

波による延縄式養殖施設の動的応答に関する研究

松原雄平*・平尾章**・河原秀昭***・野田英明****

1. はじめに

わが国各地の内湾域で定着した各種の増・養殖事業は需給空間のひっ迫あるいは海域汚染の問題で、次第に沖合水域へと漁場を拡大しつつあり、すでに数例の養殖施設は沖合水域に設置されている。ここで対象とする延縄式養殖施設も、その一つであり、外海域にロープで係留され、貝類の養殖に使用されているものである。著者らは、すでにこの延縄式養殖施設の波による動的応答現象について、比較的簡単なモデルを用いて理論的ならびに実験的に検討を加えた^{1),2)}。本研究では、さらに現実的なモデルを用いて、その波浪応答現象に関して詳細に検討するとともに現地の海中養殖施設を利用したの動揺観測ならびに観測結果とシミュレーションのそれとの比較を行うものである。

2. 運動方程式の誘導

実際の延縄式養殖施設は、図-1 に模式的に示されるように養殖籠、ブイならびにこれを係留するメインロープ、さらにアンカーロープとから成っている。ここでは Nath ら³⁾、小田⁴⁾の用いた手法を参照しつつ以下の基礎仮定にもとづいてモデル化する。すなわち、

- (1) 施設は波向と平行に設置されており、籠、ロープの動揺は2次元平面内に限られるものとする。
- (2) 養殖籠ならびにブイは、各々単一の球要素で表わされ、これらを連結するロープに作用する波力も球要素

に作用する波力で代表される。

- (3) 係留ロープの伸縮は無視する。

- (4) 両端ブイの水平ならびに鉛直方向の変位は微小で、固定点とみなしうる。

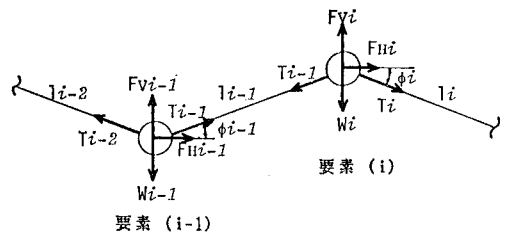


図-2 要素に作用する諸外力

図-2 は、メインロープ上の $(i-1)$ 番目の要素と i 番目の要素に作用する波力、ロープ張力ならびに重力を、 $x-y$ 座標系で示したものであり、 x 軸は水平岸向き、 y 軸は鉛直上向きを、それぞれ正としている。要素 i の座標を (x_i, y_i) で表わすと、 x および y 方向の運動方程式はそれぞれつぎのようになる。

$$m_i \ddot{x}_i = F_{Hi} + T_i \cos \phi_i - T_{i-1} \cos \phi_{i-1} \dots\dots(1)$$

$$m_i \ddot{y}_i = F_{Vi} - W_i + T_i \sin \phi_i - T_{i-1} \sin \phi_{i-1} \dots\dots(2)$$

ここに m_i および W_i は、それぞれ要素 i の質量および水中重量、 T_i および ϕ_i は要素間のロープ張力およびロープ角度である。 ϕ_i は、反時計回りを正とする。 F_{Hi} および F_{Vi} は、要素 i に作用する水平波力および鉛直波力を表わし、相対速度を考慮したモリソン式により次式のように表わされる。

$$F_{Hi} = C_M \rho_0 V_i \dot{u}_i - C_V \rho_0 V_i \dot{x}_i + (1/2) C_D \rho_0 S_{xi} |u_i - \dot{x}_i| (u_i - \dot{x}_i) \dots\dots(3)$$

$$F_{Vi} = C_M \rho_0 V_i \dot{w}_i - C_V \rho_0 V_i \dot{y}_i + (1/2) C_D \rho_0 S_{yi} |w_i - \dot{y}_i| (w_i - \dot{y}_i) \dots\dots(4)$$

ここに、 ρ_0 は水の密度、 V_i 、 S_{xi} および S_{yi} は、それぞれ要素 (i) の体積および x 方向ならびに y 方向への投影面積、 C_M 、 C_V および C_D は、それぞれ要素の慣性力係数、付加質量力係数ならびに抗力係数である。また u_i 、 w_i は、それぞれ微小振幅波理論で算定される要

