

空氣調和工学

今木清康著

空氣調和工学

今木清康著

産業図書

<著者紹介>

いま きよ やす
今 木 清 康

1952 日本大学工学部機械工学科卒

1970 工学博士(乱流境界層)

1974 技術士(機械部門)

現在 日本大学教授(理工学部)

担当 流体機械・空気調和・熱工特Ⅲ(院)

空気調和工学

定価 2500 円

昭和 55 年 2 月 29 日 初 版

著 者 今 木 清 康

発 行 者 森 田 勝 久

発 行 所 産業図書株式会社

東京都千代田区外神田 1-4-21

郵便番号 101-91

電 話 東京 (253)7821(代)

振替口座 東京 2-27724 番

検 印
省 略

© Kiyoyasu Imaki 1980

新日本印刷・誠光社製本

序

小さな地方都市の庁舎や公会堂、スーパーや銀行、病院にいたるまで当然のことのよう
に冷暖房装置が整えられ、空調という言葉が私たちの生活の中にまで滲透してきたのはご
く最近のことです。60年代では考えられなかったぜいたくな設備が、きわめて身近に、生
活環境改善のもとに次々と普及しつつあります。

閉ざされた建物空間内に自然の生活環境を求めて、より豊かな室内気象条件を人為的に
造り出すための空気調和技術は、世界市場で競い合う日本経済の工業力の進歩と共に発展
し、建築、芸術、電気、機械とあらゆる産業の集結の成果として高く評価されるようにな
りました。

事務所ビルの消費エネルギーの 75% が空調、照明に費やされているといわれる現在、新
しい省エネルギー空調を学ぶ必要があります。80年代は省エネルギー時代から新エネルギー時代
への転換の時期に入ります。ここで、私はこの時代にこれから活躍される若い技術者や大
学・高専生のための教科書、また新入社員教育の副読本として、読み、かつ、考え、そし
て教えを授けやすいように各章の構成を考え、活用されるように努めました。また、国家
試験を目ざされる人にも対策が立てられるようにまとめてあります。

本文中の技術用語や記号はすべて空気調和・衛生工学会や日本機械学会の規定によりま
した。計量単位は近く SI 単位（国際単位系）に移行される予定ですが、混乱をさ
けるため本書はすべて従来単位によりました。なお、SI 単位の換算については巻末の
解説を参照して下さい。

終りに、本書出版にお世話頂いた産業図書の方々、ならびに、多くの文献、資料を参
考、転載させて頂いた諸先生に厚くお礼を申し上げます。

1980 年 初 春

著 者

目 次

1 章 総 説	1
1.1 空気調和の定義	1
1.2 空気調和の種類	1
1.3 快感室内気候条件	2
1.4 日本の気候	4
2 章 空 気 の 性 質	5
2.1 室内気候条件の表示法	5
2.2 空気の性質	9
3 章 湿り空気線図	19
3.1 空気線図の構成	19
3.2 湿り空気 $i-x$ 線図の使い方	19
3.3 室内空気の状態変化	21
4 章 空気調和負荷	35
4.1 外気設計条件	35
4.2 室内負荷の分類	37
4.3 熱 通 過 率	37
4.4 熱通過抵抗	38
4.5 熱通過率を求める式	39
4.6 屋根と天井の熱通過率	42
4.7 実効温度差	44
4.8 ガラス窓からの侵入熱量	47
4.9 すきま風および換気による熱負荷	49

4.10	在室人員からの発熱量	53
4.11	室内機器からの発熱量	54
4.12	空気調和機器からの熱負荷	56
第5章	空気調和負荷計算	57
5.1	冷房時負荷	57
5.2	暖房時負荷	59
5.3	デGREEデー・カロリデー	61
第6章	空気調和設備	67
6.1	空気調和設備の分類	67
6.2	ゾーニングの種類	68
6.3	直接暖房方式	69
6.4	空気調和方式	76
6.5	ふく射冷暖房方式	82
6.6	システムによる分類	82
6.7	用途別空気調和方式	84
第7章	空気調和機器	95
7.1	冷凍機	95
7.2	ポンプ	110
7.3	送風機	115
7.5	空気調和器の自動制御	121
第8章	空気調和装置設計	127
8.1	吹出し気流	127
8.2	ダクト設備	139
8.3	ダクト消音設備	149
8.4	配管設備	160
8.5	空気コイル	168

