論文 異なる平衡相対湿度条件下でのセメント硬化体のヤング率と相組成 の関係

五十嵐 豪^{*1}· 堀口 直也^{*1}· 丸山 一平^{*2}

要旨:セメント硬化体のヤング率について,直接引張試験と超音波試験により取得した。40%RHより高湿度 側では、ヤング率と相対湿度の関係は正の相関が得られた。40%RHよりも低湿度側では、直接引張試験につ いては、正の相関が得られたが、超音波試験では負の相関となった。直接引張試験の結果に着目すると、応 力を負担する水が減少したことにより剛性が低下したと考えられた。そこで、乾燥が進んだ構造物の剛性の 低下を評価するために、相組成の観点から検討したところ、ヤング率と密度×ゲル/スペース比の関係は水セ メント比、乾燥状態によらず同一の直線で評価できることが確認された。 キーワード:ヤング率、相対湿度、相組成、セメント硬化体、ゲル/スペース比、密度

1. はじめに

環境負荷の低減を求める動きから,近年は構造物の高 耐久化が望まれている。コンクリートの長寿命化には中 性化,塩害,アルカリ骨材反応といったコンクリートの 化学的劣化のみでなく,強度の長期的な増進や乾燥収縮, クリープ変形の増大など力学的物性の経時変化を把握 し,制御することも重要である。しかし,力学的物性の 経時変化についての研究は強度や乾燥収縮,クリープな どの報告が主であり¹⁾,長期的な乾燥による水分逸散を 考慮したヤング率,ポアソン比の変化に関する報告は極 めて少ないのが現状である。

コンクリートの乾燥によるヤング率の変化について, 岡島ら²⁾がコンクリートのヤング率は含水率の上昇に伴 って増大するという報告を行っている。また Wittmann³⁾ は、セメント硬化体のヤング率は平衡相対湿度の低下と ともに減少していくが、ある相対湿度で極小値をとり、 それ以下の湿度では再び上昇することを報告している。 また Sereda ら⁴⁾は、吸着プロセス上では相対湿度 0%か ら 50%の範囲ではセメント硬化体のヤング率に変化は 生じないものの、高湿度領域ではヤング率は増大すると している。このように、コンクリートやセメント硬化体 の乾燥によるヤング率の変化はいまだ統一的な見解が 見いだされていないのが現状である。 ヤング率や弾性係数を求める方法には、コンクリート に外力荷重を加えた時の変形量から求まる静弾性係数 試験、共振法や超音波法により求める動弾性係数試験が 存在する。超音波試験は構造物を破壊せずに物性が把握 できる非破壊試験として注目されており、コンクリート を透過した波の伝播時間を用いる透過法や回折した波 の伝播時間を用いる反射法がある。透過法では縦波伝播 速度とヤング率の関係性についての報告が広く行われ ており、近年では縦波および横波伝播速度から試験体の ポアソン比、ヤング率を算出する手法も研究が進められ ている。河角⁵はさまざまな水セメント比、材齢のセメ ント硬化体を用いた超音波伝播試験による動弾性係数 から静弾性係数を求める式を示している。また、Abeele⁶⁰ らは極若材齢時からのコンクリートのヤング率、ポアソ ン比の経時的変化の報告を行っている。

本研究では、各平衡相対湿度環境下に置かれた試験体 を用いて超音波試験および直接引張試験からヤング率 の測定を行い⁷⁾、併せて、密度試験、リートベルト解析 および相組成モデルから同定したセメント硬化体中の 相組成から平衡相対湿度によるヤング率の変化を定量 評価することを試みた。

密度 ブレーン比表面積 Ig.loss 化学成分 [mass%] $[g/cm^3]$ [%] $\left[\text{cm}^{2}/\text{g} \right]$ MgO SO_3 Na₂O K_2O C1⁻ SiO_2 Al_2O_3 Fe₂O₃ CaO Ν 3110 21.8 4.49 63.9 1.84 3.16 0.64 2.90 2.26 0.20 0.38 0.007

表-1 セメントの試験成績

*1 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 (正会員)

*2 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 准教授・博士(工学) (正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