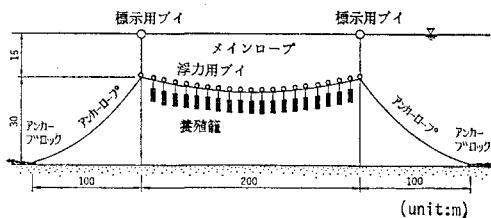


図-1 延縄式養殖施設

* 正 会 員 工 修 鳥取大学助手 工学部海洋土木工学科
 ** 正 会 員 工 修 鳥取県庁
 *** 学 生 会 員 鳥取大学大学院
 **** 正 会 員 工 博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科

素 i の位置における水平および鉛直方向の水粒子速度である。 $(i+1)$ 要素についても同様の式を導き、要素 i に関する式と連立させ T_{i+1} ならび T_i を消去すると要素 i および $i+1$ に対する運動方程式が導かれる。さらに仮定 (3) から要素間のロープの伸縮が無いとすると拘束条件式

$$(x_{i+1}-x_i)^2+(y_{i+1}-y_i)^2=l_i^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

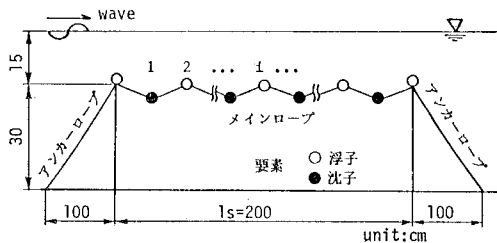
を得る。以上の運動方程式ならびに拘束条件式から各要素の変位量が算定される。各要素の変位量を数値計算で算定する際、運動方程式中の波力算定項および拘束条件式中に現われる 2 次の非線型項は、以下のように無次元化する。すなわち、要素 i の時刻 j における x 座標に関する非線型項 $(x_{i,j})^2$ を

$$(x_{i,j})^2 \simeq (x_{i,j})(x_{i,j-1}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

のように異なる時刻の項の積として与える。以上の線型化をすべての非線型項に対して行い、運動方程式中の時間微分項を前進差分で差分化し、連立一次方程式に変換して解くことにする。一方、岸側および沖側係留索張力は上記の方法によって算定されたメインロープ両端の要素に作用する波力ならびにメインロープ張力から算定される。なお、計算の初期条件は、各要素の初速度を 0 とし、初期変位は静的釣合い式から求めた値を用いる。

3. 実験装置および方法

計算結果の妥当性を検証するために波動水槽において模型実験を行なった。実験は、長さ 24 m、幅 0.6 m、深さ 1.1 m の片面ガラス張り鋼製水槽中に 1/100 縮尺の模型を係留し、その動揺量ならびに係留索張力を測定した。図—3 は、養殖施設模型の概容を示したものである。養殖施設模型は直径 1 mm のビニール被覆ワイヤを係留ロープとし、鉛製の沈子およびプラスチック製の浮子を、それぞれ養殖籠および浮力用ブイとしたものである。表—1 に、模型ロープ、浮子および沈子の特性を示す。養殖施設の動揺は、水槽外部からガラス壁を通してビデオカメラで撮影後、読み取った。アンカーロープ張力は防水ひずみゲージを貼付したアルミ板のたわみ量を検出することにより測定した。実験波の特性は、水深 h を 45 cm と一定にし波高 $H=1.42$ cm $\sim$ 6.70 cm、周期



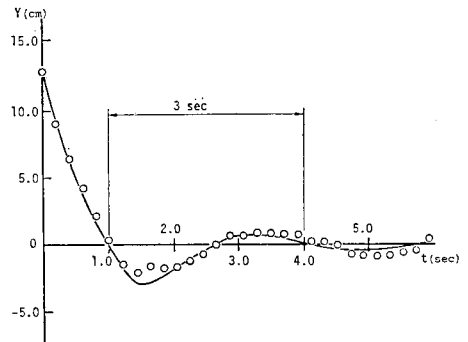
図—3 養殖施設模型

表—1 模型ロープ、浮子および沈子諸元

	浮子 A	浮子 B	沈子	ロープ (1 m 当り)
形状	球	球	球	
直径 (cm)	3.3	3.7	2.0	0.1
重量 (gf)	3.3	5.0	15.0	2.25
素材	プラスチック	プラスチック	鉛	ステンレスワイヤ

