

新 2 系ルールと新 3 系ルール

岡村 寛, 市野川 桃子, 上田 祐司, 亘 真吾, 境 磨

1. はじめに

漁業法改正により, 1 系資源は目標管理基準値を目指す管理方式に移行した. それに伴い, 2 系資源 (漁獲量と資源量指標値が有効だが, 個体群動態モデルがなく, 再生産関係を推定できない), 3 系資源 (漁獲量のみ有効で, 資源状態の情報を利用できない) についても, 目標値を設定し, それを目指した管理へ移行する. 2 系資源は, 漁獲量に加えて資源量指標値の時系列情報が利用可能なので, シミュレーションによって目標とする資源水準を決定することができる. 一方, 3 系資源は, 漁獲量のみ有効で資源量指標値が利用できないため, 大きな不確実性のもとで持続性を達成するためには漁獲量を大幅に抑制する必要があることになる (漁獲量の水準を低く抑えるようなルールとなる). そのため, 持続的かつ効率的な漁獲を行うためには, 資源量に関する情報を速やかに入手することが望ましい.

2. 2 系資源の新しい漁獲管理方策

2-1. 2 系資源の ABC 算定規則

2 系資源は, 漁獲量と資源量指標値 (CPUE) の時系列データから, 経験的な式を用いて ABC を計算するものである.

新ルールでは, ABC を,

$$ABC = \alpha_t \bar{C}_t = \exp [k_t (D_t - B_T)] \times \bar{C}_t$$

によって与える. ここで,

$$k_t = \begin{cases} \beta & D_t > B_L \\ \beta + \delta \exp [\lambda \log (AAV_t^2 + 1)] \frac{B_L - D_t}{D_t - B_B} & B_B < D_t \leq B_L \\ \infty & D_t \leq B_B \end{cases}$$

である (図 1). $\bar{C}_t$ は現在 (t 年) から過去 n 年間の漁獲量の平均値, D_t は現在の資源水準であり, 過去の CPUE に累積正規分布

$$D_t = \int_{-\infty}^{CPUE_t} \phi \left[\frac{x - E(CPUE)}{SD(CPUE)} \right] dx$$

を適用することにより計算される (図 2: これは, CPUE の不確実性の影響を軽減するための平滑化の一種である). ここで, ϕ は標準正規分布を表す. AAV_t は, t 年までの CPUE から計算される資源量指標値の年変動の指標で, 計算に使用される有効な CPUE の数を N (= 時系列の長さ-1-欠測値の数) とするとき,

$$AAV_t = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^t \frac{2|CPUE_u - CPUE_{u-1}|}{CPUE_u + CPUE_{u-1}}$$

となる。

B_T は目標資源量水準で CPUE を正規分布の累積曲線で変換したものの確率点となる。 B_L は限界資源量水準, B_B は禁漁資源水準で, それぞれ目標資源量水準の $100 P_L \%$ ($B_L = P_L \times B_T$), $100 P_B \%$ ($B_B = P_B \times B_T$) とする (P_L, P_B は B_T に対する B_L, B_B の割合で, 1 より小さい数字となる)。図 1 にあるように, B_T の周辺では緩やかに目標値に近づけるが, B_L を下回って低水準になった場合には, 目標値に急速に近づけるような措置をとる (低水準で, 目標から遠ければ遠いほど厳しい管理になる)。

係数 δ は資源が低水準であるときに資源を回復させるスピードにあたるが, CPUE の不確実性が大きいときはできるだけ早く回復させるのが望ましいことを考えて, 係数 λ によって CPUE の変動 AAV が大きいときの回復スピードを大きくすることに対応している。

2-2. シミュレーションによるチューニングパラメータの決定

以前の 2 系ルールと同じくプロダクションモデルを OM に使用したシミュレーション(市野川ら 2015)を用いて, 新 2 系ルールに必要なチューニングパラメータ (β, δ, λ) を決定してやる。 $\beta = 0.1, 0.2, \dots, 0.5$, $\delta = 0.1, 0.2, \dots, 0.5$, $\lambda = 0.0, 0.1, 0.2, \dots, 1.0$ と 0.1 刻みで, 市野川ら (2015) と同じスコア方式で性能評価を行った (増加率, 観測誤差, プロセス誤差や資源の歴史的変化の組み合わせで 108 通りのシナリオ (basecase シナリオと呼ぶことにする) のシミュレーションを行った。資源保護目的のパフォーマンス指標は, 資源量が B_{msy} の 20% を下回る確率を 20% 以下に抑えられるシナリオの割合, 漁獲量が MSY の 20% を上回るシナリオの割合, 漁獲量変動が AAV (この場合は, 上の CPUE のものと異なり, 漁獲量に対して計算したもの) が 40% を下回るシナリオの割合, としている。これは市野川ら (2015) で使用されたものと同じである)。過去の漁獲量の参照年としては, $n = 5$ を採用した (予備的な解析で, $n = 1, 3, 5, 7$ と見て, 5 年が良さそうだったので)。

限界水準に対する割合 $P_L = 0.7$, 禁漁水準の割合 $P_B = 0.0$ で固定した上で, 目標水準 B_T を 0.6 から 0.05 刻みで 0.95 まで変更したところ, $B_T = 0.8 \sim 0.85$ にピークが見られた。これより, $B_T = 0.8$ として, P_L を変更した場合と $P_B = 0.1$ にした場合のパフォーマンスを調べた。 $P_L = 0.6$ とした場合, パフォーマンスは低下したが, $P_L = 0.8, 0.9$ とした場合は, パフォーマンスは変わらなかった。これより, $P_L = 0.7$ で性能は頭打ちになると考えられる。 $P_B = 0.1$ とした場合には, $P_B = 0.0$ の場合よりも性能が低下した。これは, この漁獲制御方式は漁獲量の変化率を指数的に変化させるため, 低い水準では実質的に禁漁となる (図 1)。それ故, 資源保護目的を向上させようと閾値で切って漁獲量を強制的に 0 にすれば, 漁獲量を下げる度合いが大きくなることになり, かえって総合的な性能の低下につながるものと思われる。以上の結果から, 総合的に判断して, $B_T = 0.8$, $P_L = 0.7$, $P_B = 0.0$, $(\beta, \delta, \lambda) = (0.5, 0.4, 0.4)$ を標準値として採用した (表 1)。従来の手法に対して, 全体的に上回るスコアを持ってお

り、特に ABC の年変動にあたる AAV のスコアが飛躍的に上昇した（表 1）。AAV の中央値のすべてのシナリオ（108 個）に対する平均は、およそ 24%であり、従来ルールと同平均が 57%、従来ルールの漁獲量 3 年平均を使用した場合でも 39%であることを考えると、ABC の変動がかなり抑えられて安定した漁獲を行えるものと判断できる。

シミュレーションの一部に関する資源量と漁獲量の推移を示した（図 3）。資源量の推移は、従来の 2 系ルールとよく似ているが、漁獲量の変動はかなり抑えられ安定した漁獲を継続することが可能なものとなっている。しかし、管理が継続した後の平均的な漁獲量については大きな差はない。したがって、新 2 系ルールは資源保護と平均漁獲量の性能を保った上で、漁獲量の安定性を大幅に向上させたものと考えられる。

2-3. 頑健性テストと大きな不確実性がある場合の補正係数

基本的なシミュレーションの設定を超えた不確実性に対する頑健性を調べるために、次のシナリオのテストを行った。最初に、資源量指標値が資源量に比例しない

$$CPUE = qB^d$$

ことを仮定したテストとして、 $d = 0.5$ (hyperstability)、 $d = 2$ (hyperdepletion) の 2 つの場合を調べた (Hashimoto et al. 2018)。さらに、管理開始前の年数を 20 年間としていたのを 10 年にした場合、プロダクションモデルを Pella-Tomlinson モデル

$$B_{t+1} = B_t + rB_t \left[1 - \left(\frac{B_t}{K} \right)^\theta \right] - C_t$$

にした場合 ($\theta=0.5, 2.0$)、観測誤差 σ_{obs} が basecase では 0.2, 0.4 のところを 0.6, 0.8 にした場合、個体群の過程誤差に自己相関 $\rho = 0.5$ を仮定した場合、漁獲量がランダムに変動する場合 ($\sigma_c = 0.2$)、漁獲量が ABC を上回って獲られ続けた場合 ($b_c = 0.2$)、ABC 計算に対する時間遅れが 2 年の場合 ($\text{lag} = 2$)、を調べた。

そのときの ABC として、2-2 で選択された ABC 算定規則の標準設定に補正係数 m ($m = 1.0, 0.9, 0.8$) を掛けた

$$ABC = m\alpha_t \bar{C}_t$$

の性能を調べた。

資源保護に対するパフォーマンスが特に悪化する場合は、hyperdepletion ($d=2$) の場合、 $\theta=2$ の場合、観測誤差が大きい場合 ($\sigma_{obs} = (0.6, 0.8)$)、自己相関がある場合 ($\rho=0.5$)、漁獲量にバイアスがある場合 ($b_c=0.2$)、時間遅れが 2 年の場合 ($\text{lag}=2$)、であった。すべてのシナリオに対する中央値を basecase の結果と比較すると性能が 12%減となる（表 2）。補正係数 $m = 0.9$ を掛ければ、中央値で見て、資源保護のパフォーマンスは basecase とほぼ同じになる。このとき漁獲量のパフォーマンスはおよそ 35%減少することになる。 $m = 0.8$ は、basecase 以上に資源保護のパフォーマンスを上げるが、漁獲量に対するパフォーマンスは 81%減となり、漁獲量の損失が大きい。以上から、資源量指標値の不確実性が大きいと考えられる場合、 $m = 0.9$ の補正を行うのが望ましいものと考えられる。

3. 3 系資源の新しい漁獲管理方策

3-1.3 系資源の ABC 算定規則

3 系資源は、資源量指標値 (CPUE) の情報がなく、漁獲量の時系列データのみから、経験的な式を用いて ABC を計算するものである。

新ルールでは、ABC を、

$$ABC = \alpha_t \bar{C}_t = \exp [-k_t(H_t - Y_T)] \times \bar{C}_t$$

によって与える。ここで、

$$k_t = \begin{cases} \beta & H_t < Y_L \\ \beta + \delta \frac{Y_L - H_t}{H_t - Y_B} & Y_L < H_t \leq Y_B \\ \infty & H_t \geq Y_B \end{cases}$$

である (図 4)。 $\bar{C}_t$ は過去 n 年間の漁獲量の平均値、 H_t は現在 (t 年) の漁獲量水準であり、 $H_t = (1/n) \sum_{i=0}^{n-1} C_{t-i} / \max(C_t)$ とする。図 1 に比較して、3 系ルールでは逆の形になっていることがわかる。これは、漁獲量しかないため、漁獲量をなるべく低い目標水準に抑える必要があり、あるレベルを越えれば、漁獲を素早く下げたほうが良いという逆の考え方が有効となるためである。

Y_T は目標漁獲量水準、 Y_L は限界漁獲量水準、 Y_B は禁漁漁獲量水準で、 $Y_L = P_L \times Y_T$ 、 $Y_B = P_B \times Y_T$ とする (P_L 、 P_B は Y_T に対する Y_L 、 Y_B の割合で、この場合は 1 より大きい数字となる)。図 3 にあるように、 Y_T の周辺では小さな変化率で目標値に近づけるが、 Y_L を上回って過剰な漁獲水準になった場合には、目標値に急速に近づけるように大幅な漁獲削減の措置をとる (過剰漁獲水準で、目標から遠ければ遠いほど厳しい漁獲削減の管理になる)。 Y_B を超えた場合には、ABC は 0 となる。

3-2. シミュレーションによるチューニングパラメータの決定

以前の 2 系ルールと同じシミュレーション (市野川ら 2015) を用いて、新 3 系ルールに必要なチューニングパラメータ (β, δ) を決定してやる。 $\beta = 0.5, 1, 1.5, 2, \dots, 5$ 、 $\delta = 0, 0.5, 1, \dots, 5$ と 0.5 刻みで、市野川ら (2015) と同じスコア方式で性能評価を行った。過去の漁獲量の参照年としては、 $n = 1, 3, 5$ を検討した。

$Y_T = 0.2, 0.1, 0.05$ として、新しいルールの性能を評価した (表 3)。総合的な性能を最大化しようと思うと、漁獲量や AAV のパフォーマンスは 2 系ルールに匹敵する場合もあるが、資源保護の基準 ($\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$) のパフォーマンスが 2 系ルールに比して大きく減少してしまう。そこで、資源保護の基準を 0.769 以上 (旧ルールによる資源保護のパフォーマンス; 表 1) にした上で、漁獲量のパフォーマンスを最大にするルールを選択することとした。漁獲量パフォーマンスが最大になるものが複数ある場合は、AAV が最小になるものを選択した。 $Y_T = 0.2$ とした場合、資源保護のパフォーマンスが 0.769 以上となるものは存在しなかった。漁獲量パフォーマンスが最大で、総合得点も最高となったものは、 $Y_T = 0.1$ 、

$P_L=6$, $P_B=10$, $(\beta, \delta)=(2.0, 1.0)$ であった (表 4). AAV の中央値のすべてのシナリオに対する平均値は 4.6% であった. このときの全体的なパフォーマンス指標は, 2 系ルールに劣るが, これは特に平均漁獲量のパフォーマンスが劣るためである. 平均資源量のパフォーマンスは, 新 2 系ルールよりは劣るものの, これまでの 2 系ルールよりは上もしくは同等となっている (表 4). 表 4 で数値が入っていないものは, 条件 $(\Pr(\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2) > 0.769)$ を達成できなかったものである.

