

論文 蒸気養生中における薄肉部材の乾燥水量に関する実験的研究

武井一夫*1

要旨：定置式製造システムで促進養生したコンクリートは、養生温度が高いため乾燥し易い。これは、蒸気養生後のコンクリート強度の伸びに大きく影響すると考えられ、特に薄肉部材ほどその影響は大きい。しかし、蒸気養生中におけるコンクリート中の水分の乾燥過程は不明である。このため、厚さの異なる薄肉の供試体を定置式製造システムで蒸気養生し、その重量と温湿度を時間毎に計測することにより、どの時点でどの程度乾燥するのか検討を行った。

キーワード：蒸気養生、プレキャストコンクリート、乾燥、フレッシュコンクリート

1.はじめに

定置式製造システムによる常圧蒸気養生は、鋼製型枠（以後ベツト）に打設したコンクリートをシートで覆い蒸気の熱によって加熱する方法である（図-1）。蒸気養生中のコンクリートの乾燥状態は、昇温工程から最高温度付近のコンクリート表面温度が槽内空気の温度より高くなる時まで平衡蒸気圧下であり、コンクリート中の水分はほとんど蒸発しないと考えられ、それ以後は槽内の温度が下がり槽内空気の蒸気圧とコンクリート表面の蒸気圧に差が生じるため、コンクリート表面から水分の蒸発が始まる。また、蒸気養生中のコンクリートの乾燥はその後の強度の伸びに影響し、薄肉のプレキャスト部材は体積に比べ表面積が大きいので影響を受け易いと考えられる。しかし、実際には蒸気養生中のコンクリートの乾燥過程の研究は少なく明らかでない。本報は薄肉プレキャスト部材が蒸気養生中にどのような過程で乾燥するか、また、それは厚さにどのように関係しているか、厚さの異なる薄肉の供試体を用い、実験し検討を行う。

2.実験概要

定置式製造システムによる常圧蒸気養生中の薄肉部材の乾燥過程を解明するために、次に示す実験を行った。実験は厚さの異なる供試体（厚さ5, 10, 15cm）を、恒温恒湿室（室温20℃, 相対湿度60%（以後20℃60%）・40℃40%）と加熱養生槽に入れ、温湿度と供試体重量を時間毎に計測した。コンクリートはレディミクストコンクリートを用い、調合は表-1に示す普通コン

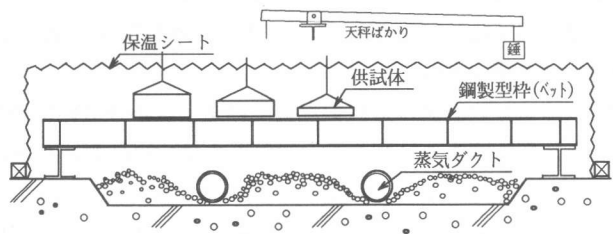


図-1 定置式加熱養生槽と実験装置

クリートで、空気量4%・粗骨材の最大寸法20mm・調合強度350kgf/cm²を用いた。供試体重量の計測は恒温恒湿室では、電子ばかりを用いて型枠ごと計測するが、加熱養生槽では温湿度が高く電子ばかりでは測定できないと判断し、図-1に示す天秤ばかりを使って天秤棒の水平位置にお

*1 飛島建設（株）技術本部（正会員）

る錘の重量を計り供試体重量に換算した。また、蒸気養生の加熱方法は打込み後保温シートを掛け前養生（2時間）を行った後、加熱（燃烧時間4時間）を行った（図-2）。

また、蒸気養生中の供試体重量は、コンクリート表面や型枠に結露した水が付着するため、供試体の乾燥過程を定量的に把握することはできないので、恒温恒湿室の結果や加熱方法を変えた実験により乾燥過程を検討することにした。

2.1 供試体

供試体は、人力で運搬できる程度の表面積の広い四角柱（上表面30cm×30cm, 厚さ5・10・15cm）とした。型枠は

水分を吸収しないように全表面を油性ペイントを塗布した木製（ベニヤ合板12mm）で、側面の熱移動を極力抑えるために外側に伝導率の低い押出法ポリスチレンフォーム保温板厚25mmを貼り、型枠の底面はベット上の薄肉部材と同じ熱状態になるように、蒸気の熱を受け易い鋼板（1.6mm）を用いた。また、コンクリートの上端は型枠上端と同じ高さに（恒温恒湿用供試体はブリーディング水が溢れない程度に、蒸気養生用供試体は結露水が溜らない程度に）表面を平滑に仕上げた。供試体はそれぞれ2体ずつである。

