

第 13 回気象文化大賞 研究成果報告書

貴財団から助成いただきました「確率論的リアルタイム高潮・高波予測モデル構築のための基礎研究」について、以下の通り、研究成果を報告いたします。

【課題名】 確率論的リアルタイム高潮・高波予測モデル構築のための基礎研究

【研究代表者】 福谷 陽（関東学院大学）

1. 研究背景・目的

本研究では、高潮・高波の数値予測モデルによる解析結果等を教師データとして、ニューラルネットワークを中心とした機械学習の技術を用いた予測モデルを開発し、気象庁メソアンサンブル数値予報モデル等の予報データと組み合わせることで、確率論的リアルタイム高潮・高波予測モデルを構築するための基礎的研究を実施する。今後、研究成果を基に、予報業務許可を取得したコミュニティ FM と連携し、高潮・高波の即時予測情報を、市区レベルの不特定多数の沿岸部の地域住民、労働者向けに発信し、研究成果を具体的な気象防災（沿岸防災）に役立てることを目指す。

2. 研究手法、および、結果

2.1 台風データの抽出および作成

本研究では、横浜市沿岸部を対象とするため、気象庁ベストトラック（1952 年～2022 年）を用いて、横浜市沿岸部東西 3 度、南北 1 度の枠内に接近した台風を抽出した。該当する台風の個数は 35 個であった（図 1 参照）。また、今後の気候変動による台風の強大化に対応するため、気候変動による緯度毎の気圧低下予測の研究結果（Mori, 2012）を基に、緯度 3 度毎に標準偏差 σ を決め、過去の台風の中心気圧から 1σ 低下、および、 2σ 低下させた台風データを同時に作成した。その際、台風の最大風速半径は、中心気圧に対する台風半径の出現確率分布（安田ら, 2010）を基に、作成した台風の中心気圧に対する確率分布の最頻値をとって最大風速半径を決定した。以上により、全 105 ケースの台風データを作成した。

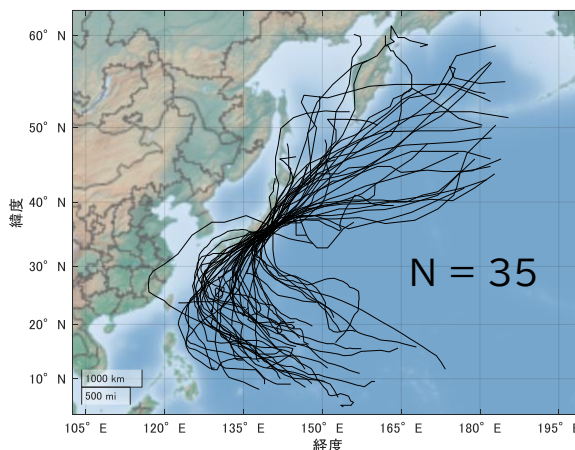


図 1 解析に使用した台風データの経路

2.2 高潮・高波の数値解析

1.で生成した台風の経路情報、中心気圧、最大風速半径、速度等の情報を用いて、以下の高潮・高波の支配方程式により対象地域周辺海域での高潮・高波の数値解析を行った。まず、式(1)-(3)に高潮の支配方程式を示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_o}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_o}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

ここで、式(1)は連続式、式(2)および(3)は運動方程式である。また、 η ：静水面からの海面上昇量、 M ：x軸方向の流量フラックス（海面から海底までの流速の積分量）、 N ：y軸方向の流量フラックス（海面から海底までの流速の積分量）、 D ：海面から海底までの水深、 f ：コリオリ係数、 p_o ：海面での大気圧、 ρ_w ：海水密度、 τ_{sx}, τ_{sy} ：海面せん断応力（風が海面に及ぼす接線応力）、 τ_{bx}, τ_{by} ：海底面せん断応力（海底からの摩擦力）、 A_h ：水平渦動粘性係数、 S_{xx}, S_{yy} ：ラディエーション応力テンソル、である。次に、式(4)-(5)に高波の支配方程式を示す。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial C_x E}{\partial x} + \frac{\partial C_y E}{\partial y} + \frac{\partial C_\theta E}{\partial \theta} = S_{net} \quad (4)$$

$$S_{net} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{btm} \quad (5)$$

ここで、 $E(f, \theta)$ ：波浪2次元スペクトル、 $C_x(f), C_y(f)$ ：各空間での群速度（波エネルギーの進む速さ）、 S_{net} ：波浪スペクトルに対するエネルギーの入出力を表現する外力関数、 S_{in} ：エネルギー入力（風による風浪の発生・発達）、 S_{nl} ：非線形エネルギー輸送（波と波の相互作用、3波・4波共鳴） S_{ds} ：エネルギー散逸（逆風や砕波による波浪の減衰）、 S_{btm} ：海底摩擦、である。式(4)で解析した $E(f, \theta)$ に対して、式(6)を計算することで、有義波高 $H_{1/3}$ が計算できる。