8.6 空気洗浄器	179
8.7 冷 却 塔	184
第9章 直 接 暖 房	191
9.1 直接暖房の分類	191
9.2 蒸 気 暖 房	192
9.3 温 水 暖 房	211
9.4 ふく射暖房	217
9.5 赤外線暖房	225
9.6 熱ポンプ暖房	226
第10章 換 気 装 置	233
10.1 換 気 装 置	233
10.2 空気ろ過器装置	241
10.3 エアカーテン	248
付表・付図	253
SI 単位について	266
参 考 文 献	269
索 引	273

第1章 総 説

1.1 空気調和の定義

室内の空気の条件を、空気調和の要求に適するように調整することを、空気調和 (air conditioning) といい、プロセスとしてはつぎの4つの要素からなる。

- 1) 空気の冷却, 加熱 (温度の調整)
- 2) 空気の減湿, 加湿 (湿度の調整)
- 3) 気流分布の均一化 (気流の調整)
- 4) 空気の清浄化 (空気の浄化)

温度はわれわれの体に非常に鋭敏に感じるので、昔は温度の変化だけで暖房とか、冷房と呼ばれてきたが、最近では温度のほかに3つの要素も含めて空気調和と呼ぶようになった。従って、これらを調整するための設備機器も大きくなり、装置から発生する音や振動の防止についても、十分な検討がなされるようになってきた。

1.2 空気調和の種類

室内の対象を人間にするか、産業製品にするかで快感用空調と産業用空調に大別される。

1. 快感用空調

快感用空調 (comfort air conditioning) も事務室、軽工場内の仕事のように生産活動にかかわりあいのあるものと、全く休息的な住宅、ホテル、病院などの空調とに分けられる。これらはいずれも人間を対象としているので、気象条件に左右されやすいのが特色であり、また人種、年齢、性別、個人差などいろいろな適用条件を十分維持できる設備能力を与えておく必要がある。普通の空気調和は、ほとんど快感用空調をさし、これらの種類は種々雑多である。

2. 産業用空調

産業用空調 (industrial air conditioning) は工場で生産される製品の合理化、維持管理、保管についての条件をカバーするもので、条件の適用範囲は多種多様で、きわめて広い方面にわたっているが、指定範囲が明確であるだけに、空調効果が生産性に絶対的に結

表 1.1 産業用空調における室内の温・湿度

業 種	工 程	夏 期		冬 期	
		温 度 [°C]	湿 度 [%]	温 度 [°C]	湿 度 [%]
製陶工業	成 型	27	60	27	60
醸造工業	ビール醸酵	4~8	50~70	4~8	50~70
電機工業	電気機器製造	24~26	50~55	24~26	50~55
光学工業	研 磨	27	80	27	80
製薬工業	一 般 製 薬	21~27	10~50	21~27	10~50
煙草工業	巻煙草製造	21~27	55~65	21~27	55~65
製菓工業	キャンディ製造	18~27	35~50	18~24	35~50
印刷工業	印 刷	24~27	45~50	24	45~50
写真工業	フィルム製造	23~24	40~65	23~24	40~65
毛糸紡績	織 布	24~27	50~55	21~24	50~55
機械工業	歯 切 り	24~27	55~60	24	45~50

びついて発生しなければならない。産業用空調は作業用空調と工業工程用空調とに分けられる。表 1.1 に産業用空調において要求される温・湿度の値を示す。

a) 作業用空調は、人間の普通の生活環境の維持を目的としたもので、快感用空調とはほとんど変わりなく、工場内の労働に従事するものの安全管理、作業能率の向上や作業環境の改善などが主な目的となる。この点では特殊環境が要求されることになる。

b) 工業工程用空調は、各種工業の生産合理化を対象とし、製品製造の工程管理に十分な効果を与えなくてはならない。このほか、原料、製品の貯蔵、包装、輸送など製品の質向上、工程速度の増強によるコストダウンも大きな目的であるので、設置機器の関連性能や集中的な異常熱源なども調査しておく必要がある。

