

論文 逆解析によるマスコンクリートの保温養生材の性能評価

新美勝之*1・高木健次*2・江渡正満*3・若林雅樹*4

要旨：LNG地下タンク底版マスコンクリートの保温養生材の性能評価を目的に、底版を想定したコンクリート試験体を作成し、気泡を内包したポリエチレンシート（エア・バッグと称す）で養生した試験体内部の温度分布を計測して熱伝達係数を逆解析した。また、逆解析結果に基づき、熱伝達係数に及ぼすエア・バッグの枚数の影響とコンクリート表面から露出する鉄筋の影響に関する検討を行い、底版の温度解析に用いる等価熱伝達係数の算定方法を提案した。

キーワード：マスコンクリート、保温養生、熱伝達係数、逆解析

1. はじめに

液化天然ガスを貯蔵するLNG地下タンクの底版コンクリートは、大きなものでは直径70m以上、厚さ10mにもおよぶマスコンクリートで、施工時にはセメントの水和発熱に伴う内部拘束による温度ひび割れの発生が問題になる。この内部拘束による温度応力を緩和するための有効な手段の一つに、養生面を保温性の高い、すなわち熱伝達係数の小さい養生材で養生し、コンクリート内部の温度勾配を小さくする方法がある。底版コンクリートの養生材としては、軽量で施工性に優れた気泡を内包したポリエチレンシート（エア・バッグと称す）を用いることが多い。養生面に敷設するエア・バッグ枚数を増やすことで養生面の熱伝達係数を小さくできるが、経済性と施工性の面からは、エア・バッグの枚数はできるだけ減らす必要がある。そのため、合理的な施工を行うためにはエア・バッグの枚数と熱伝達係数の関係を正確に把握することが重要である。また、底版コンクリートを厚さ方向に層分割して施工する場合には、第1リフト施工時には養生面からせん断鉄筋が数十cm程度突き出ている。鉄はコンクリートと比較して熱伝導

率が大きいと露出した鉄筋部分から大気への伝達熱量も大きく、この影響は温度応力の評価において無視できないものと考えられる。

コンクリート養生面の熱伝達係数を推定する試みとしては、四国電力の大森川ダムにおける実験¹⁾、山川らによる実験と数値解析を用いたパラメトリックスタディによる評価²⁾が代表的である。最近では、実験と有限要素法による熱伝導解析を用いた逆解析により、各種養生条件のもとでの熱伝達係数を推定する試みがなされている。近久ら³⁾は、室内試験結果から逆解析手法にSimplex法を用いて推定を行っている。新美らは、試験体を屋外の実際の構造物と同じ環境下に設置して温度計測試験を行い、逆解析手法に非定常有限要素法解析を組み入れた拡張カルマンフィルタを用いて、熱伝達係数を日射吸収率と同時に時刻歴で推定している^{4),5)}。

本研究は、LNG地下タンク底版コンクリートの保温養生時の養生面の熱伝達係数を把握することを目的に、底版コンクリートを想定して作成した試験体をエア・バッグで保温養生した際の試験体内部温度分布を計測する実験を行い、逆解析によりエア・バッグの枚数の影響やコン

*1 清水建設(株)和泉研究室 工修(正会員)

*2 東邦ガス(株)知多緑浜工場建設部(正会員)

*3 清水建設(株)土木本部技術第1部 工修(正会員)

*4 東邦ガス知多緑浜工場 No.1 LNGタンク 清水・大林共同企業体

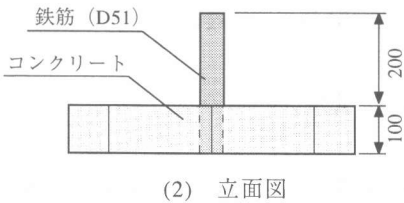
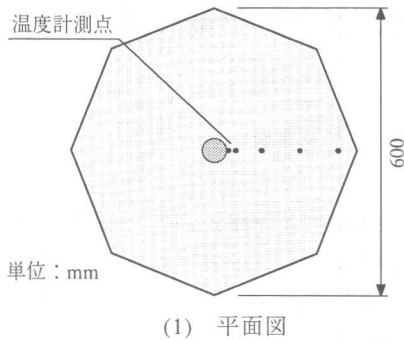
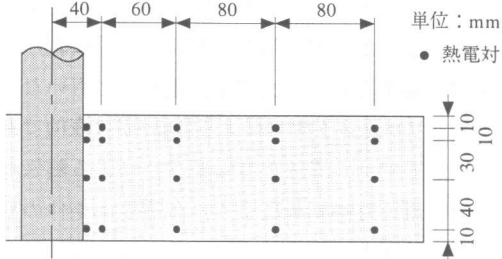