$T=0.86$ sec $\sim$ 2.28 sec の範囲に設定した。

4. 実験結果の考察および数値計算結果との比較

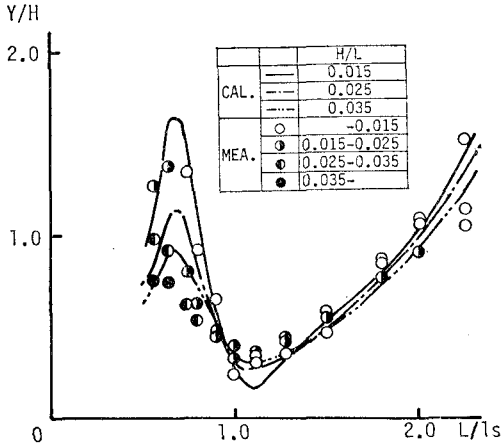


図—4 中央要素の減衰振動

図—4 は、静水中で中央要素に初期変位を与え、静かに離れた後の要素の変位量の時間変化を示したものである。これより、中央要素は、運動開始後、約 1.0 sec で中立位置に戻り、その後、約 3.0 sec の周期で減衰振動することがわかる。また同図中の実線は、 $C_D=0.5$ 、 $C_V=1.0$ と置いて算定した減衰振動の計算結果である。計算値と実測値は、ほぼ一致することがわかる。以下の、各要素の変位量や係留索張力の算定では、これらの値を用いることにする。

実験結果から、各要素の水平方向変位量は微小であったため、以下では鉛直方向の変位のみについて検討する。

図—5 は、中央要素の最大変位量を波高で無次元化し波長・メインロープスパン長比 L/l_s との関係を示したものである。これより鉛直変位量は L/l_s の増加とともに増大し、 $L/l_s=0.7$ 近傍で極大値を示すこと、さらに L/l_s が増大すると徐々に変位量が減少し $L/l_s=1.0$ 近傍で最小値となり、その後再び増大することがわかる。また、全般的に波形勾配が小さいほど、 Y/H は大きくなる傾向が認められるが、 $0.9 < L/l_s < 1.5$ の範囲では以上の関係が逆転している。一方、実線および鎖線で示された数値計算結果は実験値とほぼ一致していることがわかる。ここで特に興味深い点は、 L/l_s の変化とともに要

図-5 L/l_s と Y/H の関係

素の変位量が大きく変動することであり、特に中央要素の変位量が最大となる L/l_s の条件では、波高 H の約 1.5 倍にも達しており、表面波の変位量よりも大きい施設の動揺量が生じることである。

図-6 は、 $T=1.30$ sec, $H=4.50$ cm の波の条件に対して得られた要素 4, 10 および 16 の鉛直変位量の時間的変化を示したものである。黒丸印は要素の変位量、白丸印は各要素と同一地点における水面変動の実測値、実線および破線は、それぞれ要素ならびに水面変動量の計算値である。これより波の一周期における各要素の変位量と水面変動の位相差は場所的に異なること、各要素の波の一周期における変位量は必ずしも等しくないこと、および実測値と計算値を比較すると、その最大、最小値ならびに両者の位相はよく一致することなどがわかる。

図-7 は、図-6 と同じ条件の波に対して測定されたメインロープ上の各要素の鉛直変位量を波の一周期 T

について $T/6$ 時間毎に示したものである。図中、黒丸が各要素の変位量、実線および点線が、それぞれ要素および水表面の計算値を示している。この図で特徴的なことは、波の進行とともにロープ上の各要素も上下に動揺し、全体として波とほぼ同じ波長を有する波形を形成していることである。このとき表面波とメインロープ波形の位相は必ずしも一致しておらず、メインロープ波形が、表面波よりも、先行している。また、この場合でも、計算値と実測値とは、ほぼ一致していることがわかった。

図-8 の (a) および (b) は、異なる波の条件に対して得られたメインロープ上の各要素の変位量を波の一周期について $T/6$ 間隔に読み取ったものである。図中の丸印が実測値を表わし、破線が数値計算から算定された

