

閉鎖性水域内流動特性に及ぼす外力の時間変動性の効果

灘岡 和夫* ・ 八 木 宏**・日向 博文***
二 瓶 泰雄****・栗 原 礼*****

1. はじめに

沿岸域における汚染物質や温排水等の移流・拡散予測は、風応力の時空間的な一様性を仮定して行われることが多い。しかしながら、実現象としては、そのような一様性を仮定できる状況はきわめて限られており、特に、長期の移流・拡散予測を行う場合には、風応力の時空間的な非一様性が支配的な重要性を持つものと考えられる。これに対して、灘岡ら（1993）は、風系の時空間的な非一様性が閉鎖性水域内の流動特性に及ぼす影響を数値シミュレーション結果の解析により調べており、実際にそのような非一様性が水域内流動パターンを大きく特徴づけていることを明らかにするとともに、風による外力駆動メカニズムによる水域内流動・混合現象を明示的に扱う必要性を示す意味で、新たに“forced mixing”なる概念を提案している。

本研究はその続編と呼ぶべきもので、特に沿岸域の長期移流・拡散を考える際に重要となる残差流やラグランジュ拡散に着目し、変動風速の実測記録を外力として入力した数値実験結果から、風応力の時間変動特性が閉鎖性水域内の残差流やラグランジュ拡散に及ぼす影響について調べた。そして、その結果に基づいて、実際の数値シミュレーションにおいて重要になる、風応力の評価時間スケールについて検討した。

2. 数値シミュレーションの概要

(1) 計 算 方 法

本研究では、閉鎖性水域の残差流に対する風応力の時間変動特性の及ぼす影響を調べることが目的であることから、基礎方程式系としては、ここでは、この種の数値解析でよく用いられる水深平均された平面2次元NS方程式（いわゆる浅水流方程式）（1）、（2）と連続式（3）

を用いた。

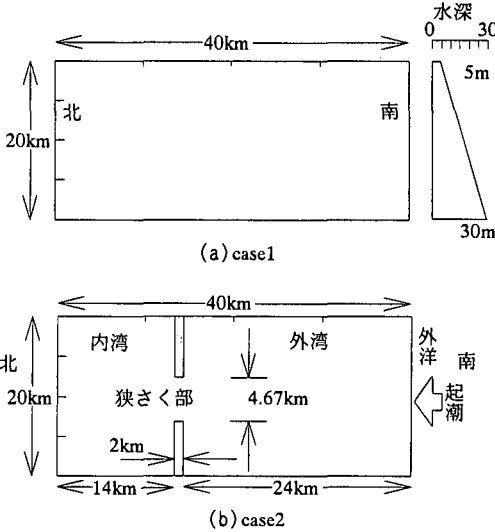
$$\frac{Du}{Dt} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{C_{fb} u \sqrt{u^2 + v^2}}{h + \eta} + \frac{C_{fs} u_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}}{s(h + \eta)} \dots (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{C_{fb} v \sqrt{u^2 + v^2}}{h + \eta} + \frac{C_{fs} v_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}}{s(h + \eta)} \dots (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[u(h + \eta)] + \frac{\partial}{\partial y}[v(h + \eta)] = 0 \dots (3)$$

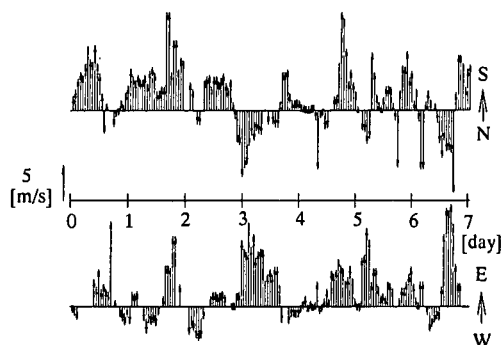
ここで、 u, v : x, y 方向速度、 η : 水位、 h : 水深、 g : 重力加速度、 f : コリオリパラメーター（ $=8.342 \times 10^{-5}$ (1/s)）、 A_H : 水平拡散係数（ $=9.25$ (m²/s)）、 C_{fb} : 底面摩擦係数（ $=1.0 \times 10^{-3}$ ）、 C_{fs} : 水面での摩擦係数（ $=3.130 \times 10^{-3}$ ）、 s : 水と大気の密度比（ $=10^3$ ）、 u_w, v_w : x, y 方向の風速、である。