1.3 快感室内気候条件

普通の快感用空調は、室内での生活に快適感を与え、仕事の能率の向上を計ると共に、保健環境を維持し、製品の品質管理の面でも十分な効果が期待できるものでなくてはなら

表 1.2 室内基準温度

建 物 種 類	夏 期		冬 期	
	温度 [°C]	湿度 [%]	温度 [°C]	湿度 [%]
住宅、事務所、病院、学校	25 ~26	50~45	23~24.5	35~30
銀行、小売店、デパート	25.5~27	50~45	22~23	35~30
劇場、教会、レストラン	25.5~27	60~50	22~23	40~35
工 場	27 ~29.5	60~50	20~22	35~30

ない。そして冷暖房ならびに換気負荷の計算に当っては、建築物を構成する材料の熱的性質をはじめ、建物以外の気象環境との間の熱の受授も不定常的に計算を進めなくてはならない。屋外条件は四季を通じて特有な気象状況に影響されながら変化するが、建物の内部でも構造物の断熱特性によって異なるが、自然の条件に大きく支配される。これに人為的な空調を行なうことによって室内条件を大きく変える。このような意味の建物内の気候のことを建築学では室内気候と呼んでいる。表 1.2 に建物別室内基準温度を示す。

室内気候は日常生活、職場での生活環境を大きく変え、保健や作業能率の面からも大きな効果が期待できる。これらに大きく影響するものとしては、温度、湿度、気流の他に周囲の壁の表面から受けるふく射熱の影響もものがしてはならない。人間の正常体温は約 36.5℃ に保持され、この熱平衡関係はかなり厳密に維持されている。体内から産出される熱量と、体表面から放出される熱量との熱平衡関係がつり合ったとき、最も快適さを感じる。このような状態が室内で作りだされたときに、これを快適室内気候と呼んでいる。

成人の安静時の人体からの生産熱量（基礎代謝量）は約 2400kcal/day で、この 80% が体温保持のために消費されている。この熱収支の関係は普通活動している人体ではつぎの式で示される。

$$\Delta q = M - E \pm C \pm R \dots\dots\dots (1.1)$$

ここで

Δq : 人体での熱の変化量で、 $\Delta q=0$ が最適、マイナスは寒く、プラスは暑く感ずる。

M : 代謝生産熱量

E : 蒸発放熱量

C : 対流による受授熱量（マイナスは人体からの放熱）

R : ふく射熱による受授熱量（マイナスは人体からの放熱）

普通安静時の成人の基礎代謝量は、体表面積当り 50kcal/h・m² で、体からの放熱量の

表 1.3 人体からの放熱量 [kcal/h]²⁰⁾

室内気温 [℃]	静 座		軽 動 作		普 通 作 業		重 労 働	
	潜 熱	顕 熱	潜 熱	顕 熱	潜 熱	顕 熱	潜 熱	顕 熱
10	17.6	110.9	29.0	136.1	41.6	168.8	93.2	239.4
15	17.6	93.2	49.1	118.4	73.0	141.9	141.0	189.0
21	25.2	75.6	76.1	85.5	110.9	109.6	186.5	143.6
27	44.1	55.4	113.4	59.2	151.2	68.0	224.3	100.8

第1章 総 説

割合は、ふく射熱約 50%，対流熱約 30%，蒸発熱約 20% 程度とされ、これらの割合がくずれると変化量 Δq が 0 であっても快適感が著しく悪くなる。また人体の作業状態や周囲の環境によって放熱の割合が変化する。全放熱量が等しくても、放熱の割合が変わると快適感も悪くなる。従って、周囲の空気温度、湿度、まわりの壁の温度などが人体の快適感に非常に大きな影響を与える。表 1.3 は作業と室内気温による人体からの潜熱、顕熱による放射熱量が異なることを示したものである。