シミュレーションの一部に関する資源量と漁獲量の推移を示した (図 5). 資源量の推移は, 従来および新 2 系ルールとよく似ているが, 漁獲量はかなり抑えられたものとなっている. これは, 資源量指標値がないため, 漁獲量を抑えないと持続的漁獲が実現できないためである. 漁獲量の水準を一定にするため, 漁獲量一定方策と似たようなものとなり, 管理が安定した後の漁獲量の変動は抑えられる. しかし, 資源の増減に関する情報はないため, 資源が増加・減少してもそれに応じて漁獲量を変えることはできない. 資源崩壊のリスクを高い確率で避けながら, 平均漁獲量を増大させるためには, 資源量指標値を推定して管理に導入すること (2 系もしくは 1 系に移行すること) が望ましいものと考えられる.

4. 従来ルールとの比較

従来の 2 系ルールと新しい 2・3 系ルールの性能を比較する. F_{msy} で漁獲した場合の資源量, 漁獲量, 漁獲量の AAV に対する比で評価する. 各統計量は, シナリオごとのシミュレーション (1000 回) の中央値をシナリオ間で平均した (表 5). また, シナリオ中で平均的にバイオマスがゼロになる割合も計算した. 資源量は, 2 系・3 系とも従来の 2 系より高くなった. 漁獲量は, 新 2 系ルールは従来ルール (1 年) と同じ値になったが, AAV はかなり小さくなり, F_{msy} で漁獲する場合とほぼ同じであった. 従来ルール (3 年) は, 漁獲量が最も高くなったが, AAV はかなり高くなった. 新 3 系ルールの漁獲量は, 2 系ルールに劣るが, AAV はかなり小さくなった. これは, 新 3 系ルールが, 漁獲量一定に近く, 変動は抑えられるものの, 漁獲の効率は悪くなることによる. バイオマスがゼロになる割合は, 従来ルールでは 5% を越えるが, 新 2 系ルールでは 3.6% に抑えられた. 新 3 系ルールのバイオマスがゼロになる確率は 5.8% ほどであり, 従来の 2 系ルールに匹敵する (表 5).

5. 実データへの応用

主に 2017 年までのデータを利用して, 新ルールによる ABC と実漁獲量, 従来の ABClimit, ABCtarget を比較した (表 6 および図 6). 系群によってばらつきはあるものの新ルールによる ABC は平均的には従来の ABCtarget と似たような値を与えるものとなる. 実漁獲量や ABClimit に対しては, 平均的に 15~25% の減少となる. シャコやズワイガニなどの甲殻類で ABC が減少しがちとなるが, ABC が低いものは特に低水準の資源であり, 新ルールでは目標値を下回る場合, 目標値からの距離によって ABC を下げることになるため (図 1), 低い

ABC となるものと考えられる。これらの系群は、早急に資源状態を改善すべきものであるとは言えるであろう。CPUE による資源水準に大きく依存するため、CPUE 標準化が効果的な可能性はある。

3 系資源では、数字を逆に見る必要があるので注意が必要である。Current/Target, Current/Limit が小さいほど資源保護的になる（2 系の場合は逆で、Current/Target が大きいほど資源保護的になる）。Hokke-DS では、従来のルールに比して、漁獲を増やすことになる。これは、従来の方法が当年の漁獲量を使うものであるが、新ルールでは 3 年平均を使うこと、2017 年の漁獲量がかなり低かったことによる（2018 年は逆にかなり高くなるということが分かっている）。一方、Umazurahagi-EC は、実漁獲や従来ルールに比して、漁獲量を大きく減らすことになるが、高いレベルで漁獲を継続しているためであり、資源量の情報が無い状態で高い漁獲圧を掛け続けることは資源にとって危険な可能性があり、現状維持を容認することは困難であろう。今後高い漁獲圧を掛け続けて大丈夫かどうか知るためにも、できるだけ早期に資源量に関する情報を収集し、2 系もしくは 1 系に移行することが望ましいと考えられる。

6. まとめ

2 系（従来の 2-1 系）、3 系（従来の 2-2 系）とも目標に基づいた管理方式のプロトタイプを提示した。目標に基づく 2 系ルールは、資源保護と漁獲量の確保の点で、従来の 2 系ルールと同等の管理パフォーマンスを有しながら、漁獲量の変動を大きく抑えることを可能にした。しかしながら、大きな不確実性のもとで効率の良い漁獲を行うことには限界があるため、個々の系群の状況に合わせたシミュレーションによってより効率の良い管理方式を選ぶこと、個体群動態モデルを用いた資源評価を実行し 1 系に移行することが推薦される。3 系資源に関しては、従来の 2-2 系は漁獲量を資源量指標値とみなすものであったため、漁獲量を減らせば資源量が減ったと判断して漁獲量を減らすことになる（結果、管理規則を守っていれば、漁獲量が下がり続ける）といった内的矛盾が指摘されてきた。また、従来の 2-2 系にはシミュレーションによる公式の検討がなされておらず、持続性に関しても確証がないものであった。新たな 3 系ルールは、従来の 2 系ルールに匹敵する資源保護能力を有しながら、漁獲の持続可能性を保証するものとなっている。しかしながら、大きな不確実性下でそのような資源保護性能を達成するためには、資源量指標値が使用できる場合に比して漁獲を抑えざるを得ず、効率的な漁獲を行うことは難しい。資源量指標値情報を入手して 2 系もしくは 1 系に移行するか、他の生物情報を入手してそのような情報を活用した管理方式に移行することが望まれる。2 系にしる 3 系にしる、ここで提示したものは標準的なものであり、これを使用しなければならないということではない。しかし、新たな 2、3 系ルールは、このような状況でこのような性能であるということは検証されているので、

系群ごとに新たな管理ルールが提示される場合は、その比較対象としてここで提示された管理ルールが活用されることになるであろう。シミュレーション等で、ここで提示されたルールを上回る性能を示せた場合、新たなルールを採用する意義についてステークホルダーへ説明することが容易になり、新たなルールの採用が円滑になされることが期待される。

引用文献

- Hashimoto, M., Okamura, H., Ichinokawa, M., Hiramatsu, K., and Yamakawa, T. 2018. Impacts of the nonlinear relationship between abundance and its index in a tuned virtual population analysis. *Fisheries Science* 84:335–347.
- 市野川 桃子・岡村 寛・黒田啓行・由上龍嗣・田中寛繁・柴田泰宙・大下誠二. 2015. 管理目標の数値化による最適な ABC 算定規則の探索. *日本水産学会誌*, 81, 206–218.

表 1. 2系新ルールのパフォーマンス得点. 総合的な得点とバランスを考慮して, $B_T=0.80$, $P_L=0.7$, $P_B=0.0$, $(\beta, \delta, \lambda) = (0.5, 0.4, 0.4)$ をデフォルトルールとして採用した.

係数	BT	PL	PB	平均年	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	$C > 0.2MSY$	$AAV < 0.4$	First two	ALL
従来のルール									
1.0-1.0-0.8-1.0		-	-	1年間	0.769	0.843	0.213	0.713	0.213
1.0-1.0-0.7-1.0		-	-	3年間	0.778	0.944	0.491	0.769	0.389
新ルール									
0.5-0.6-1.0	0.65	0.70	0.00	5年間	0.741	0.954	1.000	0.741	0.741
0.5-0.5-1.0	0.70	0.70	0.00	5年間	0.769	0.907	1.000	0.769	0.769
0.4-0.5-1.0	0.75	0.70	0.00	5年間	0.806	0.889	0.991	0.806	0.796
0.5-0.4-0.4	0.80	0.70	0.00	5年間	0.833	0.880	1.000	0.815	0.815
0.3-0.4-0.5	0.85	0.70	0.00	5年間	0.833	0.880	1.000	0.815	0.815
0.2-0.4-0.0	0.90	0.70	0.00	5年間	0.833	0.870	1.000	0.806	0.806
0.1-0.4-0.0	0.95	0.70	0.00	5年間	0.833	0.870	1.000	0.806	0.806
0.5-0.5-0.6	0.80	0.60	0.00	5年間	0.824	0.880	1.000	0.806	0.806
0.3-0.4-0.6	0.80	0.80	0.00	5年間	0.833	0.880	1.000	0.815	0.815
0.2-0.4-0.2	0.80	0.90	0.00	5年間	0.833	0.880	1.000	0.815	0.815
0.5-0.2-0.4	0.80	0.60	0.10	5年間	0.796	0.889	1.000	0.796	0.796
0.2-0.4-0.0	0.80	0.70	0.10	5年間	0.796	0.889	0.991	0.796	0.787
0.6-0.1-0.9	0.80	0.80	0.10	5年間	0.806	0.880	1.000	0.796	0.796

表 2.2 系新ルールに対する感度解析結果.

	m	1.0	0.9	0.8
Basecase	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.83		
	$C > 0.2MSY$	0.88		
	$AAV < 0.4$	1.00		
d = 0.5	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.85	0.94	0.98
	$C > 0.2MSY$	0.83	0.55	0.13
	$AAV < 0.4$	0.78	0.82	0.83
d = 2	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.74	0.81	0.89
	$C > 0.2MSY$	0.89	0.75	0.24
	$AAV < 0.4$	1.00	1.00	1.00
10 years	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.84	0.92	0.98
	$C > 0.2MSY$	0.97	0.65	0.21
	$AAV < 0.4$	0.99	1.00	1.00
$\theta = 0.5$	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.97	1.00	1.00
	$C > 0.2MSY$	0.79	0.44	0.13
	$AAV < 0.4$	1.00	1.00	1.00
$\theta = 2$	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.56	0.60	0.62
	$C > 0.2MSY$	0.83	0.56	0.21
	$AAV < 0.4$	0.95	0.95	0.96
$\sigma_{obs} = (0.6, 0.8)$	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.73	0.83	0.89
	$C > 0.2MSY$	0.88	0.64	0.07
	$AAV < 0.4$	1.00	1.00	1.00
$\rho = 0.5$	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.65	0.69	0.81
	$C > 0.2MSY$	0.79	0.35	0.13
	$AAV < 0.4$	1.00	1.00	1.00
$\sigma_e = 0.2$	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.83	0.94	1.00
	$C > 0.2MSY$	0.87	0.58	0.20
	$AAV < 0.4$	0.89	0.90	0.90
cbias = 0.2	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.56	0.74	0.88
	$C > 0.2MSY$	1.00	0.93	0.79
	$AAV < 0.4$	0.60	0.83	0.89
lag = 2	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.72	0.80	0.89
	$C > 0.2MSY$	0.89	0.81	0.37
	$AAV < 0.4$	0.99	1.00	1.00
Median/Basecase	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	0.88	0.99	1.07
	$C > 0.2MSY$	0.99	0.69	0.24
	$AAV < 0.4$	0.99	1.00	1.00

表 3. 総合得点で選択した場合の 3 系新ルールのパフォーマンス得点.
どの場合にも十分な資源保護パフォーマンスを達成できなかった.

係数	平均年	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	$C > 0.2MSY$	$AAV < 0.4$	First two	ALL
2系新ルール						
0.5-0.4-0.4	5年間	0.833	0.880	1.000	0.815	0.815
3つのパフォーマンス指標のすべてを等しい重みで最大化						
漁獲量 only ($Y_T=0.1$, $P_L = 2$, $P_B = 10$)						
0.5-0.5	1年間	0.648	0.852	0.889	0.611	0.611
1-0.5	3年間	0.667	0.870	1.000	0.574	0.574
0.5-2	5年間	0.593	0.981	0.981	0.593	0.593
漁獲量 only ($Y_T=0.2$, $P_L = 2$, $P_B = 5$)						
2.5-1.0	1年間	0.630	0.944	0.926	0.611	0.611
2.5-0.5	3年間	0.611	0.981	1.000	0.593	0.593
3.0-0.5	5年間	0.611	0.981	1.000	0.593	0.593
漁獲量 only ($Y_T=0.05$, $P_L = 2$, $P_B = 20$)						
0.5-0.5	1年間	0.704	0.648	0.907	0.463	0.463
0.5-0.5	3年間	0.611	0.907	1.000	0.593	0.593
0.5-1.0	5年間	0.630	0.926	1.000	0.611	0.611
漁獲量 only ($Y_T=0.1$, $P_L = 4$, $P_B = 10$)						
0.5-0.5	1年間	0.611	0.870	0.889	0.593	0.593
1.0-0.5	3年間	0.648	0.944	1.000	0.630	0.630
1-1.5	5年間	0.611	0.907	1.000	0.593	0.593
漁獲量 only ($Y_T=0.1$, $P_L = 6$, $P_B = 10$)						
0.5-1.5	1年間	0.593	0.870	0.870	0.574	0.574
1.0-0.5	3年間	0.648	0.889	1.000	0.630	0.630
1.5-5.5	5年間	0.685	0.852	1.000	0.574	0.574

表 4. まず資源保護の指標を従来の 2 系ルール以上のものに限定し、その中で漁獲量の性能を最大化するものを選択した場合の 3 系新ルールのパフォーマンス得点.

$Y_T = 0.1, P_L = 6, P_B = 10, (\beta, \delta) = (2.0, 1.0)$ をデフォルトルールとして採用した.