上式の数値解法としては、case 1 に関しては ADI 法を、case 2 に関しては SOR 法を用いている。なお、SOR 法における移流項の差分スキームは、日向ら（1995）と同様に 3 次の風上差分を適用している。

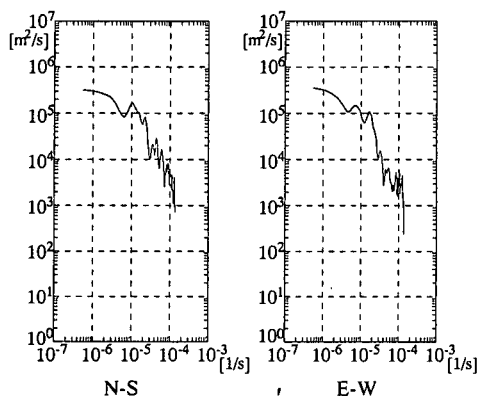


図一 数値解析の対象水域

* 正会員 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
** 正会員 博(工) 東京工業大学講師 工学部土木工学科
*** 正会員 工 修 東京工業大学助手 工学部土木工学科
**** 正会員 修(工) 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
***** 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻 修士課程



(a) 時系列データ



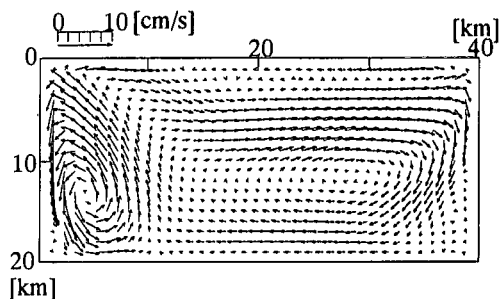
(b) 周波数スペクトル

図-2 本研究で対象とする風向・風速データ

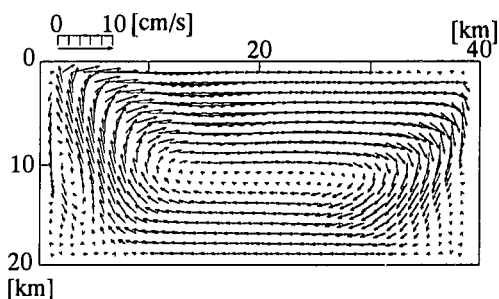
(2) 計算条件

本研究では、閉鎖性の強い湾スケールで見られる典型的な水域として、四方が閉境界で囲まれて、外力として風応力のみを受ける完全閉鎖水域(図-1(a), case 1)と、一端が外海に面していて、風応力のみならず、その境界を通して潮汐の影響を受ける水域(図-1(b), case 2), の2ケースに関して計算を行った。各々の計算領域は40 km (南北方向)×20 km (東西方向)であり、また、湾内での流動現象への支配要因の一つである狭さく部を、case 2において設置している。また、各ケースの水深分布に関しては、case 1では図中に示すように、平均水深17.5 m, 東西方向に 1.25×10^{-3} の一定勾配を持った分布を、case 2に関しては5 mの一様水深を与えている。

本計算で用いる風応力に関しては、実際に、1991年1月に東京湾のある地点において観測された1時間毎の風向、風速の時系列データに基づいて与えている。具体的には、その観測データを式(1), (2)の右辺第4項で表される風応力に変換し、それに対して2, 3, 4, 6, 8, 12, 24時間で移動平均をかけ、風応力の評価時間を変化させて計算を行った。図-2(a)には、本計算で用いた南北、東西方向の一週間にわたる風速の観測データを示し



(a) 1時間風の場合



(b) 24時間移動平均風の場合

図-3 残差流速ベクトル (case 1)

ている。また、図-2(a)のデータに対する周波数スペクトルを図-2(b)に示す。なお、開境界を有するcase 2に関しては、そこでの境界条件の設定の難しさから、ここでは、境界に対して垂直方向、すなわち南北方向のみに風応力を与えている。