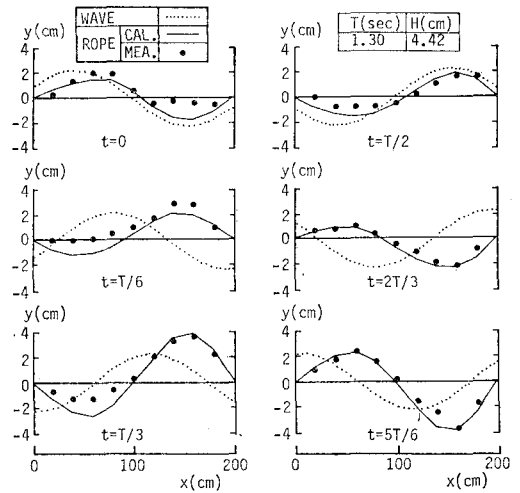


図-7 表面波とメインロープ波形

各要素の最大変位点の包絡線である。これらの図で注目すべき点としてメインロープ上の大部分の要素は波の一周期に鉛直方向に動揺するものの、その変動量は場所的に異なっており、変位量が、極めて小さくなる点、すなわち、メインロープ上の要素の動揺が節となる点が見られることである。図-8 (a) では、この節がメインロープ中央部に現われており、中央要素の変動は、波の一周期において微小となっている。一方 (b) では、(a) に比べて表面波の波長が短かいため、変位量が小さくなる点が 2 ヶ所存在することがわかる。このように波の条件の変化とともに要素の上下動の節の数ならびにその位置