$$H_{\frac{1}{3}} = 4.0 \sqrt{\iint E(f, \theta) df d\theta} \quad (6)$$

式(1)-(5)の支配方程式は、図2の通り、太平洋の外洋を十分に含む第1領域から対象地域である横浜市沿岸部の第6領域（7290m - 2430m - 810m - 270m - 90m - 30m）まで6段階にネスティングして差分法により解析を実行した。解析コードとして、金ら(2008)による高潮・波浪結合モデル SuWAT (A coupled model of Surge, WAve and Tide)を用いた。このモデルは TU Delft (Delft University of Technology)が開発した波浪モデル SWAN と高潮を解法する浅水理論式を結合させたモデルである。表1に高潮数値解析、表2に高波数値解析の基本設定を示す。

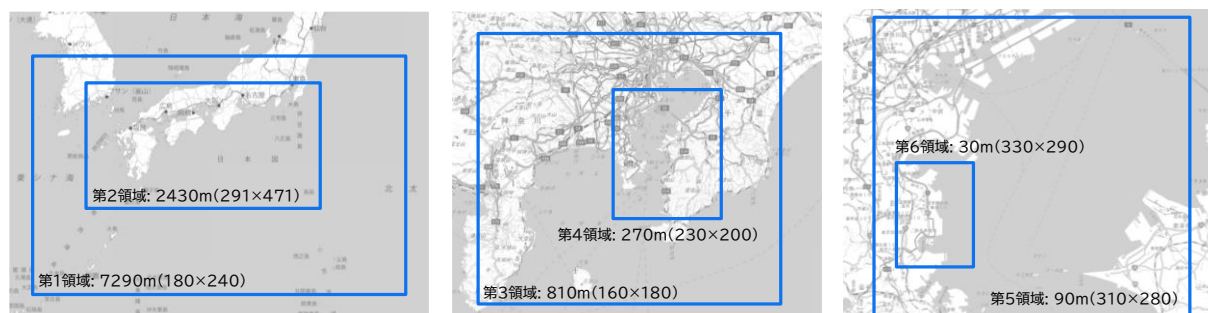


図 2 数値解析における第 1 領域から第 6 領域の計算領域

表 1 高潮数値解析の基本設定

計算領域	6 領域 (7290m-2430m-810m-270m-90m-30m)
計算時間	2019 年 9 月 8 日 9 時～9 月 9 日 15 時 (助走期間 : 4 日)
初期潮位	T.P. +0.5 m (一定値)
計算時間間隔	0.5 s
風・気圧場 推算式	気圧場 : Myers の式 風場 : 超傾度風 (Super Gradient Wind) Mitsuyasu-Fujii 式考慮
最大風速半径 推算式	高木ら(2015)の式
風速低減係数	C1=C2=0.7

表 2 高波数値解析 (SWAN) の基本設定

波浪推算モデル Version	SWAN 40.41AB
方向スペクトル分割数	72 分割
周波数スペクトル分割数	24 分割
周波数帯域	0.05-1.00 Hz
波浪発達項	第 3 世代 Janssen(1999)、波浪依存の抗力係数

2.3 ニューラルネットワークの構築

今回は研究期間の制約上、横浜市沖合の 1 地点を対象に、東西風速、南北風速、海面気圧の 3 要素の入力値に対して、数値解析結果である有義波高を出力値としたニューラルネットワークを構築した。時系列の全データ（18,160 組）を訓練：検証 = 5:1 の比に分割し、中間層数、各層のユニット数の変化、Dropout の導入などのネットワークモデルのケースを複数試行した。結果、中間層 2 層、ユニット数 10 および 50 のニューラルネットワークが訓練と検証の RMSE が最小となったため、このモデルを最適モデルとした（図 3 参照）。