本実験では、研究用普通ポルトランドセメント(記号 N)を用いた。セメントの試験成績を表-1 に示す。超 音波試験に供する試験体は、水セメント比 0.55, 0.40, 0.30(記号はそれぞれ N55U, N40U, N30U)で 3×13× 300mm の鋼製型枠に打設し、それぞれ材齢5日,4日, 2 日で脱型した。脱型後は恒温室(20±2℃)で材齢 28 日まで飽和水酸化カルシウム溶液中で水中養生を行い, 以後は乾燥開始材齢まで湿布養生にて養生した。試験体 は基準となる長さ、質量を測定した後、平衡相対湿度の 異なる飽和水溶液で調湿したデシケータ内に静置し,約 1年間調湿を行い、質量変化が生じなくなった後、再び 試験体長さおよび質量を測定しひずみ、含水率を算出し た。デシケータ内の湿度はそれぞれ 95, 85, 75, 70, 60, 43, 23, 11%RH である。使用した飽和水溶液の平衡相 対湿度を表-2に示す。また、100%RH 試験体は 95%RH 試験体を浸水させた上で減圧機を用いて飽水状態とし たものを用いて測定を行った。0%RHについては11%RH 試験体をマッフル炉にて105℃下で24時間乾燥させるこ とにより行った。

直接引張試験に供する試験体は、水セメント比 0.55, 0.40 (記号はそれぞれ N55T, N40T)で 3×22×300mm の 鋼製型枠に打設し、それぞれ材齢 4 日と 3 日で脱型を行 った。脱型後は恒温室(20±2℃)で飽和水酸化カルシ ウム溶液による水中養生を行い、試験体長さを 150mm に成形した後、基準となる試験体長さ、質量を測定した。 その後、相対湿度 100%とする試験体は水中養生を継続 し、80,60,40%RH に調湿する試験体は各湿度に調湿 したデシケータ内に入れ約 3 ヵ月調湿を行った後、再び 試験体長さと質量を測定しひずみ、含水率を算出した。 デシケータ内の相対湿度は±3%RH で制御し、調湿には 水酸化ナトリウムを使用した。また、0%RH については 100%RH 試験体の基準長さ、質量を測定後、マッフル炉 にて 105℃下で 24 時間乾燥を行い、長さおよび質量を測 定後、アルミ袋に入れ密封状態で保管した。

本実験では十分な期間調湿を行い、代表的なサンプル を用いて質量変化が無くなったのを確認した上で、試験 体内部が外気湿度と平衡に達した状況において試験を 実施した。そのため本検討では試験体内部は水分分布や それに起因する物性について均質な状況にあるものと 考えることができる。

また、本検討では、相対湿度全域にわたるパラメータ を設定しているため、低湿度域では表面付近にマイクロ クラックの発生が考えられる。このことから、マイクロ スコープ(倍率:×500, Anmo Electronics 社製)により 表面の観察を行った。すべての調合、調湿条件の試験体

表-2 各種塩の飽和水溶液における相対湿度

溶質	平衡相対湿度 [%]
KNO ₃	95
KCl	85
NaCl	75
KI	70
NaBr	60
K_2CO_3	43
CH ₃ COOK	23
LiCl	11



において, 倍率 500 倍の範囲では, マイクロクラックの 存在は観測されなかった。

2.2 超音波試験

超音波試験は、透過法により超音波到達時間を測定した。測定装置としては Panametrics-NDTTM 超音波探触子(縦波用: V103-RM,横波用: V153-RM), Panametrics-NDTTM パルサレシーバー5077PR (OLYMPUS 社製),およびデジタルオシロスコープ TDS2012B (Tektronix 社製)を使用した。測定条件は、パルス発振電圧:-400V,探触子周波数:1.00Hz,パルス繰返し周波数:100Hz である。接触媒質には試験体内部への浸透を抑えるため縦波、横波ともに粘性の高いカップラントを使用した。

縦波到達時間および横波到達時間は送信用,受信用探 触子を試験体の両側から押しあて測定した透過波形と, 試験体を挟まず測定したリファレンス波形により求め た。縦波および横波の到達時間は,正の第1波形におけ る極大値となる点の時間を用い,透過波形とリファレン ス波形の時間の差分を到達時間とした。ノギス(最小目 盛り 0.05mm)により測定した試験体厚さについて,得 られた到達時間で除して縦波速度および横波速度を算 出し,式(1)によりヤング率を求めた⁸⁾。

$$E = 2 \cdot \left(1 + \frac{1 - 2r^2}{2 - 2r^2} \right) V_s^2 \rho$$
 (1)