図-1 試験体（鉄筋あり）



クリート表面から露出したせん断鉄筋の影響を検討したものである。

2. 実験概要

温度計測試験の概要を以下に示す。

2.1 試験体および実験装置

試験体寸法および熱電対の埋設位置を図-1、図-2に示す。実験に用いた試験体は、対角寸法60cmの正八角形の平板で厚さは10cmである。試験体は、上記寸法の平板試験体（以下、鉄筋なし試験体）と、底版コンクリートを想定して中央部に鉄筋(φ51mm)を配置したもの（以下、鉄筋あり試験体）の2種類とした。それぞれの試験体には、内部の温度分布を把握するために熱電対を半径方向に5断面計20個埋設した。なお、有

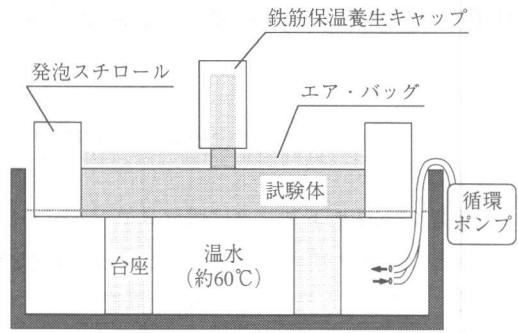


図-3 実験装置

表-1 実験ケース

試験体		エアバッグ枚数
鉄筋なし		2,4,6,8
鉄筋あり	鉄筋無養生	2,4,6,8,10
	鉄筋保温キャップ養生	8,10

限要素法による熱伝導解析を行う場合に、試験体を軸対称でモデル化するために、試験体は円形形状が理想であるが、試験体製作の都合上正八角形とした。また、試験体養生面の面積は、約0.255m²で、これは底版コンクリートにおいて0.5m間隔にせん断鉄筋を配置した場合の、鉄筋一本当たりの養生面面積にはほぼ等しい。

実験装置を図-3に示す。実験は、試験体の側面を硬質ウレタンフォームで覆って断熱し底面から熱を加え、上面の養生面からのみ熱を放出するようにして、試験体内部温度分布と室温を30分間隔で計測し、内部の温度分布の時間変化がなくなる定常状態と見なせるまで計測を継続した。実験装置は、試験体底面全体をむらなく一定温度に保って加熱できるように、水槽に約60°Cに保った温水を入れ、試験体底面が温水に接するように設置した。温水は、温度制御付きヒータと循環ポンプで均一な温度になるようにし、室温も一定に保った。

2.2 実験ケース

表-1に示すように、それぞれの試験体でエア・バッグの枚数を変えて実験を行った。また、鉄

筋あり試験体については、養生面から露出した鉄筋部分からの放熱を抑える目的で、鉄筋に発泡ポリエチレン製の保温キャップ（厚さ10mm）をかぶせたケースについても実験を行った。

表-2 解析に用いた物性値

	熱伝導率 [W・m ⁻¹ ・°C ⁻¹]	比熱 [kJ・kg ⁻¹ ・°C ⁻¹]
コンクリート	2.70	1.15
鉄筋	80.0	0.466

3. 熱伝達係数の推定方法

温度計測試験の結果に基づいて、養生面の熱伝達係数の推定を行う方法を示す。

まず、鉄筋なし試験体の実験結果から、養生時の熱伝達係数を推定し、エア・バッグの枚数と熱伝達係数の関係を把握する。次に、底板コンクリートを想定した鉄筋ありの試験体の実験結果から、鉄筋の熱伝達係数を逆解析により推定すると共に、鉄筋部からの放熱の影響も考慮した試験体全体での熱伝達係数について検討する。解析に用いた物性値は、文献^{6),7)}を参考にして表-2に示すように定めた。試験体は均質で、熱伝導率および熱容量は場所によらず一定と仮定した。