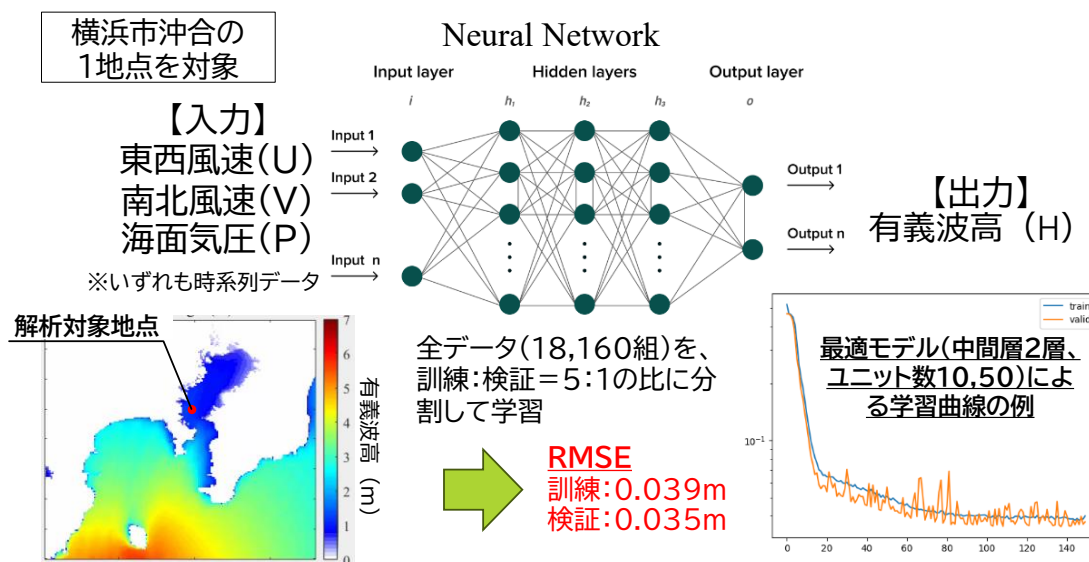


図 3 ニューラルネットワークモデル構築の概念図

3. 確率論的リアルタイム波高予測 -2019 年台風 15 号を事例として-

2.で構築したニューラルネットワークを用いて、2019 年台風 15 号を事例とした確率論的リアルタイム波高予測を試行する。

まず、入力データとして気象庁 MEPS (Meso-scale ensemble prediction system:メソアンサンブル予報システム)による予報データを用いた。MEPS は令和元年 6 月 27 日に運用が開催されたアンサンブル予報である（気象庁,2019）。アンサンブル予報とは、初期値作成、時間積分などにおいて生じ得る誤差の要因に対応するわずかな摂動を加えた複数の予測（アンサンブルメンバー）により予測の不確実性を評価する手法であり、これを利用して、2019 年台風 15 号時の高波に対する確率論的予測を実施する。MEPS による予測データは、メンバー数 21、水平格子間隔 5 km、予報時間 39 時間、予報頻度：4 回／日である。

図 4 に、横浜市沿岸部の一地点を対象に、MEPS の東西風速、南北風速、海面気圧の 3 要素を入力値として、ニューラルネットワークにより予測した結果を示す。MEPS の初期値は 2019 年 9 月 8 日 18 時とした。各図は横軸が予報時間、縦軸が各物理量に対応している。また、予測線が複数あるのは、21 個のアンサンブルメンバーに対応している。本研究の対象地点である横浜市沿岸部では、9 月 9 日 3 時頃に、約 3m を超える高波により沿岸部に浸水が発生してい

たとえられている。9月8日18時を初期値とした9時間先の予測結果（Forecast time=9）を見ると、この時点で最大値3.4mであり、また、21メンバー中、3メンバーは、3mを超える予測結果となっていることが分かる。