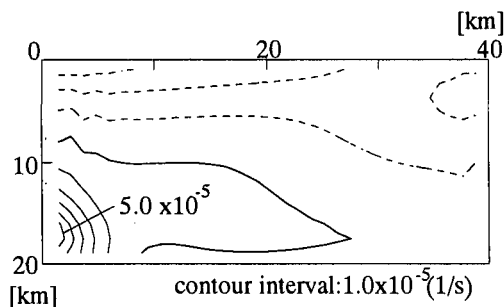
計算の境界条件としては、閉境界でno-slip壁面条件を、case 2の開境界においては潮汐を模擬して、水位に正弦振動(周期12時間)、流速に関しては開放条件を与えている。初期条件は静水状態とした。なお、本計算で用いた数値コードの妥当性は、予備的に行った、樋口・柳(1975)の湾口部を有する潮汐残差流の実験結果との比較により、確認されている。

3. 数値計算結果と考察

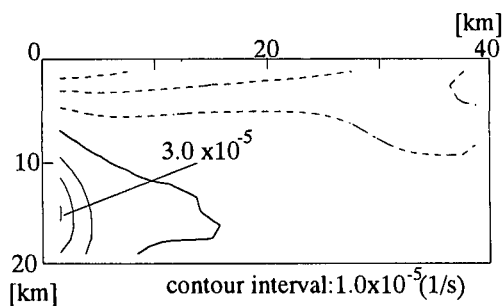
(1) 風応力のみを作用させた場合

(case 1の計算結果)

まず、風応力の時間変動特性が閉鎖性水域での流動現象に及ぼす基本的な影響を調べるために、1時間風(1時間毎の観測値に基づく風応力)を作用させた場合と24時間移動平均風(24時間にわたって移動平均された風応力)を作用させた場合の残差流速ベクトルを図-3に示す。ここでは、風の時間変動が顕著な、4日目からの風応力を作用させて、4日間の平均データとして示している。これらを見ると、24時間移動平均風の場合には、水域全般にわたって時計回りの大規模な循環流が存在して



(a) 1時間風

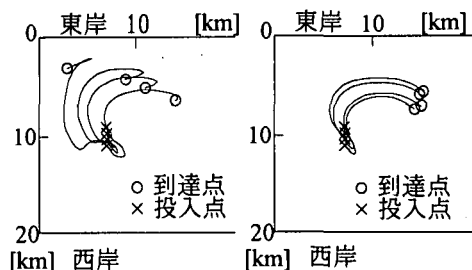


(b) 24時間移動平均風

図-4 case 1での1日平均の渦度コンター
(細実線：正、点線：負、太実線：0)

いる。これは、図-2(a)での南北方向風速の時系列データを見ると明らかなように、この4日間では、北風が卓越しているので、東西方向の水深変化に起因したトルクの効果により、このような循環流が形成されているものと考えられる。それに対して、1時間風の場合には、水域中央付近での時計回りの循環流のみならず、北岸近傍に反時計まわりの強い循環流が存在している。このような反時計回りの循環流は、24時間風の場合にも見られるものの、その大きさは1時間風の場合の方がかなり大きくなっている。

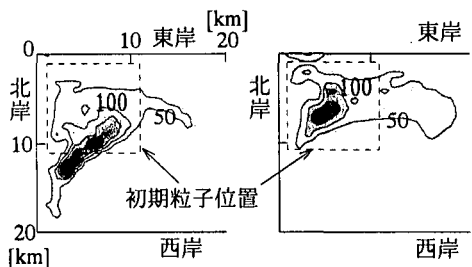
次に、このような循環流構造の違いを詳細に検討するために、計算開始後二日目における1日平均の渦度コンターを図-4に示す。これを見ると、1時間風の場合には、その日に卓越している北風の影響で負の渦度領域が支配しているものの、北岸付近には、それよりも大きな正の渦度領域も存在している。これは、前日の初期に吹いた南風により形成された正の渦度が、完全に消滅せずに残ったものであることが考えられる。それに対して、同じ日での24時間移動平均風の場合には、正の渦度領域は存在はするものの、その大きさは1時間風の場合と比べると小さく、全体的には、負の渦度領域が大部分をしめる結果となっている。これは、24時間風では、1時間風と異なり、計算開始一日目において顕著な南風が発生していないためであり、このような風応力の時間変動特