2.2 計測方法

コンクリート温度および室温・槽内温度の計測は、各供試体の上表面の中央（図-2）とその真上2cmの位置における空気の温度を熱電温度計を用いて、打込み時から供試体重量の計測と同時に30分毎に行った。湿度計測は50℃まではアスマン通風乾湿計により数値を読み、湿り空気線図より相対湿度を算定した。また、加熱養生槽での50℃以上の湿度の計測は湿度・温度変換器を用い、その感知部を加熱養生槽（シート）内に入れ湿度を計測した。湿度の測定位置は恒温恒湿室・加熱養生槽とも床上40cmとした。

供試体重量の計測は恒温恒湿室では電子ばかり（秤量20kg、1台または2台）を用い、30分毎に打込み後48時間まで計測した。加熱養生槽での計測は全長約2.5mの天秤ばかりを作り、天秤棒の一方には保温シートの穴に通した鉄線に供試体を吊るし、もう一方に錘を吊るして天秤棒が水平になった時の錘の重量を30分毎に打込み後17時間まで計り、それを換算することにより供試体重量を求めた。また、天秤ばかりの支点は摩擦抵抗が少なくなるようにナイフエッジ状に加工した。

2.3 加熱方法

供試体の加熱方法は薄肉PCa部材製造時の加熱状態に近い3種類の方法を採った。加熱方法（a）は前述（図-2）に示す加熱工程で供試体をベット上に直に置き、打込み後すぐに重量を計測し保温シートを掛け前養生の後、ベットからの加熱とベットの上から蒸気熱により加熱する方法である。加熱方法（b）は前養生時に保温シートを掛けない状態でベットの上に1時間放置し、その後ベットの温度を40℃まで暖め（プレヒート）1時間置き、保温シート掛けた後加熱する（以降加

表-1 コンクリートの調合表

調合強度 kgf/cm ²	水セメント比 %	スラブ cm	細骨 材率 %	AE減 水剤 kg/m ³	単位 水量 kg/m ³	重量 kg/m ³			
						セメント	砂	砕砂	砕石
350	47	8	43.1	2.004	157	334	390	390	1048

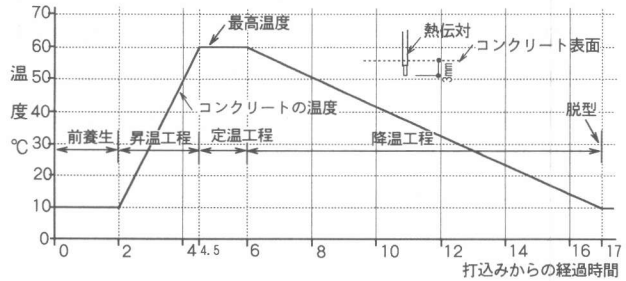


図-2 養生温度計画

熱工程は (a) と同じ) 方法であり、加熱方法 (c) は (a) の方法と同じ工程で実験終了までベット上に吊った状態で、蒸気の熱のみで加熱する方法である。加熱工程はどれも図-2を基準とした。

3. 実験結果と考察

3.1 恒温恒湿室の供試体重量

コンクリートのスランブは9.5cm、空気量3.8%であった。コンクリートの表面温度は恒温恒湿室(20°C60%)では終始室温とほぼ同じであり、恒温恒湿室(40°C40%)では室温の+1~3°C程度であった。供試体毎の差も両室とも+0~2°Cと大差なく、薄い供試体(t=5cm)のコンクリートの表面温度は室温とほぼ同じであった。

図-3に各供試体の打込み時のコンクリート重量を100%とした時の重量変化率(測定時重量×100%/打込み時重量)と材令の関係を示す。重量変化率の厚さ毎の差は、恒温恒湿室20°C60%と40°C40%のいずれの場合も、薄い供試体ほど重量変化率が大きく、5cmと10cm、10cmと15cmの差を比べると5cmと10cmの差の方が大きい。