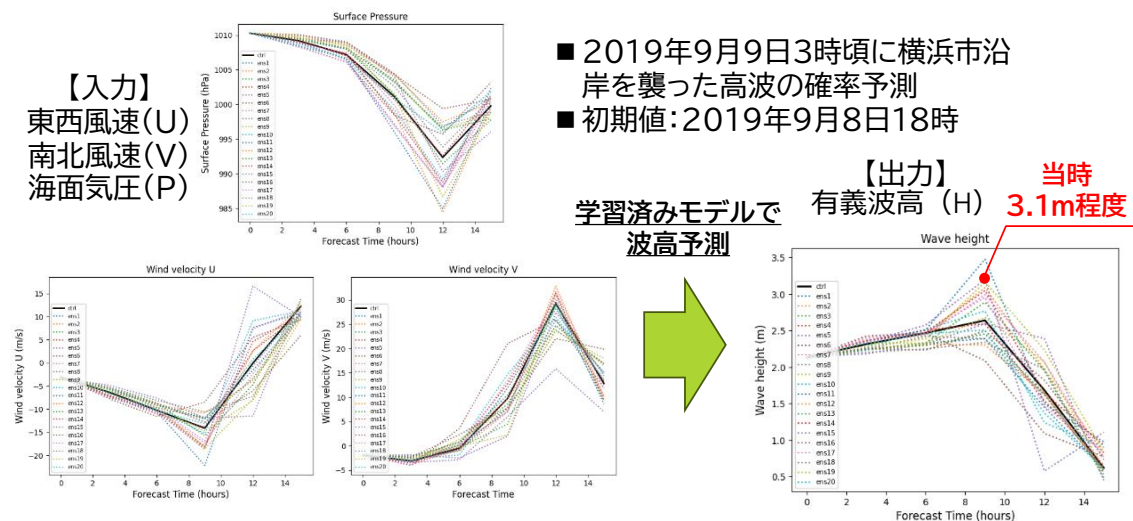


図4 MEPSの予測データ（左図）と学習済みニューラルネットワークによる予測結果（右図）

表3に各初期値、各予報時間での高波の波高と、それらの0.5m、1m、2m、3mを超える波高の超過確率を予測した結果を示す。上段の2019年9月8日9時を初期値として予測した結果では、9月9日0時に3mを超える波高が全メンバー中、約14.3%あることを示している。中段の2019年9月8日15時を初期値として予測した結果では、9月9日0時に3mを超える波高が9.52%あることを示している。下段の2019年9月8日21時を初期値として予測した結果では、9月9日0時に3mを超える波高が100%などであることを示している。

表3 MEPSの各初期値での予測結果。（上段）2019年9月8日9時初期値、（中段）2019年9月8日15時初期値、（下段）2019年9月8日21時初期値

【MEPS初期値】2019年9月8日9時

予報時刻	各アンサンブルメンバーの波高(m)																					各波高の超過確率			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	3m超	2m超	1m超	0.5m超
9月8日9時	1.75	1.75	1.75	1.74	1.76	1.74	1.76	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.76	1.74	1.75	1.75	1.74	1.74	1.76	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%
9月8日12時	1.84	1.83	1.84	1.90	1.79	1.89	1.78	1.89	1.78	1.86	1.83	1.88	1.78	1.80	1.87	1.75	1.92	1.87	1.80	1.92	1.81	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%
9月8日15時	1.86	1.93	1.88	1.92	1.89	2.05	1.72	1.90	1.88	1.90	1.88	2.02	1.75	1.89	1.84	1.79	1.99	1.99	1.81	1.91	1.89	0.00%	9.52%	100.00%	100.00%
9月8日18時	1.95	2.02	1.98	1.98	1.94	2.22	1.88	2.01	1.95	2.02	2.05	2.13	1.94	2.06	1.95	1.88	2.08	2.15	1.91	2.01	1.92	0.00%	47.62%	100.00%	100.00%
9月8日21時	2.21	2.29	2.12	2.29	2.12	2.47	2.00	2.20	2.16	2.32	2.09	2.27	2.16	2.15	2.22	2.16	2.24	2.27	2.10	2.33	2.12	0.00%	95.24%	100.00%	100.00%
9月9日0時	2.74	2.97	2.37	3.03	2.25	2.98	2.31	2.46	2.87	3.32	2.31	2.64	2.85	2.57	2.94	2.63	2.76	3.00	2.38	2.80	2.42	14.29%	100.00%	100.00%	100.00%

【MEPS初期値】2019年9月8日15時

予報時刻	各アンサンブルメンバーの波高(m)																					各波高の超過確率			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	3m超	2m超	1m超	0.5m超
9月8日15時	1.87	1.89	1.85	1.87	1.87	1.88	1.86	1.88	1.87	1.87	1.86	1.88	1.88	1.86	1.85	1.89	1.88	1.86	1.88	1.86	1.86	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%
9月8日18時	2.10	2.04	2.17	2.03	2.17	1.98	2.23	2.19	2.01	2.14	2.06	2.19	2.03	2.05	2.16	2.12	2.08	2.19	2.02	2.08	2.12	0.00%	95.24%	100.00%	100.00%
9月8日21時	2.36	2.27	2.34	2.25	2.41	2.19	2.42	2.35	2.20	2.29	2.38	2.39	2.26	2.24	2.37	2.43	2.22	2.35	2.32	2.31	2.36	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
9月9日0時	2.62	2.42	2.94	2.74	2.63	2.48	2.36	2.94	2.34	2.63	2.76	3.15	2.34	2.45	2.96	3.01	2.48	2.86	2.45	2.97	2.60	9.52%	100.00%	100.00%	100.00%
9月9日3時	1.86	1.90	1.96	2.28	1.69	2.81	1.35	1.51	2.32	2.40	1.33	1.57	2.07	2.06	1.68	0.68	2.17	2.15	1.88	2.64	1.71	0.00%	42.86%	95.24%	100.00%
9月9日6時	0.68	0.79	0.69	0.66	0.77	0.64	0.87	0.72	0.77	0.88	0.75	0.82	0.80	0.80	0.83	0.92	1.12	0.76	0.68	0.64	0.76	0.00%	0.00%	4.76%	100.00%