(a) 1時間風

(b) 24時間移動平均風

図-5 case 1での渦度のストレッチング項
(細実線：正、点線：負、太実線：0)



(a) 1時間風

(b) 24時間移動平均風

contour interval: 50[個/km²]

図-6 中立粒子の数密度コンター (case 1)

性の違いが流動パターンに多大な影響を及ぼしていることが分かる。

次に、移流混合特性を把握するために、計算領域に中立粒子を投入して、ラグランジュ的追跡を行うことを試みた。図-5は、計算開始時に中立粒子を投入し、4日間追跡した結果の軌跡を示したものである。24時間移動平均風の場合では、4つの中立粒子はほぼまとまって移動しているのに対して、1時間風の場合は広範囲に拡がっており、到達位置にも大きな違いがみられる。また、図-6は図中の点線で示される10 km²の領域に10,000個の中立粒子を計算開始時に投入し、その計算開始4日後の中立粒子の数密度コンターである。1時間風の場合には、西岸方向に中立粒子の多くが移動しているのに対して、

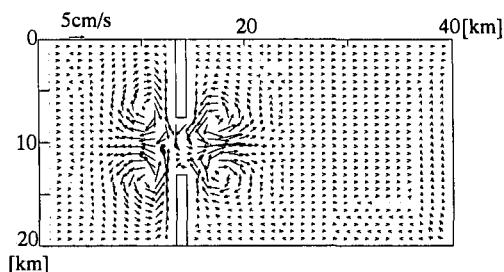


図-7 残差流ベクトル (case 2, 潮汐のみ)

24時間移動平均風の場合は、残差流のパターンと同様に、南岸方向へと移動している。このように、粒子のラグランジュ的挙動は二つの場合で大きく異なっており、風応力の評価時間の違いが移流混合特性にも大きな影響を及ぼしていることが明らかになった。

(2) 潮汐と風応力が共存する場合の計算結果 (case 2 の計算結果)

次に、潮汐現象と風速場が共存する場合において、風応力の時間変動性が海水流動特性に与える影響を調べるために行った、case 2 (図-1(b))に関する数値解析結果を示す。まず、潮汐のみを作用させた場合における残差