図-4に乾燥水量と打込み時からの材令の関係を示す。乾燥水量は打込み時の供試体重量から測定時の供試体重量を引いた値とした。乾燥水量の勾配は、恒温恒湿室(20°C60%)の実験結果は直線変化に近い状態で乾燥するのに対し、恒温恒湿室(40°C40%)では打込み後しばらくして急勾配になるが、打込後16時間後付近から緩くなっている。また、厚さ毎の乾燥水量の差は図-3同様に5cmと10cm差の方が大きく、48時間後の乾

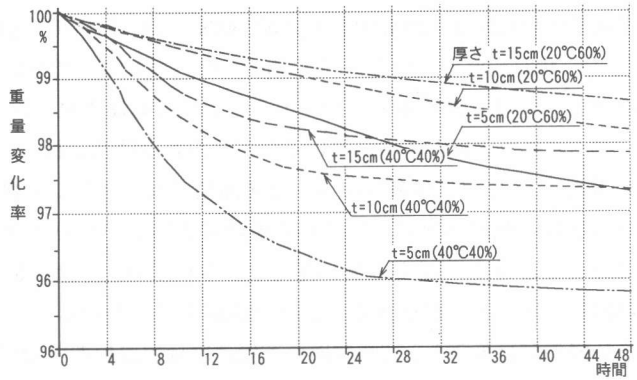


図-3 重量変化率と材令

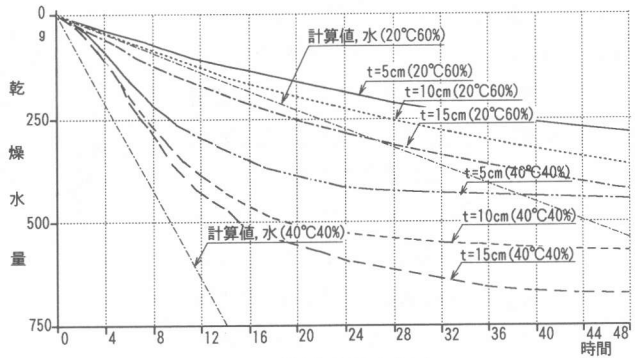
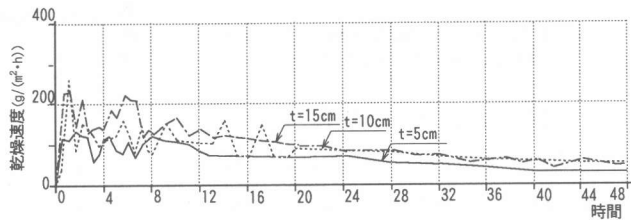
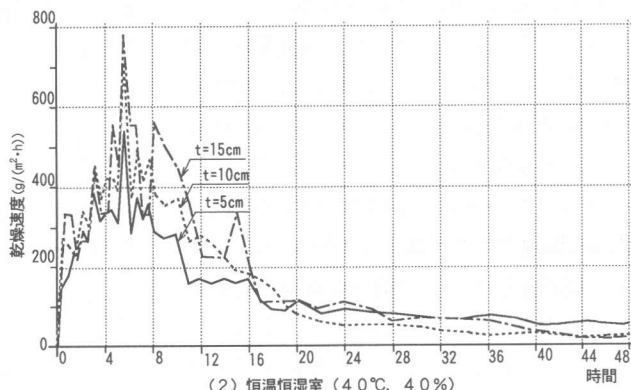


図-4 乾燥水量と材令



(1) 恒温恒湿室 (20°C, 60%)



(2) 恒温恒湿室 (40°C, 40%)

図-5 恒温恒湿室における供試体の乾燥速度と材令

乾燥量は単位厚さに換算すると、20℃60%ではt=5cmで640g/m²cm、t=10cmで411g/m²cm、t=15cmで322g/m²cm、40℃40%ではt=5cmで1018g/m²cm、t=10cmで648g/m²cm、t=15cmで510g/m²cmとなり、薄い供試体ほど乾燥水量が多く、いずれもt=5cmの乾燥水量はt=15cmのほぼ2倍となっている。

図-5に恒温恒湿室内における供試体の乾燥速度と材令の関係を示す。乾燥速度は変化した供試体重量 (g) を測定間隔 (時間) と表面積 (m²) で除した値である。恒温恒湿室 (20℃60%) における供試体の乾燥速度は、打込み直後は乾燥速度が早い徐々に遅くなる。恒温恒湿室 (40℃40%) に比べると速度は遅く大きな変化はみられない。また、恒温恒湿室 (40℃40%) における供試体の乾燥速度は、どの供試体も打込み直後から徐々に増し、打込み後5~6時間でピークに達し、その後乾燥速度は低下し、48時間後の乾燥速度は恒温恒湿室 (20℃60%) における供試体よりも遅くなっている。

