

電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌)
Vol. 138, No. 6. (2018年6月) 抜粋

太陽光、風力発電の安定供給コスト

エネルギー問題に発言する会

2018年7月19日

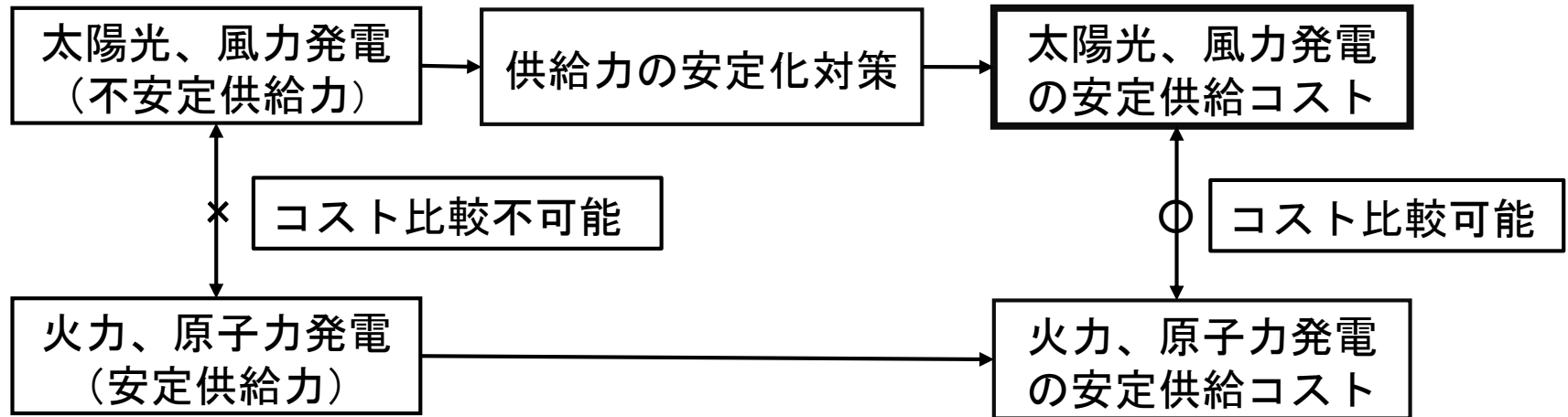
新田目 倅造

目 次

1. 太陽光、風力発電の安定供給コスト
2. 太陽光発電と蓄電設備併用時の必要設備
3. 風力発電と蓄電設備併用時の必要設備
4. 太陽光、風力発電と蓄電設備併用時の供給コスト
5. 太陽光、風力発電と火力発電併用時の供給コスト
6. まとめ
7. 関連資料
 - (1) 風力発電の増加に伴う出力抑制とコスト
 - (2) 太陽光、風力発電のエネルギー貯蔵技術開発
 - (3) 第5次エネルギー基本計画案の再生可能エネルギーの取り組み
 - (4) 変動再生可能エネルギーに起因する電力システム上の課題

1. 太陽光、風力発電の安定供給コスト

- ・ 太陽光、風力発電の安定供給力としてのコスト



- ・ 安定供給力：変化する電力需要を安定に充足できる供給力（火力、原子力発電等）
- ・ 太陽光、風力発電供給力の安定化対策
 - ① 蓄電設備との併用 ---
 - ② 火力発電との併用 --- } 本論文で検討
 - ③ 電力需要調整（デマンドコントロール）、系統連系など

2. 太陽光発電と蓄電設備の併用供給時の必要設備

(1) シミュレーションによる算定

① 東北エリアの2015年の年間 8,760時間の需給シミュレーション。

東北エリア：東北6県および新潟県の電気事業者供給分

② 電力需要：実績需要を年間最大電力 1kWに相似的に圧縮。

年間需要電力量=5,782Kwhとなる。(負荷率 66.0%)

③ 太陽光発電：太陽光発電実績を、

年間発電電力量=需要電力量 5,782kWh

となるように相似的に圧縮。必要な発電設備=4.54kW。

④ ③と②の過不足分を蓄電設備で充放電して、需要に供給。

充放電効率=100%とした。

充放電効率：充電電力量を100として放電できる割合

⑤ 蓄電設備必要量の算定

蓄電設備必要量 W_{sp} [kWh] は、

$$W_{sp} = A_{max} - A_{min}$$

ここに A_{max} = 需給差累計の年間最大値

$$= \max \sum_{i=1}^n (P_{Pi} - P_{Li}) : n = 1 \sim 8760$$

A_{min} = 需給差累計の年間最小値

$$= \min \sum_{i=1}^n (P_{Pi} - P_{Li}) : n = 1 \sim 8760$$

P_{Pi} , P_{Li} = i 時間の太陽光発電電力量、需要電力量 [kWh]

東北2015年モデル：最大需要電力 1kW、
 年間需要電力量 5,782kWh、負荷率66.0%
 太陽光発電：最大 4.54kW、年間発電電力量 5,782kWh、
 蓄電設備 1,011kWh（年間需要電力量比17.5%）

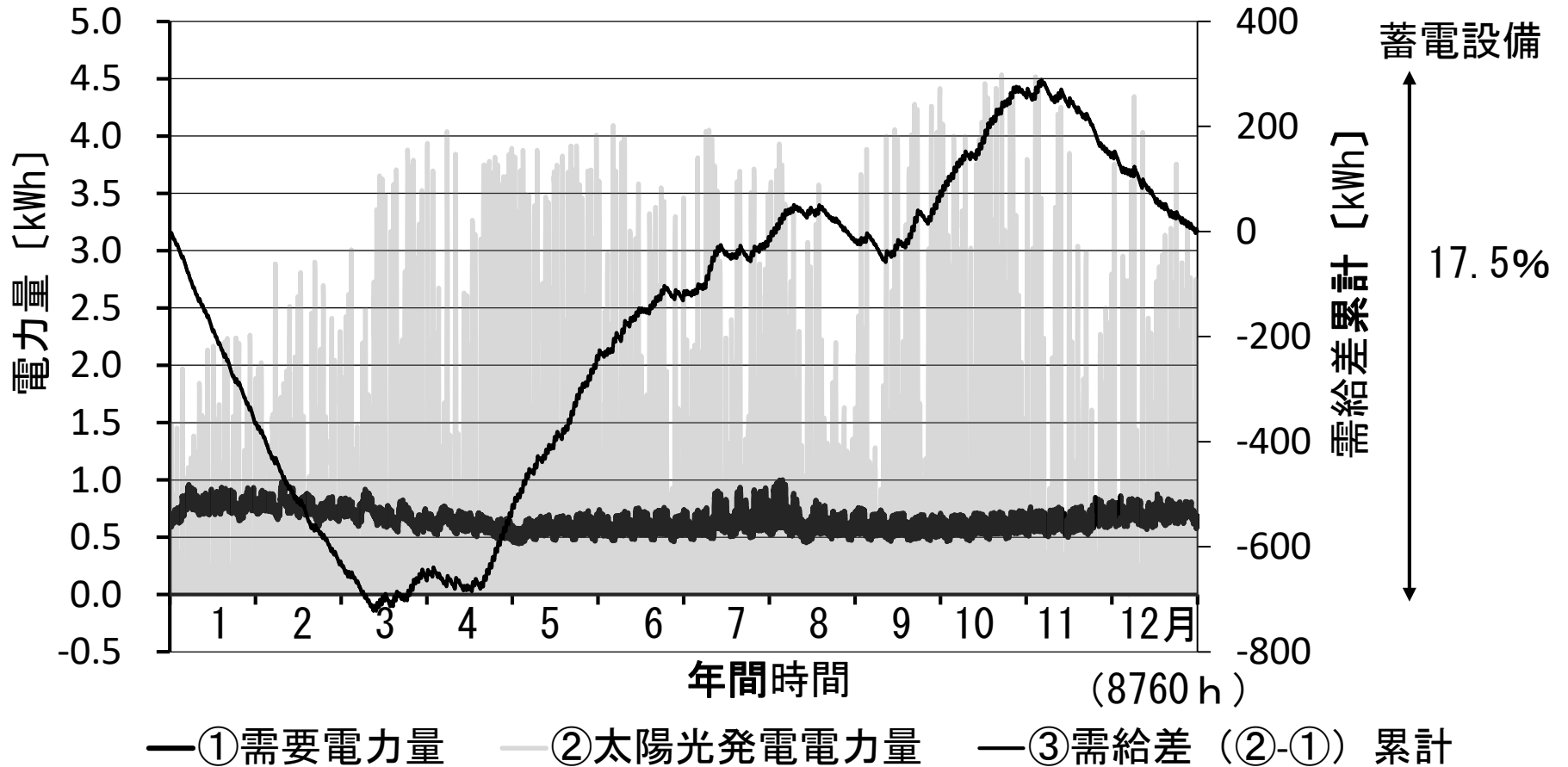


図1 太陽光発電供給モデル (1)

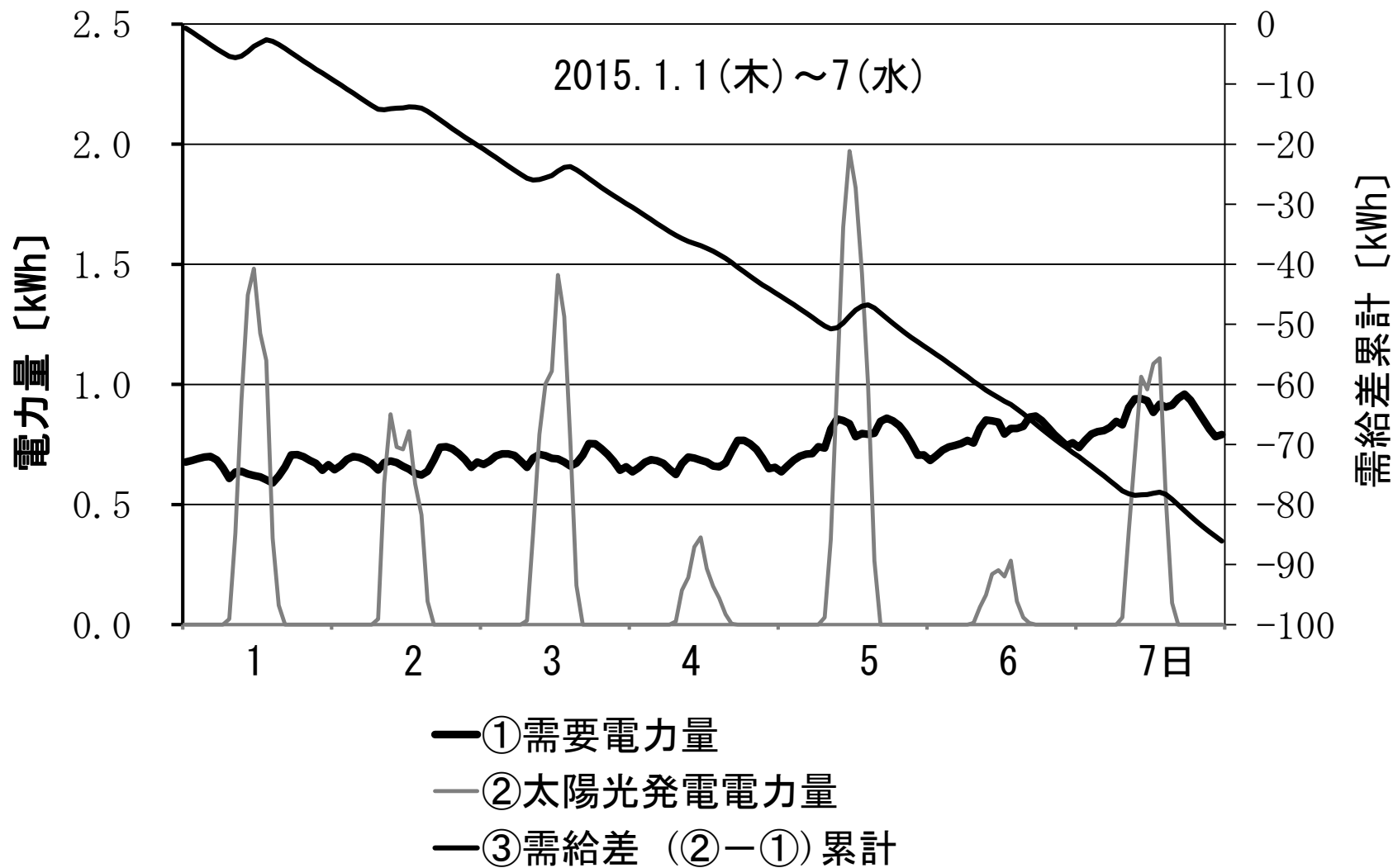


図2 太陽光発電供給モデル (2)

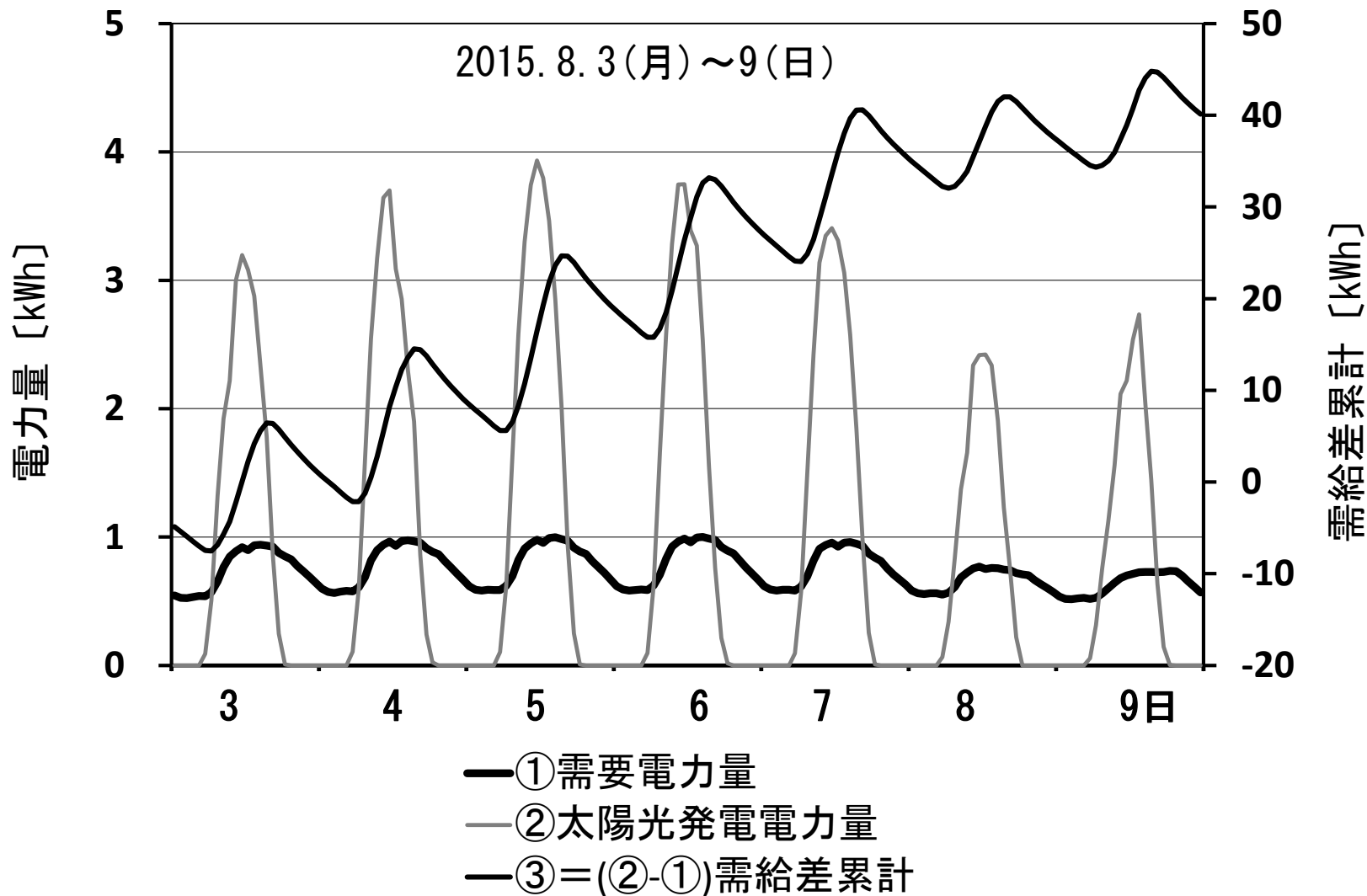
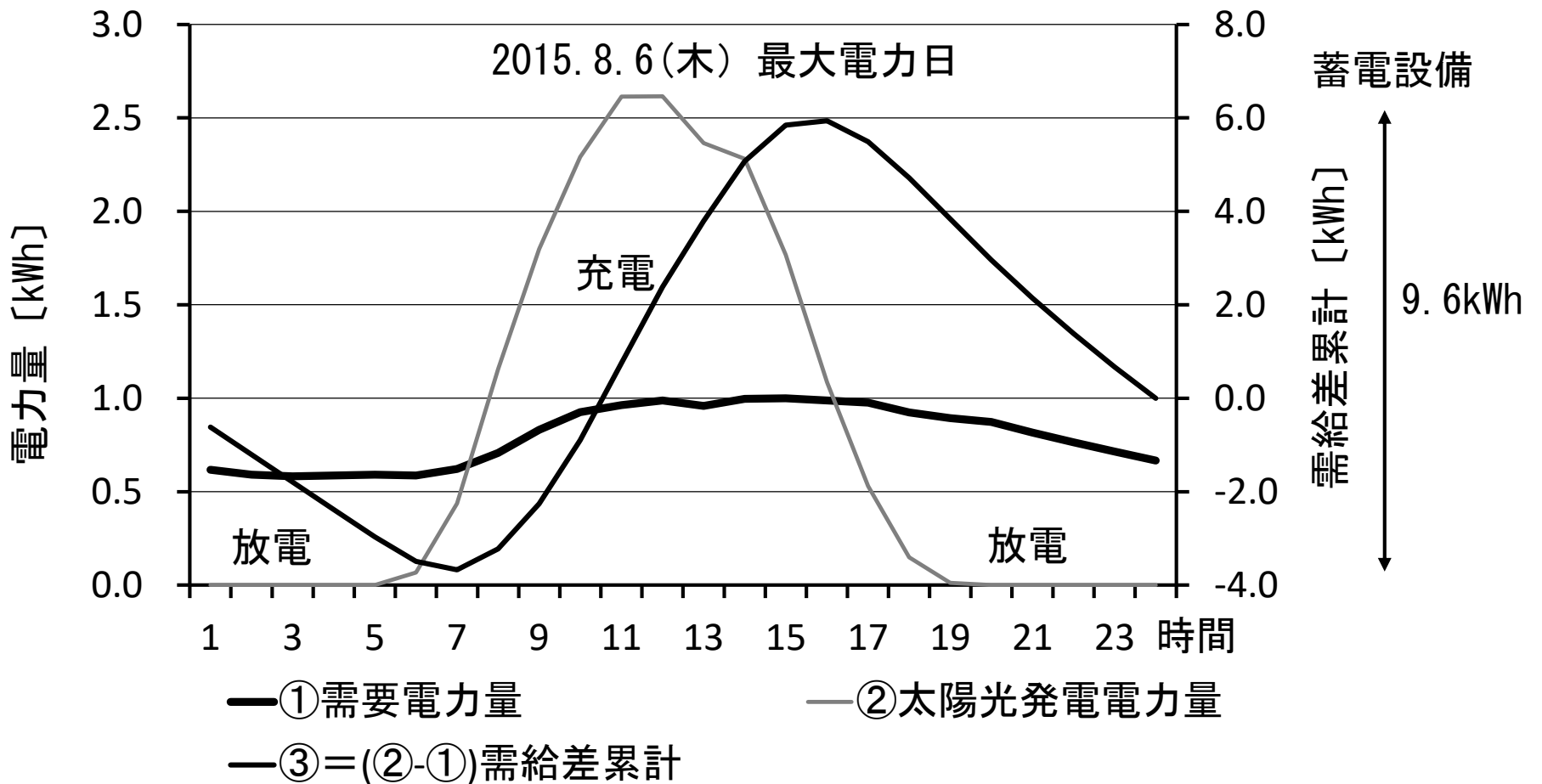