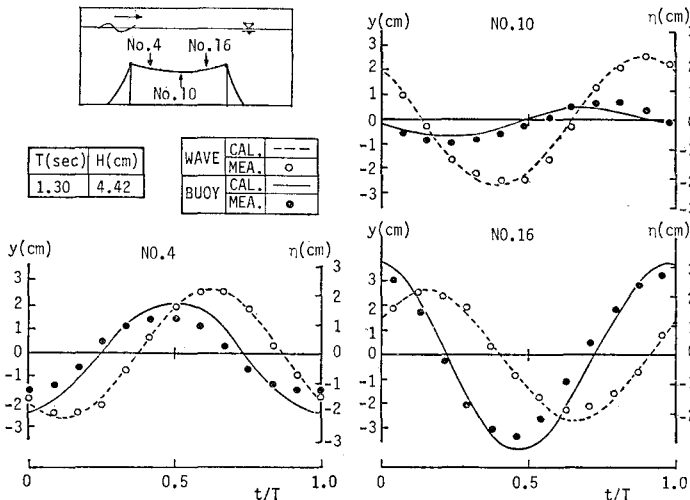


図-6 要素 4, 10 および 16 の鉛直変位量の時間的変化

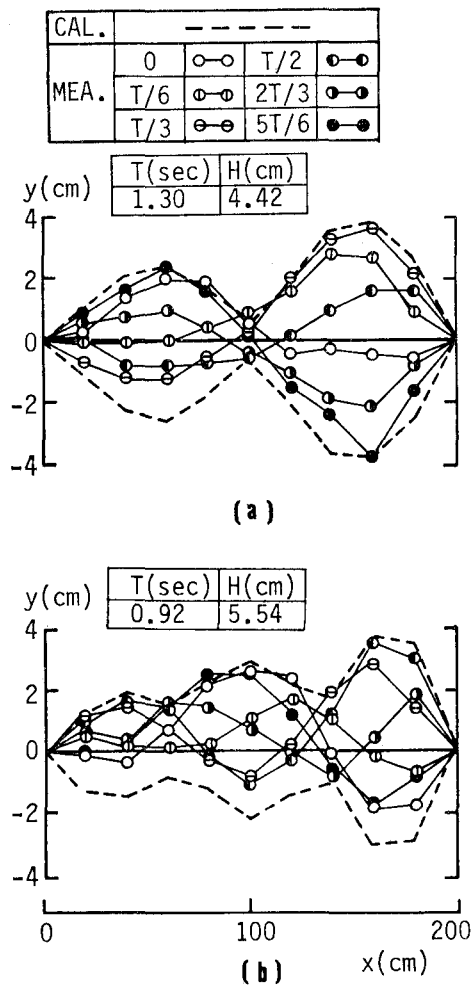


図-8 波の一周期における各要素の変位量の場所的変変化

も変化することが明らかとなった。以上のメインロープにある要素の振動特性を検討するとつぎのようである。すなわち中央に節が現われる 図-8 (a) の場合、 L/l_s の値は、ほぼ 1 に近く、一方、節が 2 点現われる 図-8 (b) では $L/l_s=0.65$ である。さらに節が 4 点生じるケースでは $L/l_s \approx 0.5$ となることがわかった。すなわち L/l_s と節の数 n との間に $L/l_s=2/(n+1)$ ($n=0, 1, 2, \dots$) の関係が成立することがわかった。特に上の条件が満たされる場合、図-8 (a) から明らかなようにメインロープが共振し、その形状は、両端固定弦の固有振動モードと一致していることがわかる。

図-9 は、波の一周期中の最大岸側索張力を初期張力で無次元化し、 L/l_s との関係をも H/L をパラメーターとして示したものである。図中の実線、一点および二点鎖線は数値計算結果を示したものである。この図より $L/l_s=0.5$ 付近で索張力は極大となり、 $0.7 < L/l_s < 1.1$ で索張力が減少すること、また H/L の増大とともに索張力も大きくなる。計算結果と実験結果を比較

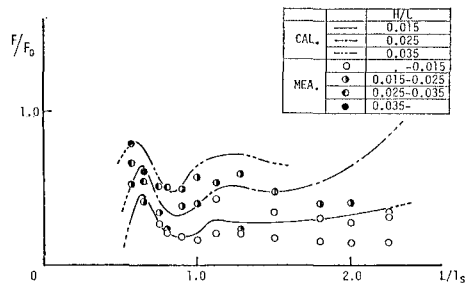
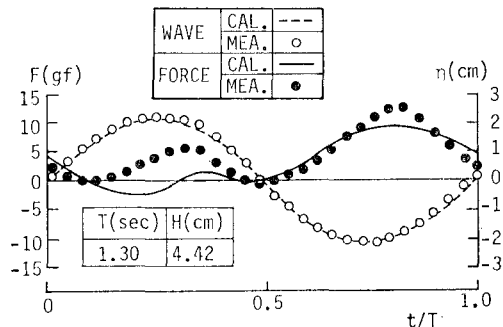
図-9 岸側索張力と L/l_s の関係

図-10 岸側索張力の時間的変化

すると、実験結果に若干のばらつきが認められるものの、ほぼ一致することがわかる。

図-10 は波の一周期における岸側索張力の時間的変化を示したもので、黒丸および白丸は、それぞれ索張力ならびに水面変動の実測値を示したもので、実線および点線が索張力ならびに水面変動の計算値を示している。これより係留索張力の時間的変化は、ほぼ正弦的であり、計算結果は実測値とほぼ一致することがわかる。

5. 施設の動揺に関する現地観測ならびにシミュレーション結果との比較

鳥取県沖合海域に敷設されているイタヤ貝養殖施設に加速度計を設置し動揺観測を行なった。この施設は、図-1 にも示したようにメインロープスパン長が 200 m、アンカロープ長が約 110 m である。メインロープ上には 5 m 間隔に長さ 2 m、直径 0.8 m の養殖籠が 2 連づつ浮力用のブイとともに吊り下げられている。敷設海域の水深は約 40 m であり、同海域の波向きの卓越方向と、メインロープの方向が、ほぼ等しくなるように設置されている。加速度測定装置は、加速度センサー、アンプ、タイマー、ペン書きオシログラフおよびバッテリーから成るものである。これらを耐圧・防水処理を施した鋼製函体 (65 cm×65 cm×25 cm) 中に収納し、アンカロープのほぼ中央部付近にロープで係留した。観測装置の設置水深は、約 17 m であった。動揺観測を、昭和 58 年 3 月 23 日～3 月 25 日および昭和 59 年 3 月 26 日～

3月29日の2回にわたって行なった。現地観測期間中の波浪記録は、運輸省第三港湾建設局により鳥取市賀露沖にて測定されたものを採用した。加速度観測では、2時間毎に5分間の観測値が得られるようにタイマーをセットした。また各時刻における加速度の観測値は代表値として最大加速度（鉛直上向き）、最小加速度（鉛直下向き）を用いて整理した。図-11は、昭和58年3月の観測結果を示したものである。図中の波高および周期は、各時刻における有義波波高および有義波周期である。この図より以下のことがわかる。