3.1 養生面の熱伝達係数の推定方法

鉄筋なし試験体では、試験体内部の熱流が1次元であると仮定して、次の方法で養生面の熱伝達係数を推定した。

まず、各実験ケースについて、それぞれの試験時間の中から温度が定常状態と見なすことができる時間間隔を設定し、その範囲の試験体中央断面の観測値を各計測点毎に平均する。

次に、この平均観測値を用いて、板厚方向zの温度勾配 $\partial\theta/\partial z$ と試験体養生面温度 θ_c を最小自乗法により推定する。

ここで、試験体の熱伝導率を λ 、平均室温を θ_n とすると、試験体内部のz方向の熱流 q_i と養生面での伝達熱流 q_c は次のようになる。

$$q_i = \lambda \cdot \partial\theta/\partial z \quad (1)$$

$$q_c = \alpha(\theta_c - \theta_n) \quad (2)$$

したがって、熱流の連続条件 ($q_i = q_c$) より、養生面の熱伝達係数 α は次式で推定できる。

$$\alpha = \frac{\lambda}{\theta_c - \theta_n} \frac{\partial\theta}{\partial z} \quad (3)$$

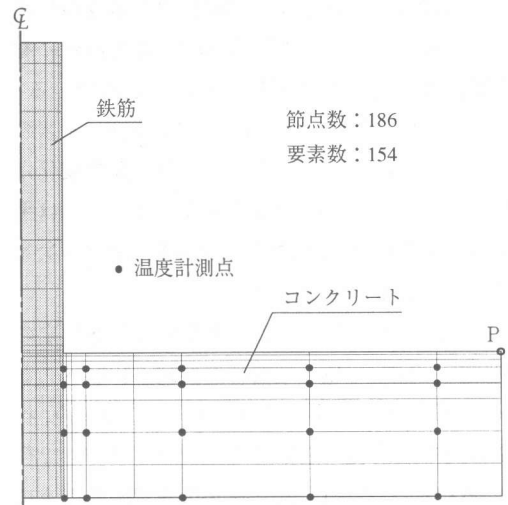


図-4 軸対称有限要素解析モデル

3.2 鉄筋の熱伝達係数の推定方法

底板コンクリートを想定した鉄筋あり試験体の実験結果から、非定常熱伝導有限要素法解析を組み込んだカルマンフィルタ^{8),9)}を用いて、鉄筋の熱伝達係数を推定した。なお、鉄筋あり試験体では熱流は軸対称であるものと仮定して、有限要素解析では試験体を図-4に示す軸対称でモデル化した。

カルマンフィルタを用いた状態推定の具体的な定式化を以下に示す。

まず、本推定で対象としたシステムの状態空間モデルを示す。システムの状態量は推定する鉄筋の熱伝達係数 α_s とし、時刻 t_i における1次元状態ベクトル x_i を式(4)のように定める。時刻 t_i から時刻 t_{i+1} への状態量の遷移を表すシステム状態方程式を式(5)に、時刻 t_i における観測値と状態の関係を表す観測方程式を式(6)に示す。

状態ベクトル

$$x_i \equiv \{\alpha_{si}\} \quad (4)$$

システム状態方程式

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \mathbf{w}_i \quad (5)$$

観測方程式

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{h}(\mathbf{x}_i) + \mathbf{v}_i \quad (6)$$

ここに、 \mathbf{y}_i は時刻 t_i における p 次元観測ベクトルで、熱電対で計測される試験体内部温度の観測値で構成される。 \mathbf{h}_i は観測関数で、この関数に有限要素法による熱伝導解析を組み込んでいる。 \mathbf{w}_i 、 \mathbf{v}_i はそれぞれシステムノイズ、観測ノイズのベクトルである。ここでは、 α_s の時間的変化はないものと考え、 \mathbf{w}_i は $\mathbf{0}$ とする。また、 \mathbf{v}_i は平均ベクトル $\mathbf{0}$ 、共分散マトリクス \mathbf{V}_i に従う p 次元の正規白色雑音と仮定する。