係数	平均年	$\Pr(B < 0.2B_{msy}) < 0.2$	$C > 0.2MSY$	$AAV < 0.4$	First two	ALL
2系新ルール						
0.5-0.4-0.4	5年間	0.833	0.880	1.000	0.815	0.815
Pr($B < 0.2B_{msy}$) < 0.2のパフォーマンスが0.769以上となるもののうち、 $C > 0.2MSY$ を最大化（同点がある場合は、AAVが小さいものを選択）						
漁獲量only ($Y_T=0.1, P_L = 2, P_B = 10$)						
1.0-1.5	1年間	0.778	0.481	0.870	0.370	0.370
1.5-1.5	3年間	0.778	0.648	1.000	0.463	0.463
2.5-0.5	5年間	0.778	0.611	1.000	0.426	0.426
漁獲量only ($Y_T=0.2, P_L = 2, P_B = 5$)						
-	1年間	-	-	-	-	-
-	3年間	-	-	-	-	-
-	5年間	-	-	-	-	-
漁獲量only ($Y_T=0.05, P_L = 2, P_B = 20$)						
0.5-1.0	1年間	0.778	0.463	0.870	0.352	0.352
0.5-2.5	3年間	0.778	0.611	1.000	0.426	0.426
1.0-2.0	5年間	0.778	0.593	1.000	0.407	0.407
漁獲量only ($Y_T=0.1, P_L = 4, P_B = 10$)						
1.5-0.5	1年間	0.778	0.537	0.981	0.407	0.407
2-0.5	3年間	0.778	0.667	1.000	0.481	0.481
2.5-0.5	5年間	0.778	0.648	1.000	0.463	0.463
漁獲量only ($Y_T=0.1, P_L = 6, P_B = 10$)						
1.5-0.5	1年間	0.778	0.537	0.981	0.407	0.407
2.0-1.0	3年間	0.778	0.685	1.000	0.500	0.500
2.5-0.5	5年間	0.778	0.648	1.000	0.463	0.463

表 5. 従来の 2 系ルールと新 2・3 系ルールの平均性能の比較. 真の F_{msy} で漁獲した結果に対する比. $Bratio$ は資源量, $Cratio$ は漁獲量, $AAVratio$ は漁獲量の AAV に関するもの. $zero\ B$ は, シナリオ中で資源量がゼロになる平均割合.

	$Bratio$	$Cratio$	$AAVratio$	$zero\ B$
旧2系ルール (1年)	1.685	0.307	2.396	0.059
旧2系ルール (3年)	1.655	0.349	1.652	0.053
新2系ルール	1.758	0.307	1.097	0.036
新3系ルール	1.730	0.224	0.198	0.058

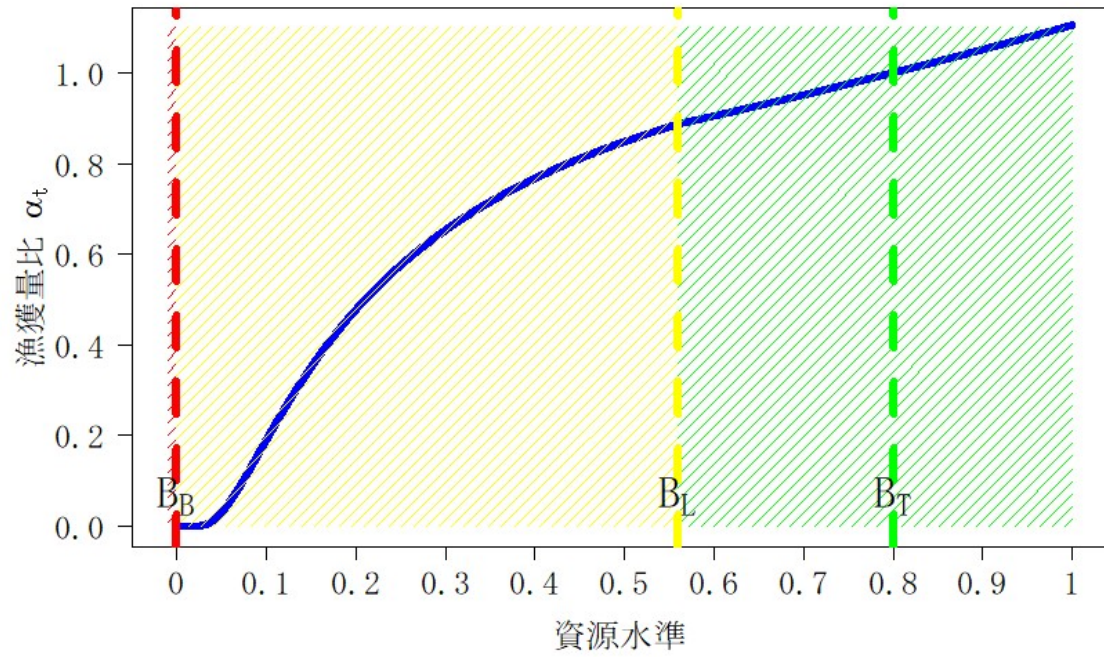


図 1. 新しい HCR. 資源状態が低くなり、目標値から遠くなればなるほど早い回復をするための漁獲圧を下げる必要がある (B_{ban} は明確に指定していないが、この性質により、資源状態が低くなれば急速に 0 に近づくため、実質上禁漁になる). 高い資源状態を保てば安定した漁獲量を持続することができる. 上記の図は、 $B_T = 0.80$, $B_L = 0.56$ ($P_L = 0.7$), $B_B = 0.0$ ($P_B = 0.0$), $(\beta, \delta, \lambda) = (0.5, 0.4, 0.4)$, $AAV = 0.2$ を使用して描かれた.

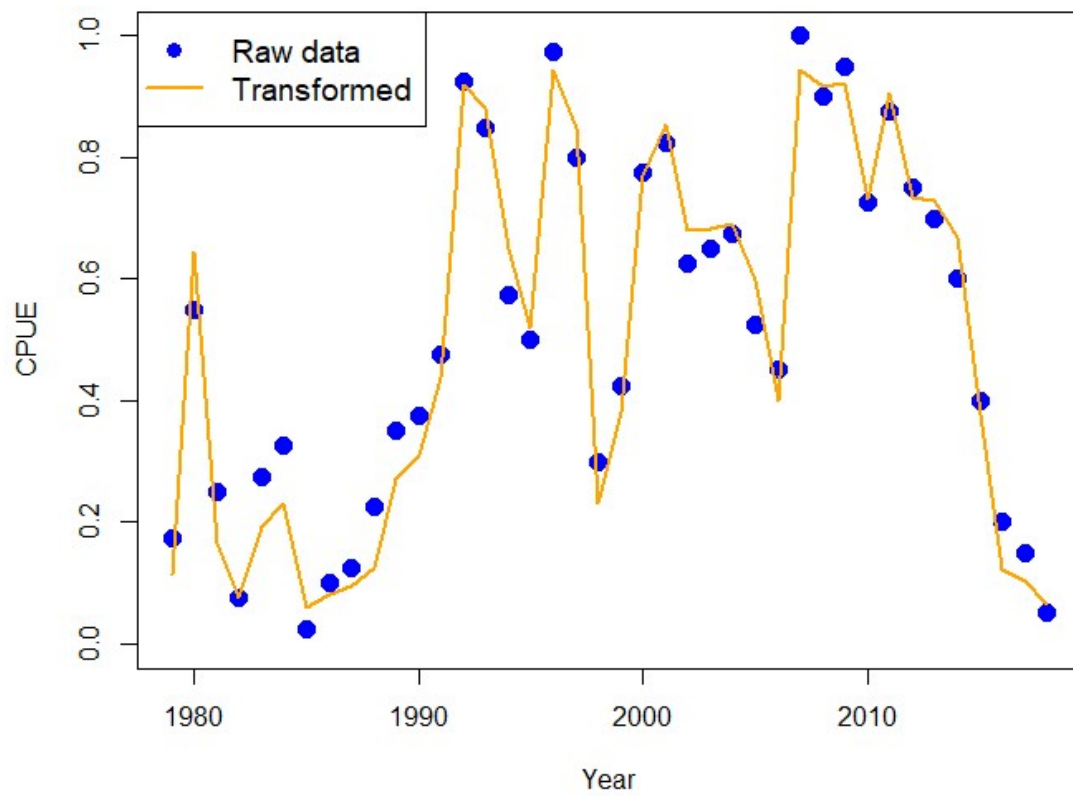
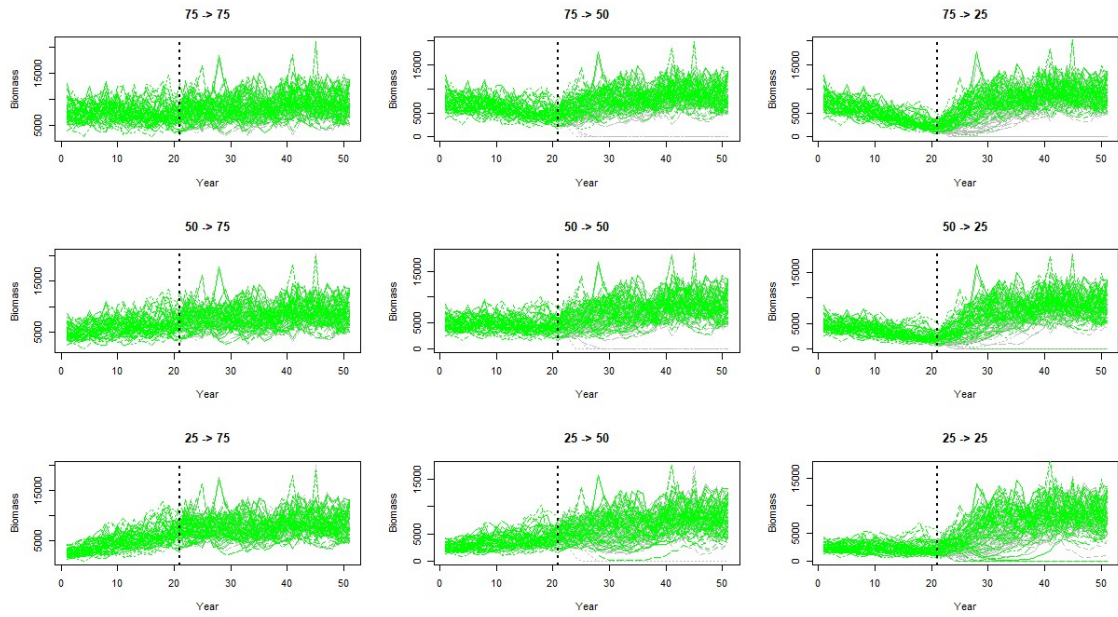


図 2. CPUE データと累積正規分布の比較.

a) 資源量



b) 漁獲量

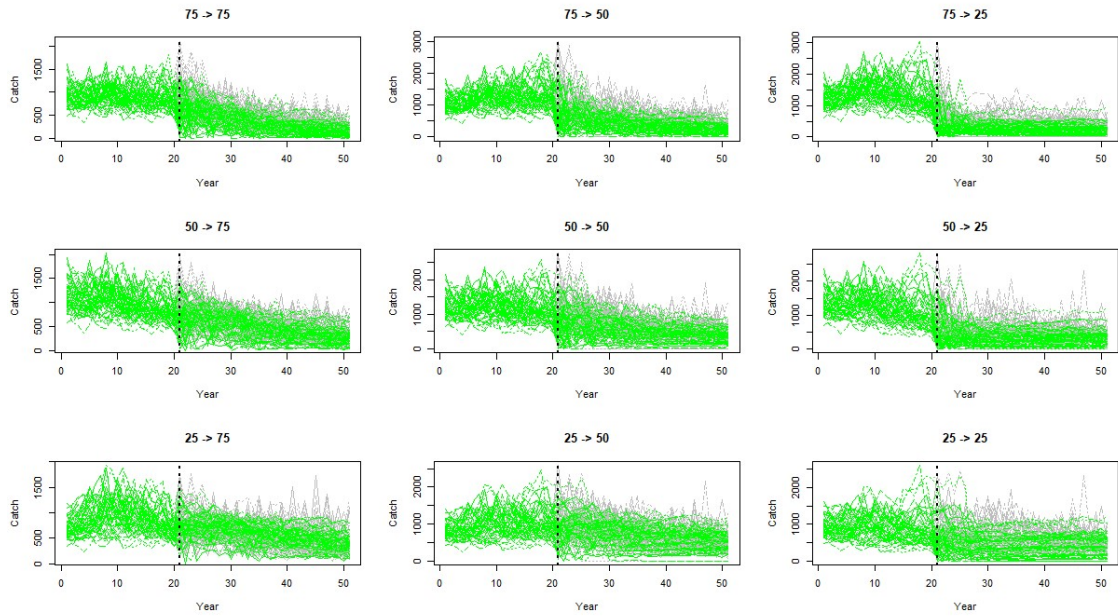


図 3. 新 2 系ルールによる資源量と漁獲量の推移. 縦の点線は管理開始年. 灰色の推移曲線は従来 2 系ルールのもの. 緑色の推移曲線は新 2 系ルールによるもの. 資源の増加率 $r=0.5$ で, 過程誤差 $\sigma_r=0.2$, 観測誤差 $\sigma_{\text{obs}}=0.2$ の場合.