ここで,E:ヤング率 (GPa),r:伝搬速度比 (= V_s/V_p)(-), V_s :横波伝搬速度 (km/sec.), V_p :縦波伝搬速度 (km/sec.), ρ :見かけの密度 (g/cm³)である。

セメント硬化体は平衡相対湿度により含水率が変化 し、見かけの密度が変わるため、ヤング率の導出には後 述する密度試験および図-4の実験結果から算出した各 湿度における見かけの密度を用いた。

2.3 直接引張試験

直接引張試験は、図-1 に示すように、薄肉試験体へ 縦方向および横方向にひずみゲージを貼り付け、ひずみ を測定した。また、載荷時に試験体から水分の逸散が生 じないよう、ひずみゲージを妨げない処理をした上から アルミ粘着テープで封緘を施した。この試験体両端に接 続用治具をエポキシ系接着剤で取り付け、写真-1 に示 されるようにテコ式引張試験機およびロードセルに対 して、ユニバーサルジョイントを用いて接続した。これ は、試験体に曲げモーメントが作用することを抑えるた めである。荷重は試験体上部に接続したロードセル(測 定範囲 500N、精度±0.5%)により測定した。

2.4 密度試験

セメント硬化体の飽水状態における見かけの密度は、 セメント硬化体を表面乾燥飽水状態として、アルキメデ ス法により測定した。その後、表乾状態の試験体を105℃ で24時間乾燥させて、質量減量を測定し、飽和含水率 を求めた。乾燥により蒸発した水はセメント硬化体中に おいても大気圧下の体積と等しかったものとして、式(2) に従い、図-4に示す脱着等温線の結果から各平衡相対 湿度における見かけの密度を算出した。

$$\rho_{RH} = \frac{1 + w_{RH}}{1 + w_{sat}} \cdot \rho_{sat} \tag{2}$$

ここで, ρ_{RH} :各平衡相対湿度における密度 (g/cm³), w_{RH} :各相対湿度における含水率 (g/g), w_{sat} :飽和含水率 (g/g), ρ_{sat} :飽水密度 (g/cm³)である。

2.5 粉末 X線回折およびリートベルト解析

粉末 X 線回折の測定は、D8 ADVANCE(BrukerAXS 社 製)により、水和停止を行った 11%RH 乾燥状態の粉末試 料に内部標準試料として α -Al₂O₃を内割で 10wt%混合し て、X 線源 Cu-K α 、管電圧 40kV、管電流 40mA、走査 範囲 2 θ =5~65°,ステップ幅:0.02°,スキャンスピ ード:0.5°/min.の条件で行い、ソフトウェア TOPAS ver.4.2 (BrukerAXS 社製)によりリートベルト解析を行っ た。定量に際しては、C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF、MgO (M), Free-Lime, CaCO₃(C \overline{C})、CaSO₄·2H₂O (C \overline{S} H₂)、CaSO₄· 1/2H₂O (C \overline{S} H_{0.5})、Ca(OH)₂ (CH)、C₃A·3CaSO₄·32H₂O (AFt)、C₃A・CaSO₄·12H₂O (AFm)の各セメント鉱物・水