次に、カルマンフィルタを用いた状態推定の漸化式を示す。式(6)の観測方程式は状態ベクトル \mathbf{x}_i に関して非線形になっている。このため、状態推定の定式化は拡張カルマンフィルタ⁷⁾で行う。式(4)から式(6)で表される状態空間モデルに対して拡張カルマンフィルタを適用し、次のような時間漸化式を得る。

時間更新アルゴリズム

$$\hat{\mathbf{x}}_{i/i-1} = \hat{\mathbf{x}}_{i-1/i-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{i/i-1} = \mathbf{P}_{i-1/i-1} \quad (8)$$

観測更新アルゴリズム

$$\hat{\mathbf{x}}_{i/i} = \hat{\mathbf{x}}_{i/i-1} + \mathbf{K}_{Gi} [\mathbf{y}_i - \mathbf{H}_i \hat{\mathbf{x}}_{i/i-1}] \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{i/i} = \mathbf{P}_{i/i-1} - \mathbf{K}_{Gi} \mathbf{H}_i \mathbf{P}_{i/i-1} \quad (10)$$

カルマンゲイン

$$\mathbf{K}_{Gi} = \mathbf{P}_{i/i-1} \mathbf{H}_i^T [\mathbf{H}_i \mathbf{P}_{i/i-1} \mathbf{H}_i^T + \mathbf{V}_i]^{-1} \quad (11)$$

初期値

$$\hat{\mathbf{x}}_{0/-1} = \bar{\mathbf{x}}_0, \mathbf{P}_{0/-1} = \bar{\mathbf{P}}_0 \quad (12)$$

式中で $\hat{\cdot}$ は推定値を、添字 $i+1/i$ は時刻 t_i の情報に基づく時刻 t_{i+1} の値を表す。 $\mathbf{P}_{i/i}$ は推定誤差共分散マトリクス、 \mathbf{V}_i は観測ノイズの共分散マトリクス、 \mathbf{H}_i は観測マトリクスで式(6)の観測方程式を推定値のまわりで線形化して次式で与えられる。

$$\mathbf{H}_i = \left(\frac{\partial \mathbf{h}_i}{\partial \mathbf{x}_i} \right)_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{i/i}} \quad (13)$$

式(7)から式(11)までの漸化式により、最終的に鉄筋の熱伝達係数 α_s の最尤推定値を得る。

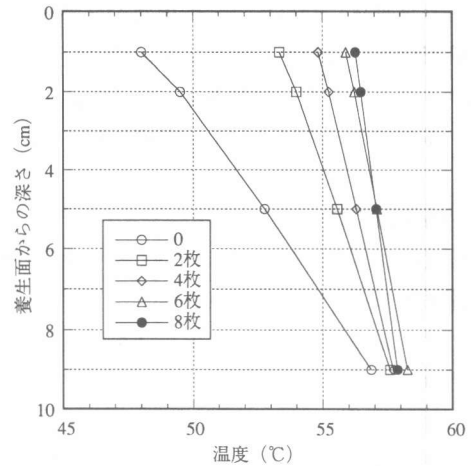


図-5 試験体内部の温度分布

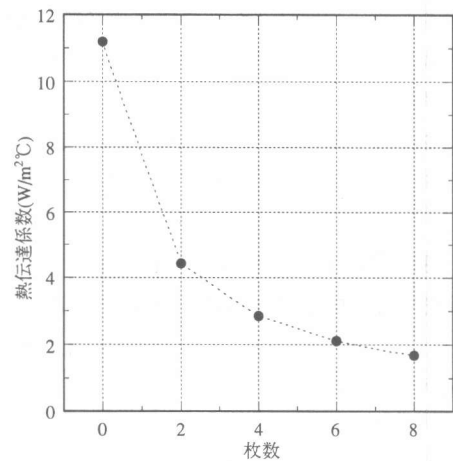


図-6 エア・バッグの枚数と熱伝達係数の関係

4. 実験結果と熱伝達係数の推定

4.1 鉄筋なし試験体

鉄筋なし試験体を用いた各実験ケースの、試験体中央計測断面での定常時の平均温度分布を図-5に示す。この実験結果を用いて、前章で述べた方法により熱伝達係数を推定した。エア・バッグの枚数と熱伝達係数の関係を図-6に示す。エアバッグの枚数が増えるにしたがって、熱伝達係数が小さくなっていることがわかる。