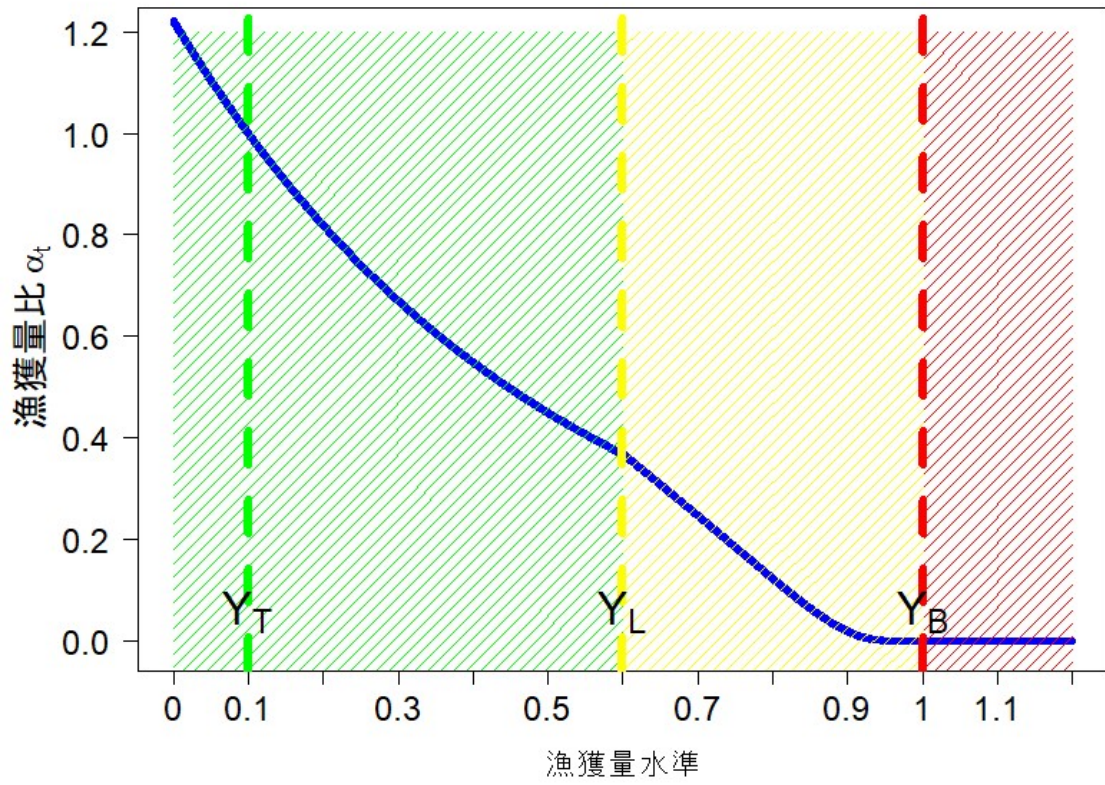
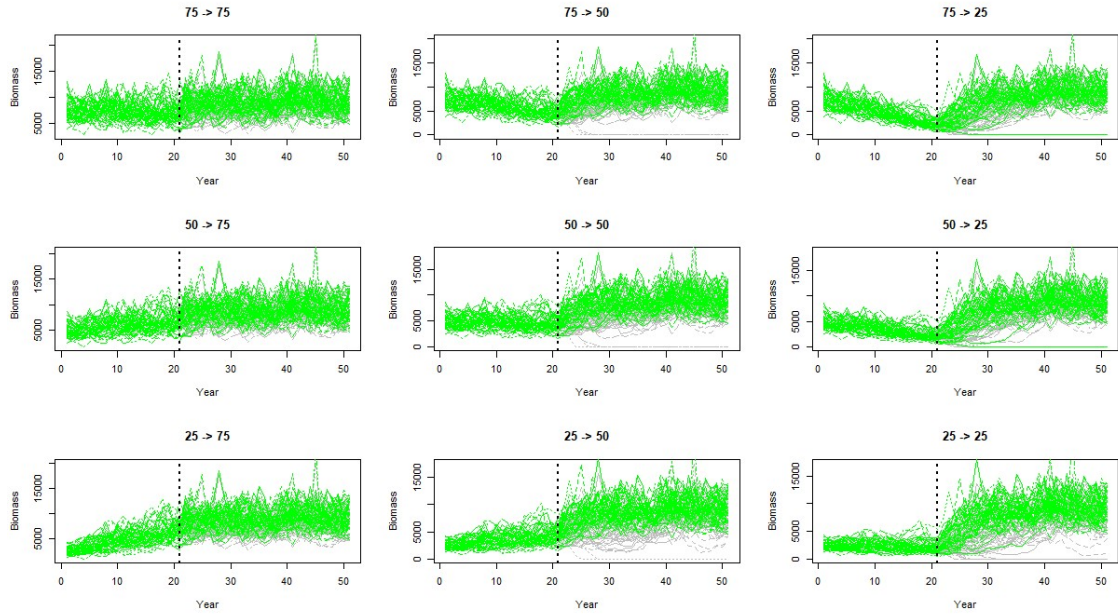


図 4.3 系のルール. 上記の図は, $Y_T = 0.1$, $Y_L = 0.6$ ($P_L = 6$), $Y_B = 1.0$ ($P_B = 10$), $(\beta, \delta) = (2.0, 1.0)$ を使用して描かれた.

a) 資源量



b) 漁獲量

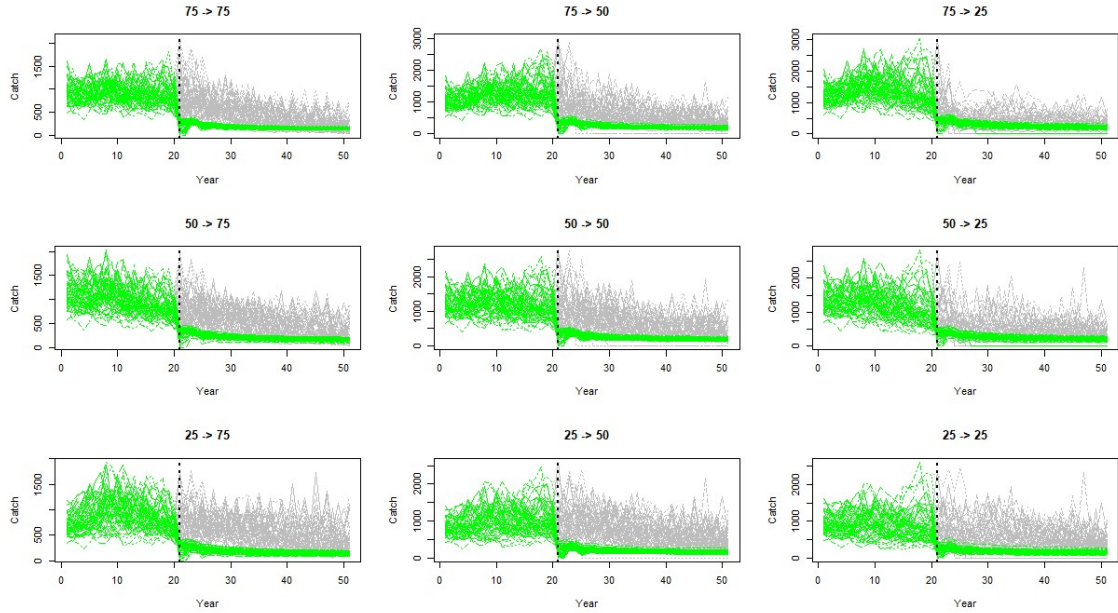
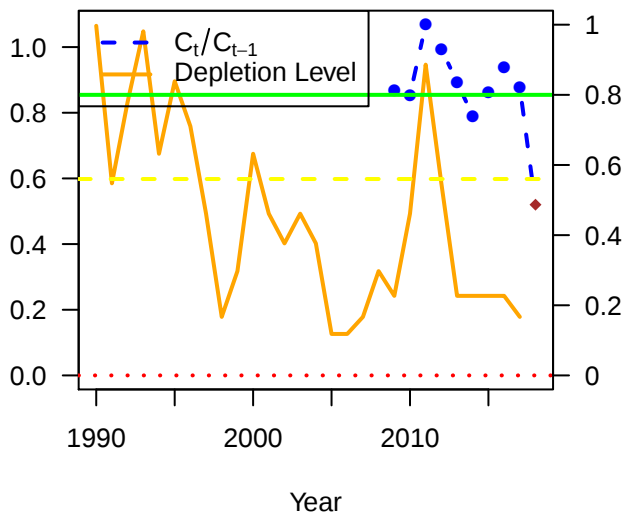


図 5. 新 3 系ルールによる資源量と漁獲量の推移. 縦の点線は管理開始年. 灰色の推移曲線は従来 2 系ルールのもの. 緑色の推移曲線は新 3 系ルールによるもの. 資源の増加率 $r=0.5$ で, 過程誤差 $\sigma_r = 0.2$, 観測誤差 $\sigma_{\text{obs}} = 0.2$ の場合.

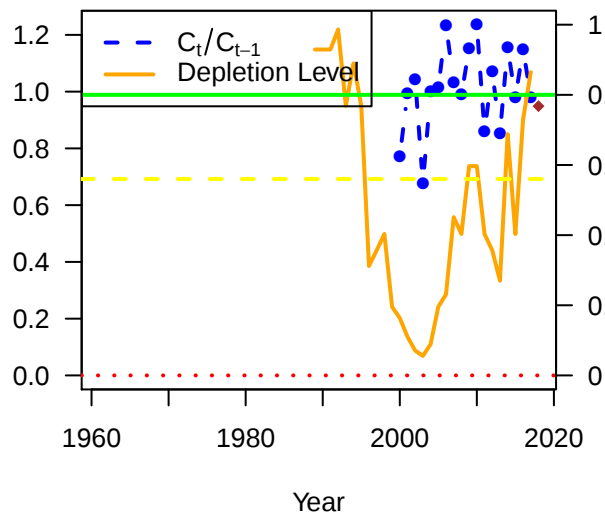
表6. 2. 3系資源に対するABCの試算（一部、1系資源もあり）

系群名	タイプ	Current/Target	Current/Limit	実漁獲（2017年）	ABCLimit	ABCTarget	new ABC	new ABC/実漁獲	new ABC/ABCLimit	new ABC/ABCTarget
Machi(Himedai)-EC	2	0.546	0.660	94	73	58	49	0.520	0.670	0.843
Machi(Hamadai)-EC	2	1.059	1.257	263	209	167	250	0.949	1.194	1.494
Machi(Oohime)-EC	2	0.836	0.920	74	51	41	51	0.686	0.995	1.238
Machi(Aodai)-EC	2	0.686	0.788	316	278	222	154	0.486	0.552	0.692
Muroaji-EC	2	0.364	0.503	5849	5600	4500	3556	0.608	0.635	0.790
Sawara-EC	2	0.746	0.998	10405	9500	7600	11509	1.106	1.211	1.514
Kensaki-EC	2	0.896	0.957	7436	7300	5800	6086	0.818	0.834	1.049
Kidai-EC	2	0.981	1.223	4443	4500	3600	4432	0.997	0.985	1.231
Amadai-EC	2	0.120	0.154	7	5.5	4.4	0	0.002	0.003	0.004
Amadai-SOJ	2	1.067	1.179	667	550	440	660	0.990	1.200	1.500
Tachiuo-EC	3	1.902	0.238	1515	977	782	1396	0.922	1.429	1.786
Umazurahagi-EC	3	11.973	1.497	3830	4200	3200	1320	0.345	0.314	0.413
Madai-SE-east	2	1.693	2.524	2102	2003	1603	2170	1.032	1.084	1.354
Ikanago-SE-east	2	0.107	0.140	1252	537	430	74	0.059	0.139	0.173
Maanago-PA	2	0.288	0.371	249	157	126	40	0.159	0.252	0.314
Syako-PA	2	0.141	0.181	108	72	57	1	0.007	0.011	0.014
Nigisu-PA	2	0.592	0.707	616	424	340	293	0.476	0.691	0.862
Buri-PA	2	1.660	2.112	117380	123000	104000	130251	1.110	1.059	1.252
Zuwai-JSA	2	1.004	1.375	2769	2800	2300	3146	1.136	1.124	1.368
Zuwai-JSB	2	1.067	1.248	227	600	490	280	1.234	0.467	0.572
Akagarei-JS	2	1.117	1.392	4453	4000	3200	5257	1.181	1.314	1.643
Nigisu-JS	2	0.606	0.732	2160	2100	1700	1296	0.600	0.617	0.762
HatahataN-JS	2	1.322	2.166	1578	2400	1900	2536	1.607	1.057	1.335
Benizuwai-JS1	2	0.699	0.889	7688	9396	7516	7254	0.944	0.772	0.965
Benizuwai-JS2	2	1.170	1.322	5426	5824	4659	6155	1.134	1.057	1.321
Hokkokuakaebi-JS1	2	1.327	1.734	2356	2305	1844	2340	0.993	1.015	1.269
Hokkokuakaebi-JS2	2	1.230	1.500	138	158	126	171	1.239	1.082	1.353
SurumeF	2	0.596	0.767	85070	49000	39000	70485	0.829	1.438	1.807
Buri	2	1.185	1.466	117380	123000	104000	126133	1.075	1.025	1.213
Magarei-JS	3	2.212	0.277	122	100	80	136	1.118	1.364	1.705
Yariika-JS	3	7.908	0.988	2821	2400	2000	1602	0.568	0.668	0.801
Zuwaigani-NP	2	0.448	0.567	12	109	88.3	3	0.213	0.024	0.029
Itohikidara-P	2	0.623	0.765	11725	29000	23000	10428	0.889	0.360	0.453
Kianko-NP1	2	0.737	0.966	353	404	323	267	0.755	0.661	0.826
Kianko-NP2	2	2.057	2.901	1011	1358	1086	839	0.831	0.618	0.773
Samegarei-NP	2	0.266	0.419	247	200	160	139	0.561	0.693	0.867
Yariika-P1	2	1.193	1.813	2879	2705	2164	3070	1.066	1.135	1.419
Yariika-P2	2	0.868	1.219	444	345	276	469	1.056	1.358	1.698
Kichiji-OKS	2	0.344	0.415	184	110	90	2	0.009	0.015	0.019
Kichiji-DES	2	0.736	1.071	359	260	210	331	0.921	1.272	1.574
Suketou-OHK	2	0.715	0.921	15292	22500	18000	22017	1.440	0.979	1.223
Suketou-NE	2	0.142	0.221	4920	2000	1600	3149	0.640	1.574	1.968
Zuwai-OK	2	0.025	0.035	438	190	150	30	0.067	0.155	0.197
Souhachi-HN	2	0.899	1.057	2734	2600	2100	1683	0.616	0.647	0.802
Hokke-NDHEI	2	0.072	0.100	203	160	120	100	0.492	0.624	0.832
Hokke-DS	3	0.583	0.073	665	400	300	1218	1.832	3.046	4.061
Magarei-HN	2	1.553	1.905	2404	2100	1700	1983	0.825	0.944	1.166
Madara-HP	2	1.278	1.690	15831	16500	13200	17869	1.129	1.083	1.354
Madara-HN	2	2.117	2.850	5244	6700	5400	4287	0.818	0.640	0.794
Madara-OKS	2	3.328	5.517	10215	9900	7900	4343	0.425	0.439	0.550
Surume-W	2	0.185	0.242	36	18	14	8	0.219	0.442	0.568
2系	46			Surume-Wは2018年			中央値	0.829	0.834	1.049
3系	5						平均	0.779	0.842	1.055
							標準偏差	0.419	0.521	0.672