恒温恒湿室内における乾燥速度は (20℃60%, 100~200kg/m²h・40℃40%, 200~600kg/m²h) であった。これをアメリカ骨材協会・レディミクストコンクリート協会の計算図表 [4] の値と比較すると、(20℃60%, 100kg/m²h・40℃40%, 400kg/m²h) であり、コンクリートの厚さや打込みからの時間が記されていないが、ほぼ一致している。また、コンクリート表面の水の蒸発を、純粋な水の蒸発として式 (1) [5] を用いて計算すると

$$L = 0.0178 (P_w - P_a) \cdot A \quad \text{--- (1)}$$

L: 蒸発量 (kg/h)、P_w: 飽和空気の水蒸気圧 (mmHg)
P_a: 空気の水蒸気圧 (mmHg)、A: 表面積 (m²)

20℃, 60%では、P_w=17.7、P_a=10.7、L=0.125 (kg/m²h)、40℃, 40%では、P_w=55.5、P_a=22.2、L=0.593 (kg/m²h) となり、40℃, 40%では大きめの値となっている。

3.2 蒸気養生槽の供試体重量

コンクリートのスランプと空気量は、加熱方法 (a) 9.1cm、3.6%、加熱方法 (b) 8.5cm、3.9%、加熱方法 (c) 7.9cm、4.1%であった。

図-6に加熱方法 (a) における各供試体のコンクリートの表面温度と供試体真上2cmの槽内空気の温度および供試体の材令との関係を示す。養生槽内の空気の温度は蒸気の吹き出しと同時に急激に上昇し、コンクリートの表面温度と槽内空気の温度差は約25℃に達した。相対湿度も直に100%になり、保温シートの内側や型枠に結露し

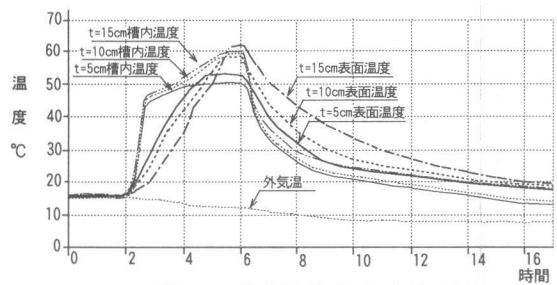


図-6 養生温度 (加熱方法 (a))

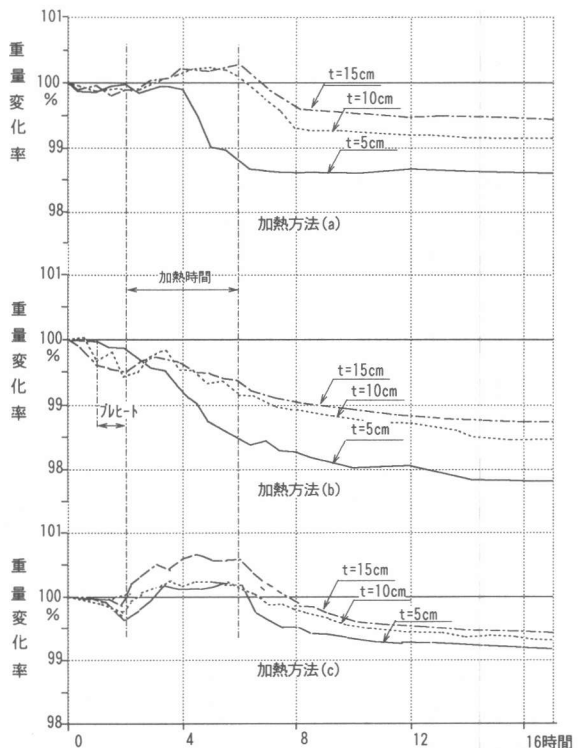


図-7 蒸気養生時における供試体の重量変化率と材令

た水が付着する。コンクリート表面温度もそれに連れて上昇するが、その勾配は厚い供試体ほど緩い。また、蒸気の吹き出し停止と同時に槽内空気の温度は急激に下がり、停止直後のコンクリートの表面温度との差は約20℃となった。また、薄い供試体の温度上昇は早く、最高温度は厚い供試体より低い。