図3 太陽光発電供給モデル (3)



- ・ 日間太陽光発電電力量を需要電力量に等しくなるように圧縮
- ・ 充電電力量=放電電力量=9.6kWh=日間需要電力量19.2kWhの50%

図4 太陽光発電供給モデル (4)

(2) 日射量と発電電力量による算定

①東北エリアでの検証

a. 東北エリアで次の需給モデルを設定する。

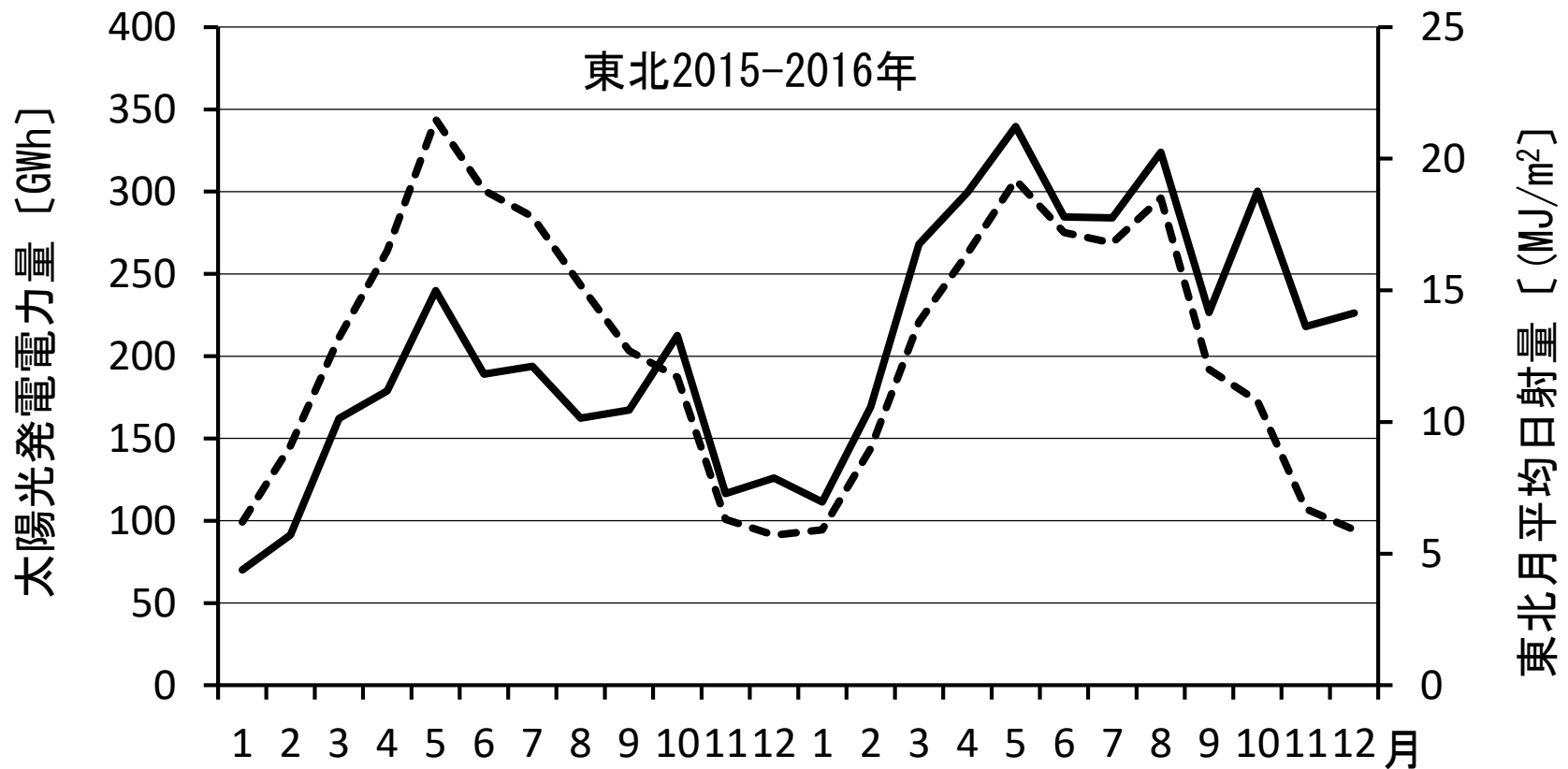
A. 実績モデル：年間8,760時間の需給シミュレーションを月別にまとめた需給バランス

B. 日射量推定モデル：月別発電電力量相当の需要と日射量から推定した太陽光発電電力量による需給バランス

b. BモデルがAモデルに近いことを検証する。

②全国各地域での概算

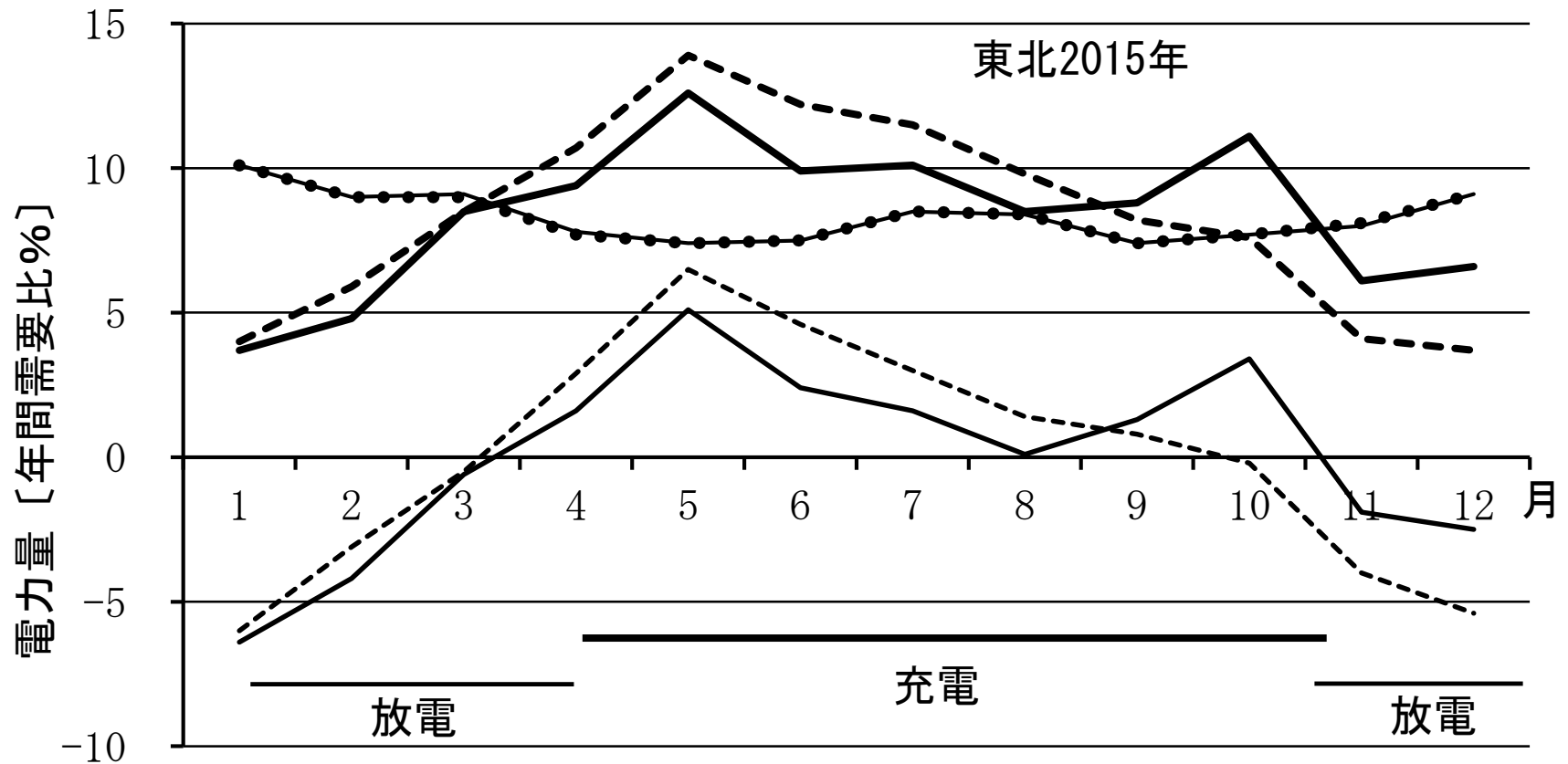
各地域の月別日射量推定モデルから、蓄電設備容量を概算する。



—①太陽光発電 ---②日射量(日積算値)