表-3 各乾燥状態における水和生成物の組成

水和物	乾燥状態	H/C	名中十	分子量	密度
			租成工	[g/mol]	[g/cm ³]
C-S-H	1000°C	0	C _x SH ₀	155	
	105°C	0.88	$C_x SH_{1.5}$	182	2.65
	20°C,11%RH	1.18	C _x SH _{2.1}	191	2.40
	Saturated	1.18	C _x SH _{2.1}	191	2.40
	1000°C	0	$C_6A\overline{S}_3H_0$	679	
AFt	105°C	2.00	$C_6A\overline{S}_3H_{12}$	895	2.38
	20°C,11%RH	5.33	$C_6 A \overline{S}_3 H_{32}$	1255	1.77
	Saturated	5.33	$C_6A\overline{S}_3H_{32}$	1255	1.77
	1000°C	0	$C_4 A \overline{S} H_0$	406	
AFm	105°C	2.00	$C_4A\overline{S}H_8$	550	2.40
	20°C,11%RH	3.00	$C_4 A \overline{S} H_{12}$	623	1.99
	Saturated	3.00	$C_4 A \overline{S} H_{12}$	623	1.99
С-А-Н	1000°C	0	C_4AH_0	326	—
	105°C	1.75	C ₄ AH ₇	470	2.70
	20°C,11%RH	3.25	C_4AH_{13}	561	2.04
	Saturated	3.25	C_4AH_{13}	561	2.04
C-F-H	1000°C	0	C ₄ FH ₀	384	
	105°C	1.75	C_4FH_7	528	2.70
	20°C,11%RH	3.25	C ₄ FH ₁₃	618	2.23
	Saturated	3.25	C ₄ FH ₁₃	618	2.23



図-2 セメント硬化体中の相組成

表-4	セメ	ン	ト硬化体の性質
-----	----	---	---------

	飽水密度	飽水含水率
	[g/cm ³]	[g/g]
N55U	1.93	0.285
N40U	2.12	0.192
N30U	2.23	0.144
N55T	1.91	0.294
N40T	2.05	0.210

和生成物および内部標準試料として分析試料に混合した α-Al₂O₃(10wt%混合)を定量対象とした。非晶質量は 内部標準α-Al₂O₃の定量値から式(3)に従い算出した。

$$A = \{100 \times (S_R - S)\} / \{S_R \times (100 - S) / 100\}$$
(3)

ここで,A:非晶質量 (%),S: α -Al₂O₃ の混合率 (%), S_R : α -Al₂O₃の定量値 (%)である。

セメントの各鉱物の反応率や相組成を評価するにあたり,既報と同様にして⁹,各乾燥状態における H₂O/CaO モル比(H/C比)を考慮して,表-3に示される組成や結合水量値を用い,すべて無水物に換算した上で評価した。得られたセメント硬化体中の相組成を図-2に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 セメント硬化体の物性

本実験に使用したセメント硬化体の飽水時の密度と 飽和含水率を表-4 にまとめる。これらの値を超音波試 験におけるヤング率の算出に用いた。以降,超音波試験 に用いた試験体の結果をU,直接引張試験に用いた試験 体の結果をTとして図中の凡例の末尾に表記する。

超音波試験および直接引張試験に供した試験体のひ ずみと相対湿度の関係を図-3,脱着等温線を図-4に示 す。図-4に示される脱着等温線において 105℃乾燥条 件を相対湿度 0%RH とし,含水率を 0(g/g)として定義し た。図-3に示されるように,水セメント比が小さいほ どセメント硬化体の収縮量は小さくなる傾向を示した。 図-4に示されるように脱着等温線は,各試験体とも 11%RH から 60%RH の範囲までは水セメント比にかか わらずほぼ同様の値を示し,60%以上では水セメント比 の大きいほど含水率が高くなる傾向が確認された。これ らの傾向は岸らの報告と同様であった¹⁰。

3.2 セメント硬化体のヤング率の相対湿度依存性

ヤング率と相対湿度の関係を図-5 に示す。ヤング率 は試験体の3点の平均値より求め、図中のエラーバーは 標準偏差を表している。ヤング率は、引張試験および超 音波試験ともに、高湿度領域においては相対湿度の減少 とともに低下する傾向が確認された。しかし、超音波試 験については、40%RH 付近で極小値をとり、さらに湿 度が低下していくとヤング率は上昇していく結果とな った。なお、両試験条件ともに、105℃環境下で24時間 という長期間の強い乾燥を経た0%RHでは、急激にヤン グ率が低下している。これは、強い乾燥によって倍率× 500 のマイクロスコープでは確認できないほどのマイク ロクラックの影響ではないかと推察された。0%RHの条 件を除けば、ヤング率は、乾燥の程度により約7~13% の低下が確認された。この傾向は、Wittmannの研究と同 様であった³。