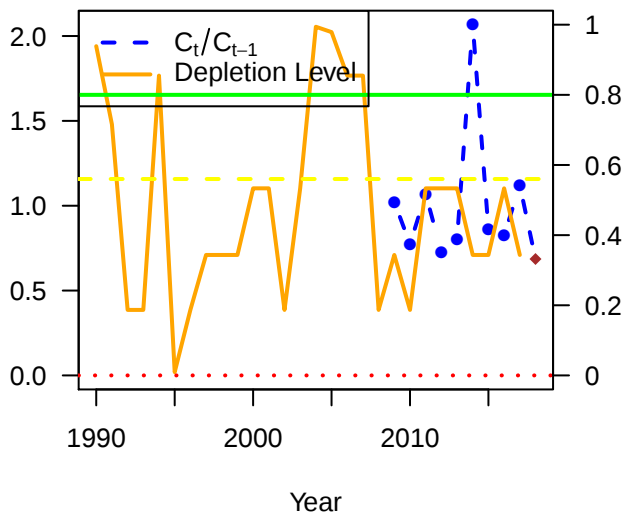
Machi(Himedai)-EC: Type 2



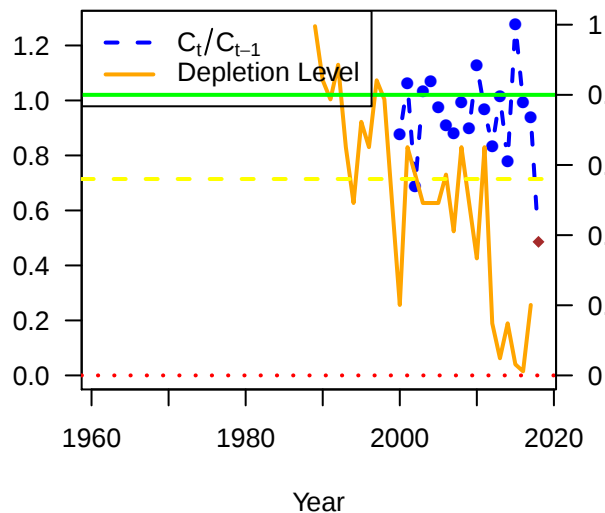
Machi(Hamadai)-EC: Type 2



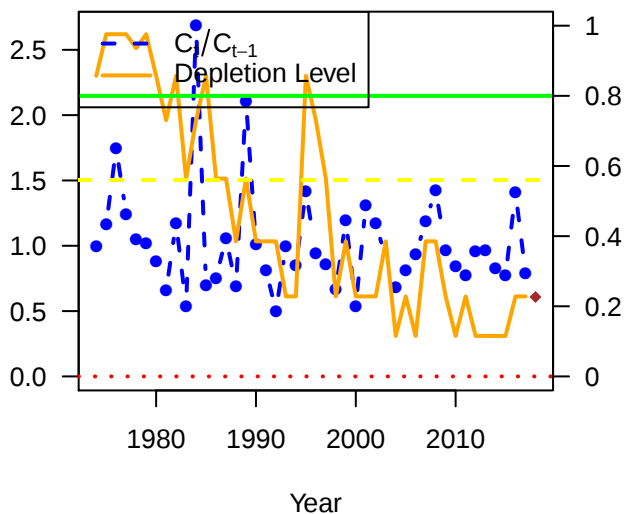
Machi(Oohime)-EC: Type 2



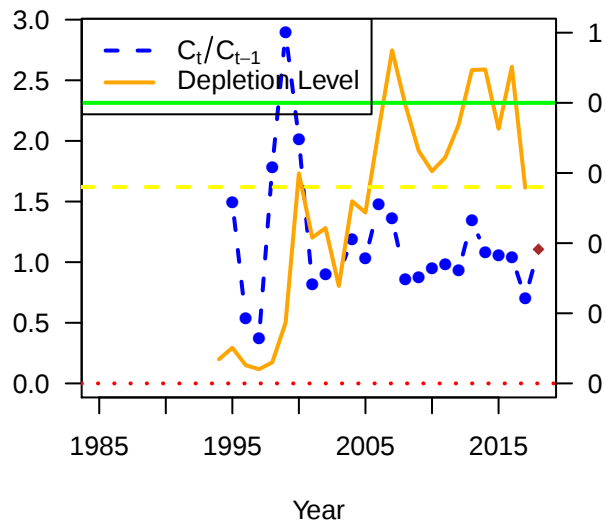
Machi(Aodai)-EC: Type 2



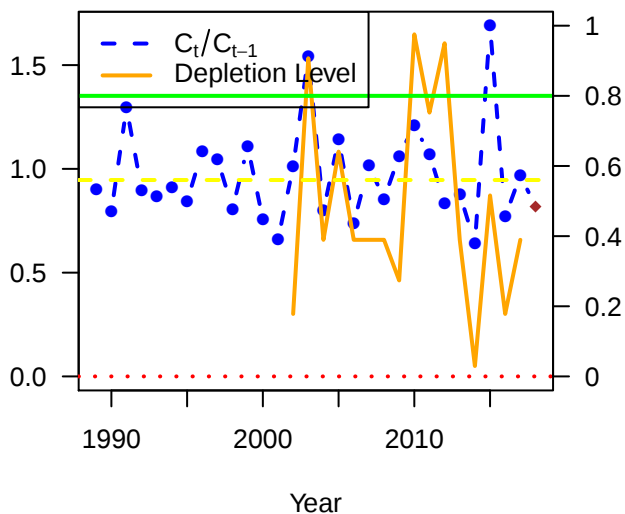
Muroaji-EC: Type 2



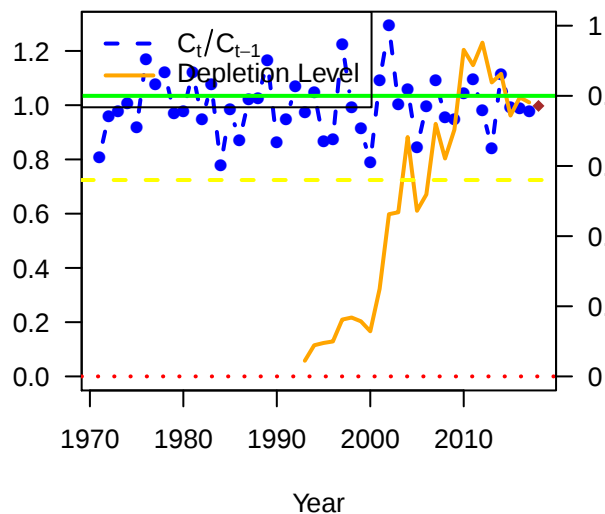
Sawara-EC: Type 2



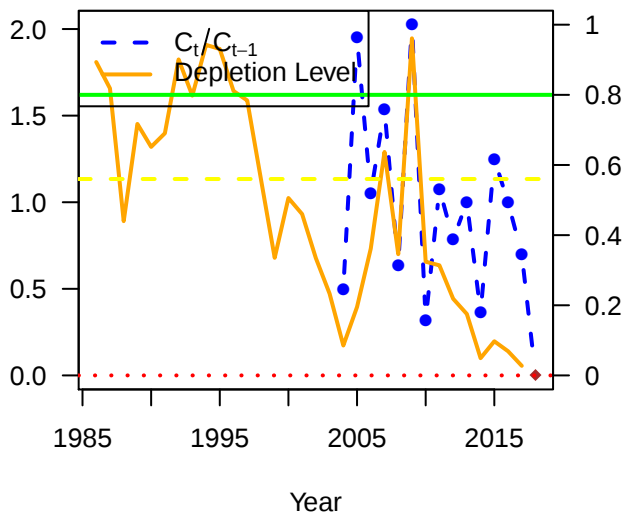
Kensaki-EC : Type 2



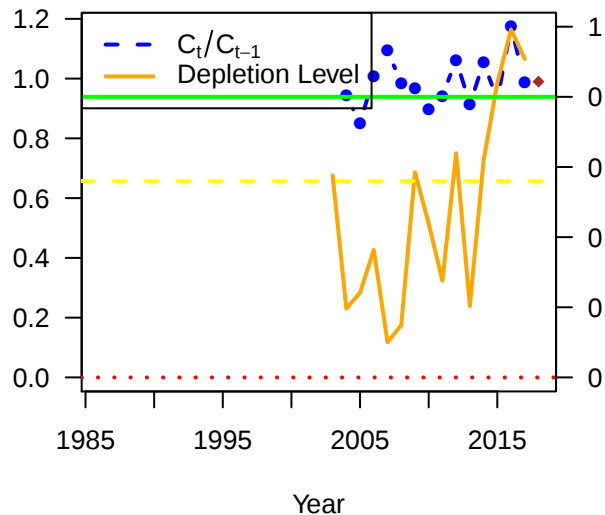
Kidai-EC: Type 2



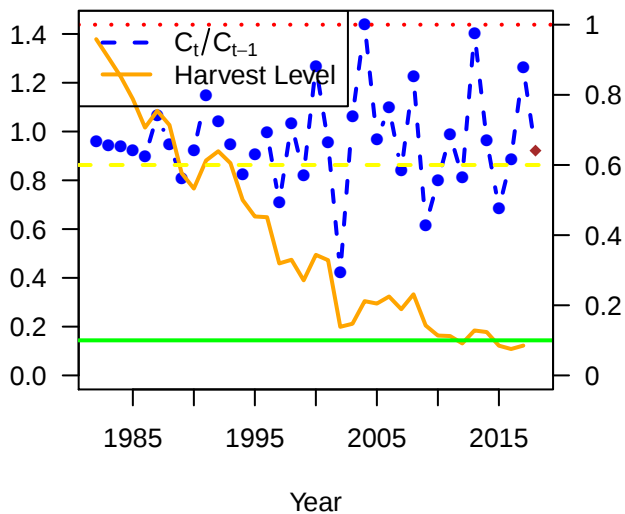
Amadai-EC: Type 2



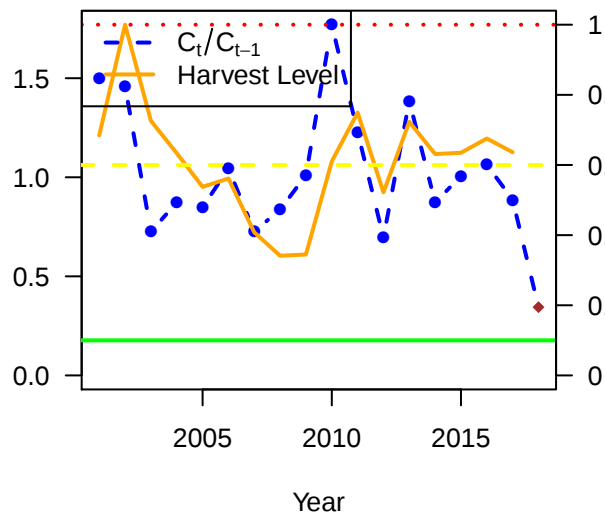
Amadai-SOJ: Type 2



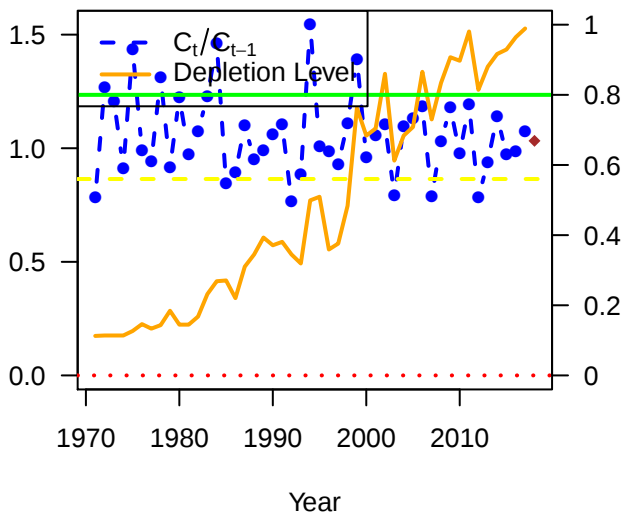
Tachiuo-EC: Type 3



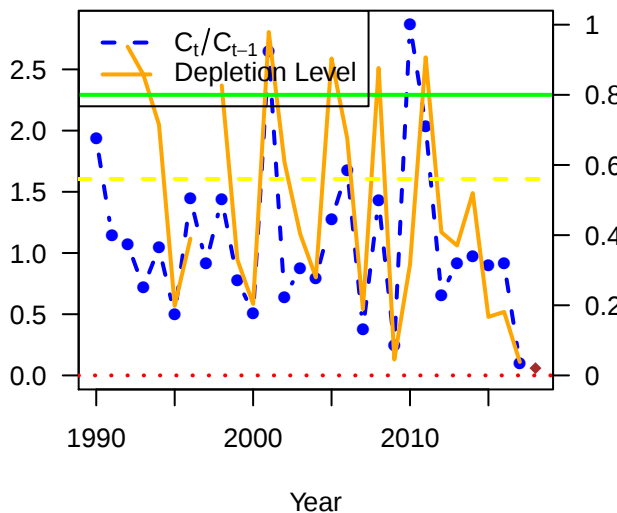
Umazurahagi-EC: Type 3



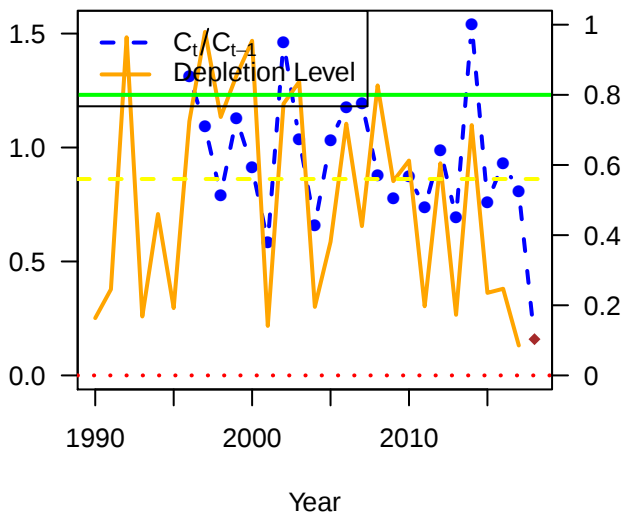