①②相関係数 : 2015年 0.84, 2016年 0.83

図5 太陽光発電と日射量



- ①実績需要 — ②実績推定発電 — ③=②-①
 …… ④発電推定需要 - - - ⑤日射量推定発電 - - - ⑥=⑤-④

図6 太陽光発電需給バランス

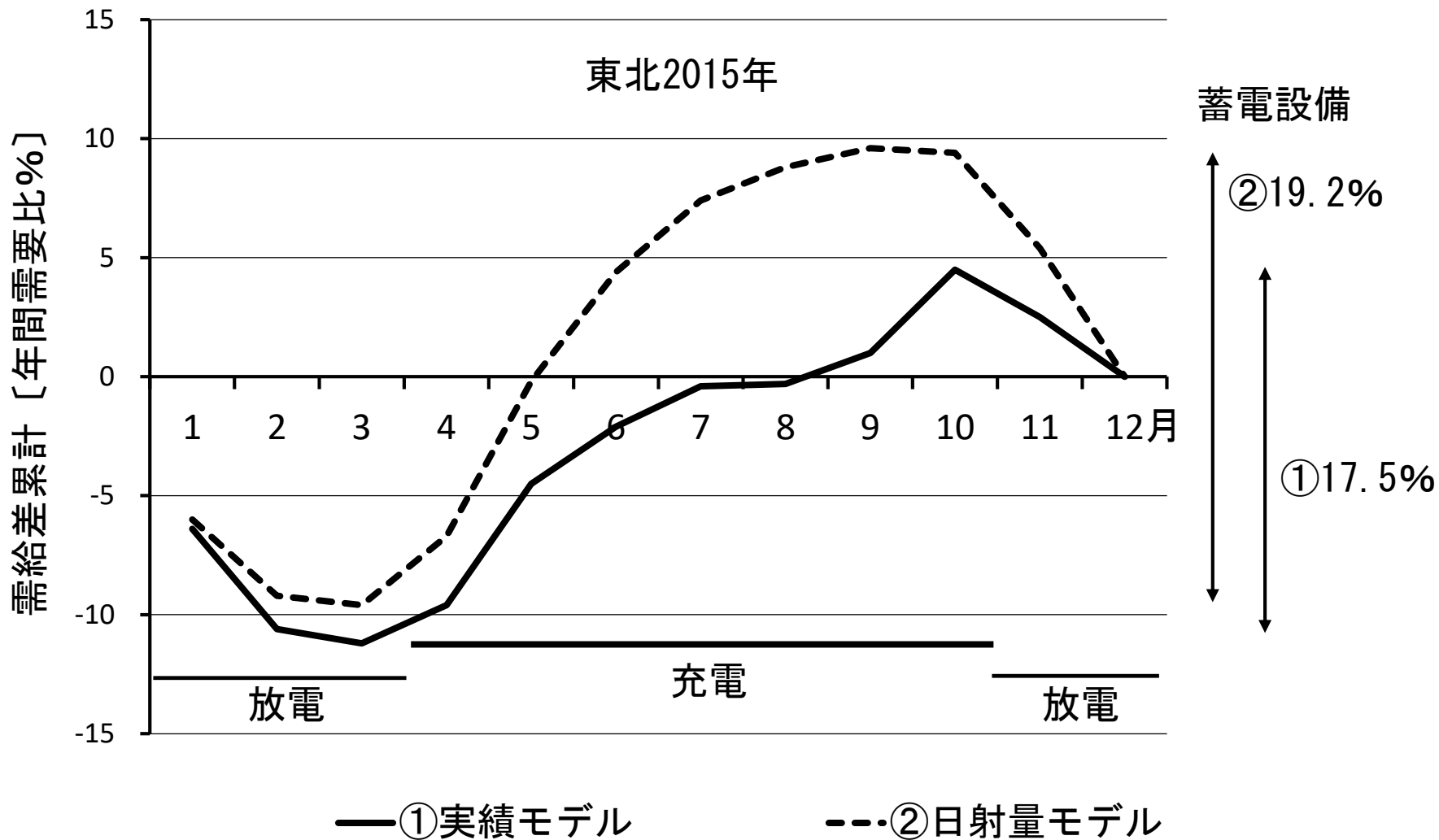


図7 太陽光発電供給需給差累計

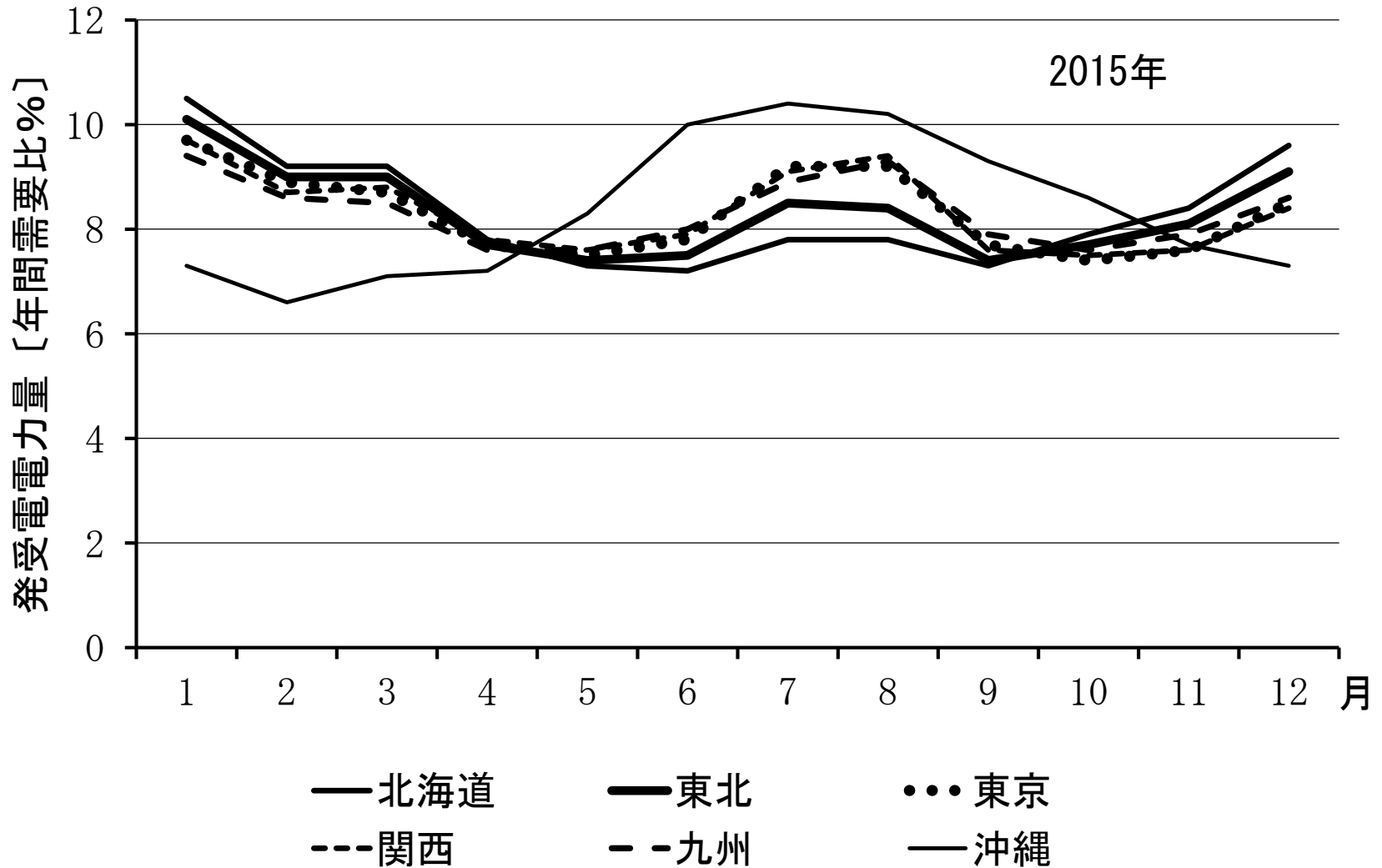


図8-1 各地域の月別発受電電力量

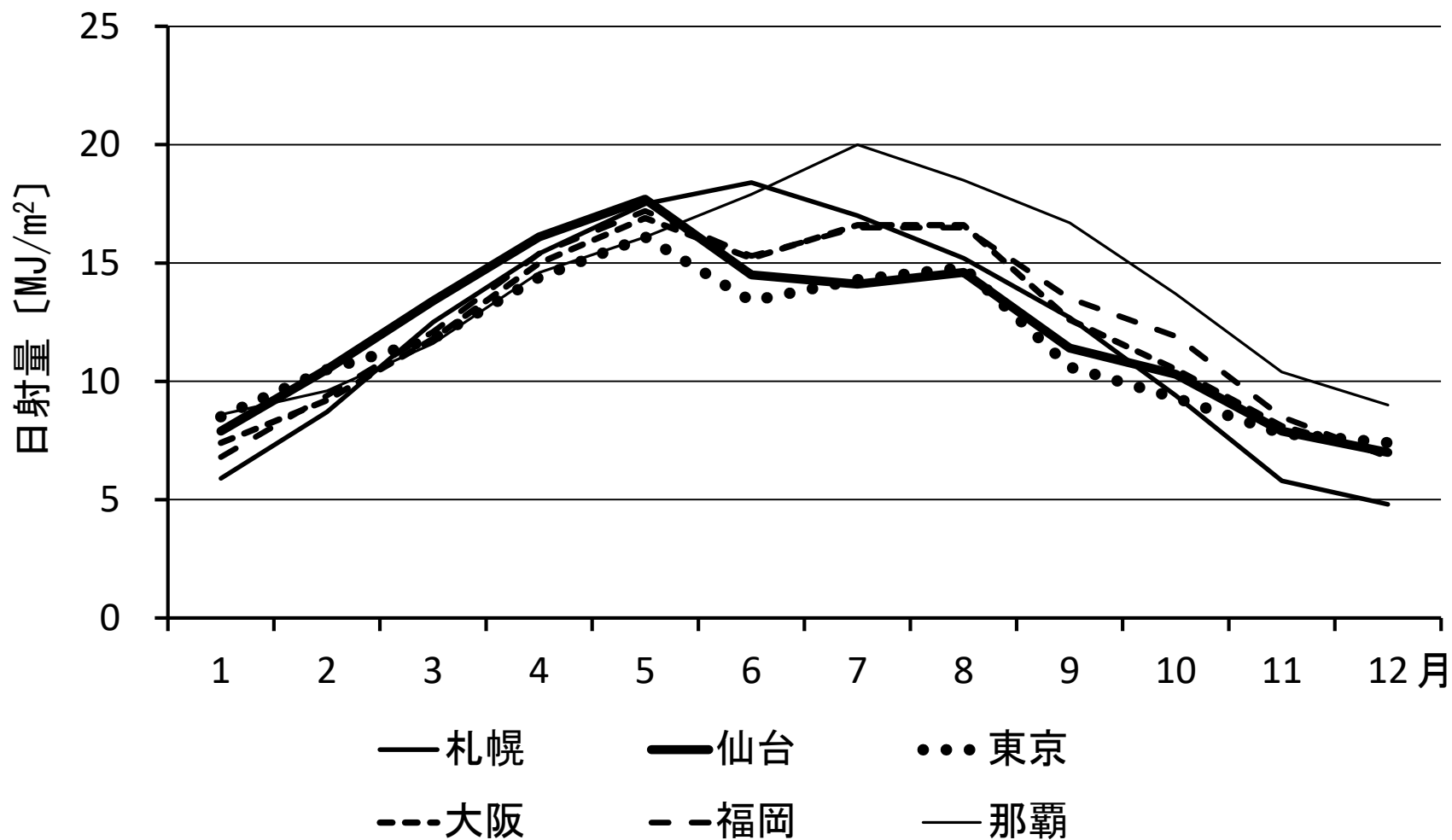


図8-2 各地域の日積算日射量の月別平年値

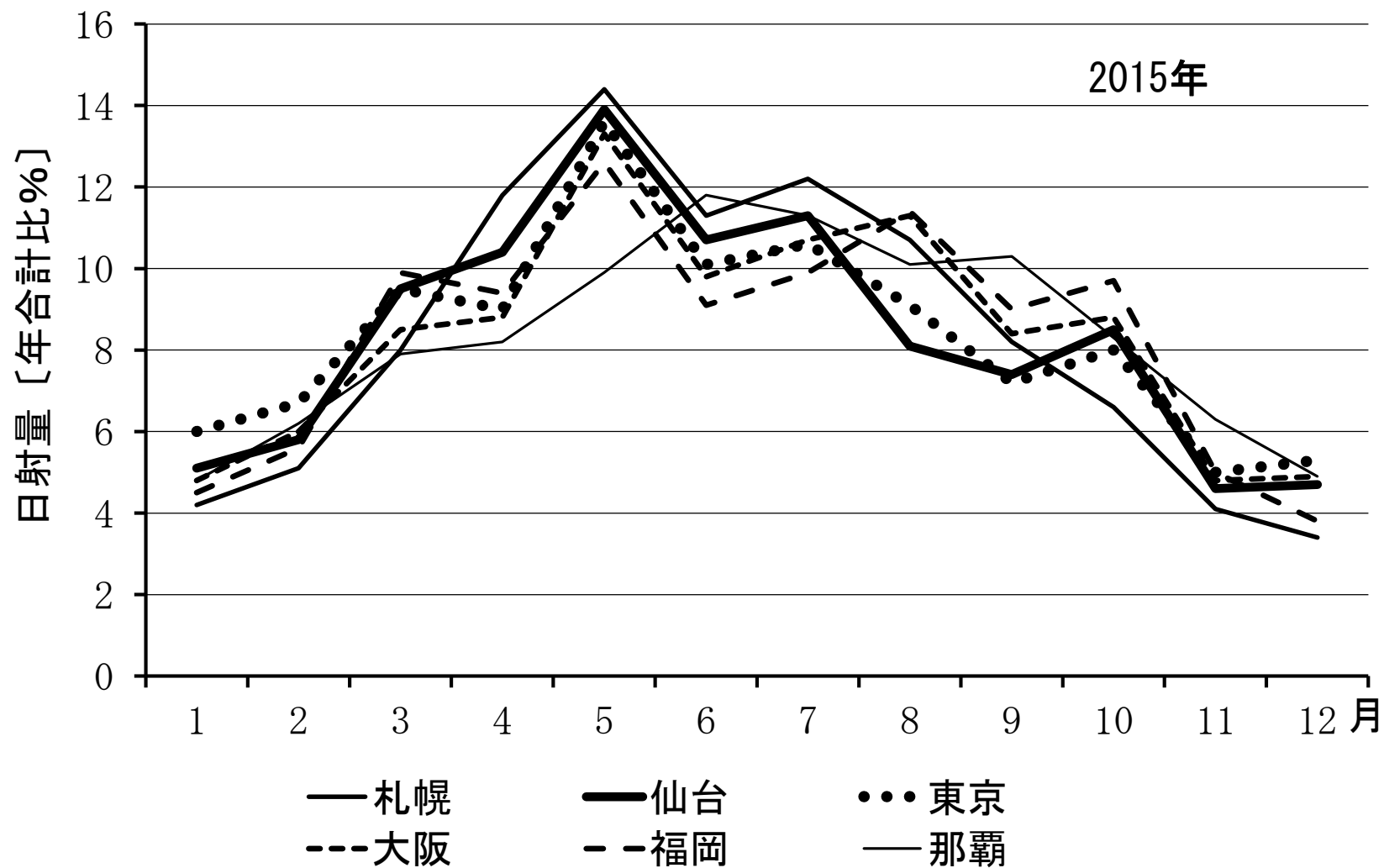


図8-3 各地域月別日射量の年合計比

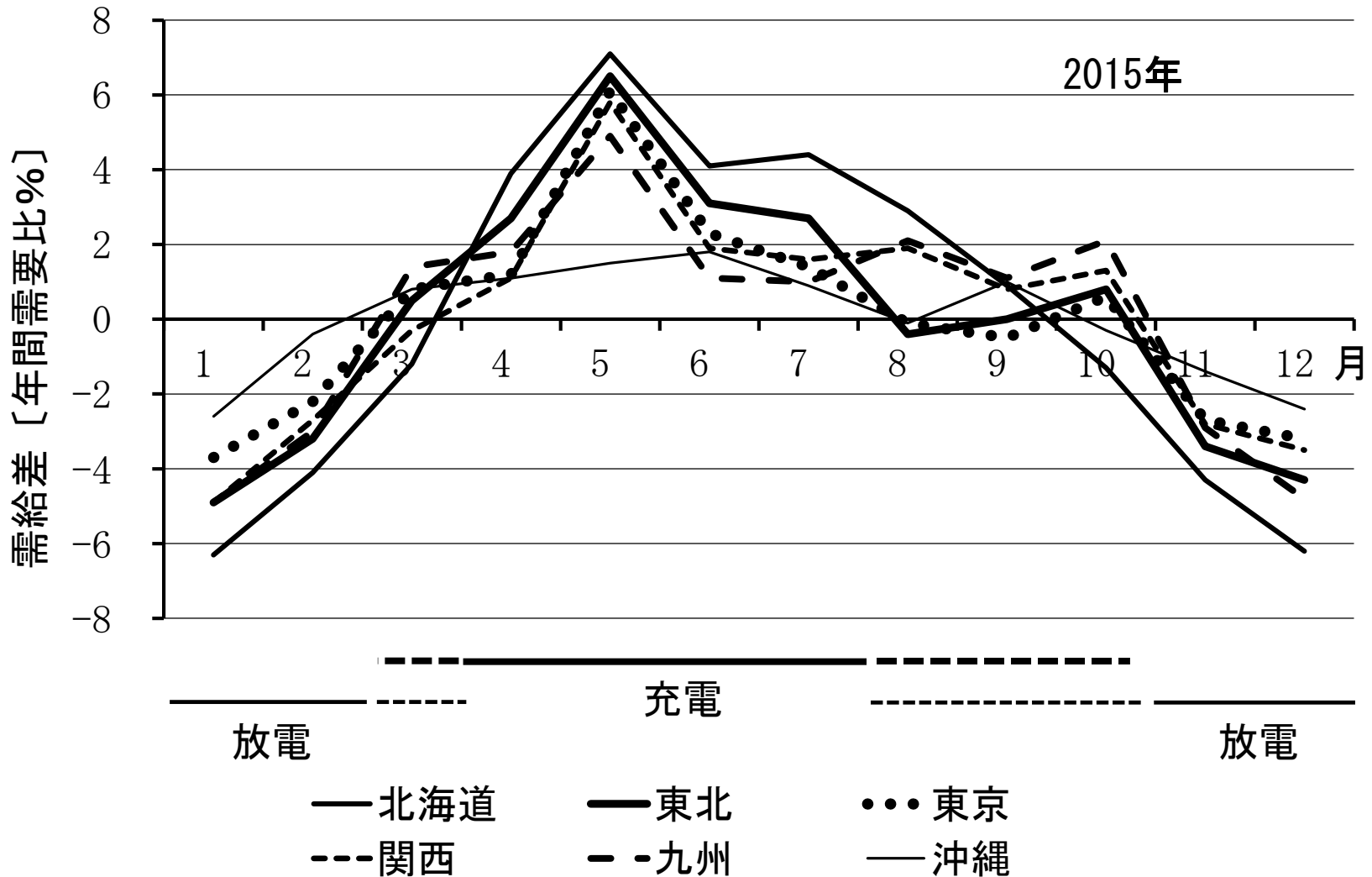


図8 各地域太陽光発電供給需給差

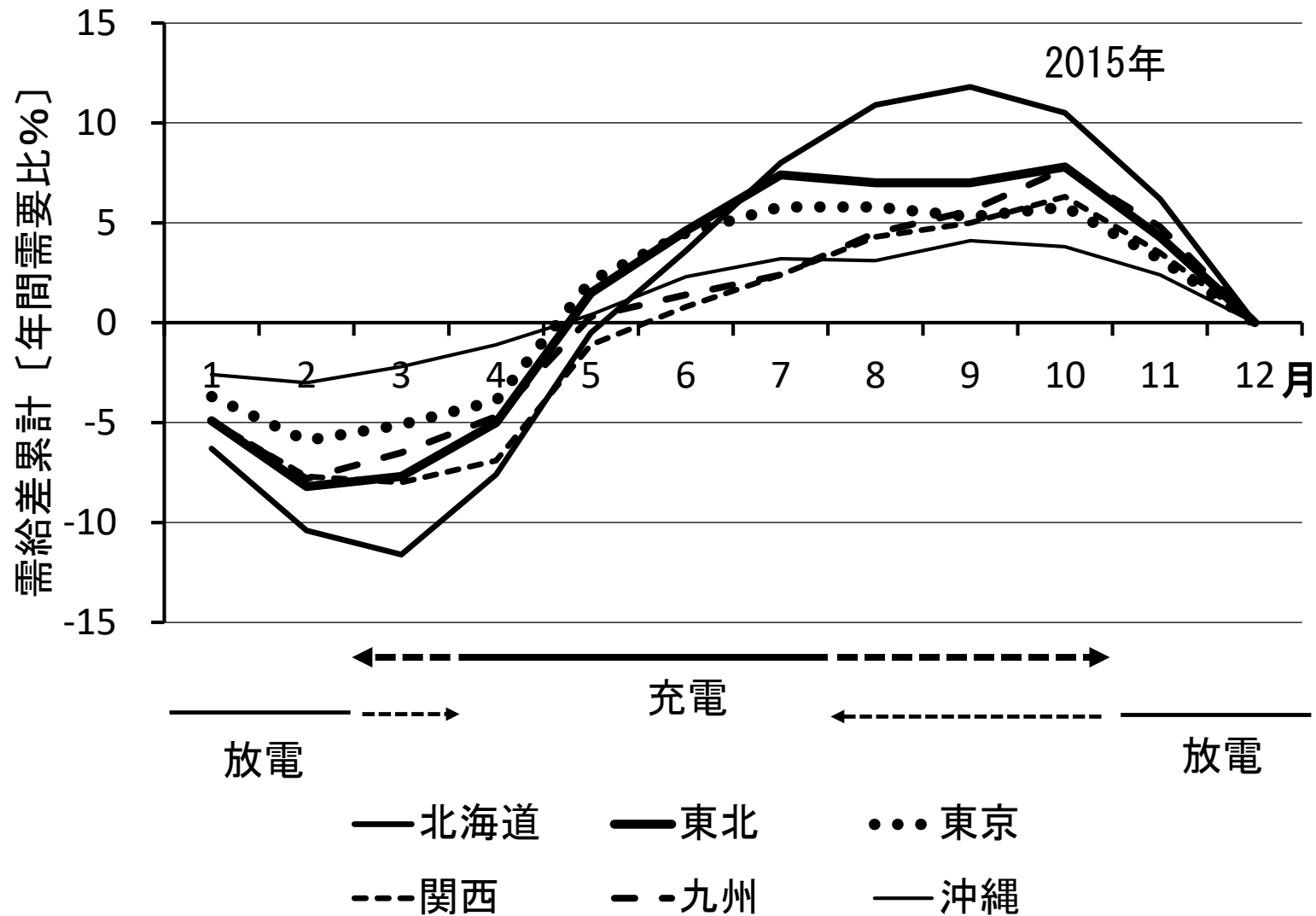


図9 各地域太陽光発電需給差累計

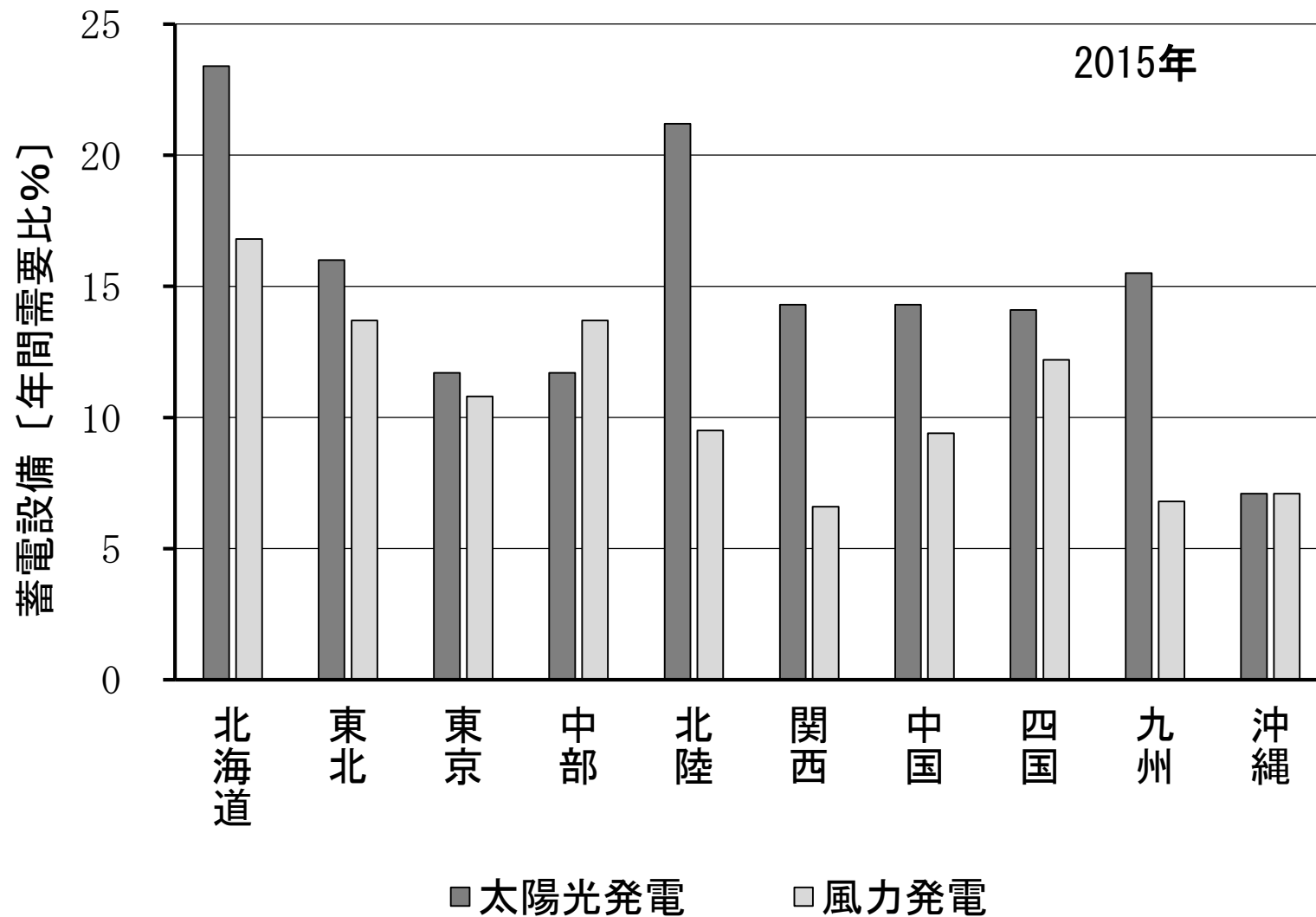


図10 太陽光、風力発電用蓄電設備

3. 風力発電と蓄電設備の併用供給時の必要設備

(1) シミュレーションによる算定 (太陽光発電と同様手法)

東北2015年モデル：最大需要電力 1kW、

年間需要電力量 5,782kWh

風力発電：最大 2.28kW、年間発電電力量 5,782kWh

蓄電設備：757kWh (年間需要電力量比13.1%)