4.2 鉄筋の熱伝達係数の推定

鉄筋あり試験体を用いた各実験ケースの結果を用いて、前章で述べた方法により鉄筋の熱伝達係数を推定した。逆解析過程で得られた、試

験体内部の温度分布の一例を、図-7に示す。また、逆解析で得られた鉄筋の熱伝達係数とエア・バッグの枚数との関係を図-8に示す。

逆解析の結果には養生材の枚数によるばらつきが若干見られるものの、鉄筋の熱伝達係数は9～11Wm⁻²℃⁻¹程度であると推定できた。また、鉄筋に保温キャップをかぶせて養生した場合は、熱伝達係数は5Wm⁻²℃⁻¹程度と推定でき、無養生の場合に比べて5割程度に低減できることが明らかになった。

カルマンフィルタを用いた逆解析過程で算出されたコンクリート部と鉄筋部の大気との熱伝達境界から大気に伝達される熱量 Q_c と Q_s を、各ケース毎に図-9に示す。実験ケース毎に水温と室温の境界条件が若干異なるために、絶対値としては多少のばらつきがあるものの、鉄筋に保温キャップを施すことにより伝達熱を6割程度に抑えることができることが分かる。

5 地下タンクの解析に用いる熱伝達係数の検討

これまでの検討により、エア・バッグで養生したコンクリート表面と、コンクリート面から露出した鉄筋の熱伝達係数をそれぞれ推定したが、実際にLNG地下タンクの底版コンクリート第1リフトの温度応力解析を行う場合に、露出した鉄筋を1本ずつモデル化することは、モデル化の煩雑さや計算コストの点から考えて困難である。解析においては、養生面を個々の鉄筋の影響を含めた等価な熱伝達係数を持つ境界としてモデル化する方法が現実的である。

ここで、試験体全体でコンクリート養生面と鉄筋表面から大気へ伝達される熱量の和と、養生面の代表的な温度と外気温との差を用いて、試験体養生面全体での平均的な熱伝達係数を、等価熱伝達係数 α_{equiv} として、次式のように定義する。

$$\alpha_{equiv} = \frac{Q_c + Q_s}{A(\theta_p - \theta_a)} \quad (14)$$

ここに、 A は養生面の面積である。また、 θ_p は試験体養生面を代表する温度で、ここでは鉄筋の

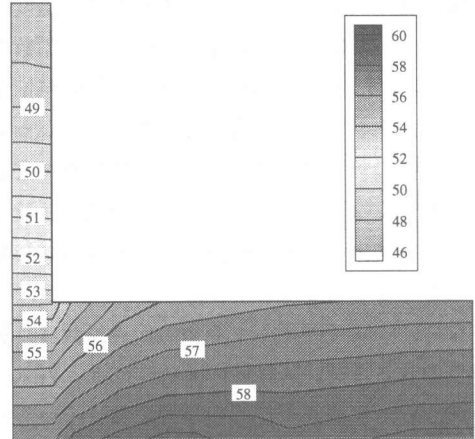


図-7 試験体内部温度分布
(エア・バッグ6枚、保温キャップなし)