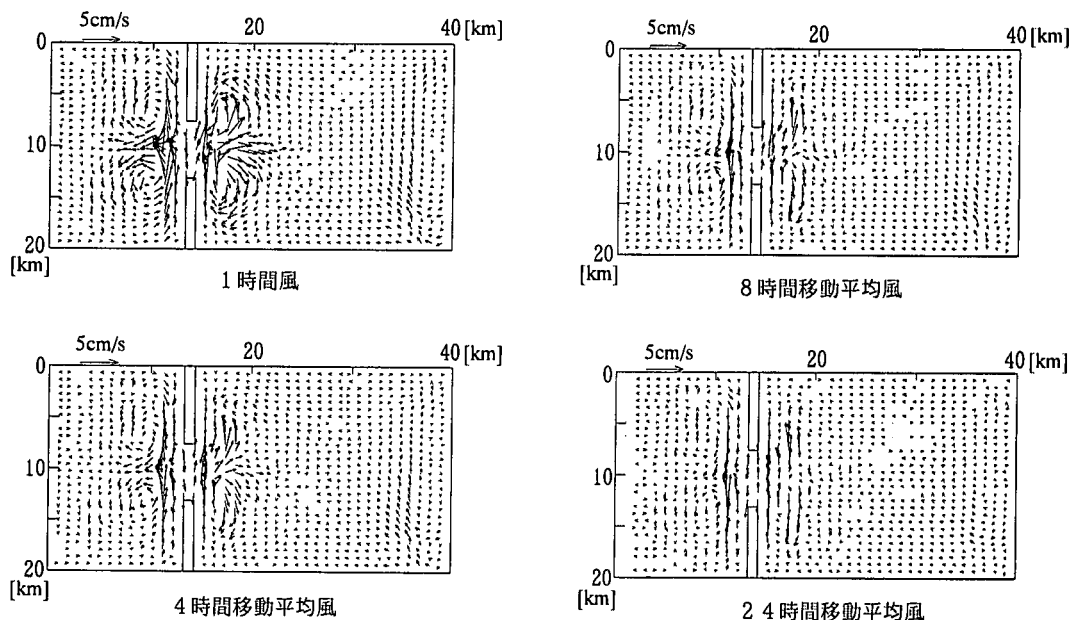


図-8 case 2 に関する計算結果 (一週間平均残差流)

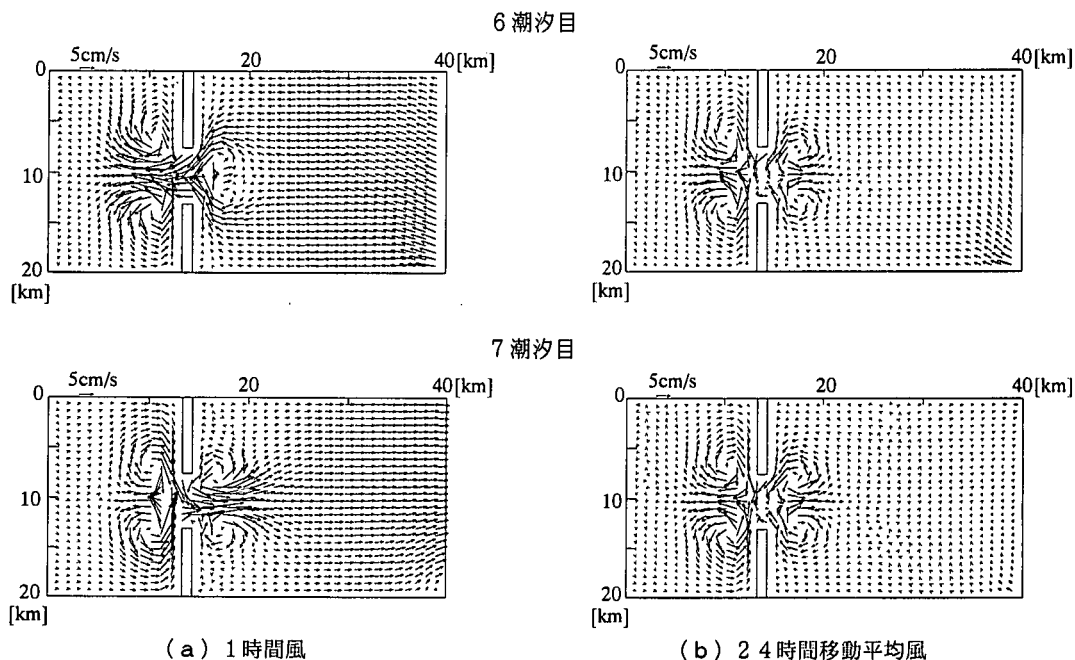


図-9 風応力の時間変動の違いに伴う流動パターンの変化 (一潮汐平均残差流)

流ベクトル図を図-7に示す。これを見ると、狭さく部周辺に正負の渦度を有した2組の大規模渦塊が存在しており、既存の研究(例えば、八木ら, 1995)でよく知られている流動パターンが現れていることが分かる。

次に、風応力の移動平均時間の違いの影響を見るために、移動平均時間を1(観測データ)、4, 8, 24時間の場合における、流速を一週間平均した残差流速ベクトルを図-8に示す。ここでは、潮汐のみを作用させた場合と明確な比較を行うために、各計算結果から潮汐のみの計算結果(図-7)を差し引いたものを図に示している。まず、1時間風の場合における計算結果を見てみると、潮汐のみのケースに形成される2組の大規模渦塊を強めるような向きの循環流構造が形成されていることが分かる。そして、4時間移動平均風の場合では、1時間風の場合と比べて、狭さく部での流速は若干小さくなり、そこで形成される大規模渦塊のサイズも減少している。このような傾向は、移動平均時間を増加させるとともに顕著になり、24時間移動平均風を作用させた場合には、潮汐のみの計算結果とほとんど差がなく、1時間風の場合とは大きく異なる結果が得られていることがわかる。以上のことから、このようなシンプルな計算対象にも関わらず、風応力の時間変動特性が流動現象に与える影響は極めて大きいことがわかる。