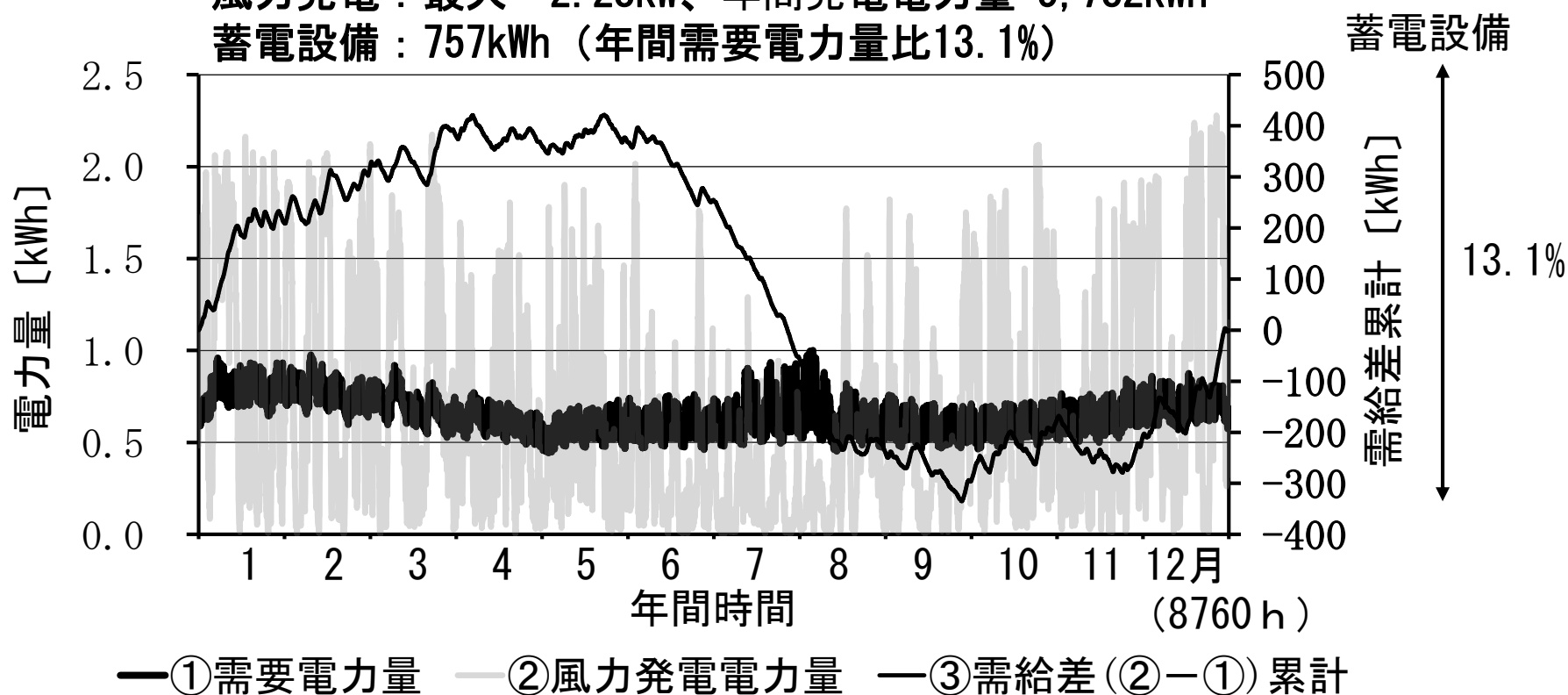


図11 風力発電供給モデル (1)

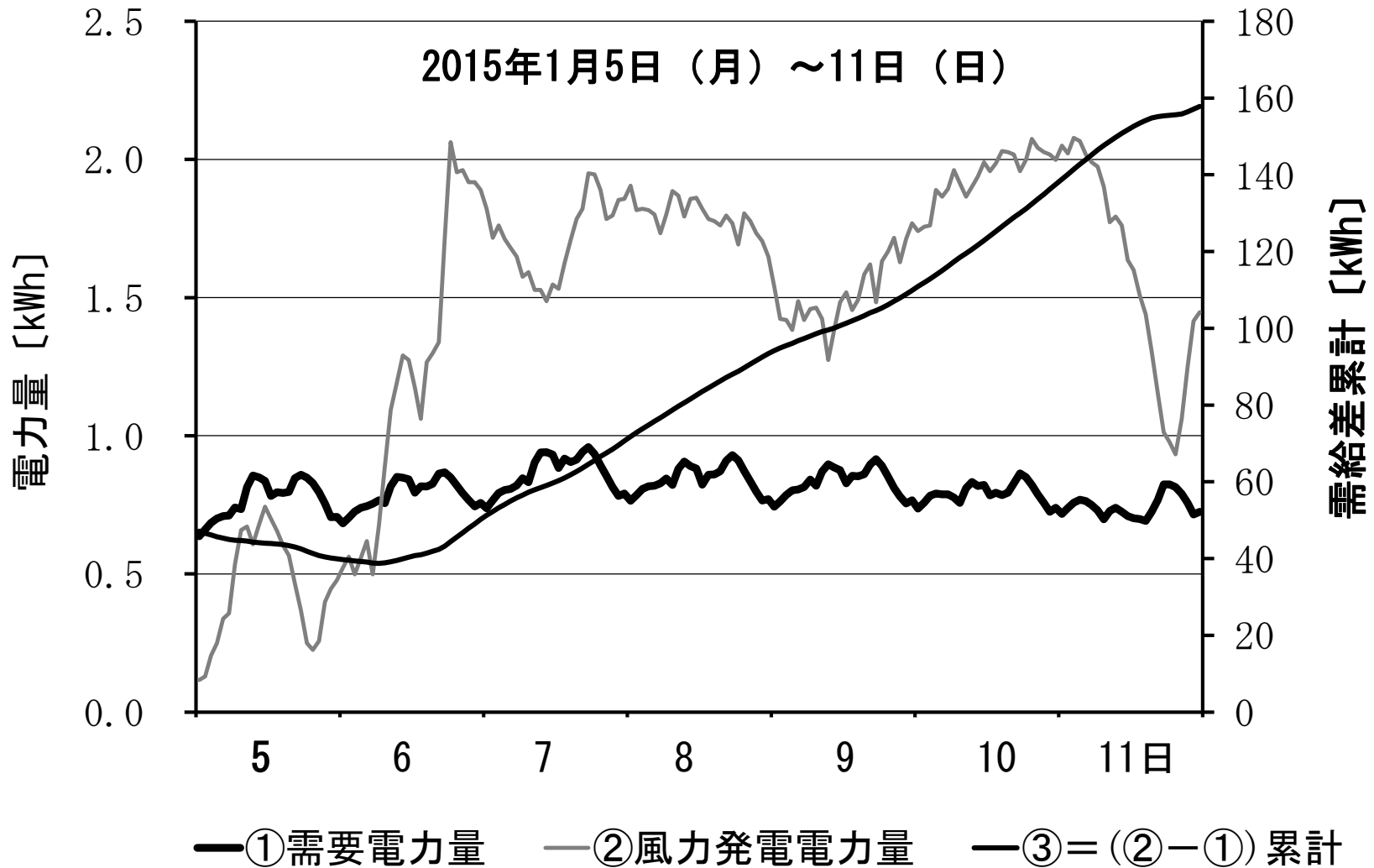


図12 風力発電供給モデル (2)

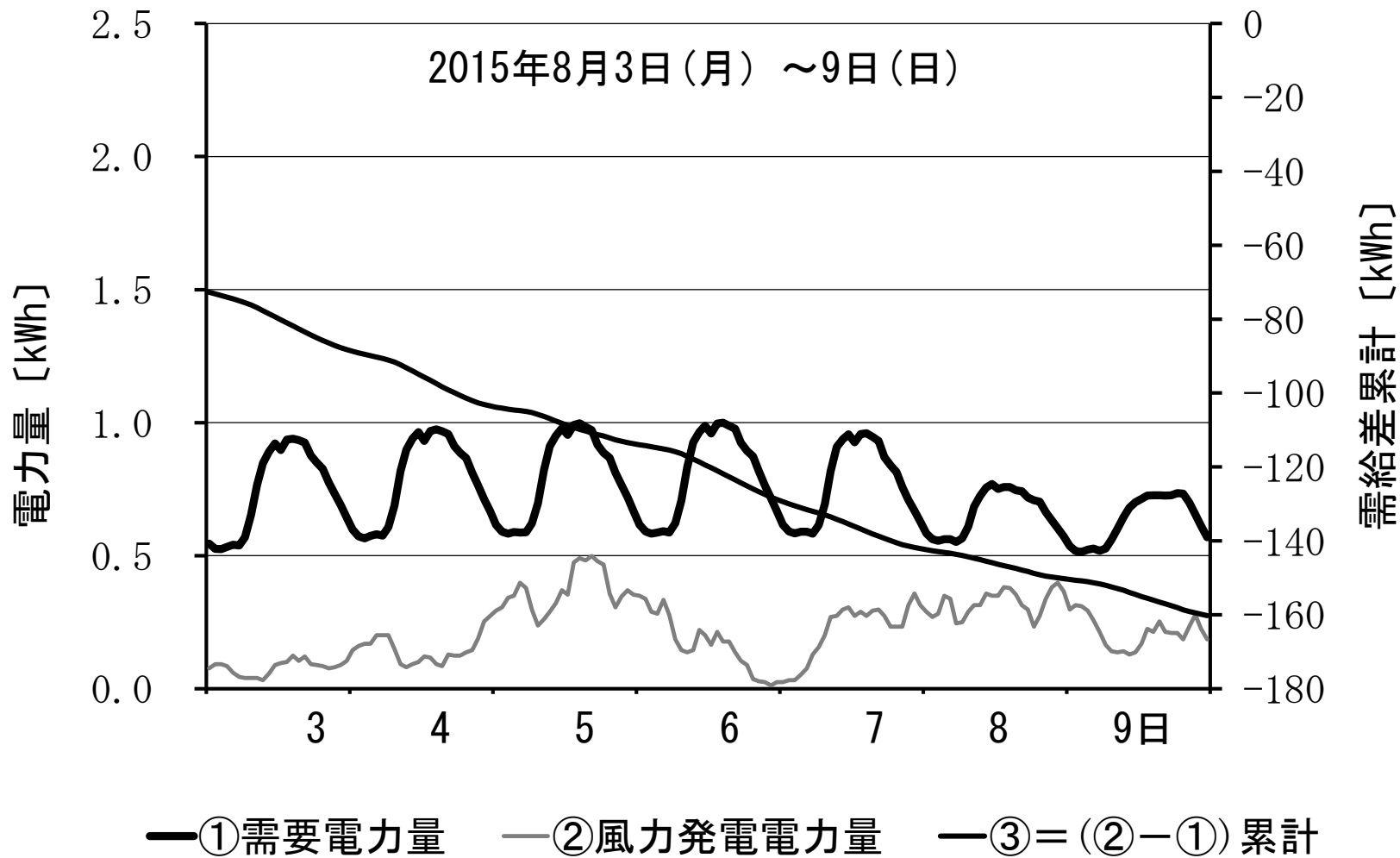


図13 風力発電供給モデル (3)

(2) 風速と発電電力量による算定

①東北エリアでの検証

a. 東北エリアで次のモデルを比較する。

A. 実績モデル：年間8760時間のシミュレーションを月別にまとめたもの

B. 風速推定モデル：月別発電電力量相当の需要と風速から推定した風力発電電力量（注）による需給バランス

b. BモデルがAモデルに近いことを検証する。

②全国各地域での検証

各地域の月別風速推定モデルから、蓄電設備容量を概算する。

（注）月別平均風速から風力発電電力量の概算

・1秒間に風車を通過する空気の質量Mは、

$$M = \rho AV$$

ここに、 ρ =空気の密度、A=風車の受風面積、V=風速（図14-1）

・1秒間に風車の受ける空気の運動のエネルギーすなわち風力エネルギー P_w は、

$$P_w = (1/2) MV^2 = (1/2) \rho AV^3$$

従って、風力発電電力も大略、風速の3乗に比例する。

・年間発電電力量を月別平均風速の3乗に比例配分して月別風力発電電力量を求める。

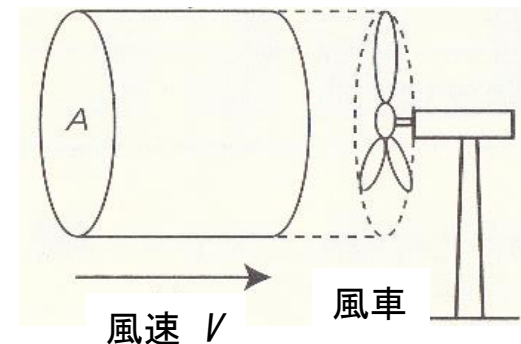
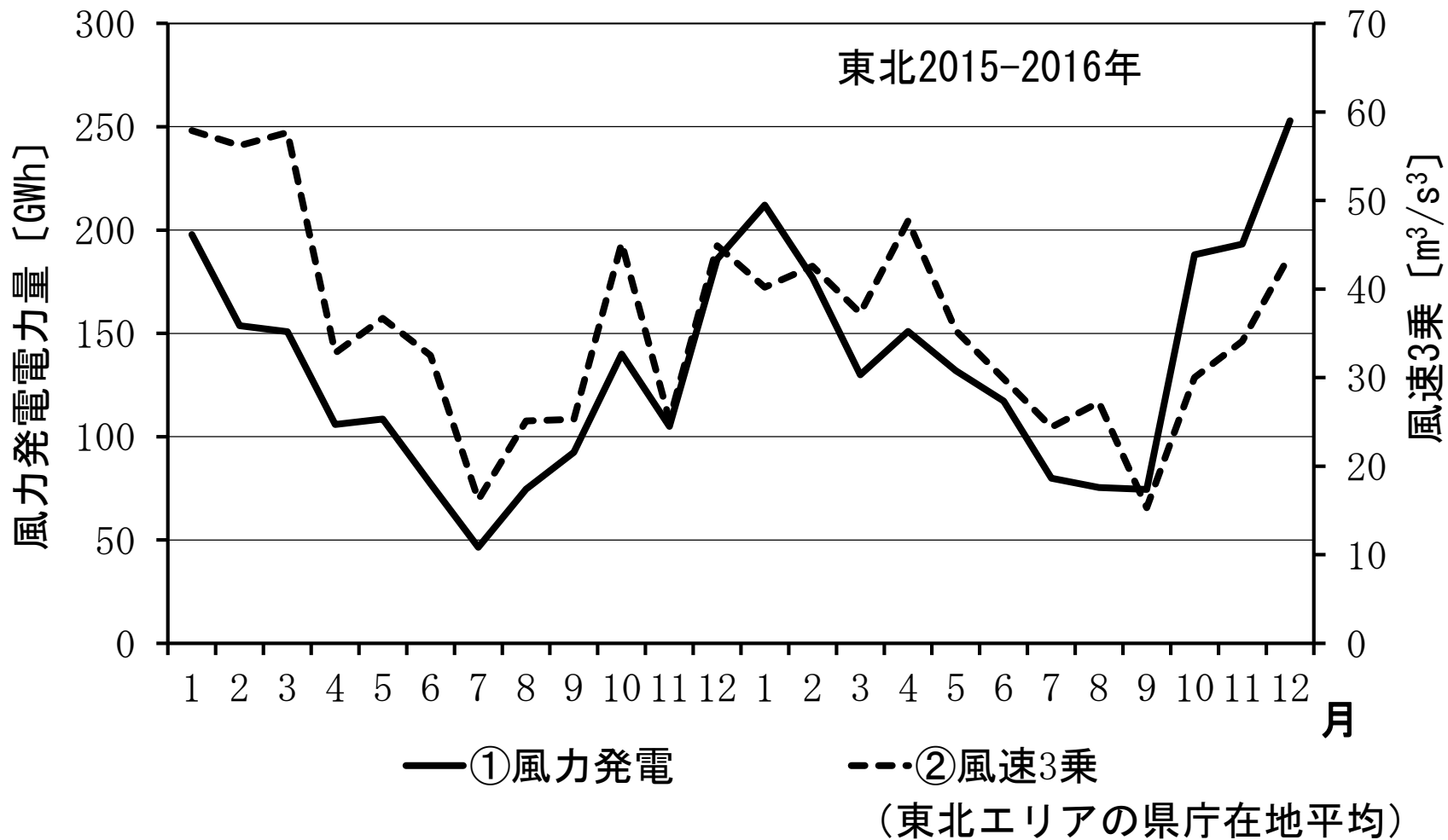