高い相対湿度において、セメント硬化体のヤング率が 減少した原因としては、微小空隙内に吸着・凝縮してい る水が応力負担をすることが古くから指摘されている が、相対湿度の低下に伴う含水率の低下により実質的な 応力負担面積が減少し、応力に対するコンプライアンス が増加したものと考えられる。超音波の伝播速度につい ても同様で、微小空隙中の水分の挙動が固体に近い振る 舞いをしており、その水分が減少することで伝播速度が 低下したものと推察される。この多孔体中の水が超音波 伝導性にどのような振る舞いをするかについては,今後 の課題としたい。

低湿度領域における超音波試験によるヤング率の上 昇のメカニズムの一つの仮説として,低湿度領域では, セメントの水和生成物である C-S-H の Si-O 鎖が,乾燥 によって長大化することに起因すると考えられ,固相部 分の超音波伝播速度が,水の低下量を上回るほど改善さ れた結果として生じるというものが挙げられる。

3.3 セメント硬化体のヤング率と相組成の関係

前節までに確認された,相対湿度によるヤング率の変 化をセメント硬化体中の相組成の観点から定量評価す ることを試みた。本検討では,既往の研究と同様に¹¹⁾, 2.4 節で得られた密度と 2.5 節で得られたゲル/スペース 比から評価を行った。

$$X = \frac{V_{hyd}}{V_{hyd} + V_{pore}} \tag{4}$$

$$E = E_0 \rho \left(X + \frac{X_e}{\rho} \right) \tag{5}$$

ここで, $X: \dot{\mathcal{F}}\nu/スペース比$ (vol./vol.), V_{hyd} :各水和生成物量の総和 (cm³), V_{pore} :総空隙量 (cm³), E: ヤング率 (GPa), E_{θ} (GPa), X_{e} (-):材料定数である。

ー般に弾性体について密度がヤング率と線形相関が あることは運動方程式の展開によって(6)式のように示 される¹²⁾。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \mathbf{E} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{6}$$

さらに、ヤング率の評価にゲル/スペース比を乗じたの は、図-6の概念図で説明される。つまり、セメント硬 化体の応力負担を形成する骨格は、水和生成物により形 成されるものであり、水和生成物が変形した時に、水和 生成物よりも剛性の小さい空隙は、水和生成物と同じひ ずみを生じるが、一方、未水和セメントは、水和生成物 の変形に伴い移動するが、剛な微粒子として分布してお り、ほとんどひずみを生じないものと考えられる。

ゲル(水和生成物)が,毛管空隙,ゲル空隙のすべて の空隙を埋めるような理想的な連続的状態においてセ メント硬化体は,未水和セメントと水和生成物が緊密に 接触し,未水和セメントと水和生成物の各要素において ひずみの適合性が成り立つ,準連続体のように振る舞う ものと捉えることができる。

また,提案式において, x 軸に切片を持ち原点を通ら ないことは,極若材齢においては,水和生成物が生成し ても,応力伝達経路となる骨格が形成されずにヤング率 が発現しないことと対応するものと捉えられる。この点 については,今後,切片付近のデータを蓄積することで 硬化時のヤング率の発現プロセスにおける本式の妥当





性が裏付けられるものと考えられる。

(5)式の形は、水和、つまりゲル/スペースの増大による 定性的なヤング率の増大と、見かけの密度をパラメータ として、応力負担経路となる骨格を形成する水和生成物 量が、水セメント比によって異なることを評価している。

検討の結果を図-7に示す。既報¹¹における材齢1日 から1年までの水和反応過程において、4×4×16cm 試験 体による超音波試験(記号:HU)およびφ5×10cm 円柱試 験体による圧縮試験(記号:HC)の結果から得られた,ヤ ング率と密度×ゲル/スペース比の関係について図中に 併せて示した。図に示されるように、セメント硬化体の ヤング率と密度×ゲル/スペース比の関係はほぼ正の直 線関係にあることが実験的に確認された。既報における 検討では、水和反応の進行による密度×ゲル/スペース比 の変化とヤング率の関係が直線関係が確認されたが、今 回の検討により平衡相対湿度による含水率の変化で決 定される密度×ゲル/スペース比とヤング率の関係につ いても同様の傾向があることが実験的に確認された。