相対湿度は加熱停止後30分100%、60分92%、90分84%、120分75%と徐々に低下して行き、17時間後は65%になった。なお、17時間後の供試体および型枠には、結露した水は付着していない。また、加熱方法が異なっても槽内空気の温度はほぼ同じ工程をたどった。最高温度付近の槽内空気の温度は高さにより、上部と下部では15~20℃差ができた。このため、供試体の厚さにより供試体真上の槽内温度とコンクリートの表面温度に供試体毎に差が生じている。しかし、加熱方法(c)では、コンクリートの表面温度と槽内空気の温度に供試体毎の大きな差はみられなかった。これは、供試体が加熱方法(a)、(b)に比べ、槽内の上部の同じ高さにあったためと考えられる。

図-7に供試体の蒸気養生時における重量変化率と材令の関係を、図-8に乾燥水量と材令の関係を、図-9に乾燥速度と材令の関係を示す。

加熱方法(a)について、図-7と8から乾燥水量の変化をみると、前養生時は空気の流れがないため、蒸気の吹き出し(以後吹出し)が始まるまで重量の変化があまりみられない。吹出しが始まると周囲の温度より蒸気の温度が高いため、コンクリート表面や型枠に蒸気が結露し重量が増す。また、吹出しの停止と共に槽内温度が下がり始め、同時に重量も減り始める。吹出し停止後2時間までは急激に減少し続けるがそれ以後は少ない。しかし、薄い供試体(t=5cm)は打込み後から吹出し途中まで重量の