Madai-SE-east: Type 2



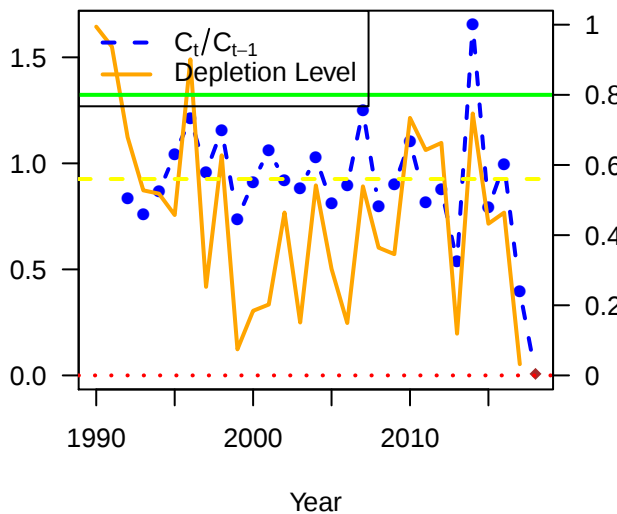
Ikanago-SE-east: Type 2



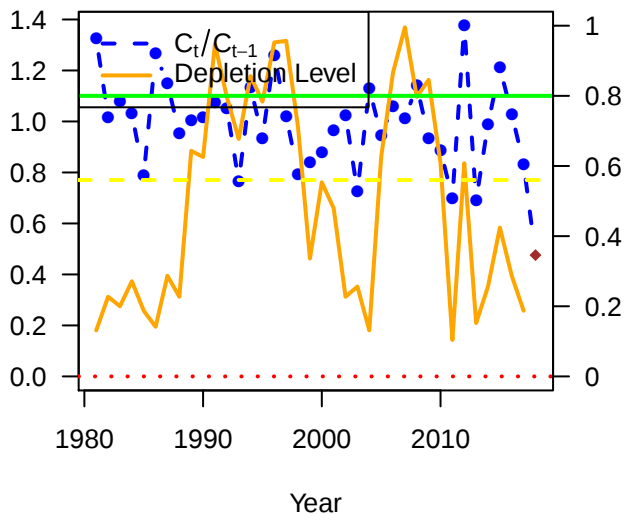
Maanago-PA: Type 2



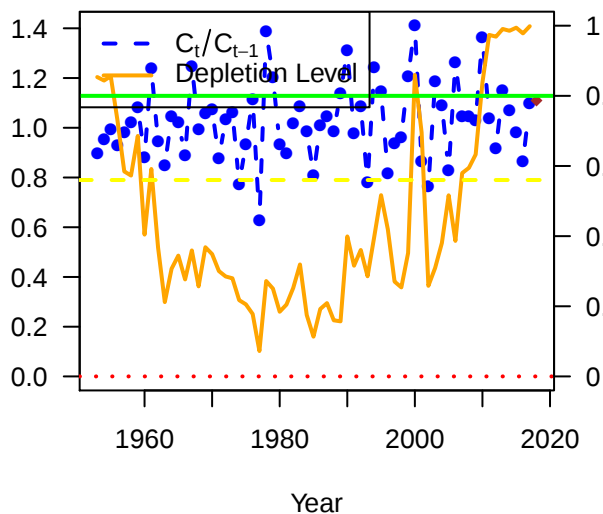
Syako-PA: Type 2



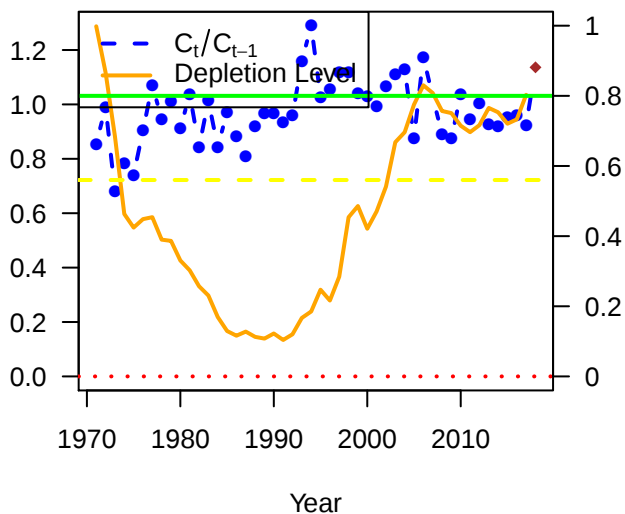
Nigisu-PA: Type 2



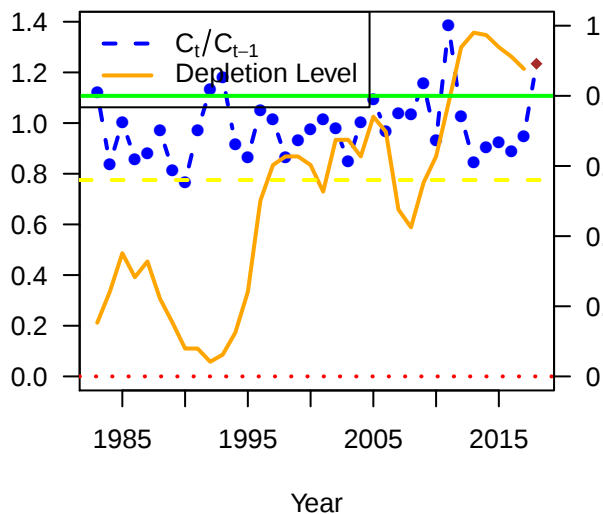
Buri-PA: Type 2



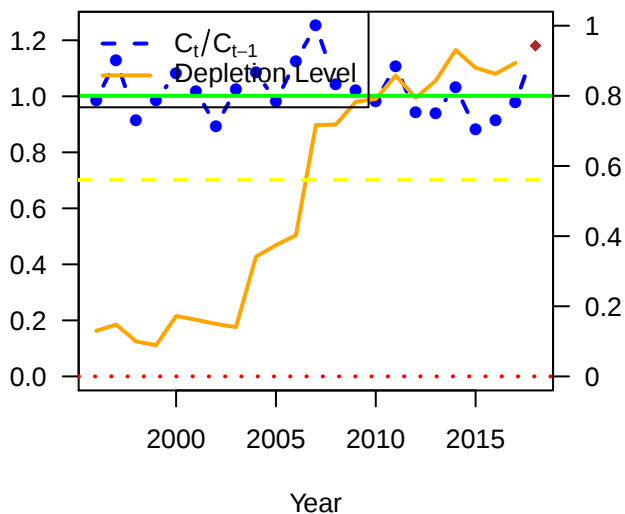
Zuwai-JSA: Type 2



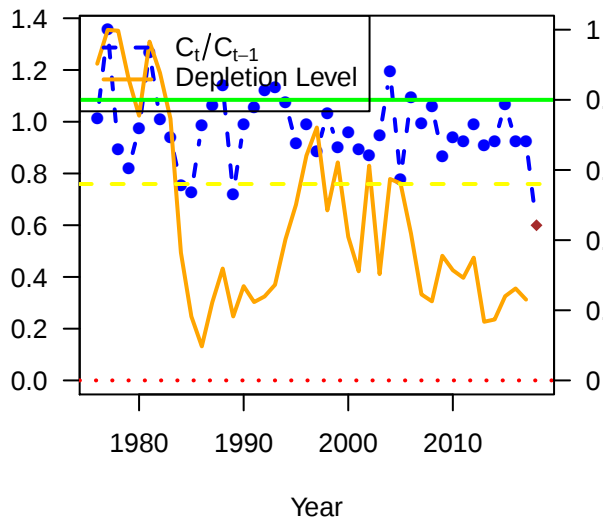
Zuwai-JSB: Type 2



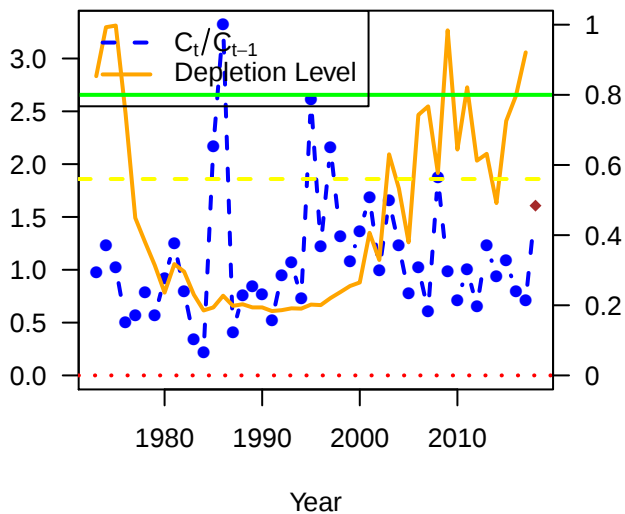
Akagarei-JS: Type 2



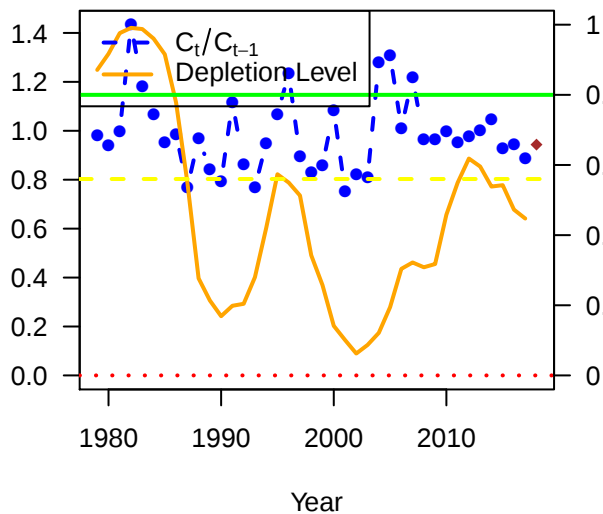
Nigisu-JS: Type 2



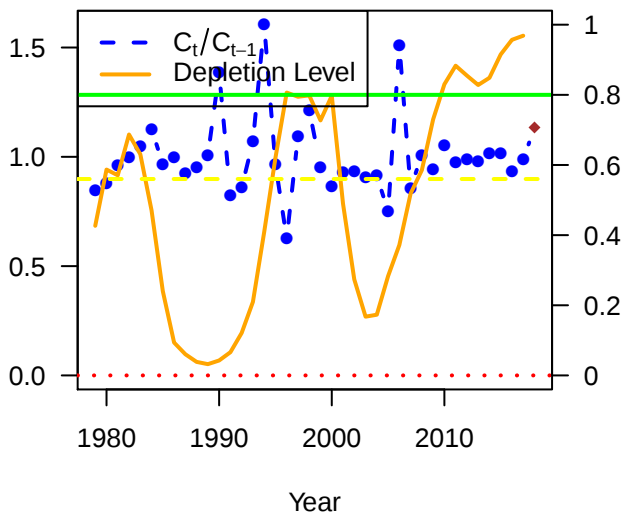
HatahataN-JS: Type 2



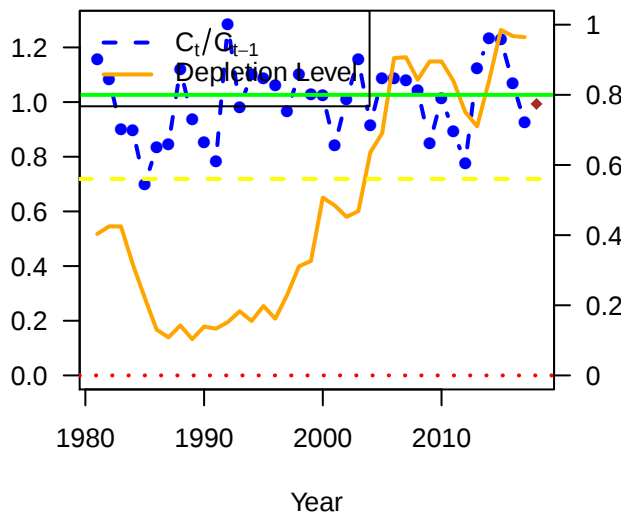
Benizuwai-JS1: Type 2



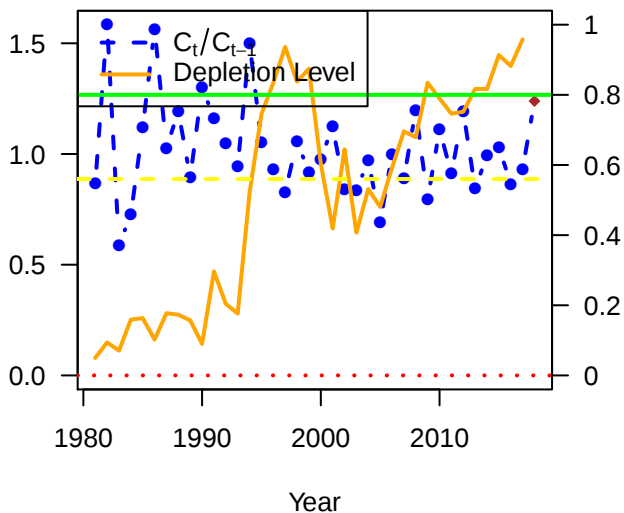
Benizuwai-JS2: Type 2



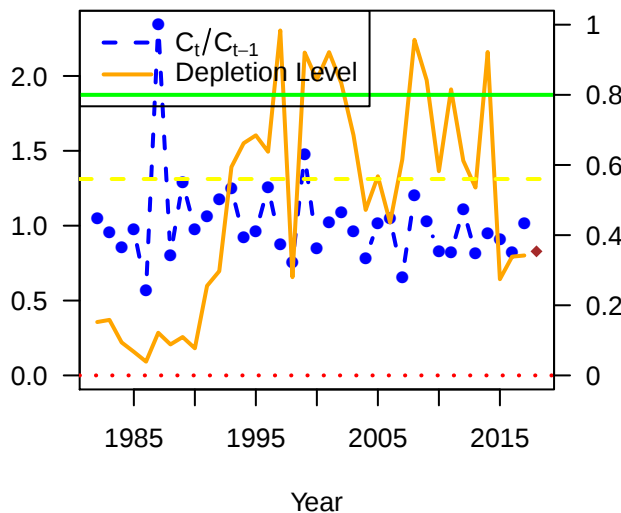