1.4 日本の気候

日本列島は北端の北海道弁天島（北緯 $45^{\circ}31'16''$ ）から南端の沖縄県波照間島（北緯 $24^{\circ}15'$ ）までの細長い範囲にわたり、北海道の亜寒帯から沖縄の亜熱帯まで及んでいる。しかし、主要都市のほとんどは中央の温帯湿潤地帯に位置している。冬期は大陸の影響を強く受け、裏日本では低温多雪、表日本では低温低湿となり、夏期は南の海の影響を受けて各地とも高温多湿になる。世界主要都市の平均気温と平均湿度を月別に記入した気候図を図 1.1 に示す。日本特有の気象状態がこれよりよくわかる。

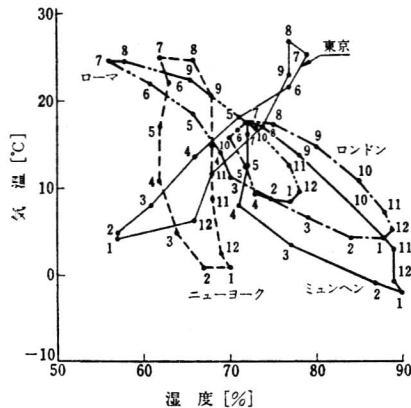


図 1.1 世界各地の気候図（数字は月を表わす）²⁸⁾

統計年次 東京 1941~1970
ローマ 1946~1955
その他 1931~1960

第2章 空気の性質

2.1 室内気候条件の表示法

1. 気温

気温は人体に最も大きな影響を与える。普通は乾球温度計の乾球温度 (DB: Dry Bulb temperature) が用いられ、湿り空气の度合いは、乾球温度計の球の部分を布で包み、水で濡らした湿球温度計で湿球温度 (WB: Wet Bulb temperature) が求められる。

2. 相対湿度

湿度の表示法は、相対湿度 (RH: Relative Humidity) (関係湿度ともいう) を広く用いる。通常、乾球温度計と湿球温度計の値から相対湿度表で求めるが、計算によっても求まる。このほかに電気抵抗式湿度計、毛髪湿度計などが用いられる。

3. 実効温度

実効温度 (ET: Effective Temperature) は、実感温度、感覚温度とも呼ばれ、1923年

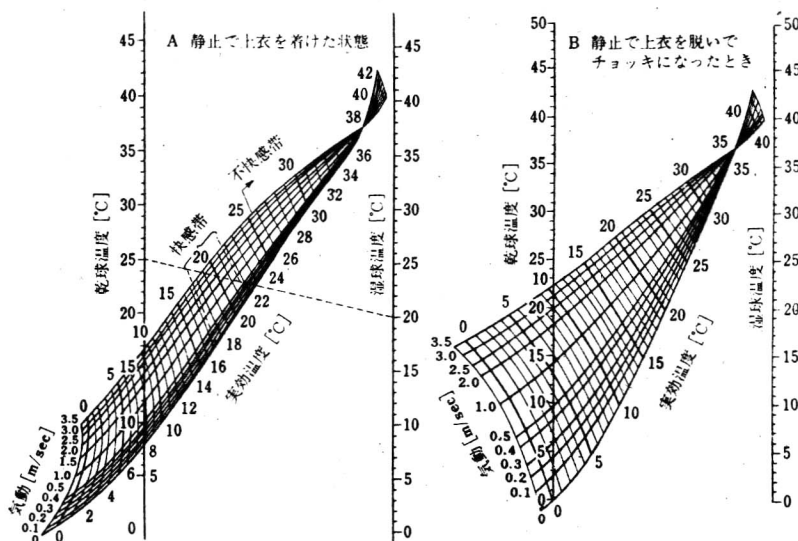


図 2.1 実効温度図⁶⁴⁾

フートンとヤグロー氏によって被験者の主観的な申告で求めた実験的な温度スケールで、乾球・湿球温度の他に気流の影響を加えたものである。その基準は相対湿度 100% の静止空気 (気流 0.08~0.13 m/s) の室内状態を実効温度の指数とし、他の気動のある室内状態でこれに等しい感覚を感じたとき、同じ実効温度であるとする。気流を含めた温度感覚と同じ静止状態の飽和空気の温度を図表で求めるものである。図 2.1 に着衣の場合の実効温度図を示す。