次に、上で得られたような、風応力の時間変動特性の違いがもたらす海水流動パターンへの影響に関して検討するために、1時間風の場合と24時間移動平均風の場合の計算結果について、一潮汐ごとの平均流速ベクトルを比較してみた。そこでは、当然のことながら、風応力が小さい期間では、両者の違いはほとんど見られないものの、その大きさの増加とともに、幾つかの顕著な違いが見受けられる。図-9は、その一例として、計算開始から6潮汐目と7潮汐目における各潮汐毎に平均された流速ベクトルを示したものである。これらを見ると明らかに、24時間移動平均風の場合には、両潮汐において、狭さく部近傍に2組の渦塊が現れる、という上述した一般的な流動パターンが形成されているのに対して、1時間風の場合には、狭さく部での大規模渦は明確に現れず、一方向の卓越した流れが生じていることが分かる。また、6潮汐目と7潮汐目を比較すると、流れの卓越方向が逆になっている、という大きな特徴も確認できる。

では、なぜこのように風応力の時間変動性を変化させると、流動パターンに顕著な違いが現れるのだろうか? このことを解明するために、ここで、風速の時系列データと潮汐の位相関係を示した図-10を見てみると、6潮汐目においては、干潮から上げ潮最大時において、その潮流と同じ向きに風が吹いていることから、風によって流れが増強される位相関係にあることが分かる。これに

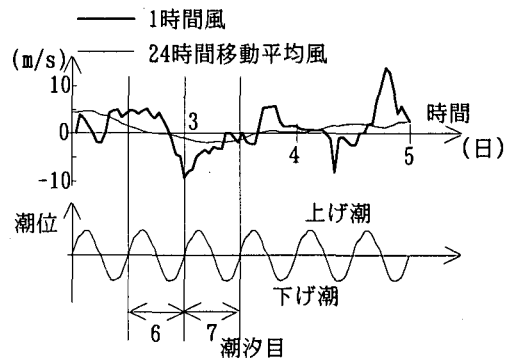


図-10 潮汐と風データの位相関係

対して、7潮汐目において、6潮汐目と異なって南向きに卓越した流れが生じているのは、6潮汐目での南風により顕著な setup が生じ、それが7潮汐目において風向きが変化する際に setup が解放され、南向きの流速が形成されることによるものと考えられる。

これらのことから、潮汐が有意な大ききで存在する水域での海水流動に対する風応力の時間変動特性の効果は、潮汐との相対的な位相関係を介した形でかなり顕著に現れる場合があり、**位相情報を含む風速と潮汐の変動特性の相対関係**が、閉鎖性水域内での流動特性、ひいては物質の混合・拡散に大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった(なお、潮汐振幅に及ぼす風応力の影響に関しては、柳(1989)は現地データを用いてその重要性を指摘している)。

4. おわりに

今回の数値実験により、風応力の評価時間スケールのとり方によって、残差流や移流混合のシミュレーション結果が大きく異なること、そして、特に、対象とする領域のもつ応答時間スケールや潮汐位相との相対関係が重要となることが明らかになった。

参考文献

- 灘岡和夫・八木 宏・塚原隆夫 (1993): 風系の時空間的非一様性が閉鎖性水域内流動に及ぼす影響について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 231-235.
- 樋口明生・柳 哲雄 (1975): 潮汐残差流の基礎的研究, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 213-218.
- 日向博文・八木 宏・灘岡和夫 (1995): 地形変化を考慮した大規模湾口渦に関する数値計算, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1226-1230.
- 八木 宏・塚原隆夫・灘岡和夫 (1995): 底面境界層の力学特性を考慮した沿岸海水流動の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 426-430.
- 柳 哲雄 (1989): 沿岸海洋学—海の中でのものはどう動くか—, 恒星社厚生閣, pp. 84-85.