Hokkokuakaebi-JS1: Type 2



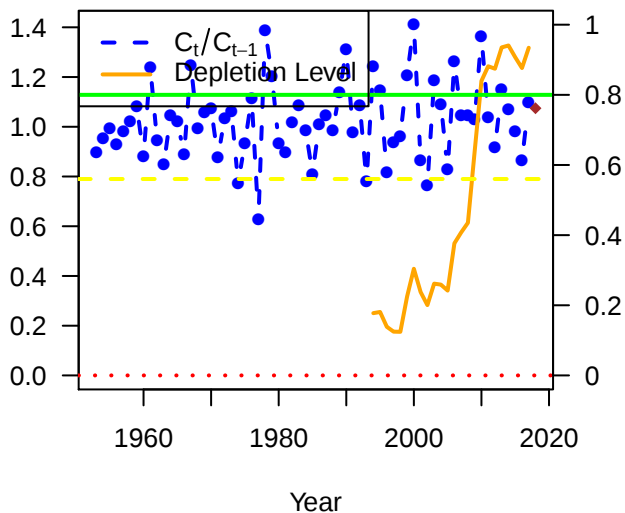
Hokkokuakaebi-JS2: Type 2



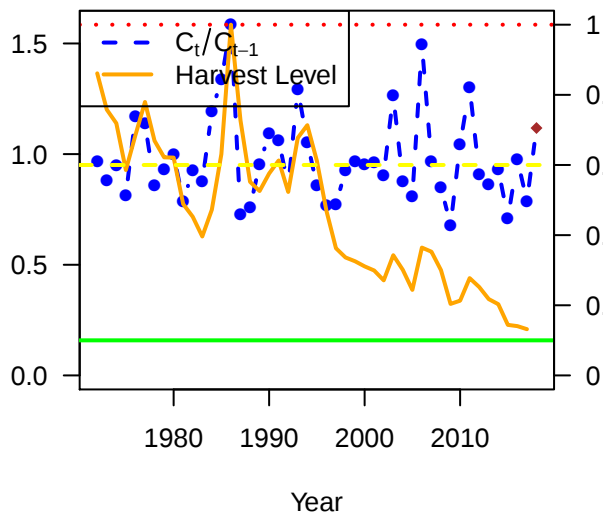
SurumeF: Type 2



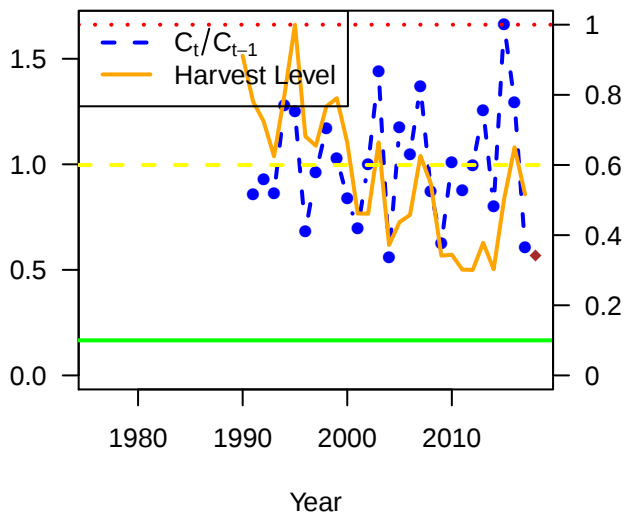
Buri: Type 2



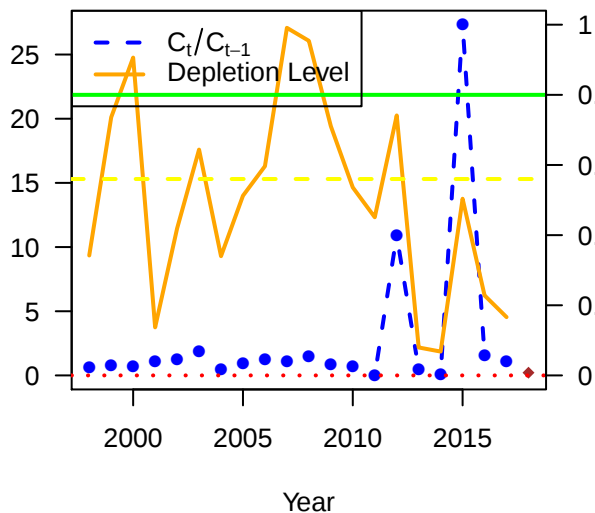
Magarei-JS: Type 3



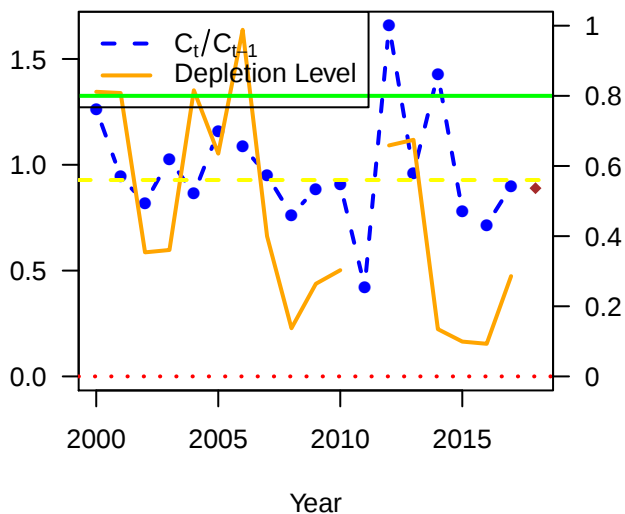
Yariika-JS: Type 3



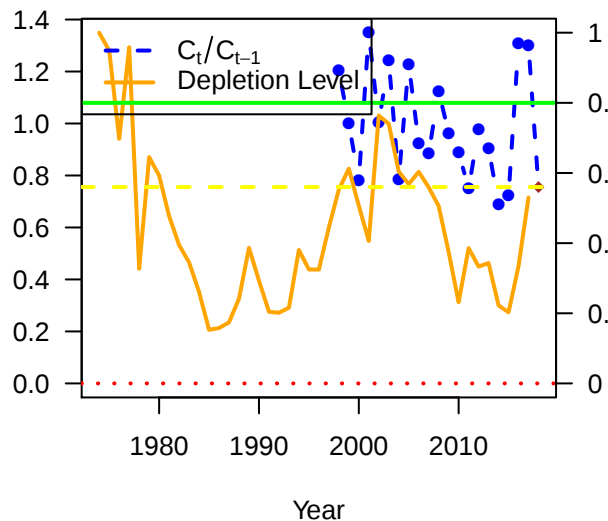
Zuwaigani-NP: Type 2



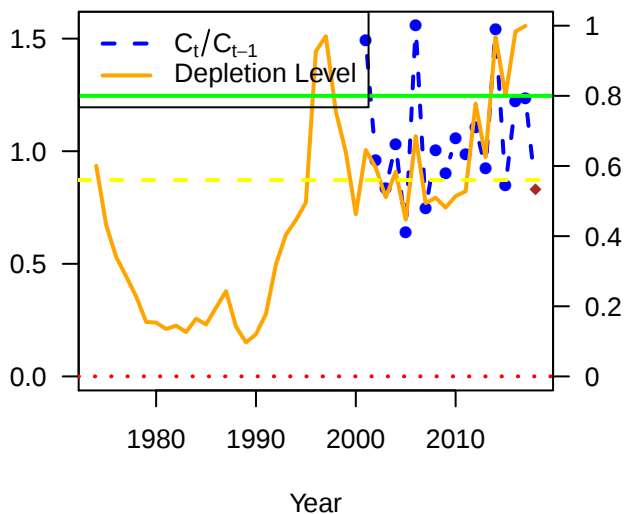
Itohikidara-P: Type 2



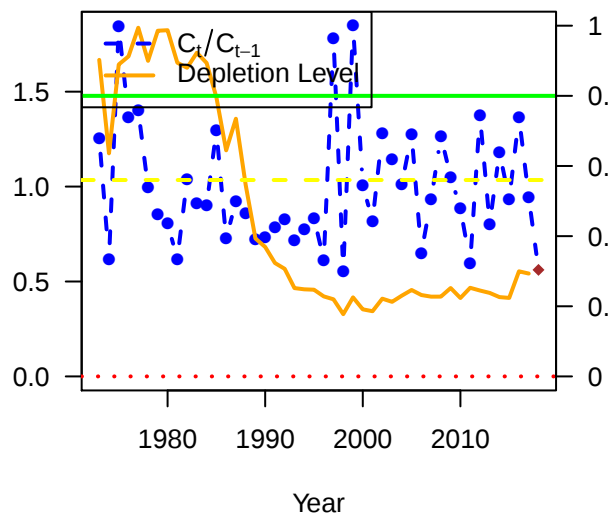
Kianko-NP1: Type 2



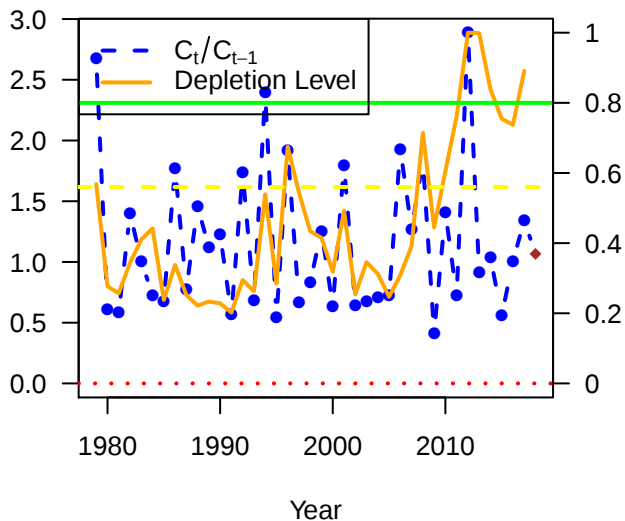
Kianko-NP2: Type 2



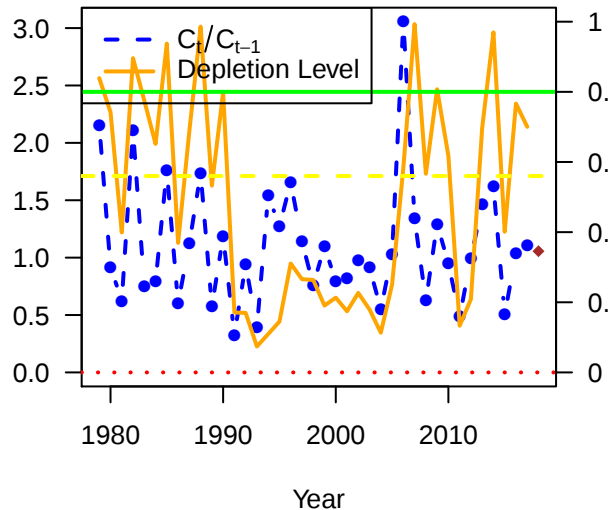
Samegarei-NP: Type 2



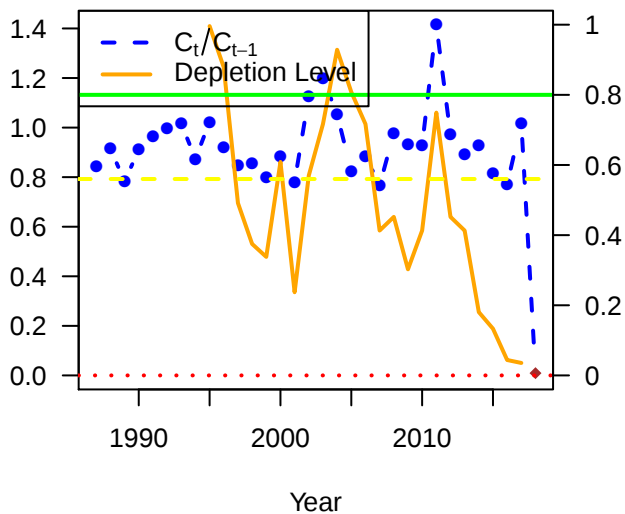
Yariika-P1: Type 2



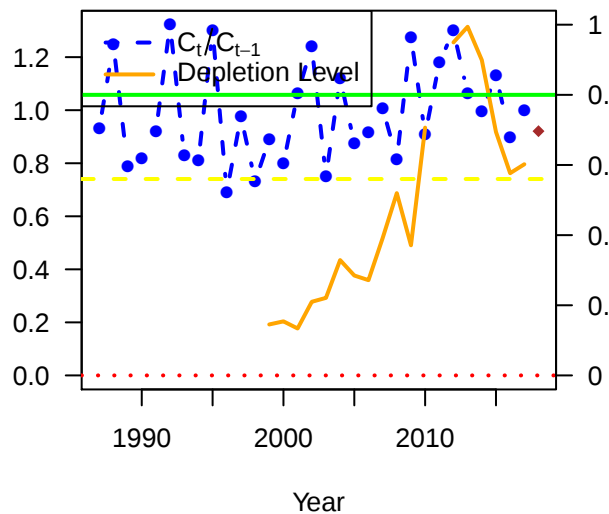
Yariika-P2: Type 2