4. 修正実効温度

修正実効温度 (CET: Corrected Effective Temperature) は実効温度に熱ふく射の影響をみたもので、周壁の平均ふく射温度 (MRT: Mean Radiant Temperature) と気温が等しいときに CET と ET が等しくなる。

5. 効果温度

効果温度 (OT: Operative Temperature) は、グローブ温度計によって測った周壁面の平均ふく射温度 (t_R) と乾球温度 (t) との平均値で、気温、気動、周壁からのふく射熱など、生理的要求を加えた総合効果で示したものである。

$$OT \doteq \frac{t_R + t}{2} \dots\dots\dots (2.1)$$

OT は人体に感じないくらいの微風 ($v=18\text{ cm/s}$) のときのグローブ温度計と一致する。この効果温度は、湿度を考えないので、高温では適用できない。アメリカの通常着衣の安

表 2.1 平均不快日数²⁸⁾

地 名	7 月平均不快日数			8 月平均不快日数		
	75 以上	80 以上	85 以上	75 以上	80 以上	85 以上
札幌	8.5	1.9	—	12.5	2.0	—
青森	11.0	2.0	—	20.9	4.7	—
仙台	14.5	4.5	0.1	23.7	8.5	—
新潟	19.9	9.3	—	28.5	15.7	0.7
長野	21.0	9.7	—	28.3	15.4	—
名古屋	26.6	15.1	1.7	30.3	24.1	2.4
東京	23.3	11.5	0.1	29.5	21.6	0.7
京都	27.5	18.5	2.5	30.5	26.4	5.3
広島	26.8	13.5	0.1	30.5	22.9	0.1
大阪	28.6	18.4	0.7	30.5	26.5	3.0
福岡	27.8	19.3	0.4	30.7	24.0	1.7
鹿児島	30.5	22.0	0.4	31.0	27.1	1.7
那覇	31.0	26.9	—	31.0	25.8	—

統計期間 1964~1974

静時の成人は 18.3°C 以上, 老人, 子供は 21°C 以上となっている。

6. 不快指数

不快指数 (UI: Uncomfort Index) はアメリカ気象局が気候の快適さを空気温度湿度で示したもので

$$UI = 0.72(t + t') + 40.6 \quad (2.2)$$

ここで UI : 不快指数 t : 空気の乾球温度 [°C] t' : 空気の湿球温度 [°C]

日本人の体感では 75 以上はやや暑い, 80 以上は発汗があり暑くなる, 85 以上は我慢できないほどの暑さとなっている。表 2.1 は日本各地の不快日数を求めたものである。

7. 快適環境条件

1920 年代から, アメリカ暖房・冷凍空調技術者協会 (ASHRAE) が, 人体の快感を研究して, 1956 年に ASHRAE 快感線図を発表した (図 2.2)。その後, 1963 年にこの研究を引き継いだカンサス州立大学が, 研究の結果に基づいて, 新しい快感線図* (図 2.3) を発表した。この図は海拔 2100m 以下の地点で, 相対湿度 (40%), 平均ふく射温度が室内温度 (24.5°C) と等しいときに気動が 0.23m/s 以下の条件で, 軽装で休養か軽い事務的な仕事をしているときの快感条件を求めたとされて

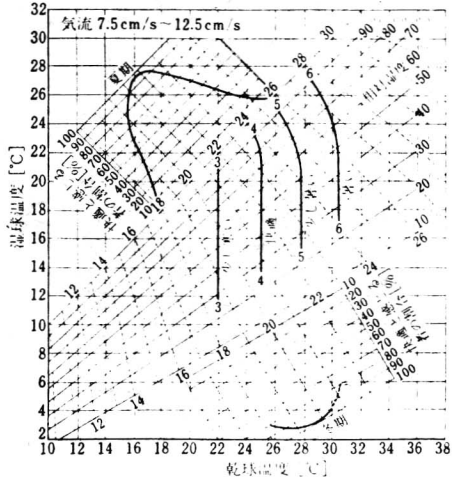


図 2.2 ASHRAE 快感線図⁶⁴⁾

いる。ASHRAE の快感線図による快適条件とは

夏期: ET 18.9~23.9°C, RH 30~70% 冬期: ET 17.2~21.7°C, RH 30~70%

日本人の場合は ET は 2~3°C 低目が適当とされている。

8. 快適感応温度差

快適感覚は皮膚表面の温度と室温との差で大きく影響される。室温が高いと皮膚に発汗作用が働いて放熱効果が促進され, また, 室温が低いと皮膚に発熱作用が働いて, 絶えず