図14-1 風力エネルギー



①②相関係数：2015年 0.89 2016年 0.71

図14 風力発電と風速

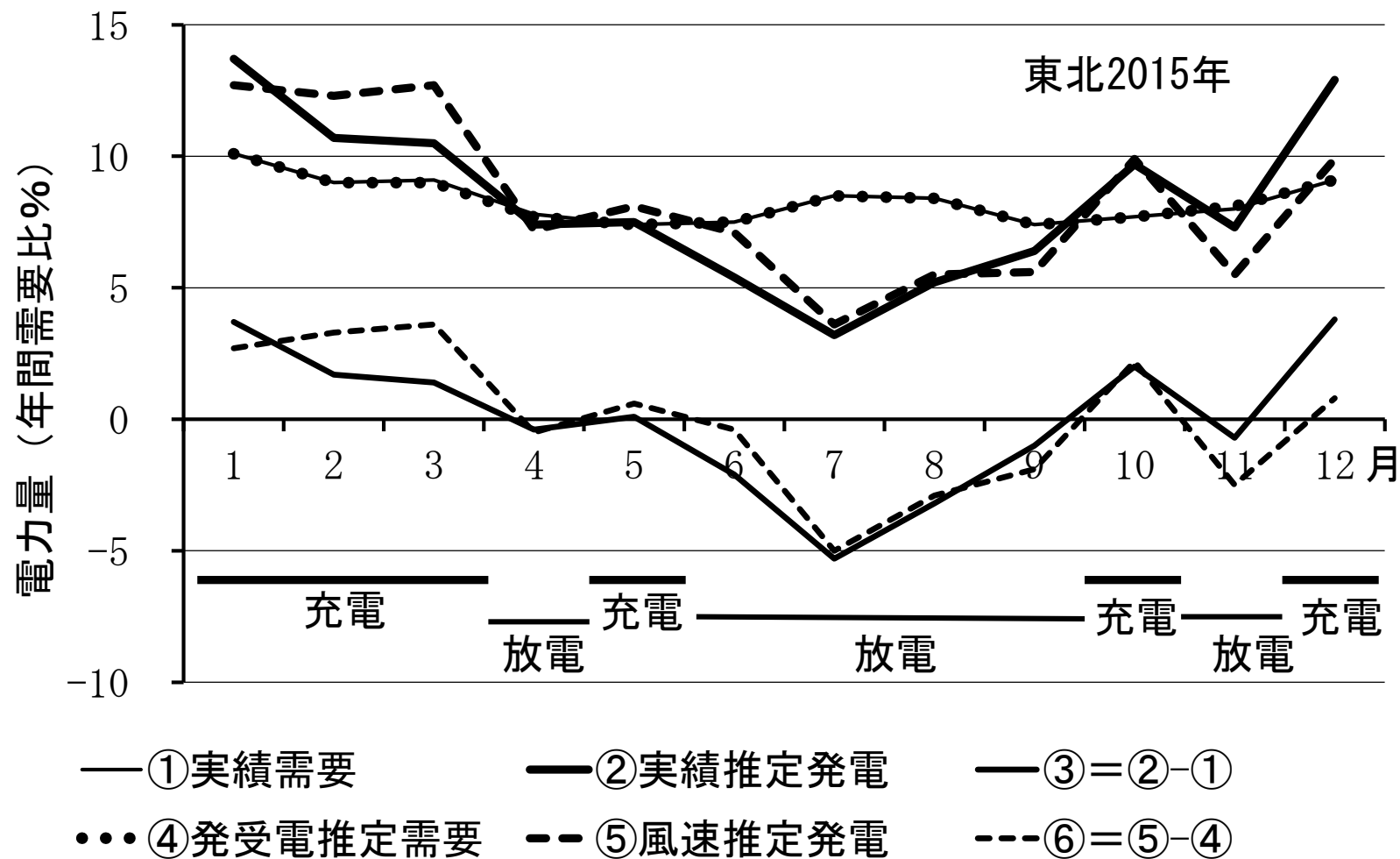


図15 風力発電需給バランス

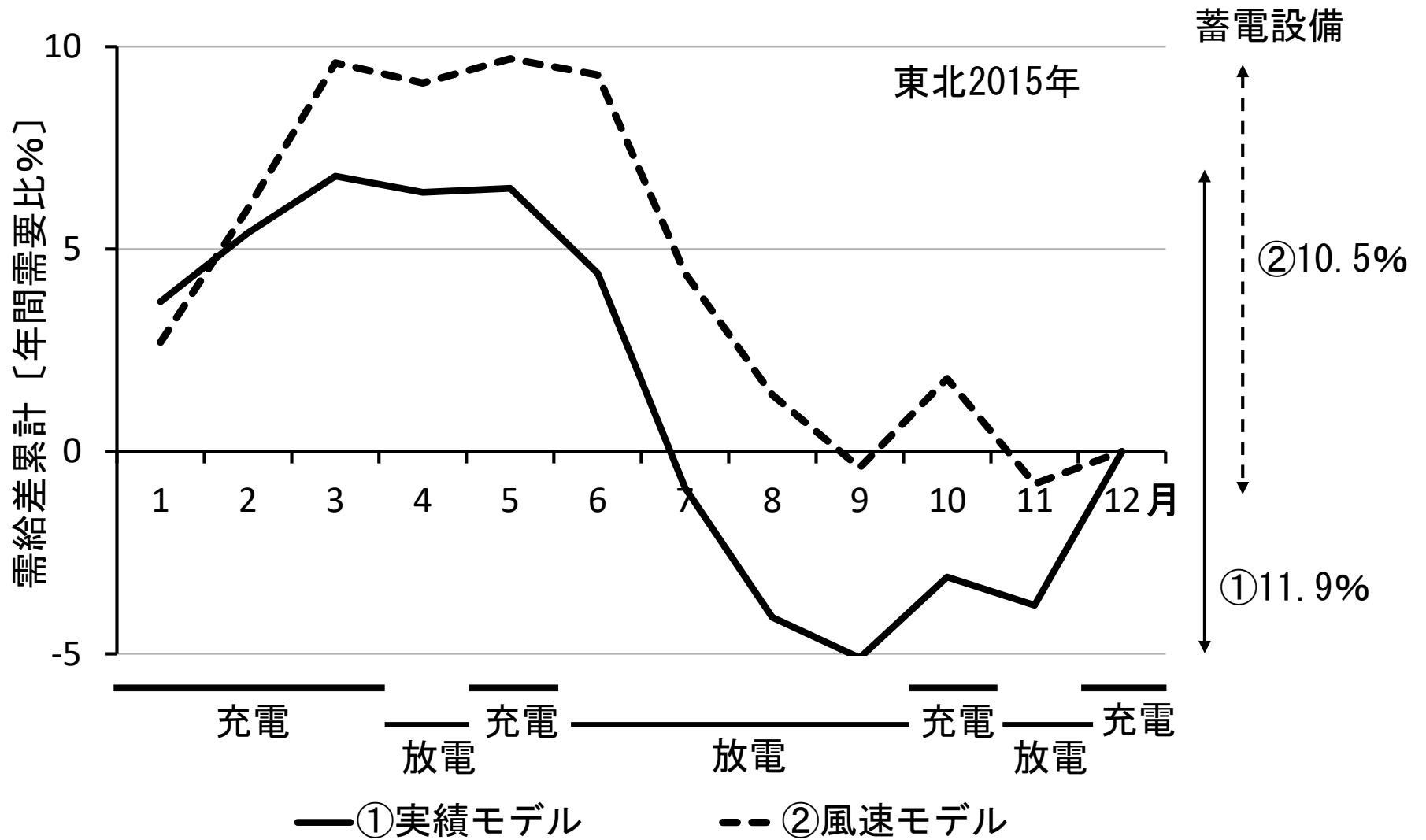


図16 風力発電需給差

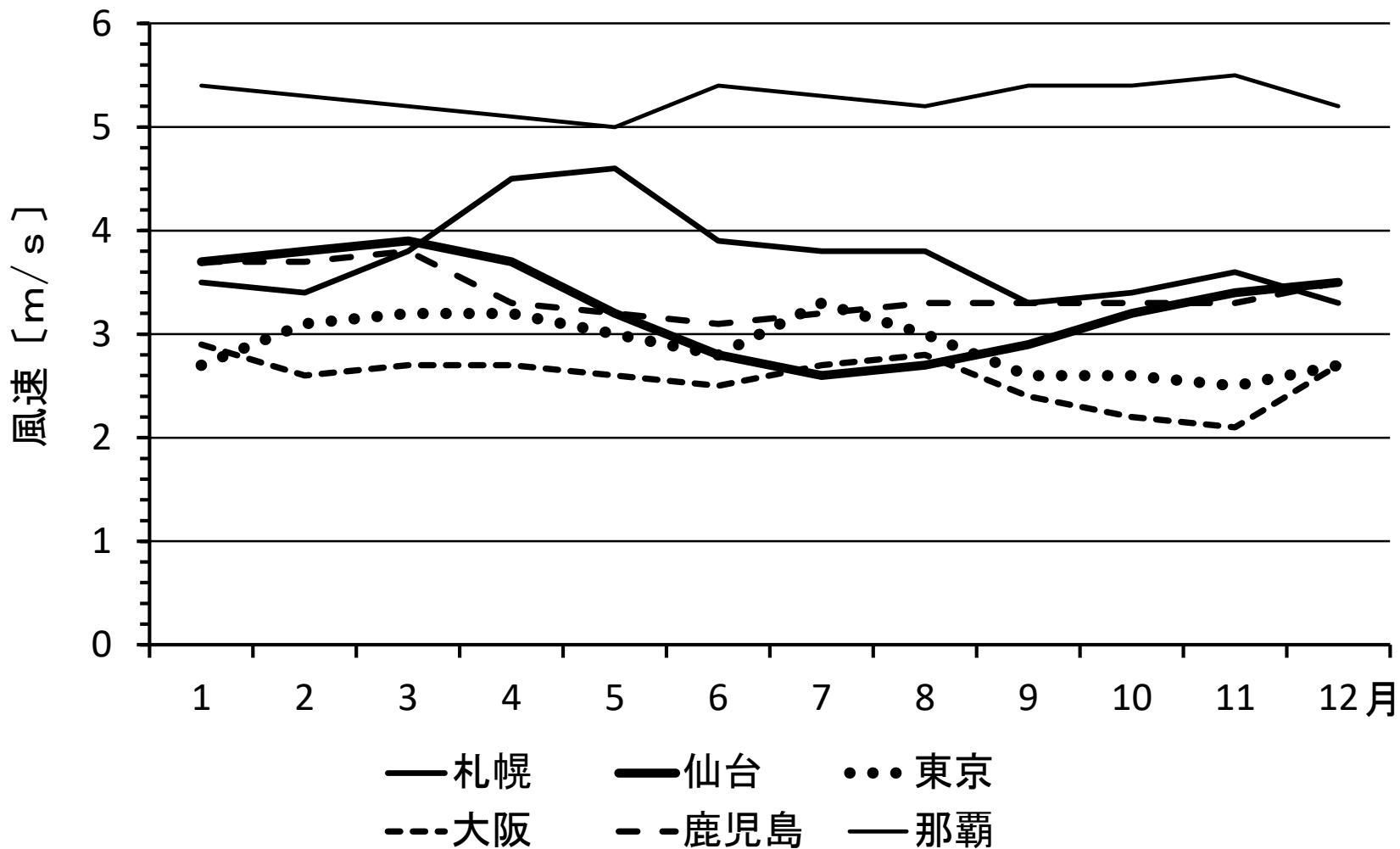


図17-1 各地域の平均風速の月別平年値

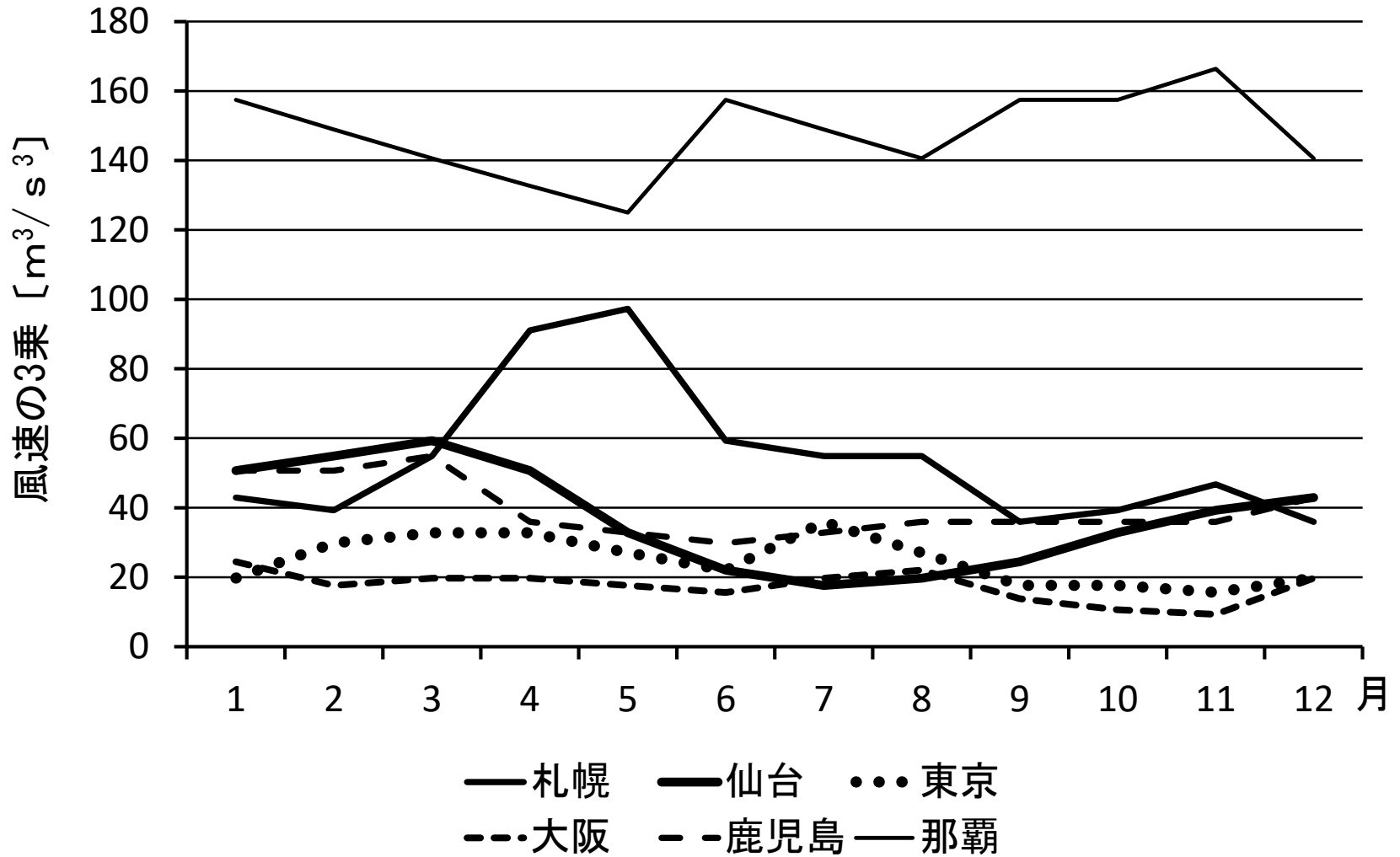


図17-2 各地域の平均風速の3乗の月別平年値

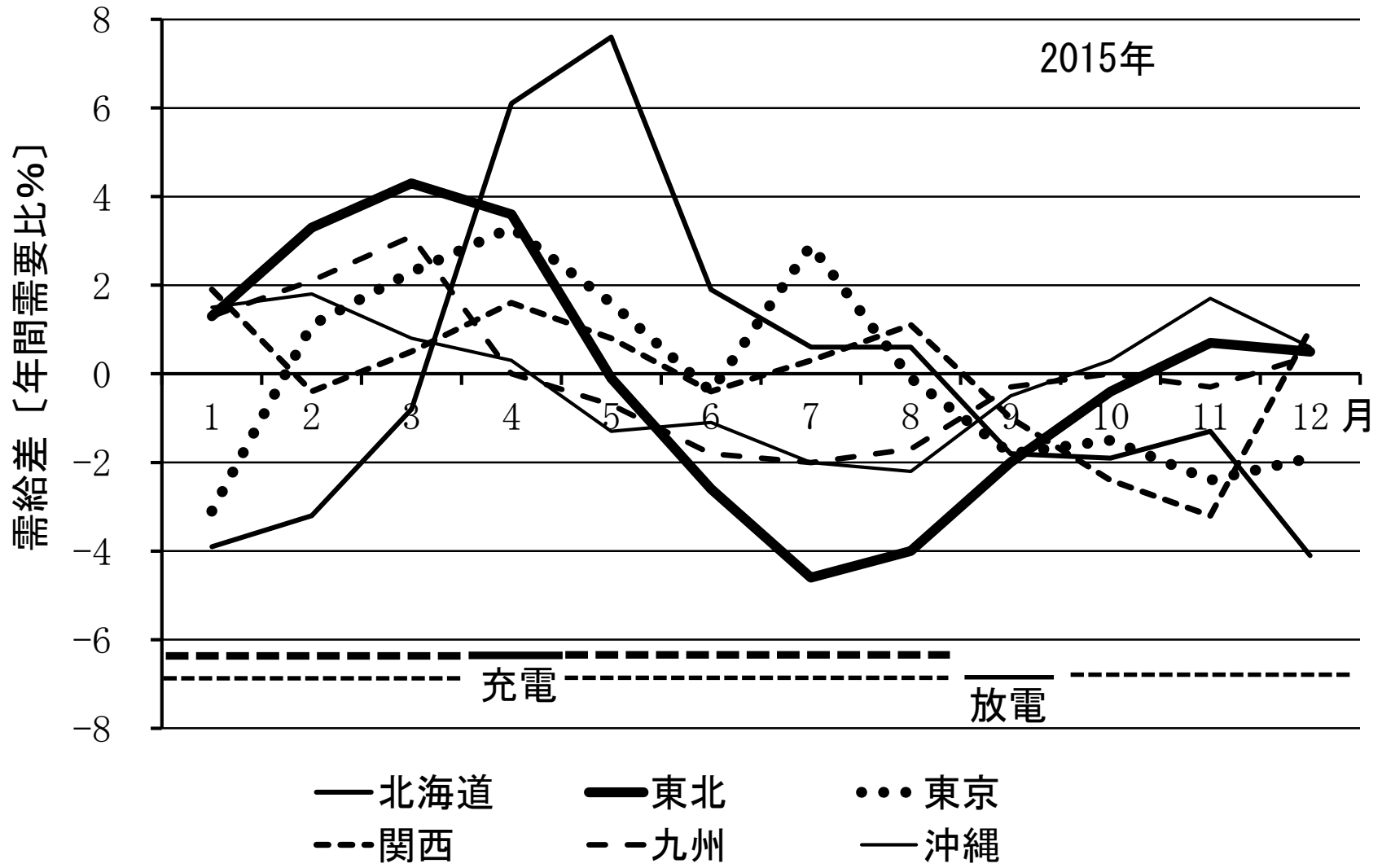


図17 各地域風力発電需給差

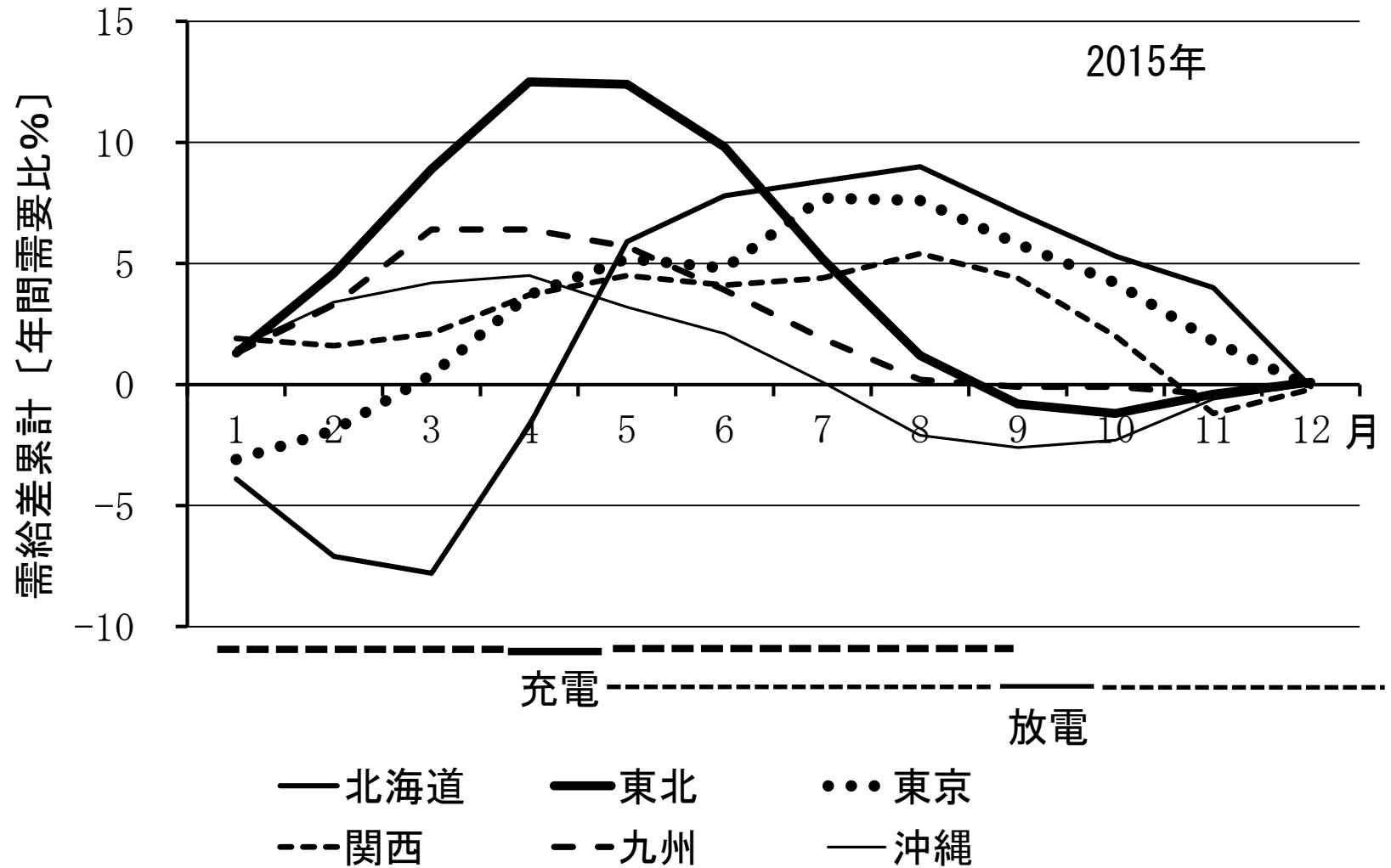


図18 各地域風力発電需給差累計

4. 太陽光、風力発電と蓄電設備併用時の供給コスト

(1) 算定方法

- ・ 最大電力 1kW、負荷率65%の電力需要に供給する設備とコストを算定する。
- ・ 太陽光、風力発電のモデルプラントの建設費、発電コストをベースとし、蓄電設備の年間費用は、太陽光、風力発電の建設費に対する蓄電設備の建設費の割合で増加するものとする。
- ・ 算定条件

発電	太陽光発電	風力発電
モデルプラント	メガソーラー 出力 1MW	陸上 出力 30~100MW
利用率 [%] ①	14	20
建設単価 [万円/kW] ①	29.4	28.4
発電コスト [円/kWh] ①	24.2	21.6
蓄電設備容量 [%] [日分] ②	15 (55)	10 (37)
蓄電設備建設単価 [万円/kWh] ③	4~10	4~10

①総合エネルギー調査会、長期エネルギー需給見通し小委員会、発電コスト検証ワーキンググループ報告書 (2015)

②年間需要比 [%] (平均需要日数)

③辰巳国昭：「蓄電池の概要と大型化に向けた開発動向」電学誌Vol. 134, No. 11 (2014)

表1 太陽光、風力発電と蓄電設備併用時の供給コスト

	太陽光発電			風力発電		
	設備容量	建設費 万円	コスト単価*	設備容量	建設費 万円	コスト単価*
発電設備	4.64 kW	136	1.0	3.25 kW	92	1.0
蓄電設備	1,110.3 kWh	4,441 ~11,103	32.6 ~81.4	569.4 kWh	2,278 ~5,694	24.7 ~61.7
合計	—	4,577 ~11,239	33.6 ~82.4	—	2,370 ~5,786	25.7 ~62.7

* モデルプラントの発電コスト単価の倍数

5. 太陽光、風力発電と火力発電併用時の供給コスト

・ 供給コストの算定方法

- ① 東北エリアの2015年の年間 8,760時間の需給シミュレーションによって算定
- ② 電力需要：実績需要を年間最大電力が 1kWとなるように相似的に圧縮。
- ③ 火力発電：バックアップ用として、設備容量 1kWの火力発電を併用。
火力発電の最低出力は、設備容量の30%一定。
- ④ 太陽光発電の導入：東北エリアの2015年の太陽光発電実績を相似的に圧縮して、導入率を0から100%まで増加した時の需給バランス、供給コストを求める。
電力需要には太陽光発電からの供給を優先し、火力発電を最低出力まで抑制しても余剰電力が発生する場合は、太陽光発電の出力を抑制する。
太陽光発電の導入率：年間需要電力量に占める太陽光発電可能電力量の比率
- ⑤ 風力発電の導入：④の太陽光発電の導入時と同様に、風力発電導入時の需給バランス、供給コストを求める。

