
~2700				0.0000		0.0000				0.0000
~2800				0.0000		0.0000				0.0000
~2900				0.0230		0.0235				0.0230
~3000				0.3575		0.3628				0.3570
~3100				0.3550		0.3590				0.3545
~3200				0.6290		0.6368				0.6280
~3300				0.3150		0.3180				0.3145
~3400				0.5388		0.5450				0.5368
~3500				1.0245		1.0350				1.0215
~3600				1.0290		1.0358				1.0253
~3700				0.9835		0.9975				0.9800
~3800				0.9350		0.9380				0.9295
~3900				0.8190		0.8205				0.8163
~4000				0.7405		0.7435				0.7390
合計	1090.40		合計	1000.9664	合計	900.7467			合計	998.0776