* ASHRAE 快感線図 (ASHRAE 編: hand book of fundamentals, chap 7, ASHRAE (1972))

第2章 空気の性質

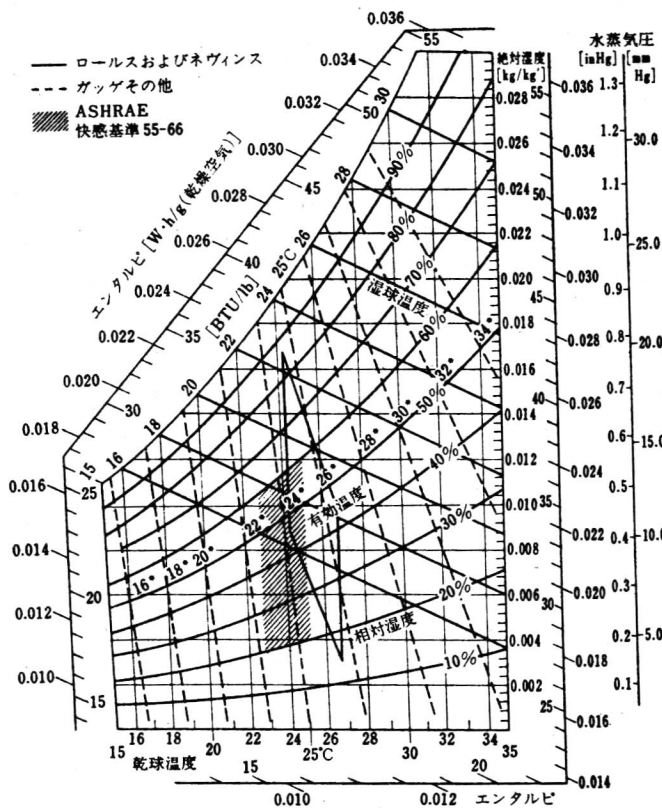
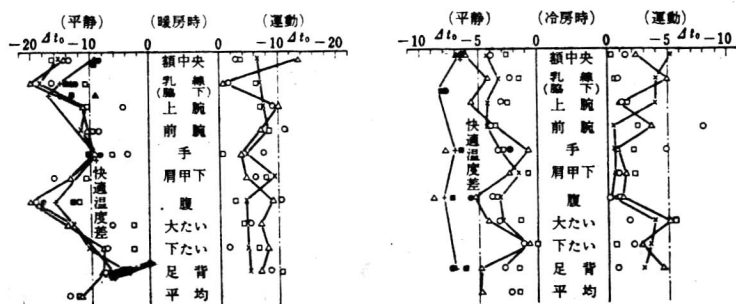
図 2.3 新快適温度図表⁶⁴⁾

図 2.4 快温度感温度差

内臓器系の保護にあたる。従って、快適感はいこれらの熱収支がバランスよく保たれることによる。

図 2.4 は筆者* が実験した快適感応温度差 (Δt_0) で、人体の皮膚温度に変化が伴うときの室温と皮膚表面温度との差から求めた。図中の記号は、6 人の学生 (22 歳位・男子) を示し、測定箇所は頭部から足まで 10 箇所 (脇下は参考) を測り、皮膚表面積から平均温度を求めたものを「平均」で示している。平静は立位あるいは座位で動きのないとき、運動は 2 段の階段を上下運動する程度の軽い動きを与えたものである。温度差による快適感はい体の位置によって異なるが、暖房時は個人差が少なく、冷房時は大きい。図中の快適温度差はい空調設計条件から求めた参考線で、暖房では皮膚温より 10°C 高く、冷房では 5°C 高くなる。運動をすると、皮膚温度が上るので、ほとんど冷房の必要のないこともこの関係からわかる。