- (1) 3月23日は比較的静穏な海象条件であったため、養殖施設に大きな加速度は生じていない。
- (2) 3月24日、午前0時頃より波高・周期ともに急激な増大を示し同日午前6時～8時にかけて波浪は最も発達したことがわかる。これに伴って加速度の測定値も急激な増大を示しており、施設の動揺が顕著であったことを示している。
- (3) 3月25日の波浪記録は、有義波波高が徐々に減衰し、うねり性の波へと変化していることを示しているが、加速度記録も、同じ傾向にあることがわかる。

また図中の破線は、数値シミュレーションから得られた施設の最大および最小加速度の時間的変化を示したものである。なお、数値シミュレーションでは、現地の養殖籠を同じ質量を有する球に置き換えて動揺計算を行なっている。この図より、シミュレーション結果が実測値よりも過大に現われているものの両者の傾向はほぼ一致す

ることがわかる。この計算値と実測値の差異の原因は、養殖籠のモデル化や基礎仮定の妥当性などによると考えられるが、現地点では養殖施設の設置海域における正確な波浪、潮流等の測定が困難なため、いかなるシミュレーション手法を用いても完全に現地観測の結果と一致させることは困難と思われる。今後、ここで述べた手法をさらに展開させて、より広範な条件の波に対する波浪応答を推定する必要がある。

6. 結 語

本研究では延縄式養殖施設の波浪応答モデルを導き、その妥当性の検証を行なった。得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 養殖施設の動揺ならびに索張力の測定に関する模型実験を行い、数値計算結果と比較したところ、施設の動揺量ならびに係留索張力ともに計算結果と実験結果はよく一致することがわかった。特に施設の変動量は L/l_s と波形勾配 H/L によって決定され、 L/l_s が $2/(1+n)$ ($n=0, 1, 2, \dots$) のとき施設が共振することがわかった。
- (2) 日本海沖合域に設置されている延縄式養殖施設で動揺に関する現地観測を行い、数値シミュレーション結果と比較した。その結果、実測値と計算値に若干の差異は認められるものの、ほぼ両者の傾向は一致することがわかった。

最後に、現地観測において多大のご援助を賜った鳥取県水産試験場の諸氏に深謝の意を表するとともに、本研究は、文部省科学研究費奨励研究(A)による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 松原雄平・平尾 章・野田英明：波動下における海中養殖施設の動的応答に関する研究，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 420～424。
- 2) Matsubara, Y., H. Noda and A. Hirao: Dynamic response of the submerged buoy-cable system to ocean waves, 15th. Technical Report, Tottori Univ., pp. 93～101, 1984。
- 3) Thresher, R. W. and J. H. Nath: Anchor-last deployment simulation by lumped mass, Journal of Water Ways Harbours and Coastal Eng. Div. ASCE, 1975, pp. 419～433。
- 4) 小田一紀：浮遊構造物の諸問題，水工学に関する夏期研修会講義集，B-2-1～B-2-25, 1980。

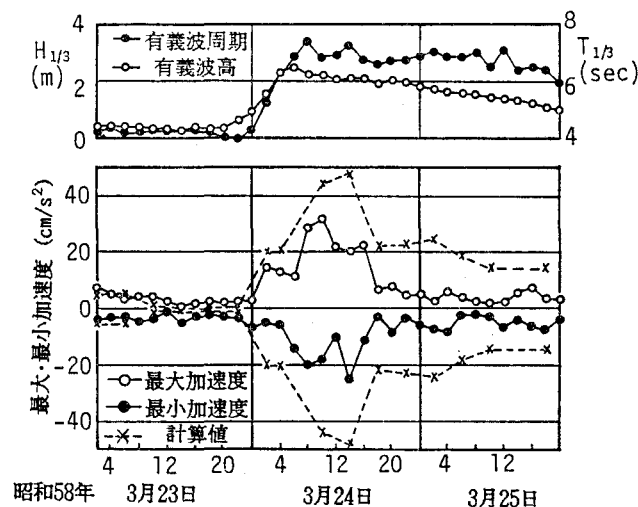


図-11 現地観測結果とシミュレーション結果の比較