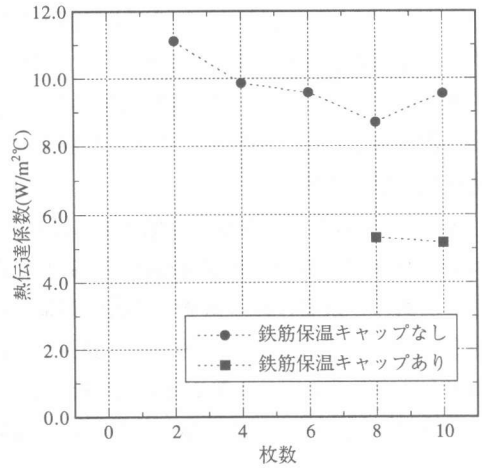


図-8 鉄筋の熱伝達係数推定値

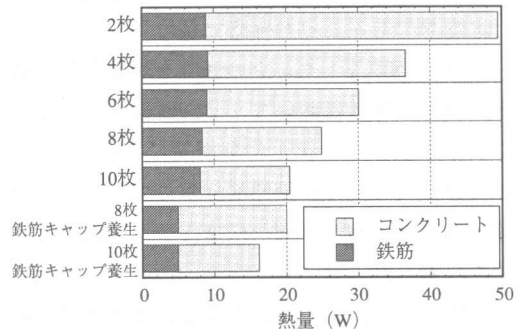


図-9 境界からの熱流出量推定結果

影響を受けにくい図-4に示すP点の節点温度とした。式(14)により評価した等価熱伝達係数を図-10に示す。鉄筋の影響を考慮した等価熱伝達係数は、鉄筋がない場合に比べて大きくなっており、特にその差はエアバッグの枚数が増えるほど大きくなっている。エア・バッグの枚数が多いほど露出したせん断鉄筋からの放熱の影響が大きくなることが分かる。

なお、ここで評価した等価熱伝達係数は、試験体の大きさや、実験時の試験体底面と外気の温度といった境界条件等の影響を受けているものと考えられる。実際の設計に適用するためには、更に詳細な検討が必要であると考えられる。

6. おわりに

LNG地下タンク底版コンクリートの施工時に用いる保温養生材の性能を把握すること目的に、底版コンクリートを想定した試験体を用いて温度計測試験を行い、逆解析により保温養生面の熱伝達係数を評価した。

まず、鉄筋のない試験体の実験結果に基づき、エア・バッグの枚数と熱伝達係数の関係を把握した。次に、鉄筋のある試験体の実験結果に基づき、底版第1リフトのコンクリート表面から露出するせん断鉄筋部分の熱伝達係数を推定した。その結果、鉄筋のある試験体の鉄筋部にも保温キャップを付けて保温養生することにより、鉄筋部の熱伝達係数が半分程度に小さくなり、伝達熱量も6割程度に減少し、保温効果を高めることに有効であることが確認できた。

また、LNG地下タンクの底版を対象とした温度ひび割れ解析において、せん断鉄筋が露出した養生面境界のモデル化を簡易にするために、熱伝達係数にせん断鉄筋部分から大気への熱伝達の影響を含めた等価熱伝達係数を評価する方法を提案した。

今後は、本評価方法による等価熱伝達係数の適用性に関する検討を行い、実際のLNG地下タンク底版コンクリートの温度応力解析に役立つ予定である。

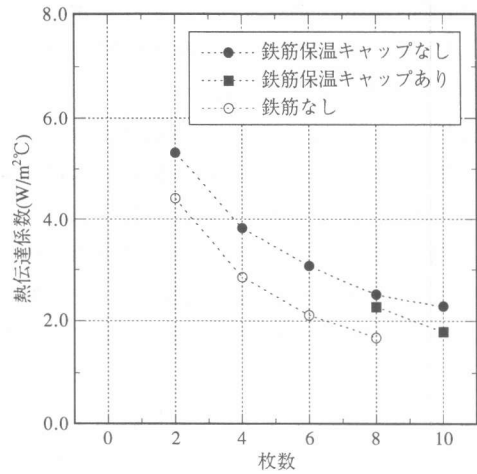


図-10 等価熱伝達係数推定値

参考文献

- 1) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1985
- 2) 山川秀次, 田辺忠顕, 笠原清: 熱伝達率の試験ならびに実測例, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp19-26, 1982.8.
- 3) 近久博志ほか: 逆解析手法によるマスコンクリートの熱伝達係数の評価, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp39-47, 1992.
- 4) 新美勝之, 鈴木誠, 上田稔, 佐藤正俊: 熱伝導問題における非正常境界条件の逐次推定, 土木学会応用力学論文集, Vol.1, pp83-90, 1998.
- 5) 新美勝之, 鈴木誠, 上田稔, 佐藤正俊: 拡張カルマンフィルタを用いた熱伝達係数と日射吸収率の逆解析-実測結果に基づく推定-, 土木学会第53回年次学術講演会, V, pp.736-737, 1998.
- 6) コンクリート標準示方書[施工編], 土木学会, 1996.
- 7) 国立天文台編: 理科年表, 丸善, 1998.
- 8) Harvey A. C., 国友直人・山本拓訳: 時系列モデル入門, 東京大学出版会, 1985.
- 9) 片山徹: 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, 1983.