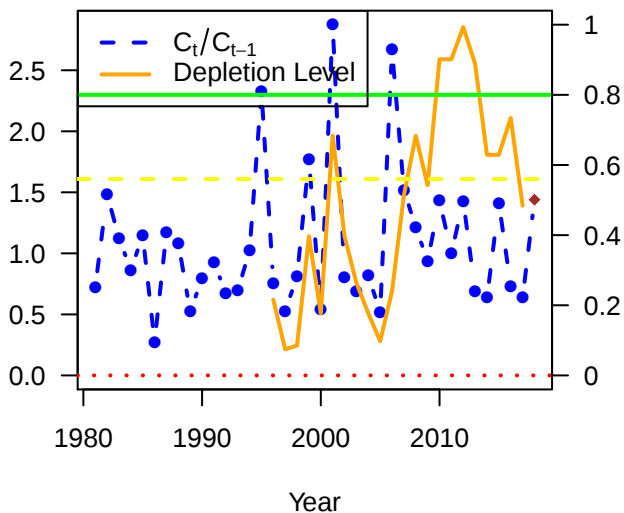
Kichiji-OKS: Type 2



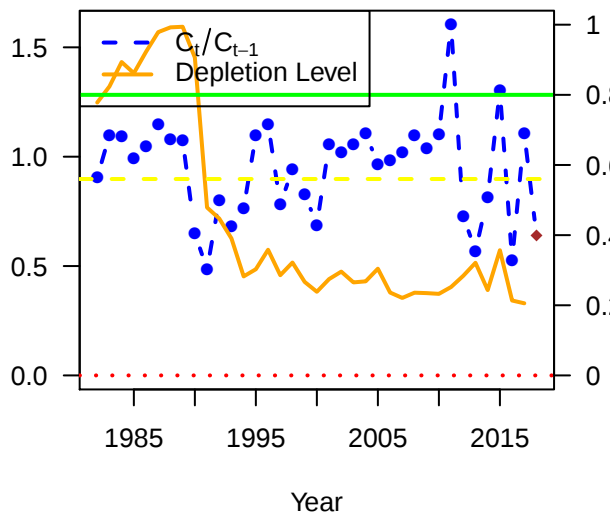
Kichiji-DES: Type 2



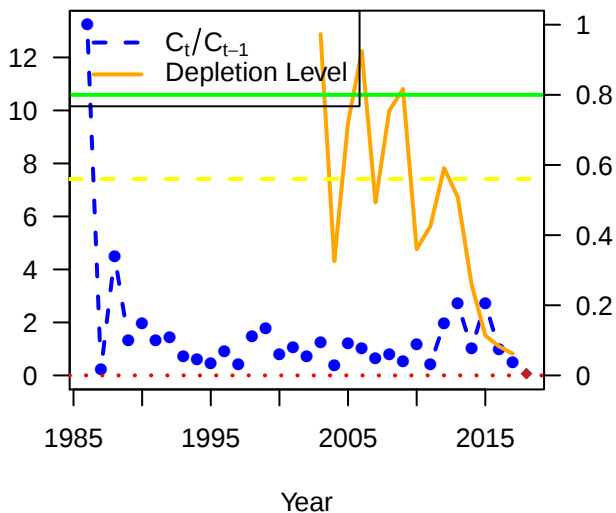
Suketou-OHK: Type 2



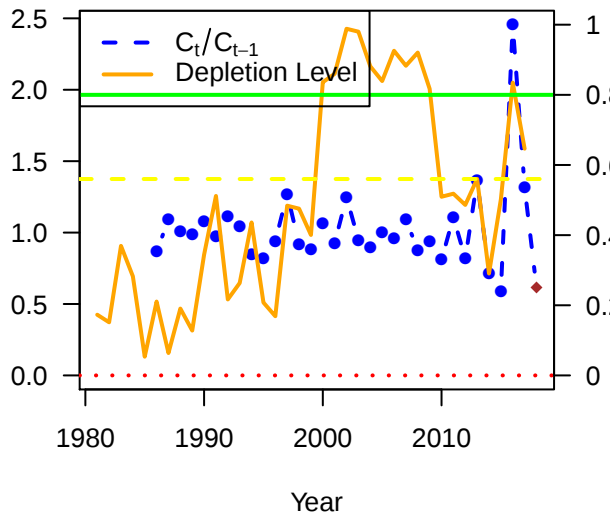
Suketou-NE: Type 2



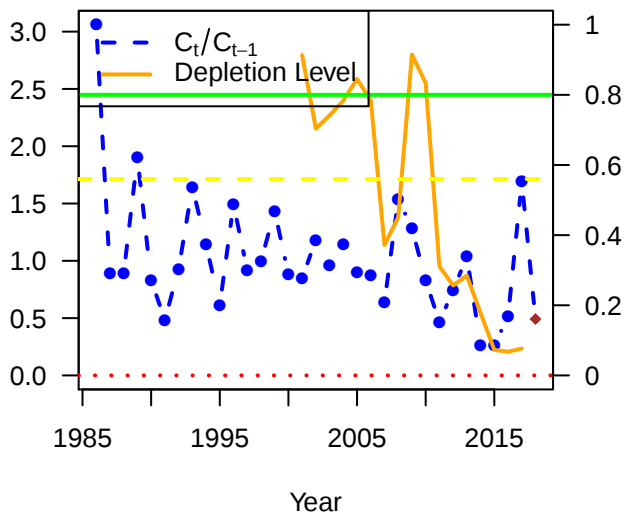
Zuwai-OK: Type 2



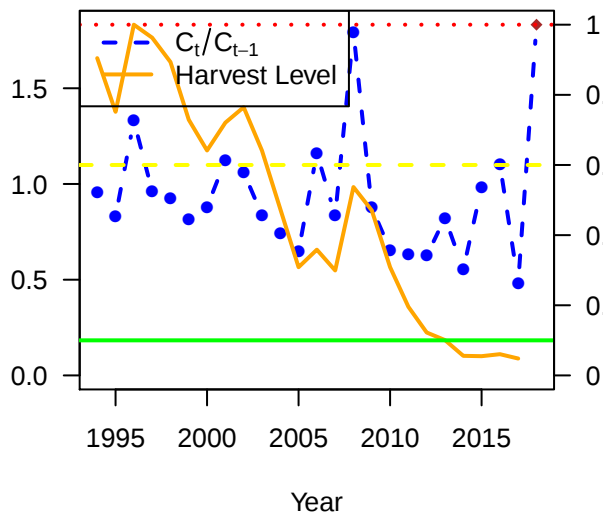
Souhachi-HN: Type 2



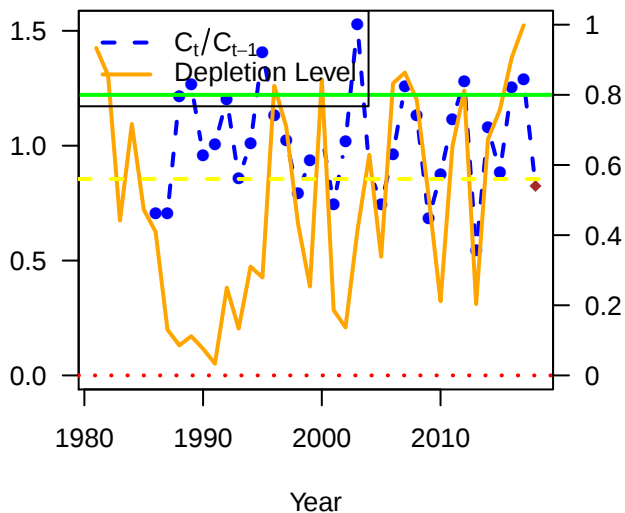
Hokke-NDHEI: Type 2



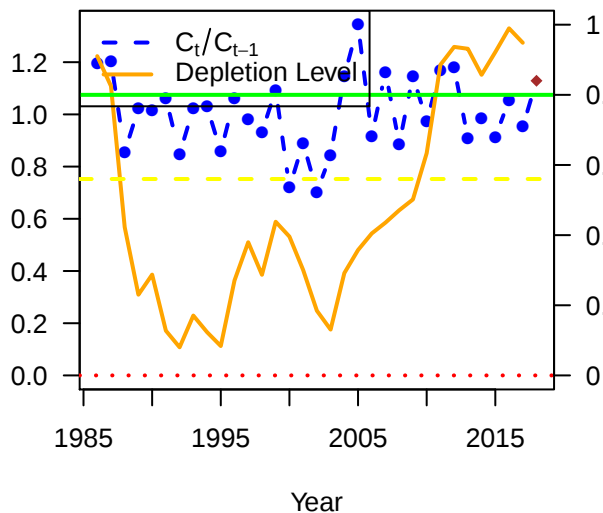
Hokke-DS: Type 3



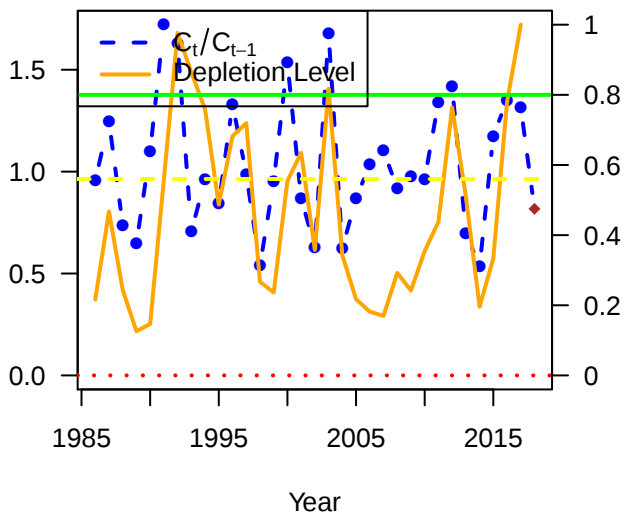
Magarei-HN: Type 2



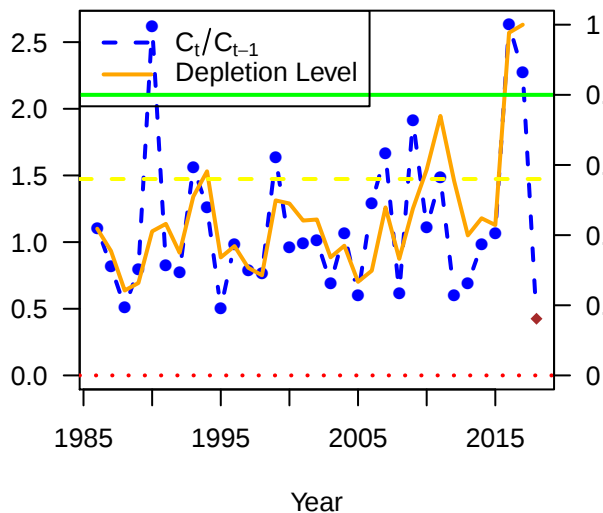
Madara-HP: Type 2



Madara-HN: Type 2



Madara-OKS: Type 2



Surume-W: Type 2

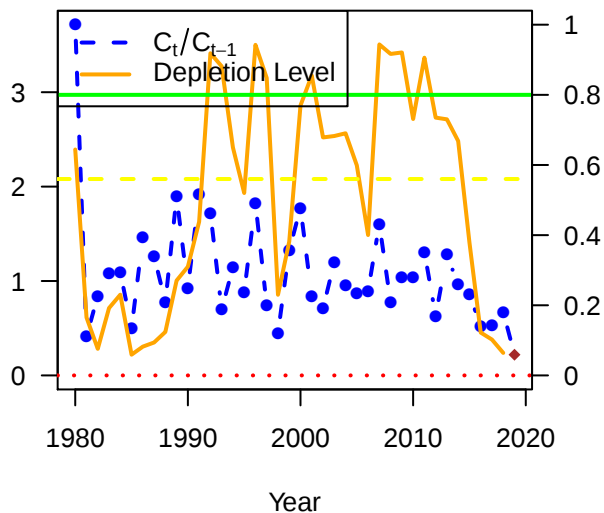


Fig. 6. Application to real data. Green, yellow, and red lines denote target, limit, and ban levels.