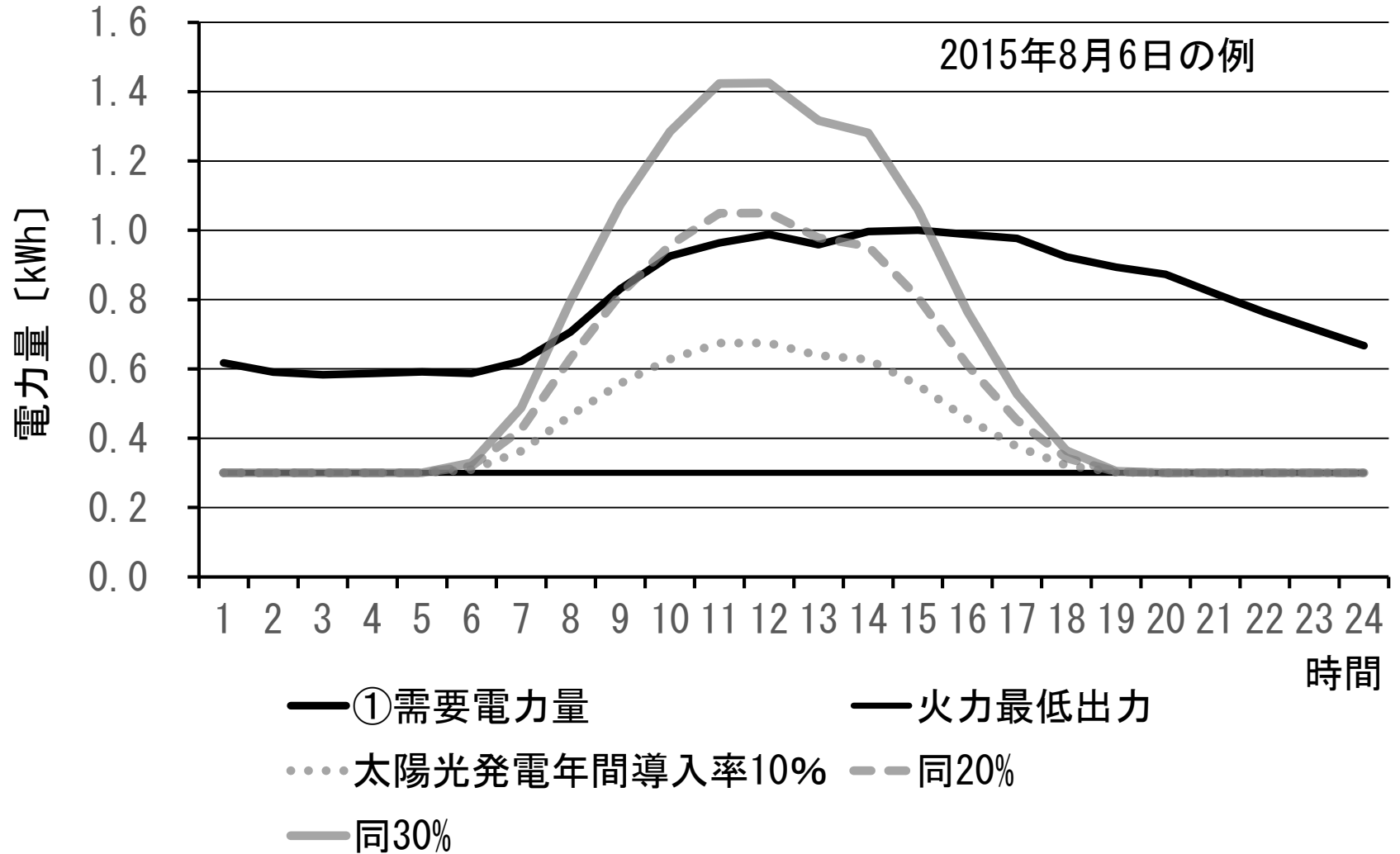


図19-1 太陽光発電導入率と余剰電力例

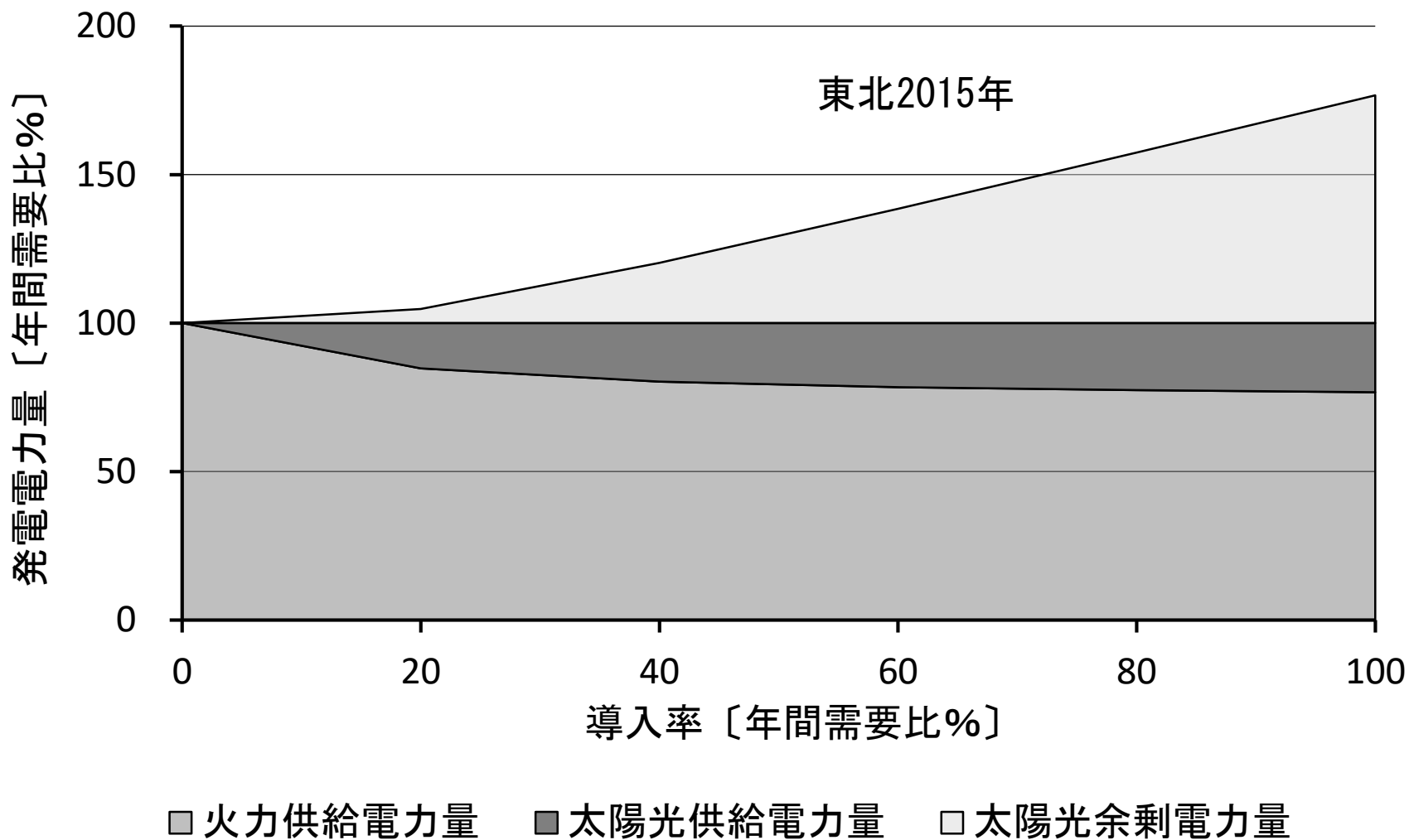


図19 太陽光発電の導入率と余剰率

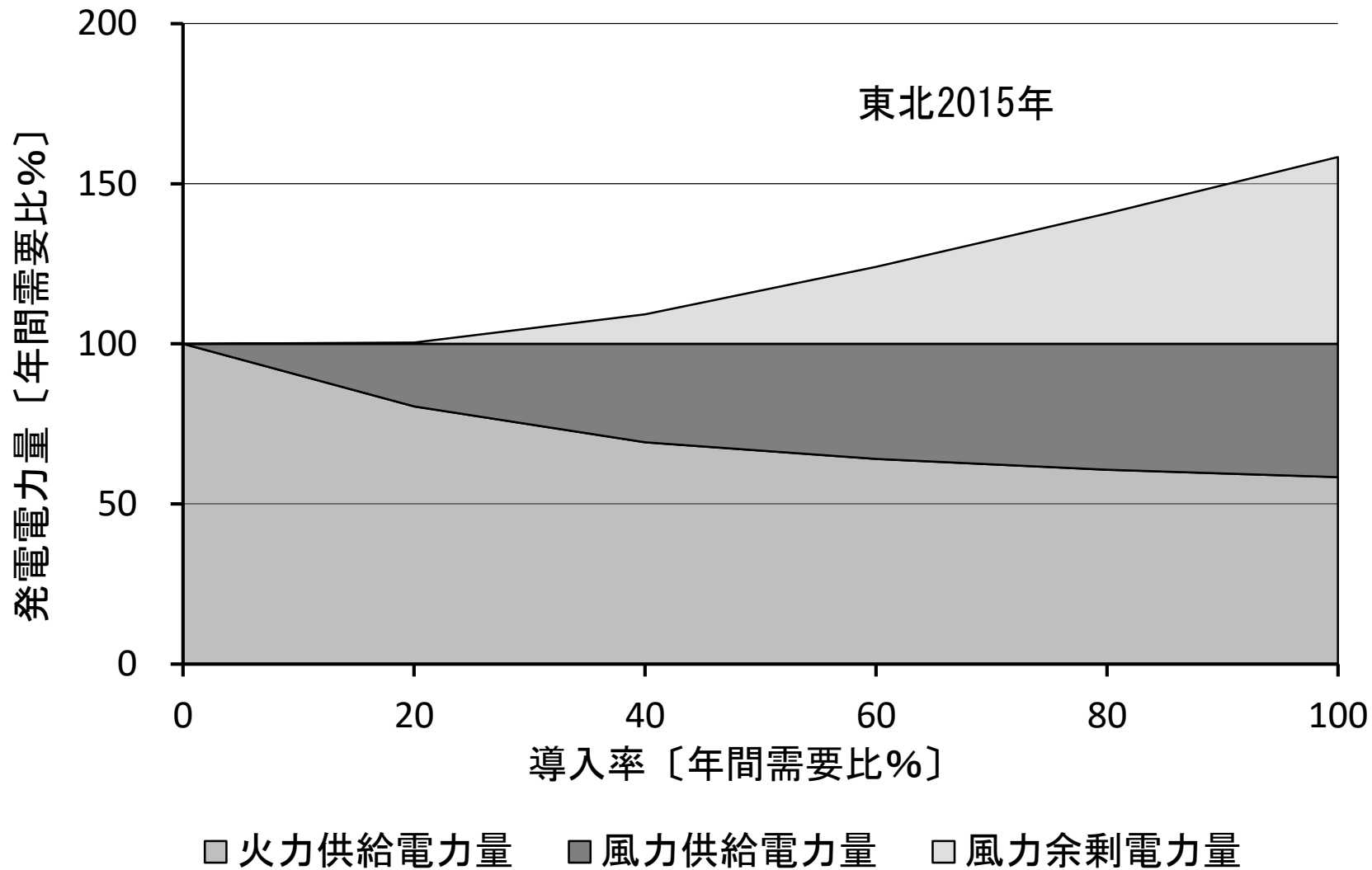
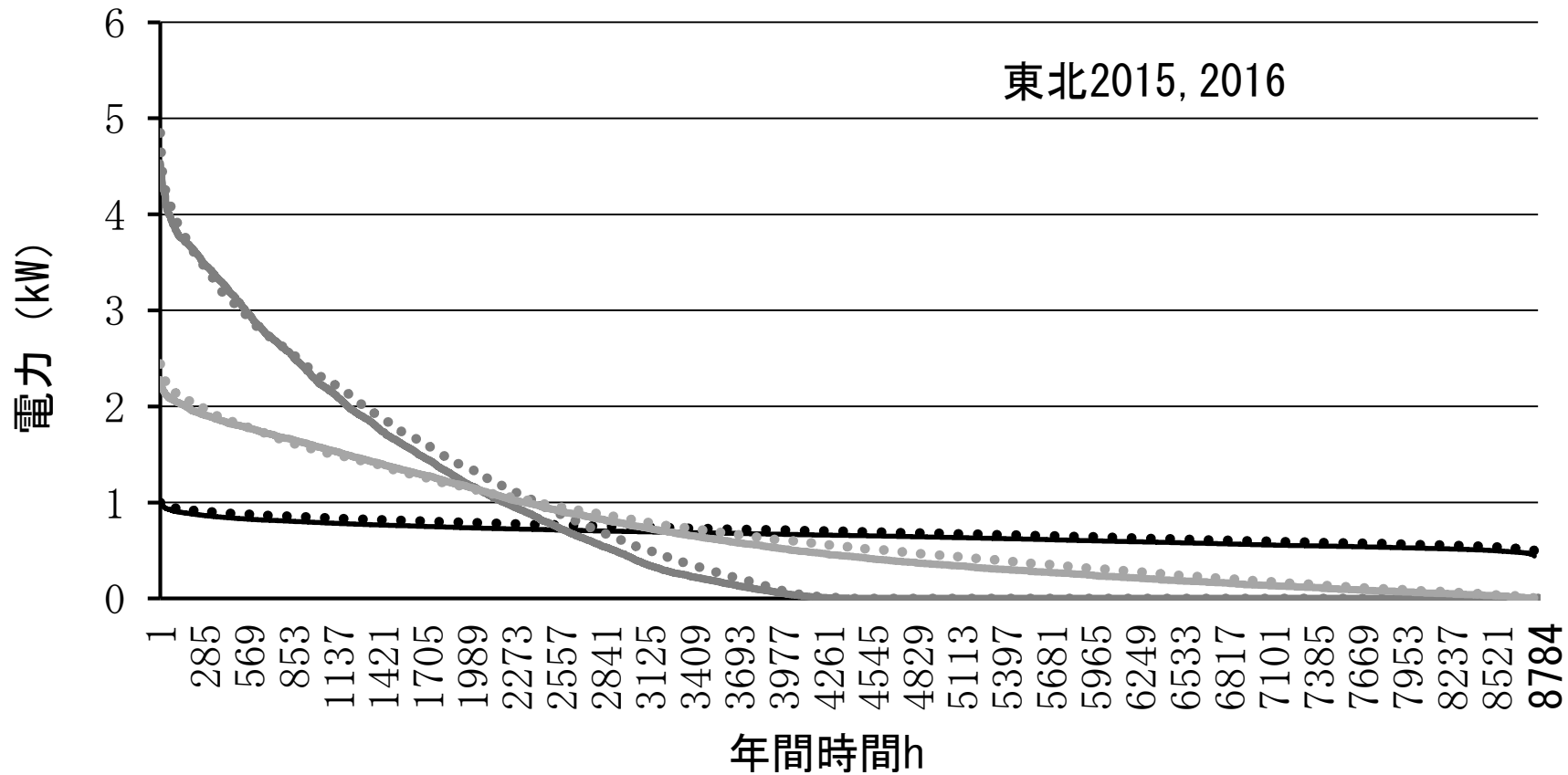


図20 風力発電の導入率と余剰率



- ①2015最大1kW需要