2.2 空 気 の 性 質

1. 乾燥空気と湿り空気

われわれが生活している地球上の空気は、78.1% の窒素 (N_2) と 21.0% の酸素 (O_2) の混合気体であり、これに 0.03% の炭酸ガス (CO_2) と 1% ぐらいの水蒸気が含まれている。このうち、水蒸気以外の成分は、ほとんど一定であるが、水蒸気だけは気象条件によって常に変化している。水蒸気を含まない空気は自然界にあり得ない仮定であるが、空調調和ではこの空気を乾燥空気 (dry air) と呼び、これに対して水蒸気を含んだ、いわば自然の空気を湿り空気 (humid air, moist air) と呼んで区別している。湿り空気は乾燥空気と水蒸気の混合気体であり、これを理想気体と考えて Dalton 分圧法則を適用すると、つぎのようになる。

$$P = (p_{N_2} + p_{O_2} + p_A + p_{CO_2}) + p_w = p_a + p_w \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで P : 湿り空気の全圧力 [kg/cm²]

p_a : 乾燥空気の分圧力 [kg/cm²]

p_w : 水蒸気分圧力 [kg/cm²]

p_n : n は N_2, O, A, CO_2 の分圧力 [kg/cm²]

2. 飽和湿り空気

温度が高く、熱量が多いほど物質内の分子運動のエネルギーが多くなり、気体の圧力は分

* 今木清康：皮膚温の変化からみた快適室内温度，冷凍，53-614 (昭 53)，9-18。

子運動のエネルギーと分子の数によって決まってくる。密閉容器内に少量の水を入れて暖めると、水は水蒸気となって蒸発するが、水蒸気の量はある限界状態で停止する。この状態の空気を飽和湿り空気、または飽和空気 (saturated air) という。飽和状態の空気の中に含まれる最大限の水蒸気の量を飽和水蒸気量といい、この点の水蒸気の圧力を飽和蒸気圧という。この飽和状態を示す空気温度を飽和温度 (saturation temperature) という。

標準状態の気圧は $P=1.03323 \text{ kg/cm}^2$ であるが、このときの空気の温度を 25°C とすると、水蒸気分圧 $p_w=0.03230 \text{ kg/cm}^2$ であり、ダルトン分圧法則より

$$\begin{aligned}\text{乾燥空気の分圧 } p_a &= P - p_w = 1.03323 - 0.03230 \\ &= 1.00093 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

が求められる。

飽和空気だけを密閉容器に入れて、さらに熱を加えると、蒸発する水がないので水蒸気分子数は増えないで、蒸気のみが分子運動だけが活発になる。この空気中の水蒸気を過熱蒸気 (superheated steam) と呼び、飽和状態に達しない空気を不飽和空気または不飽和湿り空気と呼んでいる。

乾燥空気と空気中の水蒸気のいずれも完全ガスと考えると、つぎの式が成立する。

$$p_a v_a = R_a T \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$p_w v_w = R_w T \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで p_a, p_w : 分圧力 $[\text{kg/m}^2]$ v_a, v_w : 比容積 $[\text{m}^3/\text{kg}]$

R_a, R_w : ガス常数 $[\text{kg}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}]$

(乾燥空気=29.27, 水蒸気=47.06)

T : 絶対温度 (K=273+ $t^\circ\text{C}$) 添字 a, w : 乾燥空気, 水蒸気

3. 乾球温度, 湿球温度, 露点温度

空気中の湿度, 気流, ふく射熱の影響を受けない空気のみ温度は, 乾球温度計で求められる。この温度を乾球温度 t (DB: Dry Bulb temperature) という。水で濡らした布で乾球温度計の下端の球を包んで、その一端を水につけ、感熱部の風速が 5m/s 以上になったとき測った温度を湿球温度 t' (WB: Wet Bulb temperature) という*。湿気が少ないときは、湿球からの蒸発が盛んになるので、湿球温度は低くなる。水蒸気の量がその温度の飽和水蒸気圧以上になると、水蒸気は遊離して露となる。湿り空気が露を結ぶ温度を湿り空気の露点温度 t'' (dew point temperature) と呼ぶ。飽和水蒸気圧が示す飽和空

* 従って、壁掛け式乾湿球温度計の読みは、数%の誤差がある。