図に示されるように, 調湿期間が1年である凡例記 号が黒色のUシリーズ,および図中に矢印で示した白色の105℃乾燥条件の2つのプロットについては,ほかの シリーズに比べて上側に来るものの、乾燥による密度の 変化あるいは水セメント比によるゲル/スペース比の変 化とヤング率の関係は正の相関となるという定性的な 傾向は一致する。他シリーズと同一直線上で評価できな かったことは、長期間の調湿期間が水和生成物の密度や 弾性性状に影響を及ぼしていることが示唆されるが、今 後の課題としたい。

4. 結論

本研究ではセメント硬化体のヤング率の平衡相対湿 度依存性を超音波試験および直接引張試験から測定を 行い,セメント硬化体中の相組成から評価を行った結果, 以下の知見が得られた。

- 超音波試験において、ヤング率は相対湿度の低下に ともなって減少していき、40%RH 付近で極小値を とり40%RH 以下の領域ではヤング率は再び上昇す る。
- 2) 直接引張試験では、ヤング率は湿度の低下にともない、一律に低下する。ただし、40%RH 以下の領域の測定点が不足しているので、今後、0~40%RHの領域の挙動については、再度確認の必要がある。
- 3) 超音波試験による相対湿度 40%以下の領域でのヤング率の増加(伝播速度の増加)は、乾燥により C-S-HのSi-O鎖長の増大により、固相の伝播速度が 大きくなることに起因すると推察された。
- 4) セメント硬化体中の相組成から密度×ゲル/スペース比を算出してヤング率と比較を行った結果,両者の関係は,直線関係となることが実験的に確認された。
- 5) 同一直線上で評価できなかったシリーズについては、調湿期間が長かったため、水和生成物の密度や 力学的性質が変化しているものと推察された。

謝辞

本研究の一部は,平成 21 年度経済産業省高経年化対 策強化基盤整備事業,および文部科学省科学研究費(若 手 A,代表:丸山一平)課題番号 21686052 の補助を得て 実施しました。付記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

1) Powers,T.C.: Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardening cement paste, in Proc. Int. Symp.

"Structure of Concrete and its behavior under load", London, pp.319-344, 1965

- 岡島達雄,志村欣一:コンクリートの強度及びヤン グ係数と水分の関係,日本建築学会大会学術講演梗 概集, Vol.A, pp.799-800, 1989.10
- Wittmann,F.H.: Interaction of Hardened Cement Paste and Water, Journal of the American ceramic society, Vol.56, No.8, pp.409-415, 1973
- Sereda,P.J., Feldman,R.F., Swenson,E.G.: Effect of sorbed water on some mechanical properties of hydrated Portland cement paste and compacts, Highway research board, SR90, pp.58-73, 1966
- 5) 河角誠:コンクリートのクリープ予想式における瞬 間ひずみ成分の決定-セメントペーストの動弾性 係数と静弾性係数の関係-,電力中央研究所報告, 研究報告:U92004, 1992
- Abeele,K.Van Den, Desadeleer,W., Schutter,G, Wevers,M.: Active and passive monitoring of the early hydration process in concrete using linear and nonlinear acoustics, Cement and Concrete Research, Vol.39, pp.426-432, 2009
- 7) 堀口直也,五十嵐豪,丸山一平:セメント硬化体の ヤング率およびポアソン比の相対湿度依存性,日本 建築学会構造系論文集, Vol.76, No.660, pp.231-236, 2011.2
- 8) 三木幸蔵:わかりやすい岩石と岩盤の知識, 鹿島出 版会, pp.128-129, 1978
- 9) 丸山一平,松下哲郎,野口貴文,細川佳史,山田一 夫:エーライトおよびビーライトの水和反応速度に 関する研究―ポルトランドセメントの水和機構に 関する研究 その1―,日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.650, pp.681-688, 2010.4
- 10) 岸直哉,猪飼陽子,丸山一平:セメント硬化体の乾燥収縮ひずみに及ぼす内部相対湿度の影響,日本建築学会大会学術講演梗概集,A-1,材料施工, pp.819-820,2008.9
- 五十嵐豪,丸山一平:普通ポルトランドセメントを 用いたセメント硬化体の相組成と力学的性質の関 係,日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.660, pp.213-222, 2011.2
- 12) 佐藤泰夫: 弾性波動論, 岩波書店, pp.2-8, 1978