- ③2015太陽100%
- ⑤2015風力100%
- ②2016最大1kW需要
- ④2016太陽100%
- ⑥2016風力100%

図21 需要、太陽光、風力発電持続曲線

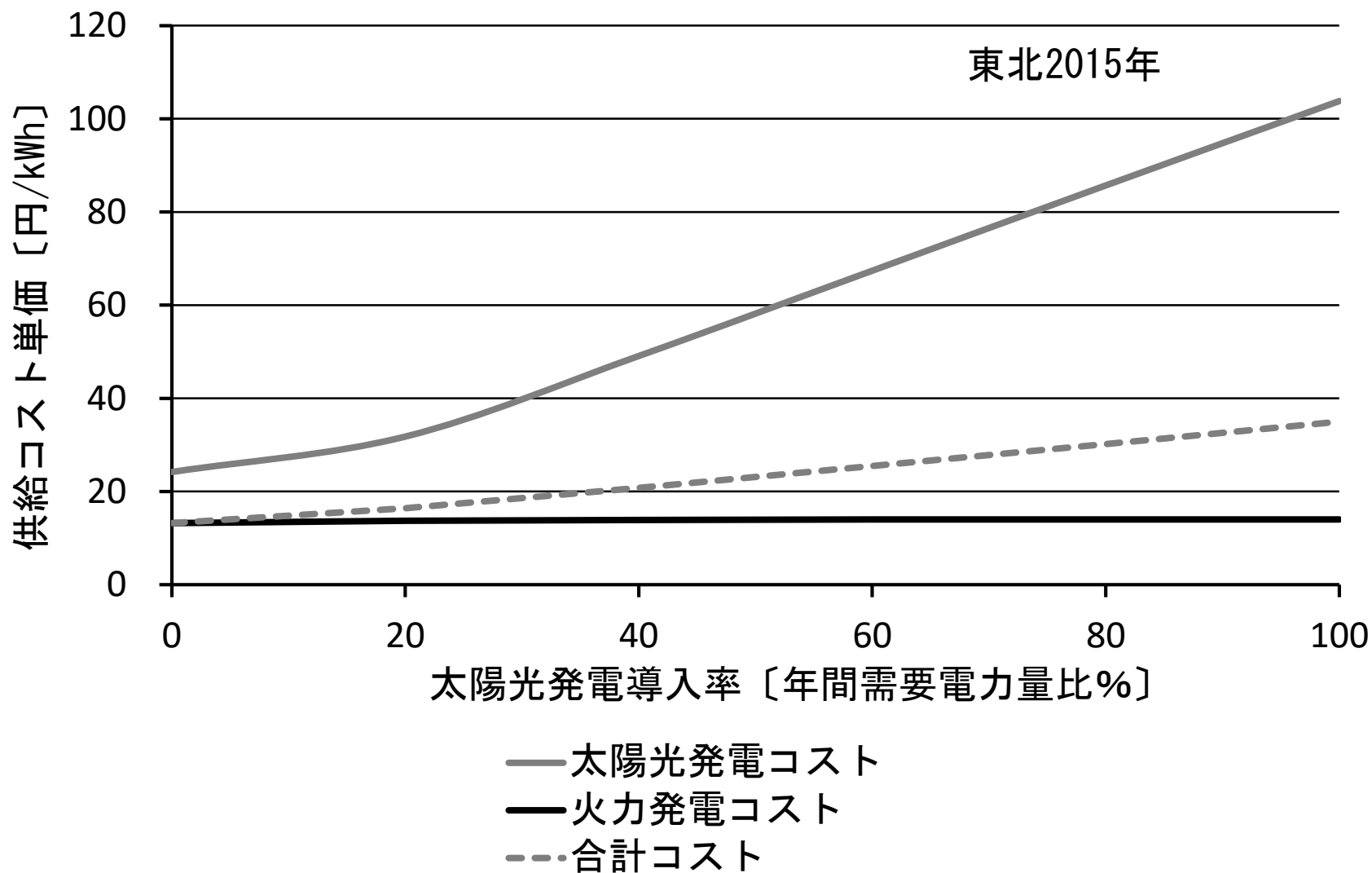


図22 太陽光発電と火力発電の併用供給コスト

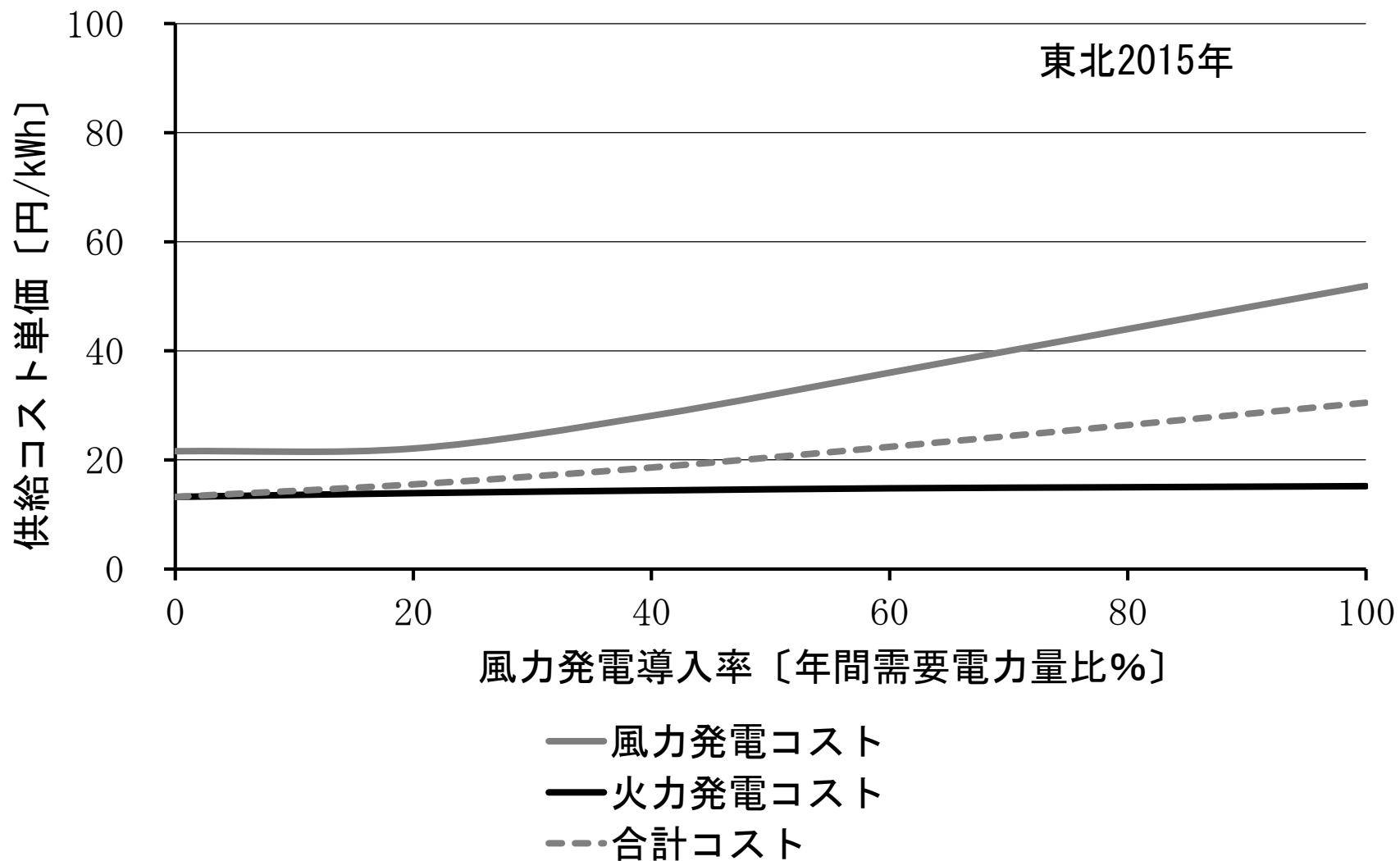
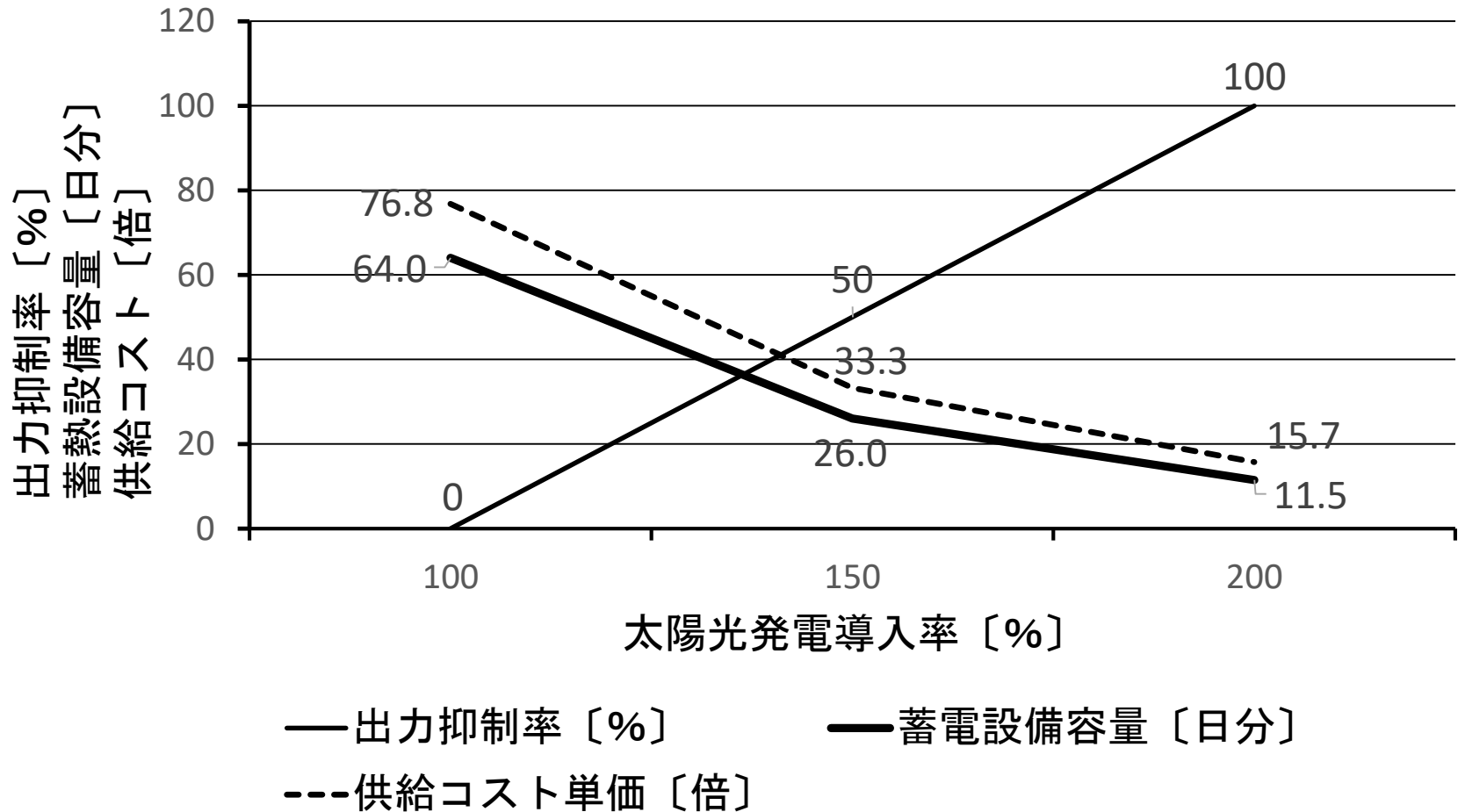