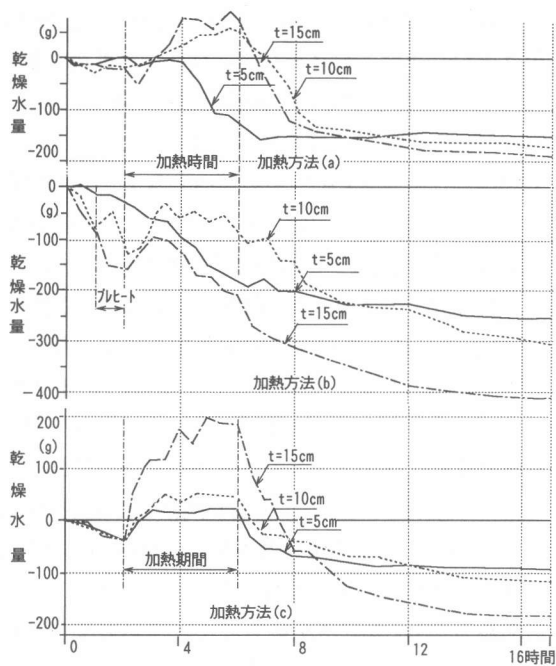


図-8 蒸気養生時における乾燥水量と材令

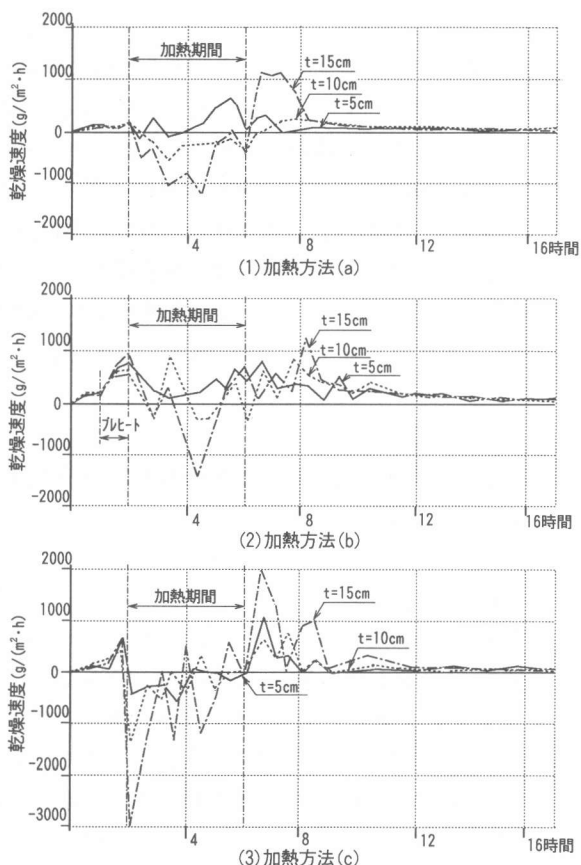


図-9 蒸気養生槽における供試体の乾燥速度と材令

変化はみられず、吹出し途中から吹出し停止後1時間程度までは重量は急激に減少するがそれ以後は緩い。また、打込み17時間後までの乾燥水量について図-4の恒温恒湿室の結果と図-8の加熱方法(a)を比較すると、恒温恒湿室(20℃, 60%)では同程度の乾燥水量であるが、恒温恒湿室(40℃, 40%)の方が2.5倍程度乾燥する結果となっている。単位厚さ当りでは $t=5\text{cm}$ で $333\text{g}/\text{m}^2\text{cm}$ 、 $t=10\text{cm}$ で $192\text{g}/\text{m}^2\text{cm}$ 、 $t=15\text{cm}$ で $142\text{g}/\text{m}^2\text{cm}$ となり、薄い供試体ほど乾燥水量が多い。

加熱方法(b)について同様に、図-7、8の乾燥水量の変化をみると、打込み後1時間は保温シートがないため打込みと同時に重量が減少し更にプレヒートによって減少する。吹出しと同時に一旦重量は増すが、吹出し開始後1時間半を過ぎると再び減少に転じている。しかし、薄い供試体($t=5\text{cm}$)は打込み直後から吹出し中も重量は減少し、増加に転じない。

加熱方法(c)について図-8をみると、吹出し中は全ての供試体で重量が増し、吹き出し停止後は全ての供試体の重量が減少している。また、厚い供試体($t=15\text{cm}$)は型枠面積が広いため結露する量も多く、吹出し中における重量は他の供試体より多く吹出し後の乾燥水量も多い。これを図-9の乾燥速度からみると吹出し開始と停止後の乾燥速度は早い結果となっている。

以上から、厚さの薄い供試体ほど単位当り($\text{m}^2\cdot\text{cm}$)の乾燥水量は多い結果となり、この傾向は蒸気養生だけでなく実験全部にみられた。また、3つの加熱方法を比較すると、17時間後の乾燥水量は加熱方法(b)の方法が最も多く、加熱方法(c)の方法が最も少ない結果となった。また、重量変化率も(c)の方法が他の加熱方法よりも少ない結果となっている。

5.まとめ

蒸気養生におけるコンクリート中の乾燥水量は、槽内空気の温度をコンクリートの表面温度より高くし、降温勾配を緩く(保温)することが、乾燥水量を押さえる方法と考えられる。

また、今回の実験範囲から検討項目をまとめると次のようになる。

1. 厚さが異なる供試体の乾燥水量は、厚さが薄いほど単位当り($\text{m}^2\cdot\text{cm}$)の乾燥水量は多い。
2. 蒸気の吹出し停止直後の乾燥速度は恒温恒湿室(20℃60%)の約5~10倍である。
3. 蒸気の吹出し中でも供試体の温度条件によっては、乾燥する。

以上の知見が得られたが今後の課題として、温湿度及び重量の計測精度を高め、さらに薄肉プレキャスト部材の蒸気養生中の乾燥と強度の関係について研究を進めたい。

【参考文献】

- [1] 武井一夫：蒸気養生した薄肉部材の乾燥と圧縮強度に関する研究、日本建築学会構造系論文集、pp1~8、1995. 12
- [2] 杉山 雅：構造体コンクリートの力学的性状に及ぼす乾燥の影響に関する研究、北海道大学博士論文、1980. 12
- [3] 笠井、横山、松井、飛内：早期におけるコンクリートの乾燥に関する研究、日本建築学会関東支部第44回研究報告集、pp329~332、1995. 12
- [4] フレッシュコンクリートからの水の蒸発速度：セメント・コンクリート中の水の挙動、セメント・コンクリート研究会水委員会、田代、田沢、笠井、pp152~153、1993. 10
- [5] プールの加熱負荷：空気調和衛生工学便覧、空気調和衛生工学会、pp492、第12版
- [6] 溶液の蒸気圧：化学入門、オーム社、藤原、木原、石原、pp193、1993