【MEPS初期値】2019年9月8日21時

予報時刻	各アンサンブルメンバーの波高(m)																					各波高の超過確率			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	3m超	2m超	1m超	0.5m超
9月8日21時	2.67	2.67	2.68	2.69	2.66	2.70	2.64	2.69	2.66	2.69	2.66	2.71	2.64	2.72	2.63	2.72	2.63	2.63	2.72	2.65	2.70	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
9月9日0時	3.04	3.05	3.03	3.04	3.04	3.04	3.04	3.04	3.05	3.03	3.05	3.03	3.05	3.03	3.05	3.04	3.05	3.05	3.03	3.04	3.04	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
9月9日3時	1.17	1.21	1.76	1.58	1.15	1.03	1.70	1.71	1.00	1.74	1.04	2.09	0.86	2.05	0.87	2.18	0.75	0.72	2.21	1.00	1.83	0.00%	19.05%	80.95%	100.00%
9月9日6時	1.11	1.24	1.12	1.05	1.17	1.09	0.99	1.13	1.05	1.04	1.15	1.06	1.18	1.07	1.16	1.09	1.17	1.17	1.01	1.14	1.01	0.00%	0.00%	95.24%	100.00%
9月9日9時	1.32	1.46	1.37	1.32	1.41	1.34	1.33	1.35	1.38	1.37	1.44	1.37	1.47	1.39	1.48	1.42	1.43	1.41	1.40	1.38	1.32	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%
9月9日12時	1.65	1.71	1.57	1.58	1.68	1.66	1.56	1.60	1.65	1.65	1.67	1.65	1.64	1.57	1.68	1.66	1.63	1.67	1.61	1.66	1.62	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%

このように、現在の決定論的な予測結果の公表ではなく、確率論的な予測結果をリアルタイムに公表することで、決定論的予測結果よりも危険側の数値を随時、確率論的に確認することが可能となり、情報の受け手側が実施する災害対策の幅を広げることが期待できる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、高潮・高波の数値解析結果を教師データとして、ニューラルネットワークによる波高予測モデルを開発し、MEPSの予報データと組み合わせることで、確率論的リアルタイム高潮・高波予測モデルを構築した。構築したモデルを用いて、2019年台風15号を事例とした波高予測を試行したところ、MEPSの各初期値に対して、予報時間毎に、波高を確率論的に予測することが可能であることを示した。本研究で開発したモデルを用いれば、現在確定的にしか発表されていない高潮・高波の予測情報を、例えば「ある時間帯にある地域で〇〇m以上の高潮・高波となる確率〇〇%」などの確率的な表現で発表することが可能となる。これらの確率論に基づく高潮・高波の即時予測情報は、今後、予報業務許可を取得したコミュニティFMを通して、沿岸部の地域住民や工業団地の労働者向けに発信することを目指している。当地域の沿岸の住民は2019年台風15号襲来時に被災していることから、基本的な防災意識が高く、地域に根差したきめ細やかな防災情報を提供すれば、防災上の効果は高いと考えられる。

今後の技術的な課題としては、ニューラルネットワーク構造の高度化（e.g., d4pdfやd2pdf等の気候モデルの予測データの利用、時系列データを考慮できるLong Short-Term Memory (LSTM)の導入、Bayesian Neural Network (BNN)の導入）、2次元波高分布/浸水分布の予測、より詳細なメッシュ格子（5mメッシュ、1mメッシュ）での予測と不確実性評価などが挙げられる。

5. 謝辞

本研究は、一般財団法人WN I 気象文化創造センターからの助成により実施させていただきました。改めて、ここに御礼申し上げます。

6. 参考文献

- Mori, N. (2012) Projection of Future Tropical Cyclone Characteristics based on Statistical Model, Chapter 12, In: Cyclones: Formation, Triggers and Control Editors: K. Oouchi and H. Fudeyasu.
- 安田 誠宏, 林 祐太, 森 信人, 間瀬 肇 (2012) 地球温暖化による高潮・高波推算に対応可能な確率台風モデル, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 66 巻 1 号, pp.1241-1245.
- 金洙列, 安田誠宏, 間瀬肇 (2008) 潮汐・高潮・波浪結合モデルによる土佐湾異常高潮の追算, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.321-325, 2008.
- 気象庁予報部数値予報課 (2019) メソアンサンブル予報システム(MEPS) の予報特性等について、 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/koushu190620/shiryou2.pdf>

以 上