図23 風力発電と火力発電の併用供給コスト

表2 太陽光、風力発電と火力発電併用時の供給コスト

発電方式	太陽光発電		風力発電	
	設備容量	コスト単価	設備容量	コスト単価
太陽光又は風力	4.54kW	4.3 ②	2.28kW	2.4 ②
火力	1.00kW	1.1 ③	1.00kW	1.2 ③
合計	5.54kW	2.7 ③	3.28kW	2.3 ③
太陽光または風力単独	1.00kW	24.2円/kWh ④	1.00kW	21.6円/kWh ④
火力単独	1.00kW	13.0円/kWh ⑤	1.00kW	13.0円/kWh ⑤

- ① 最大電力1kWの2015年東北実績需要モデルで、太陽光または風力発電の導入率100%時の供給設備容量、コスト
- ② 太陽光または風力発電単独コスト単価に対する倍数
- ③ 火力発電コスト単価に対する倍数
- ④ 総合エネルギー調査会、発電コスト検証ワーキンググループ報告書（2015）
- ⑤ 設備利用率70%の石炭とガスのモデル火力の平均単価コスト単価④

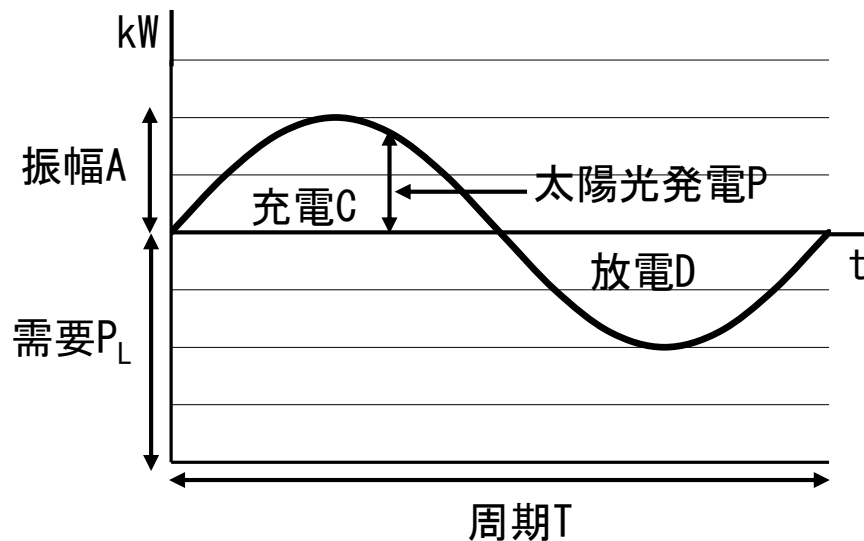


図表1 太陽光発電と蓄電設備併用時の供給コスト
(太陽光発電導入率100~200%の場合)

発電方式とエネルギー貯蔵

1. 需給調整のためのエネルギー貯蔵方式

発電方式	エネルギー貯蔵
水力	貯水池
火力、原子力	燃料
太陽光、風力	蓄電池、水素



図X 太陽光発電の充放電モデル

2. 太陽光、風力発電の蓄電容量

	日間変動	年間変動
振幅A	P_L の数倍以下	P_L の数倍以下
周期T	1日	1年
貯蔵容量 AT/π	C_D	C_D の数100倍

$$P = A \sin(2\pi / T) t$$

$$C = \int_0^{T/2} P dt = AT / \pi$$

6. まとめ

(1) 太陽光または風力発電と蓄電設備の併用供給の場合

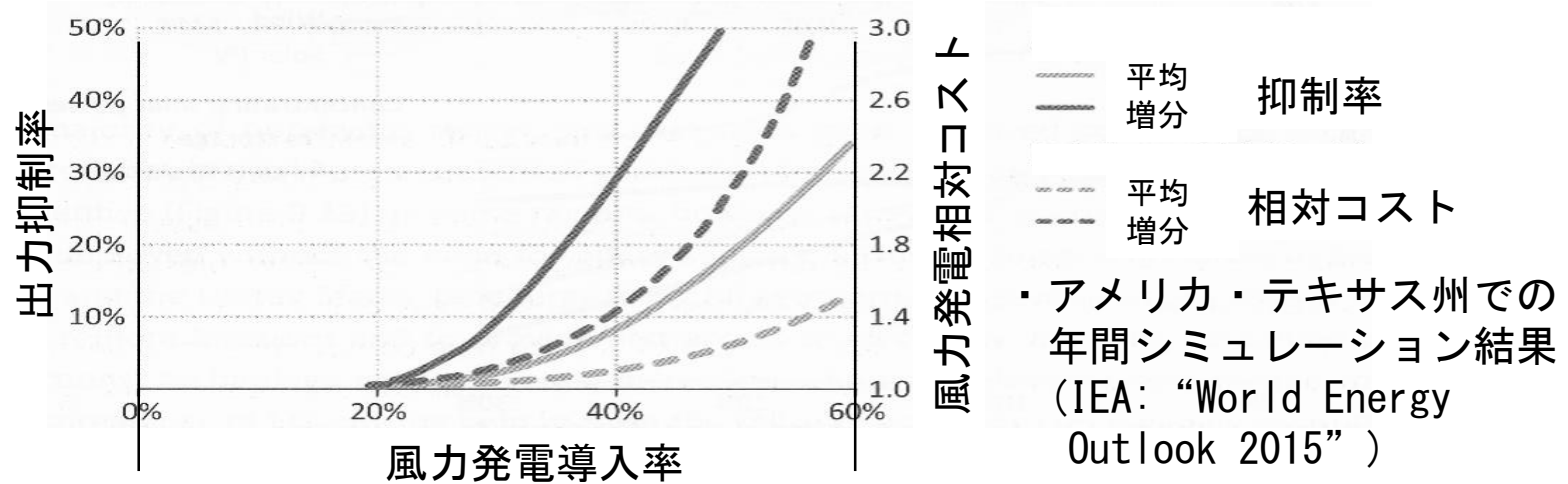
- ・ 蓄電設備必要量：太陽光発電は年間電力需要の10～20%（37～73日分）
風力発電は同上の 5～15%（18～55日分）
- ・ 供給コスト単価：発電単独コスト単価の 数10倍

(2) 太陽光または風力発電と火力発電の併用供給の場合

- ・ 太陽光または風力発電の導入率が20%程度以上になると余剰電力が発生
- ・ 導入率100%時の供給コスト単価は、発電単独コスト単価に比べて、
太陽光発電では 4倍以上
風力発電では 2倍以上

7. 関連資料

(1) 風力発電の増加に伴う出力抑制とコスト



- ・ 風力発電導入率：年間の発電電力量に占める風力発電電力量の比率
- ・ 出力抑制率：風力発電の発電可能電力量に占める抑制電力量の比率
- ・ 風力発電相対コスト：出力抑制のない時の風力発電コスト単価に対する倍率

*太陽光、風力発電のような変動再生可能電力（VG）が増加すると、他の電源で出力変動分を吸収できなくなり、VGの出力を抑制せざるを得なくなり、その分VGのコスト単価が増加する。この例では、風力発電の導入率が30%程度を越えると抑制率、相対コストが急増し、特に増分抑制率、増分コスト単価の増加が激しい。

*VGの抑制を減らすには、エネルギー貯蔵やロードシフトが効果的だが、VGと電力需要の季節的ミスマッチによる余剰電力の抑制を減らすには、1日を超えた長期の電力貯蔵なしでは、通常の貯蔵技術では難しいと見ている。

(2) 太陽光、風力発電のエネルギー貯蔵技術開発

a. 欧州の電力貯蔵技術⁽¹⁾

- ・ 太陽光、風力発電などの再生可能エネルギーで全電力需要に供給する場合、年間電力需要の数～20%程度の電力貯蔵が必要とされている。
- ・ 従来の蓄電池や揚水発電の放電時間は数時間以内であり、太陽光や風力のように、日、週、月単位の変動に対する長時間放電には、水素貯蔵、再生メタンなどによるエネルギー貯蔵が有望とみられて研究が進められている。

b. 再生可能エネルギーキャリアーの基盤技術⁽²⁾

- ・ 太陽光、風力は、数時間以内の短時間変動に加えて、数日～季節ごとの長周期変動が顕著であり、昼夜間平準化以上の長い時間スケールの平準化が必要である。
- ・ このために、再生可能エネルギーを大量に利用する社会を実現するためには、エネルギーの輸送、貯蔵後の必要な時に、電力、動力、熱に変換して利用する社会システムが必要である。

c. Power to Gasに関する取り組み状況⁽³⁾

- ・ 風力発電、太陽光発電などの再生可能エネルギーの余分な電力を活用して、エネルギーを貯蔵利用するために、水の電気分解による水素、メタンなどの製造技術について、諸外国、日本で研究が進められている。

(1) 日本産業機械工業会：「欧州の電力貯蔵技術」(2011)

(2) 科学技術振興機構、研究開発戦略センター：「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアーの基礎研究」(2011)

(3) NEDO：「Power to Gasに関する取り組み状況」(2016)

(3) 第5次エネルギー基本計画における再生可能エネルギーの取り組み

- a. 経済的に自立し脱炭素化した主力電源化を目指す。
 - ・ このために、再エネの国際水準並み価格引き下げ、既設送電網の最大限の活用、開放徹底、蓄電池・水素蓄電システムの開発、デジタル技術開発（総合需給調整）などを進めることとしている。

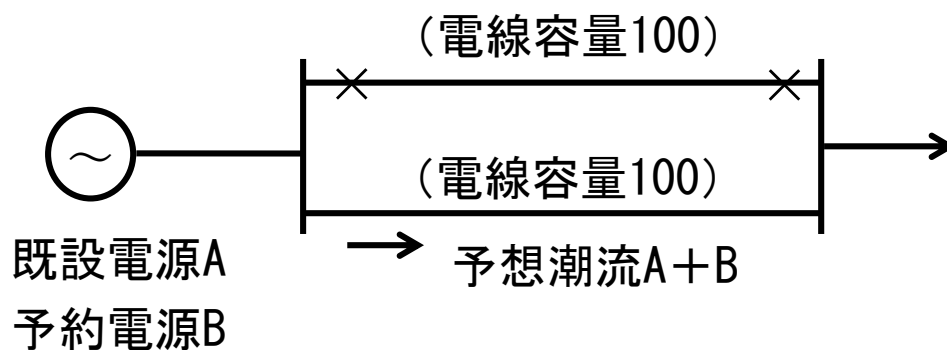
- b. 電力貯蔵の所要容量
 - ・ 太陽光、風力発電のような天候次第の変動電源を、大量に導入して自立電源化を目指すためには、年間で最も気象条件が悪い期間にも電力供給を確保するために、全国需要数日分の蓄電池または水素貯蔵が必要とされている。
 - ・ しかし、太陽光、風力発電の季節的な長期間変動に対しては、(2) a. の海外の文献でも本論文と同様、年間電力需要の数10日分（数～20%）の電力貯蔵が必要と試算されており、さらに検討が必要と考えられる。

- c. 系統制約の克服
 - ・ 再生可能エネルギーの大量導入に伴う送電系統の制約を克服するために、既存系統を最大限活用し、一定の条件で系統への接続を認める「日本版コネクト&マネージ」の仕組みを具体化していく。

・送電線の空容量、利用率の算定方法

2回線送電線の空容量は、

- ①既設電源出力が最大Aで
- ②2回線送電線の1回線事故時に
- ③接続予約電源が最大B発電しても空いている容量。



① 予想潮流 $A+B=100$ の時 :

空容量 = 1回線電線容量100 - 予想潮流100 = 0

利用率 = (予想潮流100 / 1回線電線容量100) × 100

= 100%

② 予想潮流 $A+B=60$ の時 :

空容量 = 100 - 60 = 40

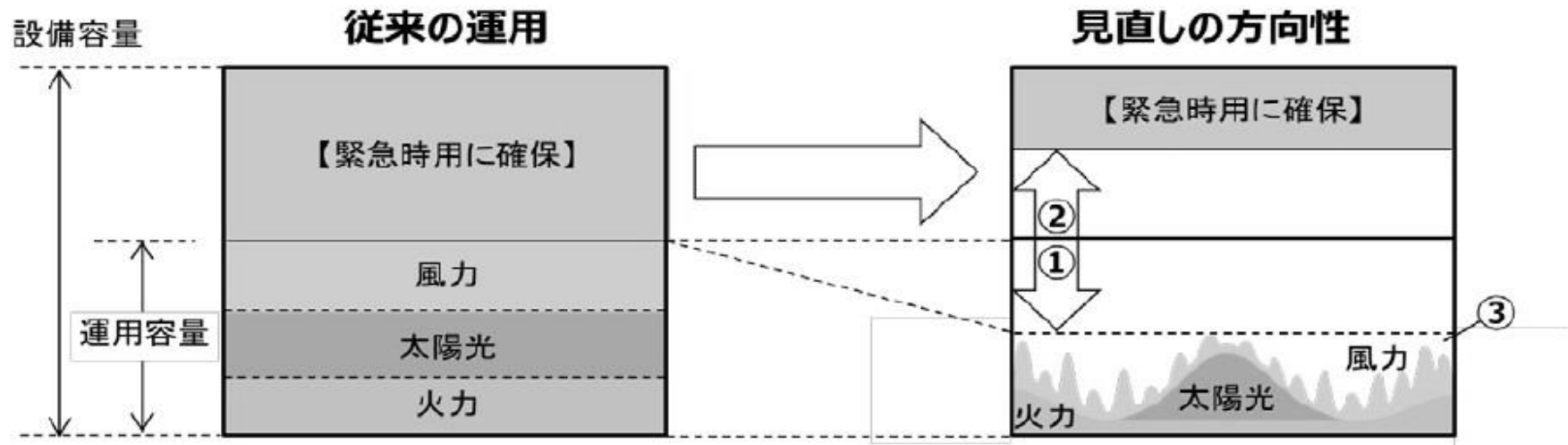
利用率 = (60 / 100) × 100

= 60%

日本版コネクト&マネージ

- 既存システムの最大限の活用のため、従来の運用を見直し、①～③の領域を活用。
- 詳細ルールを検討の上、順次運用に反映。

	従来の運用	見直しの方向性
①空容量の算定	全電源フル稼働	実態に近い想定 (火力はメリットオーダー、再エネは最大実績相当)
②緊急時用の枠	半分程度を確保	事故時に瞬時遮断する装置の設置により、枠を開放
③出力制御前提の接続	通常は想定せず	混雑時の出力制御を前提とした、新規接続を許容



総合エネ調・再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会資料
(2018年5月)

(4) 変動再生可能エネルギーに起因する電力システム上の課題

区分		課題	概要
平常時	全系	需給バランス	VREの増加に伴って電力システム全体の需給バランスが崩れる。蓄電設備又は火力発電等との併用は大幅コスト増加となる。
	ローカル	線路過負荷	ローカルの需給バランスが崩れ、送配電線に過負荷が生じ、線路増強が必要となる。
		電圧変動	VREの増加により電圧変動が増加し電圧変動対策が必要となる。
事故時	全系	過渡安定度	太陽光発電（静止型電源で慣性がない）の大量導入に伴って、電力システムの同期化力が低下し、電力系統事故時の電力系統の安定性が低下する恐れがある。
	ローカル	単独運転	送配電線事故時にVRE電源を持った小系統が本系統から切り離されて単独となり、電圧、周波数の大幅変動によって不安定となる恐れがある。

VRE：太陽光、風力発電のような変動再生可能エネルギー